Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT FLUVIAL CAMARGUE INSULAIRE

CHAPITRE N°0 : RESUME NON TECHNIQUE

SOMMAIRE

1 Objet de l'étude 3
2 Le Delta du RhÔne 4
3 Le Symadrem 6
4 système d'endiguement et zone protégée 8
5 Fonctionnement du système d'endiguement 45
6 Niveaux de protection au sein de la zone protégée 50
7 Fonctionnement du système en fonction des crues 54
7.1 Définition des niveaux caractéristiques 54
7.2 Scénario n°1 : fonctionnement du système jusqu'à l'atteinte du niveau de protection 56
7.3 Scénario n°2 : Défaillance d'un batardeau ou d'une vanne 60
7.4 Scénario n° 3 : Brèche probable dans le système d'endiguement 63
7.5 Scénario n°4 : fonctionnement probable pour la crue de référence 77

1 OBJET DE L'ETUDE

L'étude de dangers est réalisée dans le cadre d'une autorisation initiale sans travaux du système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire ».
Elle entre dans le cadre du décret n°2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques dit « décret digues » pris en application de l'article modifié L 562-8-1 du Code de l'Environnement. Ce décret stipule que les systèmes d'endiguement de classe A et B doivent faire l'objet d'une demande de ré-autorisation au titre des articles L.214-1 à L.214-6 du Code de l'Environnement, avant le 31 décembre 2019. A défaut, à compter du 1er janvier 2021, les ouvrages ne seront plus constitutifs d'une digue et l'autorisation dont bénéficiaient ces ouvrages sera réputée caduque. L'étude de dangers est conforme à l'arrêté du 7 avril 2017.

2 LE DELTA DU RHONE

Les systèmes d'endiguement et les zones protégées associées à ces derniers, identifiés aujourd'hui dans le Delta du Rhône sont les suivants :

- Système d'endiguement fluvial de la Rive Gauche du Rhône et du Grand Rhône ;
- Système d'endiguement fluvial de la Rive Droite du Rhône et du Petit Rhône ;
- Système d'endiguement fluvial de la Camargue Insulaire (Grand Rhône Rive Droite et Petit Rhône Rive Gauche) ;
- Système d'endiguement maritime de la Camargue Insulaire reliant les embouchures respectives avec la mer du Petit Rhône et du Grand Rhône ;
- Système d'endiguement fluvial du quartier des Marguilliers à Beaucaire.

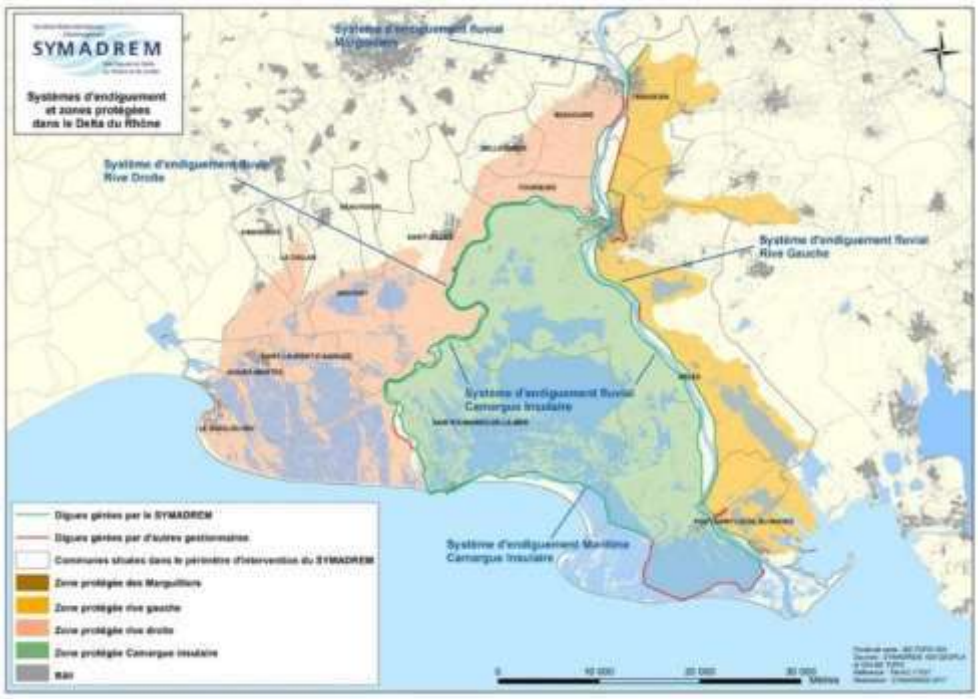


Figure 1. Systèmes d'endiguement dans le Delta du Rhône

Les zones protégées par ces systèmes d'endiguement sont :

- La « Rive droite » du Rhône et Petit Rhône correspondant à la zone inondée en novembre 1840 et couvrant 11 communes du Gard. Les trois unités de cette zone sont la plaine de Beaucaire, la Camargue Gardoise et la Camargue Saintoise. La population protégée (hors période estivale) est estimée à 45 000 personnes ;
- La « Rive Gauche » du Rhône et du Grand Rhône. Elle comprend les centres urbains de Tarascon, d'Arles et de Port-Saint-Louis-du-Rhône et de Mas Thibert, les plaines de Tarascon, et du Trébon, les anciens marais d'Arles et marais de la Vallée des Baux et de Meyranne et le Plan du Bourg. La population protégée (hors période estivale) est estimée à 55 000 personnes. La zone protégée par le système d'endiguement couvre le territoire de 15 communes ;
- La « Camargue Insulaire » ceinturée par le Petit Rhône Rive Gauche ; le Grand Rhône Rive Droite et la digue à la Me comprenant les centres urbains des Saintes-Maries-de-

la-Mer, et les villages de la commune d'Arles (Saliers, Sambuc, Salin-de-Giraud, Albaron...). La population protégée (hors période estivale) est estimée à 15 000 personnes

Cette population d'environ 115 000 personnes peut doubler, voire tripler en période estivale, principalement dans les communes du Grau-du-Roi, Aigues-Mortes, Arles et les Saintes-Maries-de-la-Mer

Les systèmes ont été créés après les grandes crues de 1840 et 1856 en lieu et place d'autres ouvrages encore plus anciens, dont certains remontent au XII^{ème} siècle. Du fait de leur mode de réalisation (compactage avec des dames de 15 kg, non prise en compte de la teneur en eau à l'optimum découverte en 1933 par Ralph Proctor) et de l'effet mille-feuilles dû aux phases successives de rehaussement, les digues du Rhône sont fortement exposées au risque de brèche par érosion interne (comprendre infiltrations). La probabilité de brèche devient significative dès les premières sollicitations du fleuve et croît sensiblement avec le débit et la durée de la crue.

Les crues de 1993, 1994, 2002, 2003 et 2016 ont montré que les digues du Delta du Rhône pouvaient céder bien avant que l'eau n'atteigne la crête les digues.

3 LE SYMADREM

Le SYMADREM est responsable de l'exploitation de la majeure partie de ces ouvrages, à savoir : environ 210 km digues fluviales (dont 5,5 km d'ouvrages maçonnés) et 25 km de digue à la mer.

La gestion des autres ouvrages est partagée par :

- SNCF Réseau, qui gère le remblai ferroviaire entre Tarascon et Arles sur un linéaire d'environ 10 km ;
- La Compagnie Nationale du Rhône (CNR), qui gère les Sites-Industrialo-portuaires de Beaucaire, Tarascon et Arles (linéaire total d'environ 7 km) et quelques digues de raccordement à ses remblais et l'écluse de Barcarin ;
- Voies Navigables de France (VNF) qui gère les écluses de Beaucaire, d'Arles et de Saint Gilles.
- La Compagnie des Salins du Midi et le Conservatoire du Littoral, qui gère la digue à mer depuis le Rhône vif jusqu'à son raccordement à l'est avec la digue du Grand Rhône rive droite, sur une longueur d'environ 25 km.
- Le Conseil Départemental des Bouches-du-Rhône, qui gère 3 tronçons routiers : la RD35 en rive gauche du Grand Rhône, le RD36d sur le Grand Rhône rive droite, le RD85 en rive droite du Petit Rhône.

Des accords ont été passés (SNCF et CNR) ou vont être passés (Salins du Midi, CD13) pour qu'au fur à mesure des travaux, le SYMADREM devienne progressivement le gestionnaire unique des systèmes d'endiguement.

Le SYMADREM regroupe depuis le 1er janvier 2018 :

- la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur,
- la Région Occitanie,
- le Département des Bouches-du-Rhône,
- le Département du Gard,
- la Métropole Aix Marseille Provence (AMP),
- la Communauté d'Agglomération Arles Crau Camargue Montagnette (ACCM),
- la Communauté d'Agglomération Nîmes Métropole (NM),
- la Communauté de Communes Terre de Camargue (CCTC),
- la Communauté de Communes de Beaucaire Terre d'Argence (CCBTA),
- la Communauté de Communes de la Petite Camargue (CCPC).

Le SYMADREM dispose, par arrêté du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement du 24 janvier 2018 portant agrément d'organismes intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques de : l'agrément n°62-c « Digues et Petits Barrages – Etudes et diagnostics » et de l'agrément n°62-d « Digues et Petits Barrages – Etudes, diagnostics et suivi de travaux » jusqu'au 30 décembre 2021.

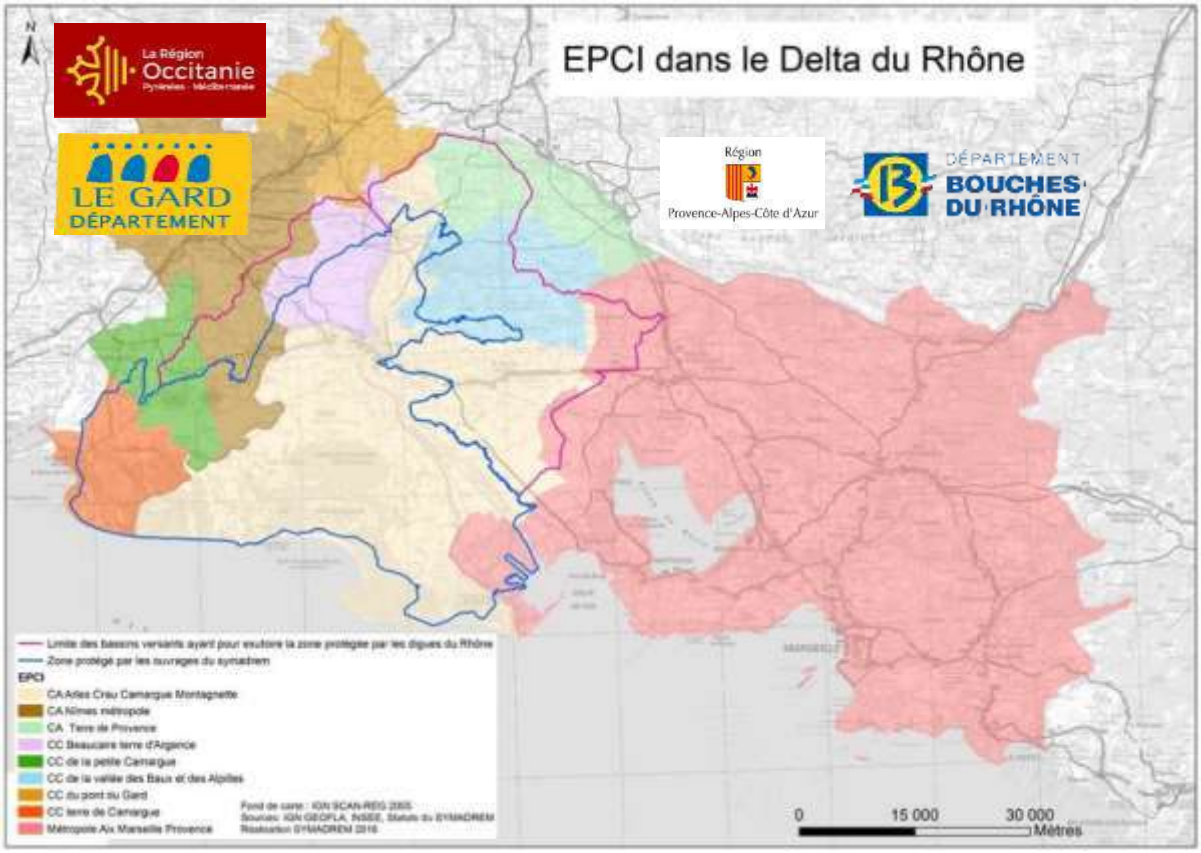


Figure 2. Le Symadrem et ses membres

4 SYSTEME D'ENDIGUEMENT ET ZONE PROTEGEE

Le système d'endiguement « Camargue Insulaire » et la zone protégée par ce dernier, figure en page suivante.
Le système comprend des digues de 1er rang et certaines protections de berges en enrochements quand la largeur du ségonnal (ou franc-bord) est inférieure à 20 mètres.

L'objectif du système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » est de protéger les sous-zones protégées par ce système, des crues du Rhône jusqu'aux niveaux de protection affichés ci-après et déterminés dans l'étude de dangers. Conformément à la réglementation, ces niveaux de protection sont déterminés avec une probabilité résiduelle de rupture d'ouvrage, qui ne peut excéder 5 %.

Ce système d'endiguement fluvial est sans efficacité contre les tempêtes marines et l'impluvium local, qui peuvent être également sources d'inondation de la zone protégée.

Les digues constituant le système d'endiguement et la zone protégée par ce système d'endiguement figurent en page suivante.

Compte tenu de la faible altimétrie du terrain naturel, les centres urbains ne disposent pas de zones de repli.

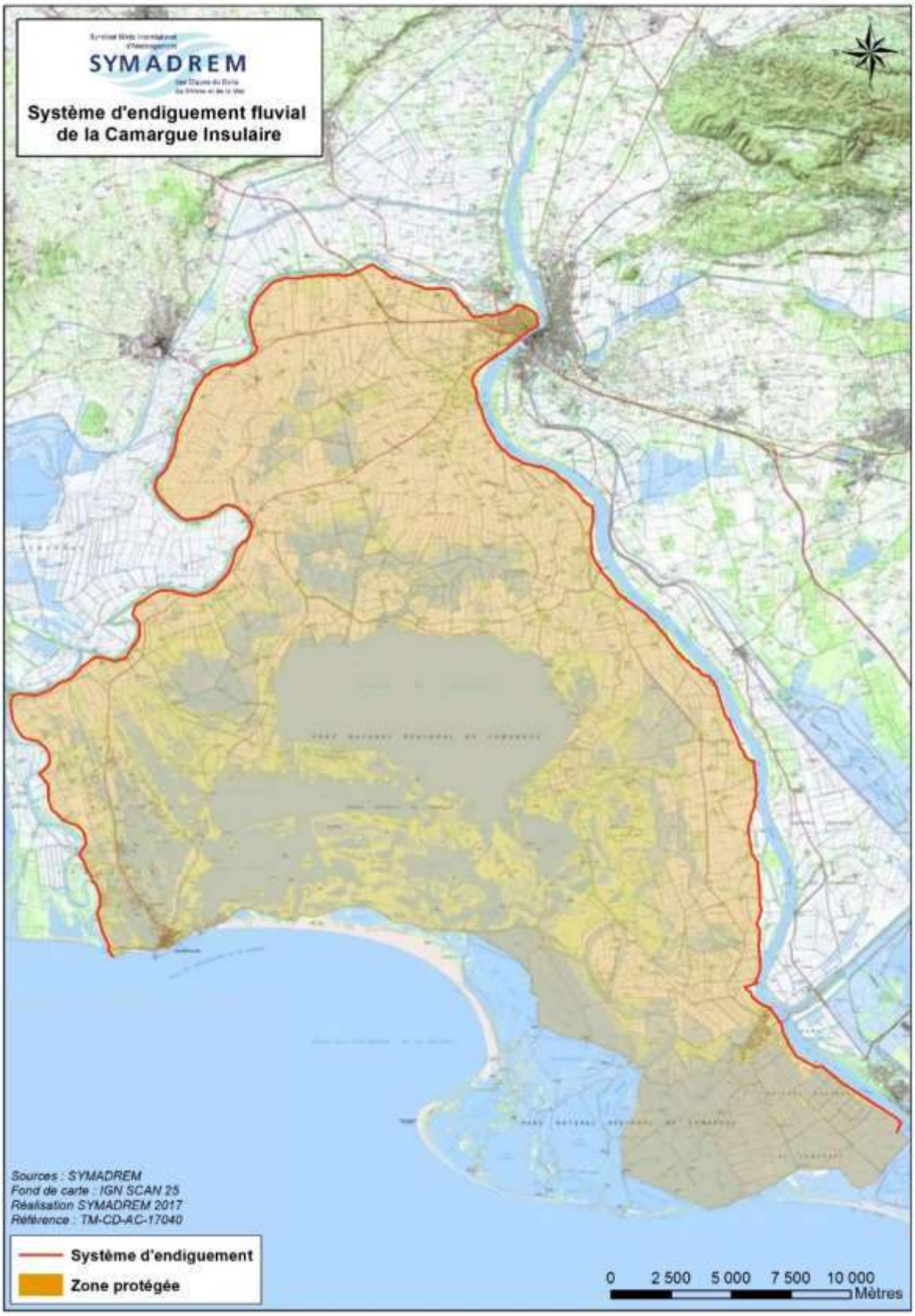


Figure 3. Système d'Endiguement Rive Gauche et Zone Protégée

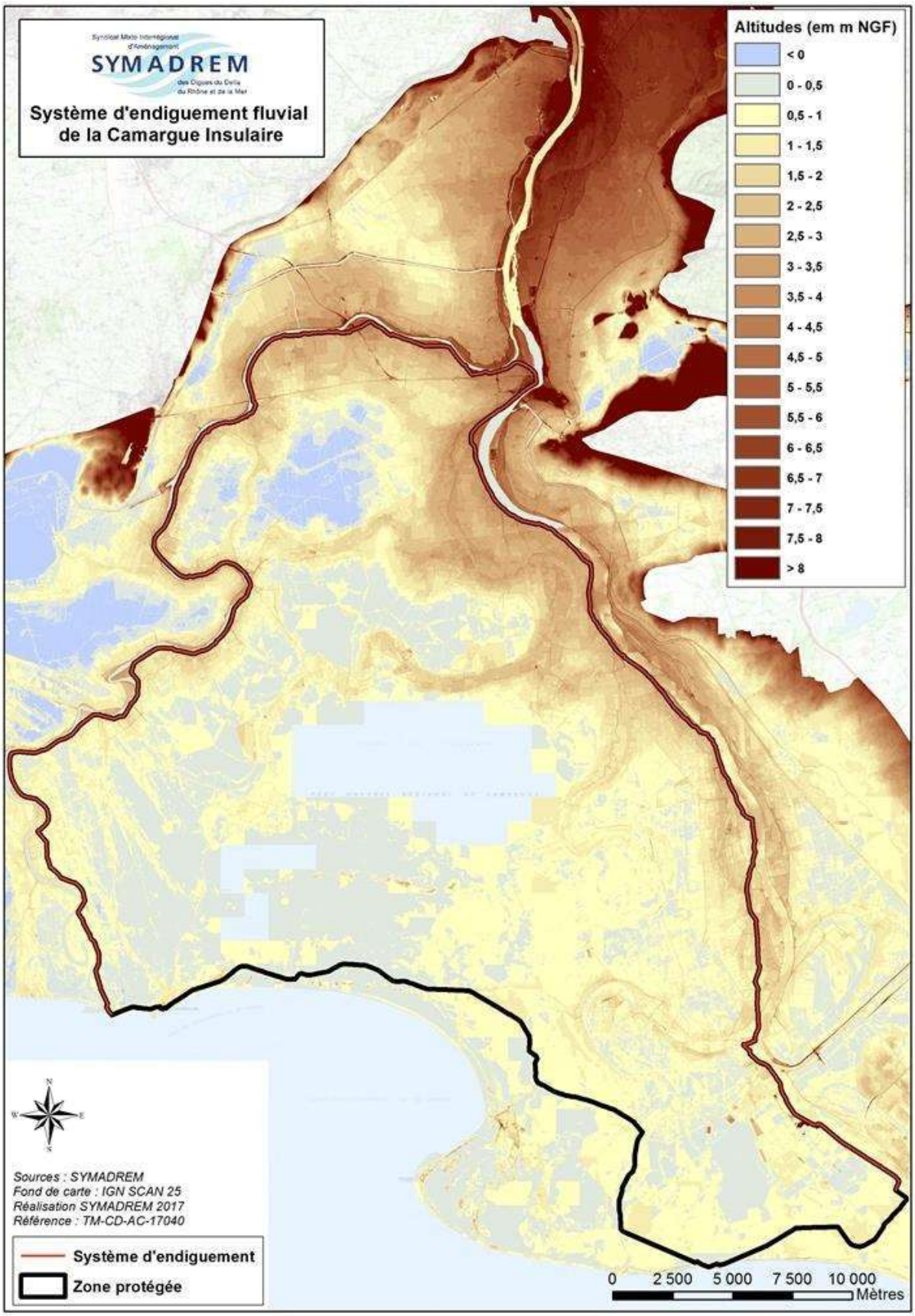


Figure 4. Zone protégée et modèle numérique de terrain

La zone protégée a été découpée en 39 sous-zones protégées considérés comme hydrauliquement homogènes vis-à-vis des inondations du Rhône. Elles ont été délimitées à partir de l'évaluation des probabilités de brèches (bande de sécurité), et des différents scénarios d'inondation. La carte ci-dessous illustre ce découpage.

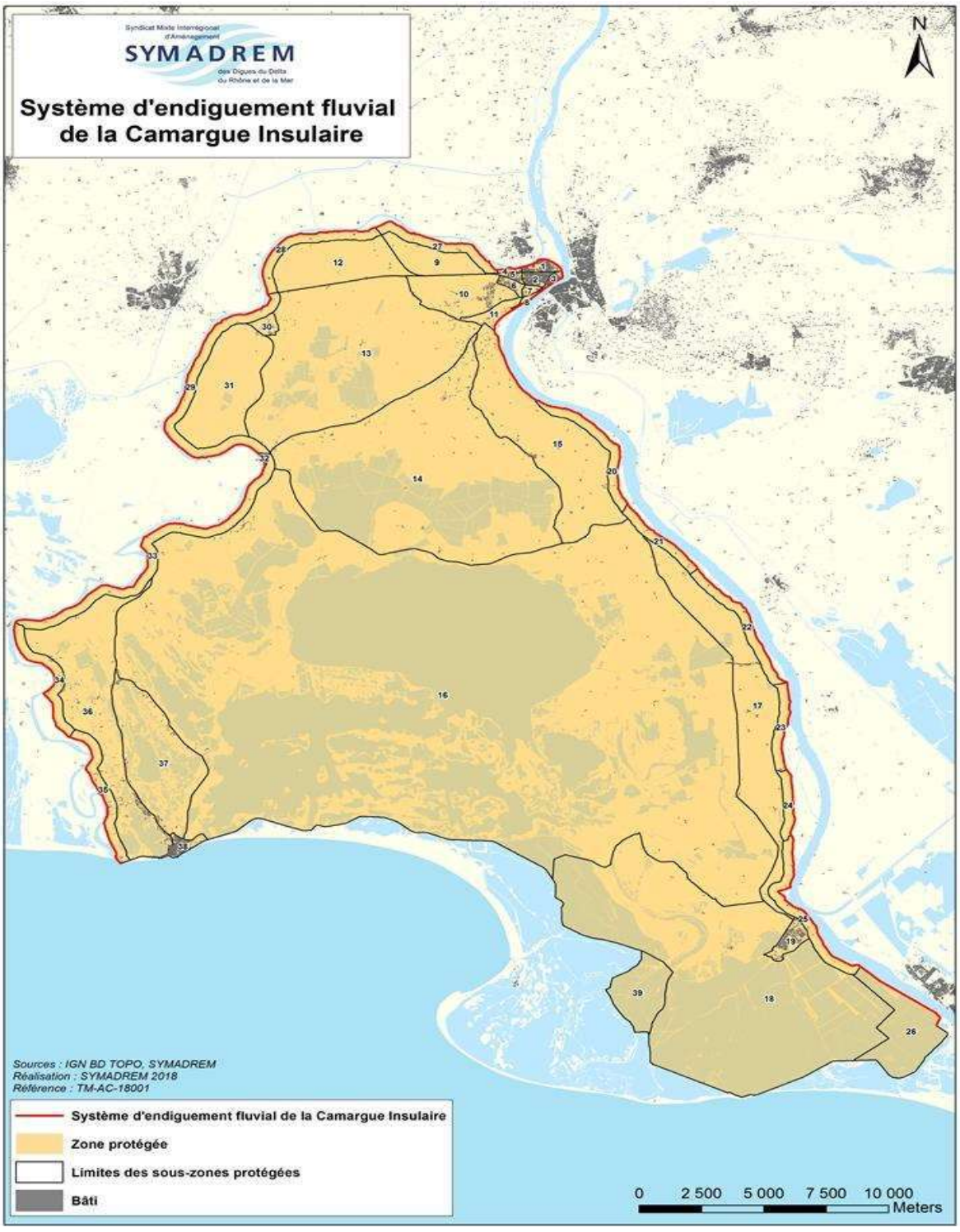


Figure 5. Découpage de la Camargue Insulaire en 39 sous-zones protégées

Les digues de 1er rang du système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » sont illustrées ci-dessous :

PRG1 Trinquetaille

PRG2 Cazeneuve-Augery

PRG3 Bois de Beaumont

PRG4 Beaumont-Cavalès

PRG5 Cavalès-St Gilles

PRG6 St Gilles-Figarès

PRG7 Figarès

PRG8 La Galante-Albaron

PRG9 Albaron

PRG10 Albaron-Eymini

PRG11 Eymini-Sénebier

PRG12 Sénebier

PRG13 Sylvéréal-Mas d'Icard

PRG14 Mas d'Icard-Bac du sauvage

PRG15 Aval du Bac du Sauvage

PRG16 Port Dromar

PRG17 Port de l'Amarée

PRG18 l'Amarée

PRG19 l'Embouchure

D1 Défluent

GRD1 Quais d'Arles

GRD2 Papèteries

GRD3 Emmaüs-Passerons

GRD4 Passerons-Montlong

GRD5 Montlong

GRD6 Montlong - Beaujeu

GRD7 Beaujeu-l'Armelière

GRD8 l'Armelière-la Commanderie

GRD9 la Commanderie-Bois Verdun

GRD10 Bois Verdun - Chartrouse

GRD11 Chartrouse-la Louisiane

GRD12 La Louisiane-l'Esquineau

GRD13 l'Esquineau-la Palissade

Les digues de 1er rang du système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » sont cartographiées ci-dessous :

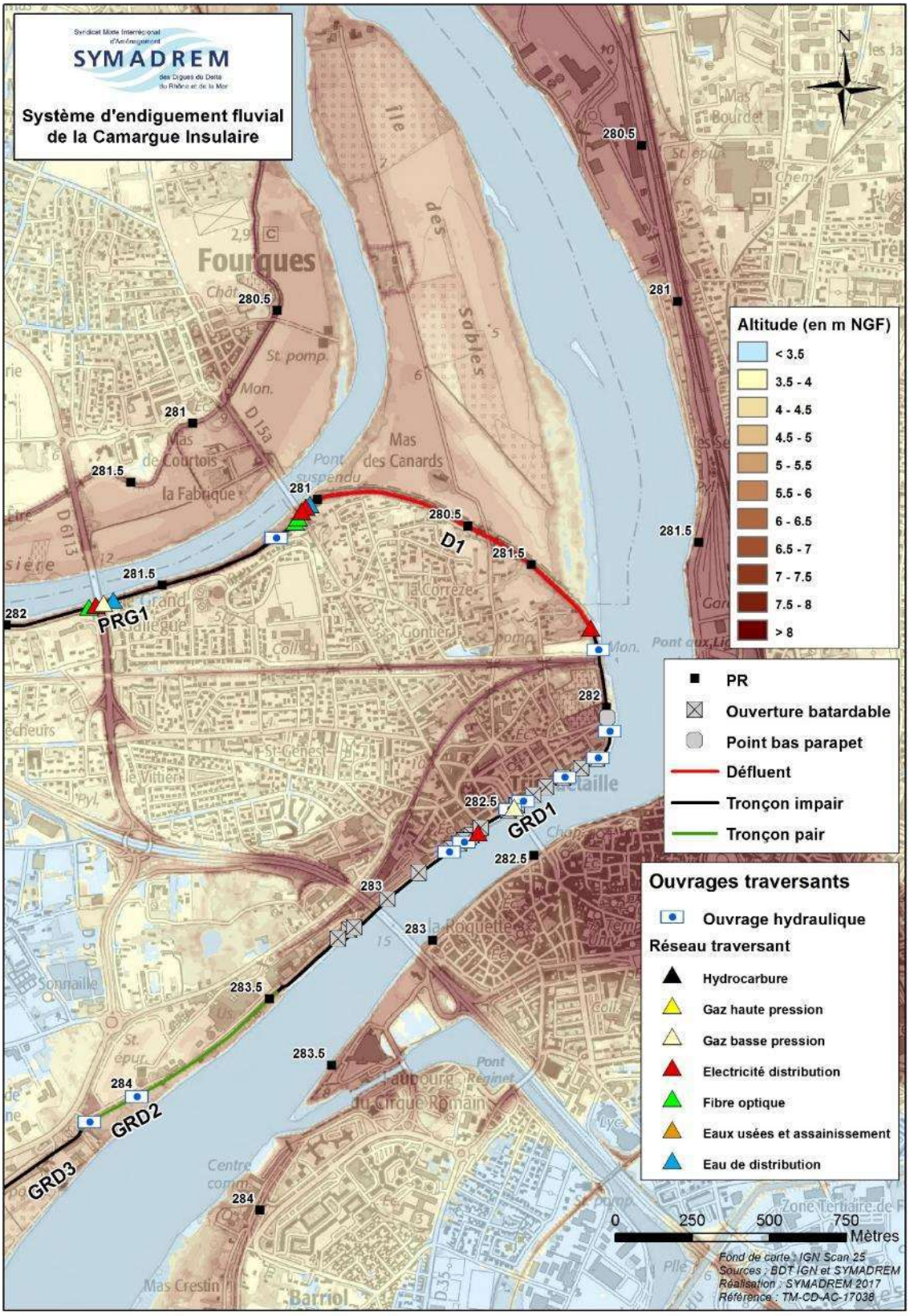


Figure 6. Localisation des tronçons D1, GRD1 et GRD2

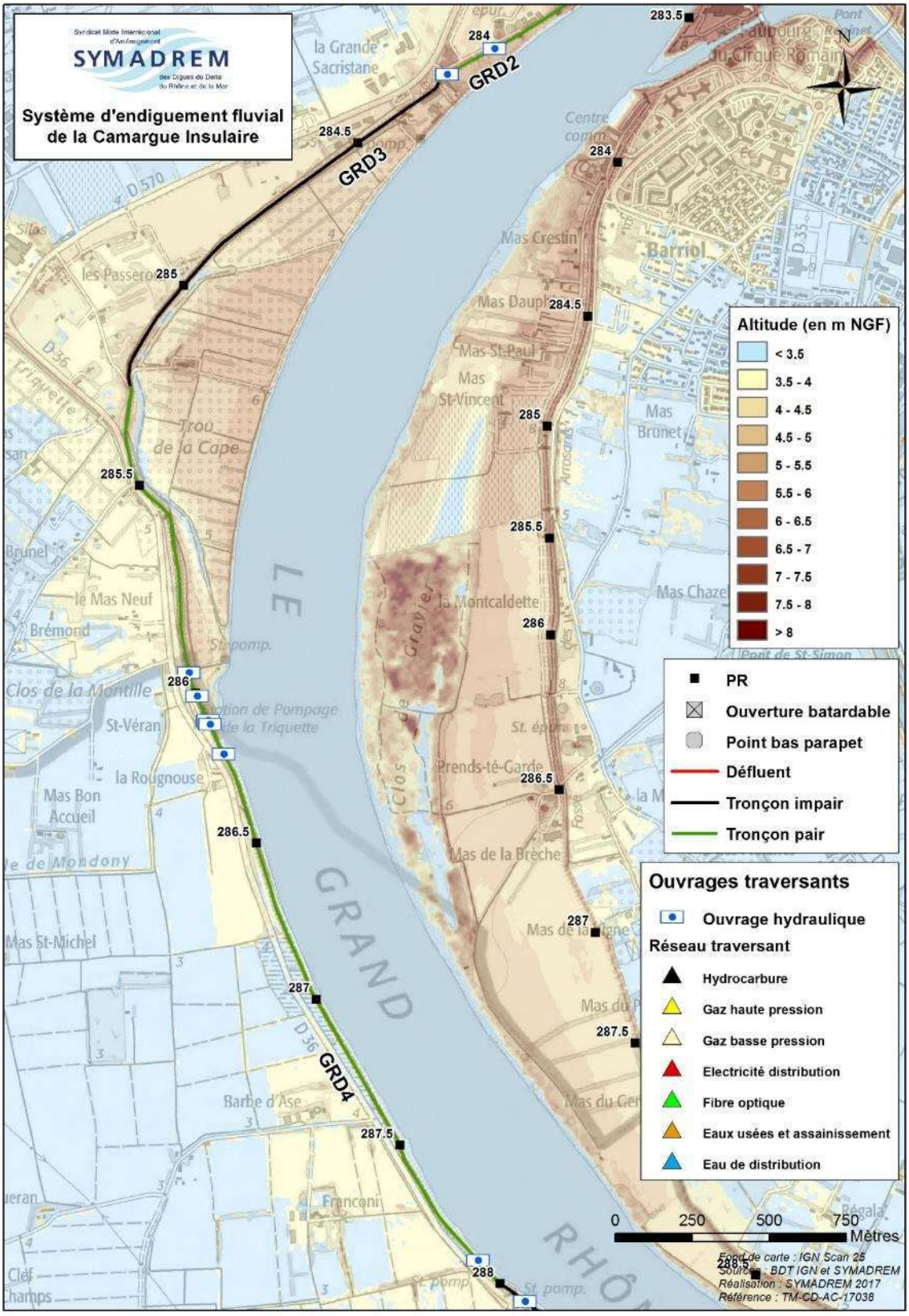


Figure 7. Localisation des tronçons GRD3 et GRD4

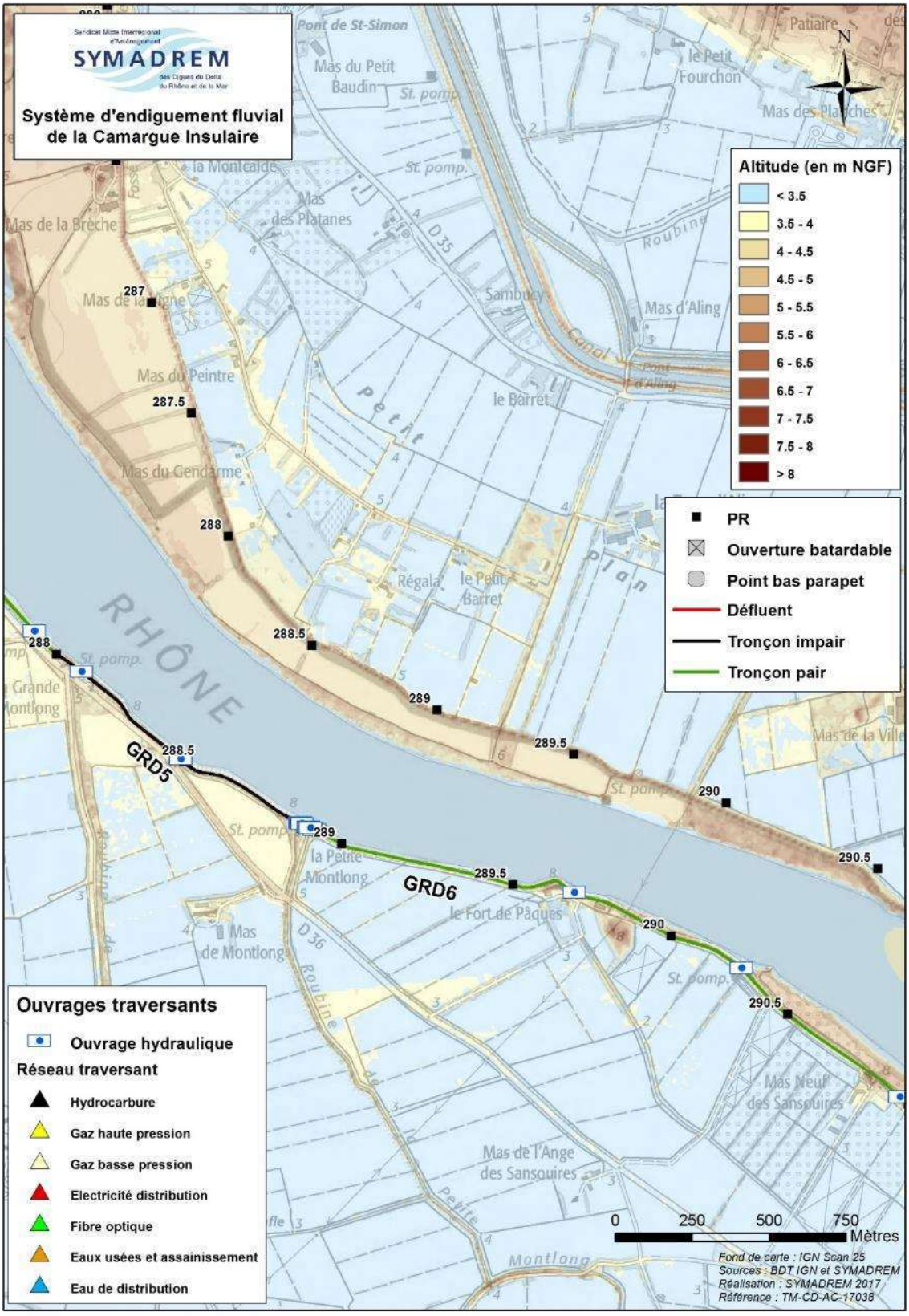


Figure 8. Localisation des tronçons GRD5 et GRD6

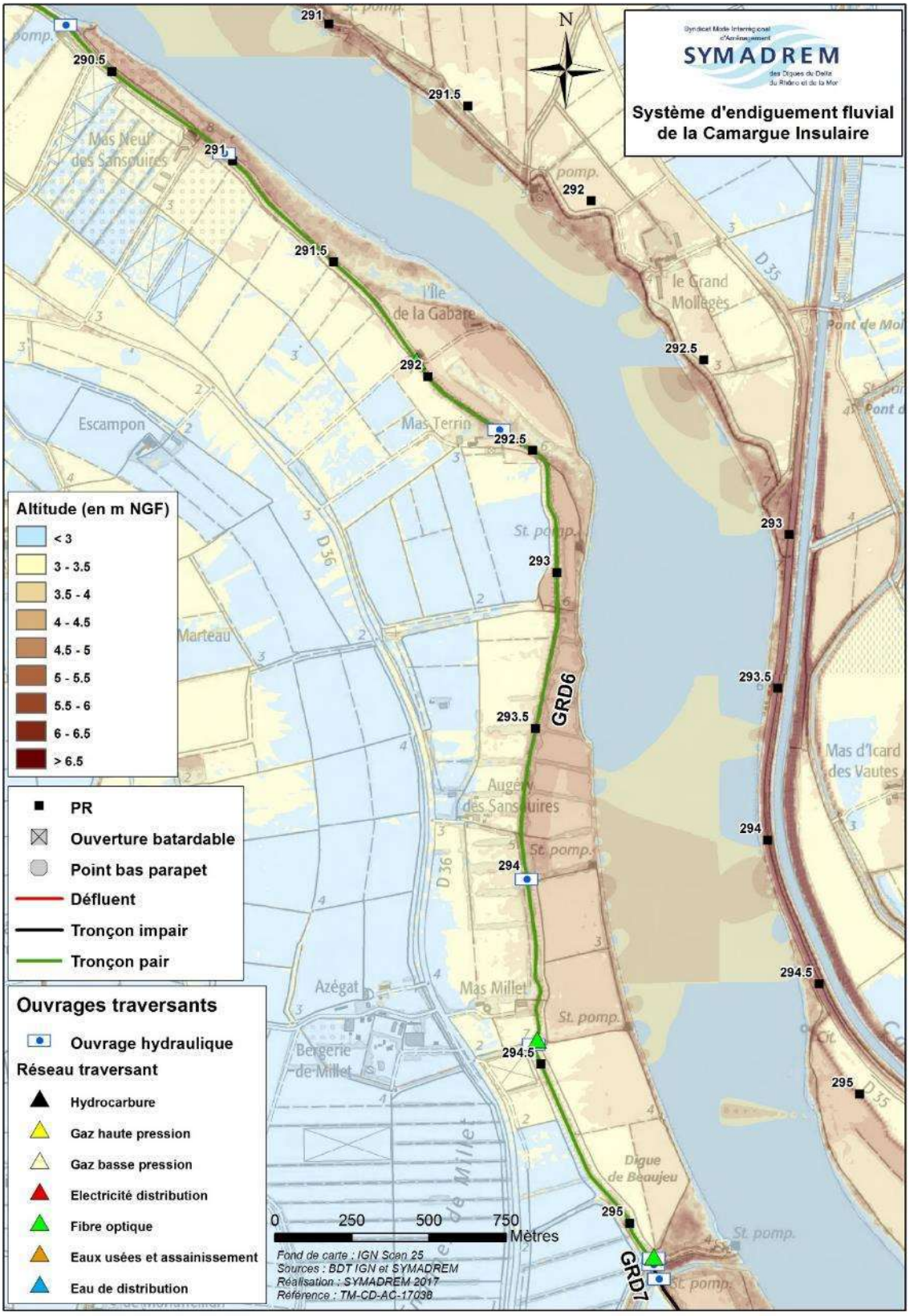


Figure 9. Localisation du tronçon GRD6

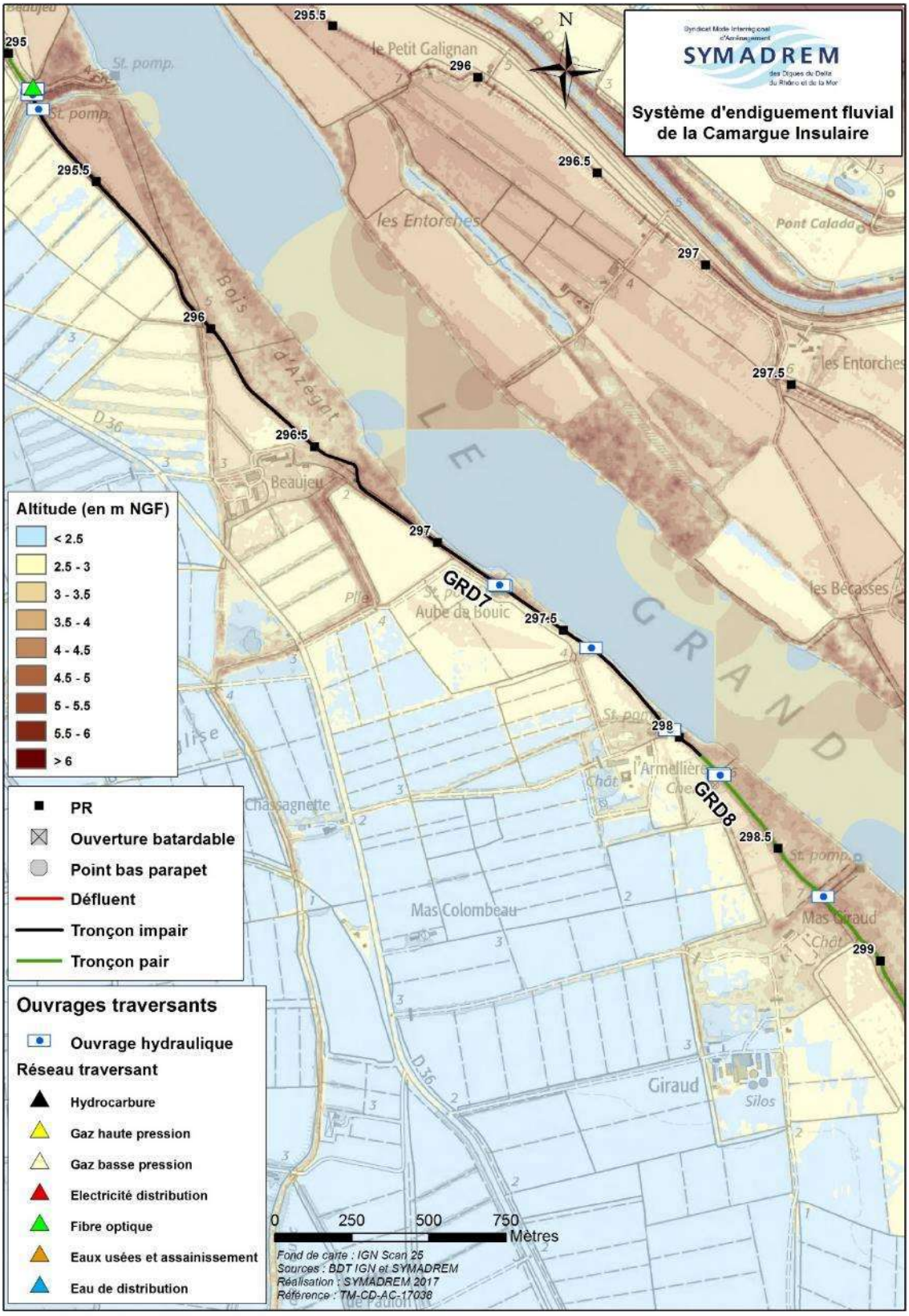


Figure 10. Localisation du tronçon GRD7

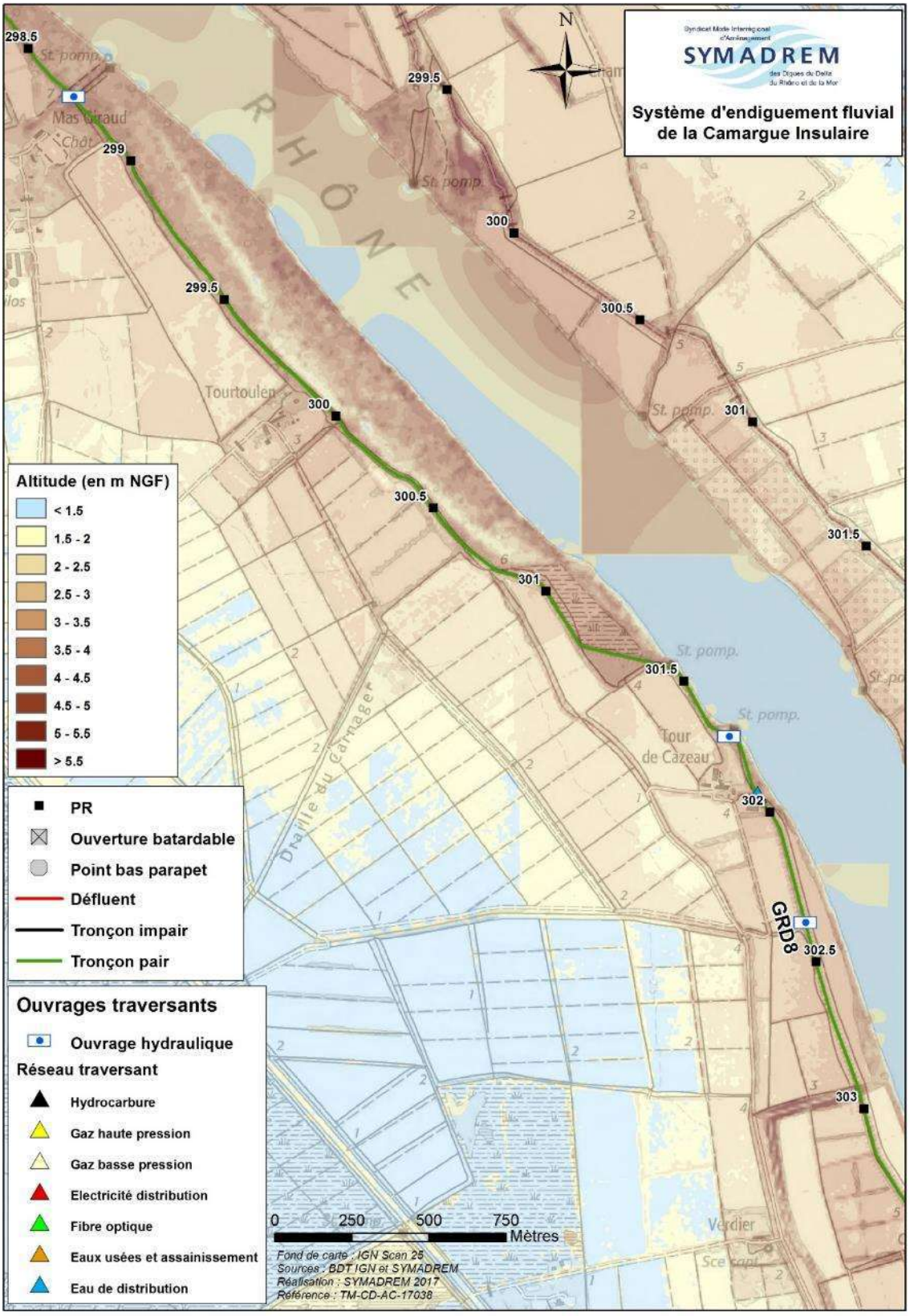


Figure 11. Localisation du tronçon GRD8

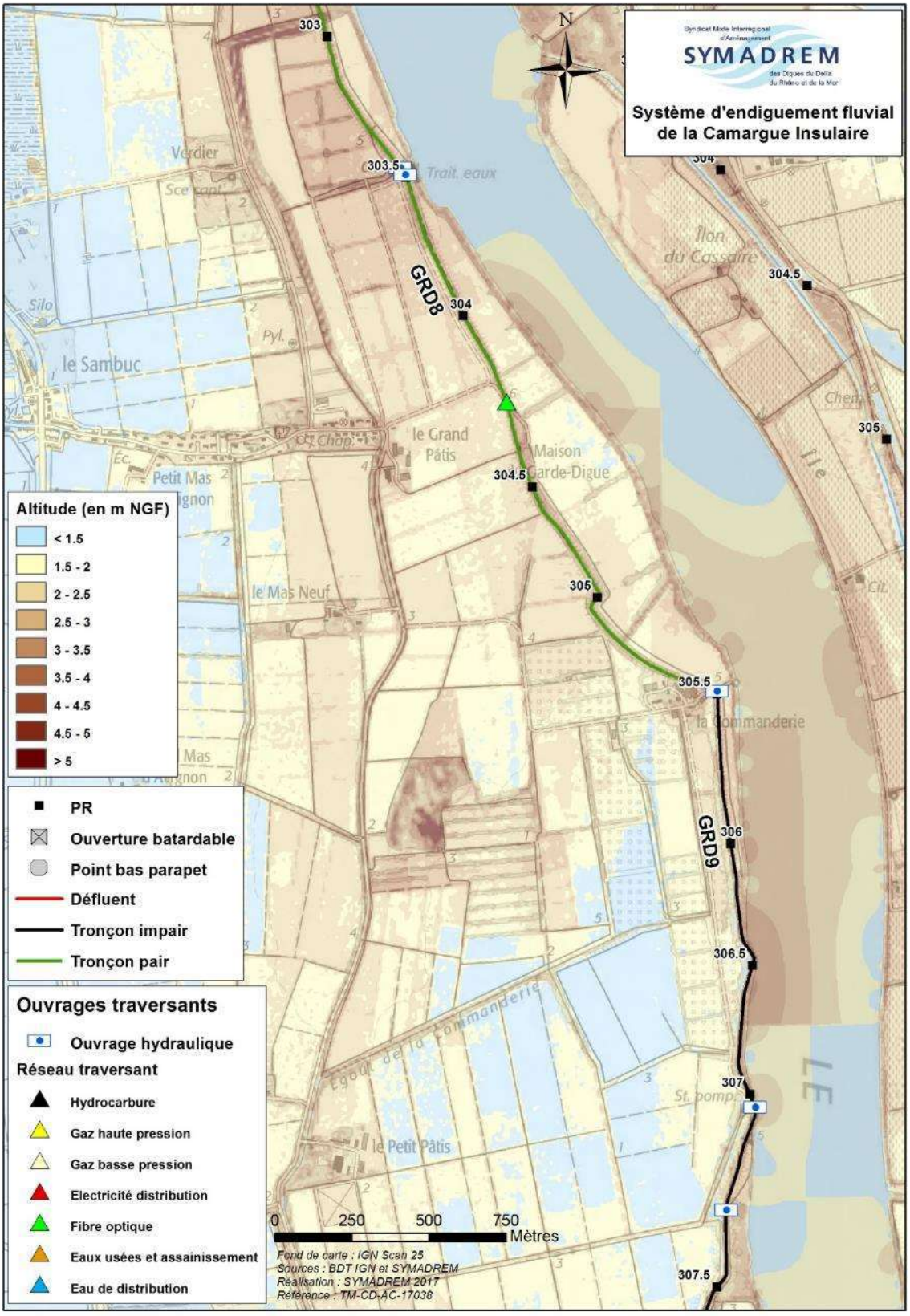


Figure 12. Localisation des tronçons GRD8 et GRD9

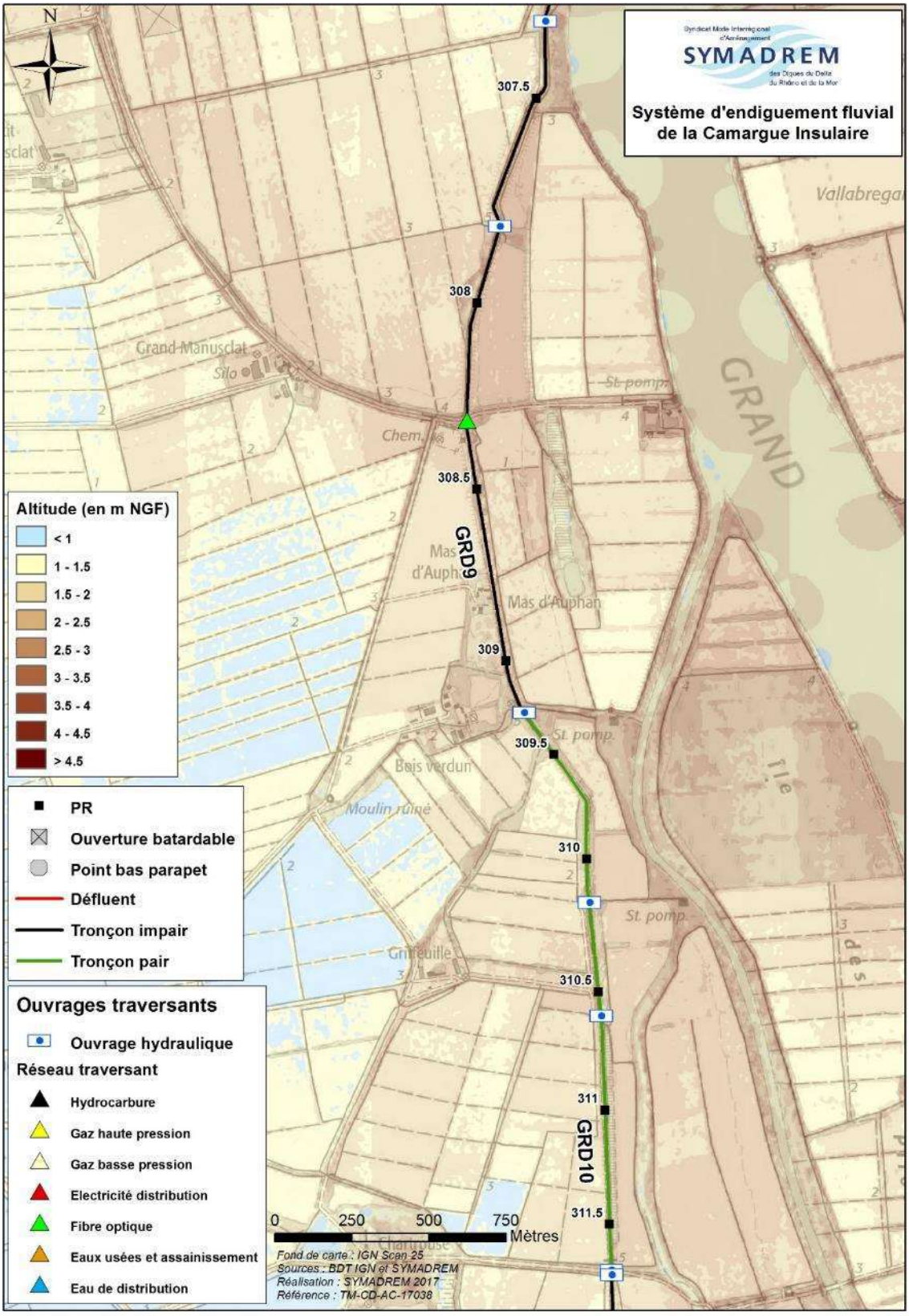


Figure 13. Localisation des tronçons GRD9 et GRD10

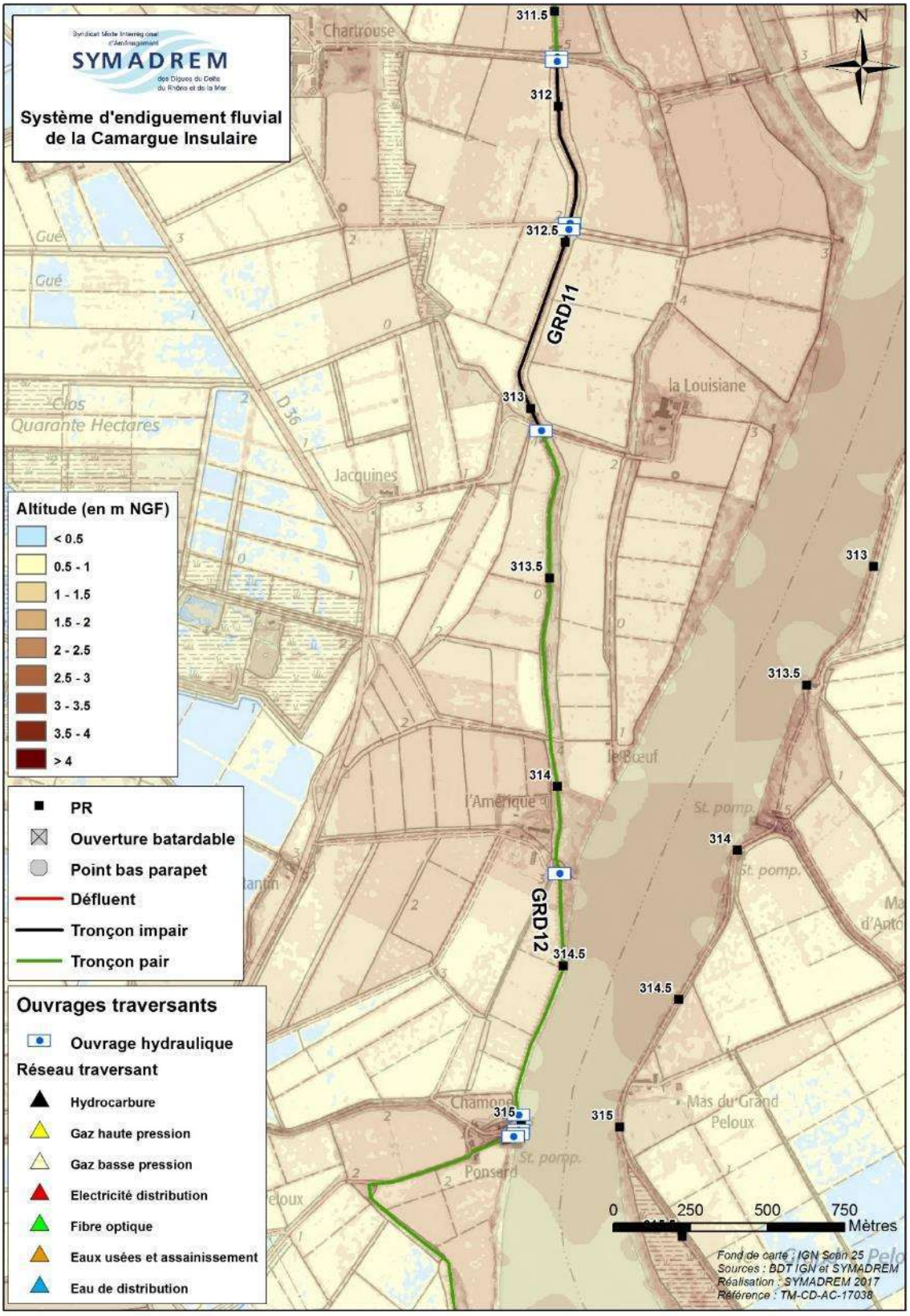


Figure 14. Localisation des tronçons GRD11 et GRD12

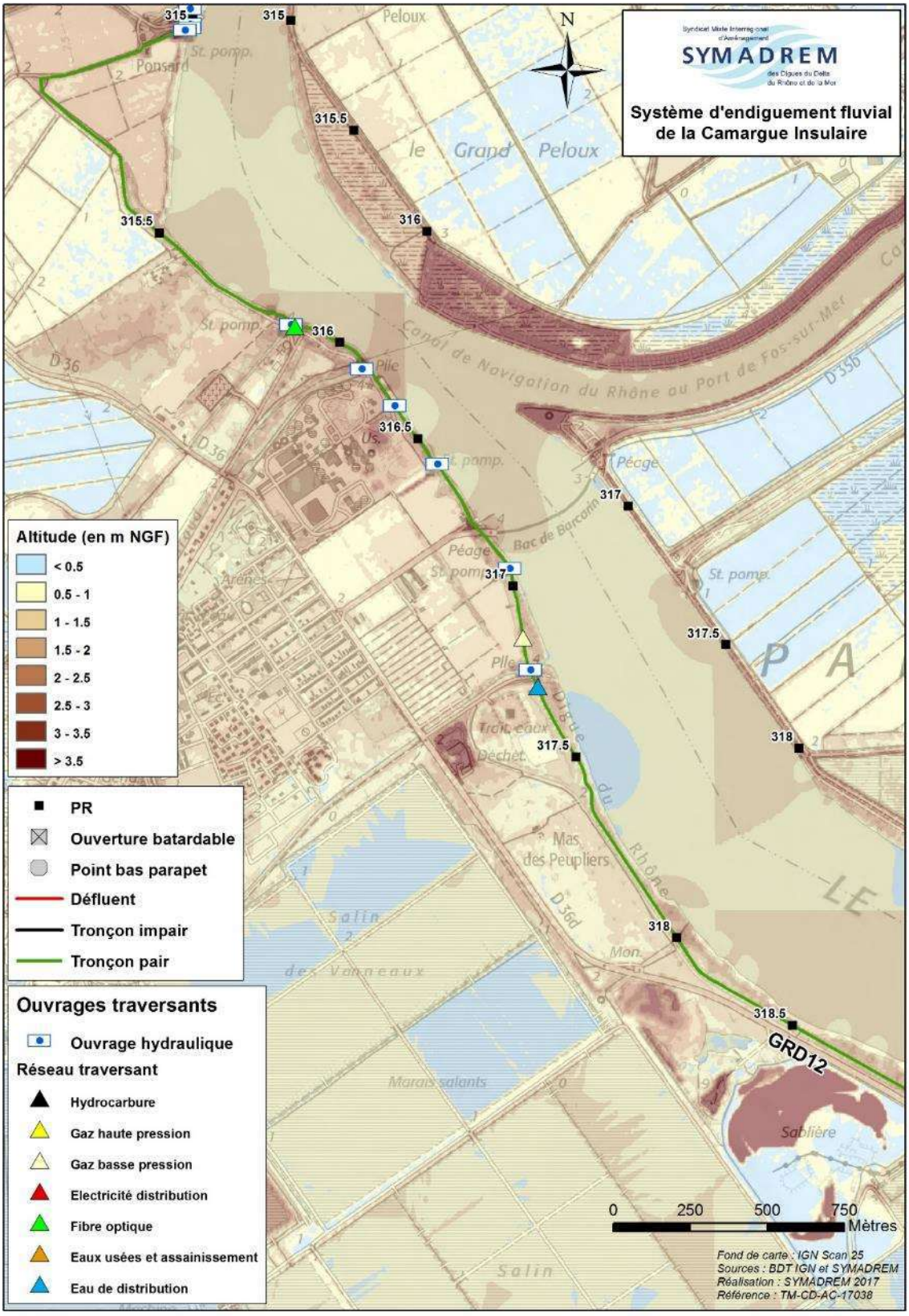


Figure 15. Localisation du tronçon GRD12

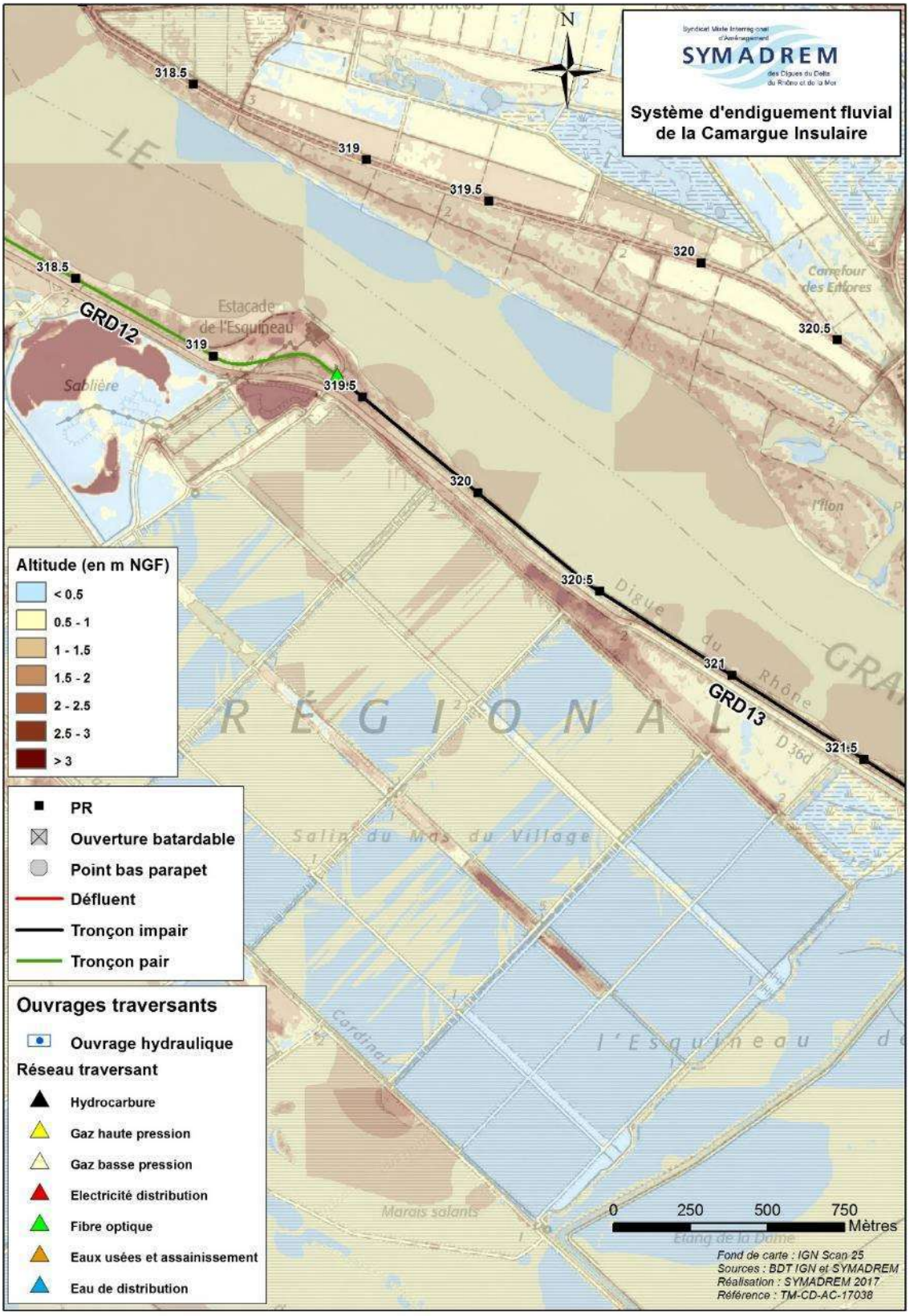


Figure 16. Localisation des tronçons GRD12 et GRD13

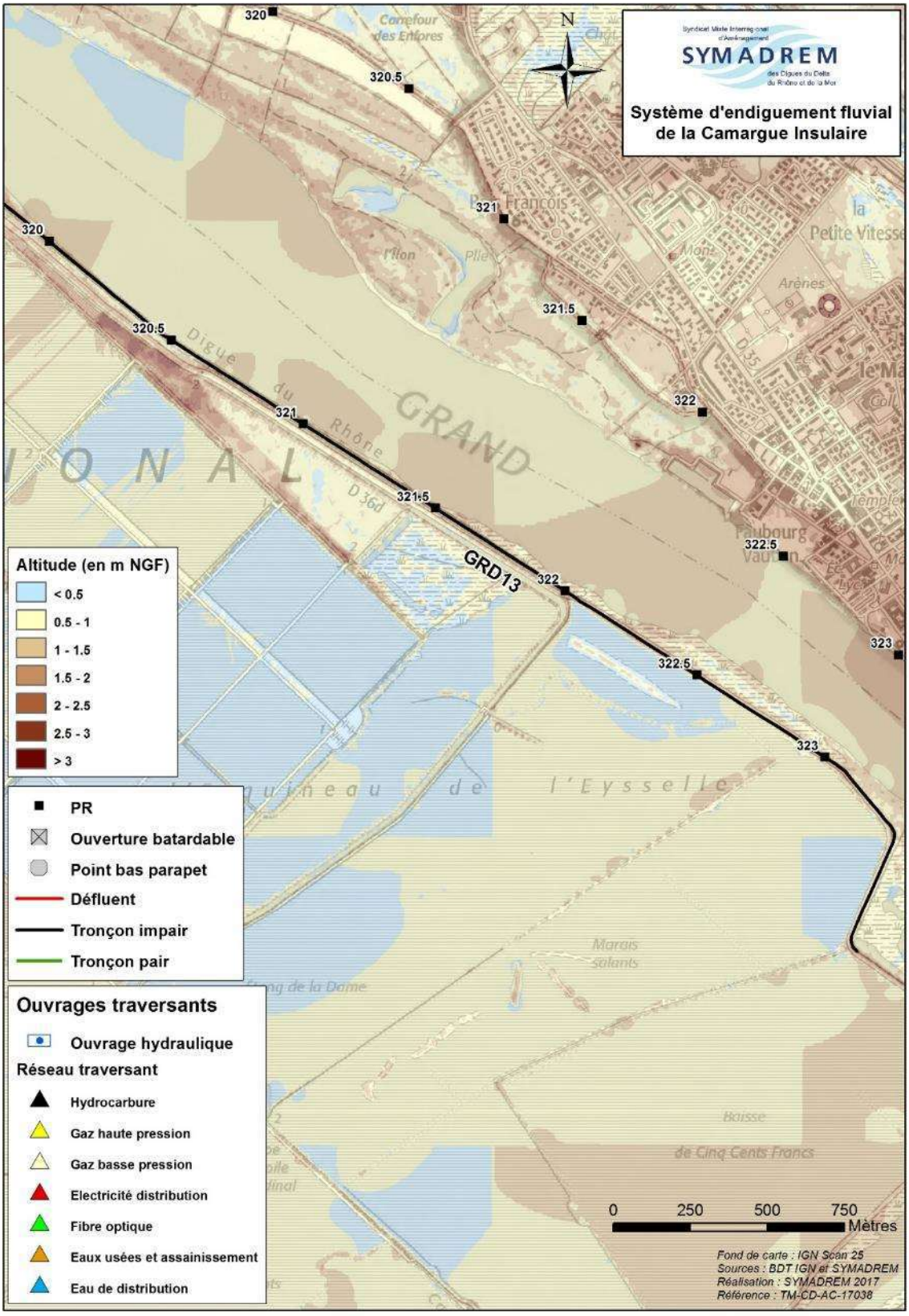


Figure 17. Localisation du tronçon GRD13

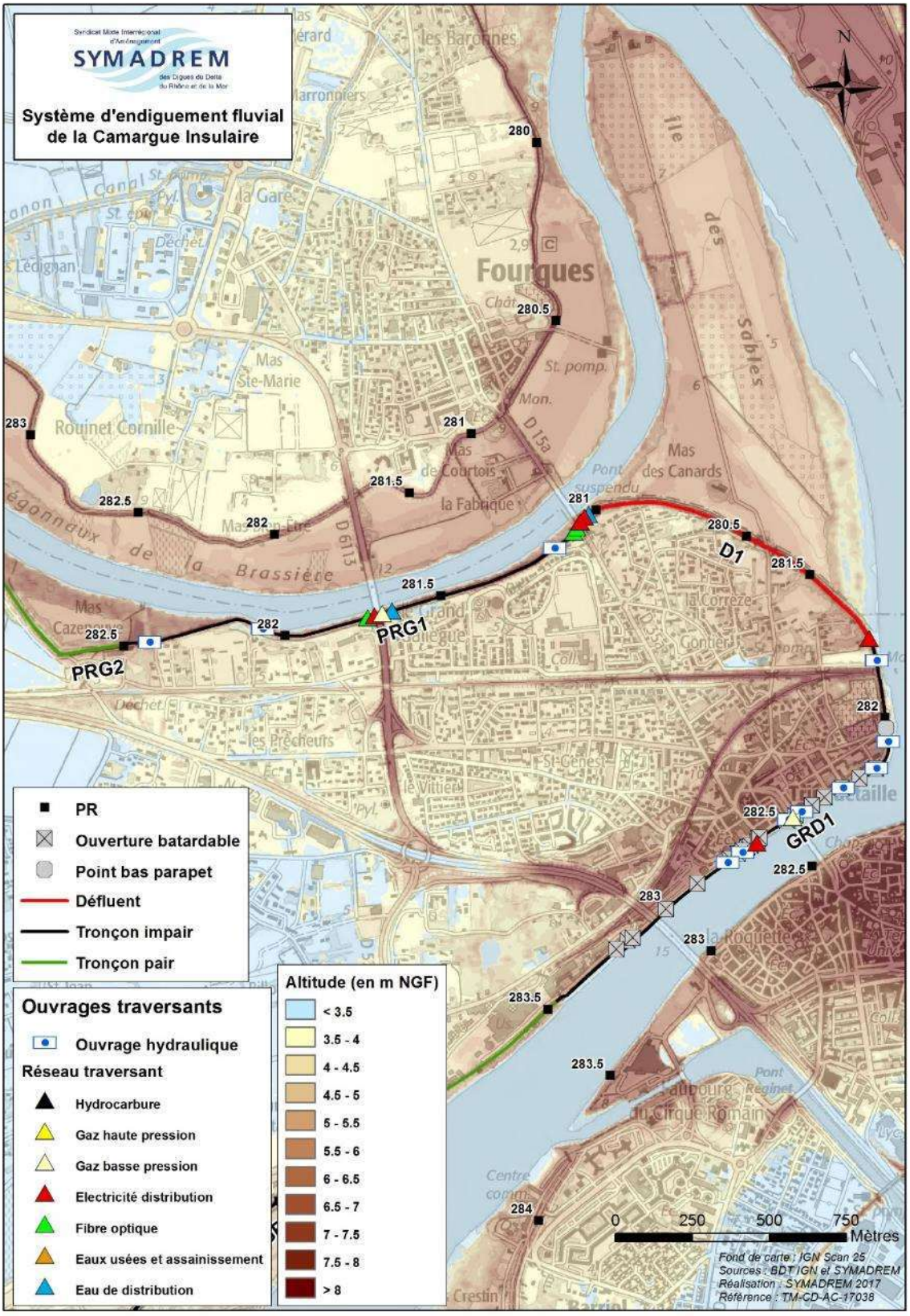


Figure 18. Localisation des tronçons D1 et PRG1

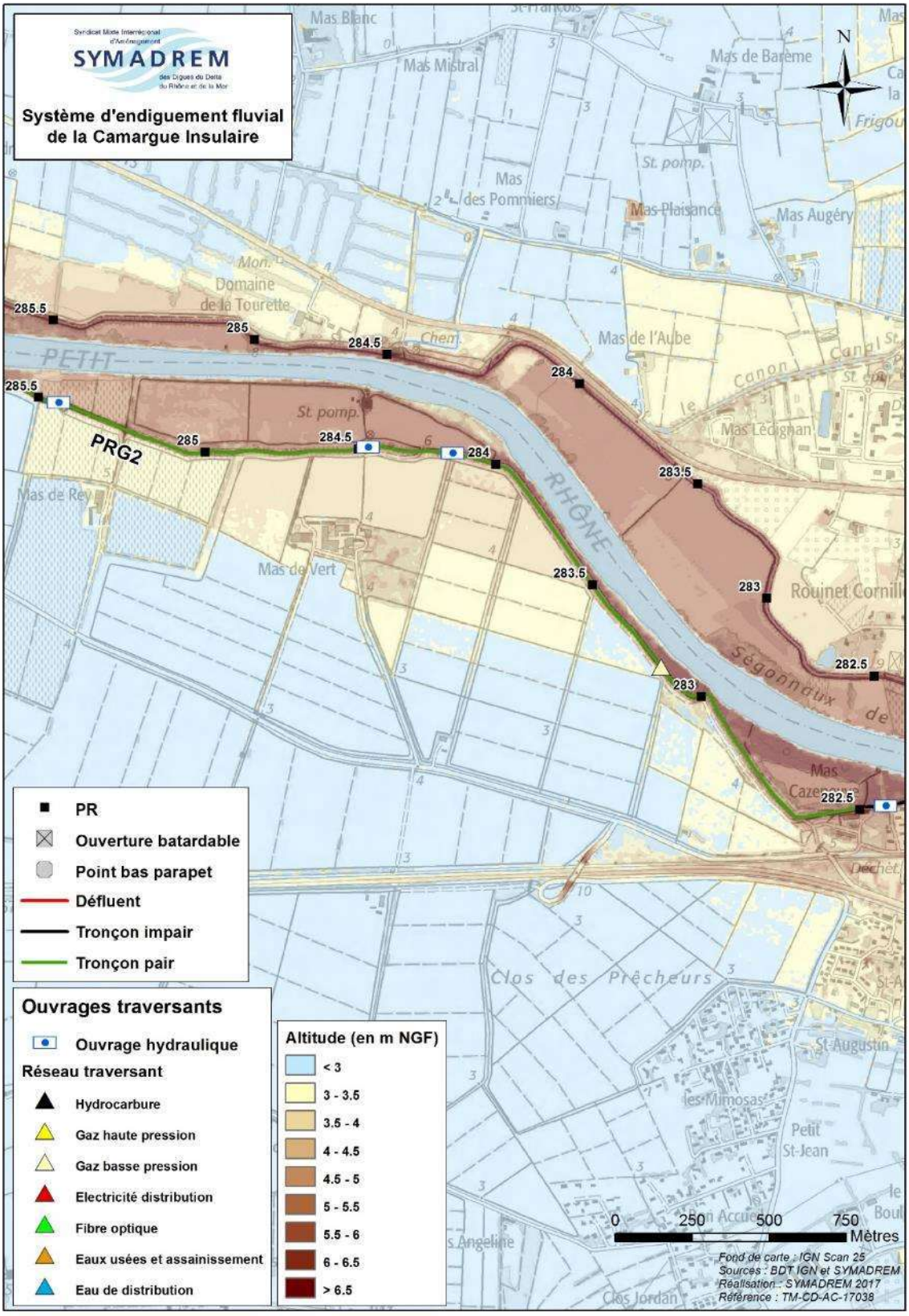


Figure 19. Localisation du tronçon PRG2

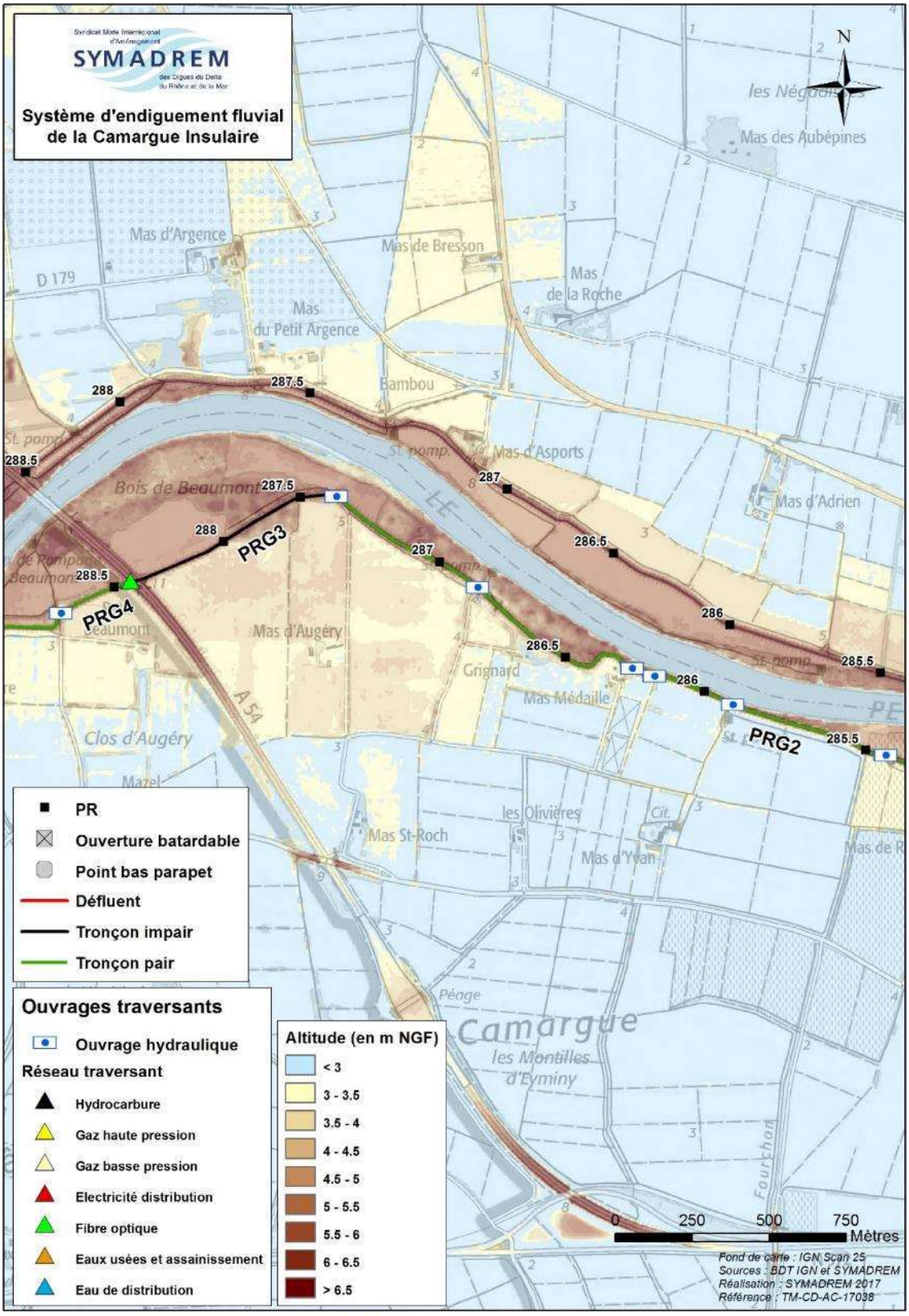


Figure 20. Localisation des tronçons PRG2 et PRG3

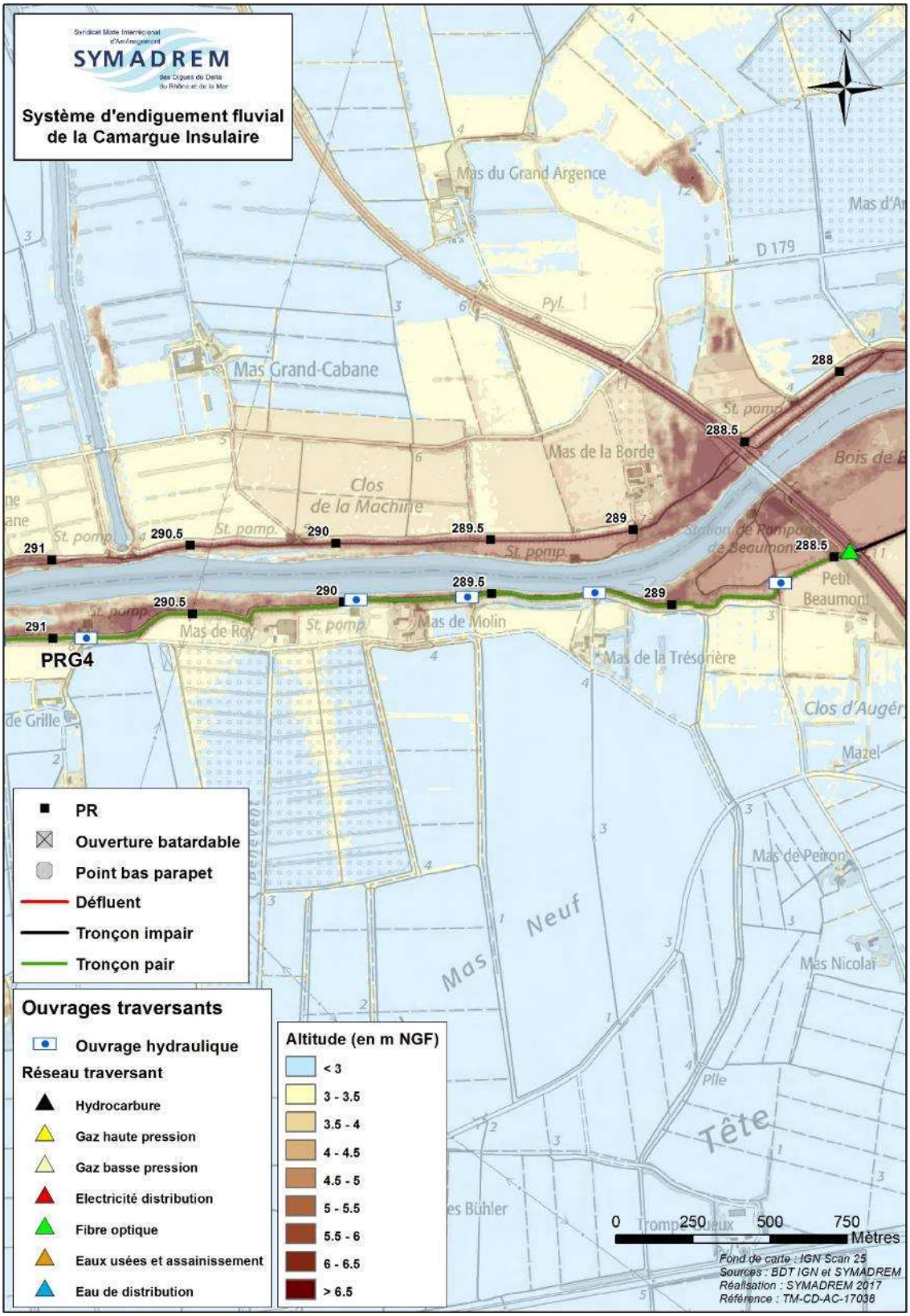


Figure 21. Localisation du tronçon PRG4

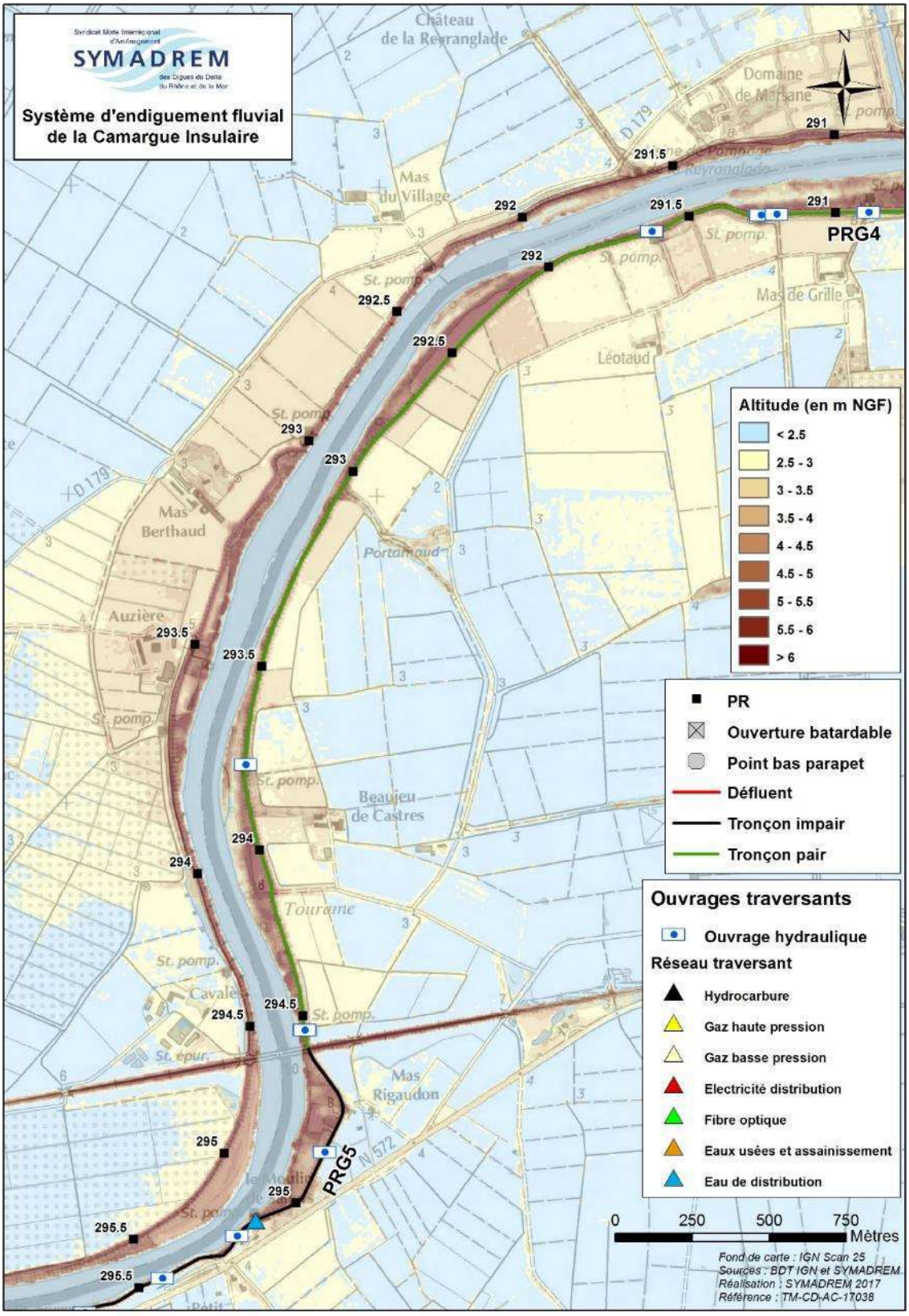


Figure 22. Localisation des tronçons PRG4 et PRG5

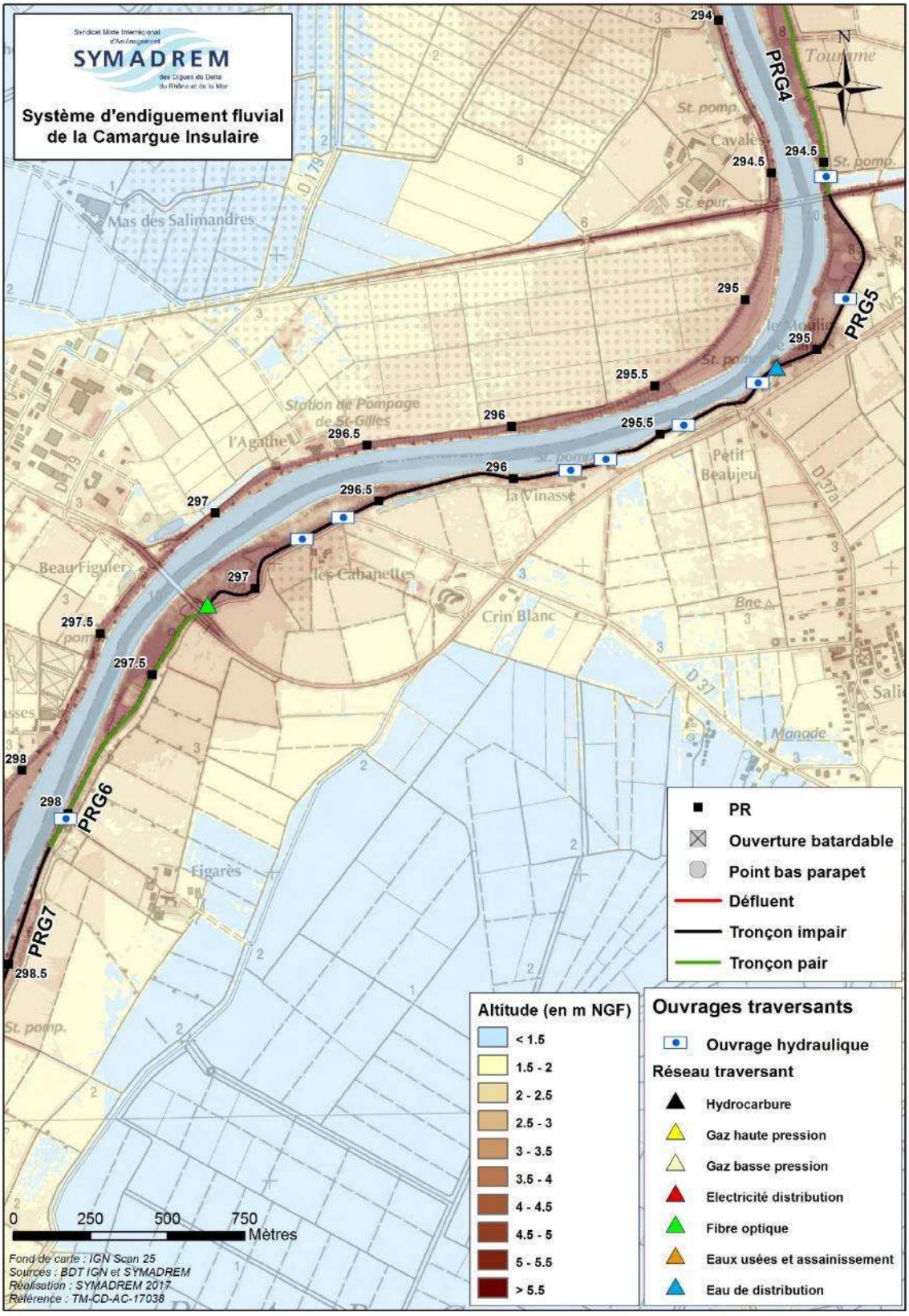


Figure 23. Localisation des tronçons PRG5 et PRG6

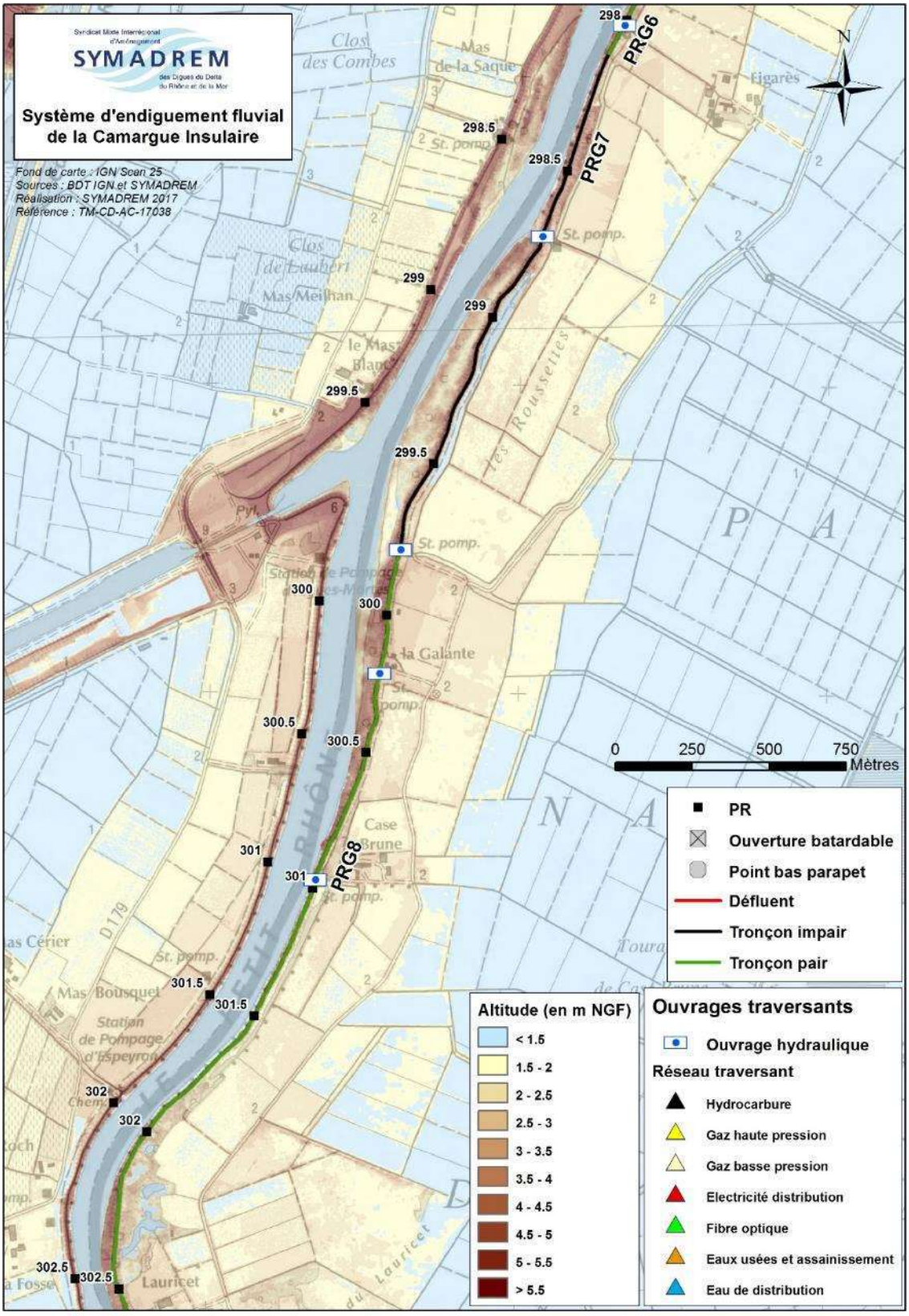


Figure 24. Localisation des tronçons PRG7 et PRG8

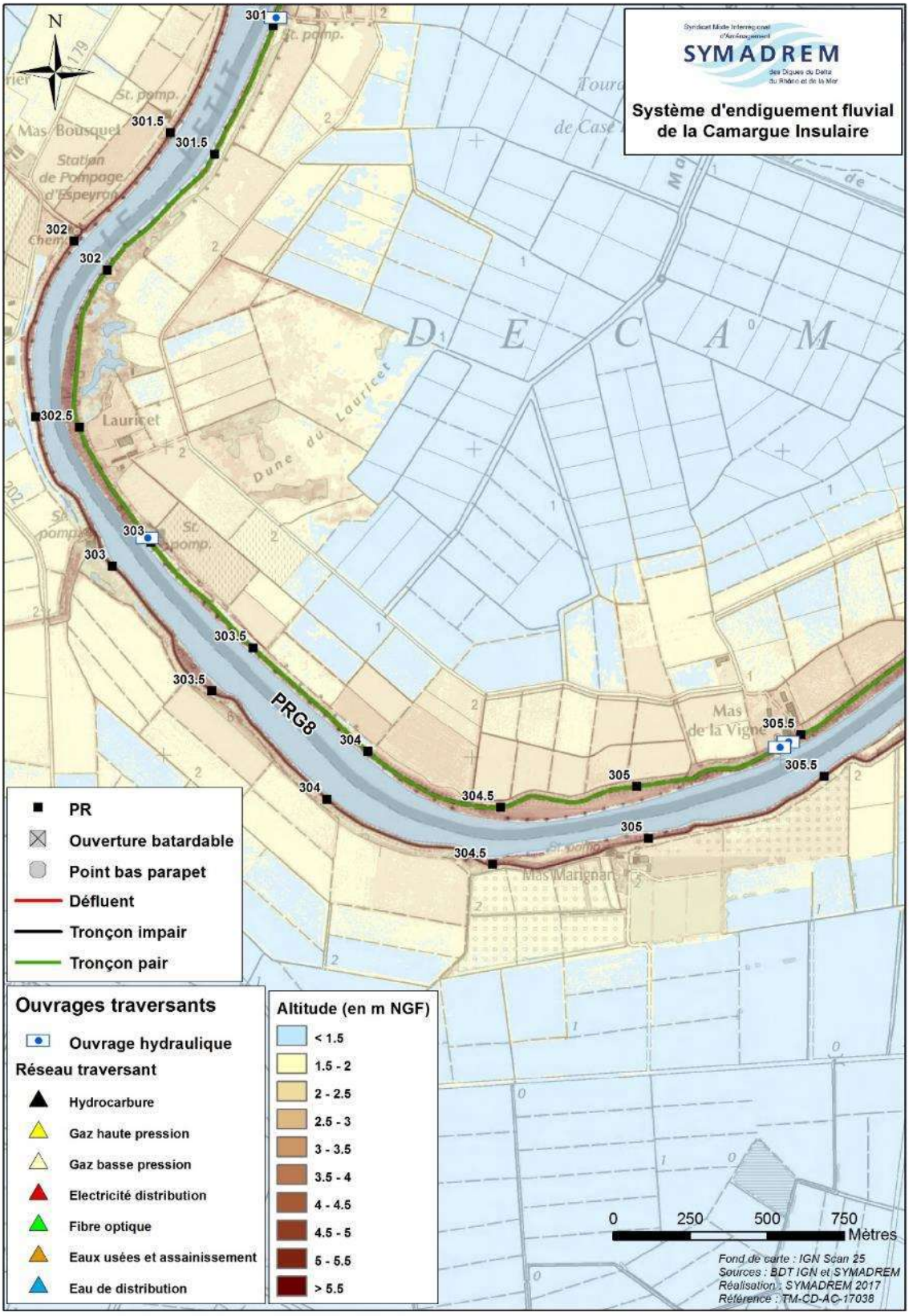


Figure 25. Localisation du tronçon PRG8

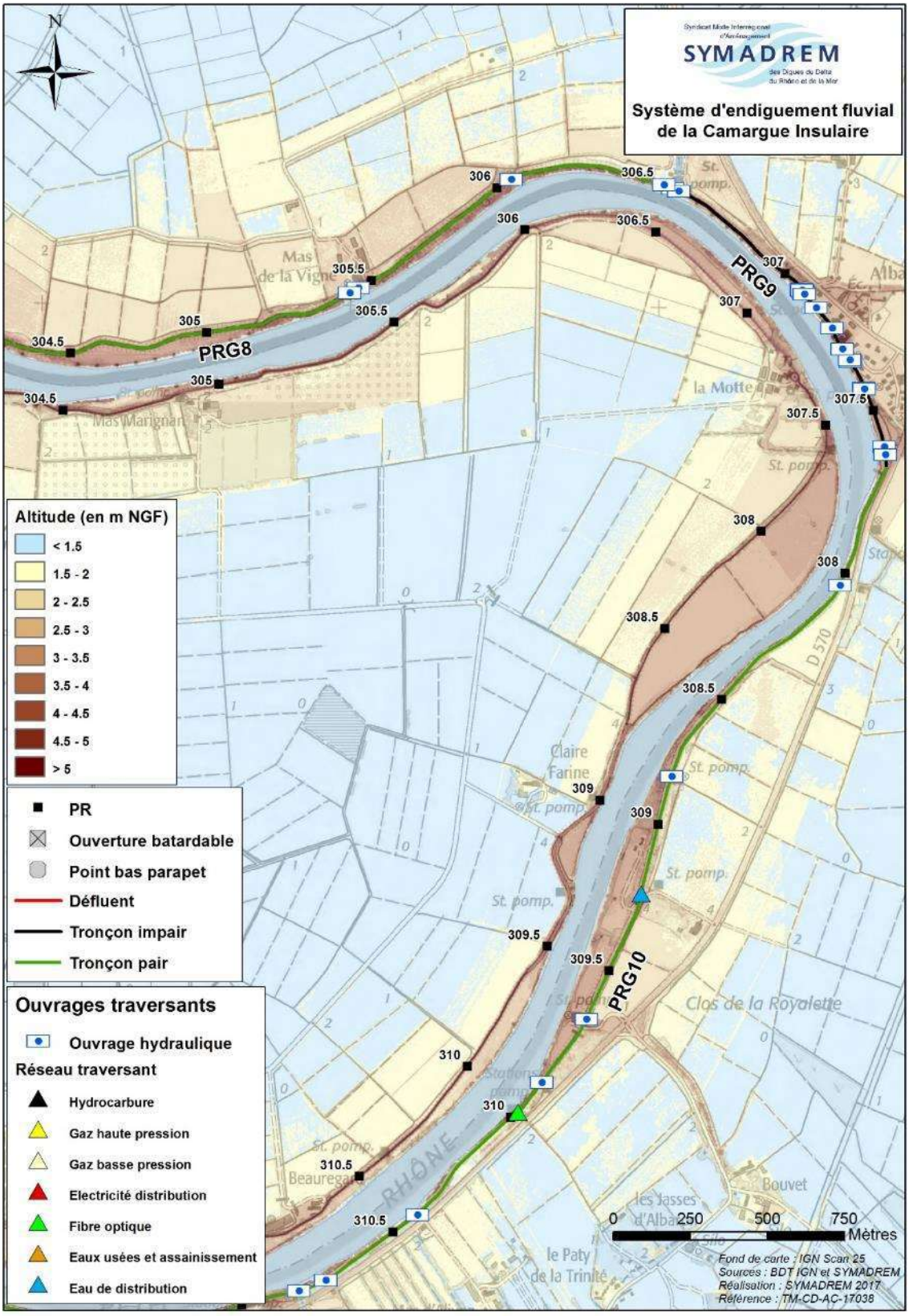


Figure 26. Localisation des tronçons PRG8 à PRG10

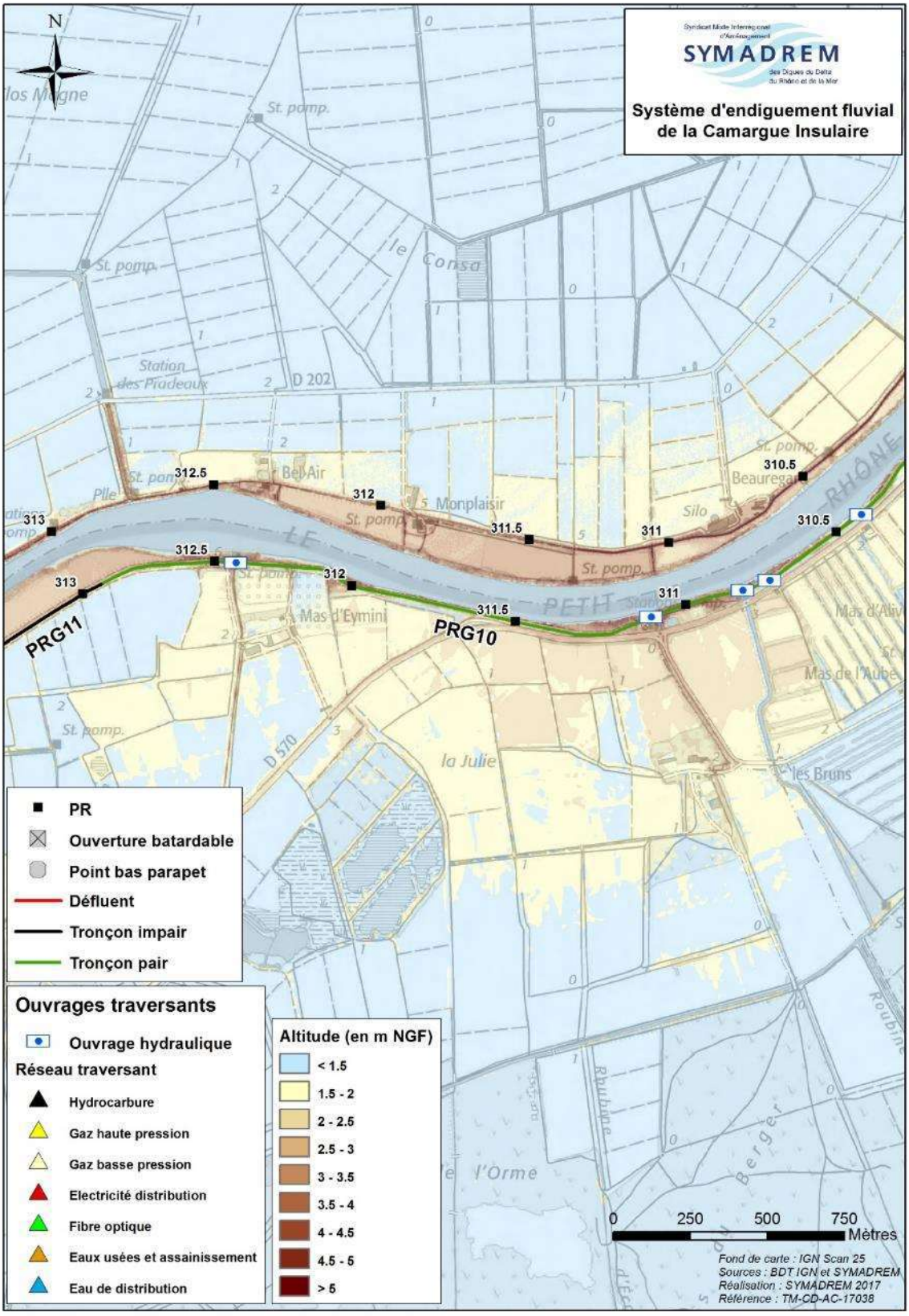


Figure 27. Localisation du tronçon PRG10

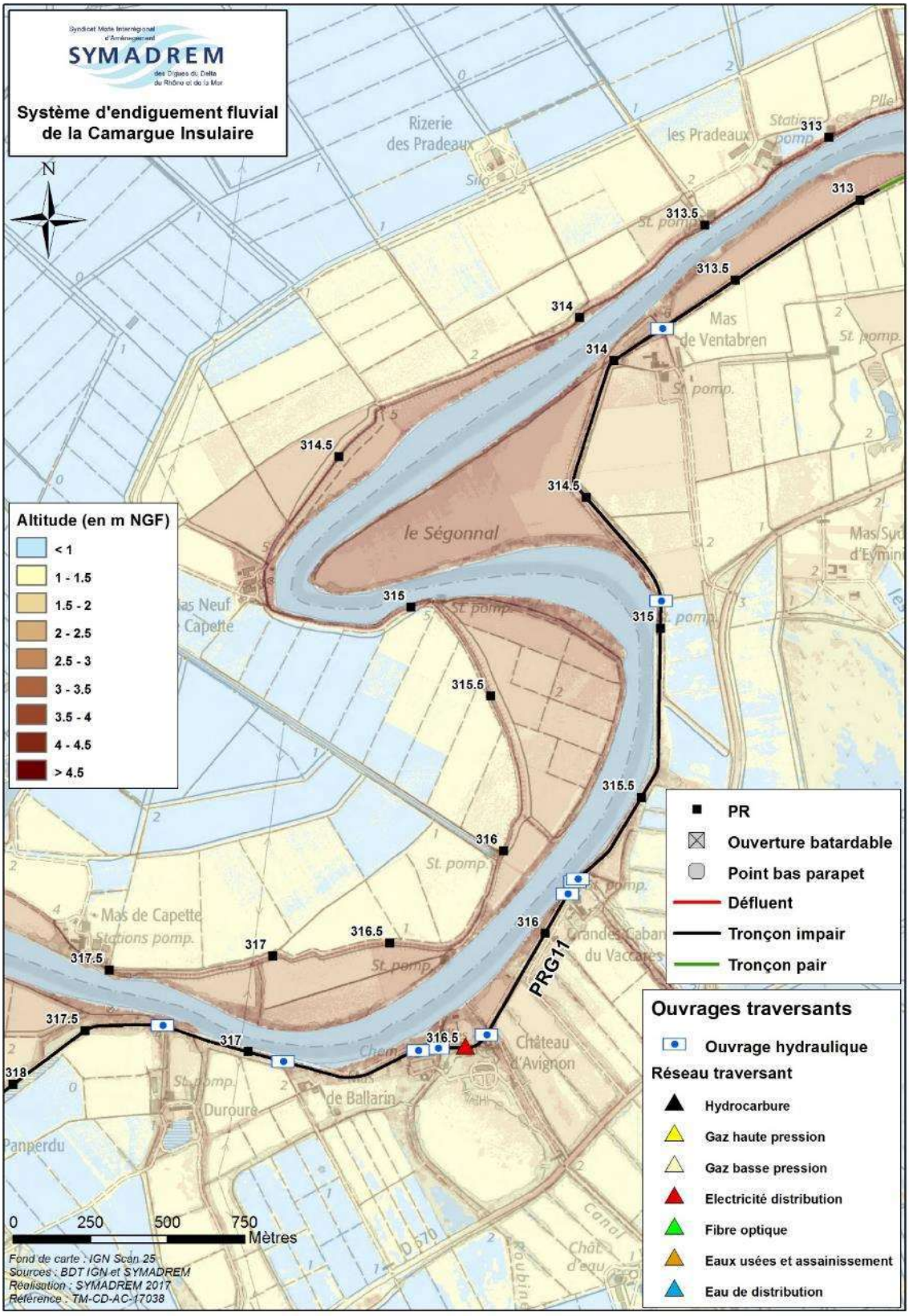


Figure 28. Localisation du tronçon PRG11

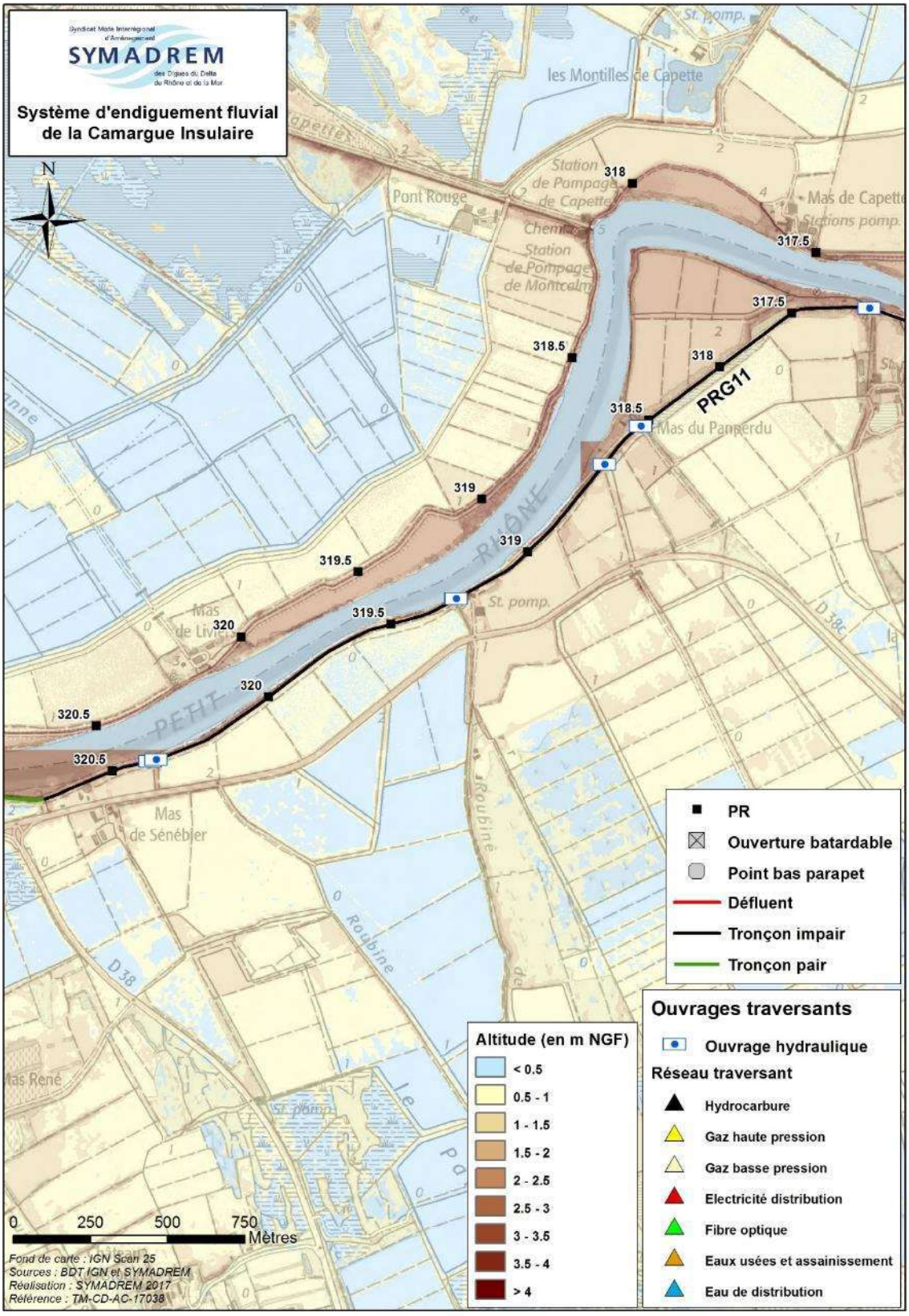


Figure 29. Localisation du tronçon PRG11 (suite)

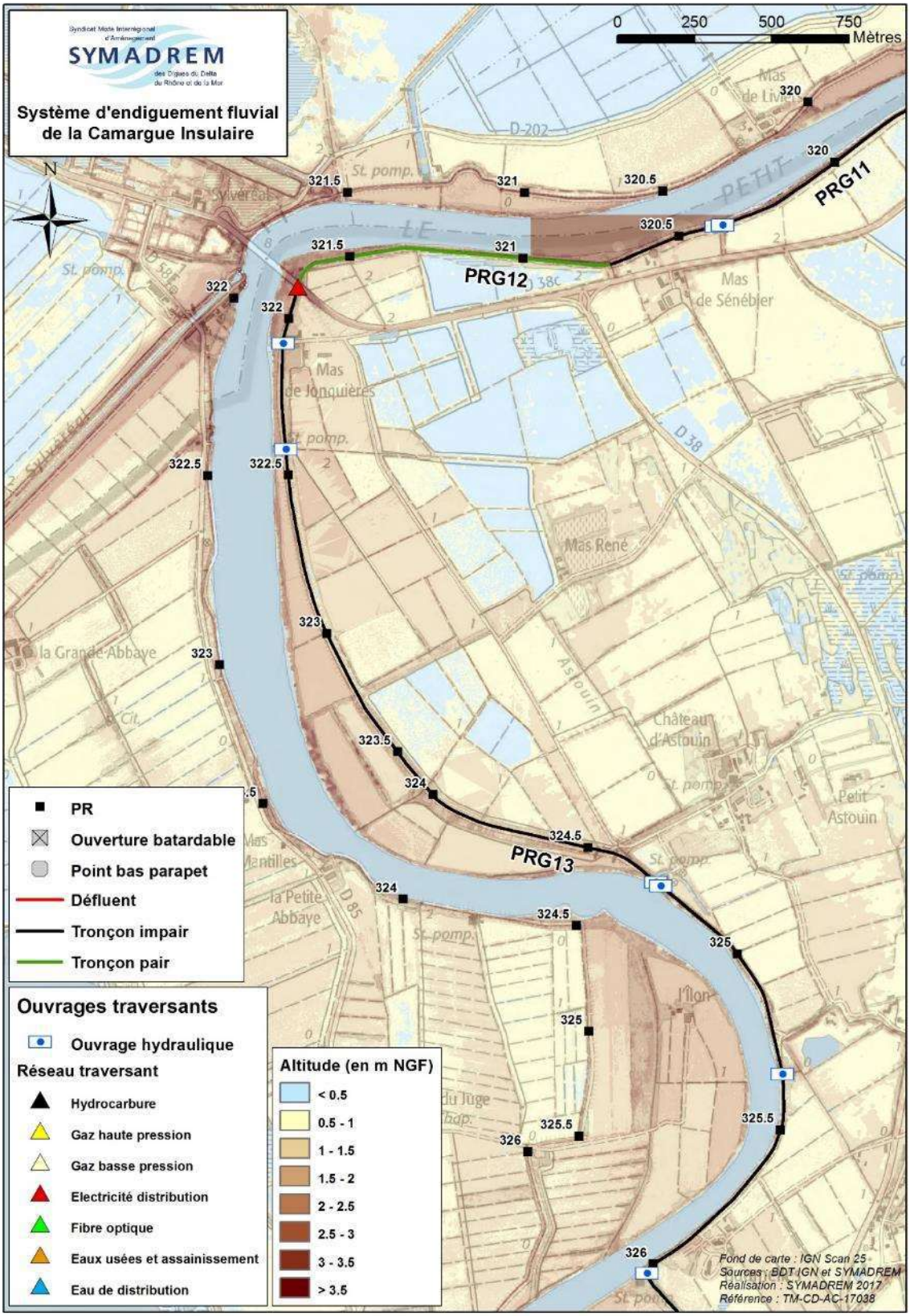


Figure 30. Localisation des tronçons PRG12 et PRG13

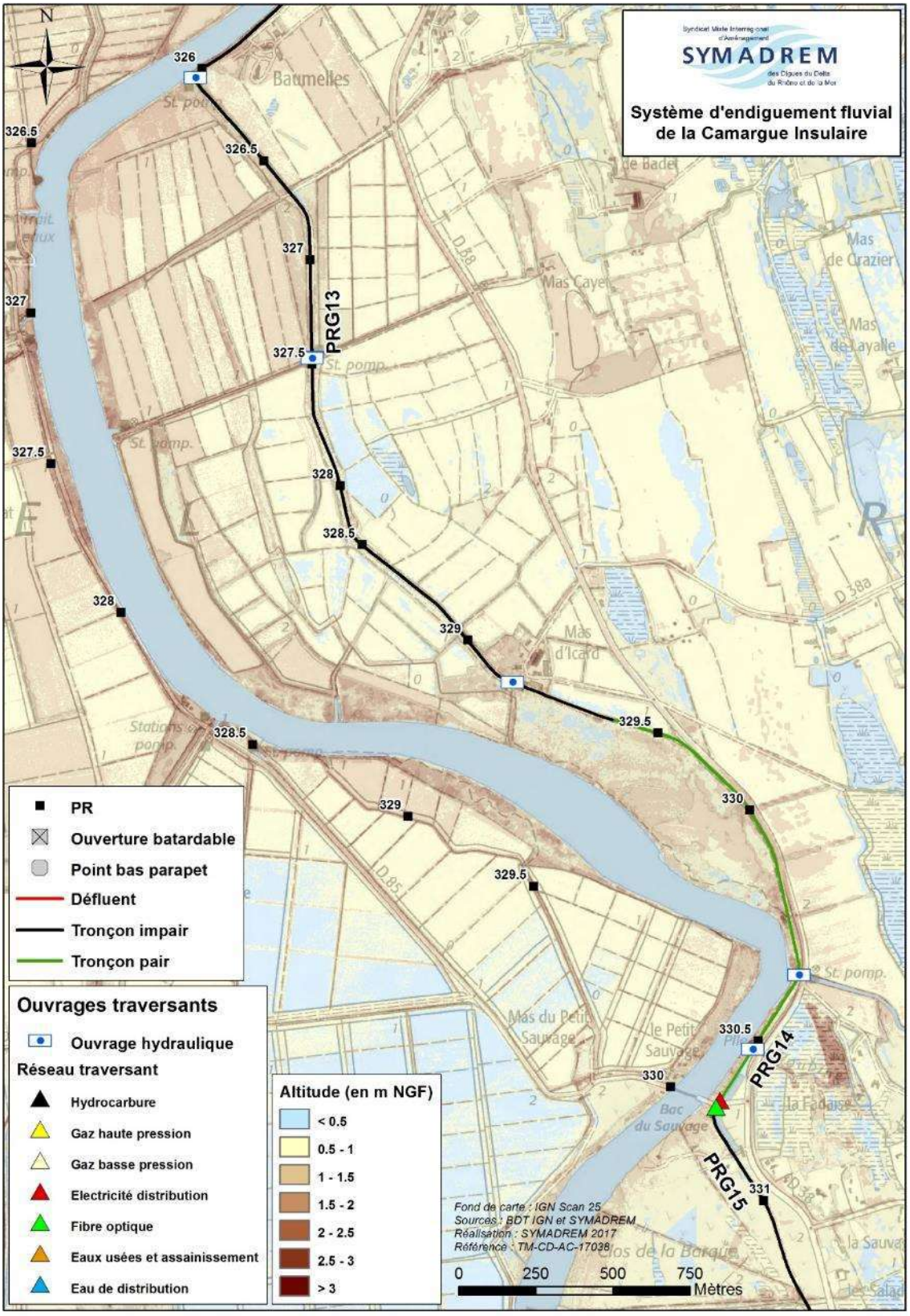


Figure 31. Localisation des tronçons PRG13 et PRG14

Figure 32. Localisation des tronçons PRG15 à PRG18

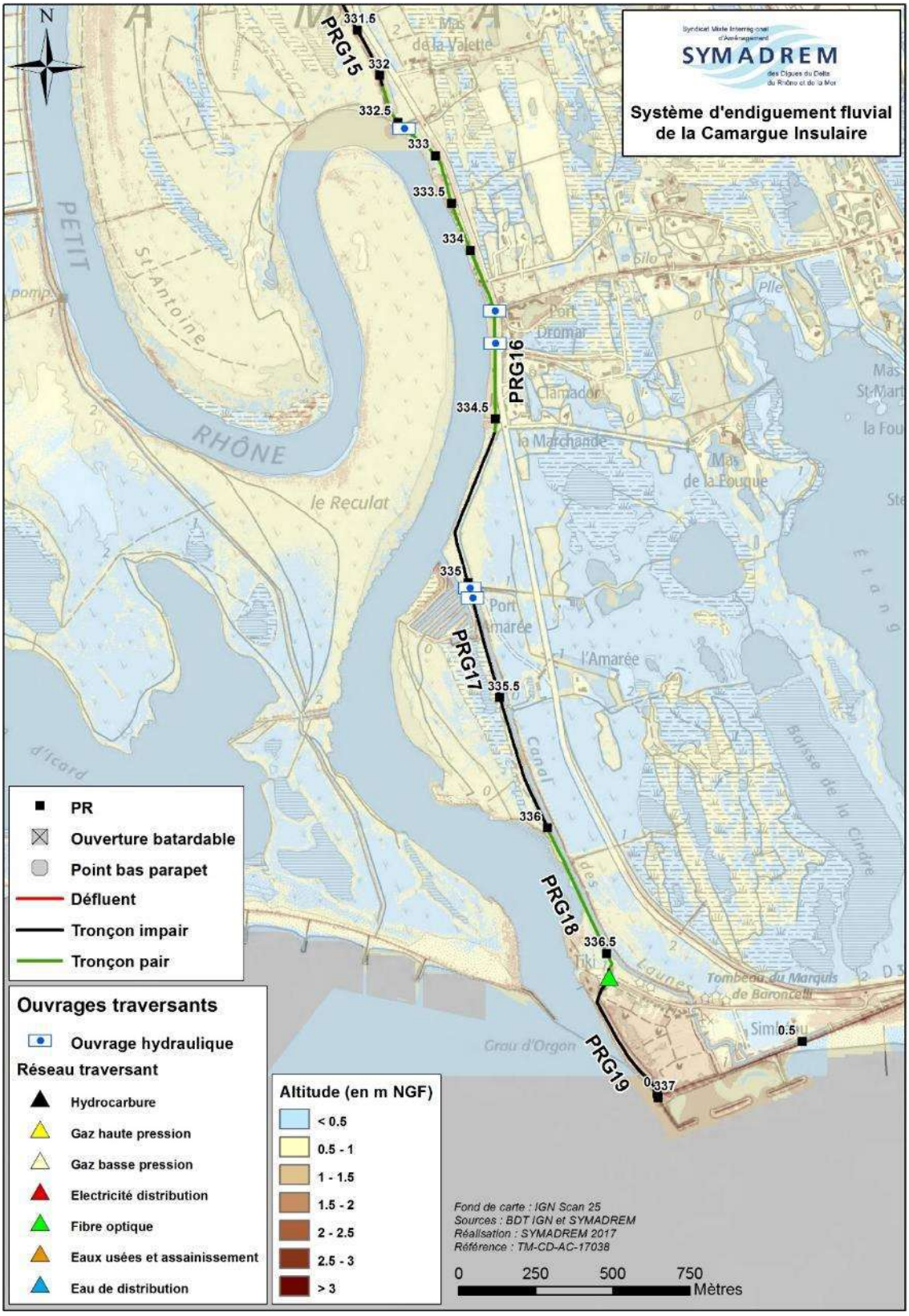


Figure 33. Localisation des tronçons PRG16 à PRG19

5 FONCTIONNEMENT DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT

La détermination des niveaux de protection des sous zones protégées a été précédée de plusieurs étapes résumées ci-après.

Quatre scénarios d'inondation en provenance du système d'endiguement ont été abordés. Trois concernent les risques incrémentaux (également qualifiés de technologiques, bien que ce qualificatif ne soit pas utilisé en France pour ce type d'ouvrage) induits par la présence même de la digue : la brèche avant surverse ; la brèche après surverse et la défaillance d'organes de fermeture des ouvrages traversants. Un scénario traite du risque lié à l'inondation, qui serait équivalente à celle causée en l'absence de digue : la surverse sans brèche (risque naturel). C'est la prise en compte de ces quatre scénarios d'inondation et du risque associé, qui a permis de déterminer et quantifier les niveaux de protection des sous-zones protégées.

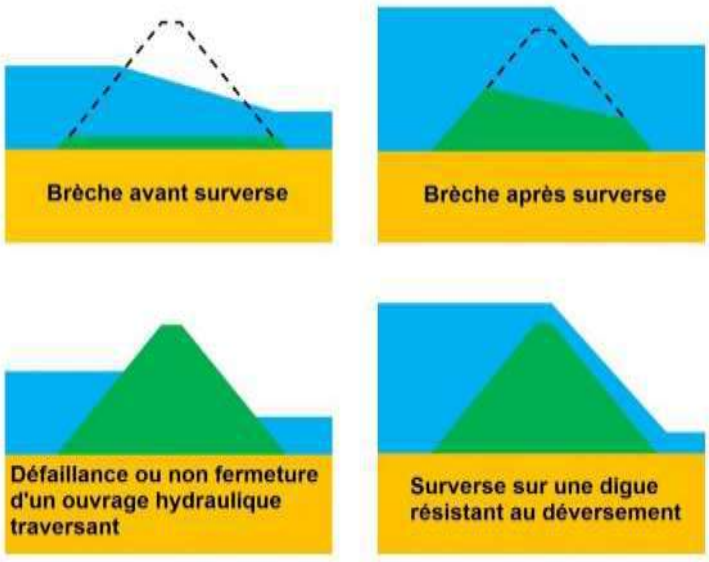


Figure 34. Quatre scénarios d'inondation étudiés

Pour l'évaluation des risques, le choix a été fait de construire un modèle probabiliste. 13 scénarios de brèche ont été étudiés et évalués en fonction du retour d'expériences des crues passées, des investigations géotechniques et de l'état de l'art actuel.

Pour la construction de ce modèle probabiliste, le SYMADREM a bénéficié du concours de Centre d'Ingénierie Hydraulique d'EDF, avec lequel il a développé un partenariat technique depuis de nombreuses années. La méthodologie mise en œuvre a fait l'objet de plusieurs publications internationales avec présentation orale au sein de la Commission Internationale des Grands Barrages : en 2014 à Bali (Indonésie); à Johannesbourg en 2016 (Afrique du Sud) et fera l'objet d'une présentation en juillet 2018, lors du 26ème congrès de la Commission Internationale des Grands Barrages à Vienne (Autriche).

Tableau 1. Identification des différents scénarios de brèches

N° scénario	Modes de rupture initiateurs	Libellé du scénario de brèche
1	Claquage hydraulique + Erosion de conduit	Claquage hydraulique d'un terrier de blaireau partiellement colmaté et érosion de conduit
2	Erosion de conduit	Erosion de conduit dans un vide le long d'un ouvrage hydraulique traversant
3	Erosion de conduit	Erosion de conduit dans une racine d'arbre mort
4	Erosion de conduit	Erosion de conduit dans une fissure traversante
5	Soulèvement hydraulique + Erosion régressive	Claquage hydraulique d'une couche de sol cohésive surplombant une couche de sable et érosion régressive de cette dernière
6	Claquage hydraulique + Erosion de contact	Claquage hydraulique du masque étanche et érosion de contact le long d'une couche de graviers
7	Claquage hydraulique + Suffusion interne	Claquage hydraulique du masque étanche et suffusion de couche de grave englobée dans la digue
8	Surverse	Surverse sur la digue
9	Affouillement de pied	Affouillement en pied amont de la digue
10	Glissement	Glissement du talus aval en crue
11	Glissement	Glissement du talus amont en crue
12	Mécanique	Stabilité mécanique des ouvrages hors glissement, claquage hydraulique et soulèvement du pied aval
13	Mécanique	Stabilité des parapets et batardeaux

Pour chaque tronçon homogène de digue, une courbe de fragilité correspondant à la section la plus critique, a été construite. Elle donne la probabilité de brèche en fonction du débit du Rhône à la station de Beaucaire/Tarascon (Cf. exemple ci-après)

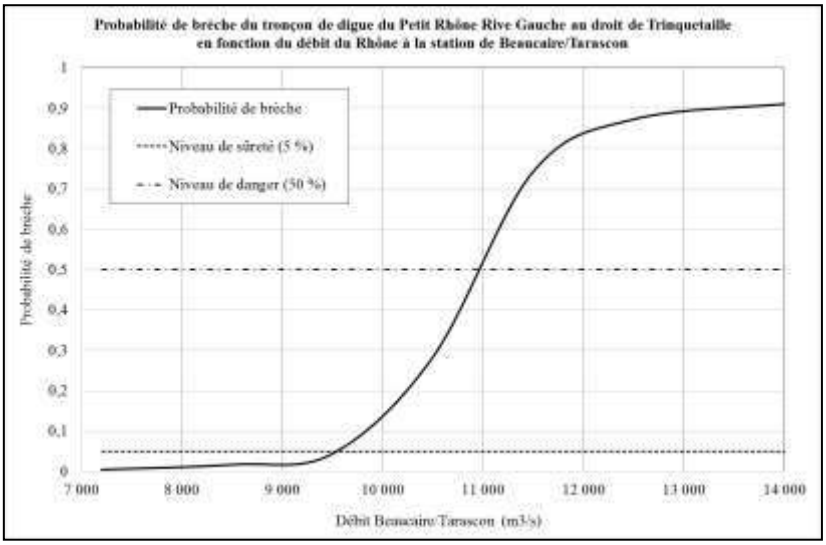


Figure 35. Exemple de courbe de fragilité
(probabilité de brèche en fonction du débit à Beaucaire/Tarascon)

Ces études de dangers ont confirmé le retour d'expérience accidentologique des crues récentes et confirmé que le scénario de brèche avant surverse était l'événement à redouter.

Ce type de fonctionnement est dangereux pour la sécurité des populations, car il est imprévisible et aléatoire. Il est imprévisible car la formation de brèche peut intervenir de manière quasi-certaine (probabilité ≅ 50 %) bien avant l'atteinte du niveau de submersion. Les habitants de la zone protégée peuvent avoir une impression de sécurité, alors même que la cote de sûreté des ouvrages a été dépassée et que les ouvrages sont sollicités au-dessus du niveau pour lequel ils ont été dimensionnés. Il est aléatoire, car la formation de brèche peut se produire à n'importe quel endroit du système d'endiguement, ce qui sur un territoire aussi étendu que celui du delta du Rhône rend la gestion des secours très difficile, pour ne pas dire hasardeuse. En outre, la brèche libère quasiment instantanément des volumes d'eau considérables détruisant tout sur les premiers mètres

Photo 1. Danger provoqué par une brèche

Par le passé, la zone protégée par le système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » a été inondée plusieurs fois par les crues du Rhône : sur les crues recensées depuis 1840, 5 ont provoqué des brèches dans le système d'endiguement (1840, 1843, 1856, 1993 et 1994). La Camargue Insulaire a pu être épargnée des eaux en 2002 et 2003, grâce au dispositif de surveillance et d'intervention mis en place par le Symadrem et surtout au fait que des brèches se sont produites sur la rive opposée du fleuve provoquant l'inondation de la plaine de Beaucaire et de la Camargue Gardoise.

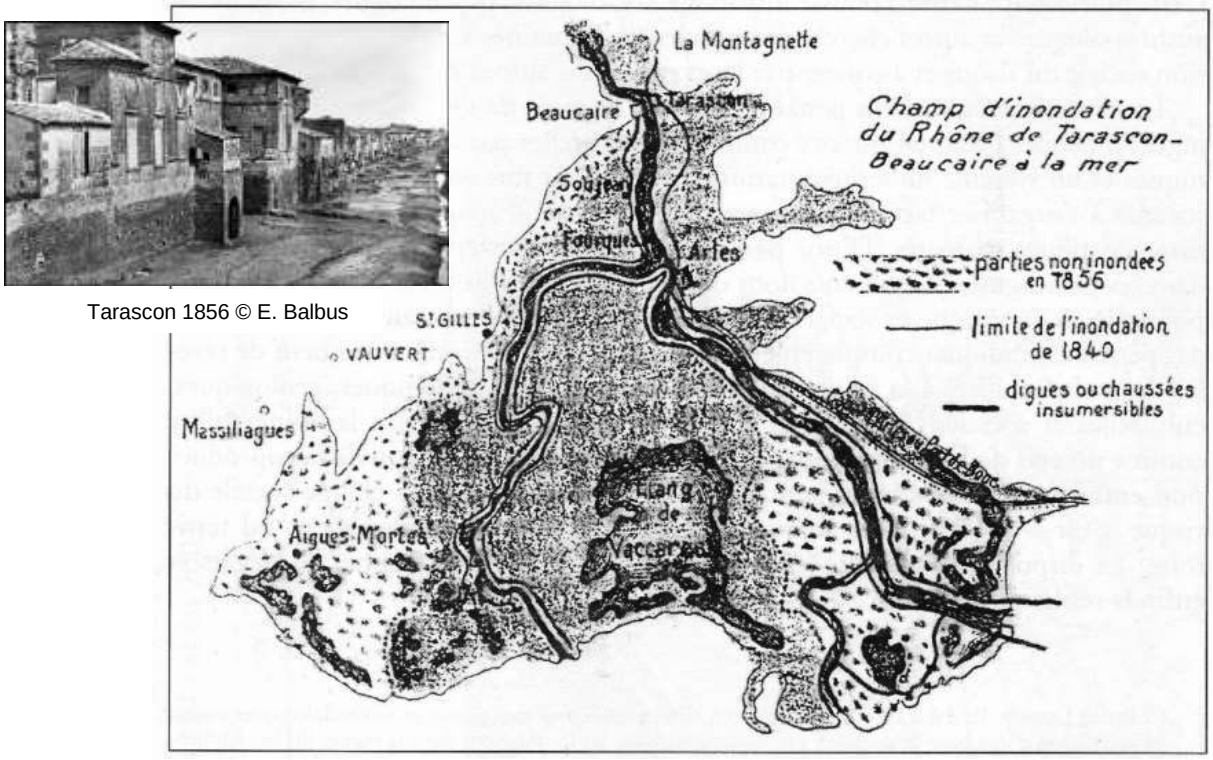


Figure 36. Inondations de 1840 et 1856 (source Pardé)

Le tableau ci-après renseigne sur la cote de quelques laisses de crues, relevées dans la zone protégée.

Tableau 2. Laisses des crues de 1840, 1843, 1856 et 1993 en Camargue Insulaire

Inondations du Rhône	Lieu	Cote relevée (m NGF)
Novembre 1840	Mas des Bernacles	1,89 (3,30 autre relevé)
Novembre 1843	Mas de Bernacles	1,59 m NGF
Mai 1856	Trinquetaille – avenue Edouard Herriot	6,26
	Mas de Bernacle	2,16
	Mas du Pont de Rousty	2,62
Octobre 1993	Mas du Pont de Rousty	2,43

Photo 2. Laisse de crue mai 1856 quartier de Trinquetaille

Les deux cartes ci-après illustrent l'inondation la zone protégée en octobre 1993 et janvier 1994.

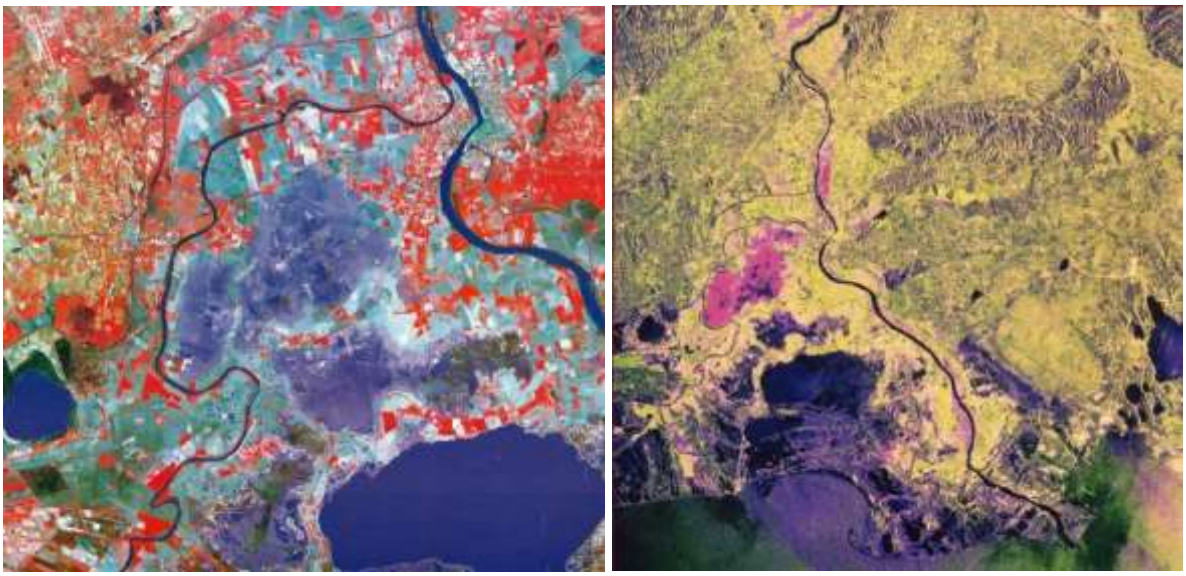


Figure 37. Inondation du Rhône d'octobre 1993 et janvier 1994 – source Spot

Les volumes d'eau déversé au travers des brèches dans les systèmes ont été évalués à :

Tableau 3. Volume déversé lors des crues historiques de 1840, 1856, 1993 et 1994

Zone protégée	Nov. 1840	Mai 1856	Octobre 1993	Janvier 1994
Rive Droite	1 400 millions de m^3	300 millions de m^3		
Camargue Insulaire	800 millions de m^3	1 000 millions de m^3	130 millions de m^3	60 millions de m^3
Rive Gauche	> 600 millions de m^3	500 millions de m^3		
TOTAL	**2 800 millions de m^3**	**1 800 millions de m^3**	**130 millions de m^3**	**60 millions de m^3**

Les crues d'octobre 1993 et de janvier 1994 ont marqué les esprits mais restent très en deçà des crues de 1840 et 1856 qui ont été de véritables catastrophes pour le territoire.

6 NIVEAUX DE PROTECTION AU SEIN DE LA ZONE PROTEGEE

Sept classes de niveau de protection ont été retenues. Elles sont décrites dans le tableau ci-après avec les incertitudes liées à ces paramètres.

Tableau 4. Caractéristiques des classes de niveau de protection

Niveau de protection	Débit (m^3/s)* Beaucaire /Tarascon	Cote** Beaucaire/ Tarascon (m NGF IGN 69) suivant courbe de tarage (en vigueur depuis le 7/12/2003)	Cote*** Beaucaire/ Tarascon (m NGF IGN 69) extraite du modèle ECPS PS (CNR) après sécurisation	Niveau marin (m NGF IGN 69)	Période de retour (années arrondies)
A	14 160	Non valable	12,05	1,50	800 à 1000
B	12 500		11,79	1,30	200
C	11 500	11,30	11,44	0,98	100
D	10 500	10,77	10,83	0,94	50
E	9 500	10,22	10,45	0,94	20
F	8 500	9,58	9,94	0,90	10
G	7 200	8,56	9,02	0,90	3

* ± 5 % ** ± 10 cm *** ± 20 cm

Il est à souligner que la station de référence pour le relevé des niveaux et l'estimation débits du Rhône est la station Beaucaire/Tarascon du Service Prévision des Crues du Grand Delta au PK Rhône 269,6 (www.vigicrues.gouv.fr).

Les débits sont estimés à partir d'une courbe appelée courbe de tarage en vigueur depuis le 7 décembre 2003 (courbe verte sur la figue ci-dessous), qui estime le débit du Rhône en fonction de la cote relevée.
Les valeurs, en termes de débit et de hauteur, supérieures à celles connues en décembre 2003, ont été extrapolées mathématiquement sans tenir compte des surverses occasionnées entre Beaucaire et Arles en rives droite et gauche du Rhône, qui ont pour effet de contrôler les niveaux au droit de la station. Cet effet est perceptible sur la figure ci-dessous, qui superpose la courbe de tarage actuellement en vigueur à la station de Beaucaire/Tarascon (courbe verte) et les niveaux modélisés par la $CNR_{ingénierie}$ dans le cadre de l'étude de calage (courbe bleu). On remarque que la courbe de tarage n'est pas valable pour les niveaux supérieurs à 11,5 m NGF (zone 1). A titre d'exemple, la crue exceptionnelle du Rhône (14 160 m^3/seconde) correspondrait suivant la courbe de tarage en vigueur à une cote d'environ 12,65 m NGF. Les niveaux modélisés par la $CNR_{ingénierie}$ dans le cadre de l'étude de calage donne une cote d'environ 12,05 m NGF dans l'état initial et 12,01 m NGF dans l'état après travaux.
Il est donc indispensable de modifier la courbe de tarage en vigueur pour les débits supérieurs à 11 500 m^3/s pour tenir compte du fonctionnement hydraulique (actuel ou projeté) entre Beaucaire et Arles.

De la même façon, on constate des écarts notables entre la courbe de tarage et les résultats de la modélisation CNR (en dehors de la fourchette de précision des débits de ± 5 %) pour les débits de pointe inférieurs à 9 500 m^3/s (zone 2) ; cet écart étant dû au fait le modèle a été calé sur la seule crue de décembre 2003.

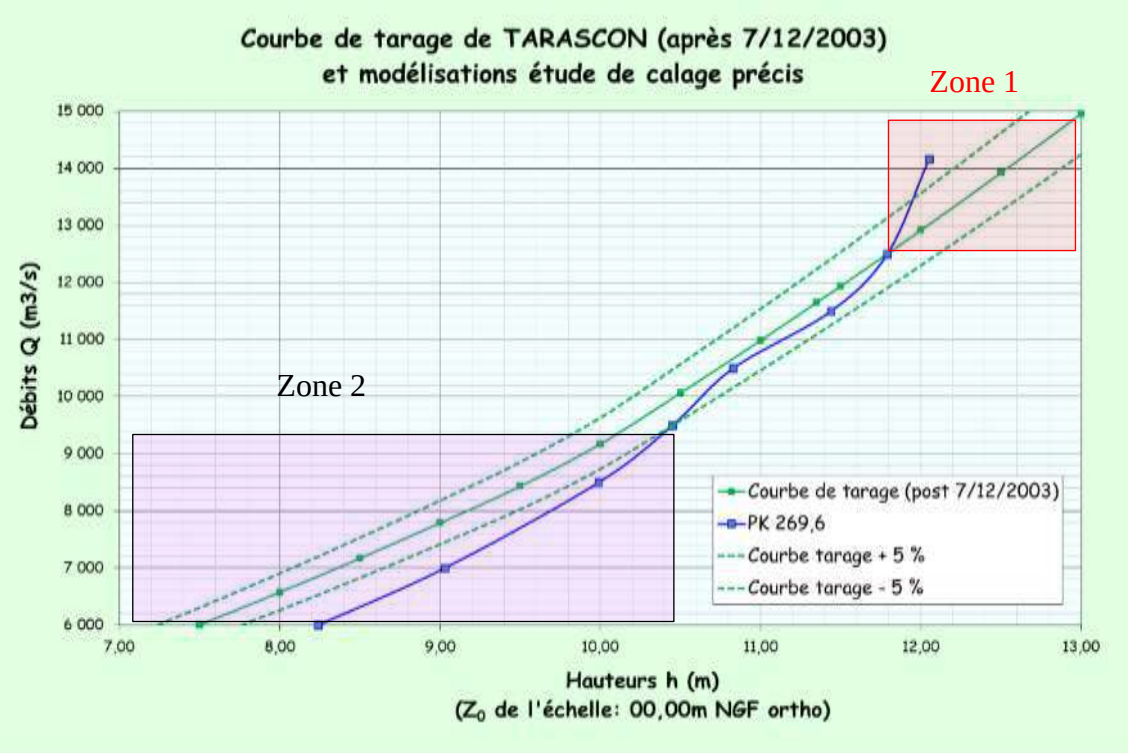


Figure 38. Courbe de tarage en vigueur à Beaucaire/Tarascon, fourchettes de précision et niveaux modélisés dans le cadre de l'étude de calage

Les cartes ci-après représentent les niveaux de protection des sous zones protégées en l'état actuel :

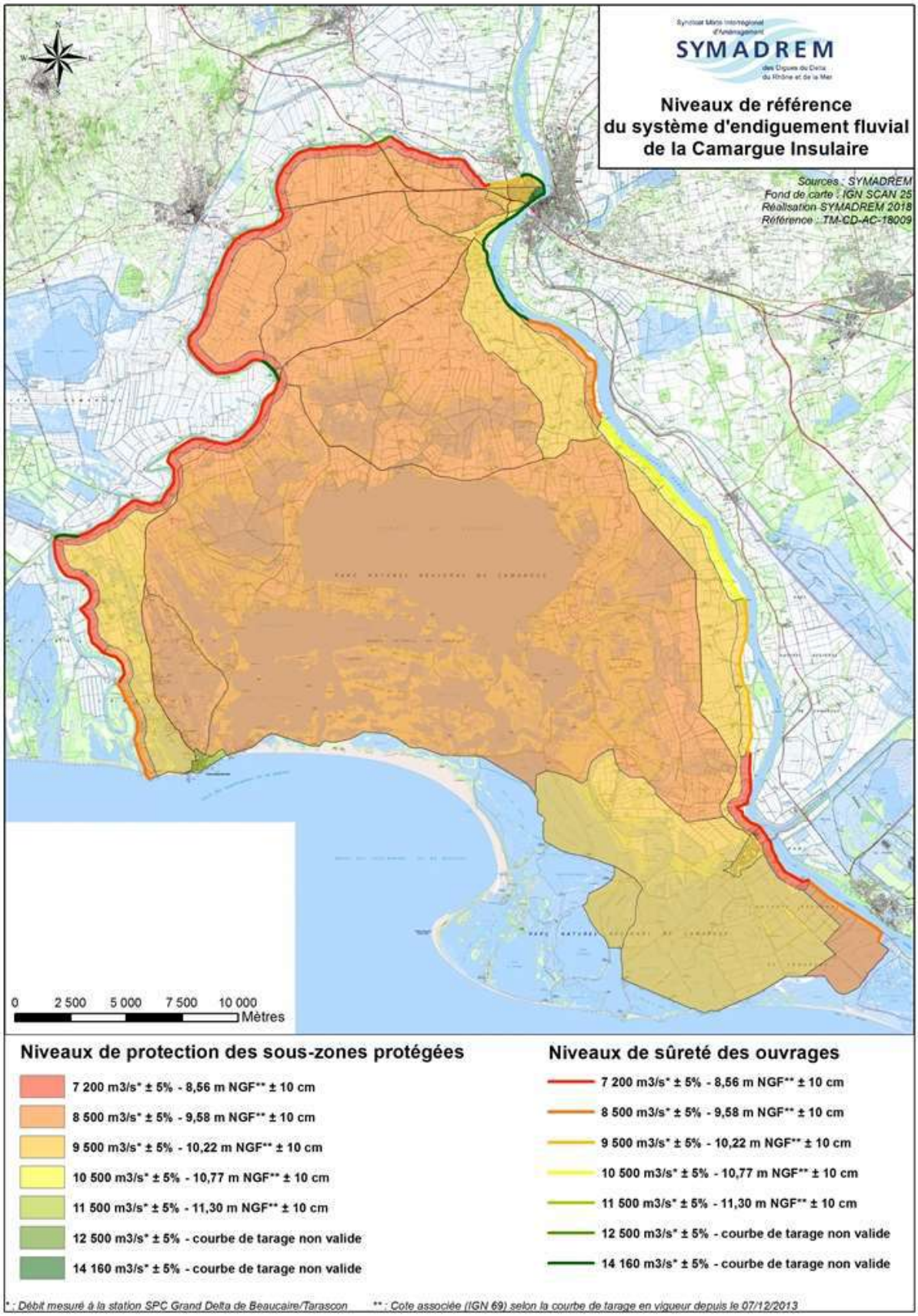


Figure 39. Niveaux de protection des sous-zones protégées (probabilité résiduelle de brèche de 5 % pour les crues considérées)

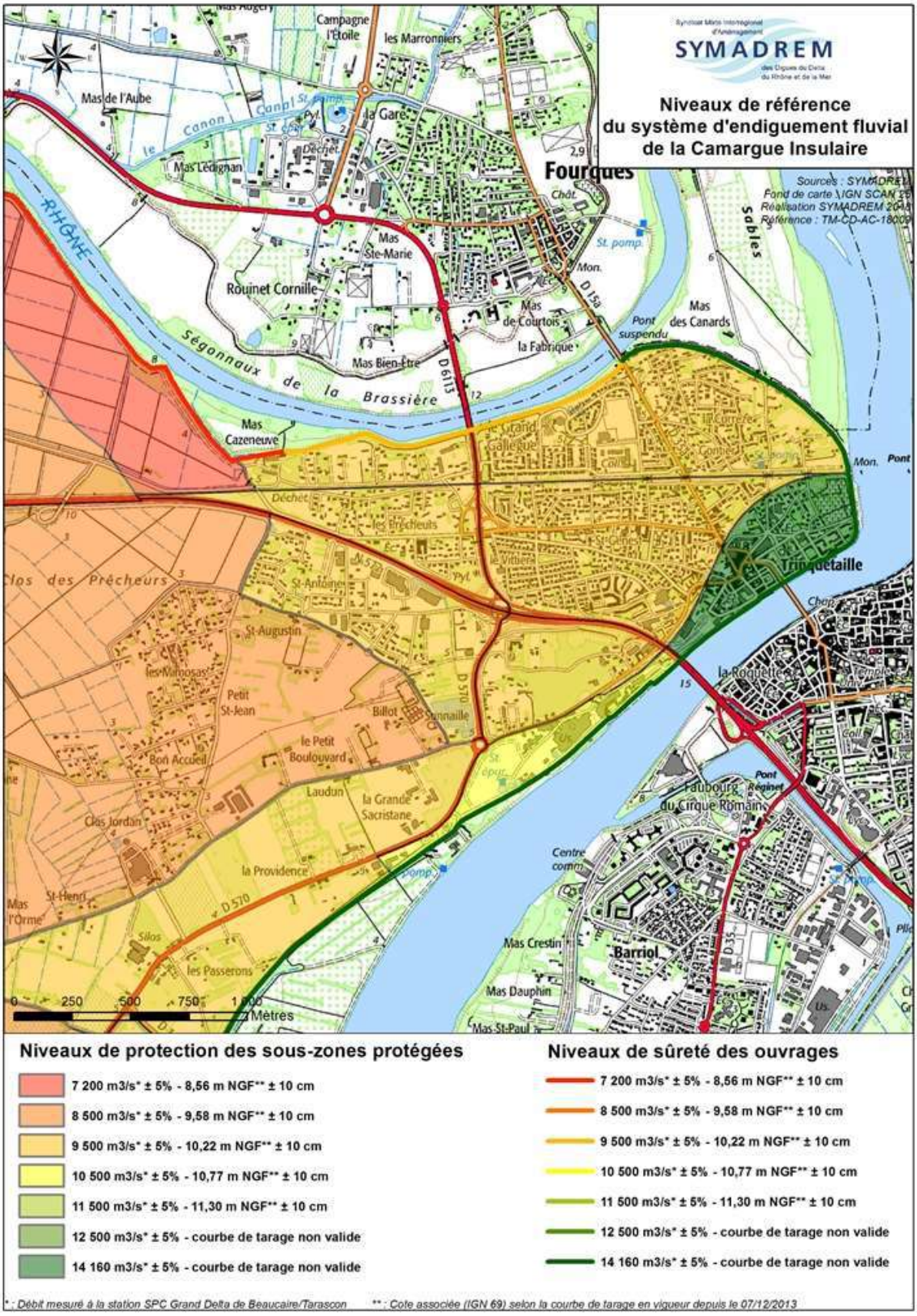


Figure 40. Niveaux de protection au droit du quartier de Trinquetaille (probabilité résiduelle de brèche de 5 % pour les crues considérées)

7 FONCTIONNEMENT DU SYSTEME EN FONCTION DES CRUES

7.1 DEFINITION DES NIVEAUX CARACTERISTIQUES

Pour l'évaluation des risques liés aux ouvrages, 4 niveaux sont définis :

- Le niveau de protection d'un ouvrage correspond au niveau à partir duquel des entrées d'eau dans le système doivent être pris en compte. Ces entrées d'eau peuvent s'effectuer par brèche ou par déversement sur les digues (cas des digues résistantes à la surverse). Ce niveau est confondu avec le niveau de sûreté infra, quand le système ne comporte pas de digue résistante à la surverse ou quand la probabilité de brèche est supérieure à 5 % au moment des premiers débordements sur les tronçons prévus à cet effet ;
- Le niveau de sûreté d'un ouvrage correspond au niveau à partir duquel des entrées d'eau par brèche doivent être considérées. Ce niveau correspond à une probabilité résiduelle de brèche au plus de 5 %, conformément à l'arrêté du 7 avril 2017 sur les études de dangers ;
- Le niveau de danger d'un ouvrage correspond à une probabilité de brèche de 50 %. Ce niveau va permettre de définir le scénario dit n°3 défini dans l'arrêté susvisé pour permettre aux services en charge des secours aux personnes de préparer la gestion de crise ;
- Le niveau de submersion d'un ouvrage correspond à l'atteinte par le cours d'eau du niveau de la crête de digue.

Pour l'évaluation des risques dans la zone protégée, 2 niveaux sont définis

- Le niveau de protection des personnes résidant dans une zone protégée correspond au niveau de protection défini à l'article R.214-119-1 du Code de l'Environnement. Il correspond à la situation « pieds secs » des personnes résidant dans la zone protégée ;
- Le niveau de sécurité des personnes résidant dans une zone protégée correspond aux venues d'eau peu dangereuses (1er niveau), dangereuses (2ème niveau) et très dangereuses (3ème niveau).

Conformément à l'arrêté précité, les zones de venues d'eau non dangereuses correspondent à des hauteurs d'eau inférieures à 1 m et des vitesses d'écoulement inférieures à 0,5 m/s ; et les zones de venues d'eau dangereuses à des hauteurs d'eau supérieures à 1 m ou des vitesses d'écoulement supérieures à 0,5 m/s. Les zones de venues d'eau très dangereuses non quantifiées réglementairement correspondent aux hauteurs d'eau supérieures à 2 m ou vitesse d'écoulement supérieures à 1 m/s. La figure ci-dessus illustre la dangerosité des venues d'eau en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse des écoulements

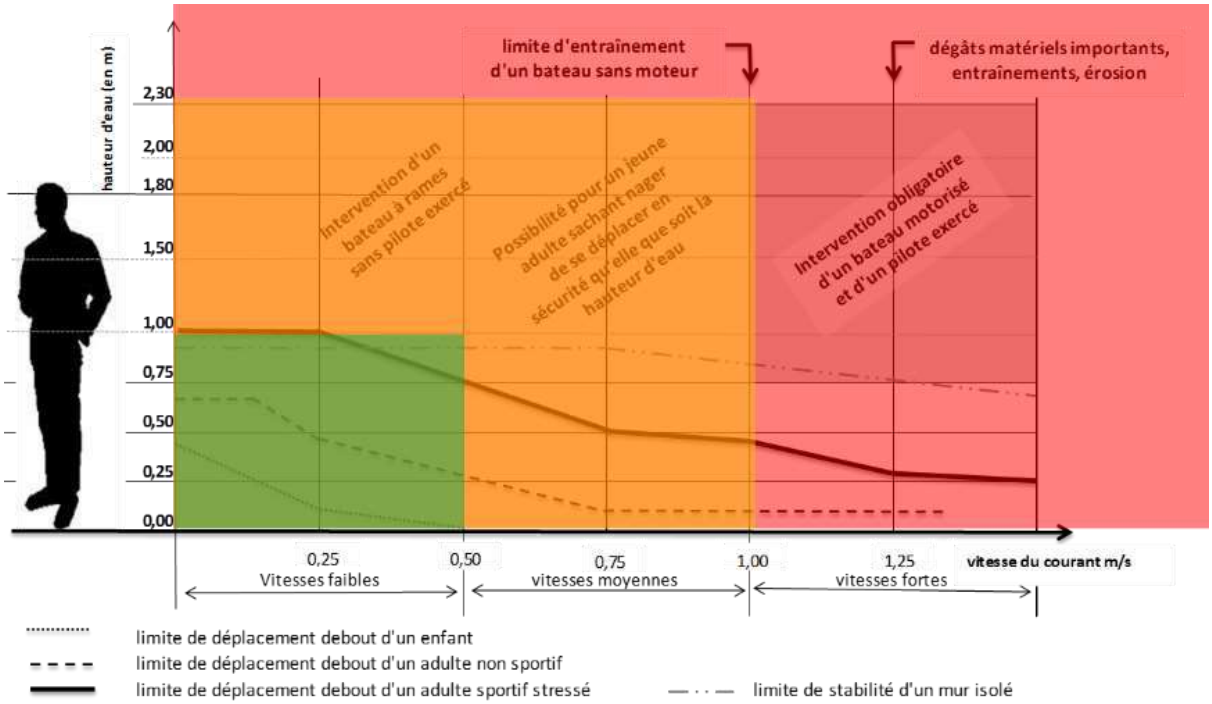


Figure 41. Caractérisation de la dangerosité des venues d'eau (vert : peu dangereux, orange : dangereux et rouge : très dangereux)

7.2 SCENARIO N°1 : FONCTIONNEMENT DU SYSTEME JUSQU'A L'ATTEINTE DU NIVEAU DE PROTECTION

Dans le cas du système d'endiguement fluvial de la Camargue Insulaire qui ne dispose pas de tronçon de digue résistant à la surverse, l'inondation de la zone protégée ne peut s'effectuer que par brèche, le niveau de protection des ouvrages est confondu avec le niveau de sûreté.

Tant que le niveau du Rhône est inférieur au niveau de sûreté/protection des ouvrages, on considère qu'il n'y a pas d'entrées d'eau dans la zone protégée en provenance du système d'endiguement : le fleuve est contenu par les digues. La probabilité de brèche avant surverse est inférieure au seuil de 5 %. Quand la probabilité de brèche est supérieure au seuil de 5 % fixé par la réglementation, on considère que des entrées d'eau doivent être prises en compte.

La figure ci-après illustre le principe de fonctionnement

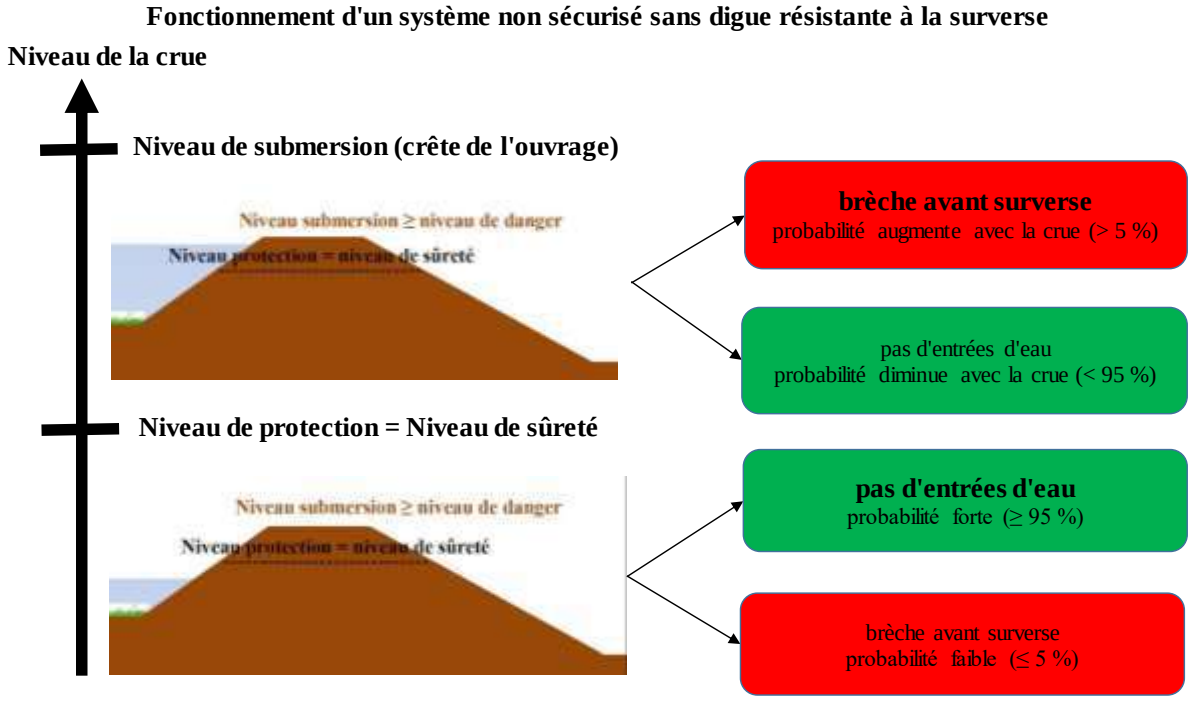


Figure 42. Fonctionnement du système d'endiguement Camargue Insulaire

La carte en page suivante donne par tronçon homogène de digue le débit à Beaucaire/Tarascon correspondant à l'atteinte du niveau de sûreté/protection des ouvrages.

On constate que lorsque que le débit dépasse le seuil de 7200 m^3/s à Beaucaire/Tarascon, la probabilité de brèche sur les digues du Petit Rhône rive gauche dépasse le seuil de 5 % (ce qui signifie également que la probabilité, que les digues ne cassent pas, descend en dessous de 95 %).

Historiquement, aucune brèche n'a été recensée pour cette intensité de crue. En revanche, des désordres notables (fuites) ont pu être observés.

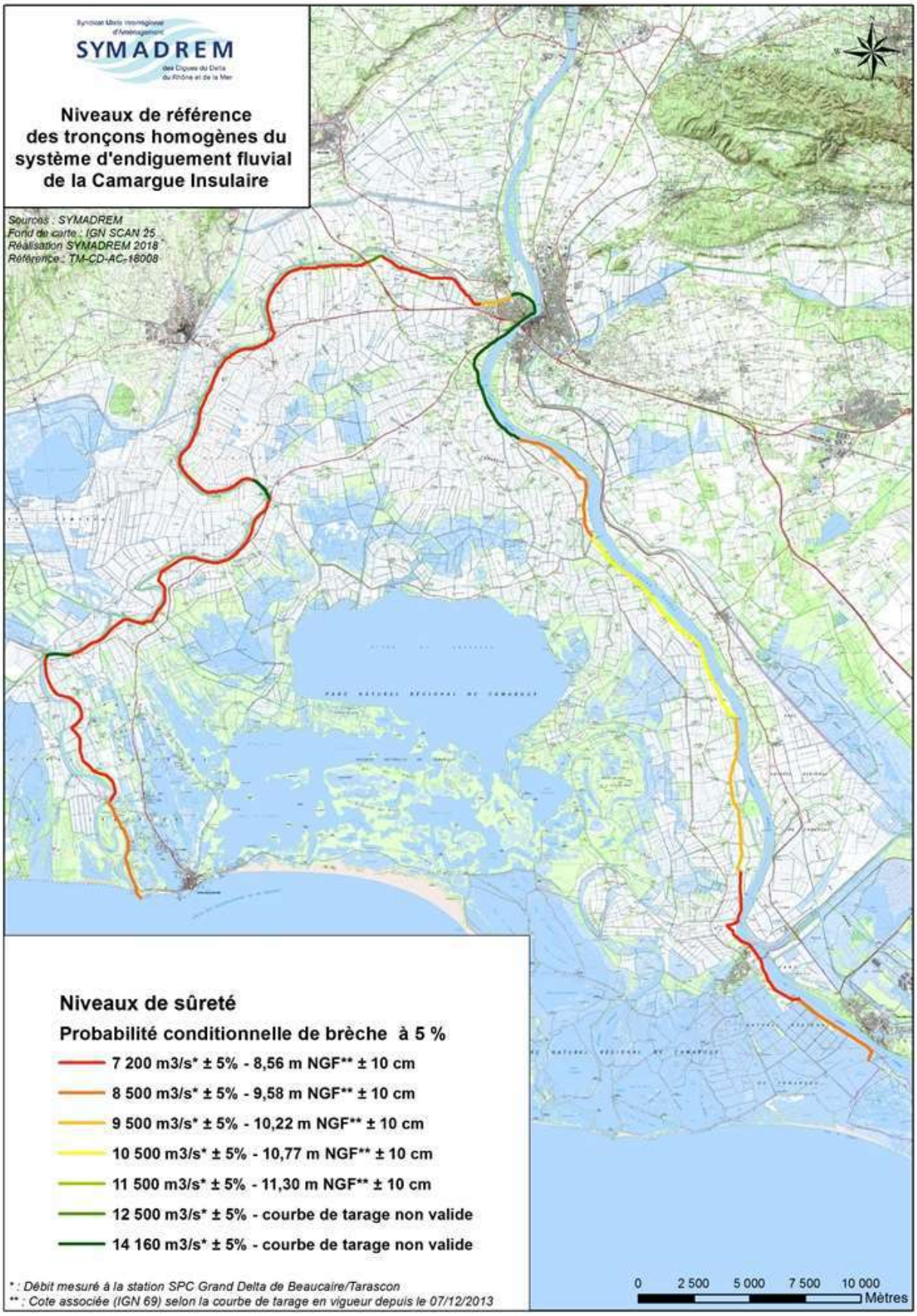


Figure 43. Camargue Insulaire : niveaux de protection ou de sûreté des digues

L'analyse des scénarios d'inondation a permis de déterminer les niveaux de protection des sous-zones protégées.

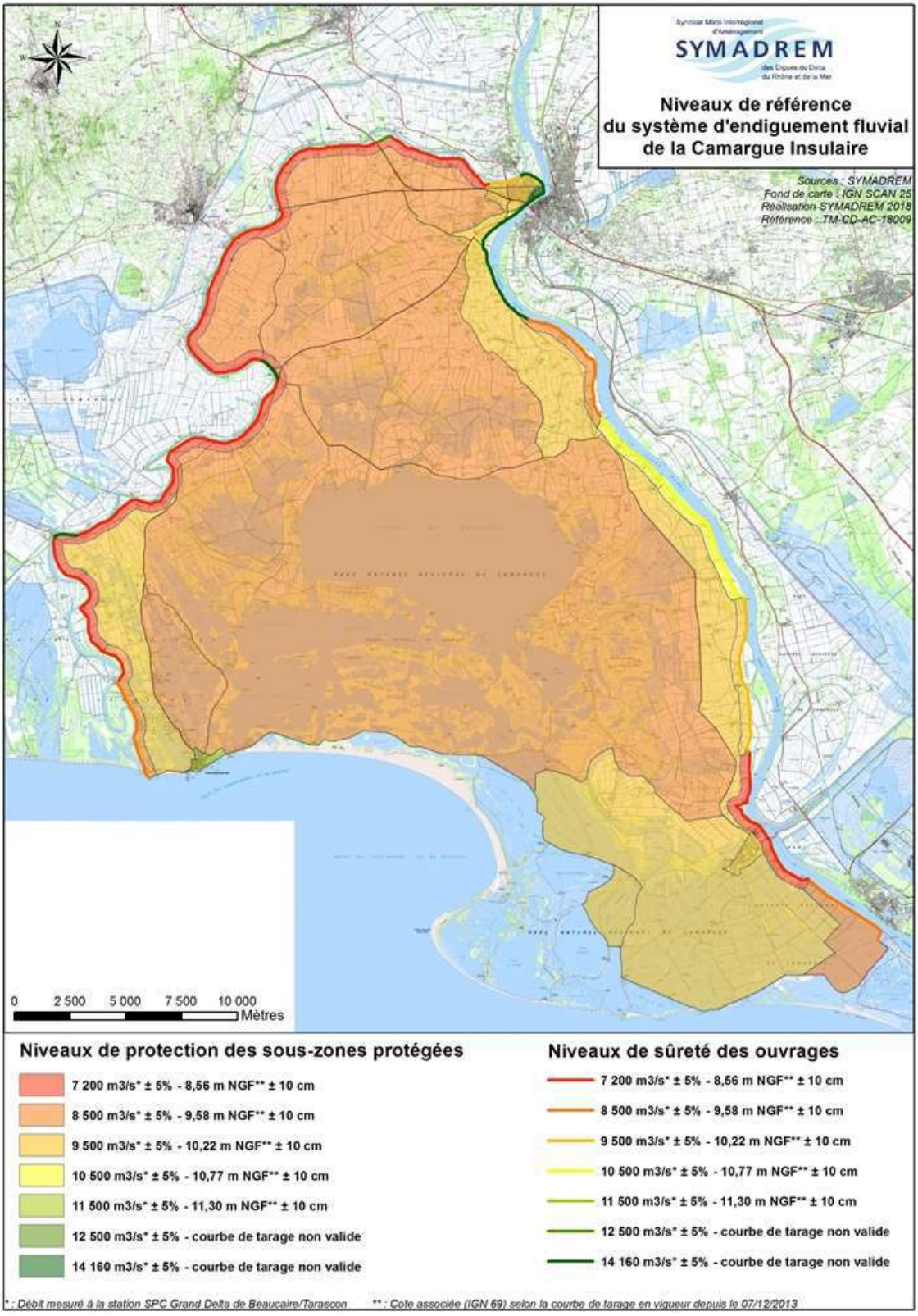


Figure 44. Niveaux de protection des sous-zones protégées
(probabilité résiduelle de brèche de 5 % pour les crues considérées)

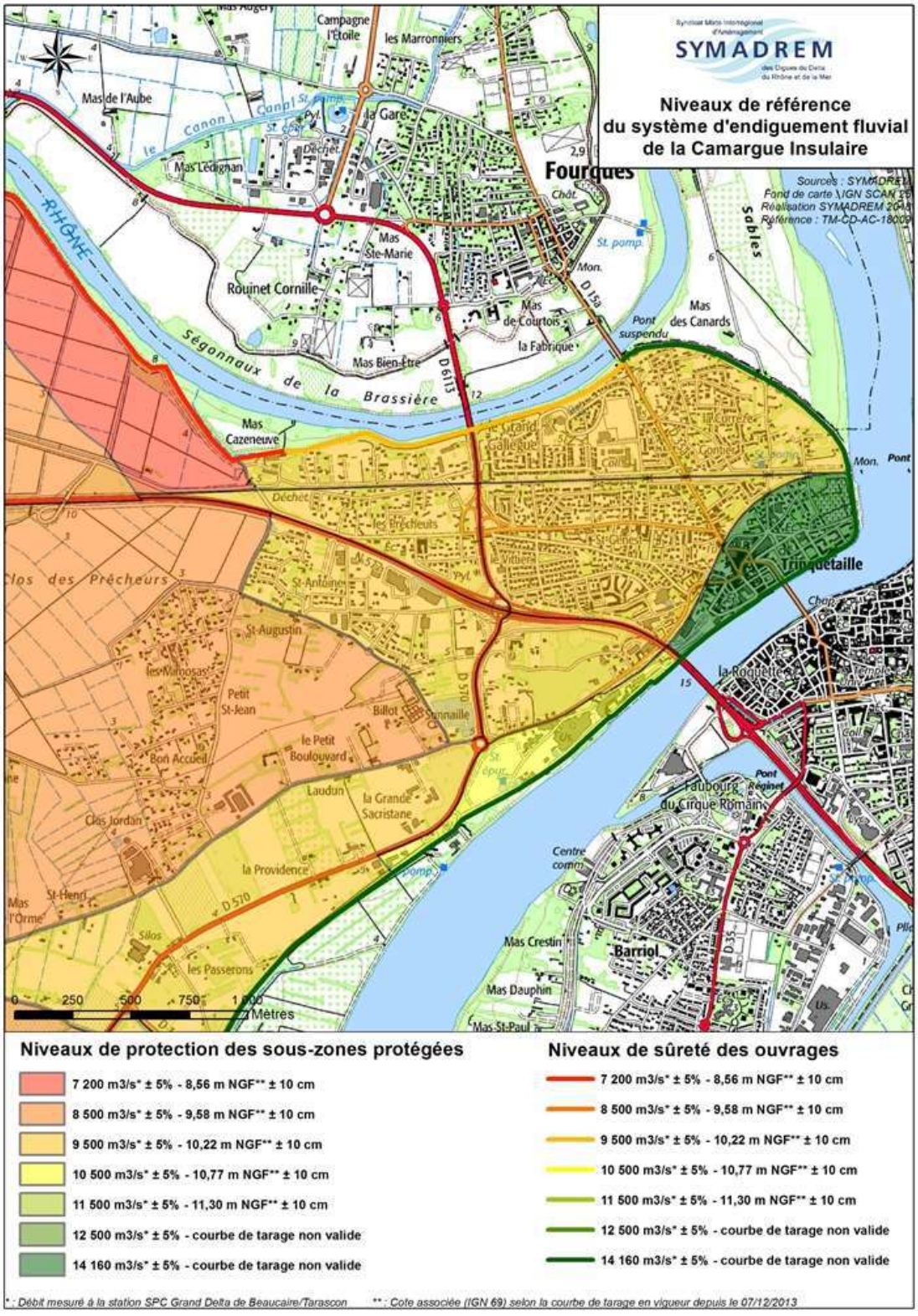


Figure 45. Niveaux de protection au droit du quartier de Trinquetaille (probabilité résiduelle de brèche de 5 % pour les crues considérées)

7.3 SCENARIO N°2 : DEFAILLANCE D'UN BATARDEAU OU D'UNE VANNE

Ce scénario correspond à la non mise en place ou la rupture d'un batardeau, ou à la non fermeture ou rupture d'une vanne d'un ouvrage hydraulique traversant.

7.3.1 Non fermeture ou rupture d'un batardeau

Les batardeaux sont mis en place par la ville d'Arles dès que le débit franchit 6000 m3/s, soit bien avant que l'eau n'atteigne le pied du batardeau. Le dispositif est inscrit dans le plan communal de sauvegarde de la ville. Il est mis en œuvre statistiquement tous les 2 ans (période de retour du débit de 6000 m3/s) et fonctionne bien. La probabilité de non fermeture est donc très faible.

Photo 3. Batardeau crue de novembre 2014

Ces batardeaux ont été dimensionnés pour résister à la crue exceptionnelle du Rhône, qui atteindrait un débit de 14 160 m^3/s. On rappelle que le débit de la crue de décembre 2003 était de 11 500 m^3/s, celui de mai 1856, 12 500 m^3/s et celui de novembre 1840 : 13 000 m^3/s.
Tous ces batardeaux sont équipés de dispositifs anti-vols (Cf. photo ci-dessous). Des poteaux disposés en face des passages batardables, empêchent hors période de crue la circulation de véhicules à quatre roues sur le chemin de halage. En période de crues, ces poteaux permettent d'éviter qu'un véhicule heurte par inadvertance ou volontairement un batardeau (Cf. photo ci-dessous).

Photo 1. Dispositif antivol (à gauche) et risque de choc et rupture du batardeau accru en cas d'absence des poteaux urbains (à droite)

Toutes les mesures ont été prises pour réduire les risques au minimum et à un niveau jugé comme acceptable.

En cas de rupture, les possibilités d'intervention sont jugées importantes. Le volume maximal d'entrée d'eau massive serait estimé à 100 000 m3, ce qui équivaudrait pour le centre du quartier Trinquetaille à une hauteur moyenne maximale de 40 cm.

7.3.2 Non fermeture ou rupture d'une

La fermeture des ouvrages hydrauliques est assurée par les propriétaires des ouvrages. Le contrôle de cette fermeture est assuré par les gardes digues. La non fermeture des ouvrages hydrauliques peut occasionner une inondation lente qui sera perceptible, dès la mise en charge des ouvrages. L'absence de fermeture lors de crues importantes a été par le passé observée. Lors de la détection de la non-fermeture, le garde digues ou si nécessaire la direction du SYMADREM prévienne le propriétaire. Si cette fermeture n'est techniquement pas possible, il est procédé à une intervention d'urgence, qui consiste en la mise en œuvre préférentiellement côté amont de blocs de 3 à 6 tonnes ou de big-bags équivalents.

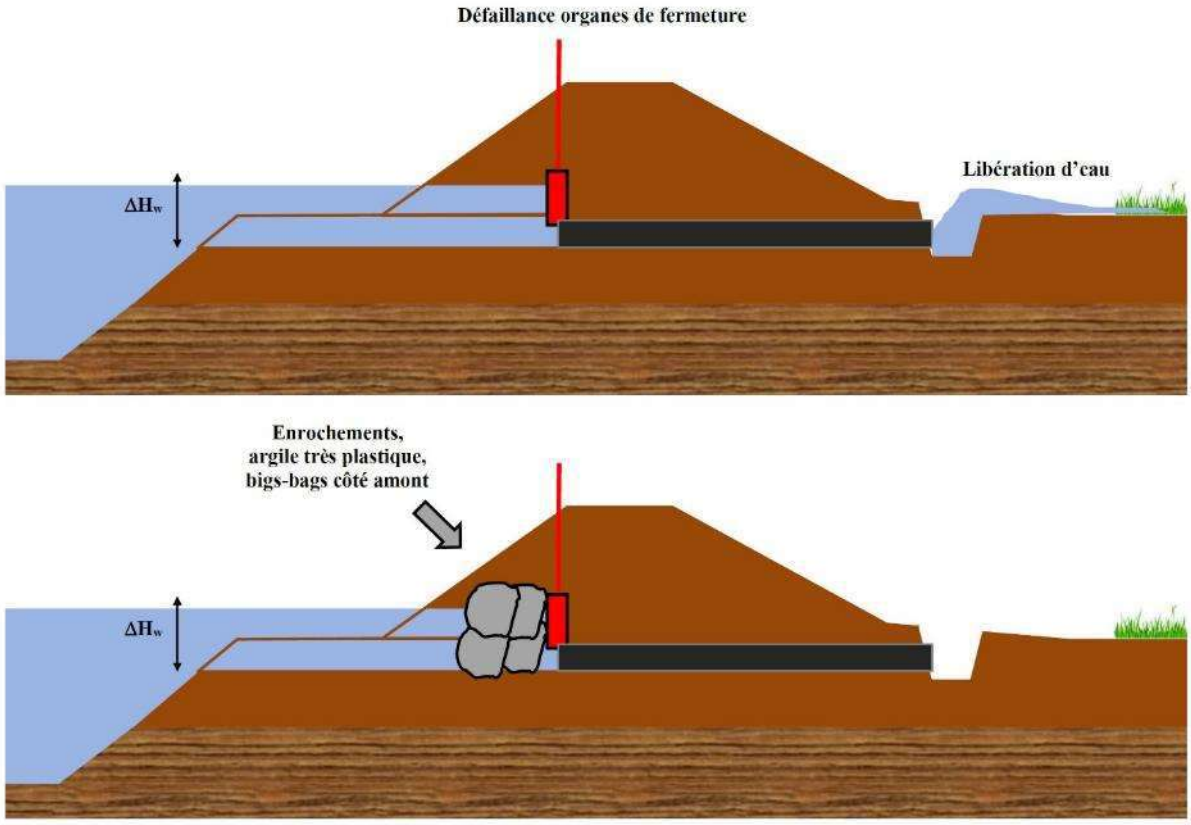


Figure 46. Principe d'intervention en cas de non fermeture ou rupture d'un organe de fermeture

Photo 4. Intervention au droit d'un ouvrage traversant

7.4 SCENARIO N° 3 : BRECHE PROBABLE DANS LE SYSTEME D'ENDIGUEMENT

Conformément à la réglementation, les scénarios d'inondation (par brèche) correspondant à une probabilité de brèche d'au moins 50 % pour un ouvrage, ont été modélisés pour différentes intensités de crues. La carte et le tableau ci-après donnent les niveaux de danger par tronçon homogène en fonction du débit à Beaucaire/Tarascon.

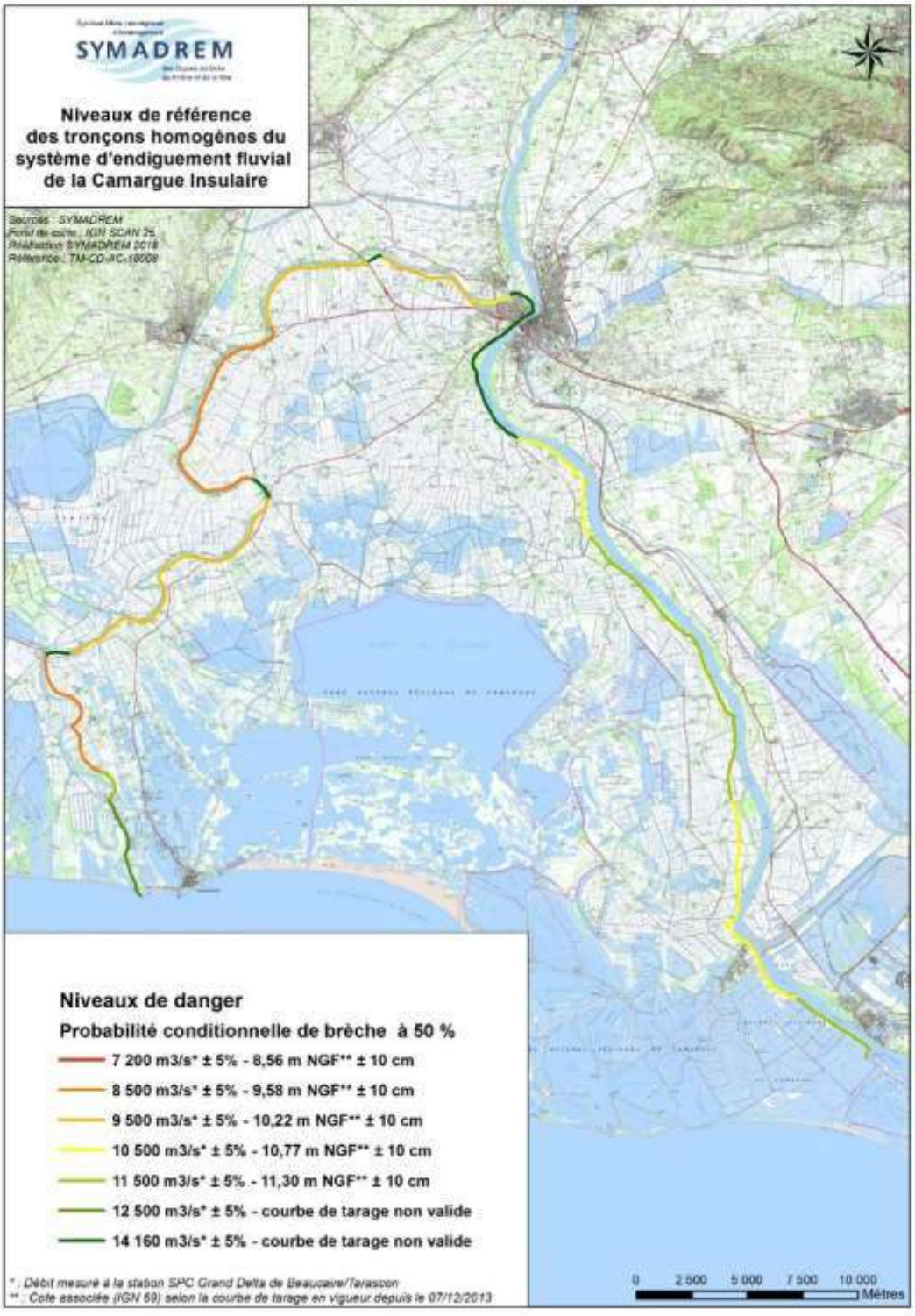


Figure 47. Système d'endiguement fluvial Camargue Insulaire – niveaux de danger des ouvrages (probabilité de brèche 50 %)

Globalement le débit de 8500 m^3/s constitue la valeur seuil à partir de laquelle la probabilité de brèche devient supérieure à divers endroit du système.

7.4.1 Fonctionnement probable à 50 % ou plus pour une crue de 8500 m^3/s

Pour une crue dépassant le seuil de 8500 m^3/s, les tronçons de digue susceptibles de rompre (Probabilité de brèche ≅ 50 %) sont localisés sur la rive gauche du Petit Rhône entre le Pont de Cavalès et Albaron, et en aval du Pont de Sylvéréal jusqu'au Mas d'Icard.

La carte illustrant :

- les zones peu dangereuses (hauteur d'eau < 1 m et vitesse < 0,5 m/s)
- les zones dangereuses (1 m < hauteur d'eau < 2 m et 0,5 m/s < vitesse < 1,0 m/s)
- les zones très dangereuses (hauteur d'eau > 2 m ou vitesse > 1,0 m/s)

figure en page suivante.

Le nombre de personnes concernées par l'ensemble des scénarios possibles (cumul des scénarios) est estimé à :

- Nombres de personnes situées en zones très dangereuses : 74, dont 30 considérés comme vulnérables (moins de 18 ans ou plus de 65 ans) ;

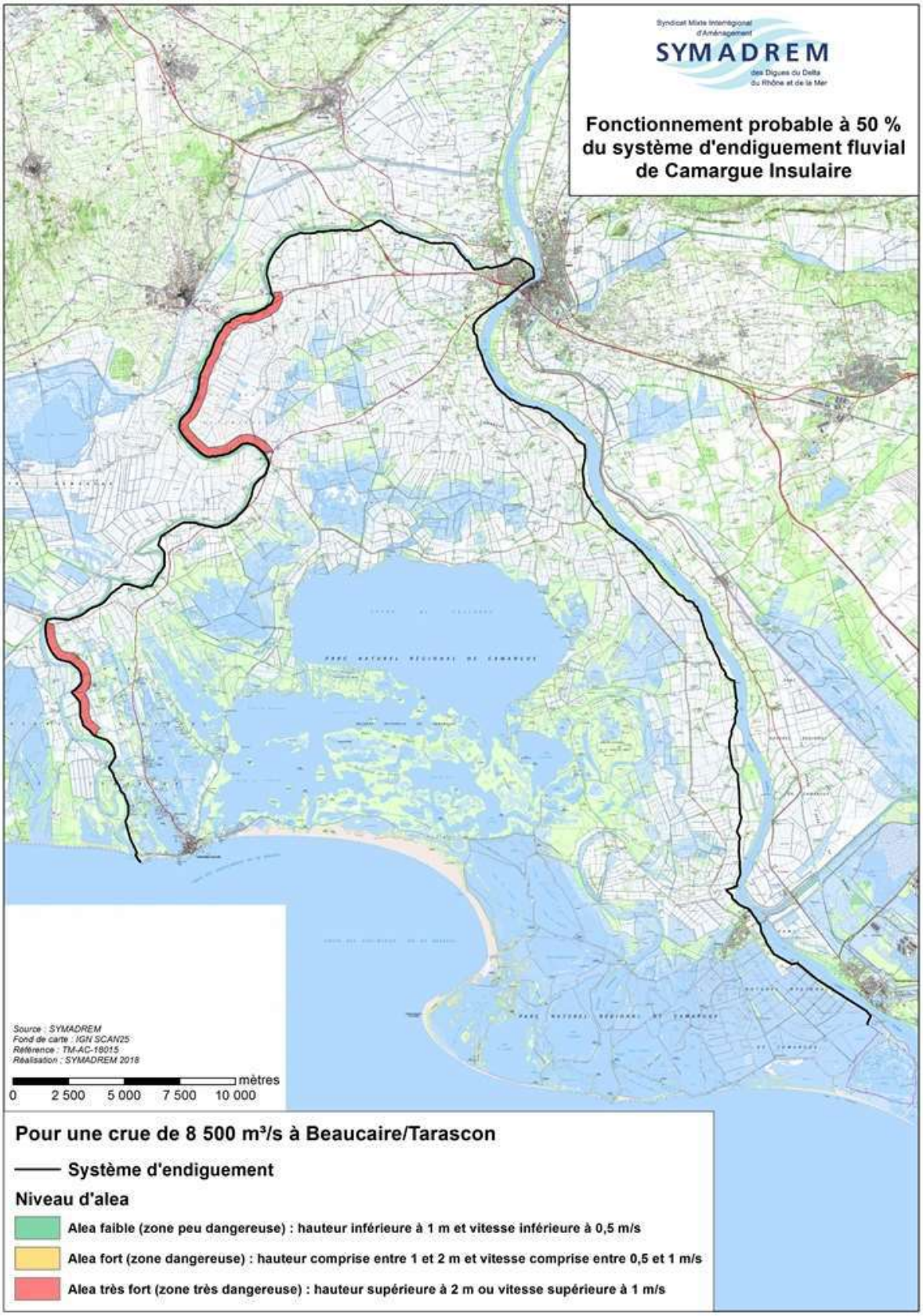


Figure 48. Crue 8500 m^3/s - fonctionnement probable à 50 % et dangerosité des sous-zones protégées

7.4.2 Fonctionnement probable à 50 % ou plus pour une crue de 9500 m^3/s

Pour une crue dépassant le seuil de 9500 m^3/s, à l'exception des tronçons de digues confortés après 1994, l'ensemble des digues du Petit Rhône rive gauche depuis l'aval du mas de Cazeneuve (Trinquetaille) jusqu'au mas d'Icard (Saintes-Maries-de-la-Mer) présente une probabilité de brèche d'au moins 50 %, Une inondation probable à 50 % par rupture des digues du Petit Rhône est à prévoir.

La carte illustrant :

- les zones peu dangereuses (hauteur d'eau < 1 m et vitesse < 0,5 m/s)
- les zones dangereuses (1 m < hauteur d'eau < 2 m et 0,5 m/s < vitesse < 1,0 m/s)
- les zones très dangereuses (hauteur d'eau > 2 m ou vitesse > 1,0 m/s)

figure en page suivante.

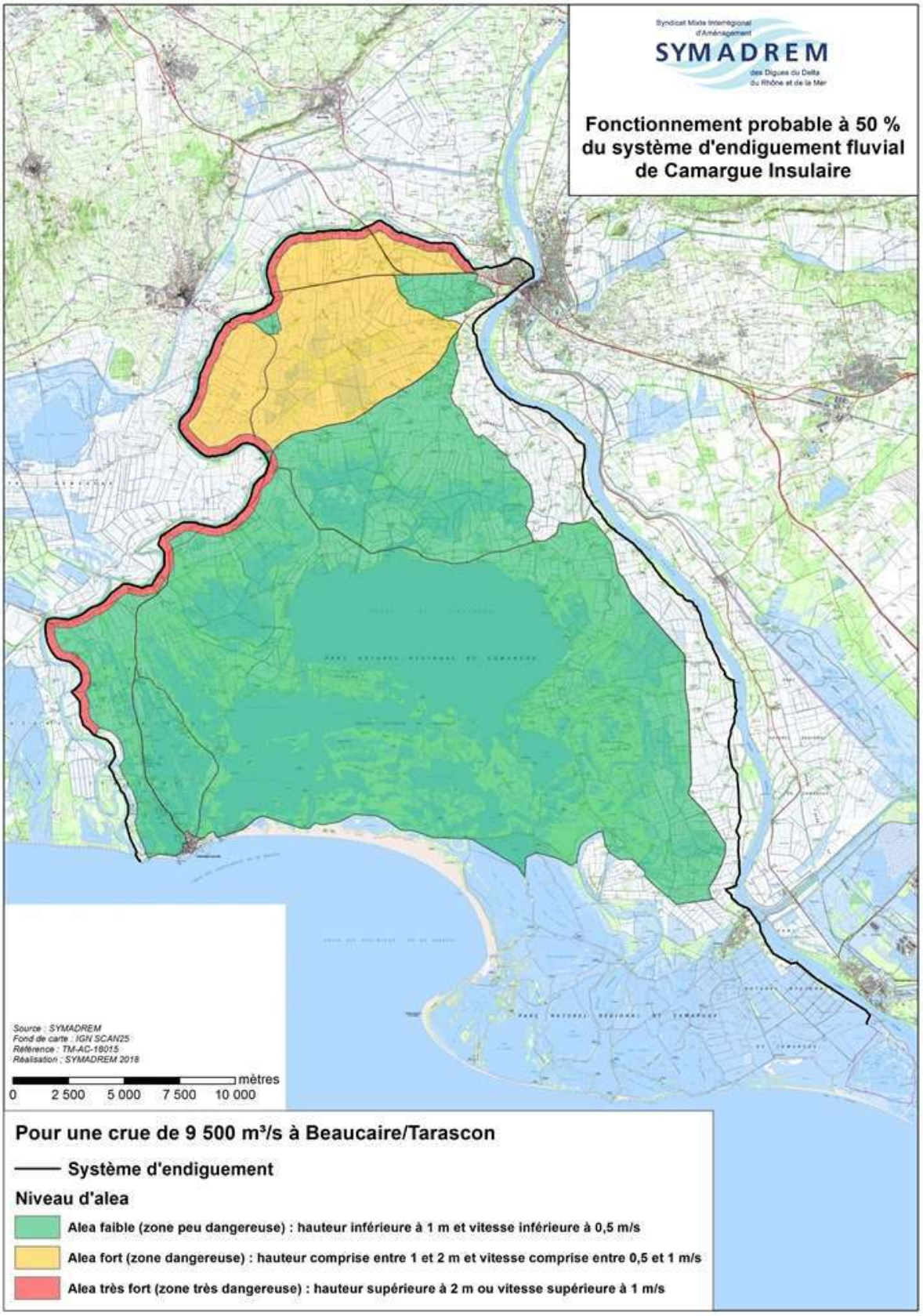
Globalement toutes les bandes de sécurité des digues du Petit Rhône (largeur 400 m) peuvent générer un aléa très dangereux. Les sous-zones situées au nord du remblai de l'A54, de la RN113 et du remblai ferroviaire du Pont de Cavalès peuvent générer par remous des zones d'aléa dangereux. Les marais de Saliers et du Pont de Rousty du fait de leur faible altimétrie peuvent également représenter des zones dangereuses.
Le quartier de Gimeaux peut être inondé par remous du fait de sa faible altimétrie. Il en est de même pour les marais de la Grande Mar ou les secteurs en bordure du Vaccarès. Le village d'Albaron peut être en zone d'aléa faible en cas de brèches situées juste en amont ou en aval du secteur conforté en 2004. Il en est de même pour le village de Saliers en cas de brèche juste en aval du Pont de Cavalès au droit de la brèche de Rigodon de 1856.

L'étang de Ginès pourrait être en zone peu dangereuse en cas de brèche sur le Petit Rhône aval.

On citera également que pour cette gamme de crue, le niveau de sûreté (probabilité 5 %) de la digue du Petit Rhône rive gauche comprise entre le Pont Suspendu et le Mas de Cazeneuve est dépassé, ce qui commence à représenter un danger grave pour les habitants du quartier de Trinquetaille.

Le nombre de personnes concernées par l'ensemble des scénarios possibles (cumul des scénarios) est estimé à :

- Nombres de personnes situées en zones très dangereuses : 200, dont 80 considérés comme vulnérables (moins de 18 ans ou plus de 65 ans) ;
- Nombres de personnes situées en zones dangereuses : 300, dont 100 vulnérables ;
- Nombres de personnes situées en zones peu dangereuses : 2500, dont 1000 vulnérables.



Crue 9500 m^3/s - fonctionnement probable à 50 % et dangerosité des sous-zones protégées

7.4.3 Fonctionnement probable à 50 % ou plus pour une crue de 10500 m³/s

Pour une crue dépassant le seuil de 10500 m³/s, à l'exception des tronçons de digues confortés après 1998, l'ensemble des digues du Petit Rhône rive gauche depuis le pont suspendu jusqu'au mas d'Icard présente une probabilité de brèche d'au moins 50 %, Une inondation probable à 50 % par rupture des digues du Petit Rhône est à prévoir. On notera la rupture probable à 50 % du tronçon de digue de Trinquetaille pour cette occurrence de crue.
Les digues du Grand Rhône Rive Droite au droit de Salin de Giraud ont une probabilité de 50 % de rompre ou d'être submergées. Dans les deux cas, à l'exception d'une brèche sur le Petit Rhône ou sur la rive opposée du Grand Rhône, l'inondation de Salin de Giraud est certaine. La digue du Grand Rhône rive droite Montlong-Beaujeu a également une probabilité de 50 % de rompre.

La carte illustrant :

- les zones peu dangereuses (hauteur d'eau < 1 m et vitesse < 0,5 m/s)
- les zones dangereuses (1 m < hauteur d'eau < 2 m et 0,5 m/s < vitesse < 1,0 m/s)
- les zones très dangereuses (hauteur d'eau > 2 m ou vitesse > 1,0 m/s)

figure en page suivante.

Globalement, les bandes de sécurité des digues du Petit Rhône Rive Gauche et du Grand Rhône Rive droite à l'exception des tronçons confortés après 1998 et des secteurs compris entre Beaujeau et BoisVerdun sur le Grand Rhône sont localisées en zones très dangereuses. Le quartier de Trinquetaille est également en zone très dangereuse à l'exception du centre du quartier qui bénéficie d'une altimétrie plus favorable et qui se retrouve hors d'eau. Les marais de Saliers et du Pont de Rousty se retrouvent également sous des hauteurs d'eau supérieures à 2 m.

Le quartier de Gimeaux, Saint Antoine Billot ainsi que les villages de Saliers, du Sambuc et de Salin de Giraud, qui concentrent un certain nombre d'enjeux se trouvent en zones dangereuses. Le centre urbain des Saintes-Maries-de-la-Mer, la friche industrielle des Papeteries Etienne et le centre de Trinquetaille sont quant à eux hors d'eau.

Les autres zones dangereuses sont situées au nord de l'A54, de la RN113 et du remblai ferroviaire de Cavalès. Elles sont également dans les secteurs de Montlong, Etang de Vaccarès, de la Ginès et les Marais du Grand Mar, les Salins du Midi et.

Les autres zones inondées mais en situation jugée non dangereuses sont la zone humide de Trinquetaille, la Grande Sacristane, le secteur Sud-Est des Salins du Midi, l'Etang des Launes, le vieux Rhône et paradoxalement les bandes de sécurité des digues du Grand Rhône pour lesquelles les niveaux de danger n'ont pas été atteints et qui bénéficie d'une altimétrie avantageuses liée au bourrelet alluvial.

Le nombre de personnes concernées par l'ensemble des scénarios possibles (cumul des scénarios) est estimé à :

- Nombres de personnes situées en zones très dangereuses : 5100, dont 2100 considérés comme vulnérables (moins de 18 ans ou plus de 65 ans) ;
- Nombres de personnes situées en zones dangereuses : 4800, dont 1800 vulnérables ;

- Nombres de personnes situées en zones peu dangereuses : 900, dont 400 vulnérables.

Soit un nombre total de 10800 sinistrés potentiels, dont 4300 considérés comme vulnérables.

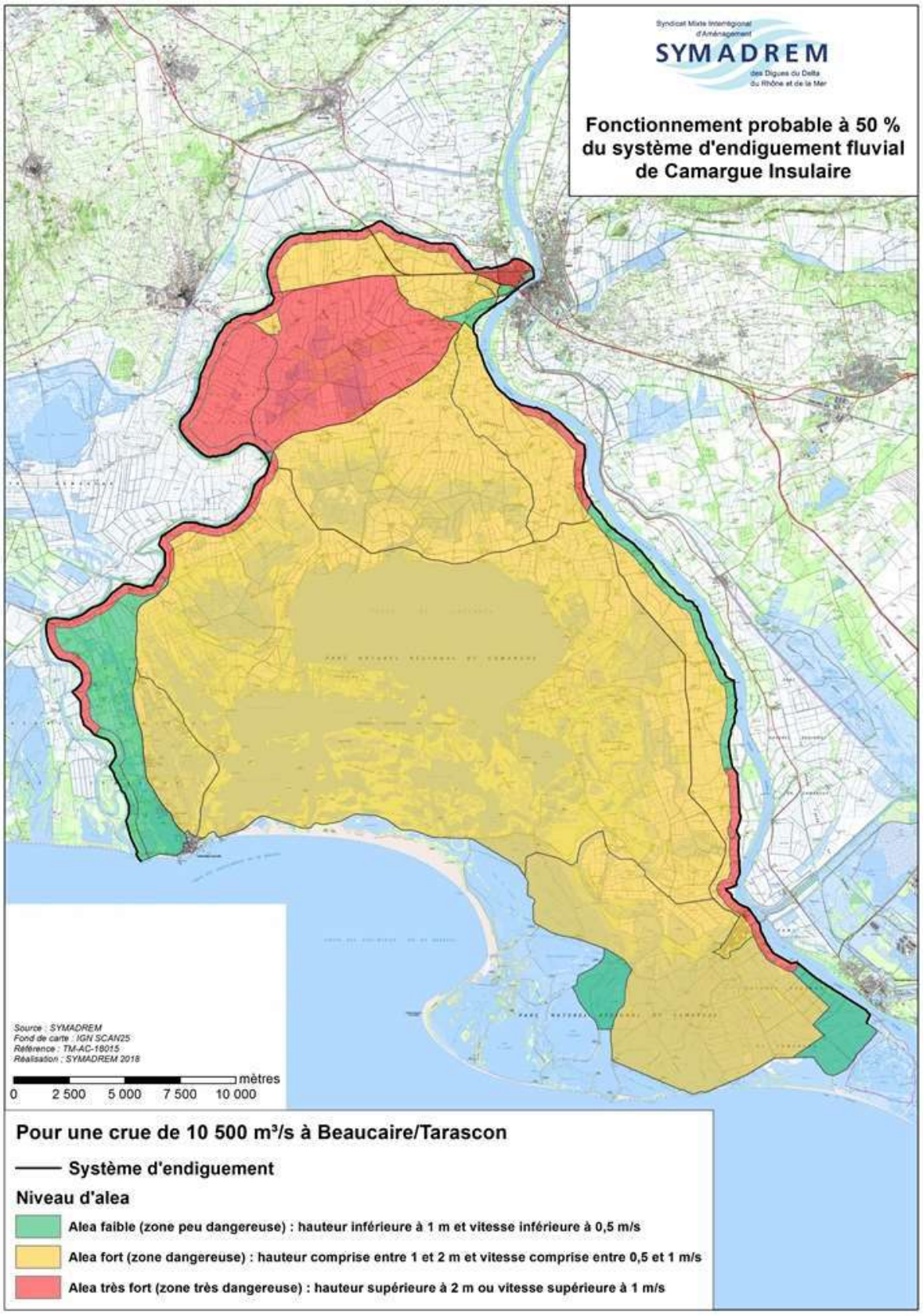


Figure 49. Crue 10500 m^3/s - fonctionnement probable à 50 % et dangerosité des sous-zones protégées

Quelques scénarios d'inondation modélisés sont également présentés.

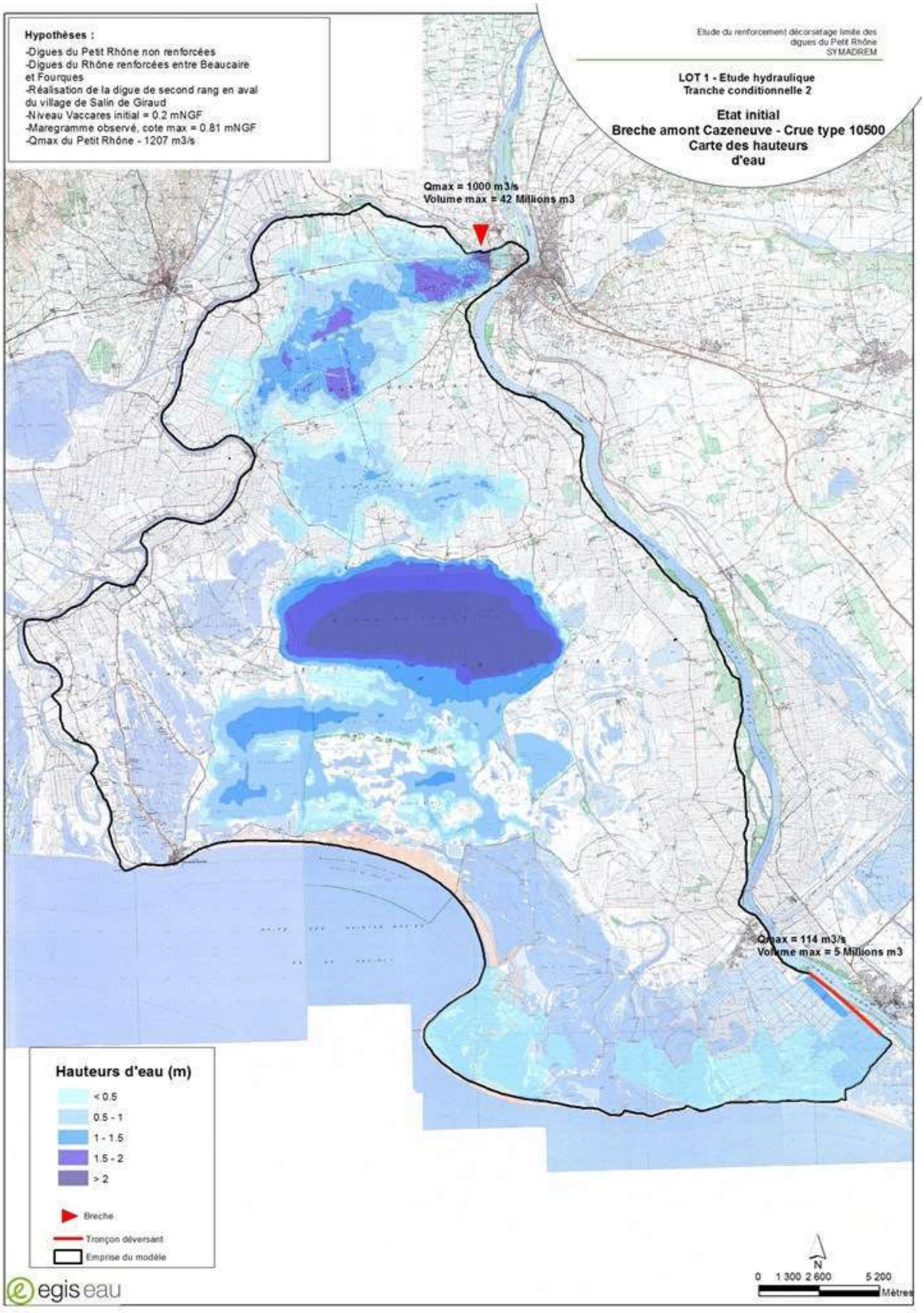


Figure 50. Crue à 10500 m^3/s – Modélisation d'une brèche à Cazeneuve

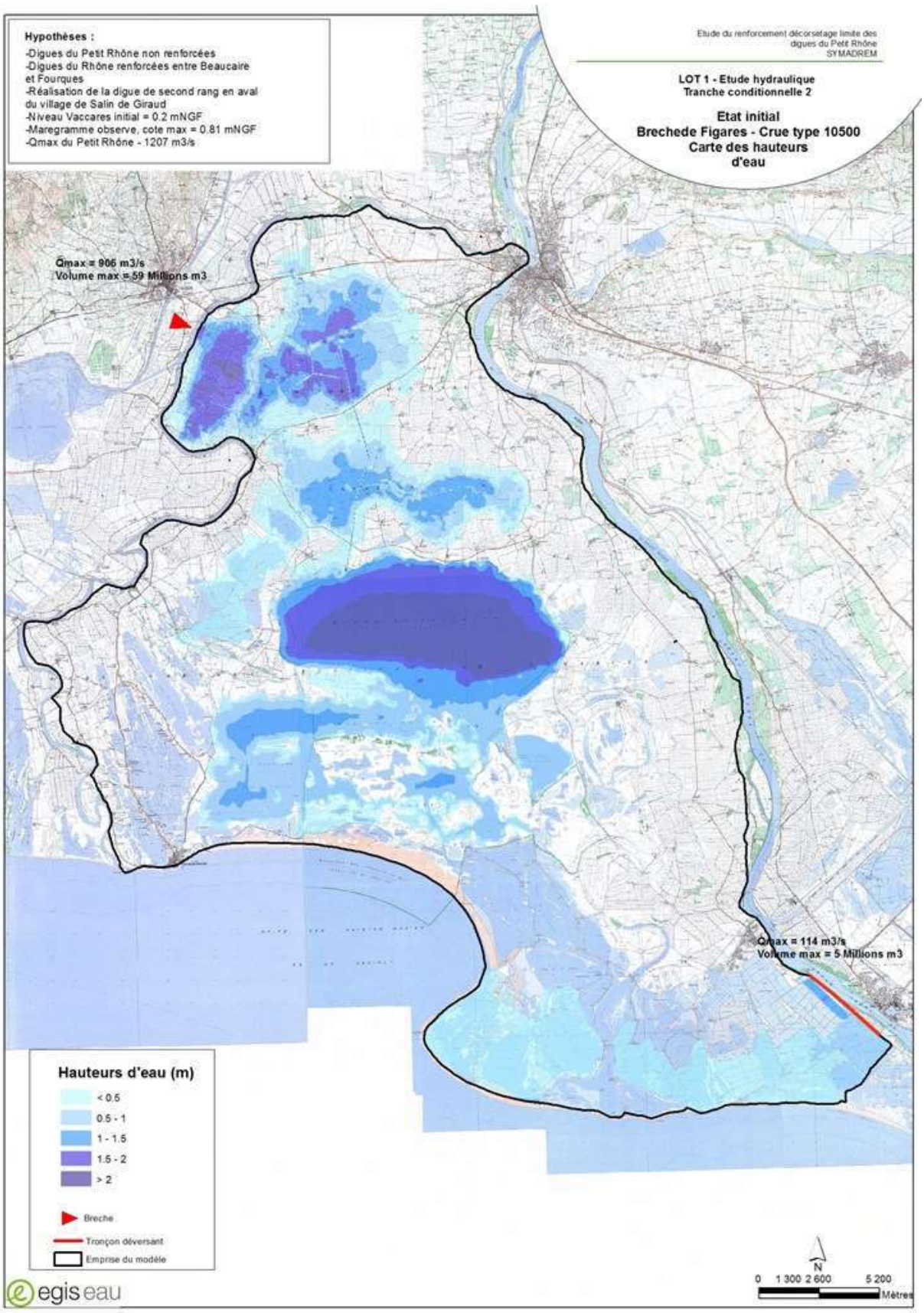


Figure 51. Crue à 10500 m^3/s – Modélisation d'une brèche à Figarès

7.4.4 Fonctionnement probable à 50 % ou plus pour une crue de 11500 m³/s

Pour une crue dépassant le seuil de 11500 m³/s, la probabilité de brèche sur les digues du Petit Rhône rive gauche augmente encore. Les digues du Grand Rhône Rive Droite de Petite Montlong à l'embouchure ont une probabilité de 50 % de rompre ou d'être submergées pour la partie située au droit de Salin de Giraud. Dans les deux cas, à l'exception d'une brèche sur le Petit Rhône ou sur la rive opposée du Grand Rhône, l'inondation de Salin de Giraud est certaine.
La carte illustrant :

- les zones peu dangereuses (hauteur d'eau < 1 m et vitesse < 0,5 m/s)
- les zones dangereuses (1 m < hauteur d'eau < 2 m et 0,5 m/s < vitesse < 1,0 m/s)
- les zones très dangereuses (hauteur d'eau > 2 m ou vitesse > 1,0 m/s)

figure en page suivante.

Globalement, les bandes de sécurité des digues du Petit Rhône Rive Gauche et du Grand Rhône Rive droite à l'exception des tronçons confortés après 1998 sont localisées en zones très dangereuses. Le quartier de Trinquetaille est également en zone très dangereuse à l'exception du centre du quartier qui bénéficie d'une altimétrie plus favorable et qui se retrouve hors d'eau. Les marais de Saliers et du Pont de Rousty et le quartier de Gimeux se retrouvent également sous des hauteurs d'eau supérieures à 2 m, compte tenu de leur faible altimétrie.
Le quartier de la Grande Sacristane, de Saint Antoine Billot ainsi que les villages de Saliers, du Sambuc et de Salin de Giraud, qui concentrent un certain nombre d'enjeux se trouvent en zones dangereuses. Le centre urbain des Saintes-Maries-de-la-Mer et le centre de Trinquetaille sont quant à eux hors d'eau.
Les autres zones dangereuses sont situées au nord de l'A54, de la RN113 et du remblai ferroviaire de Cavalès. Elles sont également dans les secteurs de Montlong, Etang de Vaccarès, de la Ginès et les Marais du Grand Mar, les Salins du Midi.
Les autres zones inondées mais en situation jugée non dangereuses sont la zone humide de Trinquetaille, le secteur Sud-Est des Salins du Midi, l'Etang des Launes, le vieux Rhône.

Le nombre de personnes concernées par l'ensemble des scénarios possibles (cumul des scénarios) est estimé à :

- Nombres de personnes situées en zones très dangereuses : 5900, dont 2300 considérés comme vulnérables (moins de 18 ans ou plus de 65 ans) ;
- Nombres de personnes situées en zones dangereuses : 4200, dont 1600 vulnérables ;
- Nombres de personnes situées en zones peu dangereuses : 700, dont 300 vulnérables.

Soit un nombre total de 10800 sinistrés potentiels, dont 4200 considérés comme vulnérables.

Quelques scénarios d'inondation modélisés sont également présentés.

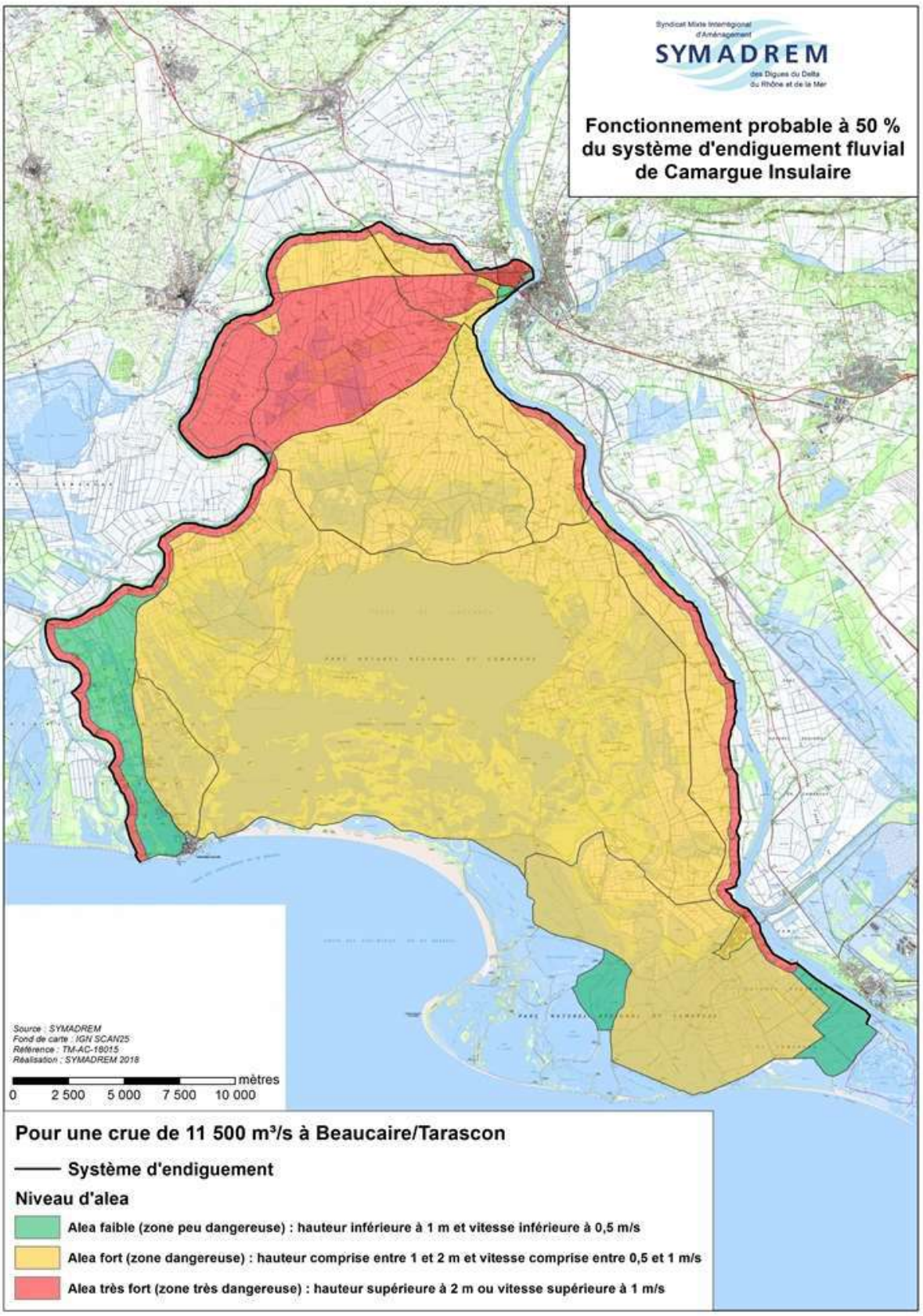


Figure 52. Crue 11500 m^3/s - fonctionnement probable à 50 % et dangerosité des sous-zones protégées

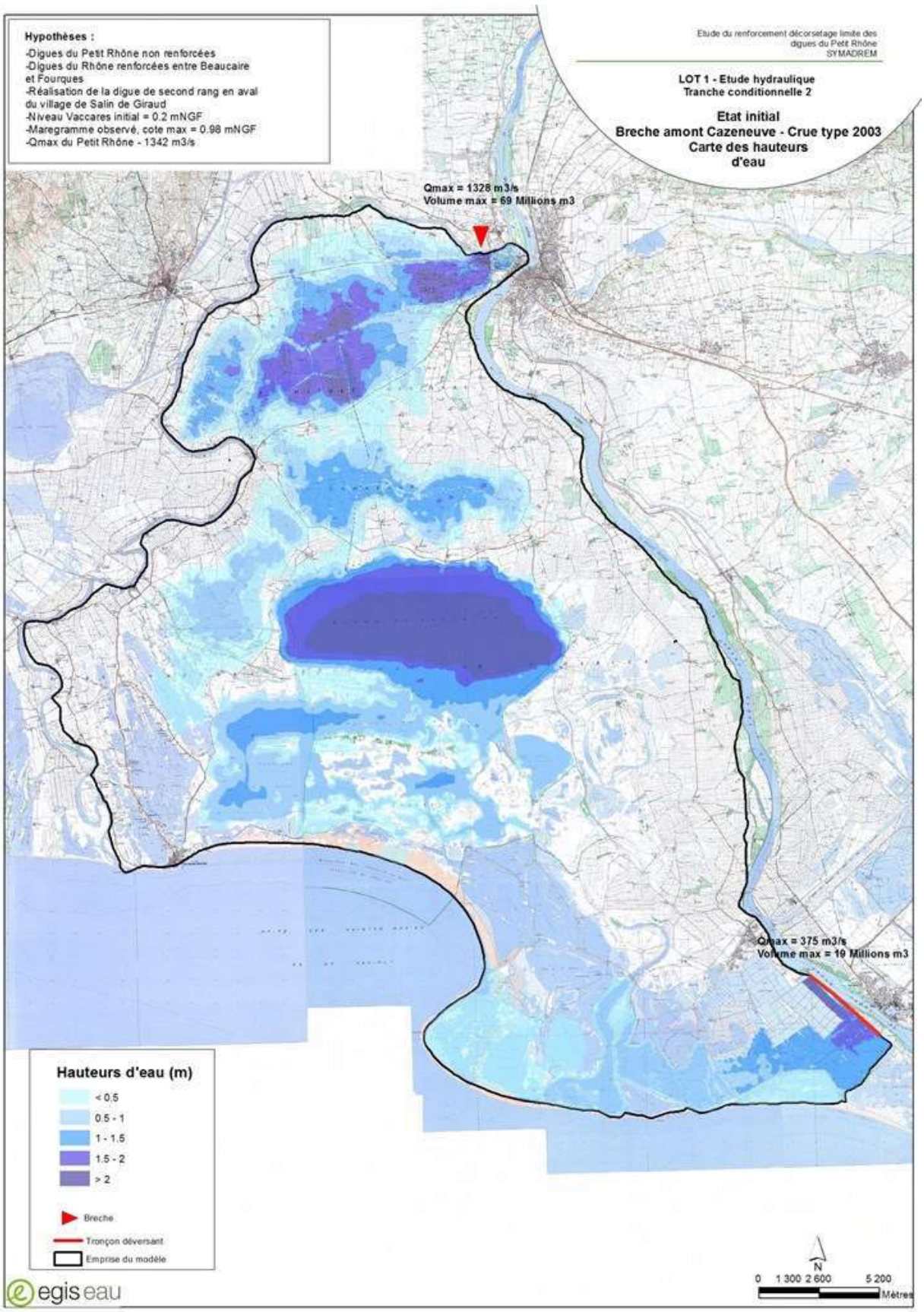


Figure 53. Crue 11500 m^3/s – modélisation d'une brèche à Cazeneuve

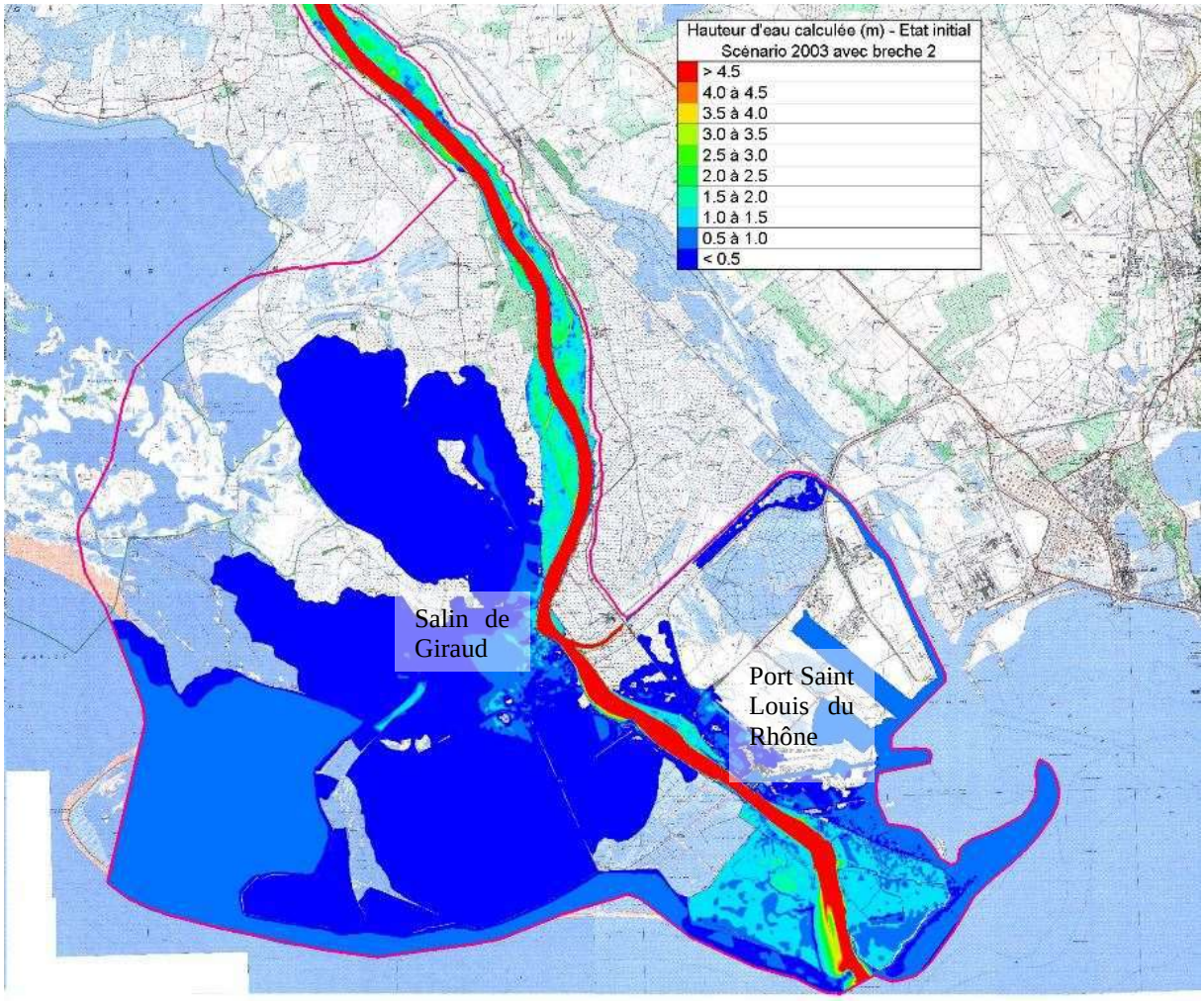


Figure 54. Crue 11500 m^3/s – modélisation d'une brèche à Salin-de-Giraud

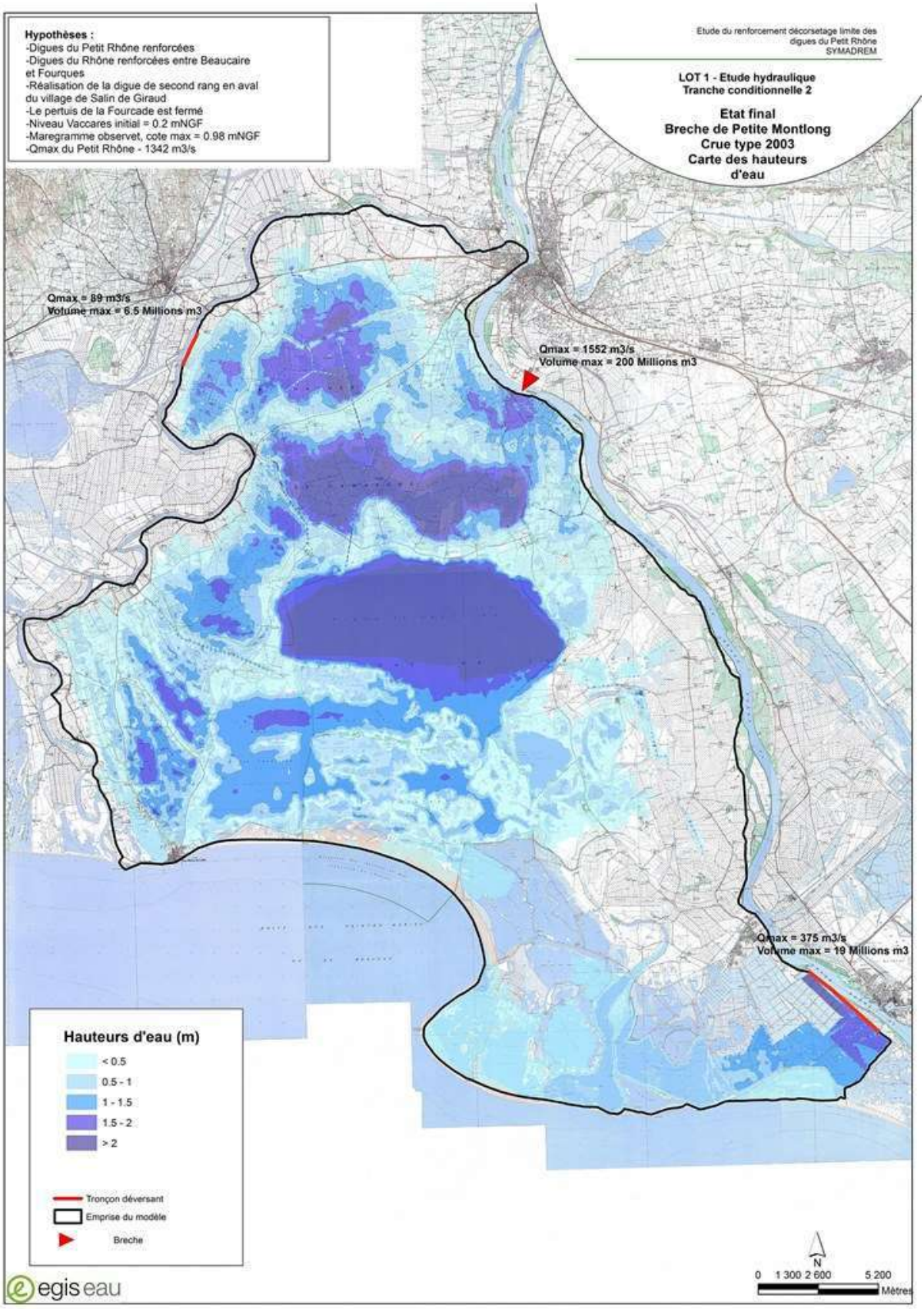


Figure 55. Crue 11500 m^3/s – modélisation d'une brèche à Petite Montlong

7.5 SCENARIO N°4 : FONCTIONNEMENT PROBABLE POUR LA CRUE DE REFERENCE

Pour une crue dépassant le seuil de 12500 m^3/s, à l'exception des tronçons de digues confortés après 1998, l'ensemble des digues du Petit Rhône rive gauche depuis l'aval du mas de Cazeneuve jusqu'à l'embouchure présente une probabilité de brèche d'au moins 50 %, une inondation probable à 50 % par rupture des digues du Petit Rhône est à prévoir. On notera la rupture probable à 90 % du tronçon de digue de Trinquetaille pour cette occurrence de crue.

Les digues du Grand Rhône Rive Droite de Petite Montlong à l'embouchure ont une probabilité de 50 % de rompre ou d'être submergées pour la partie située au droit de Salin de Giraud. Dans les deux cas, à l'exception d'une brèche sur le Petit Rhône ou sur la rive opposée du Grand Rhône, l'inondation de Salin de Giraud est certaine.

La carte illustrant :

- les zones peu dangereuses (hauteur d'eau < 1 m et vitesse < 0,5 m/s)
- les zones dangereuses (1 m < hauteur d'eau < 2 m et 0,5 m/s < vitesse < 1,0 m/s)
- les zones très dangereuses (hauteur d'eau > 2 m ou vitesse > 1,0 m/s)

figure en page suivante.

Globalement toute la zone protégée est en zone très dangereuse, du fait des hauteurs d'eau supérieures à 2 m ou des vitesses supérieures à 1 m/s à proximité des digues, dont la ruine est généralisée. Le centre de Trinquetaille demeure la seule zone non inondée. La friche industrielle des anciennes papeteries Etienne, le village d'Albaron et le centre des Saintes-Maries-de-la-Mer sont inondés mais en situation considérée comme non dangereuse (aléa faible). Le quartier Saint Antoine Billot de Trinquetaille, la Grande Sacristane, la zone humide de Trinquetaille, le village de Saliers et le village de Salin de Giraud ainsi que l'Etang des Launes sont également inondés et en situation de dangerosité liée à l'intensité de l'aléa.

Le nombre de personnes concernées par l'ensemble des scénarios possibles (cumul des scénarios) est estimé à :

- Nombres de personnes situées en zones très dangereuses : 7500, dont 2900 considérés comme vulnérables (moins de 18 ans ou plus de 65 ans) ;
- Nombres de personnes situées en zones dangereuses : 3200, dont 1300 vulnérables ;
- Nombres de personnes situées en zones peu dangereuses : 2100, dont 800 vulnérables.

Soit un nombre total de 12800 sinistrés potentiels, dont 5000 considérés comme vulnérables.

Quelques scénarios d'inondation modélisés sont également présentés.

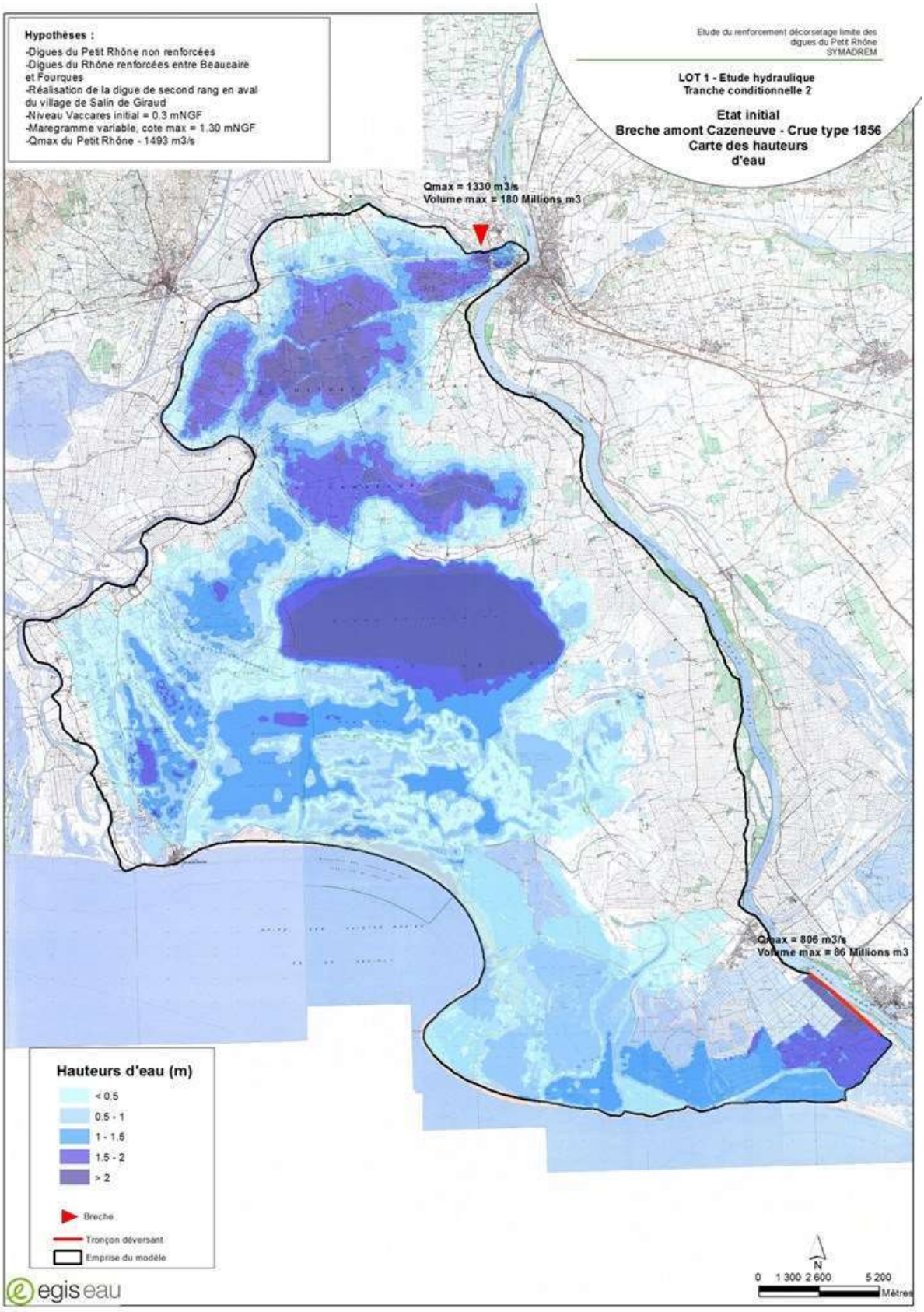


Figure 56. Crue de 12 500 m^3/s – modélisation brèche à Cazeneuve

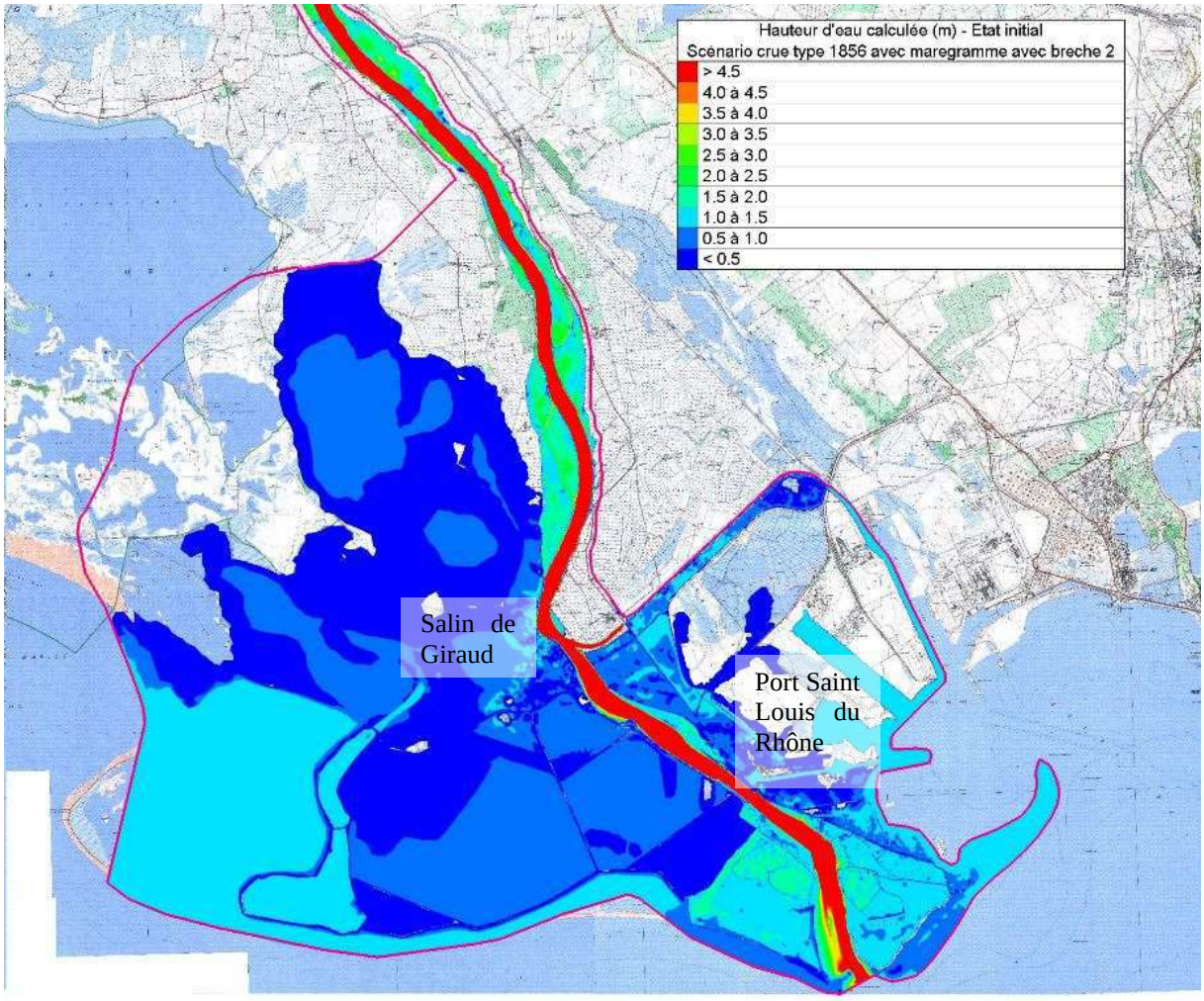


Figure 57. Crue de 12 500 m^3/s – modélisation brèche à Salin de Giraud

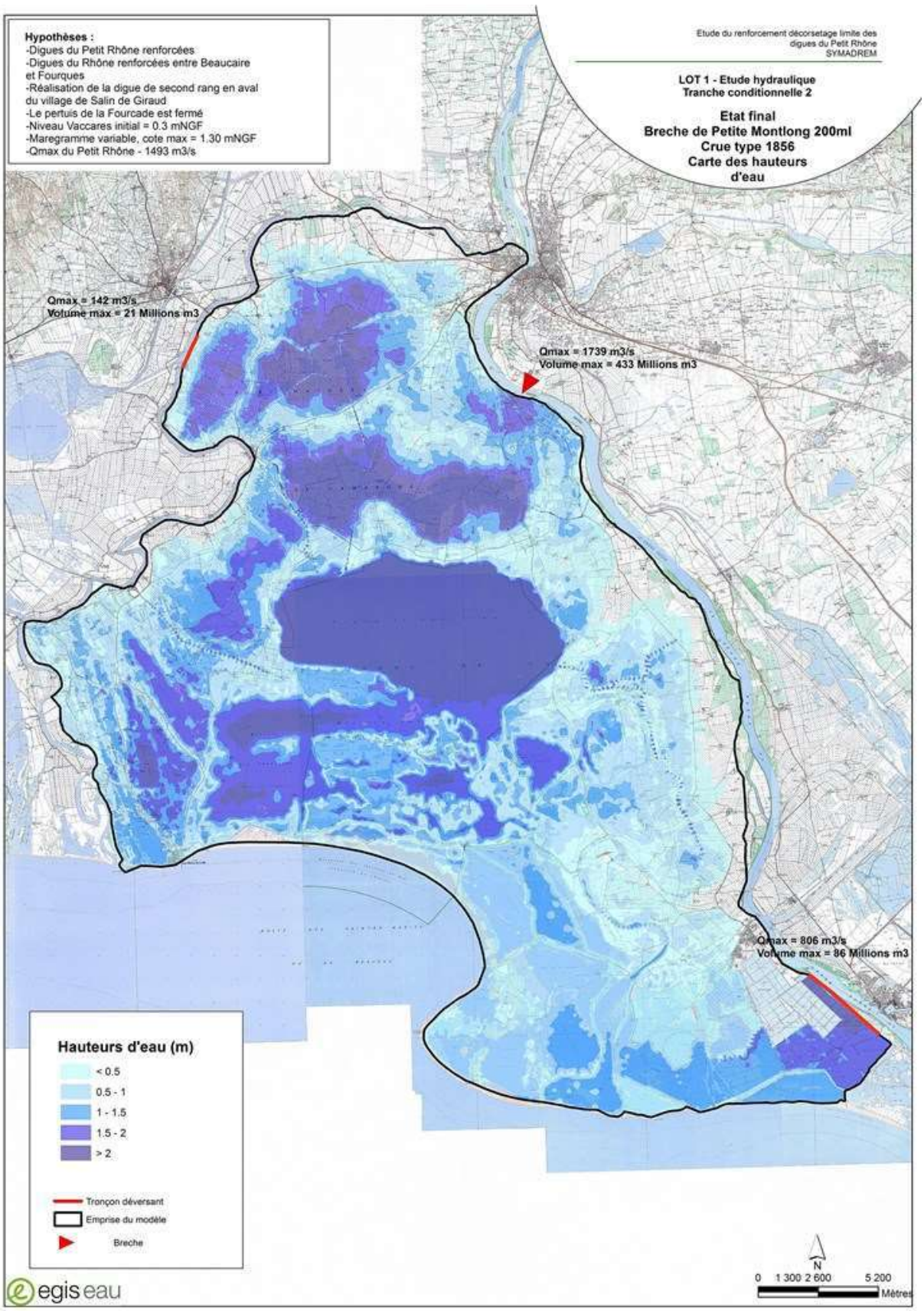


Figure 58. Crue de 12 500 m^3/s – modélisation brèche à Petite Montlong

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT FLUVIAL CAMARGUE INSULAIRE

DOCUMENT A :

CHAPITRE N°1 : RENSEIGNEMENTS ADMINISTRATIFS 1

CHAPITRE N°2 : OBJET DE L'ETUDE SOMMAIRE 27

CHAPITRE N°3.1 : DESCRIPTION DE LA ZONE PROTEGEE 55

CHAPITRE N°3.2 : DESCRIPTION DES FACTEURS NATURELS 85

CHAPITRE N°3.3 : DESCRIPTION DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT 112

CHAPITRE N°3.4 : DESCRIPTION DU FONCTIONNEMENT 156

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT FLUVIAL CAMARGUE INSULAIRE

DOCUMENT A

CHAPITRE N°1 : RENSEIGNEMENTS ADMINISTRATIFS

SOMMAIRE

1 Date de remise officielle de l'étude de dangers 3
2 Gestionnaires et propriétaires des ouvrages 4
2.1 Propriétaires et gestionnaires des digues 4
2.2 Propriétaires et exploitants des ouvrages et réseaux traversant les digues 10
2.3 Propriétaires et exploitants des passages batardables englobés dans les digues 19
3 Arrêtés préfectoraux 20
3.1 Arrêtés statuts du SYMADREM 20
3.2 Arrêtés de transfert de gestion 20
3.3 Arrêtés de classement 20
3.4 Arrêté réglementant l'usage et la circulation sur les digues 20
3.5 Arrêtés de destruction des animaux fouisseurs 21
3.6 Arrêtés relatifs aux acquisitions foncières 21
3.7 Arrêtés et portes à connaissance relatifs aux procédures dites d'autorisation loi sur l'eau ou CNPN 21
4 Arrêtés municipaux 22
5 Déclaration d'existence 22
6 Conventions avec VNF 22
6.1 Affectation SYMADREM 22
6.2 Affectation VNF 23
6.3 Affectations Commune 23
7 Identification des rédacteurs et organismes ayant participé à la rédaction de l'étude de dangers 25

1 DATE DE REMISE OFFICIELLE DE L'ETUDE DE DANGERS

L'étude de dangers du système d'endiguement fluvial Camargue Insulaire a été approuvée par délibération n°2018-28 du 03/04/2018 et remise au Préfet des Bouches-du-Rhône le 06/04/2018.

Tableau 1. Suivi administratif de l'étude de dangers

Indice	Approbation Comité Syndical	Envoi Préfet	Arrêté préfectoral	Nature des modifications
0	3 avril 2018	6 avril 2018		Autorisation initiale sans travaux
1				Prise en compte des remarques de la DREAL

2 GESTIONNAIRES ET PROPRIETAIRES DES OUVRAGES

2.1 PROPRIETAIRES ET GESTIONNAIRES DES DIGUES

Le tableau suivant recense le propriétaire des différents tronçons de digues, inclus dans le système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » et leurs gestionnaires.

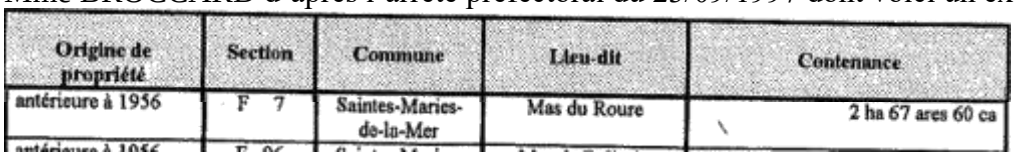
La grande partie des ouvrages gérés par le Symadrem a fait l'objet d'une déclaration d'existence, en application de l'article L.214-6 du code de l'environnement, adressée au préfet des Bouches-du-Rhône le 26 mars 2009.
En cas de superposition d'affectations, l'affectation concernant le SYMADREM est systématiquement « la protection contre les crues du Rhône ».

Tableau 2. Système d'endiguement Camargue Insulaire - digues de 1er rang du Petit Rhône

Ouvrage	PR digue		Linéaire	Propriétaire	Exploitant actuel
	Début	fin	(m)		
Pont suspendu (RD15)			13	Département	Voirie : Département Transition : Symadrem
Pont suspendu à RD6113	281.17	281.7	678	Symadrem	Symadrem
Pont D6113	281.7	281.72	25	Département	Voirie : Département Transition : Symadrem
RD 6113 à A54	281.72	287.9	6751	Symadrem	Symadrem
A54	287.9	288.48	141	Etat	Voirie : ASF Transition : Symadrem
A54 à pont de Cavalès	288.48	294.6	6563	Symadrem	Symadrem
pont de Cavalès	294.9	294.64	15	SNCF	Ouvrage : SNCF Transition Symadrem
Pont de Cavalès à Pont de Saint Gilles	294.64	297.2	2815	Symadrem	Symadrem
Pont de Saint Gilles (D6572N)	297.2	297.3	101	Département	Voirie : Département Transition : Symadrem
Pont de Saint Gilles au Mas du Panperdu	297.3	318.53	21495	Symadrem (4)	Symadrem
Chemin au droit du Mas du Panperdu	318.53	318.54	16	Mme DE BOCCARD (2) (Parcelle F390)	Symadrem
Mas du Panperdu à station des Saintes Maries	318.54	319.19	728	Symadrem	Symadrem
Digue au droit du pompage des Saintes Maries	319.19	319.3	50	Saintes Maries de la Mer (3)	Symadrem
Station de pompage des Saintes Maries au	319.3	321.7	2516	Symadrem	Symadrem

pont de Sylvéréal					
Pont de Sylvéréal (D38C)	321.7	321.9	34	Département	Voirie : Département Transition : Symadrem
Pont de Sylvéréal au chemin des baumelles	321.9	326.57	4588	Symadrem	Symadrem
Digue au droit des Flamands Roses	326.57	326.6	45	Les Flamands Roses (2) (Parcelle AB19)	Symadrem
Chemin des Baumelles à la maison cantonnière de la Fadaise	327.48	330.25	3104	Symadrem	Symadrem
Digue au droit de Maison cantonnière de la Fadaise	330.25	330.255	29	M SALMOCHI(2) (Parcelle AD21)	Symadrem
De la maison cantonnière de la Fadaise à la station de la Fadaise	330.255	330.42	183	Symadrem	Symadrem
Digue au droit de la station de la Fadaise	330.42	330.43	6	ASA Bassin des Saintes Maries (2) (Parcelle BB30)	Symadrem
Station de la Fadaise au bac du Sauvage	330.43	330.79	490	Symadrem	Symadrem
Bac du Sauvage	330.79	330.8	15	Département	Voirie : Département Transition : Symadrem
Bac du Sauvage au Tiki	330.8	336.55	4236	Symadrem	Symadrem(1)
Tiki	336.55	337	483	Saintes Maries de la Mer (3)	Symadrem

(1) : Des constructions privées empêchent l'accès à la digue autour de Port Dromar (PRG15, 16 et 17), la surveillance n'est pas effectuée par le Symadrem entre les PR 330.8 et 336.
(2) : Acquisitions foncières à régulariser
(3) : Parcelles communales, suite à la loi GEMAPI elles ont été transférées à l'ACCM dont le SYMADREM fait représentation/substitution en matière de protection contre les inondations.
(4) : le cadastre (2016) n'est pas à jour ; la parcelle F7 est propriété du SYMADREM et non de Mme BROCCARD d'après l'arrêté préfectoral du 23/09/1997 dont voici un extrait :



Origine de propriété	Section	Commune	Lieu-dit	Contenance
antérieure à 1956	F 7	Saintes-Maries-de-la-Mer	Mas du Roure	2 ha 67 ares 60 ca

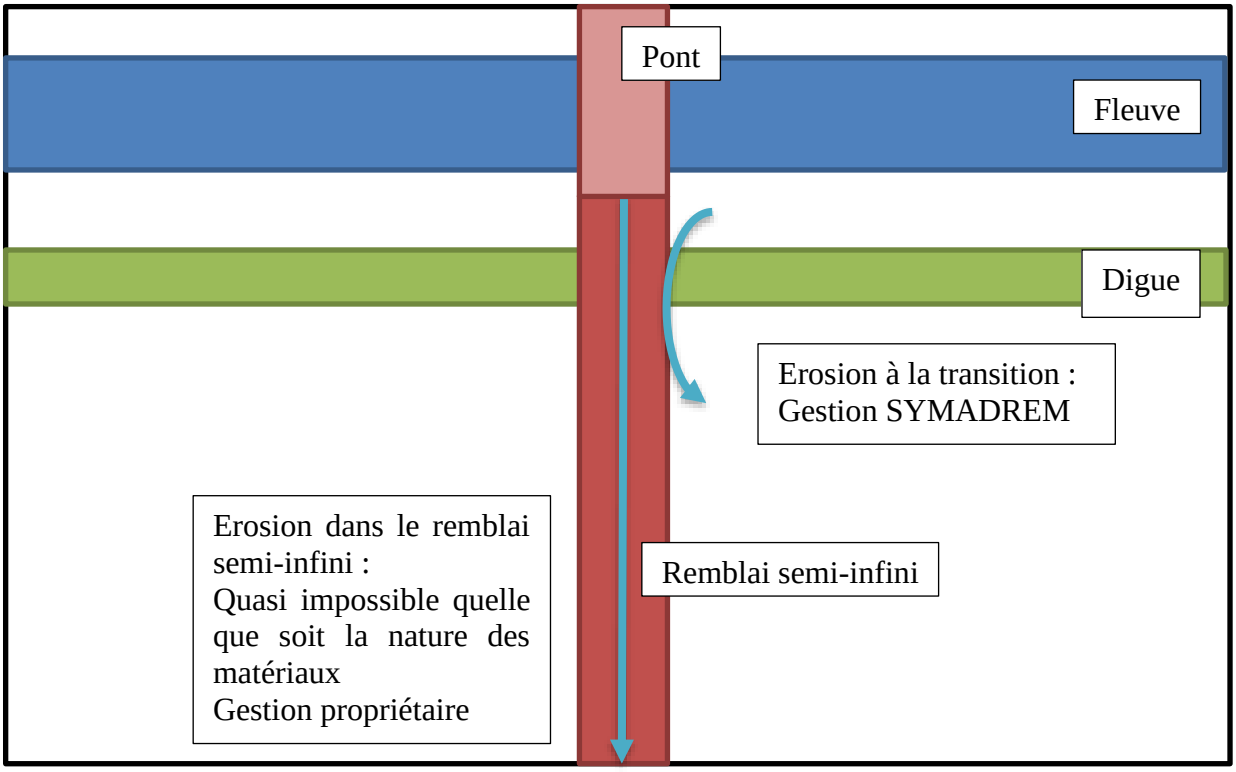
Tableau 3. Système d'endiguement Camargue Insulaire - digues de 1er rang du Grand Rhône

Ouvrage	PR digue		Linéaire	Propriétaire	Exploitant
	Début	fin	(m)		
Digue du Défluent	281.15 (pont suspendu)	281.85 (Pont de Lunel)	1198	Symadrem	Symadrem
Pont de Lunel	281.85	281.88	30	SNCF	Ouvrage : SNCF Transition : Symadrem
Quai Saint-Pierre	281.88	282.02	161	Symadrem(1)	Symadrem(1)
Quai Trinquetaille	282.02	282.6	594	Etat, ministère de l'équipement(1)	Symadrem(1)
Bâtiment VNF	282.6	282.73	119	VNF(1)	Symadrem(1)
Quai Gare Maritime amont RN113	282.73	283.02	283	SNCF/VNF(1)	Symadrem(1)
Quai Gare Maritime aval RN113	283.02	283.22	205	VNF(1)	Symadrem(1)
Quai de la Gabelle	283.22	283.50	280	Symadrem	Symadrem(1)
Papeteries Etienne à Passerons	283.22	285.25	2207	Symadrem	Symadrem
Chemin des Passerons	285.25	285.26	5	Département	Voirie : Département Transition : Symadrem
Passerons à Chamone	285.26	315	29768	Symadrem	Symadrem
Chemin communal de Chamone	315	315.26	476	Arles (3)	Voirie : Ville Remblai : Symadrem
Digue au droit AMF Chamone	315.24	315.26	86	AMF de Chamone(2) (Parcelle PL131)	Symadrem
Chemin communal de Chamone à l'église de Barcarin	315.26	315.9	1270	Symadrem	Symadrem
Digue de Barcarin	315.9	315.91	18	Domaine Public Fluvial	Symadrem
Digue IMERYS amont	315.91	316.14	231	IMERYS (2) (Parcelle PN25)	Symadrem
	316.14	316.15	7	Symadrem	Symadrem
Digue CSME	316.15	316.16	9	CSME (2) (Parcelle PN27)	Symadrem
Digue IMERYS aval	316.16	316.18	30	IMERYS (2) (Parcelle PN28)	Symadrem
IMERYS à Bac de Barcarin	316.18	316.81	568	Symadrem	Symadrem

Bac de Barcarin	316.81	316.86	76	Département	Voirie : Département Transition : Symadrem
Bac de barcarin au bac à train	316.86	317.2	436	Symadrem	Symadrem
Bac à train à la Palissade	317.2	323.33	6892	Etat	Symadrem

(1) : Une convention tripartite VNF/Symadrem/Commune d'Arles est en cours sur les quais d'Arles, le Symadrem aura pour affectation la partie protection contre les crues du Rhône (signature prévue d'ici la fin de l'année 2018).
(2) : Zones à régulariser ; elles se trouvent dans le périmètre des travaux à venir dans le cadre de l'opération GR2-1 et seront régularisées à ce moment-là (entre 2020 pour les acquisitions à l'amiable et 2022 pour les expropriations).
(3) : Parcelles communales, suite à la loi GEMAPI elles ont été transférées à l'ACCM dont le SYMADREM fait représentation/substitution en matière de protection contre les inondations.

Pour les ponts et voies perpendiculaires à la digue, la gestion des parties à risque est bien effectuée :



Les berges en enrochements incluses dans le système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » sont celles situées à moins de 20m des digues, elles sont listées dans les tableaux suivants :

Tableau 4. Système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » - berges en enrochements rive gauche du Petit Rhône

N° tronçon	Libellé	PK Rhône		Propriétaire	Exploitant
		début	Fin		
Enrochements et perrés anciens					
D1	Amont pont fourques	280.95	281.05	Domaine Public Fluvial	SYMADREM
PRG1	Trinquetaille	281.2	282.1		
PRG2	Mas d'Yvan	285.65	286.3		
PRG4	La trésorière	289	290.25		
PRG4	Mas Léotaud	291.3	292		
PRG4	Portamaud	293	293.6		
PRG5	Petit Beaujeu	295	295.5		
PRG6-7	Figarès	297.8	298.75		
PRG8	Case brune	300.8	302.2		
PRG8	Lauricet	303	304.3		
PRG8	Mas de la vigne	305.1	305.5		
PRG8	Amont Albaron	306.2	306.3		
PRG9	Albaron	306.5	307.6		
PRG10	Mas Combet	307.7	308.3		
PRG10	Paty de la trinité	309.9	310.2		
PRG10	Mas d'Alivon	310.4	310.5		
PRG10	Les Bruns	310.8	311.1		
PRG10	Amont Eymini	311.4	311.9		
PRG10	Eymini	312.1	312.25		
PRG11	Eymini Sud	314.85	314.85		
PRG11	Eymini Sud (2)	314.95	315.25		
PRG11	Mas de Ballarin	316.85	317.2		
PRG11	Sénebier	318.8	321.25		
PRG13	Château d'Astouin	324.9	325		
PRG13	Cabanes Cambon	325.25	326		
PRG14	La Fadaise	330.4	330.6		
Enrochements récents					
PRG13	Les Baumelles	325.6	325.6	Domaine Public Fluvial	SYMADREM
PRG13	La Fadaise	330.35	330.4		
PRG18	L'Amarée	336	336.25		
PRG19	Le Tiki	336.5	337		

Tableau 5. Système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » - berges en enrochements rive droite du Grand Rhône

N° tronçon	Libellé	PK Rhône		Propriétaire	Exploitant
		début	Fin		
Enrochements et perrés anciens					
GRD1	Quais du Rhône	281.8	283.5	Domaine Public Fluvial	SYMADREM
GRD2	Papèteries	283.5	283.7		
GRD 4-5-6	Triquette – Fort de Pâques	286.2	289.8		
GRD6	Sansouires	290.1	290.2		
GRD7	Aube de Bouic	297	297.2		
GRD7	L'Armelière	297.5	297.9		
GRD8	Tour de Cazeau	301.5	301.8		
GRD9	Petit Patis	306.3	307.2		
GRD12	Chamone	314.5	315		
GRD12	Barcarin	315.5	317		
GRD13	Salins	320.2	321		
Enrochements récents					
GRD 4-5-6	Triquette - Montlong	286.2	288.9	Domaine Public Fluvial	SYMADREM
GRD7	Aube de Bouic	297	297		
GRD12	Chamone	315	315		
GRD12	Eglise Barcarin	315.8	315.9		
GRD12	Mas des Peupliers (1)	317.6	317.6		
GRD12	Mas des Peupliers (2)	317.85	317.9		
GRD12	Estacade de l'Esquineau	318.5	318.65		
GRD13	Salins (1)	320	320		
GRD13	Salins (2)	320.6	320.6		
GRD13	Salins (3)	321.3	321.6		
GRD13	Salins (4)	321.75	321.75		
GRD13	Salins (5)	321.85	321.85		

2.2 PROPRIETAIRES ET EXPLOITANTS DES OUVRAGES ET RESEAUX TRAVERSANT LES DIGUES

Par convention, on utilise la terminologie « ouvrage hydraulique traversant » pour les ouvrages équipés d'organes de fermeture et dans lesquels circule de l'eau prélevé dans le Rhône (irrigation) ou de l'eau évacuée vers le Rhône (drainage agricole ou pluvial) et la terminologie « réseaux » pour les réseaux secs ou humides. Qu'il s'agisse d'ouvrages hydrauliques traversants ou de réseaux, tous ces ouvrages sont la propriété de tiers et peuvent être exploités par un opérateur de réseaux ou un fermier. Les ouvrages aériens et les ouvrages enterrés longitudinalement dans la digue ne sont pas recensés.
Le tableau ci-dessous liste les ouvrages de tiers englobés dans les ouvrages gérés par le SYMADREM. La typologie des réseaux traversants (colonne Typ) est la suivante :

Tableau 6. Typologie des réseaux secs et humides

Code	Type réseaux
GBP	Gaz basse pression
GHP	Gaz haute pression
ELD	Elect. distrib. (BT et HTA)
ELT	Elect. transport (HTB)
TEL	Télécommunications
FIB	Fibre optique
OLE	Hydrocarbure
EP	Eclairage Public
EDI	Eau de distribution
EUS	Eaux usées, assainis.

Tableau 7. Typologie des ouvrages hydrauliques traversants

DRA	Drainage
EPL	Eaux pluviales
IRR	Irrigation
IND	Indéfini

Dans les tableaux ci-après, la colonne « Pos » indique la position de l'ouvrage ou du réseau traversant dans la digue :

- La lettre « T » est utilisée si l'ouvrage ou le réseau est enterré dans la digue ou dans la fondation superficielle (moins de 2 mètres),
- La lettre « S » est utilisée si l'ouvrage ou le réseau passe en siphon inversé soit en suivant la géométrie de la digue (cas le plus souvent des ouvrages agricoles) ou soit en suivant le profil en long du chemin ou de la route de franchissement.
- La lettre « F » est utilisée si l'ouvrage ou le réseau traverse la digue en fondation profonde (plus de 2 mètres) avec des débouchés amont et aval suffisamment éloignés de la digue.

Tableau 8. Digue PRG d'Arles à Albaron– Ouvrages hydrauliques traversants

PR	Typ	Pos	Libellé ou lieu-dit	Exploitant	Ville	Téléphone
281,13	EPL	S	Rue Robert Martin	ACCM eaux	ARLES	04 90 99 52 14
282,07	IRR	T	Malteze	MALTESE Gérard	ARLES	04 90 96 42 81
282,43	IRR	T	Mas de Cazeneuve	GFA Cazeneuve	ARLES	04 90 96 20 10
284,14	IND	T	Mas de Vert 1	GFA Greniers du mas de vert	ARLES	06 12 93 38 30
284,45	IRR	T	Mas de Vert 2	ASA Mas de Vert	ARLES	04 90 93 54 43
285,43	IRR	T	Mas de Rey	SCA Mas de Rey	ARLES	04 90 96 11 84
285,91	IRR	T	Mas d'Yvan	EARL Mas d'Yvan (VERAN Lucienne)	ARLES	04 90 49 75 90
286,17	IRR	S	Mas des Olivières	ROMAN Frédéric	ARLES	
286,25	IRR	S	Mas Médaille	GUIGON	ARLES	04 90 93 04 82
286,85	IRR	T	Petite Corrège	ASA de la Petite Corrège (GIRAUD Alain)	ARLES	04 90 96 44 91
287,38	IRR	T	Mas d'Augéry	AMPHOUX Robert	ARLES	04 90 97 02 13
288,67	IRR	T	Petit Beaumont	ASA Petit Beaumont	ARLES	04 90 96 44 91
289,23	IRR	S	Mas de la Trésorerie	CORNILLE	ARLES	06 03 22 56 68
289,59	IRR	T	Mas de Molin	ASA Petit Beaumont	ARLES	04 90 96 44 91
289,96	IRR	S	Mas de Roy	CHABERT Frédéric	ARLES	06 10 01 92 93
290,89	IRR	T	Mas de Grille 1	GFA du mas de Grille	ARLES	06 12 93 38 30
291,20	IRR	T	Mas de Grille 2	GFA du mas de Grille	ARLES	06 12 93 38 30
291,25	IRR	T	Mas de Grille 3	GFA du mas de Grille	ARLES	06 12 93 38 30
291,64	IRR	T	Mas Léotaud	BLANC Oliver	ARLES	06 10 45 14 18
293,78	IRR	T	Mas Beaujeu de Castres	ARNAUD jean luc (Co-pro.)	ARLES	06 20 52 84 97
294,55	IRR	S	Mas Rigaudon 1	MARSAUD Jean	ARLES	04 66 87 18 60
294,83	IRR	S	Mas Rigaudon 2	OHANIAN Sophie	ARLES	
295,13	IRR	T	Château d'eau Saliers	ACCM eaux	ARLES	04 90 99 52 14
295,20	IRR	S	Saliers	ASA Arrosant de Saliers	ARLES	04 66 87 36 87
295,44	IRR	S	Petit Beaujeu	ASA Arrosant de Saliers	ARLES	04 66 87 36 87
295,71	IRR	S	La Vinasse 1	ASA de St Cézaire	ARLES	04 66 87 36 87
295,83	IRR	S	La Vinasse 2	GFA Mas de la Vinasse	ARLES	04 66 87 36 87
296,63	IRR	S	Les Cabanettes 1	SCI des Cabanettes	ARLES	04 66 87 31 53
296,78	IRR	S	Les Cabanettes 2	SCI des Cabanettes	ARLES	04 66 87 31 53
298,02	IRR	S	Figares Nord	SCA Mas de la Ville	ARLES	04 90 96 34 47
298,72	IRR	S	Figares Sud	SCA Mas de la Ville	ARLES	04 90 96 34 47

299,80	IND	S	Les Roussettes	SCA Mas de la Ville	ARLES	04 90 96 34 47
300,23	IRR	T	Mas de la galante	SCHNOEBELEN Lydie	ARLES	06 08 01 46 84
301,03	IRR	T	Casebrune	MICHEL Patrick et Jean Paul	ARLES	04 90 97 10 41
302,67	IND	S	Mas de Lauricet 1	VARIN D'INVELLE Bruno	ARLES	04 90 97 10 08
303,01	IRR	T	Mas de Lauricet 2	VARIN D'INVELLE Bruno	ARLES	04 90 97 10 08
305,45	IRR	T	Mas de la Vigne 1	EARL Mas de la Vigne	ARLES	04 90 97 11 29
305,48	IRR	S	Mas de la vigne 2	EARL Mas de la Vigne	ARLES	04 90 97 11 29
306,05	IRR	S	Mas d'Albaron	DIJOL Maurice	ARLES	04 90 97 10 30
306,52	IRR	S	Corrège Major 1	ASCO Corrège Major	ARLES	04 90 96 44 91
306,55	IRR	T	Corrège Major 2	ASCO Corrège Major	ARLES	04 90 96 44 91
306,57	DRA	T	Corrège Major 3	ASCO Corrège Major	ARLES	04 90 96 44 91

Tableau 9. Digue PRG d'Arles à Albaron – Réseaux traversants

PR	Typ	Pos	Libellé ou lieu-dit	Exploitant	Ville	Téléphone
281,06	FIB	F	Pont Fourques (1)	Verizon France	ARLES	
281,06	EDI	F	Pont Fourques (2)	ACCM eaux	ARLES	04 90 99 52 14
281,06	ELD	F	Pont Fourques (3)	Enedis	ARLES	
281,06	FIB	F	Pont Fourques (4)	Orange	ARLES	
281,06	ELD	F	Pont Fourques (5)	CNR	ARLES	
281,63	FIB	F	Pont N113 (1)	SFR	ARLES	
281,63	EDI	F	Pont N113 (2)	ACCM eaux	ARLES	04 90 99 52 14
281,63	ELD	F	Pont N113 (3)	Enedis	ARLES	
281,63	GBP	F	Pont N113 (4)	GRT GAZ	ARLES	
283,17	GBP	F	Cazeneuve aval	GRTGAZ	ARLES	
288,50	FIB	F	Autoroute	?	ARLES	
295,13	EDI	T	Château d'eau Saliers	ACCM eaux	ARLES	04 90 99 52 14
297,20	FIB	F	Pont Saint Gilles	Orange	ARLES	

Tableau 10. Digue PRG d'Albaron à Sylvéréal - Ouvrages hydrauliques traversants

PR	Typ	Pos	Libellé ou lieu-dit	Exploitant	Ville	Téléphone
307,08	IRR	S	Albaron Nord 1	TEULON Jean Luc	ARLES	04 90 97 10 03
307,08	IRR	S	Albaron Nord 2	TEULON Jean Luc	ARLES	04 90 97 10 03
307,08	IRR	S	Albaron Nord 3	NOURY	ARLES	06 03 18 78 49
307,09	IRR	S	Albaron Nord 4	Syndicat d'arrosage	ARLES	06 10 22 72 72

				d'Albaron		
307,10	IRR	S	Albaron Nord 5	SCEA Domaine Saint Andiol	ARLES	06 10 22 72 72
307,15	IRR	S	Lotissement Albaron 1		ARLES	06 20 43 49 03
307,25	DRA	T	Lotissement Albaron 2	ACCM eaux	ARLES	04 90 99 52 14
307,30	IRR	S	Lotissement Albaron 3	CUISSARD	ARLES	04 90 97 12 45
307,31	IRR	S	Lotissement Albaron 4	FAGES	ARLES	04 90 97 11 64
307,34	IRR	S	Lotissement Albaron 5		ARLES	09 52 50 12 16
307,35	IRR	S	Lotissement Albaron 6	AYMES Patrice	ARLES	04 90 97 16 47
307,44	IRR	S	Albaron Sud 1	Société RICARD	ARLES	04 90 97 10 10
307,44	IRR	S	Albaron Sud 2		ARLES	04 90 97 10 30
307,44	IRR	T	Albaron Sud 3	Société RICARD	ARLES	04 90 97 10 10
307,46	DRA	T	Albaron Sud 4 - STEP	ACCM eaux	ARLES	04 90 99 52 14
307,62	IRR	T	Basse Méjanes	PAGES	ARLES	06 08 58 34 08
307,64	IRR	S	Mas Broglie	MANDROLINI Yves	ARLES	04 90 97 10 27
308,04	IRR	S	Mas Combet	JACQUIER Ariane	ARLES	06 10 89 05 48
308,84	IRR	T	Domaine Jasses	Département 13	ARLES	04 90 97 16 74
309,65	IRR	T	Mas de Carrelet		ARLES	
309,87	IRR	T	Mas de Bouvet	SCA du Mas de Bouvet	ARLES	04 90 97 18 58
310,42	IRR	S	Mas d'Alivon		ARLES	04 90 97 11 44
310,75	IRR	S	Mas de l'Aube		ARLES	04 90 97 10 17
310,84	DRA	T	Sigoulette	ASA SIGOULETTE	ARLES	04 90 96 44 91
311,11	IRR	T	Mas des Bruns	GRAND Marcel	Stes Maries	07 78 05 14 24
312,45	IRR	T	Mas d'Eymini	GIRAUD Alain	Stes Maries	04 90 97 16 74
313,81	IRR	T	Ventabren 1	RICOME Sophie	Stes Maries	06 24 49 48 25
313,81	IRR	S	Ventabren 2	RICOME Sophie	Stes Maries	06 24 49 48 25
314,86	IRR	S	Mas d'Eymini (SUD)	ARNAUD Jean-Luc	Stes Maries	06 20 52 84 97
315,82	IRR	T	Grandes Cabanes du Vaccarès 1	conservatoire de l'espace littoral et des rivages lacustres	Stes Maries	04 42 91 64 10
315,83	IRR	T	Grandes Cabanes du Vaccarès 2	SARL les Frignants	Stes Maries	09 88 66 58 89
315,88	IRR	T	Grandes Cabanes du Vaccarès 3	CLAUZEL Florence	Stes Maries	06 03 67 72 80

316,42	IRR	T	Château Avignon 1	conservatoire de l'espace littoral et des rivages lacustres	Stes Maries	04 42 91 64 10
316,57	IRR	T	Château Avignon 2	Domaine départemental du château d'Avignon	Stes Maries	04 13 31 94 59
316,61	IRR	T	Château Avignon 3	Domaine départemental du château d'Avignon	Stes Maries	04 13 31 94 59
316,93	IRR	T	Mas de Ballarin	PASTRE Olivier	Stes Maries	04 90 43 72 77
317,28	IRR	T	Mas du Roure	SCEA Mas du Roure	Stes Maries	06 24 51 74 06
318,53	DRA	T	Mas du Panperdu 1	MAZEL Bertrand	Stes Maries	04 90 97 52 66
318,68	IRR	S	Mas du Panperdu 2	MAZEL Bertrand ?	Stes Maries	04 90 97 52 66
319,19	IRR	T	Frigoulès 1	Ville des Saintes Maries de la Mer	Stes Maries	04 90 97 80 05
319,21	IND	T	Frigoulès 2	Ville des Saintes Maries de la Mer	Stes Maries	04 90 97 80 05
319,23	DRA	T	Frigoulès 3	Ville des Saintes Maries de la Mer	Stes Maries	04 90 97 80 05
319,27	IRR	T	Frigoulès 4	ASA de Frigoulès	Stes Maries	06 11 29 02 98
320,37	IRR	T	Mas Sénébier 1	GUICHARD Philippe	Stes Maries	06 09 33 38 83
320,39	IRR	T	Mas Sénébier 2	GUICHARD Philippe	Stes Maries	06 09 33 38 83

Tableau 11. Digue PRG d'Albaron à Sylvéréal – Réseaux traversants

PR	Typ	Pos	Libellé ou lieu-dit	Exploitant	Ville	Téléphone
309,24	EDI	T	Clos de la Royalette	ACCM eaux	ARLES	
310,00	FIB	F	Chemin du paty	Orange	ARLES	
316,50	EDI	S	Château Avignon (1)	Mr Alluni	Stes Maries	
316,50	ELD	S	Château Avignon (2)	Mr Alluni	Stes Maries	
321,70	ELD	F	Pont sylvéréal	Enedis	Stes Maries	

Tableau 12. Digue PRG de Sylvéréal aux Saintes Maries - Ouvrages hydrauliques traversants

PR	Typ	Pos	Libellé ou lieu-dit	Exploitant	Ville	Téléphone
322,11	IRR	T	Mas de Jonquières 1	DAUBAN Catherine	Stes Maries	04 90 97 50 53
322,42	IRR	S	Mas de Jonquières 2	DAUBAN Catherine	Stes Maries	04 90 97 50 53
324,71	IRR	T	Domaine Astouin 1	MAZEL Bertrand	Stes Maries	04 90 97 52 66
324,73	IRR	T	Domaine Astouin 2	MAZEL Bertrand	Stes Maries	04 90 97 52 66
325,36	IRR	T	Cabanes de Cambon	DUBOIS Jean-Pierre	Stes Maries	06 16 37 77 41
326,07	IND	T	Baumelles	LINSOLAS Joel	Stes Maries	06 14 89 49 92

327,47	IRR	T	Domaine de Badet 1	DUBOIS Jean-Pierre	Stes Maries	06 16 37 77 41
327,47	IND	T	Domaine de Badet 2	DUBOIS Jean-Pierre	Stes Maries	06 16 37 77 41
327,47	DRA	T	Domaine de Badet 3	DUBOIS Jean-Pierre	Stes Maries	06 16 37 77 41
329,15	IRR	T	Mas d'Icard	SCEA Mas d'Icard	Stes Maries	06 09 47 10 62
330,42	DRA	T	La Fadaise	ASA Saintes-Marie-de-la-Mer (Prés.: PICCHI)	Stes Maries	04 90 96 44 91
330,63	IRR	T	La petite Fadaise	Ville des Saintes Maries de la Mer	Stes Maries	04 90 97 80 05
332,59	IRR	T	La Valette	MOTTET Michel	Stes Maries	06 30 30 00 29
334,20	IRR	T	Dromar	Ville des Saintes Maries de la Mer	Stes Maries	04 90 97 80 05
334,31	IRR	T	La marchande	COMTE Henry	Stes Maries	04 90 97 87 64
335,11	IRR	T	L'Amarée 1	DE GOURCUFF Charles	Stes Maries	04 90 97 81 20
335,15	IRR	T	L'Amarée 2	DE GOURCUFF Charles	Stes Maries	04 90 97 81 20

Tableau 13. Digue PRG de Sylvéréal aux Saintes Maries – Réseaux traversants

PR	Typ	Pos	Libellé ou lieu-dit	Exploitant	Ville	Téléphone
330,70	ELD	F	Bac Sauvage (1)	Enedis	Stes Maries	
330,70	FIB	F	Bac Sauvage (2)	Orange	Stes Maries	
336,55	FIB	F	Tiki	Orange	Stes Maries	

Tableau 14. Défluent et quais d'Arles - Ouvrages hydrauliques traversants

PR	Typ	Pos	Libellé ou lieu-dit	Exploitant	Ville	Téléphone
281,83	EPL	T	Défluent	ACCM eaux	ARLES	04 90 99 52 14
282,06	EPL	T	St Pierre 1	ACCM eaux	ARLES	04 90 99 52 14
282,13	EPL	T	St Pierre 2	ACCM eaux	ARLES	04 90 99 52 14
282,23	EPL	T	St Pierre 3 - Porte des Curatiers	ACCM eaux	ARLES	04 90 99 52 14
282,41	EPL	T	St Pierre 4	ACCM eaux	ARLES	04 90 99 52 14
282,47	EPL	T	Trinquetaille	ACCM eaux	ARLES	04 90 99 52 14
282,69	EPL	T	Gare Maritime 1	ACCM eaux	ARLES	04 90 99 52 14
282,76	EPL	T	Gare Maritime 2	ACCM eaux	ARLES	04 90 99 52 14

Tableau 15. Défluent et quais d'Arles – réseaux traversants

PR	Typ	Pos	Libellé ou lieu-dit	Exploitant	Ville	Téléphone
281,75	ELD	T	Défluent-Limni	CNR	ARLES	
282,60	ELD	T	Gare maritime - Limni	CNR	ARLES	

Tableau 16. Digue GRD d'Arles à Tourtoulen – Ouvrages hydrauliques traversants

PR	Typ	Pos	Libellé ou lieu-dit	Exploitant	Ville	Téléphone
284,01	EPL	T	Papèteries Etienne	Condamné		
284,17	EPL	T	Emmaüs	CG13	ARLES	
285,96	IRR	T	La Triquette 1	ASA de la Roubine de la Triquette	ARLES	04 90 96 44 91
286,02	IRR	T	La Triquette 2	ASA de la Roubine de la Triquette	ARLES	04 90 96 44 91
286,10	IRR	T	La Triquette 3	ASA de la Roubine de la Triquette	ARLES	04 90 96 44 91
286,11	IRR	S	Saint Veran	ASA de la Roubine de la Triquette	ARLES	04 90 96 44 91
286,21	IRR	S	La Rougnouse	Mr MAIRE ABAT	ARLES	04 90 96 45 98
287,91	IRR	S	Franconi	ASA Canal en relief Grande Montlong	ARLES	04 90 96 44 91
288,09	IRR	S	Grande Montlong	ASA Canal en relief Grande Montlong	ARLES	04 90 96 44 91
288,48	IRR	S	Petite Montlong 1	BOYER Daniel	ARLES	04 90 97 00 36
288,87	IRR	S	Petite Montlong 2	ASA de la Petite Montlong	ARLES	06 12 46 72 87
288,87	IRR	S	Petite Montlong 3	ASA de la Petite Montlong	ARLES	06 12 46 72 87
288,89	DRA	T	Petite Montlong 4	ASA de la Petite Montlong	ARLES	06 12 46 72 87
288,90	IRR	S	Petite Montlong 5	ASA de la Petite Montlong	ARLES	06 12 46 72 87
288,91	IRR	S	Petite Montlong 6	ARSAC Bernard	ARLES	04 90 97 00 17
289,69	IND	T	Fort de Paques	ARSAC Bernard	ARLES	04 90 97 00 17
290,27	IND	T	Sansouires			
290,97	IRR	T	Mas Neuf des sansouires	Mas neuf des sansouires (cadastre)	ARLES	04 90 97 00 89
292,35	IRR	T	Mas Terrin	JONQUET Alain	ARLES	04 90 97 00 70
294,01	IRR	T	Mas Augéry	MICHEL Guy	ARLES	04 90 97 00 71
294,47	IRR	T	Mas Millet	MARCHETTI / ARSAC / BERLHE	ARLES	04 90 97 00 56
295,14	IRR	T	Beaujeu 1	ASA de la Petite Montlong	ARLES	0612467287
295,15	IRR	T	Beaujeu 2	CARTIER Pierre	ARLES	09 64 18 90 33
295,20	DRA	T	Beaujeu 3	ASCO Corrège Major	ARLES	04 90 96 44 91
297,24	IRR	T	Aube de Bouic 1	ASA Aube de Bouic	ARLES	04 90 96 44 91
297,25	IRR	T	Aube de Bouic 2	ASA Aube de Bouic	ARLES	04 90 96 44 91

297,48	IRR	S	L'Armelliere 1	SCEA Armellière	ARLES	04 90 97 20 29
297,96	IRR	S	L'Armelliere 2	SCEA Armellière	ARLES	04 90 97 20 29
298,19	IRR	T	L'Armelliere 3	ASL de Tourtoulen	ARLES	04 90 97 10 27
298,20	IRR	T	L'Armelliere 4	ASL de Tourtoulen	ARLES	04 90 97 10 27
298,72	IRR	T	Mas Giraud	ASL de Tourtoulen	ARLES	04 90 97 10 27

Tableau 17. Digue GRD d'Arles à Tourtoulen – Réseaux traversants

PR	Typ	Pos	Libellé ou lieu-dit	Exploitant	Ville	Téléphone
291,95	FIB	F	Ile de la Gabarre	Orange	ARLES	
294,46	FIB	F	Mas Millet	Orange	ARLES	
295,13	FIB	F	Beaujeu	Orange	ARLES	

Tableau 18. Digue GRD de Tourtoulen à la Louisiane- Ouvrages hydrauliques traversants

PR	Typ	Pos	Libellé ou lieu-dit	Exploitant	Ville	Téléphone
301,73	IRR	T	Tour de Cazeau 1	LACROTTE Hervé	ARLES	
302,38	IND	T	Tour de Cazeau 2	LACROTTE Hervé	ARLES	
303,46	IRR	T	Canal du Sambuc	ASA SAMBUC	ARLES	04 90 97 20 76
303,49	IRR	T	Domaine du Grand Paty	JANET	ARLES	06 11 61 42 12
305,50	IRR	T	Domaine de la Commanderie	LAFFORGUE Bernard	ARLES	04 90 97 20 49
307,04	IRR	S	Petit Paty 1	GALINDO	ARLES	06 75 50 56 48
307,30	DRA	T	Petit Paty 2	GALINDO	ARLES	06 75 50 56 48
307,82	IRR	T	Petit Paty 3	GALINDO	ARLES	06 75 50 56 48
309,27	IRR	S	Grand Manusclat	ROLIN	ARLES	06 80 13 93 95
310,17	IRR	T	Mas de Grifeuille 1	TAVAN Patrick	ARLES	06 75 65 98 24
310,61	IRR	T	Mas de Grifeuille 2	TAVAN Patrick	ARLES	06 75 65 98 24
311,75	DRA	T	Mas Chartrouse 1	CALVIERE David	ARLES	06 16 78 78 82
311,77	IRR	T	Mas Chartrouse 2	CALVIERE David	ARLES	06 16 78 78 82
312,42	DRA	T	Mas Chartrouse 3	CALVIERE David	ARLES	06 16 78 78 82
312,44	IRR	T	Mas Chartrouse 4	CALVIERE David	ARLES	06 16 78 78 82

Tableau 19. Digue GRD de Tourtoulen à la Louisiane - Réseaux traversants

PR	Typ	Pos	Libellé ou lieu-dit	Exploitant	Ville	Téléphone
301,94	EDI	T	Tour de Cazeau	GIRAUD Jacques	ARLES	
304,29	EDI	T	Le Grand Patis (1)	ACCM eaux	ARLES	
304,30	FIB	F	Le Grand Patis (2)	Orange	ARLES	
308,30	FIB	F	Bois d'estaing	Orange	ARLES	

Tableau 20. Digue GRD de la Louisiane à la Palissade- Ouvrages hydrauliques traversants

PR	Typ	Pos	Libellé ou lieu-dit	Exploitant	Ville	Téléphone
313,08	IRR	T	Louisiane	CALLET	ARLES	06 83 01 35 43
314,25	IRR	T	Mas de l'Amérique 1	ALLARD Jean Pierre	ARLES	06 72 94 28 40
314,25	DRA	T	Mas de l'Amérique 2	ALLARD Jean Pierre	ARLES	06 72 94 28 40
314,97	IRR	S	Chamone 1	ASA Canal du Japon	ARLES	06 71 17 94 44
314,99	IRR	S	Chamone 2		ARLES	06 71 17 94 44
315,01	IRR	S	Chamone 3	ASA Canal du Japon	ARLES	06 71 17 94 44
315,02	IRR	T	Chamone 4	ASA Canal du Japon	ARLES	06 71 17 94 44
315,02	IRR	T	Chamone 5	ASA Canal du Japon	ARLES	06 71 17 94 44
315,75	IND	T	Eglise de Barcarin bis		ARLES	06 71 17 94 44
315,88	DRA	T	Eglise de Barcarin	ASA Canal du Japon	ARLES	06 71 17 94 44
316,14	IRR	T	Canal de Giraud	Salins du midi	ARLES	
316,25	IND	T	Ancienne station et Quais	Imerys, contact: CASTELLANI Bernard	ARLES	04 42 55 54 12
316,34	IND	S	Imerys (Solvay) 1	SOLVAY	ARLES	04 42 55 54 12
316,34	IND	S	Imerys (Solvay) 2 - Pompier	SOLVAY	ARLES	04 42 55 54 12
316,62	DRA	S	Imerys (Solvay) 3	SOLVAY	ARLES	04 42 55 54 12
316,95	IRR	T	Imerys (Solvay) 4	SOLVAY	ARLES	04 42 55 54 12
317,24	DRA	S	Bac ferroviaire	Salins du midi	ARLES	

Tableau 21. Digue GRD de la Louisiane à la Palissade - Réseaux traversants

PR	Typ	Pos	Libellé ou lieu-dit	Exploitant	Ville	Téléphone
315,89	FIB	F	Barcarin	Orange	ARLES	
317,15	GBP	F	Bac à train	GRTGAZ	ARLES	
317,29	EDI	T	Station épuration Salin De Giraud	ACCM eaux	ARLES	
319,35	FIB	F	Estacade de l'esquineau	Orange	ARLES	

2.3 PROPRIETAIRES ET EXPLOITANTS DES PASSAGES BATARDABLES ENGLOBES DANS LES DIGUES

Les quais d'Arles sont traversés par des passages batardables, propriétés de la ville.

La liste de ces passages batardables gérés par la ville d'Arles (20) figurent ci-après.

Tableau 22. Camargue Insulaire – Passages batardables

PR	Localisation / Libellé	Propriétaire	Exploitant
GRD 282,18	Trinquetaille – T10	Ville Arles	Ville Arles
GRD 282,23	Trinquetaille – T9	Ville Arles	Ville Arles
GRD 282,29	Trinquetaille – T1	Ville Arles	Ville Arles
GRD 282,35	Trinquetaille – T8	Ville Arles	Ville Arles
GRD 282,4	Trinquetaille – T7	Ville Arles	Ville Arles
GRD 282,45	Trinquetaille – T6	Ville Arles	Ville Arles
GRD 282,48	Trinquetaille – T5	Ville Arles	Ville Arles
GRD 282,59	Trinquetaille – T2	Ville Arles	Ville Arles
GRD 282,59	Trinquetaille – T3	Ville Arles	Ville Arles
GRD 282,61	Gare Maritime – GM1	Ville Arles	Ville Arles
GRD 282,64	Gare Maritime – GM2	Ville Arles	Ville Arles
GRD 282,65	Gare Maritime – GM3	Ville Arles	Ville Arles
GRD 282,66	Gare Maritime – GM4	Ville Arles	Ville Arles
GRD 282,68	Gare Maritime – GM5	Ville Arles	Ville Arles
GRD 282,72	Gare Maritime – S3B3	Ville Arles	Ville Arles
GRD 282,86	Gare Maritime – GM6	Ville Arles	Ville Arles
GRD 283,01	Gare Maritime – GM7	Ville Arles	Ville Arles
GRD 283,12	Quai de la Gabelle – GM8	Ville Arles	Ville Arles
GRD 283,15	Quai de la Gabelle – S1B2	Ville Arles	Ville Arles
GRD 283,21	Quai de la Gabelle – T4	Ville Arles	Ville Arles

3 ARRETES PREFECTORAUX

3.1 ARRETES STATUTS DU SYMADREM

Le dernier arrêté préfectoral portant sur la mise à jour des statuts du SYMADREM est le suivant :

- [R002] : Arrêté Préfectoral des Bouches-du-Rhône portant modification des statuts du Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement des Digues du Delta du Rhône et de la Mer – 8 février 2017

3.2 ARRETES DE TRANSFERT DE GESTION

Deux arrêtés portant transfert de gestion des digues de l'Etat au bénéfice du SYMADREM ont été pris en 2001 concernant la gestion des digues du Grand Rhône Rive Droite du PK 317 au PK 326 et en 2002 concernant la partie haute des quais du Rhône en traversée d'Arles. Les références de ces arrêtés sont les suivantes :

- [R101] : Arrêté Préfectoral des Bouches-du-Rhône portant transfert de gestion au Syndicat Mixte d'Aménagement des Digues du Rhône et de la Mer des terrains du Domaine Public Fluvial à Arles partie haute de quais du Rhône – 11 avril 2002 (remise d'ouvrage le 10 juin 2002)
- [R102] : Arrêté Préfectoral des Bouches-du-Rhône portant transfert de gestion au Syndicat Mixte d'Aménagement des Digues du Rhône et de la Mer des terrains du Domaine Public Fluvial sur les rives gauche (PK 288.5 à 311.5) et droite (317 à 326) du Grand Rhône – 17 Décembre 2001

3.3 ARRETES DE CLASSEMENT

Deux arrêtés de classement d'ouvrages actuellement gérés par le SYMADREM ont été pris. Ce sont les suivants :

- [R302] : Arrêté Préfectoral des Bouches-du-Rhône n°16-2010 PC fixant la classe B pour les digues protégeant la Camargue Insulaire, rive droite du Rhône et rive gauche du Petit Rhône – 22 mars 2010
- [R304] : Arrêté Préfectoral des Bouches-du-Rhône n°56-2012 modifiant [R302] vis-à-vis de la revue de sureté.

3.4 ARRETE REGLEMENTANT L'USAGE ET LA CIRCULATION SUR LES DIGUES

Un arrêté a été pris en 2002, réglementant les usages sur les digues et quais du Rhône appartenant à l'Etat et dont la gestion a été transférée au SYMADREM. La référence de ce dernier est la suivante :

- [R501] : Arrêté Préfectoral des Bouches-du-Rhône réglementant les usages sur les digues et quais du Rhône et la digue à la Mer appartenant à l'Etat et dont la gestion a été transférée au SYMADREM – 24 octobre 2002

Cet arrêté ne vise pas le décret de 1932. Il interdit la circulation à tout véhicule terrestre à moteur et précise que la circulation à pied et à vélo est autorisée.

3.5 ARRETES DE DESTRUCTION DES ANIMAUX FOUISSEURS

Chaque année, à la demande du SYMADREM, un arrêté préfectoral autorisant le piégeage des animaux fouisseurs et plus particulièrement les blaireaux est pris. Le dernier en date est le suivant :

- [R607] : Arrêté Préfectoral des Bouches-du-Rhône portant autorisation aux gestionnaires d'ouvrages hydrauliques de destruction d'animaux d'espèces fouisseuses ou dévastatrices susceptibles de porter atteinte par leur action à l'intégrité physique des ouvrages de génie civil dans le Département des Bouches-du-Rhône de juin 2017 à juin 2018 – 20 juillet 2017

3.6 ARRETES RELATIFS AUX ACQUISITIONS FONCIERES

L'arrêté en vigueur de déclaration d'utilité publique est le suivant :

- [R703] : Arrêté Préfectoral des Bouches-du-Rhône n°2013-15 déclarant d'utilité publique sur le territoire de la commune d'Arles, au bénéfice du SYMADREM, les travaux de réparation des quais du Rhône dans la traversée d'Arles et de la continuité de la protection en amont et en aval des quais – 10 avril 2013

3.7 ARRETES ET PORTES A CONNAISSANCE RELATIFS AUX PROCEDURES DITES D'AUTORISATION LOI SUR L'EAU OU CNPN

Les arrêtés d'autorisation, arrêtés complémentaires, portés à connaissance et arrêtés de dérogation à l'interdiction de destructions d'espèces protégées sont les suivants :

- [R802] : Arrêté Préfectoral des Bouches-du-Rhône n°2002-31/37-1999-EA autorisant, au titre des articles L214-1 à 6 du Code de l'Environnement, le SYMADREM à procéder aux travaux de confortement des digues du Rhône – secteurs invariants – confortement côté terre sur les communes d'Arles et de Port-Saint-Louis-du-Rhône et déclarant d'intérêt général cette opération – 12 avril 2002
- [R804] : Arrêté Inter-préfectoral des Bouches-du-Rhône et du Gard autorisant, au titre des articles L214-1 à 6 du Code de l'Environnement, le SYMADREM à procéder aux travaux de confortement des digues du Rhône – secteurs invariants – confortement côté fleuve et modification de tracé de la digue sur les communes d'Arles et de Port-Saint-Louis-du-Rhône – 19 mars 2003
- [R810] : Arrêté Préfectoral des Bouches-du-Rhône n°136-2001 DIG/EA portant déclaration d'intérêt général et autorisant, au titre de l'article L214-3 du Code de l'Environnement, le SYMADREM à réaliser les travaux de réparation des quais du Rhône dans la traversée d'Arles et de la continuité de la protection en amont et en aval des quais – 18 juin 2013
- [R815] : Arrêté Préfectoral des Bouches-du-Rhône autorisant les travaux de carrossabilité des digues du Petit Rhône et du Grand Rhône sur les communes d'Arles et Saint Gilles – 28 octobre 2015

4 ARRETES MUNICIPAUX

2 arrêtés municipaux réglementant l'usage et la circulation sur les digues de Camargue Insulaire ont été pris. Ces sont les suivants :

- [R502] : Arrêté municipal d'Arles interdisant la circulation à tout véhicule sur les digues et ouvrages exploités par le SYMADREM – 14 septembre 2010
- [R503] : Arrêté municipal d'Arles modificatif interdisant la circulation aux véhicules terrestres à moteur sur les digues et ouvrages exploités par le SYMADREM – 4 octobre 2010

5 DECLARATION D'EXISTENCE

Une déclaration d'existence, en application de l'article L.214-6 du code de l'environnement et valant autorisation au titre de la loi sur l'eau a été adressée en 2009 au Préfet des Bouches-du-Rhône [R201].

6 CONVENTIONS AVEC VNF

La convention intéressant le système d'endiguement Camargue Insulaire est la suivante :

- [F206] : Convention de participation financière entre le SYMADREM et VNF pour la réalisation des études réglementaires sur la partie basse et la partie haute des quais d'Arles – 2015

Une convention de superposition d'affectations sur les quais du Rhône est en cours de rédaction ; elle attribuera les affectations suivantes :

- Affectation principale : navigation (VNF)
- Affectation supplémentaire n°1 : protection contre les crues du Rhône (SYMADREM)
- Affectation supplémentaire n°2 : gestion des chemins de halage, mise en place des batardeaux (Ville d'Arles)
- Affectation supplémentaire n°3 : gestion des ouvrages hydrauliques d'eaux pluviales englobés dans les quais (Ville d'Arles)

Les trois parties signalent aux deux autres tout dysfonctionnement et tout désordre susceptible d'affecter les ouvrages objets de la superposition d'affectations. Et toutes ont à leur charge la veille hydrologique des crues du Rhône.

6.1 AFFECTATION SYMADREM

Le SYMADREM a à sa charge la surveillance, l'entretien et l'exploitation des quais en toutes circonstances dans leur globalité. Son affection comprend notamment la prise en charge financière des études et des documents exigés par la réglementation, en dehors des prestations, citées explicitement, à charge de VNF ou de la commune d'Arles.

Il assure également le maintien d'un niveau de sûreté des ouvrages correspondant au niveau de crue atteint par la crue exceptionnelle du Rhône.

6.2 AFFECTATION VNF

Hors période de crue, VNF a à sa charge la délivrance auprès de tiers des conventions d'occupation temporaire des ouvrages, après avis et prescriptions écrites de la commune d'Arles et du SYMADREM, ainsi que la gestion (garde, surveillance, entretien, réparations et renouvellement) du garde-corps et des trois soupiraux englobés dans le quai de la gare maritime.

A partir d'une prévision supérieure à 6000m3/s, VNF a à sa charge trois missions supplémentaires :

- La dépose ou le rabattement du garde-corps précité et sa repose après crue,
- L'obturation des trois soupiraux englobés dans le quai de la gare maritime et leur ouverture après crue,
- l'établissement, post-crue supérieure, d'un procès-verbal relatif à ces opérations (mise en œuvre, contrôle et événement particulier) et la transmission au SYMADREM au plus tard le 31 décembre de l'année écoulée.

6.3 AFFECTATIONS COMMUNE

Au-delà de la gestion de la voirie, la commune a à sa charge la gestion des batardeaux et ouvrages traversants.

Hors période de crue, la ville d'Arles gère la mise en place, l'exploitation, le stockage en lieu sûr et l'entretien courant des 31 batardeaux ainsi que des rainures et des seuils des passages batardables. Il en est de même pour la mise en place, la surveillance, l'entretien courant, les réparations et le renouvellement des organes de fermeture des ouvrages hydrauliques traversants (vannes, martellières, clapet anti-retour). Toute modification structurelle ou remplacement de ces organes fait l'objet d'une validation par le SYMADREM, qui ne pourra intervenir que par écrit. Les modalités d'entretien courant ont été remises à la Commune par le SYMADREM qui en valide toute modification.
La commune veille également à l'intégrité des poteaux urbains disposés au droit des batardeaux et destinés à empêcher le stationnement de véhicules et à réduire le risque de choc sur les batardeaux.

A partir d'une crue de 6000m3/s à la station de Beaucaire/Tarascon, la ville d'Arles met en place les batardeaux ; pour les ouvrages hydrauliques, qui sont des exutoires pluviaux, leur fermeture est faite en fonction de la corrélation Pluie/Crues.
La commune informe le SYMADREM et VNF de sa décision de mettre en œuvre les batardeaux et, après mise en œuvre, de la bonne mise en place des batardeaux. Les batardeaux sont cadenassés pour éviter le vol. Un contrôle extérieur ou interne par un personnel qualifié est réalisé par la commune a minima sur les batardeaux les plus vulnérables, soit les batardeaux dont la hauteur est supérieure à 1,50 m et qui comporte un ou plusieurs poteaux intermédiaires (11 sur les 31).

Pendant la durée de présence des batardeaux, des inspections régulières sont effectuées par la commune afin de s'assurer du maintien de l'intégrité des batardeaux et notamment de l'absence de vandalisme.
Après crue, le démontage des batardeaux est opéré, au plus tard 10 jours après que le débit constaté à la station de Beaucaire/Tarascon soit passé en dessous de 6000 m^3/s ; lors de ce dernier un inventaire des pièces est réalisé. Un procès-verbal relatif à ces opérations (mise en œuvre, contrôle et événement particulier) est établi par la commune et adressé au SYMADREM au plus tard le 31 décembre de l'année écoulée.

7 IDENTIFICATION DES REDACTEURS ET ORGANISMES AYANT PARTICIPE A LA REDACTION DE L'ETUDE DE DANGERS

L'organisme ayant rédigé l'étude de dangers est :

Le Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer
1182 Chemin de Fourchon
VC33
13200 ARLES

Les rédacteurs de l'étude de dangers sont :

- Thibaut MALLET : Directeur Général Adjoint et Directeur technique
- Charlie DAST : Ingénieur sûreté des ouvrages
- Marceau REQUI : Ingénieur sûreté des ouvrages
- Séverine CHARDES : Ingénieur d'exploitation

La cartographie et l'extraction des données a été assurées par :

- Antoine CASTAGNET : Chargé de missions Géomatique et Informatique

Ont contribué également à la rédaction de certaines parties :

- Khadija OUTALMIT : Ingénieur sûreté des ouvrages (n'est plus en poste actuellement)
- Jacques GUILLOT : Directeur technique adjoint (retraité)

La rédaction de l'étude accidentologique a été réalisée en étroite collaboration avec les gardes digues du SYMADREM :

- Robert BONNEFOY
- Joël COMMIN
- Bruno DUMAS
- Louis GASPARD
- Thierry LIABOEUF
- Thierry MORRA
- Norbert ROGER
- Alain RAMON

Le modèle de rupture a été élaboré avec l'assistance de Jean-Jacques FRY, expert au Centre d'Ingénierie Hydraulique d'EDF.

Jean-Jacques FRY a procédé en une relecture, vérification et validation technique du chapitre n°7.1 et de la méthodologie décrite au chapitre n°2.

Le Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement des Digues du Delta du Rhône et de la Mer (SYMADREM), est un établissement public territorial (syndicat mixte ouvert) qui regroupe depuis le 1er janvier 2018 :

- La Région Provence-Alpes-Côte d'Azur,
- La Région Occitanie,
- Le Département du Gard,
- Le Département des Bouches-du-Rhône,
- la Métropole Aix Marseille Provence (AMP),
- la Communauté d'Agglomération Arles Crau Camargue Montagnette (ACCM),
- la Communauté d'Agglomération Nîmes Métropole (NM),
- la Communauté de Communes Terre de Camargue (CCTC),
- la Communauté de Communes de Beaucaire Terre d'Argence (CCBTA),
- la Communauté de Communes de la Petite Camargue (CCPC).

Ses missions consistent en :

- l'exploitation des ouvrages de protection contre les crues du Rhône et contre les incursions marines situés dans son périmètre de compétences,
- la maîtrise d'ouvrage des études et des travaux de renforcement des ouvrages situés dans son périmètre de compétences.

Le SYMADREM dispose, par arrêté du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement du 24 janvier 2018 portant agrément d'organismes intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques de l'agrément n°62-c « Digues et Petits Barrages – Etudes et diagnostics » et de l'agrément n°62-d « Digues et Petits Barrages – Etudes, diagnostics et suivi de travaux » jusqu'au 30 décembre 2021.

Conformément à l'arrêté du 15 novembre 2017 précisant les catégories et critères des agréments des organismes intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques ainsi que l'organisation administrative de leur délivrance :

- L'agrément Digues et petits barrages - études et diagnostics autorise : la réalisation de l'étude de dangers d'un ouvrage hydraulique (barrage ou digue), d'un système d'endiguement ou d'un aménagement hydraulique, en application de l'article R. 214-116 du code de l'environnement ; la conception d'un projet de création ou de modification d'un ouvrage hydraulique (barrage ou digue), en application de l'article R. 214-119 du code de l'environnement ; la réalisation du diagnostic de sûreté d'un ouvrage hydraulique (barrage ou digue), en application de l'article R.214-127 du code de l'environnement ;
- L'agrément Digues et petits barrages - études, diagnostics et suivi des travaux ; cet agrément autorise en sus du précédent la maîtrise d'œuvre unique pour la construction ou la modification d'un ouvrage hydraulique (barrage ou digue), en application de l'article R. 214-120 du code de l'environnement.

Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT FLUVIAL CAMARGUE INSULAIRE

DOCUMENT A

CHAPITRE N°2 : OBJET DE L'ETUDE

SOMMAIRE

1 Cadre de l'étude 29
2 Présentation de la zone protégée 30
3 Presentation du système d'endiguement 38

1 CADRE DE L'ETUDE

L'étude de dangers est la première étude de dangers concernant le système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire ». Cette étude de dangers est réalisée dans le cadre d'une autorisation initiale du système d'endiguement, sans travaux. Le contenu de l'étude de dangers, qui fait partie du dossier de demande d'autorisation, est conforme à l'article 2 de l'arrêté du 7 avril 2017.
Le contenu de l'étude porte sur ce système en l'état actuel.

Avertissement :

Tous les débits cités dans le document sont ceux estimés, à la station de Beaucaire/Tarascon au PK Rhône 269.6, à partir de la courbe de tarage en vigueur au moment de l'établissement du présent document. Les périodes de retour sont celles issues de l'analyse hydrologique menée en 1998 lors de l'Etude Globale Rhône (EGR). Ces périodes de retour ont été révisées dans le cadre de la présente étude de dangers et le seront encore prochainement avec l'étude hydrologique en cours menée sous maîtrise d'ouvrage de la DREAL Auvergne-Rhône-Alpes.
Les niveaux d'eau dans le lit endigué sont ceux calculées par la $CNR_{ingénierie}$ à partir du modèle développé dans le cadre de l'étude de calage pour des scénarios de crues données. Certains paramètres peuvent influer sur la ligne d'eau. Ces niveaux d'eau sont donc entachés d'incertitudes présentées dans le chapitre n°4.
Les niveaux de protection de la zone protégée par le système d'endiguement sont donnés sous la forme d'une cote à la station de Beaucaire/Tarascon entachée d'une incertitude précisée dans le chapitre relatif aux niveaux de protection ; les débits et périodes de retour associés à cette cote sont indicatifs.

2 PRESENTATION DE LA ZONE PROTEGEE

La zone protégée par le système d'endiguement s'étend sur 657 km². Les contours de la zone protégée ont été déterminés par la localisation des digues du système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » et de la digue à la mer, ces dernières créant un espace fermé où l'altimétrie est faible.

La zone protégée par le système d'endiguement fait partie de la zone protégée du Grand Delta du Rhône, d'une superficie de 1 571 km², qui forme un « triangle » ayant pour sommet : Beaucaire/Tarascon au Nord, Port-Saint-Louis-du-Rhône/Fos-sur-Mer à l'Est et Aigues-Mortes/Le Grau-du-Roi à l'Ouest (Cf. figure ci-dessous).

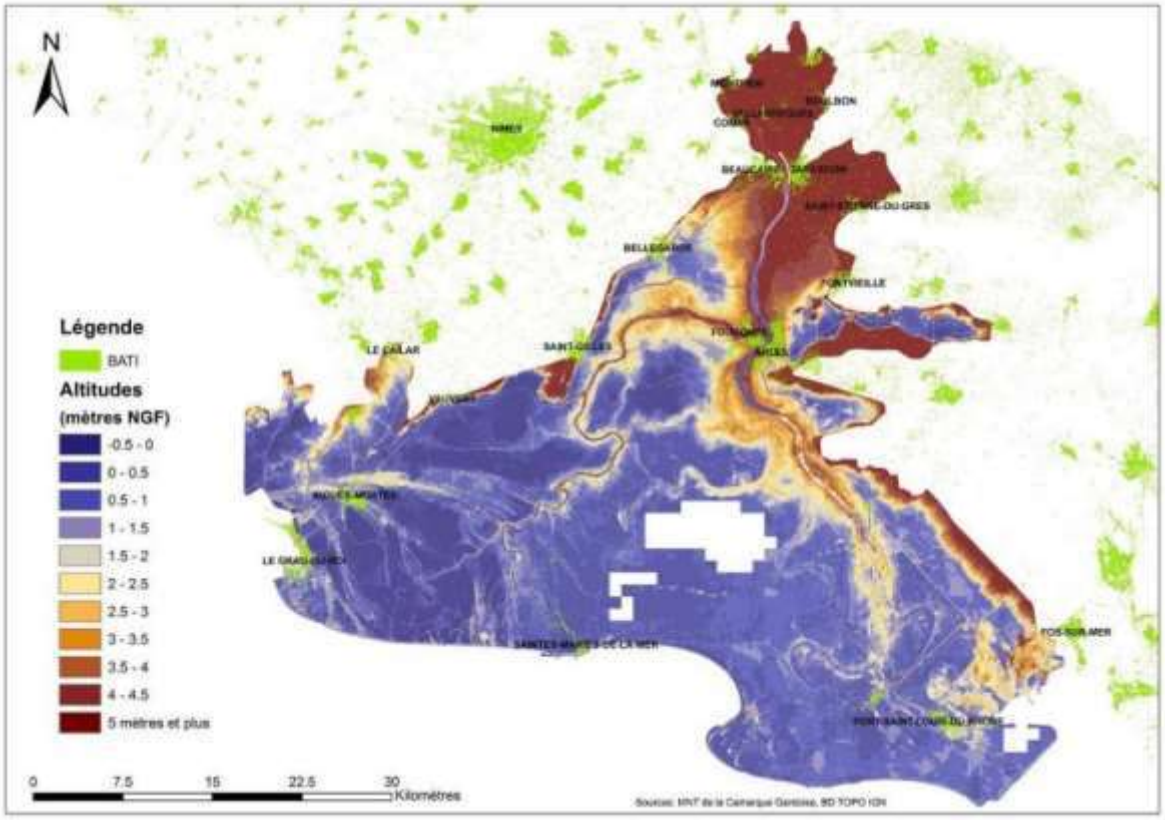


Figure 1. Le Grand Delta du Rhône

Le Grand Delta du Rhône et la zone protégée par le système d'endiguement ont été inondés plusieurs fois. On ne citera que les inondations provoquées par les crues de novembre 1840, mai 1856 et plus récemment en décembre 2003, qui sont les 3 événements les plus importants depuis le milieu du XIX^{ème} siècle.

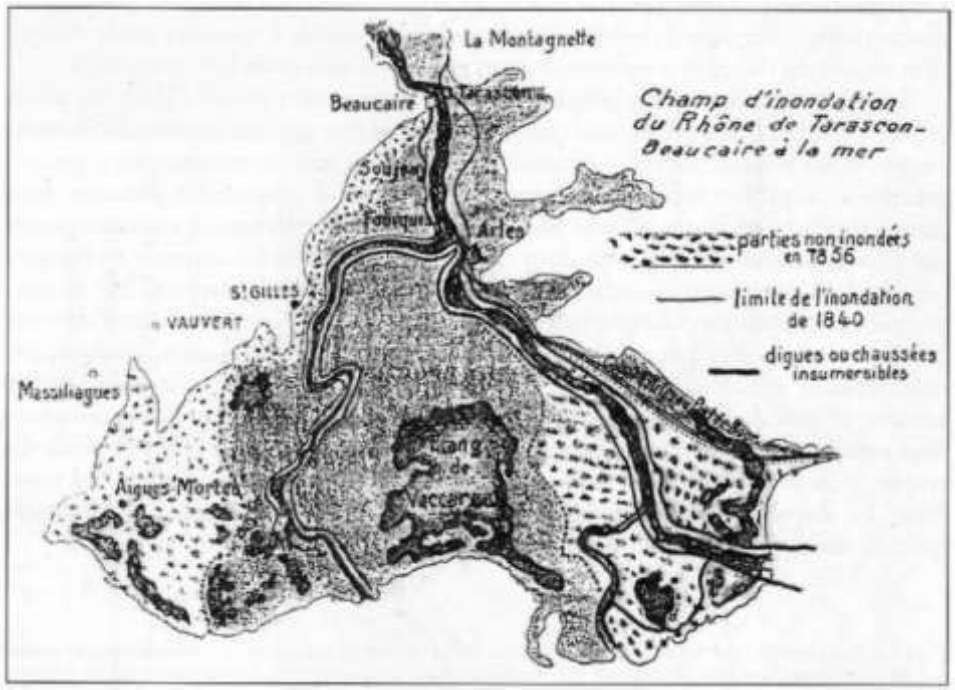


Figure 2. Inondations de 1840 et 1856 (source Pardé)

Figure 3. Inondations de 2003 (image SPOT IGN)

La zone protégée du Grand Delta du Rhône est située en aval du Bassin Versant du Rhône dont la superficie est de 95 500 km².

Figure 4. Bassin versant du Rhône et zone protégée par les ouvrages du SYMADREM

Elle se situe au carrefour des deux Régions Occitanie et Provence-Alpes-Côte d'Azur.

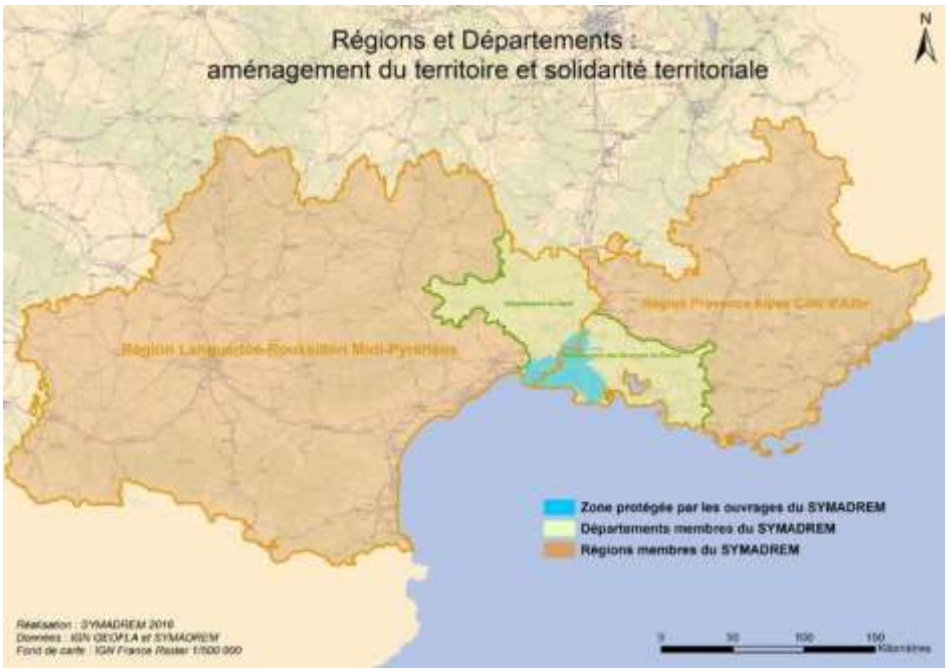


Figure 5. La zone protégée par les digues du SYMADREM

La zone protégée est répartie sur 2 communes des Bouches Du Rhône. Le tableau ci-dessous donne pour chaque commune : la surface de la commune, la surface de la commune comprise

dans la zone protégée, le pourcentage par commune de la surface communale comprise dans la zone protégée, le poids (en %) de chaque commune dans la zone protégée.

Tableau 1. Superficie de la zone protégée – bilan à l'échelle communale

Commune	Surface Commune (m²)	Surface communale dans la ZP (m²)	Surface communale dans la ZP (%)	Poids dans la ZP (%)
Arles	757 541 805	395 877 879	52.3%	60.3%
Saintes Maries de la Mer	371 765 889	260 725 610	70.1%	39.7%
TOTAL		656 603 490		100 %

Ces 2 communes sont adhérentes au SYMADREM.

La population INSEE résidant dans la zone protégée représentent environ 13 500 personnes.
La population DGF (= population INSEE + 1 habitant par résidence secondaire) représente quant à elle environ 15 000 personnes.

La carte en page suivante, superposant le bâti existant à la zone protégée, permet de voir que l'essentiel des enjeux est concentré
en tête de Camargue dans le quartier de Trinquetaille ; dans la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer en bordure du littoral et le long de la RD 570 juste au nord de la commune ; dans les hameaux de Salin de Giraud et Sambuc en bordure du Grand Rhône rive droite ; dans les hameaux de Saliers et d'Albaron en bordure du Petit Rhône rive gauche.
Les autres enjeux humains sont disséminés dans la plaine du delta.

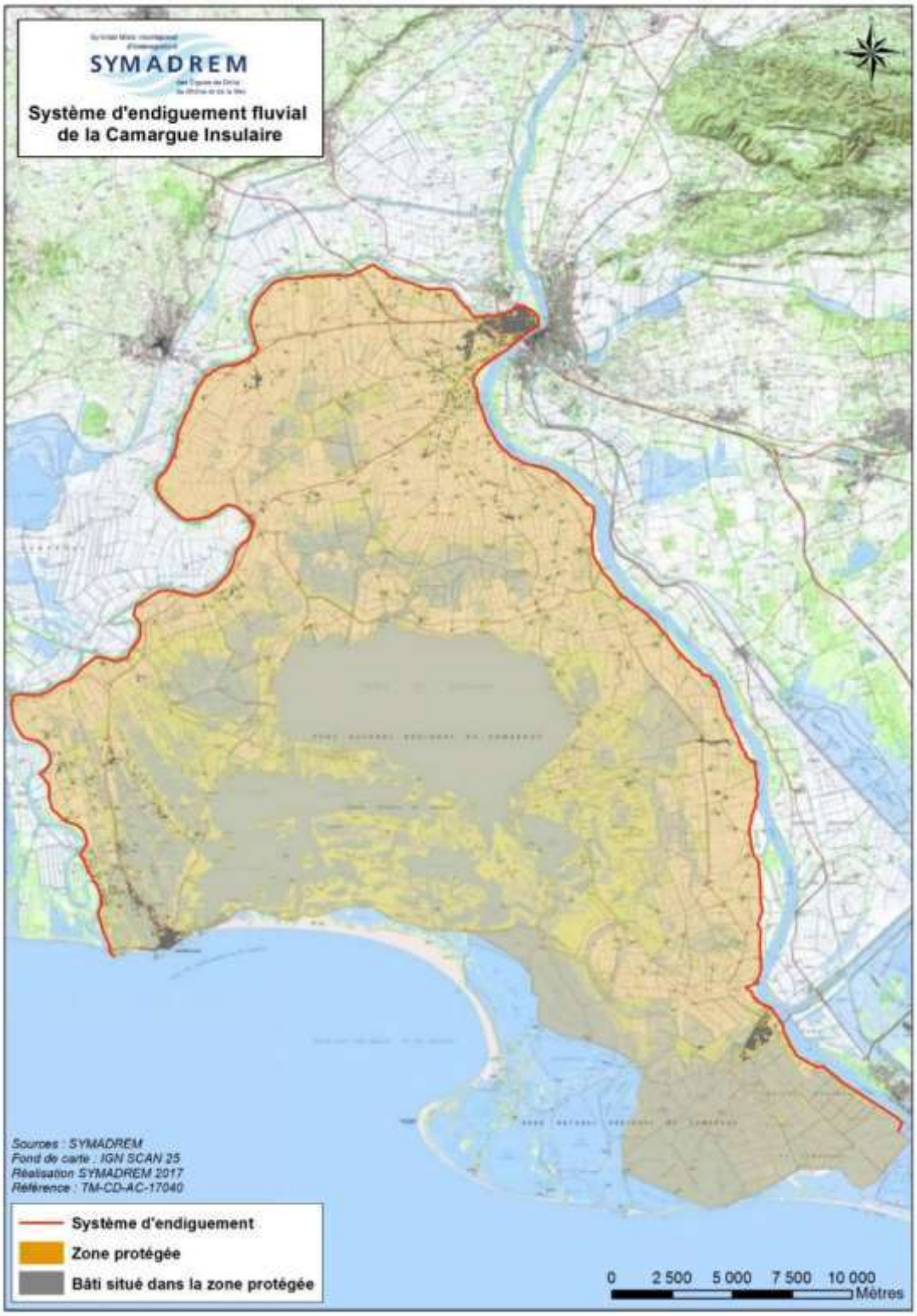


Figure 6. Système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » - zone protégée et bâti

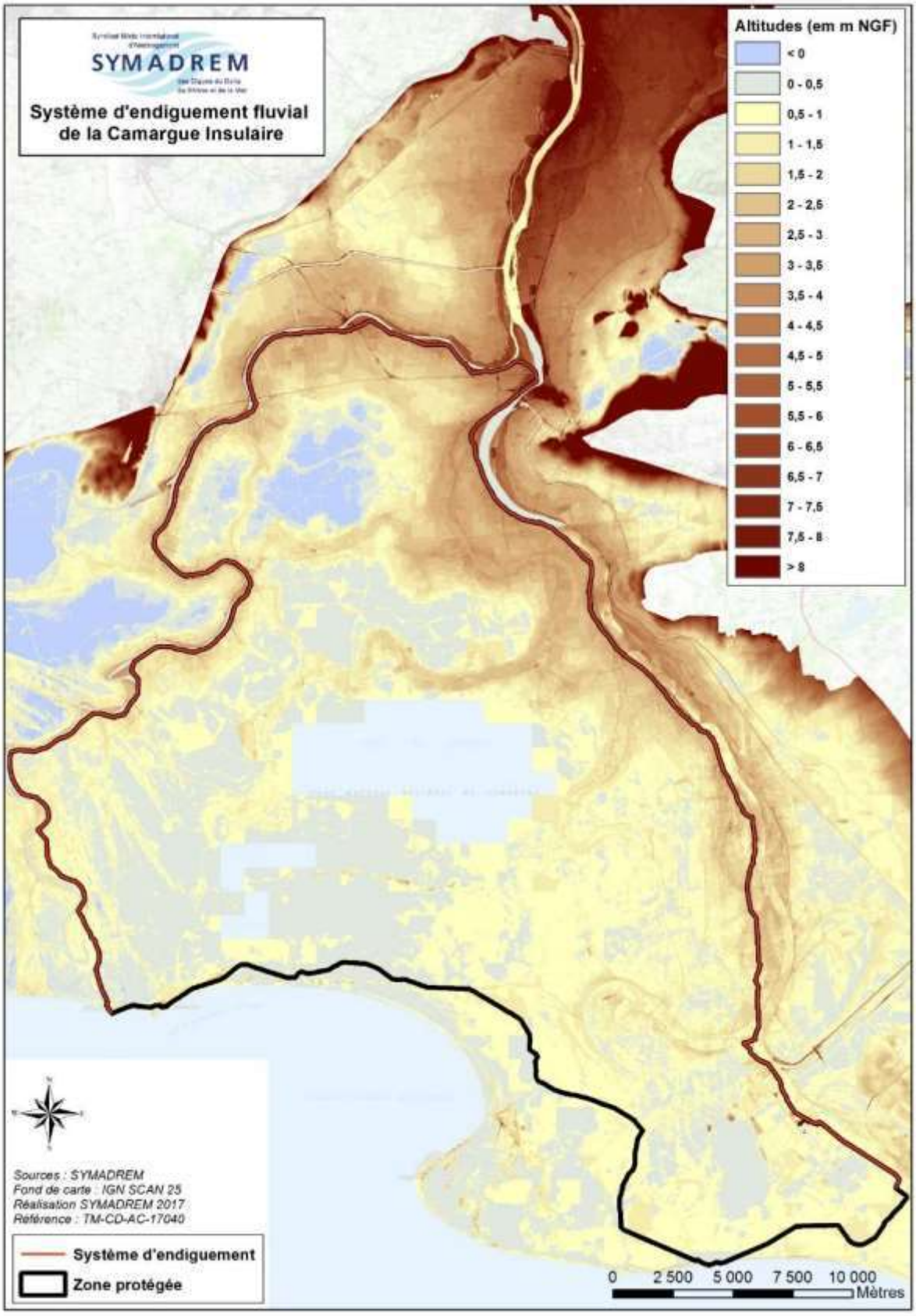


Figure 7. Zone protégée et modèle numérique de terrain

La zone protégée est découpée en 39 sous-zones protégées pouvant être considérées comme hydrauliquement cohérentes. Elles ont été délimitées à partir de l'évaluation des probabilités de brèches (bande de sécurité), et des différents scénarios d'inondation (Cf. chapitre 8). La carte ci-dessous illustre ce découpage.

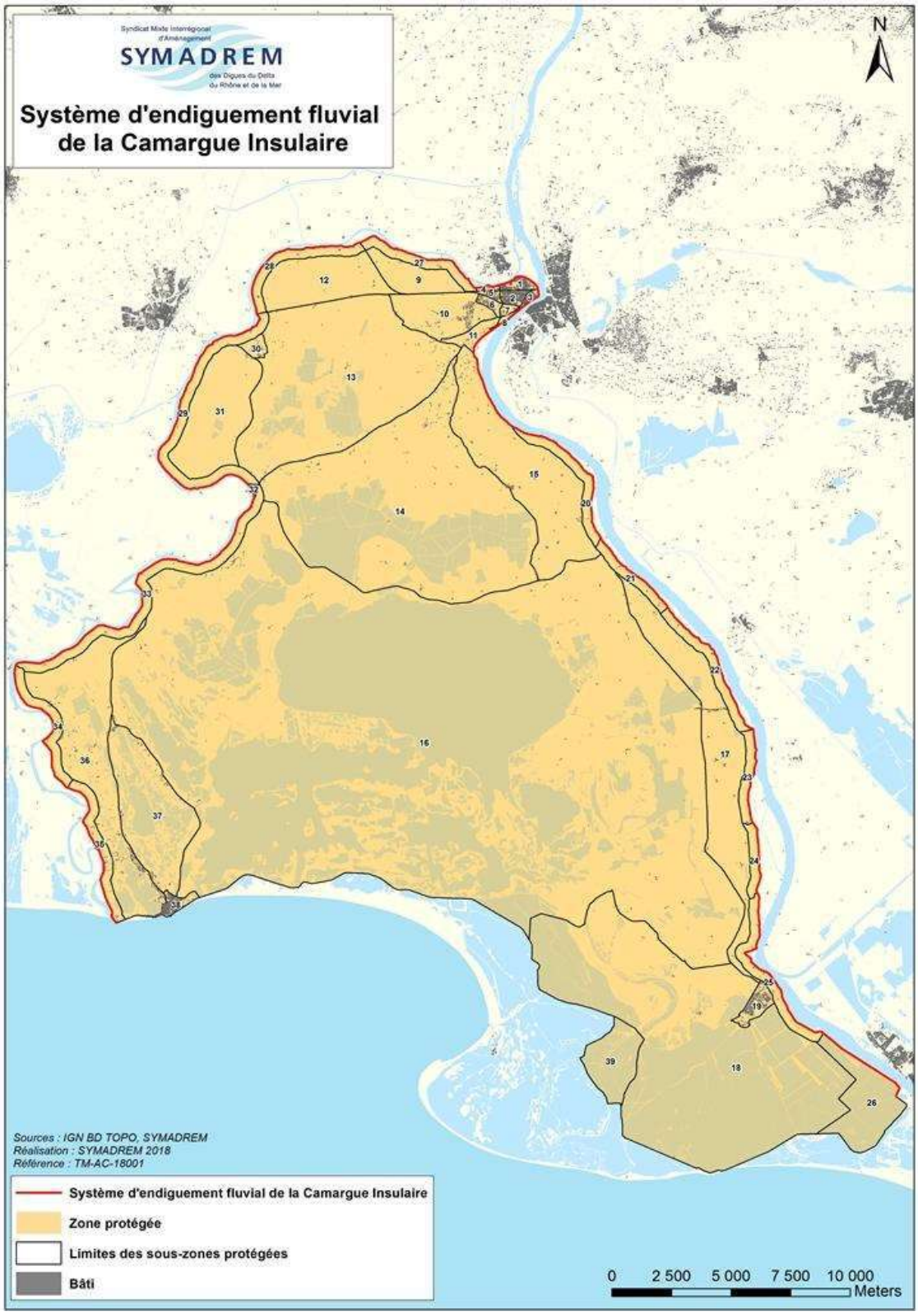


Figure 8. Découpage de la Camargue Insulaire en 39 sous-zones protégées

Le système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » est situé sur l'intercommunalité de la Communauté d'Agglomération Arles Crau Camargue Montagnette

La zone protégée par ce système est également localisée sur cette intercommunalité.

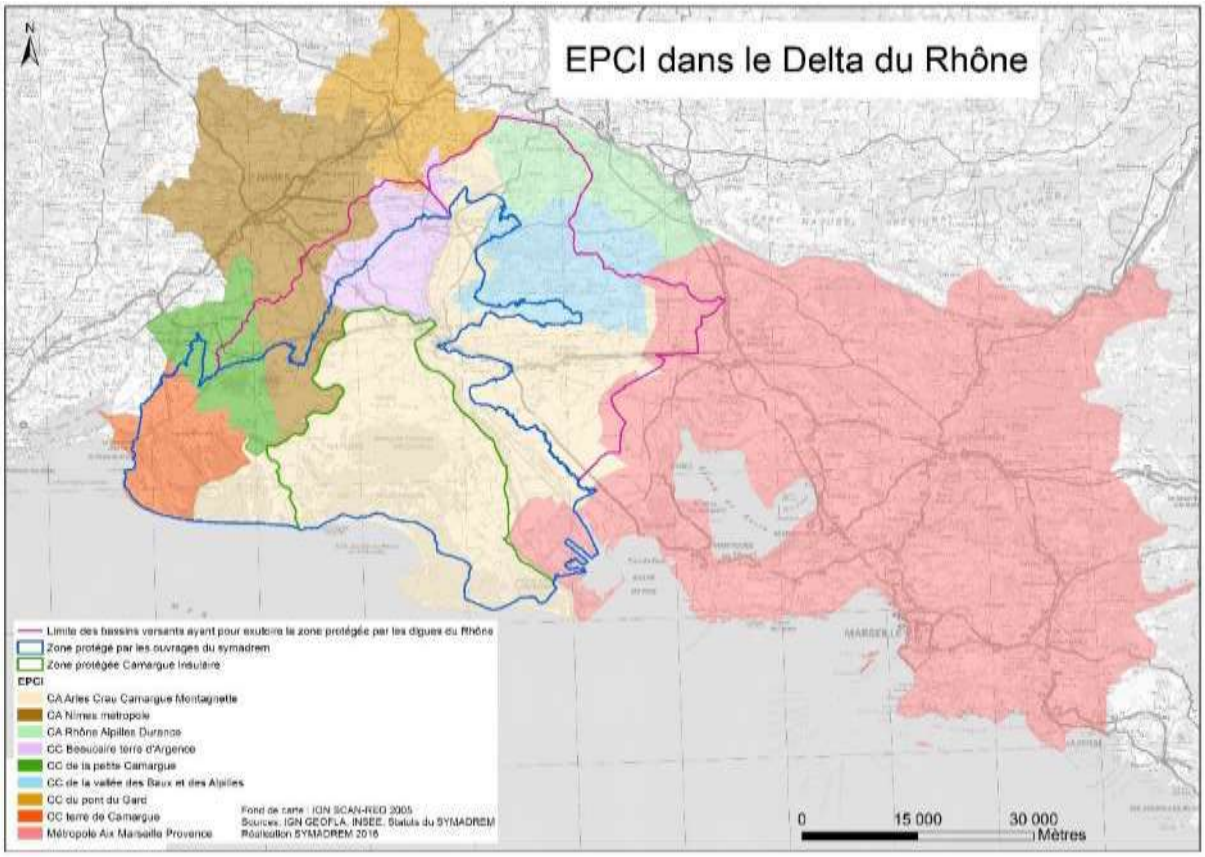


Figure 9. La zone protégée du Grand Delta du Rhône dans le contexte intercommunal

3 PRESENTATION DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT

Le système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » et la zone protégée par ce dernier, figure en page suivante.
Le système comprend des digues de 1er rang et certaines protections de berges en enrochements quand la largeur du ségonnal (ou franc-bord) est inférieure à 20 mètres.

L'objectif du système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » est de protéger la zone protégée des crues du Rhône jusqu'à un niveau de protection en cours de détermination.
Ce système d'endiguement est sans efficacité contre l'impluvium local qui peut être également source d'inondation de la zone protégée.
Les digues de 1er rang du système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » représentent environ 100 km de protection ; elles sont découpées en 33 tronçons homogènes. Les longueurs des tronçons, les PR digues encadrant ces tronçons, figurent dans le tableau ci-après.

Tableau 2. Système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » - tronçons de digue de 1er rang Petit Rhône rive gauche

N°	Libellé	Linéaire (m)	PR Digue	
			début	Fin
PRG1	Trinquetaille	1 576	PRG 281.1	PRG 282.5
PRG2	Cazeneuve-Augéry	5 268	PRG 282.5	PRG 287.4
PRG3	Beaumont	724	PRG 287.4	PRG 288.5
PRG4	Beaumont-Cavalès	6 601	PRG 288.5	PRG 294.5
PRG5	Cavalès - St Gilles	2 858	PRG 294.5	PRG 297.2
PRG6	St-Gilles - Figarès	923	PRG 297.2	PRG 298.2
PRG7	future digue résistante à la surverse (Figarès)	1 760	PRG 298.2	PRG 299.8
PRG8	La Galante - Albaron	6 698	PRG 299.8	PRG 306.55
PRG9	Albaron	1 181	PRG 306.55	PRG 307.7
PRG10	Albaron-Eymini	5 546	PRG 307.7	PRG 313
PRG11	Eymini-Sénebier	7 808	PRG 313	PRG 320.75
PRG12	Sénebier	1 057	PRG 320.75	PRG 322
PRG13	Sénebier-Icard	6 872	PRG 322	PRG 329.5
PRG14	Mas d'Icard - Bac	1 606	PRG 329.5	PRG 330.5
PRG15	Aval Bac du Sauvage	1 158	PRG 330.5	PRG 332.1
PRG16	Port Dromar	1 227	PRG 332.1	PRG 334.55
PRG17	Port l'Amarée	1 358	PRG 334.55	PRG 336
PRG18	L'Amarée	504	PRG 336	PRG 336.5
PRG19	Embouchure	491	PRG 336.5	PRG 337
Sous total Petit Rhône Rive Gauche		55 216		

Tableau 3. Système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » - tronçons de digue de 1er rang Grand Rhône rive droite

N°	Libellé	Linéaire (m)	PR Digue	
			début	Fin
D1	Défluent	1 136	PRG 281.1	GRD 281.8
GRD1	Quais	1 716	GRD 281.8	GRD 283.5
GRD2	Papeteries Etienne	790	GRD 283.5	GRD 284.15
GRD3	Emmaus	1 441	GRD 284.15	GRD 285.25
GRD4	Passeron-Monlong	3 240	GRD 285.25	GRD 288
GRD5	Monlong	1 037	GRD 288	GRD 288.9
GRD6	Montlong-Beaujeu	6 311	GRD 288.9	GRD 295.15
GRD7	Beaujeu-l'Armelière	3 142	GRD 295.15	GRD 298.2
GRD8	L'Armelière-la Commanderie	7 561	GRD 298.2	GRD 305.5
GRD9	La Commanderie-Bois Verdun	4 042	GRD 305.5	GRD 309.25
GRD10	Bois Verdun-Chartrouse	1 897	GRD 309.25	GRD 311.8
GRD11	Chartrouse-La Louisiane	1 247	GRD 311.8	GRD 313.1
GRD12	La Louisiane-L'Esquineau	7 957	GRD 313.1	GRD 319.4
GRD13	L'Esquineau-Palissade	4 368	GRD 319.4	GRD 323.3
Sous total Grand Rhône Rive droite		45 885		
TOTAL		101 101		

Le PK Rhône correspond au point kilométrique mis en place pour la navigation et matérialisé par des panneaux sur les berges du Rhône. Le PR, point repère SYMADREM pour les digues de 1er rang, correspond à la projection des PK Rhône sur les crêtes de digues matérialisés sur le terrain par des bornes posée tous les quarts de PR (soit 1 environ tous les 250 m).

La figure ci-après illustre ce principe

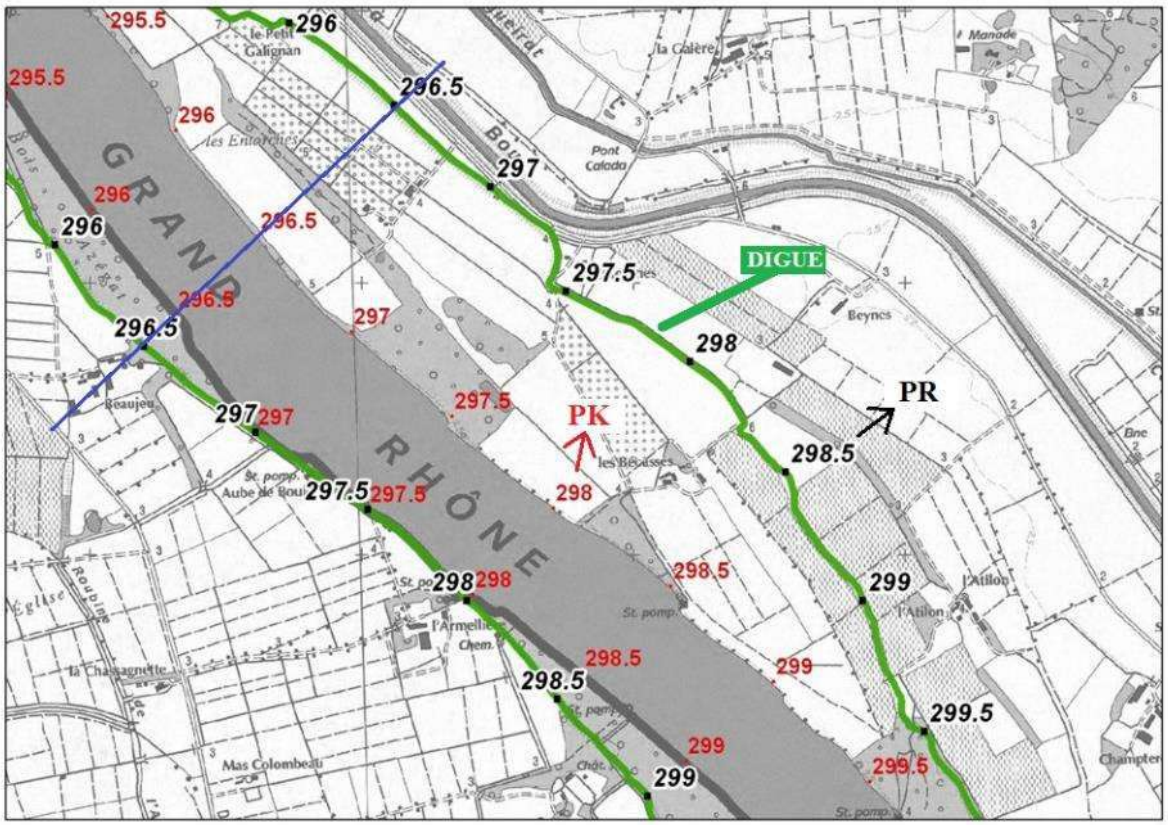


Figure 10. PK Rhône et PR digue

Les berges en enrochements incluses dans le système d'endiguement fluvial« Camargue Insulaire » sont les suivantes :

Tableau 4. Système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » - berges en enrochements du Petit Rhône

N° tronçon	Libellé	PK Rhône	
		début	Fin
D1	Amont pont fourques	280.95	281.05
PRG1	Trinquetaille	281.2	282.1
PRG2	Mas d'Yvan	285.65	286.3
PRG4	La trésorière	289	290.25
PRG4	Mas Léotaud	291.3	292
PRG4	Portamaud	293	293.6
PRG5	Petit Beaujeu	295	295.5
PRG6-7	Figarès	297.8	298.75
PRG8	Case brune	300.8	302.2

PRG8	Lauricet	303	304.3
PRG8	Mas de la vigne	305.1	305.5
PRG8	Amont Albaron	306.2	306.3
PRG9	Albaron	306.5	307.6
PRG10	Mas Combet	307.7	308.3
PRG10	Paty de la trinité	309.9	310.2
PRG10	Mas d'Alivon	310.4	310.5
PRG10	Les Bruns	310.8	311.1
PRG10	Amont Eymini	311.4	311.9
PRG10	Eymini	312.1	312.25
PRG11	Eymini Sud	314.85	314.85
PRG11	Eymini Sud (2)	314.95	315.25
PRG11	Mas de Ballarin	316.85	317.2
PRG11	Sénebier	318.8	321.25
PRG13	Château d'Astouin	324.9	325
PRG13	Cabanes Cambon	325.25	326
PRG14	La Fadaise	330.4	330.6
PRG13	Les Baumelles	325.6	325.6
PRG13	La Fadaise	330.35	330.4
PRG18	L'Amarée	336	336.25
PRG19	Le Tiki	336.5	337

Tableau 5. Système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » - berges en enrochements du Grand Rhône

N° tronçon	Libellé	PK Rhône	
		début	Fin
GRD2	Papèteries	283.5	283.7
GRD 4-5-6	Triquette – Fort de Pâques	286.2	289.8
GRD6	Sansouires	290.1	290.2
GRD7	Aube de Bouic	297	297.2
GRD7	L'Armelière	297.5	297.9
GRD8	Tour de Cazeau	301.5	301.8
GRD9	Petit Patis	306.3	307.2
GRD12	Chamone	314.5	315
GRD12	Barcarin	315.5	317
GRD13	Salins	320.2	321
GRD 4-5-6	Triquette - Montlong	GRD 286.2	GRD 288.9
GRD7	Aube de Bouic	GRD 297	GRD 297
GRD12	Chamone	GRD 315	GRD 315
GRD12	Eglise Barcarin	GRD 315.8	GRD 315.9
GRD12	Mas des Peupliers (1)	GRD	GRD

		317.6	317.6
GRD12	Mas des Peupliers (2)	GRD 317.85	GRD 317.9
GRD12	Estacade de l'Esquineau	GRD 318.5	GRD 318.65
GRD13	Salins (1)	GRD 320	GRD 320
GRD13	Salins (2)	GRD 320.6	GRD 320.6
GRD13	Salins (3)	GRD 321.3	GRD 321.6
GRD13	Salins (4)	GRD 321.75	GRD 321.75
GRD13	Salins (5)	GRD 321.85	GRD 321.85

La localisation des tronçons de digues composant le système d'endiguement figure en pages suivantes :

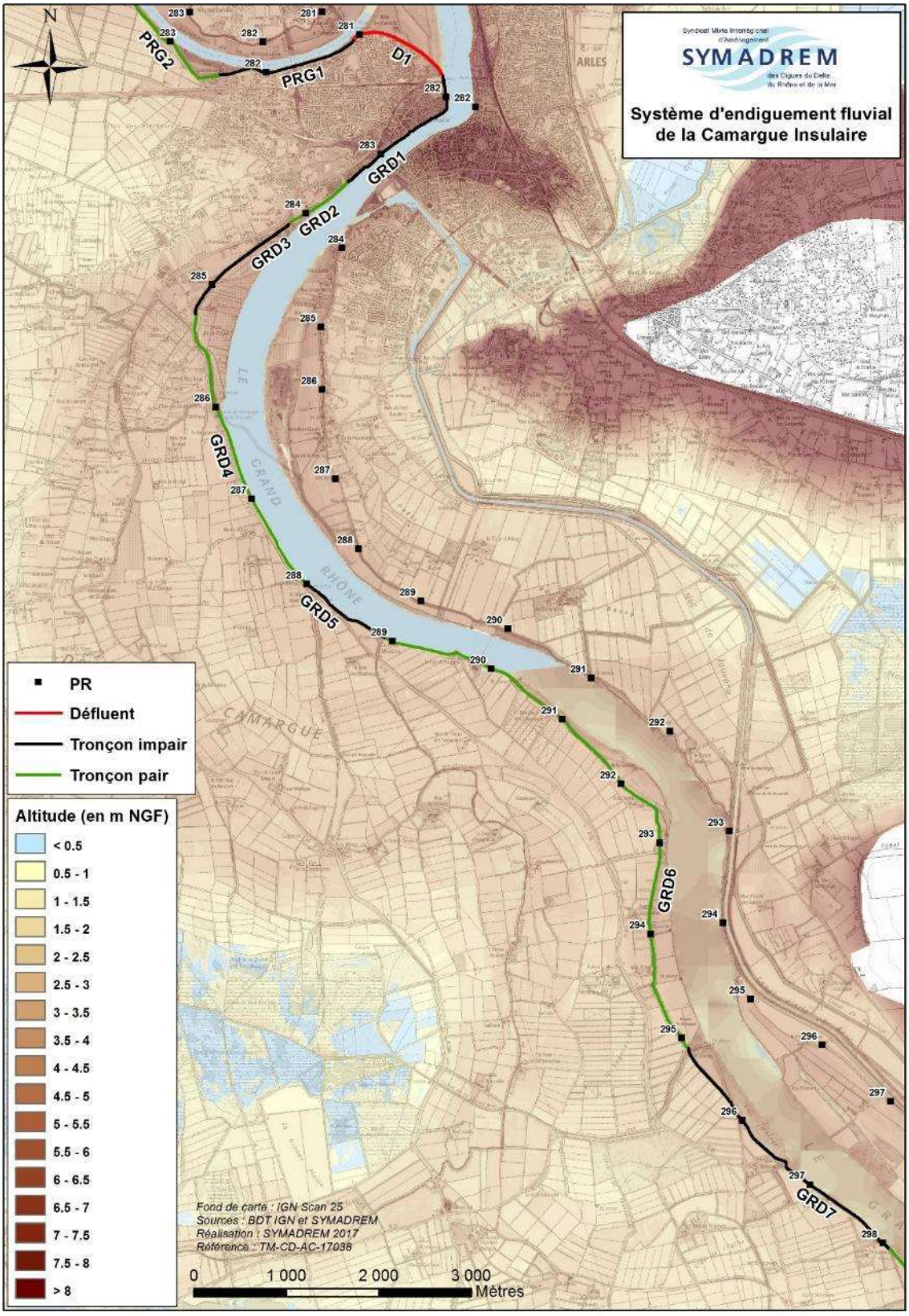


Figure 11. Système d'endiguement – découpage en tronçons de digue (D 1 et GRD 1 à 7)

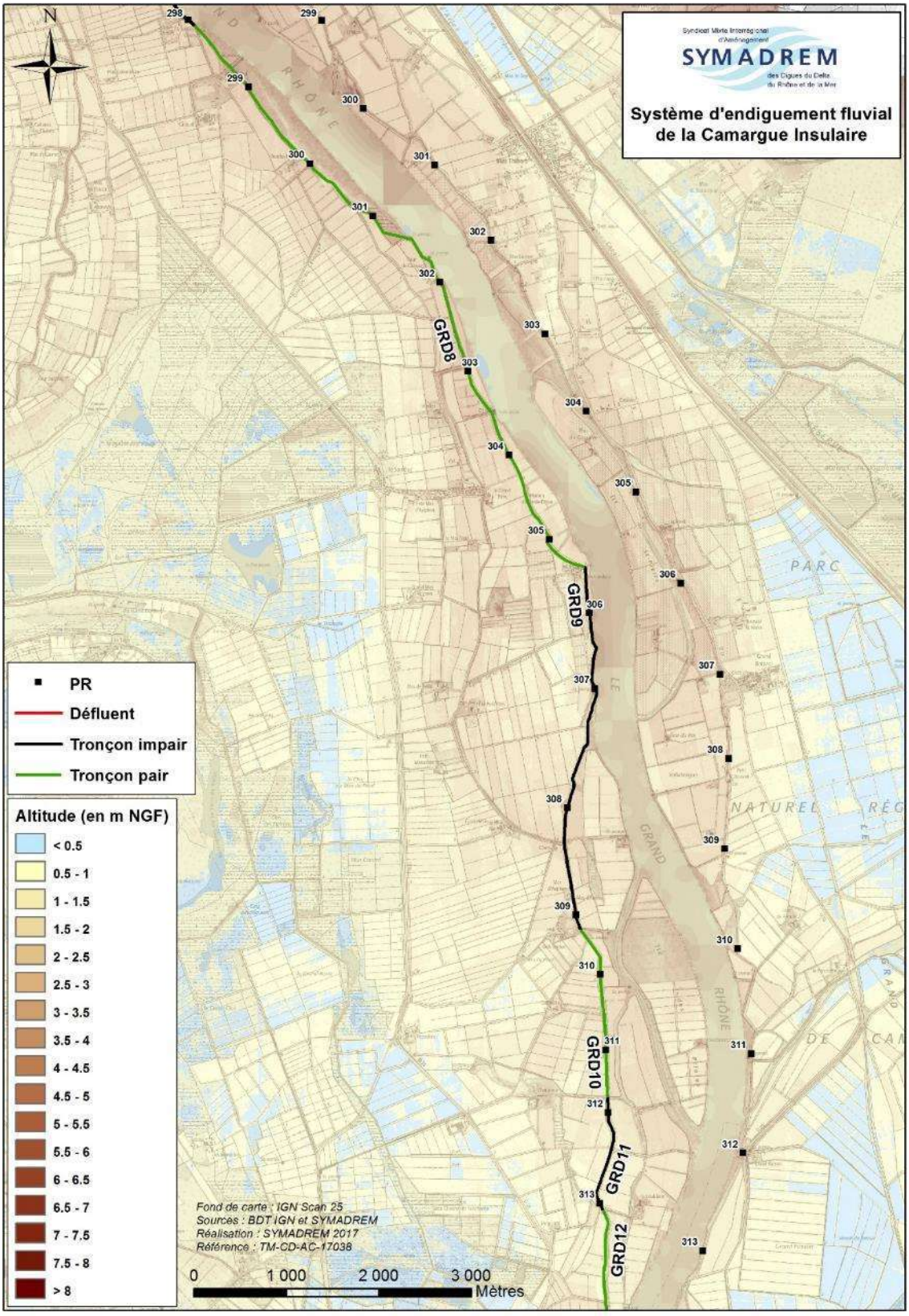


Figure 12. Système d'endiguement – découpage en tronçons de digue (GRD 8 à 11)

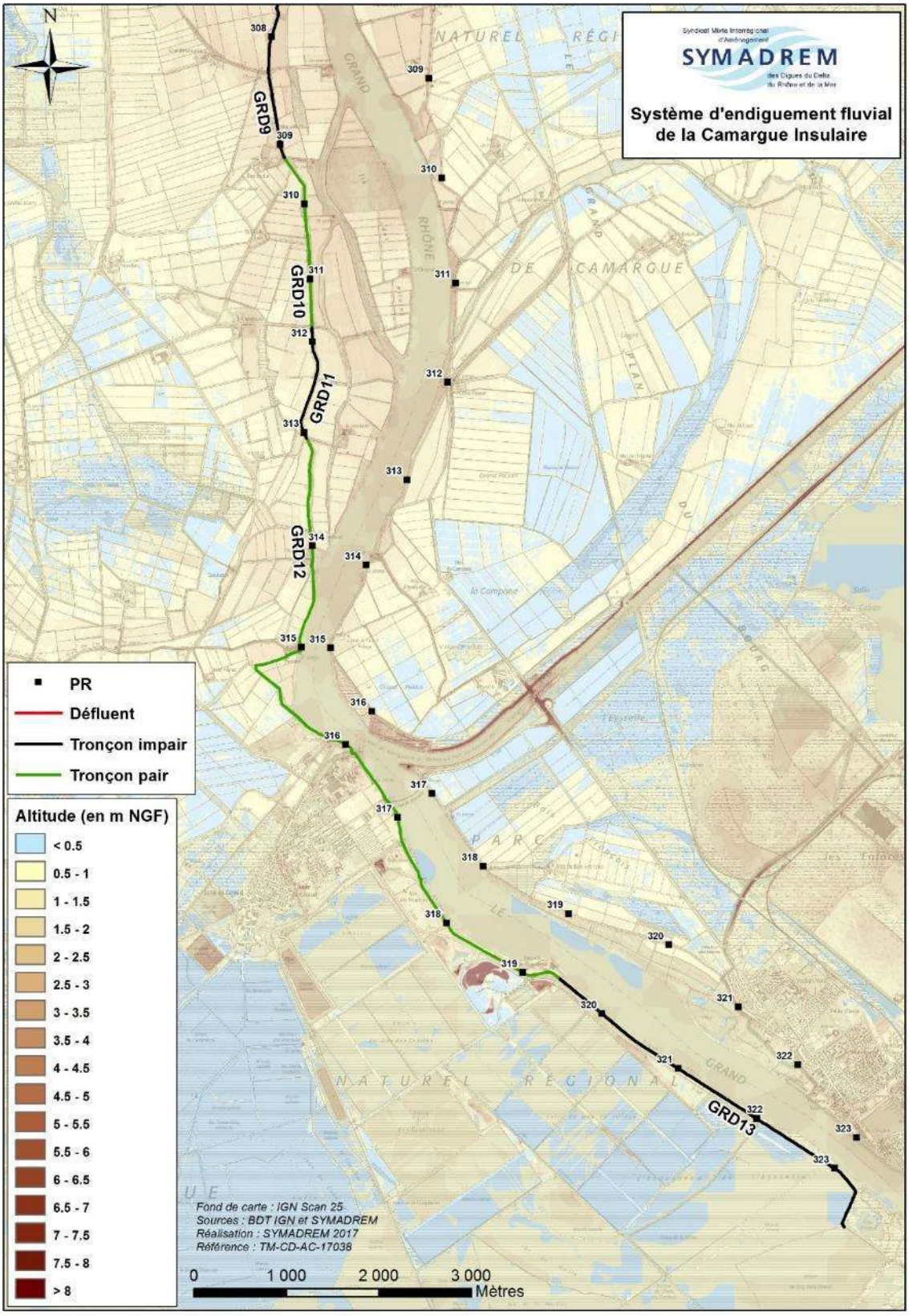


Figure 13. Système d'endiguement – découpage en tronçons de digue (GRD 11 à 13)

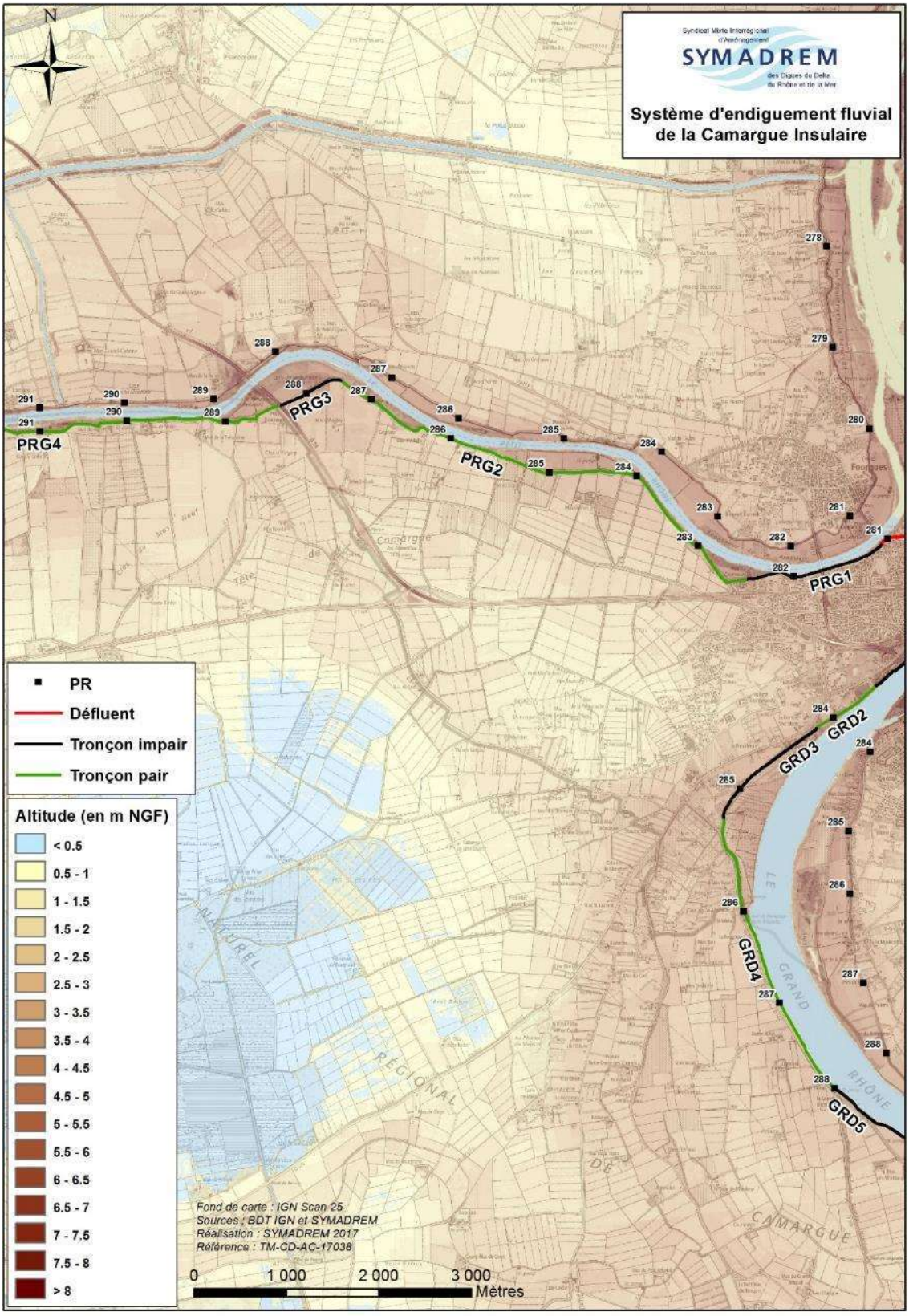


Figure 14. Système d'endiguement – découpage en tronçons de digue (PRG 1 à 3)

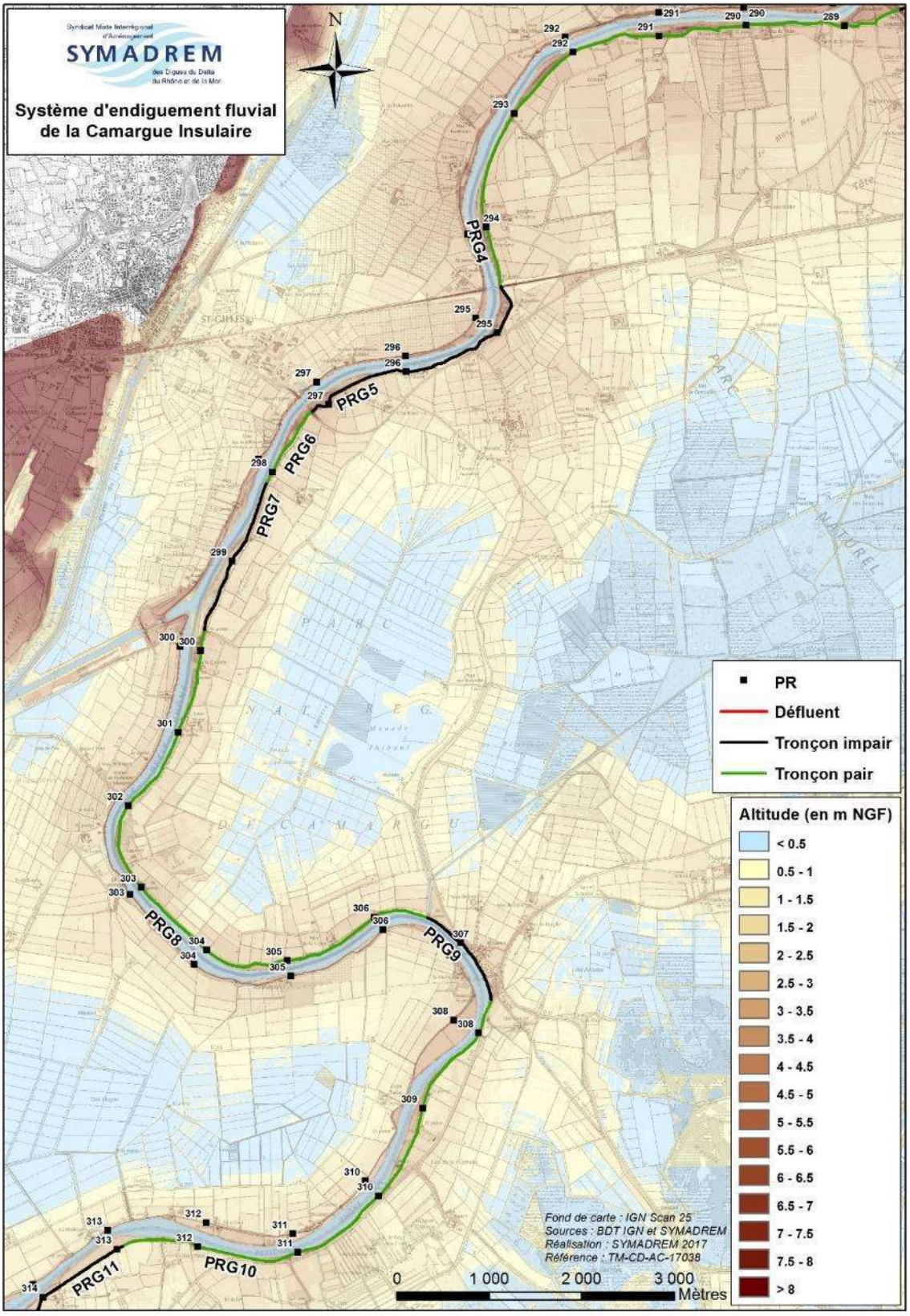


Figure 15. Système d'endiguement – découpage en tronçons de digue (PRG 4 à 10)

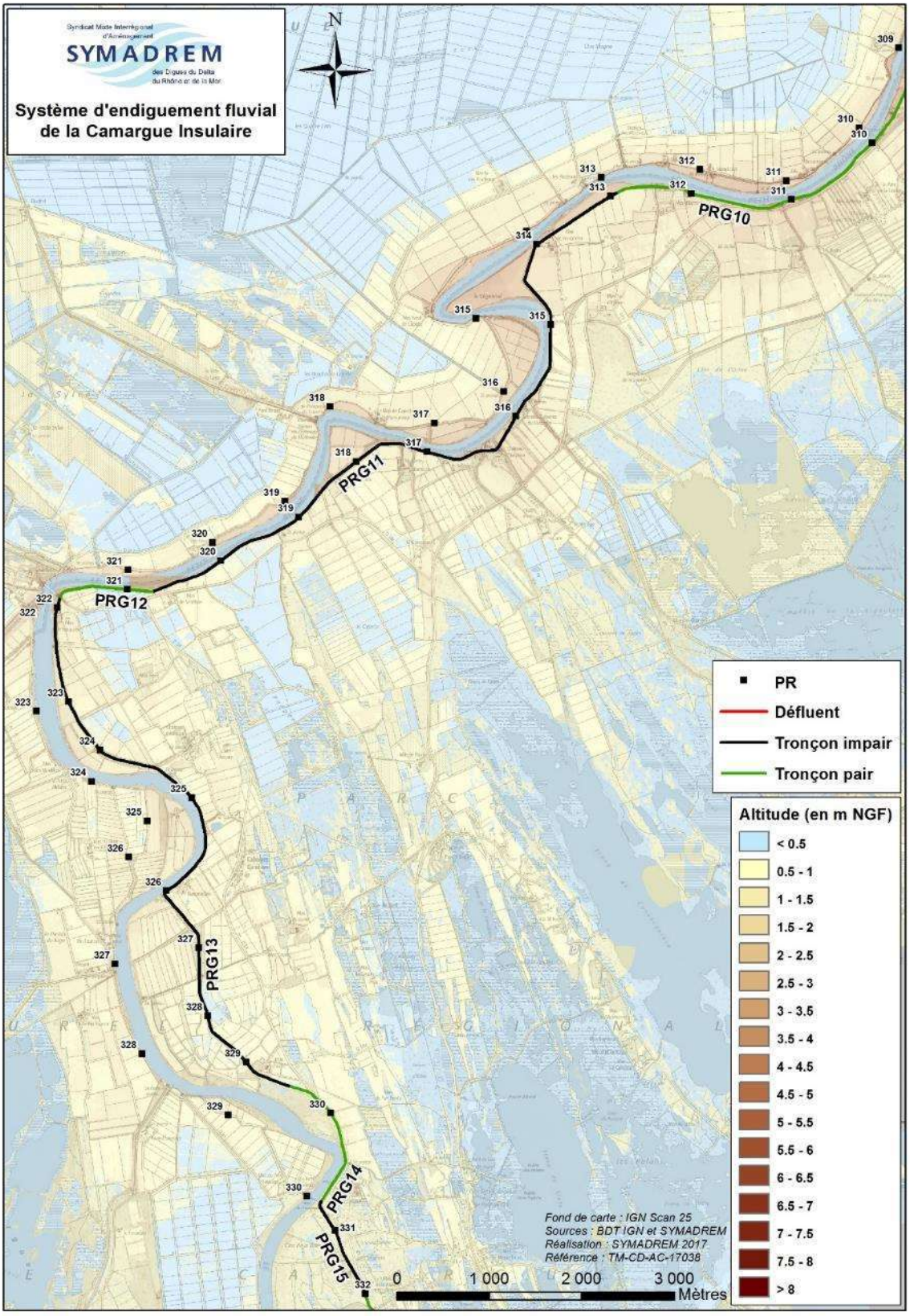


Figure 16. Système d'endiguement – découpage en tronçons de digue (PRG 11 à 15)

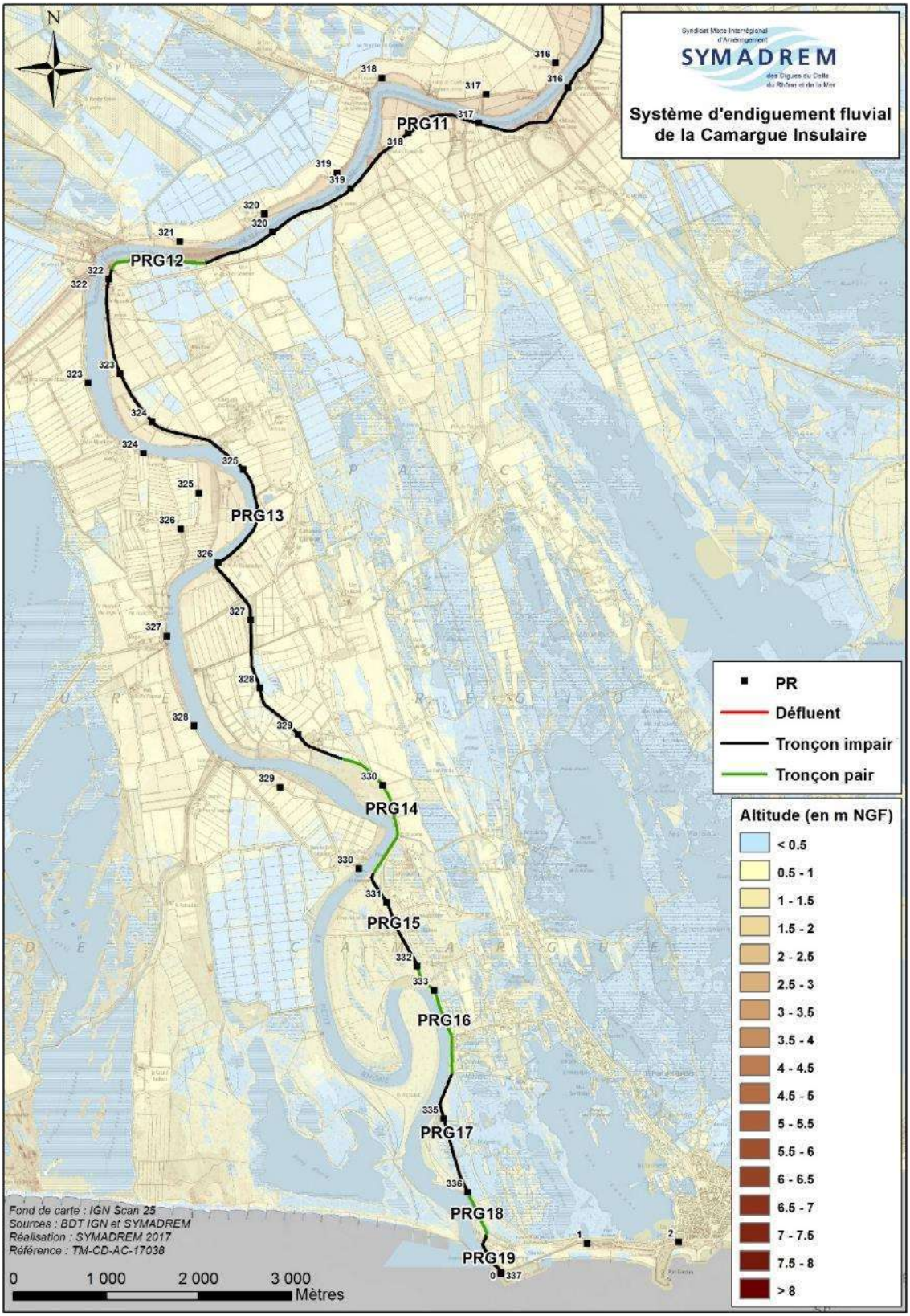


Figure 17. Système d'endiguement – découpage en tronçons de digue (PRG 12 à 19)

Les digues de 1er rang du système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » sont illustrées ci-dessous :

PRG1 Trinquetaille

PRG2 Cazeneuve-Augery

PRG3 Bois de Beaumont

PRG4 Beaumont-Cavalès

PRG5 Cavalès-St Gilles

PRG6 St Gilles-Figarès

PRG7 Figarès

PRG8 La Galante-Albaron

PRG9 Albaron

PRG10 Albaron-Eymini

PRG11 Eymini-Sénebier

PRG12 Sénebier

PRG13 Sylvéréal-Mas d'Icard

PRG14 Mas d'Icard-Bac du sauvage

PRG15 Aval du Bac du Sauvage

PRG16 Port Dromar

PRG17 Port de l'Amarée

PRG18 l'Amarée

PRG19 l'Embouchure

D1 Défluent

GRD1 Quais d'Arles

GRD2 Papèteries

GRD3 Emmaüs-Passerons

GRD4 Passerons-Montlong

GRD5 Montlong

GRD6 Montlong - Beaujeu

GRD7 Beaujeu-l'Armelière

GRD8 l'Armelière-la Commanderie

GRD9 la Commanderie-Bois Verdun

GRD10 Bois Verdun - Chartrouse

GRD11 Chartrouse-la Louisiane

GRD12 La Louisiane-l'Esquineau

GRD13 l'Esquineau-la Palissade

Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT

FLUVIAL CAMARGUE INSULAIRE

DOCUMENT A

CHAPITRE N°3.1. : ZONE PROTEGEE

SOMMAIRE

1 Limites de la zone protégée 57
2 Inondations passées de la zone protégée 58
2.1 Inondations du Rhône en provenance du système d'endiguement 58
2.2 Submersion marine 62
3 Communes et EPCI-FP de la zone protégée 63
4 Population et bâti de la zone protégee 64
5 Principales infrastructures routieres 73
6 Les Canaux 79
7 Niveaux de protection 81

1 LIMITES DE LA ZONE PROTEGEE

La zone protégée par le système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » couvre une superficie de 657 km². Les contours de la zone protégée ont été déterminés par la localisation des digues du système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » et de la digue à la mer, ces dernières créant un espace fermé.

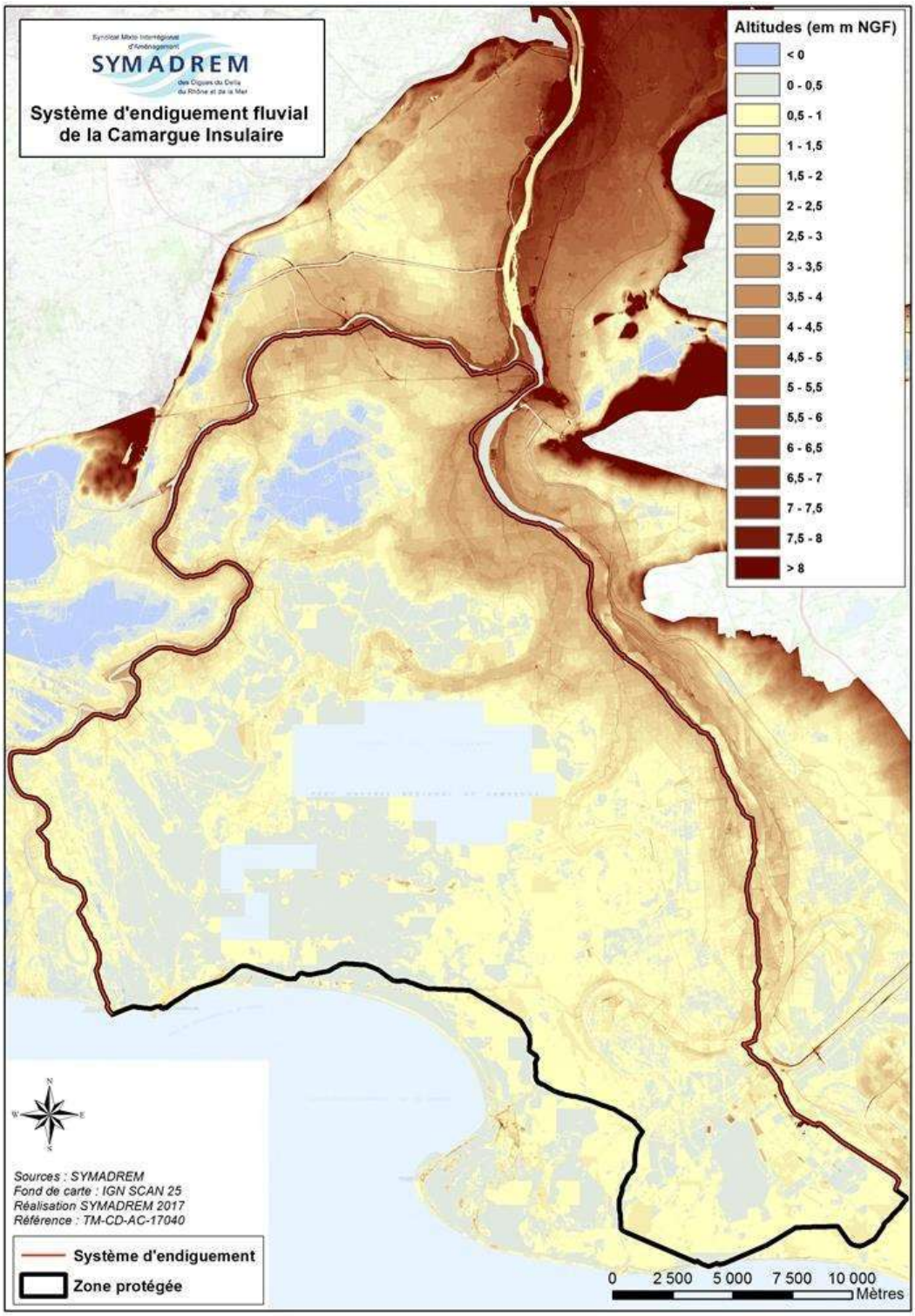


Figure 1. Zone protégée et modèle numérique de terrain

2 INONDATIONS PASSEES DE LA ZONE PROTEGEE

2.1 INONDATIONS DU RHONE EN PROVENANCE DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT

Le Grand Delta du Rhône et la zone protégée par le système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » ont été inondés plusieurs fois. Les inondations provoquées par les crues de novembre 1840, novembre 1843, mai 1856 et plus récemment en octobre 1993 et janvier 1994 sont les événements les plus importants depuis le milieu du XIX^{ème} siècle.

La carte ci-dessous illustre les contours des inondations de 1840 et 1856 provoquées par le Rhône.

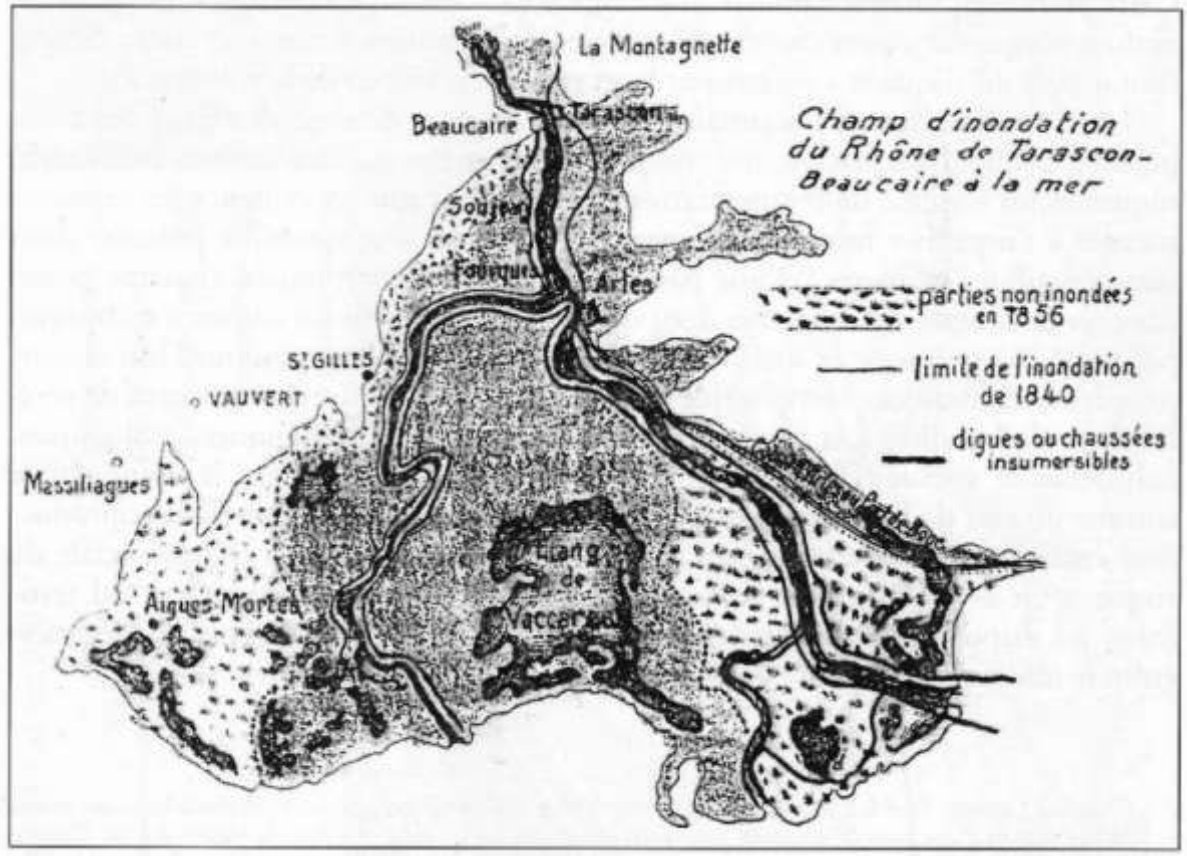


Figure 2. Inondations de 1840 et 1856 (source Pardé)

Le tableau ci-après extrait du chapitre 6 renseigne sur la cote de quelques laisses des crues précitées, relevées dans la zone protégée.

Tableau 1. Laisses des crues de 1840, 1843, 1856 et 1993 en Camargue Insulaire

Inondations du Rhône	Lieu	Cote relevée (m NGF)
Novembre 1840	Mas des Bernacles	1,89 (3,30 autre relevé)
Novembre 1843	Mas de Bernacles	1,59 m NGF
Mai 1856	Trinquetaille – avenue Edouard Herriot	6,26
	Mas de Bernacle	2,16
	Mas du Pont de Rousty	2,62
Octobre 1993	Mas du Pont de Rousty	2,43

Photo 1. Laisse de crue mai 1856 quartier de Trinquetaille

La carte ci-après illustre l'inondation la zone protégée en octobre 1993.

Le volume d'eaux déversées a été estimé à environ 130 millions de m^3.

450 maisons ont été inondées. La surface agricole touchée a été estimée à 13 000 ha sous une hauteur d'eau moyenne de 1 m.

Une partie de ce volume, 51 millions de m^3 a été rejeté dans le Rhône par les stations de pompage d'Albaron (PRG) et Beaujeu (GRD). La plus grande partie s'est écoulée vers le canal de Rousty et l'Etang de Vaccarès. De là, cette eau a été évacuée à la Mer, en partie gravitairement par le pertuis de la Fourcade (28 millions de m^3) et par pompage (44 millions de m^3). Ces pompages effectués pour éviter l'inondation des Saintes-Maries-de-la-Mer ont

nécessité l'installation de puissantes pompes d'une capacité totale d'environ 14 m^3/s. Ils ont duré deux mois.

L'image satellitaire et la photographie aérienne ci-après illustre l'ampleur de l'inondation.

Figure 1. Inondation du Rhône d'octobre 1993 – source Spot [A1993 04]

En janvier 1994, le volume d'eaux déversées a été estimé à 20 millions de m^3, ce qui est plus faible qu'en octobre 1993, mais s'explique par la décrue qui a été plus rapide et par l'importance des moyens d'interventions.

La surface touchée a été de 2000 Ha et le nombre d'habitations touchées : 45.

Le montant des dommages des crues d'octobre 1993 et janvier 1994 a été estimé sommairement dans le rapport Dambre à 200 millions de Francs, soit 30 millions d'euros. Cette estimation ne tient pas compte des dommages domestiques, dommages aux infrastructures et des interventions de moyens militaires.

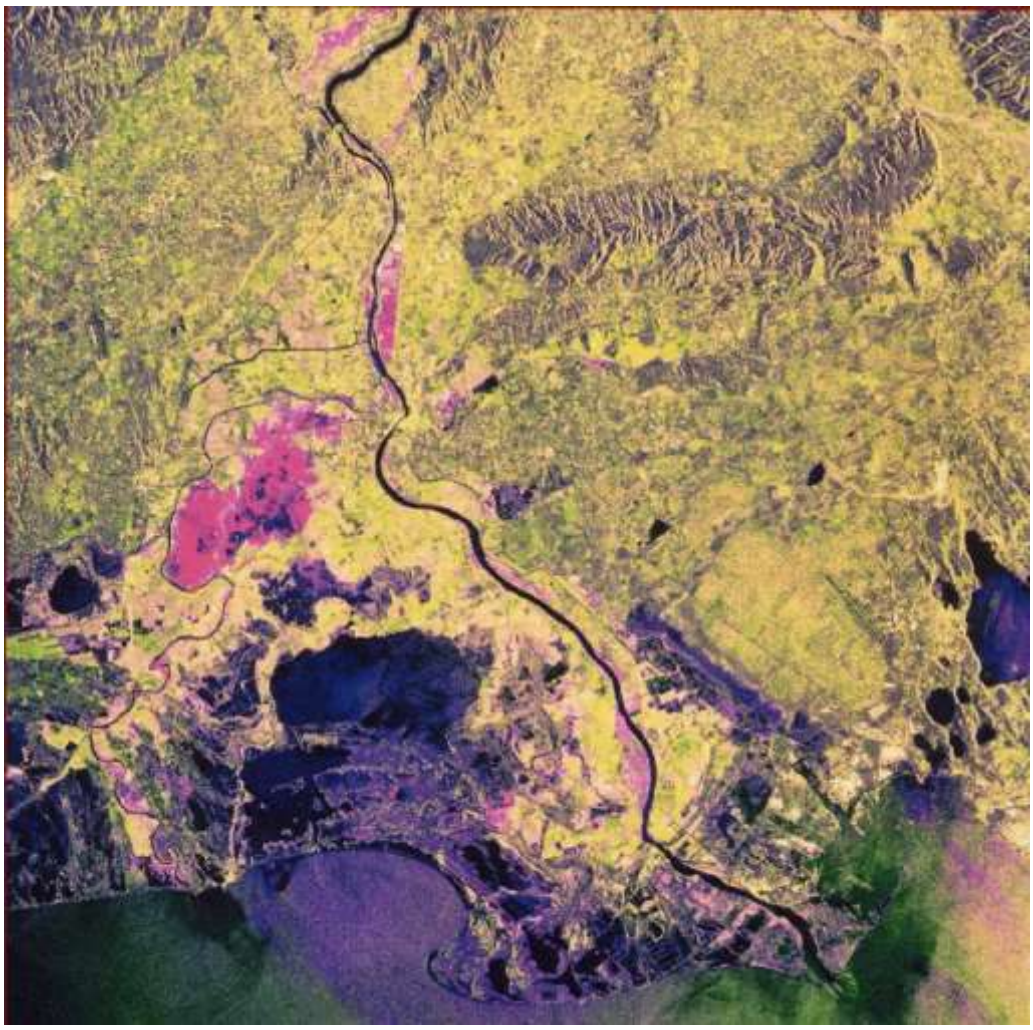


Figure 1. Inondation du Rhône de janvier 1994 – source SPOT [A1994 02]

Les volumes d'eau ayant déversé par les brèches dans le système sont respectivement les suivants :

Tableau 2. Volume déversé lors des crues historiques de 1840, 1856 et 2003

Zone protégée	Nov. 1840	Mai 1856	Octobre 1993	Janvier 1994
Rive Droite	1 400 millions de m^3	300 millions de m^3		
Camargue Insulaire	800 millions de m^3	1 000 millions de m^3	130 millions de m^3	60 millions de m^3
Rive Gauche	> 600 millions de m^3	500 millions de m^3		
TOTAL	**2 800 millions de m^3**	**1 800 millions de m^3**	**130 millions de m^3**	**60 millions de m^3**

2.2 SUBMERSION MARINE

Le territoire est également soumis au phénomène de submersion marine : inondations temporaires de la zone littorale par la mer dans des conditions météorologiques défavorables. La submersion peut avoir lieu soit par débordement lorsque le niveau marin est supérieur au terrain naturel ou au-delà de la crête des ouvrages, soit par franchissement de paquets de mer et/ou par rupture du système d'endiguement maritime lorsque les terrains à l'arrière sont sous le niveau marin. Les derniers événements marquants dans le golfe du Lion, bien qu'ils n'aient pas été exceptionnels, sont les tempêtes de 1982, 1997, 2014 ainsi que le raz-de-marée de 1985 qui a malheureusement causé une victime, 10 blessés, et plus de 1000 sinistrés.

3 COMMUNES ET EPCI-FP DE LA ZONE PROTEGEE

La zone protégée est répartie sur 2 communes et 1 EPCI-FP, l'ACCM. Le tableau ci-dessous donne pour chaque commune : la surface de la commune, la surface de la commune comprise dans la zone protégée, le pourcentage par commune de la surface communale comprise dans la zone protégée, le poids (en %) de chaque commune dans la zone protégée.

Tableau 3. Superficie de la zone protégée – bilan à l'échelle communale

Commune	Surface Commune (m²)	Surface communale dans la ZP (m²)	Surface communale dans la ZP (%)	Poids dans la ZP (%)
Arles	757 541 805	395 877 879	52.3%	60.3%
Saintes Maries de la Mer	371 765 889	260 725 610	70.1%	39.7%
TOTAL		656 603 490		100 %

Ces 2 communes sont représentées au sein du SYMADREM par la Communauté d'Agglomération Arles Crau Camargue Montagnette

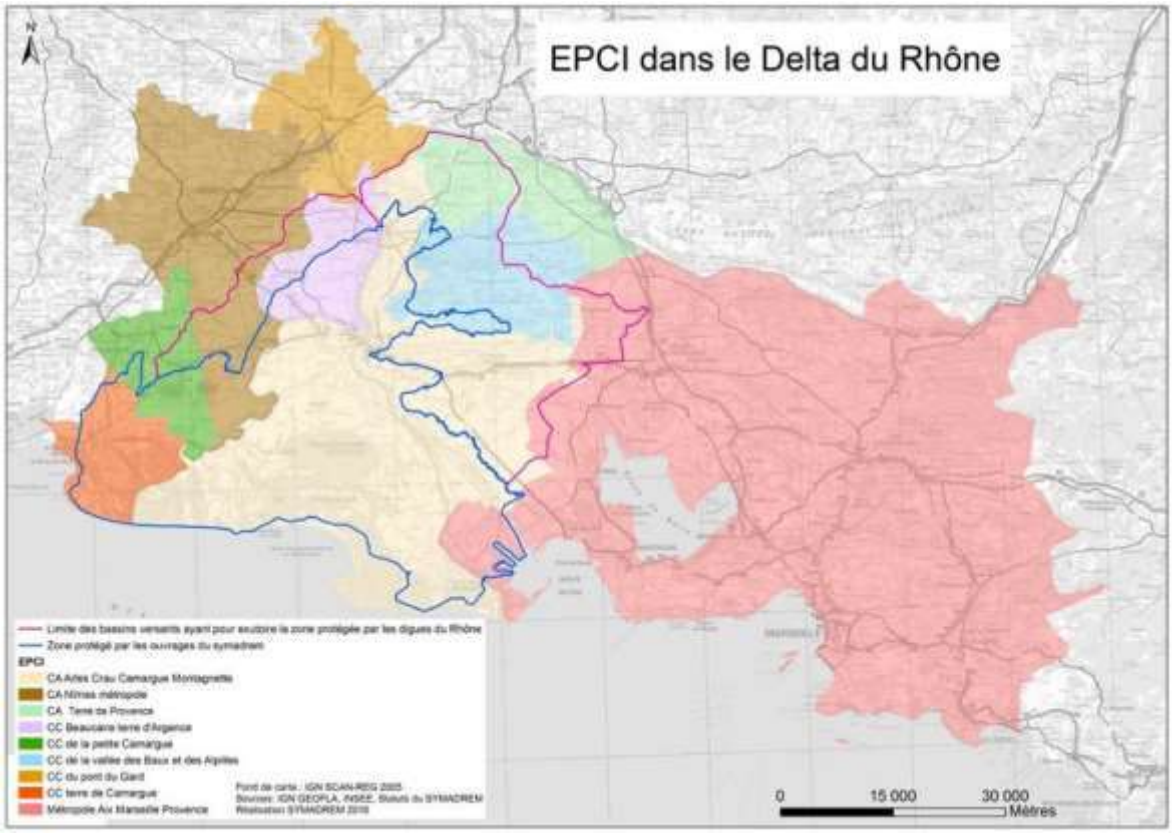


Figure 2. La zone protégée du Grand Delta du Rhône dans le contexte intercommunal

4 POPULATION ET BATI DE LA ZONE PROTEGEE

La population INSEE résidant dans la zone protégée représentent environ 13 500 personnes. La population DGF (= population INSEE + 1 habitant par résidence secondaire) représente quant à elle environ 15 000 personnes. Cette population peut doubler, voire tripler en périodes de vacances. La carte en page suivante, superposant le bâti existant à la zone protégée, permet de voir que l'essentiel des enjeux est concentré en tête de Camargue dans le quartier de Trinquetaille ; dans la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer en bordure du littoral et le long de la RD 570 juste au nord de la commune ; dans les hameaux de Salin de Giraud et Sambuc en bordure du Grand Rhône rive droite ; dans les hameaux de Saliers et d'Albaron en bordure du Petit Rhône rive gauche. Les autres enjeux humains sont disséminés dans la plaine

Figure 3. Système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » - zone protégée et bâti

La zone protégée est découpée en 41 sous-zones protégées pouvant être considérées comme hydrauliquement cohérentes. Elles ont été délimitées à partir de l'évaluation des probabilités de brèches (bande de sécurité), et des différents scénarios d'inondation (Cf. chapitre 8). La carte ci-dessous illustre ce découpage.

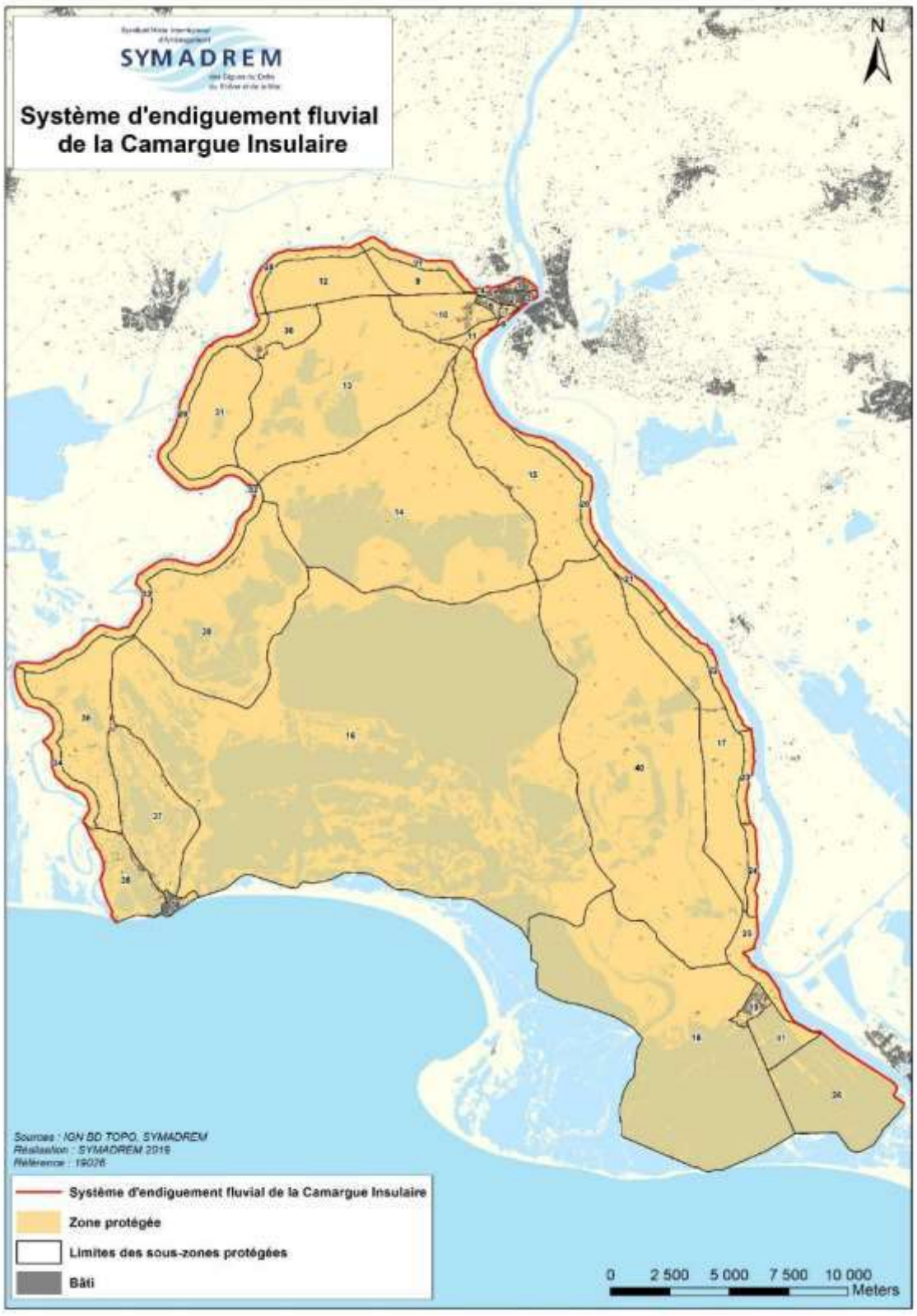


Figure 4. Découpage de la Camargue Insulaire en 39 sous-zones protégées

Le tableau ci-dessous donne par sous-zone protégée:

- La dénomination de la sous-zone protégée
- La surface en km²,
- Les cotes moyenne et médiane (m NGF) de la sous-zone protégée
- La plage de variation (5-95 %) de l'altimétrie (m NGF) de la sous-zone protégée

Tableau 4. Camargue Insulaire – Caractéristiques topographiques relatives aux enjeux

N° SZP	dénomination sous-zone protégée	Surface (en km²)	Cote (en m NGF)			
			moyenne	médiane	5 % - 95 %	
1	Trinquetaille La Corrèze Gontier	0,6	4,9	4,6	4,0	6,9
2	Trinquetaille St Genest-Le Vittier	0,6	4,7	4,3	3,7	7,2
3	Trinquetaille Centre	0,3	7,1	7,0	6,0	8,2
4	Trinquetaille Cazeneuve	0,2	4,6	4,2	3,8	7,4
5	Trinquetaille les prêcheurs	0,3	4,1	3,9	3,5	5,5
6	Trinquetaille St Antoine Billot	0,5	3,6	3,5	3,0	4,4
7	Trinquetaille zone humide	0,3	4,4	4,0	3,4	7,0
8	Anciennes Papeteries Etienne	0,2	5,0	4,7	4,2	7,1
10	A54 Est	4,0	2,4	2,3	1,6	3,5
11	Gimeaux	6,2	1,8	1,7	1,1	2,9
9	La Grande Sacristane	1,2	3,5	3,4	2,5	4,5
12	Clos du Mas Neuf	9,1	2,2	2,2	1,4	3,0
13	Marais du Pont de Rousty	40,7	0,6	0,5	-0,5	1,9
14	Marais de la Grand Mar	63,9	1,1	0,9	0,1	2,8
15	Montlong	21,0	2,8	2,8	1,8	3,6
16	Etang du Vaccarès	203,3	0,1	-0,2	-0,2	1,0
17	Armelière Sambuc Chamone	18,2	1,5	1,5	0,7	2,5
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	64,9	0,7	0,6	0,1	1,2
19	Salin de Giraud	1,3	1,2	1,2	0,6	1,7
20	Abords digue Petite Montlong Beaujeu	2,6	3,2	3,1	2,4	3,9
21	Abords digue Beaujeau Tourtoulen	1,6	2,9	2,8	2,3	4,1
22	Abords digue Tourtoulen Commanderie	2,6	2,7	2,6	1,9	3,7
23	Abords digue Commanderie Boisverdun	1,6	1,8	1,8	1,0	2,6
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	1,6	1,5	1,5	0,9	2,2
25	Abords digue Salin de Giraud	3,4	1,3	1,3	0,5	2,2
26	Salins du midi sud-est	16,7	0,8	0,7	0,2	1,2
27	Abords digue Cazeneuve - A54	2,2	3,4	3,3	2,5	4,5
28	Abords digue A54 Pont de Cavalès	2,5	3,0	2,9	2,3	4,0
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	5,1	2,2	2,1	1,3	3,4
30	Saliers	3,9	1,5	1,6	0,5	2,5

31	Marais de Saliers	12,8	0,7	0,6	0,0	1,8
32	Albaron	0,1	3,1	2,8	2,2	4,8
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	5,9	1,5	1,5	0,4	2,6
34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage	3,4	1,0	0,9	0,4	1,6
35	Amarée Dromard	6,9	0,5	0,4	0,1	1,1
36	Panperdu Etang des Launes	15,9	0,6	0,6	0,1	1,2
37	Etang de Ginès	14,6	0,3	0,2	0,1	0,9
38	Saintes-Maries-de-la-Mer	0,9	1,2	1,2	0,8	1,8
39	Paty trinité	34,2	0,7	0,6	0,1	1,5
40	Vaccarès Est	77,4	0,9	0,8	0,3	1,9
41	Esquineau	4,1	1,1	0,8	0,3	2,3

Le tableau ci-après indique par sous-zone protégée :

- la dénomination de la sous-zone protégée
- le nombre de ménages (Insee)
- le nombre total d'individus et le nombre d'individus de moins de 18 ans ainsi que le nombre d'individus de plus de 65 ans (Insee),
- la densité de population (nb d'individus/km²),
- Le nombre de locaux habités (données MAJIC ministère des finances) et le pourcentage de locaux de plain-pied.

Tableau 5. Camargue Insulaire – Principales données relatives aux populations

N°SZP	nombre ménages	Nombre d'individus	Proportions Individus Vulnérables (< 18 ans et > 65 ans)	Densité population (nb/km²)	Nombre locaux habités	% Plain-Pied
1	538	1 289	40%	2 149	632	33%
2	1 212	2 754	46%	4 591	860	30%
3	598	1 132	40%	3 772	353	8%
4	32	94	28%	468	59	25%
5	159	459	36%	1 531	187	34%
6	216	719	41%	1 438	200	32%
7	77	185	40%	617	66	38%
8	3	7	50%	35	3	0%
9	9	19	35%	5	15	33%
10	265	717	34%	116	479	56%
11	35	85	36%	71	72	44%
12	8	17	34%	2	39	26%
13	71	168	36%	4	189	50%
14	95	229	36%	4	327	52%

15	104	265	40%	13	302	45%
16	39	86	31%	0	121	68%
17	98	240	40%	13	195	58%
18	19	34	38%	1	73	44%
19	880	1 915	42%	1 473	1 074	31%
20	2	5	31%	2	16	44%
21	4	9	41%	6	18	17%
22	2	5	42%	2	24	50%
23	2	4	20%	3	20	35%
24	1	2	35%	1	2	100%
25	26	58	43%	17	65	57%
26	-	-	0%	-	2	50%
27	2	6	31%	3	27	33%
28	8	22	39%	9	40	18%
29	22	49	32%	10	55	31%
30	105	265	32%	68	177	18%
31	7	14	26%	1	17	65%
32	26	60	31%	602	51	53%
33	21	47	37%	8	67	36%
34	37	82	39%	24	84	60%
35	161	356	40%	52	528	79%
36	92	190	37%	12	206	63%
37	83	157	31%	11	301	76%
38	965	1 846	41%	2 051	1 453	20%
39	40	95	26%	3	89	57%
40	63	134	36%	2	202	60%
41	-	-	0%	-	1	100%

Les données Insee sont fournies à partir de carreaux de 200 m de côté qui sont regroupés en rectangles comptant au moins 11 ménages. Les rectangles ne correspondent donc pas exactement au découpage des sous-zones protégées. La comptabilisation des rectangles appartenant à chaque casier s'est faite selon une appréciation visuelle au regard de la répartition du bâti : lorsqu'un rectangle recoupe partiellement la surface d'un casier, si l'essentiel du bâti inclus dans le rectangle est également inclus dans le casier, le rectangle est comptabilisé comme appartenant au casier. Dans le cas contraire, il n'est pas comptabilisé.

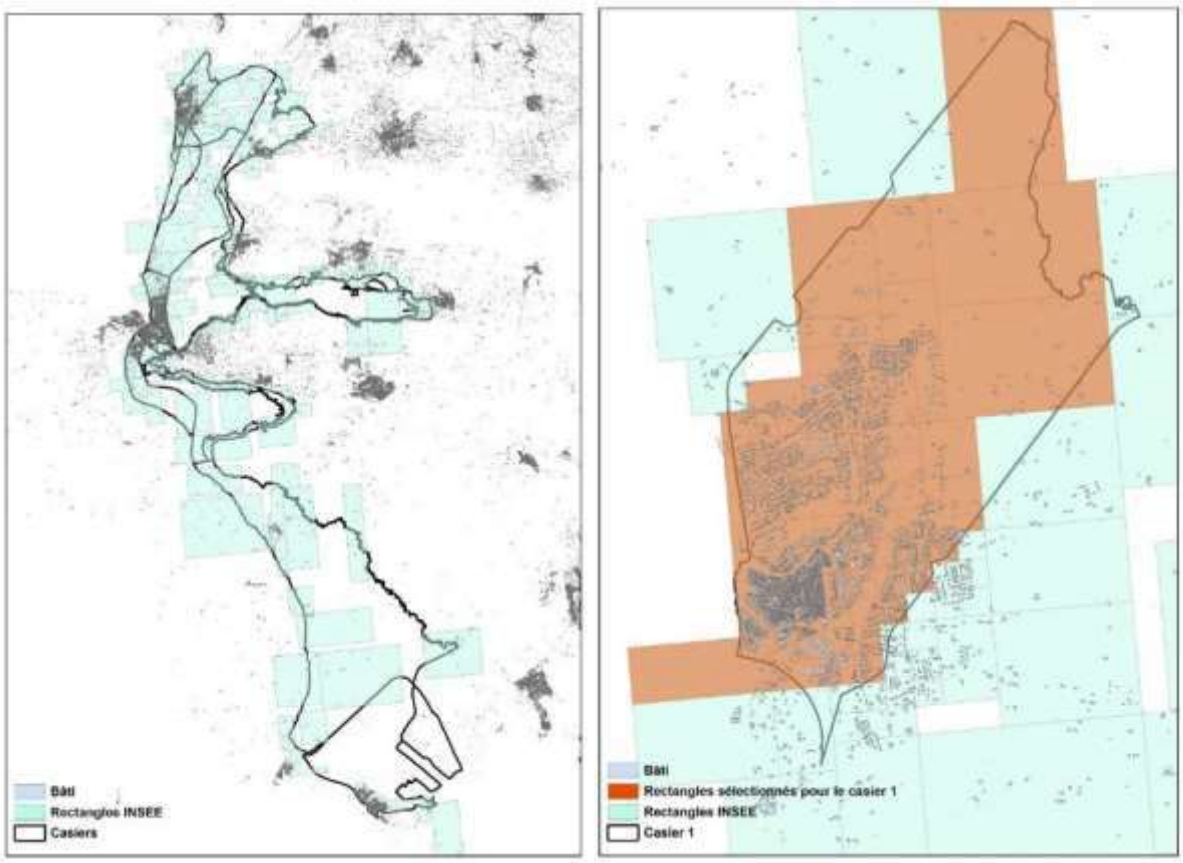


Figure 5. Principe de découpage des carroyages INSEE

Les figures en pages suivantes cartographient la répartition des parcelles contenant au moins un local d'habitation de plain-pied. Cette représentation est parfois excessive dans les zones commerciales ou industrielles, mais permet de donner une idée de la répartition de ces logements de plain-pied.

Les parcelles de plein pied sont particulièrement présentes dans les zones de Trinquetaille, Salier, Albaron, le centre des Saintes Maries de la Mer, le Sambuc et Salin de Giraud. Des cartes détaillées de ces zones sont présentées au chapitre 10.

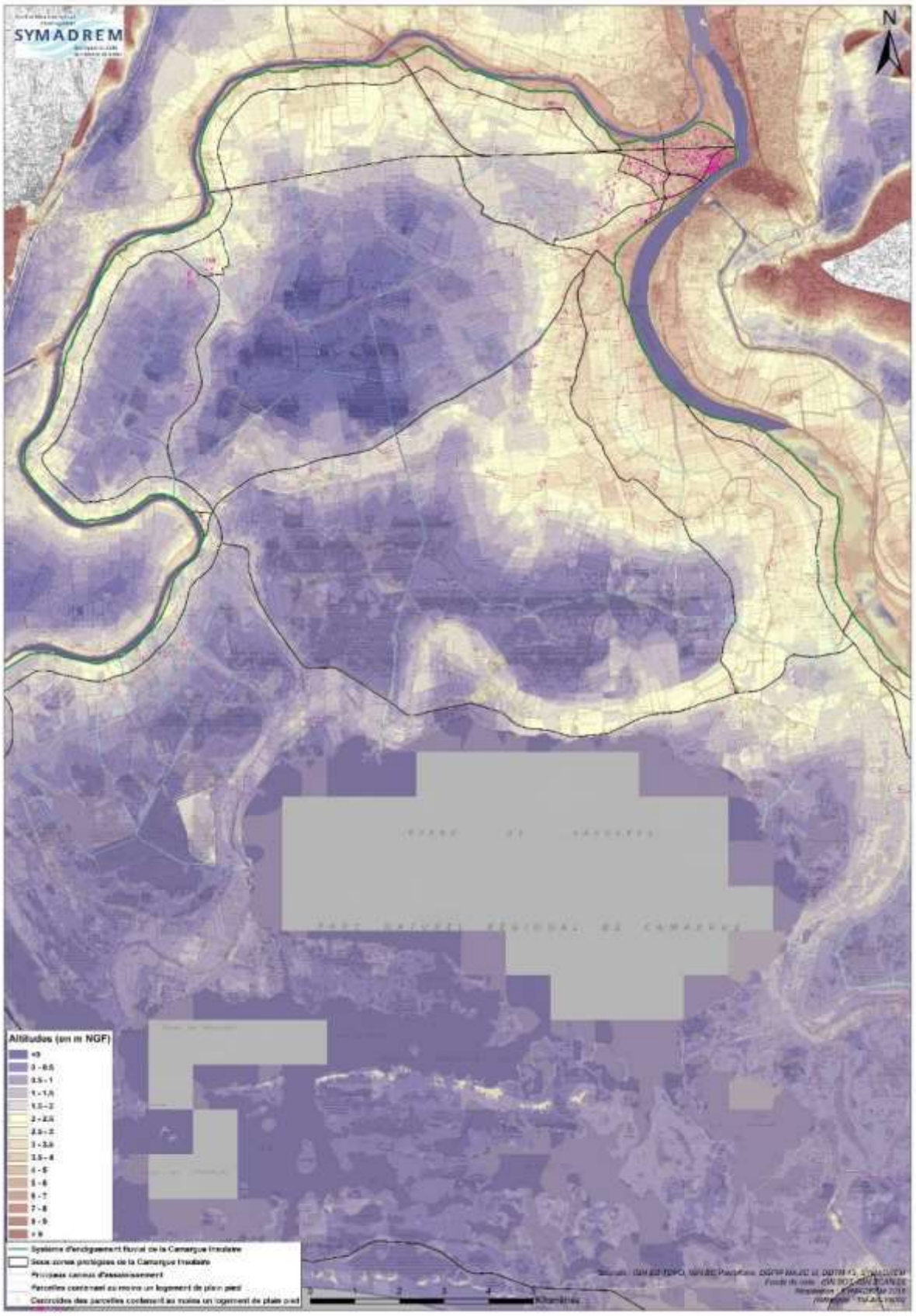


Figure 6. Localisation par parcelle des locaux d'habitation de plain-pied et topographie (1/3)

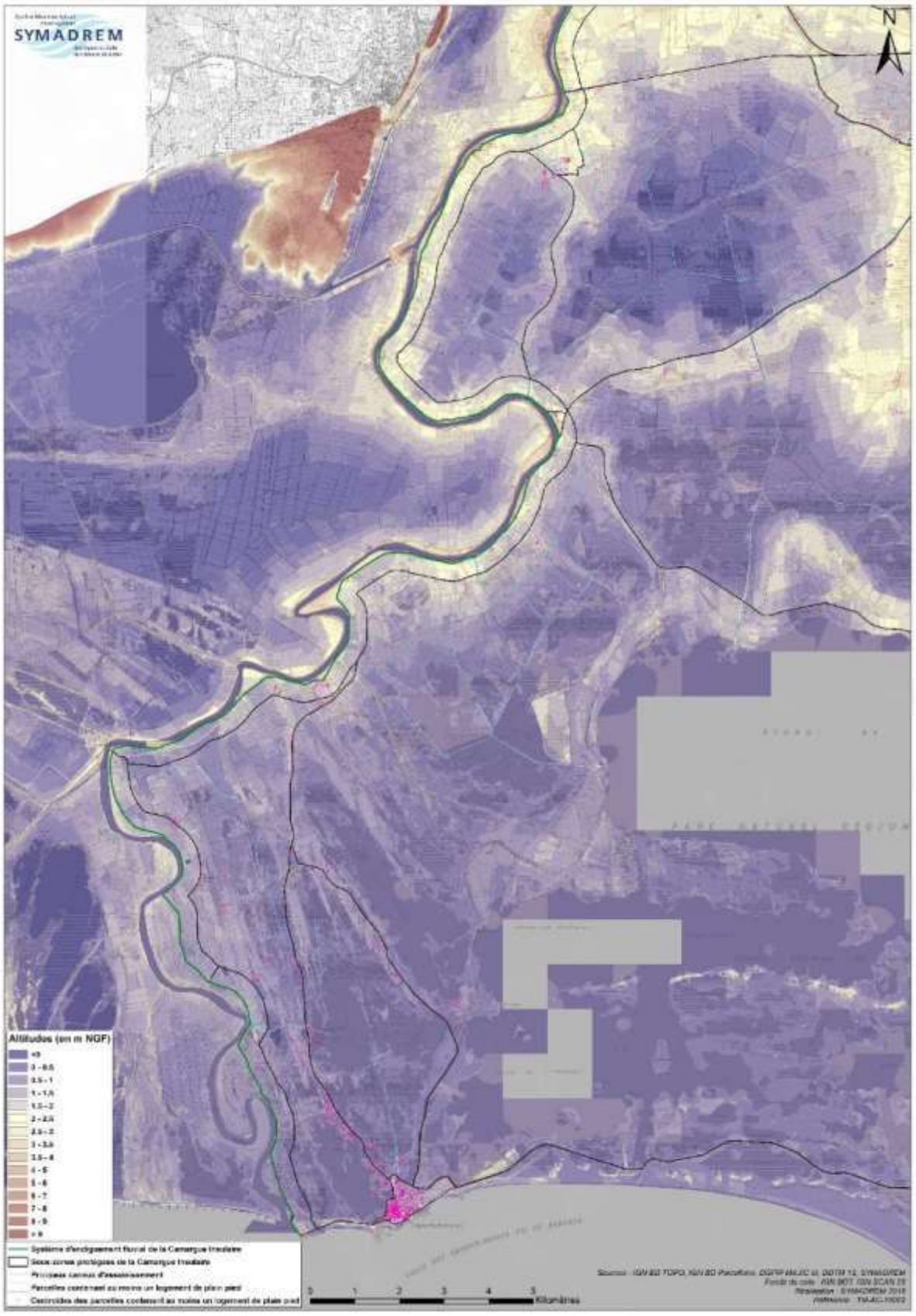


Figure 7. Localisation par parcelle des locaux d'habitation de plain-pied et topographie (2/3)

Figure 8. Localisation par parcelle des locaux d'habitation de plain-pied et topographie (3/3)

5 PRINCIPALES INFRASTRUCTURES ROUTIERES

Compte tenu de la faible altimétrie du terrain naturel, les principales infrastructures routières structurent le paysage. Elles sont le plus souvent implantées sur d'anciens bourrelets alluviaux (anciens bras du Rhône) Ces infrastructures peuvent représenter des axes primordiales d'évacuation en cas d'inondation. La carte ci-après illustre la topographie de la Camargue Insulaire. Elle localise également les principales routes et la cote (en MGF) des points bas. Elle est suivie dans les pages suivantes des profils en long des routes.

Les principaux éléments structurants hors canaux de la zone protégée sont :

- Les routes, lorsqu'elles sont surélevées par rapport au terrain naturel ; c'est le cas de :
    - la N572, qui devient l'A7, entre Arles et Bois Beaumont
    - la D572N entre le début de l'Autoroute et Saint Gilles
    - la D37 entre Saint Gilles Beaujeu (en passant par Albaron et Méjanes)
    - la D570 en aval du Château d'Avignon.
    - La D36 le long du Grand Rhône
    - La D85a, vers les Saintes Maries de la mer
- Les anciens bras du Rhône qui sont surélevés du fait des dépôts de limon :
    - de Montlong à Albaron,
    - de Montlong à Méjanes
    - De Beaujeu à la tour du Valat
    - De Chamone aux marais

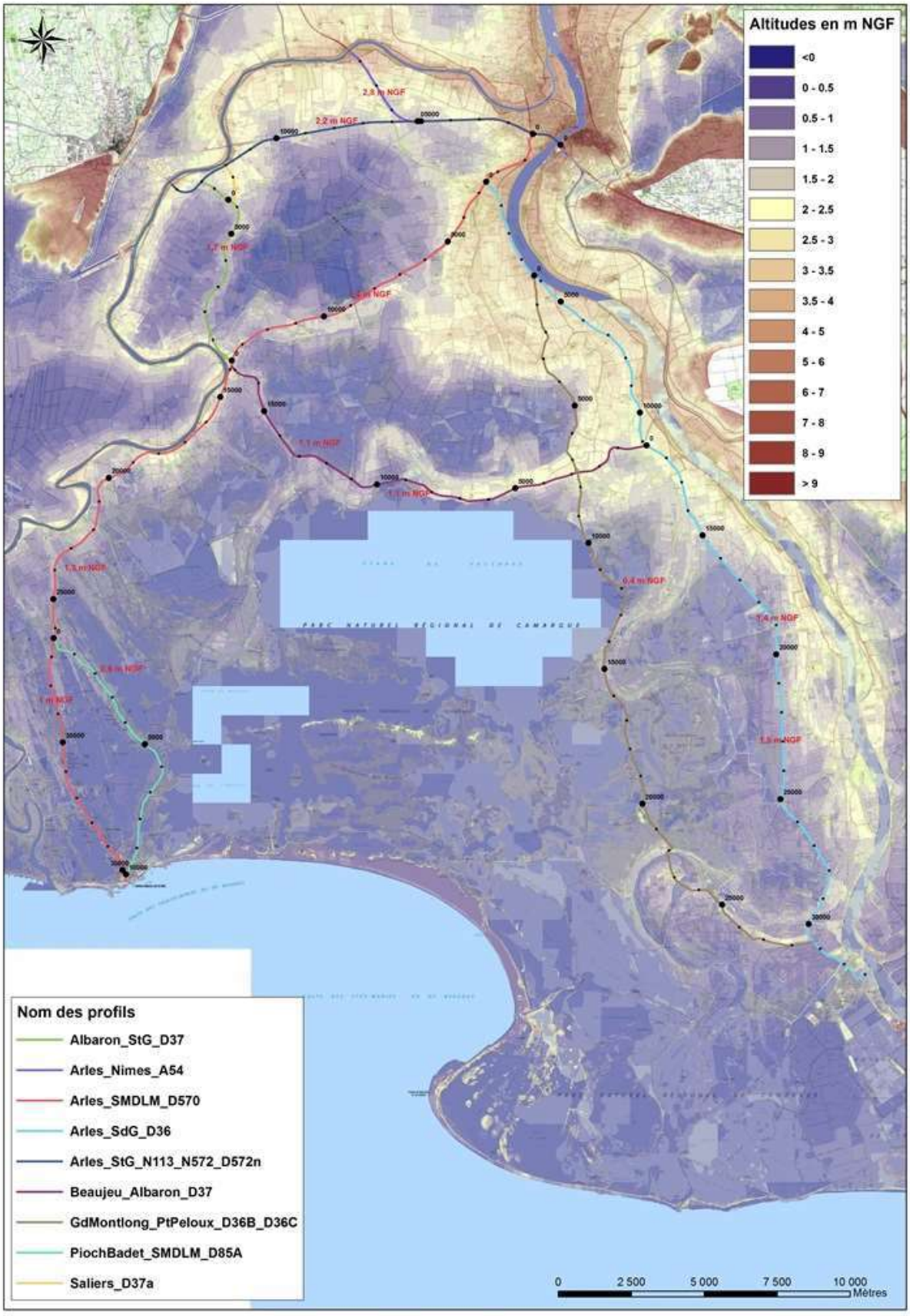


Figure 9. Camargue Insulaire – principales routes et cote (en m NGF) des points bas

La route départementale RD37 menant d'Arles à Saint Gilles est globalement entre 2 et 3 m NGF. Dans sa partie centrale sur plus de 1 km environ, sa cote descend en-dessous de 2,5 m NGF pour atteindre au plus bas 2,2 m NGF.

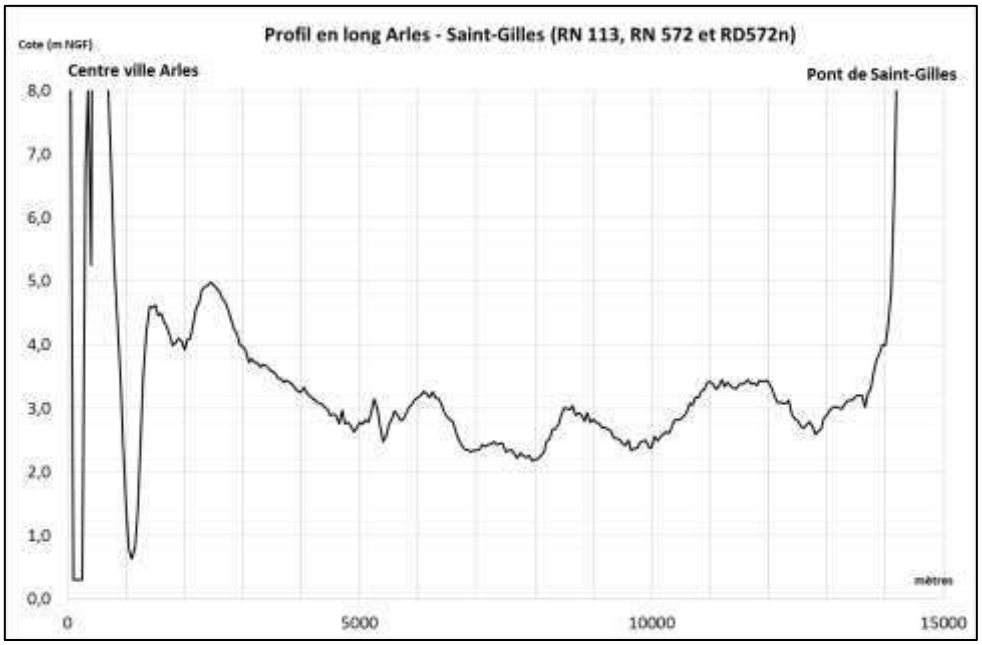


Figure 10. Camargue Insulaire – Profil en long RN 113 et RN572 (Arles à Saint-Gilles)

La route départementale RD570 menant de Trinquetaille aux Saintes-Maries-de-la-Mer est jusqu'à Albaron au-dessus de la cote 1,4 m NGF. Au sud de Pioch Badet avant d'atteindre les Saintes, elle est légèrement au-dessus de la cote de 1 m NGF

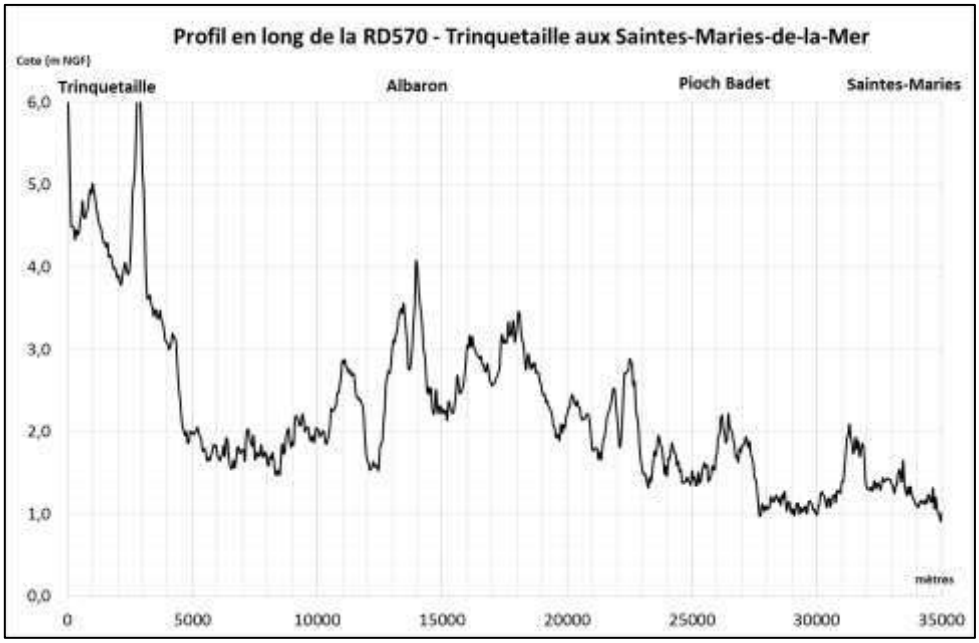


Figure 11. Camargue Insulaire – Profil en long RD570 (Arles à Saintes-Maries-de-la-Mer)

La route départementale RD36 menant de Gimeaux à Salin-de-Giraud est jusqu'à Montlong au-dessus de la cote 3,75 m NGF pour diminuer progressivement jusqu'à 2 m NGF aux abords du Mas-Neuf de Sansouire. Elle descend jusqu'à 1,4 m NGF au Sambuc où elle reste entre 1,4 et 2 m NGF maximum jusqu'à Salin de Giraud.

Figure 12. Camargue Insulaire – Profil en long RD36 (Arles à Salin-de-Giraud)

La route départementale RD37 menant d'Albaron à Saint Gilles et globalement entre 2 et 2,5 m NGF. Dans sa partie centrale sur 2 km environ, sa cote descend en-dessous de 2 m NGF pour atteindre au plus bas 1,75 m NGF.

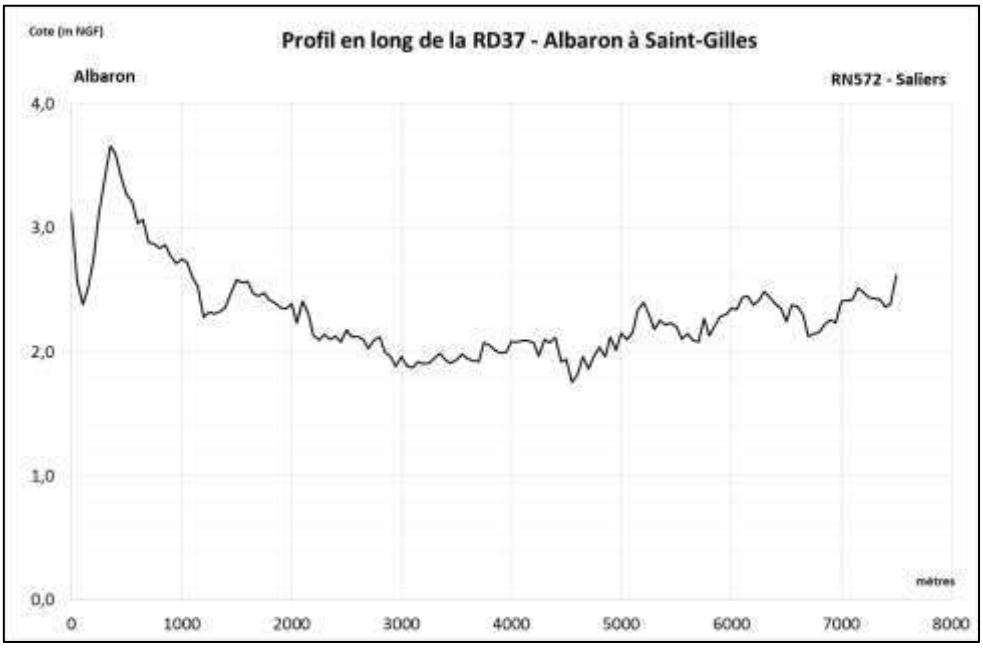


Figure 13. Camargue Insulaire – Profil en long RD 37 (Albaron à Saint-Gilles)

L'embranchement nord de l'A54 est globalement au-dessus de 3 m NGF avec des points bas à 2,8 m NGF.

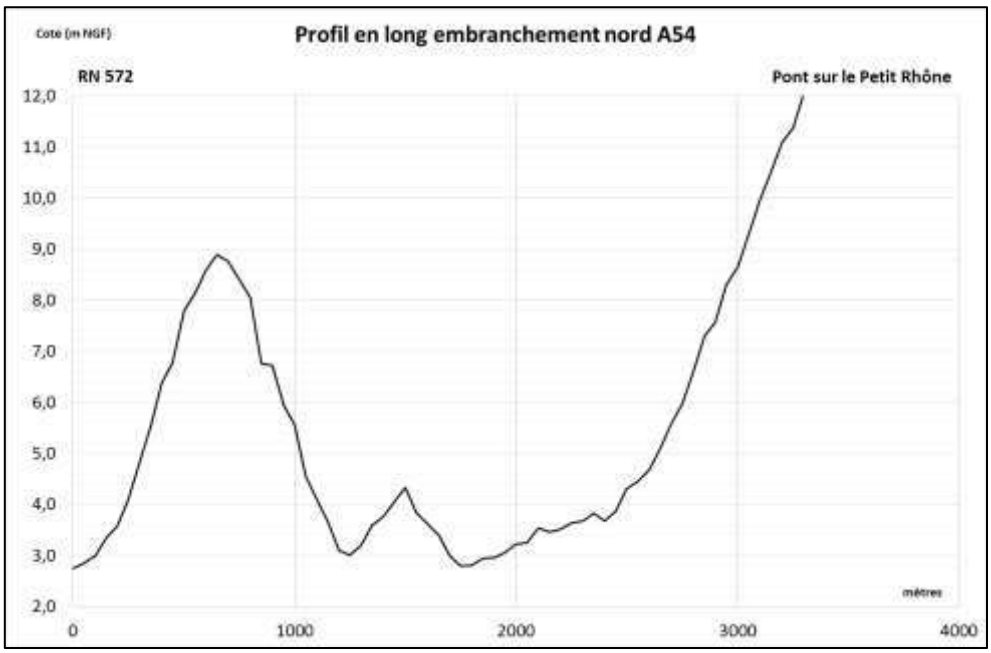


Figure 14. Camargue Insulaire – Profil embranchement nord A54

La route départementale RD37 menant de Beaujeau à Albaron est au-dessus de 2,2 m NGF jusqu'à Villeneuve pour descendre progressivement jusqu'à une cote d'environ 1,1 m NGF et remonter ensuite au-dessus de 2 m NGF juste avant d'atteindre Albaron

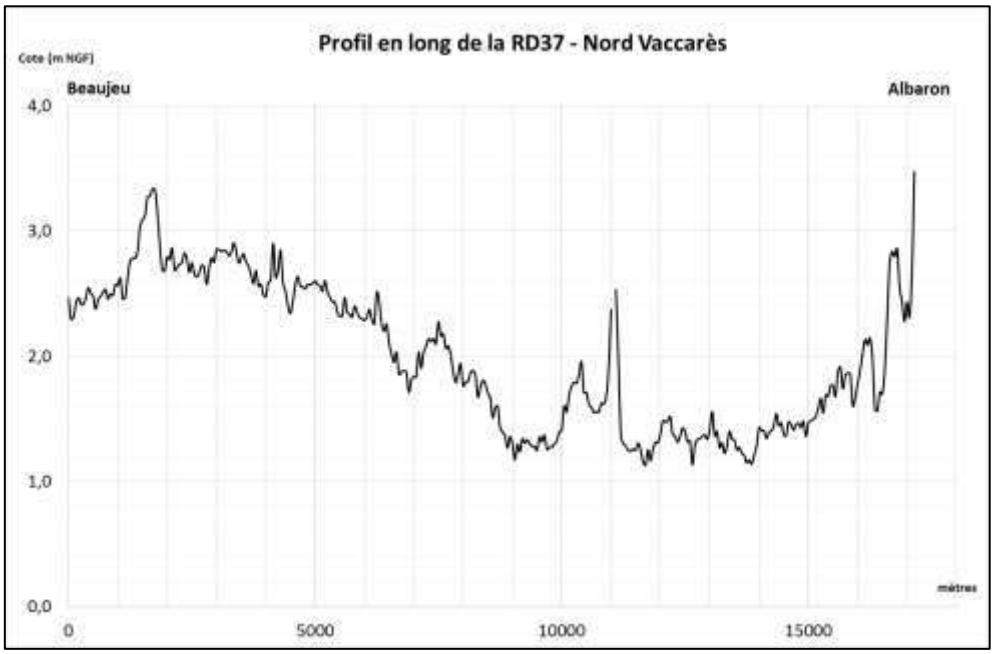


Figure 15. Camargue Insulaire – Profil en long RD 37 (Albaron à Beaujeu)

La route départementale RD36 b & c menant de Montlong jusqu'à Salin-de-Giraud est au-dessus de 1,3 m NGF jusqu'à Villeneuve et tangente la cote 1 m NGF le long du Vaccarès pour descendre jusqu'à 0,4 m NGF.

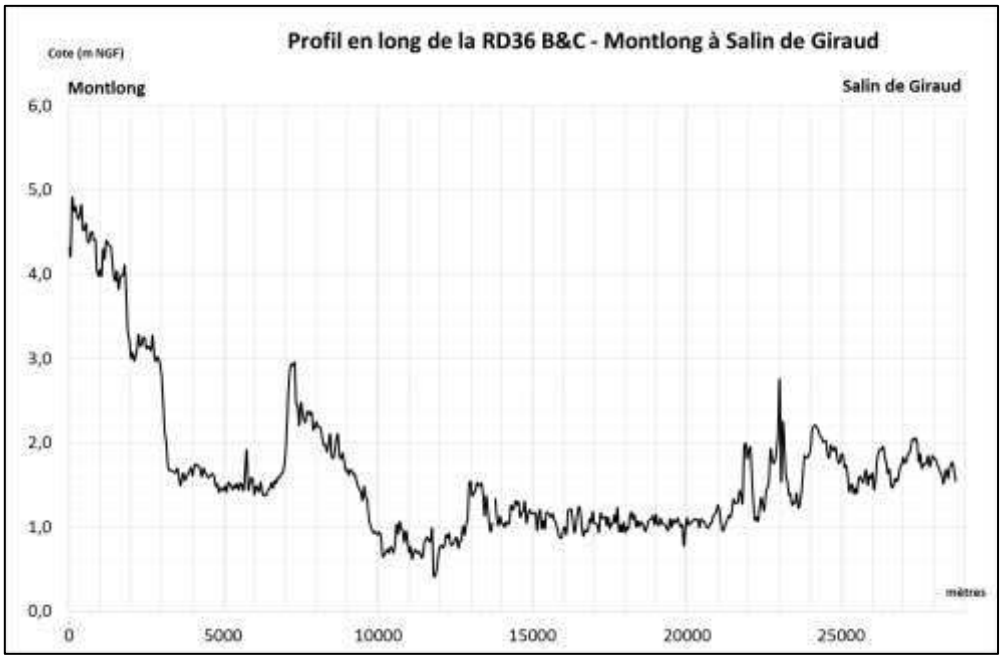


Figure 16. Camargue Insulaire – Profil en long RD 36 b & c (Montlong à Salin-de-Giraud)

La route départementale RD85a menant Pioch badet aux Saintes-Maries-de-la-Mer est globalement sous la cote de 1 m NGF et descend jusqu'à 0,6 m NGF.

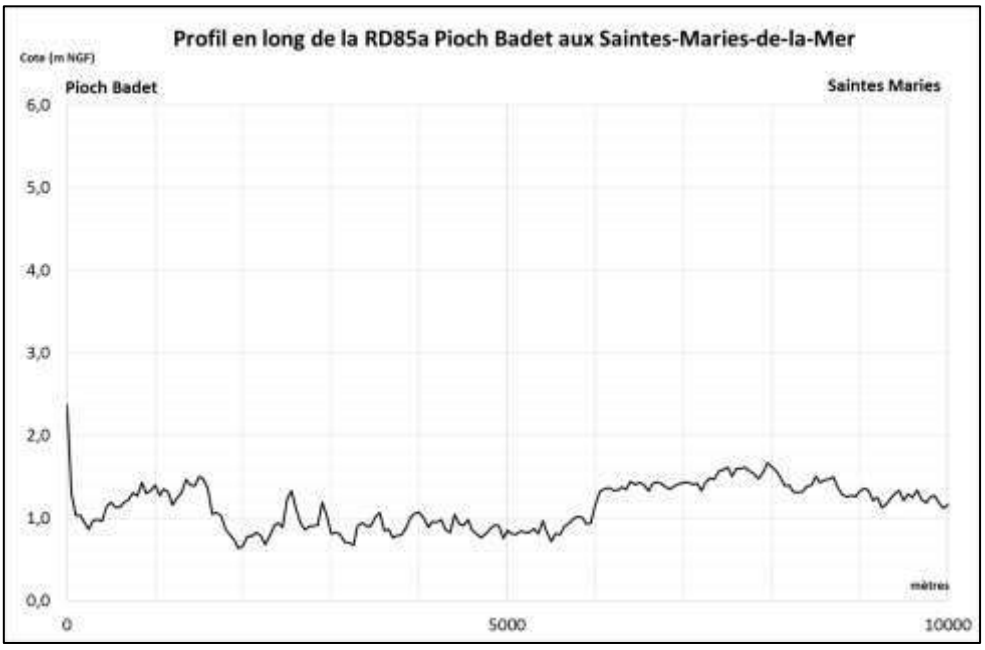


Figure 17. Camargue Insulaire – Profil en long RD 85a (Pioch Badet à Saintes-Maries-de-la-Mer)

6 LES CANAUX

Les principaux canaux structurants en Camargue Insulaire sont ceux gérés par les associations, il y a une association mixte, 11 associations d'irrigation et 15 associations d'assainissement.

Association mixte :

- ASCO Canal du Japon

Associations d'irrigation :

- ASCO Roubine de Triquette
- ASA du canal en relief de Grande Montlong
- ASA d'irrigation de la petite Montlong
- ASA de la Roubine de l'Aube de Bouic
- ASA du Canal du Sambuc
- ASA du canal d'irrgation du mas de Vert
- ASA des arrosants du Petit Beaumont
- ASA des arrosants et submersionnistes de Saliers
- ASA des arrosants de St Cézaire et Saliers
- ASA d'irrigation du clos de la vigne
- ASA d'irrigation des quartiers de Frigoulès, Pioch et Grazier

Associations d'assainissement :

- ASCO de l'égout du mas de Thor
- ASA de l'égout des Avergues de Gimeaux
- ASCO de l'égout de Meyran Praredon
- ASCO de la Roubine de Grande Montlong
- ASCO des Vidanges de Corrège Camargue Major
- Egout de Roquemaure
- Canal de Fumemorte
- ASA des fossés et égouts de Saliers et Bénevents
- ASA d'assainissement de la Sigoulette
- ASA d'assainissement du bassin des saintes maries de la mer

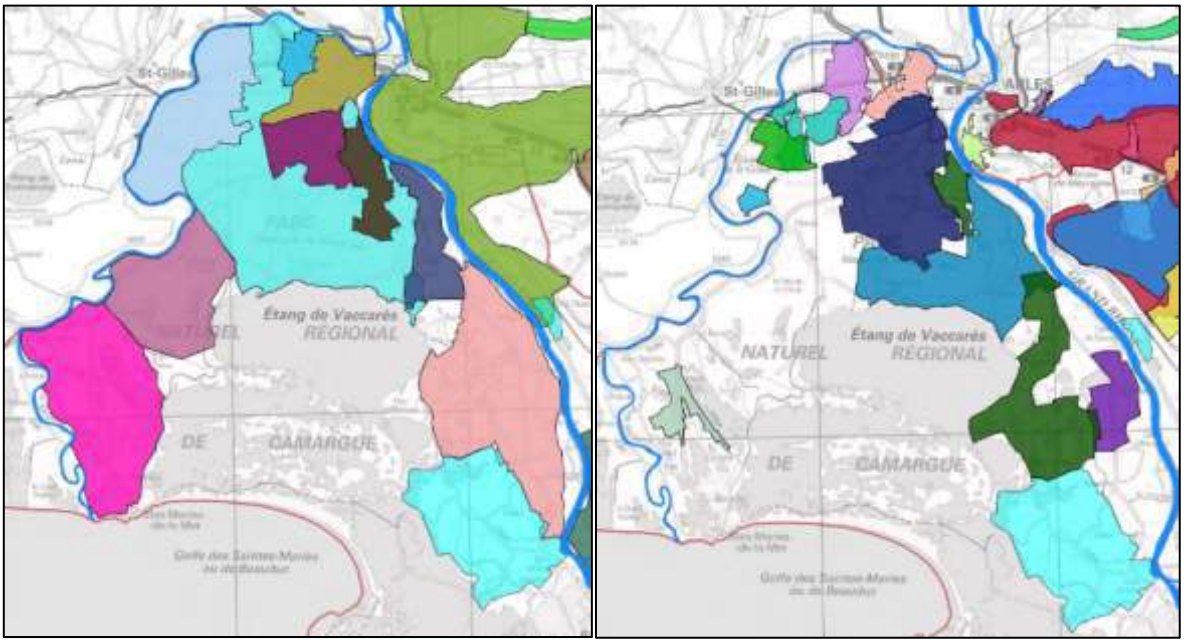


Figure 18. Associations d'assainissement (gauche) et Associations d'irrigation (droite)

La carte en page suivante localise les canaux d'assainissement sur le fond MNT de la Camargue Insulaire. Figurent également les principales stations de pompage destinées à l'assainissement.

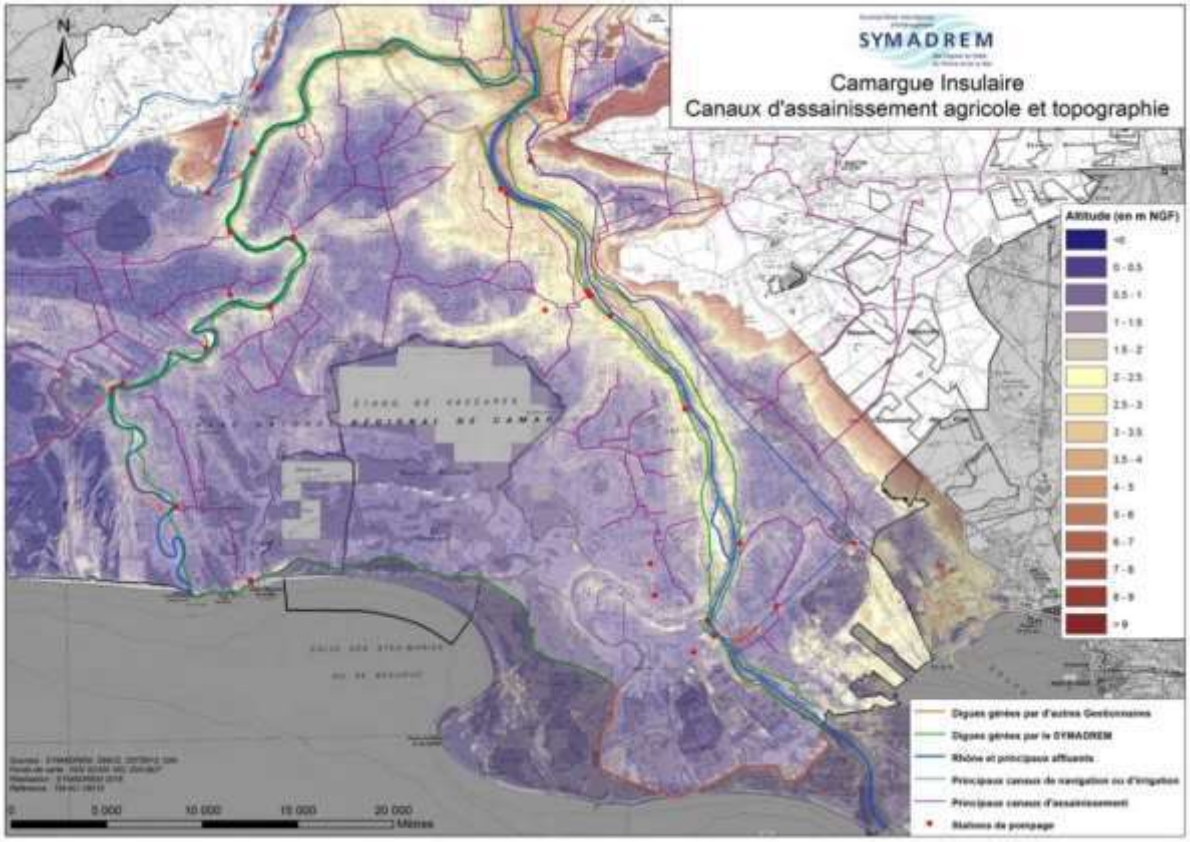


Figure 19. Camargue Insulaire – Canaux d'assainissement et topographie

7 NIVEAUX DE PROTECTION

Sept classes ont été retenues. Elles sont décrites dans le tableau ci-après avec les incertitudes liées à ces paramètres.

Tableau 6. Classes de niveaux caractéristiques

Débit (m^3/s)* Beaucaire/ Tarascon	Cote** Beaucaire/Tarascon (m NGF IGN 69) suivant courbe de tarage (en vigueur depuis le 7/12/2003)	Cote*** Beaucaire/Tarascon (m NGF IGN 69) extraite du modèle ECPS PS (CNR) état initial	Niveau marin (m NGF IGN 69)	Période de retour (années arrondies)
14 160	Non valable	12,05	1,50	800 à 1000
12 500		11,79	1,30	200
11 500	11,30	11,44	0,98	100
10 500	10,77	10,83	0,94	50
9 500	10,22	10,45	0,94	20
8 500	9,58	9,94	0,90	10
7 200	8,56	9,02	0,90	3

* débit ± 5 % correspondant à la borne inférieure de la classe ** ± 10 cm *** ± 20 cm

Il est à souligner que la station de référence pour le relevé des niveaux et l'estimation débits du Rhône est la station Beaucaire/Tarascon du Service Prévision des Crues du Grand Delta au PK Rhône 269,6.

Les débits sont estimés à partir de la courbe de tarage en vigueur depuis le 7 décembre 2003 (courbe verte sur la figue ci-dessous). Les valeurs, en termes de débit et de hauteur, supérieures à celles connues en décembre 2003, ont été extrapolées mathématiquement sans tenir compte des surverses occasionnées entre Beaucaire et Arles en rives droite et gauche du Rhône qui ont pour effet de contrôler les niveaux au droit de la station.

Cet effet est perceptible sur la figure ci-dessous, qui superpose la courbe de tarage actuellement en vigueur à la station de Beaucaire/Tarascon (courbe verte) et les niveaux modélisés par la $CNR_{ingénierie}$ dans le cadre de l'étude de calage (courbe bleu). On remarque que la courbe de tarage n'est pas valable pour les niveaux supérieurs à 11,5 m NGF (zone 1). A titre d'exemple, la crue exceptionnelle du Rhône (14 160 m^3/seconde) correspondrait suivant la courbe de tarage en vigueur à une cote d'environ 12,65 m NGF. Les niveaux modélisés par la $CNR_{ingénierie}$ dans le cadre de l'étude de calage donne une cote d'environ 12,05 m NGF dans l'état initial et 12,01 m NGF dans l'état après travaux.

Il est donc indispensable de modifier la courbe de tarage en vigueur pour les débits supérieurs à 11 500 m3/s pour tenir compte du fonctionnement hydraulique (actuel ou projeté) entre Beaucaire et Arles.

De la même façon, on constate des écarts notables entre la courbe de tarage et les résultats de la modélisation CNR (en dehors de la fourchette de précision des débits de ± 5 %) pour les

débits de pointe inférieurs à 9 500 m^3/s (zone 2) ; cet écart étant dû au fait que le modèle a été calé sur la seule crue de décembre 2003.

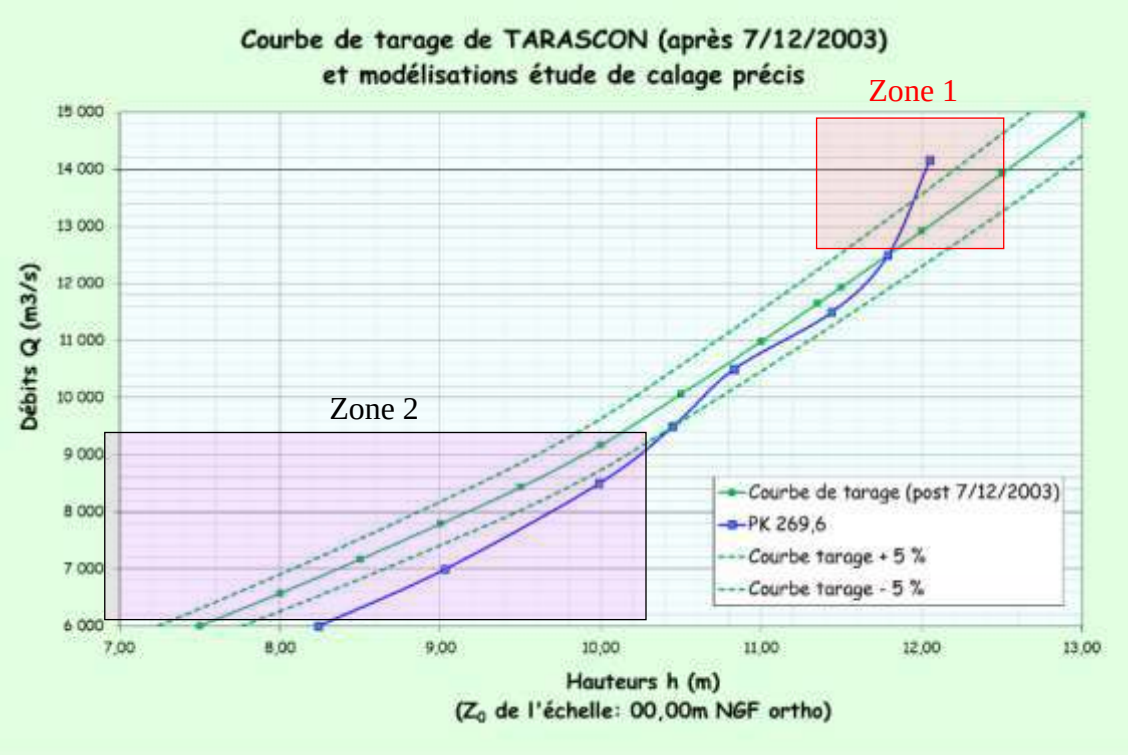


Figure 20. Courbe de tarage en vigueur à Beaucaire/Tarascon, fourchettes de précision et niveaux modélisés dans le cadre de l'étude de calage

Dans le cas du système d'endiguement fluvial de la Camargue Insulaire qui ne dispose pas de tronçon de digue résistant à la surverse, l'inondation de la zone protégée ne peut s'effectuer que par brèche, le niveau de protection des ouvrages est confondu avec le niveau de sûreté.

Pour les tronçons résistants à la crue exceptionnelle du Rhône, la probabilité de surverse sur les ouvrages étant sensiblement inférieure à la probabilité de la crue exceptionnelle elle-même, cette hypothèse n'a pas été prise en compte.

Les niveaux de protection par sous-zones protégées figurent en page suivante.

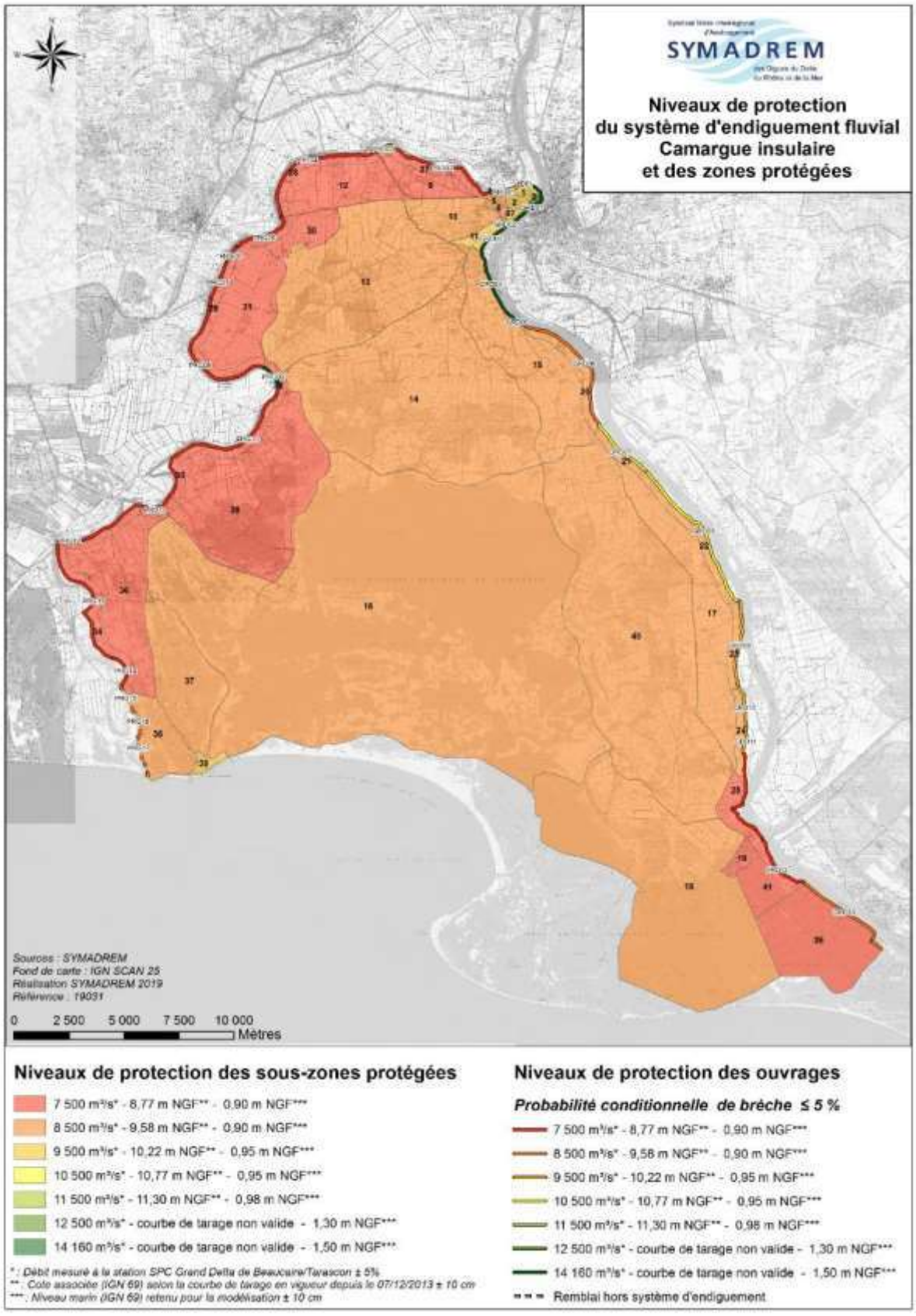


Figure 21. Niveaux de protection des sous-zones protégées (probabilité résiduelle de brèche de 5 % pour les crues considérées)

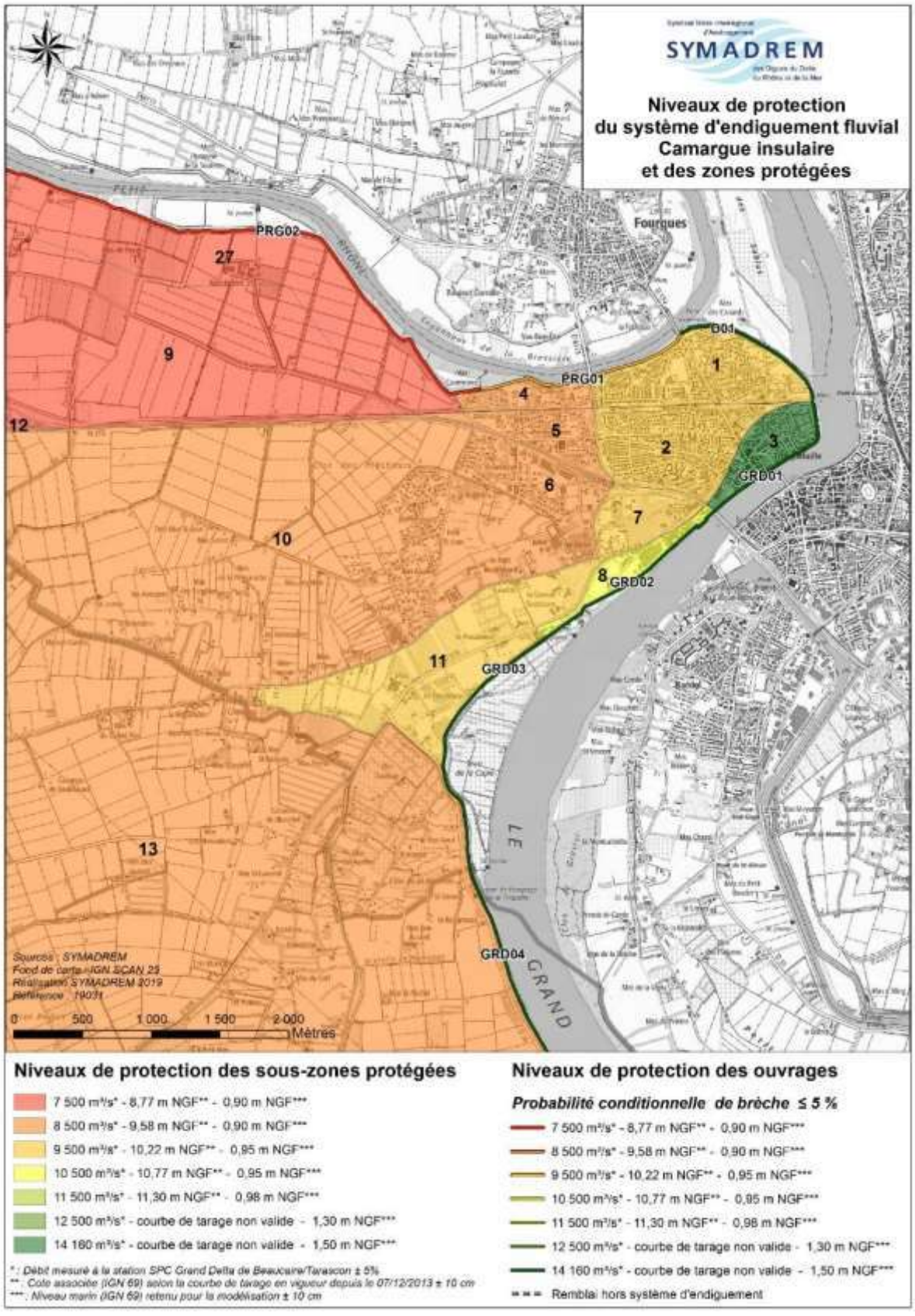


Figure 22. Niveaux de protection au droit du quartier de Trinquetaille (probabilité résiduelle de brèche de 5 % pour les crues considérées)

Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT FLUVIAL CAMARGUE INSULAIRE

DOCUMENT A

CHAPITRE N°3.2 : DESCRIPTION DES FACTEURS NATURELS

SOMMAIRE

1 Introduction 87
2 Les crues du Rhône 87
2.1 Bassin versant et type de crues 87
2.2 Historique des mesures de débits 89
2.3 Courbes de tarage 92
2.3.1 Courbes de tarage historique 92
2.3.2 Courbe de tarage actuelle 93
2.4 Crues récentes - niveaux maximaux aux stations limnigraphiques du Delta 94
2.5 Hydrologie 97
2.5.1 Différents modèles 97
2.5.2 Données retenues 98
2.5.3 Probabilité de non dépassement 99
3 Les autres facteurs 100
3.1 La géomorphologie et la morphodynamique 100
3.1.1 Géomorphologie du Delta - Diffluence aux embouchures 100
3.1.2 La morpho-dynamique du Petit Rhône 105
3.1.3 La morpho-dynamique du Grand Rhône 106
3.2 Le vent 108
3.3 Les séismes 111

1 INTRODUCTION

Le facteur naturel prépondérant est la crue du Rhône ; influent également la géomorphologie/morphodynamique du lit du Rhône, le vent, et les séismes. Ces derniers sont des facteurs aggravants mais ne mettent pas seuls la zone protégée en danger vis-à-vis du Rhône.

2 LES CRUES DU RHONE

2.1 BASSIN VERSANT ET TYPE DE CRUES

Le Rhône a un bassin versant de 95 500 km².

Figure 1. Bassin versant du Rhône et zone protégée par les ouvrages du SYMADREM

Compte tenu de son étendue, il présente un régime hydrologique singulier et est soumis aux deux influences des climats océaniques et méditerranéens. Les travaux de Maurice Pardé ainsi que l'analyse hydrométéorologique réalisée pour l'étude globale du Rhône (EGR) mettent en évidence quatre types de crues :

- Les crues océaniques : Elles sont dues aux précipitations abondantes sur la partie du bassin versant située au nord de Montélimar. Elles concernent le Rhône alpestre, le Rhône supérieur et la Saône. Les perturbations en provenance de l'Atlantique sont essentiellement actives d'octobre à mars.
- Les crues cévenoles : Elles résultent d'épisodes pluvieux accompagnés d'orages violents qui se produisent sur le pourtour du massif central (Ardèche, Eyrieux, Cèze, Gardon). Ce sont des crues violentes et rapides et concernent une période s'échelonnant de septembre à octobre.

- Les crues méditerranéennes : Elles sont plus tardives que les crues cévenoles, caractérisées par des orages violents localisés sur les Alpes du sud et le couloir rhodanien (Ouvèze, Aygues, Durance).
- Les crues généralisées : Elles sont issues de la combinaison de plusieurs épisodes pluvieux de type océanique et méditerranéen. Elles affectent l'ensemble du bassin versant.

La figure ci-dessous illustre l'origine des différentes crues.

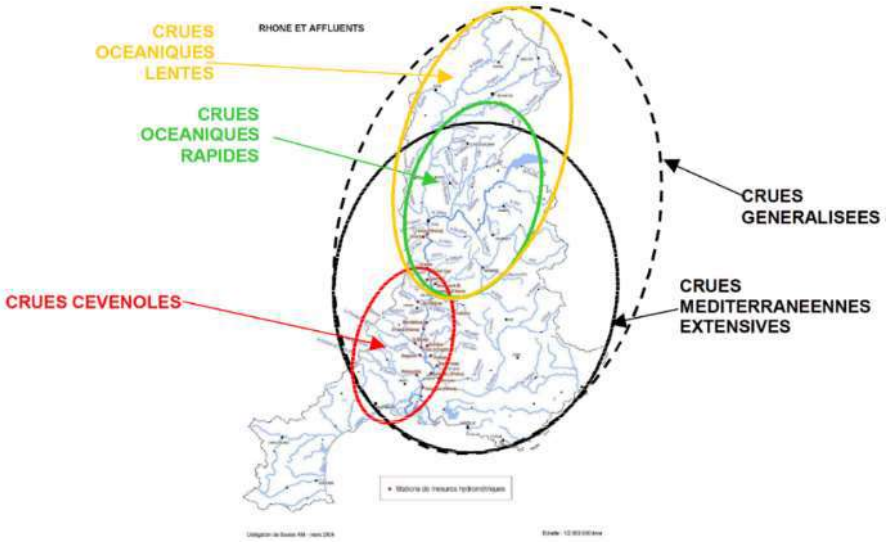


Figure 2. Typologie des crues du Rhône (source DUBAND [02003 10])

La comparaison des limnigrammes et du type de crues permet de voir que les crues ont des déroulements bien différents en fonction de leur l'origine météorologique. Ainsi les crues cévenoles et méditerranéennes sont très brèves, même si l'hydrogramme de la crue de décembre 2003 est épais au regard des autres crues méditerranéennes.

Les crues généralisées ont de leur côté des hydrogrammes plus épais. On notera que depuis 1840, aucune crue océanique n'a généré dans le Delta de crues supérieures à la crue décennale.

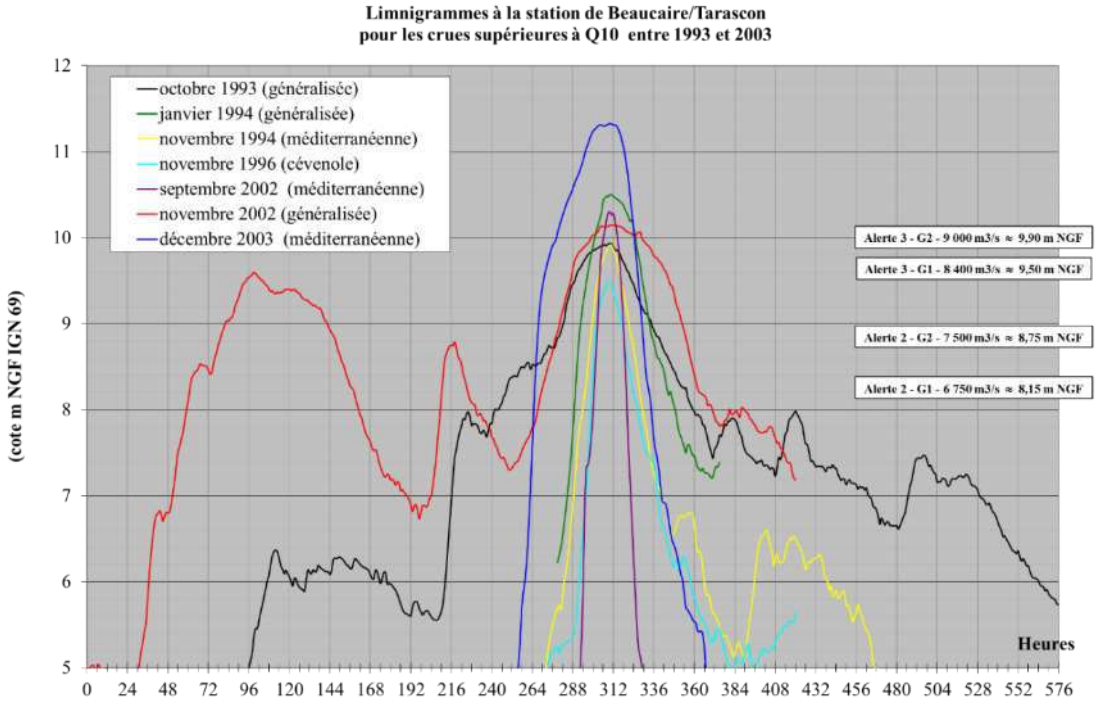


Figure 3. Limnigrammes à la station de Beaucaire/Tarascon (source CNR [K203])

2.2 HISTORIQUE DES MESURES DE DEBITS

Historiquement les débits des crues étaient estimés à partir des niveaux enregistrés à l'échelle du Pont de Beaucaire (PK 267,7) en rive droite du Vieux Rhône. Depuis les aménagements de la CNR, les débits sont mesurés à la station de Beaucaire/Tarascon située en rive gauche du Rhône au PK 269,6 juste en aval de la confluence du Vieux Rhône transitant par le barrage de Vallabrègues et le Rhône dérive transitant par l'usine hydro-électrique de Beaucaire.

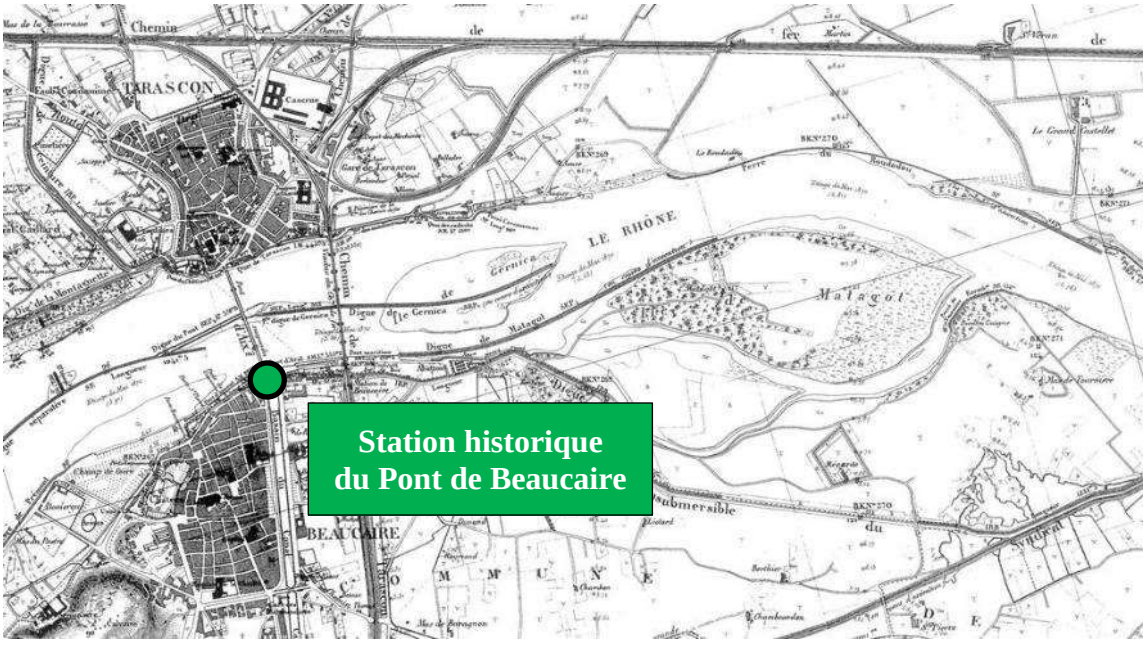


Figure 4. Traversée de Beaucaire/Tarascon en 1876 (carte des Ponts et Chaussées [H0003])

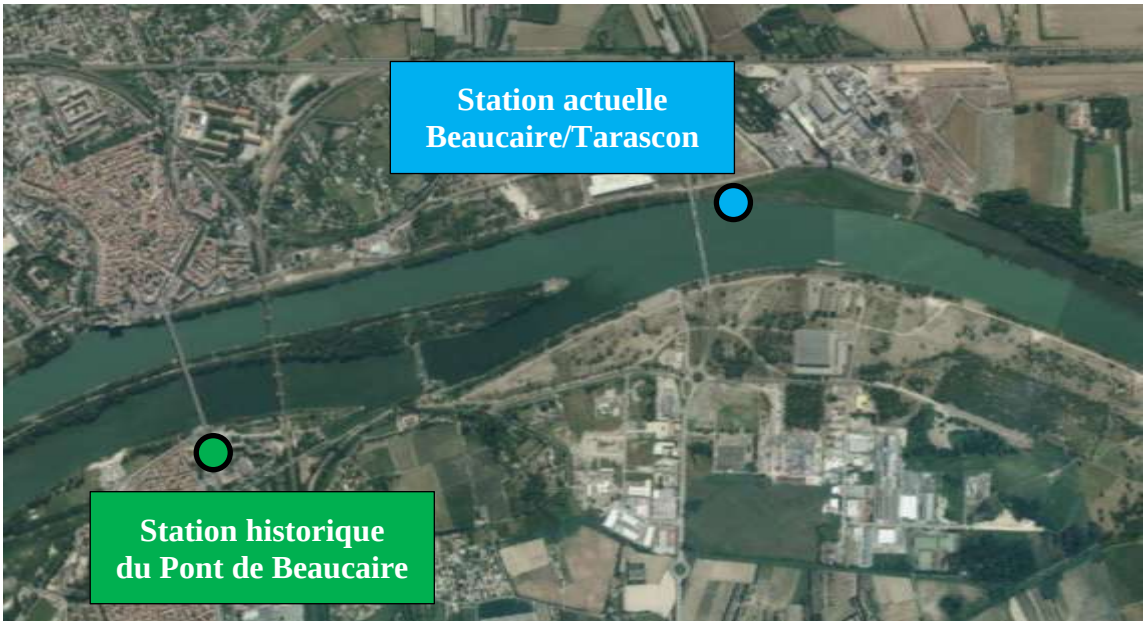


Figure 5. Traversée de Beaucaire/Tarascon en 2013 (source géoportail)

Le profil du lit du fleuve entre Beaucaire et Arles et plus particulièrement au droit du PK 269,6 a considérablement été modifié depuis 1840.

Parmi les grands changements de configuration, on notera :

- Le rehaussement des digues entre Beaucaire et Fourques après la crue de 1840 et la création du remblai ferroviaire entre Tarascon et Arles en lieu et place de l'ancienne chaussée du Trébon,
- Les aménagements liés à la navigation dans la 1ère moitié du XX^{ème} siècle,
- La réalisation des Sites Industrialo-Portuaires de Beaucaire, Tarascon et Arles, au début des années 1970, qui ont consisté à remblayer une partie du lit mineur et du lit moyen.

A contrario, le lit du fleuve dans la traversée de Beaucaire/Tarascon a subi peu de modifications géomorphologiques tant en section d'écoulement qu'en bathymétrie. Lors de la construction du canal du Rhône à Sète, une échelle fut posée. Les premières observations datent de 1816. Si aujourd'hui, elle n'est plus la station de référence, les niveaux continuent d'être enregistrés par le SPC Grand Delta. Par ailleurs, comme le note l'historien Georges PICHARD [H0004] « la stabilité et la longévité de cette échelle est évidemment exceptionnelle pour le bas Rhône » et permet de classer de façon pertinente les crues historiques en fonction du niveau atteint au droit de cette station.

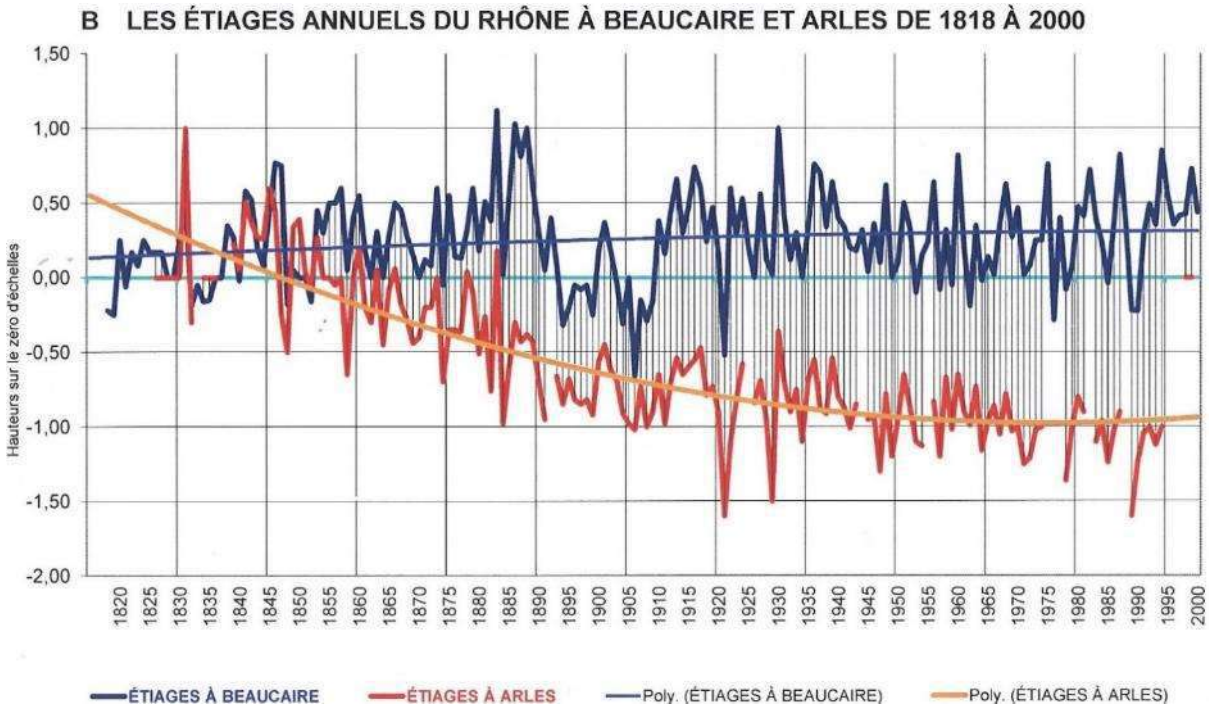


Figure 6. Comparaison des étiages à Beaucaire et Arles entre 1818 et 2000 (Pichard [H0004]

2.3 COURBES DE TARAGE

2.3.1 Courbes de tarage historique

Comme indiqué plus haut, les débits étaient mesurés à la station de pont de Beaucaire au droit de l'ancienne écluse du canal du Rhône à Sète. Pichard G. [H0004] dresse un historique des courbes de tarage qui se sont succédées (Cf. équations paraboliques ci-dessous) :

- Surrel (1847) : $Q = 3200$ pour $H = 3$ et $Q = 10000$ pour $H = 7$
- Rondel 1 (vers 1860) : $Q = 500 + 650\ h + 100\ h^2$ ($h < 5$ m)
- Rondel 1 (vers 1860) : $Q = 2105 + 8\ h + 164\ h^2$ ($h > 5$ m)
- Rondel 2 (vers 1860) : $Q = 500 + 625\ h + 112{,}5\ h^2$ ($h < 4$ m)
- Rondel 2 (vers 1860) : $Q = 400 + 675\ h + 106{,}25\ h^2$ ($h > 4$ m)
- Ponts et Chaussées (XIX^{ème}) : $Q = 400 + 760\ h + 105\ h^2$
- Ponts et Chaussées (1875) : $Q = 650 + 600\ h + 100\ h^2$
- Pardé (1919-1925) : $Q = 2580$ pour $H = 3$ et $Q = 8760$ pour $H = 7$
- Service Navigation (1920-1951) : $Q = 2678$ pour $H = 3$ et $Q = 8600$ pour $H = 7$

Le zéro de cette échelle correspond à une cote de 3,45 m NGF ortho, soit 3,48 m NGF.

Le SYMADREM a fait lever en 2010 [K008] le 8 de l'échelle actuelle au pont du Beaucaire. Il était égal à 11,38 m NGF, soit un zéro de l'échelle à 3,38 m NGF (soit l'échelle a été remplacée soit la mesure antérieure était erronée).

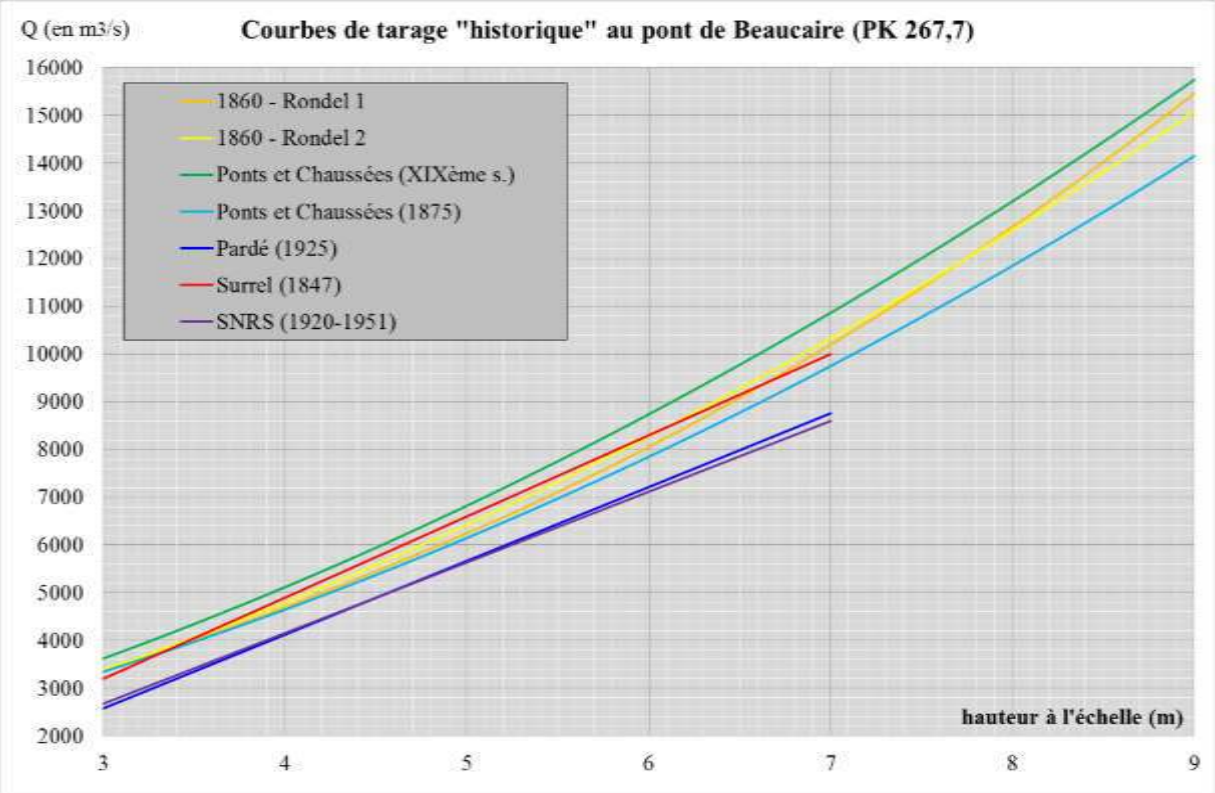


Figure 7. Courbes de tarage historique au pont de Beaucaire d'après Pichard [H0004]

2.3.2 Courbe de tarage actuelle

Suite à la conférence de consensus, la courbe de tarage à la station de Beaucaire/Tarascon a été réactualisée [O2003 05].

L'incertitude de 10 cm dans la mesure des limnigraphes correspond à un écart compris entre 100 (débit fréquent) et 200 m^3/s (débit rare) dans l'estimation des débits.

Le SPC donne les formules suivantes pour l'estimation des débits (valable pour Hortho > 3.6 m NGF) :

Pour Hortho < 9,8 m NGF

$$Q = 174.81\, H^{\frac{5}{3}} + 980.72$$

Pour Hortho > 9,8 m NGF

$$Q = 227.22\, H^{\frac{5}{3}} - 1375.26$$

On rappelle que Hign69 = Hortho + 0.03 m

La figure ci-après illustre la courbe de tarage en vigueur avec des estimations à ± 5 %.

L'incertitude de ± 5 % dans l'estimation des débits correspond à un écart d'environ ± 30 cm pour les débits rares. Il est de ± 25 cm pour les débits plus fréquents.

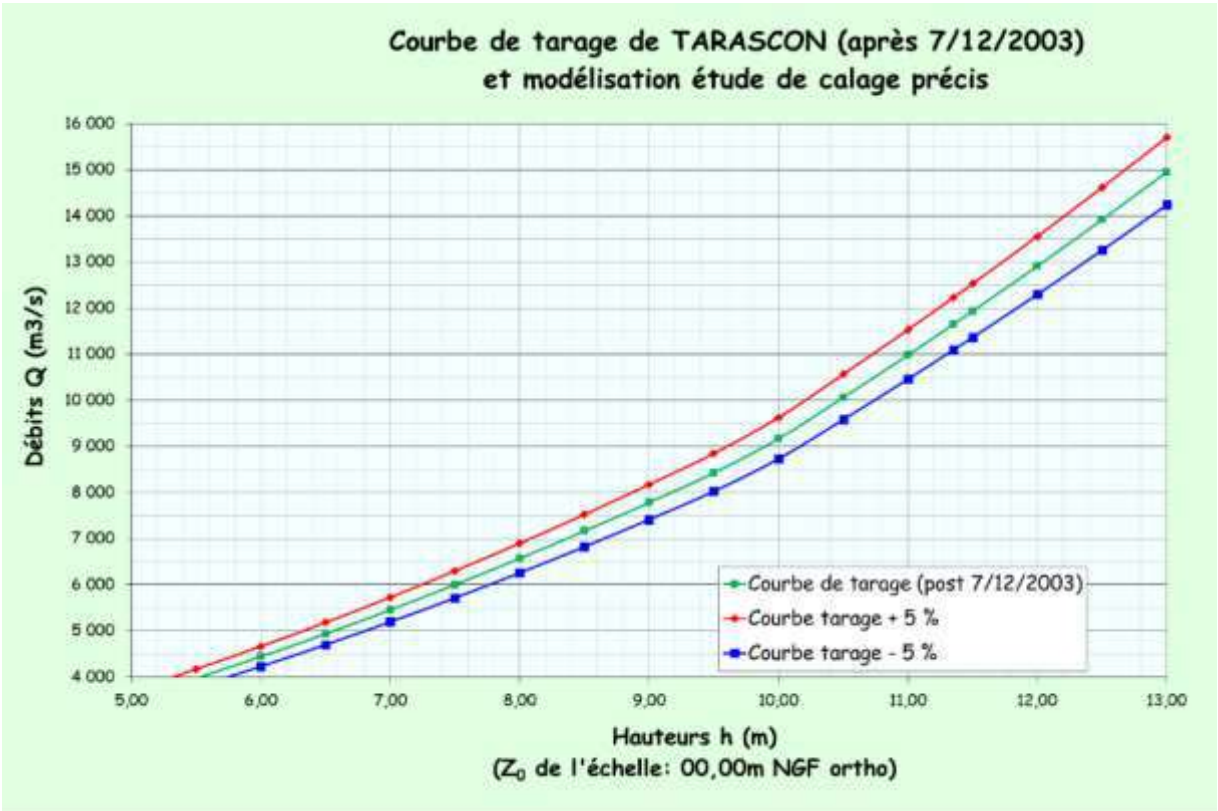


Figure 8. Courbe de tarage actuelle et enveloppe à ± 5 %

2.4 CRUES RECENTES - NIVEAUX MAXIMAUX AUX STATIONS LIMNIGRAPHIQUES DU DELTA

Les niveaux maximums des 8 crues supérieures à la crue décennale, depuis la réalisation des aménagements CNR, figurent ci-après. Ces altitudes sont en NGF IGN 69.

Figurent également dans ce tableau les niveaux à 8 heures avant la formation de la brèche de Claire Farine et à 10 heures avant la formation de la brèche de Petit Argence.

L'analyse de ces niveaux montre que le 3 décembre 2003 à 8 heures avant la formation de la première brèche (Claire Farine), jamais les niveaux n'avaient été aussi élevés aux stations de Beaucaire/Tarascon, BRL, Fourques, Arles et Saint Gilles. Pour les stations de Petite Abbaye et Grand Boisviel, ce n'est pas le cas, mais il est à noter que ces stations sont sous l'influence du niveau marin.

Ce « record » de niveau s'explique par l'efficacité des dispositifs de surveillance mis en place sur les deux rives, qui ont permis de résorber de nombreux désordres (22 brèches évitées en rive gauche) et retarder l'instant fatidique où la formation de brèches devenait inévitable.

Tableau 1. Hauteurs d'eau maximum aux stations limnimétriques - crues récentes (source CNR [K203])

Crues	Stations CNR et PK						
	Beaucaire Tarascon	**CNABRL**	**Fourques**	**Saint Gilles**	**Petite Abbaye**	**Arles**	**Grand Boisviel**
	PK 269,6	**PK277,3**	**PK 281**	**PK 297,3**	**PK 323,9**	**PK 282,6**	**PK 306,5**
10 octobre 1993	9,93	8,09	7,34	5,77	2,30	6,29	
8 janvier 1994	10,50	8,67	7,72	5,96	2,33	6,64	
6 novembre 1994	9,92	7,95	7,33	5,73	2,28	6,02	3,52
13 novembre 1996	9,48		6,73	5,23	2,10	5,77	3,38
10 septembre 2002	10,30	8,26	7,43	5,89	2,29	6,36	3,70
17 novembre 2002	9,60	7,85	7,15	5,81	2,45	6,09	3,61
26 novembre 2002	10,15	8,29	7,51	6,14	2,57	6,43	3,71
4 décembre 2003	11,33	9,24	8,03	6,32	2,56	7,05	3,84
3 déc. 2003 / 8h	10,72	8,72	7,84	6,27	2,54	6,65	3,60
3 déc. 2003 / 10 h	10,83	8,84	7,93	6,32	2,56	6,75	3,71
15 novembre 2014	8,56		5,98	4,77	1,95	5,15	2,98
23 novembre 2016	9,37		6,56	5,33	2,25	5,63	3,35

Les deux figurent ci-après permettent d'avoir une représentation de ces niveaux le long du Rhône, Grand Rhône et Petit Rhône.

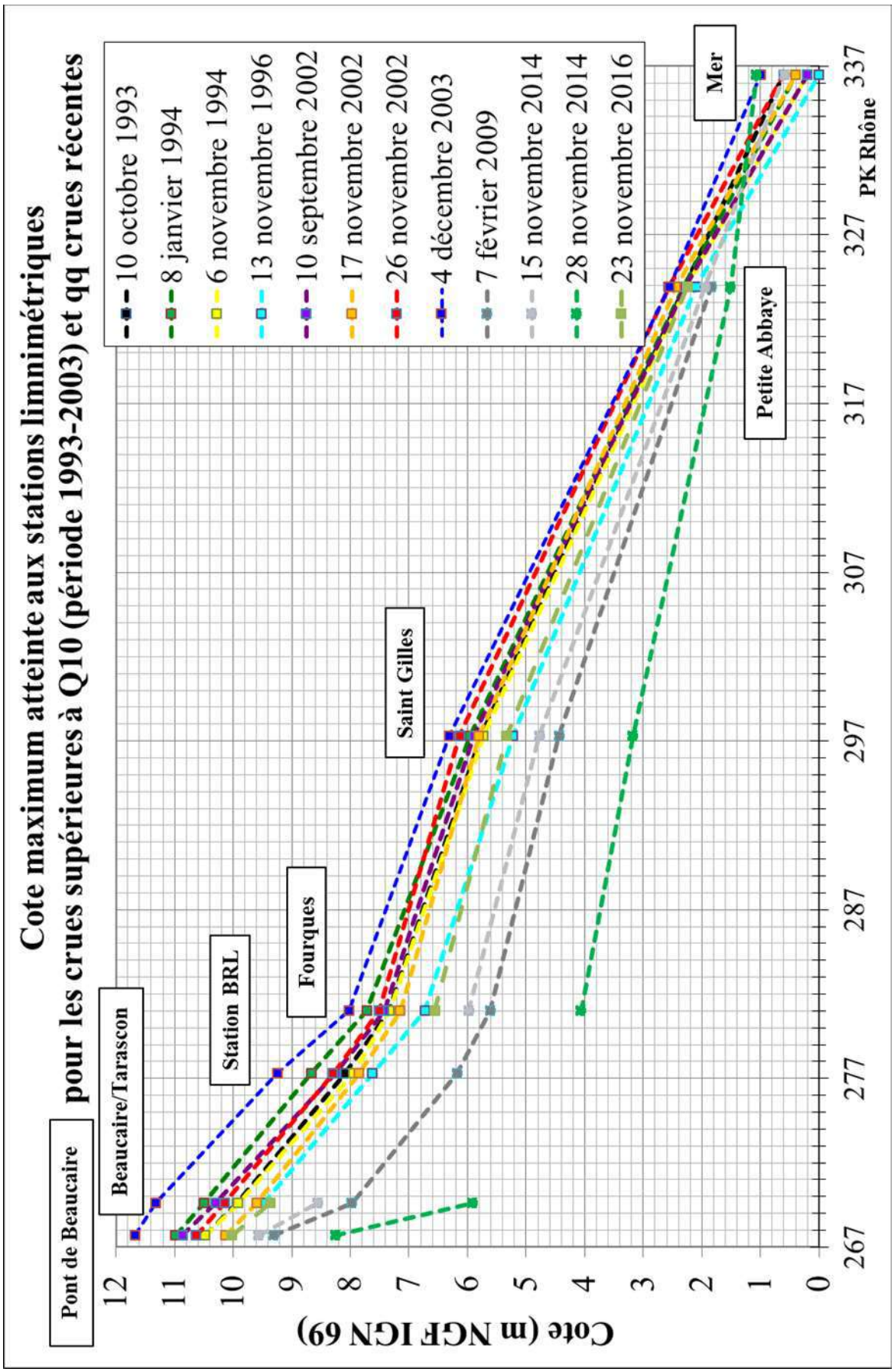


Figure 9. Niveaux maximums des crues récentes le long du Rhône et Petit Rhône (CNR [K203])

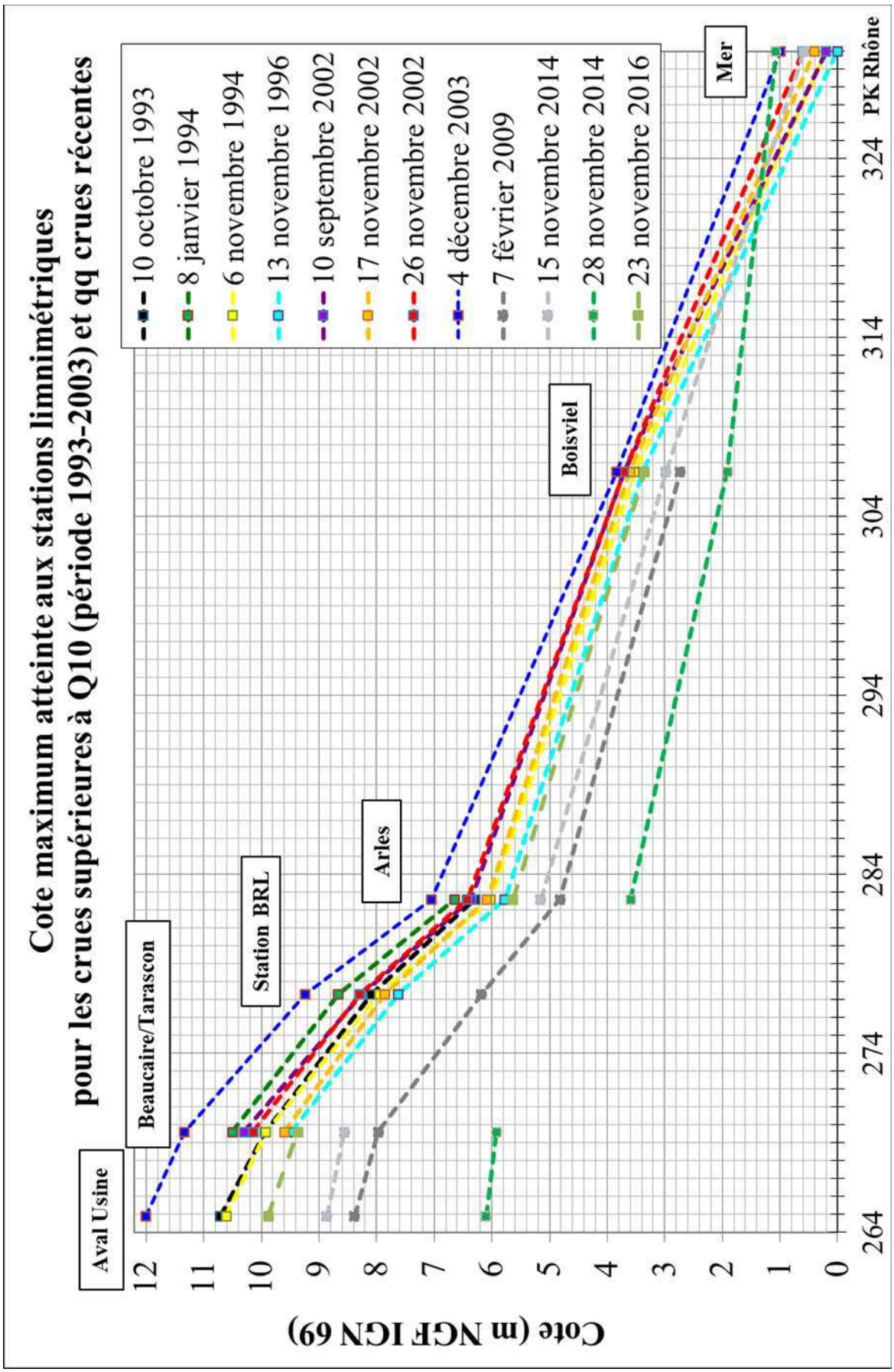


Figure 10. Niveaux maximums des crues récentes le long du Rhône et Grand Rhône (CNR [K203])

2.5 HYDROLOGIE

2.5.1 Différents modèles

2.5.1.1 Etude Globale Rhône 2000

Les périodes de retour des débits du Rhône à la station de Beaucaire/Tarascon ont été réévaluées en 2000, dans le cadre de l'Etude Globale Rhône [J001] réalisée par Territoire Rhône en partenariat avec l'Etat. Cette étude a été menée sur la base des crues enregistrées de 1920 à 1997. L'ajustement utilisé est la loi de Gumbel fréquemment utilisée pour déterminer la fréquence des valeurs extrêmes de débits.

Dans son avis du 26 mars 2013, le Comité Technique Permanent des Barrages et Ouvrages Hydrauliques a fait observer que pour préparer l'avenir, l'étude des crues de 2000 méritait d'être prochainement révisée à l'initiative des divers acteurs concernés du bassin du Rhône.

2.5.1.2 Ré-estimation des débits caractéristiques – DREAL RA 2014

En 2014, la DREAL Rhône-Alpes a commandé une étude à SAFEGE pour ré-estimer les débits caractéristiques aux stations hydrométriques du Rhône de Viviers et Beaucaire [J002]. Cette étude a repris la méthodologie utilisée dans l'étude EGR en recalant la fréquence des débits instantanés maximaux annuels sur la période 1841 à 2011.

L'étude menée par la DREAL en 2014 s'est basée sur la période débutant au lendemain de la plus grande crue observée dans le Delta, celle de Novembre 1840. Débuter l'analyse statistique des crues l'année de la plus grande crue connue peut introduire un biais dans l'analyse ; a contrario exclure la valeur de débit de 1840 (13 000 m^3/s) de l'analyse statistique peut avoir une influence notable sur la détermination des fréquences associées aux périodes de retour.

On note également que le débit instantané maximal annuel retenu pour l'année 2002 est de 9600 m^3/s. Ce débit a été estimé en considérant la courbe de tarage en vigueur depuis le 4 décembre 2003. Ce choix n'est pas cohérent avec les valeurs retenues pour les crues de 1993, 1994 et 1996 qui sont basées sur la courbe antérieure à la crue de décembre 2003.

A notre sens, soit on considère que la crue de décembre 2003 a modifié la courbe de tarage et l'estimation des débits de 1993 à 2002 doit être réalisée suivant la courbe de tarage en vigueur lors de ces crues, soit on considère que les débits de cette période doivent être ré-évalués.

Dans tous les cas, le mix de courbes de tarage sur la période 1993-2002 doit être évité ou justifié par une étude détaillée.

Sur la période 1920-2013, on note des écarts sensibles entre les débits utilisés dans l'étude et ceux figurant dans la banque HYDRO sur la période 1920-1960. La moyenne des écarts est de 160 m^3/s.

On note également pour les crues plus anciennes à l'exception de celles de 1840 et 1856 des écarts sensibles entre les données utilisées par la DREAL en 2014 et Maurice Pardé.

2.5.1.3 Ajustement

Différentes hypothèses ont été étudiées en modifiant les courbes de tarage retenues (avant ou après conférence de consensus), en utilisant une année glissante (Novembre->Octobre) pour la sélection des débits maximum annuels et en ajustant les débits de 2002 afin de caler à la courbe de tarage en vigueur à ce moment

2.5.2 Données retenues

L'hypothèse qui a pris en compte pour les débits structurants l'analyse les débits estimés par Pardé et corrigés des effets des brèches et pour les débits plus récents la courbe de tarage actuellement en vigueur permet d'avoir une série historique plus homogène au regard des observations faites au pont de Beaucaire et la stabilité bathymétrique dans ce tronçon du fleuve soulignée par les travaux de Raccasi [M007] et les travaux de Pichard [H004].

En l'état actuel de nos connaissances, cette hypothèse nous semble être la plus pertinente.
Dans l'attente des résultats de l'étude hydrologique commandée récemment par la DREAL Auvergne Rhône-Alpes, nous retiendrons pour le reste de l'étude l'hypothèse dite « 3 » dans le Chapitre 4.

Tableau 2. Période de retour, débit max et intervalles de confiance retenu

Période de retour T (années)	Débit instantané max annuel (m^3/s)	Intervalle de confiance à 70 %		Intervalle de confiance à 95 %	
		borne inf.	borne sup.	borne inf.	borne sup.
1	4 100	4 000	4 300	3 800	4 400
2	6 000	5 900	6 100	5 800	6 200
5	7 500	7 300	7 700	7 100	7 800
10	8 500	8 200	8 700	7 900	8 900
15	9 000	8 700	9 300	8 300	9 500
20	9 400	9 000	9 700	8 600	9 900
25	9 700	9 300	10 000	8 900	10 300
30	9 900	9 500	10 300	9 100	10 500
50	10 600	10 100	11 000	9 600	11 300
75	11 100	10 600	11 600	10 100	11 900
100	11 500	11 000	12 000	10 400	12 300
200	12 400	11 800	12 900	11 100	13 300
250	12 700	12 000	13 200	11 400	13 700
300	12 900	12 300	13 500	11 600	13 900
400	13 300	12 600	13 900	11 900	14 300
500	13 600	12 900	14 200	12 100	14 700
1000	14 500	13 700	15 200	12 900	15 700
2000	15 400	14 500	16 100	13 600	16 700

2.5.3 Probabilité de non dépassement

Si chaque année est considérée comme indépendante au sens des probabilités de l'année précédente, la probabilité de dépassement sur les n prochaines années d'une crue de période de retour T_0 est (toutes choses étant supposées égales par ailleurs et notamment aucune modification du lit ou des processus hydrologiques) est :

$$P = 1-(1 - 1/T_0)^n$$

Tableau 3. Probabilité de dépassement des crues caractéristiques étudiées dans le Plan Rhône sur les n prochaines années

Débit (m^3/s)	Période de retour (ans) arrondie	Probabilité de dépassement (en %) sur les n prochaines années				
		1 an	10 ans	25 ans	50 ans	100 ans
8 500	10	10	65	93	99	100
9 500	20	5	40	72	92	99
10 500	50	2	18	40	64	87
11 500	100	1	10	22	39	63
12 500	200	1	5	12	22	39
14 160	800	0.1	1	3	6	12

3 LES AUTRES FACTEURS

3.1 LA GEOMORPHOLOGIE ET LA MORPHODYNAMIQUE

3.1.1 Géomorphologie du Delta - Diffluence aux embouchures

La plaine actuelle correspond au sommet d'une accumulation deltaïque, formant un prisme sédimentaire épais de plus de 70 m au Sud. Les dépôts, à faciès fluviatiles (alluvions du Rhône), saumâtres (lagunes salées) ou littoraux (cordons sableux) s'organisent de façon complexe, et reposent à leur base sur une nappe alluviale pléistocène caillouteuse. Les apports du fleuve ont permis une avancée des terres émergées, progradantes depuis environ 7000 ans à partir d'un maximum transgressif situé au nord de l'Etang du Vaccarès : les cordons littoraux successifs sont matérialisés par des dépôts sableux coquilliers, formant des points hauts et alignés globalement Est-Ouest au centre du delta, Sud-Est/Nord-Ouest en Petite Camargue (Vella, 1999).

Les deux figures (Fassetta 2004), illustrent respectivement les étapes de l'édification holocène du Delta du Rhône et l'évolution paléographique du delta du Rhône au cours de l'holocène récent.

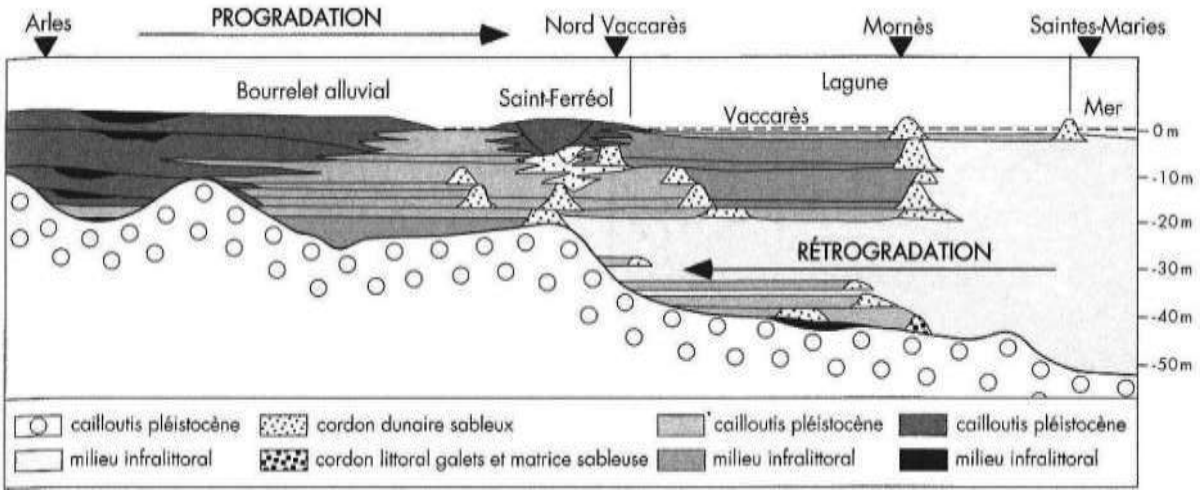


Figure 11. étapes de l'édification holocène du Delta du Rhône

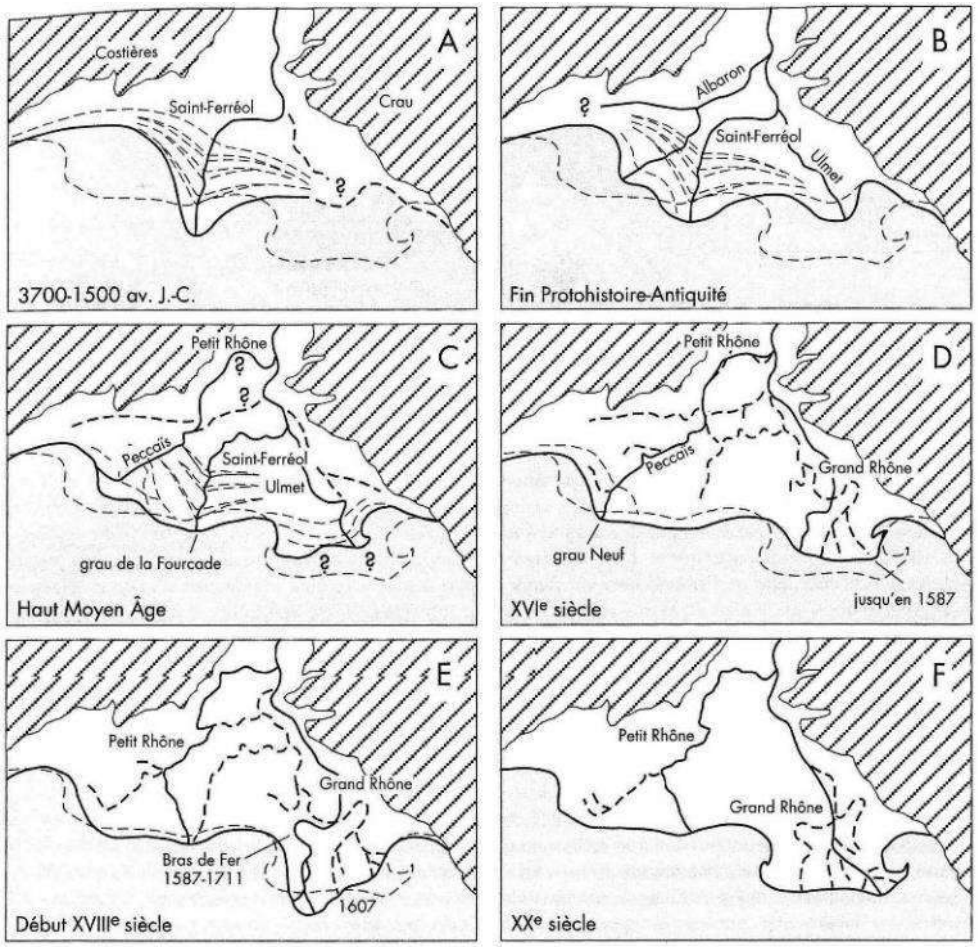


Figure 12. l'évolution paléographique du delta du Rhône au cours de l'holocène récent

Le fleuve a été divisé, selon les périodes, en plusieurs bras, dont le tracé et les embouchures se sont déplacés au cours du temps. La diffluence, dans le secteur d'Arles, est conditionnée par la présence d'un « haut fond » du substrat pléistocène, mais sa position est mobile au cours de l'Holocène. Les chenaux fluviaux successifs, abandonnés par défluviations, sont encore visibles en surface : les plus anciens (entre 6500 et 2000 BC) sont situés à l'Ouest : Rhônes d'Albaron, des Torradons, de Saint-Ferréol ; les plus récents sont situés au centre et à l'Est du delta : Rhône d'Ulmet (romain à médiéval), du Grand Passon (médiéval), du Bras de Fer (1586-1711), Grand Rhône (depuis 1711). Entre le début du XI^{ème} siècle et la fin du XVème siècle, les Rhônes de Saint-Ferréol et d'Ulmet sont progressivement colmatés, avant d'être artificiellement coupés du Grand Rhône vers 1440 (Fassetta, 2004). Quelques bras secondaires médiévaux ont fonctionné en Petite Camargue, où l'aval du Petit Rhône actuel a été tardivement privilégié par la fermeture artificielle du Rhône de Peccais en 1552. Ces bras ont édifié des bourrelets alluviaux, constitués de sables limoneux, bien drainés naturellement, qui dominent la plaine inondable marécageuse.

Le chenal du Grand Rhône n'est établi sur sa position actuelle à l'aval du seuil de Terrin (qui correspond à une remontée du substrat dur pleistocène) que depuis 1711. La présence d'îlots sableux mobiles jusqu'au milieu du XIXème siècle, traduit encore l'existence d'un style tressé Le chenal est bordé par des bourrelets alluviaux épais, comparables à ceux du palier d'Arles. Son embouchure, divisée en 3 exutoires, est caractérisée par une rapide propagation entre le XVIII^{ème} et la fin du XIX^{ème} siècle (jusqu'à 80 m/an, Maillet, 2005). Les bras

occidental (Piémanson) et central (Roustan) sont barrés et le bras de Pégoulier est endigué en 1850, avant que ne soit privilégiée définitivement l'embouchure de Roustan en 1895.

Le Petit Rhône est caractérisé par un chenal unique, à tracé sinueux en méandres. Cette configuration est sans doute associée à une charge solide peu abondante et fine et à un profil en long très affaibli par la longueur du bras (60 km). Les levées de berges sont étroites et peu élevées. Elles sont –et ont été- fréquemment recoupées par des brèches, prolongées par des cônes d'épandages sableux dans la plaine alluviale.

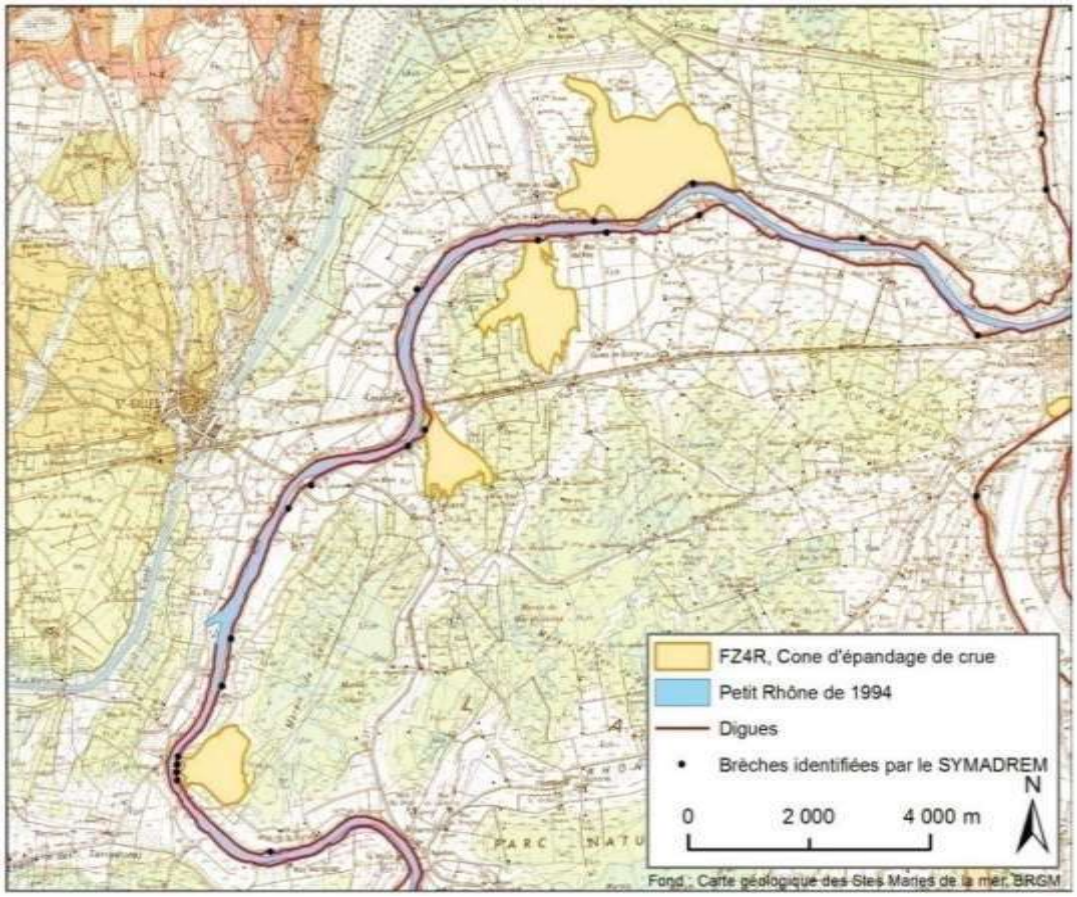


Figure 13. Localisation de paléo-brèches à partir de l'analyse de la carte géologique (Raccasi/CEREGE 2010)

La ligne d'eau est située actuellement au-dessus de la plaine inondable pour un débit annuel (4200 m^3/s). Le petit Rhône a tendance à stocker sa charge sédimentaire, ce qui explique le recul rapide de son embouchure depuis le milieu du XIX^{ème} siècle. La montée séculaire du niveau marin et les surcotes, plus fréquentes et plus hautes au cours du XX^{ème} siècle, constituent une entrave importante au bon écoulement des eaux de crues, aggravant le risque d'inondation à proximité des embouchures.

Les deux figures ci-dessous (Fassetta 2004) illustrent ces différents paléochenaux respectivement au cours de l'Antiquité tardive/Haut Moyen Âge et depuis le Moyen Âge. Les principaux paléo-chenaux recoupant les chenaux actuels ont été coloriés par le SYMADREM en rouge.

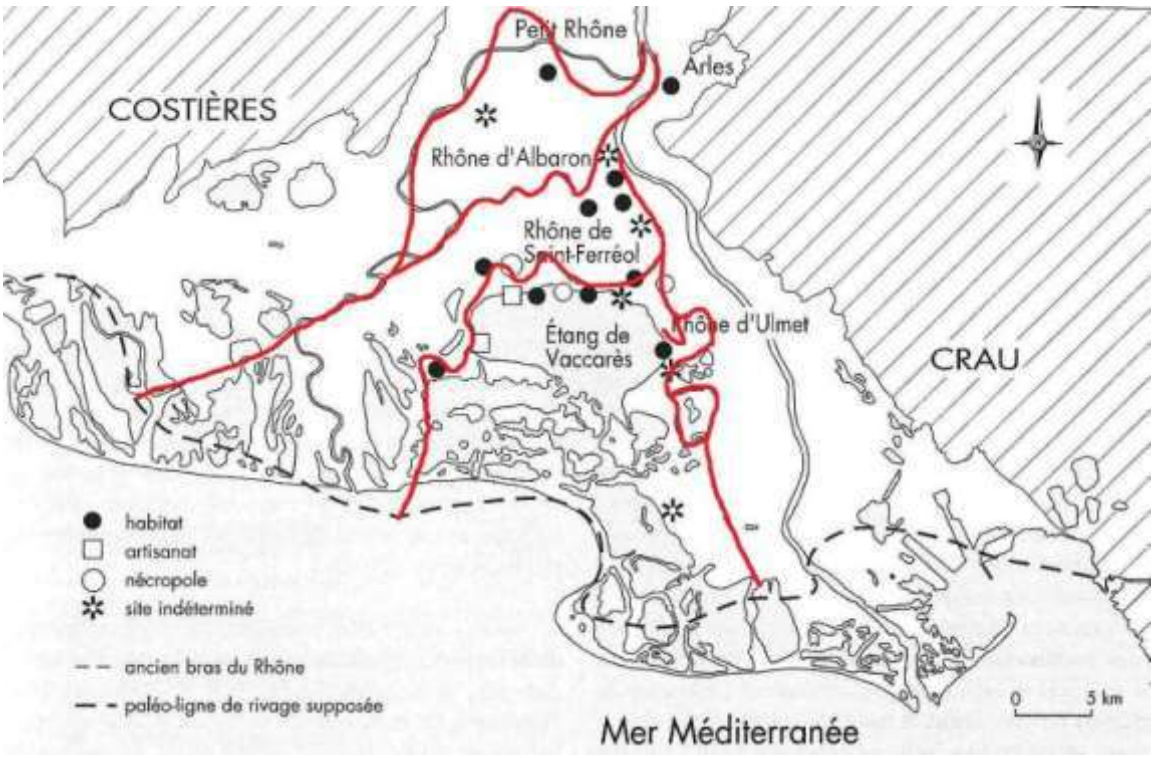


Figure 14. L'occupation du sol et le contexte hydrologique du delta du Rhône au cours de l'antiquité tardive/haut Moyen Âge (Fassetta 2004)

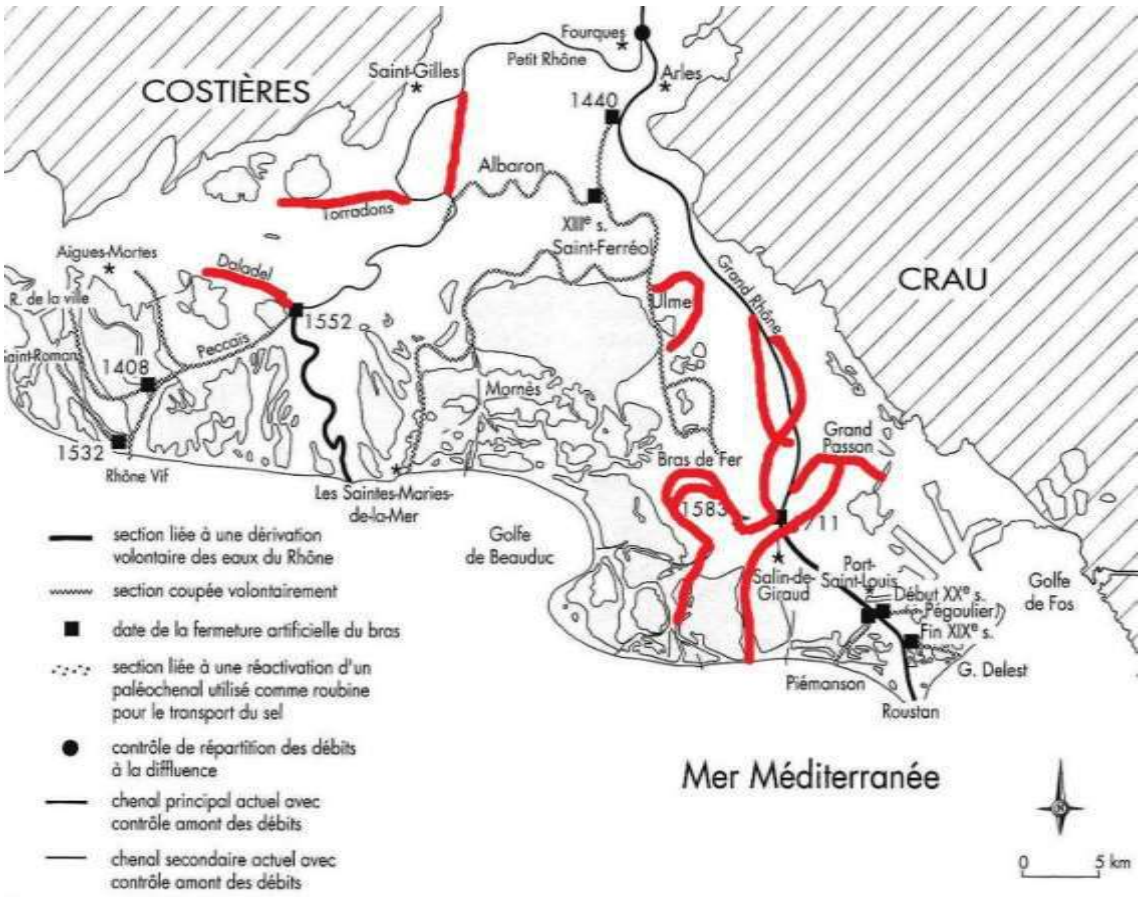


Figure 15. L'artificialisation du delta du Rhône depuis le Moyen Âge (Fassetta 2004)

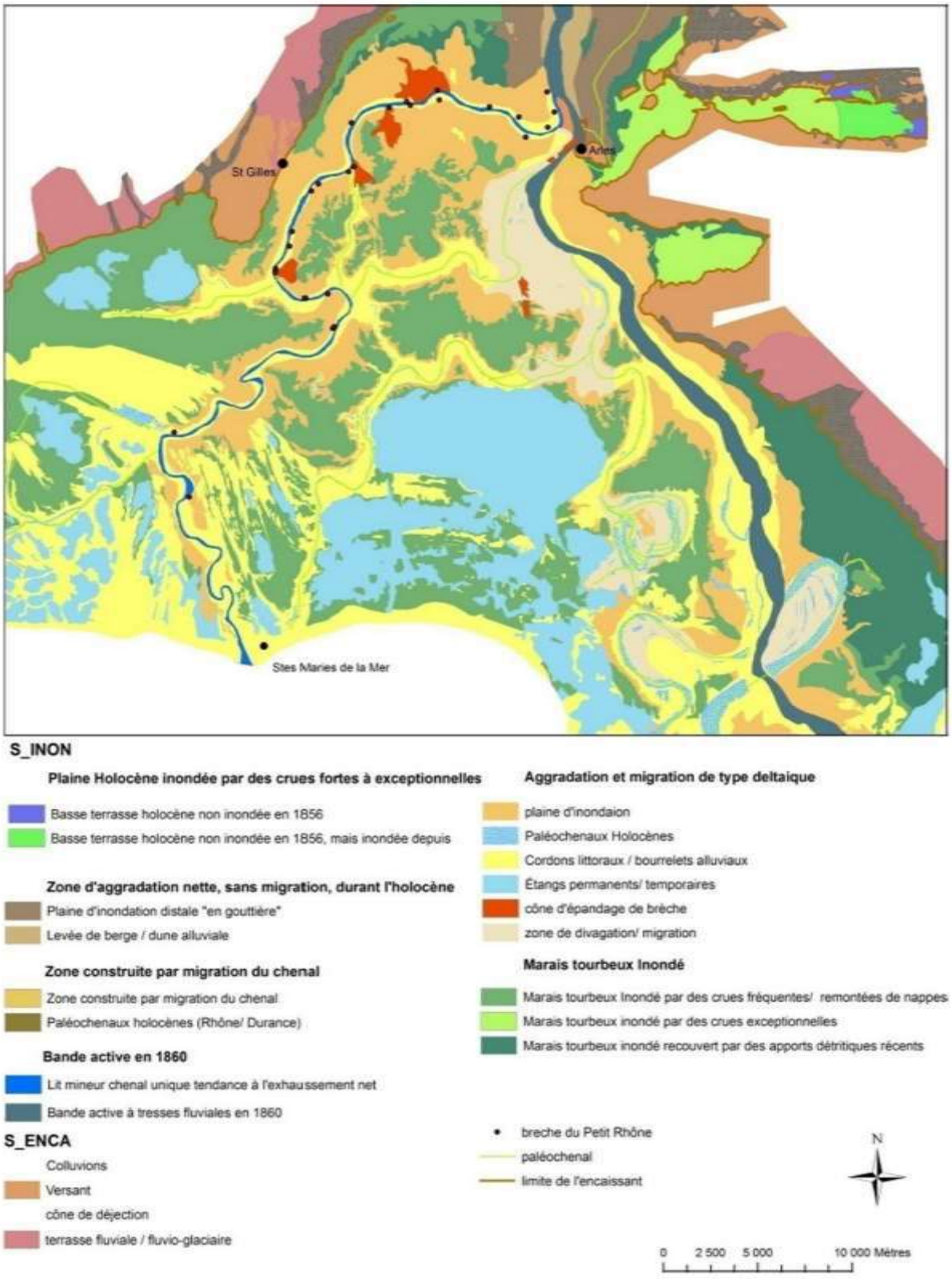


Figure 16. Atlas paléo-environnement – DREAL

3.1.2 La morpho-dynamique du Petit Rhône

Le chenal du Petit Rhône est contraint par des digues de protections contre les crues qui limitent ses possibilités de divagation. Le confortement des digues dans la deuxième moitié du XIXème siècle a été complété d'un confortement quasi systématique des berges concaves du Petit Rhône par enrochements (SE en rouge dans la carte des ponts et chaussées de 1876) et localement par la réalisation de perrés (SP en bleu dans la carte ci-dessous).

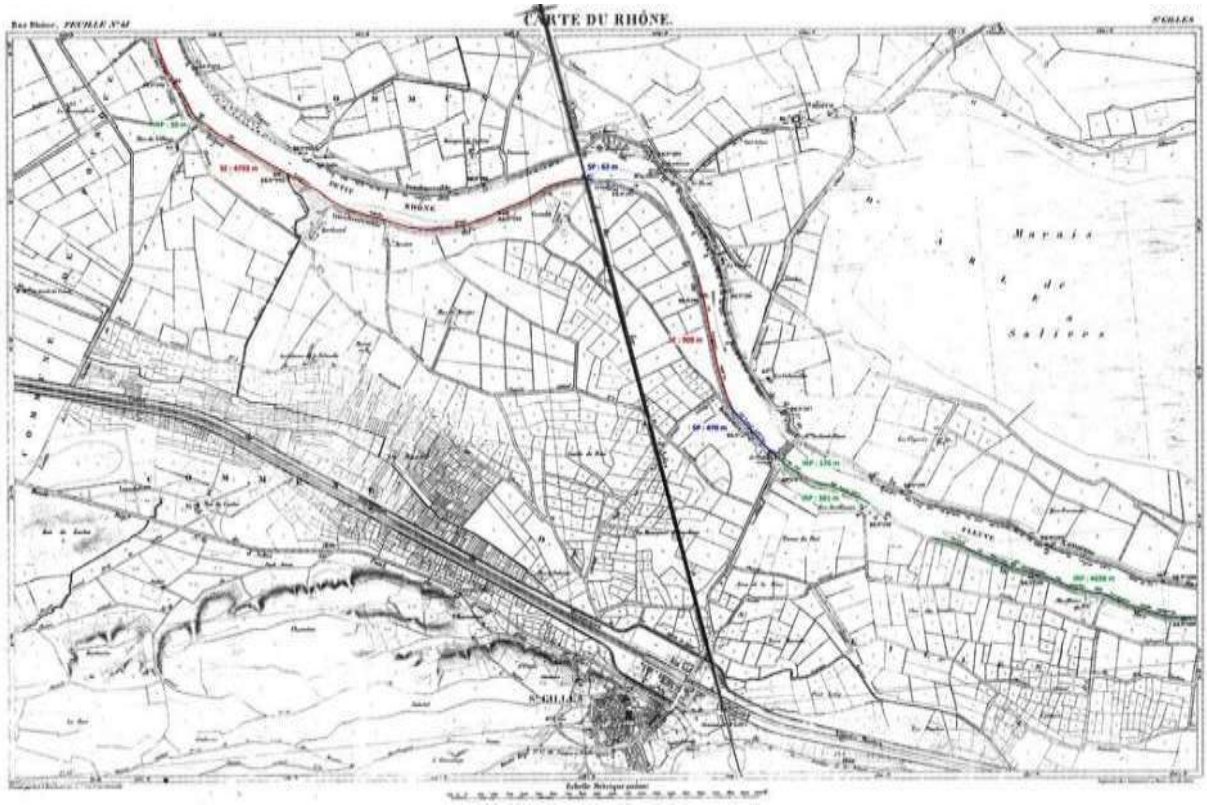


Figure 17. Carte des ponts et chaussées de 1876 (protection en enrochements en rouge et perré en bleu)

Des aménagements pour la navigation (panneaux de fonds unique sur le Rhône) et une écluse au PK300 ont été réalisés par la CNR mais gérés par VNF entre 1976 et 1981. Il s'agit de dalles en béton, dont la hauteur varie entre 0,50 m et 1 m, qui sont superposées et fixées à des pieux constitués par des profilés HE 160.

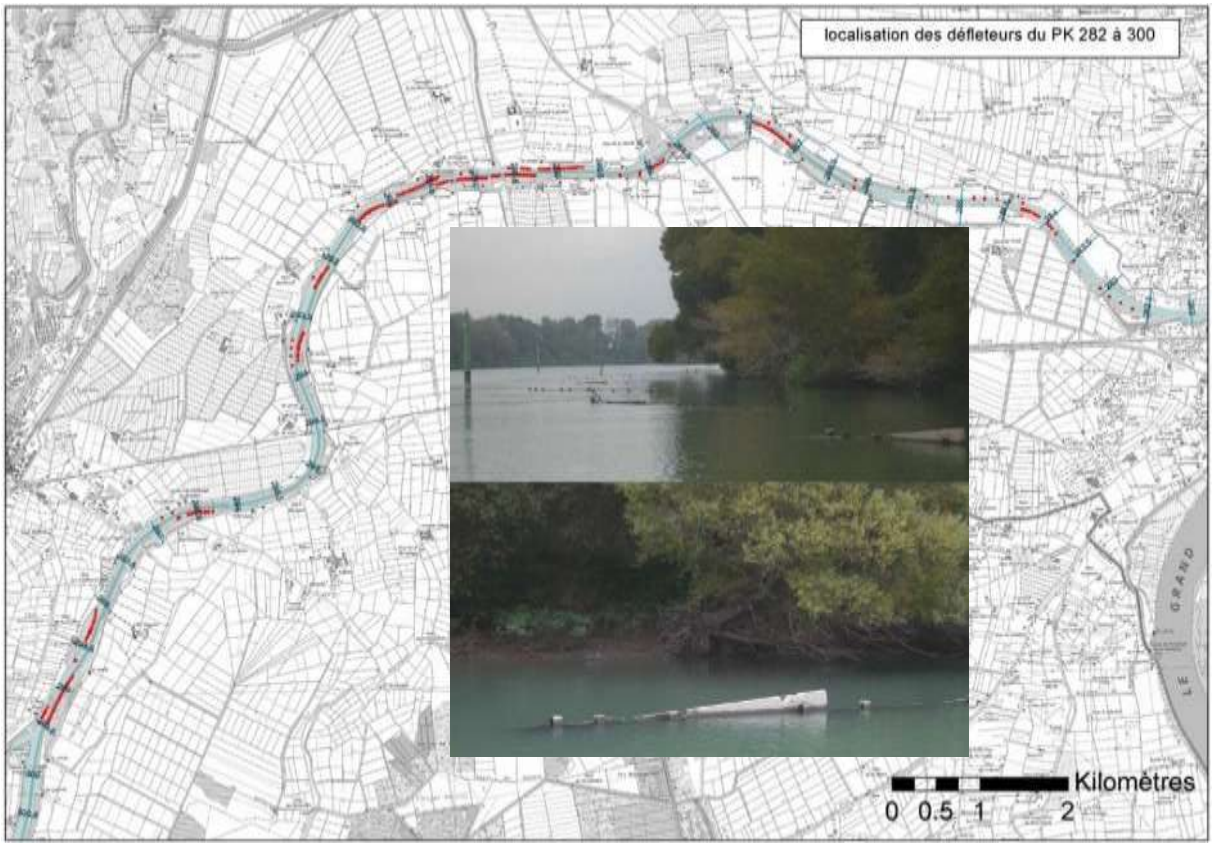


Figure 18. Panneaux de fonds sur l'amont du Petit Rhône (source EGISeau [K101])

A l'instar du Rhône entre Beaucaire et Arles, Raccasi (2008) a procédé à la création de MNT historique et l'analyse de l'évolution du chenal en 2D, puis en 3D à deux échelles de temps (1876-2004) et (2001-2004). La première échelle de temps donne des éléments intéressants pour l'appréciation de la mobilité du fleuve à très long terme (150 ans). La seconde échelle de temps donne quant à elle des éléments intéressants pour apprécier la mobilité des berges et du fond du chenal à l'échelle d'une crue puisqu'elle permet de couvrir la période 2002/2003 où 3 crues se sont succédées, la crue de septembre 2002 intense et très brève, la crue de novembre 2002, moins intense mais longue (15 jours) et la crue centennale de décembre 2003, dont l'hydrogramme reste pointu si l'on compare avec la crue de mai 1856, crue de référence du Rhône.

3.1.3 La morpho-dynamique du Grand Rhône

Les données ci-dessous proviennent de l'étude morphodynamique réalisée par ARTELIA dans le cadre de l'étude du renforcement de la digue de Salin de Giraud.

Le Rhône dans sa partie avale (du PK 312 à l'embouchure) a été marqué par trois grandes étapes :

- Avant 1607, le Rhône dit « du Grand Passon » (voir carte géologique BRGM) ;
- Jusqu'en 1711, le Vieux Rhône ou Bras de Fer qui débouchait au Grau de la Dent ;
- Après 1711, par le tracé actuel, qui a connu encore des modifications plus locales dans sa partie terminale (voir carte géomorphologique du delta du Rhône ci-après).

Depuis, le tracé du fleuve a peu changé. Le 18ème et le 19ème siècle ont vu l'avancée progressive de l'embouchure. En 1896, le débouché au droit de Piémanson a été artificiellement détourné vers l'ouest vers l'embouchure actuelle pour limiter l'ensablement du golfe de Fos. La flèche de la Gracieuse s'est progressivement édifiée avec les apports sédimentaires du fleuve.

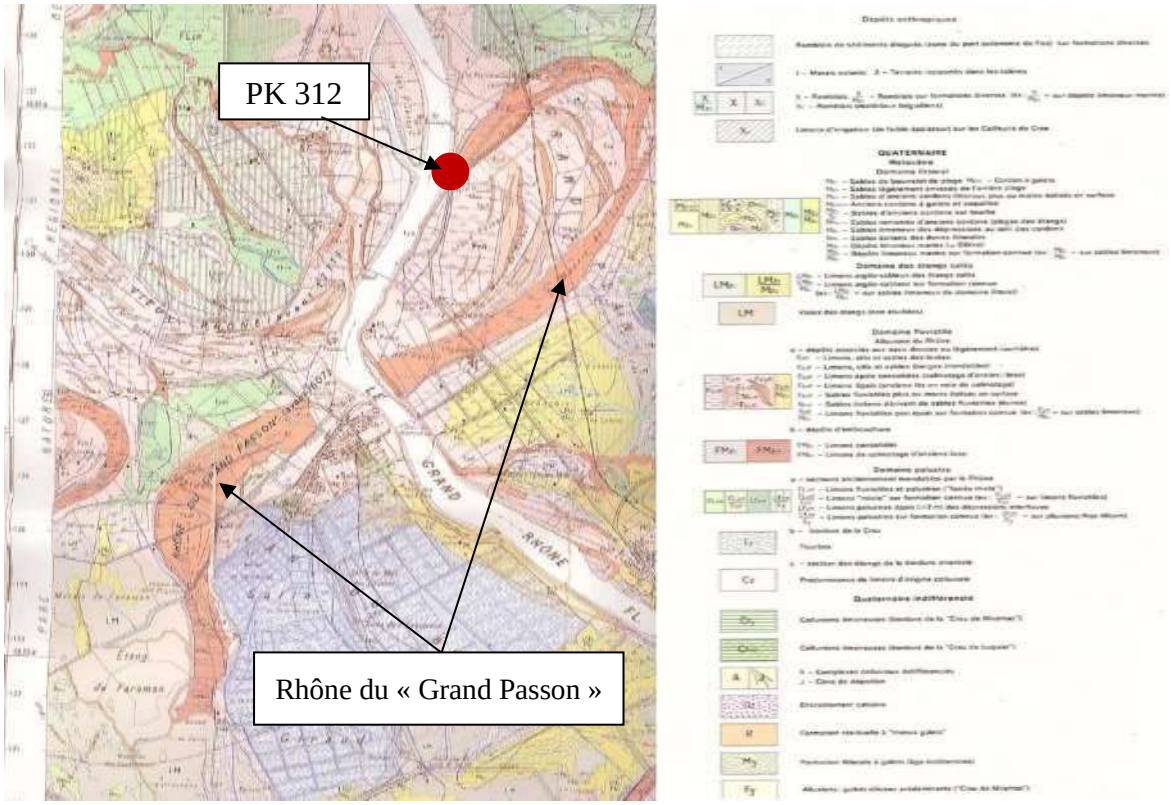


Figure 19. Carte géologique BRGM

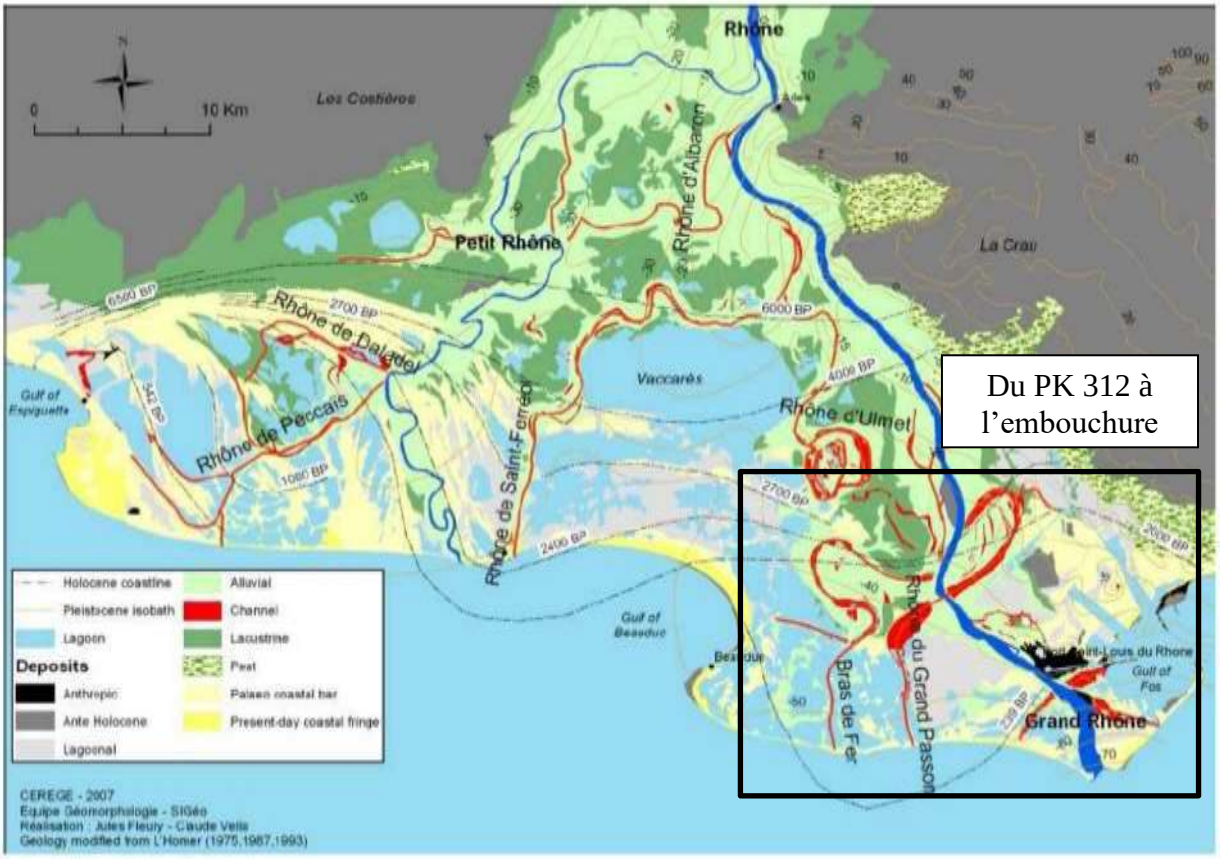


Figure 20. Carte géomorphologique du delta du Rhône (Arnaud- Fassetta)

3.2 LE VENT

Quatre stations sont présentes dans le Delta du Rhône et une station est située en périphérie.

Tableau 4. Stations météo dans le Delta du Rhône

Nom	Coordonnées		Lambert II étendu		Altitude	Producteurs
ARLES	Latitude	43°30'36"N	Lambert Y (hm)	18371	1 m	Tour du Valat
	Longitude	4°41'36"E	Lambert X (hm)	7908		
STES-MARIES-DE-LA-MER	Latitude	43°26'54"N	Lambert Y (hm)	18296	1 m	AUTRES
	Longitude	4°25'24"E	Lambert X (hm)	7691		
TARASCON	Latitude	43°49'42"N	Lambert Y (hm)	1872	15 m	METEO-FRANCE
	Longitude	4°38'24"E	Lambert X (hm)	7854		
AIGUES-MORTES	Latitude	43°32'12"N	Lambert Y (hm)	18390	1 m	Autres
	Longitude	4°12'24"E	Lambert X (hm)	7513		

NIMES-GARONS	Latitude	43°45'24"N	Lambert Y (hm)	18640	92 m	METEO-FRANCE
	Longitude	4°24'42"E	Lambert X (hm)	7673		

La rose des vents de la station d'Arles située à la Tour du Valat soit dans la partie Sud Est de la Camargue Insulaire montre des vents dominants du Nord/Nord-Ouest et Sud-Est avec une fréquence de vents avec des vitesses supérieures à 8 m/s relativement fréquentes.

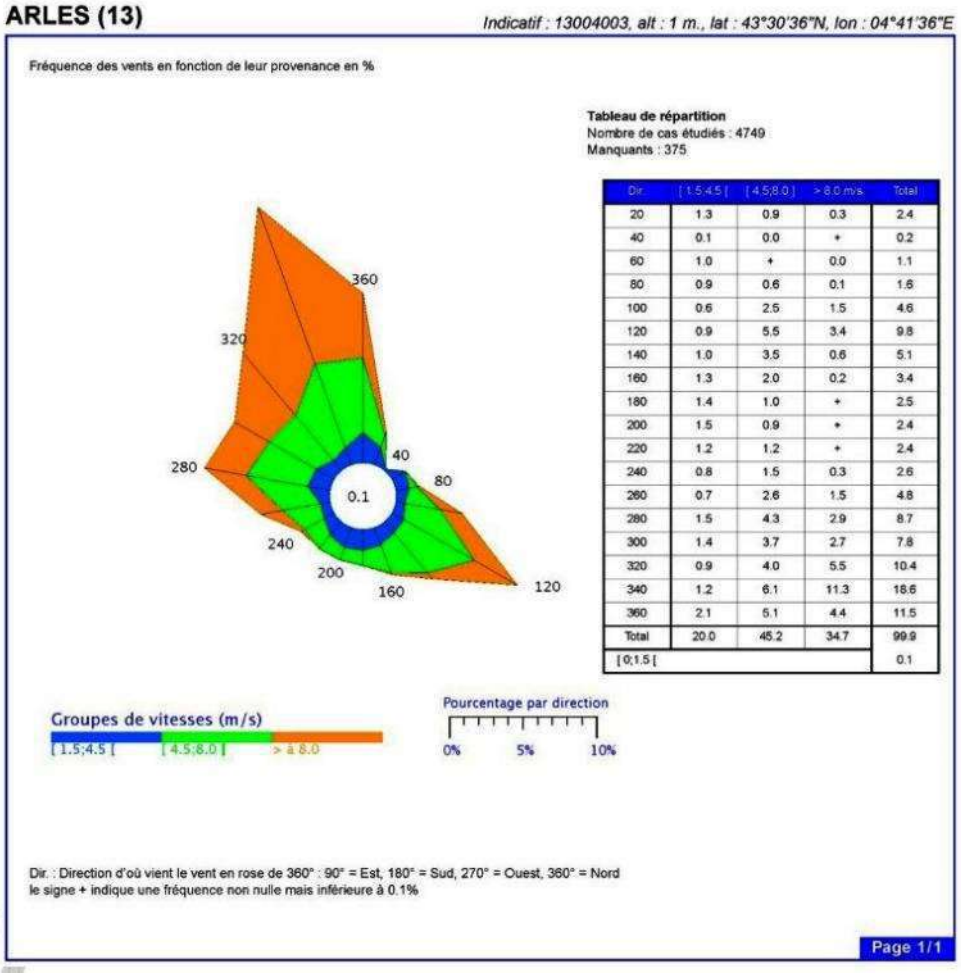


Figure 21. Rose des vents à Arles Tour du Valat

La carte extraite de l'Eurocode 1 : EN1991-1-4:2005 donne un vent de référence (période de retour de 50 ans) compris entre 28 et 30 m/s. La vitesse du vent pour une période de retour 1000 ans vaut 1,2 fois celle pour 50 ans soit 36m/s (130km/h).

L'analyse du vent lors des 8 crues supérieures à la crue décennale entre 1993 et 2003 montre que les vents dominants lors des crues sont orientés Nord ou Sud-Est, mais peuvent changer de direction en crue, comme cela fut le cas en décembre 2003. Si l'on excepte la crue de décembre 2003, la force du vent lors des crues est inférieure à 10 m/s, ce qui est très inférieure au vent annuel. La crue de décembre 2003, dont la période de retour est d'environ 100 ans montre néanmoins qu'on peut avoir des vents importants en crue sans néanmoins

atteindre des vitesses supérieures à 18 m/s, ce qui correspond à quasiment un vent de fréquence annuel.

Tableau 5. Direction et force du vent lors des crues importantes de 1993 à 2003

crue	Direction du vent moyen	Force du vent moyen
Octobre 1993	Sud-Est/Est	Entre 5 et 10 m/s
Janvier 1994	Nord	Inférieure à 4 m/s
Novembre 1994	Nord et Sud-Est	Entre 4 et 8 m/s
Novembre 1996	Nord	Entre 4 et 6 m/s
Septembre 2002	Nord/Nord-Ouest	Entre 2 et 4 m/s
Novembre 2002 (1ère)	Sud/Sud-Est	Entre 1 et 8 m/s
Novembre 2002 (2ème)	Nord	Entre 6 et 10 m/s
Décembre 2003	Sud-Est/Est puis Nord-Est Puis Sud/Sud-Est	Entre 9 et 11 m/s - nord du delta et 12 et 18 m/s - sud du delta

L'analyse des données de vents relatives aux crues supérieures à la crue décennale de 1993 à 2003 tend à montrer :

- des vitesses de vent de fréquence annuelle, voire moins ;
- des directions de vent très variables au cours de la crue ;
- l'effet joué par la végétation le long des berges du fleuve qui limite le développement de longs Fetch et donc des hauteurs de vagues spécifiques ;
- L'espace « contraint » que représente le lit endigué qui limite également le développement de longs Fetch (règle des 15°).

Les digues exposées au vent sont :

- celles situées sur le Grand Rhône rive droite notamment en aval de Salin de Giraud (vent du sud-Est et entrées maritimes),
- celles situées sur le Petit Rhône riva gauche au droit de l'Amarée (vent du Sud-Ouest et entrées maritimes),
- celle du Défluent (vent du Nord)

L'étude accidentologique a montré que les deux premières digues étaient fréquemment sollicitées par les vents marins que ce soit en période de crues ou hors période de crues.

La digue du défluent est exposée au vent du Nord avec un Fetch potentiel de 1,5 km. Le retour d'expérience des crues passées n'a pas montré de risque d'érosion liée aux vagues. La digue présente une revanche confortable par rapport à la crue exceptionnelle.

3.3 LES SEISMES

Suivant le zonage sismique de la France en vigueur depuis le 1er mai 2011, l'ouvrage se situe dans une zone de risque faible, comme le montre la carte ci-après.

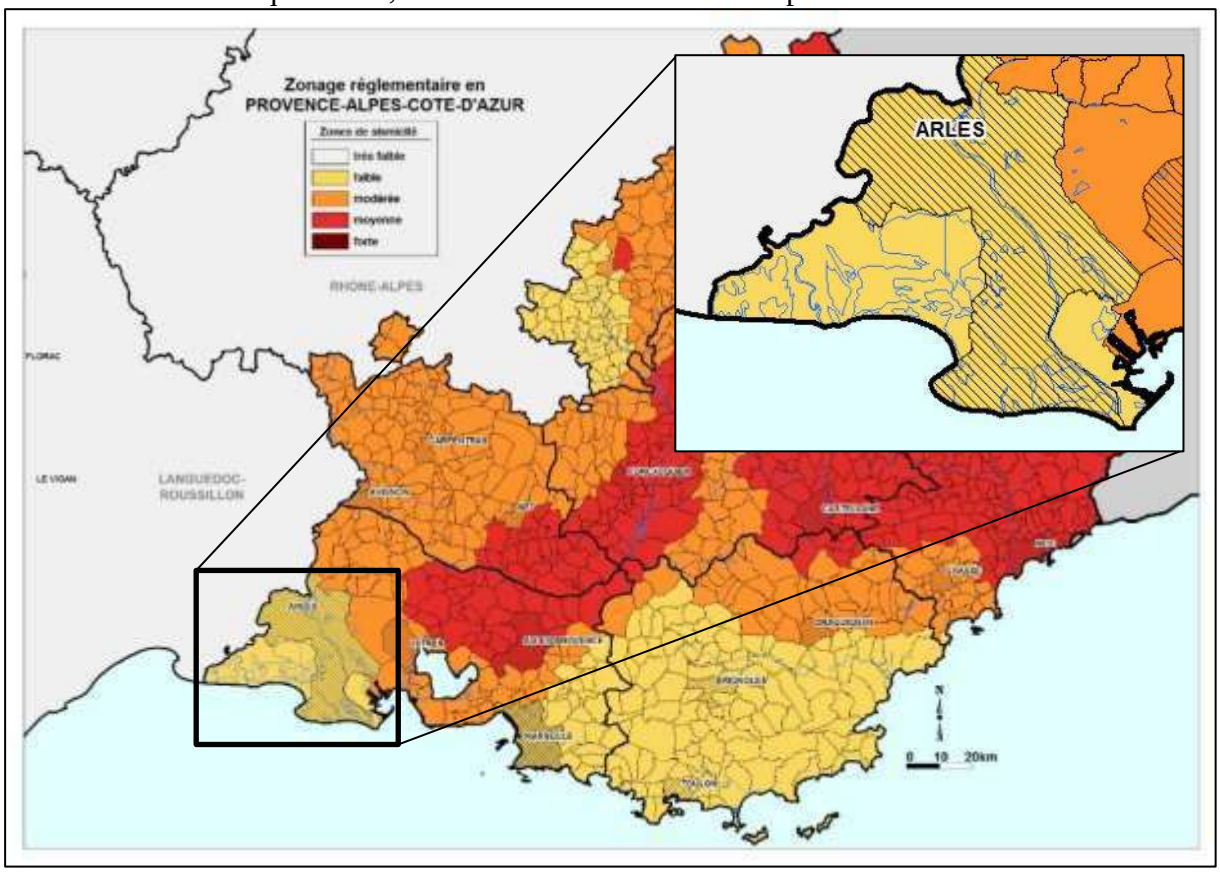


Figure 22. Zonage sismique de la France – Région PACA, zoom sur la Camargue

Pour produire les cartes de risque sismique, le BRGM a étudié les séismes recensés sur les quatre dernières décennies dans la région par les différents réseaux de sismographes : LDG et RéNASS (nationaux) et Sismalp, TGRS et RAP (locaux). La base bibliographique de SisFrance, qui compte environ 6000 séismes ressentis en France au cours du dernier millénaire a également été pris en compte.

Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT FLUVIAL CAMARGUE INSULAIRE

DOCUMENT A

CHAPITRE N°3.3 : DESCRIPTION DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT

SOMMAIRE

1 Identification du cours d'eau 114
2 Identification du système d'endiguement 116
3 Le système d'endiguement et niveau de protection 145
3.1 niveaux de protection, de sûrete et de danger - Définitions 145
3.2 Présentation en Carte 148
3.3 Présentation en Section 149
3.4 Présentation en Profil en long 149
4 Données topographiques 154
4.1 Campagne Flimap 2007 154
4.1.1 Les données projet 154
4.2 Données hydrauliques 154

1 IDENTIFICATION DU COURS D'EAU

Le système d'endiguement fluvial « Camargue insulaire » a pour but de protéger la zone protégée « Camargue insulaire » vis-à-vis des crues du Rhône.

Le Rhône a un bassin versant de 95 500 km².

Figure 1. Bassin versant du Rhône et zone protégée par les ouvrages du SYMADREM

Compte tenu de son étendue, il présente un régime hydrologique singulier et est soumis aux deux influences des climats océaniques et méditerranéens. Les travaux de Maurice Pardé ainsi que l'analyse hydrométéorologique réalisée pour l'étude globale du Rhône (EGR) mettent en évidence quatre types de crues :

- Les crues océaniques : Elles sont dues aux précipitations abondantes sur la partie du bassin versant située au nord de Montélimar. Elles concernent le Rhône alpestre, le Rhône supérieur et la Saône. Les perturbations en provenance de l'Atlantique sont essentiellement actives d'octobre à mars.
- Les crues cévenoles : Elles résultent d'épisodes pluvieux accompagnés d'orages violents qui se produisent sur le pourtour du massif central (Ardèche, Eyrieux, Cèze, Gardon). Ce sont des crues violentes et rapides et concernent une période s'échelonnant de septembre à octobre.
- Les crues méditerranéennes : Elles sont plus tardives que les crues cévenoles, caractérisées par des orages violents localisés sur les Alpes du sud et le couloir rhodanien (Ouvèze, Aygues, Durance).
- Les crues généralisées : Elles sont issues de la combinaison de plusieurs épisodes pluvieux de type océanique et méditerranéen. Elles affectent l'ensemble du bassin versant.

La figure ci-dessous illustre l'origine des différentes crues.

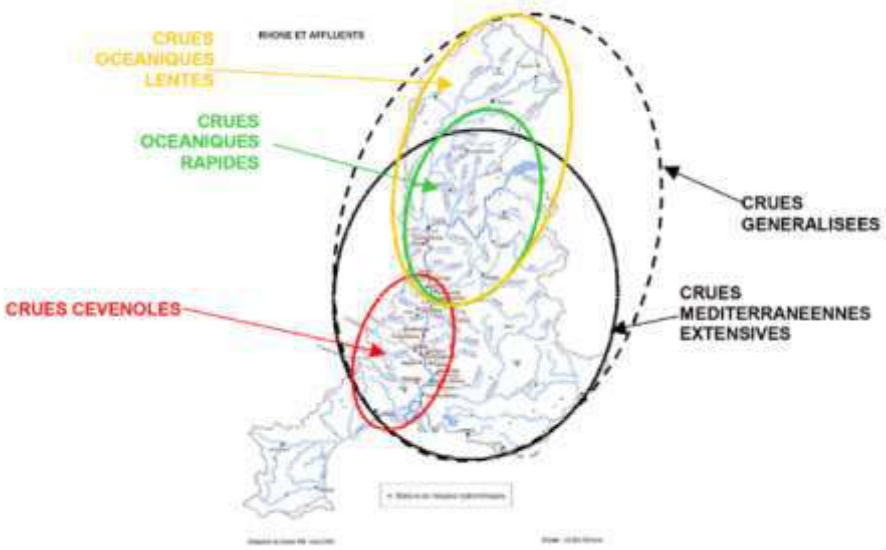


Figure 2. Typologie des crues du Rhône (source DUBAND [02003 10])

La comparaison des limnigrammes et du type de crues permet de voir que les crues ont des déroulements bien différents en fonction de leur l'origine météorologique. Ainsi les crues cévenoles et méditerranéennes sont très brèves, même si l'hydrogramme de la crue de décembre 2003 est épais au regard des autres crues méditerranéennes.

Les crues généralisées ont de leur côté des hydrogrammes plus épais. On notera que depuis 1840, aucune crue océanique n'a généré dans le Delta de crues supérieures à la crue décennale.

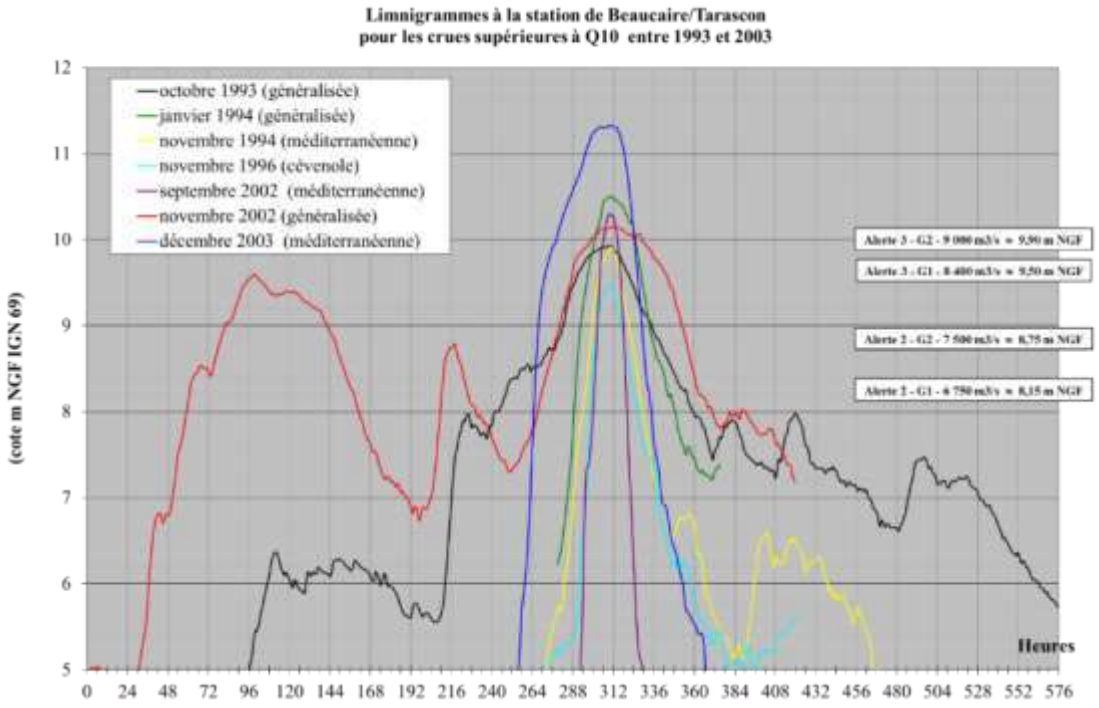


Figure 3. Limnigrammes à la station de Beaucaire/Tarascon (source CNR [K203])

2 IDENTIFICATION DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT

Le système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » représente un linéaire continu de 100km entre l'embouchure du Petit Rhône et celle du Grand Rhône.

L'historique, la nature des ouvrages et les résultats de la modélisation nous a amené a divisé ce système d'endiguement en 33 tronçons répartis autour du delta.

Le système d'endiguement est constitué de digues en terres sur 98% du linéaire et de quais maçonnés sur les 2% restants ; il s'agit du tronçon GRD 1.
Ces digues sont en majorité des ouvrages réalisés au milieu du XIXème siècle mais certains secteurs ont été repris au cours des vingt dernières années, il s'agit de :

- Trinquetaille (PRG 1)
- Bois de Beaumont (PRG 3)
- Albaron (PRG 9)
- Sénebier (PRG 12)
- Le défluent (D 1)
- Les quais d'Arles (GRD 1)
- Les digues en aval du centre-ville (GRD 2 à GRD 5)

Pour les autres tronçons, à l'exception de ceux à l'aval du mas d'Icard (PRG 14 à PRG 19), des travaux de carrossabilité ont été réalisés, en deux phases, afin de faciliter l'intervention en cas de désordre.

Cette protection continue est traversée par différents ouvrages ou réseaux qui sont représentés sur les cartes suivantes.
La liste des 211 traversées est disponible au Chapitre 1 et, par tronçon, au Chapitre 5.1.

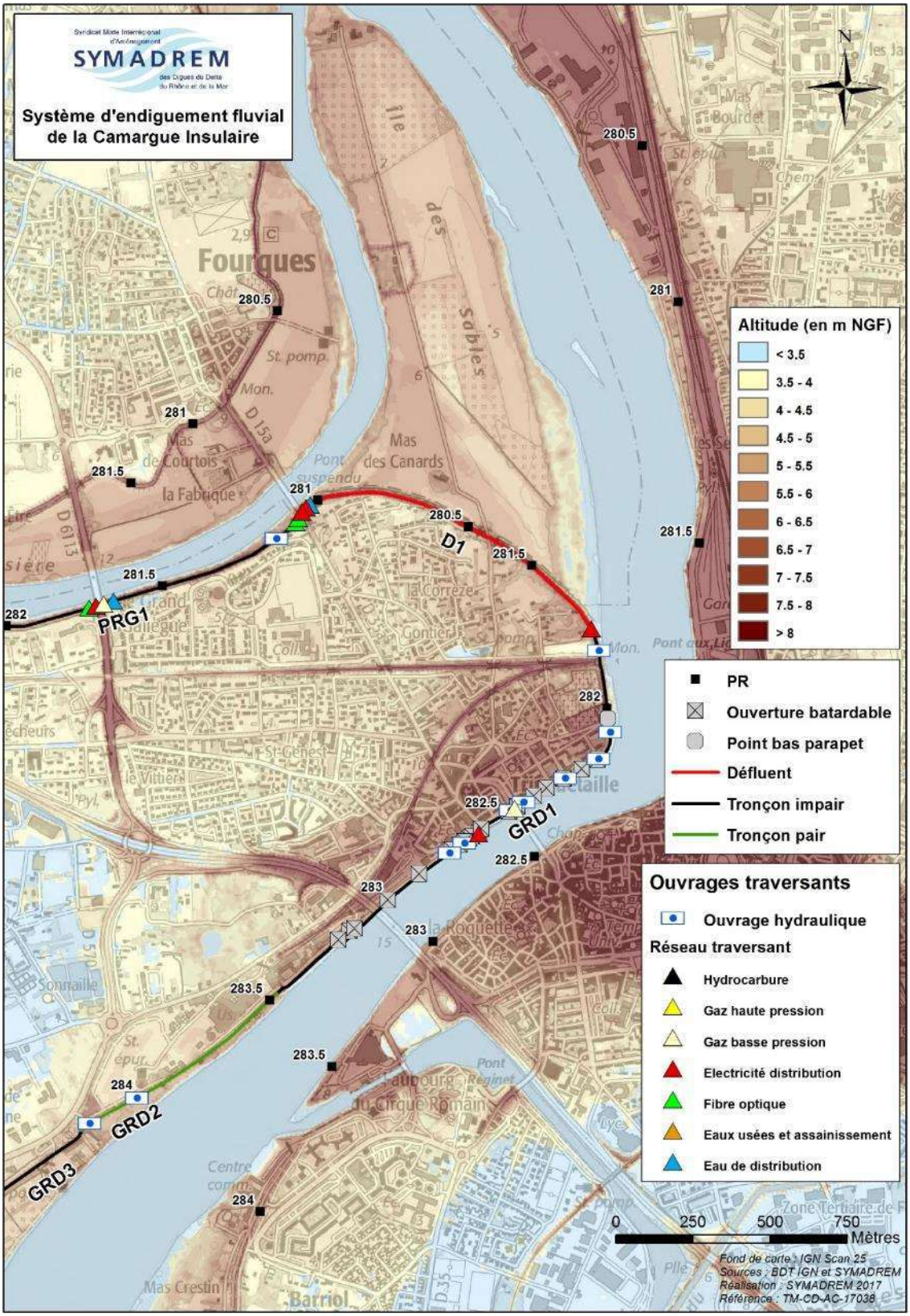


Figure 4. Localisation des tronçons D1, GRD1 et GRD2

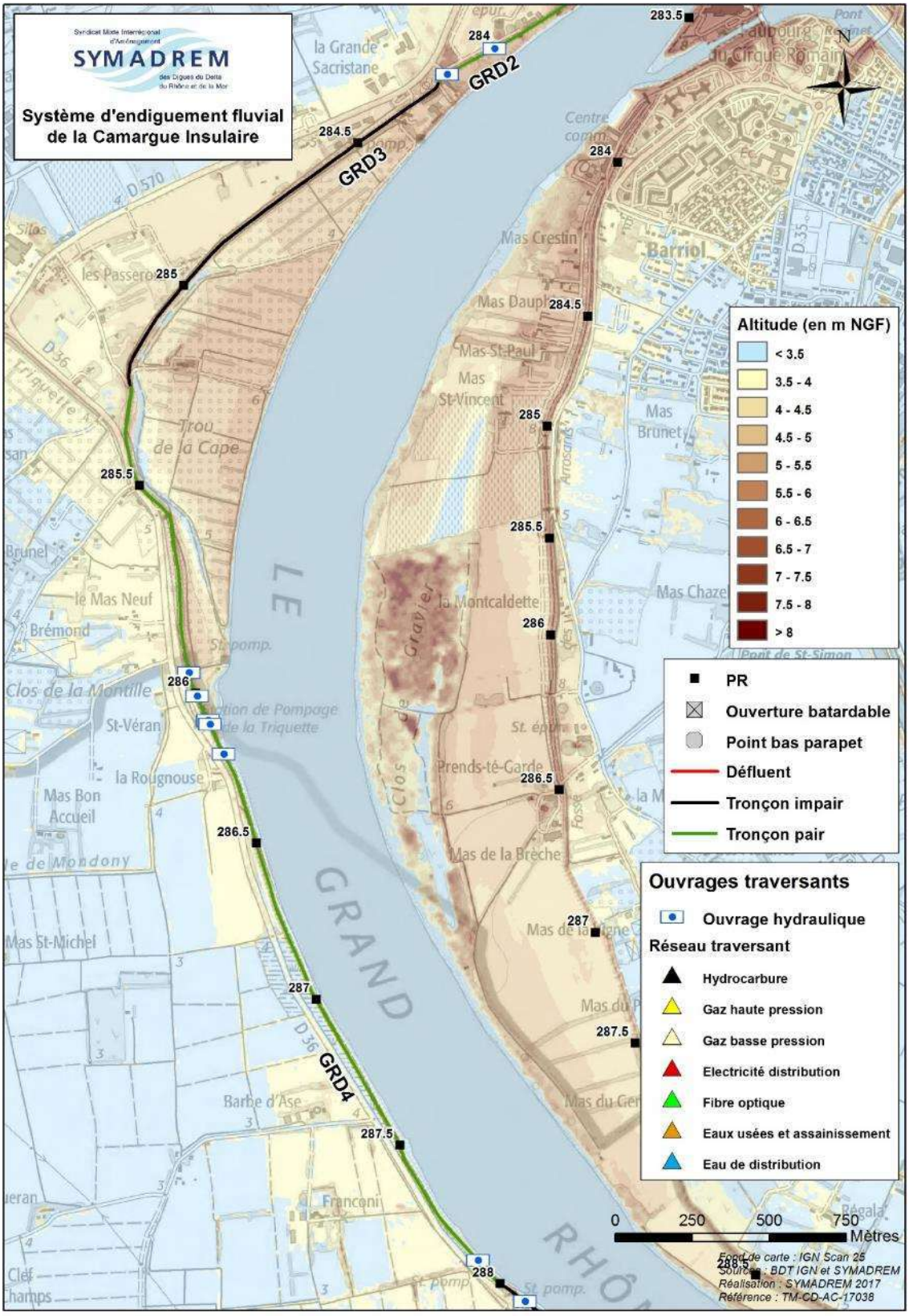


Figure 5. Localisation des tronçons GRD3 et GRD4

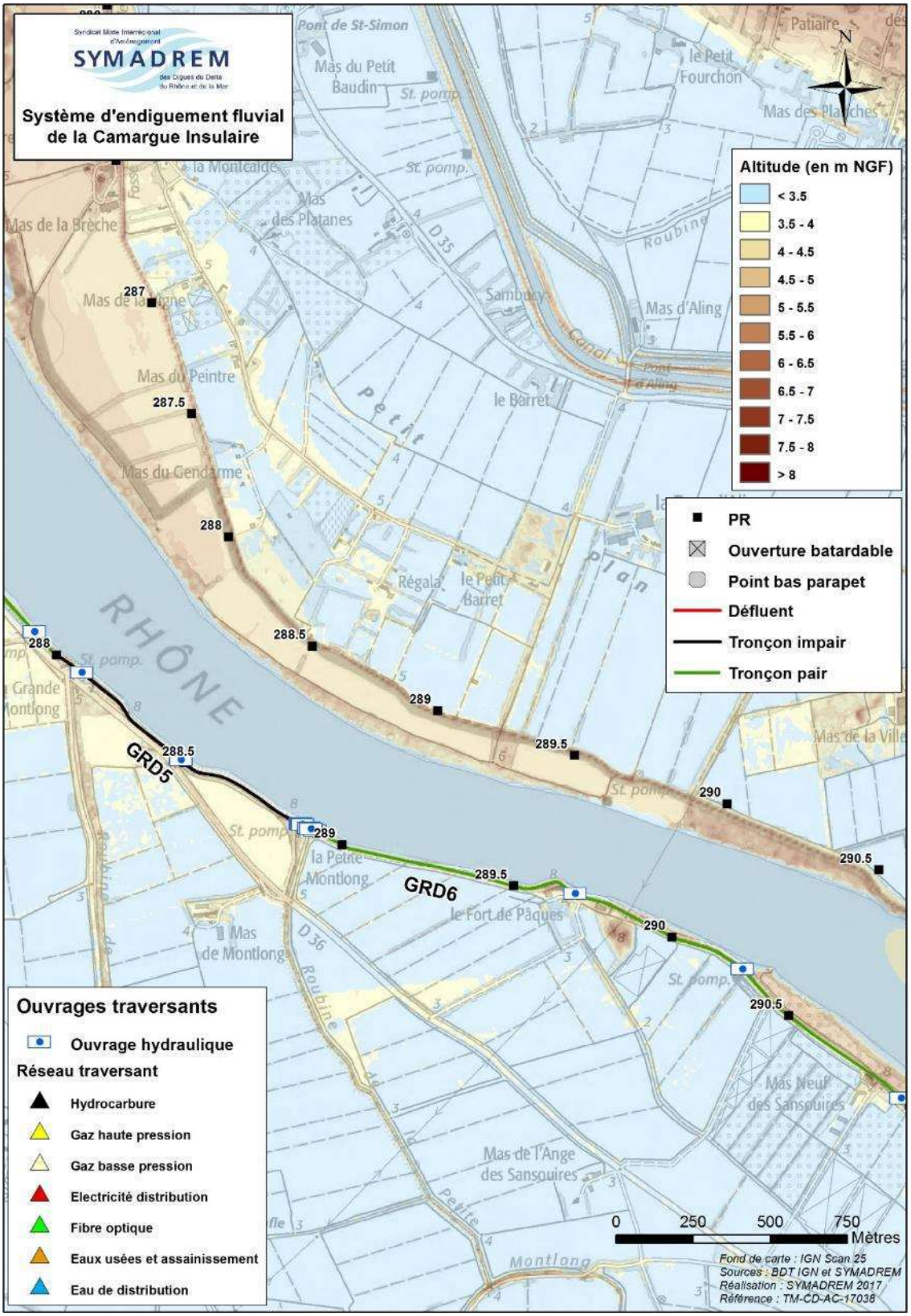


Figure 6. Localisation des tronçons GRD5 et GRD6

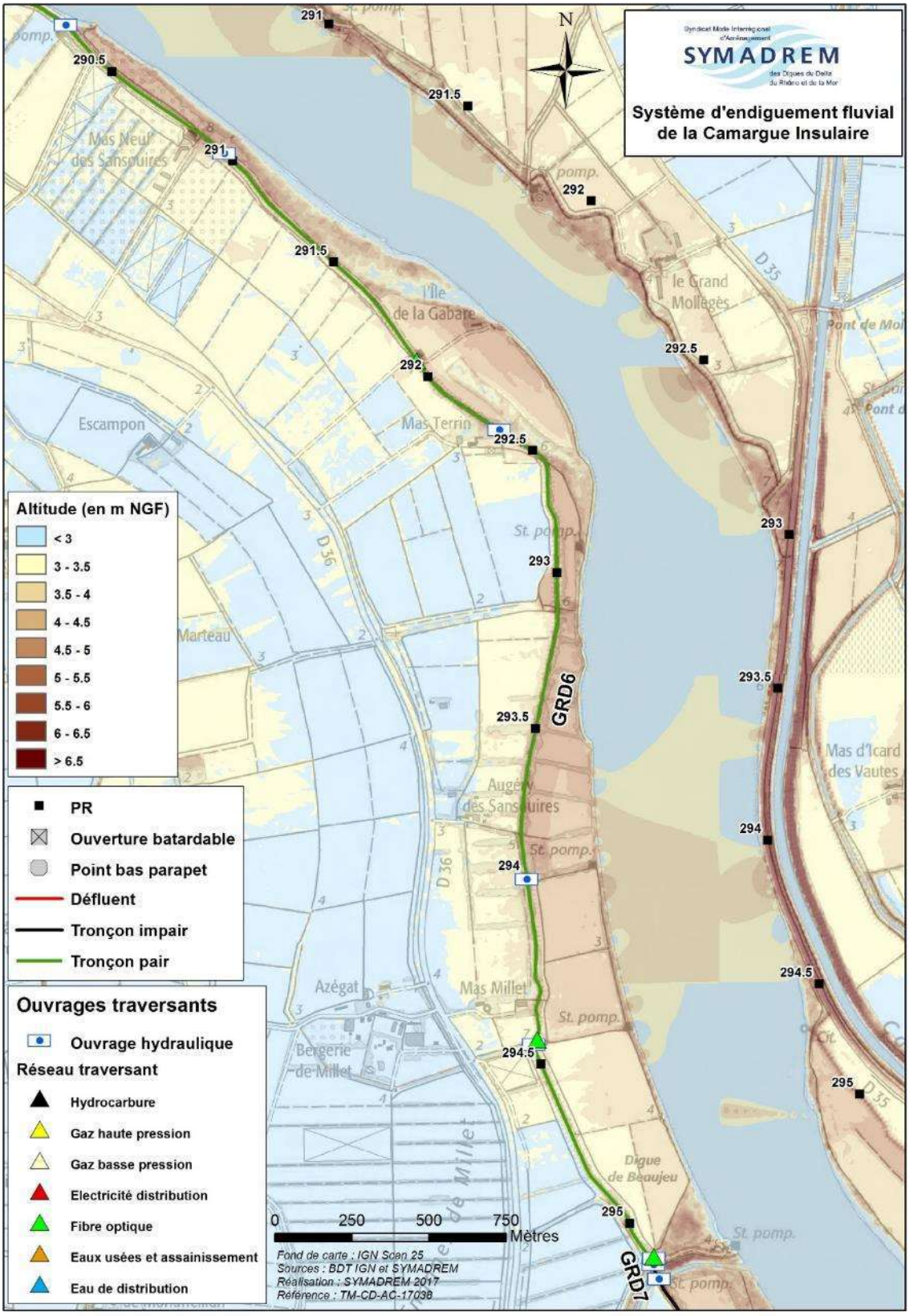


Figure 7. Localisation du tronçon GRD6

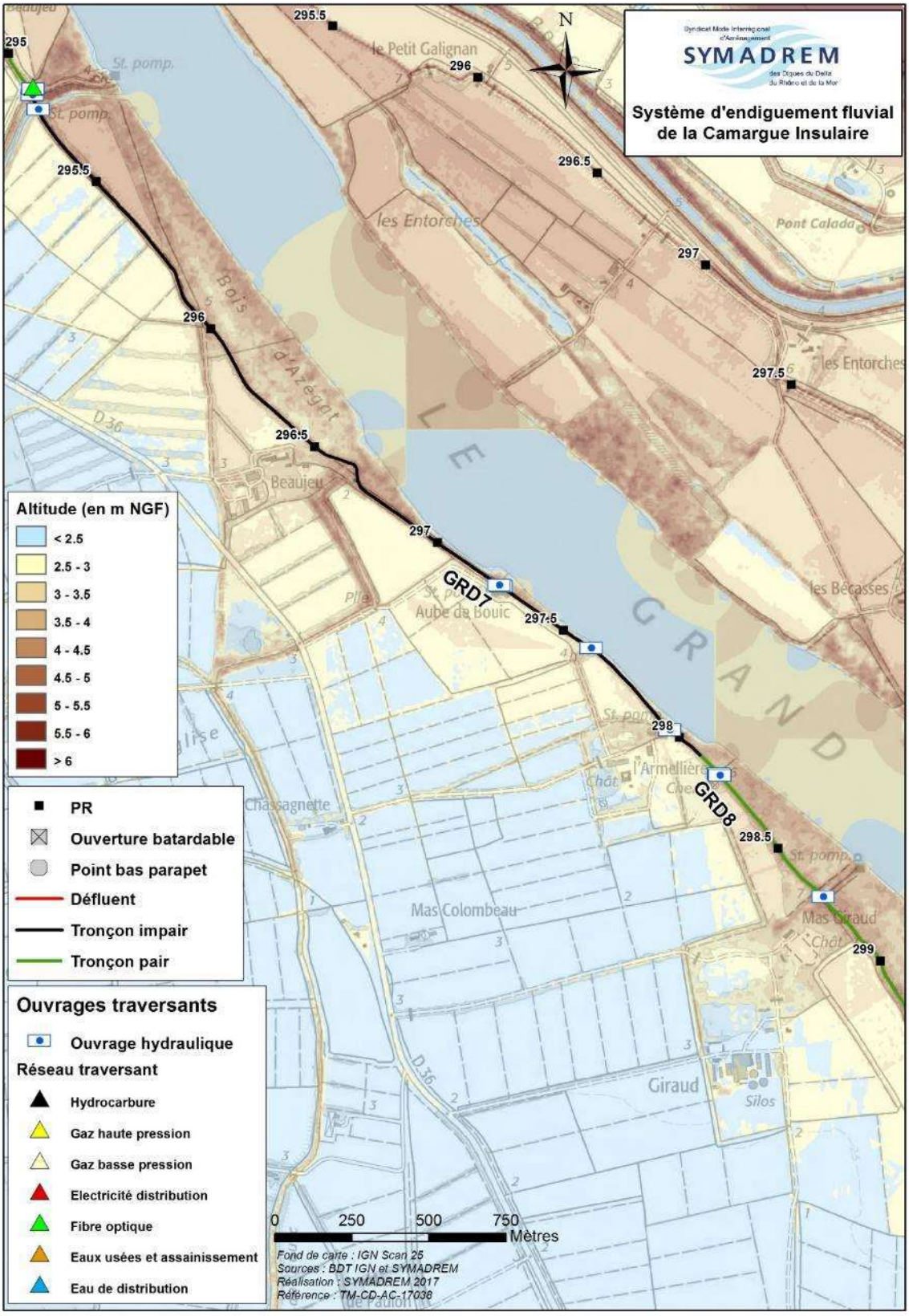


Figure 8. Localisation du tronçon GRD7

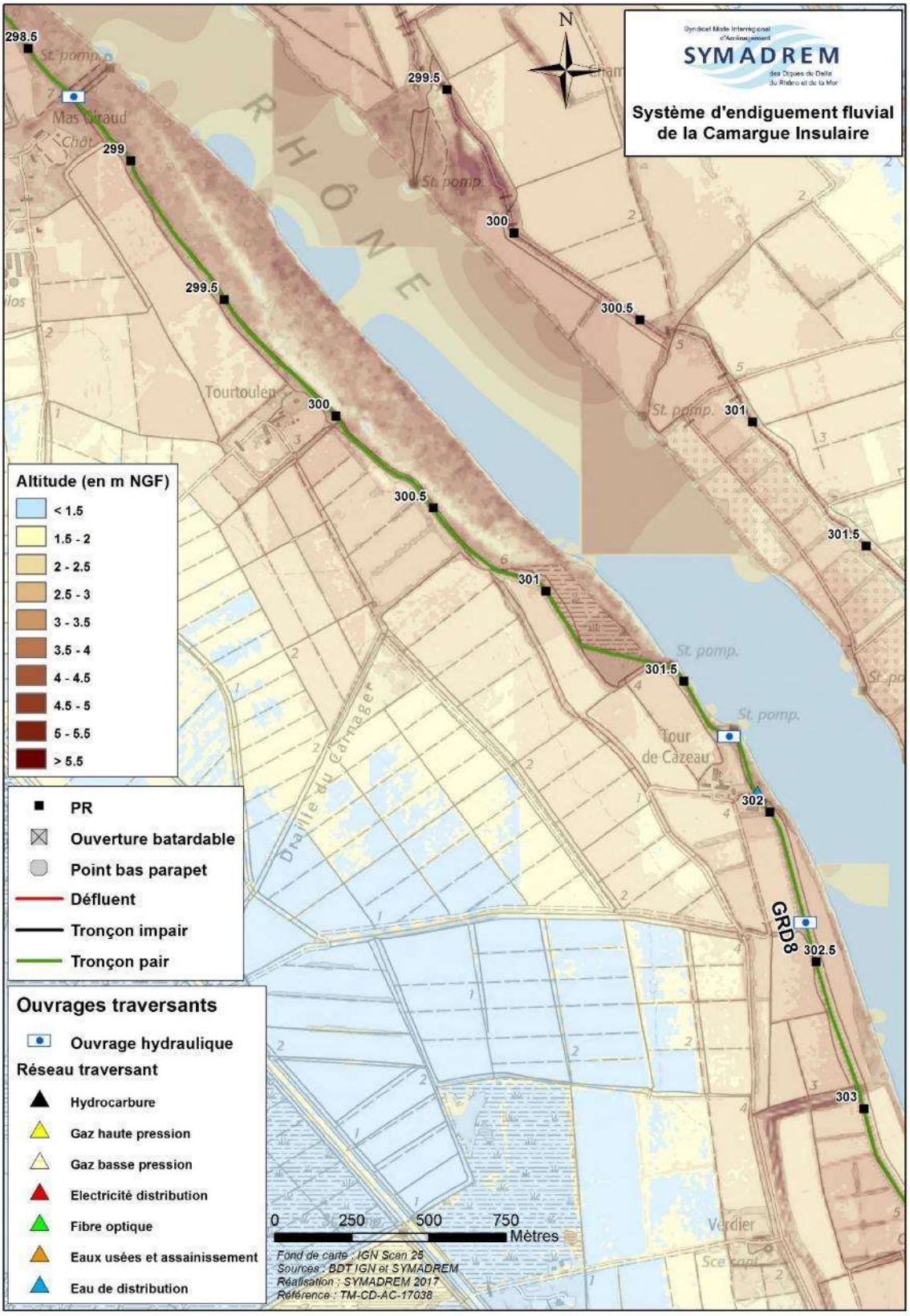


Figure 9. Localisation du tronçon GRD8

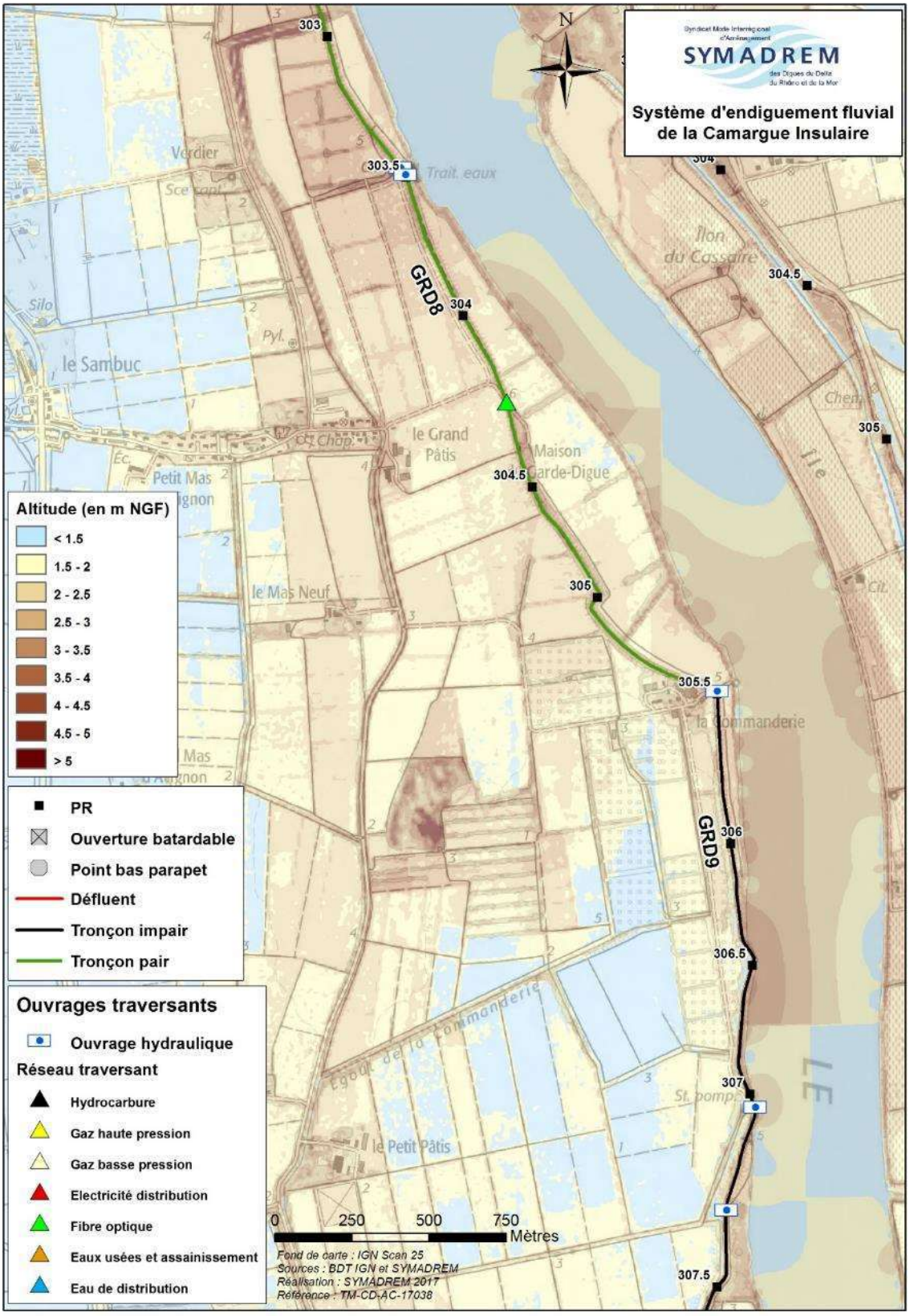


Figure 10. Localisation des tronçons GRD8 et GRD9

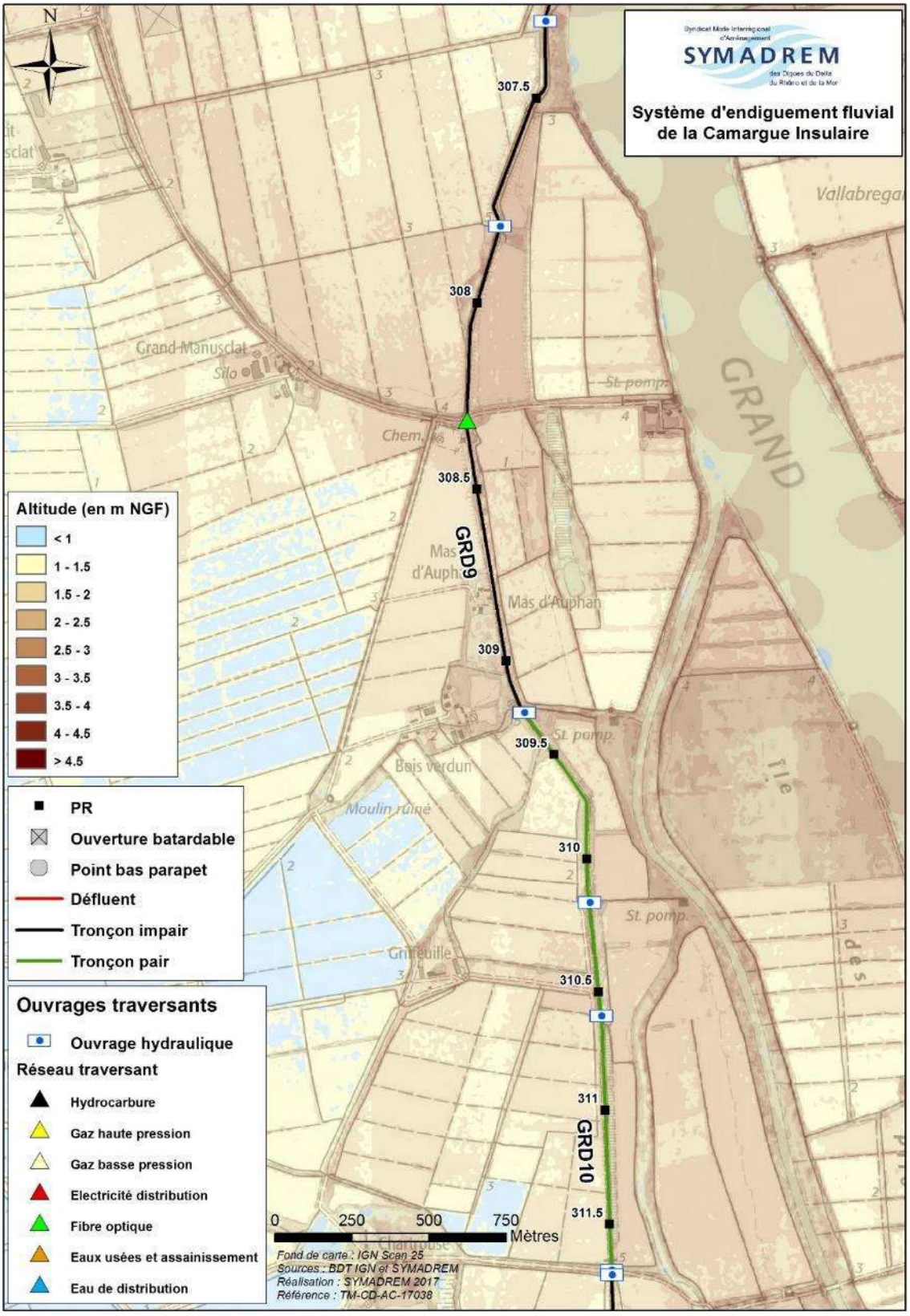


Figure 11. Localisation des tronçons GRD9 et GRD10

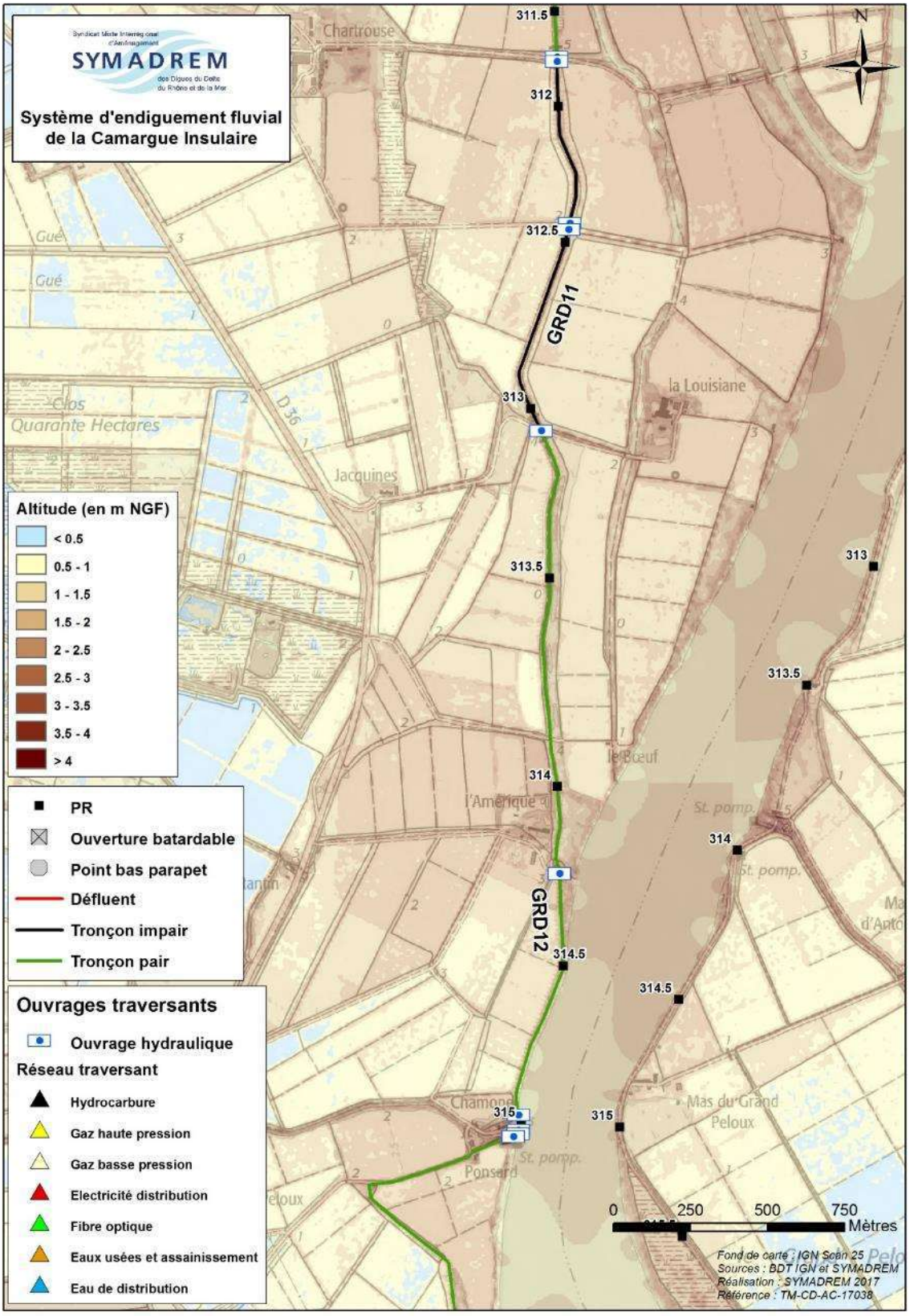


Figure 12. Localisation des tronçons GRD11 et GRD12

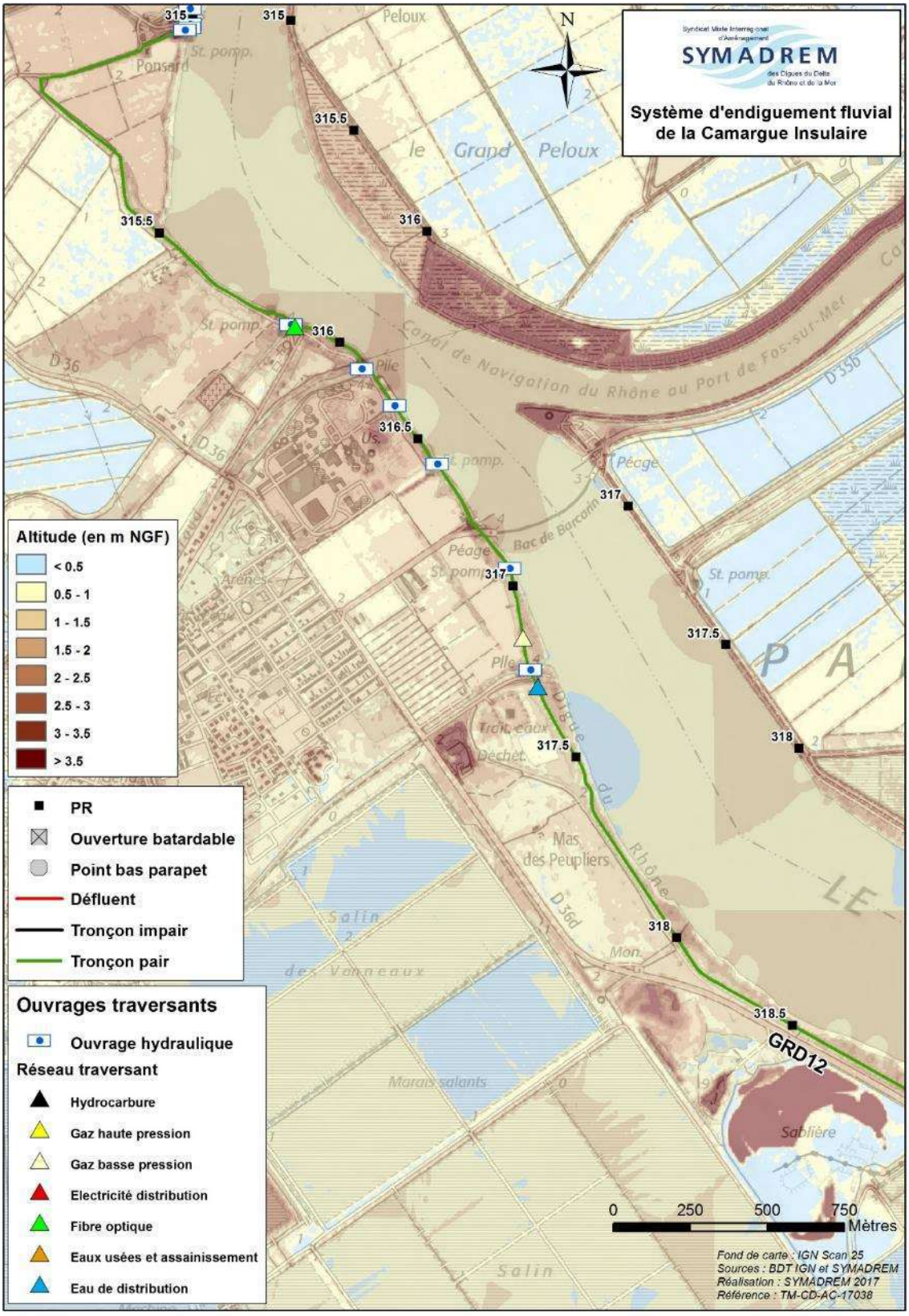


Figure 13. Localisation du tronçon GRD12

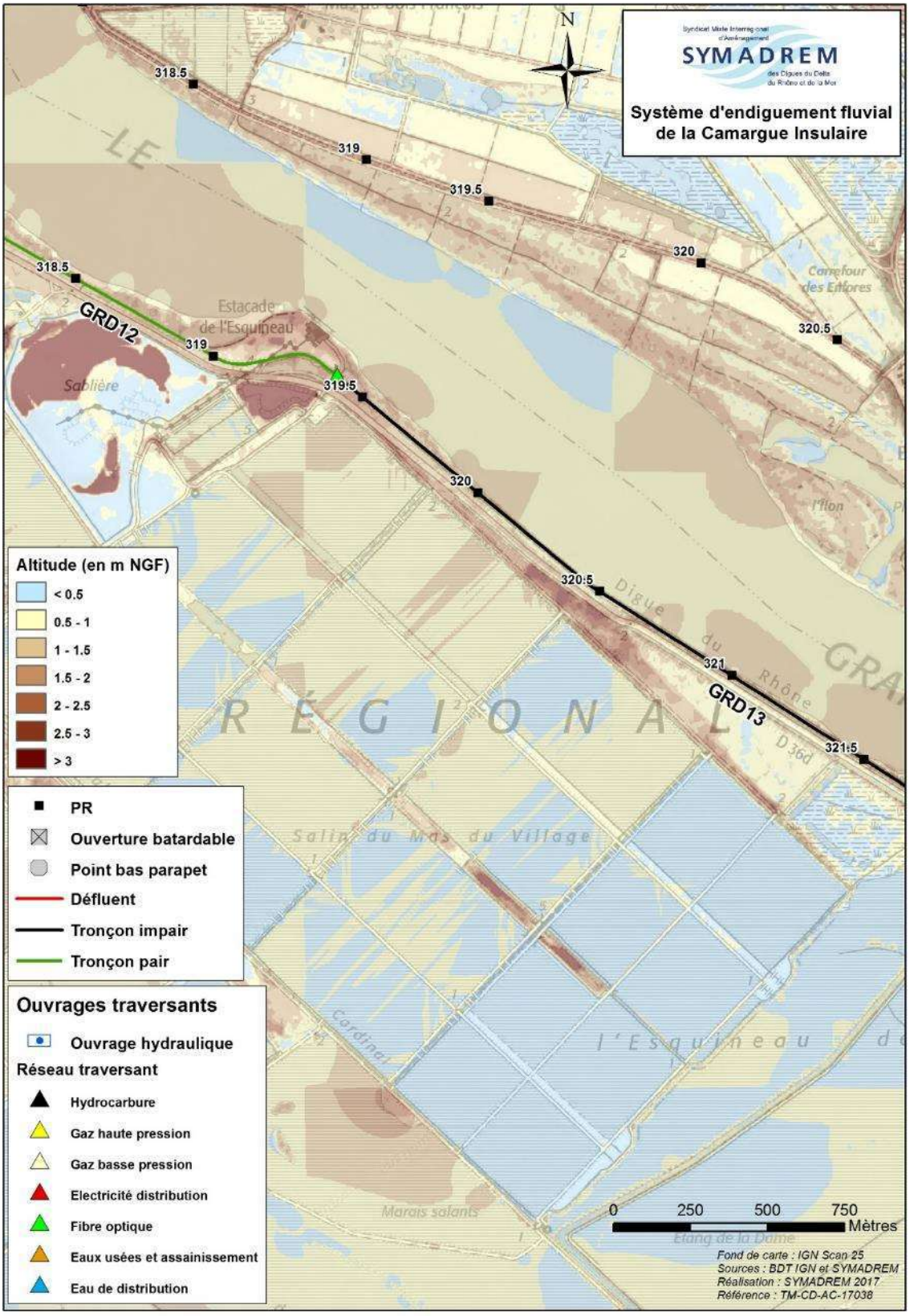


Figure 14. Localisation des tronçons GRD12 et GRD13

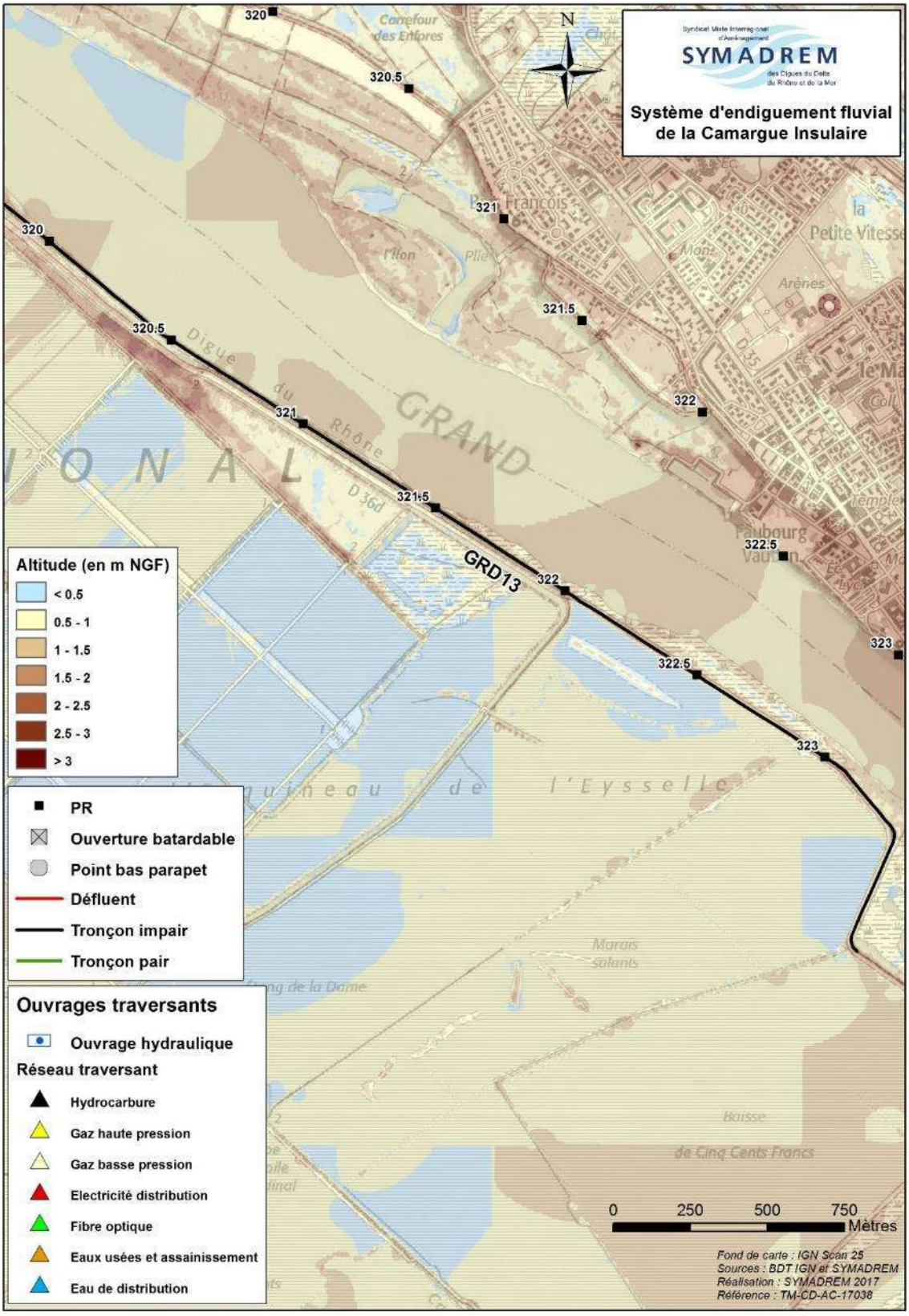


Figure 15. Localisation du tronçon GRD13

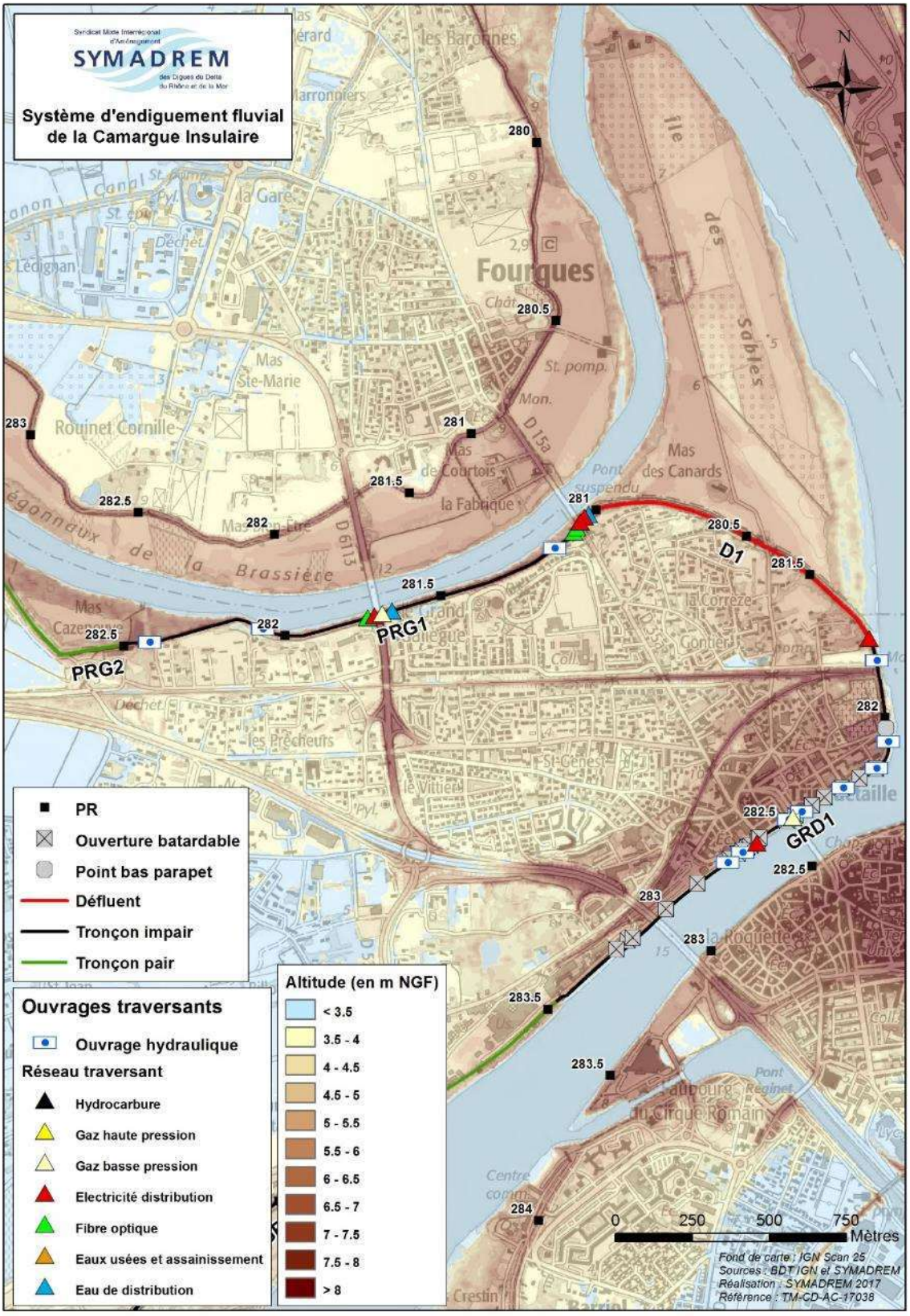


Figure 16. Localisation des tronçons D1 et PRG1

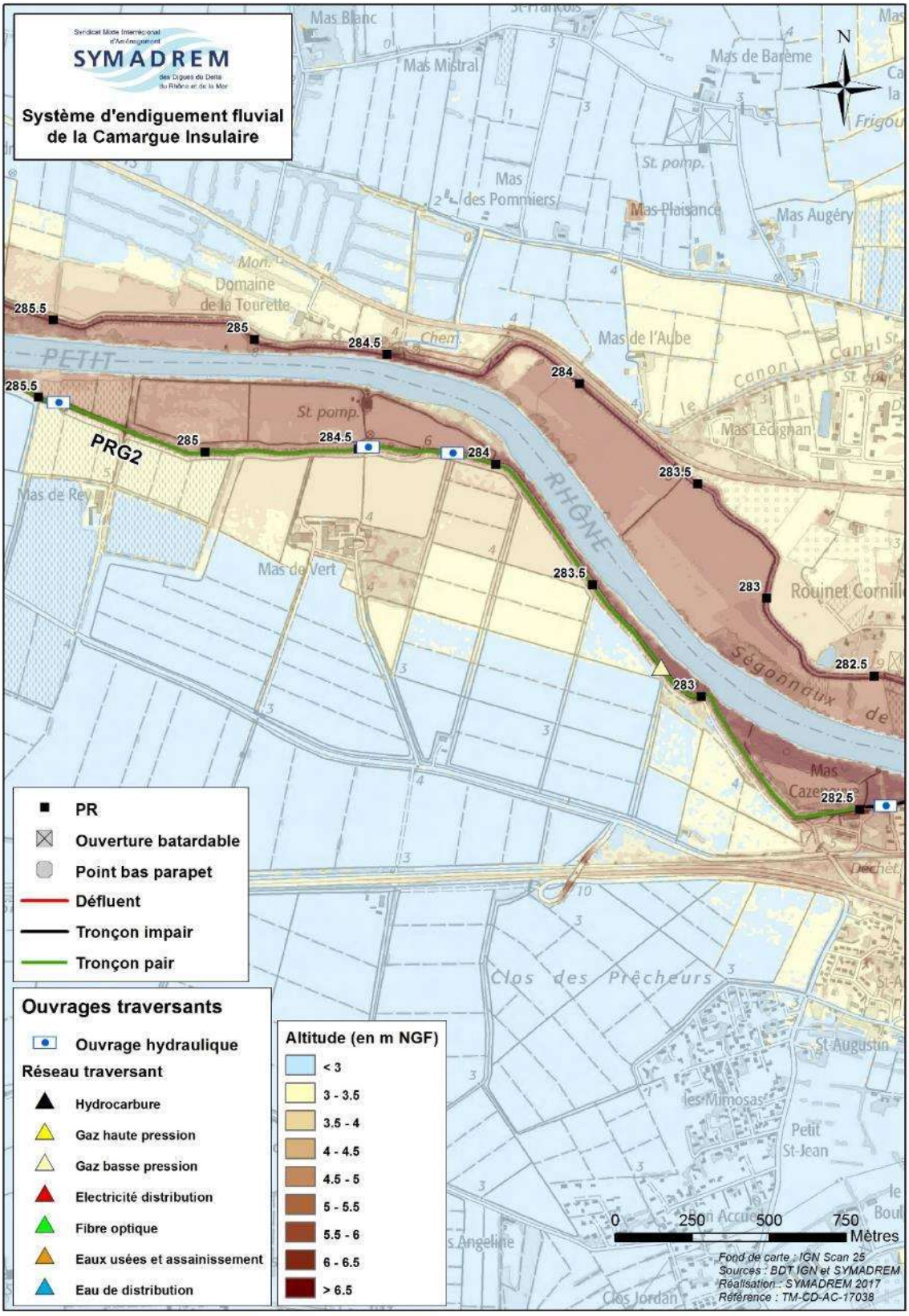


Figure 17. Localisation du tronçon PRG2

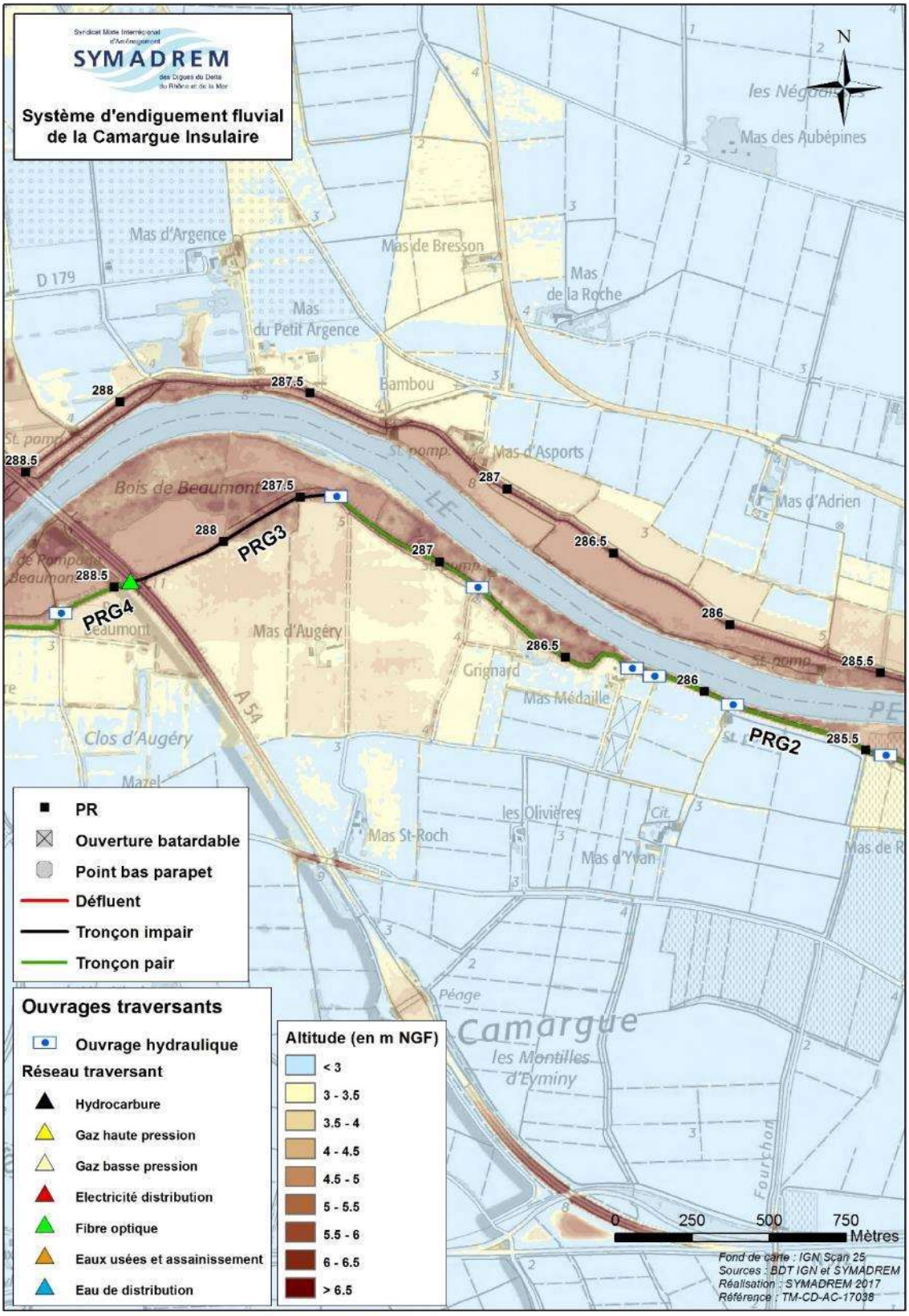


Figure 18. Localisation des tronçons PRG2 et PRG3

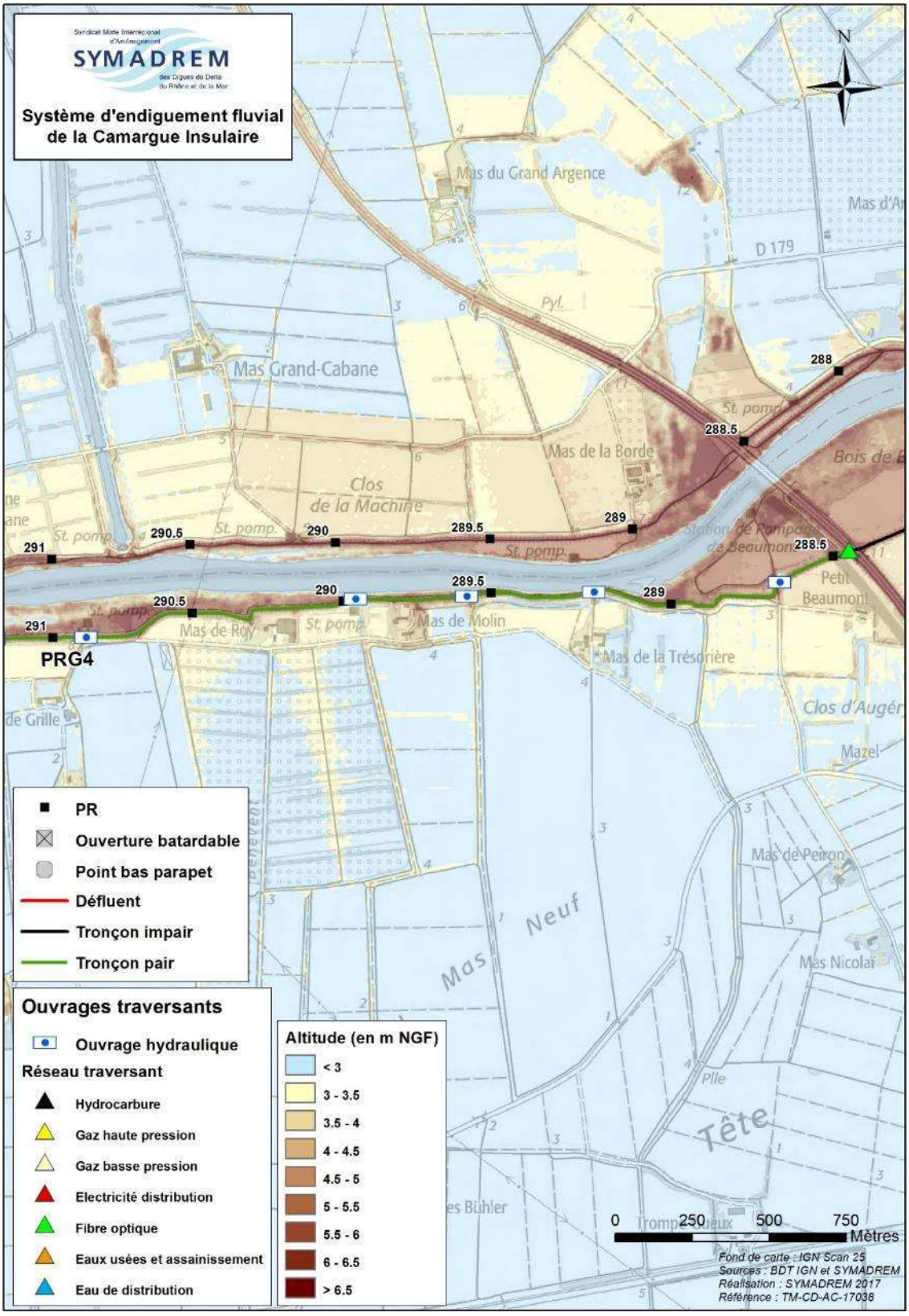


Figure 19. Localisation du tronçon PRG4

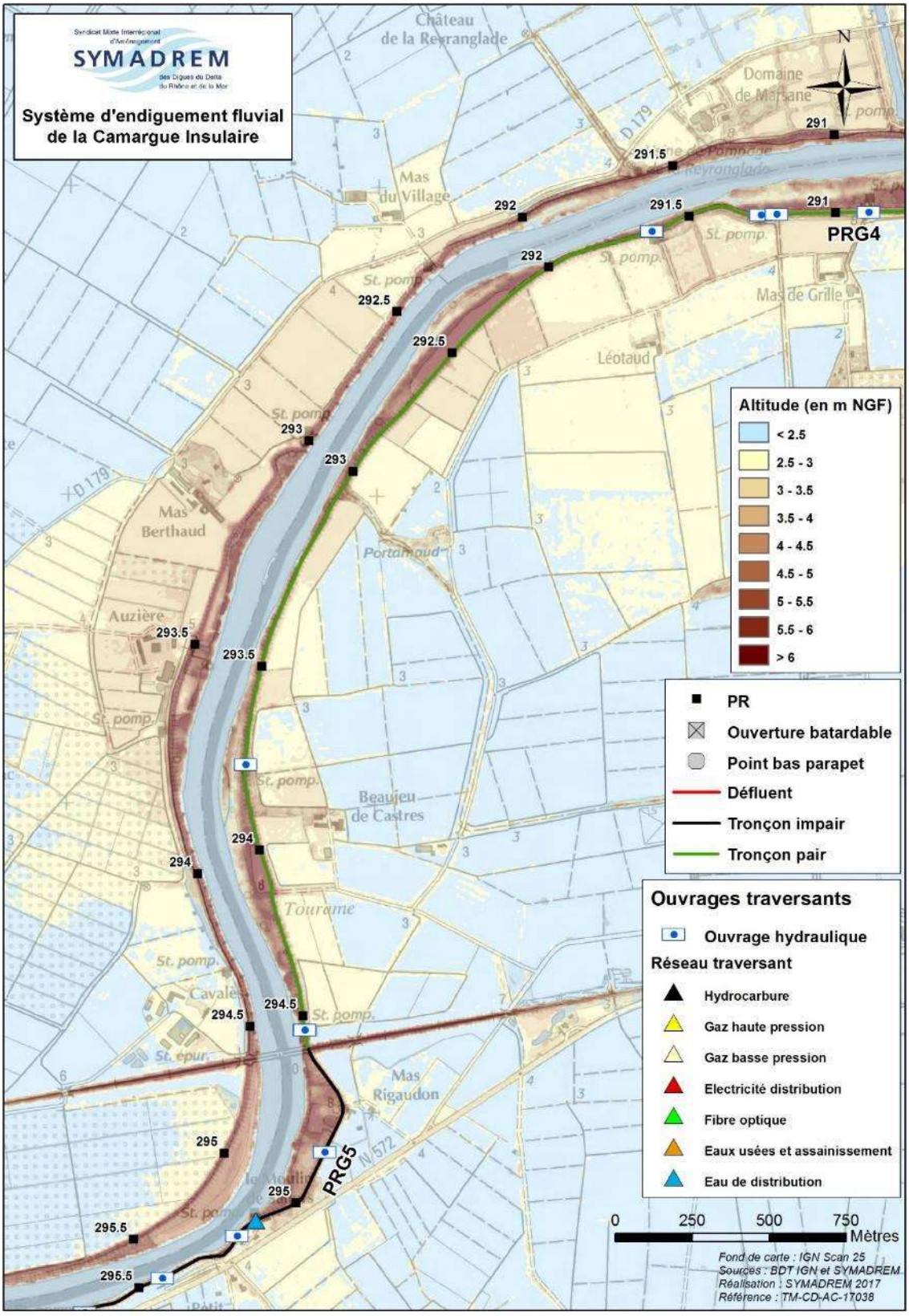


Figure 20. Localisation des tronçons PRG4 et PRG5

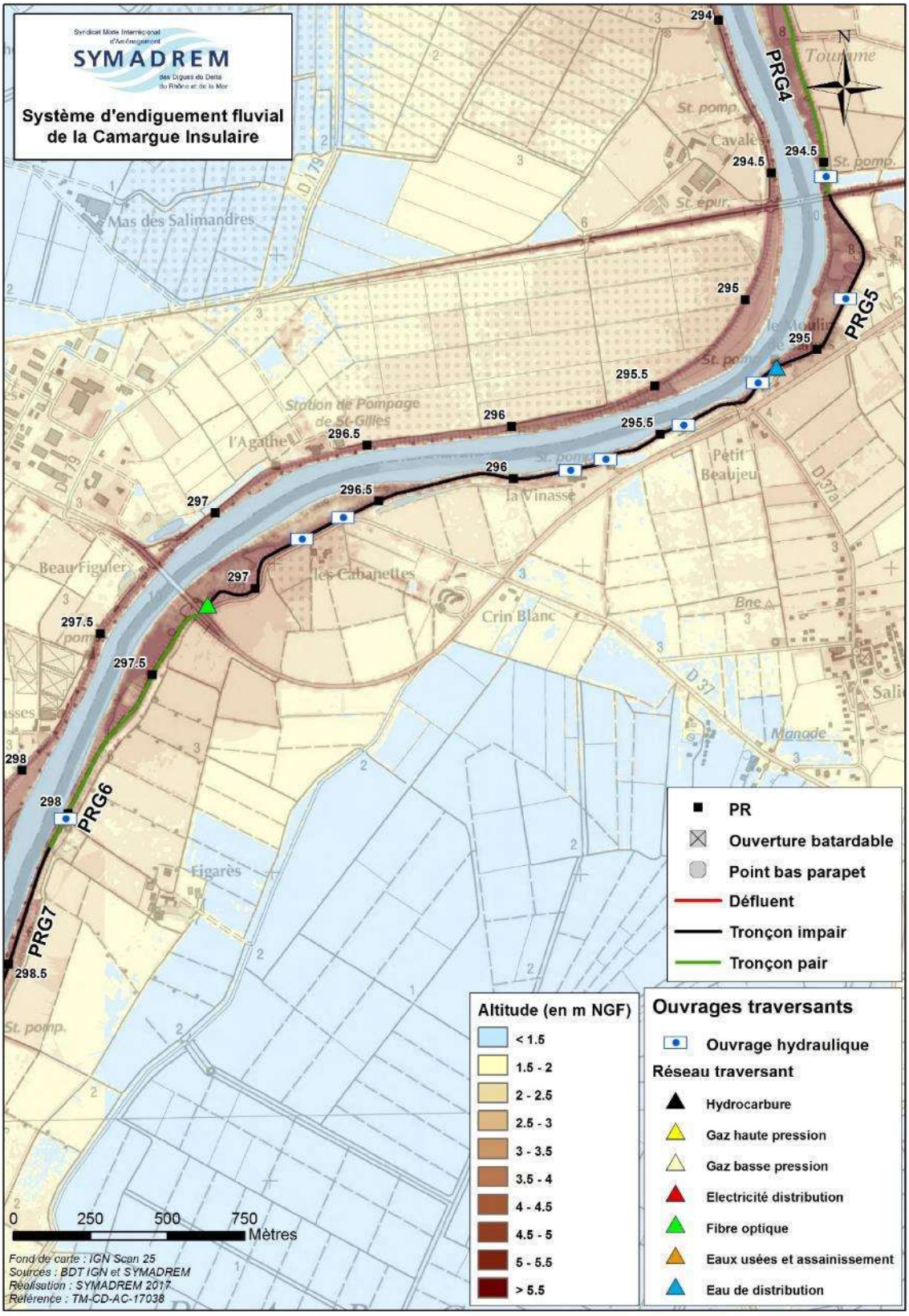


Figure 21. Localisation des tronçons PRG5 et PRG6

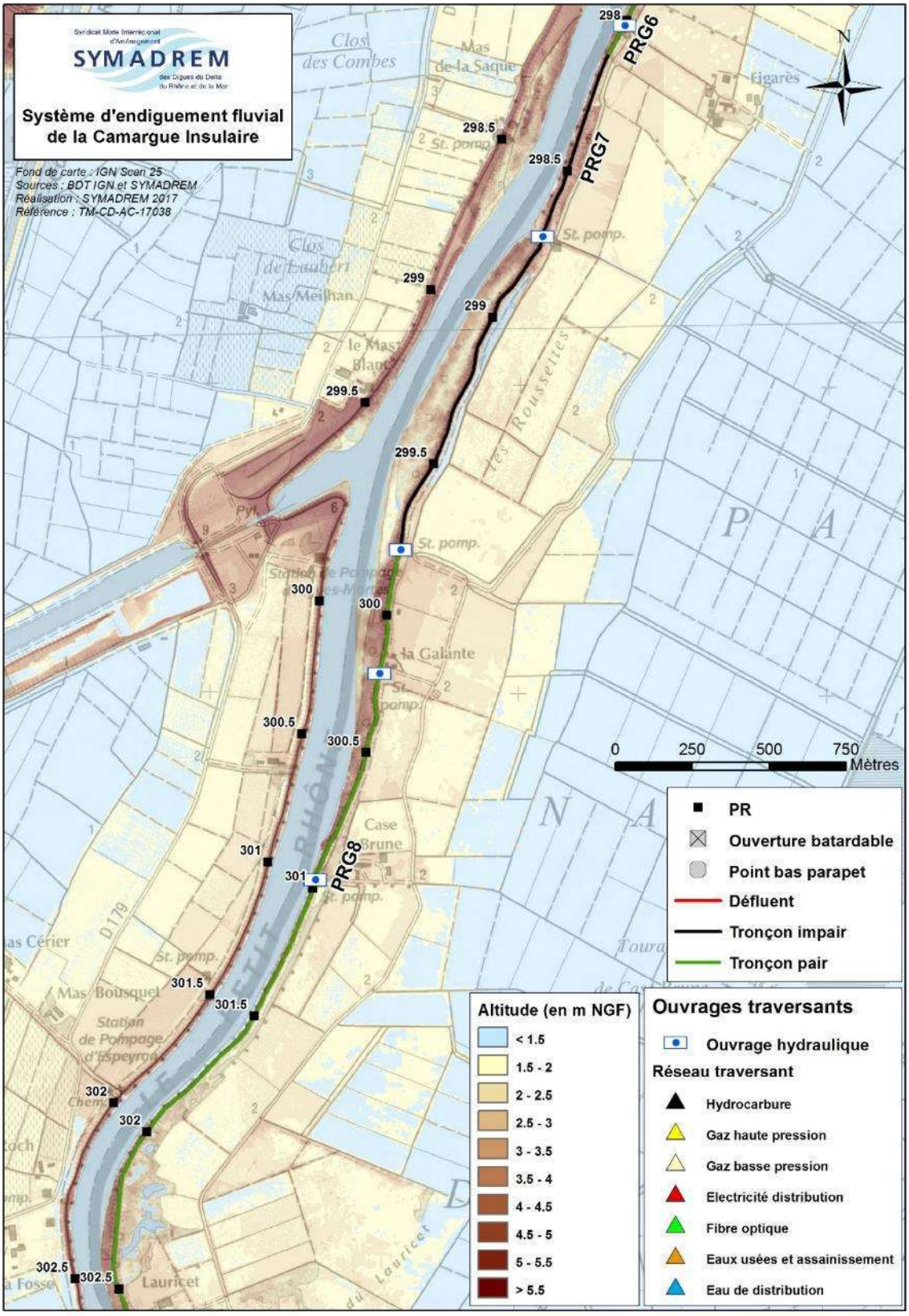


Figure 22. Localisation des tronçons PRG7 et PRG8

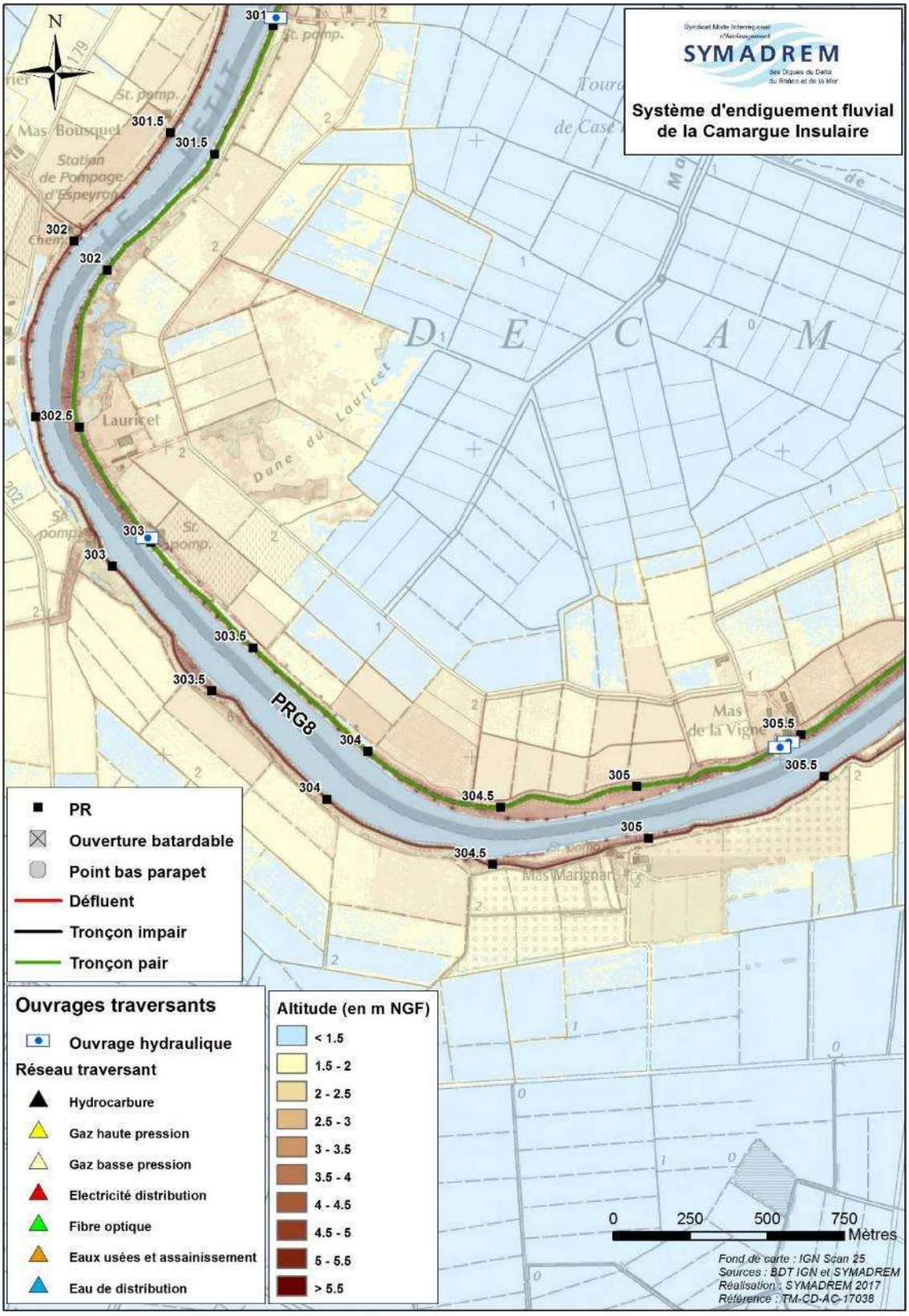


Figure 23. Localisation du tronçon PRG8

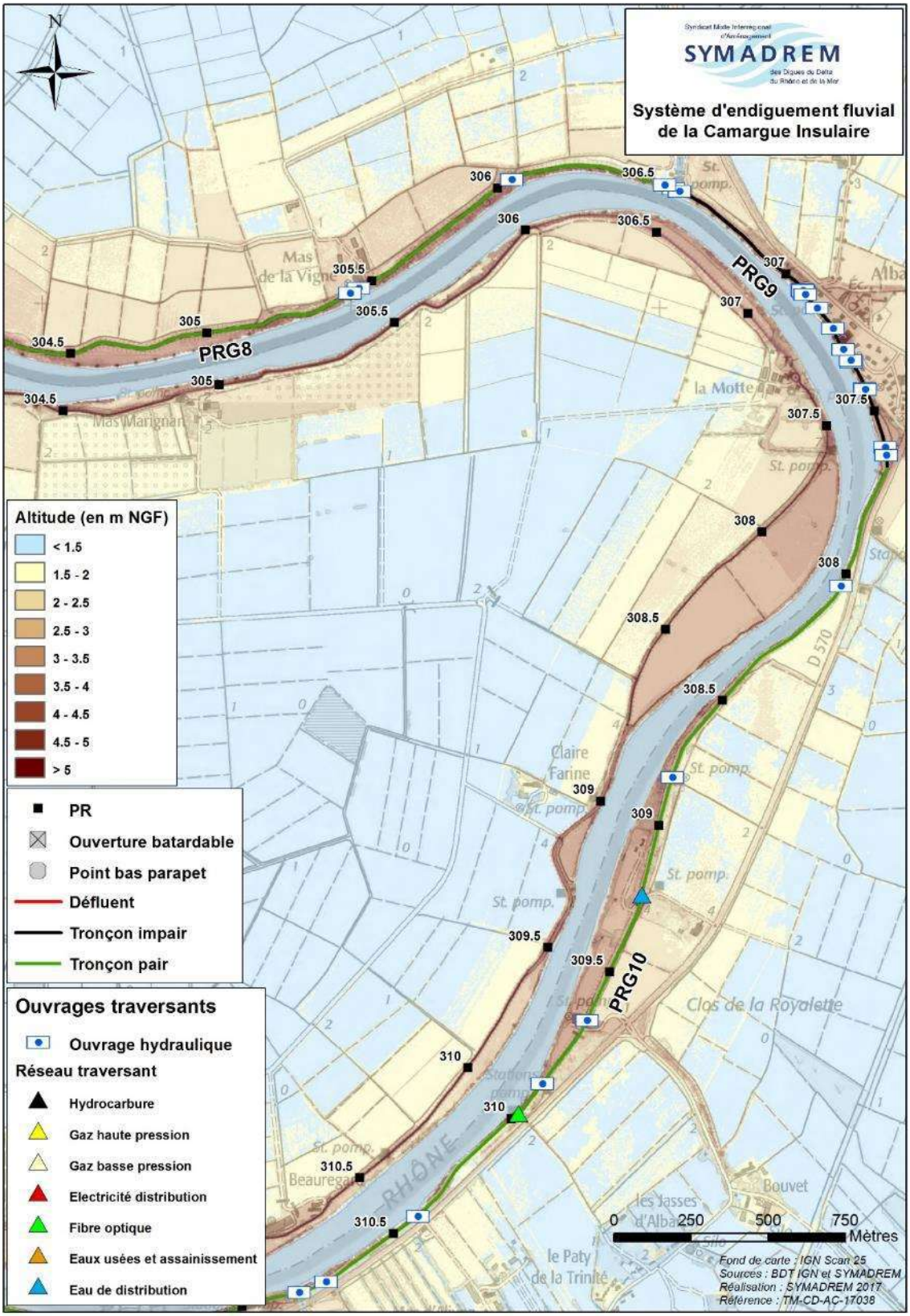


Figure 24. Localisation des tronçons PRG8 à PRG10

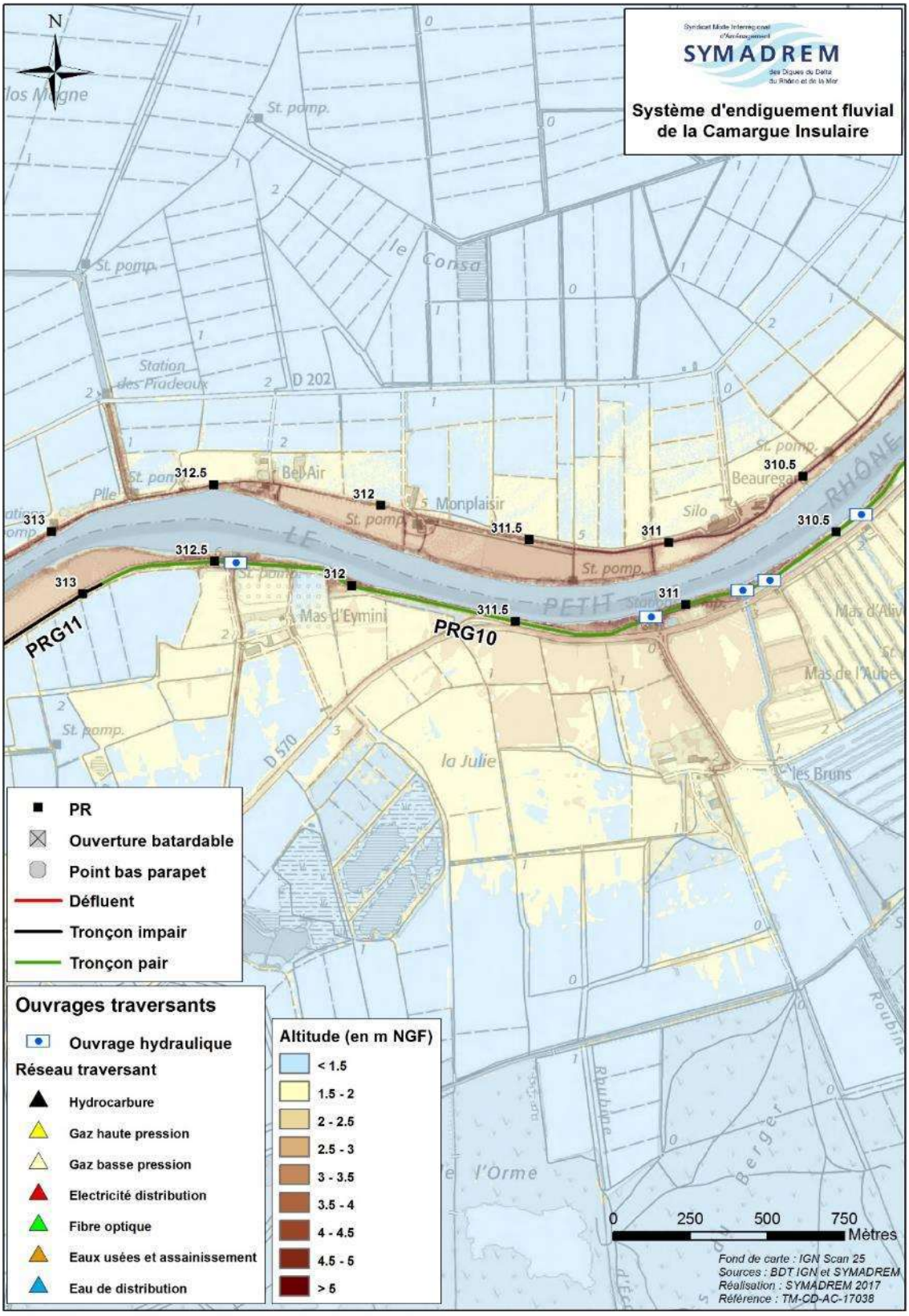


Figure 25. Localisation du tronçon PRG10

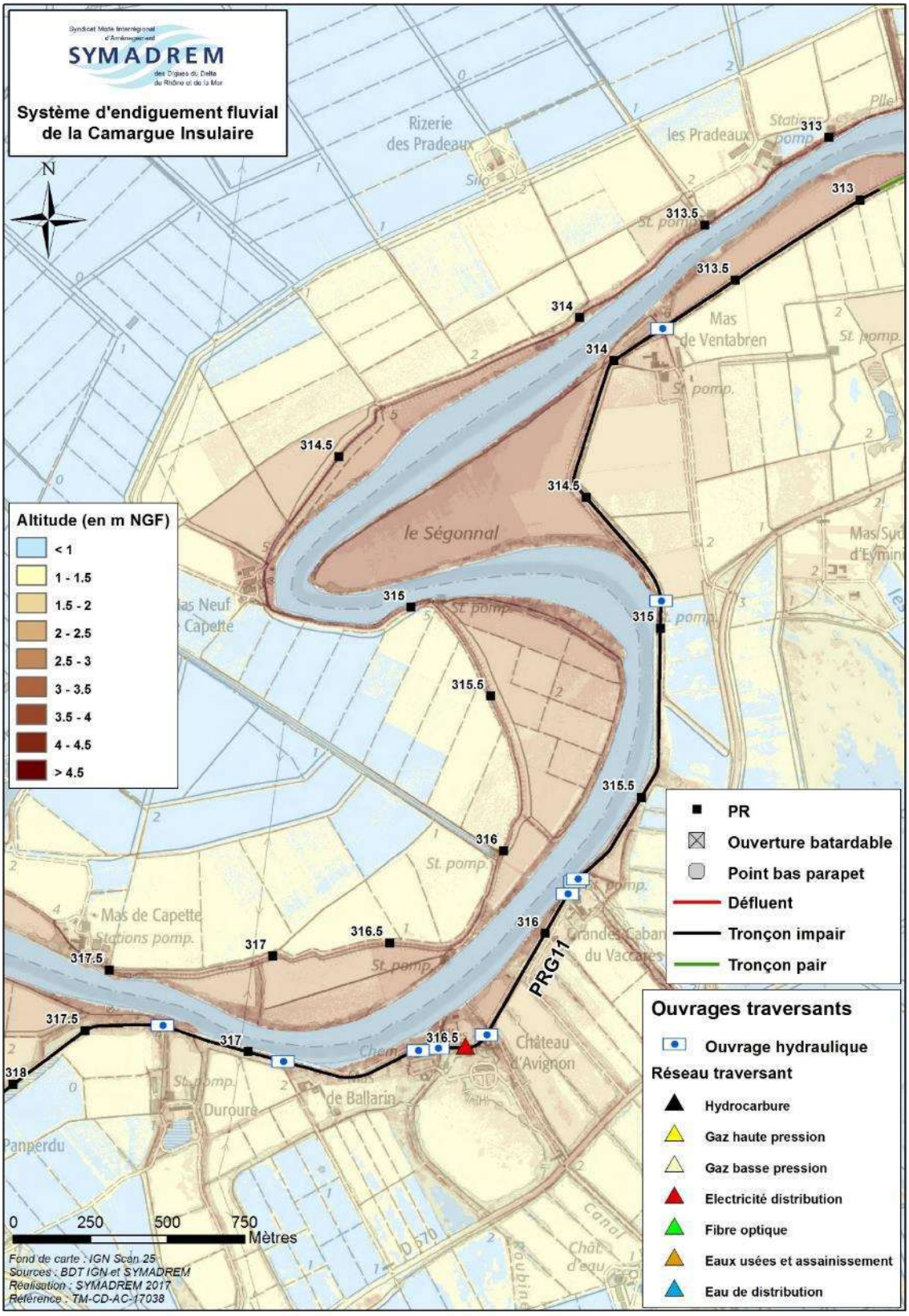


Figure 26. Localisation du tronçon PRG11

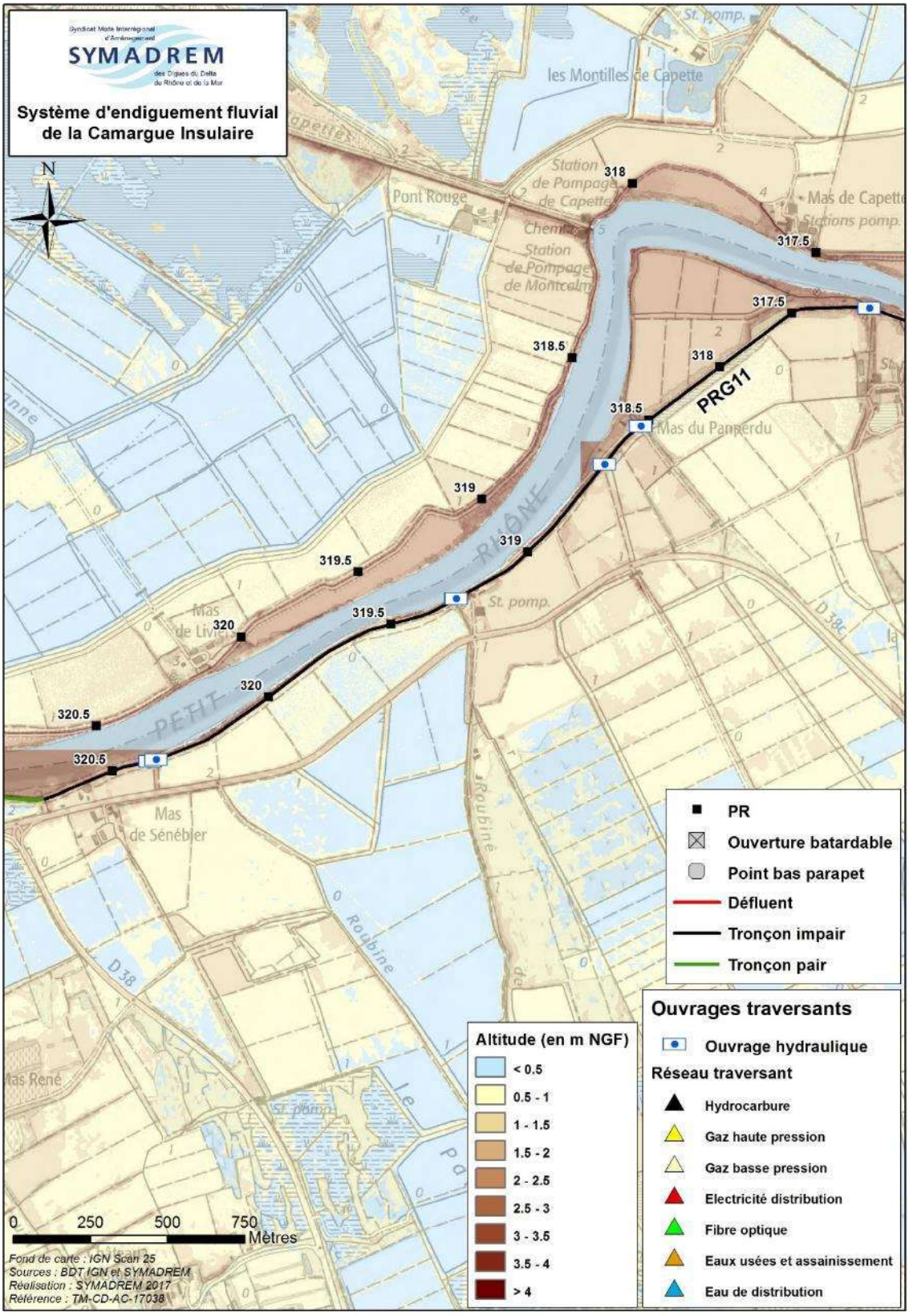


Figure 27. Localisation du tronçon PRG11 (suite)

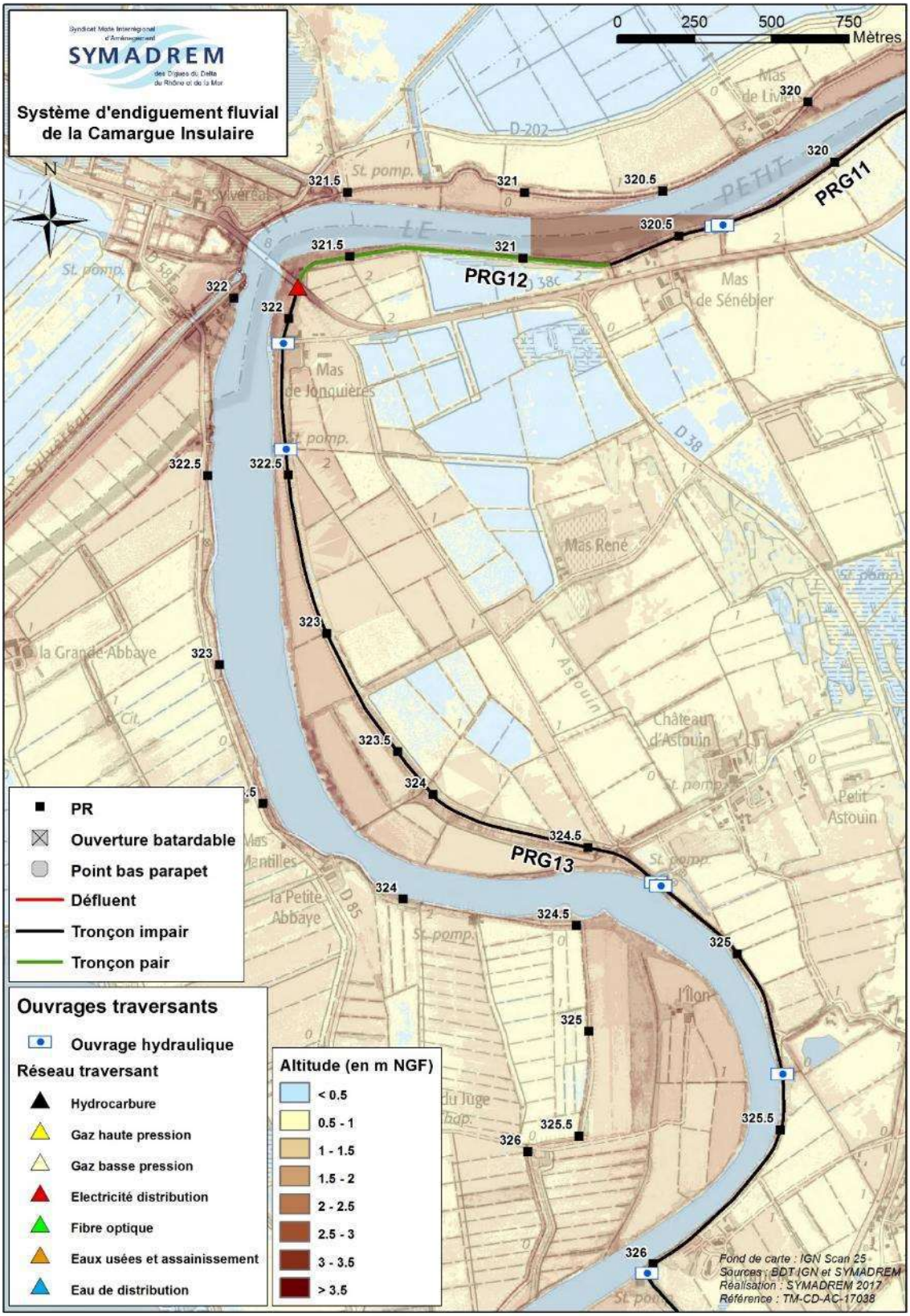


Figure 28. Localisation des tronçons PRG12 et PRG13

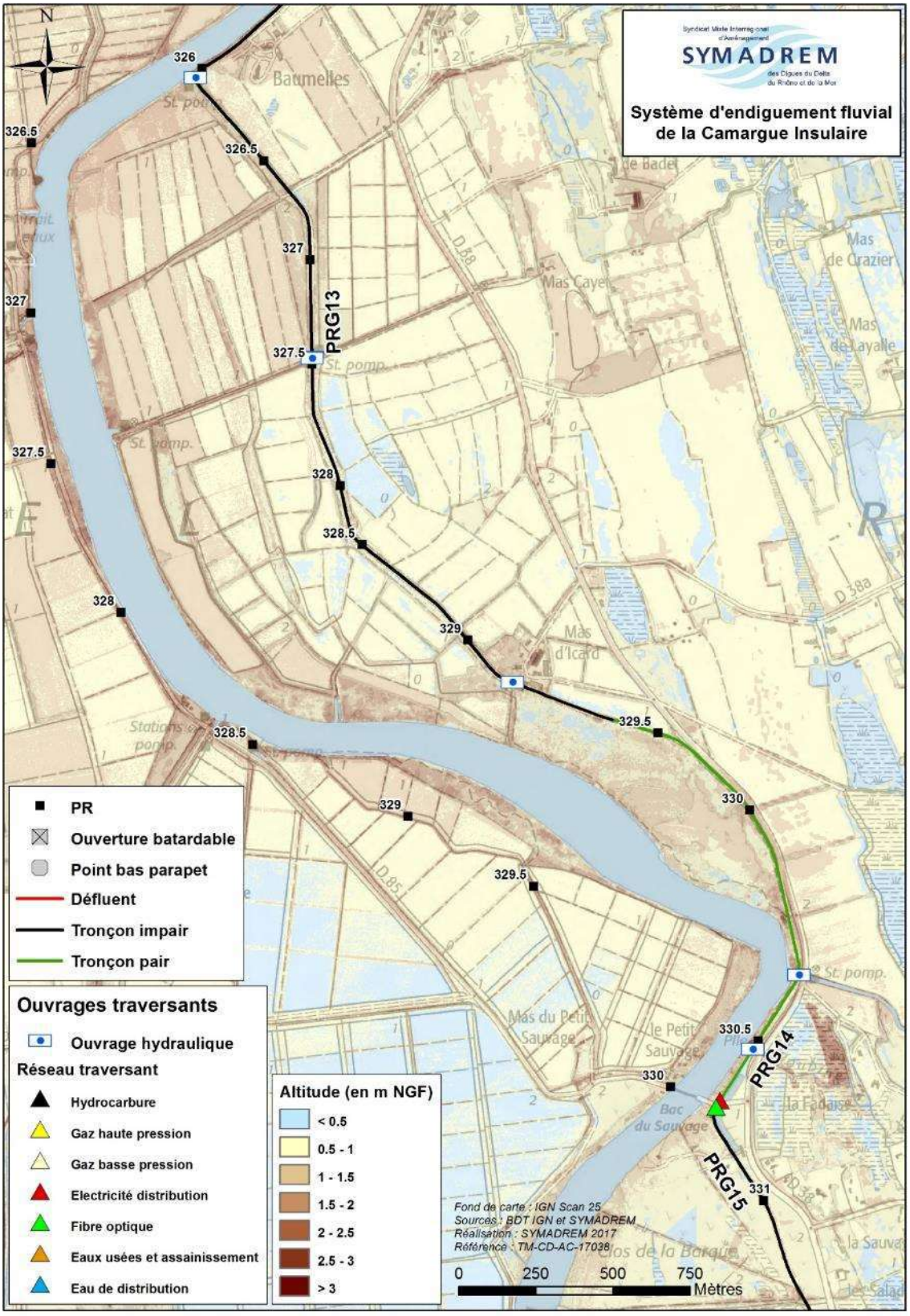


Figure 29. Localisation des tronçons PRG13 et PRG14

Figure 30. Localisation des tronçons PRG15 à PRG18

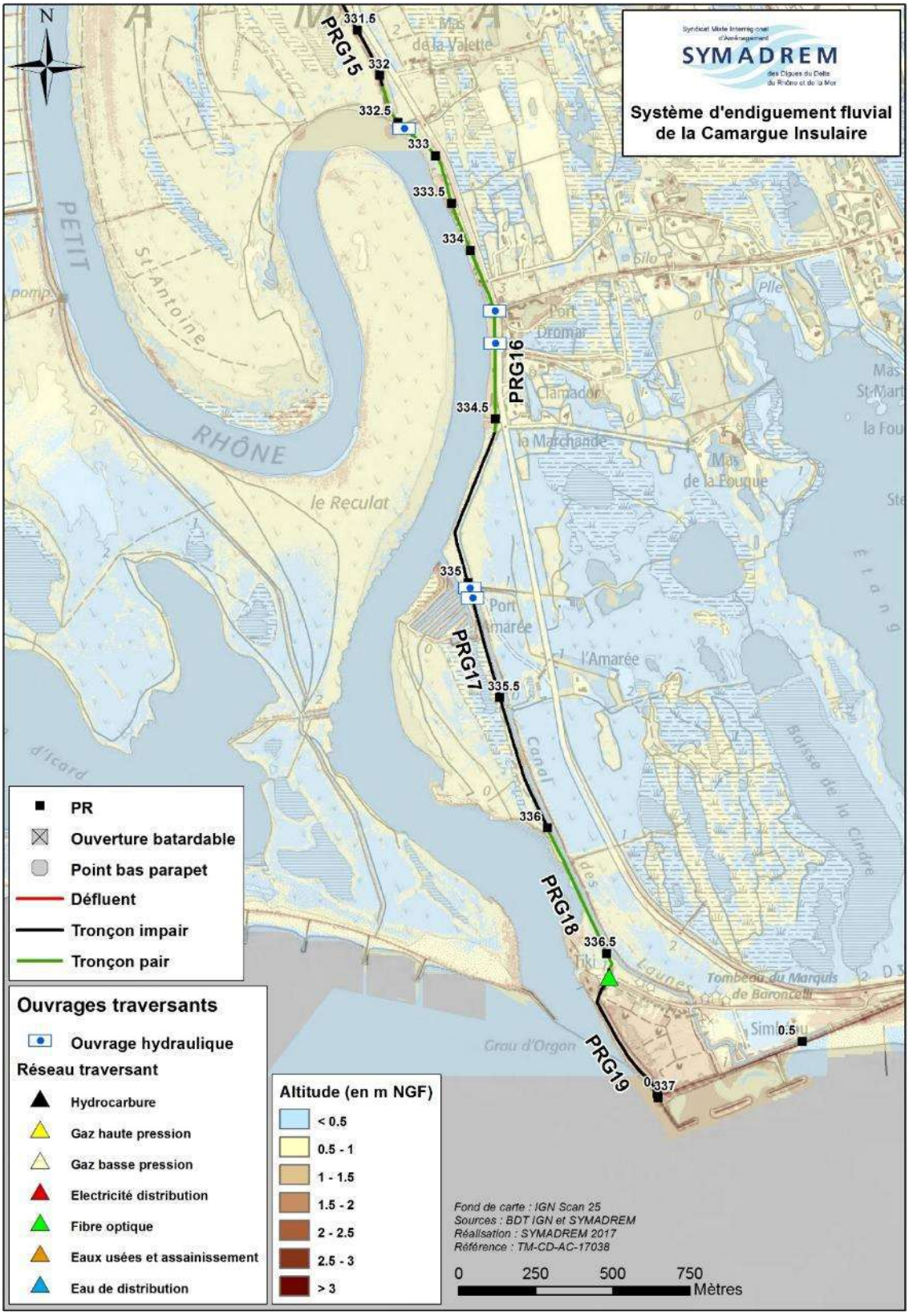


Figure 31. Localisation des tronçons PRG16 à PRG19

3 LE SYSTEME D'ENDIGUEMENT ET NIVEAU DE PROTECTION

3.1 NIVEAUX DE PROTECTION, DE SURETE ET DE DANGER - DEFINITIONS

Le niveau de protection d'une zone exposée au risque d'inondation ou de submersion marine assuré par un système d'endiguement est défini réglementairement par l'article R.214-119-1 du Code de l'Environnement, qui stipule

Le niveau de protection d'une zone exposée au risque d'inondation ou de submersion marine assuré par un système d'endiguement au sens de l'article R. 562-13 ou par un aménagement hydraulique au sens de l'article R. 562-18 est déterminé par la hauteur maximale que peut atteindre l'eau sans que cette zone soit inondée en raison du débordement, du contournement ou de la rupture des ouvrages de protection quand l'inondation provient directement du cours d'eau ou de la mer. Lorsque la taille et les caractéristiques de la zone exposée le justifient, plusieurs niveaux de protection peuvent être déterminés, chacun étant associé à une partie délimitée de la zone protégée. «Le niveau de protection d'un système d'endiguement ou d'un aménagement hydraulique est apprécié au regard soit d'un débit du cours d'eau en crue considéré ou d'une cote de niveau atteinte par celui-ci, soit d'un niveau marin pour le risque de submersion marine.

La détermination du niveau de protection d'une zone exposée au risque d'inondation ou de submersion marine assuré par un système d'endiguement nécessite l'évaluation préalable d'autres niveaux, qui ne sont pas définies réglementairement. Il s'agit des niveaux de protection, de sûreté et de danger des digues constituant le système d'endiguement. Mallet, Degoutte & Royet 2013 [X038] ont proposé des définitions, qui sont rappelées et complétées ci-après :

Niveau de protection d'une digue avec déversoir (ou digue résistante à la surverse)

Si la digue est équipée d'un déversoir de sécurité ou d'un tronçon de digue résistant à la surverse, le niveau de protection de la digue est le niveau de la crête de cet ouvrage déversant. Ceci en supposant bien sûr que la digue résiste jusque-là. C'est le niveau au-delà duquel la zone n'est plus protégée par la digue. Les lieux initialement protégés par la digue sont peu à peu inondés par les eaux provenant du déversoir (en supposant qu'ils n'aient pas été inondés précédemment par un autre processus tel que remontée de nappe, ruissellement ou remous aval).

Niveau de sûreté d'une digue

C'est le niveau pour lequel la digue conserve une certaine marge de sécurité pour les différents mécanismes de rupture. Elle doit donc :

- disposer d'une certaine revanche par rapport à la ligne d'eau de la crue de danger ;
- assurer la stabilité mécanique du corps de digue avec des coefficients de sécurité correspondant aux situations exceptionnelles [X020] ;
- présenter une sécurité vis-à-vis des mécanismes d'érosion interne ;
- assurer le fonctionnement sans endommagement du déversoir s'il existe et de ses composants.

Dans un système d'endiguement sans déversoir ou sans digue résistante à la surverse, les niveaux de protection et de sûreté de la digue sont confondus. L'inondation de la zone protégée

ne peut se faire que par brèche dans les digues. Cette situation est inconfortable car le niveau de protection n'est pas visualisable et rien ne permet d'alerter de son dépassement.

La probabilité de brèche associée au niveau de sûreté est fixée à 5% par l'arrêté du 7 avril 2017. Par le passé cette probabilité variait dans la bibliographie entre 1 et 15 %. *Mallet & al. 2013 [X038]* recommandait une probabilité minimale de 1 % pour les digues nouvelles ou les confortements. Si cet objectif peut être facilement atteint pour des ouvrages neufs par définition bien connus. Il peut dans le cas d'ouvrages anciens aboutir à fixer le niveau de sûreté au pied de digue ; avec 5% le niveau est en général très bas pour les ouvrages anciens.

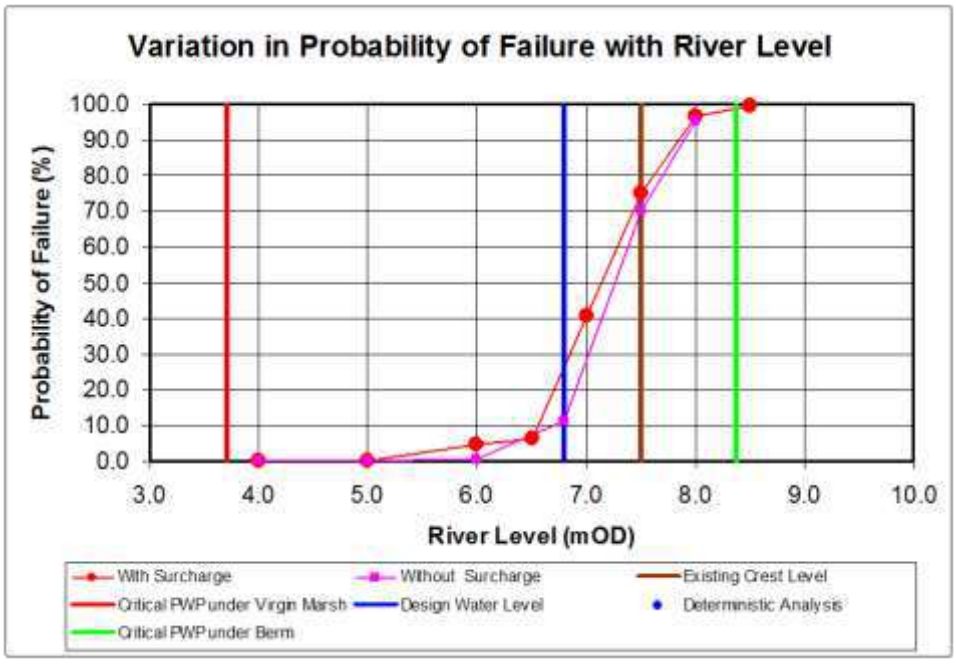


Figure 32. Courbe de fragilité – ILH Dresden Workshop – Mai 2011 (J. SIMM).

Niveau de danger d'une digue avec déversoir (ou digue résistante à la surverse)

Dans un système sécurisé, le niveau de danger correspond à la crue qui affleure le sommet de la digue en terre. Dans un système ancien non sécurisé, le niveau de danger peut bien entendu être situé sous la crête de la digue (cas observé sur les digues de Camargue lors de la crue de décembre 2003). Si le profil en long de la digue comporte des irrégularités, c'est la crue qui affleure au moins un des points bas. La probabilité de brèche associée au niveau de danger est de l'ordre de 50 %.

Cas des systèmes d'endiguement sécurisé sans digue résistante à la surverse

On entend par système sécurisé, un système construit suivant les règles de l'art actuelles et par un système non sécurisé un système non conforme aux règles de l'art actuelles mais qui a été très bien pu être construit suivant les règles de l'art en vigueur au moment de sa construction. C'est le cas des digues d'origine du Delta du Rhône, dont la conception a été assurée par les ingénieurs des ponts et chaussées.
Dans les systèmes d'endiguement sécurisé avec digue résistante à la surverse, on a :

Niveau de protection de la digue < Niveau de sûreté de la digue < Niveau de danger de la digue

Dans les systèmes d'endiguement sécurisé sans digue résistante à la surverse, on a :

Niveau de protection de la digue = Niveau de sûreté de la digue < Niveau de danger de la digue

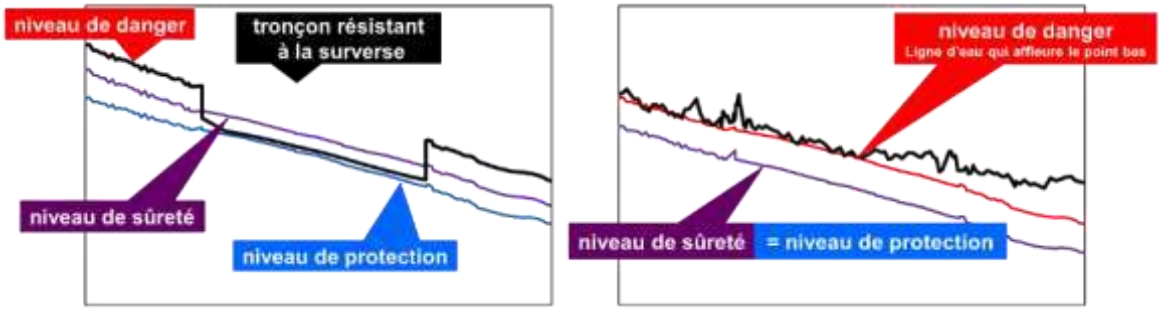


Figure 33. Système d'endiguement sécurisé avec et sans digue résistante à la surverse

Dans le cas d'un système d'endiguement non sécurisé le niveau de sûreté peut être situé en dessous du niveau des déversoirs qui n'est alors qu'un niveau de protection apparent. Il est toujours confondu avec le niveau de protection

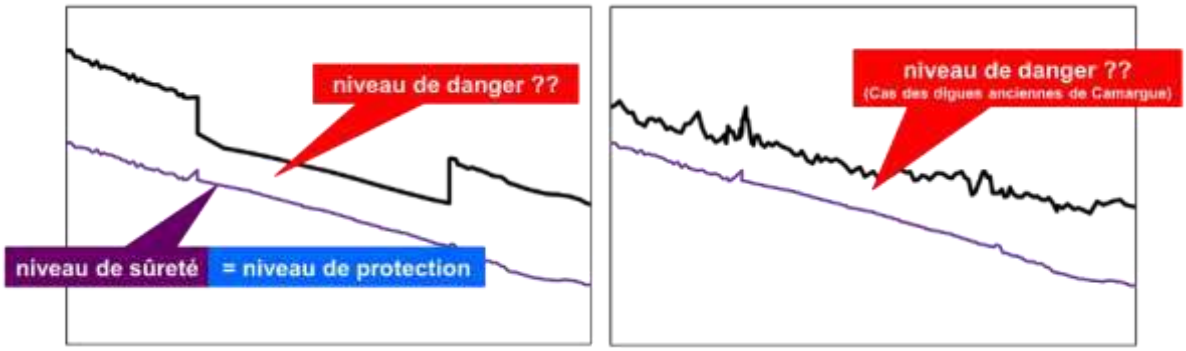


Figure 34. Système d'endiguement non sécurisé avec et sans digue résistante à la surverse

Tableau 1. Niveaux d'un ouvrage pour un système d'endiguement sécurisé ou non et comportant ou non un tronçon résistant à la surverse

Type de système	Niveau de protection	Niveau de sûreté	Niveau de danger
Avec déversoir et sécurisé	= cote déversoir	> cote déversoir < crête de l'ouvrage	= cote crête de l'ouvrage
Avec déversoir et non sécurisé	< cote déversoir	= niveau de protection	
Sans déversoir et sécurisé	= niveau de sûreté	= niveau de protection	= cote crête de l'ouvrage
Sans déversoir et non sécurisé	= niveau de sûreté	= niveau de protection	< cote crête de l'ouvrage

3.2 PRESENTATION EN CARTE

La localisation de l'ensemble des digues formant le système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » figure sur la carte suivante ; le niveau de protection associé à chaque tronçon est également mis en avant.
Des cartes avec les autres niveaux de référence sont également disponibles en chapitre 10 : Sensibilité du niveau de sureté ; Niveau de danger ; Sensibilité du niveau de danger et Niveau de submersion.

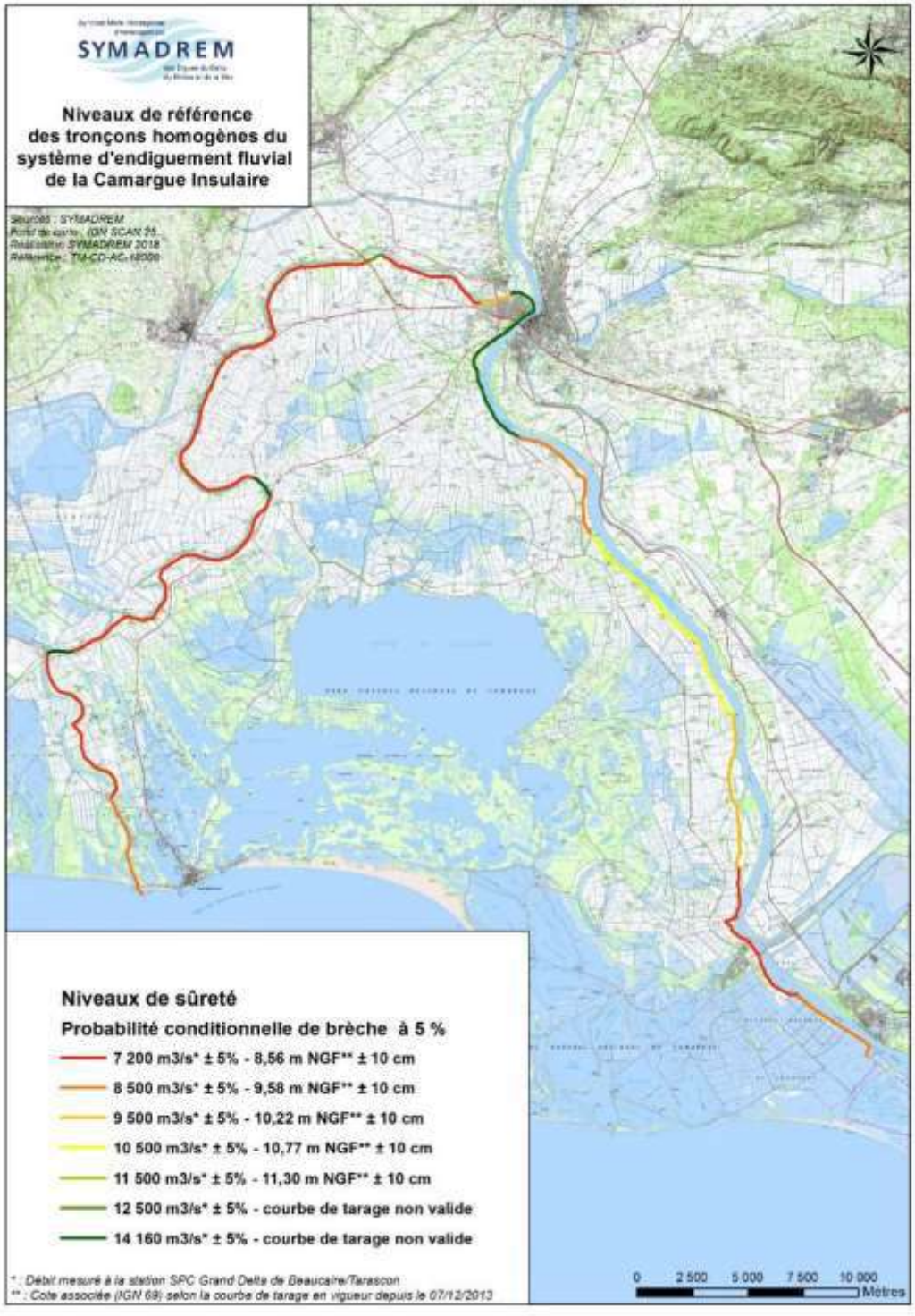


Figure 35. Localisation des ouvrages et niveau de protection (=sureté)

3.3 PRESENTATION EN SECTION

Pour l'ensemble des digues formant le système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire », ce n'est pas la surverse qui est dimensionnant ; le niveau de protection, pour ce système non sécurisé sans digue résistante à la surverse, se trouve à une hauteur variable, entre le pied et la crête de digue. Ce niveau a été estimé par les calculs et est bien visible sur les profils en long ci-après. Le niveau de protection (ou sureté) correspond à une probabilité de rupture de 5%, le niveau de danger correspond à une probabilité de 50%.

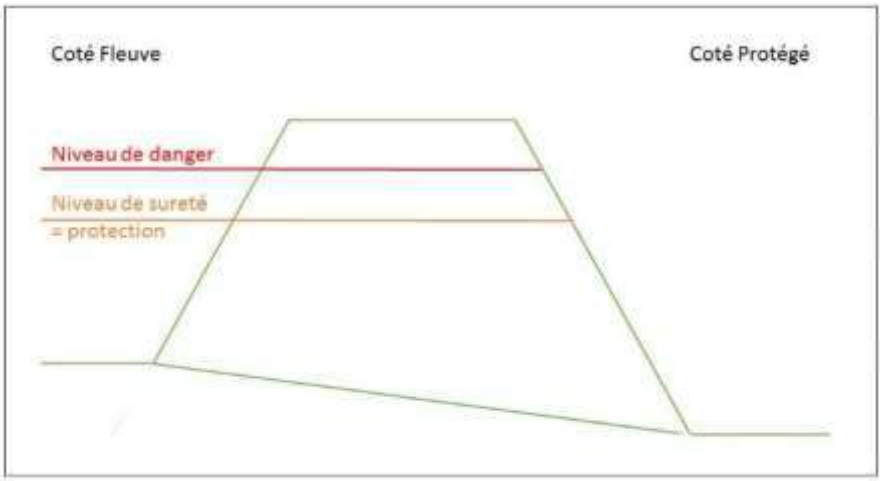
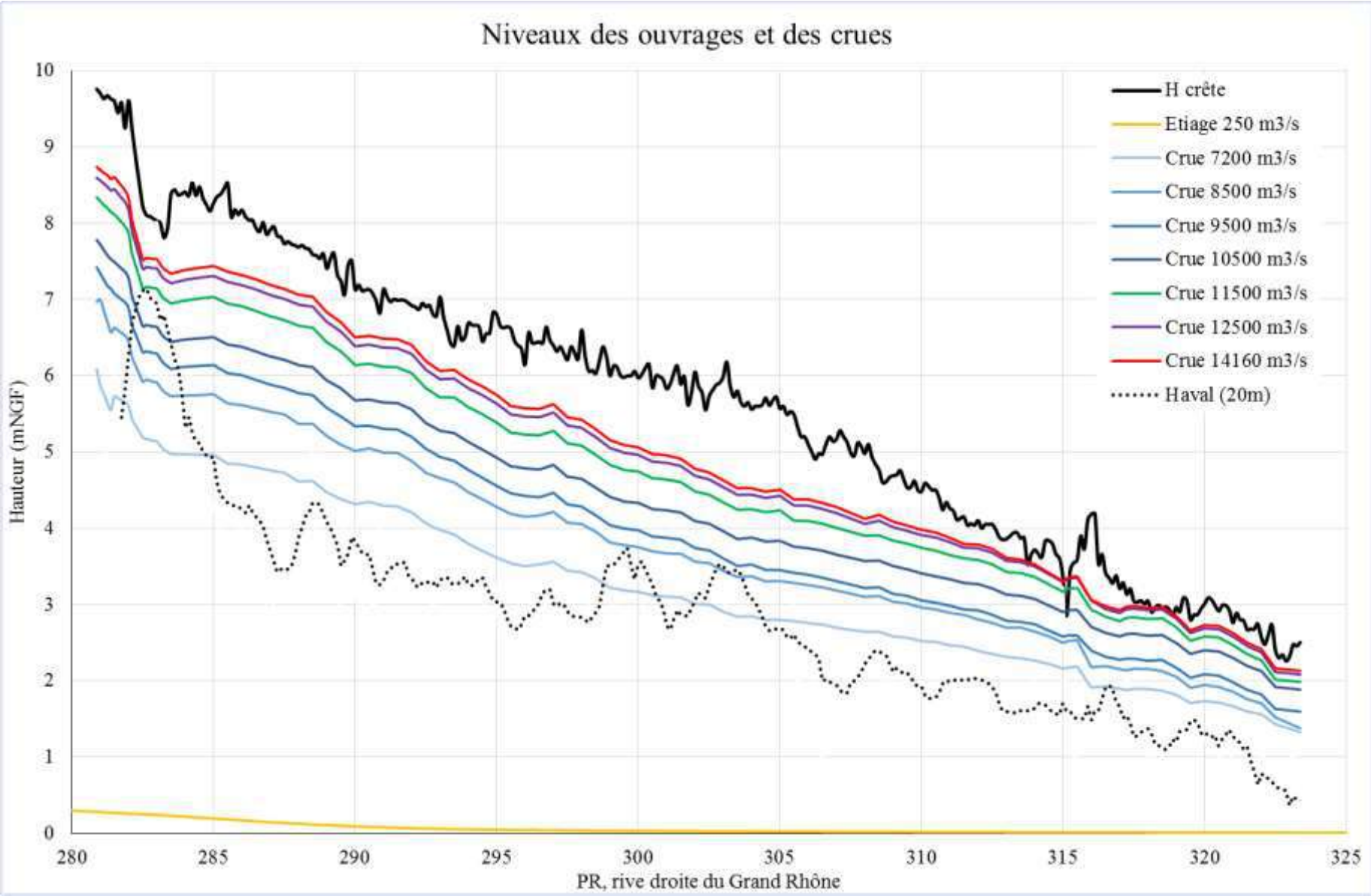
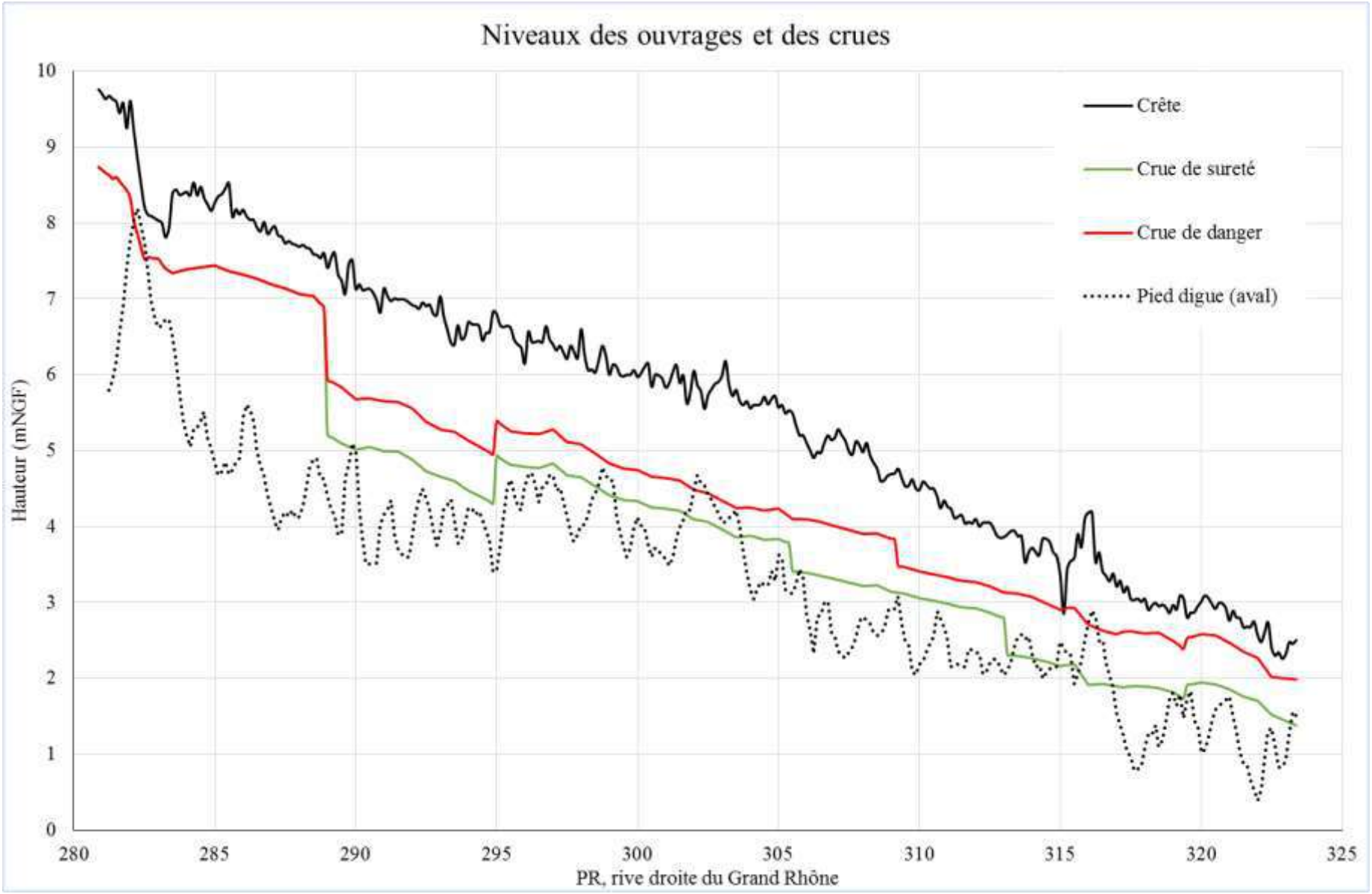


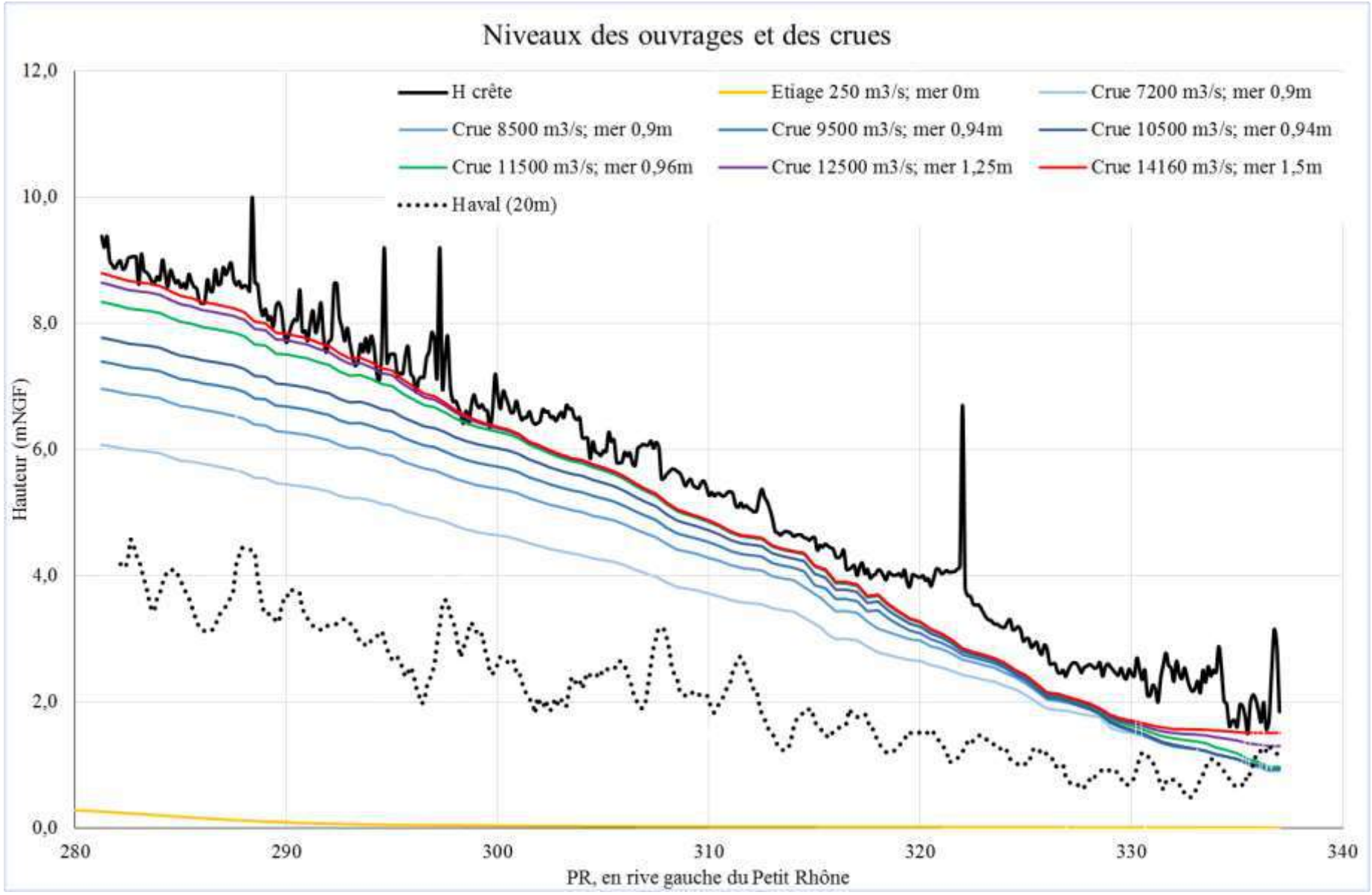
Figure 36. Schéma de principe de localisation du niveau de protection

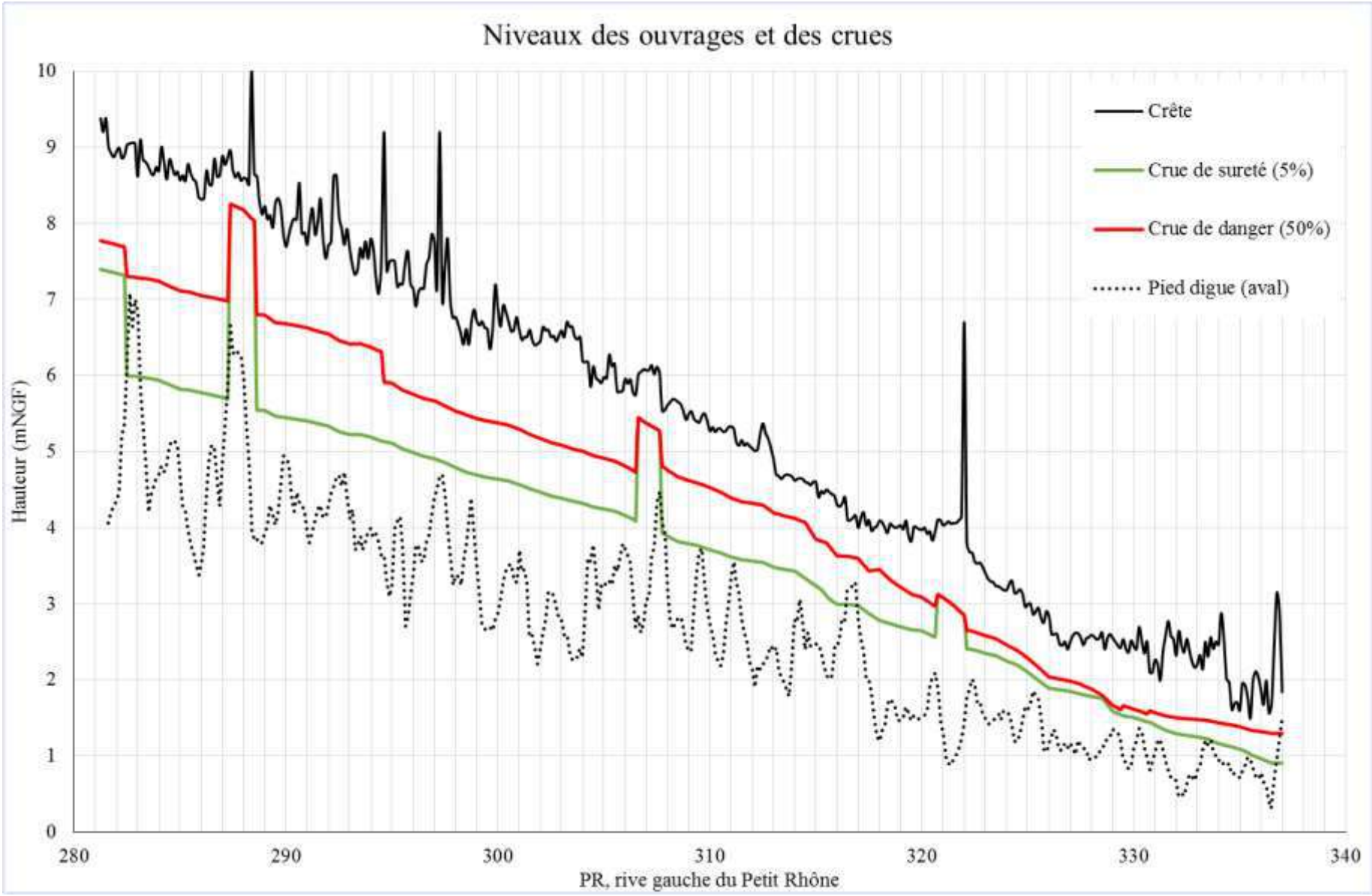
3.4 PRESENTATION EN PROFIL EN LONG

Sur les pages suivantes sont représentés les profils en long de l'ensemble du système d'endiguement, séparé entre Défluent+Grand Rhône et Petit Rhône.
Il y a un profil avec l'ensemble des niveaux de crue modélisés et un avec les niveaux de référence pour chaque rive. Les niveaux de protection, qui est égal au niveau de sureté et de danger ont été calculés en continu et ramenés aux tronçons (Cf Chapitre 7.2).


Niveaux des ouvrages et des crues
Hauteur (mNGF)
PR, rive droite du Grand Rhône
H crête
Etiage 250 m3/s
Crue 7200 m3/s
Crue 8500 m3/s
Crue 9500 m3/s
Crue 10500 m3/s
Crue 11500 m3/s
Crue 12500 m3/s
Crue 14160 m3/s
Haval (20m)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
280
285
290
295
300
305
310
315
320
325


Niveaux des ouvrages et des crues
Hauteur (mNGF)
PR, rive droite du Grand Rhône
Crête
Crue de sureté
Crue de danger
Pied digue (aval)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
280
285
290
295
300
305
310
315
320
325


Niveaux des ouvrages et des crues
H crête
Etiage 250 m3/s; mer 0m
Crue 7200 m3/s; mer 0,9m
Crue 8500 m3/s; mer 0,9m
Crue 9500 m3/s; mer 0,94m
Crue 10500 m3/s; mer 0,94m
Crue 11500 m3/s; mer 0,96m
Crue 12500 m3/s; mer 1,25m
Crue 14160 m3/s; mer 1,5m
Haval (20m)
Hauteur (mNGF)
12,0
10,0
8,0
6,0
4,0
2,0
0,0
280
290
300
310
320
330
340
PR, en rive gauche du Petit Rhône


Niveaux des ouvrages et des crues
Hauteur (mNGF)
PR, rive gauche du Petit Rhône
Crête
Crue de sureté (5%)
Crue de danger (50%)
Pied digue (aval)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
280
290
300
310
320
330
340

4 DONNEES TOPOGRAPHIQUES

4.1 CAMPAGNE FLIMAP 2007

En 2007, Flimap a réalisé des levés topographiques en continu des digues fluviales du SYMADREM par technique laser aéroportée. Ils ont également réalisés des plans topographiques à l'échelle 1/500ème, des profils en long et en travers, des modèles numérique de terrain et d'élévation et des photos géo-référencées et ortho-rectifiées.
La précision altimétrique de ces données est de ±3cm, c'est également le cas en planimétrie.

Les coordonnées et les altitudes des pieds de digue, des points à 20m des pieds et de la crête ont ensuite étaient extraites tous les 0.125PR.

Pour les tronçons ayant subi des travaux depuis 2007, les différentes sources citées ci-après ont été utilisées.

4.1.1 Les données projet

Pour les travaux récents, ce sont les DOE qui ont été réutilisés.
C'est le cas au niveau des papeteries Etienne, avec les travaux de reconstruction de la digue.
C'est également le cas pour les cotes de crêtes après les travaux de carrossabilité de 2010 et 2016.

La précision des données utilisées pour ces tronçons est centimètrique.

4.2 DONNEES HYDRAULIQUES

En comparaison, la précision des données hydrauliques issues du modèle de calage varient selon le bras (et donc le modèle considéré).
Pour le grand Rhône :

- ±20cm due à l'hydrogramme d'entré (±5%)
- ±50cm due à la rugosité en lit mineur (±5 points)
- ±15cm due à l'évolution bathymétrique 2002-2007.

Pour le petit Rhône :

- ±60cm due à l'hydrogramme d'entré (±5% débit à Beaucaire ; ±20cm pour 5% de variation du débit du Petit Rhône)
- ±20cm due à la rugosité en lit mineur (±5 points)

Toutes ces incertitudes décroissent et tendent vers 0 en allant vers l'aval.

Ces incertitudes sont indépendantes et une incertitude générale de ±50cm a été retenue.

La précision topographique est bien supérieure à celle des niveaux d'eau et l'incertitude altimétrique apparait donc comme négligeable.

Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT FLUVIAL CAMARGUE INSULAIRE

DOCUMENT A

CHAPITRE N°3.4 : DESCRIPTION DU FONCTIONNEMENT

SOMMAIRE

1 Inondations passées de la zone protégée 158
1.1 Inondations du Rhône en provenance du système d'endiguement 158
1.2 Synthèse des brèches survenues dans le système d'endiguement 159
1.3 Autres inondations 161
2 Desrcription du système d'endiguement 162
3 Les aménagements amont 162
4 Niveau de protection 163
4.1 niveaux de protection, de sûreté et de danger - Définitions 163
4.1.1 Considérations entre les niveaux relatifs aux ouvrages et niveaux relatifs aux personnes et limites de l'étude de dangers 164
4.2 Niveau de protection des ouvrages 168
4.3 Niveau de protection de la zone protégée 170
5 Comportement pour de plus fortes crues 173
6 Organisation du gestionnaire 179
6.1 Organisation du SYMADREM en situation normale 179
6.2 Organisation en situation de crue 181
6.2.1 Mise en place et fonctionnement 181
6.2.2 Détection et traitement des désordres 183
6.2.3 Brèche 184
6.2.4 Post crue 184

1 INONDATIONS PASSEES DE LA ZONE PROTEGEE

1.1 INONDATIONS DU RHONE EN PROVENANCE DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT

Le Grand Delta du Rhône et la zone protégée par le système d'endiguement « Camargue insulaire » ont été inondés plusieurs fois. Les inondations provoquées par les crues de novembre 1840, mai 1856 et plus récemment en décembre 2003 sont les 3 événements les plus importants depuis le milieu du XIX^{ème} siècle. Ce dernier n'a que peu impacté le système d'endiguement fluvial « Camargue insulaire », des brèches dans les autres systèmes d'endiguement du delta du Rhône ayant abaissé les lignes d'eau.

La carte ci-dessous illustre les contours des inondations de 1840 et 1856 provoquées par le Rhône.

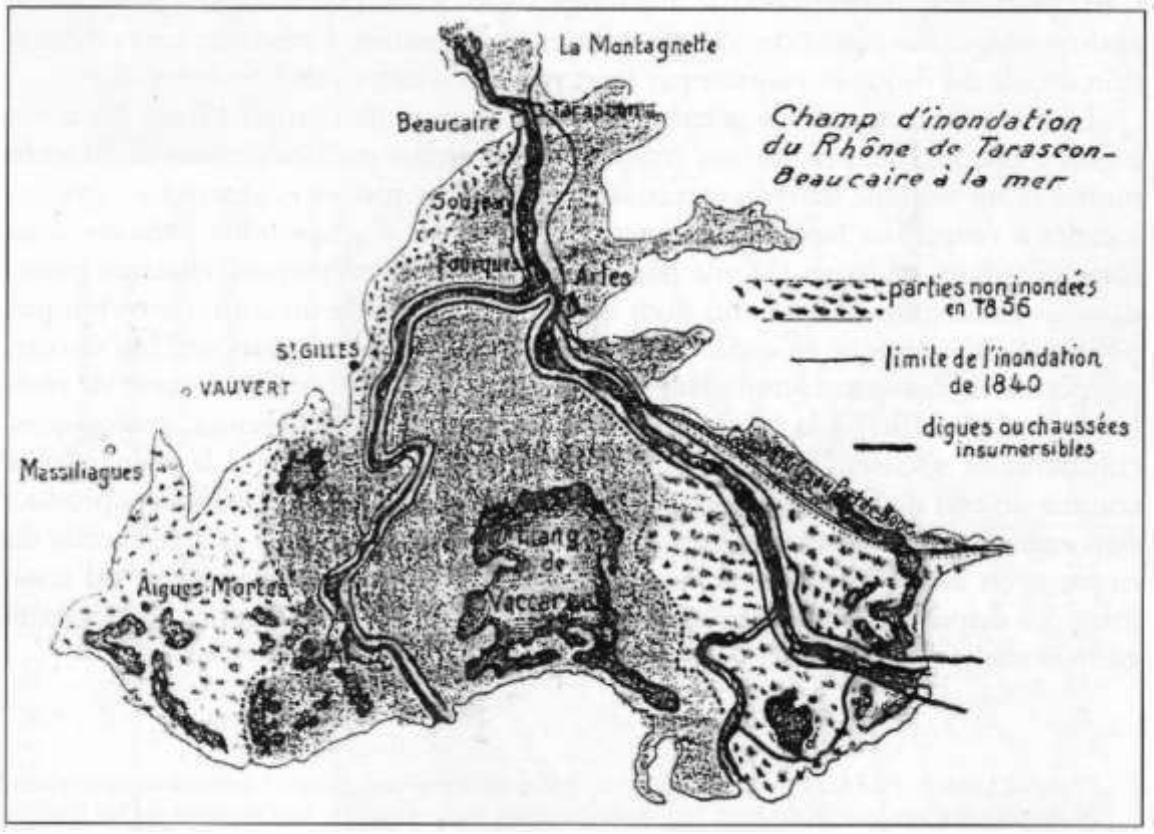


Figure 1. Inondations de 1840 et 1856 (source Pardé)

Le tableau ci-après extrait du Chapitre 6 renseigne sur la cote de quelques laisses de crues relevées dans la zone protégée pour la crue de 1840 et celle de 1856.

Tableau 1. Laisses des crues de 1840 et 1856 en Camargue Insulaire

Inondations du Rhône	Lieu	Cote relevée (m NGF)
Novembre 1840	Mas des Bernacles	1.89
Mai 1856	Trinquetaille	6.26
	Mas des Bernacles	2.16
	Maison du Parc	2.62

Les volumes d'eau ayant déversé par les brèches dans le système sont respectivement les suivants :

Tableau 2. Volume déversé lors des crues historiques de 1840, 1856 et 2003

Zone protégée	**Nov. 1840**	**Mai 1856**	**Déc. 2003**
Rive Droite	1 400 millions de m^3	300 millions de m^3	210 millions de m^3
Camargue Insulaire	**800 millions de m^3**	**1 000 millions de m^3**	
Rive Gauche	> 600 millions de m^3	500 millions de m^3	17 millions de m^3
TOTAL	2 800 millions de m^3	1 800 millions de m^3	227 millions de m^3

1.2 SYNTHESE DES BRECHES SURVENUES DANS LE SYSTEME D'ENDIGUEMENT

Au cours des derniers siècles les crues ont formé des brèches, parfois totales, dans le système d'endiguement. Ces dernières sont répertoriées, par crue, dans le tableau suivant. Des informations plus détaillées sont présentées au Chapitre 6.

Tableau 3. Synthèses des brèches en Camargue Insulaire depuis 1840

Crue		Brèches				
Année	Débit	Nom	Type	PR	largeur	initiateur
1840	8900	Lauricet	Totale	PRG 302,3	≅ 250 m	Erosion interne
1843	9000	Mas d'Yvan	Totale	PRG 285,7	considérable	Infiltrations
		Lauricet	Totale	PRG 302,2	??	Infiltrations
		Fume morte	Partielle	GRD ??	??	Infiltrations
1846	7400	Beaumelle	?	PRG 326	?	Affouillement externe
1856	12500	Cazeneuve	totale ?	PRG 281,8	Faible linéaire	Infiltrations – paléo-chenal
		Mas de Rey	totale ?	PRG 285 à 286	50 m	Infiltrations – prox. paléo-chenal
		Rigodon	Totale	PRG 295	180 m	Infiltrations – paléo-chenal + extrados
		Mas Combet	totale ?	PRG 307,75	125 m	Infiltrations – paléo-chenal
		Mas de Brun	totale ?	PRG 311	Faible linéaire	Infiltrations – paléo-chenal
		Mas d'eybrun	totale ?	??	Faible linéaire	
		Triquette (1)	Totale ?	GRD 283,7	150 m	Infiltrations – paléo-chenal
		Triquette (2)	Totale ?	GRD 285,4	150 m	Affouillement ancienne divagation

		Passerons	Totale ?	GRD 286,25	50 m	Infiltrations – paléo-chenal
		Montlong	Totale ?	GRD 288,4	50 m	Infiltrations – paléo-chenal
		Peaudure	totale ?	GRD 310,5	??	Infiltrations – ancienne divagation
		Chartrousse	totale ?	GRD 312,4	??	Infiltrations – ancienne divagation
		Jacquières	totale ?	GRD 313,25	??	Infiltrations – ancienne divagation
		Barcarin	partielle	GRD 315,75	??	Erosion du fleuve - affouillement
1872	8400	Grand patis	totale	GRD 305.2	60 m	?
1993	9000	de Molin	Partielle	PRG 289.76	6 m	Erosion conduit le long d'un tuyau
		Grille Léautaud (affaissement)	Partielle	PRG 291.50	20 m	Erosion conduit dans un terrier
		Figarès	Totale	PRG 298.70	40 m	Erosion conduit dans un terrier et éventuellement le long d'une conduite
		La Galante	Totale	PRG 299.81	15 m	Erosion conduit le long d'un tuyau
		Casebrune	Totale	PRG 301.03	17 m	Erosion conduit le long d'un tuyau
		Lauricet	Totale	PRG 304.36	40 m	Erosion conduit dans un terrier
		Mas de la Vigne n°1	Partielle	PRG 305.63	12 m	Erosion conduit dans un terrier
		Mas de la Vigne n°2	Partielle	PRG 305.70	17 m	Erosion conduit dans un terrier
		Mas de la Vigne n°3	Partielle	PRG 305.80	3 m	Erosion conduit dans un terrier
		Mas neuf de sansouires	Partielle	GRD 290,88	10 m	Erosion conduit le long d'un ouvrage traversant

		Petit Peloux	Partielle	GRD 315,35	10 m	Erosion conduit dans un terrier
1994	10000	Beaumont	Totale	PRG 288.16	35 m	Erosion conduit dans un terrier
		Lauricet	Totale	PRG 304.16	65 m	Erosion conduit dans un terrier
2002	9500	Mas d'Augery des Sansouirres	Partielle	GRD 293,64	35 m	Erosion de conduit dans un terrier
2016	8500	Ventabren	Totale	PRG 314.1	6 m	Erosion de conduit dans un terrier

1.3 AUTRES INONDATIONS

La zone protégée n'est pas sujet à d'autres inondations fluviales que celles du Rhône.
Aucune inondation majeure due à l'impluvium ou à une tempête marine n'a été observée.

2 DESRCRIPTION DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT

Le système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire » représente un linéaire continu de 100km entre l'embouchure du Petit Rhône et celle du Grand Rhône.

L'historique, la nature des ouvrages et les résultats de la modélisation nous a amené a divisé ce système d'endiguement en 33 tronçons répartis autour du delta.

Le système d'endiguement est constitué de digues en terres sur 98% du linéaire et de quais maçonnés sur les 2% restants ; il s'agit du tronçon GRD 1.
Ces digues sont en majorité des ouvrages réalisés au milieu du XIXème siècle mais certains secteurs ont été repris au cours des vingt dernières années, il s'agit de :

- Trinquetaille (PRG 1)
- Bois de Beaumont (PRG 3)
- Albaron (PRG 9)
- Sénebier (PRG 12)
- Le défluent (D 1)
- Les quais d'Arles (GRD 1)
- Les digues en aval du centre-ville (GRD 2 à GRD 5)

Pour les autres tronçons, à l'exception de ceux à l'aval du mas d'Icard (PRG 14 à PRG 19), des travaux de carrossabilité ont été réalisés, en deux phases, afin de faciliter l'intervention en cas de désordre.

Cette protection continue est traversée par différents ouvrages ou réseaux qui sont représentés sur les cartes suivantes.
La liste des 211 traversées est disponible au Chapitre 1 et, par tronçon, au Chapitre 5.1

3 LES AMENAGEMENTS AMONT

En amont de la diffluence entre Petit Rhône et Grand Rhône, qui délimitent la zone protégée, le Rhône est endigué jusqu'au barrage de Vallabrègues (PK 263).
Des travaux sont en cours en rive droite et en phase projet en rive gauche, il y aura à terme une digue résistante à la surverse, calées pour une crue de type 2003, sur chaque rive. Ces aménagements limiteront l'évolution de la ligne d'eau pour les crues importantes sur les ouvrages du système d'endiguement fluvial Camargue Insulaire.
Le barrage au fil de l'eau a un impact négligeable en crue ; hors période de crue son effet est ressenti à la station de référence (Beaucaire/Tarascon, PK 269) : fluctuation journalière.

Photo 1. Barrage de Vallabrègues

4 NIVEAU DE PROTECTION

4.1 NIVEAUX DE PROTECTION, DE SURETE ET DE DANGER - DEFINITIONS

La détermination du niveau de protection d'une zone exposée au risque d'inondation ou de submersion marine assuré par un système d'endiguement nécessite l'évaluation préalable d'autres niveaux, qui ne sont pas définies réglementairement. Il s'agit des niveaux de protection, de sûreté et de danger des digues constituant le système d'endiguement. Des définitions de ces niveaux sont présentées au Chapitre 3.3.

Niveau de protection des personnes

On peut considérer que le niveau de protection d'une personne résidant dans une zone protégée correspond à sa situation à « pieds secs » ; tant que sa résidence ou ses voiries ne sont pas inondées, son niveau de protection n'est pas atteint. Elle peut se considérer protégée. C'est le niveau de protection exigé par la réglementation 2015.

Niveau de sécurité des personnes

Le niveau de sécurité des personnes peut être défini comme le niveau à partir duquel une personne résidant dans une zone protégée se trouve en situation de danger. Les différentes recommandations en matière d'élaboration de plans de prévention du risque inondation (PPRI) donnent certains critères permettant d'apprécier l'aléa en zone inondable.
Le seuil de déplacement d'une personne en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse des écoulements (Cf. figure ci-après) semble être un critère pertinent permettant de définir le niveau de sécurité des personnes tout en restant cohérent avec la doctrine de l'État en matière de PPRI.

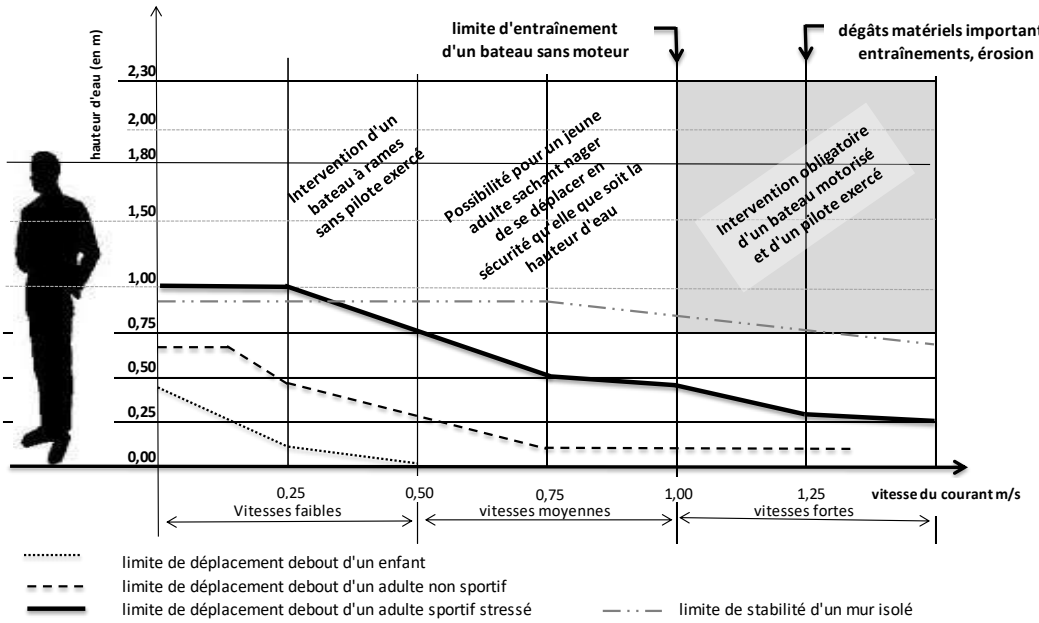


Figure 2. Seuil de déplacement des personnes en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse des écoulements (©CETE Méditerranée et guide sur les PPR [X041]

D'autres grilles d'aléa (Cf. tableaux ci- dessous) extraites de [X041] pour les crues rapides et crues lentes peuvent permettre d'apprécier le niveau de sûreté des personnes ; l'atteinte du niveau de sécurité des personnes correspondant au passage en aléa fort.

Tableau 4. Aléa pour une crue rapide en fonction de la hauteur et de la vitesse [X041]

Grille à deux paramètres Zones de confluences		Vitesse d'écoulement		
		Faible (< 0.2 m/s) (stockage)	Moyenne (écoulement)	Forte (> 0.5 m/s) (grand écoulement)
Hauteur de submersion	H < 0.50 m	Modéré	Modéré	Fort
	0.50 m < H < 1 m	Fort	Fort	Fort
	H > 1 m	Fort	Fort	Fort

Tableau 5. Aléa pour une crue lente en fonction de la hauteur et de la vitesse [X041]

Grille à deux paramètres (règle générale)		Vitesse d'écoulement		
		Faible (< 0.2 m/s) (stockage)	Moyenne (écoulement)	Forte (> 0.5 m/s) (grand écoulement)
Hauteur de submersion	H < 0.50 m	Modéré	Modéré	Fort
	0.50 m < H < 1 m	Modéré	Modéré	Fort
	H > 1 m	Fort	Fort	Fort

L'atteinte du niveau de sécurité des personnes ne doit pas être confondue avec le nombre de victimes potentielles paramètre retenu dans l'acceptabilité du risque, qui est une notion beaucoup plus difficiles à évaluer car elle dépend de nombreux paramètres dépassant le cadre de la simple modélisation hydraulique.

4.1.1 Considérations entre les niveaux relatifs aux ouvrages et niveaux relatifs aux personnes et limites de l'étude de dangers

Considérons une digue, avec ou sans déversoir, et sa zone protégée.

Cas d'une digue où niveau de la crue < niveau de protection de la digue

Soit une crue dont le niveau est inférieur au niveau de la protection de la digue. Qu'il y ait ou non un déversoir, on considère que la crue est contenue dans le lit endigué et qu'aucune entrée d'eau n'est possible.

Dans la zone protégée, certains secteurs peuvent cependant être inondés, soit par remontée de nappe, soit par débordements d'autres cours d'eau soit par accumulation du ruissellement pluvial.

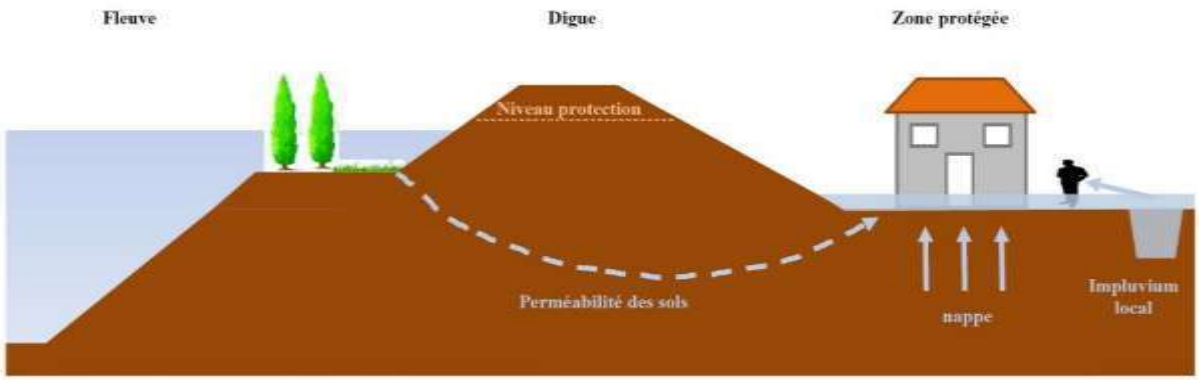


Figure 3. Zone protégée inondée et niveau de protection du système d'endiguement non atteint

Cette situation fut vécue par une partie des habitants du Cailar (Gard) en septembre 2005, lors de la crue centennale du Vistre (photo de gauche). La digue protégeant la commune assurait pleinement sa fonction, quand certains quartiers étaient inondés par ruissellement sous plusieurs décimètres d'eau (photo de droite).

Photo 2. Système d'endiguement du Vistre lors de la crue centennale de 2005 (côté cours d'eau à gauche et côté zone protégée à droite) (©ISL)

Mais d'autres secteurs peuvent être hors d'eau. C'est pourquoi suivant l'endroit où l'on se situe dans la zone protégée, on peut avoir les situations suivantes :

niveau de protection des personnes < ou > niveau de protection de la digue

Cas d'une digue avec déversoir où niveau de crue > niveau de protection de la digue mais < niveau de sûreté de la digue :

Si la digue possède un déversoir, et si elle est en bon état, la cote de sûreté de la digue est supérieure à la cote de protection. Suivant la surface de la zone protégée, la dynamique de la crue et la topographie de la plaine, le déversoir, tout en fonctionnant normalement, peut mettre en danger des personnes qui n'auraient pas été mises en sécurité. A contrario, d'autres secteurs de la zone protégée peuvent être hors d'eau. On peut donc avoir :

niveau de protection des personnes < ou > niveau de protection de la digue

niveau de sécurité des personnes ≤ niveau de sûreté de la digue

Cas d'une digue où niveau de la crue > niveau de sûreté de la digue

On rappelle que pour une digue sans déversoir, les niveaux de protection et de sûreté de la digue sont confondus. Lorsque le niveau de la crue dépasse le niveau de sûreté de la digue, la revanche entre la cote de danger et la cote de sûreté est consommée, ainsi que les marges de sécurité pour la stabilité de la digue. On est au-delà de la crue de projet ou de dimensionnement ; la probabilité d'avoir des brèches augmente sensiblement (Cf. figure ci-avant) et doit être prise en considération pour estimer les niveaux de protection et de sécurité des personnes. Les personnes sont menacées au moment même où la sûreté de la digue n'est plus assurée et l'on a donc :

niveau de sécurité des personnes = niveau de sûreté de la digue

Dans le cas particulier des grandes zones protégées comme la Camargue, suivant l'hydrogramme de brèches, les personnes résidant en extrémité de zone protégée peuvent être hors de danger pendant un temps assez long (2 à 3 jours en Camargue Gardoise en décembre 2003), ce qui permet de les mettre en sécurité après formation de la brèche, mais ce cas est peu courant et doit être appliqué avec précaution.

Bilan

On voit donc que sûreté de l'ouvrage et sécurité des personnes sont deux notions indissociables mais à ne surtout pas confondre :

- un ouvrage peut provoquer des victimes sans rompre ;
- à contrario, un ouvrage peut rompre sans victimes.

Les personnes peuvent être menacées par :

- la rupture de l'ouvrage (typiquement une brèche dans une digue en terre suite à érosion interne ou surverse) ; une onde de crue se libère alors brutalement ;
- un dysfonctionnement de l'ouvrage ou lié à lui (par exemple déversoir mobile s'effaçant brusquement) ;
- un dépassement de l'ouvrage qui reste intègre : c'est alors l'eau par-dessus la digue qui provoque des dégâts : l'ouvrage n'en est pas responsable, mais un phénomène naturel ;
- des aléas extérieurs à la crue (remontée de nappe, ruissellement pluvial, débordement d'autres cours d'eau traversant la zone protégée).

On constate que le niveau de sécurité des personnes est le même que celui de sûreté de l'ouvrage dans le cas fréquent des digues non résistantes à la surverse et sans déversoir. Sinon, il est inférieur ou égal. Finalement, on a toujours :

niveau de sécurité des personnes ≤ niveau de sûreté de la digue

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques des trois niveaux à considérer pour les ouvrages de protection, que le système ait ou non un déversoir, qu'il soit ou non sécurisé.
La notion de système sécurisé doit se comprendre comme un système construit suivant les règles de l'art actuel. En effet, le parc français des digues de protection est essentiellement ancien. Les digues les plus anciennes n'ont pas été compactées ou l'ont été avec des dames d'une quinzaine de kg seulement sans prise en compte le plus souvent de la teneur en eau

optimale qui n'a été connue qu'après les travaux de Ralph Proctor (1933). Dès lors tout système ancien est par définition non sécurisé.

Ajoutons que le cas « avec déversoir et non sécurisé » ne devrait pas concerner un déversoir récemment intégré dans une digue préexistante car sa mise en sécurité est un préalable évident.

Tableau 6. Niveaux d'un ouvrage pour un système d'endiguement sécurisé ou non et comportant ou non un tronçon résistant à la surverse

Type de système	Niveau de protection	Niveau de sûreté	Niveau de danger
Avec déversoir et sécurisé	= cote déversoir	> cote déversoir < crête de l'ouvrage	= cote crête de l'ouvrage
Avec déversoir et non sécurisé	< cote déversoir	= niveau de protection	
Sans déversoir et sécurisé	= niveau de sûreté	= niveau de protection	= cote crête de l'ouvrage
Sans déversoir et non sécurisé	= niveau de sûreté	= niveau de protection	< cote crête de l'ouvrage

4.2 NIVEAU DE PROTECTION DES OUVRAGES

Le système d'endiguement ne possédant pas de déversoir, le niveau de protection des ouvrages est égal au niveau de sureté.

Les calculs ont permis de déterminer les crues de sureté (probabilité de brèche inférieure ou égale à 5%) et de danger (probabilité de brèche inférieure ou égale à 50%) pour chaque secteur de 125 m, qui ont ensuite été regroupés en tronçons homogènes.

Tableau 7. Niveau de protection des tronçons

Id	Nom	Niveau de sureté (=protection) Débit associé	Niveau de sureté (=protection) Période de retour associée
PRG1	Trinquetaille	9 500	25
PRG2	Cazeneuve-Augéry	7 200	5
PRG3	Beaumont	12 500	250
PRG4	Beaumont-Cavalès	7 200	5
PRG5	Cavalès - St Gilles	7 200	5
PRG6	Figarès	7 200	5
PRG7	Emplacement deversoir	7 200	5
PRG8	La Galante - Albaron	7 200	5
PRG9	Albaron	14 160	800
PRG10	Albaron-Eymini	7 200	5
PRG11	Eymini-Sénebier	7 200	5
PRG12	Sénebier	14 160	800
PRG13	Sénebier-Icard	7 200	5
PRG14	Mas d'Icard - Bac	7 200	5
PRG15	Aval Bac du Sauvage	8 500	10
PRG16	Port Dromar	8 500	10
PRG17	Port l'Amarée	8 500	10
PRG18	L'Amarée	8 500	10
PRG19	Embouchure	8 500	10
D1	Défluent	14 160	800
GRD1	Quais	14 160	800
GRD2	Papeteries	14 160	800
GRD3	Emmaus	14 160	800
GRD4	Passeron-Monlong	14 160	800
GRD5	Monlong	14 160	800
GRD6	Montlong-Beaujeu	8 500	10
GRD7	Beaujeu-l'Armelière	10 500	50

GRD8	L'Armelière-la Commanderie	10 500	50
GRD9	La Commanderie-Bois Verdun	9 500	25
GRD10	Bois Verdun-Chartrouse	9 500	25
GRD11	Chartrouse-La Louisiane	9 500	25
GRD12	La Louisiane-L'Esquineau	7 200	5
GRD13	L'Esquineau-Palissade	8 500	10

4.3 NIVEAU DE PROTECTION DE LA ZONE PROTEGEE

En couplant le niveau de protection des ouvrages du système d'endiguement fluvial Camargue Insulaire avec les simulations de propagation des eaux, suite à des brèches, dans la zone protégée, les niveaux de protection de la zone protégée ont été définis.

Ces derniers sont représentés sur la carte ci-après :

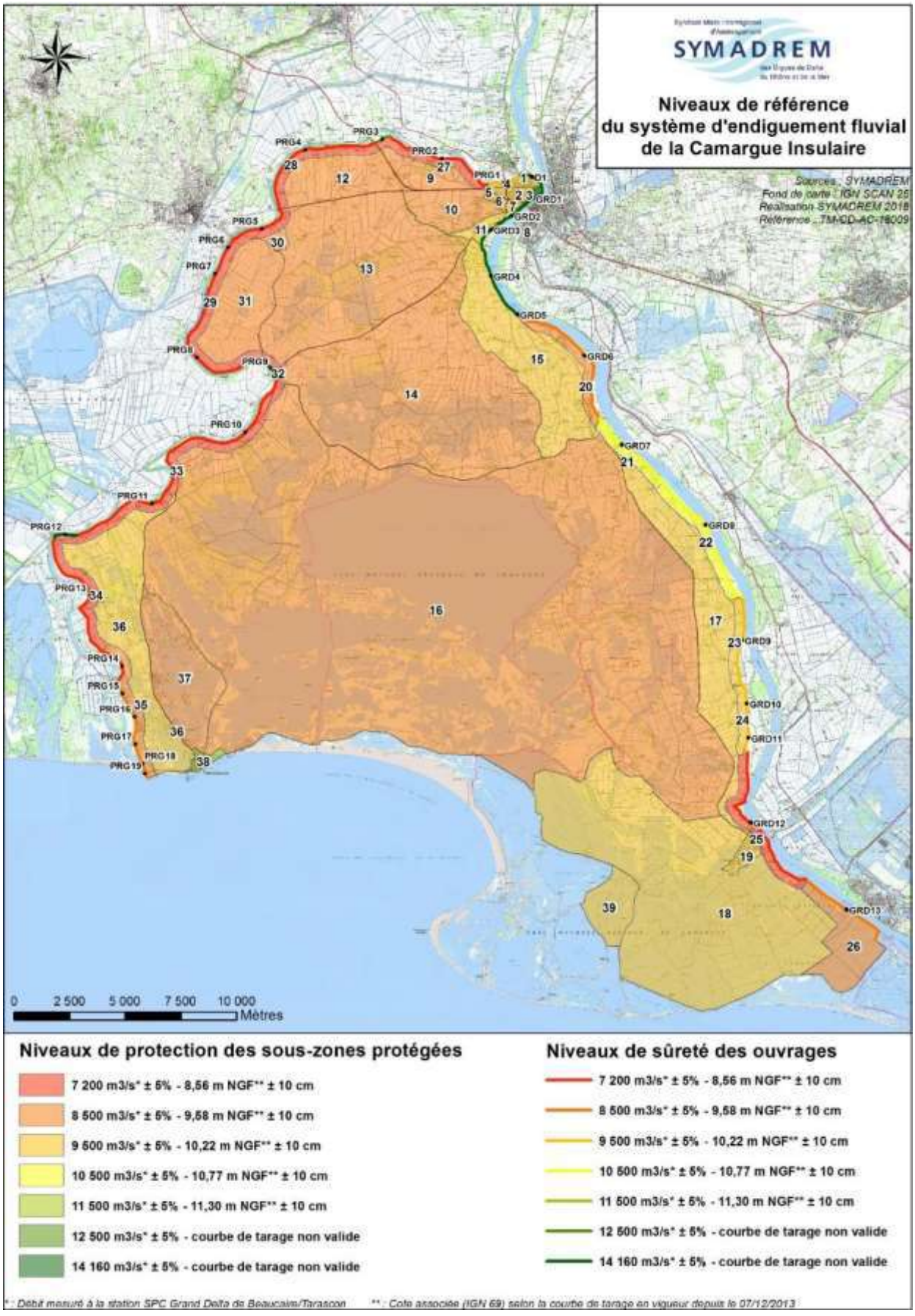


Figure 4. Niveaux de protection de la zone protégée

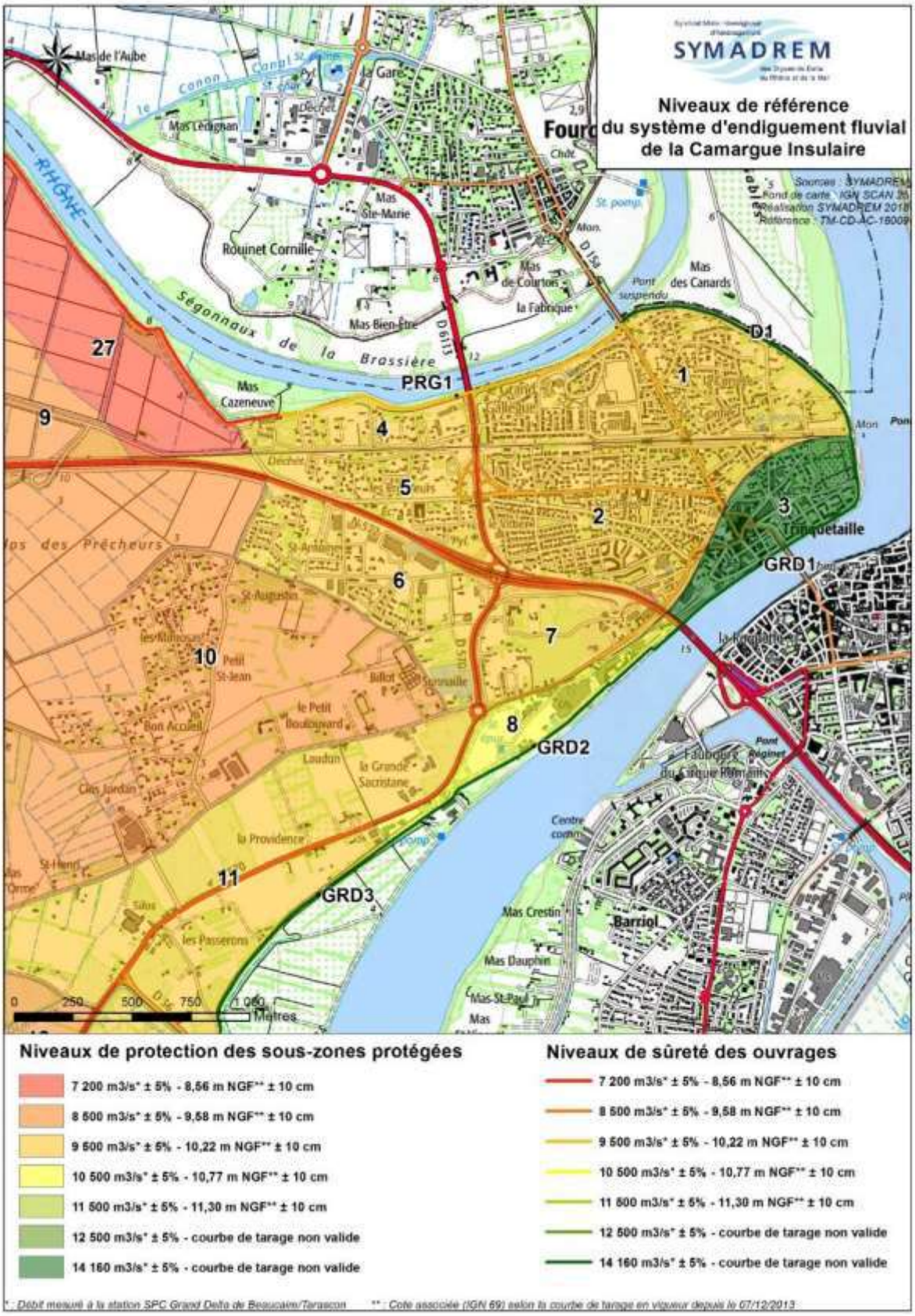


Figure 5. Niveaux de protection de la zone protégée – zoom en tête de Camargue

5 COMPORTEMENT POUR DE PLUS FORTES CRUES

Le système d'endiguement fluvial Camargue Insulaire ne comportant pas de digue résistante à la surverse, les entrées d'eau dues à une crue du Rhône ne se font que suite à une brèche.

Les brèches modélisées se situent à Cazeneuve (PRG 283) ; à Beaumont (PRG 288) ; à Figares (PRG 298.5) et au sud d'Albaron (PRG 308) pour le petit Rhône rive gauche. Concernant le Grand Rhône rive droite, les brèches modélisées se situent à l'aval de Petite Montlong (GRD 289) ; au niveau d'Augery (GRD 294), vers le mas de Bois Verdun (GRD 309) et au droit de Salin de Giraud (GRD316).

Les cartes d'inondation ci-après illustrent les conséquences possibles de brèche pour une crue dont le débit de pointe serait de 10 500 m3/s à Beaucaire/Tarascon, les conséquences seraient moindre pour des crues à 9 500 m3/s.

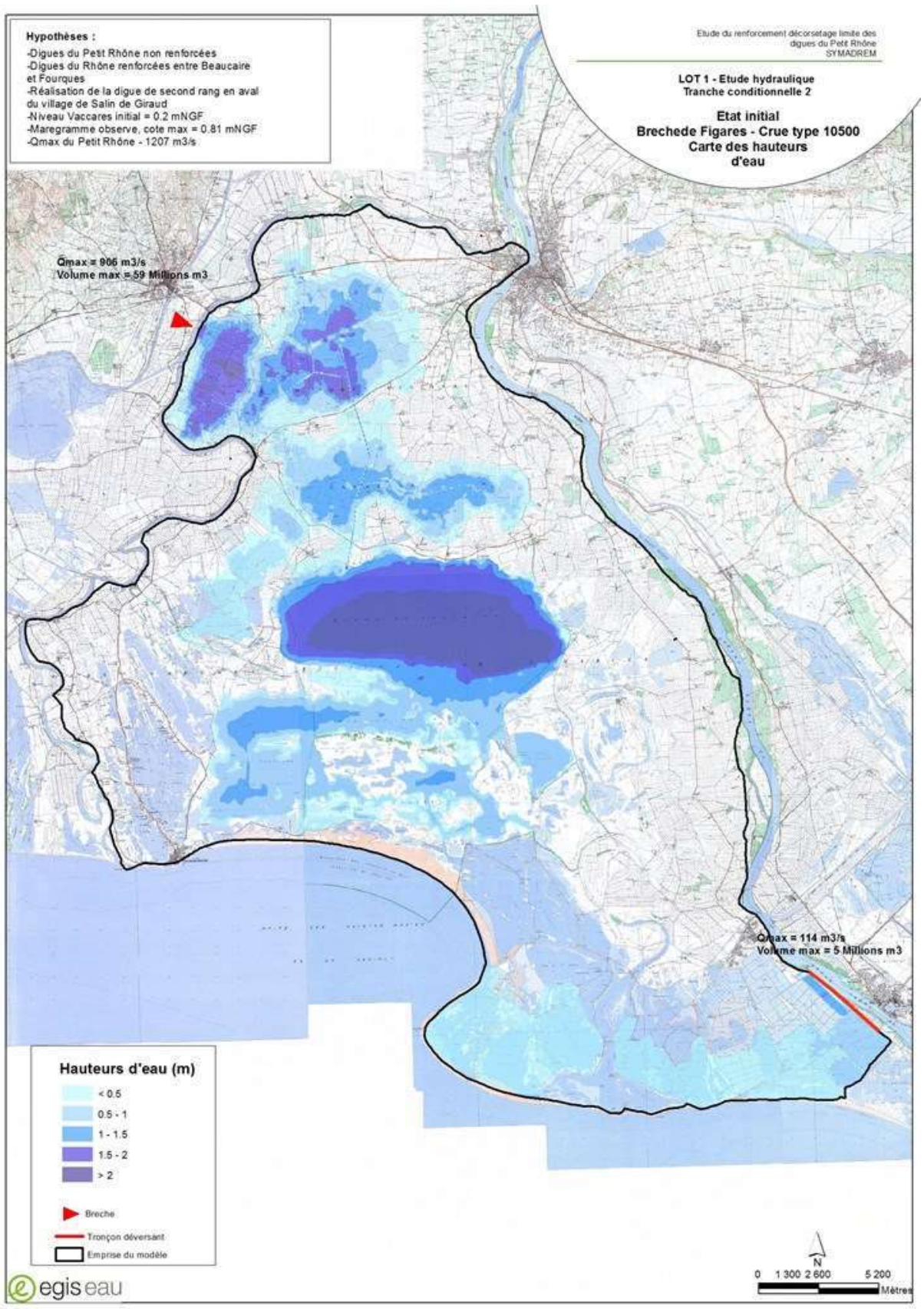


Figure 6. Conséquences possibles d'une brèche à Figarès

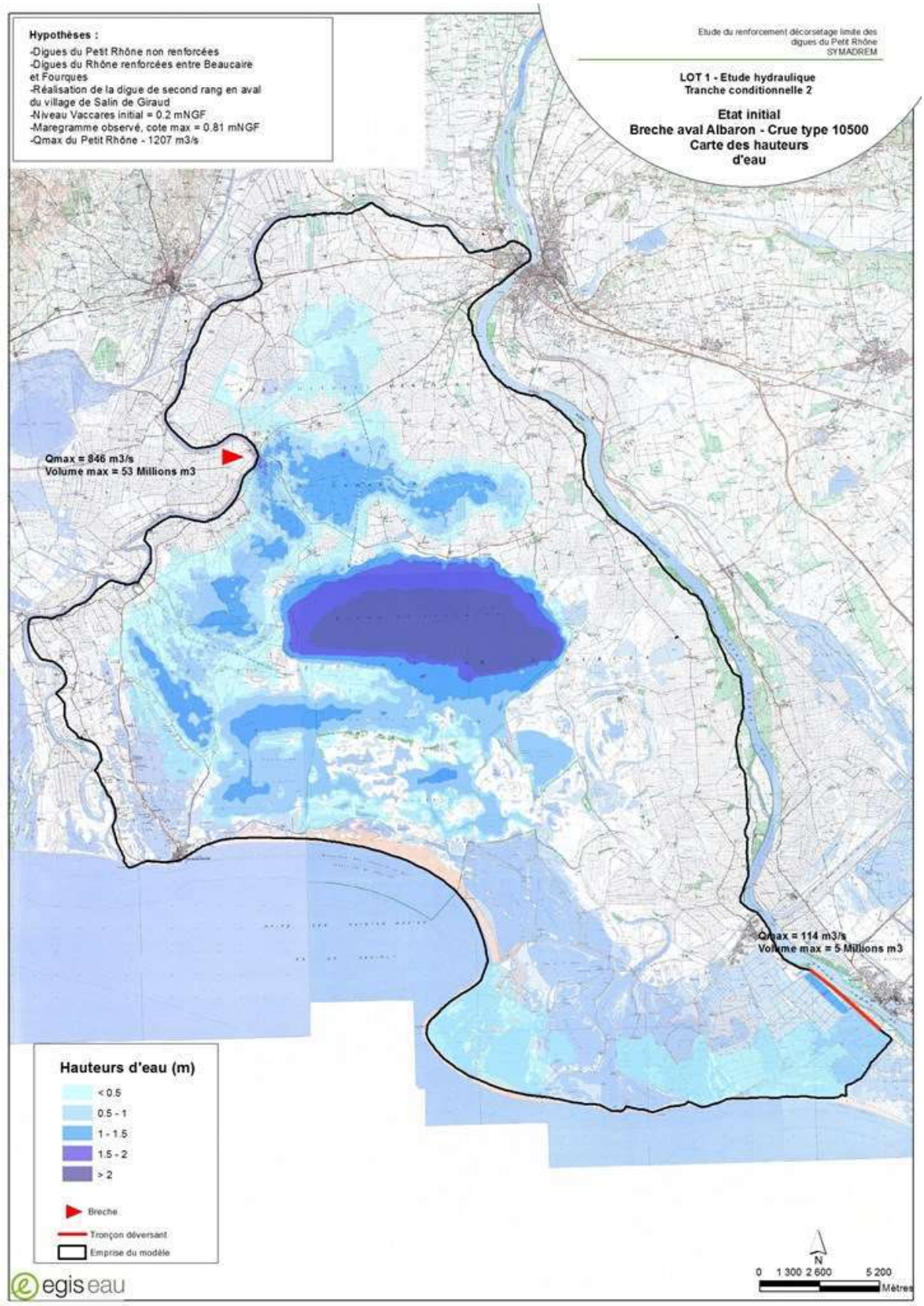


Figure 7. Conséquences possibles d'une brèche en aval d'Albaron

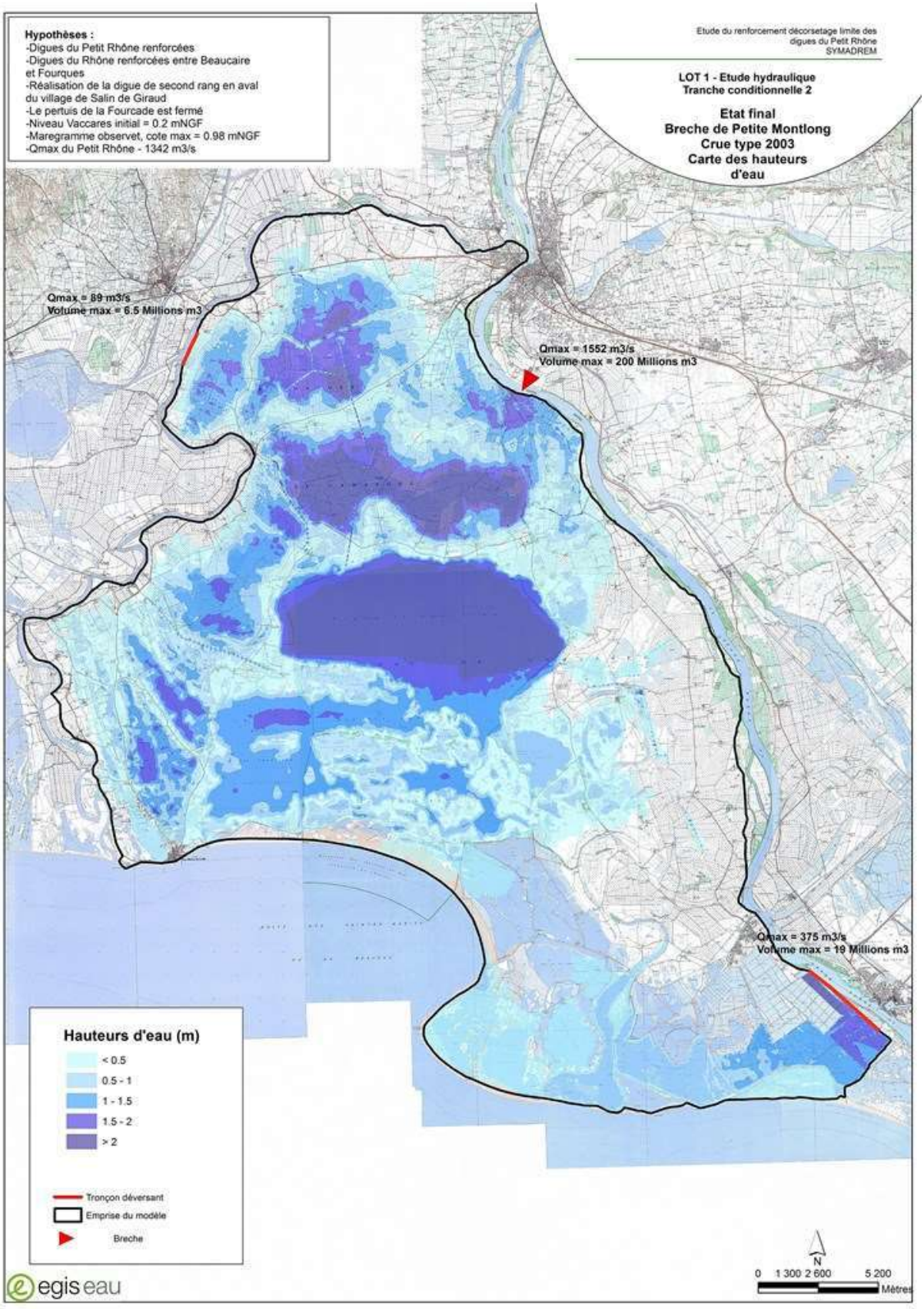


Figure 8. Conséquences possibles d'une brèche à Petite Montlong

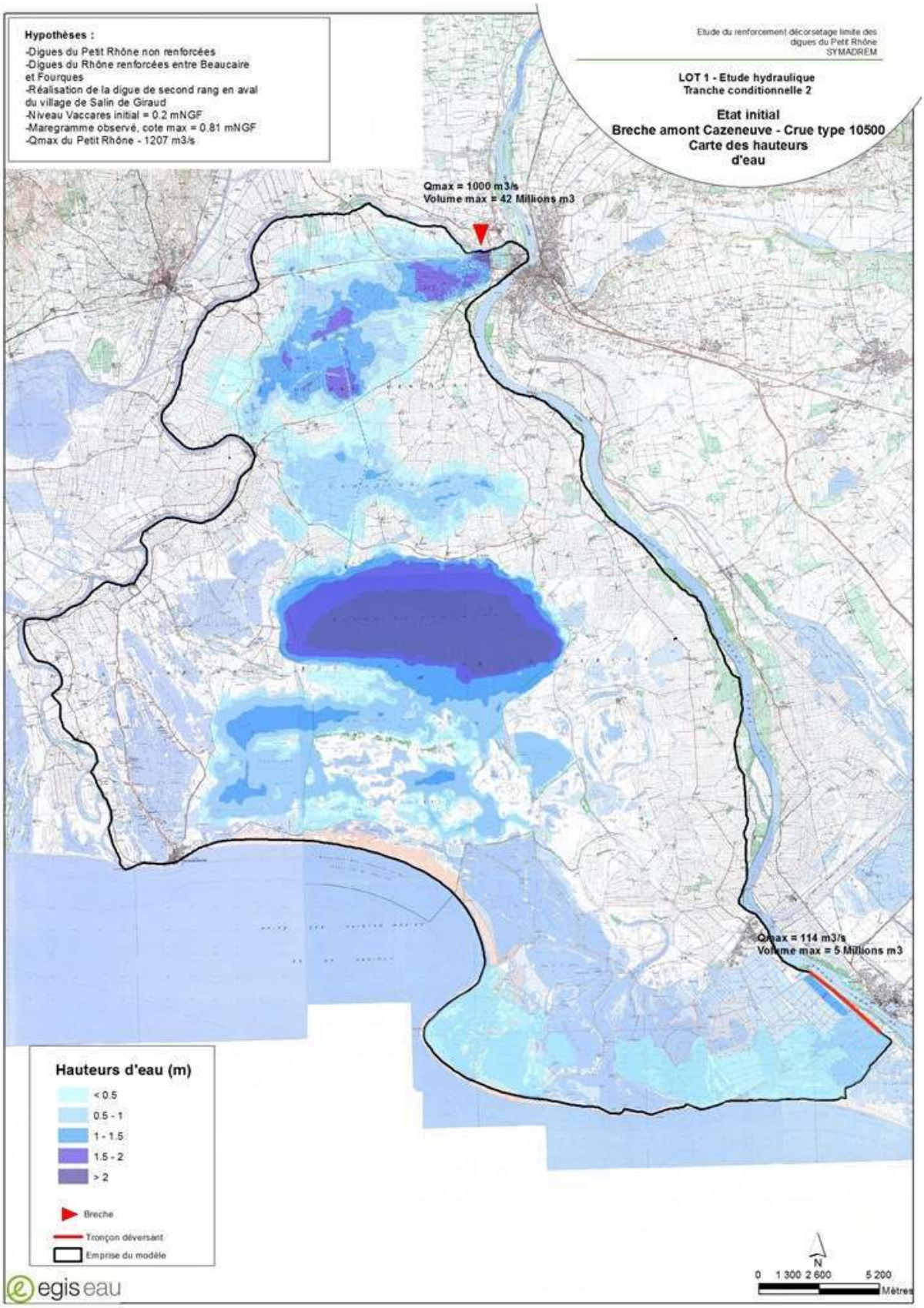


Figure 9. Conséquences possibles d'une brèche en aval du pont de la RN113 (petit rhône)

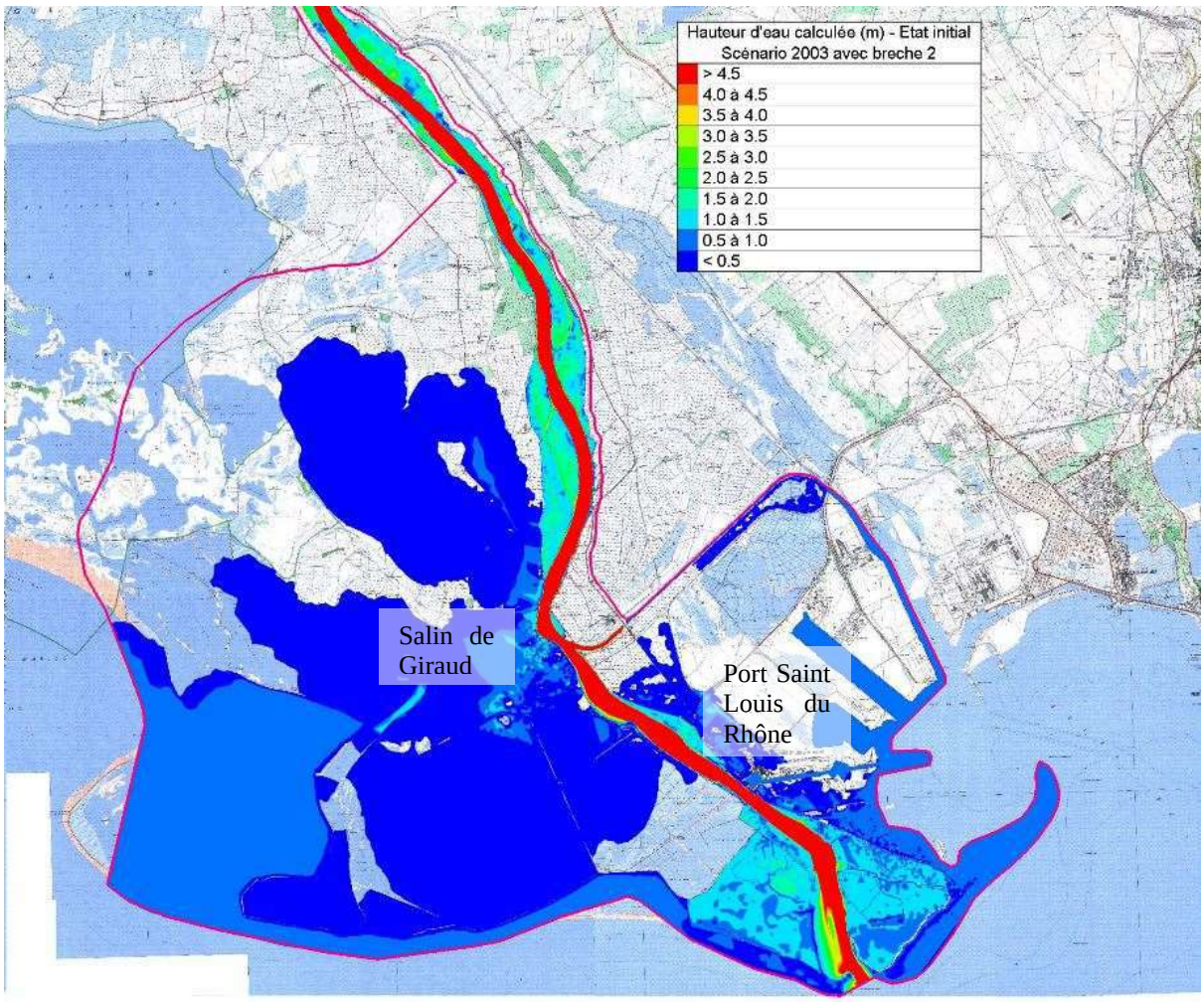


Figure 10. Conséquences possibles d'une brèche au droit de Salin de Giraud

6 ORGANISATION DU GESTIONNAIRE

La politique de prévention des accidents majeurs et du système de gestion de la sécurité est décrite dans le document intitulé « Description de l'organisation et des consignes mises en place pour assurer l'exploitation, l'entretien et la surveillance en toutes circonstances des ouvrages des systèmes d'endiguement fluviaux et maritime ».

Le document est présenté de façon à distinguer :

- L'organisation courante dans le cas de l'exploitation normale de l'ouvrage,
- L'organisation dans le cas des situations particulières (crues, tempêtes, séismes)

Il présente également les dispositions prescrites aux entreprises sur les secteurs faisant l'objet de travaux de confortement et placés sous la responsabilité des entreprises.

6.1 ORGANISATION DU SYMADREM EN SITUATION NORMALE

L'organisation du SYMADREM en situation normale comprend :

- La surveillance,
- La gestion,
- L'entretien et réparation.

La surveillance des ouvrages comprend des visites de surveillance régulières qui sont :

Tableau 8. Les différentes visites de surveillances régulières

Visites de surveillance régulière	Parcours de la visite	Fréquences	Moyens	Commentaires
Visite de surveillance programmée (VSP)	Digues fluviales et remblais Rideaux de palplanches Murs de quai verticaux ou inclinés Batardeaux et portes métalliques Epis et brises lames	1 x/ mois	Gardes digues – SYMADREM Véhicule de service à vitesse lente – A vélo - A pied	Les constatations effectuées au cours des VSP sont relevées sur une fiche.
Visite de surveillance programmée des dépendances (VSP dépendances)	Dépendances du système d'endiguement (chemins d'accès, barrières, bornes, panneaux…)	1x/ mois	Gardes-Digues – SYMADREM Véhicule de service – A vélo - A pied	Les constatations effectuées au cours des VSP des dépendances sont relevées sur une fiche de VSP dépendances.

Visite technique approfondie (VTA)	Digue fluviale et remblai Rideaux de palplanches Murs de quai verticaux ou inclinés Batardeaux et portes métalliques Epis et brises lames	1x/ an	Les VTA sont réalisées à pied par trois personnes sous la direction d'un ingénieur : une personne chemine en crête, une côté fleuve et une autre côté zone protégée, quand la végétation le permet.	Les constatations effectuées au cours de la VTA sont relevées sur une fiche de VTA. Ces constatations sont ensuite saisies dans le SIRS Digues.
Visite technique approfondie des berges (VTA berges)	Les berges des digues fluviales du système d'endiguement lorsque le ségonnal est inférieur à 20m.	1x/ 3 ans	Les VTA sont réalisées par voie nautique sous la direction d'un ingénieur.	Les constatations effectuées au cours de la VTA sont relevées sur une fiche de VTA.
Visite technique approfondie des Ouvrages hydrauliques traversants (VTA OHT)	Partie visible de l'OHT	1x/ 3 ans	Les VTA sont réalisées sous la direction d'un ingénieur.	Les constatations effectuées au cours de la VTA sont relevées sur une fiche de VTA.
Visite technique approfondie du mur du château (VTA Mur du Château)	Mur du château royal de Tarascon	1x/ 3 ans	La VTA est réalisé soit par voie nautique ou par un autre moyen (non défini à ce jour) sous la direction d'un ingénieur.	Les constatations effectuées au cours de la VTA sont relevées sur une fiche de VTA.

En plus des visites de surveillance régulières réalisées par le SYMADREM, les propriétaires d'ouvrages de tiers (tels que les ouvrages hydrauliques traversants, les batardeaux et portes et les écluses) doivent surveiller et entretenir leurs ouvrages.

Les conventions passées avec ces propriétaires précisent les modalités de surveillance, d'entretien et de réparation.

L'entretien et la réparation comprend :

- La programme des travaux au regard du bilan de la surveillance et en tenant compte des contraintes administratives et financières des suites à donner,

- Les travaux d'entretien réalisés en régie, ils sont réalisés par les gardes digues et comprennent divers travaux manuels de faible importance (débroussaillage ponctuel, piégeage…)
- Les travaux d'entretien réalisés en entreprise sont réalisés par une ou plusieurs entreprises de travaux publics et correspondent au débroussaillement général des digues de façon régulière. Et lorsque c'est nécessaire de travaux divers nécessitants du matériel spécifique,
- Un bilan des travaux d'entretien (à la fois financier et technique) est réalisé une fois par an.

La gestion comprend :

- La gestion foncière des ouvrages du SYMADREM, qui consiste à préserver l'intégrité des emprises, acquérir ou rétrocéder des terrains pour mettre en adéquation le patrimoine du SYMADREM et ses besoins et conventionner l'exploitation d'ouvrages appartenant à l'Etat.
- La délivrance d'autorisation de travaux et passation de convention d'occupation temporaire pour les ouvrages de tiers englobés dans les digues,
- La gestion administrative relative à l'exploitation.

6.2 ORGANISATION EN SITUATION DE CRUE

6.2.1 Mise en place et fonctionnement

Le PGOPC (Plan de Gestion des Ouvrages en Période de Crue) est un dispositif gradué de surveillance des ouvrages exploités par le SYMADREM. L'objectif est de détecter au plus tôt des désordres générés par la crue et le cas échéant, de procéder à des interventions d'urgence d'entreprises de travaux publics, afin d'éviter toute aggravation du phénomène qui pourrait entraîner la formation d'une brèche et l'inondation de la zone protégée. En fonction du débit du Rhône prévu à la station hydrométrique de Beaucaire/Tarascon, des procédures doivent être mises en place afin de surveiller les digues et intervenir en cas de nécessité.

Dès que les ouvrages sont sollicités par le fleuve en crue, une surveillance linéaire de ces ouvrages est mise en place et est assurée par des équipes de surveillance (équipes d'agents et, ou de volontaires) afin de détecter tout désordre généré par la crue.
Dès qu'un désordre est détecté par une équipe de surveillance, une évaluation de la gravité du désordre est effectuée par le SYMADREM, qui décide en tant que de besoin, de passer commande d'une intervention à l'entreprise titulaire du marché de travaux d'urgence aux fins d'exécuter les travaux nécessaires au traitement du désordre.

Le PGOPC est composé de trois entités distinctes dont les actions sont coordonnées entre elles, à savoir :

- le Poste de Commandement (PC) qui assure la direction fonctionnelle de la surveillance des ouvrages et des interventions d'urgence,
- la surveillance des ouvrages assurée par l'ensemble des équipes de surveillance supervisées par les gardes digues du SYMADREM,

- l'exécution de travaux d'interventions d'urgence, assurée par un groupement d'entreprises de travaux publics, désigné sous le vocable « entrepreneur d'interventions d'urgence ».

Le PGOPC est placé sous l'autorité du Directeur des Opérations (DO) qui est le Président du SYMADREM en exercice.

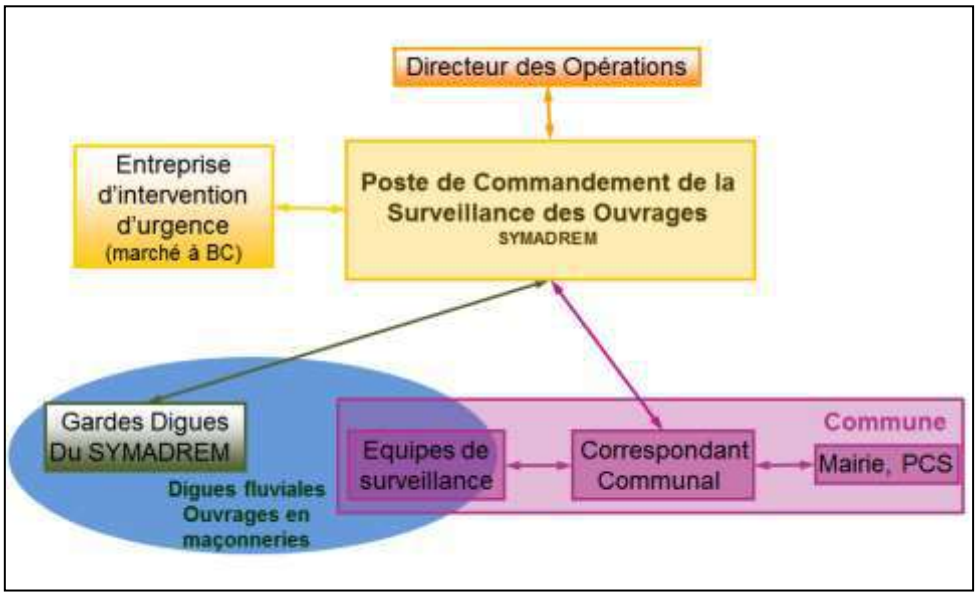


Figure 11. Synoptique des entités du PGOPC

Les ouvrages de protection contre les crues du Rhône exploités par le SYMADREM ont des caractéristiques géométriques et intrinsèques variées.

Pour tenir compte de cette configuration variée des ouvrages, ceux-ci sont répartis en quatre groupes distincts, groupe1 (G1), groupe 2 (G2), groupe 3 (G3) et groupe 4 (G4). Le détail des groupes ainsi que les débits associés aux différentes alertes sont disponibles au Chapitre 9.

La mise en place des différentes phases du PGOPC dépend de la prévision de débit du Rhône, à la station de Beaucaire/Tarascon.

En pré-alerte et alerte 1, le PC est mis en place dans une configuration réduite. Les gardes digues assurent la surveillance des ouvrages avec notamment la surveillance des points fragiles et la détection des terriers. Par ailleurs, il est demandé aux propriétaires d'ouvrage hydraulique traversant de fermer leurs ouvrages.
Le PC en configuration normale est mis en place lorsque la prévision indique un déclenchement de l'alerte 2. Dès l'alerte 2, les entreprises ayant le marché d'intervention d'urgence sont mobilisées, les gardes digues ouvrent l'ensemble des barrières d'accès aux digues et les équipes de surveillance sont présentes sur les ouvrages (de 9h à 17h).
En alerte 3, la surveillance se fait 24/24h.
L'alerte 4 correspond à l'atteinte du niveau de danger des ouvrages (ou niveau de protection pour les digues résistantes à la surverse). Dès le déclenchement de l'alerte 4, les équipes de surveillance arrêtent la surveillance de leur secteur.

6.2.2 Détection et traitement des désordres

6.2.2.1 Détection

Lorsqu'une équipe de surveillance détecte un désordre, elle prend contact avec le Correspondant Equipe (CE) du PC et donne toutes les indications utiles permettant de localiser le désordre à l'aide des bornes repères (Cf. photo ci-dessous) et d'en caractériser la gravité.

Photo 3. Borne repère

Lorsque le désordre est détecté directement par un garde digues, celui-ci prend contact avec le CE et il effectue les actions de sa fiche chronogramme des actions.

6.2.2.2 Confirmation

Lorsqu'un désordre a été signalé par une équipe de surveillance, le CE demande au garde digues correspondant de se rendre sur le lieu du désordre signalé, afin de donner des précisions supplémentaires et examiner s'il y a nécessité ou non d'effectuer une intervention d'urgence.

6.2.2.3 Traitement

Lorsqu'une intervention d'urgence est demandée par le garde digues, sur information du CE, le DT ou son représentant et l'entrepreneur se rendent sur le lieu du désordre afin d'examiner et commander les travaux d'urgence à effectuer.

L'exécution du traitement des désordres est placée sous la direction du DT du SYMADREM.
Le suivi du traitement de désordre est effectué par un chargé de suivi des travaux d'intervention d'urgence (poste du PC).

6.2.2.4 Principes d'interventions d'urgence en période de crues

Les travaux d'urgence ne doivent pas être comparés avec des travaux d'entretien ou des travaux de renforcement. Les interventions sont opérées le plus souvent en période de pluie peu propices au compactage des matériaux fins.

Les principes généraux d'intervention d'urgence sont :

- l'utilisation des techniques classiques de terrassement. Car elles sont maîtrisées par le SYMADREM ;
- l'utilisation de matériaux pulvérulents pour les interventions côté aval et l'utilisation de matériaux très plastiques en cas d'utilisation d'argile côté amont ;
- les interventions du côté zone protégée (aval) sont préférées aux interventions côté fleuve (amont) ;
- l'utilisation de matériaux d'apport (laitier, ballast, enrochements) entreposés sur des aires de stockage localisées à proximité des digues ;

Ces travaux ne sont pas destinés à être permanents et doivent faire l'objet d'un diagnostic post crue.

6.2.3 Brèche

Lorsqu'une brèche est constatée par une équipe ou un garde digues, le DPC ordonne le retrait des équipes de surveillance des secteurs proches et le retour à leur lieu de départ.

Le DT ou son représentant se rend sur la brèche ou rupture de digue par tout moyen afin d'examiner les dispositions à prendre pour lancer le colmatage de celui-ci.

Le suivi du traitement de la brèche est effectué par un chargé de suivi des travaux d'intervention d'urgence (poste du PC).

6.2.4 Post crue

6.2.4.1 Achèvement des interventions d'urgence et remise en état des installations

Après la crue, les interventions d'urgence en cours d'exécution doivent être limitées à la stricte mise en sécurité des ouvrages, afin de faire face à une éventuelle nouvelle crue.

Dans le cadre de l'achèvement des interventions d'urgence, toutes les installations qui ont été détériorées pendant la crue, sont remises en état.

6.2.4.2 Bilan financier de la crue

Dès la fin des interventions d'urgence et/ou de la période d'activation du PGOPC, le bilan financier de la crue est établi par le SYMADREM.

6.2.4.3 Retour d'expérience

Des retours d'expériences sont effectués, portant sur chacun des postes du PCSO, sur la surveillance des ouvrages et sur les interventions d'urgences éventuelles.

De même, au sein des communes sur le territoire desquelles la surveillance linéaire a été mise en œuvre, un retour d'expérience est effectué et remis au SYMADREM.

Un rapport de synthèse est établi à partir des retours d'expériences partiels.
A partir des retours d'expérience des crues et des exercices de simulation, des modifications mineures et des ajustements sont apportés en tant que de besoin, à titre d'adaptation mineure du PGOPC.
Par nature, le PGOPC est un outil non figé qui doit s'enrichir des expériences vécues afin de satisfaire au mieux les objectifs visés en matière de surveillance des digues et des ouvrages.

6.2.4.4 Rapport post crue

Après chaque crue, une Visite de Surveillance Post Crue (VPC) des tronçons d'ouvrages est programmée. Sur les secteurs de surveillance (concernés à minima par l'alerte 2) la VPC est effectuée sur les principes d'une Visite Technique Approfondie (VTA).
Pour les secteurs n'ayant pas dépassé le niveau d'alerte 2, la VPC est effectuée suivant les modalités de la VSP.

Nonobstant l'établissement du rapport post crue, le cas échéant, des déclarations d'Evénement Importants pour la Sûreté Hydraulique (EISH) sont établies et transmises au Préfet.

Le Rapport post crue est intégré au rapport de surveillance des ouvrages.

6.2.4.5 Exercices de simulation de crue

Des exercices de simulation, portant sur la mise en œuvre partielle du PGOPC sont prévus biennalement.

Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement SYMADREM des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DES SYSTEMES D'ENDIGUEMENT FLUVIAUX DU DELTA DU RHONE

DOCUMENT B

CHAPITRE N°4 : CARACTERISATION DES ALEAS NATURELS

Digue de Fourques en décembre 2003 ©P. Royet - IRSTEA

SOMMAIRE

1 Crues du Rhône 3
1.1 Bassin versant et type de crues 3
1.2 Hydrométrie et limnimétrie 5
1.3 La crue de mai 1856 21
1.4 La crue de Novembre 1840 28
1.5 Les autres grandes crues du XIX^{ème} siècle 34
1.6 Les grandes crues du XX^{ème} siècle jusqu'en 1992 40
1.7 Les crues de 1993 à 2002 44
1.8 La crue des 3 et 4 décembre 2003 57
1.9 Crues de novembre 2014 63
1.10 Synthèse crues récentes 65
1.11 Comparaison des crues de 2003, 1840 et 1856 70
1.12 Hydrologie 72
1.13 Modélisation hydraulique des crues 101
1.14 Comparaison entre niveaux modélisés et niveaux observés 118
2 Géomorphologie et Morphodynamique 124
2.1 Géomorphologie du Delta - Beaucaire à la diffluence 124
2.2 Géomorphologie du Delta - Diffluence aux embouchures 126
2.3 Chronologie des aménagements hydrauliques 131
2.4 Synthèse des paléo-chenaux 133
2.5 Morpho-dynamique du Rhône entre Beaucaire et Arles 135
2.6 Morpho-dynamique du Petit Rhône 139
2.7 Morpho-dynamique du Grand Rhône 161
2.8 Inspection nautique des berges 201
2.9 Synthèse et conclusion sur le risque d'affouillement externe 219
3 Le Vent 287
3.1 Données de vents 287
3.2 Vents observés lors des crues sup. à la décennale depuis 1993 290
3.3 Run-up 300
3.4 Conclusion et identification des secteurs exposés au effet du vent 308
4 Séismes 312

Ce Chapitre est commun aux études de dangers des systèmes d'endiguement fluviaux du delta du Rhône : « Rive Gauche », « Camargue Insulaire » et « Rive Droite ».

1 CRUES DU RHONE

1.1 BASSIN VERSANT ET TYPE DE CRUES

Le Rhône a un bassin versant de 95 500 km².

Figure 1. Bassin versant du Rhône et zone protégée par les ouvrages du SYMADREM

Compte tenu de son étendue, il présente un régime hydrologique singulier et est soumis aux deux influences des climats océaniques et méditerranéens. Les travaux de Maurice Pardé ainsi que l'analyse hydrométéorologique réalisée pour l'étude globale du Rhône (EGR) mettent en évidence quatre types de crues :

- Les crues océaniques : Elles sont dues aux précipitations abondantes sur la partie du bassin versant située au nord de Montélimar. Elles concernent le Rhône alpestre, le Rhône supérieur et la Saône. Les perturbations en provenance de l'Atlantique sont essentiellement actives d'octobre à mars.
- Les crues cévenoles : Elles résultent d'épisodes pluvieux accompagnés d'orages violents qui se produisent sur le pourtour du massif central (Ardèche, Eyrieux, Cèze, Gardon). Ce sont des crues violentes et rapides et concernent une période s'échelonnant de septembre à octobre.
- Les crues méditerranéennes : Elles sont plus tardives que les crues cévenoles, caractérisées par des orages violents localisés sur les Alpes du sud et le couloir rhodanien (Ouvèze, Aygues, Durance).

- Les crues généralisées : Elles sont issues de la combinaison de plusieurs épisodes pluvieux de type océanique et méditerranéen. Elles affectent l'ensemble du bassin versant.

La figure ci-dessous illustre l'origine des différentes crues.

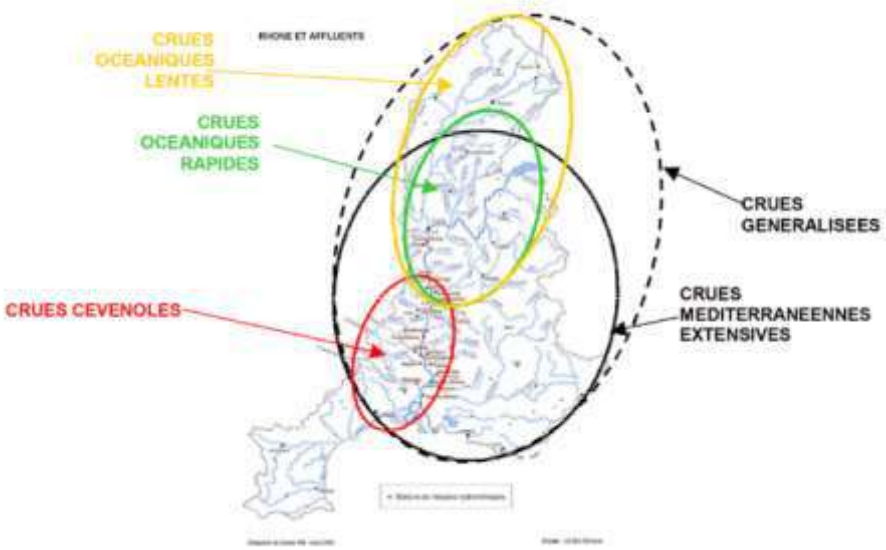


Figure 2. Typologie des crues du Rhône (source DUBAND [02003 10])

La comparaison des limnigrammes et du type de crues permet de voir que les crues ont des déroulements bien différents en fonction de leur l'origine météorologique. Ainsi les crues cévenoles et méditerranéennes sont très brèves, même si l'hydrogramme de la crue de décembre 2003 est épais au regard des autres crues méditerranéennes.

Les crues généralisées ont de leur côté des hydrogrammes plus épais. On notera que depuis 1840, aucune crue océanique n'a généré dans le Delta de crues supérieures à la crue décennale.

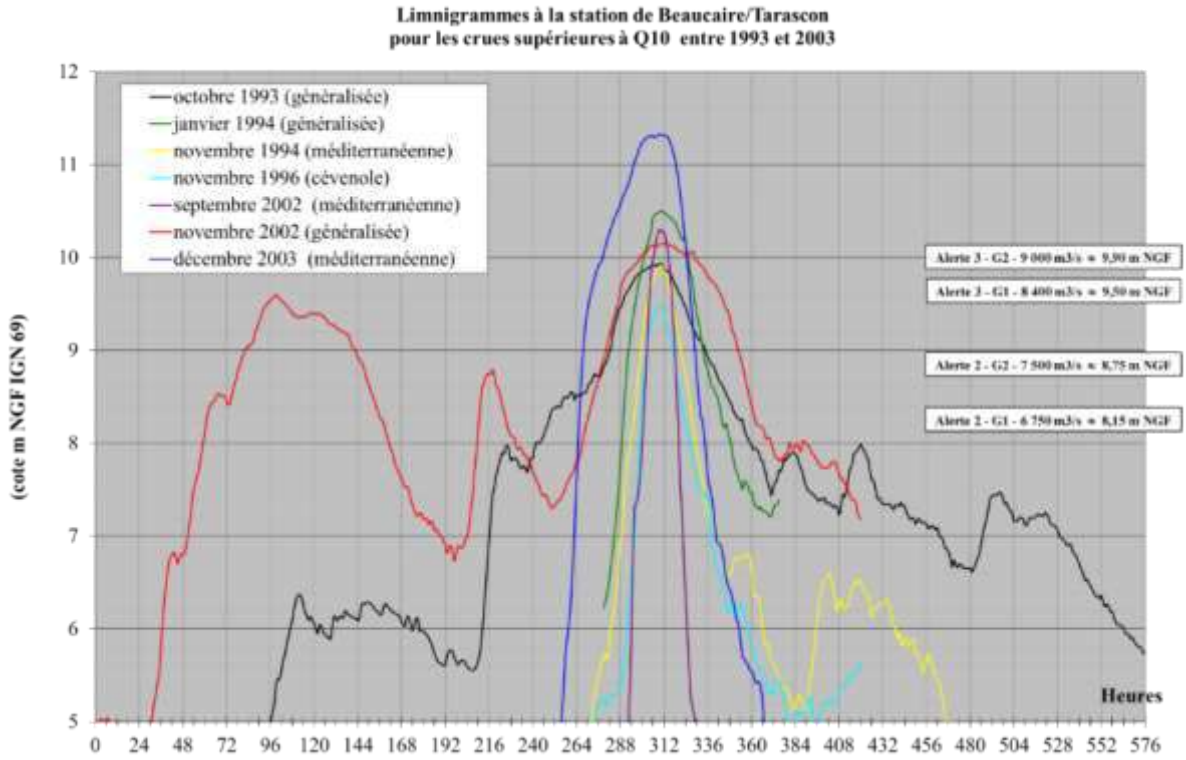


Figure 3. Limnigrammes à la station de Beaucaire/Tarascon (source CNR [K203])

1.2 HYDROMETRIE ET LIMNIMETRIE

1.2.1 Historique des mesures de débits

Historiquement les débits des crues étaient estimés à partir des niveaux enregistrés à l'échelle du Pont de Beaucaire (PK 267,7) en rive droite du Vieux Rhône. Depuis les aménagements de la CNR, les débits sont mesurés à la station de Beaucaire/Tarascon située en rive gauche du Rhône au PK 269,6 juste en aval de la confluence du Vieux Rhône transitant par le barrage de Vallabrègues et le Rhône dérive transitant par l'usine hydro-électrique de Beaucaire.

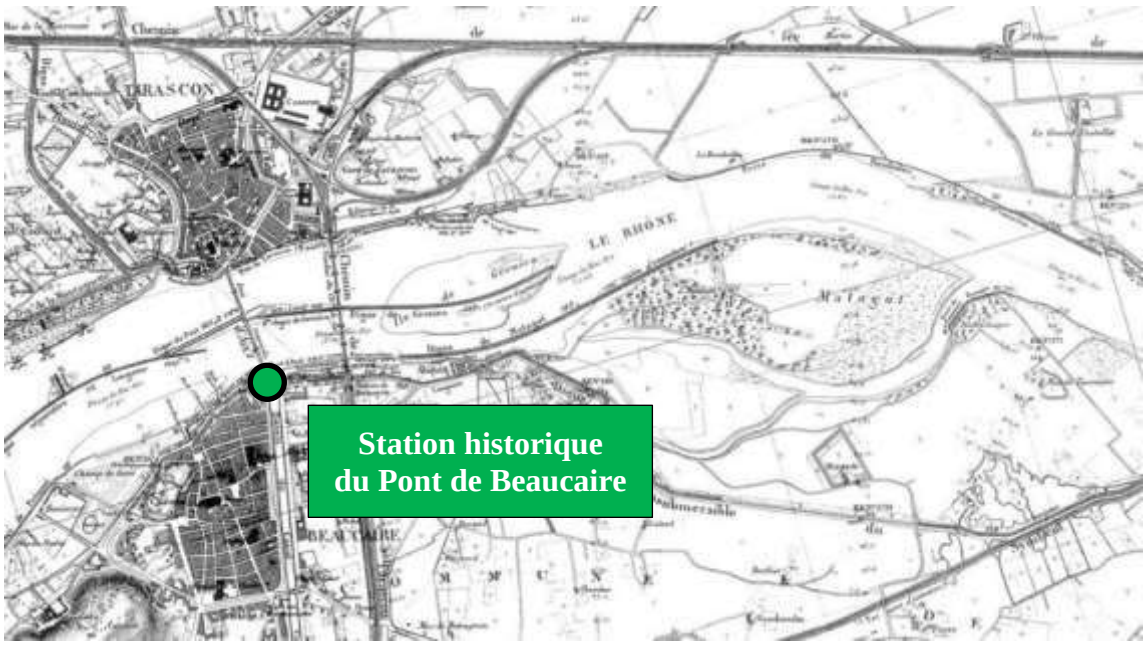


Figure 4. Traversée de Beaucaire/Tarascon en 1876 (carte des Ponts et Chaussées [H0003])

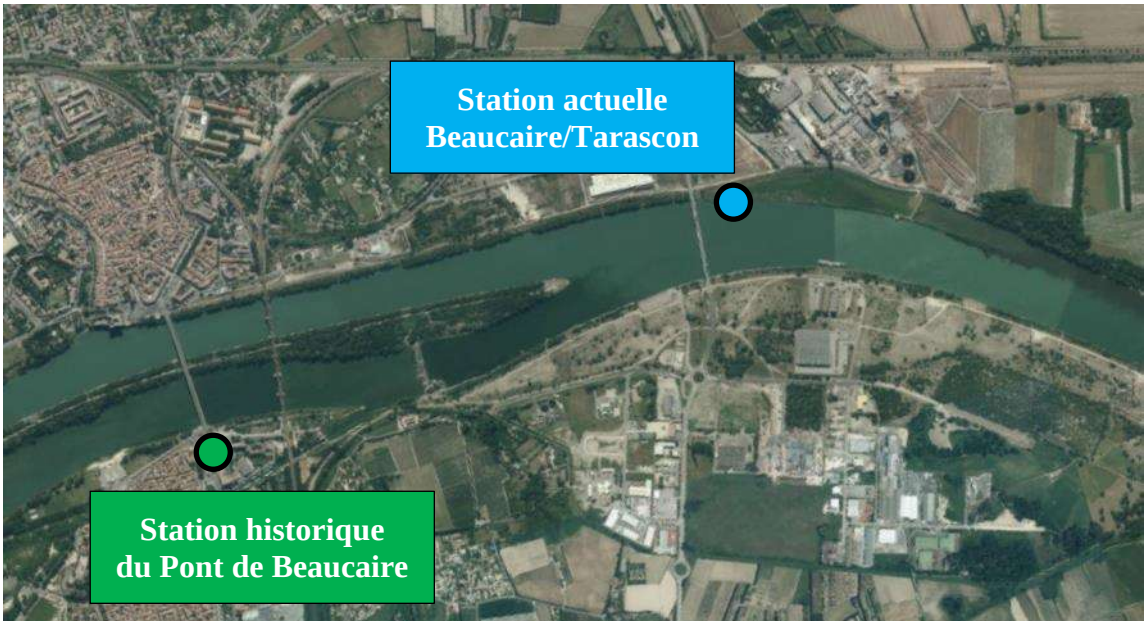


Figure 5. Traversée de Beaucaire/Tarascon en 2013 (source géoportail)

Le profil du lit du fleuve entre Beaucaire et Arles et plus particulièrement au droit du PK 269,6 a considérablement été modifié depuis 1840.

Parmi les grands changements de configuration, on notera :

- Le rehaussement des digues entre Beaucaire et Fourques après la crue de 1840 et la création du remblai ferroviaire entre Tarascon et Arles en lieu et place de l'ancienne chaussée du Trébon,
- Les aménagements liés à la navigation dans la 1ère moitié du XX^{ème} siècle,

- La réalisation des Sites Industrialo-Portuaires de Beaucaire, Tarascon et Arles, au début des années 1970, qui ont consisté à remblayer une partie du lit mineur et du lit moyen.

A contrario, le lit du fleuve dans la traversée de Beaucaire/Tarascon a subi peu de modifications géomorphologiques tant en section d'écoulement qu'en bathymétrie. Lors de la construction du canal du Rhône à Sète, une échelle fut posée. Les premières observations datent de 1816. Si aujourd'hui, elle n'est plus la station de référence, les niveaux continuent d'être enregistrés par le SPC Grand Delta. Par ailleurs, comme le note l'historien Georges PICHARD [H0004] « la stabilité et la longévité de cette échelle est évidemment exceptionnelle pour le bas Rhône » et permet de classer de façon pertinente les crues historiques en fonction du niveau atteint au droit de cette station.

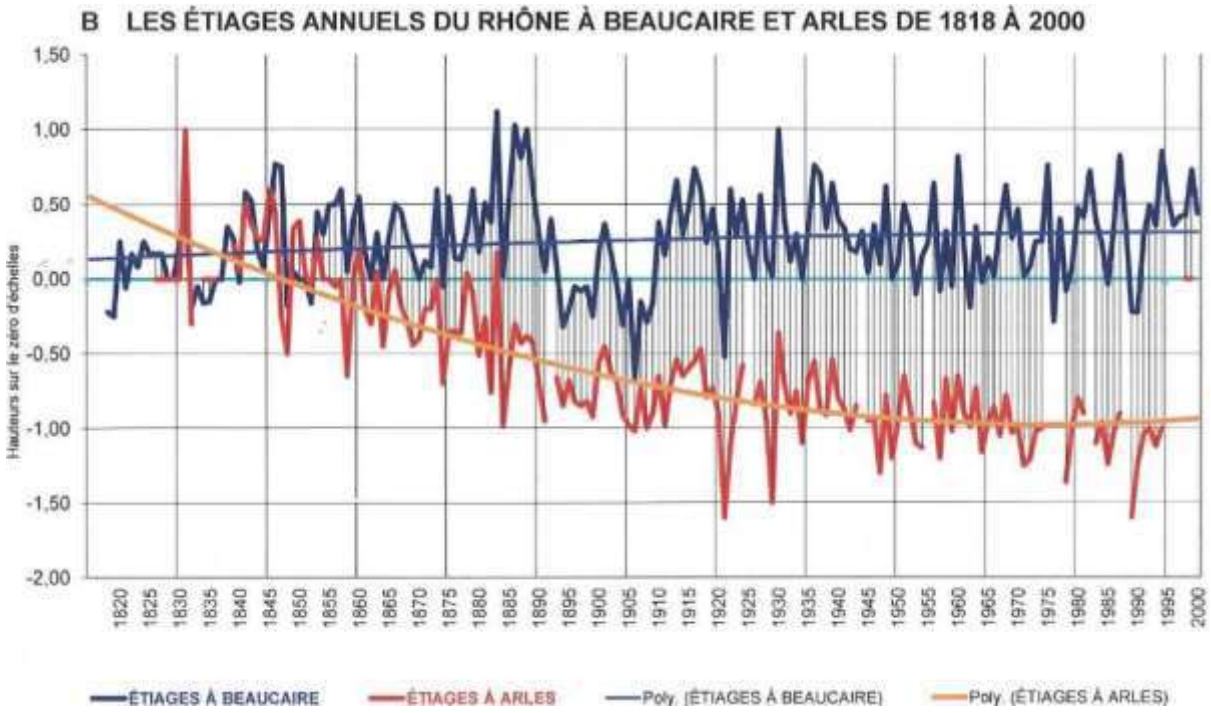


Figure 6. Comparaison des étiages à Beaucaire et Arles entre 1818 et 2000 (Pichard [H0004]

1.2.2 Courbes de tarage historique

Comme indiqué plus haut, les débits étaient mesurés à la station de pont de Beaucaire au droit de l'ancienne écluse du canal du Rhône à Sète. Pichard G. [H0004] dresse un historique des courbes de tarage qui se sont succédées (Cf. équations paraboliques ci-dessous) :

- Surrel (1847) : $Q = 3200$ pour $H = 3$ et $Q = 10000$ pour $H = 7$
- Rondel 1 (vers 1860) : $Q = 500 + 650\,h + 100\,h^2$ ($h < 5$ m)
- Rondel 1 (vers 1860) : $Q = 2105 + 8\,h + 164\,h^2$ ($h > 5$ m)
- Rondel 2 (vers 1860) : $Q = 500 + 625\,h + 112{,}5\,h^2$ ($h < 4$ m)
- Rondel 2 (vers 1860) : $Q = 400 + 675\,h + 106{,}25\,h^2$ ($h > 4$ m)
- Ponts et Chaussées (XIX^{ème}) : $Q = 400 + 760\,h + 105\,h^2$
- Ponts et Chaussées (1875) : $Q = 650 + 600\,h + 100\,h^2$
- Pardé (1919-1925) : $Q = 2580$ pour $H = 3$ et $Q = 8760$ pour $H = 7$
- Service Navigation (1920-1951) : $Q = 2678$ pour $H = 3$ et $Q = 8600$ pour $H = 7$

Le zéro de cette échelle correspond, d'après les documents anciens, à une cote de 3,45 m NGF ortho, soit 3,48 m NGF.
Le SYMADREM a fait lever en 2010 [K008] le 8 de l'échelle actuelle au pont du Beaucaire. Il était égal à 11,38 m NGF, soit un zéro de l'échelle à 3,38 m NGF. Selon l'étude en cours de la DREAL de Bassin pour la révision hydrologique du Rhône, il semblerait que le zéro de l'échelle n'ait pas été modifié et que la valeur de 3,48 m NGF soit à remplacer par la valeur de 3,38 m NGF. Des corrections ont été apportées en conséquence dans le document par rapport à la version de l'étude de dangers soumise à enquête publique à l'automne 2017.

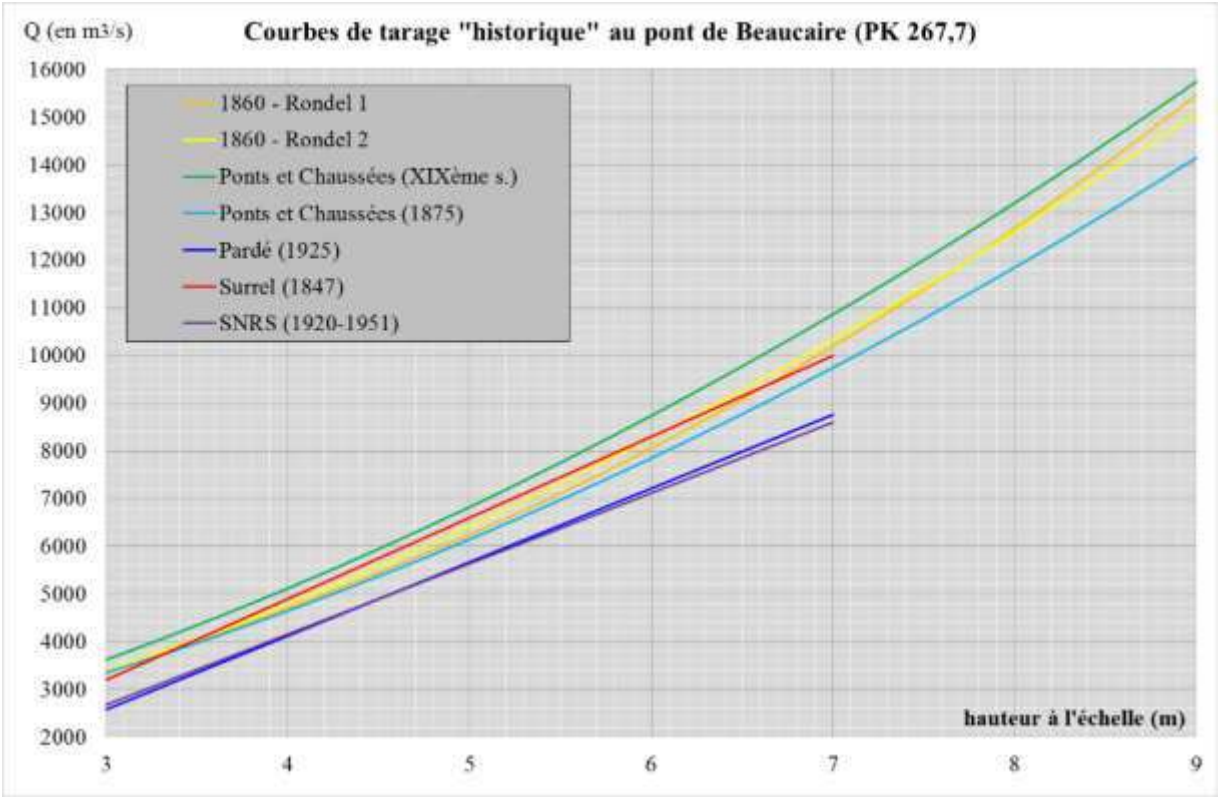


Figure 7. Courbes de tarage historique au pont de Beaucaire d'après Pichard [H0004]

1.2.3 Nivellement (source IGN)

Plusieurs réseaux de Nivellement Général de la France ont existé de 1840 à aujourd'hui.

Dans la première moitié du XIX^{ème} siècle, il n'existait pas de réseau nivellement national et les réseaux locaux avaient des origines diverses. Dans la grande région de Marseille, cette origine était le plus souvent la graduation zéro de l'échelle de marée implantée dans le Vieux-Port de Marseille, à proximité du fort Saint-Jean. Cette graduation était considérée comme étant le niveau des basses mers.

Ensuite, trois réseaux de Nivellement Général de la France (NGF) se sont succédé sur le sol de la métropole :

- le réseau établi par Paul Adrien Bourdaloue de 1857 à 1864 (NGF/Bourdaloue)
- le réseau établi par Charles Lallemand (NGF/Lallemand)
- le réseau établi par l'Institut Géographique National (NGF/IGN69)

L'origine du réseau Bourdaloue, appelée "zéro Bourdaloue" fut fixé par décision ministérielle du 13 janvier 1860 comme étant le trait 0,40 m de l'échelle de marée du Fort St-Jean à Marseille. Les documents anciens semblent montrer que le calcul des altitudes de ce réseau ne faisait pas intervenir de mesures de gravimétrie.

En 1884, Charles Lallemand fut chargé d'établir un réseau de nivellement sur l'ensemble du territoire. Ce réseau est appelé NGF-Lallemand. L'origine de ce réseau a été déterminé à l'issue d'observations marégraphiques obtenues au marégraphe de Marseille du 1er février 1885 au 1er janvier 1897 (niveau moyen de la mer), qui se trouve à 71 mm au-dessous du "zéro Bourdaloue". Les altitudes de ce réseau sont de type orthométrique, prenant en compte des valeurs de pesanteur théorique.

Le réseau NGF/Lallemand s'étant dégradé, l'IGN décidait la remise en état du 1er ordre de 1962 à 1969, en conservant l'origine du réseau NGF-Lallemand, les altitudes étant de type normal, prenant en compte un modèle utilisant des mesures de pesanteur réelle. Ce réseau est appelé NGF/IGN69 (pour la France continentale) et NGF/IGN78 (pour la Corse, l'origine étant alors le niveau moyen de la mer à Ajaccio).

Des grilles de correction, disponibles à l'adresse ci-dessous permettent de convertir des altitudes orthométriques NGF/Lallemand en altitude normales NGF/IGN69.

http://professionnels.ign.fr/ficheProduitCMS.do?idDoc=5276264

Sur certains plans anciens figure « mer moyenne », plusieurs référentiels existaient, ainsi le niveau moyen de la mer à Port de Bouc était considéré à 3 cm au-dessous de celui de Marseille.

De la même façon, en 1882, la mer moyenne à Sète était par exemple considérée comme étant à 18,4 cm au-dessus de la mer moyenne à Marseille (note du Comité du Nivellement Général de la France sur les marégraphes français – séance du 14 novembre 1882 du Comité du nivellement).

Les données de la CNR sont indiquées en m NGF ortho.

Dans la suite du document, la mention NGF sans autre précision indiquera une cote en m NGF IGN69.

1.2.4 Mesure actuelle des débits et niveaux

Pour la mesure des débits, 2 stations sont référencées sur le site actuel de Beaucaire/Tarascon :

- la V7200010 dont la gestion est assurée par la CNR et avec des données depuis 1920 (mais uniquement en débit) ;
- la V7200015, dont la gestion est assurée par le Service de Prévision des Crues du Grand Delta (SPCGD), avec des données en niveau et débit bancarisées depuis la création du service.

L'espace de mesure entre les 2 capteurs/stations est de 10m mais rattachée à la même échelle (celle de la CNR en rouge).
La campagne de nivellement menée en 2013 par le SPCGD donne un zéro de l'échelle à « -0.017 m NGF IGN 69 », ce qui correspond approximativement au zéro ortho.
Compte tenu de l'erreur potentielle de mesure du capteur et de la précision centimétrique du relevé de nivellement, cet écart entre le zéro de l'échelle et 0 m NGF IGN69 est jugé par le SPCGD comme acceptable.
On notera que les données limnimétriques servant de base au calcul des débits sont données avec une précision en Z de 10 cm, ce qui permet également de relativiser cet écart.
Il existe également 9 stations limnimétriques dans le Delta exploitées par la CNR. Les niveaux d'eau sont relevés en cote NGF orthométrique (zéro Lallemand). Des corrections pour obtenir les niveaux en NGF IGN 69 sont nécessaires. Elles figurent ci-dessous

Tableau 1. Principales stations limnimétriques dans le Grand Delta du Rhône

Station	Bras du Rhône	PK Rhône	IGN69 - ortho
Aval Barrage de Vallabrègues	Vieux Rhône	262.9	+ 3 cm
Usine de Beaucaire	Rhône dérivé	264.9	+ 3 cm
Pont de Beaucaire	Vieux Rhône	267.7	+ 3 cm
Beaucaire/Tarascon	Rhône	269.6	+ 3 cm
Prise d'eau canal BRL	Rhône	277.3	+2 cm
Arles	Grand Rhône	282.6	+2 cm
Fourques	Petit Rhône	281.0	+2 cm
Saint Gilles	Petit Rhône	297.3	+2 cm
Petite Abbaye	Petit Rhône	323.9	+2 cm
Grand Boisviel	Grand Rhône	306.5	+ 3 cm

1.2.5 La crue de décembre 2003 et la conférence de consensus

Le déroulement des événements est bien connu. Une monographie reprenant le déroulement des événements a été réalisée par la DREAL Rhône Alpes [A2003 19] avec un volet météorologique réalisé par Météo France.

La pointe de crue est intervenue à la station de Beaucaire/Tarascon le 3 décembre 2003 à 21 heures. Le débit de pointe à Tarascon/Beaucaire, annoncé sur le site InfoRhône de la CNR et par le service d'annonce des crues [O2003 01] était supérieur à 13 000 m^3/s.

Le graphique figurant ci-après, établi en temps réel par le directeur du SYMADREM, à partir des débits annoncés sur le site InfoRhône de la CNR permet de reproduire la dynamique de la crue.

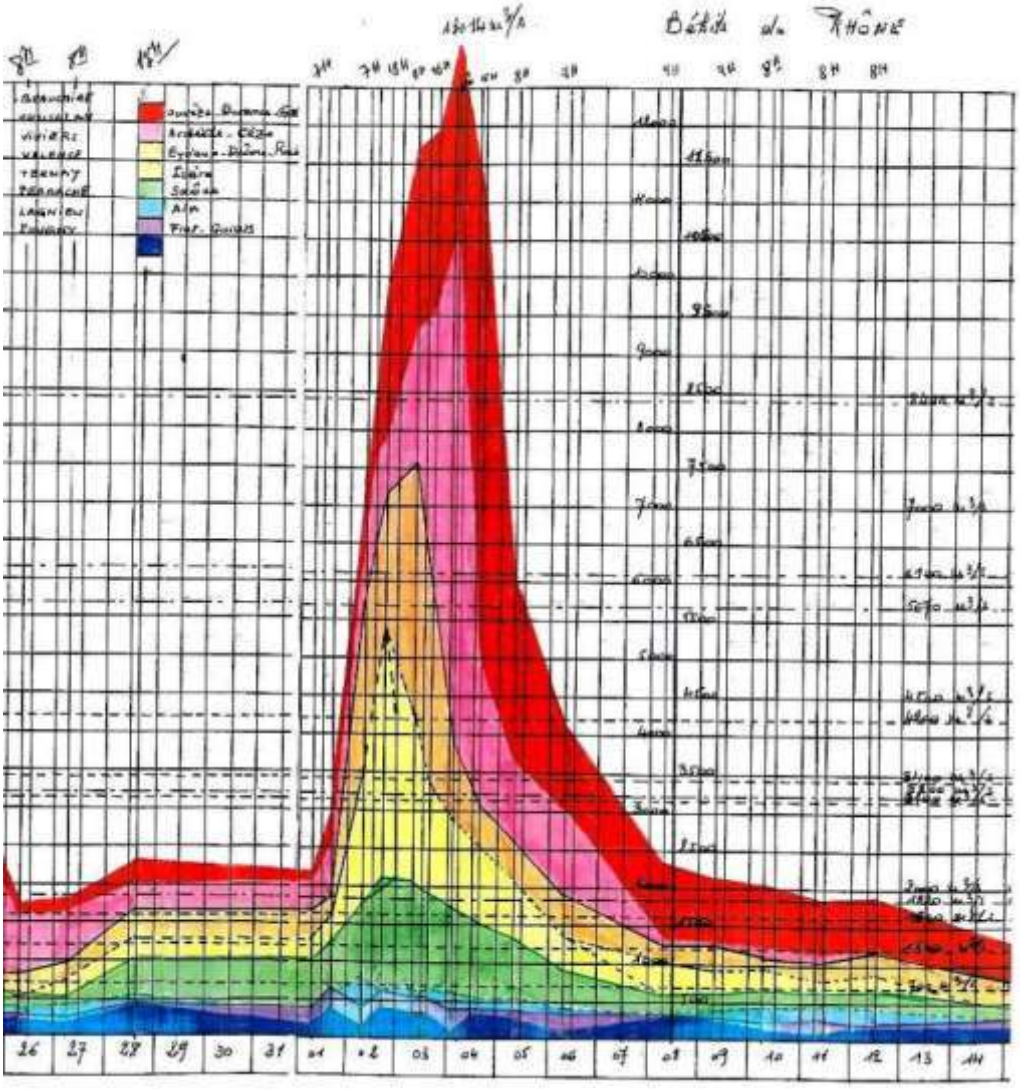


Figure 8. Données recueillies par le SYMADREM à partir du site InfoRhône [O2003 02]

Suite à la crue de décembre 2003, une conférence de consensus composée d'experts internationaux a été organisée pour analyser cette crue.

7 experts composant le comité scientifique de cette conférence ont été sélectionnés en fonction de critères d'excellence en publication académique en recherchant des compétences en hydraulique, hydrologie et hydrométrie (deux américains, un suisse, un néerlandais, un italien, un norvégien et un français).

A l'issue de cette conférence, qui a fait l'objet de multiples contributions [O2003 10], le débit de la crue de 2003 a été estimé à 11 500 m^3/s +/- 5% soit une incertitude de l'ordre de 600 m^3/s [O2003 09].

Le comité d'experts a aussi déduit que les valeurs de fréquence pour les débits maximaux annuels à Beaucaire, utilisées dans l'Etude Globale pour une Stratégie de Réduction des Risques dus aux crues du Rhône (EGR [J001]) étaient cohérentes avec les séries historiques et confirmaient la valeur de 11300 m^3/s pour la crue centennale. Le comité d'experts a également émis une liste de recommandations figurant ci-après :

1) Une analyse fréquentielle plus détaillée devrait être effectuée pour les crues historiques, prenant en considération leur caractère météorologique et le fait que plusieurs événements importants ont eu lieu à une date récente. Des estimations de l'écart-type des valeurs des quantiles doivent aussi être effectuées.
2) Le Comité recommande l'élaboration, pour le bassin versant du Rhône, d'un modèle hydrologique général, distribué ou semi-distribué, destiné au diagnostic et à l'analyse des crues, à l'estimation de l'humidité du sol, et à la gestion des ouvrages. Ce modèle pourrait également fournir la base pour des prévisions en temps réel des débits en divers points critiques du bassin versant.
3) Les différences entre les mesures de la hauteur d'eau à Beaucaire réalisées par la CNR pendant la crue, au moyen du limnimètre et par lecture directe de l'échelle limnimétrique, doivent être élucidées, afin d'aboutir à l'établissement d'une série chronologique unique.
4) Une nouvelle courbe de tarage devrait être établie pour Beaucaire, comprenant les mesures de la crue de décembre 2003, afin de prendre en compte les changements dans la capacité d'écoulement du lit (la courbe de tarage établie par le Comité afin d'estimer la valeur de pointe de la crue de décembre 2003 n'est valable que pour cet événement et ne doit pas être utilisée comme un outil de portée générale pour les calculs futurs).
5) Les évolutions géomorphologiques, passées et en cours, du Rhône aval, qu'elles soient naturelles ou artificielles, impliquent la nécessité d'une mise à jour régulière des courbes de tarage et du paramétrage du modèle pour l'ensemble du bassin.
6) L'événement de 2003 démontre combien les mesures de débit pendant la pointe de la crue sont d'une importance extrême. Mais, pour des raisons de sécurité, il est à la fois difficile et déconseillé d'effectuer de telles mesures la nuit. L'emploi de techniques de mesures ADCP télécommandées serait d'un grand intérêt pour les travaux futurs sur le Rhône. Des développements (métrologiques) dans cette direction devraient être encouragés.
7) Considérant l'importance socio-économique du Rhône et de ses crues, une étude interdisciplinaire approfondie du système fluvial serait d'un grand bénéfice pour l'aménagement et la gestion futurs, en mettant particulièrement l'accent sur l'évaluation de l'incertitude pour la gestion du risque.
8) La CNR a une obligation opérationnelle d'effectuer des mesures de suivi du Rhône dans une optique de gestion. Néanmoins, il semble nécessaire que soit constituée une capacité indépendante et externe de mesure sur des sections-clés du Rhône, afin de fournir des données neutres complémentaires qui pourraient être utilisées pour l'analyse des crues, ainsi que pour les aménagements futurs.
9) L'analyse *ex-post* d'événements comme la crue de décembre 2003, ainsi que la programmation d'aménagements futurs, pourraient être facilitées par la disponibilité d'un modèle hydraulique unique en régime transitoire couvrant l'ensemble du Rhône, de la frontière suisse à la mer. Les techniques de modélisation, les bases de données sont disponibles, et un tel modèle permettrait d'éviter une interprétation malaisée de conditions (aux limites) simulées là où différents modèles se raccordent.

Bien que la conférence de consensus n'ait pas remis en cause les débits des crues de 1993 à 2002, la contribution de D. DUBAND et P. BOIS [O2003 10] a mis en exergue 3 horsains dans les 37 jaugeages réalisés par la CNR de 1992 à 2003. Hors ce sont ces 3 jaugeages de surface qui constituent très probablement selon eux la cause de la surestimation à 13 000 m^3/s du débit de pointe de la crue de décembre 2003 en conditionnant la courbe de tarage établie par CNR depuis 1994. L'estimation faite par ces deux experts était de 11 000 m^3/s. Si cette estimation n'a pas été retenue par la conférence de consensus, elle l'a nettement influencée.

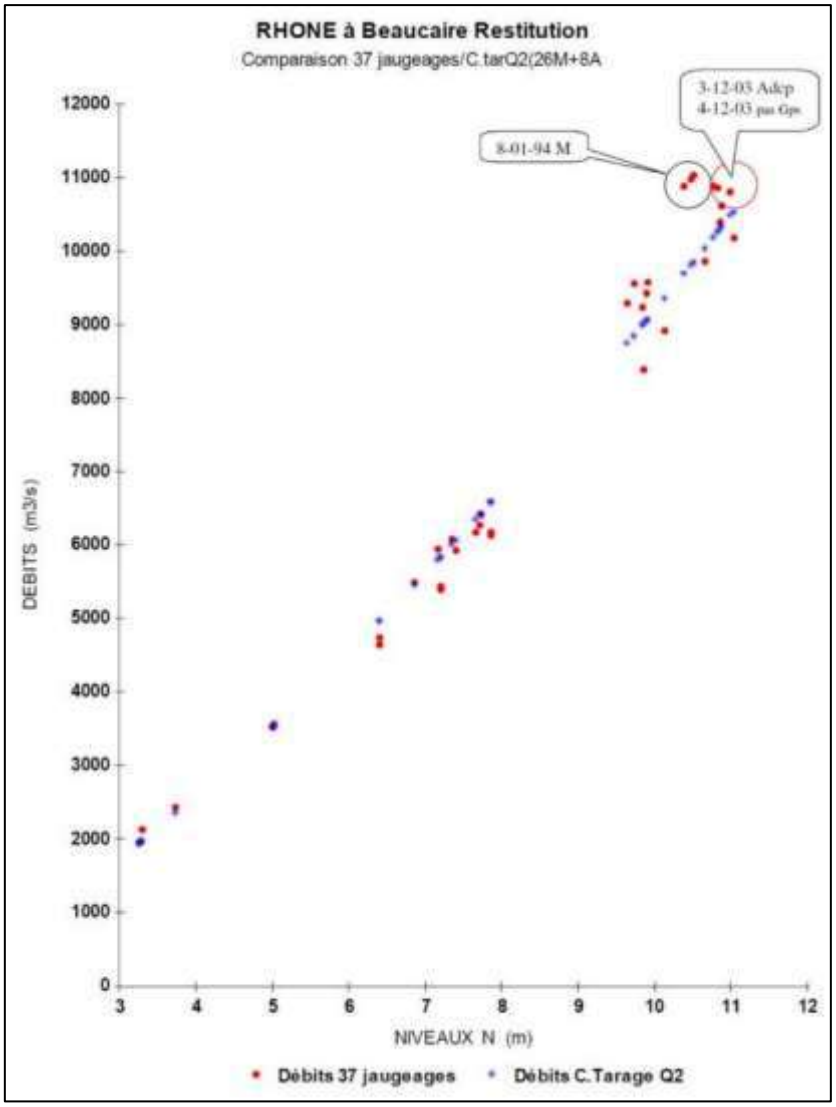


Figure 9. Analyse des jaugeages de la CNR par DUBAND et BOIS [O2003 10]

L'hydrogramme reconstitué de la crue après la conférence de consensus figure ci-après :

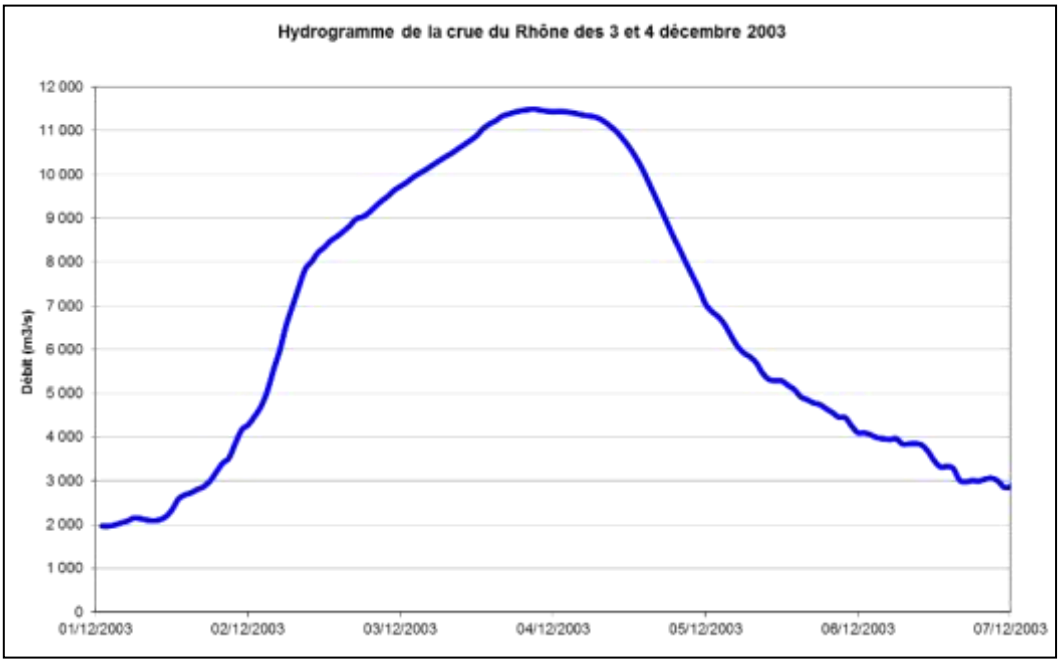


Figure 10. Hydrogramme de la crue de déc 2003 à la station de Beaucaire/Tarascon (SPC [O2003 06])

1.2.6 Courbe de tarage actuelle

Suite à la conférence de consensus, la courbe de tarage à la station de Beaucaire/Tarascon a été réactualisée [O2003 05].

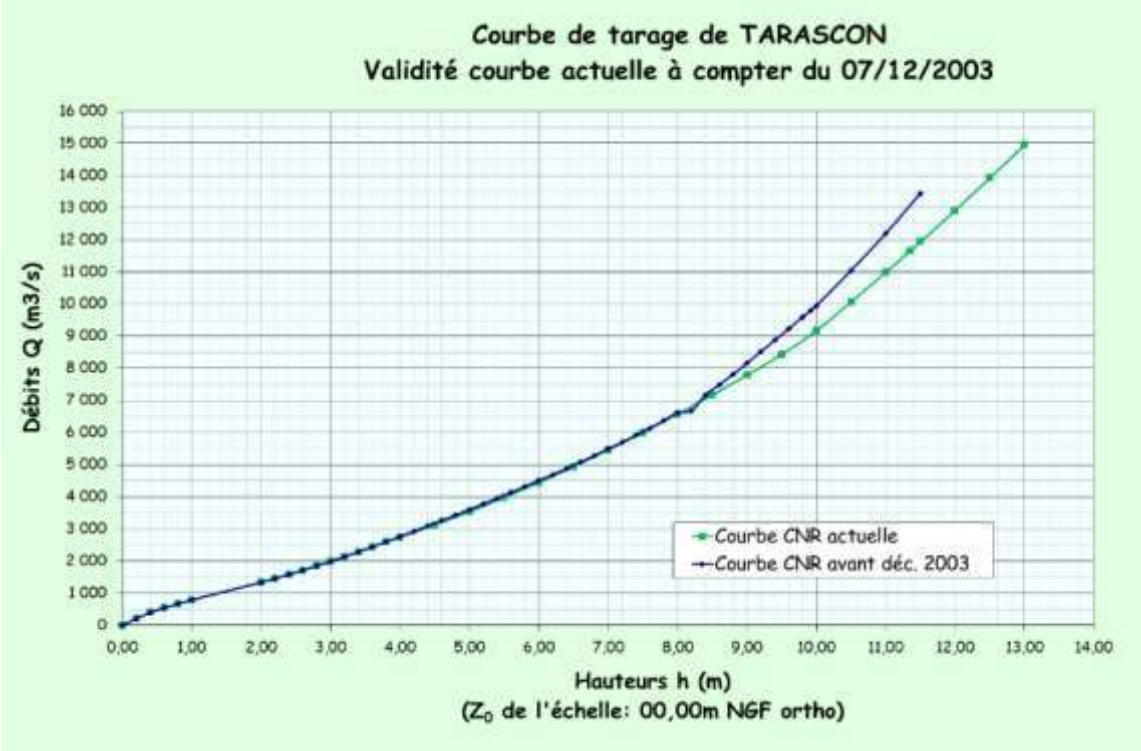


Figure 11. Courbe de tarage actuelle et en vigueur avant décembre 2003 (source SPC Grand Delta [O2003 05])

L'incertitude de 10 cm dans la mesure des limnigraphes correspond à un écart compris entre 100 (débit fréquent) et 200 m^3/s (débit rare) dans l'estimation des débits.

Le SPC donne les formules suivantes pour l'estimation des débits (valable pour Hortho > 3.6 m NGF) :

Pour Hortho < 9,8 m NGF

$$Q = 174.81\, H^{\frac{5}{3}} + 980.72$$

Pour Hortho > 9,8 m NGF

$$Q = 227.22\, H^{\frac{5}{3}} - 1375.26$$

On rappelle que Hign69 = Hortho + 0.03 m

La figure ci-après illustre la courbe de tarage en vigueur avec des estimations à ± 5 %.

L'incertitude de ± 5 % dans l'estimation des débits correspond à un écart d'environ ± 30 cm pour les débits rares. Il est de ± 25 cm pour les débits plus fréquents.

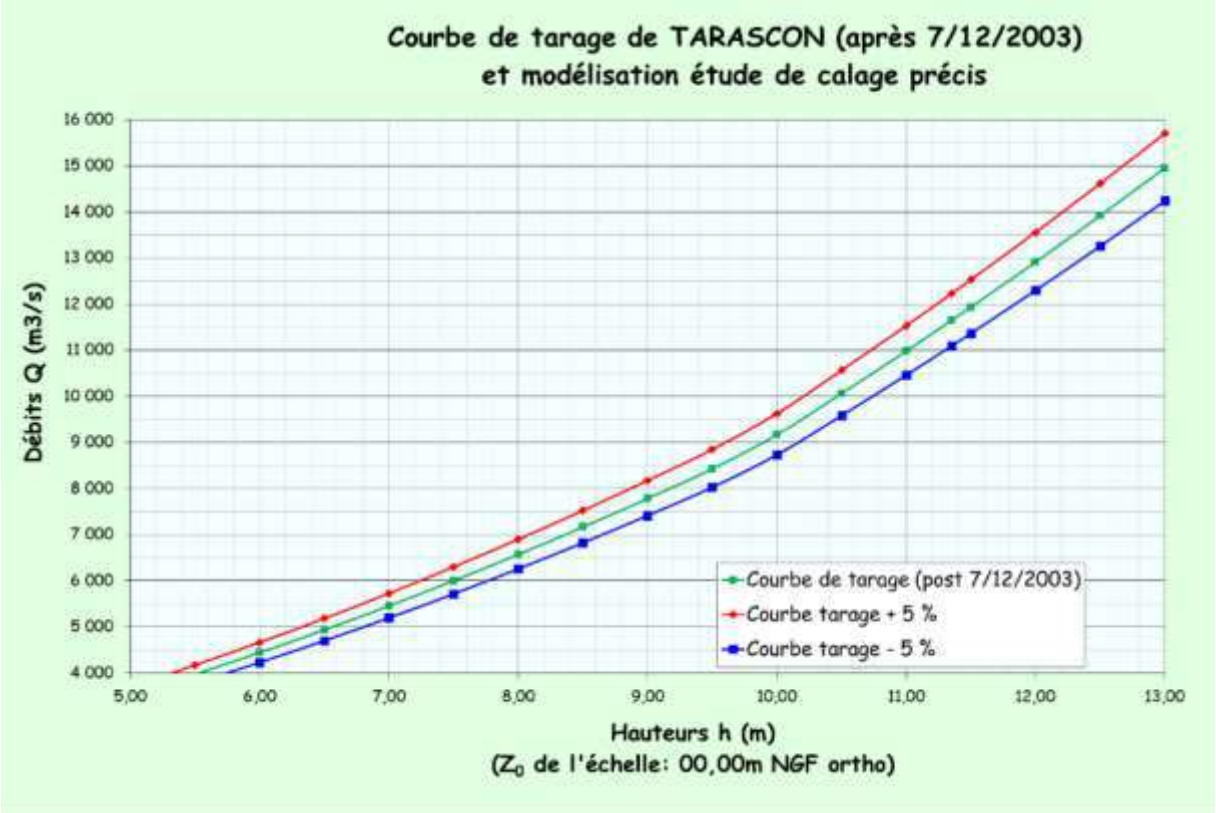


Figure 12. Courbe de tarage actuelle et enveloppe à ± 5 %

1.2.7 RIC Grand Delta

Dans le cadre de la procédure de révision du règlement de surveillance de prévision et de transmission de l'information sur les crues (appelé RIC), le Service Prévision des Crues du Grand Delta a procédé à une « réévaluation » des débits des principales crues depuis 1993 à partir de la nouvelle courbe de tarage [RIC K204].

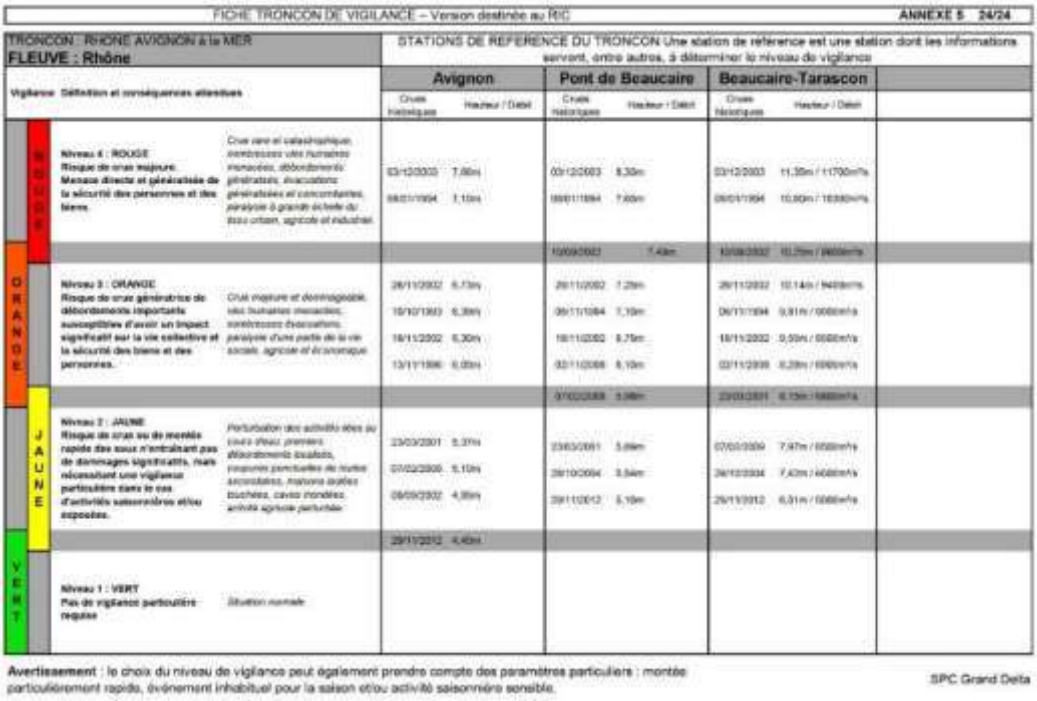


Figure 13. RIC SPC Grand Delta [K204]

Ces derniers sont repris dans le tableau ci-après.

Tableau 2. Hauteur d'eau atteinte à la station de Beaucaire/Tarascon et débits estimés en fonction de l'ancienne courbe de tarage et courbe de tarage actualisée suite à la conférence de consensus

Crue	Cote (m NGF IGN 69)	Estimation du débit de pointe suivant la courbe de tarage	
		ancienne	actuelle
4 décembre 2003 à 3h	11,33	13 000 m^3/s	11 700 m^3/s
26 novembre 2002	10,15	10 300 m^3/s	9 400 m^3/s
17 novembre 2002	9,60	9 200 m^3/s	8 500 m^3/s
10 septembre 2002 à 2h	10,30	10 600 m^3/s	9 600 m^3/s
13 Novembre 1996 à 22h	9,48	9 000 m^3/s	8 400 m^3/s
6 Novembre 1994 à 16h	9,92	9 800 m^3/s	9 000 m^3/s
8 janvier 1994 à 7h	10,50	11 000 m^3/s	10 300 m^3/s
10 octobre 1993 à 7h	9,93	9 800 m^3/s	9 000 m^3/s

1.2.8 Corrélation entre mesure de débits (PK 269,6) et hauteurs observées au pont de Beaucaire (PK 267,7)

La figure ci-dessous permet, en fonction de ces débits, de voir la corrélation entre les débits estimées à la station de Beaucaire/Tarascon (PK 269.6) et les hauteurs relevées au droit de la station historique du Pont de Beaucaire (PK 267,7). On constate que cette dernière est très bonne pour les débits compris entre 4000 et 11 500 m3/s. En deçà de 4000 m3/s, la présence du seuil de Beaucaire et la répartition des débits entre le Vieux Rhône et le Rhône dérivé commandée par la CNR ne permet pas d'avoir de bonne corrélation.

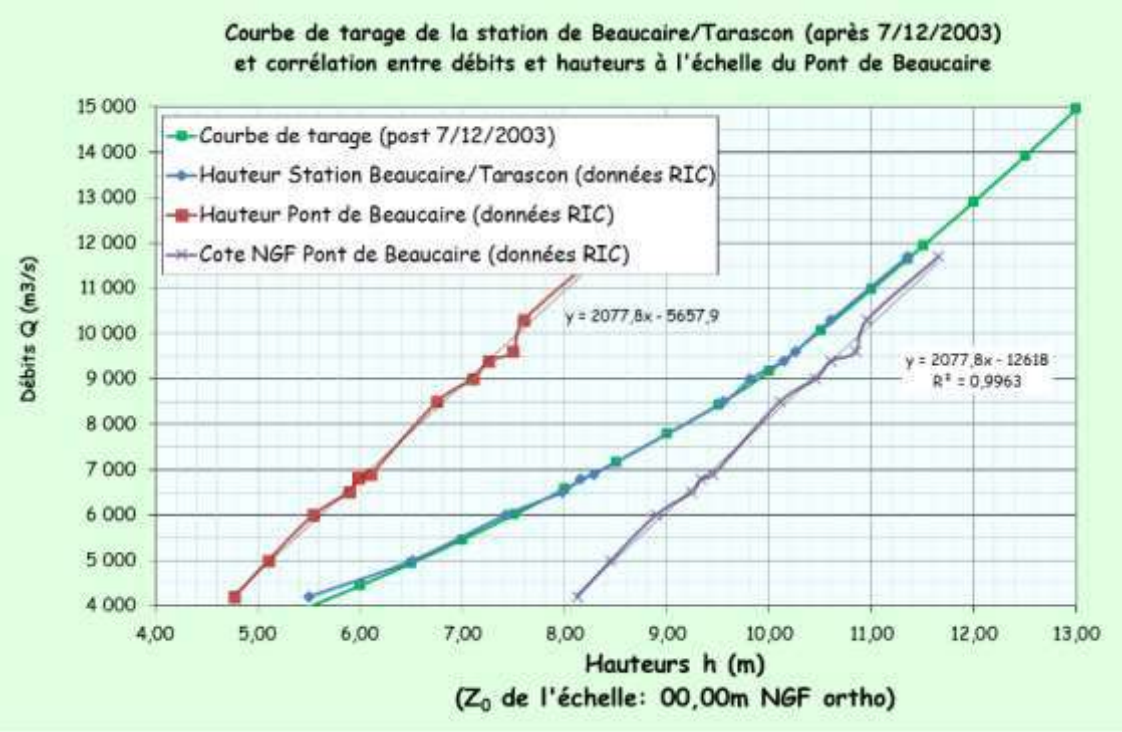


Figure 14. Débits Station de Beaucaire/Tarascon et Hauteurs station Pont de Beaucaire

1.2.9 Impact des brèches sur la détermination des débits

Les brèches abaissent les niveaux dans le lit du fleuve d'une manière différente qu'on soit en amont ou en aval des brèches (source G. Degoutte [W004]).

En aval d'une brèche qui vient de se produire, le lit endigué propage un hydrogramme de crue obtenu par différence entre l'hydrogramme amont et celui qui est dérivé vers le lit majeur au travers de la brèche. La ligne d'eau est abaissée en proportion de la réduction de débit.

Vers l'amont, l'effet hydraulique est d'une toute autre nature. Une brèche, tant qu'elle débite, induit un abaissement de la ligne d'eau par effet de remous. Cela peut constituer un avantage local, par exemple en arrêtant un débordement qui aurait commencé. Mais cela est rarement

déterminant sur de longues distances, car peu à peu l'effet des pertes de charges tout au long du cours d'eau « dilue » le bénéfice de l'abaissement aval.

Cet impact a été très perceptible en 1840 et 1856. Les brèches occasionnées dans la digue de la Montagnette pour ces deux crues (Cf. figure ci-dessous) ont eu pour effet de dériver une partie du débit (environ 2000/3000 m^3/s) en rive gauche du Rhône et de réduire très sensiblement le débit transitant en traversée de Beaucaire/Tarascon, engendrant de fait une baisse du niveau.

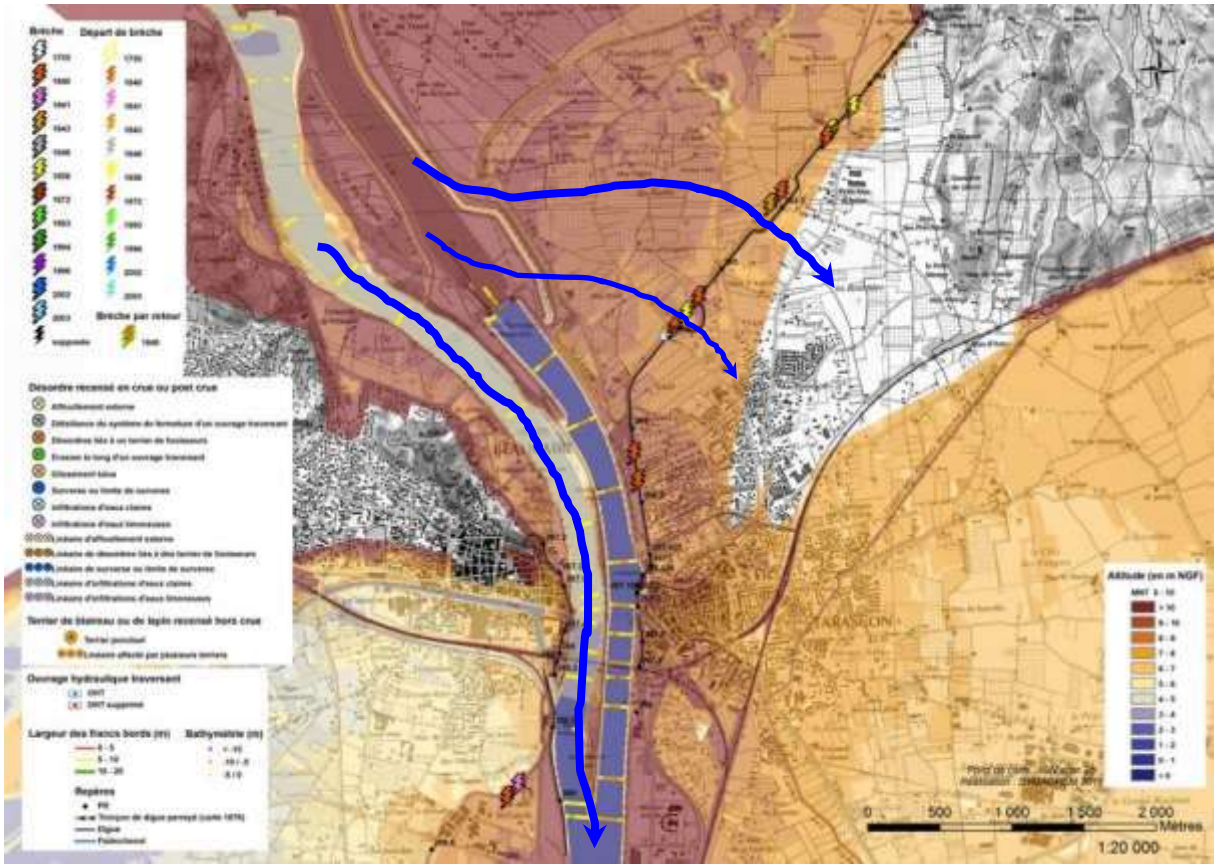


Figure 15. Brèches en amont et aval de la traversée de Beaucaire/Tarascon

En 1840, cette baisse a été d'autant plus importante que des grandes brèches en rive droite du Rhône juste en aval du pont de Beaucaire ont également été occasionnées.

Cette baisse a également était perceptible en 1841 avec des brèches en aval de Beaucaire et en 1843 avec des brèches en amont de Tarascon dans la digue de la Montagnette.

Pour ces crues anciennes, les ingénieurs de l'époque (Kleitz) ou Pardé ont estimé l'impact de ces dernières.

Depuis 1993, les brèches, moins conséquentes mais néanmoins importantes ont été occasionnées en aval de la station de mesure. On estime à 5 cm l'impact des brèches en décembre 2003 sur la mesure de niveaux à la station de Beaucaire/Tarascon. Cet impact est essentiellement dû aux brèches dans les digues de protection des trémies du remblai ferroviaire.

Les brèches lors des crues de 1993, 1994 et 2002 ont été localisées sur le Petit Rhône. Si leur impact n'a pas été précisément mesuré ; la comparaison avec la crue de décembre 2003 nous amène à estimer que ce dernier est de l'ordre du centimètre, soit très inférieur à la précision de la mesure des niveaux.

Tableau 3. Crues du Rhône de 1827 à 1919 (source Pardé [K001])

Crues de plus de 6 mètres sur le Bas-Rhône.

DATE du maximum à Beaucaire	Cote à Aramon	Cote à Beaucaire	Cote à Arles	Débit approximatif	NOMBRE de jours pendant lesquels les eaux se sont maintenues au-dessus de 6 m.	TYPE DE LA CRUE	RIVIÈRES les plus impressionnées par l'averse
11 octobre 1827...	»	6,10	5,10	7.500	»	Cévenole.	Ardèche.
3 novembre 1840.	»	8,50[1] (?)	5,05[5]	12-14.000	+ de 9[6]	Générale.	Rhône supér., Saône, rivières cévenoles.
27 octobre 1841...	»	6,90[2] (?)	4,41[5]	8.500	»	Id.	Id., mais moins fort.
3 novembre 1843.	»	6,79[3]	5,15	9.000	»	Affluents inférieurs rive gauche.	Durance, Drac.
19 octobre 1846...	»	6,45	5,04	7.400	»	Affl. inf. rive gauche et rivières cévenoles.	Durance.
31 mai 1856.....	8,00	8,77[4]	5,58[5]	12-14.000	+ de 5[6]	Générale.	Rhône et Durance supérieurs, Drac.
28 octobre 1864...	6,35	6,25	4,80	7.100	»	Cévenole.	?
21 octobre 1872...	7,04	6,87	5,37	8.400	»	Affl. inf. rive gauche et rivières cévenoles.	Durance, Drôme.
4 décembre 1872.	6,62	6,57	5,06	7.700	»	Affluents inférieurs rive gauche.	Durance.
29 octobre 1882...	7,16	6,60	4,81	7.800	2	Affluents inférieurs rive gauche.	Durance.
27 octobre 1886...	7,60	7,48	5,15	9.500	3	Affl. inf. rive gauche et rivières cévenoles.	Durance, Drôme.
12 novembre 1886.	7,70	7,55	5,52	9.700	8	Générale.	Drac, Roubion, Durance.
1er janvier 1889...	6,23 (?)	6,81	4,78	8.300	2	Cévenole.	Gardon.
23-24 sept. 1890...	5,79	6,04	4,57	6.700	12 heures	Cévenole et Durance.	Erieux, Ardèche.
22-23 octobre 1891.	6,41	6,34	»	7.100	1	Cévenole et Durance.	Ardèche.
2 novembre 1896.	7,30	7,00	4,99	8.600	8	Générale.	Crues moyennes partout.
30 septembre 1900	7,31	7,08	4,89	8.700	2	Cévenole.	Ardèche
10 octobre 1907...	7,13	6,68	4,69	7.900	2	Cévenole.	Doux, Erieux.
18 octobre 1907...	7,09	6,70	4,70	7.900	2 1/2	Cévenole et Durance.	Cèze, Gardon.
10 novembre 1907.	7,33	6,83	»	8.400	1	Affl. inf. rive gauche, rivières cévenoles.	Sorgues, Durance.
2 décembre 1910.	7,20	6,61	4,55	7.800	2	Générale.	Durance.
8 décembre 1910.	7,48	7,02	5,03	8.600	¼	Cévenole.	Ardèche, Cèze, Gardon.
12-13 déc. 1910....	6,94	6,44	»	7.400	¼	Affl. inf. rive gauche et rivières cévenoles.	Durance.
4 novembre 1914.	6,35	6,34	»	7.100	2	Cévenole et Durance.	Gardon.
21-22 mai 1917....	6,85	6,56	4,60	7.700	1	Cévenole et Durance	Gardon.
31 mai 1917	6,43	6,05	4,38	6.700	quelques heures	Affluents inférieurs rive gauche.	Drac, Durance.
7 janvier 1919 ...	7,43	6,80	4,80	8.300	4	Générale.	Durance

[1] Cote enregistrée 6,87, très abaissée par la rupture des digues.
[2] Cote enregistrée 6,10, très abaissée par la rupture des digues.
[3] Cote abaissée probablement par la rupture des digues.
[4] Cote enregistrée 7,95, très abaissée par la rupture des digues.
[5] Cotes très abaissées par la rupture des digues.
[6] Durée très difficilement appréciable par suite de la rupture des digues, estimée approximativement d'après les courbes d'amont.

1.3 LA CRUE DE MAI 1856

1.3.1 Déroulement de la crue

La crue de mai-juin 1856 tout aussi exceptionnelle que celle de 1840, fut engendrée par une cause simple et unique, mais remarquable justement par sa simplicité. Une première grande crue du Rhône supérieur et de la Saône s'était produite du 17 au 24 mai, et par la suite de pluies survenues encore le 26, les eaux étaient restées à un niveau élevé : 4 mètres (7,38 m NGF) à Beaucaire. A ce moment s'abattit dans presque toute la France une averse océanique mémorable. La pluie s'étendit loin vers le sud. Elle gonfla d'un coup toutes les rivières du bassin, y compris dans une proportion modérée les rivières cévenoles. La montée extrêmement rapide fut simultanée sur toute la longueur du fleuve et fait remarquable, on enregistra le maximum à la fois sur Lyon, à Valence et à Avignon. Le fleuve atteignit 7,83 m à Avignon le 31 mai à 17h. Il rompit les remparts de la ville. La forte crue de la Durance coïncida avec celle du Rhône.

La figure ci-après extraite de DREAL RA [K205] permet de mesure l'apport des différents affluents.

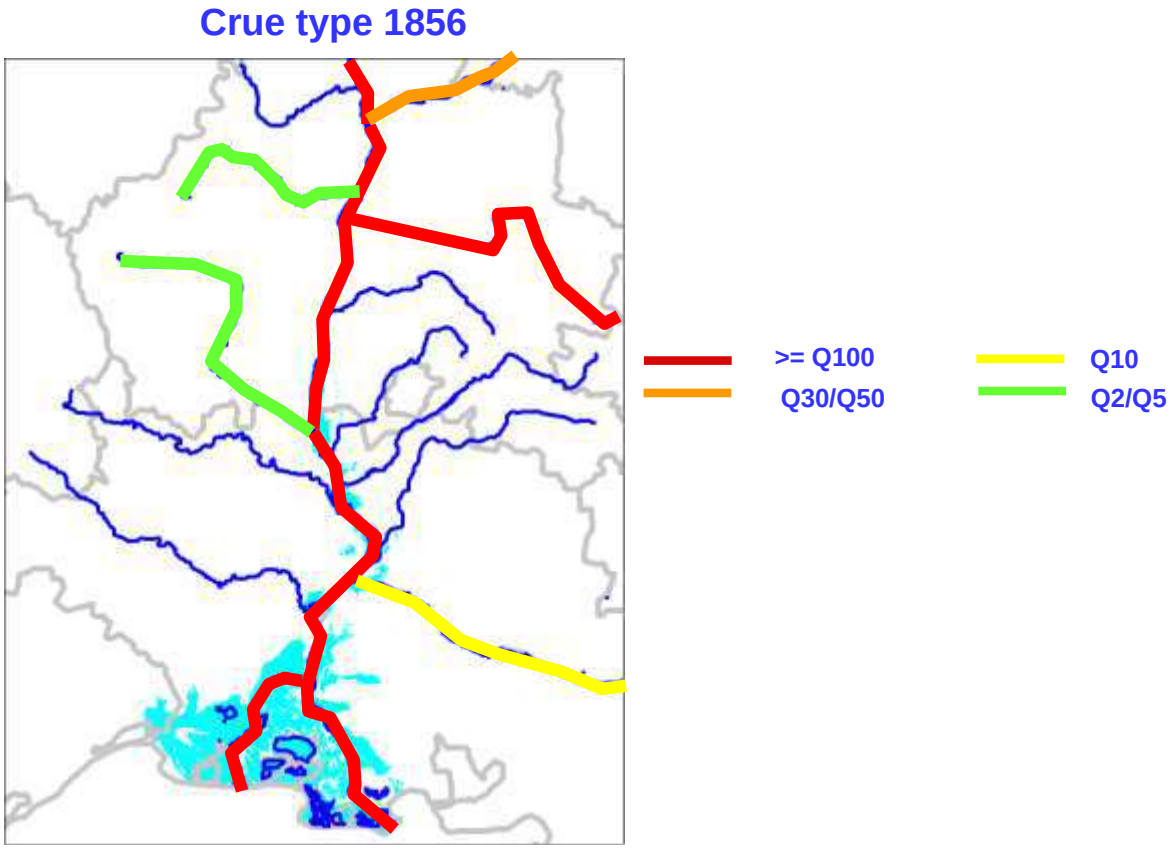
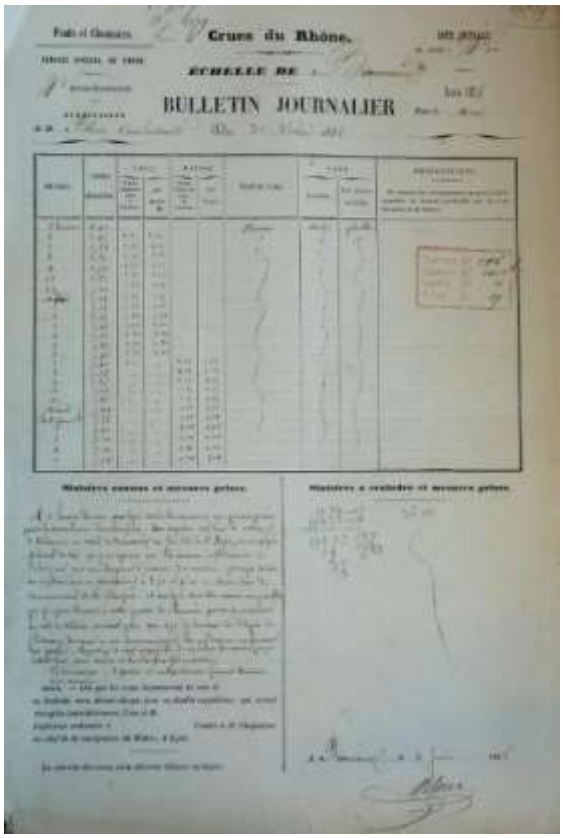


Figure 16. Crue du Rhône de mai 1856 et apports des affluents (source DREAL RA [K205])

1.3.2 Evolution des niveaux aux principales échelles de mesure

Les bulletins journaliers des Ponts et chaussées [O1856 01] et [O1856 02] nous ont permis de reconstituer le limnigramme à Beaucaire et aux stations de Fourques, Saint Gilles et Sylvéreal. Ils nous donnent également des informations sur la direction et force du vent pendant la crue, à savoir un vent faible du sud. Le niveau maximum à Beaucaire fût atteint le 31 mai 1856 à 18 h, heure à laquelle la digue de la montagnette rompit par infiltration, ce qui eut pour conséquence de dériver une grande partie du débit du Rhône du fleuve vers la zone protégée et contribua à faire baisser les niveaux dans le fleuve en aval de Beaucaire/Tarascon.


Crues du Rhône.

BULLETIN JOURNALIER

Figure 17. Bulletin journalier de la crue de mai 1856 – SSR [O1856 01]

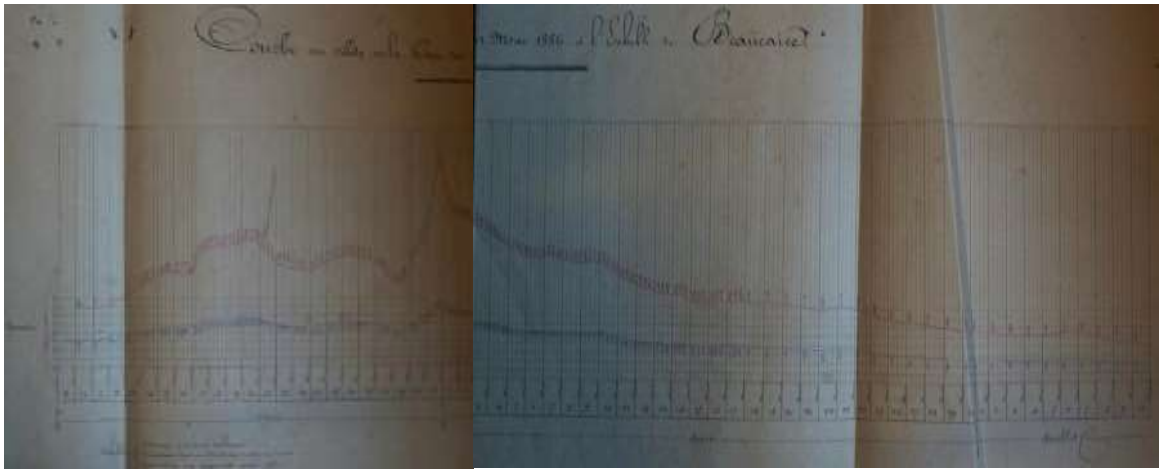


Figure 18. Courbe des débits de la crue de 31 mai 1856 à l'échelle de Beaucaire (2/2) – Archives du Vaucluse – Service Spécial du Rhône – 28 septembre 1857 [O1856 04]

Les limnigrammes extraits de Pardé permettent également d'observer la dynamique de la crue à Vallabrègues juste en amont de la digue de la Montagnette. Alors qu'on constate une baisse des niveaux à Beaucaire dans la nuit du 31 mai au 1er juin 1856, due à la formation des brèches dans la digue de la Montagnette. Les niveaux tendent à plafonner à l'échelle de Vallabrègues, compte tenu des apports amont. En effet, la décrue franche ne s'amorce à cette échelle que dans le milieu de la journée du 3 juin.

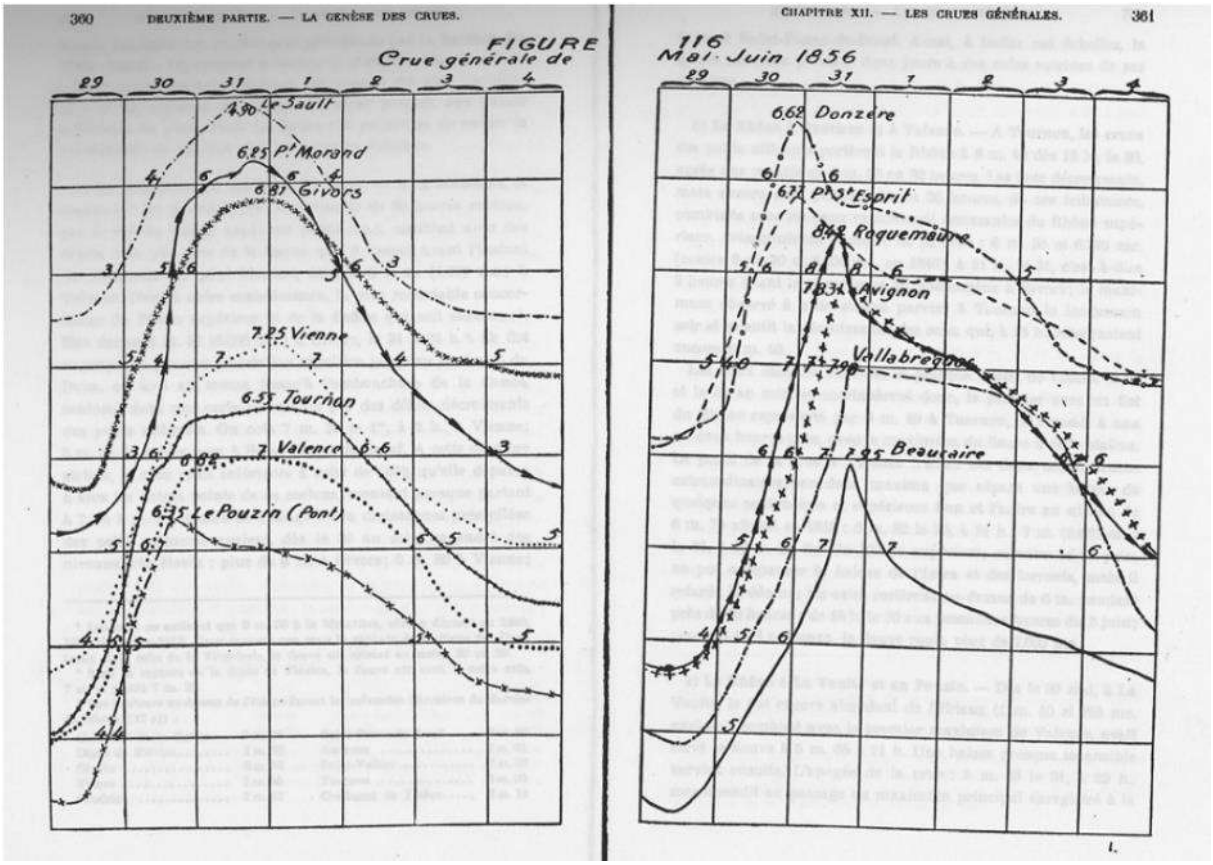


Figure 19. Crue mai 1856 – Rapport IGE d'après Pardé [W003]

Sans la rupture de ces digues, l'ingénieur en chef Kleitz a estimé que le niveau se serait élevé à 8,77 m à l'échelle de Beaucaire, soit 12,15 m NGF. Le pic de crue aurait été, selon son estimation, atteint une douzaine d'heures après le pic observé.

Cette estimation de 8,77 m est également reprise dans Pardé [K001].

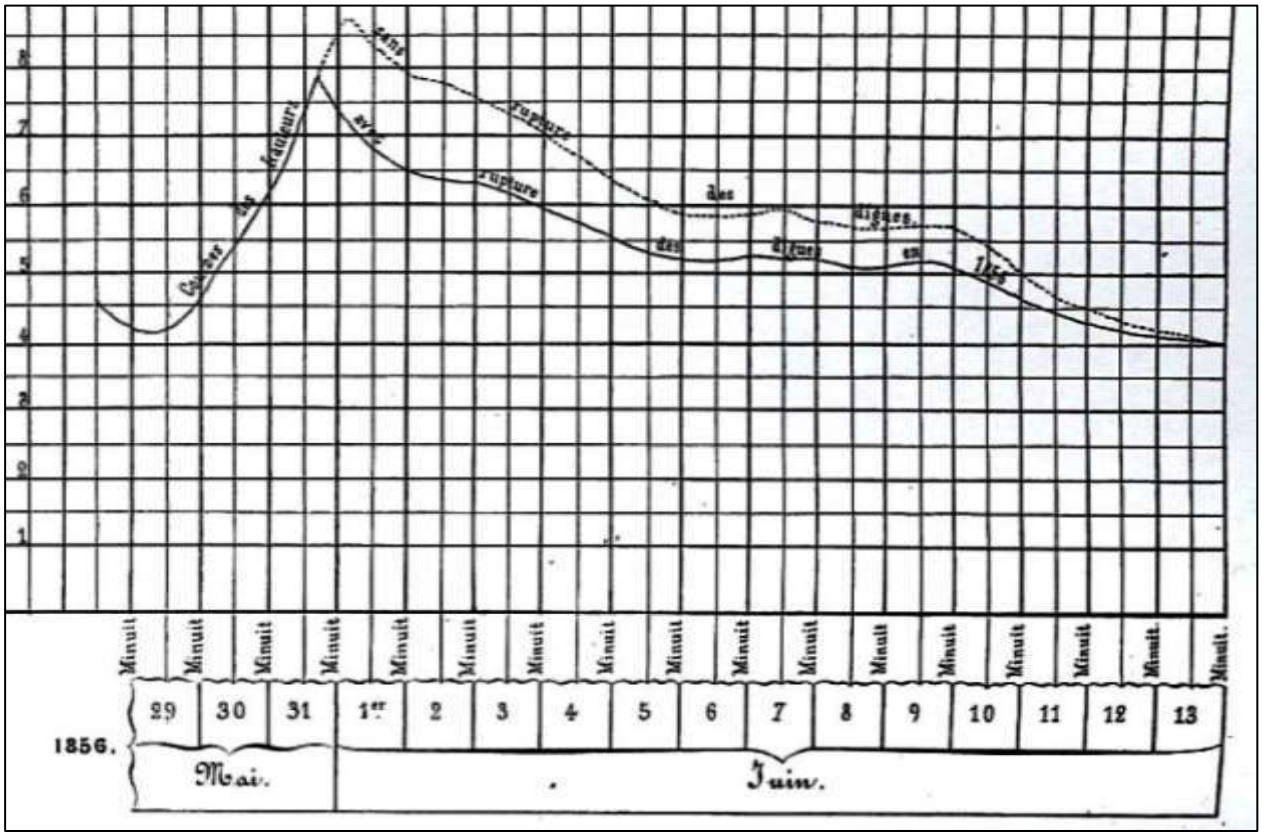


Figure 20. Limnigramme de la crue de 1856 à Beaucaire avec et sans rupture (Ingénieur Kleitz - Ponts et Chaussées, 1860). Source (A. Méjean [H0005])

Ces hauteurs d'eau aux échelles de Beaucaire, Fourques, Saint-Gilles, Sylvéréal et Vallabrègues ont été converties en mètres NGF grâce aux documents d'archives [O1856 09] et aux informations figurant dans Pichard [H0004].

La figure ci-dessous illustre l'évolution de ces niveaux en m NGF. On notera que pour les échelles du Petit Rhône, les cotes étaient levées 1 ou 2 fois par jour même lors de cette crue, ce qui fait que les niveaux maximums ne figurent pas dans ces levés. Ils ont été complétés à partir des données figurant dans [O1856 09].

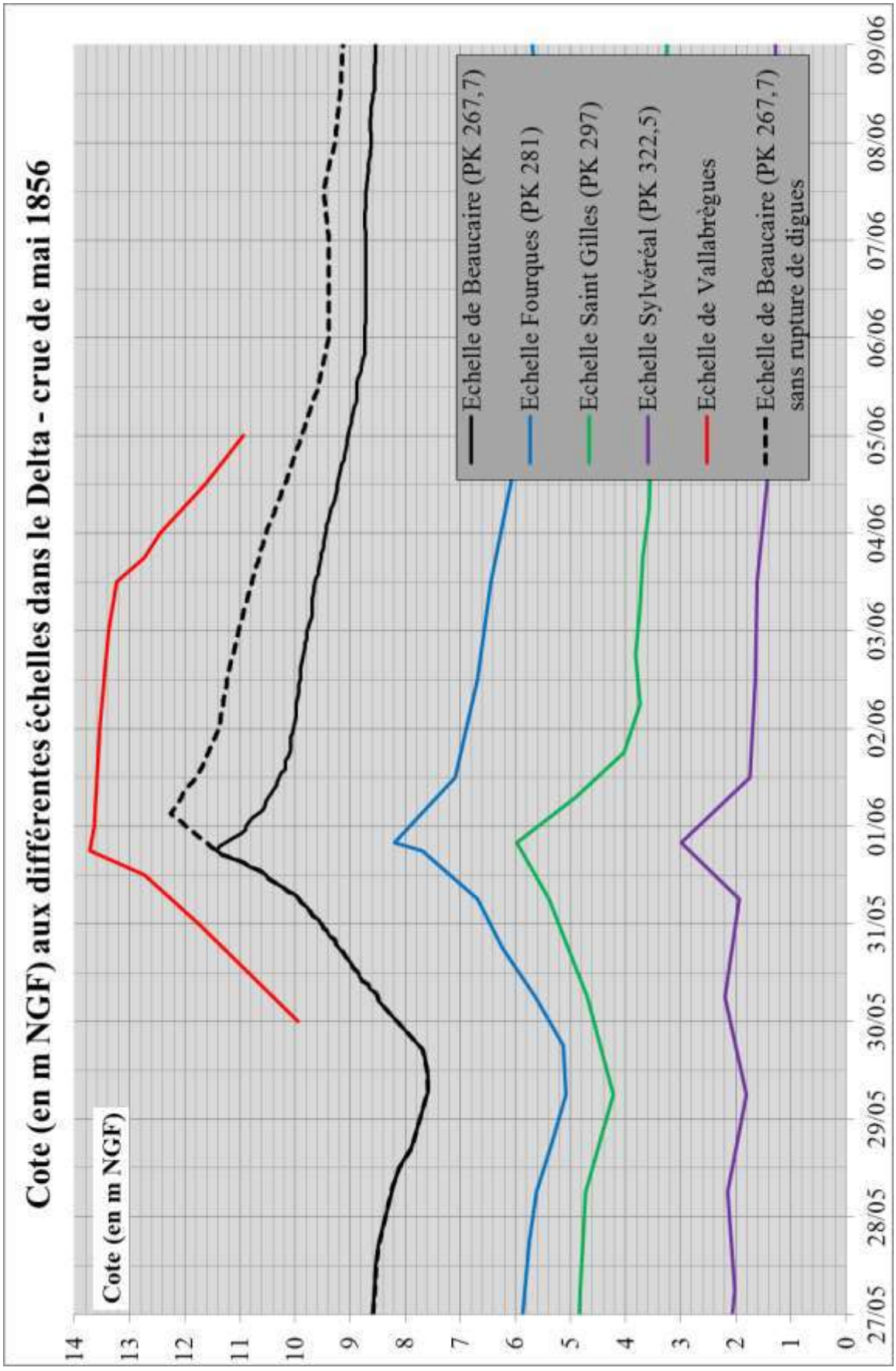


Figure 21. Limnigrammes (en m NFG) observés et estimé à partir des plans d'archives

1.3.3 Débits de la crue

Plusieurs débits existent dans la bibliographie, certaines sources font état du débit maximum instantané ayant effectivement transité dans la traversée de Beaucaire/Tarascon sans prendre en compte le débit ayant transité dans les brèches de la digue de la Montagnette, d'autres font état du débit qui aurait transité en traversée de Beaucaire/Tarascon sans rupture dans la digue de la Montagnette.

Les estimations des ingénieurs des Ponts et Chaussées réalisées après la crue de 1856 donnent des débits ayant effectivement transité en traversée de Beaucaire/Tarascon compris entre 12 000 et 12 500 m^3/s. Ces estimations résultent de l'application des courbes de tarage précitées. Elles ne tiennent donc pas compte du débit dérivé par les brèches de la Montagnette. Certaines estimations plus tardives font même état d'un débit de 13 000 m^3/s.

Pardé [K001] va ramener sensiblement ces débits à la baisse en donnant une estimation du débit qui aurait transité en traversée de Beaucaire sans brèches dans la Montagnette. Son estimation donne un débit compris entre 12 000 et 14 000 m^3/s. Dans Pardé [K003], on y trouve un débit de 12 000 m^3/s.

CNR [J003] indique un débit de 11 640 m^3/s sans préciser s'il s'agit d'un débit avec ou sans prise en compte du débit dérivé dans les brèches de la Montagnette. Cette estimation correspond quasiment à la courbe de tarage de 1875. Elle correspondrait donc à un débit réel minoré du débit ayant transité par les brèches dans la Montagnette.

Actuellement, la valeur communément admise est celle de 12 500 m^3/s en absence de brèche. Elle est dans l'enveloppe donnée par Pardé.

1.3.4 Profils en long de la ligne d'eau

Plusieurs profils en long existent dans les documents d'archives, leurs références figurent ci-dessous :

- [O1856 05] : Profils en long et en travers du Rhône entre l'écluse du canal de Beaucaire et la tête de la Camargue - Ponts et Chaussées - Service Spécial du Rhône 4ème arrondissement – 10 octobre 1859
- [O1856 06] : - Travaux du Rhône – Digue du Syndicat de Beaucaire à la Mer – Profil en long et profil type - Ponts et Chaussées - Service Spécial du Rhône 4ème arrondissement – 31 décembre 1885
- [O1856 07] : Réglementation générale des prises d'eau de la rive droite du Petit Rhône – Clauses à insérer dans les projets de règlement dans l'intérêt de la digue syndicale de Beaucaire à la Mer – Profil en long de la digue syndical entre Beaucaire et Sylvéréal-Ponts et Chaussées - Service Spécial du Rhône 4ème arrondissement – 10 octobre 1912
- [O1856 08] : Cote atteinte par la crue de 1856 - Service Navigation Rhône–Saône – 1978
- [O1856 09] : Le Rhône de Beaucaire-Tarascon à la Mer – Digues de défense contre les inondations – projet de renforcement des digues – Syndicat des digues de Beaucaire à

la Mer : Syndicat des digues de la Grande Camargue – profil en long et profil en travers type - Service Navigation Rhône–Saône – 1984

- [O1856 10] : repère des crues de 1856 / 1840 / 1843 / 1755 / 1846 Ponts et Chaussées - Service Spécial du Rhône 4ème arrondissement (Archives départementales / S 479)

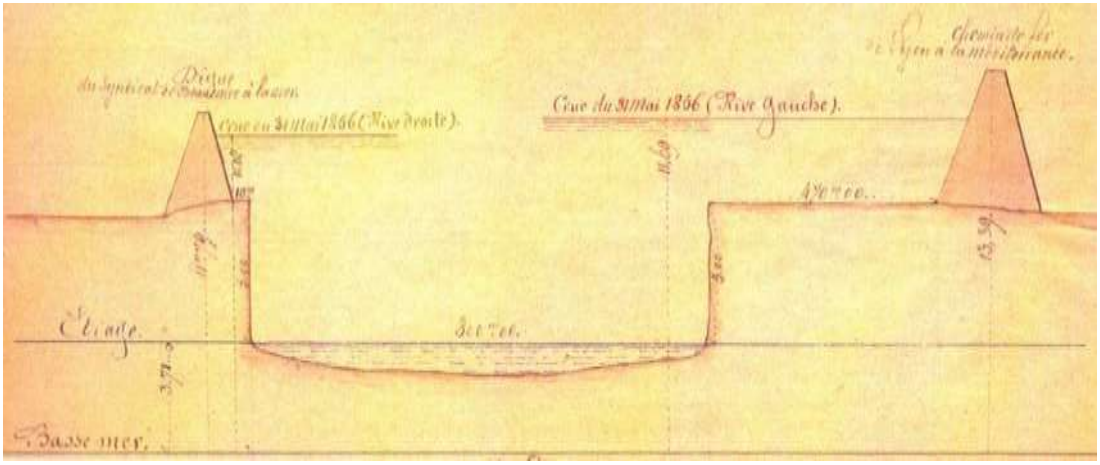


Figure 22. Profil en travers du lit endigué et laisses de crues en rives droite et gauche [O1856 05]

1.3.5 Volume de la crue

A partir des différentes formules d'estimation du débit (officielles pour la station de Beaucaire/Tarascon et corrélées pour la station du Pont de Beaucaire), nous avons dans un premier temps estimer le volume de la crue de décembre 2003 à la station de Beaucaire/Tarascon et dans un deuxième temps à la station du Pont de Beaucaire. Les volumes sont donnés respectivement au-dessus du débit annuel de 4200 m^3/s et biennal de 6000 m^3/s.

Tableau 4. Volumes de la crue de décembre 2003

Station	**Volume de crue (en Millions m^3) pour Q > 4200 m^3/s**	**Volume de crue (en M.m^3) pour Q > 6000 m^3/s**
Beaucaire/Tarascon	1 498	959
Pont de Beaucaire	1 506	949
Ecart (%)	< 1 %	≅ 1 %

Compte tenu de cet écart très faible au regard des autres incertitudes, le calcul des volumes de crues sera estimés pour les crues anciennes au Pont de Beaucaire à partir de la formule précitée et pour les crues récentes à la station de Beaucaire/Tarascon à partir de la formule officielle. Les volumes de crues sont les suivants

Tableau 5. Volumes de la crue de mai 1856

	Volume de crue (en Milliards m^3) pour Q > 4200 m^3/s	**Volume de crue (en Milliards m^3) pour Q > 6000 m^3/s**
Avec brèches	2.4	0.9
Sans brèches	4	2.2
Différence	1.6	1.3

1.4 LA CRUE DE NOVEMBRE 1840

1.4.1 Déroulement de la crue

Le déroulement de la crue est décrit dans [Pardé K001] et dans les journaux de l'époque, dont certains extraits sont reproduits ci-après. La crue fut engendrée par une situation météorologique telle qu'on n'en connaît pas d'exemple. Il tomba dans l'espace de six jours, au moins une averse océanique et plus probablement deux ou trois, dont le résultat fut une crue prodigieuse de la Saône. En même temps se produisirent, au milieu d'orages violents, trois averses méditerranéennes. La crue débuta du 28 au 31 octobre, par une montée très rapide causée par la Durance et les rivières cévenoles. La Cèze et le Gardon surtout. La baisse de ces torrents fut compensée jusqu'au 2 novembre par l'arrivée du flot puissant du Rhône supérieur. Mais au moment où celui-ci décroissait, il fut contre toute attente, renforcé par l'averse méditerranéenne mixte du 2 et du 3 novembre, qui engendra une très grande crue du Doux, de l'Eyrieux et sans doute d'autres rivières. Le maximum énorme qui en résulta : 8,30 m à Avignon le 4 novembre à 17 heures, amena la submersion des 9/10 de la ville et se combina presque exactement avec une grande crue de la Durance.

La figure ci-dessous extraite de [K205], localise les cours d'eau du bassin en crue et leur intensité.

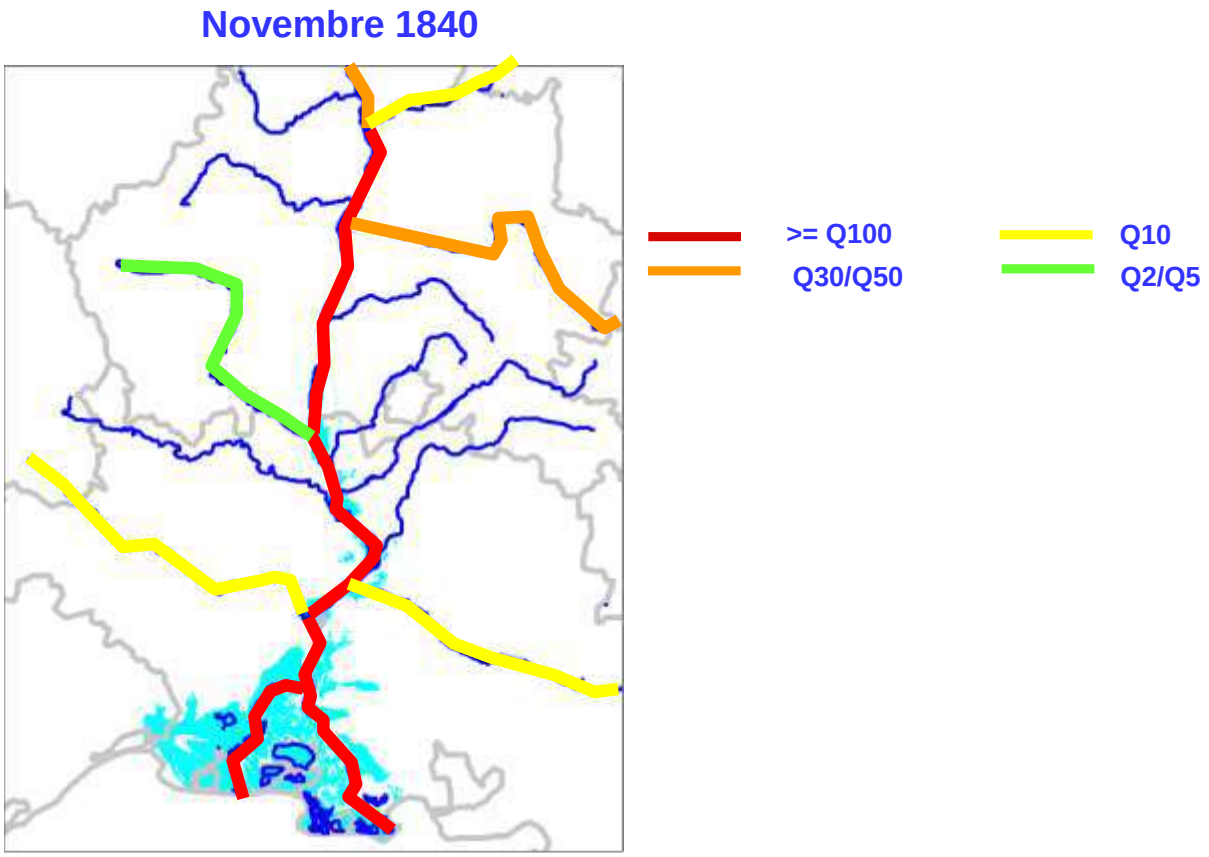


Figure 23. Crue du Rhône de nov. 1840 et apports des affluents (source DREAL RA [K205])

1.4.2 Evolution des niveaux aux principales échelles de mesure

Plusieurs limnigrammes existent dans la bibliographie. On citera ceux de Pardé repris dans Pichard [H0004]. On notera que les courbes de Beaucaire et d'Arles vont en sens contraire le 3 novembre, ce qui serait due, d'après Pichard à l'apparition de brèches dans les chaussées du Trébon. D'après ces limnigrammes, le pic de crue est atteint le 3 novembre 1840 à Beaucaire et le 2 novembre 1840 à Arles.

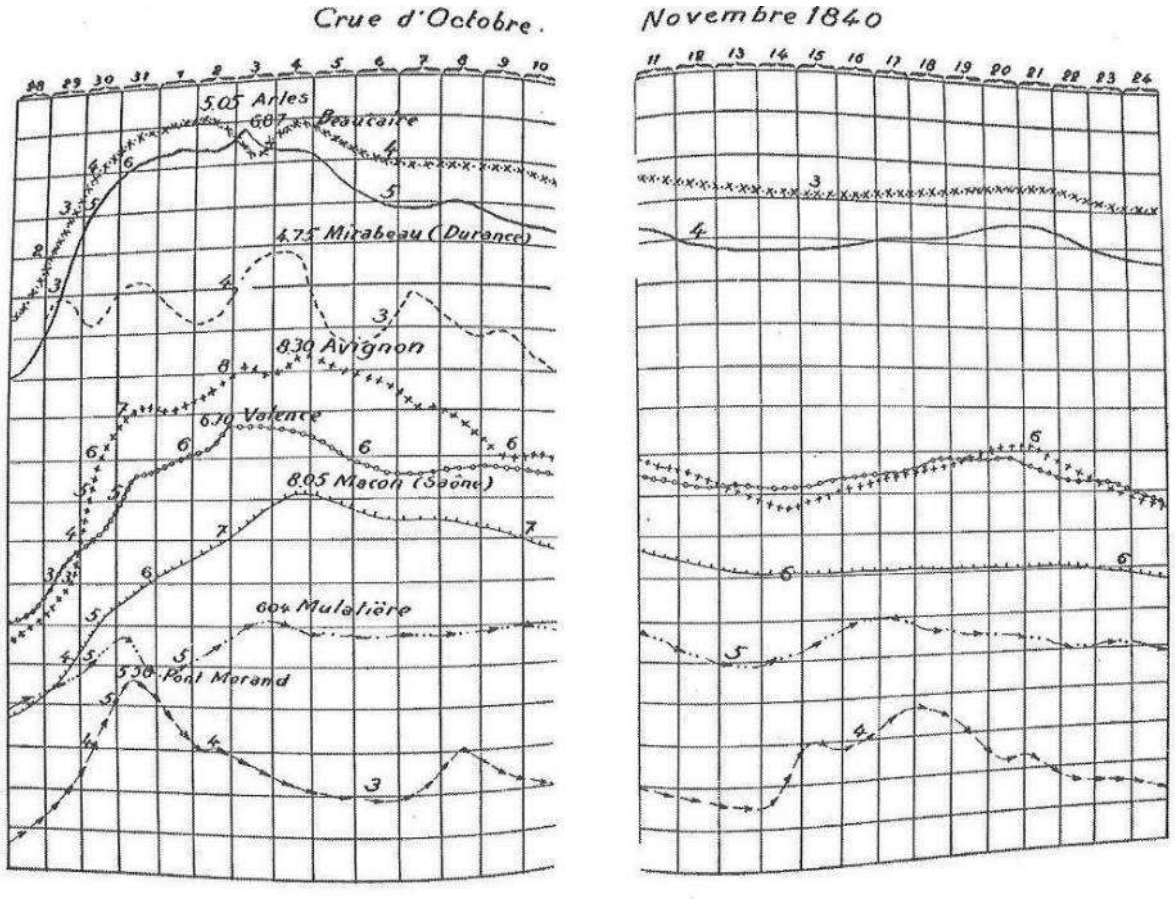


Figure 24. L'évolution de la crue de 1840 aux différentes stations de Lyon à la Mer (d'après M. Pardé le régime du Rhône t.II 1925 p372-373)

Nos recherches aux archives départementales du Vaucluse ont permis de retrouver les limnigrammes de cette même crue établis en 1857 par les ingénieurs du Service Spécial du Rhône [O1840 01]. Ils font état de correction. La brusque baisse de niveau à Arles le 3/11/1840 à midi est corrigée et n'apparaît donc plus (4,95 m à la place de 3,95). La pointe de crue à Beaucaire est également avancée au 3/11/1840 à minuit contre 4/11/1840 à minuit. Ces corrections réalisées en 1857 n'ont pas été reprises par Pardé, qui est reparti des documents originaux.

Les limnigrammes enregistrés aux échelles de Beaucaire et Arles et corrigés figurent ci-après. Ils sont exprimés en hauteur d'eau aux différentes échelles.

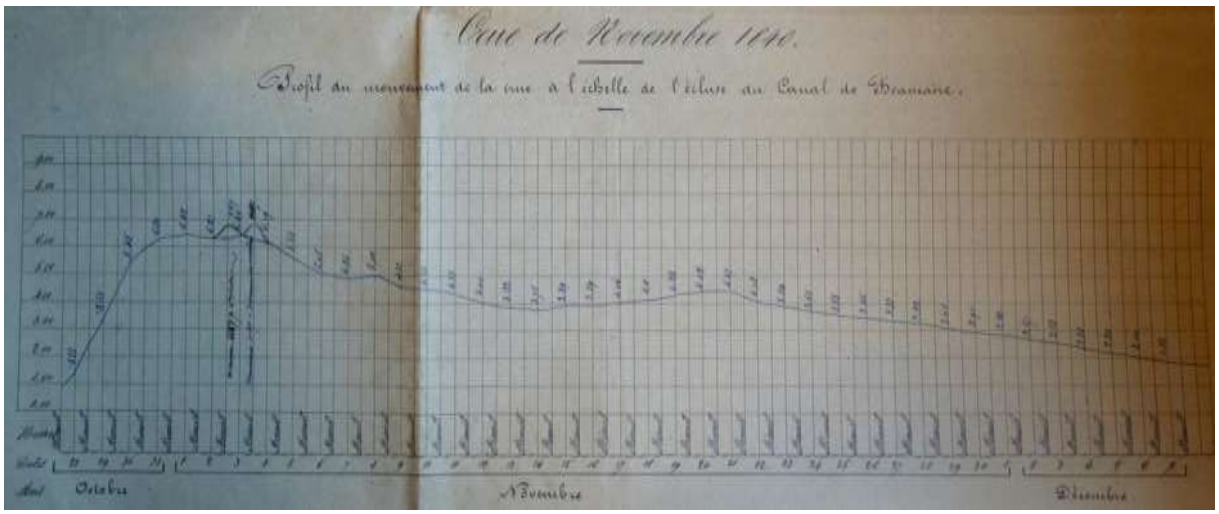


Figure 25. Crue de 1840 – limnigramme à l'échelle du canal de Beaucaire (SSR [O1840 01])

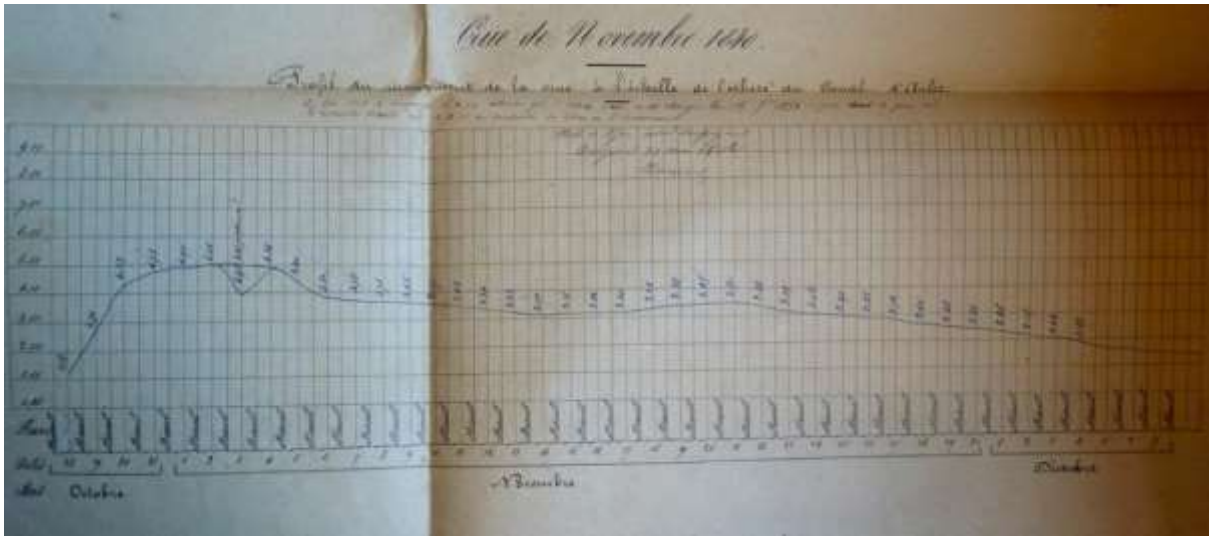


Figure 26. Crue de 1840 – limnigramme à l'échelle du canal d'Arles (SSR [O1840 01])

Ces limnigrammes donnent des hauteurs maximum de 6,87 m à l'échelle de Beaucaire (soit 10,25 m NGF IGN 69) et de 5,05 m à l'échelle de l'écluse du canal d'Arles, soit 6,35 m NGF IGN 69 (d'après Pichard 1,28 m NGF ortho [H0004]).

La lecture des journaux de l'époque et plus particulièrement du Journal de Toulouse et du Censeur de Lyon (éditions du mois de novembre 1840) permet de voir que les événements qui y sont décrits sont globalement conformes aux limnigrammes corrigés établis en 1857. Les limnigrammes figurant dans Pardé sont fort probablement erronés.

La figure ci-dessous permet de voir l'évolution des niveaux en m NGF aux échelles de Beaucaire et Arles. Le limnigramme sans brèche estimé par Pardé permet de voir que la crue se serait maintenue au-dessus de 6500 m^3/s pendant plus de 13 jours et au-dessus du 8500 m^3/s pendant plus de 8 jours.

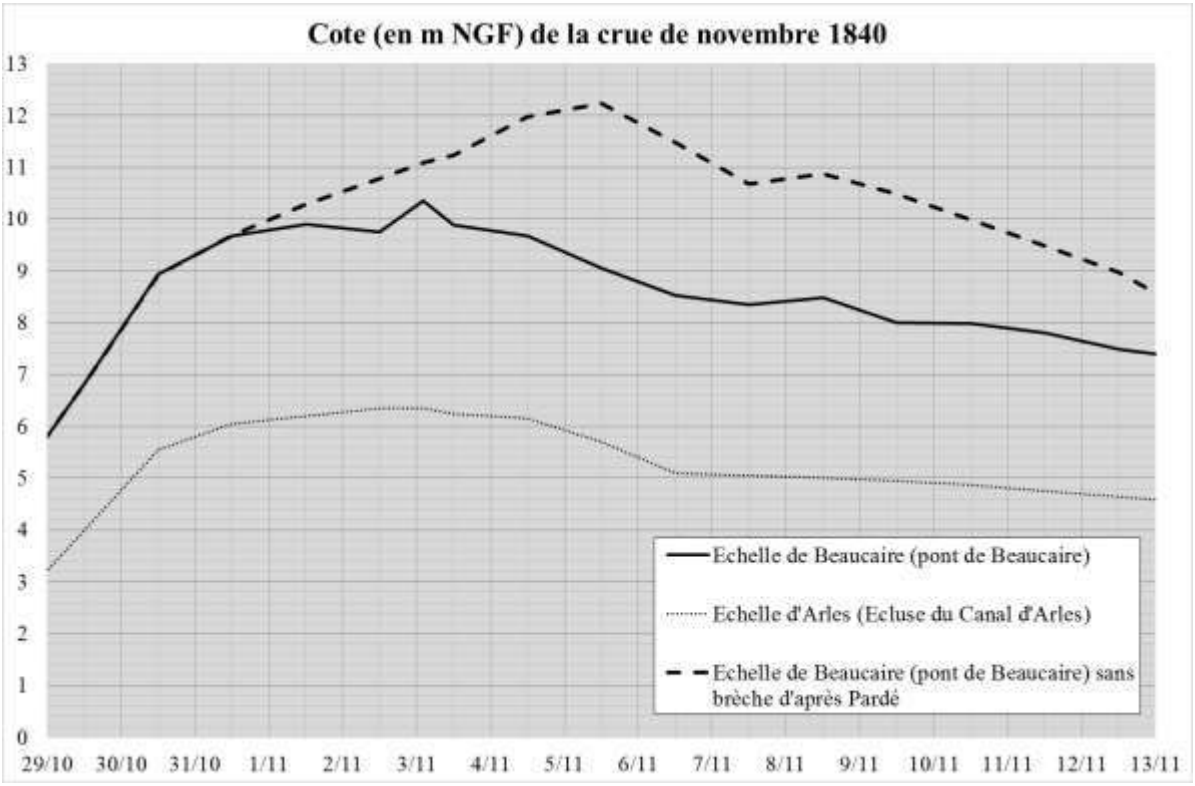


Figure 27. Crue novembre 1840 – limnigrammes aux échelles de Beaucaire et Arles (en m NGF)

1.4.3 Débits de la crue

A partir du niveau maximum observé à l'échelle de Beaucaire (6,87 m), Pardé [K001] a estimé le débit de pointe en traversée de Beaucaire/Tarascon à 9 800 m^3/s. Sans les ruptures en aval et amont de Beaucaire, le débit de pointe aurait vraisemblablement été compris, suivant Pardé [K001] entre 12 et 14 000 m^3/s, avec un niveau maximum de 8,75 m à l'échelle de Beaucaire (en milieu de journée du 5 novembre 1840 comme l'indique ce limnigramme reconstitué par Pardé, soit 12,13 m NGF. Dans Pardé [K003], l'estimation de 12 500 m^3/s est donnée pour cette même crue.

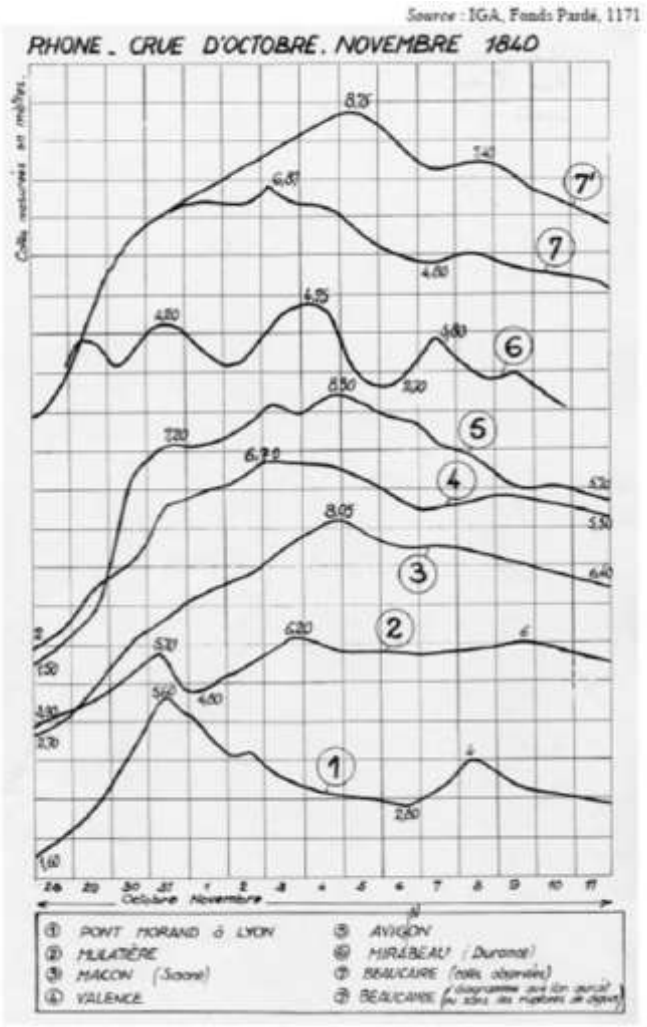


Figure 28. Limnigrammes observés et reconstitués de la crue de 1840 aux différentes échelles

CNR [J004] indique un débit de 9 640 m^3/s sans préciser s'il s'agit d'un débit avec ou sans prise en compte du débit dérivé dans les brèches de la Montagnette. Cette estimation correspond quasiment à la courbe de tarage de 1875. Elle correspondrait donc à un débit minoré du débit ayant transité par les brèches dans la digue de la Montagnette.

Actuellement, la valeur communément admise est celle de 13 000 m^3/s en absence de brèche. Elle est dans l'enveloppe donnée par Pardé.

1.4.4 Reconstitution des lignes d'eau

Certaines laisses de crue dans le lit endiguées ont été relevées et situées en altitudes relatives par rapport à la crue de 1856 dans le document du Service Spécial du Rhône SSR [O1856 10]. Cette dernière crue étant plus documentée. Nous avons pu estimer dans un premier temps la cote des laisses de crue de 1856 dans le nivellement général IGN 69 et en déduire les niveaux de la crue de 1840. Les résultats figurent dans le tableau ci-dessous.

Tableau 6. Laisses de crues de 1856 et 1840 (source SSR [O1856 10])

PK Rhône	Lieu-dit	Laisse de crue 1840 /1856	Laisse de crue 1856 (m NGF)	Laisse de crue 1840 (m NGF)
	Vallabrègues	Δ = - 0,83 m	13.53	12.70
	Boulbon		13,03	
	Digue Montagnette		12,92	
267,7	Pont de Beaucaire	Δ = - 1,08 m	11,33	10,25
271	Le Grand Castelet	Δ = - 0,93 m	10,09	9,16
273,5	Mas du Grand Beaumont	Δ = - 0,71 m	9,56	8,85
279	Mas molin	Δ = - 0,71 m	8,33	7,62
281	Pont de Fourques	Δ = - 0,77 m	8,23	7,46
302,9	Martelière de la fosse	Δ = - 0,55 m	5,04	4,49

1.4.5 Volume de la crue

Les volumes de crues sont les suivants :

Tableau 7. Volumes de la crue de novembre 1840

	Volume de crue (en Milliards m^3) pour Q > 4200 m^3/s	**Volume de crue (en Milliards m^3) pour Q > 6000 m^3/s**
Avec brèches	2	0.8
Sans brèches	6	3.9
Différence	4	3.1

1.5 LES AUTRES GRANDES CRUES DU XIX^{EME} SIECLE

1.5.1 La crue d'octobre 1841

La crue du 27 octobre 1841 a atteint la cote de 6,10 m à l'échelle de Beaucaire. D'après Pardé [K001], elle aurait atteint la cote de 6,90 m en l'absence de brèches, ce qui correspond à une cote de 10,28 m NGF.

Le débit de pointe a été estimé à 8 500 m^3/s par Pardé [K001] (en supposant l'absence de brèches) et à 8 150 m^3/s par la CNR [J003] et [J004] en prenant en compte l'effet des brèches.

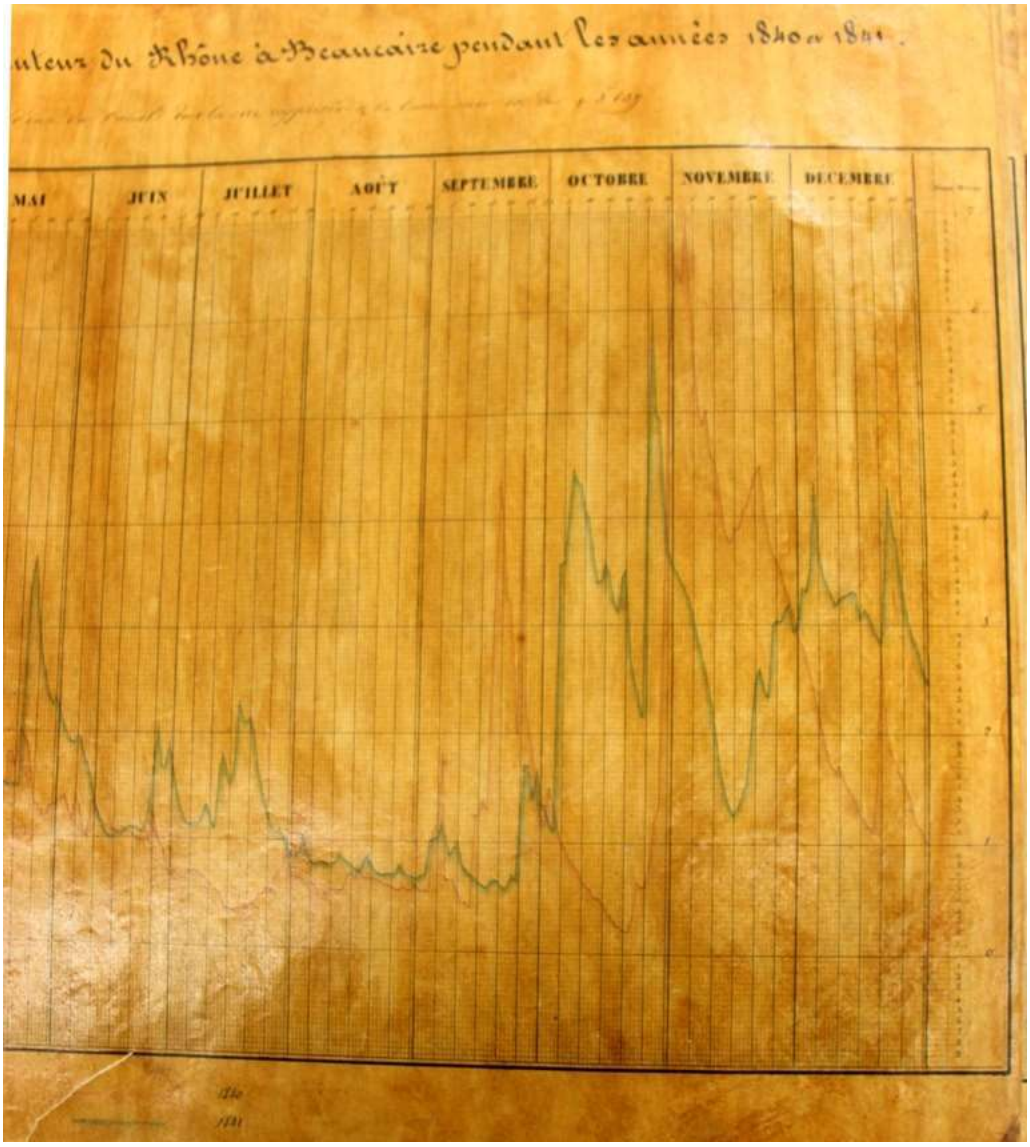


Figure 29. Niveaux à l'échelle de Beaucaire en novembre 1843 [O002]

1.5.2 La crue de novembre 1843

La crue du 3 novembre 1843 a principalement été causée par la Durance qui a atteint un débit de pointe de 6 000 m^3/s et qui a envahi la plaine de Tarascon et la plaine du Trébon depuis Châteaurenard en contournant le massif de la Montagnette par le Sud.

La hauteur à l'échelle de Beaucaire a été de 6,79 m, abaissée probablement par les ruptures de digues [K001]. Elle correspond à une cote de 10,17 m NGF

Le débit de pointe a été estimé à 9 000 m^3/s par Pardé [K001] en supposant l'absence de brèches et à 9 460 m^3/s par la CNR [J003] et [J004] en appliquant une courbe de tarage proche de celle de 1875.

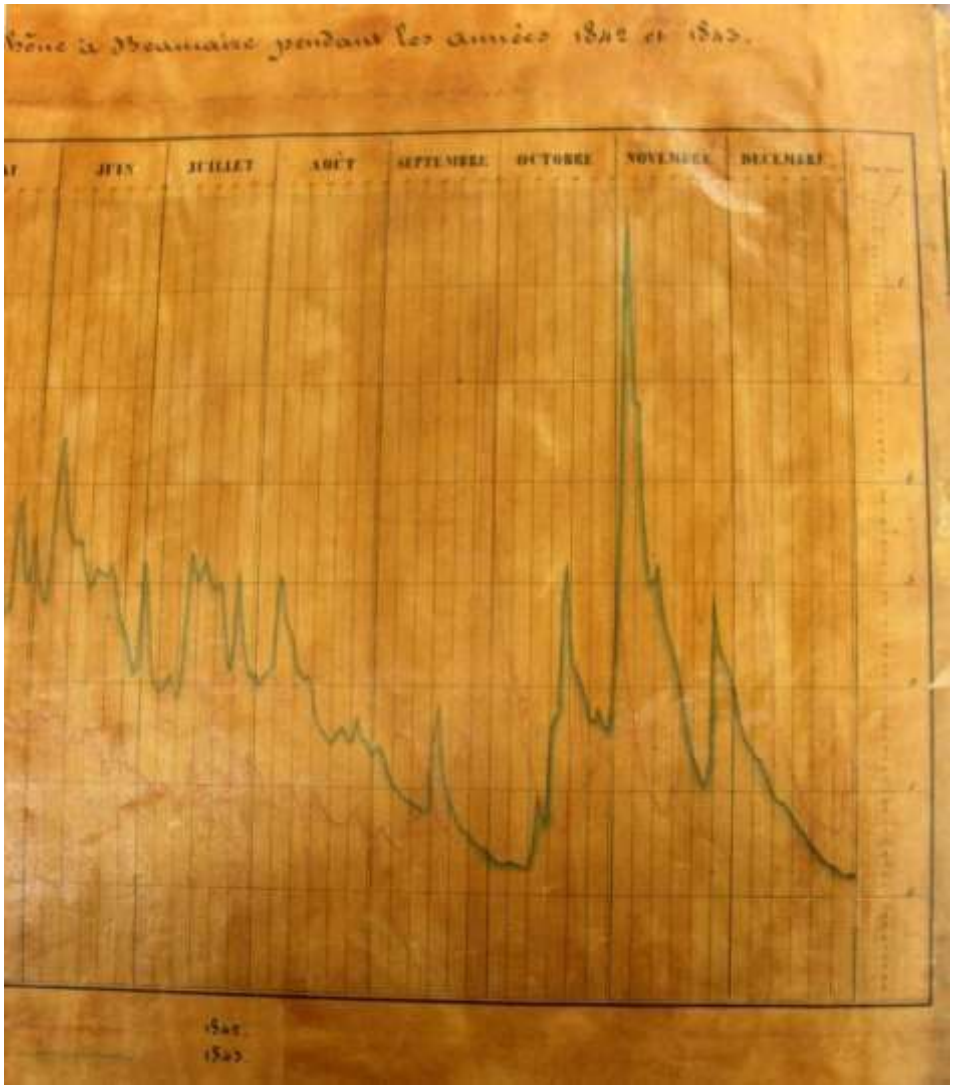


Figure 30. Niveaux à l'échelle de Beaucaire en novembre 1843 [O002]

1.5.3 La crue d'octobre 1846

La crue du 19 octobre 1841 a atteint la cote de 6,45 m à l'échelle de Beaucaire, soit une cote de 9,83 m NGF.

Le débit de pointe a été estimé à 7 400 m^3/s par Pardé [K001] et à 8 720 m^3/s par la CNR [J003] et [J004].

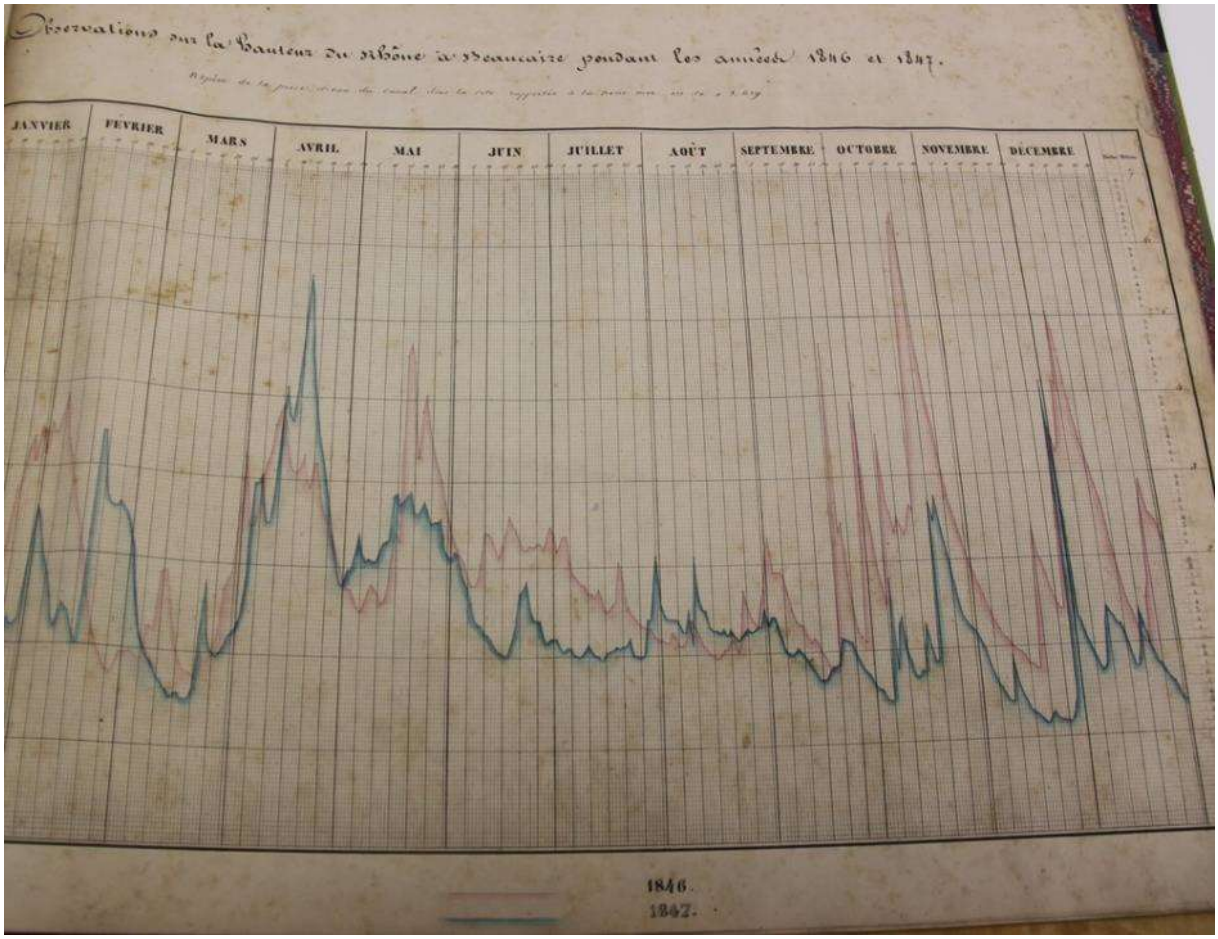


Figure 31. Niveaux à l'échelle de Beaucaire en octobre 1846 [O002]

1.5.4 Les crues d'octobre et décembre 1872

La crue du 21 octobre 1872 a atteint la cote de 6,88 m à l'échelle de Beaucaire, soit une cote de 10,26 m NGF. Le débit de pointe a été estimé à 8 400 m^3/s par Pardé [K001] et à 9 080 m^3/s par la CNR [J003] et [J004].

La crue du 4 décembre 1872 a atteint la cote de 6,50 m à l'échelle de Beaucaire, soit une cote de 9,88 m NGF. Le débit de pointe a été estimé à 7 700 m^3/s par Pardé [K001].

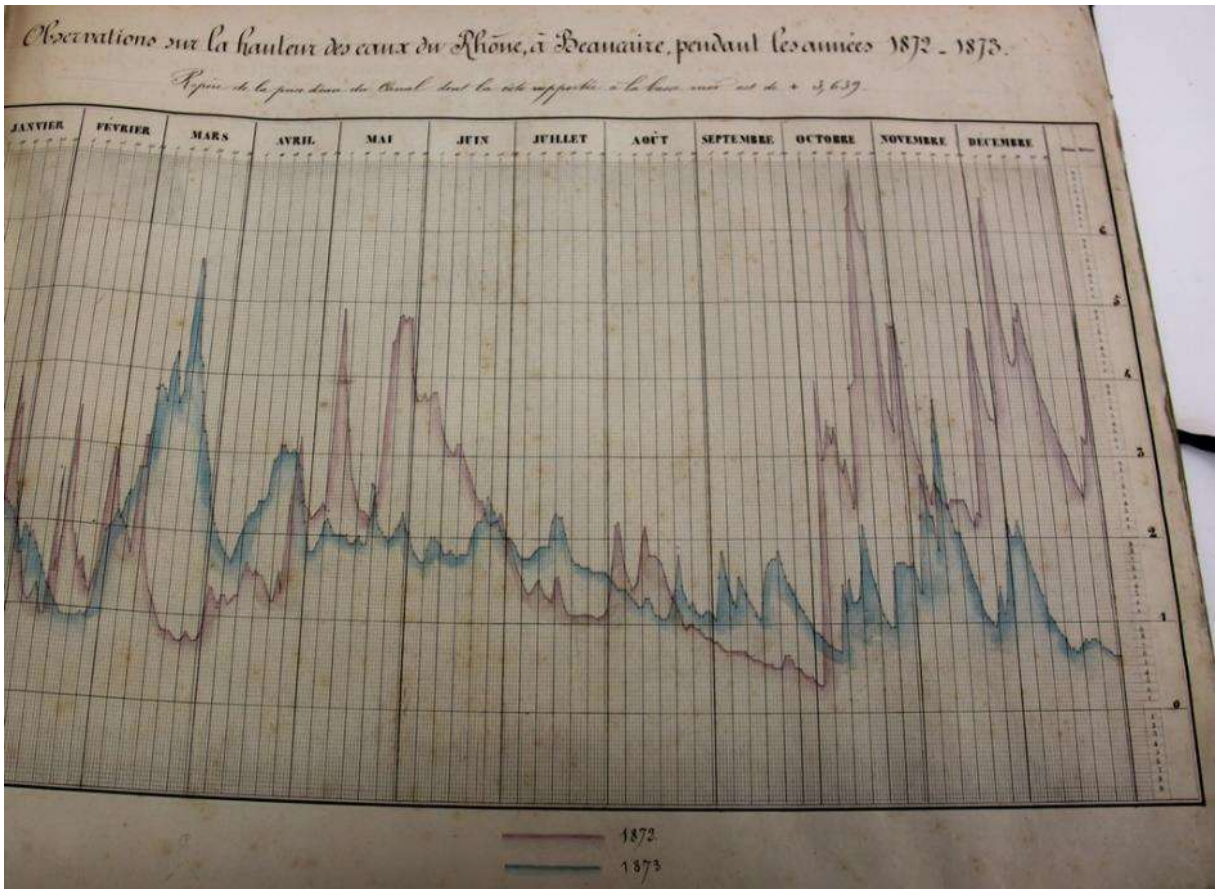


Figure 32. Niveaux à l'échelle de Beaucaire en octobre et décembre 1872 [O002]

1.5.5 La crue d'octobre 1882

La crue du 29 octobre 1882 a atteint la cote de 6,60 m à l'échelle de Beaucaire, soit une cote de 9,98 m NGF. Le débit de pointe a été estimé à 7 800 m^3/s par Pardé [K001] et à 8 390 m^3/s par la CNR [J003] et [J004].

1.5.6 Les crues d'octobre et novembre 1886

Deux crues bien distinctes se sont succédées, les 27 octobre et 12 novembre 1886.

La crue du 27 octobre 1886 a atteint la cote de 7,48 m à l'échelle de Beaucaire, soit une cote de 10,86 m NGF. Le débit de pointe a été estimé à 9 500 m^3/s par Pardé [K001].

La crue du 12 novembre 1886 a atteint la cote de 7,55 m à l'échelle de Beaucaire, soit une cote de 10,93 m NGF. Le débit de pointe a été estimé à 9 700 m^3/s par Pardé [K001] et à 10 200 m^3/s par la CNR [J003] et [J004].

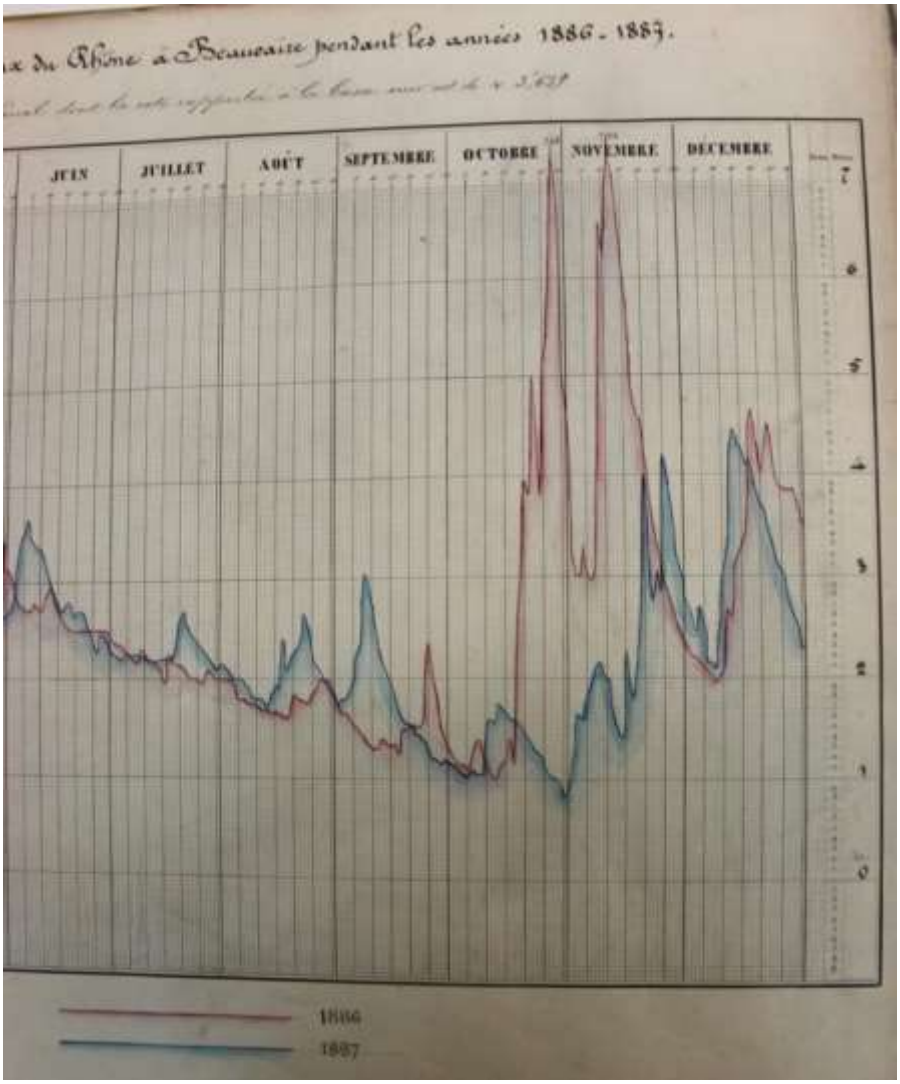


Figure 33. Niveaux à l'échelle de Beaucaire en octobre et décembre 1872 [O002]

1.5.7 La crue de janvier 1889

La crue du 1er janvier 1889 a atteint la cote de 6,81 m à l'échelle de Beaucaire, soit une cote de 10,19 m NGF. Le débit de pointe a été estimé à 8 300 m^3/s par Pardé [K001] et à 8 780 m^3/s par la CNR [J003] et [J004].

1.5.8 La crue de novembre 1896

La crue du 3 novembre 1896 a atteint la cote de 7,00 m à l'échelle de Beaucaire, soit une cote de 10,38 m NGF. Le débit de pointe a été estimé à 8 600 m^3/s par Pardé [K001] et à 9 060 m^3/s par la CNR [J003] et [J004].

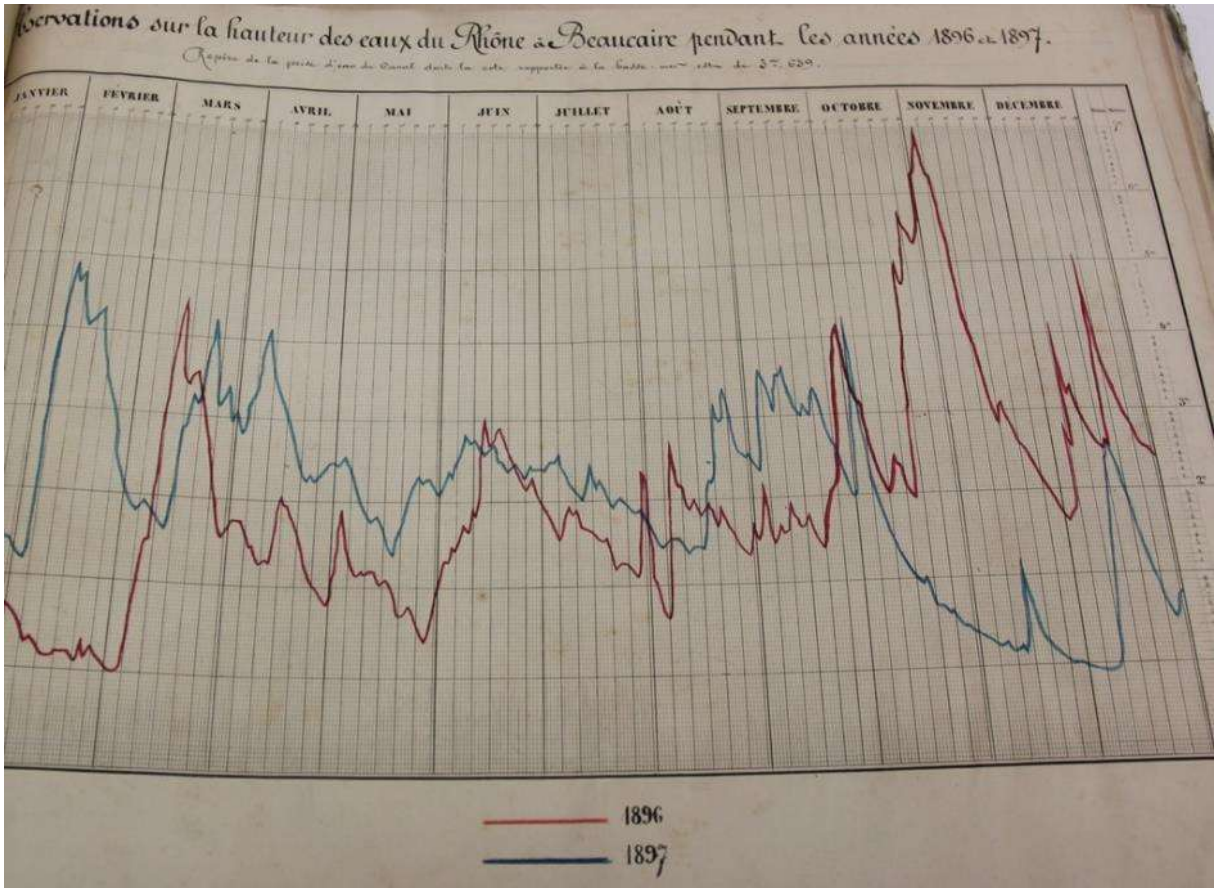


Figure 34. Niveaux à l'échelle de Beaucaire en novembre 1896 [O002]

1.6 LES GRANDES CRUES DU XX^{EME} SIECLE JUSQU'EN 1992

1.6.1 La crue de septembre 1900

La crue du 30 septembre 1900 a atteint la cote de 7,08 m à l'échelle de Beaucaire, soit une cote de 10,46 m NGF. Le débit de pointe a été estimé à 8 700 m^3/s par Pardé [K001] et à 8 940 m^3/s par la CNR [J003] et [J004].

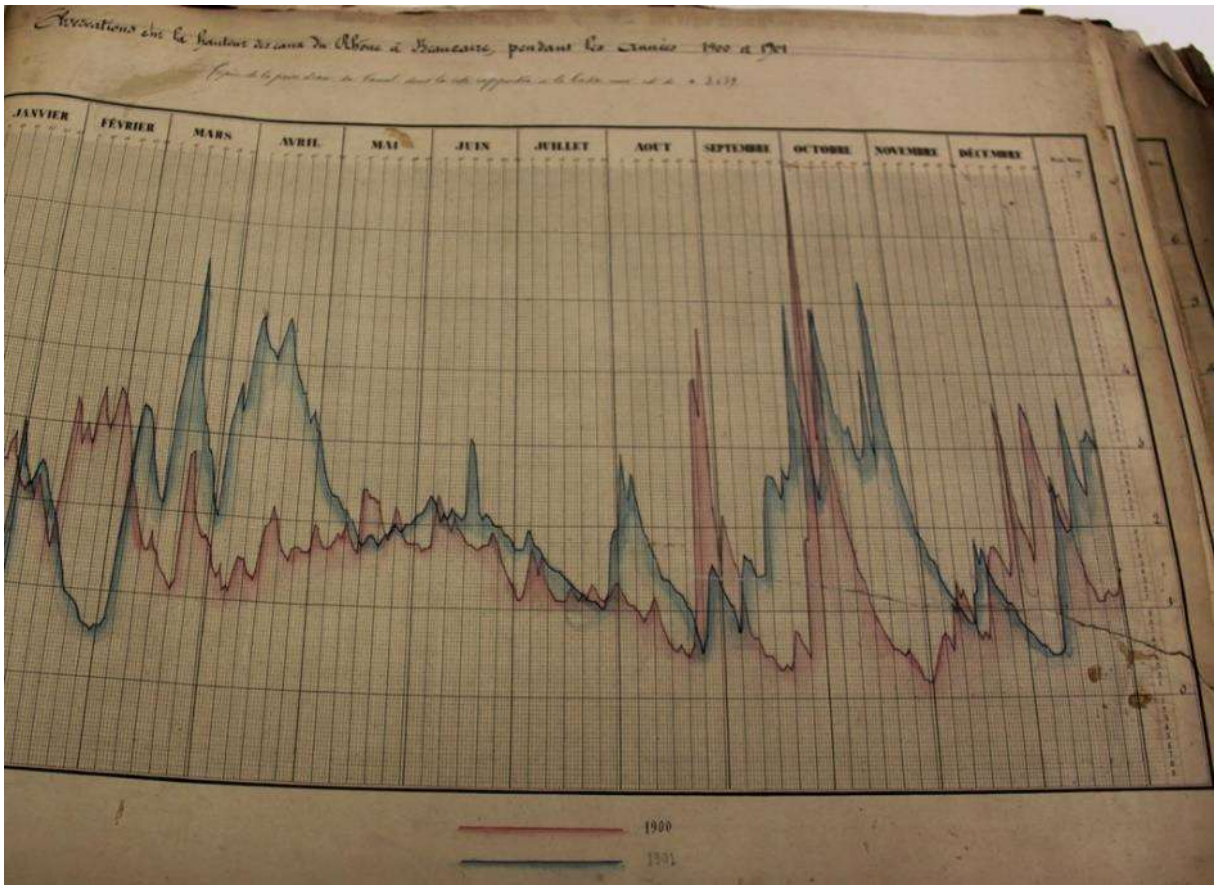


Figure 35. Niveaux à l'échelle de Beaucaire en septembre 1900 [O002]

1.6.2 Les crues d'octobre et de novembre 1907

La crue du 12 octobre 1907 a atteint la cote de 6,68 m à l'échelle de Beaucaire, soit une cote de 10,06 m NGF. Le débit de pointe a été estimé à 7 900 m^3/s par Pardé [K001].

La crue du 18 octobre 1907 a atteint la cote de 6,7 m à l'échelle de Beaucaire, soit une cote de 10,08 m NGF. Le débit de pointe a été estimé à 7 900 m^3/s par Pardé [K001].

La crue du 10 novembre 1907 a atteint la cote de 6,83 m à l'échelle de Beaucaire, soit une cote de 10,21 m NGF. Le débit de pointe a été estimé à 8 400 m^3/s par Pardé [K001] et à 8 500 m^3/s par la CNR [J003] et [J004].

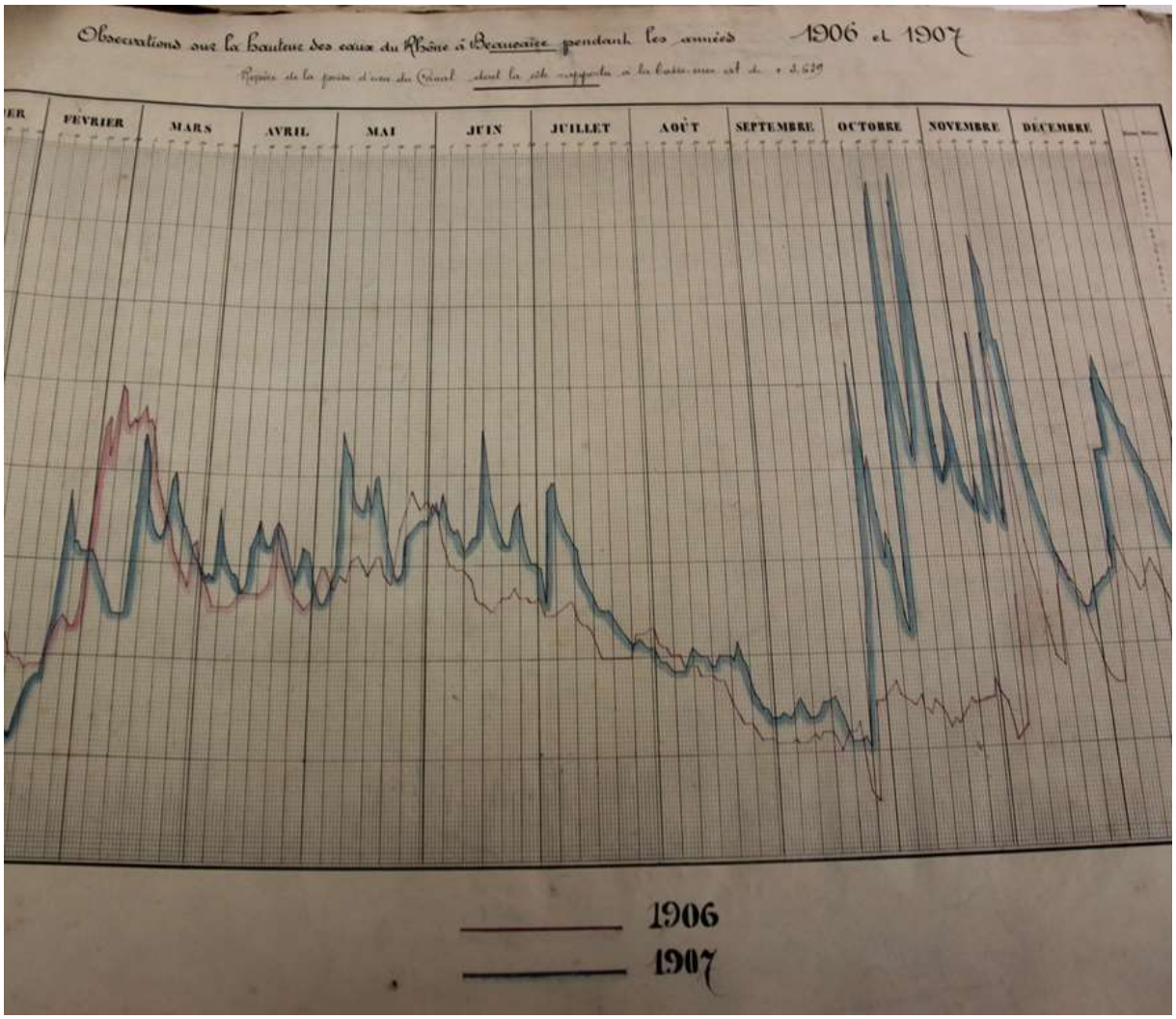


Figure 36. Niveaux à l'échelle de Beaucaire en octobre et novembre 1907 [O002]

1.6.3 La crue de décembre 1910

La crue du 8 décembre 1910 a atteint la cote de 7,02 m à l'échelle de Beaucaire, soit une cote de 10,40 m NGF. Le débit de pointe a été estimé à 8 600 m^3/s par Pardé [K001] et à 8 660 m^3/s par la CNR [J003] et [J004].

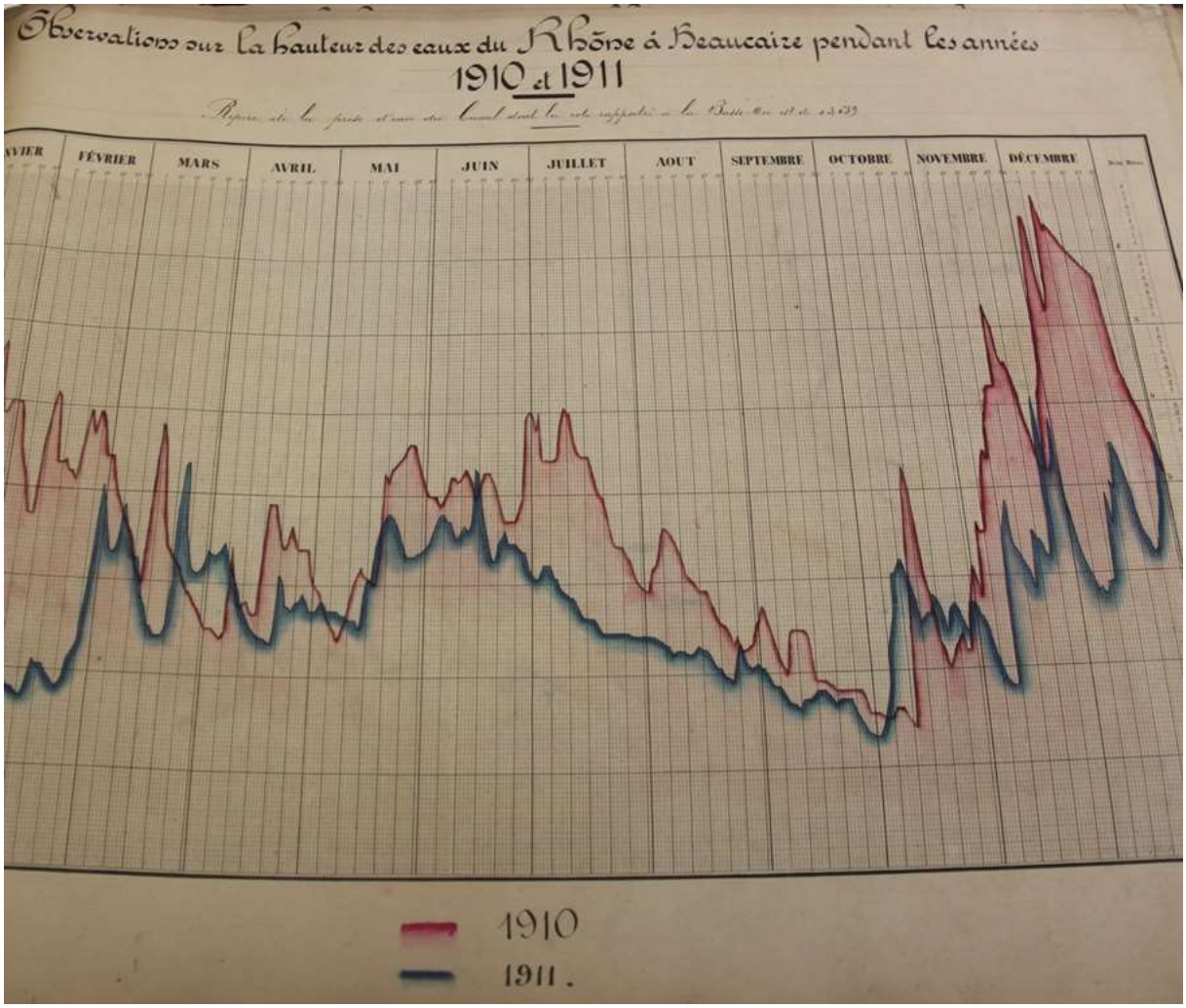


Figure 37. Niveaux à l'échelle de Beaucaire en décembre 1910 [O002]

1.6.4 La crue de novembre 1935

La crue du 14 novembre 1935 a atteint la cote de 7,68 m à l'échelle de Beaucaire, soit une cote de 11,06 m NGF. Le débit de pointe a été estimé à 9 500 m^3/s par Pardé [K001] et à 9 600 m^3/s par la CNR [J003] et [J004].

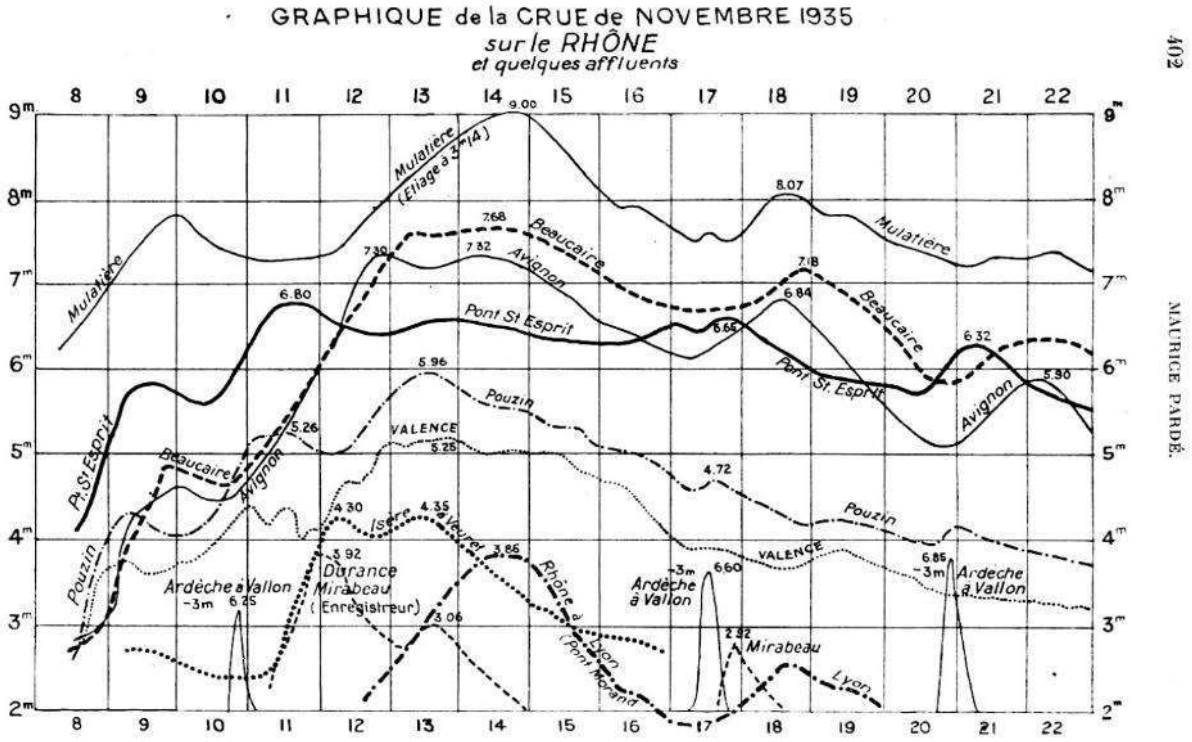


Figure 38. Limnigrammes de la crue de novembre 1935 (Pardé [K003])

1.6.5 La crue de novembre 1951

La crue a connu deux pics les 12 et 22 novembre 1951 avec des niveaux respectifs de 7.35 et 7,64 m à l'échelle de Beaucaire, soit des cotes de 10,73 et 11,02 m NGF.

Le débit de pointe du second pic a été estimé à 9 500 m^3/s par Pardé [K001] et à 9 170 m^3/s par la CNR [J003] et [J004].

1.7 LES CRUES DE 1993 A 2002

1.7.1 La crue d'octobre 1993

La crue a franchi le seuil de 8,15 m NGF à la station de Beaucaire/Tarascon (environ 6 750 m^3/s) du 7/10/1993 en soirée jusqu'au 12/10/1993 en matinée pour atteindre son pic de crue le 10 octobre 1993 à 7h. Les principales caractéristiques de la crue d'octobre 1993 sont les suivantes.

Tableau 8. Caractéristiques hydrologiques et hydrauliques de la crue d'octobre 1993

Durée alerte 2 – groupe 1 - Q > 6 750 m^3/s	4,5 jours
Durée alerte 2 – groupe 2 – Q > 7 500 m^3/s	2,5 jours
Durée alerte 3 – groupe 1 – Q > 8 400 m^3/s	1,5 jour
Durée alerte 3 – groupe 2 – Q > 9 000 m^3/s	0 jour
Débit de pointe annoncé (anc. courbe tarage)	9 800 m^3/s
Débit de pointe (nouvelle courbe de tarage)	9 000 m^3/s
Cote maximum (m NGF)	9,93 m NGF

La figure ci-dessous extraite de DREAL RA [K205] illustre l'intensité des apports des affluents du Rhône.

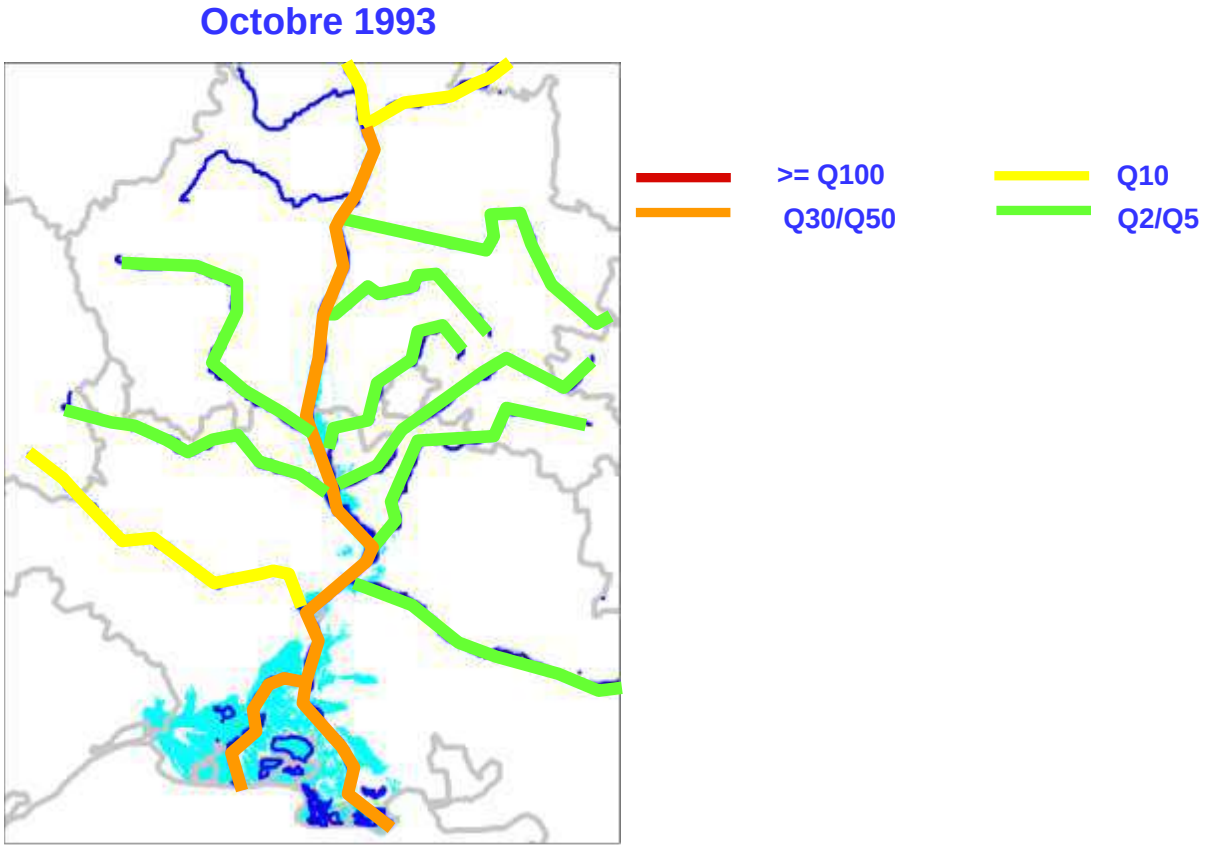


Figure 39. Crue du Rhône d'oct. 1993 et apports des affluents (source DREAL RA [K205])

L'évolution des limnigrammes aux différentes stations du Grand Delta figure ci-après. Les instants de formation des deux principales brèches (Figarès et Lauricet) y sont également indiqués.

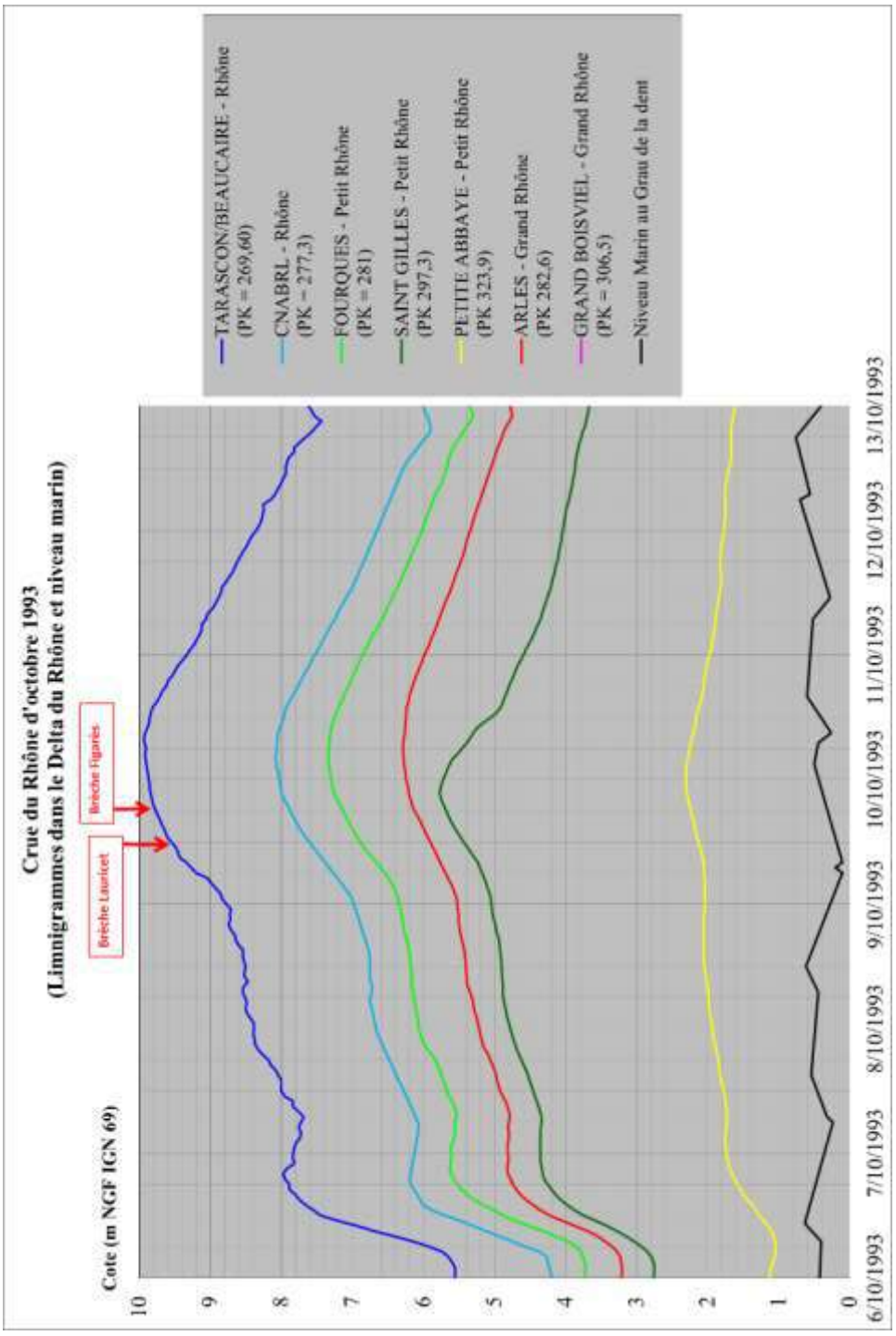


Figure 40. Crue d'octobre 1993 – Limnigrammes dans le Delta du Rhône et niveau marin

Les volumes de la crue sont les suivants :

- Volume de la crue pour Q > 4200 m^3/s : 2.8 milliards de m^3,
- Volume de la crue pour Q > 6000 m^3/s : 0.8 milliards de m^3.

1.7.2 La crue de janvier 1994

La crue a franchi le seuil de 8,15 m NGF (environ 6750 m^3/s) du 7/01/1994 (vers 10h30) en matinée jusqu'au 09/01/1994 en soirée (vers 18h00) pour atteindre son pic de crue le 8 octobre 1993 à 7h à la station de Beaucaire/Tarascon. Les principales caractéristiques de la crue de janvier 1994 sont les suivantes.

Tableau 9. Caractéristiques hydrologiques et hydrauliques de la crue de janvier 1994

Durée alerte 2 – groupe 1 - Q > 6 750 m^3/s	2,5 jours
Durée alerte 2 – groupe 2 – Q > 7 500 m^3/s	2 jours
Durée alerte 3 – groupe 1 – Q > 8 400 m^3/s	1,5 jour
Durée alerte 3 – groupe 2 – Q > 9 000 m^3/s	1 jour
Débit de pointe annoncé (anc. courbe tarage)	11 000 m^3/s
Débit de pointe (nouvelle courbe de tarage)	10 000 m^3/s
Cote maximum (m NGF)	10,50 m NGF

La figure ci-dessous extraite de DREAL RA [K205] illustre l'intensité des apports des affluents du Rhône (principalement la Durance).

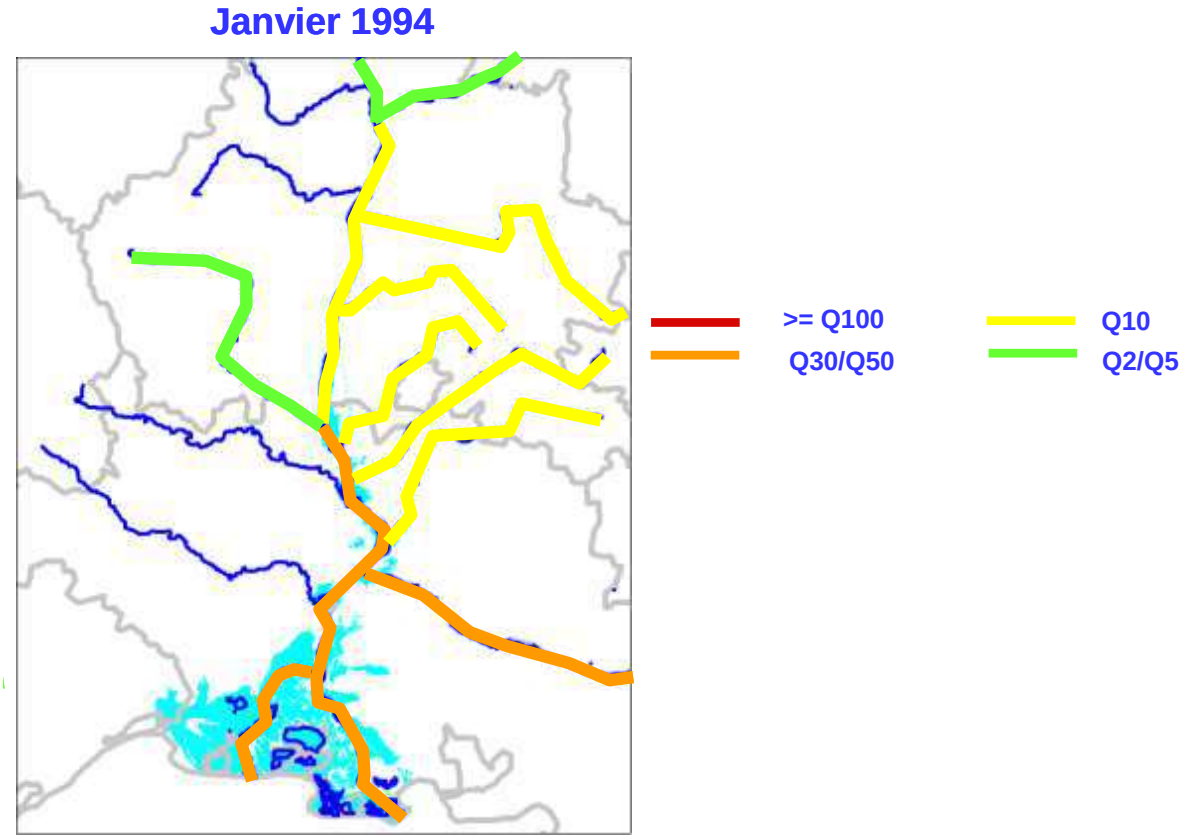


Figure 41. Crue de janvier 1994 et apport des affluents (DREAL RA [K205])

L'évolution des limnigrammes aux différentes stations du Grand Delta figure en page suivante. Les instants de formation des brèches de Beaumont et de Lauricet y sont également indiqués.

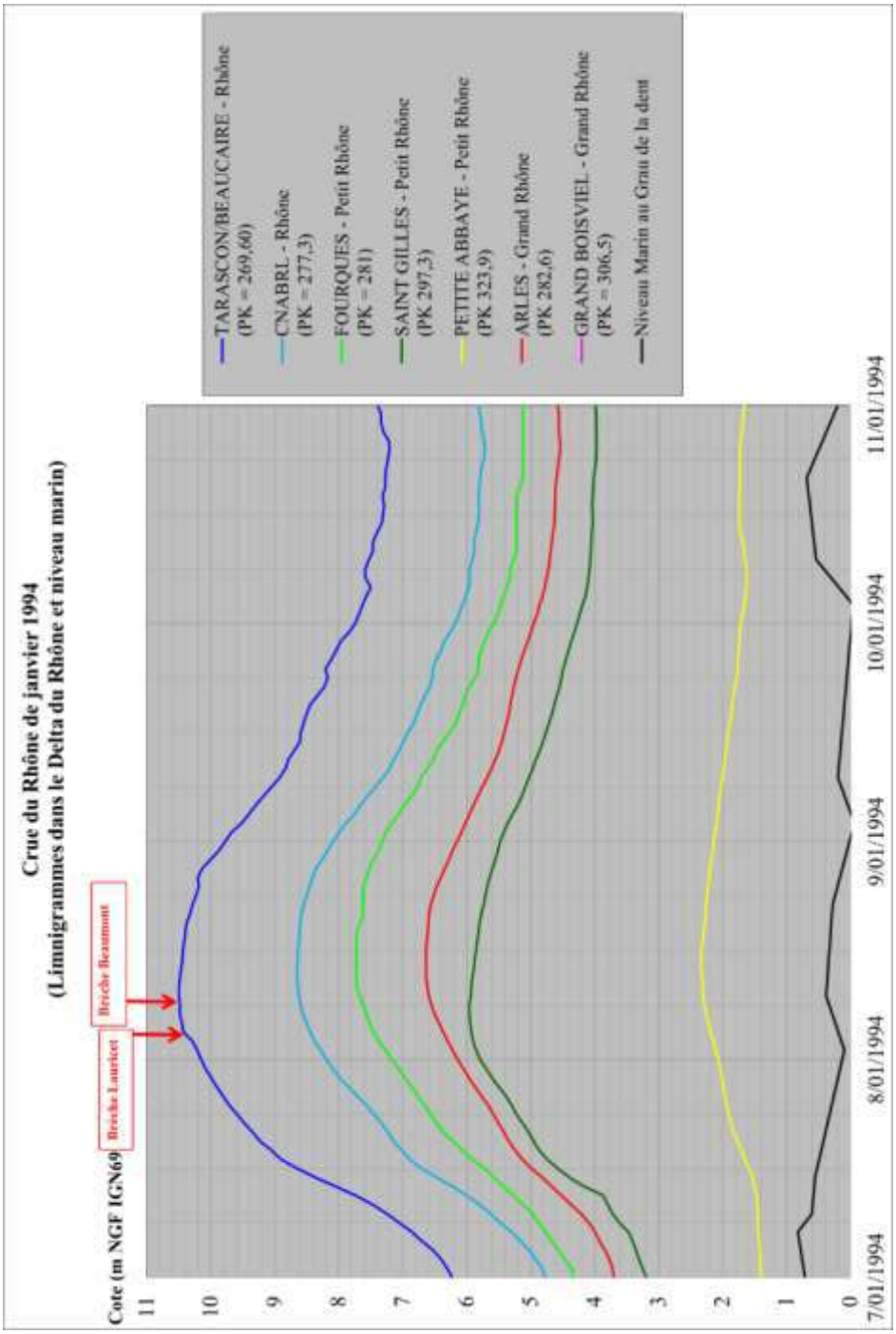


Figure 42. Crue de janvier 1994 – Limnigrammes dans le Delta du Rhône et niveau marin

Les volumes de la crue sont les suivants :

- Volume de la crue pour Q > 4200 m^3/s : 1.2 milliards de m^3,
- Volume de la crue pour Q > 6000 m^3/s : 0.55 milliards de m^3.

1.7.3 La crue de novembre 1994

La crue a franchi le seuil de 8,15 m NGF (environ 6750 m^3/s) du 6/11/1994 (vers 01h00) jusqu'au 07/11/1994 à 10h00. Elle a atteint son pic le 6 novembre 1994 à 16h00 à la station de Beaucaire/Tarascon. Les principales caractéristiques de la crue de novembre 1994 sont les suivantes.

Tableau 10. Caractéristiques hydrologiques et hydrauliques de la crue de nov. 1994

Durée alerte 2 – groupe 1 - Q > 6 750 m^3/s	1,5 jour
Durée alerte 2 – groupe 2 – Q > 7 500 m^3/s	1 jour
Durée alerte 3 – groupe 1 – Q > 8 400 m^3/s	0,5 jour
Durée alerte 3 – groupe 2 – Q > 9 000 m^3/s	3 heures
Débit de pointe annoncé (anc. courbe tarage)	9 800 m^3/s
Débit de pointe (nouvelle courbe de tarage)	8 900 m^3/s
Cote maximum (m NGF)	9,92 m NGF

L'évolution des limnigrammes aux différentes stations du Grand Delta, ainsi que les enregistrements du marégramme du Grau de la Dent figurent ci-après.

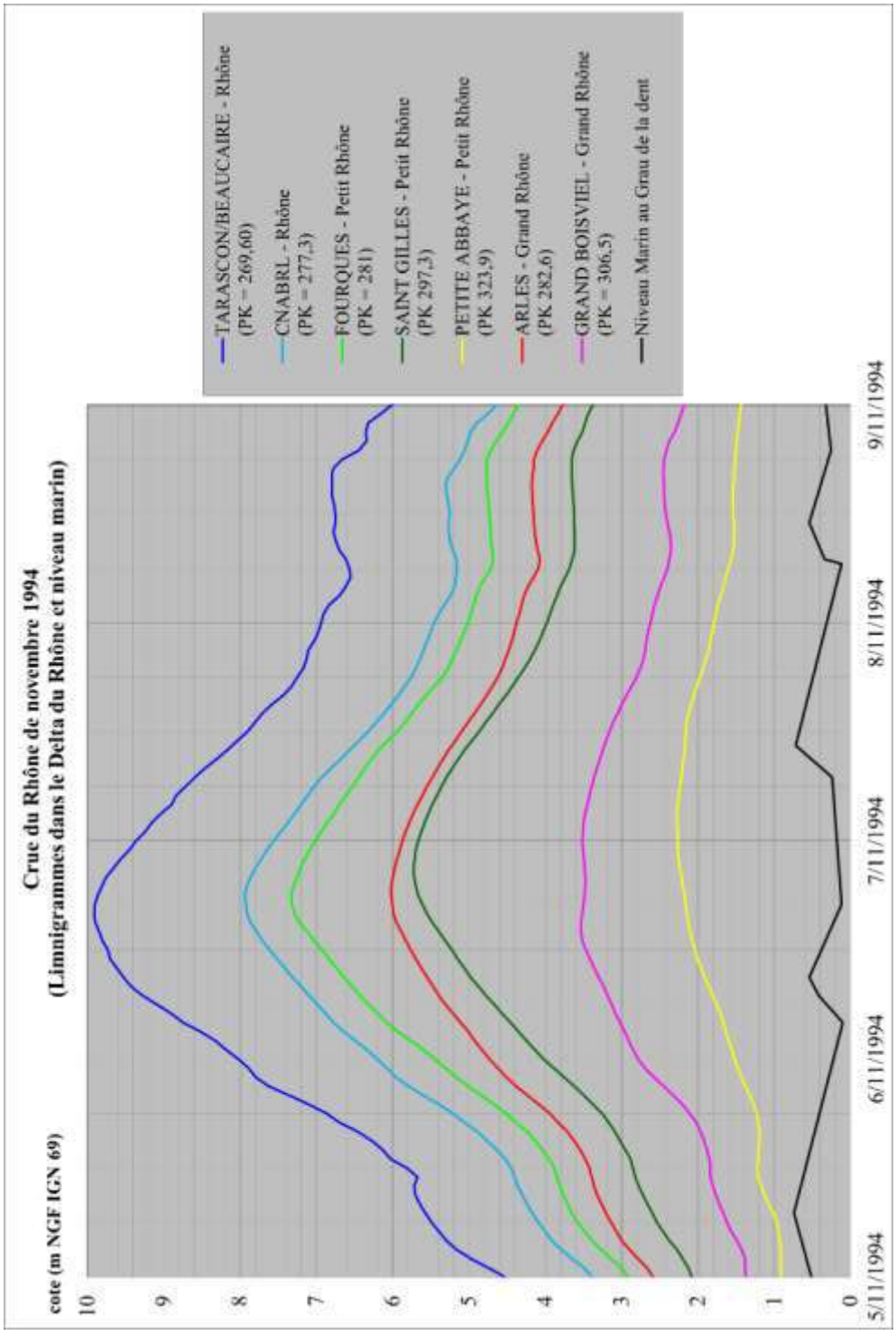


Figure 43. Crue de Nov. 1994 – Limnigrammes dans le Delta du Rhône

Les volumes de la crue sont les suivants :

- Volume de la crue pour Q > 4200 m^3/s : 0.8 milliards de m^3,
- Volume de la crue pour Q > 6000 m^3/s : 0.26 milliards de m^3.

1.7.4 La crue de novembre 1996

La crue a franchi le seuil de 8,15 m NGF (environ 6750 m^3/s) du 13/11/1996 à 11h00 jusqu'au 14/11/1994 à 12h00. Elle a atteint son pic le 13 novembre 1996 à 22h00 à la station de Beaucaire/Tarascon. Les principales caractéristiques de la crue de novembre 1996 sont les suivantes.

Tableau 11. Caractéristiques hydrologiques et hydrauliques de la crue de nov. 1996

Durée alerte 2 – groupe 1 - Q > 6 750 m^3/s	1 jour
Durée alerte 2 – groupe 2 – Q > 7 500 m^3/s	18 heures
Durée alerte 3 – groupe 1 – Q > 8 400 m^3/s	1 heure
Durée alerte 3 – groupe 2 – Q > 9 000 m^3/s	
Débit de pointe annoncé (anc. courbe tarage)	9 000 m^3/s
Débit de pointe (nouvelle courbe de tarage)	8 400 m^3/s
Cote maximum (m NGF)	9,48 m NGF

L'évolution des limnigrammes aux différentes stations du Grand Delta, ainsi que les enregistrements du marégramme du Grau de la Dent figurent ci-dessous.

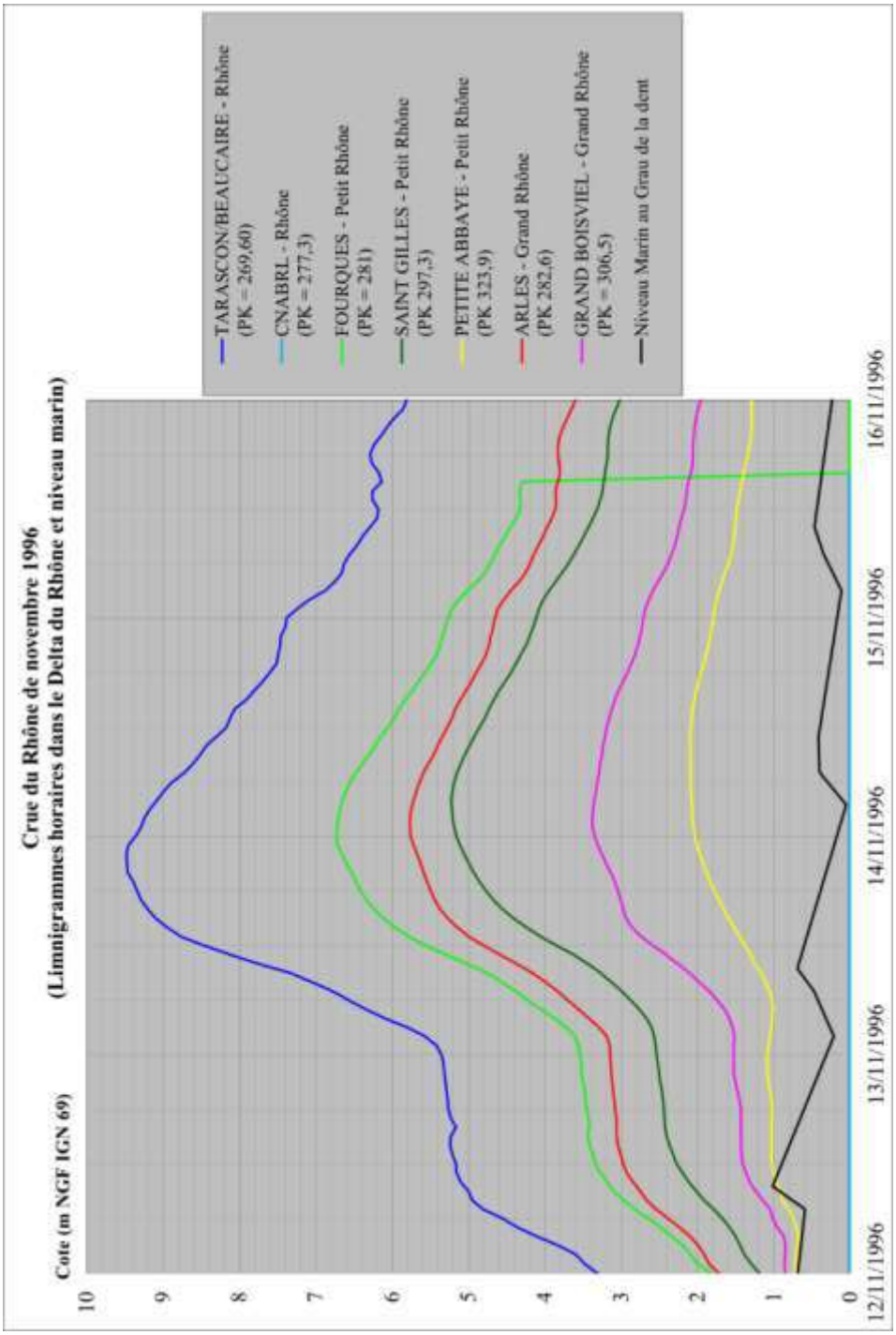


Figure 44. Crue de Nov. 1996 – Limnigrammes dans le Delta du Rhône

Les volumes de la crue sont les suivants :

- Volume de la crue pour Q > 4200 m^3/s : 0.5 milliards de m^3,
- Volume de la crue pour Q > 6000 m^3/s : 0.17 milliards de m^3.

1.7.5 La crue de septembre 2002

La crue de septembre 2002 est la crue la plus rapide depuis 1993. Elle a franchi le seuil de 8,15 m NGF (environ 6750 m^3/s) du 09/09/2002 à 17h00 jusqu'au 10/02/2002 à 11h00. Elle a atteint son pic le 10 septembre 2002 à 2h00 à la station de Beaucaire/Tarascon. Les principales caractéristiques de la crue de septembre 2002 sont les suivantes.

Tableau 12. Caractéristiques hydrologiques et hydrauliques de la crue de sept. 2002

Durée alerte 2 – groupe 1 - Q > 6 750 m^3/s	18 heures
Durée alerte 2 – groupe 2 – Q > 7 500 m^3/s	16 heures
Durée alerte 3 – groupe 1 – Q > 8 400 m^3/s	13 heures
Durée alerte 3 – groupe 2 – Q > 9 000 m^3/s	10 heures
Débit de pointe annoncé (anc. courbe tarage)	10 600 m^3/s
Débit de pointe (nouvelle courbe de tarage)	9 600 m^3/s
Cote maximum (m NGF)	10,30 m NGF

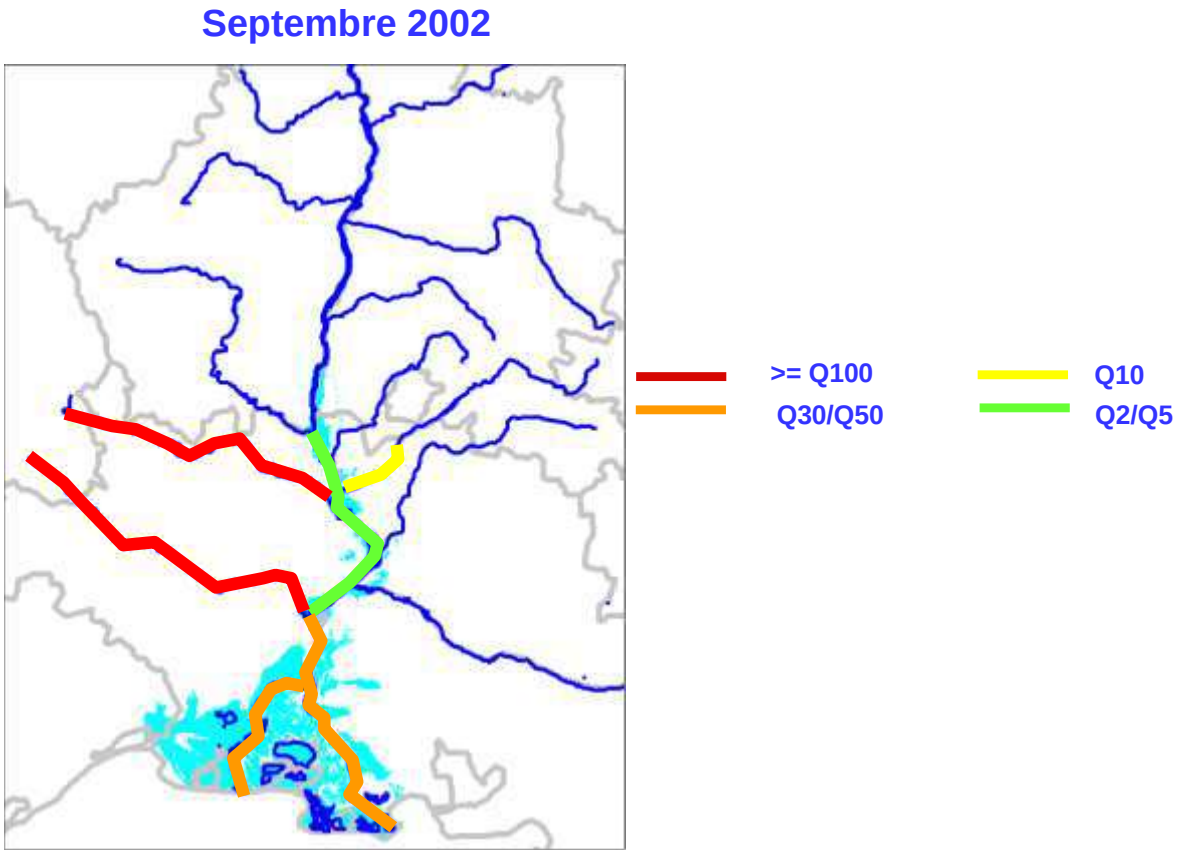


Figure 45. Crue de septembre 2002 – apports des affluents (source DREAL RA [K205])

L'évolution des limnigrammes aux différentes stations du Grand Delta, ainsi que les enregistrements du marégramme du Grau de la Dent figurent ci-dessous.

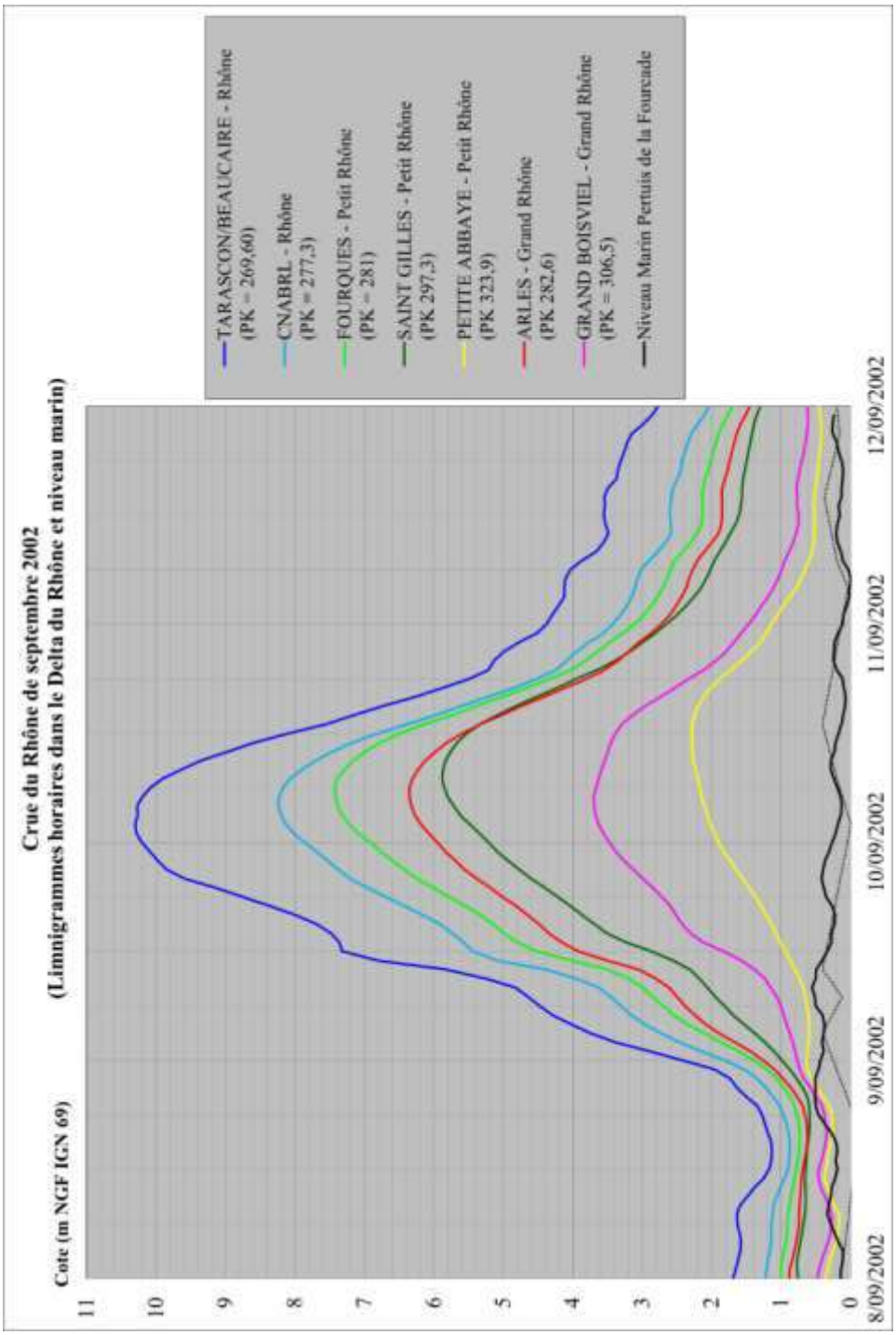


Figure 46. Crue de Sept. 2002 – Limnigrammes dans le Delta du Rhône

Les volumes de la crue sont les suivants :

- Volume de la crue pour Q > 4200 m^3/s : 0.37 milliards de m^3,
- Volume de la crue pour Q > 6000 m^3/s : 0.19 milliards de m^3.

1.7.6 La crue de novembre 2002

La crue de novembre 2002 s'est principalement caractérisée par sa longueur et ses trois pointes successives entre le 15/11/2002 et le 01/12/2002. Elle a franchi une première fois le seuil de 8,15 m NGF (environ 6750 m^3/s) le 16/11/2002 à 0h00 pour atteindre un 1er pic à la cote de 9,60 m NGF le 17/11/2002 à 14h et redescendre sous le seuil de 8,15 m NGF le 20/11/2002 à 2h00.
Le 22/11/2002 à 5h00, le seuil de 8,15 m NGF a été une nouvelle fois franchi. La crue a atteint son 2ème pic à la cote de 8,79 m NGF le 22/11/2002 à 13h00 pour redescendre sous le seuil de 8,15 m NGF, le même jour à 22h.
Le 24/11/2002, la crue franchit le seuil de 8,15 m NGF une 3ème fois pour atteindre son pic maximum le 26/11/2002 à 9h00 (cote de 10,15 m NGF). La crue est redescendue sous le seuil de 8,15 m NGF le 28/11/2002 à 19h.

Les principales caractéristiques de la crue de novembre 2002 et ses trois pics sont les suivantes :

Tableau 13. Caractéristiques hydrologiques et hydrauliques de la crue de novembre 2002

Durée alerte 2 – groupe 1 - Q > 6 750 m^3/s	9 jours
Durée alerte 2 – groupe 2 – Q > 7 500 m^3/s	6,5 jours
Durée alerte 3 – groupe 1 – Q > 8 400 m^3/s	2,5 à 3 jours
Durée alerte 3 – groupe 2 – Q > 9 000 m^3/s	1,5 jour
Débit de pointe 1er pic annoncé (anc. courbe tarage)	9 200 m^3/s
Débit de pointe 1er pic (nouvelle courbe de tarage)	8 500 m^3/s
Cote maximum 1er pic (m NGF)	9,60 m NGF
Débit de pointe 3ème pic annoncé (anc. courbe tarage)	10 300 m^3/s
Débit de pointe 3ème pic (nouvelle courbe de tarage)	9 500 m^3/s
Cote maximum 3ème pic (m NGF)	10,15 m NGF

La figure ci-après extraite de DREAL RA [K205] illustre l'intensité des apports des affluents du Rhône.

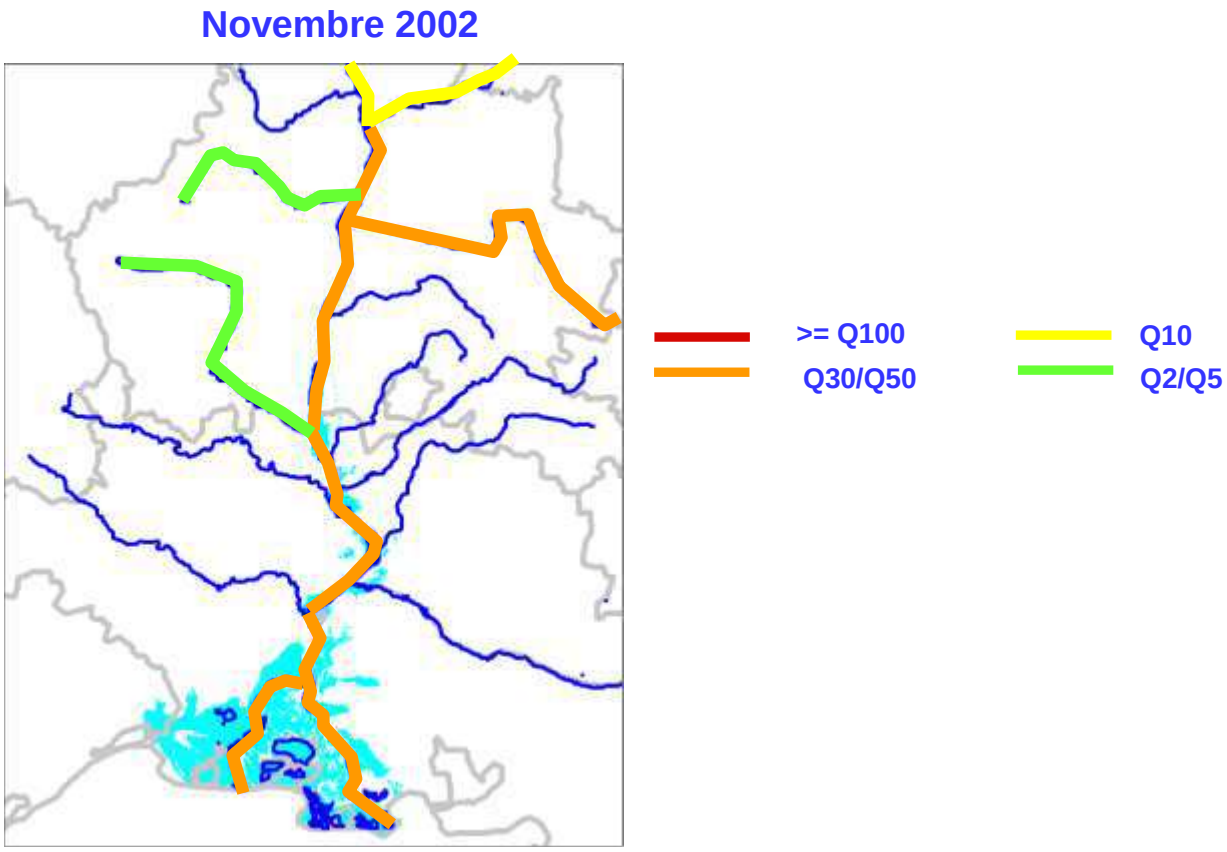


Figure 47. Crue de novembre 2002 – apports des affluents (source DREAL RA [K205])

L'évolution des limnigrammes aux différentes stations du Grand Delta figure en page suivante. L'instant de formation de l'unique brèche totale occasionnée dans le système juste en amont du mas de Claire Farine (PRD 309,0) et la période, pendant laquelle la digue en aval de Sylvéréal a surversé, sont également indiqués.

Les volumes de la crue sont les suivants :

- Volume de la crue pour Q > 4200 m^3/s : 4.1 milliards de m^3,
- Volume de la crue pour Q > 6000 m^3/s : 1.7 milliards de m^3.

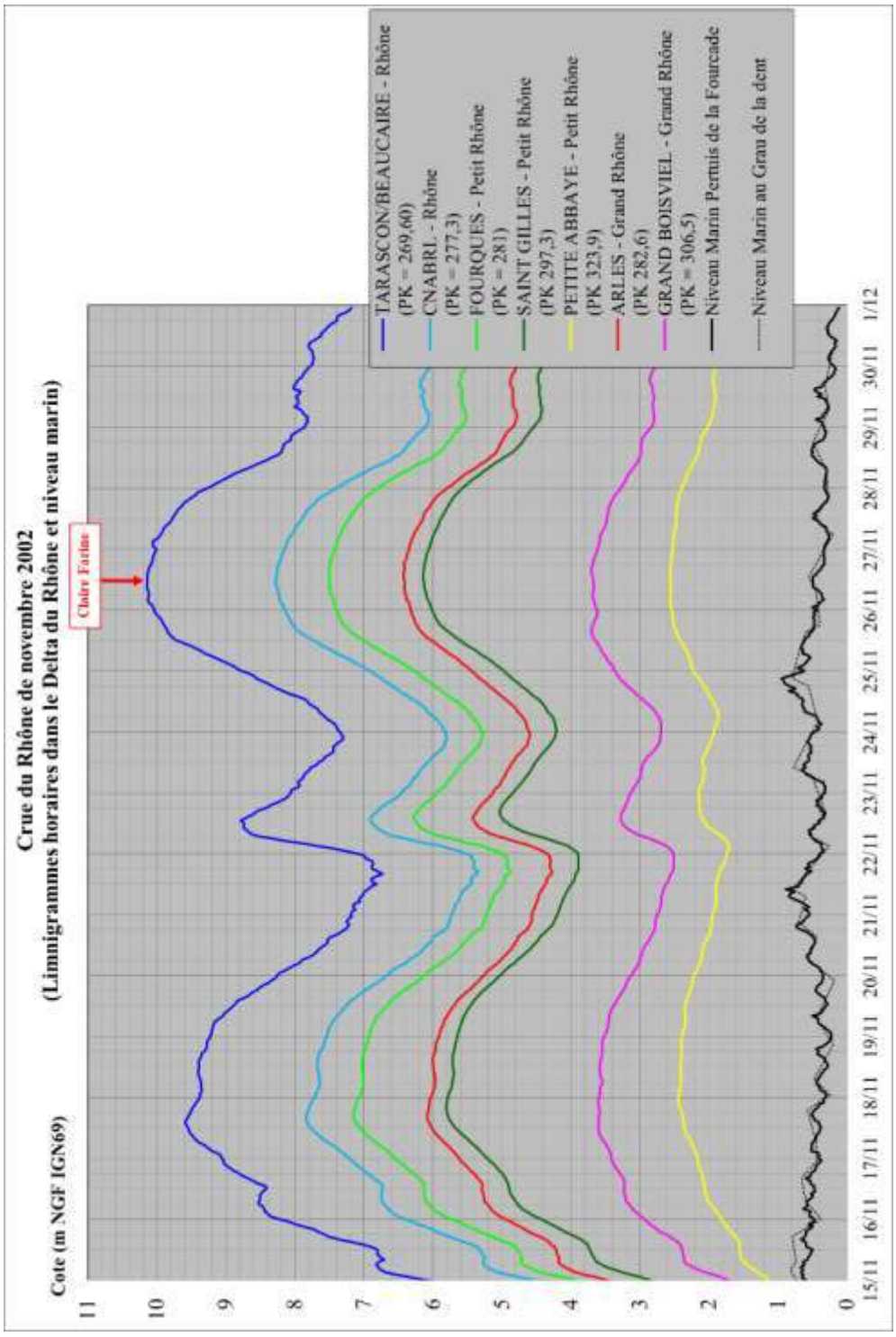


Figure 48. Crue novembre 2002 – limnigrammes stations du Grand Delta du Rhône

1.8 LA CRUE DES 3 ET 4 DECEMBRE 2003

La crue de décembre 2003 a franchi le seuil de 8,15 m NGF (environ 6750 m^3/s) du 02/12/2003 à 7h00 jusqu'au 05/12/2003 à 2h00. Elle a atteint son pic le 4 décembre 2003 à 3h00 à la station de Beaucaire/Tarascon. Les principales caractéristiques de la crue de décembre sont les suivantes.

Tableau 14. Caractéristiques hydrologiques et hydrauliques de la crue de déc. 2003

Durée alerte 2 – groupe 1 - Q > 6 750 m^3/s	2,9 jours
Durée alerte 2 – groupe 2 – Q > 7 500 m^3/s	2,6 jours
Durée alerte 3 – groupe 1 – Q > 8 400 m^3/s	2,3 jours
Durée alerte 3 – groupe 2 – Q > 9 000 m^3/s	2 jours
Débit de pointe annoncé (anc. courbe tarage)	13 000 m^3/s
Débit de pointe (nouvelle courbe de tarage)	11 600 m^3/s
Cote maximum (m NGF)	11,33 m NGF

Elle est la crue la plus importante du Rhône depuis 1856. La figure ci-dessous extraite de DREAL RA [O0112] illustre l'intensité des apports des affluents du Rhône.

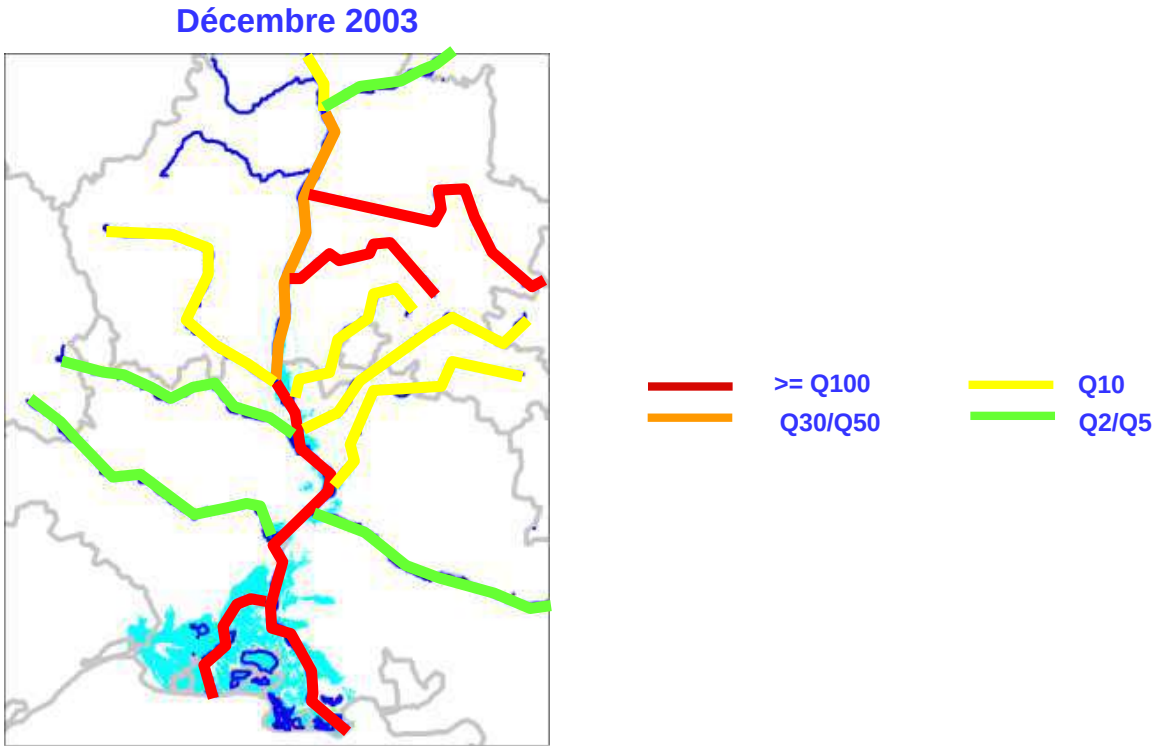


Figure 49. Crue de déc. 2003 – Apports des principaux affluents (source DREAL RA [K205])

Les limnigrammes dans le Delta du Rhône et le marégramme au Grau de la Dent figurent en page suivante.

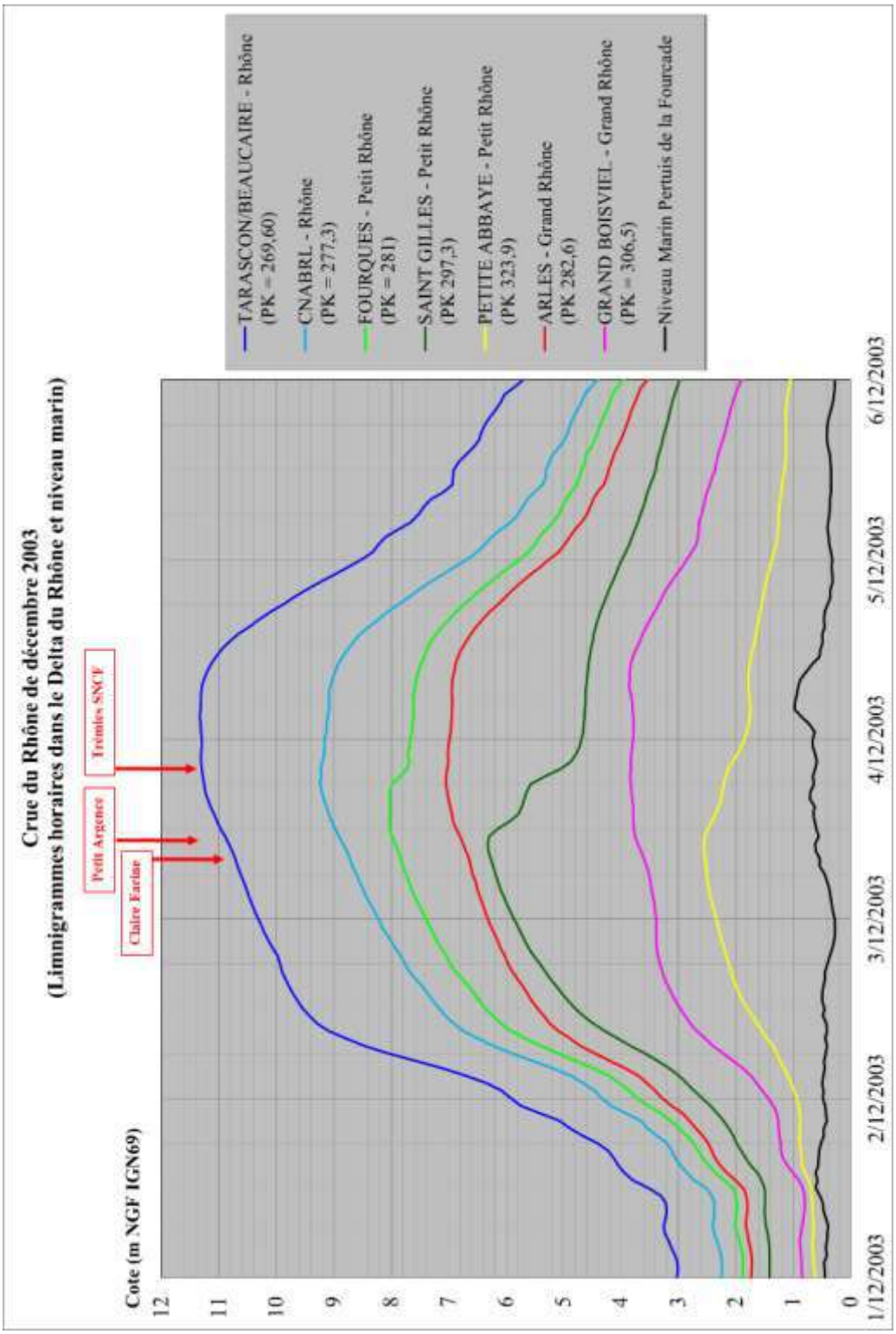


Figure 50. Crue de déc. 2003 : limnigrammes aux principales stations du Grand Delta et Marégramme au pertuis de la Fourcade

Les figures ci-après, extraites de l'étude de calage précis entre Beaucaire et Arles réalisées par la CNRingénierie [K100] illustrent respectivement :

- Les débits modélisés dans la brèche d'Argence, la brèche de Claire Farine et sur le Petit Rhône à Fourques ;
- Le débit sur le Petit Rhône en amont et en aval d'Argence ainsi que le débit dérivé dans la zone protégée au travers de la brèche d'Argence ;
- Le débit sur le Petit Rhône en amont et en aval de Claire Farine ainsi que le débit dérivé dans la zone protégée au travers de la brèche de Claire Farine;
- Les débits de pointe modélisés aux stations de Beaucaire/Tarascon, Arles et Fourques ;
- La ligne d'eau maximum modélisée sur le Rhône et Petit Rhône lors de la crue de décembre 2003 et la ligne d'eau modélisée pour la même crue en supposant l'absence de brèche ;
- La répartition Petit Rhône/Grand Rhône.

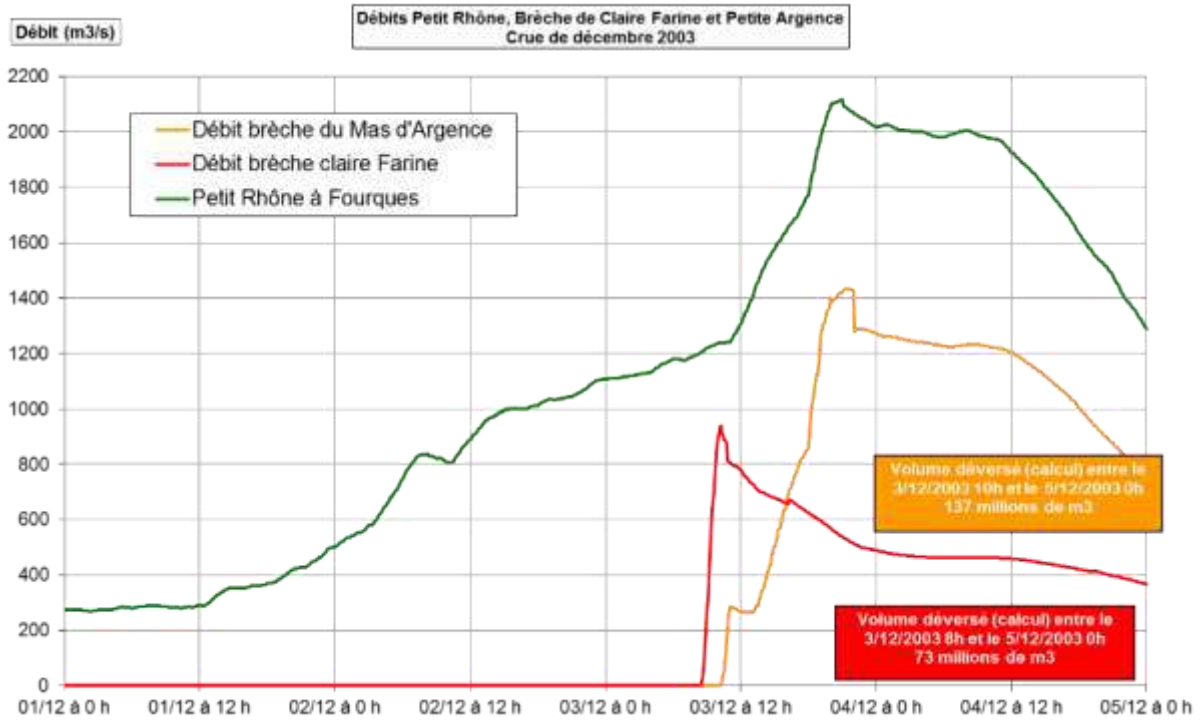


Figure 51. Débits modélisés dans la brèche d'Argence, la brèche de Claire Farine et sur le Petit Rhône à Fourques (source CNR [K100])

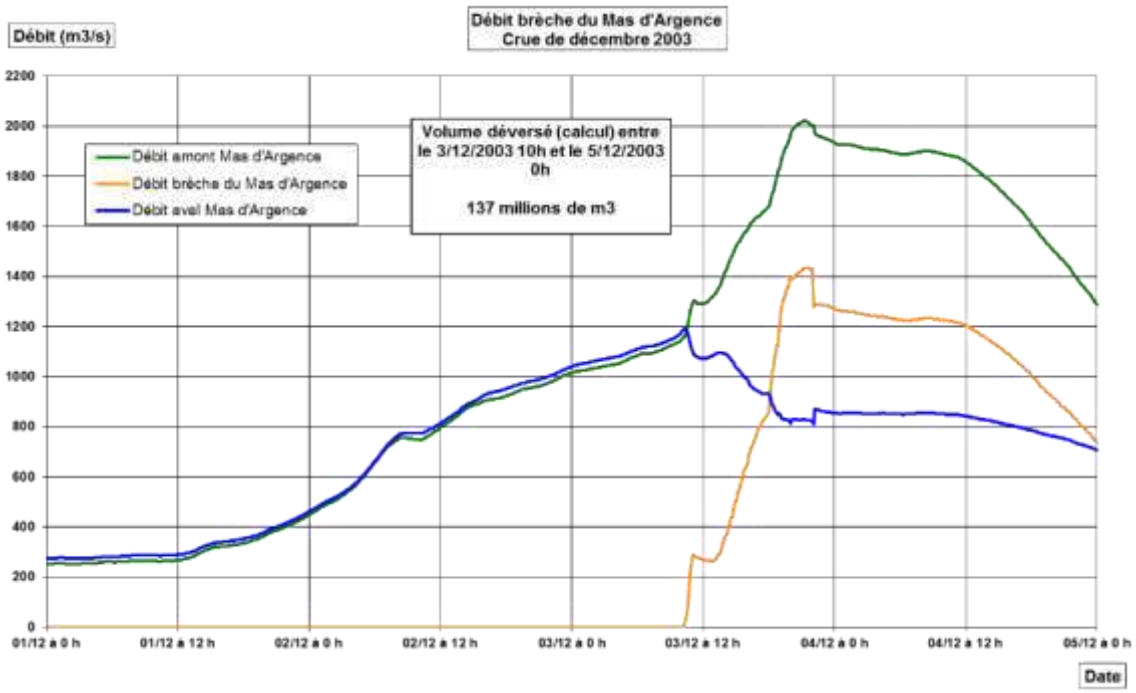


Figure 52. Débit sur le Petit Rhône en amont et en aval d'Argence et dans la brèche d'Argence (source CNRingénierie [K100])

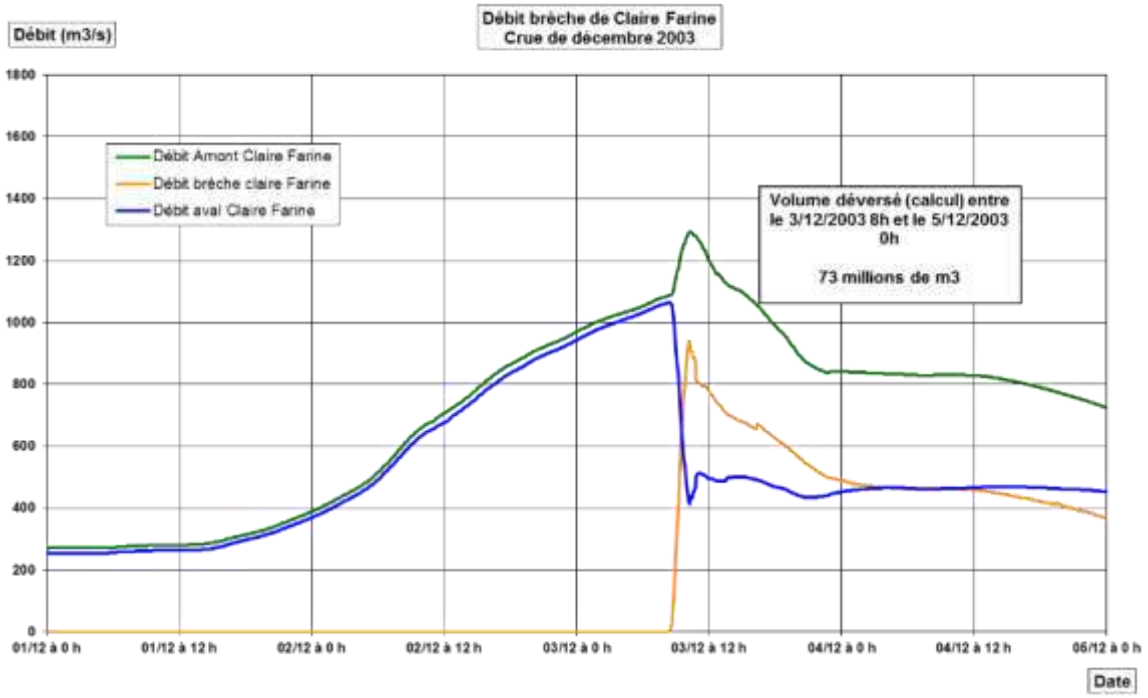


Figure 53. Débit sur le Petit Rhône en amont et en aval de Claire Farine et dans la brèche de Claire Farine (source CNRingénierie [K100])

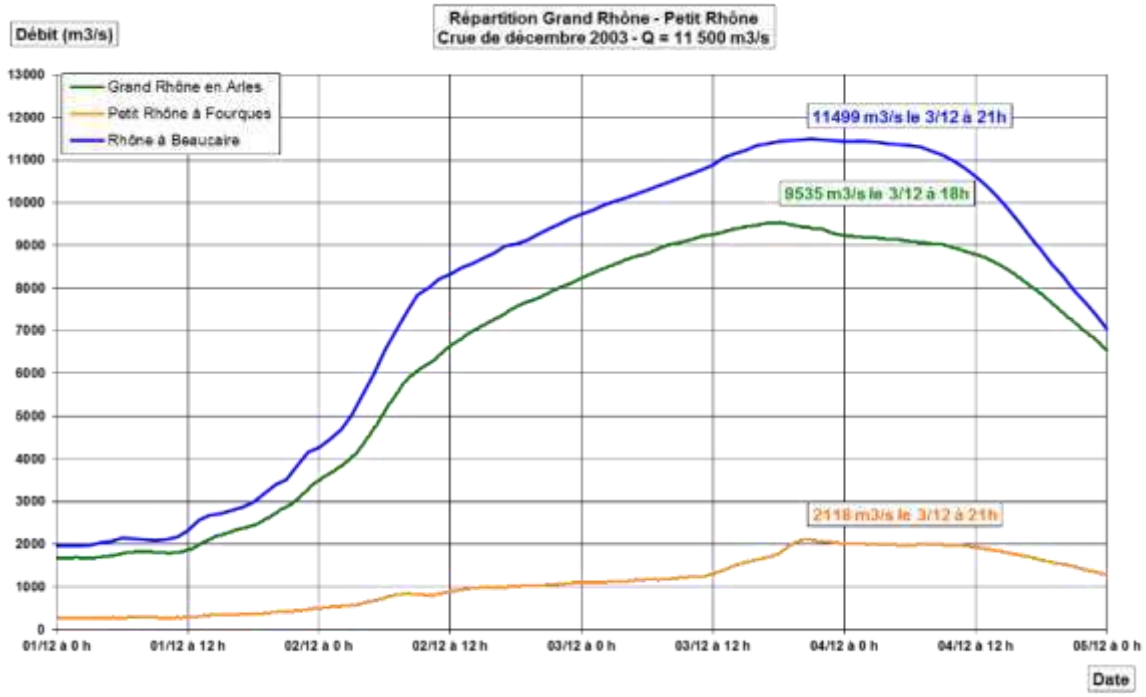


Figure 54. Débits de pointe modélisés aux stations de Beaucaire/Tarascon, Arles et Fourques

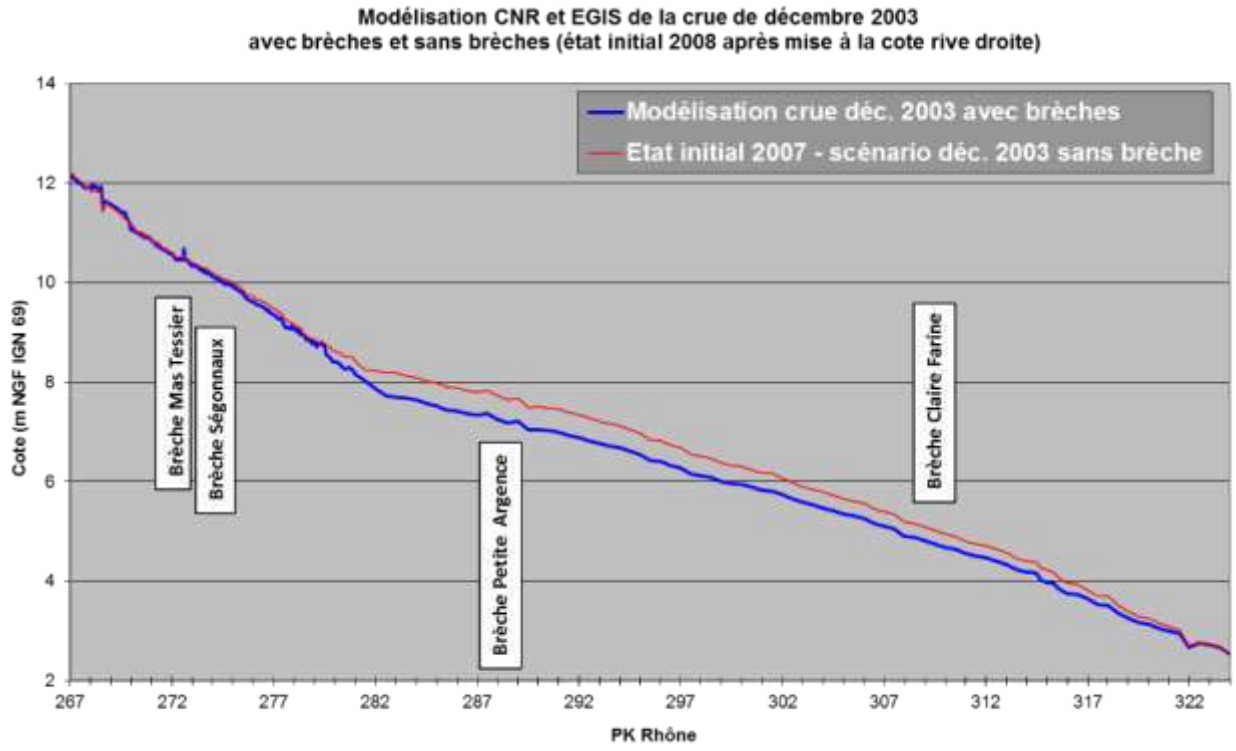


Figure 55. Lignes d'eau en décembre 2003 avec brèches et ligne d'eau de la crue de décembre 2003 dans l'état initial de 2003 avec déversement sans brèche (source CNR [K100] et EGISeau [K101]).

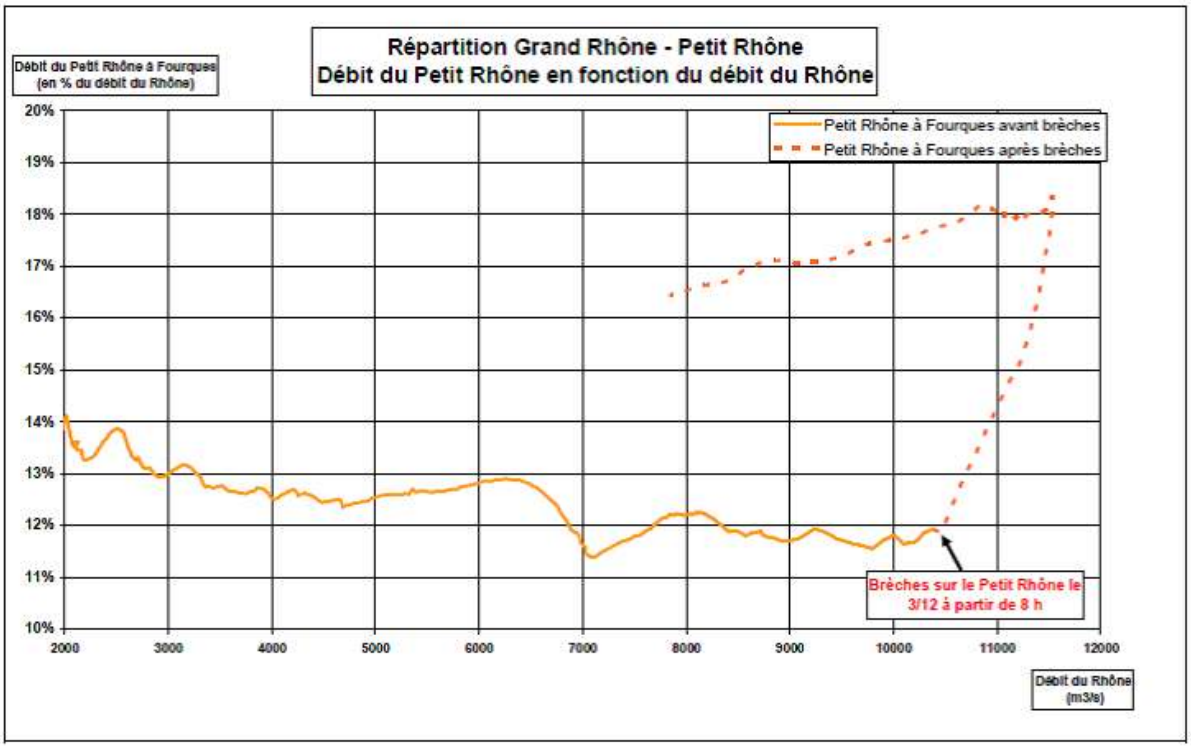


Figure 56. Répartition Grand Rhône/Petit Rhône en décembre 2003 (source CNR [K100])

Ces figurent permettent de mesurer l'importance des débits et volumes de déversement au travers des brèches.

Elles permettent également de voir l'appel de débit vers le Petit Rhône causé par les brèches sur le Petit Rhône et la modification de la répartition Petit Rhône/Grand Rhône. Le débit de pointe sur le Petit Rhône en l'absence de brèches dans le système aurait été de 1 378 m^3/s (source CNR [K100]) alors qu'il a été d'environ 2000 m^3/s en décembre 2003. De la même façon la répartition Petit Rhône/Grand Rhône est passée de 12 % à 18 %.

Cette augmentation de débit sur le Petit Rhône ne se traduit néanmoins pas en une augmentation de ligne d'eau comme en témoigne la figure ci-dessus.

On peut voir sur la figure ci-dessus que l'effet des brèches de Petit Argence et Claire Farine a sensiblement abaissé la ligne d'eau dans le Petit Rhône. En revanche sur le Rhône entre Beaucaire et Arles, cet abaissement n'a plus été que de 25 cm au droit de la prise d'eau BRL et de 5 cm au droit de la station de Beaucaire/Tarascon.

Ce fonctionnement est perceptible également sur les limnigrammes enregistrés par la CNR (Cf. figure ci-avant) en décembre 2003. Les niveaux baissent très sensiblement en aval de Petit Argence et Claire Farine dès la formation des brèches, alors qu'ils continuent d'augmenter en amont, compte tenu des apports du Bassin Versant.

1.9 CRUES DE NOVEMBRE 2014

En novembre 2014 il y eut la première crue de plus de 6 000 m3/s depuis 2003 ; elle a atteint 7 200 m3/s en pointe, après un premier pic à 6 900 m3/s quelques jours auparavant. La fin de ce mois de novembre 2014 a été couronnée par une tempête marine la plus importante depuis 1982 concomitamment avec une crue annuelle du Rhône.

La figure ci-dessous donne les limnigrammes et le marégramme aux différentes stations de mesure.

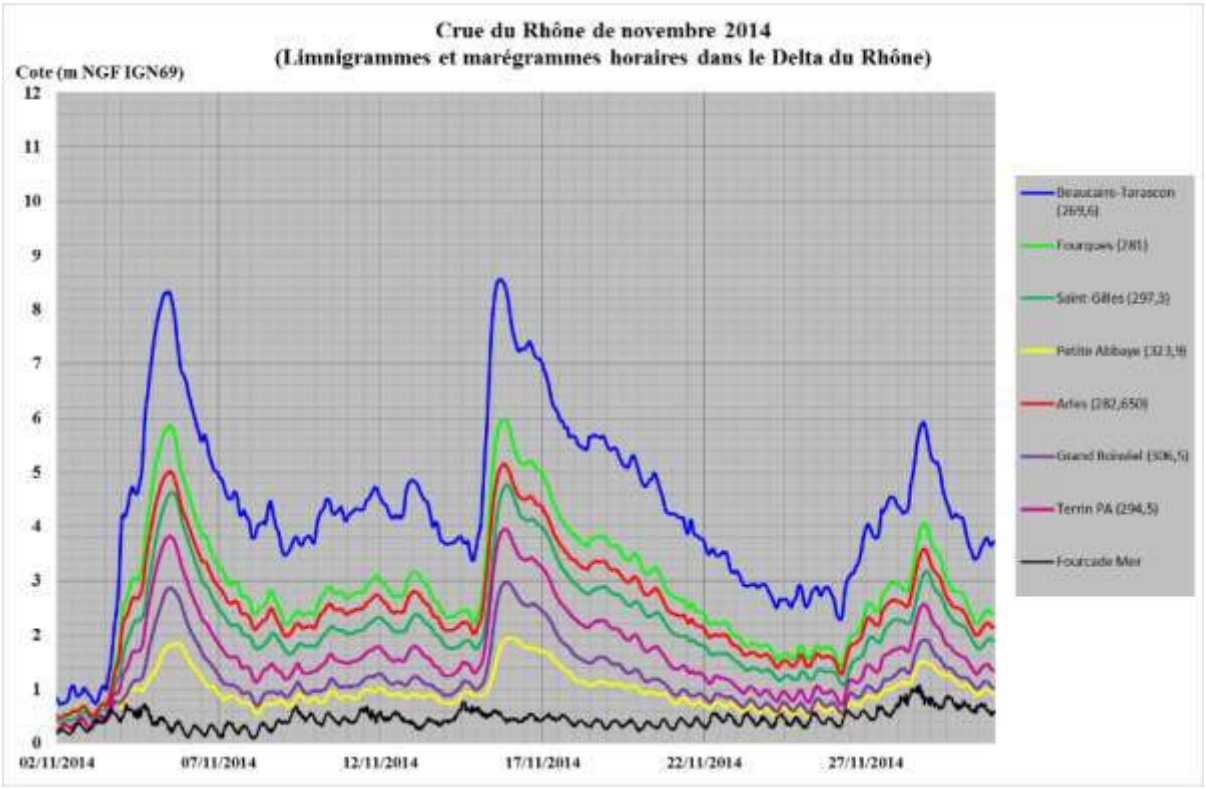


Figure 57. Crues novembre 2014 – limnigrammes

1.10 CRUES DE NOVEMBRE 2016

Depuis 2003, aucune crue importante n'a été occasionnée. La dernière en date qui est la crue la plus forte est celle de novembre 2016 qui a atteint un débit de pointe de 8200 m3/s. Dans la semaine il y eut un second pic à 6200 m3/s.
La figure ci-dessous donne les limnigrammes aux différentes stations de mesure.

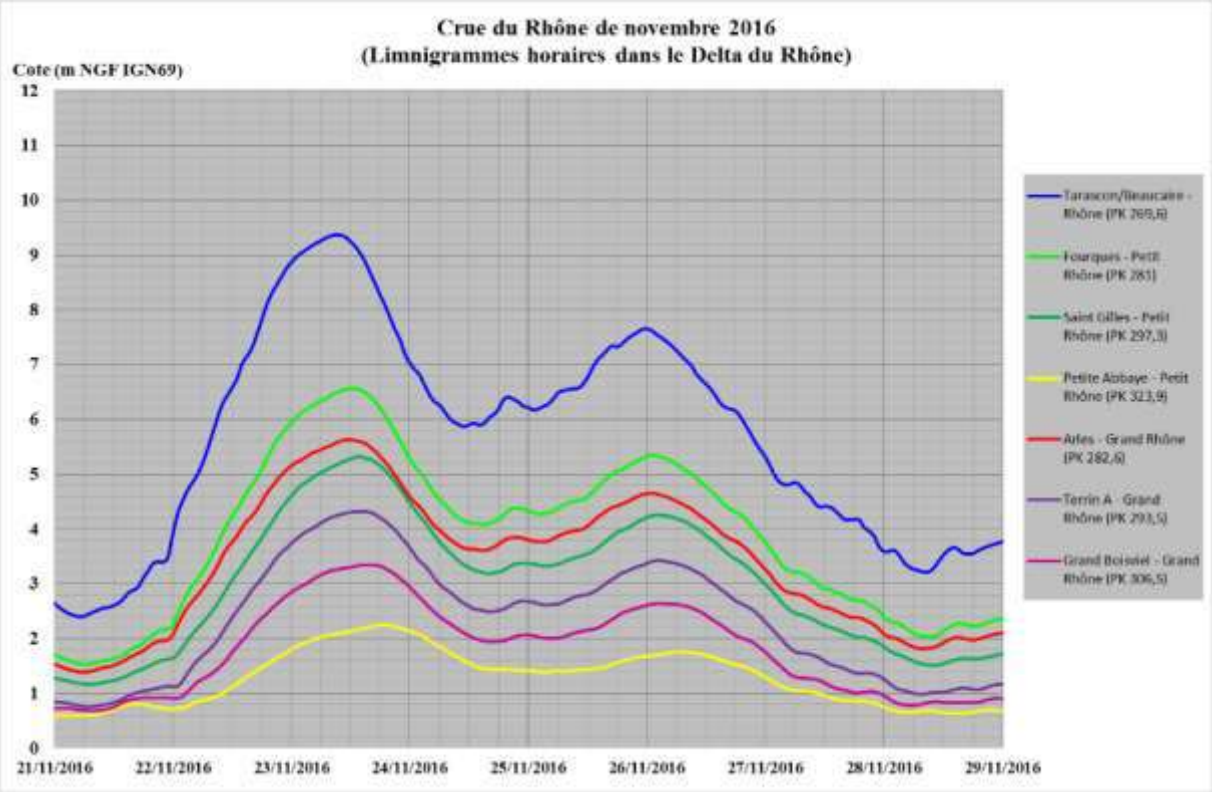


Figure 58. Crues novembre 2016 – limnigrammes

1.11 SYNTHESE CRUES RECENTES

1.11.1 Niveaux maximaux aux stations limnigraphiques du Delta

Les niveaux maximums des 8 crues supérieures à la crue décennale, depuis la réalisation des aménagements CNR, figurent ci-après. Ces altitudes sont en NGF IGN 69.

Figurent également dans ce tableau les niveaux à 8 heures avant la formation de la brèche de Claire Farine et à 10 heures avant la formation de la brèche de Petit Argence.

L'analyse de ces niveaux montre que le 3 décembre 2003 à 8 heures avant la formation de la première brèche (Claire Farine), jamais les niveaux n'avaient été aussi élevés aux stations de Beaucaire/Tarascon, BRL, Fourques, Arles et Saint Gilles. Pour les stations de Petite Abbaye et Grand Boisviel, ce n'est pas le cas, mais il est à noter que ces stations sont sous l'influence du niveau marin.

Ce « record » de niveau s'explique par l'efficacité des dispositifs de surveillance mis en place sur les deux rives, qui ont permis de résorber de nombreux désordres (22 brèches évitées en rive gauche) et retarder l'instant fatidique où la formation de brèches devenait inévitable.

Tableau 15. Hauteurs d'eau maximum aux stations limnimétriques - crues récentes (source CNR [K203])

Crues	Stations CNR et PK						
	Beaucaire Tarascon	**CNABRL**	**Fourques**	**Saint Gilles**	**Petite Abbaye**	**Arles**	**Grand Boisviel**
	PK 269,6	**PK277,3**	**PK 281**	**PK 297,3**	**PK 323,9**	**PK 282,6**	**PK 306,5**
10 octobre 1993	9,93	8,09	7,34	5,77	2,30	6,29	
8 janvier 1994	10,50	8,67	7,72	5,96	2,33	6,64	
6 novembre 1994	9,92	7,95	7,33	5,73	2,28	6,02	3,52
13 novembre 1996	9,48		6,73	5,23	2,10	5,77	3,38
10 septembre 2002	10,30	8,26	7,43	5,89	2,29	6,36	3,70
17 novembre 2002	9,60	7,85	7,15	5,81	2,45	6,09	3,61
26 novembre 2002	10,15	8,29	7,51	6,14	2,57	6,43	3,71
4 décembre 2003	11,33	9,24	8,03	6,32	2,56	7,05	3,84
3 déc. 2003 / 8h	10,72	8,72	7,84	6,27	2,54	6,65	3,60
3 déc. 2003 / 10 h	10,83	8,84	7,93	6,32	2,56	6,75	3,71
15 novembre 2014	8,56		5,98	4,77	1,95	5,15	2,98
23 novembre 2016	9,37		6,56	5,33	2,25	5,63	3,35

Les deux figurent ci-après permettent d'avoir une représentation de ces niveaux le long du Rhône, Grand Rhône et Petit Rhône.

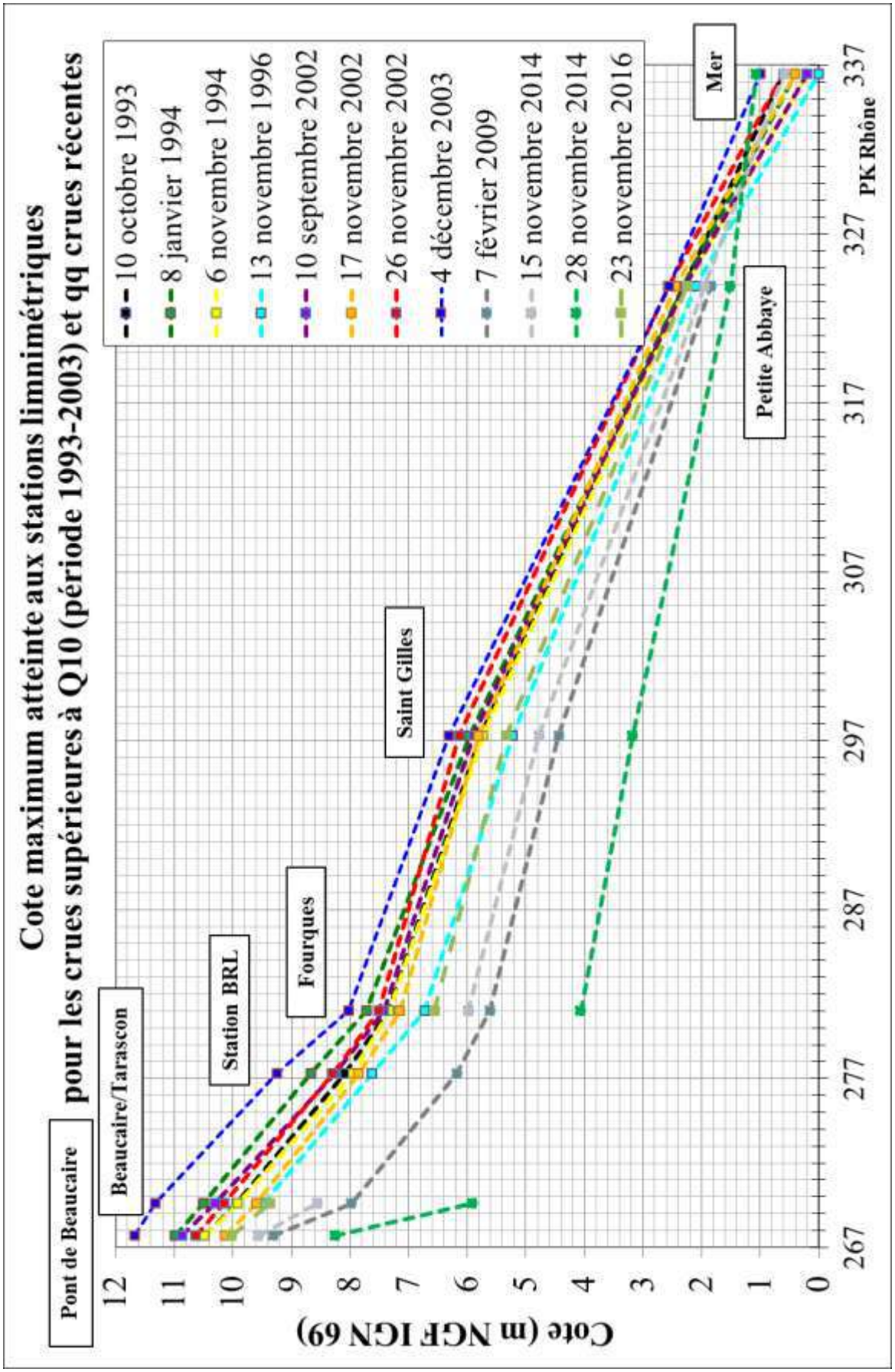


Figure 59. Niveaux maximums des crues récentes le long du Rhône et Petit Rhône (CNR [K203])

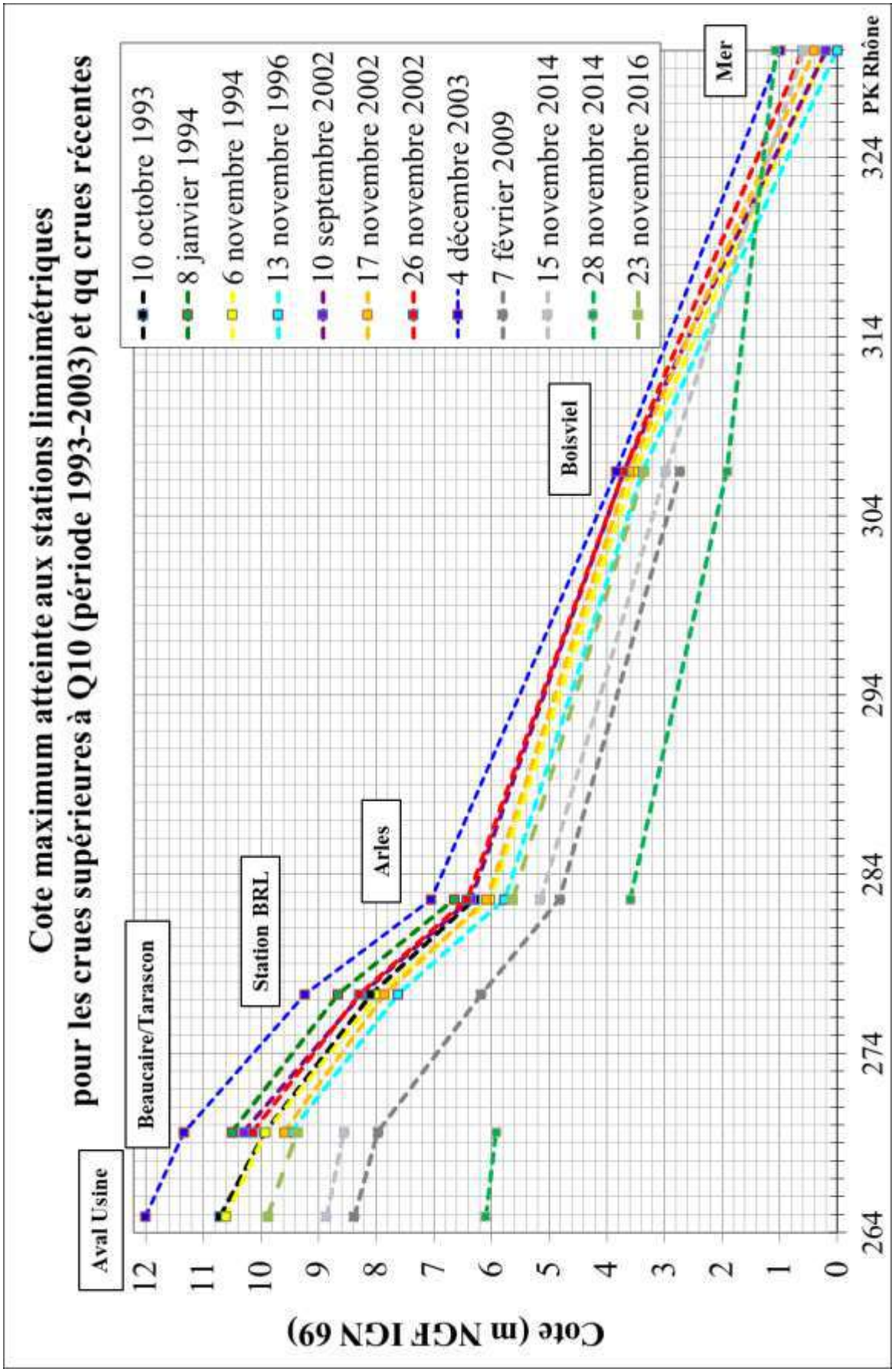


Figure 60. Niveaux maximums des crues récentes le long du Rhône et Grand Rhône (CNR [K203])

Ces figures appellent les commentaires suivants :

- Les niveaux atteints lors de la crue de décembre 2003 sont nettement supérieurs aux autres crues ;
- Les lignes d'eaux peuvent s'inverser suivant la forme de l'hydrogramme de crue en tête de Delta. On constate que pour les crues respectivement du 10 sept. 2002 et du 26 novembre 2002, pour lesquelles aucune brèche majeure n'est venue « perturber » la ligne d'eau : La crue de septembre 2002 a atteint des niveaux en tête de Delta supérieurs à celle de novembre 2002. Les niveaux de la crue du 26 novembre 2002 dépassent les niveaux de la crue du 10 septembre 2002 à partir de la station BRL sur le Rhône (PK 277,3). **Cet « inversement » s'explique par la différence de durée et donc de volume des crues**. Lors de la réalisation de l'étude de calage précis entre Beaucaire et Arles, la CNR a montré que le gradient de montée de crue (et donc la durée de crue) pouvait avoir une influence sur les niveaux de crue ; ainsi à débit égal, une crue plus rapide est mieux laminée et atteint des niveaux inférieurs à une crue longue (effet transitoire/permanent) ;
- Cet effet dû au laminage de la crue est très bien illustré par la crue de novembre 1996, qui est une crue cévenole très rapide avec un volume de crue comparable à la possibilité de laminage des plaines de Boulbon et du lit endigué entre Beaucaire et Arles. Cette crue présente des niveaux relativement élevés à Beaucaire/Tarascon qui vont diminuer très sensiblement au fur et à mesure de la propagation de l'onde de crue dans le Delta ; La crue novembre 2016 légèrement moins rapide a suivi la même tendance ;
- Si le niveau de la crue du 8 janvier 1994 est supérieur de 35 cm à la crue du 26 novembre 2002 à la station de Beaucaire/Tarascon, la ligne d'eau de la crue du 26 novembre 2002 devient supérieure au niveau de la crue du 8 janvier 1994 vers le PK 288. **Cette différence s'explique par les deux brèches** de Beaumont (PK 288) et Lauricet (PK 303) qui ont plafonné les niveaux en aval ;
- On note que les crues de novembre 1994 et d'octobre 1993 présentent des **lignes d'eau comparables**, alors qu'elles n'ont pas du tout été vécues de la même façon. **La crue d'octobre 1993 a causé une brèche inondante** avec un volume de déversement de 130 millions de m^3, alors que **la crue de novembre 1994 n'a pas occasionné de brèches** ;
- Les différences de niveaux entre ces crues deviennent très faibles à l'approche de l'embouchure (station de Grand Boisviel sur le Grand Rhône et station de Petite Abbaye sur le Petit Rhône). Cette diminution s'explique par **l'importance croissante du niveau marin sur les lignes d'eau en aval du Delta**.
- Cette influence est particulièrement notable pour la crue annuelle du 28 novembre 2014 qui a été concomitante avec la tempête marine. Les niveaux observés aux embouchures du PK 327 au PK 337 pour le Petit Rhône et du PK 319 au PK 3360 pour le Grand Rhône sont comparables à ceux observés lors des grandes crues récentes.

La figure en page suivante permet d'avoir une autre représentation des niveaux en fonction du débit en tête de Delta.

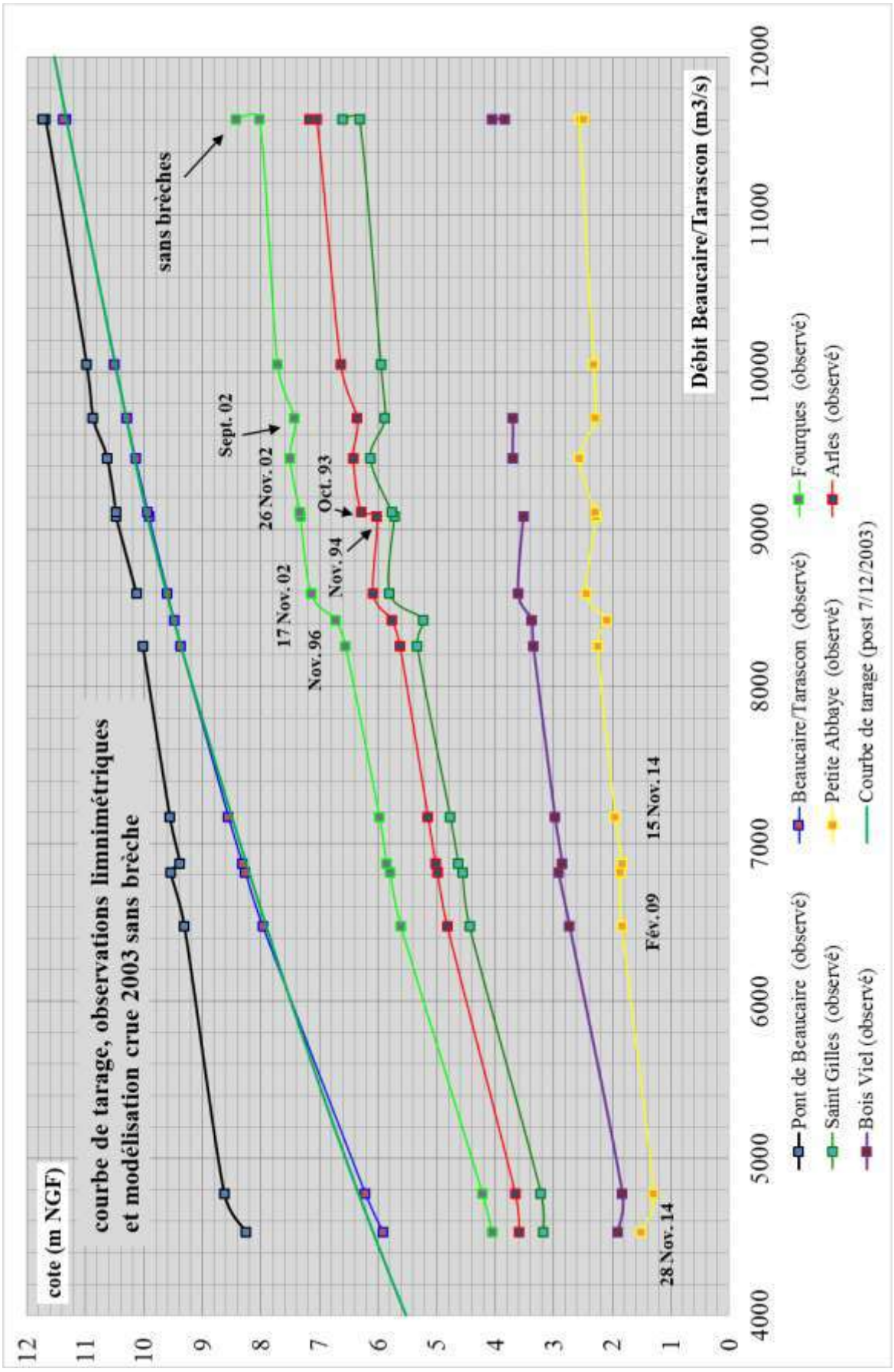


Figure 61. Débits à Beaucaire/Tarascon et niveaux observés aux principales stations limnigraphiques

1.12 COMPARAISON DES CRUES DE 2003, 1840 ET 1856

Reconstitué à partir des données des Ponts et Chaussées et du SPC Grand Delta, la figure ci-dessous donne les limnigrammes des crues de 1840, 1856 et 2003. Comme indiqué ci-avant, la crue de décembre 2003 a atteint des niveaux records.

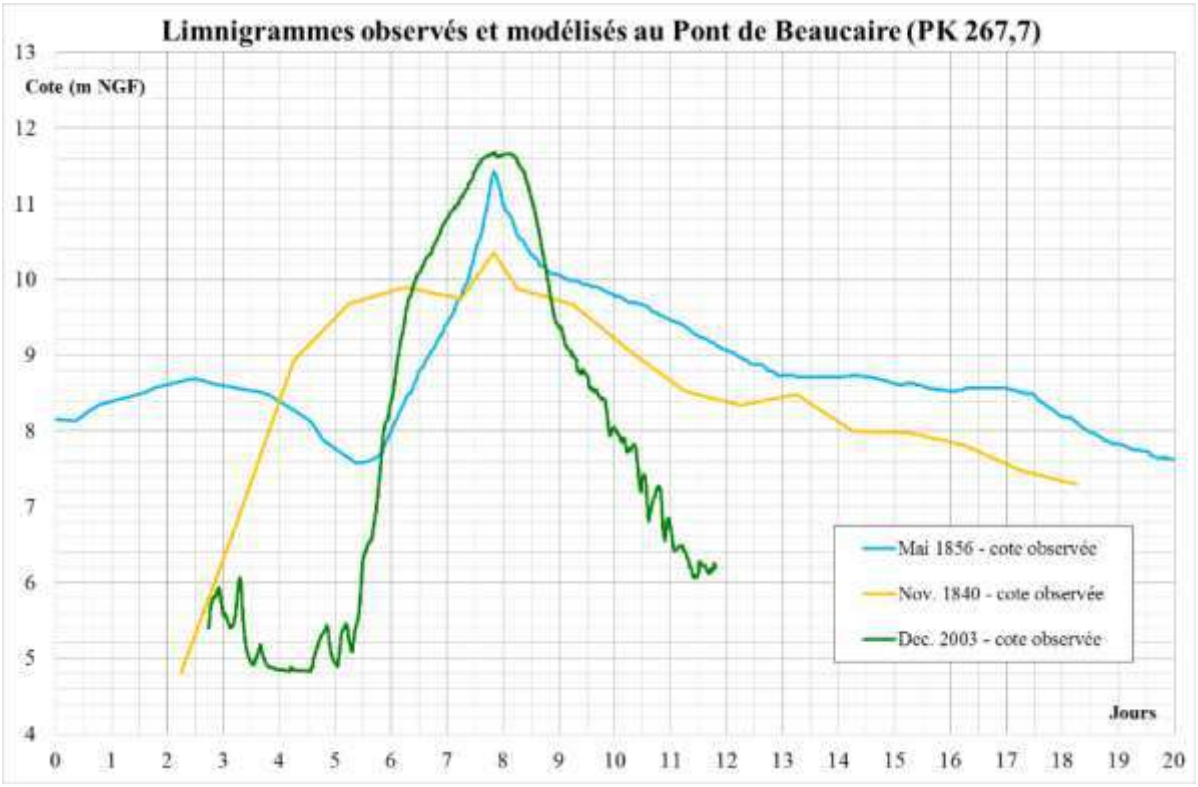


Figure 62. Niveaux observés en 1840, 1856 et 2003 au Pont de Beaucaire (267,7)

La figure suivante donne les mêmes limnigrammes mais en l'absence de brèches dans le système.
L'hydrogramme de mai 1856 sans brèche est quasiment deux fois plus épais que celui de décembre 2003 et celui de novembre 1840 sans brèche aurait été 2 fois plus épais que celui de mai 1856 sans brèche.

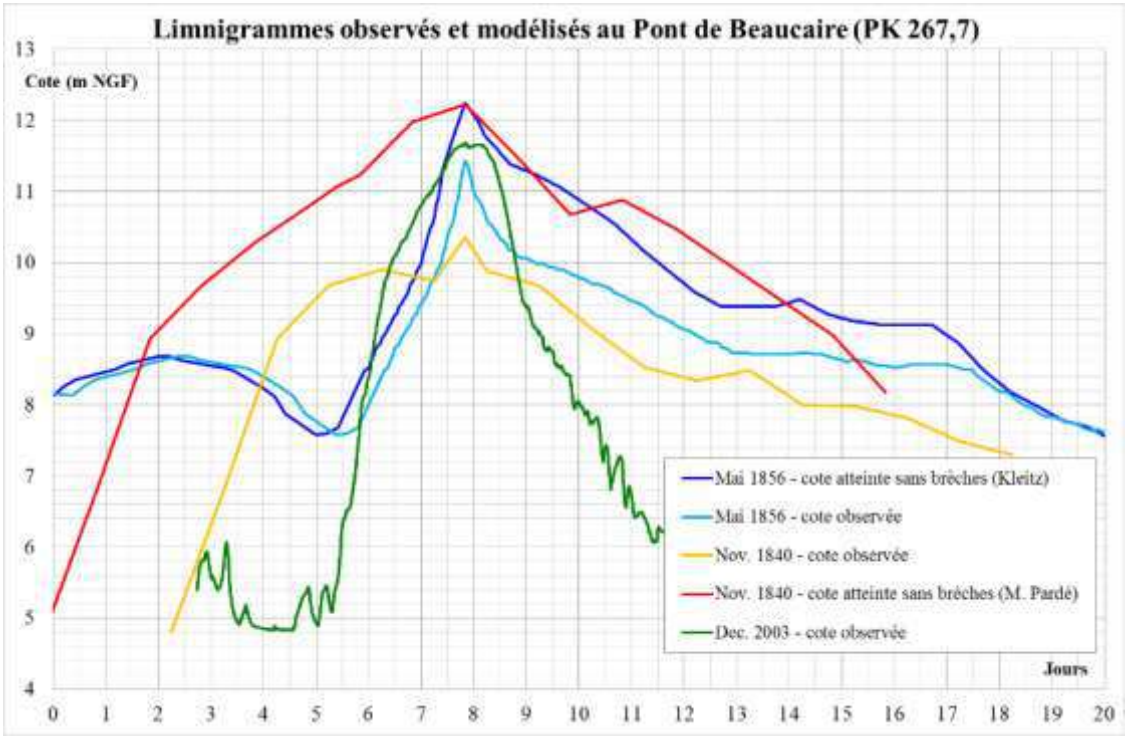


Figure 63. Niveaux observés en 1840, 1856 et 2003 et niveaux sans brèches pour 1840 et 1856 au Pont de Beaucaire (267,7)

Sur la figure ci-après sont ajoutés les trois limnigrammes calculés dans le cadre de l'étude de calage, eux-mêmes construits à partir de l'analyse hydrologique menée dans le cadre de l'EGR. On constate que l'hydrogramme de la crue de novembre 1840 est comparable à celui de la crue exceptionnelle.

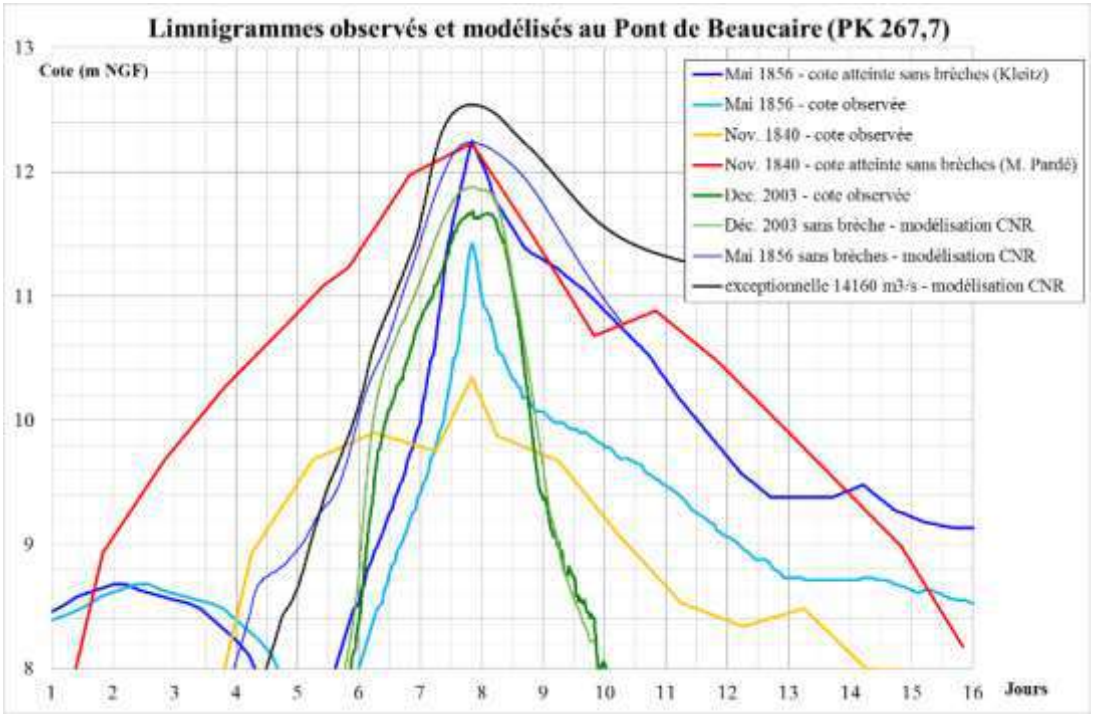


Figure 64. Niveaux observés, estimés sans brèche et calculés

1.13 HYDROLOGIE

1.13.1 Etude Globale Rhône 2000

Les périodes de retour des débits du Rhône à la station de Beaucaire/Tarascon ont été réévaluées en 2000, dans le cadre de l'Etude Globale Rhône [J001] réalisée par Territoire Rhône en partenariat avec l'Etat. Cette étude a été menée sur la base des crues enregistrées de 1920 à 1997. L'ajustement utilisé est la loi de Gumbel fréquemment utilisée pour déterminer la fréquence des valeurs extrêmes de débits. Les débits caractéristiques et leur période de retour figurent dans le tableau ci-dessous avec les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 80 %, sont :

Tableau 16. Débits de pointe à Beaucaire/Tarascon et périodes de retour (SAFEGE CETIIS [J001])

Période de retour	Débit de pointe	Intervalle de confiance à 80 %	
		Borne inférieure	Borne supérieure
2 ans	6 060 m^3/s	5 860 m^3/s	6 290 m^3/s
5 ans	7 460 m^3/s	7 150 m^3/s	7 870 m^3/s
10 ans	8 390 m^3/s	7 970 m^3/s	8 950 m^3/s
50 ans	10 440 m^3/s	9 760 m^3/s	11 350 m^3/s
100 ans	11 300 m^3/s	10 510 m^3/s	12 370 m^3/s
500 ans	13 300 m^3/s	12 250 m^3/s	14 720 m^3/s
1000 ans	14 160 m^3/s	13 000 m^3/s	15 730 m^3/s

Dans son avis du 26 mars 2013, le Comité Technique Permanent des Barrages et Ouvrages Hydrauliques a fait observer que pour préparer l'avenir, l'étude des crues de 2000 méritait d'être prochainement révisée à l'initiative des divers acteurs concernés du bassin du Rhône.

1.13.2 Ré-estimation des débits caractéristiques – DREAL RA 2014

En 2014, la DREAL Rhône-Alpes a commandé une étude à SAFEGE pour ré-estimer les débits caractéristiques aux stations hydrométriques du Rhône de Viviers et Beaucaire [J002]. Cette étude a repris la méthodologie utilisée dans l'étude EGR en recalant la fréquence des débits instantanés maximaux annuels sur la période 1841 à 2011. Les résultats de cette étude figurent ci-dessous.

Tableau 17. Débits de pointe à Beaucaire/Tarascon et périodes de retour (SAFEGE 2014 [J002])

Période de retour	Débits instantanés maximaux annuels		Variation
	Période 1841-1997	Période 1841 - 2011	
2 ans	6 043 m^3/s	6 056 m^3/s	0.22 %
10 ans	8 379 m^3/s	8 442 m^3/s	0.75 %
50 ans	10 428 m^3/s	10 534 m^3/s	1.02 %
100 ans	11 294 m^3/s	11 419 m^3/s	1.11 %
500 ans	13 295 m^3/s	13 462 m^3/s	1.26 %
1000 ans	14 155 m^3/s	14 341 m^3/s	1.31 %

Cette étude n'a pas donné d'intervalles de confiance.

1.13.3 Analyse critique de l'étude menée en 2014

L'étude menée par la DREAL en 2014 s'est basée sur la période débutant au lendemain de la plus grande crue observée dans le Delta, celle de Novembre 1840. Débuter l'analyse statistique des crues l'année de la plus grande crue connue peut introduire un biais dans l'analyse ; a contrario exclure la valeur de débit de 1840 (13 000 m^3/s) de l'analyse statistique peut avoir une influence notable sur la détermination des fréquences associées aux périodes de retour.

On note également que le débit instantané maximal annuel retenu pour l'année 2002 est de 9600 m^3/s. Ce débit a été estimé en considérant la courbe de tarage en vigueur depuis le 4 décembre 2003. Ce choix n'est pas cohérent avec les valeurs retenues pour les crues de 1993, 1994 et 1996 qui sont basées sur la courbe antérieure à la crue de décembre 2003.

A notre sens, soit on considère que la crue de décembre 2003 a modifié la courbe de tarage et l'estimation des débits de 1993 à 2002 doit être réalisée suivant la courbe de tarage en vigueur lors de ces crues, soit on considère que les débits de cette période doivent être ré-évalués.

Dans tous les cas, le mix de courbes de tarage sur la période 1993-2002 doit être évité ou justifié par une étude détaillée.

Sur la période 1920-2013, on note des écarts sensibles entre les débits utilisés dans l'étude et ceux figurant dans la banque HYDRO sur la période 1920-1960. La moyenne des écarts est de 160 m^3/s. Les plus significatifs concernent :

- la crue de 1935 (10000 m^3/s banque hydro et 9600 m^3/s dans l'étude DREAL 2014),
- la crue de 1951 (9 950 m^3/s banque hydro et 9170 m^3/s dans l'étude DREAL 2014),
- la crue de 1958 (8 570 m^3/s banque hydro et 7920 m^3/s dans l'étude DREAL 2014).

La banque HYDRO précise que les débits calculés sur la période 1920-1970 sont des estimations à partir de moyenne.

On note également pour les crues plus anciennes à l'exception de celles de 1840 et 1856 des écarts sensibles entre les données utilisées par la DREAL en 2014 et Maurice Pardé.

Le tableau ci-dessous donne ces écarts.

Tableau 18. Ecarts entre les débits estimés par Pardé et ceux figurant dans DREAL 2014

Crues	H (m) PK 267.7	Pardé (crues de plus de 6 m) figurant dans [K001]	Débits DREAL 2014	Ecart Pardé/DREAL 2014
27/10/1841	6,9	8 500	8 150	4%
3/11/1843	6,79	9 000	9 460	-5%
19/10/1846	6,45	7 400	8 720	-15%
31/05/1856	8,77	12 500	12 500	0%
28/10/1864	6,25	7 100	8 100	-12%
21/10/1872	6,87	8 400	9 080	-7%
29/10/1882	6,6	7 800	8 390	-7%
12/11/1886	7,55	9 700	10 200	-5%
1/01/1889	6,81	8 300	8 780	-5%
23/09/1890	6,04	6 700	7 260	-8%
22/10/1891	6,34	7 100	7 800	-9%
2/11/1896	7	8 600	9 060	-5%
30/09/1900	7,08	8 700	8 940	-3%
10/11/1907	6,83	8 400	8 500	-1%
08/12/1910	7,02	8 600	8 660	-1%
04/11/1914	6,34	7 100	7 480	-5%
21/05/1917	6,56	7 700	7 850	-2%
07/01/1919	6,8	8 300	8 280	0%
14/11/1935	7,68	9 500	9 600	-1%
22/11/1951	7,64	9 500	9 170	4%

La figure ci-dessous illustre :

- Les courbes de tarage historiques au pont de Beaucaire,
- La régression réalisée à partir des débits figurant dans le RIC du SPC et les hauteurs d'eau mesurées,
- Les débits estimés par Pardé dans [K001] et [K003],
- Les débits figurant dans l'étude de la DREAL 2014 [J002],
- Les débits des crues de 1993 à 2003 estimés suivant la nouvelle courbe de tarage,
- Les débits des crues de 1993 à 2002 estimés suivant l'ancienne courbe de tarage.

On constate que les débits anciens estimés par Pardé en prenant en compte l'effet des brèches présentent un bon alignement situé légèrement en deçà de la « courbe » qu'on dénommera « SYMADREM » construite au pont de Beaucaire par corrélation avec la courbe de tarage actuelle. Les seuls écarts concernent la crue de 1827, ce qui peut s'expliquer par le fait que l'échelle était certes existante mais la mesure de débits pas encore établie, et la crue de 1843 dont le niveau sans l'effet des brèches n'a pas été recalculé par Pardé, ce qui explique qu'il soit en retrait par rapport à l'alignement.

Les débits 1993-2002 estimés suivant l'ancienne courbe de tarage sont alignés sur la courbe de tarage des Ponts et Chaussées de 1875.

Les couples hauteurs/débits extraits de l'étude DREAL 2014 sont très diffus tantôt alignés sur la courbe de 1875, tantôt alignés sur Pardé, tantôt sur la courbe SYMADREM.

Les débits alignés sur la courbe de 1875 sont ceux de 1843, 1846, 1864.

Les débits alignés sur la courbe du SNRS (1920-1951) sont ceux des années 1910 à 1919 ainsi que ceux de 1935 et 1951, ce qui peut s'expliquer facilement par la mise en place de la courbe précitée.

Comme indiqué dans les chapitres relatifs aux crues historiques, les données extraites de DREAL 2014 et qui reprennent les données historiques de la CNR ne prennent pas en compte l'effet des brèches (à l'exception de la crue de 1856) qui ont pour effet de minorer le débit qui passerait très probablement en traversée de Beaucaire/Tarascon dans l'état actuelle.

Les mesures de débits des crues de 1993-2002 non remis en cause par la conférence de consensus mais mis en cause par DUBAND semblent effectivement élevées au regard des données historiques. Elles constituent de véritables horsains dans la série historique et doivent être selon nous remises en cause.

Les données de Pardé corrigées de l'effet des brèches sont cohérentes et proches de la courbe corrélée suivant la courbe de tarage actuelle.

L'étude des débits instantanés maximaux annuels est souvent menée en retenant la valeur maximale de l'année civile. Dans le cas des crues du Rhône aval, on a vu plus haut que les crues importantes, qui structurent l'ajustement statistique se produisent, à l'exception de la crue de mai 1856, dans la période s'étalant du mois de septembre au mois de janvier avec une concentration sur les mois d'octobre et de novembre. Le choix de retenir la valeur maximale de l'année civile a pour conséquence de supprimer de l'échantillon statistique certaines crues marquantes, ce qui peut avoir une influence sur la détermination des fréquences. On peut citer deux exemples récents : 1994 et 2002.

En 1994, deux crues importantes ont été observées, celle de janvier 1994 qui figure dans l'échantillon statistique et celle de novembre 1994 écartée de l'échantillon. De la même façon, en 2002, deux crues importantes ont également été observées, celle de septembre 2002, retenue dans l'échantillon et celle de novembre 2002, écartée de l'analyse.

Dans le cadre de l'étude de dangers, nous avons pris le parti de reprendre l'analyse hydrologique en testant plusieurs hypothèses pour en mesurer la sensibilité sur la détermination des débits caractéristiques :

- Hypothèse 1a : échantillon de l'étude DREAL 2014 étendu à la période 1830 – 2015 ;
- Hypothèse 1b : échantillon de l'étude DREAL 2014 étendu à la période 1830 – 2015 en retenant une valeur de débit max pour l'année 2002 suivant la courbe de tarage en vigueur en 2002 ;
- Hypothèse 1c : échantillon de l'étude DREAL 2014 étendu à la période 1830 – 2015 en retenant pour l'estimation des débits de la période 1993 – 2002 la courbe de tarage actuelle ;
- Hypothèse 2a : Hypothèse 1a mais en retenant à la place de l'année civile une année glissante du 1er novembre de l'année n au 31 octobre de l'année n+1 ;

- Hypothèse 2b : Hypothèse 1b mais en retenant à la place de l'année civile une année glissante du 1er novembre de l'année n au 31 octobre de l'année n+1 ;
- Hypothèse 2c : Hypothèse 1c mais en retenant à la place de l'année civile une année glissante du 1er novembre de l'année n au 31 octobre de l'année n+1 ;
- Hypothèse 3 : Hypothèse 2c en retenant pour les crues anciennes importantes les débits estimés par Pardé.

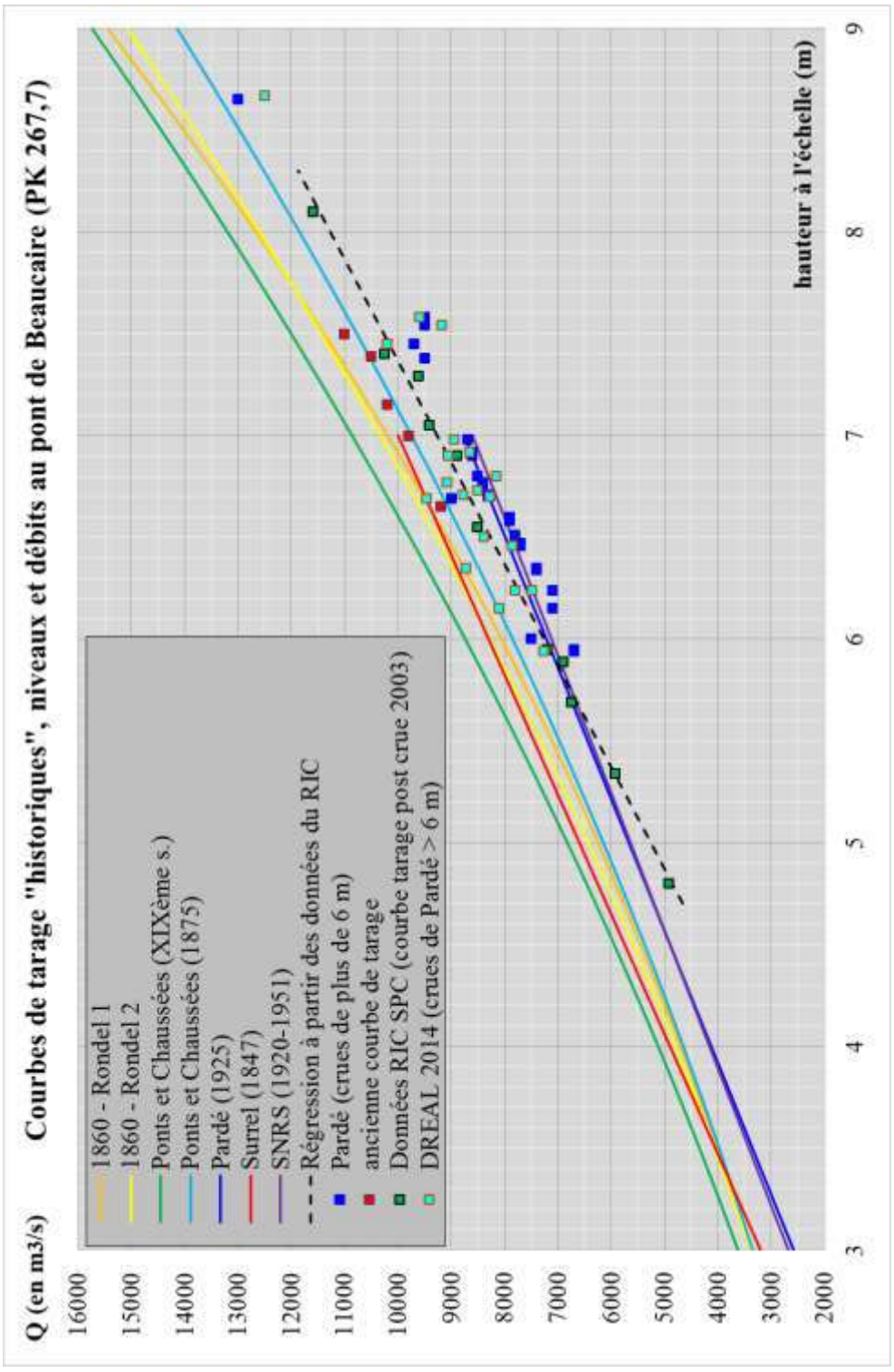


Figure 65. Pont de Beaucaire (267.7) – Débits, Hauteurs et Courbes de tarage historiques

1.13.4 Méthode d'ajustement

A l'instar des études EGR 2000 et DREAL 2014, l'ajustement statistique a été mené suivant une loi de Gumbel. D'autres fonctions de répartition existent, on citera les lois de Fréchet ou de Weibull. Une loi à 3 paramètres ou plus (comme celle de Weibull) décrit en général correctement l'échantillon des observations mais en extrapolation les incertitudes seront plus grandes. Une loi à 2 paramètres décrit parfois moins bien les fréquences observées. En revanche en extrapolation les incertitudes seront moins grandes que pour une loi à k > 2 paramètres. La fonction de répartition de Gumbel est exprimée sous la forme suivante :

$$F(x) = \exp\left(-\exp(-u)\right)$$

Avec :

$$u = \frac{x - x_0}{s}$$

u : variable réduite de Gumbel
x : quantile
x_0 : paramètre de position (mode)
s : paramètre d'échelle appelé également gradex

Pour l'estimation des paramètres, on utilise la méthode graphique et la méthode des moments

Pour la méthode graphique, on classe les débits max annuels (année civile ou année glissante) du plus petit au plus grand (1 à n) en attribuant pour chaque valeur de rang i, une fréquence expérimentale au non dépassement dite de Hazen égale à :

$$F(i) = \frac{i - 0.5}{n}$$

La variable réduite de Gumbel u s'exprime en fonction de la fréquence de la façon suivante :

$$u = -Ln(-Ln(F))$$

Ainsi en portant en ordonnées les valeurs de x en fonction de leur fréquence expérimentale au non-dépassement selon un axe gradué arithmétiquement en u, on doit obtenir une droite passant par exemple par $u = 0$ pour $x = x_0$ et $u \pm 1$ pour $x = x_0 \pm s$, ce qui permet de déterminer immédiatement x_0 et s.

L'estimation des paramètres par la méthode des moments est la suivante :

$$s = 0{,}78\ \sigma_x$$
$$x_0 = x_m - 0{,}577s$$

Avec :

σ_x : écart type de l'échantillon des n valeurs de débits x
x_m : moyenne de l'échantillon

Bernier et Veron [X029] ont étudié les intervalles de confiance de la loi de Gumbel à 70 et 95 % sans en donner d'expression analytique.

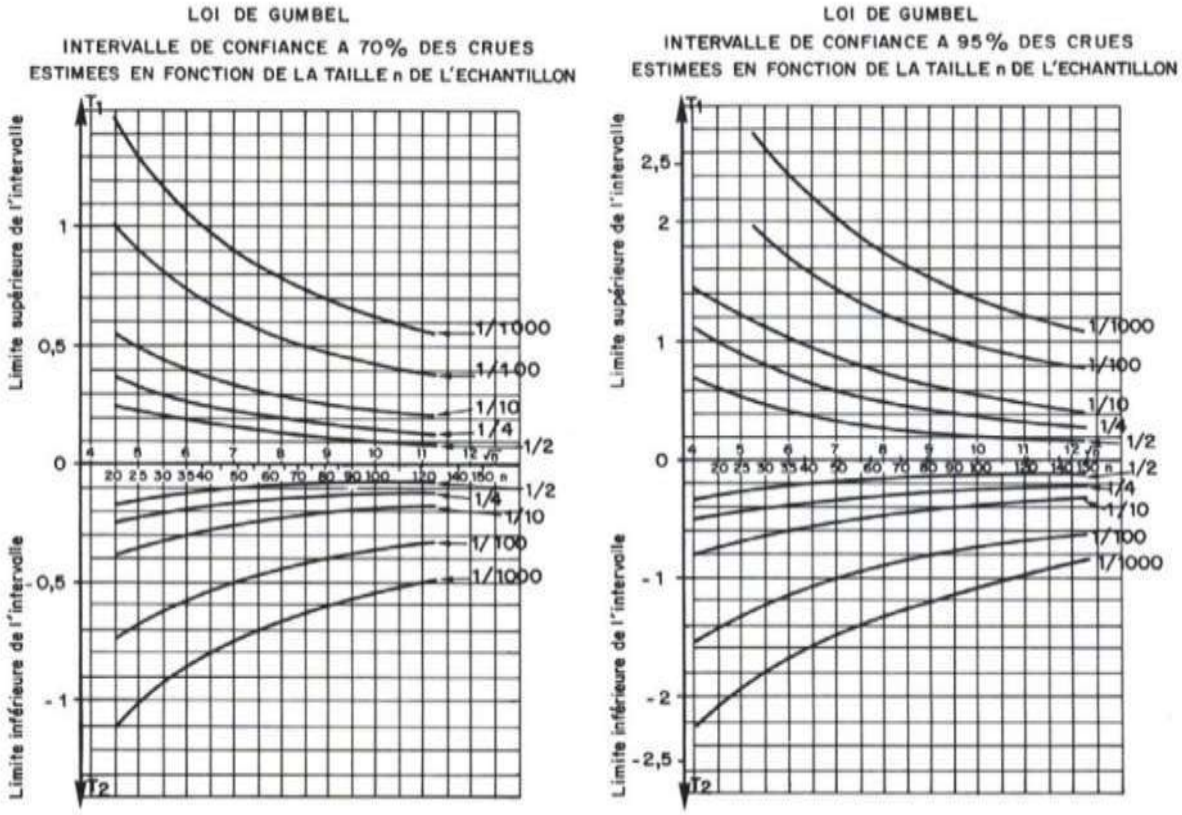


Figure 66. Abaques de Bernier et Vernon donnant les intervalles de confiance à 70 et 95 % d'une loi de Gumbel

Lang (1995) décrit dans Djerboua (2001) [X039] en donne la formulation suivante :

L'intervalle de confiance à α % sur un quantile X_F s'exprime en fonction de l'écart type σ_x par :

$$X_F - T_2.\ \sigma_x \leq X_F \leq X_F + T_1.\ \sigma_x$$

$$T_{1,2} = \frac{\pm u_\alpha^2(0.57 + 1.1u_F) + u_\alpha\sqrt{n.(1 + 1.14u_F + 1.1u_F^2) - 0.775u_\alpha^2}}{n - 1.1u_\alpha^2}$$

Avec :
les signes + et – correspondant respectivement à T_1 et T_2.
n : taille de l'échantillon
u_α : est la variable réduite de Gauss correspondant à la fréquence au non dépassement (1-(1-α)/2)
u_F : est la variable réduite de Gumbel correspondant à la fréquence au non dépassement F, ramenée à sa moyenne et son écart-type :

$$u_F = \frac{-Ln\big(-Ln(F)\big) - 0.577}{1.28}$$

1.13.5 Hypothèse 1a : échantillon DREAL 2014 étendu à la période 1830 – 2015

L'échantillon retenu pour l'ajustement comprend :

- Les débits figurant dans DREAL 2014 [J002] pour la période 1841-2011 ;
- Les débits du SPCGD pour la période 2012-2015 ;
- Un débit de 13 000 m^3/s pour la crue de Novembre 1840 ;
- Les débits ci-après pour la période 1830-1840 estimés à partir des niveaux maximum relevés au pont de Beaucaire et figurant aux archives départementales de l'Hérault [O002] et la formule de Rondel décrite dans Pichard 2015 [H0004].

Tableau 19. Débits instantanés maximaux annuels (année civile) sur la période 1830-1839

Date Max annuel	Débit Instantané
18/11/1830	5 800 m^3/s
3/03/1831	4 400 m^3/s
7/10/1832	3 500 m^3/s
27/12/1833	4 400 m^3/s
1/9/1834	6 300 m^3/s
13/10/1835	4 500 m^3/s
9/10/1836	8 100 m^3/s
6/5/1837	3 400 m^3/s
23/03/1838	4 900 m^3/s
8/10/1839	7 000 m^3/s

La figure ci-dessous donne :

- La distribution des débits suivant la fréquence empirique de Hazen ;
- l'ajustement graphique de la distribution des débits suivant une loi de Gumbel ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 70 % ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 95 % ;

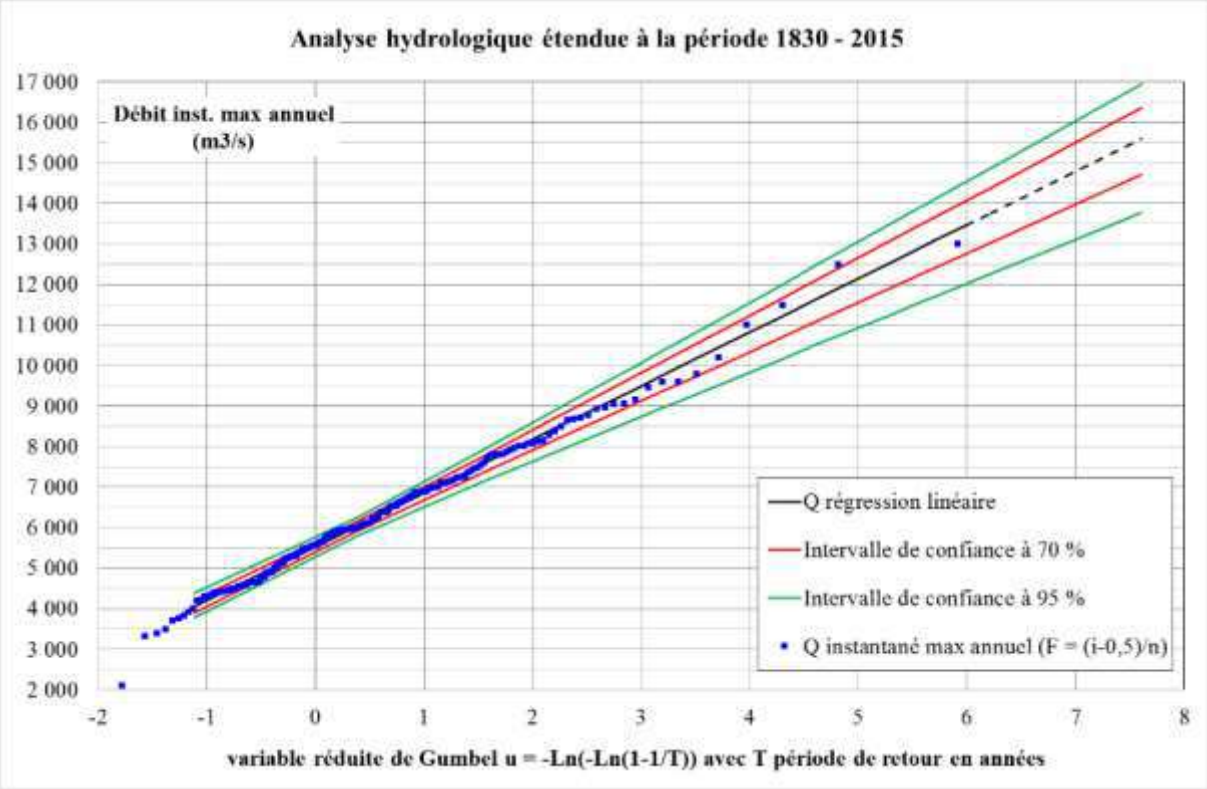


Figure 67. Hyp. 1a : ajustement statistique des maximaux annuels

Le tableau ci-dessous donne les paramètres de position x_0 et d'échelle s (gradex) déterminés suivant la méthode graphique et la méthode des moments. L'utilisation de l'une ou l'autre des méthodes donne d'un écart dans la détermination des débits caractéristiques inférieur à 0,1 %.

Tableau 20. Hyp 1a : paramètres d'ajustement de la loi de Gumbel

Méthode	x_0	s
Graphique	5 528	1 325
Moments	5 527	1 322

Le tableau ci-dessous donne pour différentes périodes de retour :

- Le débit instantané maximal annuel (année civile) arrondi à 100 m^3/s ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 70 % ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 95 % ;

Tableau 21. Hyp 1a : Période de retour, débit max et intervalles de confiance

Période de retour T (années)	Débit instantané max annuel (m^3/s)	Intervalle de confiance à 70 %		Intervalle de confiance à 95 %	
		borne inf.	borne sup.	borne inf.	borne sup.
1	4 100	3 900	4 200	3 800	4 400
2	6 000	5 900	6 100	5 800	6 200
5	7 500	7 300	7 700	7 100	7 800
10	8 500	8 200	8 800	7 900	9 000
15	9 100	8 700	9 400	8 400	9 600
20	9 500	9 100	9 800	8 700	10 000
25	9 800	9 400	10 100	9 000	10 400
30	10 000	9 600	10 400	9 200	10 600
50	10 700	10 200	11 100	9 700	11 400
75	11 200	10 700	11 700	10 200	12 000
100	11 600	11 100	12 100	10 500	12 500
200	12 500	11 900	13 100	11 300	13 500
250	12 800	12 200	13 400	11 500	13 800
300	13 100	12 400	13 700	11 700	14 100
400	13 500	12 800	14 100	12 000	14 500
500	13 800	13 000	14 400	12 300	14 900
1000	14 700	13 900	15 400	13 000	15 900
2000	15 600	14 700	16 400	13 800	16 900

L'extension de l'analyse à la période 1830-2015 et l'introduction de la crue de novembre 1840 contribue à augmenter les débits caractéristiques de 100 à 400 m^3/s suivant l'importance des périodes de retour. Cette augmentation de débit correspond à un pourcentage de 1 à 3 %, ce qui est notable mais reste en deçà de l'incertitude liée à l'estimation des débits (pour mémoire ± 5 % en décembre 2003).

L'intervalle de confiance à 95 % de cet ajustement correspond à l'intervalle de confiance à 80 % de l'étude EGR, ce qui s'explique par l'importance de l'échantillon qui est de 186 années dans la présente analyse contre 78 années dans l'EGR.

1.13.6 Hypothèse 1b : échantillon DREAL 2014 étendu à la période 1830 – 2015 avec Q_{2002} estimé suivant CT_{2002}

Cette hypothèse diffère de la précédente uniquement par la valeur du débit de l'année 2002 qui est estimé à 10 500 m^3/s à la place de 9600 m^3/s pour être conforme avec la courbe de tarage en vigueur en 2002.

La figure ci-dessous donne :

- La distribution des débits suivant la fréquence empirique de Hazen ;
- l'ajustement graphique de la distribution des débits suivant une loi de Gumbel ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 70 % ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 95 % ;

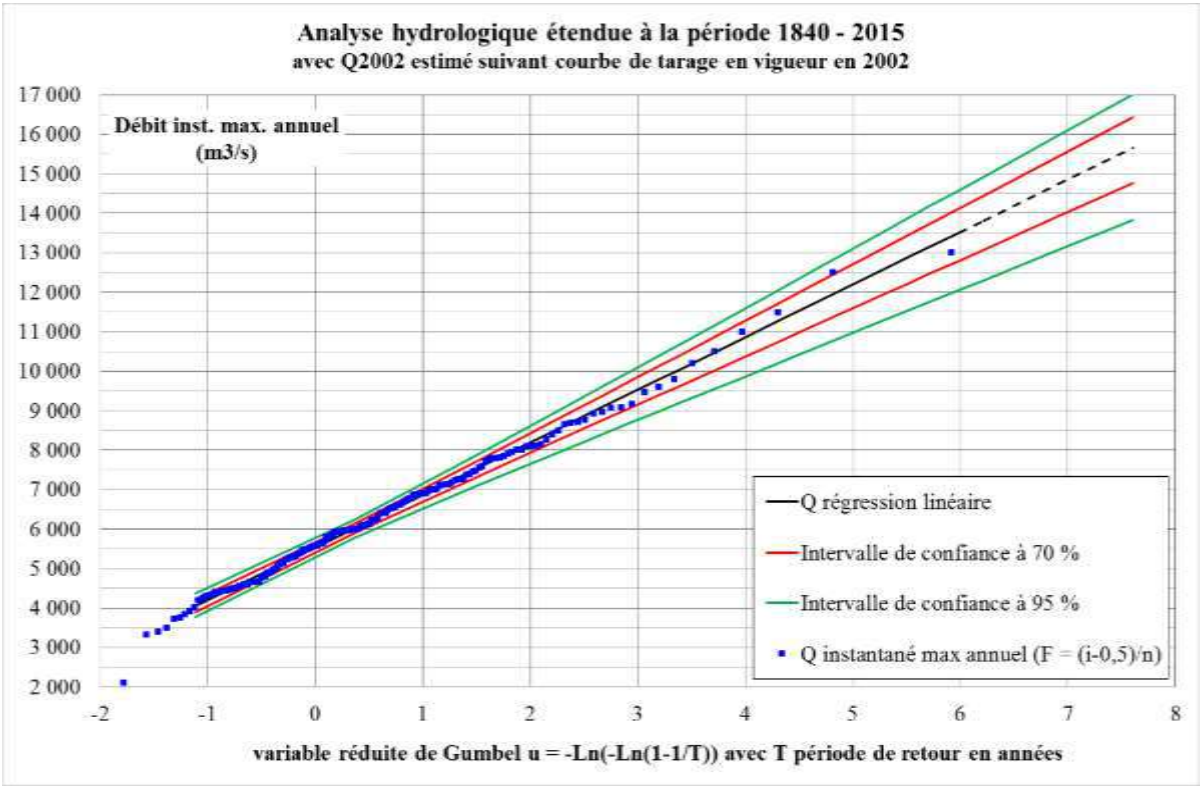


Figure 68. Hyp. 1b : ajustement statistique des maximaux annuels

Le tableau ci-dessous donne les paramètres de position x_0 et d'échelle s (gradex) déterminés suivant la méthode graphique et la méthode des moments. L'utilisation de l'une ou l'autre des méthodes donne d'un écart dans la détermination des débits caractéristiques inférieur à 0,1 %. Par rapport à l'hypothèse 1, le gradex est légèrement augmenté (une dizaine de m^3/s)

Tableau 22. Hyp 1b : paramètres d'ajustement de la loi de Gumbel

Méthode	x_0	s
Graphique	5 527	1 334
Moments	5 527	1 330

Le tableau ci-dessous donne pour différentes périodes de retour :

- Le débit instantané maximal annuel (année civile) arrondi à 100 m^3/s ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 70 % ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 95 % ;

Tableau 23. Hyp 1b : Période de retour, débit max et intervalles de confiance

Période de retour T (années)	Débit instantané max annuel (m^3/s)	Intervalle de confiance à 70 %		Intervalle de confiance à 95 %	
		borne inf.	borne sup.	borne inf.	borne sup.
1	4 000	3 900	4 200	3 800	4 400
2	6 000	5 900	6 100	5 800	6 200
5	7 500	7 300	7 700	7 100	7 900
10	8 500	8 200	8 800	7 900	9 000
15	9 100	8 800	9 400	8 400	9 600
20	9 500	9 100	9 800	8 700	10 100
25	9 800	9 400	10 100	9 000	10 400
30	10 000	9 600	10 400	9 200	10 700
50	10 700	10 300	11 100	9 800	11 500
75	11 300	10 800	11 700	10 200	12 100
100	11 700	11 100	12 100	10 500	12 500
200	12 600	12 000	13 100	11 300	13 500
250	12 900	12 200	13 500	11 500	13 900
300	13 100	12 500	13 700	11 700	14 200
400	13 500	12 800	14 100	12 100	14 600
500	13 800	13 100	14 400	12 300	14 900
1000	14 700	13 900	15 400	13 100	16 000
2000	15 700	14 800	16 400	13 800	17 000

L'impact introduit par cette mise en cohérence du débit de 2002 « ne modifie pas » sensiblement les débits caractéristiques. Les écarts restent en deçà du mécanisme d'arrondi.

1.13.7 Hypothèse 1c : échantillon DREAL 2014 étendu à la période 1830 – 2015 avec Q_{1993} à Q_{2002} estimés suivant CT_{2003}

Dans cette hypothèse, les débits instantanés maximaux annuels retenus pour les crues de 1993 à 2003 sont estimés suivant la courbe de tarage actuelle modifiée suite à la conférence de consensus.
Les débits retenus pour les crues de 1993, 1994, 1996 et 2002 sont ceux figurant dans le RIC du SPC Grand Delta [K204]. Le tableau ci-dessous donne les modifications de débit

Tableau 24. Estimation des débits de pointe des crues de 1993 à 2002 suivant les courbes de tarage

Crue	Estimation ancienne courbe de tarage	Estimation nouvelle courbe de tarage
Octobre 1993	9 800 m^3/s	8 950 m^3/s
Janvier 1994	11 000 m^3/s	10 250 m^3/s
Novembre 1996	8 980 m^3/s	8 430 m^3/s
Septembre 2002	10 500 m^3/s	9 620 m^3/s

La figure ci-dessous donne :

- La distribution des débits suivant la fréquence empirique de Hazen ;
- l'ajustement graphique de la distribution des débits suivant une loi de Gumbel ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 70 % ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 95 % ;

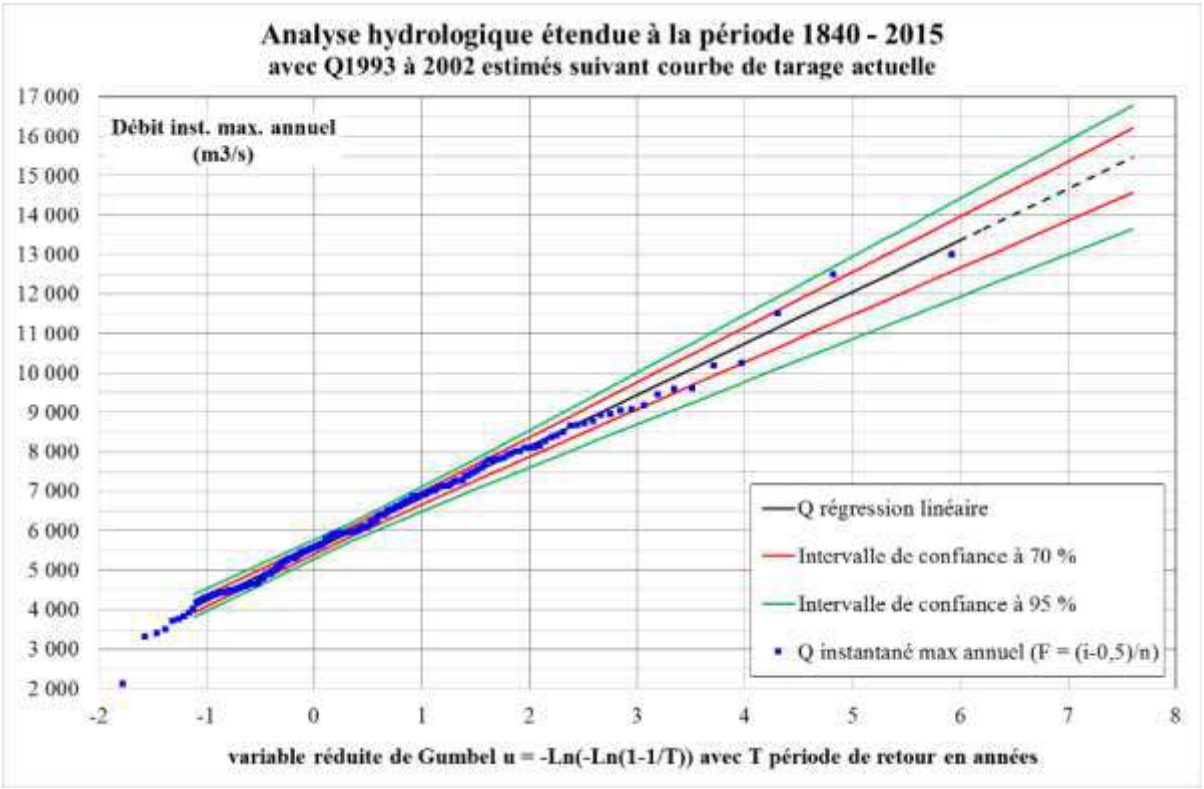


Figure 69. Hyp. 1c : ajustement statistique des maximaux annuels

Le tableau ci-dessous donne les paramètres de position x_0 et d'échelle s (gradex) déterminés suivant la méthode graphique et la méthode des moments. L'utilisation de l'une ou l'autre des méthodes donne d'un écart dans la détermination des débits caractéristiques inférieur à 0,1 %. Par rapport à l'hypothèse 1a, le gradex est diminué d'une vingtaine de m^3/s et d'une trentaine de m^3/s par rapport à l'hypothèse 1b.

Tableau 25. Hyp 1c : paramètres d'ajustement de la loi de Gumbel

Méthode	x_0	s
Graphique	5 527	1 306
Moments	5 526	1 304

Le tableau ci-dessous donne pour différentes périodes de retour :

- Le débit instantané maximal annuel (année civile) arrondi à 100 m^3/s ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 70 % ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 95 % ;

Tableau 26. Hyp 1c : Période de retour, débit max et intervalles de confiance

Période de retour T (années)	**Débit instantané max annuel (m^3/s)**	**Intervalle de confiance à 70 %**		**Intervalle de confiance à 95 %**	
		borne inf.	**borne sup.**	**borne inf.**	**borne sup.**
1	4 100	3 900	4 200	3 800	4 400
2	6 000	5 900	6 100	5 800	6 200
5	7 500	7 300	7 700	7 100	7 800
10	8 500	8 200	8 700	7 900	8 900
15	9 000	8 700	9 300	8 300	9 500
20	9 400	9 000	9 700	8 700	10 000
25	9 700	9 300	10 000	8 900	10 300
30	9 900	9 500	10 300	9 100	10 600
50	10 600	10 200	11 000	9 700	11 300
75	11 200	10 600	11 600	10 100	11 900
100	11 500	11 000	12 000	10 400	12 400
200	12 400	11 800	13 000	11 200	13 400
250	12 700	12 100	13 300	11 400	13 700
300	13 000	12 300	13 500	11 600	14 000
400	13 400	12 700	13 900	11 900	14 400
500	13 600	12 900	14 300	12 200	14 700
1000	14 500	13 700	15 200	12 900	15 800
2000	15 500	14 600	16 200	13 700	16 800

La « ré-estimation » des débits de 1993 à 2002 suivant la nouvelle courbe de tarage contribue à baisser par rapport à l'hypothèse 2, les débits cinquantennal et centennal de 100 m^3/s et le débit milénal de 200 m^3/s.

Par rapport à l'étude DREAL 2014, cette hypothèse induit une hausse des débits caractéristiques proche de 1 %.

1.13.8 Hypothèse 2a : échantillon étendu à la période 1830 – 2015 (1er nov. au 31 oct.)

Cette hypothèse est identique à l'hypothèse 1a, mais pour le choix de l'année, on retient à la place de l'année civile, une année glissante du 1er novembre de l'année n au 31 octobre de l'année n+1.

Ce choix est orienté par la particularité du Delta d'être exposé aux fortes crues dans la période s'étalant de septembre à janvier avec une concentration importante des événements sur les mois d'octobre et de novembre.

Cette hypothèse forte mais sans doute plus représentative de l'exposition au risque a pour conséquences d'introduire des crues importantes qui ne figuraient pas dans l'échantillonnage initial et d'en supprimer en moindre proportion. Parmi les principaux changements :

- La crue d'octobre 1841 (8160 m^3/s) est supprimée de l'échantillonnage,
- La crue de décembre 1872 (8500 m^3/s) est introduite dans l'échantillonnage,
- La crue du 28 octobre 1886 (10 000 m^3/s) est introduite,
- La crue du 31 décembre 1888 (7 460 m^3/s) est supprimée,
- La crue du 24 octobre 1977 (8 125 m^3/s) est supprimée,
- La crue du 8 novembre 1994 (9 750 m^3/s ou 8 900 m^3/s suivant courbe tarage) est introduite,
- La crue du 26 novembre 2002 (10 200 m^3/s ou 9 420 m^3/s suivant courbe tarage) est introduite,

La figure ci-dessous donne :

- La distribution des débits suivant la fréquence empirique de Hazen ;
- l'ajustement graphique de la distribution des débits suivant une loi de Gumbel ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 70 % ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 95 % ;

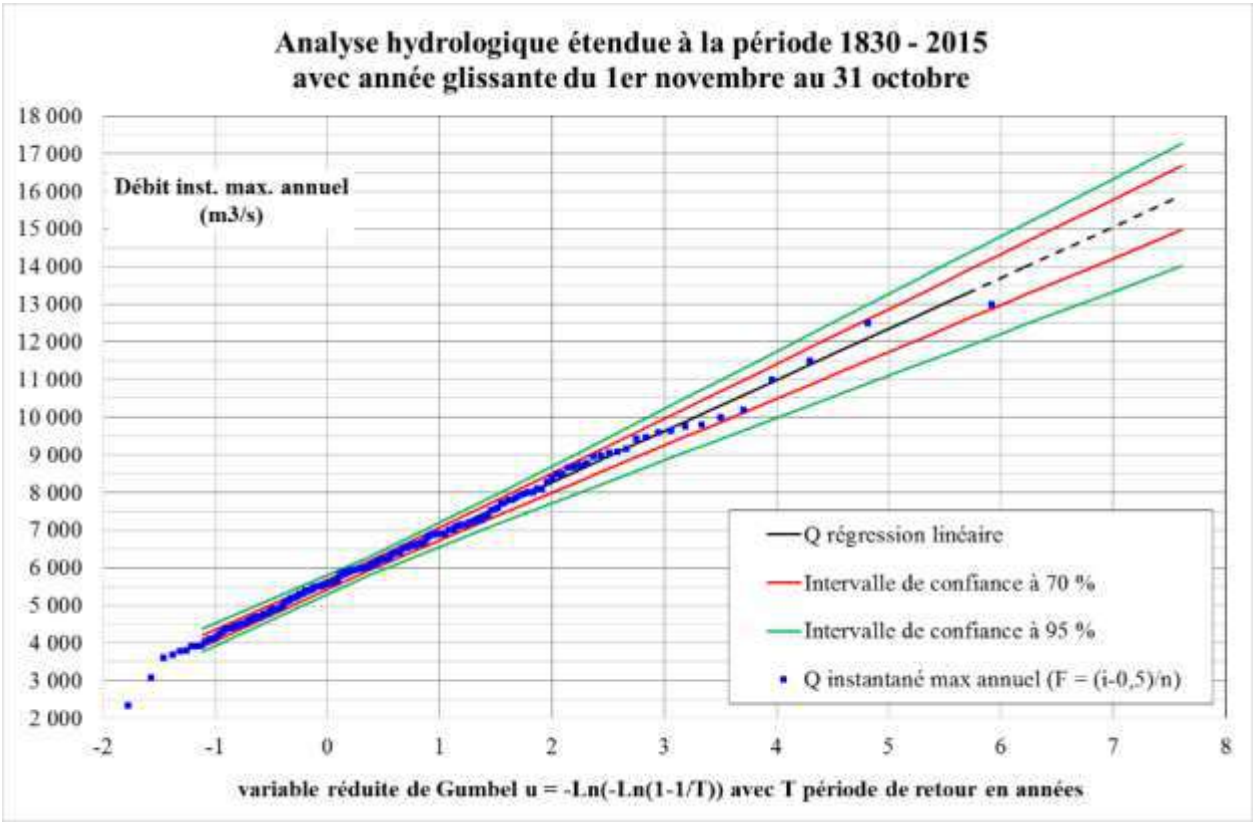


Figure 70. Hyp. 2a : ajustement statistique des maximaux annuels sur une année glissant de Nov. à Oct.

Le tableau ci-dessous donne les paramètres de position x_0 et d'échelle s (gradex) déterminés suivant la méthode graphique et la méthode des moments. L'utilisation de l'une ou l'autre des méthodes donne d'un écart dans la détermination des débits caractéristiques inférieur à 0,1 %. Par rapport à l'hypothèse 1a, le gradex est augmenté d'une trentaine de m^3/s.

Tableau 27. Hyp 2a : paramètres d'ajustement de la loi de Gumbel

Méthode	x_0	s
Graphique	5 557	1 359
Moments	5 557	1 355

Le tableau ci-dessous donne pour différentes périodes de retour :

- Le débit instantané maximal annuel (année civile) arrondi à 100 m^3/s ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 70 % ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 95 % ;

Tableau 28. Hyp 2a : Période de retour, débit max et intervalles de confiance

Période de retour T (années)	Débit instantané max annuel (m^3/s)	Intervalle de confiance à 70 %		Intervalle de confiance à 95 %	
		borne inf.	borne sup.	borne inf.	borne sup.
1	4 000	3 900	4 200	3 800	4 400
2	6 100	5 900	6 200	5 800	6 300
5	7 600	7 400	7 800	7 200	7 900
10	8 600	8 300	8 900	8 000	9 100
15	9 200	8 800	9 500	8 500	9 700
20	9 600	9 200	9 900	8 800	10 200
25	9 900	9 500	10 300	9 100	10 500
30	10 200	9 700	10 500	9 300	10 800
50	10 900	10 400	11 300	9 900	11 600
75	11 400	10 900	11 900	10 300	12 200
100	11 800	11 200	12 300	10 700	12 700
200	12 800	12 100	13 300	11 400	13 700
250	13 100	12 400	13 600	11 700	14 100
300	13 300	12 600	13 900	11 900	14 400
400	13 700	13 000	14 300	12 200	14 800
500	14 000	13 200	14 600	12 500	15 100
1000	14 900	14 100	15 700	13 200	16 200
2000	15 900	15 000	16 700	14 000	17 300

Par rapport à l'étude DREAL 2014, cette hypothèse a pour conséquence d'augmenter les débits caractéristiques de 2 à 4 %, ce qui correspond à une hausse sensible mais qui reste en deçà des incertitudes liées à l'estimation des débits.

Par rapport à l'hypothèse 1a, l'augmentation est comprise entre 1 et 2 %, s'explique par une augmentation dans l'échantillon de crues importantes (oct. 1886, nov. 1994 et nov. 2002) non compensée par le retrait en moindre proportion de crues moyennes.

1.13.9 *Hypothèse 2b : échantillon étendu à la période 1830 – 2015 avec Q_{2002} estimé suivant CT_{2002} (1^{er} nov. au 31 oct.)*

Cette hypothèse est identique à l'hypothèse 1b, mais pour le choix de l'année, on retient à la place de l'année civile, une année glissante du 1er novembre de l'année n au 31 octobre de l'année n+1.

Les débits des crues de septembre 2002 et novembre 2002 sont estimés respectivement à 10 500 m^3/s et 10 200 m^3/s à la place de 9 600 et 9 420 m^3/s pour être conforme avec la courbe de tarage en vigueur en 2002.

La figure ci-dessous donne :

- La distribution des débits suivant la fréquence empirique de Hazen ;
- l'ajustement graphique de la distribution des débits suivant une loi de Gumbel ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 70 % ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 95 % ;

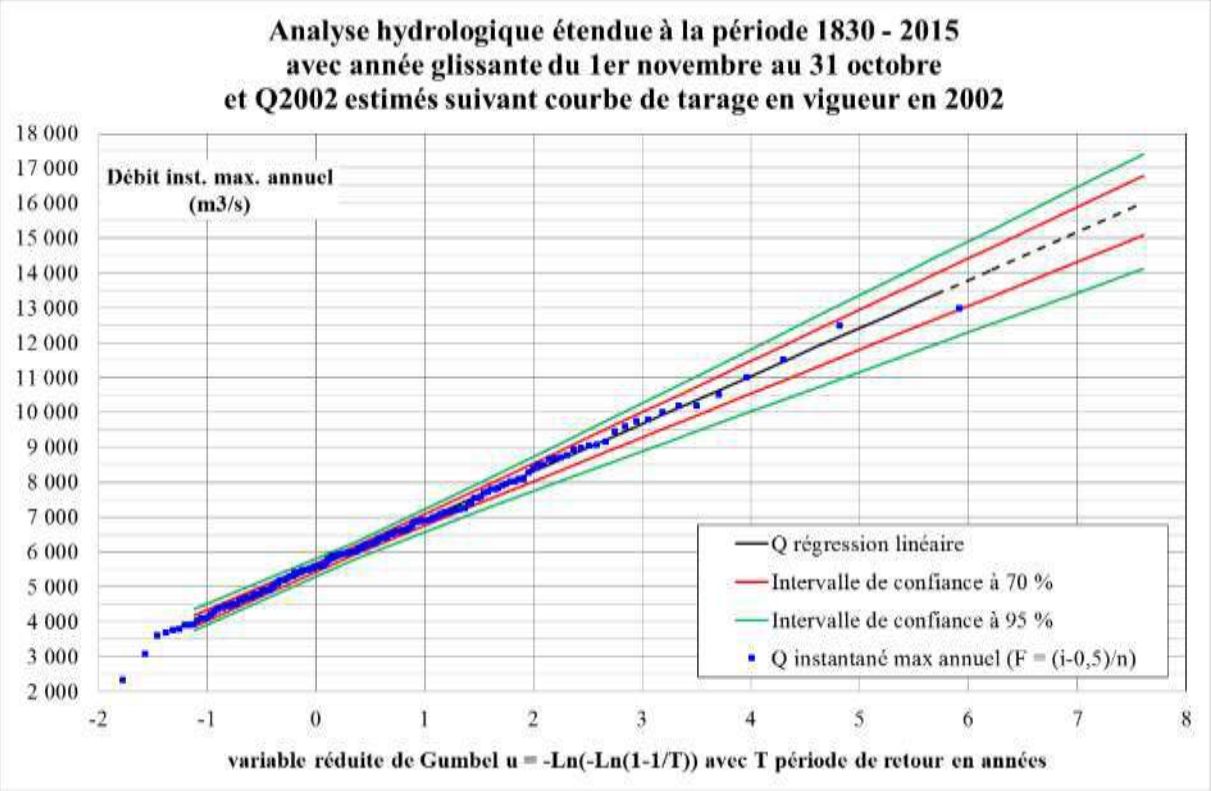


Figure 71. Hyp. 2b : ajustement statistique des maximaux annuels sur une année glissant de Nov. à Oct.

Le tableau ci-dessous donne les paramètres de position x_0 et d'échelle s (gradex) déterminés suivant la méthode graphique et la méthode des moments. L'utilisation de l'une ou l'autre des méthodes donne d'un écart dans la détermination des débits caractéristiques inférieur à 0,1 %. Par rapport à l'hypothèse 1b, le gradex est augmenté d'une quarantaine de m^3/s et d'une quinzaine de m^3/s par rapport à l'hypothèse 2a.

Tableau 29. Hyp 2b : paramètres d'ajustement de la loi de Gumbel

Méthode	x_0	s
Graphique	5 557	1 374
Moments	5 558	1 369

Le tableau ci-dessous donne pour différentes périodes de retour :

- Le débit instantané maximal annuel (année civile) arrondi à 100 m^3/s ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 70 % ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 95 % ;

Tableau 30. Hyp 2a : Période de retour, débit max et intervalles de confiance

Période de retour T (années)	Débit instantané max annuel (m^3/s)	Intervalle de confiance à 70 %		Intervalle de confiance à 95 %	
		borne inf.	borne sup.	borne inf.	borne sup.
1	4 000	3 900	4 200	3 800	4 400
2	6 100	5 900	6 200	5 800	6 300
5	7 600	7 400	7 800	7 200	8 000
10	8 600	8 300	8 900	8 000	9 100
15	9 200	8 900	9 500	8 500	9 800
20	9 600	9 300	10 000	8 900	10 200
25	10 000	9 500	10 300	9 100	10 600
30	10 200	9 800	10 600	9 300	10 900
50	10 900	10 400	11 300	9 900	11 700
75	11 500	10 900	11 900	10 400	12 300
100	11 900	11 300	12 400	10 700	12 700
200	12 800	12 200	13 400	11 500	13 800
250	13 100	12 500	13 700	11 800	14 200
300	13 400	12 700	14 000	12 000	14 400
400	13 800	13 000	14 400	12 300	14 900
500	14 100	13 300	14 700	12 500	15 200
1000	15 000	14 200	15 800	13 300	16 300
2000	16 000	15 100	16 800	14 100	17 400

Par rapport à l'étude DREAL 2014, cette hypothèse a pour conséquence d'augmenter les débits caractéristiques de 2 à 5 %, ce qui correspond à une hausse sensible qui avoisine les incertitudes liées à l'estimation des débits.

Par rapport à l'hypothèse 2a, l'augmentation est inférieure à 1 %.

Par rapport à l'hypothèse 1b, l'augmentation est comprise entre 1 et 2 % pour les mêmes raisons que celles évoquées pour l'hypothèse 2a.

1.13.10 Hypothèse 2c : échantillon étendu à la période 1830 – 2015 avec Q_{1993} à Q_{2002} estimés suivant CT_{2003} (1er nov. au 31 oct.)

Dans cette hypothèse, les débits instantanés maximaux sur année glissante retenus pour les crues de 1993 à 2003 sont estimés suivant la courbe de tarage actuelle modifiée suite à la conférence de consensus.
Les débits retenus pour les crues de 1993, 1994, 1996 et 2002 sont ceux figurant dans le RIC du SPC Grand Delta [K204]. Le tableau ci-dessous donne les modifications de débit

Tableau 31. Estimation des débits de pointe des crues de 1993 à 2002 suivant les courbes de tarage

Crue	Estimation ancienne courbe de tarage	Estimation nouvelle courbe de tarage
Octobre 1993	9 800 m^3/s	8 950 m^3/s
Janvier 1994	11 000 m^3/s	10 250 m^3/s
Novembre 1994	9 750 m^3/s	8 890 m^3/s
Novembre 1996	8 980 m^3/s	8 430 m^3/s
Septembre 2002	10 500 m^3/s	9 620 m^3/s
Novembre 2002	10 200 m^3/s	9 420 m^3/s

La figure ci-dessous donne :

- La distribution des débits suivant la fréquence empirique de Hazen ;
- l'ajustement graphique de la distribution des débits suivant une loi de Gumbel ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 70 % ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 95 % ;

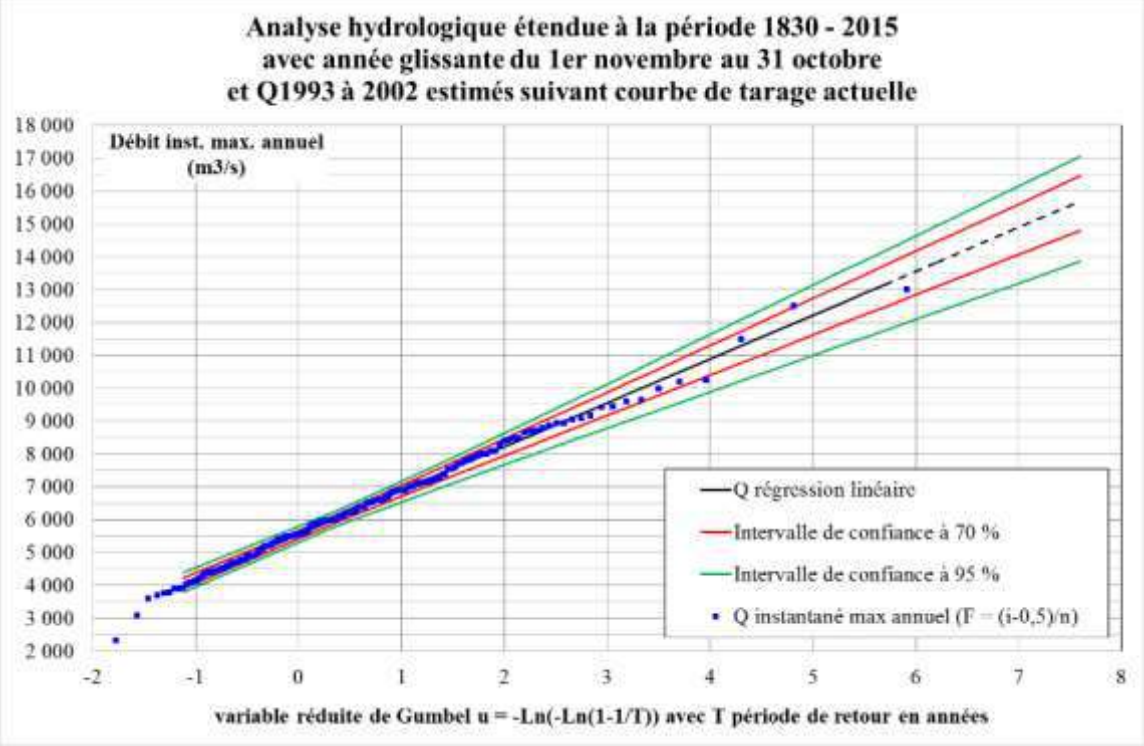


Figure 72. Hyp. 2c : ajustement statistique des maximaux annuels

Le tableau ci-dessous donne les paramètres de position x_0 et d'échelle s (gradex) déterminés suivant la méthode graphique et la méthode des moments. L'utilisation de l'une ou l'autre des méthodes donne d'un écart dans la détermination des débits caractéristiques inférieur à 0,1 %.

Par rapport à l'hypothèse 2a, le gradex est diminué d'une trentaine de m^3/s et d'une quarantaine de m^3/s par rapport à l'hypothèse 2b.

Tableau 32. Hyp 2c : paramètres d'ajustement de la loi de Gumbel

Méthode	x_0	s
Graphique	5 555	1 334
Moments	5 555	1 331

Le tableau ci-dessous donne pour différentes périodes de retour :

- Le débit instantané maximal annuel (année civile) arrondi à 100 m^3/s ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 70 % ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 95 % ;

Tableau 33. Hyp 2c : Période de retour, débit max et intervalles de confiance

Période de retour T (années)	Débit instantané max annuel (m^3/s)	Intervalle de confiance à 70 %		Intervalle de confiance à 95 %	
		borne inf.	borne sup.	borne inf.	borne sup.
1	4 100	3 900	4 200	3 800	4 400
2	6 000	5 900	6 200	5 800	6 300
5	7 600	7 300	7 700	7 100	7 900
10	8 600	8 300	8 800	8 000	9 000
15	9 100	8 800	9 400	8 400	9 600
20	9 500	9 100	9 800	8 800	10 100
25	9 800	9 400	10 200	9 000	10 400
30	10 100	9 700	10 400	9 200	10 700
50	10 800	10 300	11 200	9 800	11 500
75	11 300	10 800	11 800	10 200	12 100
100	11 700	11 100	12 200	10 600	12 500
200	12 600	12 000	13 200	11 300	13 600
250	12 900	12 300	13 500	11 600	13 900
300	13 200	12 500	13 700	11 800	14 200
400	13 500	12 800	14 200	12 100	14 600
500	13 800	13 100	14 500	12 300	15 000
1000	14 800	13 900	15 500	13 100	16 000
2000	15 700	14 800	16 500	13 900	17 100

La « ré-estimation » des débits de 1993 à 2002 suivant la nouvelle courbe de tarage contribue à baisser par rapport à l'hypothèse 2b, les débits centennal et milénal de 200 m^3/s.

Par rapport à l'étude DREAL 2014, cette hypothèse a pour conséquence d'augmenter les débits caractéristiques de 2 à 4 %, ce qui correspond à une hausse sensible mais qui reste en deçà des incertitudes liées à l'estimation des débits.

Par rapport à l'hypothèse 2b, la diminution est de 1 à 2 %.

Par rapport à l'hypothèse 1c, l'augmentation est comprise entre 1 et 2 % pour les mêmes raisons que celles évoquées pour l'hypothèse 2a.

1.13.11 *Hypothèse 3 : échantillon étendu à la période 1830 – 2015 avec Q_{1993} à Q_{2002} estimés suivant CT_{2003} et crues anciennes suivant Pardé (1er nov. au 31 oct.)*

Dans cette hypothèse, les débits instantanés maximaux sur année glissante retenus pour les crues de 1993 à 2003 sont estimés suivant la courbe de tarage actuelle modifiée suite à la conférence de consensus. Est également modifié le débit de la crue de 1876 qui est ramené à 8200 m^3/s contre 8690 m^3/s.
Les débits retenus pour les crues anciennes sont ceux de Pardé [K001] et [K003] pour les raisons évoquées précédemment.

La figure ci-dessous donne :

- La distribution des débits suivant la fréquence empirique de Hazen ;
- l'ajustement graphique de la distribution des débits suivant une loi de Gumbel ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 70 % ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 95 % ;

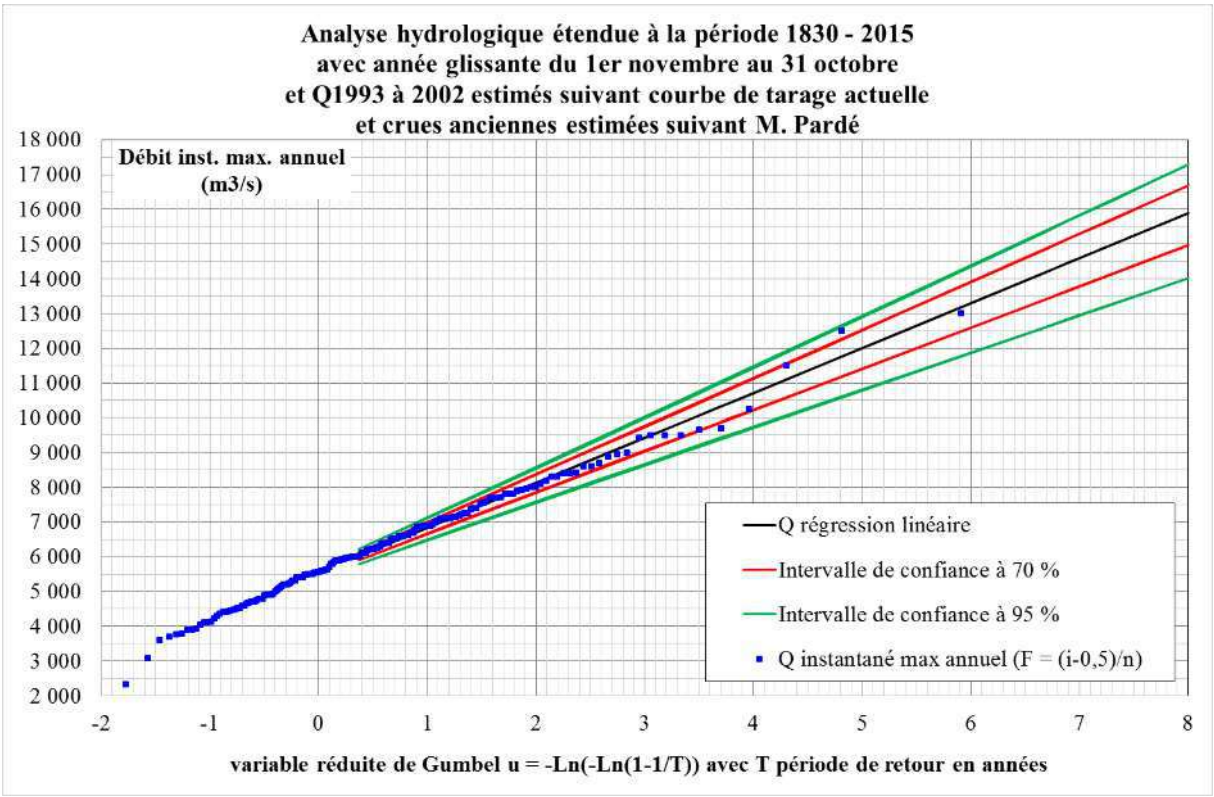


Figure 73. Hyp. 3 : ajustement statistique des maximaux annuels

Le tableau ci-dessous donne les paramètres de position x_0 et d'échelle s (gradex) déterminés suivant la méthode graphique et la méthode des moments. L'utilisation de l'une ou l'autre des méthodes donne d'un écart dans la détermination des débits caractéristiques inférieur à 0,1 %.

Par rapport à l'hypothèse 2c, le gradex est diminué d'une quarantaine de m^3/s et d'une dizaine de m^3/s par rapport à l'hypothèse 1c.

Tableau 34. Hyp 3 : paramètres d'ajustement de la loi de Gumbel

Méthode	x_0	s
Graphique	5 541	1 294
Moments	5 541	1 292

Le tableau ci-dessous donne pour différentes périodes de retour :

- Le débit instantané maximal annuel (année civile) arrondi à 100 m^3/s ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 70 % ;
- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 95 % ;

Tableau 35. Hyp 3 : Période de retour, débit max et intervalles de confiance

Période de retour T (années)	Débit instantané max annuel (m^3/s)	Intervalle de confiance à 70 %		Intervalle de confiance à 95 %	
		borne inf.	borne sup.	borne inf.	borne sup.
1	4 100	4 000	4 300	3 800	4 400
2	6 000	5 900	6 100	5 800	6 200
5	7 500	7 300	7 700	7 100	7 800
10	8 500	8 200	8 700	7 900	8 900
15	9 000	8 700	9 300	8 300	9 500
20	9 400	9 000	9 700	8 600	9 900
25	9 700	9 300	10 000	8 900	10 300
30	9 900	9 500	10 300	9 100	10 500
50	10 600	10 100	11 000	9 600	11 300
75	11 100	10 600	11 600	10 100	11 900
100	11 500	11 000	12 000	10 400	12 300
200	12 400	11 800	12 900	11 100	13 300
250	12 700	12 000	13 200	11 400	13 700
300	12 900	12 300	13 500	11 600	13 900
400	13 300	12 600	13 900	11 900	14 300
500	13 600	12 900	14 200	12 100	14 700
1000	14 500	13 700	15 200	12 900	15 700
2000	15 400	14 500	16 100	13 600	16 700

La prise en compte des débits de Pardé contribue à baisser sensiblement le débit centennal de 200 m^3/s et le débit milénal de 300 m^3/s.

1.13.12 Synthèse

Le tableau ci-dessous synthétise pour différentes périodes de retour les débits instantanés maximaux annuels suivant les hypothèses précitées.

Tableau 36. Synthèse des débits caractéristiques

T (ans)	Débits instantanés maximaux annuels								
	Année civile					Année glissante de nov. à oct.			
	EGR	DREAL	Hyp1a	Hyp1b	Hyp1c	Hyp2a	Hyp2b	Hyp2c	Hyp3
2	6 100	6 100	6 000	6 000	6 000	6 100	6 100	6 000	6 000
5	7 500	7 500	7 500	7 500	7 500	7 600	7 600	7 600	7 500
10	8 400	8 400	8 500	8 500	8 500	8 600	8 600	8 600	8 500
50	10 400	10 500	10 700	10 700	10 600	10 900	10 900	10 800	10 600
100	11 300	11 400	11 600	11 700	11 500	11 800	11 900	11 700	11 500
500	13 300	13 500	13 800	13 800	13 600	14 000	14 100	13 800	13 600
1000	14 200	14 400	14 700	14 700	14 500	14 900	15 000	14 800	14 500

La figure en page suivante illustre graphiquement ces résultats

Les écarts entre les débits caractéristiques sont compris entre :

- 0 et 200 m^3/s pour une crue décennale,
- 0 et 600 m^3/s pour une crue centennale,
- 0 et 800 m^3/s pour une crue millénale.

Ces écarts peuvent paraitre importants mais demeurent dans la fourchette d'incertitudes des débits.

L'analyse hydrologique réalisée dans le cadre de l'EGR s'est basée sur la période 1920-1998 qui correspond à une période de veille hydrologique du Rhône. Si les résultats de cette dernière ont, jusqu'à aujourd'hui, servi de références, ils constituent la fourchette basse des différentes estimations et il serait prudent de ne plus y faire référence.

L'étude DREAL 2014 couvre une période 171 années incluant la crue de décembre 2003 et celle de mai 1856 mais ne prenant pas en compte la crue de novembre 1840, ce qui peut paraître difficilement compréhensible quand on sait que c'est cette dernière qui a laissé le plus de stigmates dans le territoire.

La prise en compte de la crue de 1840 dans les différentes hypothèses introduit un biais statistique que nous avons essayé de réduire en démarrant l'analyse à 1830 et en poursuivant l'analyse jusqu'en 2015. La prise en compte de cette crue dans l'analyse augmente sensiblement les valeurs des débits caractéristiques, mais permet d'être à notre sens plus proche de la réalité.

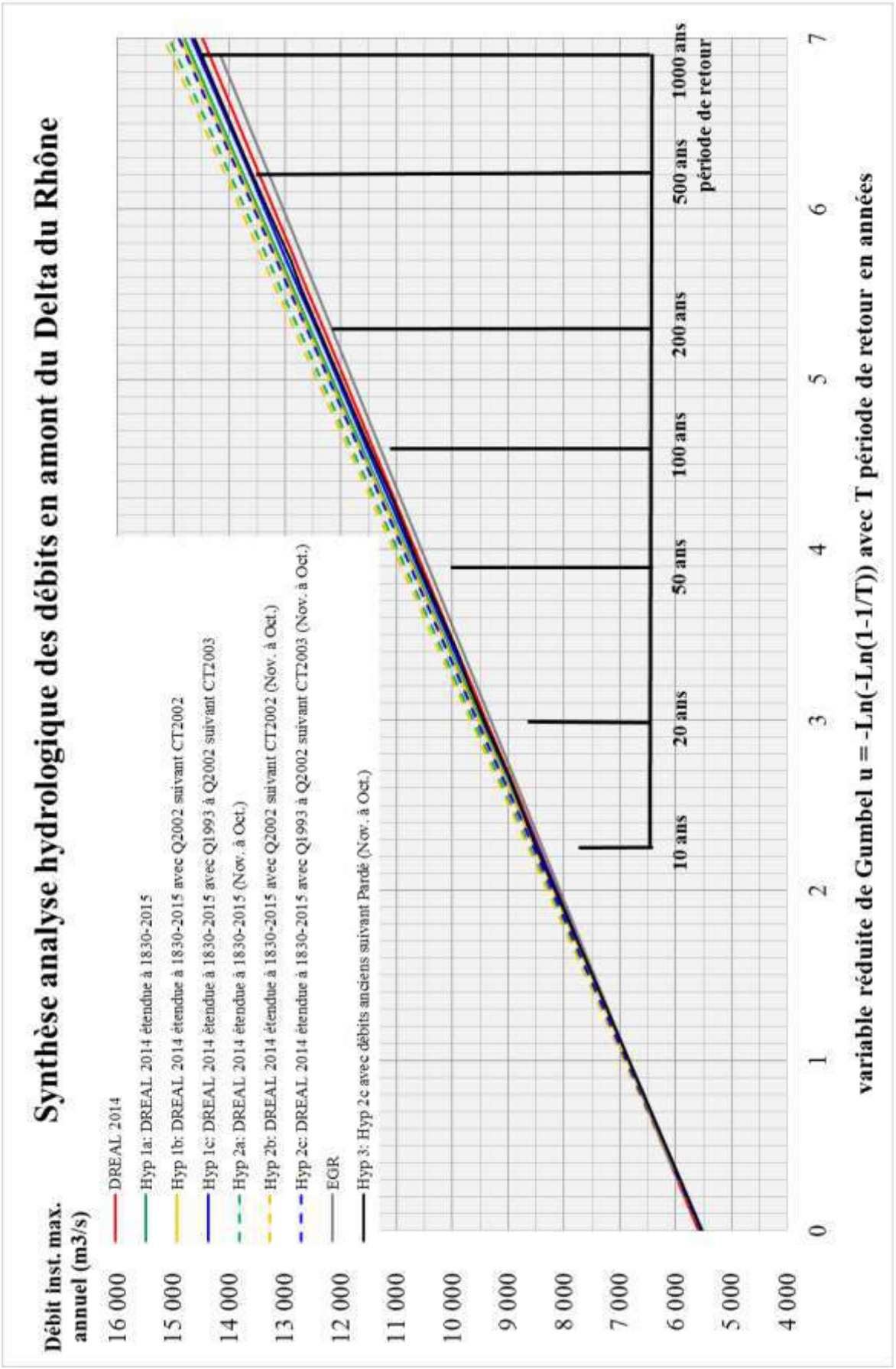


Figure 74. Synthèse hydrologique suivant les différentes hypothèses

On constate également que le fait de retenir dans l'analyse une période annuelle s'étendant du 1er novembre au 31 octobre permet d'introduire dans l'échantillon des crues importantes qui n'y figuraient pas.

Compte tenu de l'importance des crues supérieures à la décennale entre 1993 et 2002 (7), le choix de la courbe de tarage dans l'estimation des débits a également un impact sur la valeur des débits caractéristiques de l'ordre de 200 m^3/s pour les crues supérieures à la centennale.

On note que l'estimation des débits de 1993 à 2002 suivant l'ancienne courbe de tarage n'est pas homogène avec les observations passées et le débit de 2003 déterminé par la conférence de consensus sans pouvoir donner d'explications.

L'hypothèse 3 qui a pris en compte pour les débits structurants l'analyse les débits estimés par Pardé et corrigés des effets des brèches et pour les débits plus récents la courbe de tarage actuellement en vigueur permet d'avoir une série historique plus homogène au regard des observations faites au pont de Beaucaire et la stabilité bathymétrique dans ce tronçon du fleuve soulignée par les travaux de Raccasi [M007] et les travaux de Pichard [H004].

En l'état actuel de nos connaissances, cette hypothèse nous semble être la plus pertinente.
Dans l'attente des résultats de l'étude hydrologique commandée récemment par la DREAL Auvergne Rhône-Alpes, nous retiendrons pour le reste de l'étude l'hypothèse dite « 3 ».

Tableau 37. Période de retour, débit max et intervalles de confiance retenu

Période de retour T (années)	Débit instantané max annuel (m^3/s)	Intervalle de confiance à 70 %		Intervalle de confiance à 95 %	
		borne inf.	borne sup.	borne inf.	borne sup.
1	4 100	4 000	4 300	3 800	4 400
2	6 000	5 900	6 100	5 800	6 200
5	7 500	7 300	7 700	7 100	7 800
10	8 500	8 200	8 700	7 900	8 900
15	9 000	8 700	9 300	8 300	9 500
20	9 400	9 000	9 700	8 600	9 900
25	9 700	9 300	10 000	8 900	10 300
30	9 900	9 500	10 300	9 100	10 500
50	10 600	10 100	11 000	9 600	11 300
75	11 100	10 600	11 600	10 100	11 900
100	11 500	11 000	12 000	10 400	12 300
200	12 400	11 800	12 900	11 100	13 300
250	12 700	12 000	13 200	11 400	13 700
300	12 900	12 300	13 500	11 600	13 900
400	13 300	12 600	13 900	11 900	14 300
500	13 600	12 900	14 200	12 100	14 700
1000	14 500	13 700	15 200	12 900	15 700
2000	15 400	14 500	16 100	13 600	16 700

Si chaque année est considérée comme indépendante au sens des probabilités de l'année précédente, la probabilité de dépassement sur les n prochaines années d'une crue de période de retour T_0 est (toutes choses étant supposées égales par ailleurs et notamment aucune modification du lit ou des processus hydrologiques) est :

$$P = 1-(1 - 1/T_0)^n$$

Tableau 38. Probabilité de dépassement des crues caractéristiques étudiées dans le Plan Rhône sur les n prochaines années

Débit (m^3/s)	Période de retour (ans) arrondie	Probabilité de dépassement (en %) sur les n prochaines années				
		1 an	10 ans	25 ans	50 ans	100 ans
8 500	10	10	65	93	99	100
9 500	20	5	40	72	92	99
10 500	50	2	18	40	64	87
11 500	100	1	10	22	39	63
12 500	200	1	5	12	22	39
14 160	800	0.1	1	3	6	12

Ainsi la crue exceptionnelle a 12 % de chances d'être dépassée dans les 100 prochaines années et 1 % de chance d'être dépassée sur les 10 prochaines années.

Une crue de type mai 1856 (crue de référence) a 39 % de chances d'être dépassée dans les 100 prochaines années et 5 % de chance d'être dépassée sur les 10 prochaines années.

Une crue de type décembre 2003 (crue centennale) a 63 % de chances d'être dépassée dans les 100 prochaines années et 10 % de chance d'être dépassée sur les 10 prochaines années.

Une crue de type 10500 a 87 % de chances d'être dépassée dans les 100 prochaines années et 18 % de chance d'être dépassée sur les 10 prochaines années.

Une crue de type 9500 (novembre 2002) a 99 % de chances d'être dépassée dans les 100 prochaines années et 40 % de chance d'être dépassée sur les 10 prochaines années.

1.14 MODELISATION HYDRAULIQUE DES CRUES

1.14.1 Construction et calage du modèle

Le modèle utilisée pour le calcul des lignes d'eau et le calage des ouvrages entre Beaucaire et Arles s'étend depuis l'aval du barrage de Vallabrègues jusqu'à la mer sur le Petit Rhône et à 4 km de l'embouchure sur le Grand Rhône. C'est un modèle 2D (code TELEMAC développé par EDF), qui a été développé par la $CNR_{ingénierie}$. Il a permis le calage des ouvrages entre Beaucaire et Arles [K100]. Il comporte 270 000 mailles de calculs. Ce modèle est le principal modèle développé dans le Plan Rhône, il permet de fournir l'ensemble des données nécessaires aux autres modèles. Pour définir l'impact global du programme de sécurisation, il a été, dans le cadre de prestations supplémentaires confiées à la CNRingénierie [K103], couplé au modèle du Grand Rhône [K102] qui s'étend jusqu'à l'embouchure (315 000 mailles de calcul au total). L'étendue du modèle [K103] figure ci-dessous.

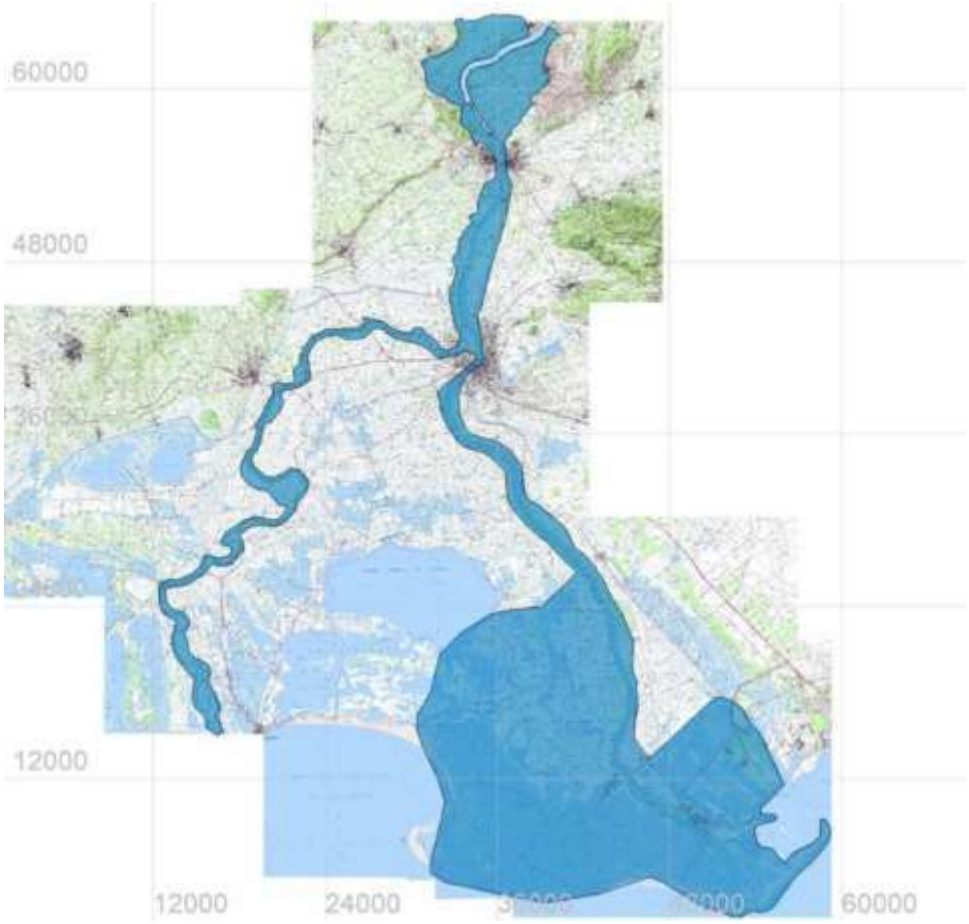


Figure 75. Etendue du modèle de l'étude de calage (source CNR [K103])

Les conditions limites amont du modèle sont :

- Débit du Vieux Rhône (barrage de Vallabrègues)
- Débit du Rhône usiné (usine hydro-électrique de Beaucaire)
- Débit du Gardon

Les conditions limites aval du modèle sont :

- Les marégrammes au Grau de la Dent (translaté au PK326 pour le Grand Rhône pour l'étude de calage)

Le modèle, calé sur la crue de décembre 2003 à partir des 9 limnigrammes de la CNR et des laisses de crues levées par la DREAL, la CNR et RFF, a une précision absolue estimée à 10 cm dans le lit mineur, 20 cm en traversée d'Arles, et 30 cm dans le lit majeur, soit l'ordre de précision des mesures (sources [K100], [K102] et [K103]).

1.14.2 Scénarios de crues étudiées

4 scénarios de crues ont été considérés initialement pour les études d'impact hydraulique.

La crue 10500 correspond à la crue occasionnant les premiers déversements sur les digues. Elle correspond également au débit enregistré à la station de Beaucaire/Tarascon lors de la crue de décembre 2003, quand la première brèche a été occasionnée dans le système.

Dans le cadre de l'impact global du programme de sécurisation, un 5ème scénario a été ajouté à la demande de l'Etat, il correspond à la crue 9500 qui a été calée sur l'hydrogramme de novembre 2002.

Tableau 39. scénarios de crues modélisées dans le programme du SYMADREM-Plan Rhône [K103]

Crues	Débit de pointe Beaucaire/Tarascon	Période de retour	Niveau marin
Crue 9500 (≅ crue de nov. 2002)	9 500 m^3/s	T ≈ 20 ans	Marégramme nov. 2002 (Max 0,95 NGF)
Crue 10500 (crue de janv. 1994 avec pointe translatée)	10 500 m^3/s	T ≈ 50 ans	Marégramme janv. 1994 (Max 0,81 NGF)
Crue 11500 (déc. 2003 sans brèche)	11 500 m^3/s ± 5 %	T ≈ 100 ans	Marégramme déc. 2003 (Max 0,98 NGF)
Crue 12500 (mai 1856 dans les conditions actuelles d'écoulement et sans brèche)	12 500 m^3/s	T ≈ 200 ans	Marégramme déc. 2003 translaté à 1,3 NGF. et concomitant avec pointe de crue
Crue 14160 scénario exceptionnelle	14 160 m^3/s	T ≈ 800 ans	Marégramme constant à 1,5 NGF

Les hypothèses concernant l'aléa marin relatif à ces crues ont été établies à partir de données du CEREGE. Dans sa thèse [ULMANN 2007] du CEREGE a estimé les périodes de retour des surcotes marines pour différentes stations du Golfe de Lyon. Elles sont les suivantes :

Tableau 40. surcote marine et période de retour (source CEREGE)

Station	Surcotes (cm NGF) durant une période d'octobre à mars pour un temps de retour de :			
	5 ans	**10 ans**	**50 ans**	**100 ans**
Port-Vendres	75	81	95	100
Sète	98	102	119	126
Grau-de-la-Dent	80	86	100	106

En sus de ces surcotes marines, la dérive tendancielle de montées des eaux a été prise en compte avec une dérive à moyen/long terme probable d'ici à 2050 comprise (au moment de l'étude de calage) d'après le CEREGE, entre 20 cm (cas de figure moyen) et 40 cm (cas de figure extrême).
En décembre 2003, les niveaux marins enregistrés aux stations du Grau de la dent (proche de l'embouchure du Grand Rhône) et du pertuis de la Fourcade (proche de l'embouchure du Petit Rhône) au moment de la pointe étaient identiques.

Dans un 1er temps, pour la réalisation de l'étude de calage précis entre Beaucaire et Arles [K100], un niveau marin constant de 1,3 m NGF a été retenu pour l'ensemble des crues à l'exception de la crue de décembre 2003, pour laquelle, le marégramme observé en décembre 2003 a été retenu. Ces hypothèses n'ont eu aucune influence sur le calage des ouvrages entre Beaucaire et Arles, compte tenu de l'absence d'impact du niveau marin sur ce tronçon du fleuve pour les fortes crues.

Cette hypothèse de niveau marin constant à 1,3 NGF s'est avérée problématique pour la modélisation de l'aléa fluvial à proximité des embouchures [K102] ; en effet, le niveau marin constant noyait l'aval et ne permettait pas de bien comprendre le comportement des crues du Rhône. En accord avec les services de l'Etat, les hypothèses suivantes ont été retenues :

- Crue 9500 : marégramme observé en novembre 2002 ;
- Crue 10500 : marégramme observé en janvier 1994 ;
- Crue 12500, marégramme de décembre 2003, translaté dans le temps et en niveau pour atteindre 1,3 NGF au moment du pic de crue ;
- Crue 14160 (crue de sûreté) : niveau marin constant à 1,5 NGF.

Le niveau marin de 1,5 m NGF du scénario de crue exceptionnelle correspond à une surcote marine de 1,1 m NGF, d'une période de retour légèrement supérieure à 100 ans avec une dérive extrême de montée des eaux, d'ici à 2050, de 40 cm.

Les hydrogrammes et marégrammes des 5 scénarios modélisés figurent ci-dessous.

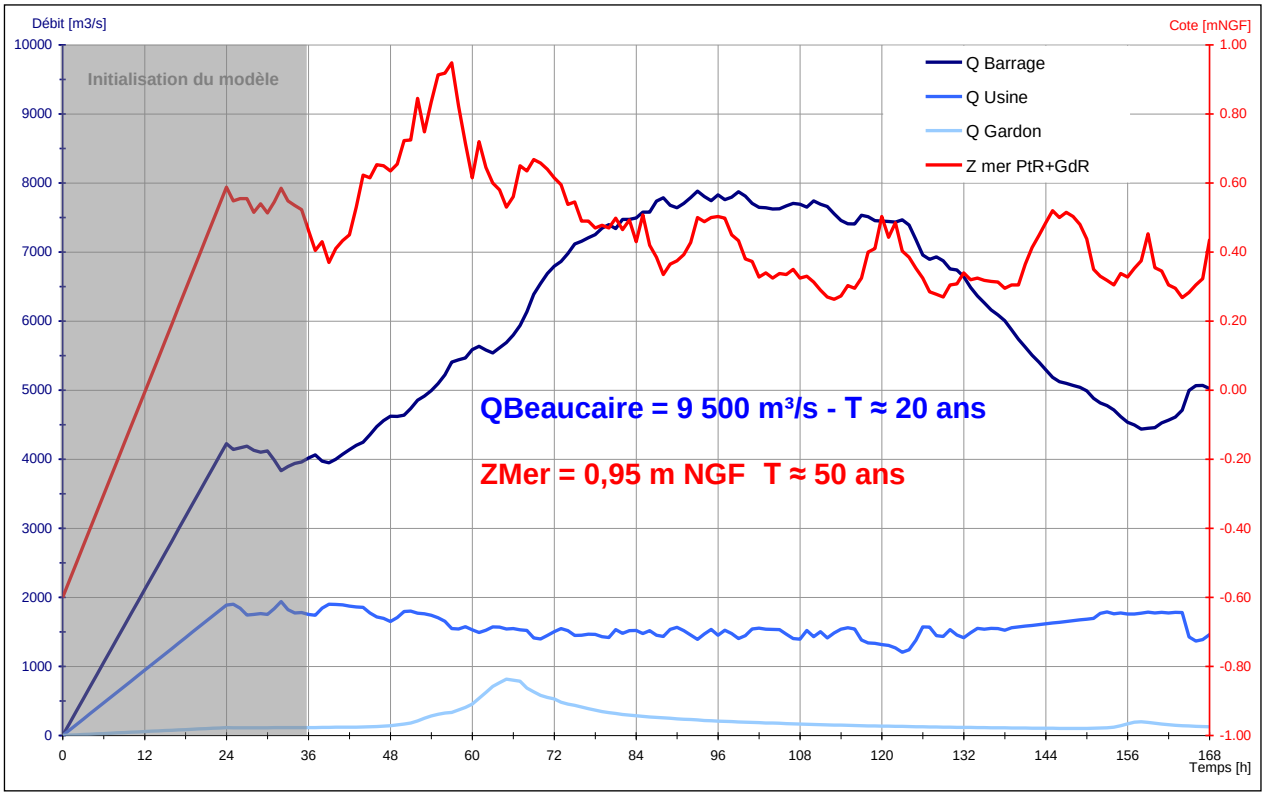


Figure 76. Hydrogramme et marégramme de la crue 9500

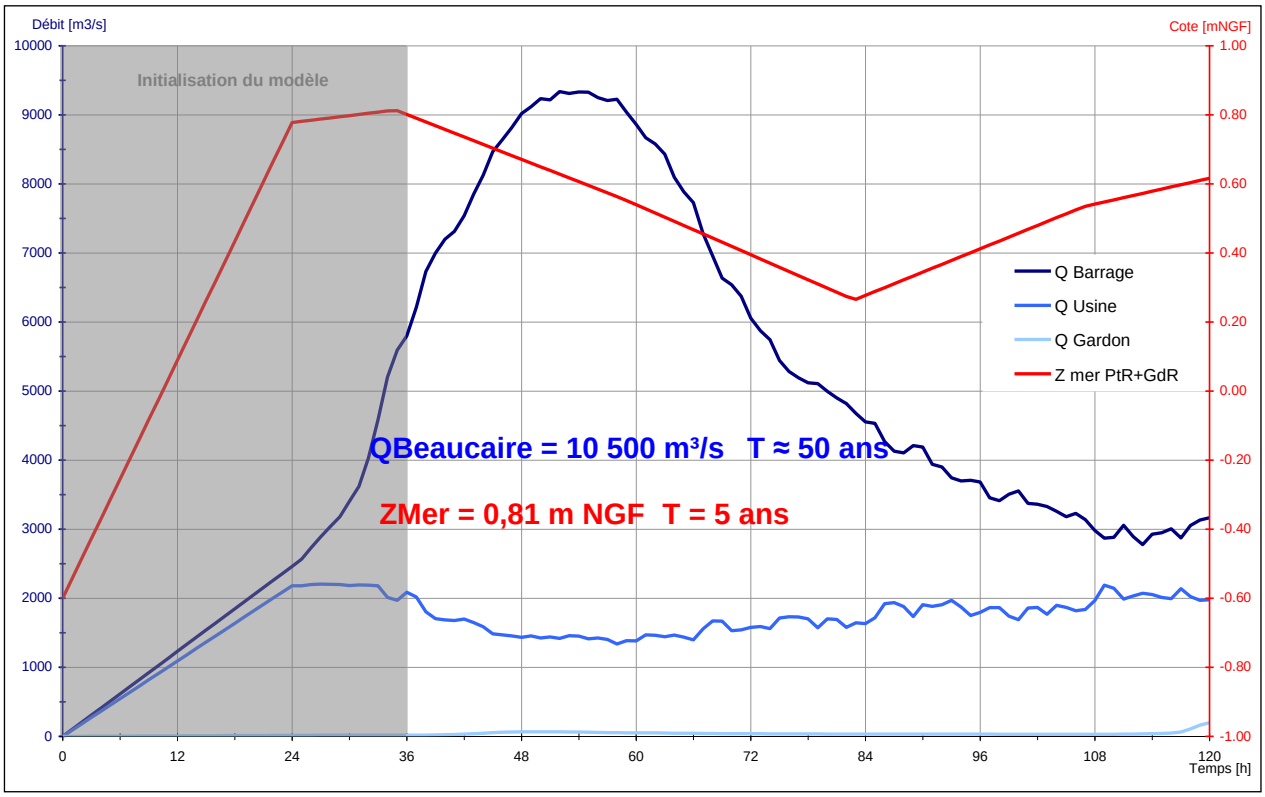


Figure 77. Hydrogramme et marégramme de la crue 10500

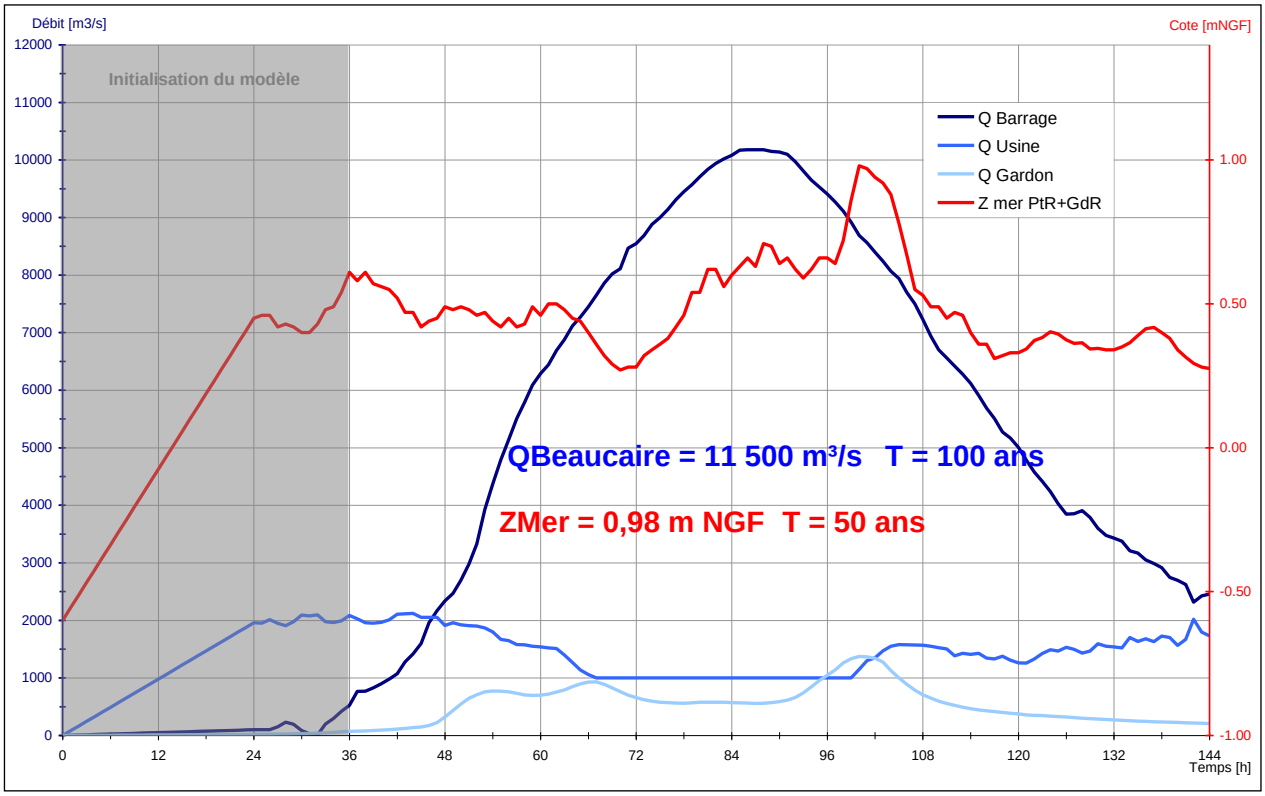


Figure 78. Hydrogramme et marégramme de la crue 11500

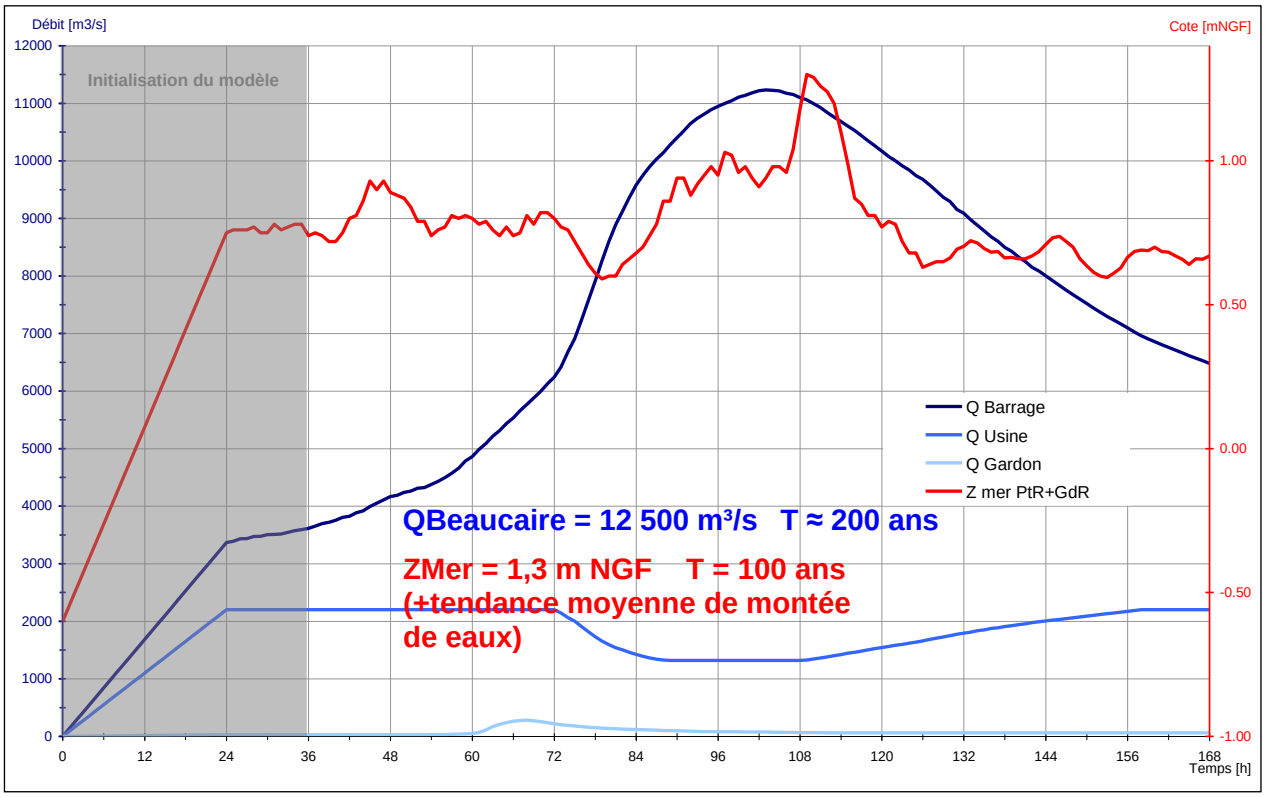


Figure 79. Hydrogramme et marégramme de la crue 12500

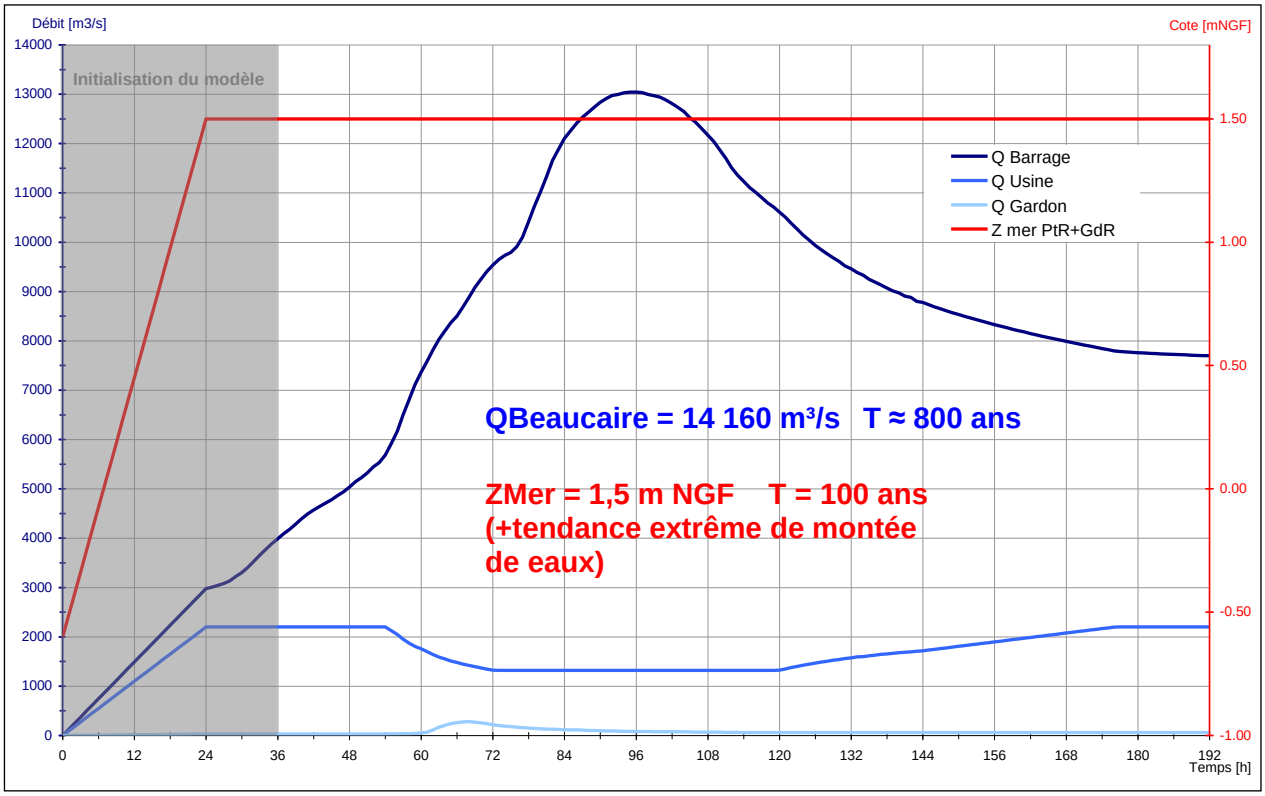


Figure 80. Hydrogramme et marégramme de la crue 14160

1.14.3 Analyse de sensibilité du modèle et incertitudes sur les niveaux modélisés

L'étude de calage précis entre Beaucaire et Arles réalisée par la CNR$_{ingénierie}$ [K100] a fait l'objet de deux analyses de sensibilité :

- une analyse de sensibilité lors de la phase de calage du modèle, qui a porté sur les paramètres suivants : débit, rugosité, bathymétrie pour définir la précision de calage du modèle.
- une analyse de sensibilité lors du calage des ouvrages, qui a porté sur les paramètres suivants : gradient de crue, niveau marin pour définir l'incertitude du modèle.

Cette analyse de sensibilité a été réalisée par bief homogène du Rhône et sur la crue de calage de décembre 2003 « En effet, l'analyse de sensibilité sur le modèle total cumulerait de l'aval vers l'amont les incertitudes liées aux différentes données d'entrée. Le fonctionnement hydraulique des biefs amont serait alors faussé par un fonctionnement hydraulique modifié par l'analyse de sensibilité sur les biefs aval, et conduirait donc à estimer la sensibilité locale au Strickler par un calcul mené dans une zone éloignée du point de fonctionnement nominal » source CNR [K100].

Le modèle Grand Rhône de l'étude de calage a été repris par la CNRingénierie dans le cadre de l'étude de renforcement de la digue de Salin de Giraud [K102]. Il a été prolongé jusqu'à l'embouchure avec la mer et a été recalé sur la crue de décembre 2003. Il est à noter que la prise en compte de la mobilité des fonds à l'embouchure a été rendue nécessaire lors de la phase de calage pour retrouver les niveaux d'eau observés en déc. 2003 en traversée de Salin

de Giraud/Port-Saint-Louis-du-Rhône. Ce modèle a également fait l'objet d'une analyse de sensibilité.
Un modèle lit endigué a également été développé sur le Petit Rhône [K101] par EGISeau pour le calage des digues du Petit Rhône. Ce modèle a également fait l'objet d'une analyse de sensibilité.

Les conclusions des différentes analyses de sensibilité du modèle figurent ci-dessous.

1.14.4 Sensibilité sur les valeurs de débit

La conférence de consensus a conclu que le débit de pointe à Beaucaire était de 11 500 m^3/s ± 5 %. Les modèles ont été testés avec un hydrogramme de crue majoré de 5 %, ce qui correspond à un débit de pointe de 12 075 m^3/s et un hydrogramme de crue minoré de 5 %, ce qui correspond à un débit de pointe de 10 925 m^3/s.

La variation de l'hydrogramme à Beaucaire/Tarascon de ± 5% a une influence sur les niveaux plus ou moins importante selon les tronçons et les conditions d'écoulement (Cf. Tableau ci-dessous).

D'une manière générale, la variation de l'hydrogramme à la station de Beaucaire/Tarascon de ± 5% engendre :

- une variation de ± 3.5% dans le Grand Rhône à Arles se traduisant par une variation de ± 20 cm sur les niveaux (une variation de ± 5% sur le débit du Grand Rhône se traduit par une variation de ± 30 cm en traversée d'Arles [K102])
- une variation de ± 17% dans le Petit Rhône à Fourques se traduisant par une variation de ± 60 cm sur les niveaux (soit ± 20 cm pour une variation de débit dans le Petit Rhône de ± 5%)

Tableau 41. Sensibilité du modèle à une variation de 5 % sur l'hydrogramme de décembre 2003 à Beaucaire/Tarascon

Modèle étude de calage	Limnigrammes observés	Sensibilité débit (cm)
modèle Rhône amont	Aval barrage de Vallabrègues	± 20 cm
modèle Rhône Beaucaire/Arles	Beaucaire/Tarascon	± 20 cm
	CNARBRL	± 15 cm
modèle Grand Rhône	Arles	± 20 cm
	Grand Boisviel	± 20 cm
modèle Petit Rhône	Fourques	± 60 cm (avant brèches)
	Saint Gilles	± 60 cm (avant brèches)
	Petite Abbaye	-20 ou +10 cm avant brèches

1.14.5 Sensibilité sur les coefficients de rugosité

L'objectif a été de traduire physiquement l'impact d'une variation sensible de coefficient de Strickler sur les lignes d'eau. On rappelle qu'une des conclusions de la conférence de

consensus [O2003 09] a été de montrer que le transport solide lors de la crue de décembre 2003 avait été intense, ce qui s'est traduit par une modification de coefficient de résistance à l'écoulement.

L'influence de la variation de ± 5 points sur le coefficient de Strickler sur les niveaux des différents modèles est résumée dans le tableau ci-dessous.
La fourchette de précision, associée à une variation du coefficient de Strickler, est d'autant plus grande que l'on s'éloigne de la condition limite aval.

Tableau 42. Sensibilité du modèle à une variation de 5 points dans le lit mineur du cours d'eau

Modèles	Limnigrammes observés	Sensibilité 5 points de rugosité (cm)
modèle Rhône amont	Aval barrage de Vallabrègues	-45 / +60 cm
Modèle Rhône Beaucaire/Arles	Beaucaire/Tarascon	± 40 cm
	CNARBRL	± 20 cm
Modèle Grand Rhône (étude Salin de Giraud)	Arles	± 40 cm
	Grand Boisviel	± 20 cm
Modèle Petit Rhône CNR	Fourques	± 20 cm (avant brèches)
	Saint Gilles	± 10 cm (avant brèches)
	Petite Abbaye	± 1 cm (avant brèches)
Modèle Petit Rhône $EGIS_{eau}$	Fourques à la Mer	0 à 40 cm (avant brèches)

1.14.6 Sensibilité sur la bathymétrie

L'objectif a été de testé les variations de niveaux entre la bathymétrie 2002 et la bathymétrie 2007.

L'influence de la variation de bathymétrie sur les niveaux des modèles Rhône amont/Rhône/Grand Rhône est synthétisée dans le tableau ci-dessous :

La reconstitution des fonds de 2002 a pour conséquence une augmentation générale des niveaux d'eau calculés. Le niveau maximal est augmenté de 19 cm à Arles.

Tableau 43. Sensibilité du modèle aux variations bathymétriques entre 2002 et 2007

Modèle étude de calage	Limnigrammes observés	Sensibilité (cm)
modèle Rhône amont	Aval barrage de Vallabrègues	2 cm
Modèle Rhône Beaucaire/Arles	Beaucaire/Tarascon	+ 3 cm
	CNARBRL	+ 3 cm
Modèle Grand Rhône	Arles	+ 19 cm
	Grand Boisviel	+ 12 cm

1.14.7 Conclusion de l'analyse de sensibilité des paramètres débit, rugosité et bathymétrie

La conclusion de la CNR sur les modèles Rhône et Grand Rhône a été que les modèles sont bien calés et représentent correctement les écoulements sur l'ensemble du secteur modélisé. La précision sur les niveaux maxima calculés est de :

- ± 10 cm en valeur absolue dans le lit mineur (calage sur les limnigrammes mesurés),
- ± 30 cm dans le lit majeur (fourchette plus lâche due à la précision moindre des laisses de crue).

La répartition Grand Rhône – Petit Rhône s'inscrit bien dans la fourchette communément admise (Petit Rhône : 11 à 13 % du débit total).

Le modèle a tendance à surestimer les niveaux calculés dans le Petit Rhône pour des débits (dans le Petit Rhône) inférieurs à 700 m^3/s, mais reproduit correctement les niveaux observés pour des débits supérieurs. Ce biais n'est pas préjudiciable pour les phases de calage au regard des débits considérés (de 10 500 à 14 000 m^3/s à Beaucaire/Tarascon, soit environ de 1 100 à 1 800 m^3/s dans le Petit Rhône).

Les coefficients de rugosité retenus pour le calage du modèle semblent particulièrement faibles, notamment :

- sur le Gardon,
- sur le Vieux Rhône de Vallabrègues,
- sur le Rhône de Beaucaire à Arles,
- sur le Grand Rhône d'Arles au seuil de Terrin,
- sur le Petit Rhône de Fourques à Saint Gilles.

Selon la conférence de consensus, la crue de décembre 2003 a été atypique, avec un transport solide intense. Les incertitudes sur les données d'entrée du modèle (hydrogramme à Beaucaire, rugosité du lit, variations bathymétriques du lit) sont telles qu'une analyse de sensibilité sur ces paramètres a été menée, afin d'évaluer les fourchettes de précision (dans les calculs de niveaux d'eau) associées.

Ces fourchettes de précision sont les suivantes :

- ± 5% sur l'hydrogramme à Beaucaire => ± 20 cm sur les niveaux calculés,
- ± 5 points de rugosité dans le lit mineur => ± 40 cm sur les niveaux calculés,
- évolution bathymétrique entre 2002 et 2007 => jusqu'à + 15 cm sur les niveaux calculés.

Elle montre la consistance hydraulique de la modélisation et valide l'utilisation du modèle pour différents scénarios de crues.

1.14.8 Influence du niveau marin sur les lignes d'eaux

Le niveau marin a, sur le Grand Rhône, un impact en crue jusqu'en traversée d'Arles et sur le Petit Rhône jusqu'à Saint Gilles. Il est à noter que cet impact décroît par paliers.

Sur le Grand Rhône, les grands paliers sont d'aval en amont :

- L'embouchure (8 derniers km),
- Resserrement en traversée de Salin de Giraud,
- Coude de Chamone (PK 315,5).

Sur le Petit Rhône, le principal palier est :

- l'aval du Bac du Sauvage, où on note l'absence de digue en rive droite,
- les digues en rive droite en aval de Sylvéréal => ces digues déversent à partir de 8 000 à 9 000 m^3/s à Tarascon), ce qui de ce fait « contrôlent » la ligne d'eau en amont.

Les deux figures ci-après, extraites de l'étude de calage, illustrent respectivement l'impact du niveau marin sur le Grand Rhône et Petit Rhône.

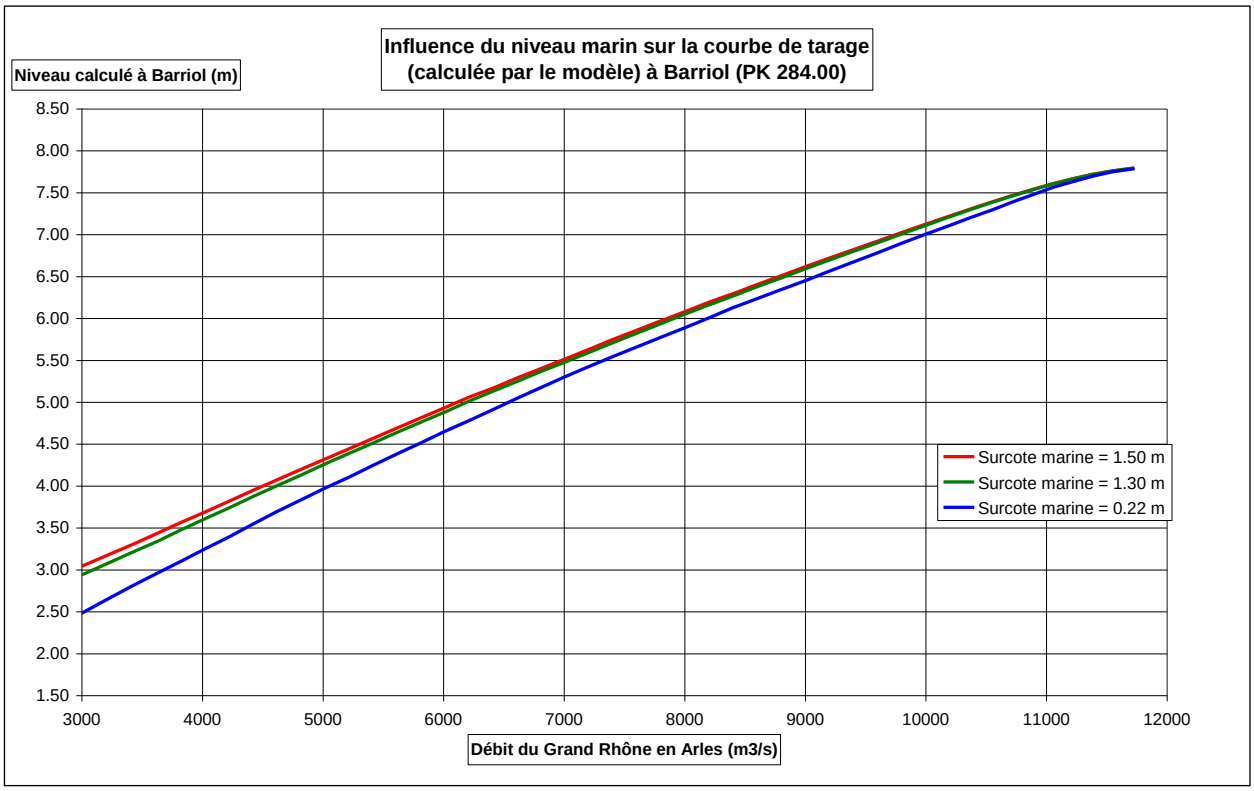


Figure 81. Influence du niveau marin sur la courbe de tarage (calculé par le modèle) à Barriol (PK284) (source CNR [K100])

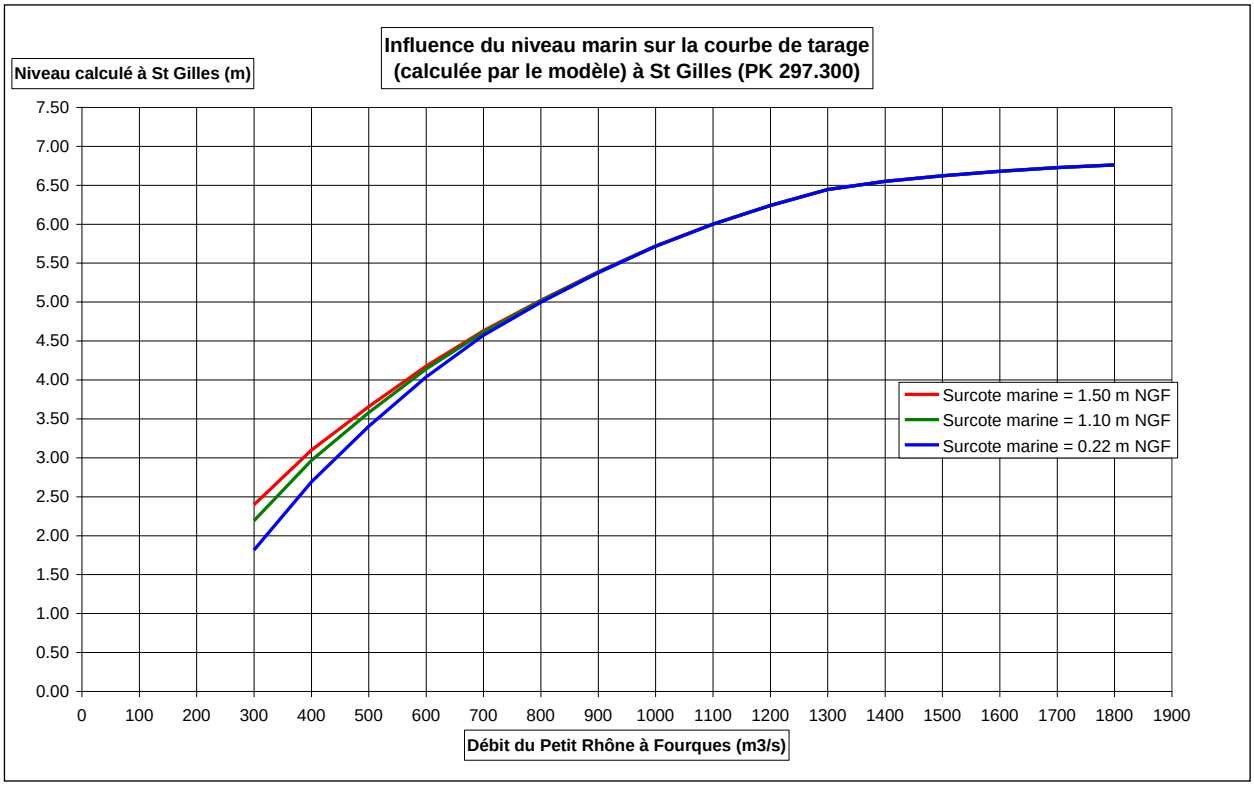


Figure 82. Influence du niveau marin sur la courbe de tarage (calculé par le modèle) à Saint Gilles (PK297,3) (source CNR [K100])

Les conclusions de cette analyse ont été que l'influence de la surcote marine sur le fonctionnement des ouvrages résistants à la surverse à réaliser en amont d'Arles (Plan Rhône) est :

- nulle sur le Petit Rhône en amont de Saint Gilles
- quasiment nulle sur le Grand Rhône en amont de Barriol

1.14.9 Influence du gradient de crue

Les niveaux maximum atteints en crue dépendent du gradient de crue de cette dernière. Pour un même débit de pointe, les niveaux maximum atteints sont d'autant plus élevés que la crue est lente.

Un test de sensibilité sur la crue de décembre 2003 (dans la configuration hydraulique de 2003) a été mené afin de comparer les niveaux maximum atteints pour les scénarios suivants :

- Hydrogramme 2003 – Marégramme 2003 (Z max = 0.98 m NGF),
- Hydrogramme 2003 deux fois plus rapide – Marégramme aval deux fois plus rapide,
- Hydrogramme 2003 deux fois plus lent – Marégramme aval deux fois plus lent.

La figure suivante au PK Rhône 284 (aval écluse d'Arles – digue de Barriol) compare les relations $Niveau_{2003}= f(Q_{2003})$ pour les trois gradients de crue considérés avec la courbe de tarage établie en régime permanent avec une surcote marine de 1.30 m NGF.

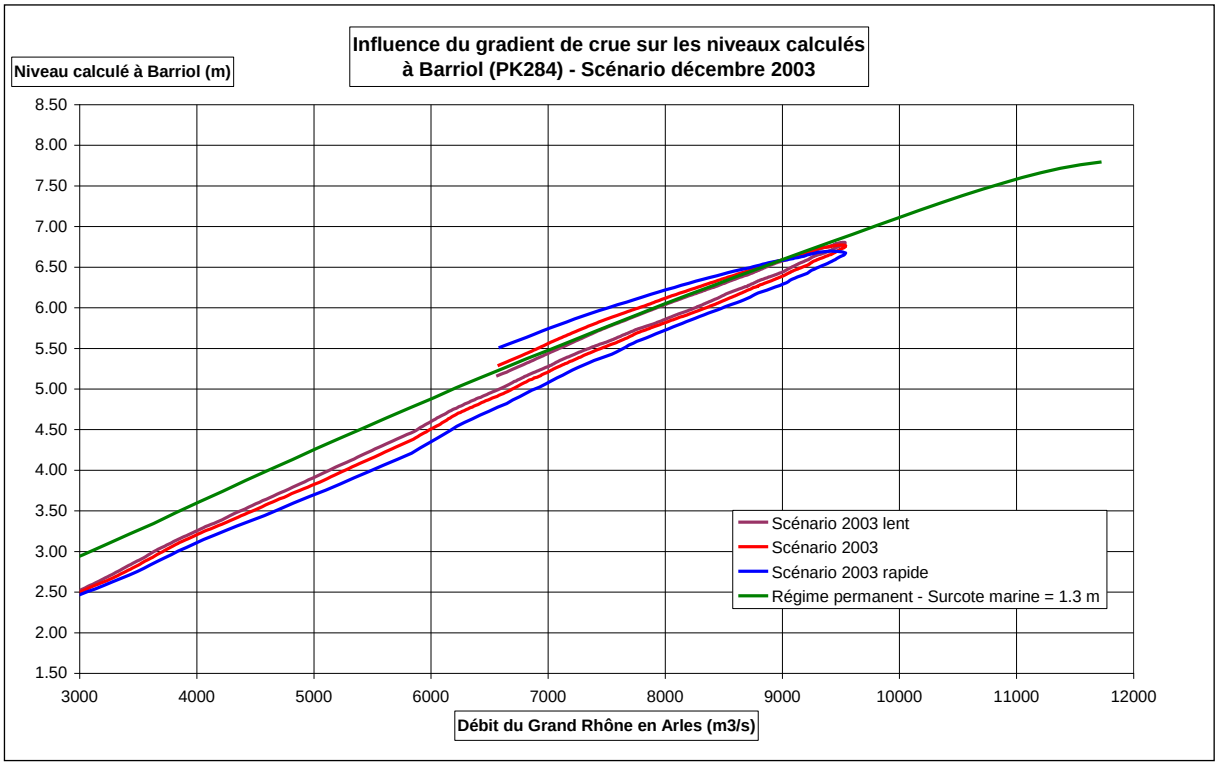


Figure 83. Influence du gradient de crue sur les niveaux maximum à Barriol (source CNR [K100])

Ces deux figures illustrent bien « la raquette hydraulique » : pour un même débit, les niveaux atteints sont supérieurs à la décrue qu'en montée de crue, cette différence étant d'autant plus importante que les gradients de crue et décrue sont élevés.

L'influence de la durée de crue sur les niveaux du Grand Rhône a été estimée à 10/15 cm par la CNR [K100]. Ainsi une crue plus longue à débit constant donne des niveaux plus hauts qu'une crue plus courte (différence entre régime permanent et régime transitoire).

L'illustration de cet effet sur le Petit Rhône est perceptible sur la crue du 17 novembre 2002, qui est une crue généralisée et celle du 13 novembre 1996, qui est une crue cévenole.

Ces deux crues ont présenté des niveaux maximums en tête de delta très proche, mais ont eu des gradients de montée totalement différents. En effet, la crue du 17 novembre 2002 a mis environ 50 heures pour passer de 7 NGF à 9,60 NGF (hauteur maximum), alors que la crue du 13 novembre 1996 est passée de 7 NGF à 9,48 NGF en seulement 15 heures.

La figure ci-dessous illustre les deux limnigrammes à la station de Beaucaire/Tarascon

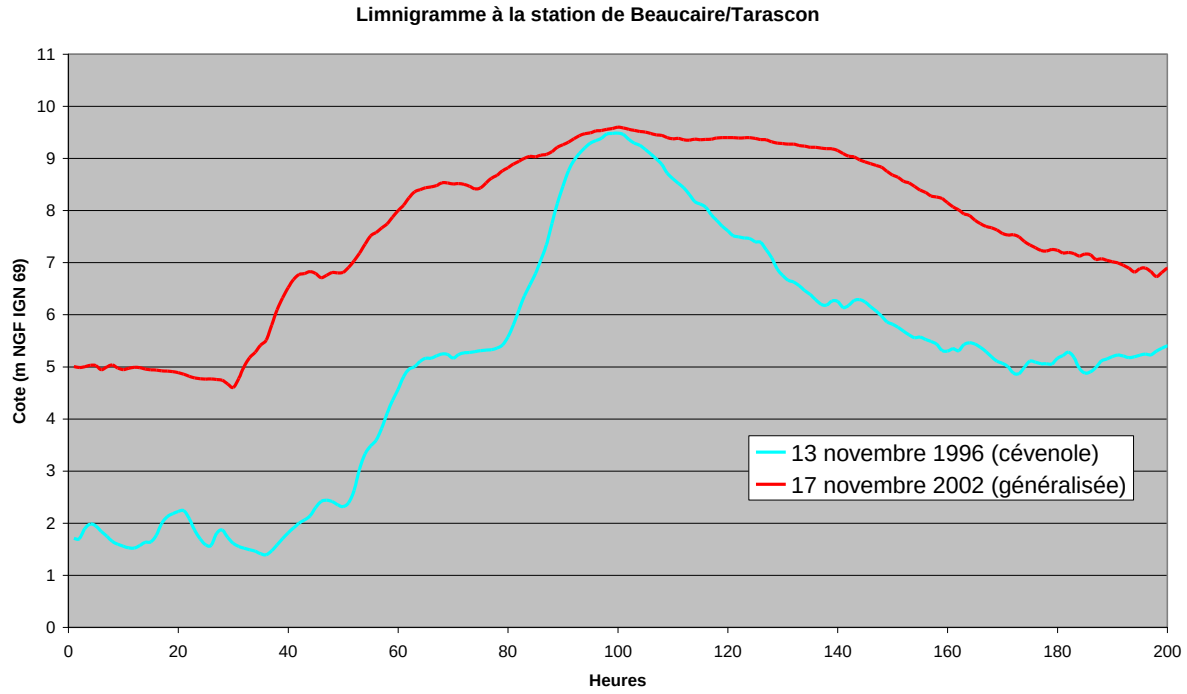


Figure 84. Comparaison des limnigrammes des crues du 17 nov. 2002 et 13 nov. 1996

Alors que les deux crues ont présenté une différence de 12 cm en tête de Delta, cette différence est passée à :

Sur le Rhône :

- Au PK 277,3 (station BRL) : 23 cm

Sur le Petit Rhône :

- Au PK 281 (Fourques) : 42 cm
- Au PK 297,3 (Saint Gilles) : 58 cm
- Au PK 323,9 (Petite Abbaye) : 35 cm

Sur le Grand Rhône :

- Au PK 282,6 (Arles) : 32 cm
- Au PK 306,5 (Boisviel) : 23 cm

La figure ci-dessous permet de mesurer cet impact sur le Rhône et Petit Rhône.

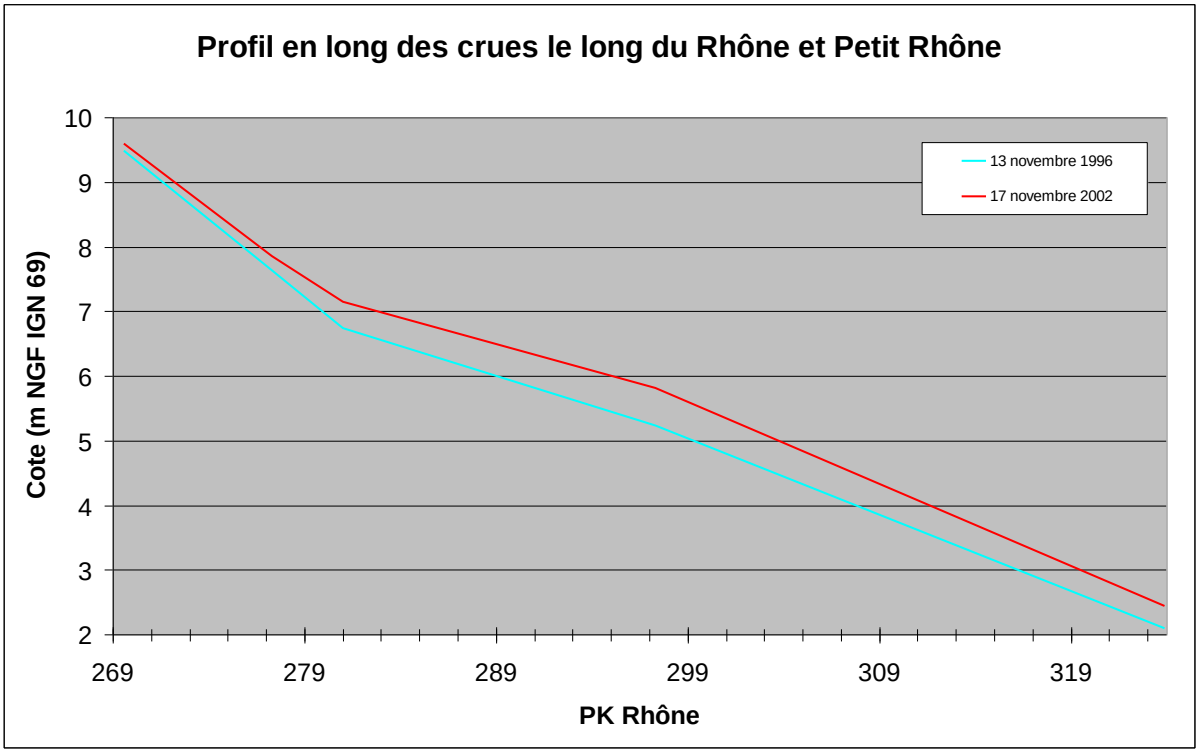


Figure 85. Comparaison des profils en long des crues du 17 nov. 2002 et 13 nov. 1996

1.14.10 Influence des brèches

D'autres paramètres perturbent la ligne d'eau. Ces sont les brèches, qui ont des impacts notables sur la ligne d'eau aval [W004].

En aval d'une brèche qui vient de se produire, le lit endigué propage un hydrogramme de crue obtenu par différence entre l'hydrogramme amont et celui qui est dérivé vers le lit majeur au travers de la brèche. La ligne d'eau est abaissée en proportion de la réduction de débit.

Vers l'amont, l'effet hydraulique est d'une toute autre nature. Une brèche, tant qu'elle débite, induit un abaissement de la ligne d'eau par effet de remous. Cela peut constituer un avantage local, par exemple en arrêtant un débordement qui aurait commencé. Mais cela est rarement déterminant sur de longues distances, car peu à peu l'effet des pertes de charges tout au long du cours d'eau « dilue » le bénéfice de l'abaissement aval.

La figure ci-dessous traduit l'impact des quatre brèches sur la ligne d'eau du Rhône et Petit Rhône en décembre 2003 :

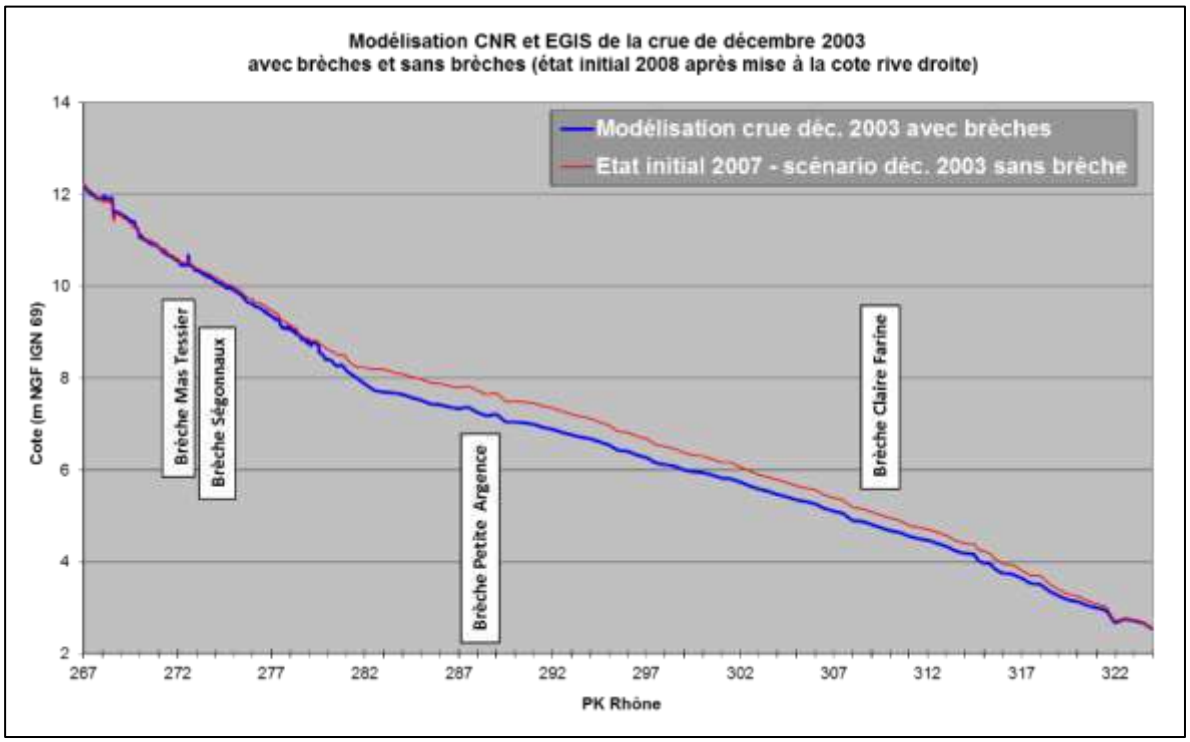


Figure 86. Lignes d'eau en décembre 2003 avec brèches et ligne d'eau de la crue de décembre 2003 dans l'état initial de 2003 avec déversement sans brèche.

Il est cependant à noter que l'état initial 2007 tient compte des travaux de mise à la cote côté Gard du PK 276 au PK 290 qui étaient prévus avant la crue de décembre 2003. Ces travaux ont néanmoins peu d'influence.

Il en ressort que les brèches sur le Petit Rhône, en se produisant une dizaine d'heures avant la pointe de crue et en dérivant 210 millions de m^3 ont eu pour effet de plafonner la ligne d'eau sur le Petit Rhône Aval, qui sans cela aurait encore plus débordé sur les digues rive droite et rive gauche. Au moment de la formation de la brèche d'Argence, le Rhône avait déjà surversé la digue au droit de Claire Farine, les digues étaient en limite de surverse, voire en début de surverse en amont d'Argence, au droit de Figarès (rive gauche) et en aval de l'écluse de Saint Gilles.

La figure ci-dessous extraite de l'étude de calage précis entre Beaucaire et Arles montre qu'en décembre 2003, la répartition Petit Rhône Grand Rhône était d'environ 12 % jusqu'à l'apparition des brèches sur le Petit Rhône qui ont créé un appel de débit sur le Petit Rhône et modifié complètement le fonctionnement du système et donc les niveaux d'eau.

Pour expliquer simplement ce phénomène : les brèches abaissent les niveaux dans le lit du fleuve mais l'impact des brèches en amont étant plus faibles, les niveaux continuent de monter compte tenu de l'augmentation du débit. Ceci a pour conséquence d'accroitre la pente hydraulique entre le Rhône et le Petit Rhône et se traduit par une augmentation de débit dans le Petit Rhône.

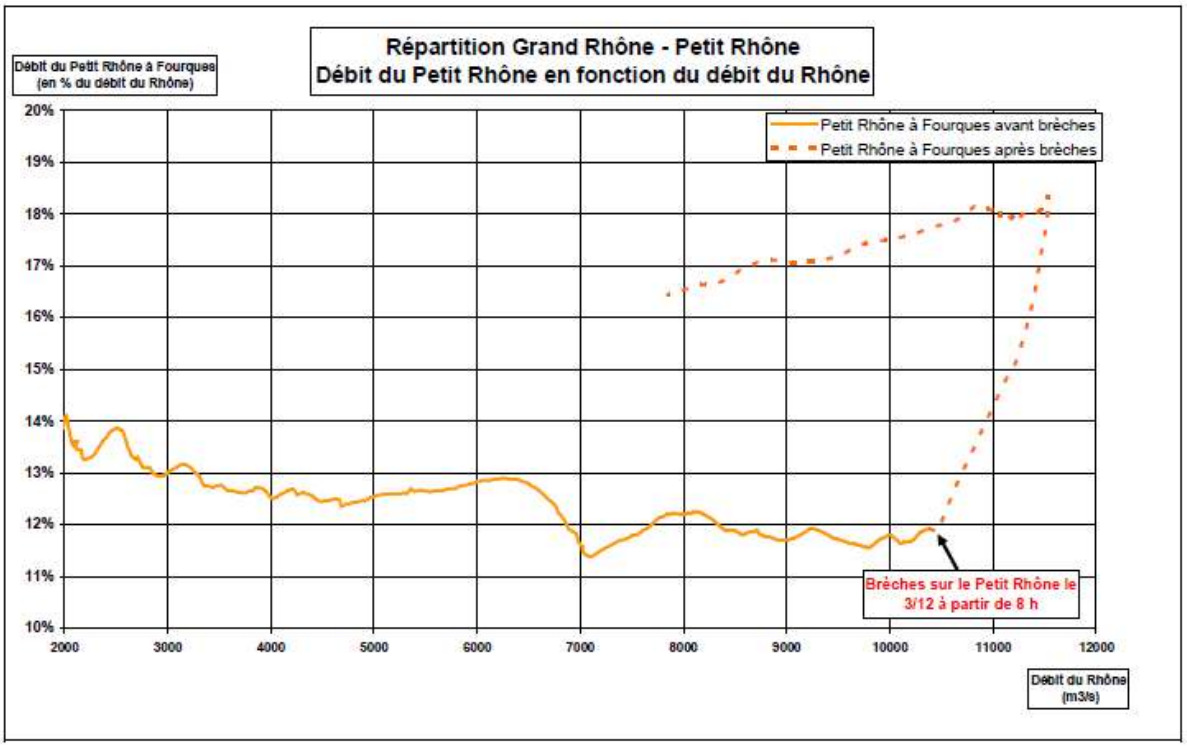


Figure 87. Répartition Grand Rhône/Petit Rhône en décembre 2003 (source CNR [K100])

1.14.11 Influence de la répartition des débits entre le Vieux Rhône et Rhône dérivé

Les scénarios modélisés ont été construits sur la base de conditions limites amont sur le débit du Gardon et les débits transitant respectivement par le barrage de Vallabrègues et l'usine hydro-électrique de Beaucaire.

L'hypothèse retenue sur le Rhône usiné est un débit de 1500 m3/s, qui correspond aux consignes de la CNR. C'est ce débit qui a été retenu pour l'ensemble des scénarios à l'exception du scénario 2003 pour lequel un débit de 1 000 m3/s a été retenu (débit estimé en 2003).

Le barrage de Vallabrègues ayant été dimensionné avec l'hypothèse sécuritaire d'un non fonctionnement de l'usine hydro-électrique, des modélisations « usine fermée » ont été réalisées sur la base de l'Etat initial. Les résultats extraits de l'étude de calage figurent dans le tableau ci-après. Compte tenu de l'impact du programme de sécurisation, on peut estimer que ces impacts seront comparables dans l'état après sécurisation des ouvrages.

Tableau 44. Impact de la fermeture de l'usine sur les niveaux

Localisation	Impact sur les niveaux (en cm)			
	Crue 10500	**Crue 11500**	**Crue 12500**	**Crue 14160**
Digue Aramon	+ 45 cm	+ 21 cm	+ 23 cm	+ 15 cm
Digue Comps	+ 45 cm	+ 23 cm	+ 24 cm	+ 17 cm
Aval Barrage	+ 47 cm	+ 25 cm	+ 29 cm	+ 23 cm
Digue Marguilliers	+ 40 cm	+ 22 cm	+ 24 cm	+ 21 cm
Plaine Boulbon	- 10 cm	- 8 cm	- 10 cm	- 12 cm
Banquette de Beaucaire	+ 6 à 7 cm	0 à - 2 cm	- 2 cm	- 2 cm
Quais de Tarascon	- 3 à - 4 cm	- 2 cm	- 2 cm	- 2 cm
Station Beaucaire/Tarascon	+ 2 cm	- 2 cm	- 2 cm	- 2 cm
Station BRL	+ 1 cm	- 2 cm	- 2 cm	- 2 cm
Station Fourques	+ 1 à 2 cm	- 2 cm	- 1 cm	- 1 cm
Station Arles	+ 1 à 2 cm	- 2 cm	- 1 cm	- 1 cm

La fermeture de l'usine a pour conséquences d'augmenter sensiblement les niveaux sur le Vieux Rhône. L'impact est très sensible au droit des digues d'Aramon, digues de Comps et digue des Marguilliers pour l'ensemble des scénarios.
L'impact est moins sensible pour la plaine de Boulbon situé sur le Rhône usiné.

L'impact est notable au droit des digues du centre-ville de Beaucaire (à la hausse) et du centre-ville de Tarascon (à la baisse) pour une crue de 10500 m3/s. Pour les crues supérieures, cet impact est quasiment nul.
Sur le Rhône en aval de la station de Beaucaire/Tarascon, cet impact est quasiment nul pour l'ensemble des crues étudiées.

1.15 COMPARAISON ENTRE NIVEAUX MODELISES ET NIVEAUX OBSERVES

La figure ci-dessous illustre la superposition de la courbe de tarage de la station de Beaucaire/Tarascon, l'enveloppe de 5 % correspondant à l'incertitude donnée par la conférence de consensus sur le débit de pointe de la crue de déc. 2003 et les niveaux calculés par la CNR dans le cadre de l'étude de calage.

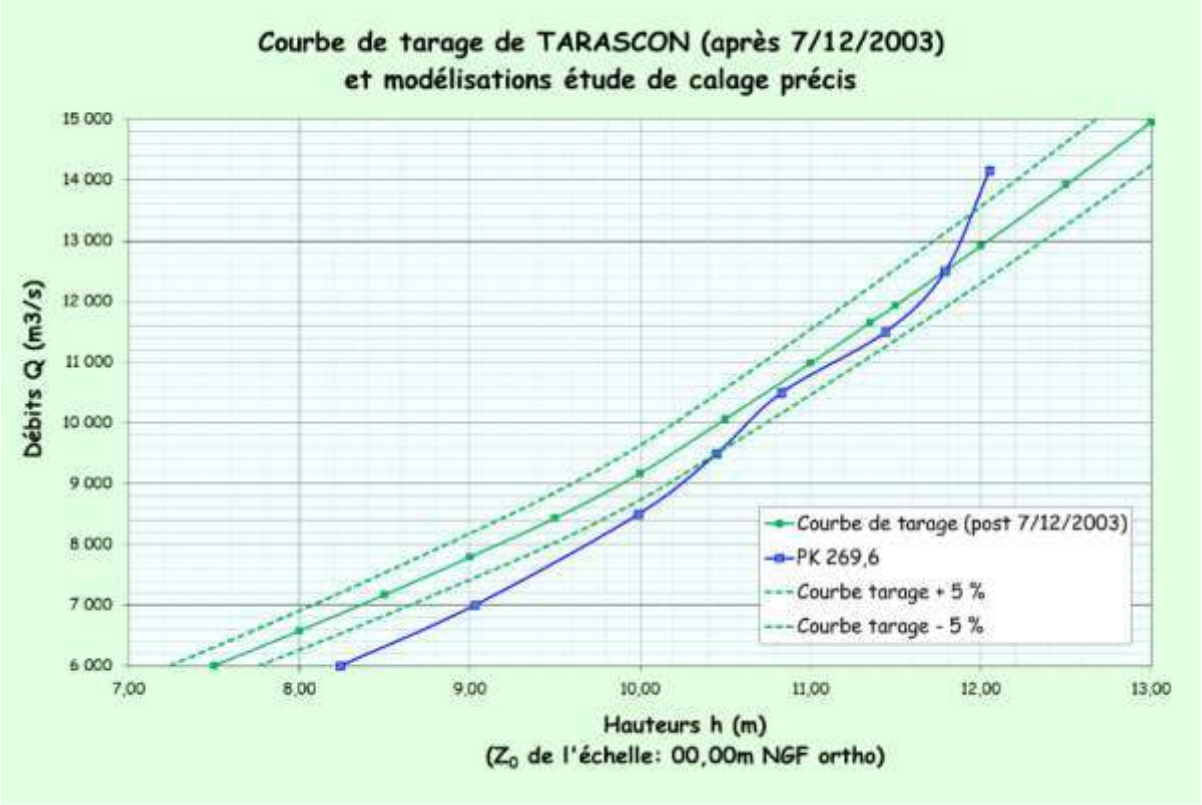


Figure 88. Courbe de tarage et niveaux modélisés

On constate que les niveaux modélisés correspondant aux crues comprises entre 9 500 m^3/s ($T \cong 20$ ans) et 12 500 m^3/s ($T \cong 200$ ans) sont contenus dans l'enveloppe de 5 %. Le modèle de l'étude de calage a été calé uniquement sur la crue de décembre 2003, l'écart pour les petits débits peut donc s'expliquer par des choix de coefficients de Strickler légèrement trop faibles pour le lit mineur. L'écart pour la crue exceptionnelle s'explique très aisément par le fait que la courbe de tarage a été extrapolée sur les mesures de débits passées et ne tient pas compte des déversements entre Beaucaire et Arles pour les crues supérieures à 11 500 m3/s, qui tendent à plafonner les niveaux.

Les figures ci-après donnent en fonction du débit à Beaucaire/Tarascon les niveaux observés aux principales stations limnimétriques et les niveaux modélisés dans le cadre de l'étude de calage.

Au droit du Pont de Beaucaire, pour les débits compris entre 9 500 et 12 500 m^3/s, l'écart est inférieur à 20 cm ce qui confirme l'incertitude de 20 cm donnée par la CNR sur le calcul des niveaux. Pour les débits inférieurs à 9 500 m^3/s, l'écart tend à croitre pour atteindre 60 cm.
Pour toute la gamme de débits, les niveaux modélisés, qui sont ceux pris en compte dans l'analyse de risques sont supérieurs aux niveaux observés lors des crues passées, ce qui est sécuritaire.

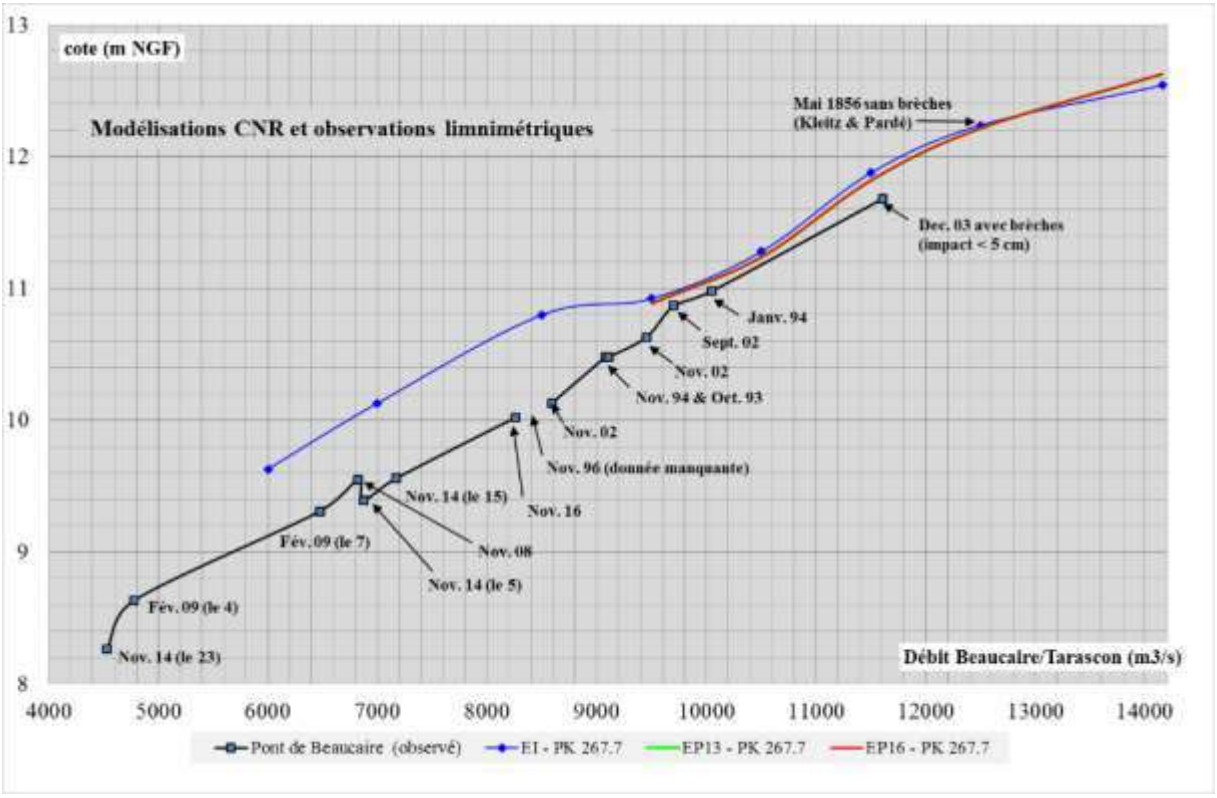


Figure 89. Pont de Beaucaire (267,7) – niveaux observés et niveaux modélisés

Au droit de la station de Beaucaire/Tarascon, pour les débits compris entre 9 500 et 12 500 m^3/s, l'écart est également inférieur à 20 cm. Pour les débits inférieurs à 9 500 m^3/s, l'écart tend à croitre pour atteindre 50 cm.

Pour toute la gamme de débits, les niveaux modélisés, qui sont ceux pris en compte dans l'analyse de risques sont supérieurs aux niveaux observés lors des crues passées, ce qui est sécuritaire.

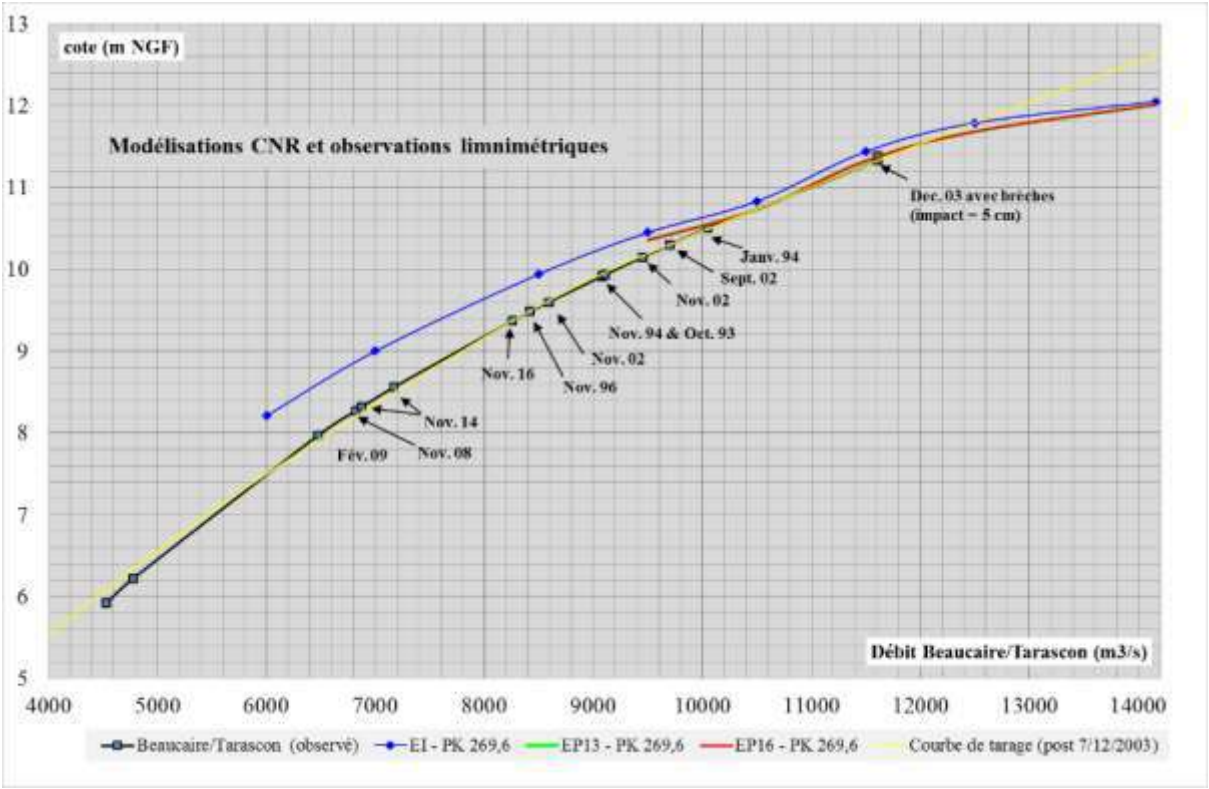


Figure 90. Station de Beaucaire/Tarascon (269.6) – niveaux observés et niveaux modélisés

Au droit des trois stations du Petit Rhône, respectivement Fourques, Saint-Gilles et Petite-Abbaye, les écarts sont plus disparates mais s'expliquent soit par la formation de brèches, soit la durée de crue, soit les incertitudes sur les débits qui sont relativement importantes sur le Petit Rhône (Cf. chapitres précédents)

Pour toute la gamme de débits considérés, les niveaux modélisés, qui sont ceux pris en compte dans l'analyse de risques sont supérieurs aux niveaux observés lors des crues passées, à l'exception de la gamme 8500-9500 pour la station de Fourques, la crue de 8500 pour la station de Saint-Gilles et la crue de 9500 pour Petite Abbaye, où les niveaux observés sont plus élevés que les niveaux modélisés.

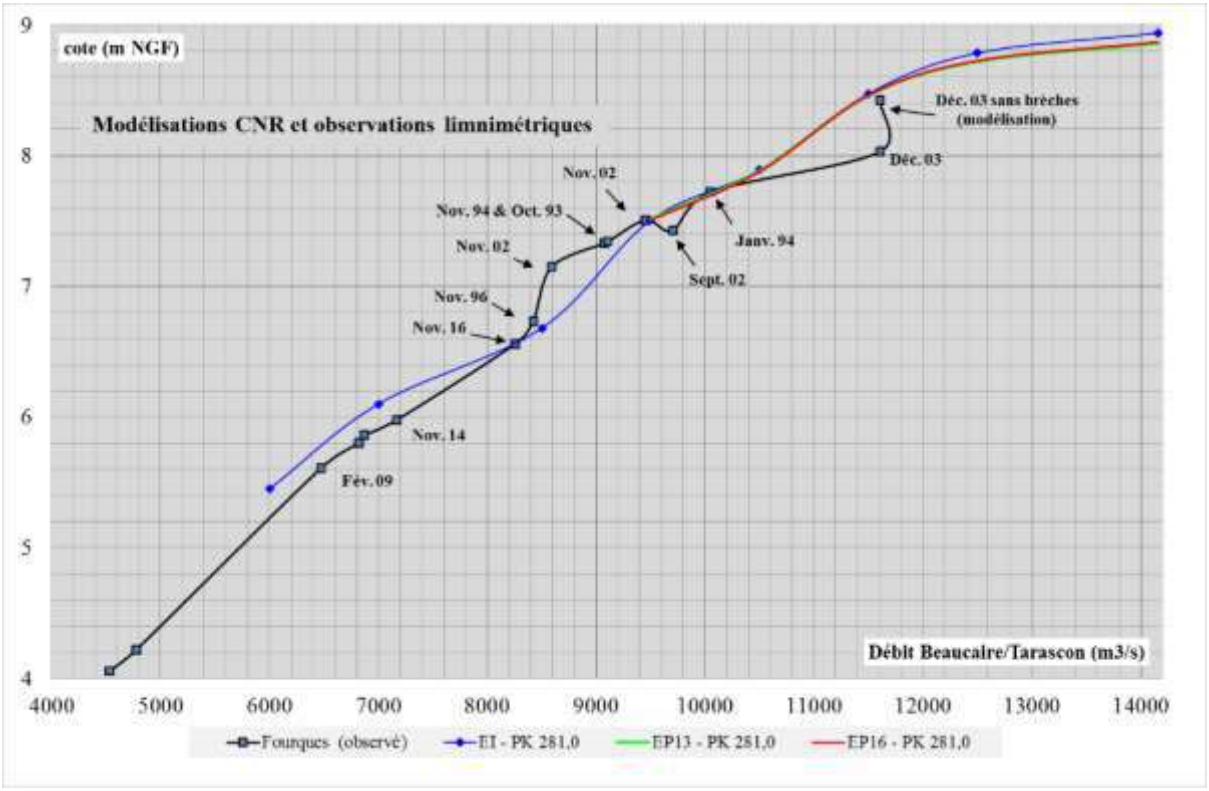


Figure 91. Station de Fourques (281) – niveaux observés et niveaux modélisés

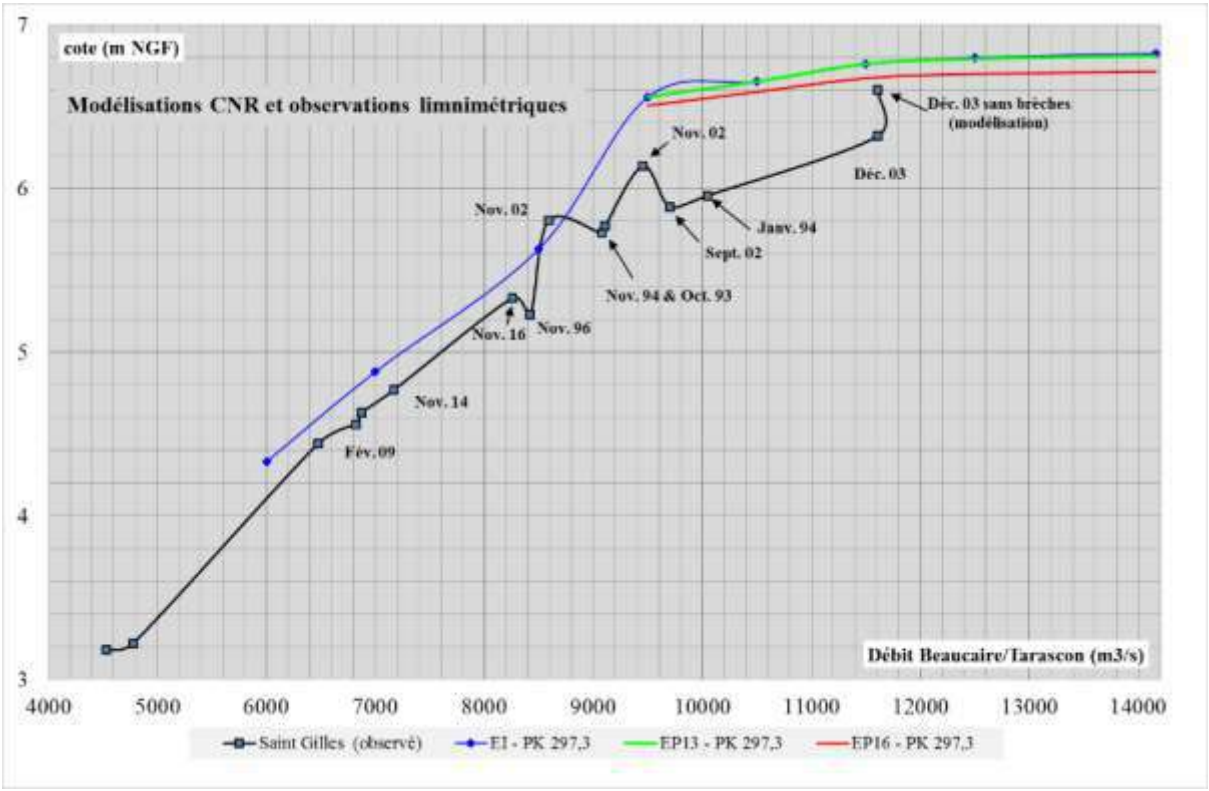


Figure 92. Station de Saint-Gilles (297.3) – niveaux observés et niveaux modélisés

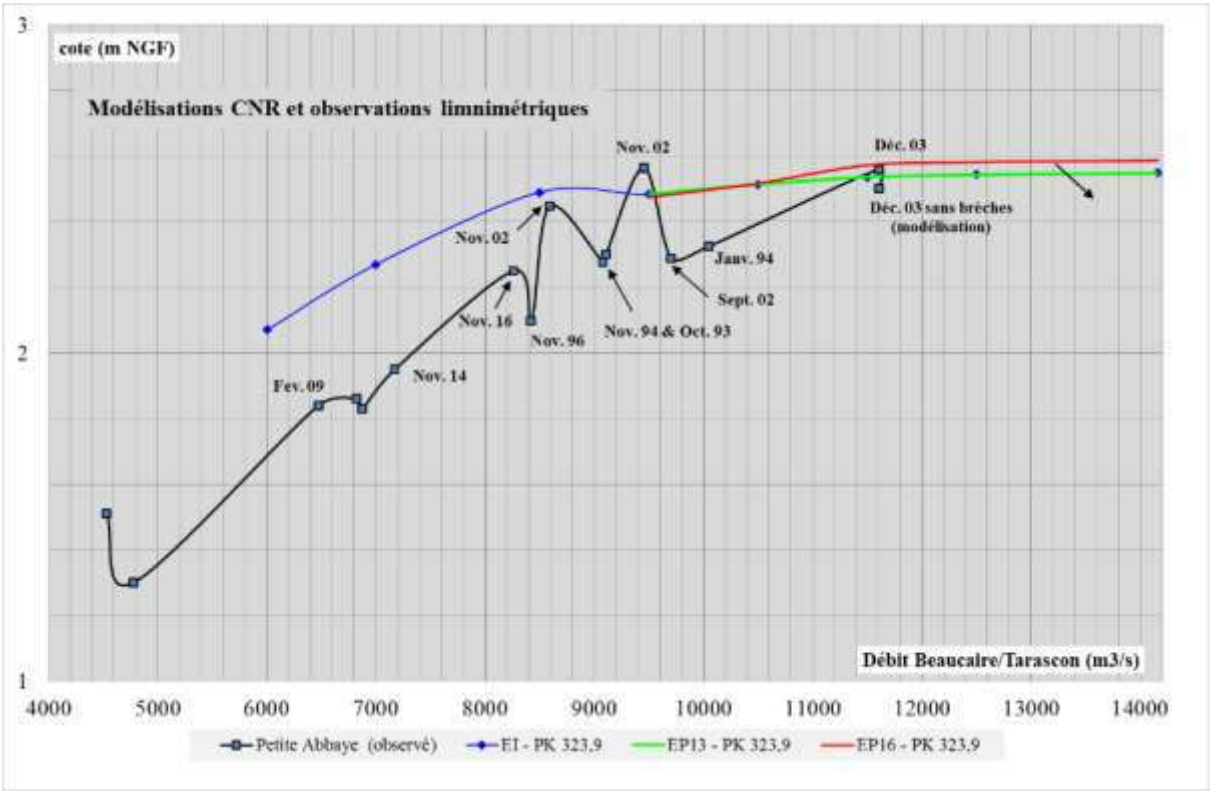


Figure 93. Station de Petite Abbaye (323,9) – niveaux observés et niveaux modélisés

Sur le Grand Rhône au droit de la station d'Arles, pour les débits inférieurs à 11 000 m^3/s, les niveaux observés sont supérieurs aux niveaux modélisés avec un écart qui reste inférieur à 20 cm, précision annoncée par la CNR.

Au droit de la station de Grand Bois Viel, pour les débits supérieurs ou égaux à 9500 m^3/s, les niveaux modélisés sont supérieurs ou égaux aux niveaux observés. Pour les débits inférieurs à 9500 m^3/s, c'est l'inverse avec des écarts qui n'excèdent pas 20 cm.

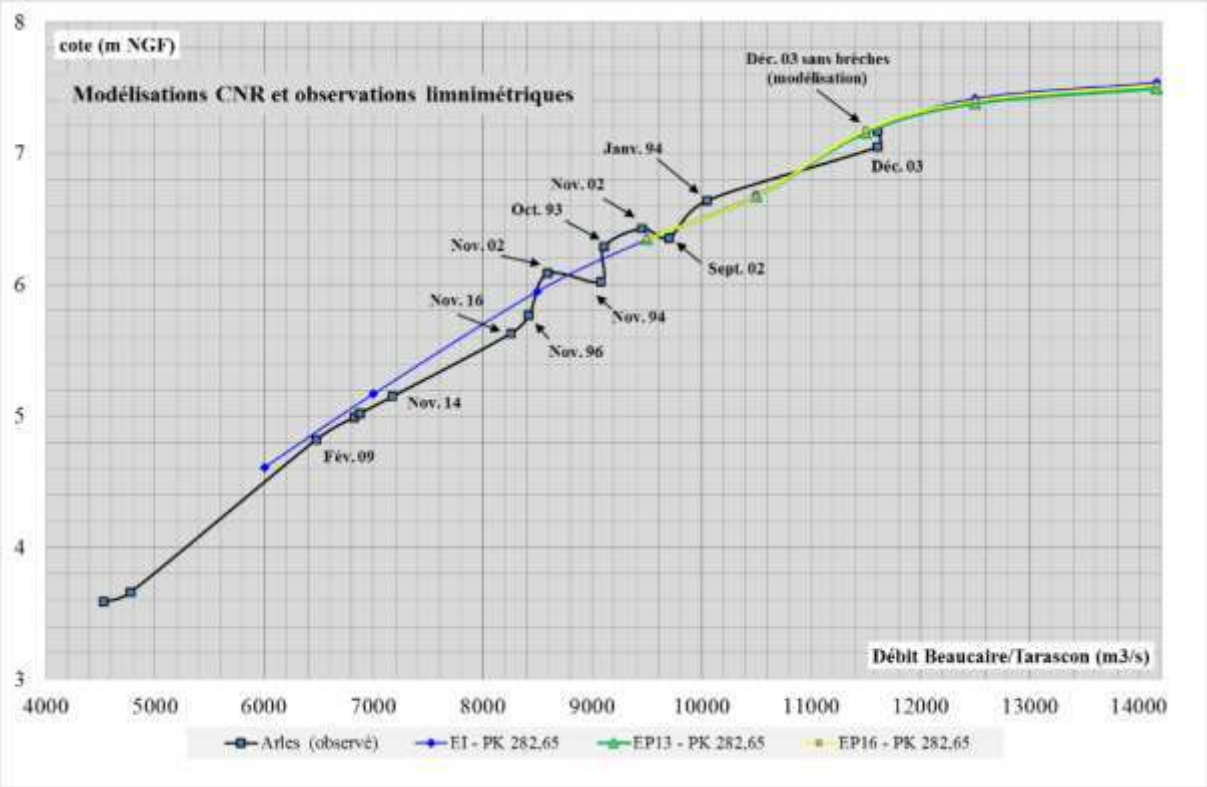


Figure 94. Station d'Arles (282,6) – niveaux observés et niveaux modélisés

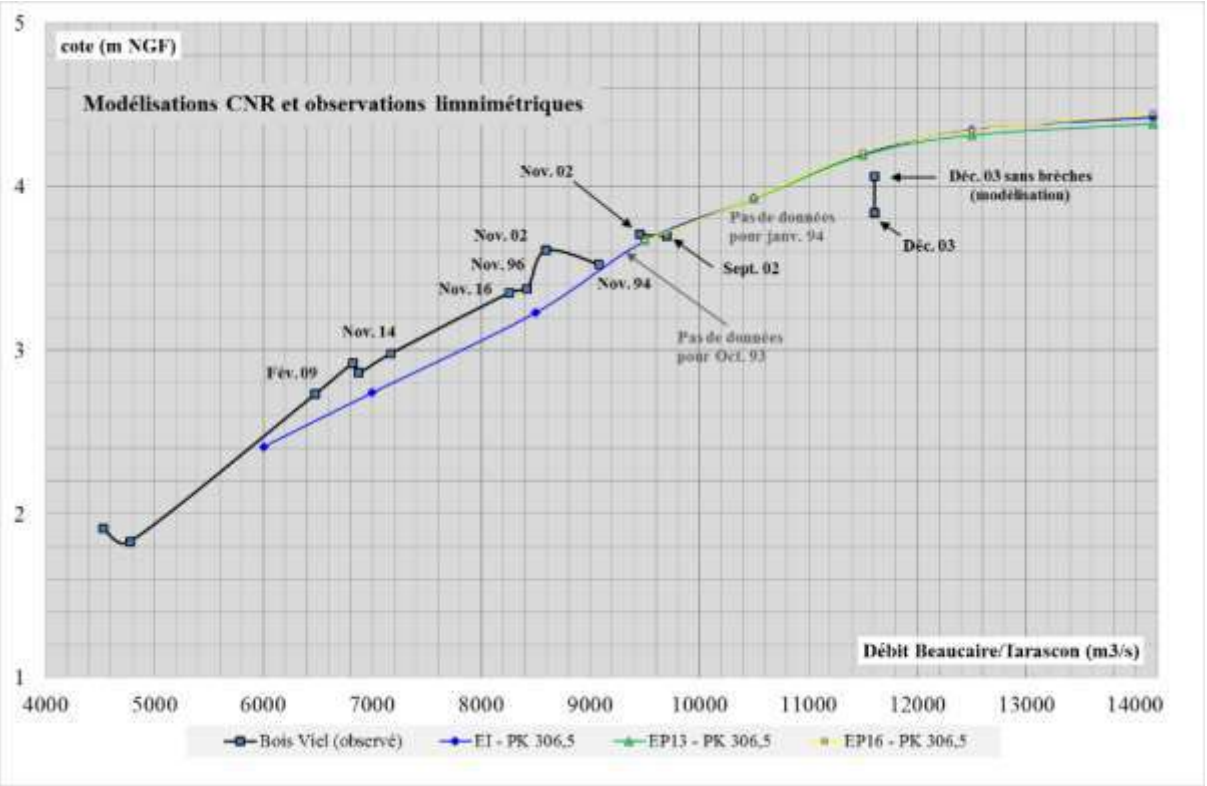


Figure 95. Station Grand Bois Viel (306,5) – niveaux observés et niveaux modélisés

2 GEOMORPHOLOGIE ET MORPHODYNAMIQUE

2.1 GEOMORPHOLOGIE DU DELTA - BEAUCAIRE A LA DIFFLUENCE

A l'aval du défilé de Beaucaire-Tarascon, les bordures de la plaine alluviale sont formées par les chaînons sud du massif des Alpilles à l'Est, les nappes alluviales du Pléistocène ancien (Costières du Gard) à l'Ouest ; elles s'écartent rapidement, amorçant le grand triangle deltaïque. La contrainte structurale s'efface donc et ne réapparait que ponctuellement dans la traversée d'Arles (pointement rocheux de l'Hauture).

La plaine holocène s'est édifiée sur une nappe caillouteuse pléistocène, formée de galets de quelques centimètres à quelques décimètres, plus ou moins cimentés par une matrice sablo-argileuse. Son toit plonge avec une pente de 1 % vers un littoral fossile situé vers – 120 m NGF. Il est à - 70 m NGF au droit des Saintes-Maries-de-la-Mer.

Au cours de l'Holocène, le Rhône a colmaté progressivement cette forme en creux, en ajustant son profil en long à la remontée holocène du niveau marin et à la progradation vers le sud de son embouchure. Cette évolution induit un affaiblissement de la pente de la vallée et du thalweg (0,03 % actuellement), qui favorise une tendance structurelle à l'accumulation sédimentaire. A partir de Beaucaire/Tarascon, les alluvions holocènes sont donc superposées aux dépôts caillouteux de la dernière période froide, et non plus emboîtés en contrebas.

Dans le cadre sa thèse, RACCASI [M007] a précisé la topographie du toit de la nappe pléistocène, qui figure ci-après.

Plusieurs secteurs d'affleurement du toit du cailloutis pléistocène dans le chenal actuel sont ainsi mis en évidence : sur le Rhône entre Beaucaire et le PK 275, puis sur la partie amont du Grand Rhône. Sur le tronçon de Beaucaire à la diffluence, le plongement du toit de la nappe de galets en aval du PK275 correspond à une limite sensible de la morphologie fluviale :

Ces différences morphologiques de part et d'autres du PK 275 coïncident avec la rupture de pente du toit de la nappe pléistocène.

En amont du PK 275, la plaine présente les indices de divagations historiques du chenal en rive gauche. Ces divagations n'affectent pas la partie occidentale de la plaine alluviale ; où domine un alluvionnement par exhaussement. Le chenal du Rhône semble être fixé sur sa position actuelle au moins depuis le Petit Age Glaciaire, où il prend un faciès en tresse, marqué par un fort exhaussement vertical, qui construit une topographie en « toit » de la plaine alluviale.

En aval du PK 275, la position du chenal semble plus stable au cours de l'holocène. Son exhaussement aboutit à l'apparition d'une plaine d'inondation « en toit » dans laquelle les inondations se propagent de plus en plus loin depuis 6000 ans. La plaine moderne, achevée au cours du Petit Age Glaciaire, comprend un bourrelet alluvial large et haut et une plaine d'inondation en « gouttière ».

Au sein du bourrelet alluvial, le lit mineur du Rhône est caractérisé au cours des derniers siècles et au moins jusqu'en 1876, par un style en tresses, à bancs de galets et îles mobiles. La mobilité latérale y est cependant réduite par le bourrelet limoneux, édifié par les crues.

A partir des années 1880, cette mobilité est fortement réduite par l'aménagement des casiers dit « Girardons »

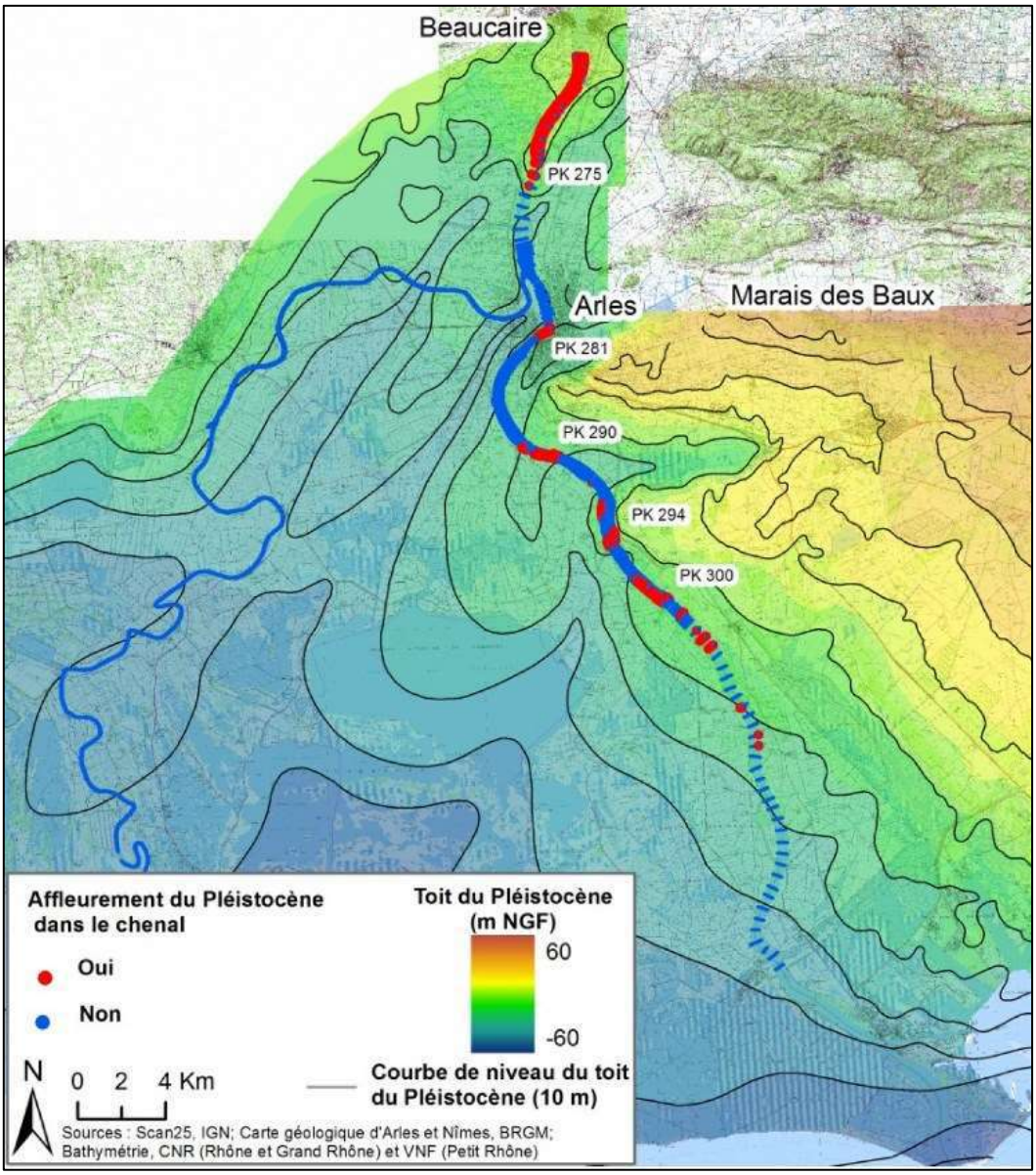


Figure 96. Toit du pléistocène et secteur d'affleurement de la couche de cailloutis dans le chenal du Rhône, construit à partir des cartes géologiques (Thèse Raccasi [M007])

2.2 GEOMORPHOLOGIE DU DELTA - DIFFLUENCE AUX EMBOUCHURES

La plaine actuelle correspond au sommet d'une accumulation deltaïque, formant un prisme sédimentaire épais de plus de 70 m au Sud. Les dépôts, à faciès fluviatiles (alluvions du Rhône), saumâtres (lagunes salées) ou littoraux (cordons sableux) s'organisent de façon complexe, et reposent à leur base sur une nappe alluviale pléistocène caillouteuse. Les apports du fleuve ont permis une avancée des terres émergées, progradantes depuis environ 7000 ans à partir d'un maximum transgressif situé au nord de l'Etang du Vaccarès : les cordons littoraux successifs sont matérialisés par des dépôts sableux coquilliers, formant des points hauts et alignés globalement Est-Ouest au centre du delta, Sud-Est/Nord-Ouest en Petite Camargue (Vella et al., 2003).

Les deux figures (Fassetta 2004), illustrent respectivement les étapes de l'édification holocène du Delta du Rhône et l'évolution paléographique du delta du Rhône au cours de l'holocène récent.

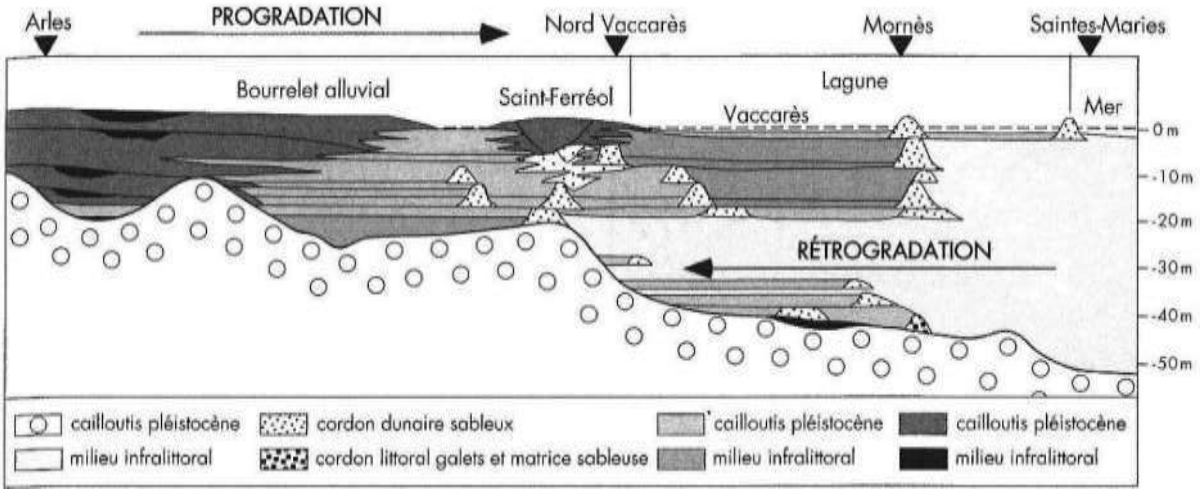


Figure 97. étapes de l'édification holocène du Delta du Rhône

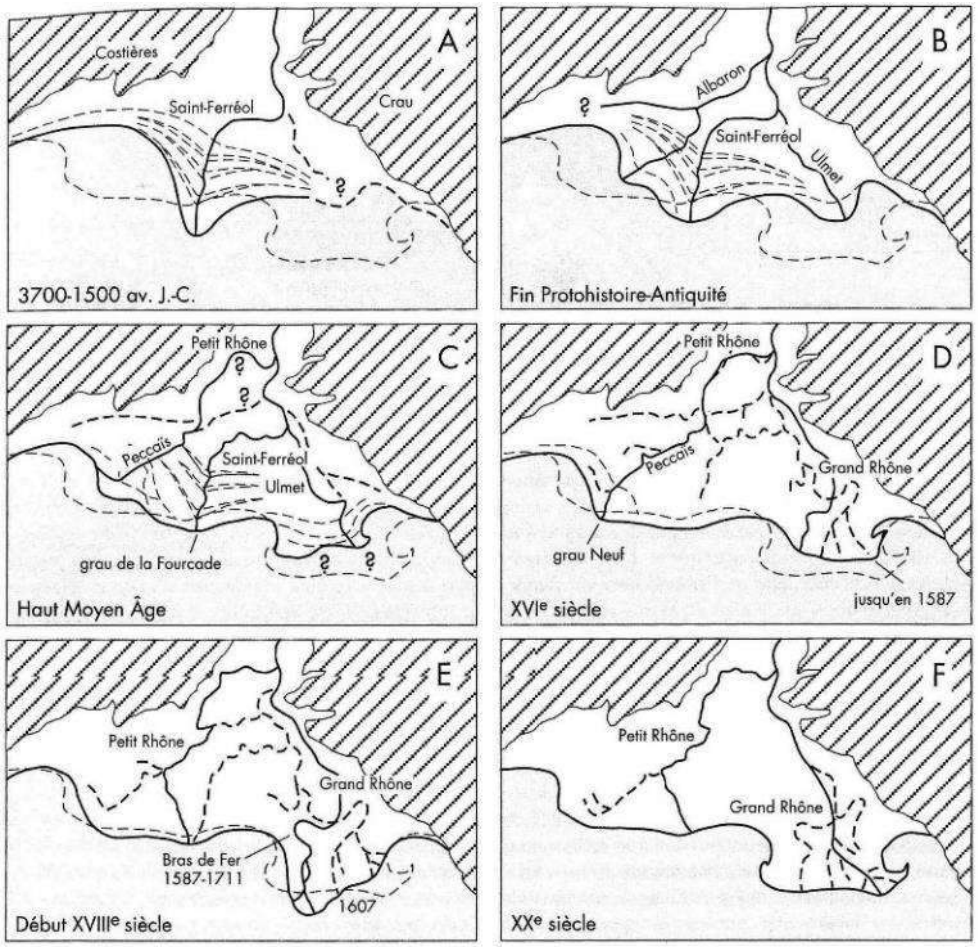


Figure 98. l'évolution paléographique du delta du Rhône au cours de l'holocène récent

Le fleuve a été divisé, selon les périodes, en plusieurs bras, dont le tracé et les embouchures se sont déplacés au cours du temps. La diffluence, dans le secteur d'Arles, est conditionnée par la présence d'un « haut fond » du substrat pléistocène, mais sa position est mobile au cours de l'Holocène. Les chenaux fluviaux successifs, abandonnés par défluviations, sont encore visibles en surface : les plus anciens (entre 6500 et 2000 BC) sont situés à l'Ouest : Rhônes d'Albaron, des Torradons, de Saint-Ferréol ; les plus récents sont situés au centre et à l'Est du delta : Rhône d'Ulmet (romain à médiéval), du Grand Passon (médiéval), du Bras de Fer (1586-1711), Grand Rhône (depuis 1711). Entre le début du XI^{ème} siècle et la fin du XVème siècle, les Rhônes de Saint-Ferréol et d'Ulmet sont progressivement colmatés, avant d'être artificiellement coupés du Grand Rhône vers 1440 (Fassetta, 2004). Quelques bras secondaires médiévaux ont fonctionné en Petite Camargue, où l'aval du Petit Rhône actuel a été tardivement privilégié par la fermeture artificielle du Rhône de Peccais en 1552. Ces bras ont édifié des bourrelets alluviaux, constitués de sables limoneux, bien drainés naturellement, qui dominent la plaine inondable marécageuse.

Le chenal du Grand Rhône n'est établi sur sa position actuelle à l'aval du seuil de Terrin (qui correspond à une remontée du substrat dur pleistocène) que depuis 1711. La présence d'îlots sableux mobiles jusqu'au milieu du XIXème siècle, traduit encore l'existence d'un style tressé Le chenal est bordé par des bourrelets alluviaux épais, comparables à ceux du palier d'Arles. Son embouchure, divisée en 3 exutoires, est caractérisée par une rapide propagation entre le XVIII^{ème} et la fin du XIX^{ème} siècle (jusqu'à 80 m/an, Maillet, 2005). Les bras

occidental (Piémanson) et central (Roustan) sont barrés et le bras de Pégoulier est endigué en 1850, avant que ne soit privilégiée définitivement l'embouchure de Roustan en 1895.

Le Petit Rhône est caractérisé par un chenal unique, à tracé sinueux en méandres. Cette configuration est sans doute associée à une charge solide peu abondante et fine et à un profil en long très affaibli par la longueur du bras (60 km). Les levées de berges sont étroites et peu élevées. Elles sont –et ont été- fréquemment recoupées par des brèches, prolongées par des cônes d'épandages sableux dans la plaine alluviale.

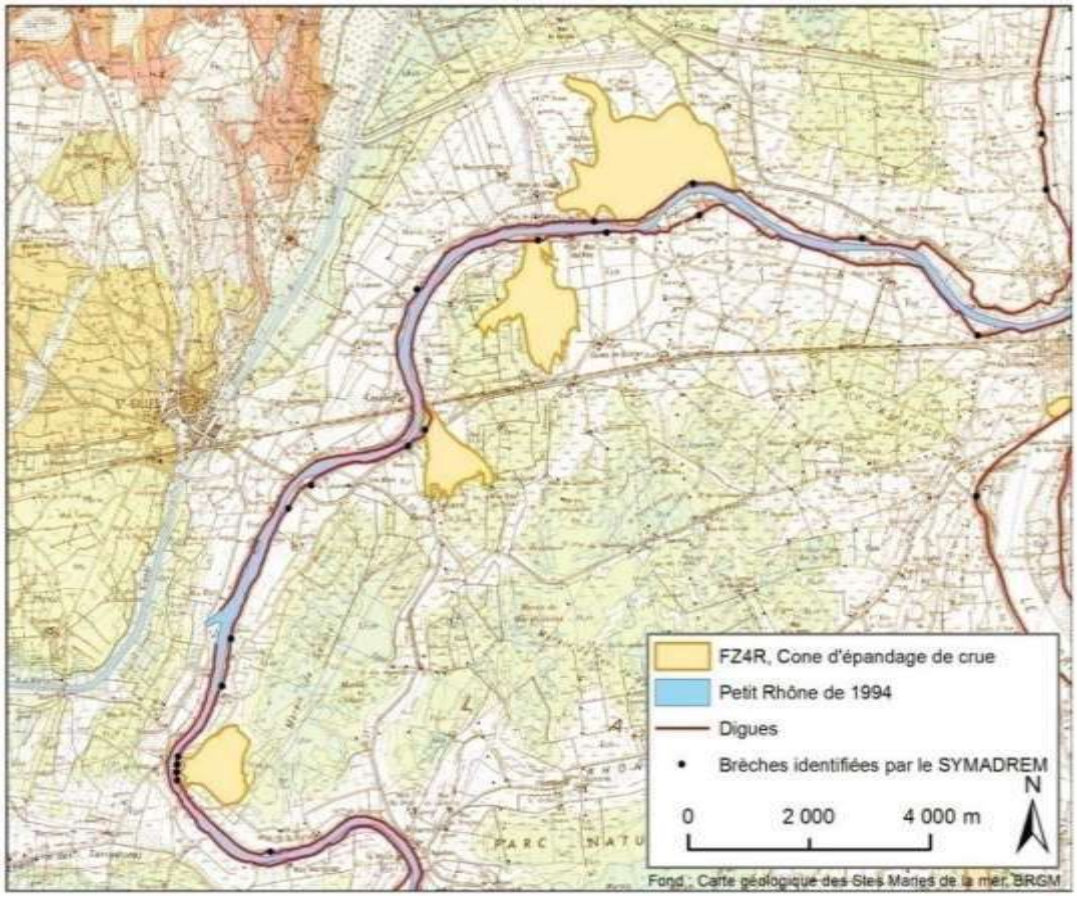


Figure 99. Localisation de paléo-brèches à partir de l'analyse de la carte géologique (Raccasi/CEREGE 2010)

La ligne d'eau est située actuellement au-dessus de la plaine inondable pour un débit annuel (4200 m^3/s). Le petit Rhône a tendance à stocker sa charge sédimentaire, ce qui explique le recul rapide de son embouchure depuis le milieu du XIX^{ème} siècle. La montée séculaire du niveau marin et les surcotes, plus fréquentes et plus hautes au cours du XX^{ème} siècle, constituent une entrave importante au bon écoulement des eaux de crues, aggravant le risque d'inondation à proximité des embouchures.

Les deux figures ci-dessous (Fassetta 2004) illustrent ces différents paléochenaux respectivement au cours de l'Antiquité tardive/Haut Moyen Âge et depuis le Moyen Âge. Les principaux paléo-chenaux recoupant les chenaux actuels ont été coloriés par le SYMADREM en rouge.

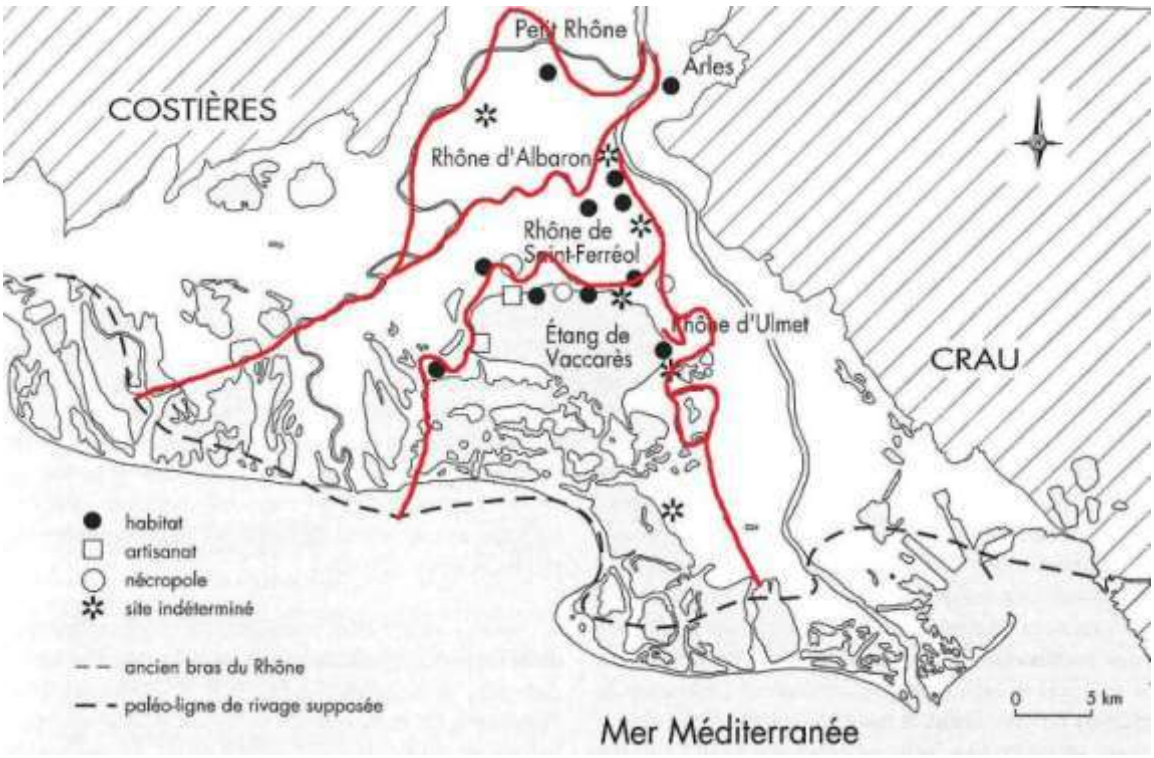


Figure 100. L'occupation du sol et le contexte hydrologique du delta du Rhône au cours de l'antiquité tardive/haut Moyen Âge (Fassetta 2004)

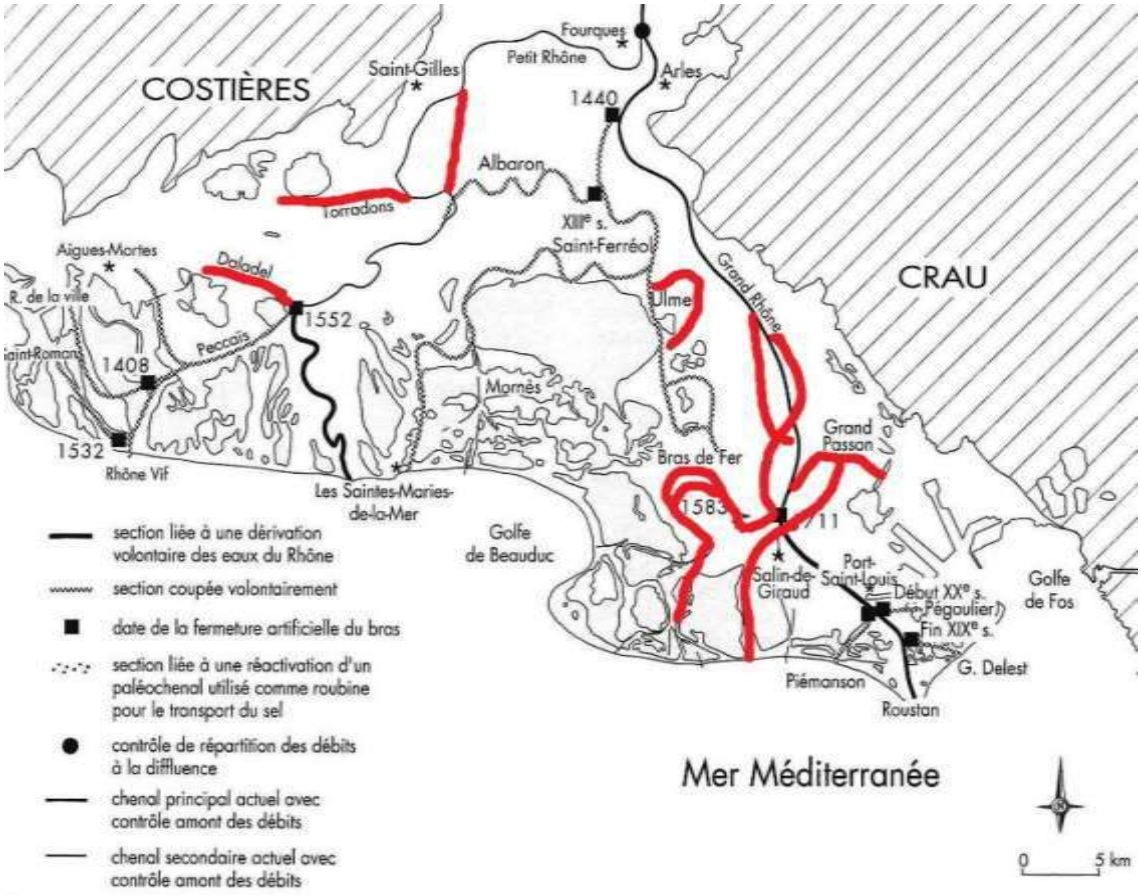


Figure 101. L'artificialisation du delta du Rhône depuis le Moyen Âge (Fassetta 2004)

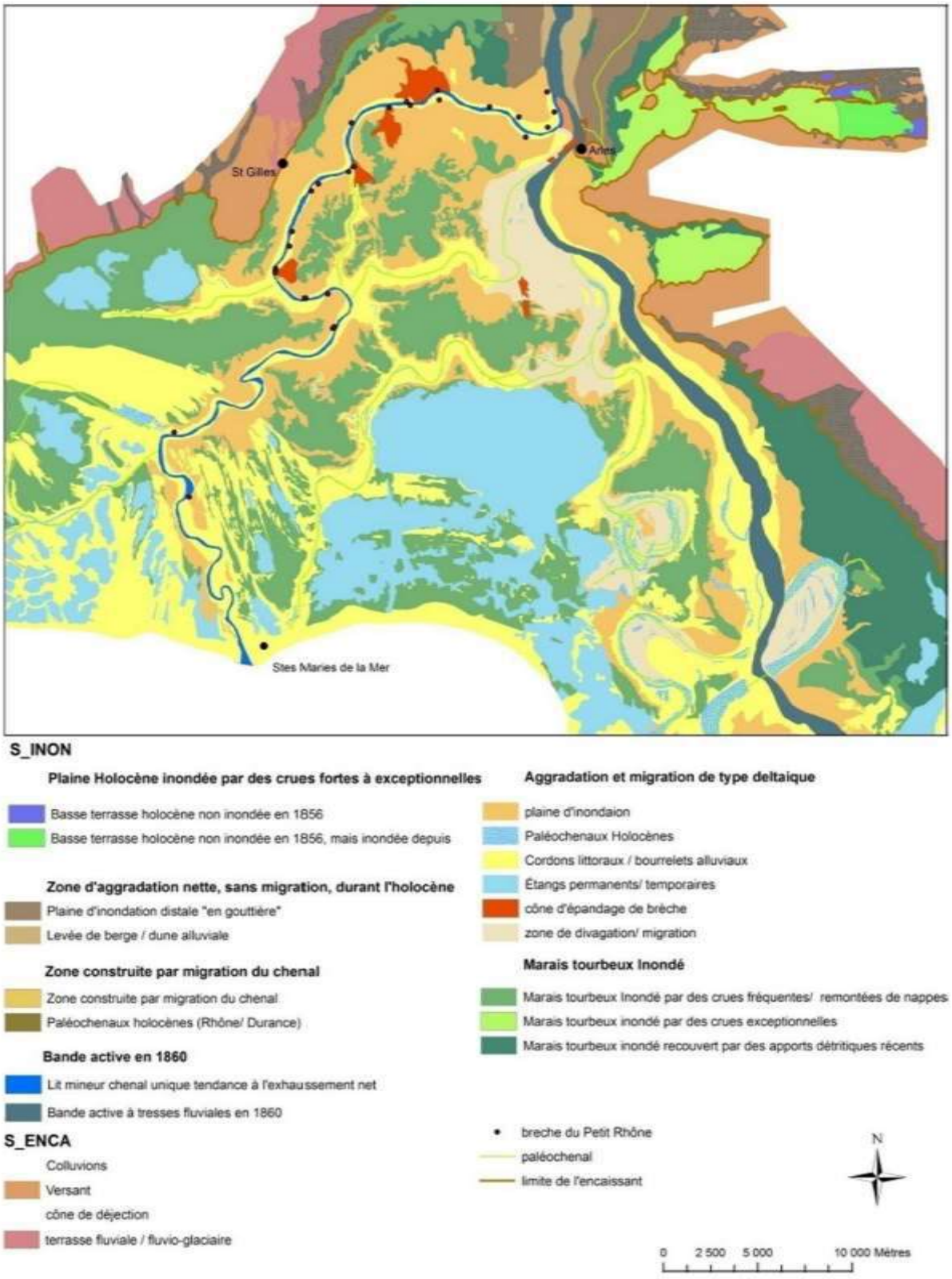


Figure 102. Atlas paléo-environnement – DREAL

2.3 CHRONOLOGIE DES AMENAGEMENTS HYDRAULIQUES

Les interventions humaines sur l'hydrographie et l'hydraulique ont pu influencer le fonctionnement des plaines alluviale et deltaïque bien avant le milieu du XIX^{ème} siècle.
Dans le delta du Rhône, on sait que le fonctionnement des paléochenaux de Saint-Ferréol et d'Ulmet est largement dépendant des aménagements hydrauliques à partir des XIème-XIIème siècles (Rossiaud, 1994 ; Arnaud-Fassetta, 1998). Le fonctionnement du Rhône de Saint-Ferréol est artificiellement prolongé de deux siècles à partir des XIII^{ème}-XIV^{ème} siècles ; le Rhône d'Ulmet est brutalement coupé au XVème siècle alors que son hydrodynamisme lui permettait encore de fonctionner.

La décision de dévier artificiellement les eaux de ces bras vers la branche orientale du delta (Grand Rhône-Grand Passon) s'inscrit dans une double volonté de concentrer les écoulements dans quelques bras seulement, afin de limiter l'encombrement des graus, et de protéger la Camargue des inondations qui deviennent plus fréquentes dès la fin du XIV^{ème} siècle (première phase du Petit Age Glaciaire).

Par ailleurs, la mise en place des digues dans la plaine d'inondation, commencée dès les XIIème- XIIIème siècles (Stouff, 1993) aura pour conséquence l'atterrissement des chenaux secondaires au cours du Moyen Age (Saint-Ferréol, Ulmet) puis des Temps Modernes (Grand Passon, Bras de Fer).

Entre Pont-Saint-Esprit et Beaucaire-Tarascon (tronçon T2), plus des deux-tiers du linéaire fluvial (berges, îles) ont été aménagés entre la fin du XVIIIème siècle et 1870. Les aménagements sont de deux types : équipements hydrauliques (digues, protection de berge, comme les perrés et les enrochements, épis dans le chenal). Plus localement, il s'agit de remblais d'infrastructure, d'ouvrages d'art et de structures destinées à minimiser l'impact de l'aléa de crue au niveau des traversées urbaines ou des fronts d'urbanisation. Cependant, ne disposant pas des dates de construction précise des ouvrages, il est difficile d'étudier leurs impacts lors de la crue de 1856. Après les crues de 1840 et 1856, le « Service Spécial du Rhône » (SSR) est chargé de l'aménagement du Rhône pour prévenir les inondations et augmenter la capacité navigable du fleuve.

En aval de Beaucaire-Tarascon et dans l'aire deltaïque en particulier (tronçon T3), le premier aménagement d'envergure fut la mise en place de la Digue à la Mer (1856-1859), qui eut pour effet de supprimer les incursions des eaux de tempêtes marines dans le delta inférieur.
Déconnectées des cordons littoraux, les lagunes de Basse-Camargue (le système Vaccarès) se métamorphosèrent alors en étangs côtiers. Le second aménagement majeur fut l'endiguement du Rhône, qui fut achevé en 1869. Les digues, censées protéger la Camargue des inondations fluviales, limitèrent dès lors les apports de limons fertiles et d'eau douce par le Rhône, obligeant les agriculteurs camarguais à réaliser des travaux de drainage et d'irrigation afin de pallier les remontées d'eau salées dans les sols. Vers 1875, le drainage des zones marécageuses vers l'étang de Vaccarès fut amélioré en réaménageant les anciens bras du Rhône en grands collecteurs débouchant dans l'étang (Heurteaux, 1993).

Le SSR réalise dans un premier temps une homogénéisation des digues insubmersibles dans la plaine d'inondation et met en place les premiers ouvrages de rectification du chenal. Des digues submersibles sont alors construites à l'entrée des bras secondaires (lône) pour les déconnecter du chenal principal. Des épis sont également mis en place pour orienter le flux du

chenal. En conséquence, le système est linéarisé, le volume d'eau dans le chenal est augmenté ce qui a pour but de faciliter la navigation. Dans les années 1890, l'ingénieur en chef Girardon prend la tête du SSR et continue le programme de rectification du chenal principal. Il fait construire un nouveau type d'aménagement, des casiers, qui portent son nom. Ils sont constitués de digues longitudinales, reliées à la berge par des tenons, submersibles au-dessus du niveau d'étiage. Ces Casiers Girardon sont mis en place sur le Grand Rhône et entre Beaucaire et Arles de 1911 à 1921 et un dernier aménagement est mis en place en rive droite au Mas de Saujan (exutoire de la Lône du Pillet) en 1938, sous contrôle de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR), créée depuis 1933 pour gérer et exploiter la puissance hydraulique du fleuve.

En 1933, la Compagnie Nationale du Rhône « CNR » est créée afin de gérer et exploiter la puissance hydraulique du fleuve. Des barrages hydrauliques sont construits à partir de l'amont. Cette phase d'aménagement concerne d'abord l'amont du Rhône, pendant une trentaine d'années. Tandis qu'à l'aval du système rhodanien, seuls les casiers sont entretenus de façon plus ou moins régulière.

Sur le Petit Rhône, des déflecteurs latéraux sont installées au début des années 1970, entre le défluent et l'Écluse de Beaucaire. Ils sont destinés à concentrer le flux dans la partie centrale du chenal, afin d'améliorer la navigation.

2.4 SYNTHESE DES PALEO-CHENAUX

Le SYMADREM a exhumé de ces archives une carte géomorphologique de l'île de Camargue réalisée en 1970 par la direction départementale de l'agriculture et BRL pour le compte du Ministère de l'Agriculture. Cette carte identifie les anciens lits du Rhône susvisés et d'autres lits secondaires.

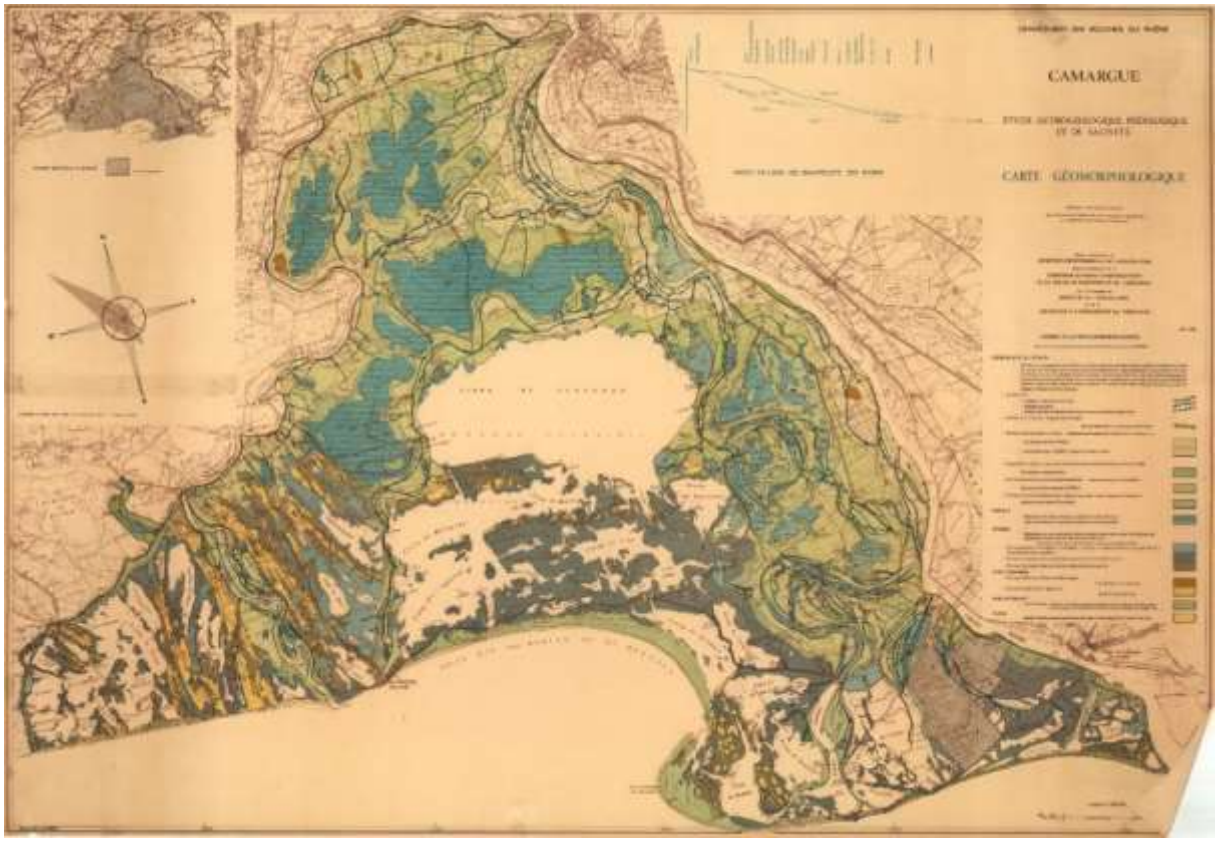


Figure 103. Carte géomorphologique (DDA 1970 [M003])

En 2008, l'IGN a réalisé dans le cadre du Plan Rhône une modèle numérique de terrain de précision de l'ensemble du Delta du Rhône par méthode laser aéroporté. Les variations topographiques permettent une identification précise des différents bourrelets alluviaux des anciens lits du Rhône. Le SYMADREM a procédé à une superposition du MNT de l'IGN avec les anciens lits de la carte géomorphologique. La carte ainsi établi figure ci-dessous. Ont également été ajouté les paléo-chenaux au droit de la digue de la Montagnette (étude BRL) et du remblai ferroviaire entre Tarascon et Arles (étude SAFEGE).

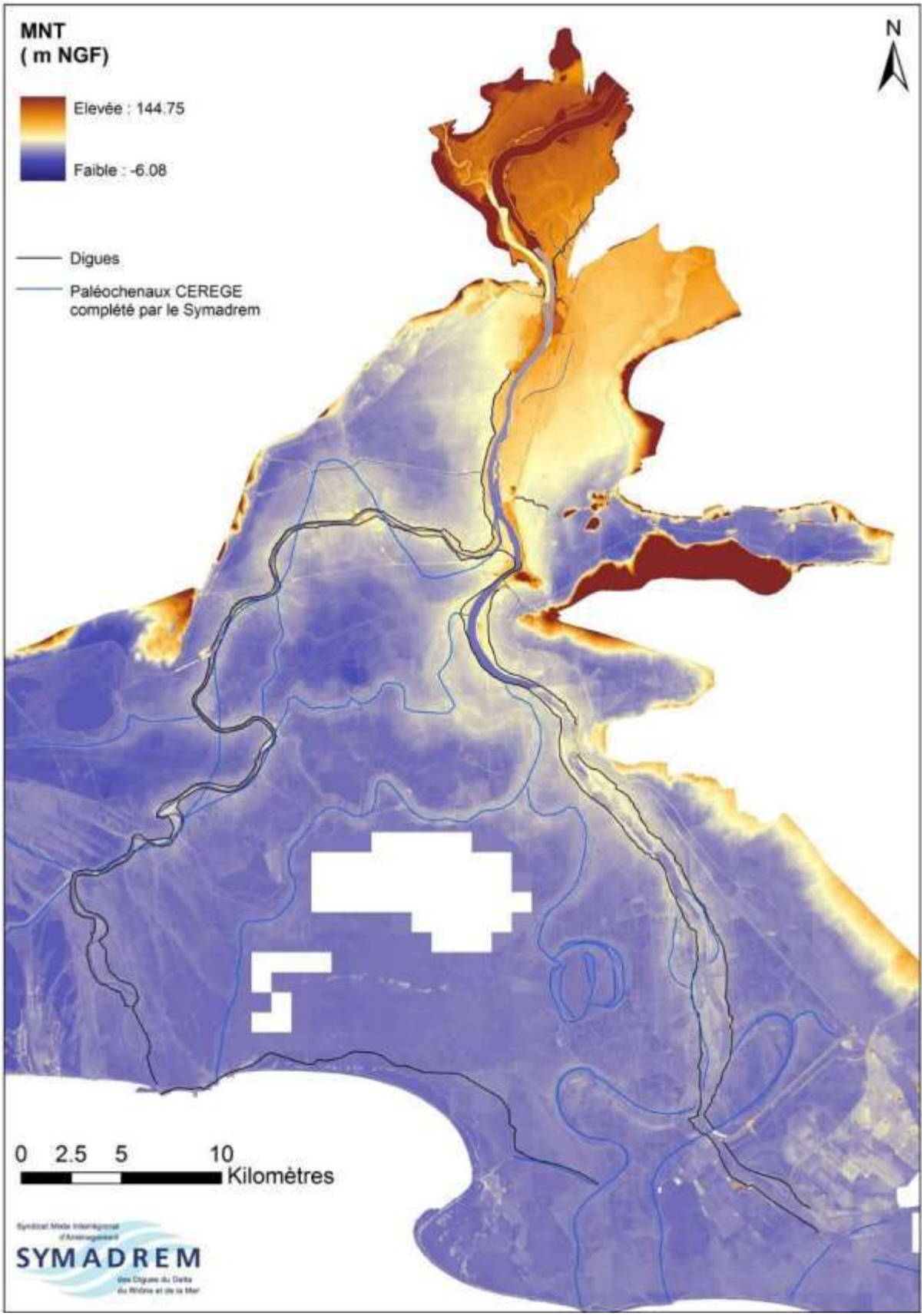


Figure 104. BDT IGN et paléo-chenaux

2.5 MORPHO-DYNAMIQUE DU RHONE ENTRE BEAUCAIRE ET ARLES

Le tronçon du Rhône entre Beaucaire et Fourques a connu depuis 150 ans une évolution morphologique provoquée par les aménagements locaux mais également par les aménagements à l'échelle globale du fleuve (réduction du transport solide). Cette évolution s'est traduite par (C. Antonelli) :

- Une simplification du chenal, guidé par des digues submersibles, les épis et les casiers ;
- Un approfondissement du chenal compensant la réduction de largeur et provoqué également la diminution des apports solides grossiers.

Les grandes phases d'aménagement rappelées ci-dessous :

- La construction de digues « insubmersibles » entre 1840 et 1870 ;
- La construction de digues submersibles qui déconnectent les lônes du chenal principal, favorisent les dépôts et réduisent la largeur du lit entre 1860 et 1880 ;
- La construction des casiers dits « Girardon » qui linéarisent le chenal et induisent un surcreusement du fond et une sursédimentation des berges entre 1880 et 1930 ;
- La mise en place des barrages le long du Rhône et sur ses affluents depuis 1930 jusqu'en 1980.

Les deux figures suivantes réalisées par le CEREGE montrent la situation des aménagements et l'occupation des sols en 1876 et 2003.

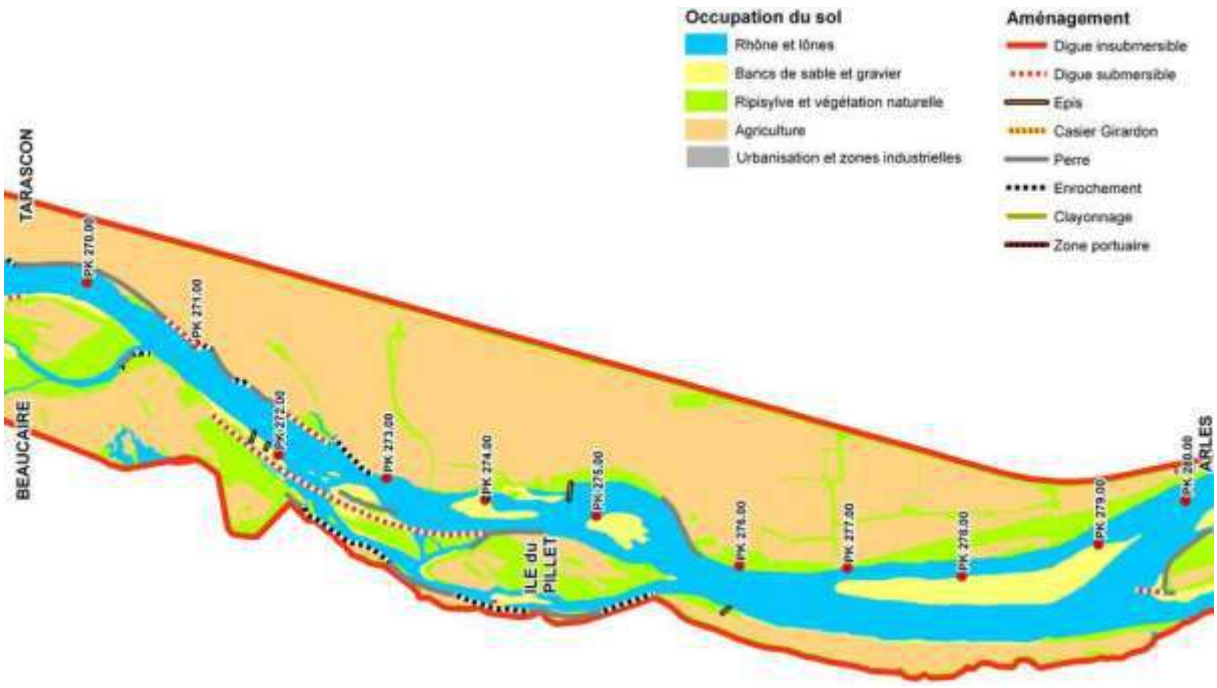


Figure 105. Occupation des sols en 1876 (CEREGE)

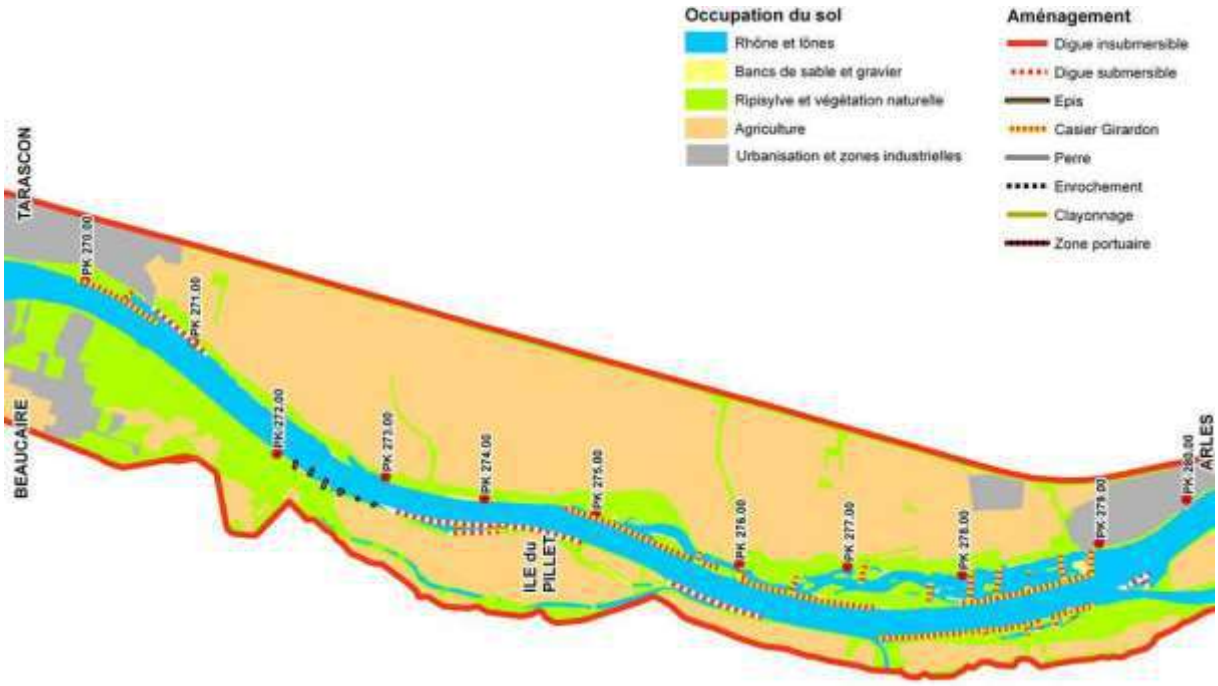


Figure 106. Occupation des sols en 2003 (CEREGE)

Raccasi (2010) a dans le cadre de sa thèse construit, à partir de la carte des ponts et chaussées de 1876 et des relevés bathymétriques de l'époque un modèle numérique de terrain et modèle bathymétrique du tronçon qu'il a comparé avec la situation actuelle

La comparaison des deux modèles figure ci-dessous

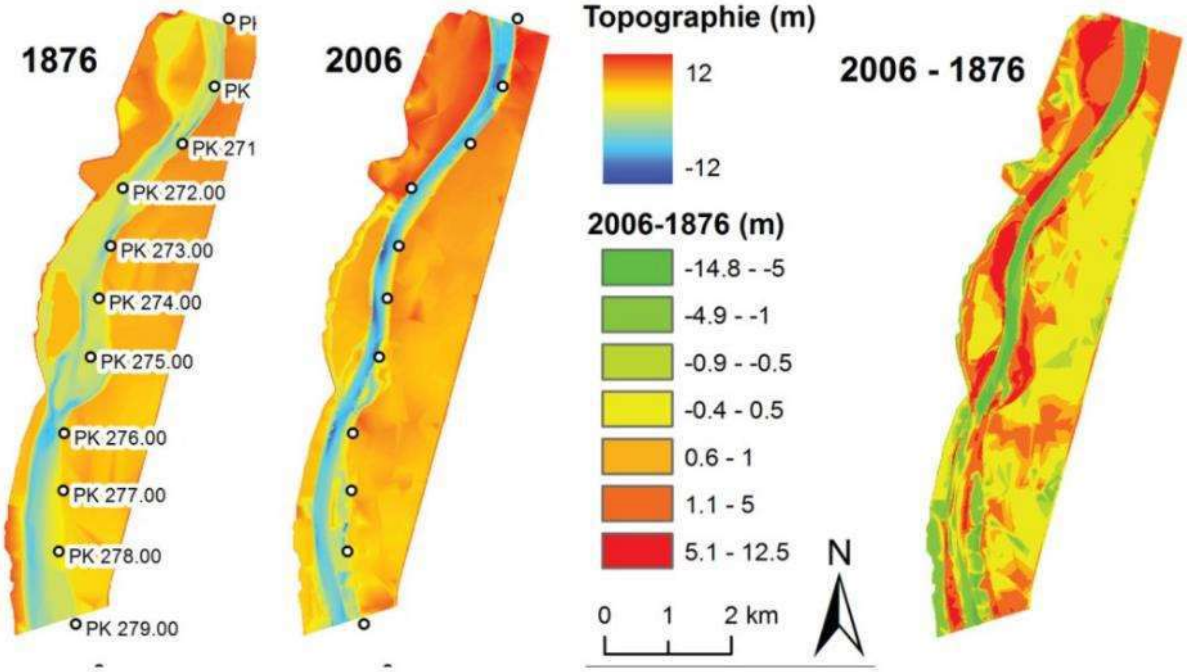


Figure 107. Comparaison de la topographie en 1876 et 2006 sur le tronçon Beaucaire/Arles (Raccasi 2010).

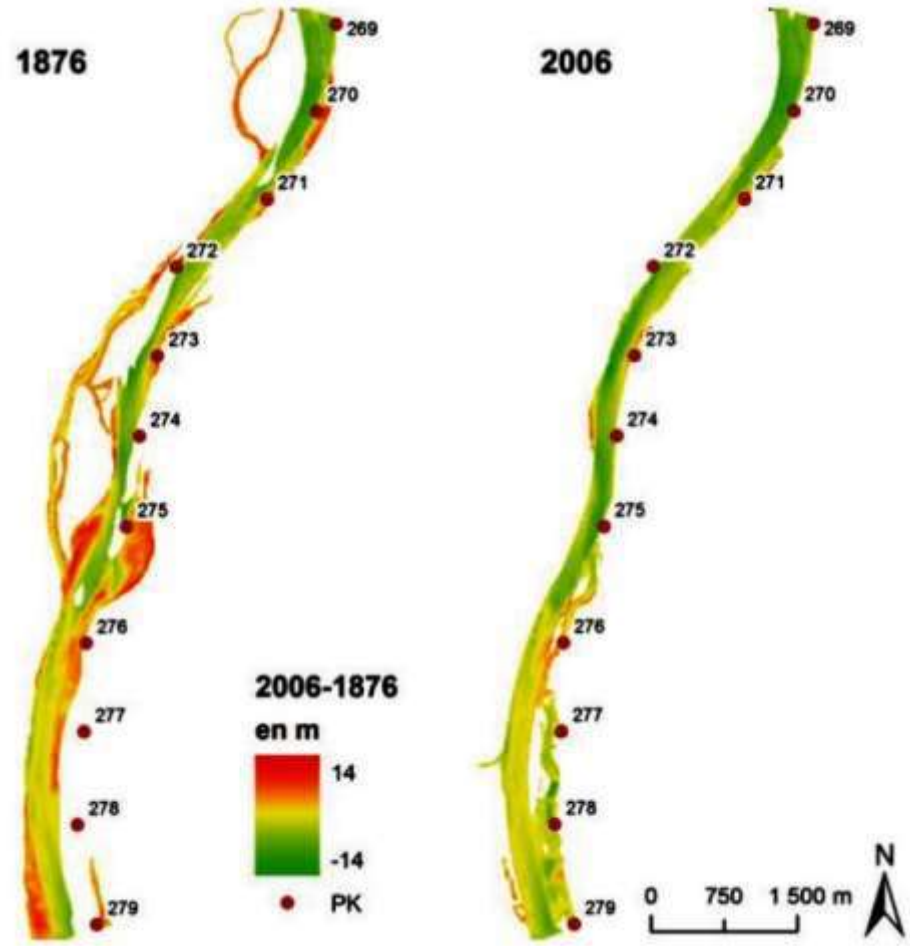


Figure 108. Comparaison bathymétrie 1876 et 2006 sur le tronçon Beaucaire/Arles (Raccasi 2010)

La superposition des MNT de 1876 et de 2006 permet d'obtenir une spatialisation des secteurs en accumulation et en érosion au cours des 150 dernières années. L'évolution du chenal et de ses marges est différenciée de part et d'autre du PK 276. En amont de ce point, l'incision du chenal est très importante (4 à 14 m). En aval, l'incision du chenal principal est beaucoup plus faible (1 à 5 m). Le bilan global de l'évolution montre une accumulation globale de 22 millions de m^3 pour une érosion de 13 millions de m3. Ce sont principalement les berges du fleuve qui concentrent la sédimentation, tout particulièrement en rive droite. La plaine en rive gauche n'a pas subi d'accrétion remarquable (érosion de 0,2 millions de m^3).

Le chenal s'est globalement approfondi, simplifié et rétracté. L'atterrissement des bras secondaires laisse apparaître un chenal unique sans tressage. Le tracé du fleuve est désormais caractérisé par de larges sinuosités, déterminées, puis fixées par les aménagements successifs. La mobilité de l'axe du talweg est restée faible, de quelques dizaines de mètres vers l'ouest au PK 272 ou vers l'est au PK 275.

Le profil 271,8 ci-dessous, qui est un des rares profils non perturbé par la présence d'une lône ou d'un aménagement aux deux dates, met en évidence la rétraction du chenal avec une progradation de la berge en rive droite de 200 m de large sur 2 m de haut correspondant à une diminution de la surface disponible pour l'écoulement de 700 m². Cette rétraction a induit un

ajustement vertical, le talweg s'incise de plus de 4 m permettant un gain de surface d'écoulement de 900 m².

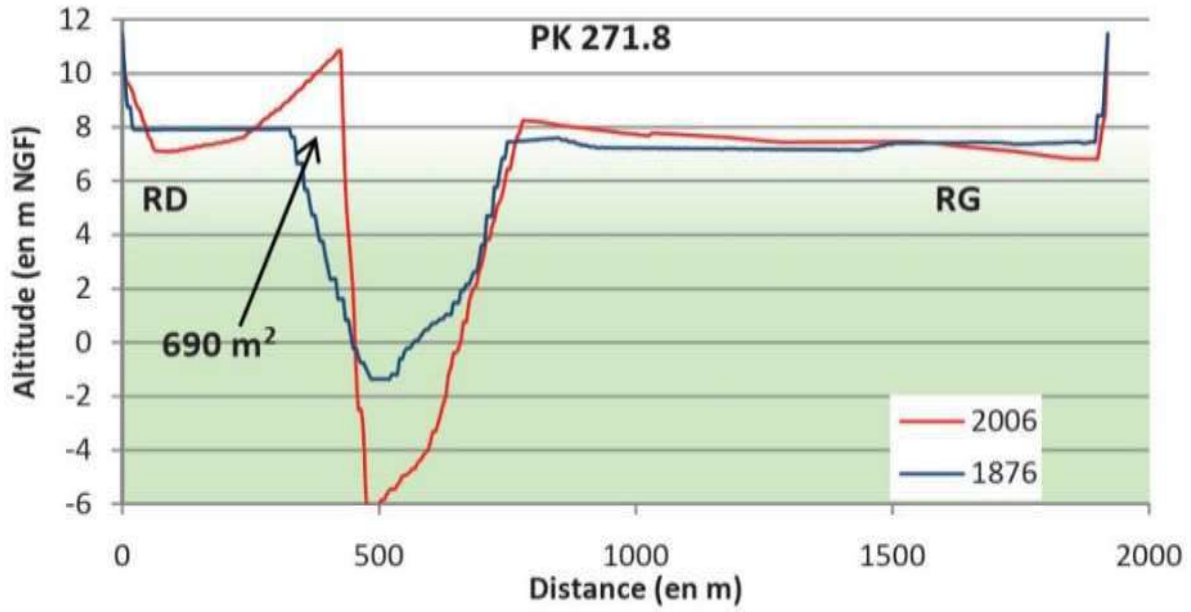


Figure 109. Evolution topographique du profil 271,8 entre 1876 et 2006

Les aménagements mis en place en aval de Beaucaire entre 1870 et 1938, pour améliorer la navigation, induisent une linéarisation du chenal et la disparition du tressage, puis la rétraction et l'approfondissement du chenal. A cette mutation du chenal s'ajoute depuis les années 1950 une accrétion importante des berges qui amplifie le phénomène d'enfoncement du chenal (Raccasi 2010).

En définitive aucune évolution morphodynamique importante n'est à craindre dans le futur sur ce tronçon que ce soit une évolution tendancielle lente ou une évolution brutale au cours d'une crue (ISL 2012).

2.6 MORPHO-DYNAMIQUE DU PETIT RHONE

2.6.1 Présentation générale de la morpho-dynamique du Petit Rhône

Le chenal du Petit Rhône est contraint par des digues de protections contre les crues qui limitent ses possibilités de divagation. Le confortement des digues dans la deuxième moitié du XIXème siècle a été complété d'un confortement quasi systématique des berges concaves du Petit Rhône par enrochements (SE en rouge dans la carte des ponts et chaussées de 1876) et localement par la réalisation de perrés (SP en bleu dans la carte ci-dessous).

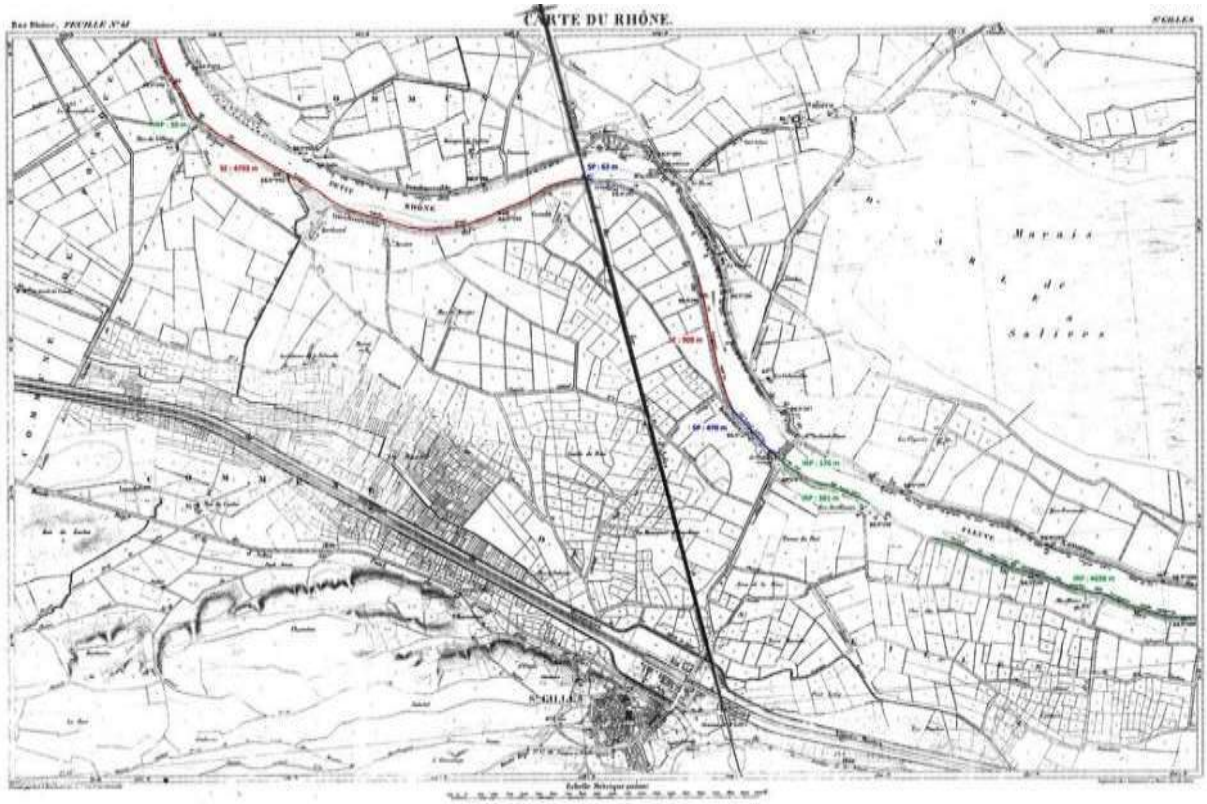


Figure 110. Carte des ponts et chaussées de 1876 (protection en enrochements en rouge et perré en bleu)

Des aménagements pour la navigation (panneaux de fonds unique sur le Rhône) et une écluse au PK300 ont été réalisés par la CNR mais gérés par VNF entre 1976 et 1981. Il s'agit de dalles en béton, dont la hauteur varie entre 0,50 m et 1 m, qui sont superposées et fixées à des pieux constitués par des profilés HE 160.

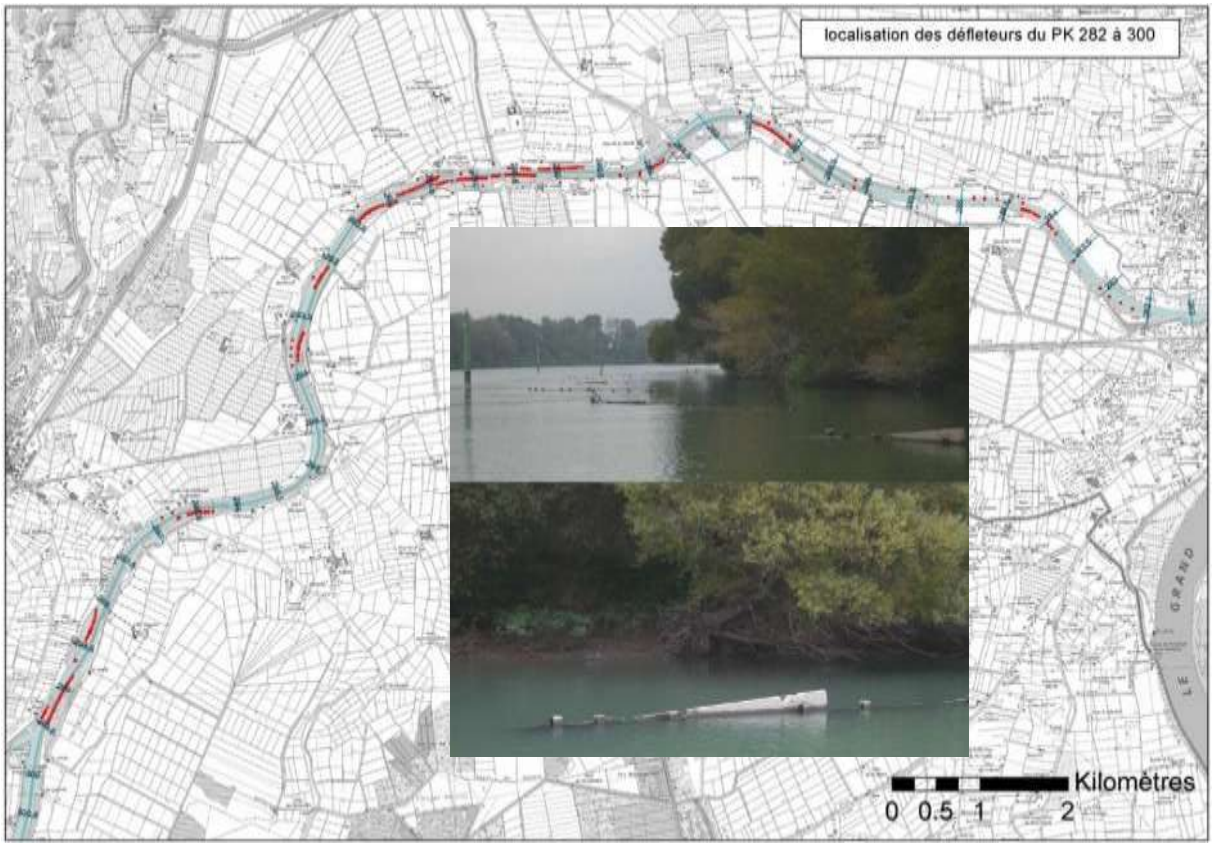


Figure 111. Panneaux de fonds sur l'amont du Petit Rhône (source EGISeau [K101])

A l'instar du Rhône entre Beaucaire et Arles, Raccasi (2008) a procédé à la création de MNT historique et l'analyse de l'évolution du chenal en 2D, puis en 3D à deux échelles de temps (1876-2004) et (2001-2004). La première échelle de temps donne des éléments intéressants pour l'appréciation de la mobilité du fleuve à très long terme (150 ans). La seconde échelle de temps donne quant à elle des éléments intéressants pour apprécier la mobilité des berges et du fond du chenal à l'échelle d'une crue puisqu'elle permet de couvrir la période 2002/2003 où 3 crues se sont succédées, la crue de septembre 2002 intense et très brève, la crue de novembre 2002, moins intense mais longue (15 jours) et la crue centennale de décembre 2003, dont l'hydrogramme reste pointu si l'on compare avec la crue de mai 1856, crue de référence du Rhône.

2.6.2 Evolution en plan entre 1876 et 2008

Entre 1876 et 1994, la largeur du chenal s'est réduite en moyenne de 20 m. Mais cette évolution est hétérogène dans le temps et l'espace (tableau ci-dessous).

Tableau 45. Evolution de la largeur du chenal du Petit Rhône entre 1876 et 1994. La limite amont/aval du chenal est fixée à l'écluse de Saint Gilles, limite de la zone navigable (PK300)

Date	Largeur moyenne (en m)		
	Totalité	Amont de St Gilles	Aval de St Gilles
1994	126	129	125
1945	127	129	125
1876	145	156	139

Elle est pratiquement achevée en 1945. Elle est plus importante à l'aval (réduction de 10% de la largeur initiale, 17 m en moyenne), qu'en amont (réduction de 8%, 4 m en moyenne).
La figure ci-dessous montre qu'à une échelle plus fine les accumulations latérales se situent indifféremment dans les intrados ou les extrados des méandres.

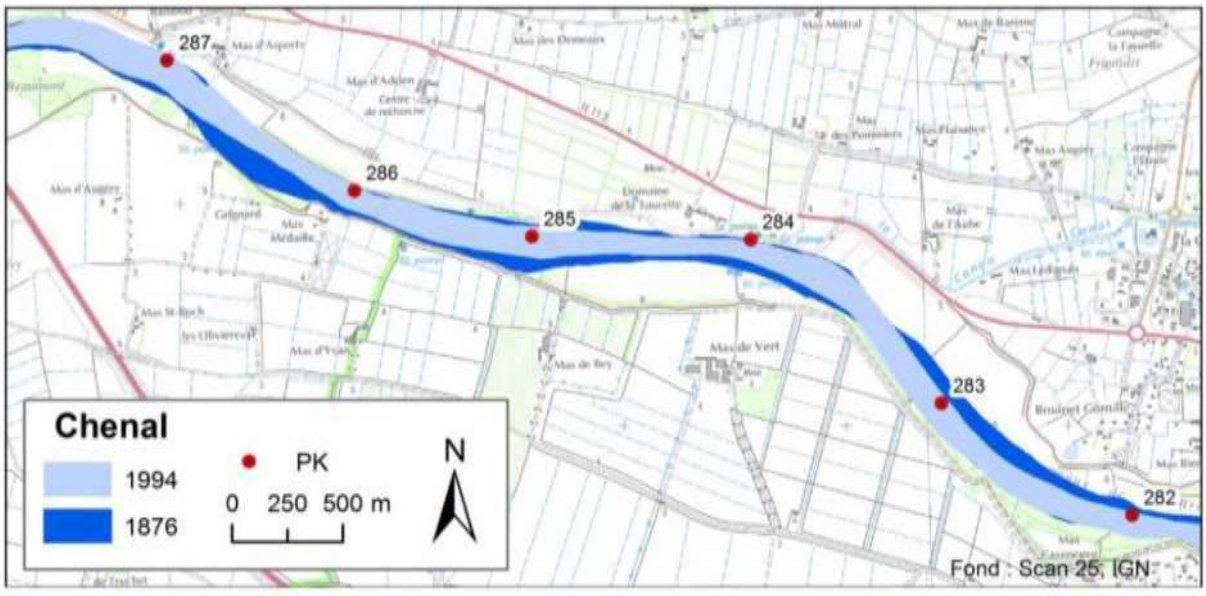


Figure 112. Rétrécissement du chenal entre 1876 et 1994 (raccasi 2008)

Cette évolution montre que les aménagements mis en place pour la navigation dans le chenal n'ont pas d'impact sur la largeur du système. En effet, ils sont positionnés entre 1945 et 1994 et sur cette période la largeur du chenal n'évolue pas. De plus, la tendance au rétrécissement du chenal est plus marquée sur l'aval du système non aménagé qui est le milieu le plus mobile mais dont la largeur reste également stable après 1945.

Dans le cadre de l'étude morphodynamique préalable au décorsetage limité des digues du Petit Rhône, EGISeau a quantifié l'évolution en plan du chenal suivant les périodes suivantes : 1876-1945 / 1945 – 1979 / 1979 – 1994 / 1994-2008.

Les secteurs étudiés et quantifiés figurent ci-dessous.

Tableau 46. Avancement/Recul sur le Petit Rhône (EGISeau [K101])

PK Rhône	1876 - 1945		1945 - 1979		1979 - 1994		1994 – 2008	
	Ava.	Rec.	Ava.	Rec.	Ava.	Rec.	Ava.	Rec.
PRG 282,0 – 282,5	9	0	0	0	0	0	0	0
PRG 282,8 - 283	0	0	18	0	0	0	0	0
PRG 285,9 – 286,4	26	0	18	0	0	20 (médaille)	0	0
PRG 289,0 - 290,3	31	0	35	0	0	27(aval autoroute)	20	0
PRG 291,3 – 292,0	16	0	8	0	0	0	24	0
PRG 293,0 – 293,8	0	0	0	0	0	0	0	0
PRG 294,1 – 294,8	28	0	0	0	14	0	0	20
PRG 295,1 – 295,7	0	0	0	0	0	0	0	0
PRG 295,9 – 296,6	0	0	0	0	0	0	0	0
PRG 297,6 – 298,7	0	0	22	0	0	16	0	0
PRG 300,6 – 305,6	18	0	0	12	0	0	12	0
PRD 300,7 – 308,1	0	0	22	0	0	38	23	0
PRG 305,5 – 306,4	14	0	0	0	0	8	19	0
PRD 308,6 – 310,6	34	0	13	0	0	24	35	0
PRD 312,4 – 314,4	31	0	0	12	0	13	18	0
PRD 314,6 – 317,0	31	0	40	0	0	35	33	0
PRD 317,9 – 319,2	40	0	0	0	0	9	24	0
PRD 320,1 – 320,8	22	0	0	0	0	13	22	0
PRD 322,5 – 324,4	17/25	0	0	10/16	0/12	0	0/19	0
PRD 330,2 – 330,7	26	0	25	0	0	23	0	16
PRD 333,7 – 337,0	0	84	0	0	20	0	0	30

2.6.3 Synthèse de l'évolution en plan entre 1876 et 2007

La synthèse suivante est basée sur l'exploitation de la superposition des cartes de 1876 et des prises de vue aériennes précises (FLIMAP, 2007). Cette superposition a été effectuée par le service technique du SYMADREM. La précision du calage est estimée 5 à 10 m environ, selon les secteurs.

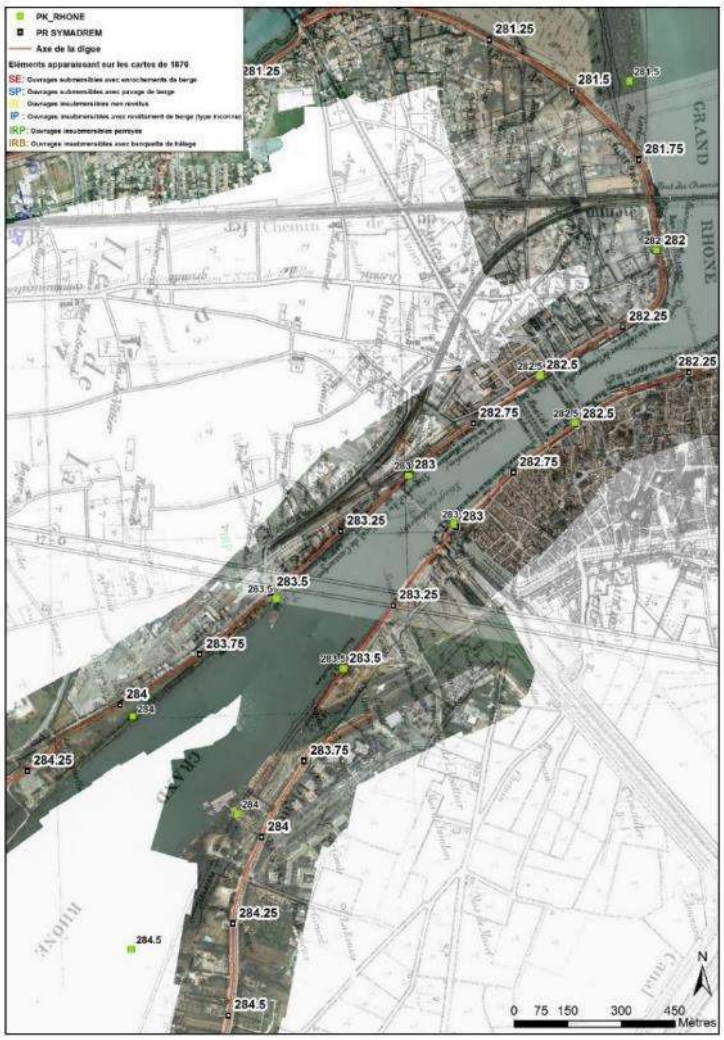


Figure 113. Exemple de superposition des cartes de 1876 et des prises de vue aériennes de 2007 en traversée d'Arles.

Différents termes ont été employés pour quantifier l'évolution entre 1876 et 2007 :

- Le terme stable signifie qu'il n'y a pas d'évolution notable entre 1876 et 2007 ;
- Le terme érosion signifie que la berge a été érodée ;
- Le terme accrétion signifie qu'il y a eu du dépôt. Cette accrétion peut-être quantifiée (accrétion de 30 m, par exemple). Cependant, il se peut qu'elle ne le soit pas. En effet, certaine prise de photo aérienne ne sont pas suffisamment éloignée de la berge pour pouvoir estimer l'accrétion ;
- Le terme indéfini signifie qu'il est impossible de déterminer s'il y a eu accrétion ou érosion, les prises de photo ne recoupant pas les cartes de 1876. Cependant, en utilisant d'autres images satellites, il est possible de conclure quant à l'évolution (accrétion, érosion, stabilité).

Les tableaux ci-dessous résument les observations ainsi faites à l'aide de la superposition.

Petit Rhône Rive Gauche

Petit Rhône Rive Gauche	Evolution	Commentaires	Largeur du ségonnal
281 – 282,5	stable	plusieurs érosions ponctuelles repérées (PRG 281)	inférieure à 20 m
282,75 – 283,5	stable	ancien épi toujours visible au PRG 283	supérieure à 20 m et localement inférieure à 20 m au droit du PRG 283
283,75	érosion de 20 m	aucun	supérieure à 20 m
284 – 285,5	accrétion de 10 à 75 m		
285,75	accrétion de 10 à 75 m	la berge constitue le pied de digue	inférieure à 20 m
286 – 286,25	stable	la berge constitue le pied de digue	
286,5 – 287,75	accrétion de 20 m	aucun	supérieure à 20 m
288 – 288,5	stable		
288,75 – 291,25	accrétion de 10 à 50 m	du 289,25 au PRG 290 : zone d'accrétion antérieure qui s'érode actuellement	inférieur à 20 m du PRG 289,25 au PRG 290, sinon supérieure à 20 m
291,5 - 292	stable	zone de dépôt	inférieure à 20 m
292,25 - 293	accrétion de 10 à 50 m	aucun	
293,25 – 293,5	stable	zone de dépôt	
293,75 – 294,25	accrétion de 20 à 50 m	aucun	supérieure à 20 m
294,5 – 296,25	stable	du PRG 295,5 au PRG 296,25 : érosion locale	inférieur à 20 m et localement supérieure à 20 m au droit des PRG 294,75 et 295
296,5 - 297	accrétion de 10 à 50 m	aucun	supérieure à 20 m
297,25 – 298,5	stable	aucun	supérieure à 20 m du PRG 297,25 au 297,75 et inférieur à 20 m du PRG 297,75 au 298,5
298,75 - 300	accrétion de 10 à 100 m	aucun	supérieure à 20 m
300,25	stable		
300,5	érosion de 20 m		
300,75 – 301,75	stable	aucun	inférieure à 20 m
302 – 302,25	érosion de 10 et 20 m		
302,5 – 304,5	stable		
304,75 – 306,25	accrétion de 10 m	aucun	supérieure à 20 m du PRG 305,5 au PRG 306, sinon inférieure à 20 m
306,5 – 308,25	stable	aucun	inférieure à 20 m
308,5 - 309	accrétion de 10 à 20 m	aucun	supérieure à 20 m
309,25 – 309,5	stable		

309,75	accrétion de 10 m		
310	stable	aucun	inférieure à 20 m
310,25	accrétion de 10 m		
310,5 - 311	stable		
311,25	accrétion de 10 m		
311,5 – 312,25	stable		
312,5 – 312,75	érosion de 10 m	aucun	supérieure à 20 m
313 – 313,5	stable		
313,75	accrétion de 20 m		
314 – 317,25	stable	aucun	supérieure à 20 m du PRG 314 au PRG 315 et PRG 316 au PRG 316,75 sinon inférieure à 20 m
317,5	accrétion de 20 m	aucun	supérieure à 20 m
317,75 - 318	stable		
318,25	accrétion de 10 m		
318,5 - 320	stable	aucun	supérieure à 20 m du PRG 318,5 au PRG 318,75 sinon inférieure à 20 m
320,25	accrétion de 10 m	aucun	inférieure à 20 m
320,5 – 321,75	stable	aucun	supérieure à 20 m au PRG 320,75 et du PRG 321,5 au PRG 321,75 sinon inférieure à 20 m
322 – 322,25	accrétion de 30 m	aucun	supérieure à 20 m
322,5 – 322,75	stable		
323 – 323,75	accrétion de 10 à 20 m		
324	stable		
324,25 – 324,5	accrétion de 10 m		
324,75 - 326	stable	du PRG 325,5 au PRG 325,75 : présence de nombreux cabanons sur la berge	inférieure à 20 m
326,25	érosion de 10 m	aucun	supérieure à 20 m
326,5 – 328,5	accrétion de 10 m		
328,75 - 329	accrétion de 100 m		
329,25 - 330	indéfini (érosion)		
330,25	érosion de 75 m	aucun	inférieure à 20 m
330,5	stable		
330,75 - 331	érosion de 20 à 50 m		
331,25 – 332,25	indéfini (érosion)	aucun	supérieure à 20 m
332,5 - 333	érosion de 10 à 50 m		

En comparant la carte de 1876 et celle de 2007 sur ce dernier secteur en érosion, on remarque principalement que les extrados se sont érodés, alors que des limons se sont déposés sur les intrados. La sinuosité sur ce secteur reste ainsi sensiblement la même.

Figure 114. Evolution en plan PK 332 au 335 (PRG)

Petit Rhône Rive Gauche	Evolution	Commentaires	Largeur du ségonnal
333,25 – 334	stable	aucun	supérieure à 20 m du PRG 333,25 au PRG 333,5 sinon inférieure à 20 m
334,25 - 335	érosion de 10 à 100 m	aucun	supérieure à 20 m seulement à PRG 335, sinon inférieure à 20 m
335,25 – 335,75	accrétion de 20 à 100 m	aucun	supérieure à 20 m seulement à PRG 335,75 sinon inférieure à 20 m
336 – 336,25	érosion de 75 m	aucun	inférieure à 20 m
336,5	stable	aucun	
336,75 - 337	érosion de 20 à 60 m	enrochements type épis (digue mer)	

Cette comparaison nous permet d'affirmer qu'entre 1876 et 2007, hormis quelques zones érodées notamment sur la partie aval à partir du PRG 326, l'ensemble des rives du Petit Rhône rive gauche est stable ou en accrétion.

Petit Rhône Rive Droite

Petit Rhône Rive Droite	Evolution	Commentaires	Largeur du ségonnal
279,5 – 280,75	accrétion de 20 à 200 m	aucun	supérieure à 20 m
281	érosion de 10 m		
281,25 – 283,5	accrétion de 10 à 60 m		
283,75 – 284,75	stable	aucun	supérieure à 20 m du PRD 283,75 au PRD 284,25 sinon inférieure à 20 m
285 – 286	accrétion de 10 à 60 m	aucun	supérieure à 20 m au PRD 285,25 / 285,75 / 286, sinon inférieure à 20 m
286,25 – 288,25	stable	aucun	supérieure à 20 m sauf du PRD 287,5 au PRD 287,78
288,5 – 288,75	érosion de 10 m	brèche d'Argence 2003 (PRG 288)	supérieure à 20 m
289	accrétion de 10 m	aucun	
289,25	stable		
289,5 – 290,5	accrétion de 10 à 30 m		
290,75	stable	aucun	inférieure à 20 m
291 - 292	accrétion de 10 à 30 m		
292,25 - 293	stable		
293,25	accrétion de 10 m	aucun	supérieure à 20 m
293,5 – 294,5	stable	PRD 294,4 érosion localisée	inférieure à 20 m à partir du PRD 294, sinon supérieure à 20 m
294,75 - 295	accrétion de 20 à 30 m	aucun	supérieure à 20 m
295,25	érosion de 10 m		
295,5 – 297	accrétion de 5 à 20 m	aucun	supérieure à 20 m uniquement au PRD 295,5, sinon inférieur à 20 m
297,25	stable	pont de Saint-Gilles	inférieure à 20 m
297,5 – 298,75	accrétion de 5 à 75 m	aucun	supérieure à 20 m à partir du PRD 298, sinon inférieur à 20 m
299 – 299,25	stable	aucun	inférieure à 20 m
299,5	érosion de 10 m		
299,75		construction de l'écluse de Saint-Gilles	
300 – 300,25	stable	aucun	inférieure à 20 m
300,5 – 300,75	accrétion de 10 m		
301 - 304	stable		
304,25 – 304,75	érosion de 10 m		
305 – 306,25	stable		

306,5 – 308,75	accrétion de 10 m	aucun	supérieure à 20 m sauf au PRD 307,5
309 - 311	stable	aucun	supérieure du PRD 309,25 au PRD 310 et au PRD 311, sinon inférieure à 20 m
311,25 – 311,5	accrétion de 10 m	aucun	supérieure à 20 m
311,75 – 313,75	stable	aucun	inférieure à 20 m à partir du PRD 312,75 sinon supérieure à 20 m
314 – 314,25	accrétion de 10 m	aucun	PRD 314 : inférieure à 20 m PRD 314,25 : supérieure à 20 m
314,5 - 315	stable	érosion de pied de berge	supérieure à 20 m uniquement au PRD 314,5
315,25 – 316	accrétion de 10 à 50 m	aucun	inférieure à 20 m uniquement au PRD 315,25
316,25 – 317,5	stable	aucun	supérieure à 20 m sauf ponctuellement au PRD 316,25 et 317,5
317,75 – 318	accrétion de 10 à 30 m	aucun	supérieure à 20 m
318,25 – 318,5	stable	aucun	inférieure à 20 m
318,75 – 319,25	accrétion de 10 à 20 m	aucun	supérieure à 20 m sauf au PRD 318,75
319,5 – 319,75	stable	aucun	supérieure à 20 m
320	accrétion de 10 m		
320,25 – 320,5	stable	aucun	inférieure à 20 m
320,75 – 321,5	accrétion de 10 à 20 m	aucun	supérieure à 20 m sauf au PRD 321,5
321,75 – 322,5	stable	aucun	inférieure à 20 m
322,75	accrétion de 30 m		
323 – 323,75	stable		
324 – 324,5	érosion de 5 à 15 m	aucun	inférieure à 20 m sauf au PRD 324,5
324,75 – 326,25	accrétion de 10 à 20 m	aucun	supérieure à 20 m
326,5	stable		
326,75	accrétion de 10 m		
327	stable	aucun	inférieure à 20 m
327,25 – 328,75	érosion de 10 à 100 m	aucun	inférieure à 20 m sauf au PRD 328,75
329 – 329,5	accrétion de 75 à 100 m	aucun	supérieure à 20 m
329,75	érosion de 150 m		
330	stable		

Cette comparaison nous permet d'affirmer qu'entre 1876 et 2007, hormis quelques zones érodées, l'ensemble des rives du Petit Rhône rive droite est stable ou en accrétion.

2.6.4 Morphologie du chenal en 1876 et en 2004

En 1876, le Petit Rhône est un chenal unique, avec un seul bras secondaire visible à l'aval entre les PK 325 et 326, en rive gauche, sur la partie convexe du méandre.

L'organisation de la répartition seuils/mouilles (Raccasi 2008 [M007]) et la morphologie du chenal montrent une distinction entre l'amont et l'aval, de part et d'autre du PK 300 :

- A l'amont, de la diffluence au PK 300, le chenal est relativement homogène, quasi rectiligne (I_s 1.3), avec une profondeur variant entre 1 et 6 m (de 7.4 à 2.6 m NGF). Les mouilles, peu profondes et de grande amplitude, se localisent principalement en rive concave dans les sections étroites (PK 283.5 à 284.5, 288 à 289.5, 292 à 293.5 et 295 à 296). Les seuils s'inscrivent dans les parties les plus linéaires du chenal et sont généralement associés à des atterrissements, notamment au PK 285 et du PK 298 au 299, avec l'apparition d'une île. Un dernier seuil moins marqué (entre 1 et 2 m) est présent entre les PK 293 et 294.
- Sur la partie aval, du PK 300 à l'embouchure, le chenal est plus profond (entre 2 et 9 m dans l'axe d'écoulement). Le profil en long est également plus chaotique avec une répartition seuils/mouilles plus dense qu'à l'amont en raison de la sinuosité. Les mouilles, profondes de 6 à 9 m, sont également situées dans la concavité des méandres et dans les secteurs de resserrement du chenal : 14 sont recensées, d'amplitudes variables. Les seuils les plus importants sont, eux, comme sur la partie amont, situés dans les secteurs rectilignes les plus larges.

En 1876, avant les principaux aménagements, le chenal du Petit Rhône présente donc une morphologie hétérogène, avec une forte différentiation entre l'amont et l'aval du PK 300.

En 2004, le Petit Rhône est aménagé et dragué pour la navigation depuis une trentaine d'années jusqu'au PK 300. Après la crue de 2003, une topo-bathymétrie a été levée par VNF pour quantifier l'impact de l'événement sur la morphologie du chenal jusqu'à l'embouchure (Raccasi 2008 [M007]).

Dans la partie amont, la profondeur est maintenue artificiellement à 3 m minimum dans le chenal navigable pour permettre le passage des péniches jusqu'à l'écluse de Saint Gilles. Le chenal montre une alternance de seuils et de mouilles profondes. Les mouilles les plus profondes (de -12 à -5 m) se trouvent entre la diffluence et le PK 283, puis du PK 288.5 à 289 (aval du Pont de l'autoroute) et enfin entre les PK 295 et 295.5 (aval du pont de la voie ferrée). En dehors de ces secteurs profonds, l'aménagement du chenal (dragages, panneaux de fond) empêche la formation de seuils et la profondeur est assez régulière, variant entre 3 et 5 m.

A partir de l'écluse de Saint Gilles, le Petit Rhône n'est plus classé comme navigable ; aucun aménagement ne permet le maintien de la profondeur minimale pour la navigation. Jusqu'à la mer, il y a dans les méandres une alternance de seuils et de mouilles profondes. Les mouilles (PK 314.7, 318, 324 et 325) sont profondes de -14 à -16 m, la plus profonde se situant au PK 322 (Pont de Sylvéréal) à -18 m NGF. Les seuils sont bien marqués (inférieurs à 1 m de profondeur). A l'aval du PK 329.5, débute le méandre ombiliqué, à partir duquel la profondeur reste inférieure à -6 m jusqu'à l'embouchure. La ligne de talweg se projette en rive concave dans toutes les sinuosités, notamment du PK 334 au PK 335, où elle longe la digue de protection contre les crues. Depuis 150 ans, le volume global érodé représente

9,7 millions de m^3, les accumulations sont de 4,0 millions de m^3, soit un bilan négatif de 5,7 millions de m^3. Ces volumes ne concernent que le chenal et n'intègrent pas une éventuelle accrétion des berges.

Sur la partie amont, les panneaux de fond favorisent l'érosion du plancher alluvial, pour le maintien de la navigation. Depuis 150 ans, 3,9 millions de m^3 ont été érodés, principalement sur le fond de la partie navigable du chenal, là où des seuils limitant la navigation en 1876 (PK 285, 293-294 et 298-299) ont été supprimés. Les dépôts sédimentaires sont minimes ($0.9.10^6$ m^3) et se concentrent en deux points : d'une part sur les bords du chenal, dont ils réduisent la largeur ; d'autre part, dans les anciennes mouilles, qu'ils colmatent sur des épaisseurs de 2 m au maximum (PK 288). Le bilan global entre la diffluence et le PK 300 (écluse de Saint-Gilles) est donc de -3.0 millions de m^3. Il faut remarquer cependant que depuis la mise en place de l'écluse de Saint Gilles, le chenal est régulièrement dragué (volumes non quantifiés d'après VNF) : il existe donc une difficulté d'interprétation dans ce tronçon.

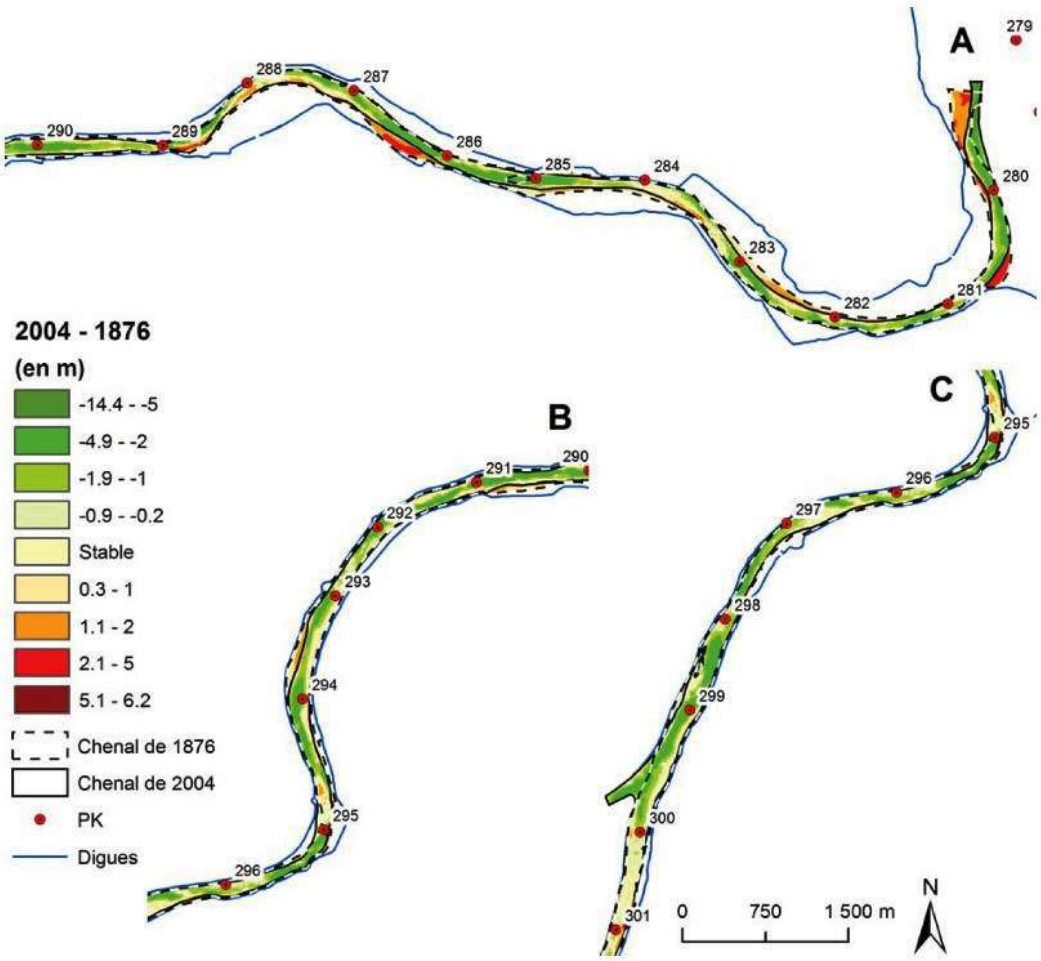


Figure 115. Evolution bathymétrique du Petit Rhône entre 1876 et 2004 de la diffluence au PK 300

Sur la partie aval, le bilan sédimentaire suit la même tendance, mais dans des proportions moins importantes ; l'érosion est de 5.8 millions de m^3, l'accumulation de 3.1 millions de m^3 (bilan de -2.7 millions de m^3). La répartition de ces volumes accumulés ou érodés montre deux types de fonctionnement différents (figure ci-dessous), avec un changement du type de morphogenèse au PK 329 :

En amont de ce point, la position du chenal entre 1876 et 2004 n'évolue pas (si ce n'est le rétrécissement déjà mis en évidence). Le différentiel montre une évolution topographique très contrastée. L'accumulation sur les seuils atteint 2 m aux PK 310, 315.5 et 319, en opposition avec le fonctionnement des mouilles qui se creusent généralement de plus de 5 m (PK 302.8, 313.5, 318.2) et localement jusqu'à 12 m (PK 314.6, 322 et 324). Le bilan sédimentaire de ce secteur est négatif, avec 1.7 millions de m^3 d'accumulation et 2.6 millions de m^3 d'érosion (bilan -1.0 millions de m^3).

A l'aval du PK 329 et jusqu'à l'embouchure, le chenal a un espace de liberté plus important du fait de l'absence de digues à partir du PK 331 en rive gauche. Entre 1876 et 2004 le chenal s'est donc déplacé dans cet espace, et en 2004, il n'a plus la même morphologie qu'en 1876, comme l'a montré l'analyse de la divagation du méandre aval. Le bilan sédimentaire reste négatif, mais est moins important (1.7 millions de m^3) et correspond à un enfoncement du talweg, qui passe de -7 m à -10 m (3.2 millions de m^3 d'érosion et 1.4 millions de m^3 d'accumulation).

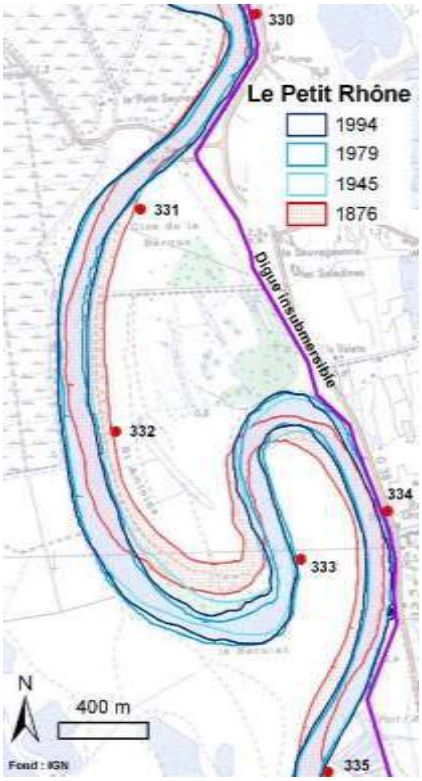


Figure 116. Evolution en plan du Petit Rhône de 1876 à 1994 à proximité de l'embouchure avec la mer

Afin d'être comparés entre eux, ces résultats sont ramenés à une valeur d'érosion par kilomètre sur chacun des trois secteurs. Le bilan érosif est de :

- 0.15 millions de m^3/km à l'amont,
- 0.03 millions de m^3/km entre les PK 300 et 329,
- 0.22 millions de m^3/km de l'aval du PK 329 jusqu'à l'embouchure.

Donc les mutations du système sont plus importantes à l'aval dans le secteur où le chenal peut divaguer librement en rive droite, puis sur le secteur amont aménagé pour la navigation qui

subit des dragages permanents. Par contre entre les PK 300 et 329, le Petit Rhône évolue dans des proportions moins importantes. C'est aussi l'endroit où le bilan des différents apports sédimentaires et de l'érosion est proche de zéro. Il est possible de penser que dans ce secteur, le chenal a acquis un équilibre dynamique qui a assimilé l'impact des digues de protection.

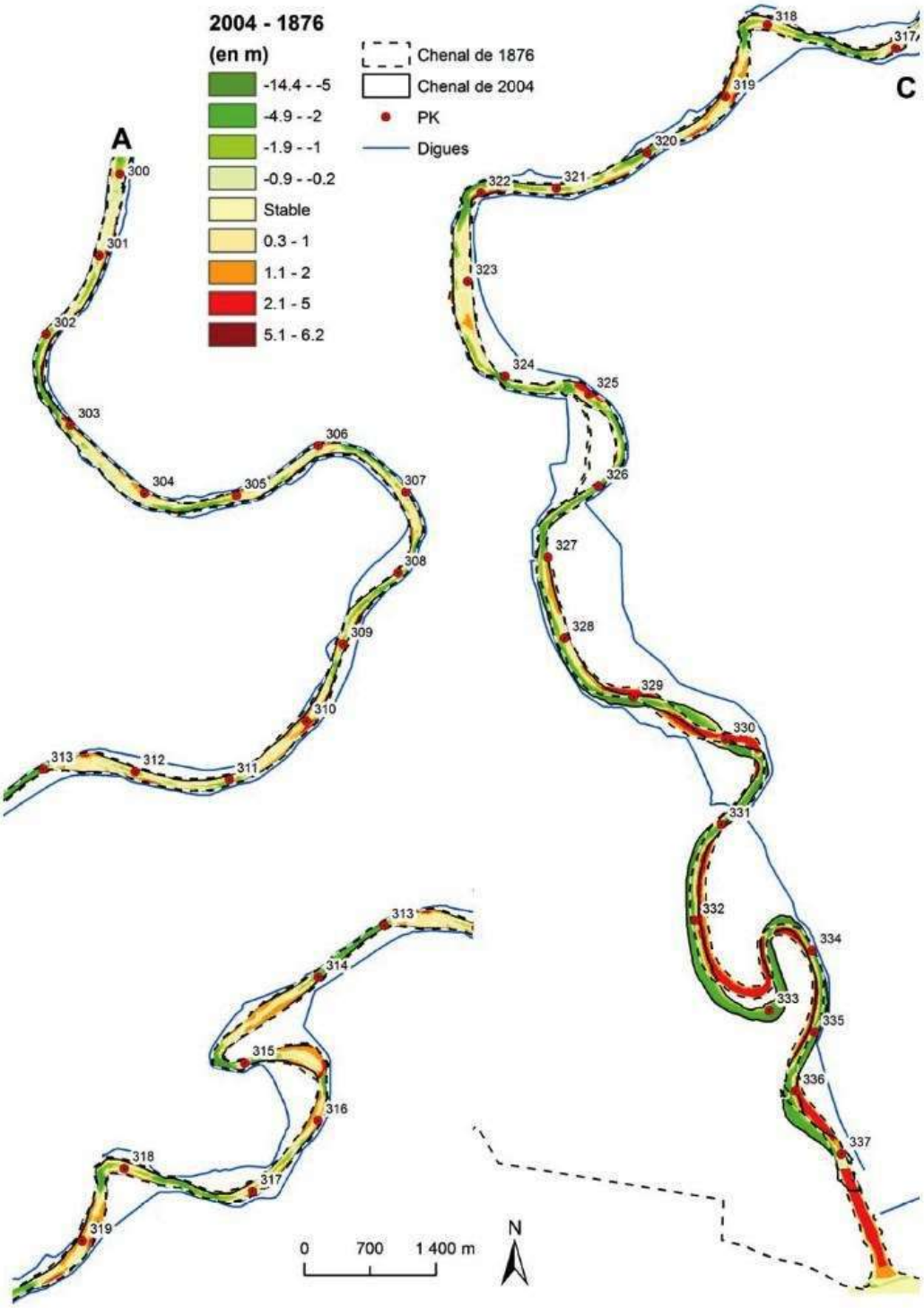


Figure 117. Evolution bathymétrique du Petit Rhône entre 1876 et 2004 du PK 300 à la mer

Cette évolution est différente dans l'espace :

A l'amont (de la diffluence au PK 300), les panneaux de fond favorisent l'érosion dans l'axe du plancher alluvial du chenal par concentration des flux, ainsi que des atterrissements en pied de berges. Positionnés dans les zones de seuils, dont ils ont provoqué ou accéléré l'érosion, ils facilitent le colmatage des mouilles à l'aval. A ces aménagements s'ajoutent des dragages fréquents qui maintiennent le tirant d'eau à 3 m pour la navigation. Donc une partie des
3.10^6 m^3 soustraits au système amont date de la deuxième moitié du XX^e siècle. La partie du bras délivre 3.10^6 m^3 vers l'aval.

En aval de l'écluse de Saint Gilles jusqu'au PK 329, le chenal n'est plus aménagé, mais les digues de protection contre les inondations persistent. Dans ce milieu laissé à l'état « naturel », le chenal fonctionne selon les lois naturelles de l'hydrodynamique : il se colmate au niveau des seuils, alors que l'incision s'amplifie dans les mouilles déjà présentes en 1876. L'analyse 2D montre une stabilisation de la largeur du chenal dans la deuxième moitié du XX$_e$ siècle. Les pertes sédimentaires ont donc majoritairement eu lieu entre 1876 et 1950. Le bilan du transit est de 4.10^6 m^3 vers l'aval.

A l'aval du PK 329, la digue de rive droite disparaît et le chenal retrouve un espace de liberté plus important, les méandres évoluant tant qu'ils ne sont pas bloqués par la digue de rive gauche. Donc l'érosion du système, continue sur toute la période d'étude, est ici aussi plus importante lors de la phase de mobilité des méandres.

La figure ci-dessous résume l'évolution morphologique du Petit Rhône. Depuis 150 ans, c'est 5.7 10^6 m^3 qui ont était soustrait au chenal et exportés au-delà de l'embouchure.

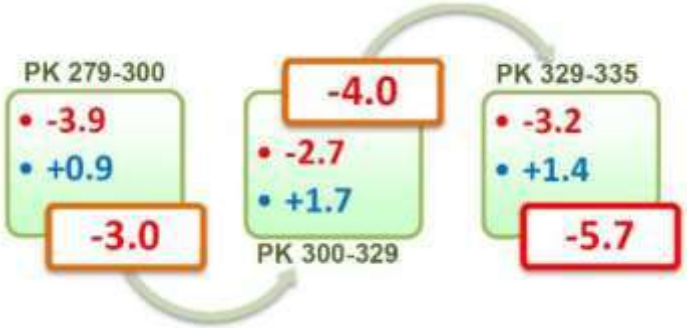


Figure 118. Evolution du chenal du Petit Rhône par secteurs entre 1876 et 2004 (en millions de m3)

Ces résultats ne tiennent pas compte du fonctionnement des berges ; les observations de terrains, complétées de l'étude des cartes anciennes, montrent que les ouvrages de protection des berges (perrés et enrochements), visibles sur l'Atlas des Ponts & Chaussées en 1876, sont à l'heure actuelle ensevelis dans les berges et ne sont mis à jours que par des arrachements quand des arbres sont emportés dans le flux (visible à l'entrée du Petit Rhône en rive gauche). Ce constat confirme l'accrétion verticale et latérale des berges.
Il est cependant possible que cette tendance soit en train de s'inverser : les données topographiques acquises par système FliMap en 2006 par le SYMADREM et analysées par le CEREGE montrent que 43% des berges du Petit Rhône sont en érosion, après une longue période d'engraissement par rétraction du chenal jusque dans les années 1950. Une étude réalisée par Wiederkehr (2006) sur la partie amont du chenal a montré qu'actuellement 43%

des berges sont en érosion, 34% accumulent des sédiments et 22% ont un comportement mixte d'accumulation en sommet de berge et d'érosion en pied.

2.6.5 Impact des crues de 2002 et de la crue de 2003 sur le Petit Rhône

En 2001, VNF a effectué un levé topographique du chenal entre la diffluence et l'écluse de Saint Gilles. A la suite de la crue centennale de décembre 2003, un autre levé topographique du chenal a été réalisé en 2004. Le différentiel des MNT de 2001 et 2004, issu de ces deux relevés bathymétriques, permet d'analyser les conséquences de la crue centennale de 2003 (T=100 ans), de la crue de septembre 2002 (T ≅ 20 ans) et novembre 2002 (T ≅ 20 ans) sur la morphologie du chenal.
Un extrait du croisement des deux MNT du chenal en 2001 et 2004 est présenté ci-dessous pour l'amont du Petit Rhône (source CEREGE).

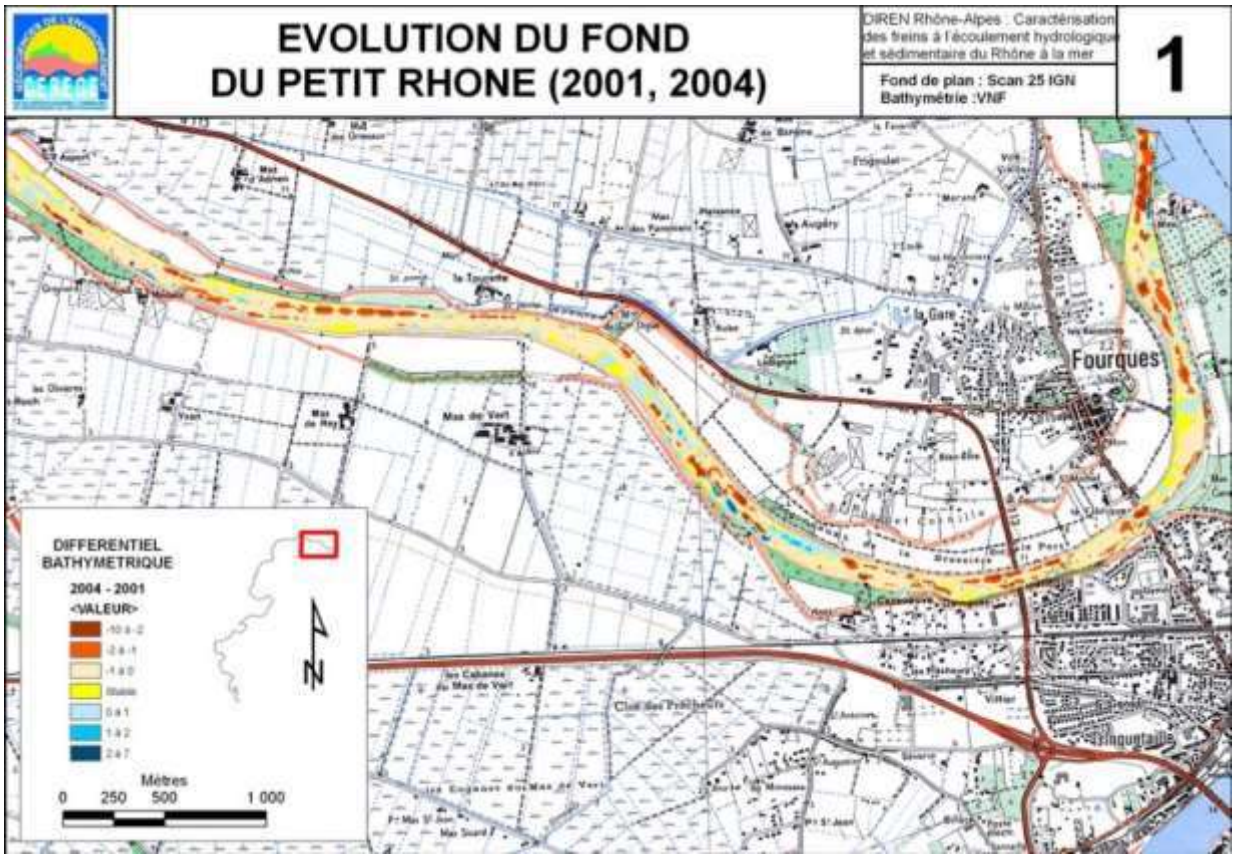


Figure 119. Evolution du fond du Petit Rhône entre 2001 et 2004 (CEREGE)

La cartographie montre un bilan érosif du plancher alluvial de 0.9 millions de m^3 (+0.3 millions de m^3, -1.2 millions de m^3) entre 2001 et 2004 pour une crue centennale (déc. 2003) et deux crues (sept. & nov. 2002) dont une très longue (nov. 2002) de période de retour 20 ans.

Sur la période 1876-2004, le bilan érosif du plancher alluvial est de 3.0 millions de m^3. Durant cette période, en dehors des trois crues précitées, on comptabilise deux crues supérieures à la vingtennale (1886 et 1994) et 11 crues supérieures à la décennale.

Arnaud-Fassetta (1998) (figure ci-dessous) avait montré que l'enfoncement du chenal était quasiment nul sur la période 1895-1969. Durant cette période, on comptabilise 5 crues décennales très espacées et aucune crue supérieure à la vingtennale.

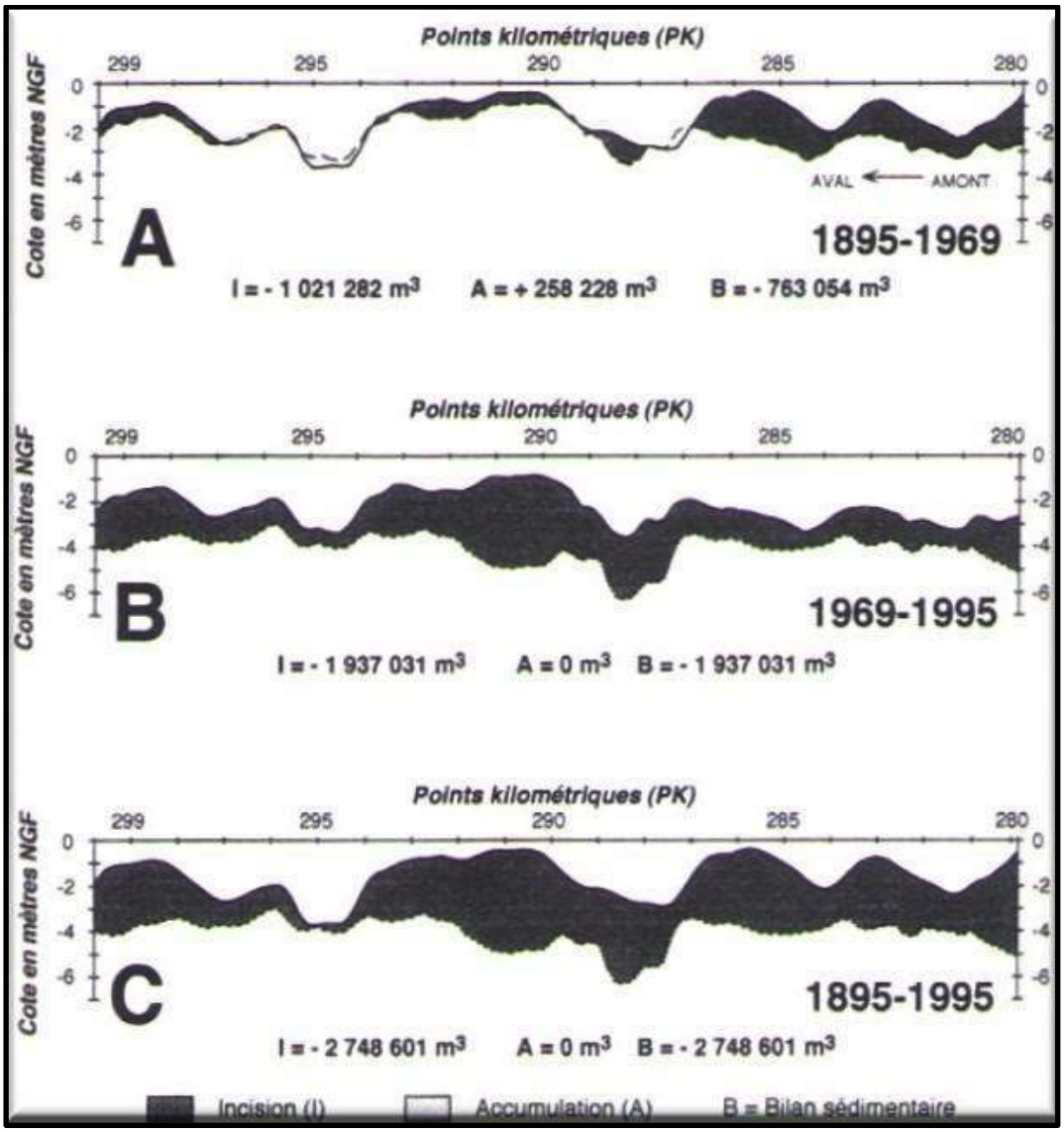


Figure 120. Evolution bathymétrique de l'amont du Petit Rhône à partir du profil en long entre 1895 et 1995 (Arnaud Fassetta 1998)

Au final il semblerait que les événements les plus morphogènes sur la bathymétrie du chenal soient les crues supérieures aux crues décennales, qui érodent le plancher alluvial. Le caractère espacé des événements semble également jouer un rôle.

Les panneaux de fonds, même s'ils limitent le colmatage, ne suffisent pas à maintenir le tirant d'eau nécessaire à la navigation.

La spatialisation de ce bilan sédimentaire montre une érosion différenciée selon les secteurs. Les plus fortes érosions localisées (jusqu'à -2 m dans les mouilles) entre les PK 282 et 284, puis en aval du PK 294 et entre les PK 295 PK 296, où elles atteignent 3.7 m au niveau de la

rive concave. Elles sont parfois associées à un déplacement du talweg qui se colmate en rive convexe et s'élargit en rive concave.

L'incision du talweg est plus prononcée en amont de la brèche de Petit Argence qu'en aval. Au cours de la crue, l'apparition de la brèche a provoqué une diminution de l'énergie hydraulique à l'aval de la brèche.

En effet, d'après les modélisations du BCEOM pour la DREAL de Bassin, à partir du débit de pointe de la crue, avec ou sans les brèches dans les digues, à Fourques la ligne d'eau est inférieure de 30 cm suite à l'impact des 2 brèches sur le Rhône en amont de la diffluence ; et à Saint Gilles le décalage est de 190 cm. Cette différence entre la ligne d'eau théorique, avec et sans la brèche, traduit l'importance de la rupture de la digue dans la dynamique hydrosédimentaire sur le linéaire entre l'amont et l'aval de Petit Argence.

2.6.6 Fonctionnement et synthèse des berges du Petit Rhône

Les commentaires ci-après sont extraits du mémoire de stage de WIERDERKEHR Elise du CEREGE sous la direction de Madame Mireille PROVANSAL.

Une typologie reposant sur une centaine d'observations a été définie : Cinq types de berges, regroupés en deux grandes catégories :

- Les berges artificialisées récemment (moins de 15 ans) de type A ;
- Les berges naturelles divisées en 4 types :
  - Les berges hautes en érosion,
  - Les berges basses en érosion,
  - Les berges mixtes caractérisées par des processus d'érosion en pied et accrétion en haut de berges,
  - Les berges en accumulation,

(WIERDERKEHR n'a pas pris en compte les protections réalisées dans la deuxième moitié du XIXème siècle les considérant comme non entretenues et recouverts par la végétalisation. Ces protections comme il est dit au chapitre 5 ont été réalisées sans sabot, donc très exposées au risque de déstabilisation lors de l'incision de lit. En revanche, dans les secteurs non incisés depuis 1876, il nous semble que leur rôle reste opérant.

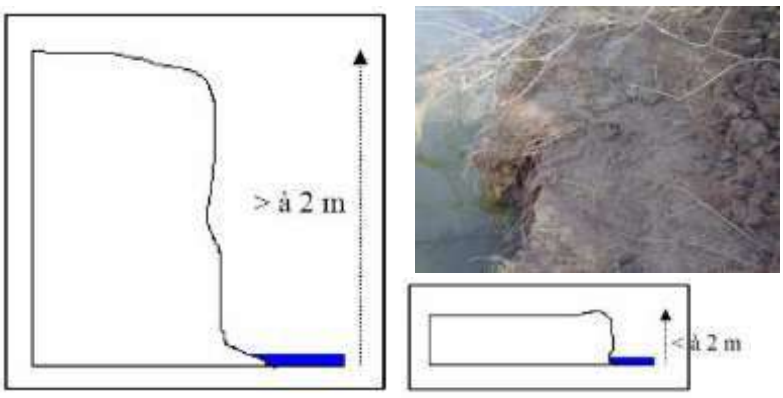


Figure 121. Berge haute en érosion et berge basse en érosion

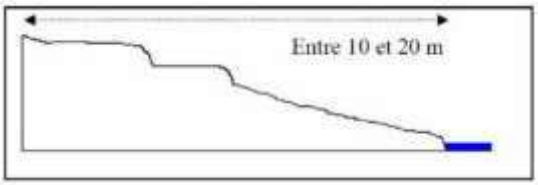


Figure 122. Berge mixte

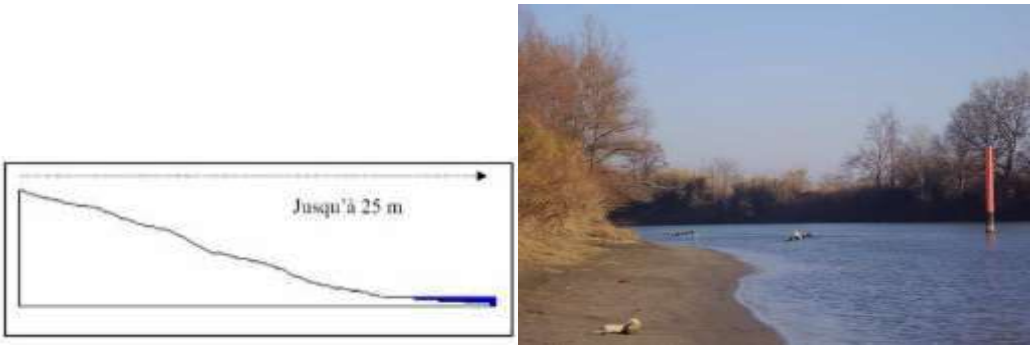


Figure 123. Berge en accumulation

Par ailleurs, cette étude a été limitée aux 17 km situés en amont. EGISeau dans le cadre de l'étude morphodynamique préalable au décorsetage limité des digues du Petit Rhône a étendu cette méthodologie à l'ensemble du Petit Rhône et ajouté les encoches d'érosion. Un extrait de ces résultats figure ci-dessous (Egiseau [K101]).

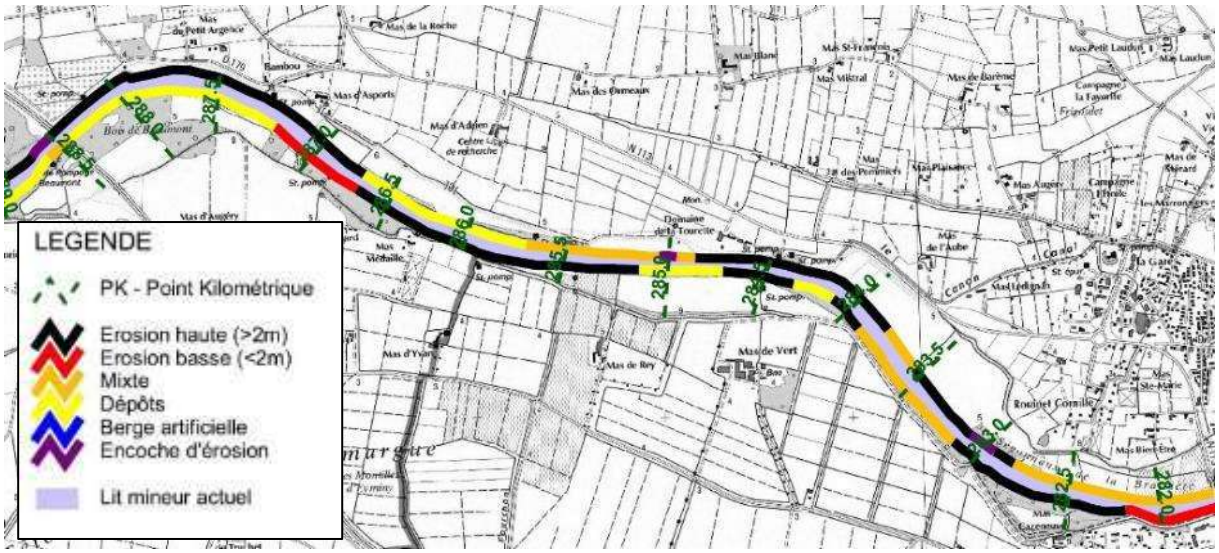


Figure 124. Typologie des berges en amont du Petit Rhône (EGISeau)

L'analyse qualitative des berges a également porté sur l'observation de la ripisylve et l'état de la végétation : est-elle pionnière ? Ou plutôt vieillissante ? Est-elle présente sur l'ensemble des berges ?

Cette typologie a été suivie d'une analyse factorielle.

Un profil tous les 100 m a été caractérisé en fonction de son type de berge par rapport à cinq variables définies ci-dessous.

Tableau 47. Variable utilisée pour l'analyse factorielle

Variables		Modalités	Acquisition des données
Aménagements	Panneaux de fond	Présence	Données CNR
		Absence	
	Ségonnal < à 25 m	Présence	D'après le Scan 25
		Absence	
Ecosystèmes	Ripisylve	Inexistante	Etude sur le terrain
		Pionnière	
		Mature	
	Lithologie	Sables fluviatiles	Carte géologique
		Limons, silts et sables (berges inondables)	
Morphométrique	Bathymétrie	Seuil : inf à 2 m	Bathymétrie 2004
		Mouille : sup à 5 m	
		Entre 2 et 5 m de profondeur	

Les berges du Petit Rhône sont majoritairement en phase d'érosion (type 1a et 1b). En effet, 43 % du linéaire étudié évoluent dans ce sens. Les berges en accumulation (type 3) représentent un peu plus d'un tiers de la partie observée. Les berges mixtes (type 2) concernent environ un cinquième de l'ensemble observé. Quant aux berges artificialisées, leur part est tellement négligeable, avec 107,6 m seulement, soit 0,6 %, qu'elle n'a pas été prise en compte pour l'analyse factorielle (figure ci-après)

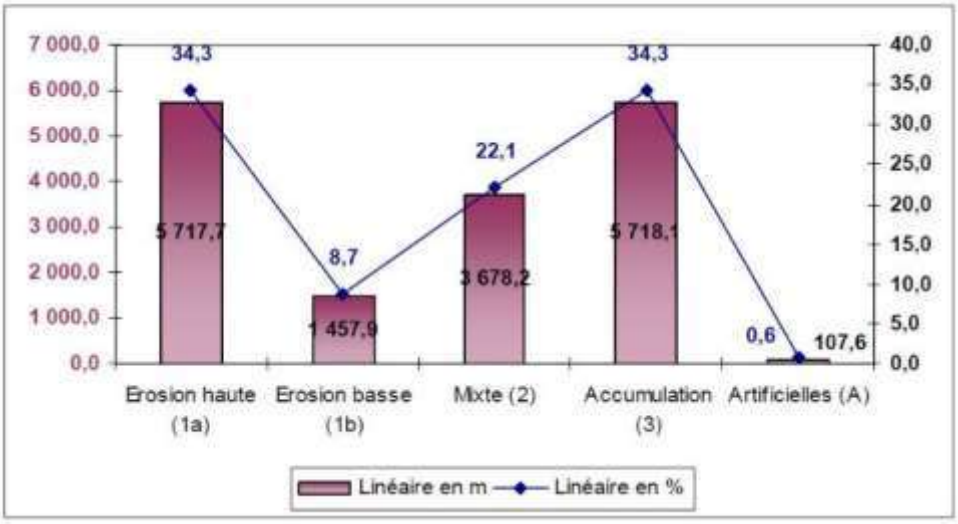


Figure 125. Répartition de la typologie des berges du Petit Rhône amont (Wiederkehr 2006)

Le Petit Rhône est une rivière à méandres. Même si la partie amont se distingue de l'aval par un indice de sinuosité plus faible, le cours d'eau reste sinueux. Or du coté convexe, l'énergie est moindre. Il y a donc sédimentation en direction de l'axe du chenal. Alors que sur la rive concave, les berges sont érodées. En fait, chaque crue agresse la rive concave, et donc entraîne son recul pendant que dans le même temps la rive convexe se construit par accrétion latérale (figure ci-dessous).

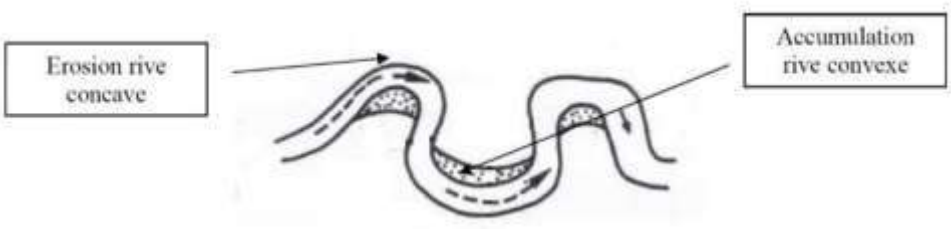


Figure 126. Evolution d'un méandre (Wiederkehr 2006)

Pourtant dans cette étude, les rives convexes sont dominées par des berges en érosion, qui représentent plus de 55 % de ce type de rive. Dans le même temps, les rives concaves sont représentées à part égales par des berges en érosion et en accumulation.

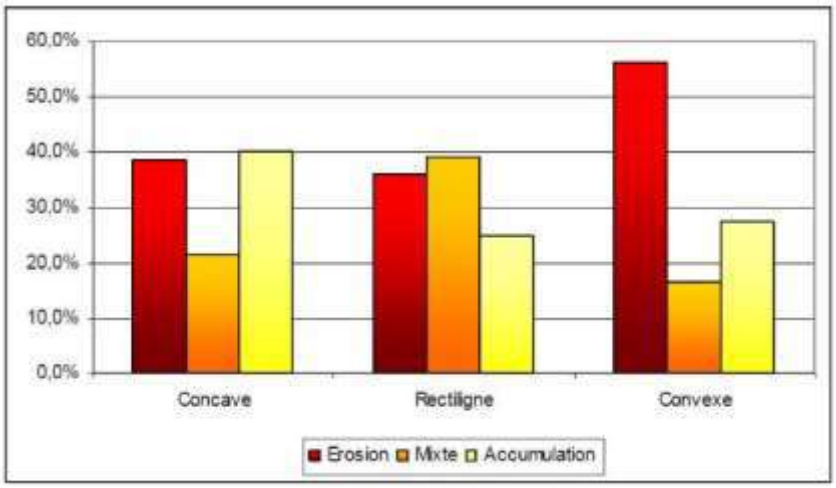


Figure 127. Répartition des types de berge en fonction du type de rive (Wiederkehr 2006)

Cette situation est paradoxale. Mais différents facteurs peuvent expliquer la présence de ce type de berge en rives convexe ou concave, notamment les aménagements qui ont conquis peu à peu le Petit Rhône. C'est l'intérêt de l'analyse factorielle qui a suivi et dont les conclusions figurent ci-dessous :

- les berges en accumulation sont recouvertes de végétation pionnière ;
- l'absence de panneaux de fond combinée à la présence d'une mouille influençant l'érosion de la berge ;
- paradoxalement, malgré la présence de panneaux de fond, les berges sont instables ;
- les berges en accumulation se situent dans des zones où le chenal est peu profond.
- les secteurs en érosion sont liés à l'apparition de mouille ;
- La présence de panneaux de fond permet de faire la distinction entre berges en érosion et berges en accumulation ;
- la présence de panneaux de fond fait partie des facteurs déterminants la sédimentation d'une berge ;
- Les variables prises en compte pour cette analyse ne permettent pas de caractériser correctement la formation des berges mixtes ;

- la rive concave est majoritairement en accumulation. Or l'évolution d'un méandre se fait théoriquement par accrétion de la rive convexe et érosion de la rive concave.

L'étude a montré également que la présence de panneaux de fond peut avoir des conséquences inattendues sur la stabilité des berges avoisinantes. L'étude montre qu'il y a sédimentation à l'arrière des équipements. Cette sédimentation entraîne un exhaussement de ce côté de la rive et en rive opposée, la création d'une mouille et une érosion de la berge (figure suivante). Certains secteurs qui à l'origine ne sont soumis à aucun risque d'érosion deviennent progressivement des zones à surveiller.

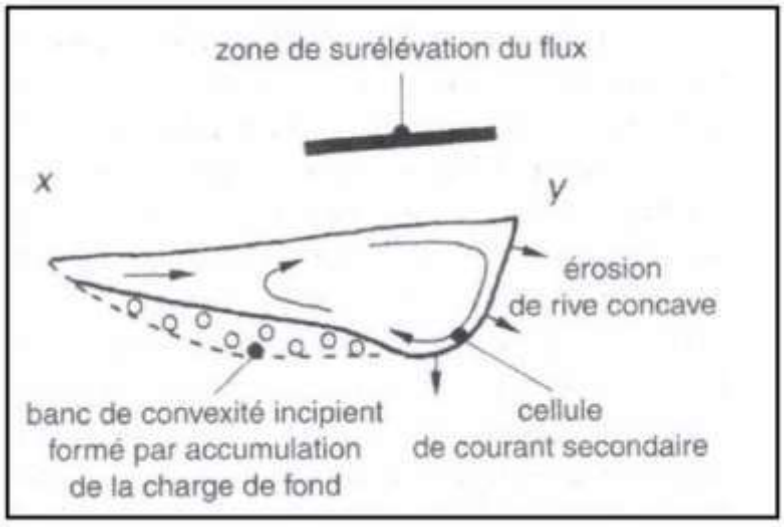


Figure 128. Création d'une mouille par accumulation en berge opposée (Bravard et Petit 2002)

Les berges les plus instables sont celles qui se situent en rive concave. Les panneaux de fond sont à l'origine de la sédimentation de la berge située à proximité. Mais ils sont également responsables de l'instabilité des berges situées à l'opposé par réajustement du chenal aux contraintes hydrauliques.

2.7 MORPHO-DYNAMIQUE DU GRAND RHONE

2.7.1 Présentation générale de la morpho-dynamique du Grand Rhône

Les données ci-dessous proviennent de l'étude morphodynamique réalisée par ARTELIA dans le cadre de l'étude du renforcement de la digue de Salin de Giraud.

Le Rhône dans sa partie avale (du PK 312 à l'embouchure) a été marqué par trois grandes étapes :

- Avant 1607, le Rhône dit « du Grand Passon » (voir carte géologique BRGM) ;
- Jusqu'en 1711, le Vieux Rhône ou Bras de Fer qui débouchait au Grau de la Dent ;
- Après 1711, par le tracé actuel, qui a connu encore des modifications plus locales dans sa partie terminale (voir carte géomorphologique du delta du Rhône ci-après).

Depuis, le tracé du fleuve a peu changé. Le 18ème et le 19ème siècle ont vu l'avancée progressive de l'embouchure. En 1896, le débouché au droit de Piémanson a été artificiellement détourné vers l'ouest vers l'embouchure actuelle pour limiter l'ensablement du golfe de Fos. La flèche de la Gracieuse s'est progressivement édifiée avec les apports sédimentaires du fleuve.

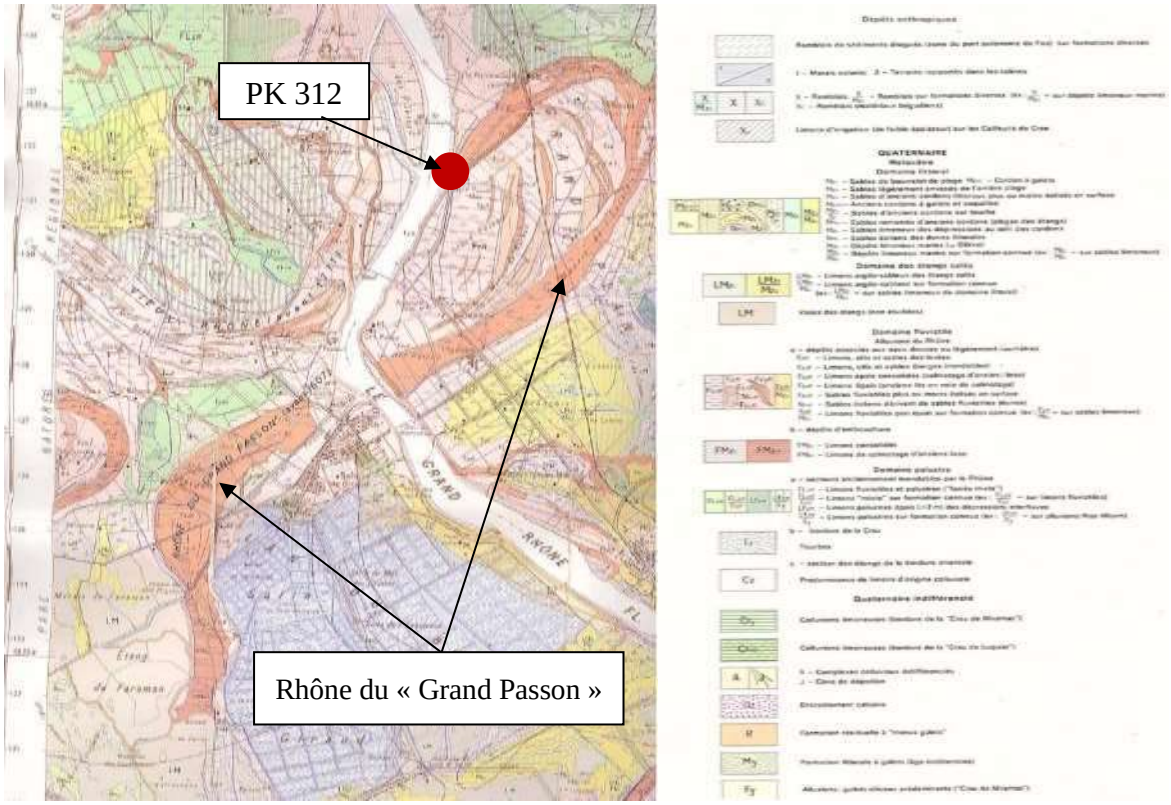


Figure 129. Carte géologique BRGM

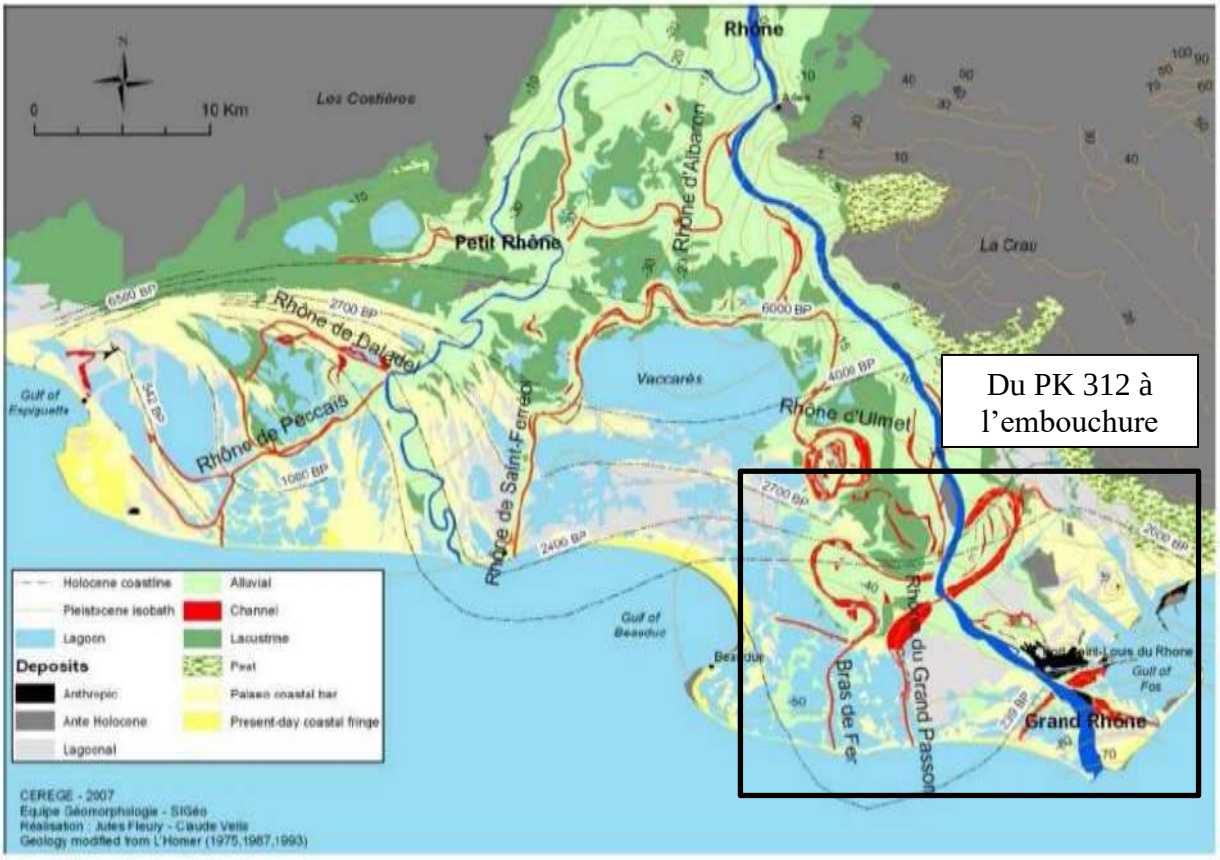


Figure 130. Carte géomorphologique du delta du Rhône (Arnaud- Fassetta)

2.7.2 Evolution en plan entre 1855 et 2007

Les évolutions en plan de 1855 à 1998 ont été étudiées en détail par Christelle Antonnelli dans sa thèse [M006]. Nous reprenons dans les quatre paragraphes suivants ses principales observations et conclusions relatives à ces différentes périodes.

Une synthèse de l'évolution en plan entre 1876 et 2007 est présentée dans le dernier paragraphe de cette section. Elle est basée sur l'exploitation de la superposition des cartes de 1876 et des prises de vue aériennes précises (FLIMAP, 2007).

a) Détail de la période 1855 à 1944

Le secteur d'Arles à la mer enregistre les plus fortes évolutions de largeur du chenal actif durant cette période, sans toutefois changer de style fluvial, qui reste à chenal unique faiblement sinueux.

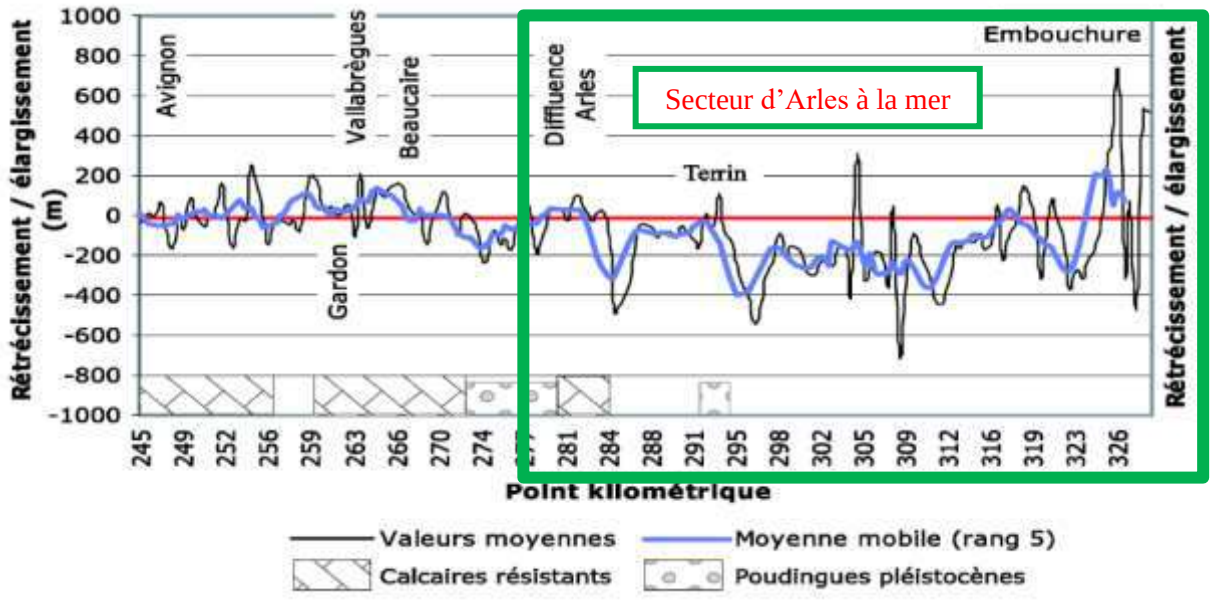


Figure 131. Evolution de la largeur du lit entre Avignon et la mer entre 1855 et 1944 (C. Antonelli 2002 [M006])

Le chenal passe de 597 mètres en 1855 à 467 mètres en 1944. Cette réduction de 167 mètres de la largeur moyenne (-1,88 m/an) masque la grande amplitude des valeurs qui oscillent de -713 m à + 313 m entre ces deux dates.

En effet, de la diffluence au PK 283,5 le chenal s'élargit de 21 mètres en moyenne. Cet élargissement qui s'effectue dans la traversée d'Arles, ne semble pas contraint par la lithologie locale (affleurement des calcaires résistants du rocher d'Arles).
Plus en aval, on note trois zones de contraction assez marquées : du PK 284 au PK 287, la réduction du chenal est liée à l'abandon d'un bras qui contournait un puissant banc actif sur la carte d'Etat-Major. De même, entre les PK 310 et 312, le rétrécissement du chenal actif (-55 %) est lié à la mise en place de l'île des Pilotes. En revanche, le rétrécissement constaté entre les PK 295 et 297 ne semble correspondre à aucune particularité géomorphologique ou lithologique même si elle est précédée du seuil de Terrin, située entre les PK 292,6 et 294,5.

Les bancs actifs présents dans le chenal de 1855 ont tous disparu. La plupart des bancs ont été évacués vers l'aval, contribuant à la progradation du trait de côte à l'embouchure (1500 m entre 1855 et 1944). D'autres ont été consolidés en îles (île de Saint-Pierre entre les PK 300 et 304, des Pilotes entre les PK 308 et 312 et de la Palissade au PK 325) du fait de l'aggradation sédimentaire et du développement de la ripisylve. Dans les secteurs soumis à réduction, on constate que le fleuve a tendance à se plaquer dans les rives concaves, ce qui contribue à augmenter le degré de sinuosité du chenal, bien que l'indice calculé ne varie presque pas (1,15 en 1855 et 1,16 en 1944). L'élargissement notable enregistré dans la partie la plus aval (+ 716 mètres au maximum) est dû à l'aménagement artificiel du Grau de Roustan, qui devient la seule embouchure du fleuve après 1890.

Le tableau suivant synthétise les vitesses moyenne de contraction mesurées sur les différents secteurs que nous venons de définir en proposant quelques découpages supplémentaires pour

des zones dont les modifications en plan n'étaient pas spectaculaires, mais dont les vitesses de contraction présentent une certaine originalité.

	Diffluence-Mer		
Zones	280,5-283,5	284-324,5	325-Embouchure
Vitesse²	+0,24 m/an	-2,07 m/an	+2,41 m/an
Vitesse de la section	**-1,54 m/an**		

Figure 132. Vitesses de contraction/expansion du chenal actif du Rhône de la diffluence à la mer entre 1855 et 1944. Source : Thèse Christelle Antonnelli [M006] (CEREGE 2002)

b) Détail de la période de 1944 à 1965/1970

La figure suivante présente l'évolution de la largeur du chenal entre ces deux dates depuis Avignon jusqu'à la mer.

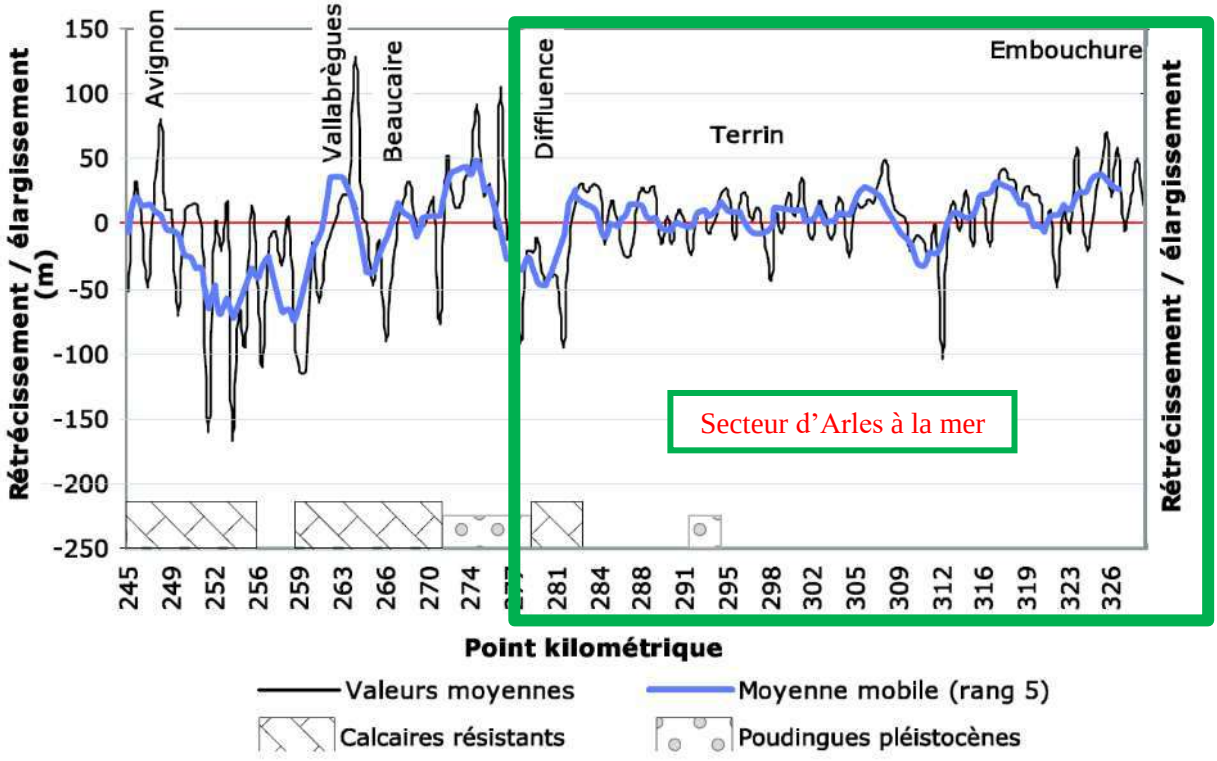


Figure 133. Evolution de la largeur du chenal de 1944 à 1965/70 d'Avignon à la mer. Source : Thèse Christelle Antonnelli [M006] (CEREGE 2002)

Au sud de la diffluence et jusqu'à l'embouchure, la largeur moyenne du chenal passe de 467 à 473 mètres, soit un accroissement moyen de 0,23 m/an entre 1944 et 1970. Mais cette tendance est en partie due à la disparition des bancs actifs probablement expulsés en mer (il n'en reste qu'un sur les 20 recensés en 1944) et à la réduction de la superficie des îles (-20 hectares au total) qui pourrait être liée au déstockage d'une partie de ces accumulations. En revanche, l'embouchure se stabilise et sa déviation vers le Sud-Est par l'édification d'une flèche sableuse montre que les dynamiques de la dérive littorale deviennent plus importantes

que celles de l'expulsion des sédiments fluviaux (Suanez, 1997 ; Sabatier, 2001). Le littoral devient « waves dominated », après avoir été pendant plusieurs siècles « fluvial dominated » (Sabatier, 2001).

c) Détail de la période de 1965/1970 à 1998

La figure suivante présente l'évolution de la largeur du chenal d'Avignon à la mer entre 1965/1970 et 1998. Le facteur essentiel de cette période réside dans la construction et la mise en service du barrage de Vallabrègues entre 1966 et 1970. Elle s'est accompagnée d'une série d'aménagements connexes tels la construction de digues et de canaux parallèles au canal de dérivation et au Vieux Rhône, la canalisation de la confluence Gardon-Rhône, l'enrochement des berges tout au long du canal d'amenée et du canal de fuite, etc….

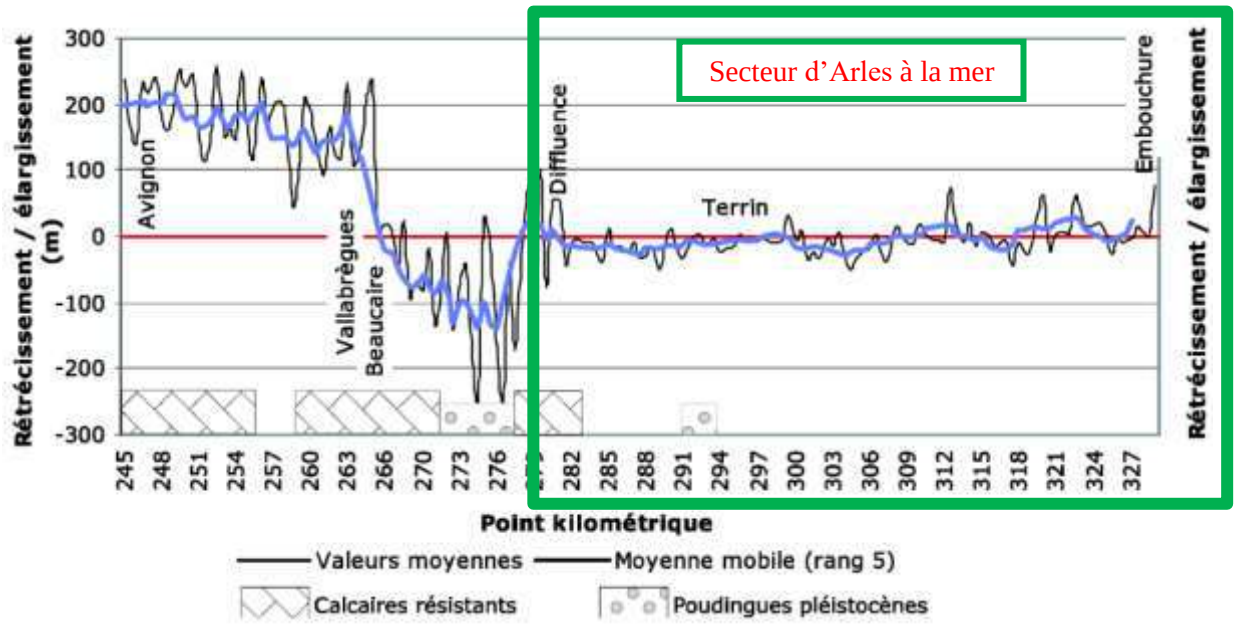


Figure 134. Evolution de la largeur du chenal de 1965-1970 à 1998 d'Avignon à la mer et de la moyenne mobile associée (rang 5). Source : Thèse Christelle Antonnelli [M006] (CEREGE 2002).

Sur le Grand Rhône, on constate que la tendance à l'élargissement, initiée entre 1944 et 1970, s'inverse puisque la largeur du chenal actif diminue de 471 à 466 mètres entre 1970 et 1998 (soit –0,18 m/an). On peut opposer la période 1970-1985 qui présente une contraction du chenal actif de -0,49 m/an en moyenne à la période 1985-1998 qui se caractérise par un élargissement du chenal au rythme moyen de 0,16 m/an. Ces chiffres situés dans la marge d'erreur de la mesure doivent cependant être pris avec précaution et démontrent au mieux la stabilité de la largeur du chenal sur ce secteur. En conclusion, on retiendra que l'évolution du chenal sur les 40 dernières années est essentiellement contrôlée par la mise en place du complexe hydroélectrique de Vallabrègues. Les impacts aval semblent cependant s'atténuer depuis une quinzaine d'années.

d) Conclusion des détails sur les périodes de 1855 à 1998

Des évolutions importantes ne touchent pas tous les secteurs selon la même intensité et les mêmes impacts. Alors que le secteur situé en amont du delta du Rhône semble être soumis à

une simplification de son style fluvial, dans le delta ce sont plutôt la contraction et la diminution du nombre d'îles et/ou de bancs qui dominent.

Au milieu du 20e siècle, le chenal du Grand Rhône poursuit sa contraction mais progresse également en mer (progradation de plus de 1 000 mètres).

A partir de 1944, jusqu'à la mise en place du barrage de Vallabrègues, les derniers bancs actifs présents dans le delta du Rhône disparaissent et les îles se fixent alors que l'embouchure, jusque-là en construction, semble passer sous domination des dynamiques marines.

Suite à la construction du barrage de Vallabrègues, les variations latérales du chenal dans le Delta sont très faibles, la largeur du chenal semble donc se stabiliser.

2.7.3 Synthèse de l'évolution en plan entre 1876 et 2007

La synthèse suivante est basée sur l'exploitation de la superposition des cartes de 1876 et des prises de vue aériennes précises (FLIMAP, 2007). Cette superposition a été effectuée par le service technique du SYMADREM. La précision du calage est estimée 5 à 10 m environ, selon les secteurs.

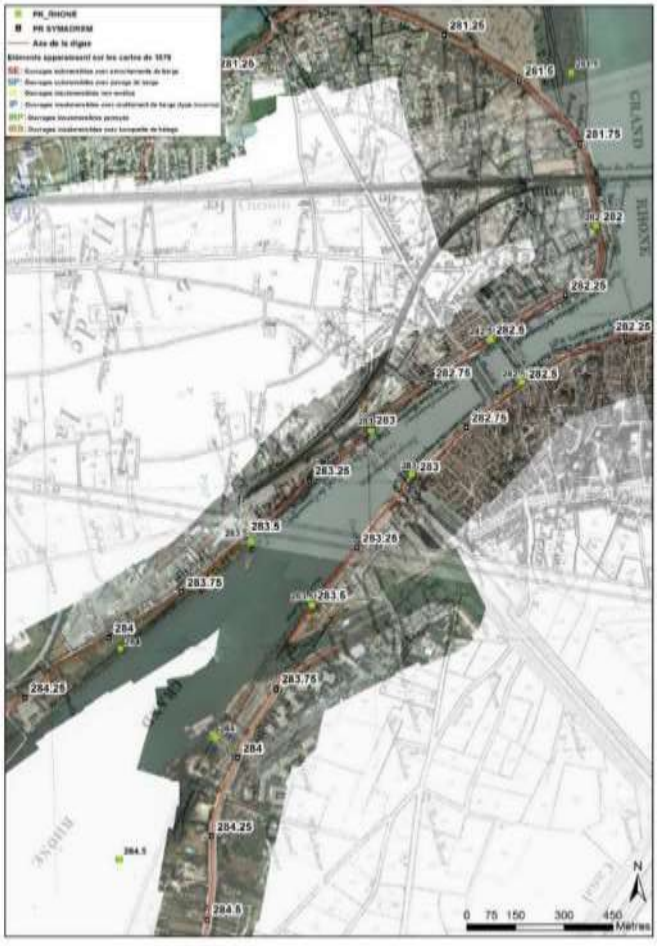


Figure 135. Exemple de superposition des cartes de 1876 et des prises de vue aériennes de 2007 en traversée d'Arles.

Différents termes ont été employés pour quantifier l'évolution entre 1876 et 2007 :

- Le terme stable signifie qu'il n'y a pas d'évolution notable entre 1876 et 2007 ;
- Le terme érosion signifie que la berge a été érodée ;
- Le terme accrétion signifie qu'il y a eu du dépôt. Cette accrétion peut-être quantifiée (accrétion de 30 m, par exemple). Cependant, il se peut qu'elle ne le soit pas. En effet, certaine prise de photo aérienne ne sont pas suffisamment éloignée de la berge pour pouvoir estimer l'accrétion ;
- Le terme indéfini signifie qu'il est impossible de déterminer s'il y a eu accrétion ou érosion, les prises de photo ne recoupant pas les cartes de 1876. Cependant, en utilisant d'autres images satellites, il est possible de conclure quant à l'évolution (accrétion, érosion, stabilité).

Les tableaux ci-dessous résument les observations ainsi faites à l'aide de la superposition.

Grand Rhône Rive Gauche

Tableau 48. Evolution en plan 1876-2007 - Rive gauche Grand Rhône PK 281,5 à 287

Grand Rhône Rive Gauche	Evolution	Commentaires	Largeur du ségonnal
281,5 – 283,75	stable	traversée d'Arles, de la diffluence jusqu'à l'embouquement du canal d'Arles à Fos	inférieure à 20 m (quais)
284	accrétion de 30 m	quartier de Barriol	supérieure à 20 m
284,25	accrétion de 75 m		
284,5 – 287	indéfini (accrétion)	indéfini en utilisant la superposition des cartes de 1876 et photos aériennes de 2007 (photo aérienne non suffisamment éloignée de la berge pour pouvoir qualifier l'évolution)	supérieure à 20 m

On constate à l'aide d'images satellites Google, qu'une ancienne île de 1876 ainsi que sa lône ont disparu et ont été remplacées par un espace végétalisé. On peut donc déduire qu'il y a eu de l'accrétion. Cette observation a également été effectuée par Christelle Antonnelli dans sa thèse [M006] (voir détail de la période de 1855 à 1944).

Tableau 49. Evolution en plan 1876-2007– Rive gauche Grand Rhône PK 287,25 à 288,75

Grand Rhône Rive Gauche	Evolution	Commentaires	Largeur du ségonnal
287,25 – 288,75	indéfini (stable)	indéfini en utilisant la superposition des cartes de 1876 et photos aériennes de 2007 (photo aérienne non suffisamment éloignée de la berge pour pouvoir qualifier l'évolution)	supérieure à 20 m

On constate à l'aide d'images satellites Google, qu'une île était présente au milieu du Rhône avec présence d'une lône. L'île a probablement été expulsée en mer (cf. détail de la période de 1944 à 1965/1970). La berge de l'ancienne lône n'a pour autant pas subit d'érosion ni d'accrétion, constituant ainsi la berge actuelle. On peut donc déduire que l'évolution des berges est stable, seule l'île a disparu.

Tableau 50. Evolution en plan 1876-2007 – Rive gauche Grand Rhône PK 289 à 299,25

Grand Rhône Rive Gauche	Evolution	Commentaires	Largeur du ségonnal
289 – 289,75	stable	aucun	supérieure à 20 m
289,75	érosion de 15 m	érosion ponctuelle	supérieure à 20 m
290	érosion de 10 m		
290,25	accrétion de 10 m	aucun	supérieure à 20 m
290,5 – 293	stable	aucun	inférieure à 20 m
293,25 – 294,75	stable	gestionnaire : Conseil Départemental des Bouches-du-Rhône	inférieure à 20 m
295 – 299,25	indéfini (accrétion)	indéfini en utilisant la superposition des cartes de 1876 et photos aériennes de 2007 (photo aérienne non suffisamment éloignée de la berge pour pouvoir qualifier l'évolution)	supérieure à 20 m

On constate sur les cartes de 1876 que des digues/épis de longueurs variables avaient été édifiés dans le fleuve créant ainsi des îles et des lônes (digues des bécasses, digues de Cannonge par exemple). A l'aide d'images satellites Google, on constate que les lônes ont été remplacées par des espaces végétalisés (ségonnal). On peut donc déduire qu'il y a eu de l'accrétion. Cette observation a également été effectuée du PK 295 au PK 297 (GRG) par Christelle Antonnelli dans sa thèse (CEREGE 2002) (voir détail de la période de 1855 à 1944).

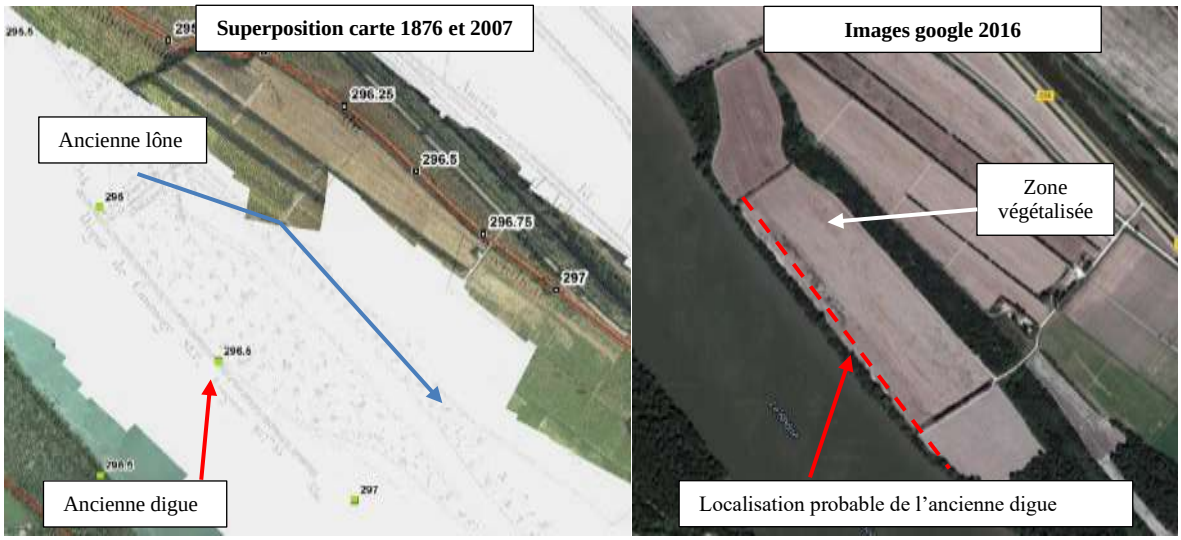


Figure 136. Evolution en plan PK 295 à 297 (GRG)

Tableau 51. Evolution en plan 1876-2007 – Rive gauche Grand Rhône PK 299,5 à 309,75

Grand Rhône Rive Gauche	Evolution	Commentaires	Largeur du ségonnal
299,5 – 300,25	stable	aucun	supérieure à 20 m
300,5 – 309,75	indéfini (accrétion)	indéfini en utilisant la superposition des cartes de 1876 et photos aériennes de 2007 (photo aérienne non suffisamment éloignée de la berge pour pouvoir qualifier l'évolution)	supérieure à 20 m

Comme vu précédemment, on constate sur les cartes de 1876 que des digues/épis de longueurs variables avaient été édifiés dans le fleuve, créant ainsi des îles et des lônes (digue de Saint-Pierre, digue de Mas Thibert etc…). A l'aide d'images satellites Google, on constate que les anciennes lônes ont été remplacés par des espaces végétalisés (ségonnal). Les îles présentent au milieu du Rhône ont quant à elles toutes disparues. On peut donc déduire qu'il y a eu de l'accrétion.

Tableau 52. Evolution en plan 1876-2007 – Rive gauche Grand Rhône PK 310 à 313

Grand Rhône Rive Gauche	Evolution	Commentaires	Largeur du ségonnal
310	érosion de 15 m	érosion linéaire	supérieure à 20 m
310,25	érosion de 30 m		
310,5 – 311	stable	ancienne digue de Parade	supérieure à 20 m et très localement inférieure à 20 m
311,25	érosion de 50 m	les érosions concernent d'anciens ouvrages présents dans le Rhône et non directement la berge (voir figure ci-dessous)	supérieure à 20 m
311,5	érosion de 75 m		
311,75	érosion de 100 m		
312	érosion de 20 m		
312,25	érosion de 20 m	érosion locale	inférieure à 20 m
312,5	érosion de 40 m	érosion locale d'un ancien épi (épi de Bramaire) confirmée visuellement lors de l'inspection des berges par voie nautique ; Idem disparition de l'ancien épi de Bramaire	inférieure à 20 m
312,75	stable	épi des pilotes L'épi des pilotes est toujours présent (vu lors de l'inspection visuelle des berges en mars 2015)	inférieure à 20 m
313	érosion de 20 m	érosion linéaire confirmée par l'inspection visuelle des berges en mars 2015	inférieure à 20 m

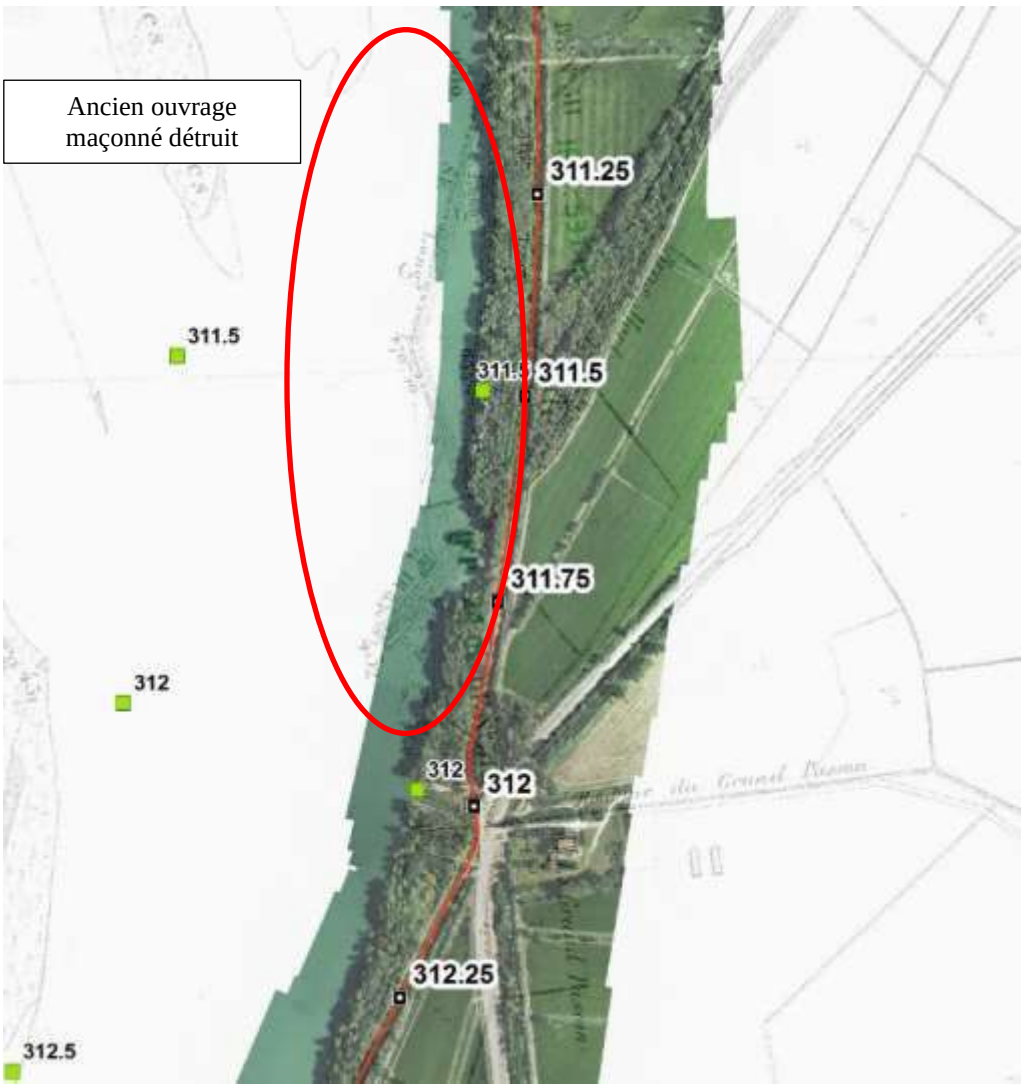


Figure 137. Evolution en plan - zoom entre les PK 311 et 312 (GRG)

Tableau 53. Evolution en plan 1876-2007 – Rive gauche Grand Rhône PK 313,25 à 322,25

Grand Rhône Rive Gauche	Evolution	Commentaires	Largeur du ségonnal
313,25 – 315,5	stable	malgré une évolution stable, des phénomènes d'érosion ont été constatés lors de l'inspection visuelle des berges par voie nautique	inférieure à 20 m
315,75 - 316	stable	aucun	supérieure à 20 m
316,25 – 316,5	indéfini	création du canal de navigation du Rhône au port de Fos sur Mer	aucun ségonnal
316,75 – 317,75	érosion de 10 m	des phénomènes d'érosion ont été constatés lors de l'inspection visuelle des berges par voie nautique	inférieure à 20 m
318	érosion de 20 m		
318,25 - 319	stable	aucun	supérieure à 20 m
319,25 – 322,25	indéfini (accrétion)	indéfini en utilisant la superposition des cartes de 1876 et photos aériennes de 2007 (photo aérienne non suffisamment éloignée de la berge pour pouvoir qualifier l'évolution)	supérieure à 20 m

On constate à l'aide d'images satellites Google, qu'une ancienne île de 1876 (île de François) a disparu et a été remplacée par un espace végétalisé. On peut donc déduire qu'il y a eu de l'accrétion.

Tableau 54. Evolution en plan 1876-2007 – Rive Gauche Grand Rhône PK 322,5 à 323,25

Grand Rhône Rive Gauche	Evolution	Commentaires	Largeur du ségonnal
322,5 – 323,25	stable	traversée de Port-Saint-Louis-Du-Rhône	inférieure à 20 m

Grand Rhône Rive Droite

Tableau 55. Evolution en plan 1876-2007 – Rive Droite Grand Rhône PK 281,5 - 286

Grand Rhône Rive Droite	Evolution	Commentaires	Largeur du ségonnal
281,5 – 284	stable	traversée d'Arles, de la diffluence jusqu'à l'embouquement du canal d'Arles à Fos	inférieure à 20 m (quais)
284 - 286	indéfini (accrétion)	indéfini en utilisant la superposition des cartes de 1876 et photos aériennes de 2007 (photo aérienne non suffisamment éloignée de la berge pour pouvoir qualifier l'évolution)	supérieure à 20 m (Ancienne Ile de la Cape)

On constate à l'aide d'images satellites Google, qu'une ancienne île de 1876 ainsi que sa lône (Ile de la Cape) ont disparu et ont été remplacées par un espace végétalisé. On peut donc déduire qu'il y a eu de l'accrétion.

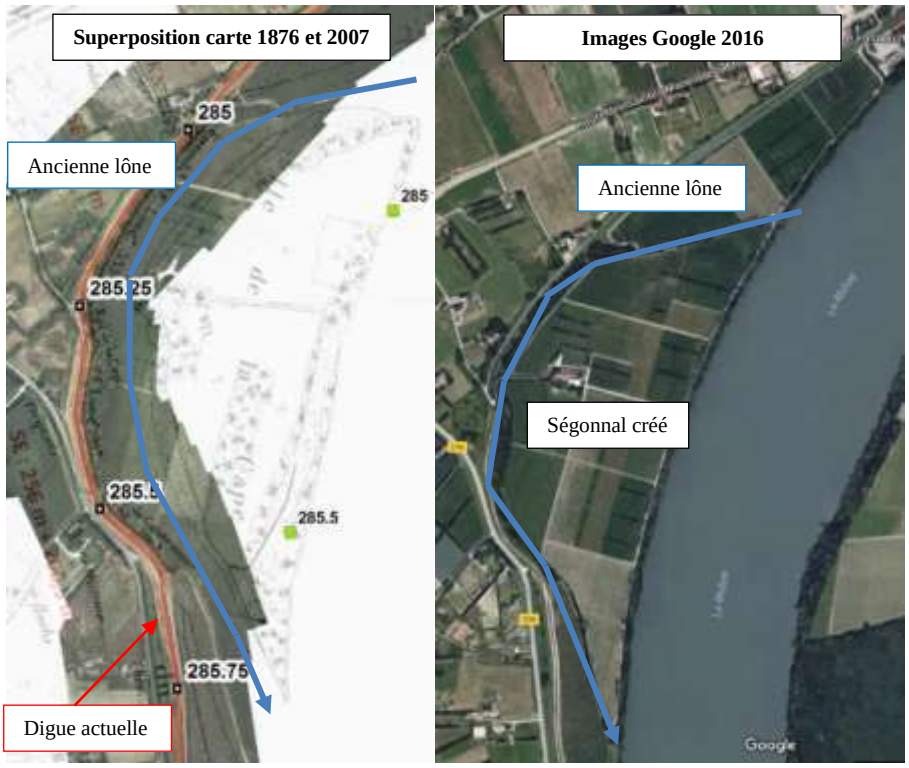


Figure 138. Evolution en plan PK 284 à 286 (GRD)

Tableau 56. Evolution en plan 1876-2007 – Rive Droite Grand Rhône PK 286 – 292,75

Grand Rhône Rive Droite	Evolution	Commentaires	Largeur du ségonnal
286 – 290,5	stable	aucun	inférieure à 20 m
290,5 - 291	accrétion de 10 m	grâce à d'anciens épis	supérieure à 20 m
291 – 292,75	accrétion de 50 m à 200 m	disparition d'une lône et création d'un ségonnal	supérieure à 20 m

On constate à l'aide d'images satellites Google, qu'une ancienne île de 1876 ainsi que sa lône (Ile de la Gabarre) ont disparu et ont été remplacées par un espace végétalisé. On peut donc déduire qu'il y a eu de l'accrétion. La superposition des cartes de 1876 et 2007 montrent également que l'ancienne île s'est translatée de 50 mètres environ vers l'Ouest. Il y a donc eu de l'érosion en même temps que la lône s'est comblée. L'inspection visuelle des berges n'a pas été effectuée sur ce secteur car le ségonnal est supérieur à 20 mètres. Cette probable érosion n'a donc pas été observée.

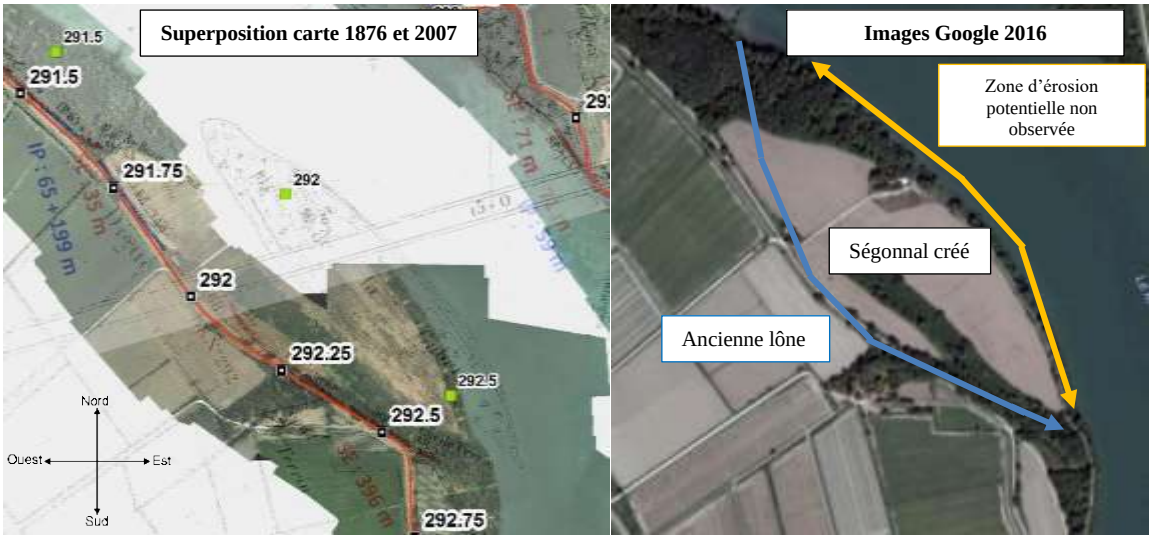


Figure 139. Evolution en plan PK 291 à 292,75 (GRD)

Tableau 57. Evolution en plan 1876-2007 – Rive Droite Grand Rhône PK 292,75 - 298

Grand Rhône Rive Droite	Evolution	Commentaires	Largeur du ségonnal
292,75 – 293,25	érosion de 30 m	aucun	supérieure à 20 m
293,25 – 296,5	stable	présence d'anciennes digues (Augéry, Beaujeu)	supérieure à 20 m
296,5 – 296,75	accrétion de 40 m	grâce à ancien épis de Beaujeu. De l'érosion est néanmoins constatée (inspection visuelle nautique)	supérieure à 20 m
296,75 – 297,25	érosion	voir remarques ci-	inférieure à 20 m

		dessous	
297,25 – 298	érosion	phénomène similaire que précédemment	inférieure à 20 m

En comparant la carte de 1876 et celle de 2007 on remarque que globalement, il y a eu de l'accrétion du PK 296,75 au PK 297,25 (GRD). Cet apport de matériau a été rendu possible par la création : d'une digue (en amont de cette zone), de l'épi de Beaujeu (au droit de cette zone) et de la digue de l'armellière (en aval de la zone). A l'heure actuelle, on peut dire que cette accrétion n'a plus lieu et qu'un phénomène d'érosion est en cours. On note la présence d'arbres anciens au droit des zones érodées, ce qui suggère qu'à une époque la zone disposée de matériaux permettant leur pousse. Cf. illustration ci-dessous.

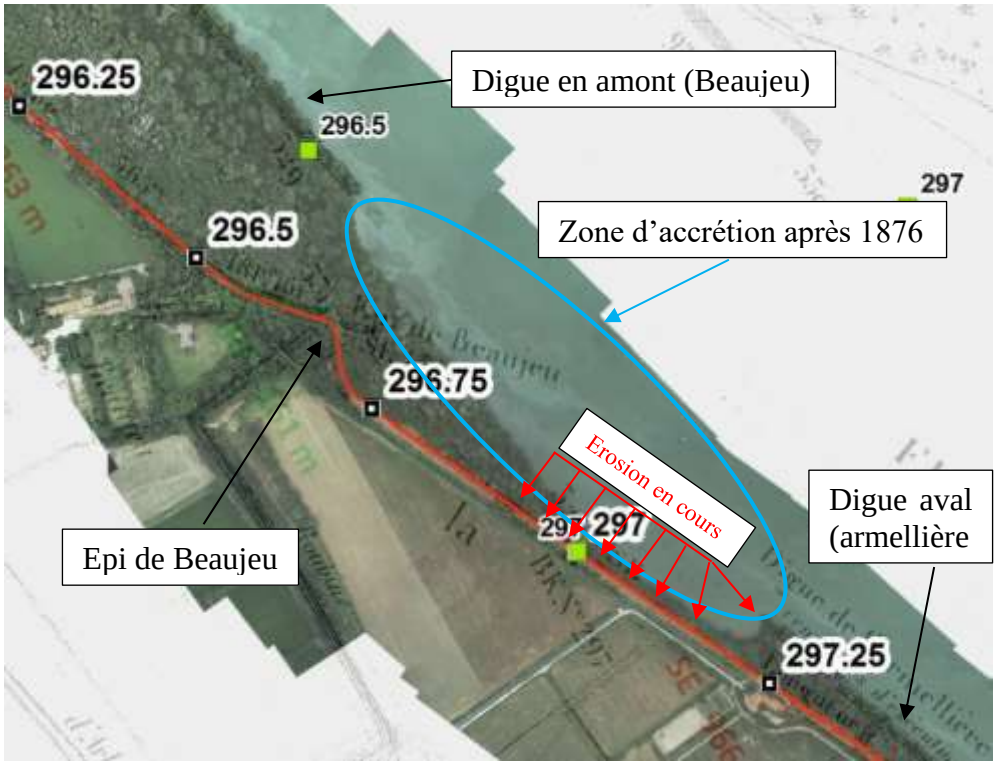


Figure 140. Illustration de l'évolution en plan PK 296,75 à 297,25 (GRD)

Figure 141. Zone d'érosion au droit du PK 297 (GRD)

Tableau 58. Evolution en plan 1876-2007 – Rive Droite Grand Rhône PK 298 – 303,75

Grand Rhône Rive Droite	Evolution	Commentaires	Largeur du ségonnal
298 – 301,5	accrétion de 50 à 200 m	grâce à la création de « la digue de Giraud »	supérieure à 20 m
301,5 – 303,75	stable	présence d'érosion ponctuelle GRD 301,7	inférieure à 20 m (GRD 301,5 – 302) supérieure à 20 m (GRD 302 – 303,75)

On constate à l'aide d'images satellites Google, qu'une île était présente au milieu du Rhône avec présence d'une lône entre le PK 300,5 et 301. L'île a probablement été expulsée en mer (cf. détail de la période de 1944 à 1965/1970).

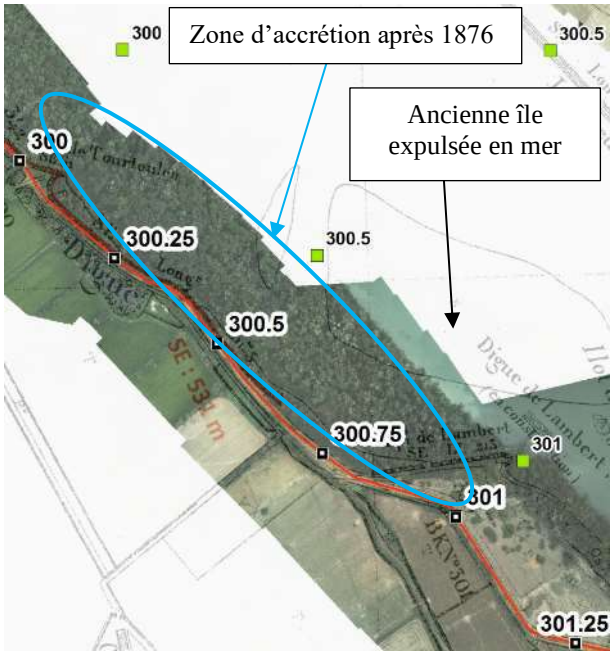


Figure 142. Ile expulsée en mer PK 300,5 - 301 (GRD)

Tableau 59. Evolution en plan 1876-2007 – Rive Droite Grand Rhône PK 303,75 – 313,75

Grand Rhône Rive Droite	Evolution	Commentaires	Largeur du ségonnal
303,75 – 305,5	accrétion de 50 à 200 m	grâce à la création de « la digue du mouton »	supérieure à 20 m
305,5 – 307,25	érosion de 30 à 75 m	aucun	inférieure à 20 m
307,25 – 313,75	accrétion (indéfini)	indéfini en utilisant la superposition des cartes de 1876 et photos aériennes de 2007 (photo aérienne non suffisamment éloignée de la berge pour qualifier l'évolution)	supérieure à 20 m

On constate à l'aide d'images satellites Google, que de nombreuses anciennes îles de 1876 ainsi que leurs lônes ont disparu et ont été remplacées par un espace végétalisé. On peut donc déduire qu'il y a eu de l'accrétion. Cette observation a également été effectuée par Christelle Antonnelli dans sa thèse (CEREGE 2002) (voir détail de la période de 1855 à 1944).

Tableau 60. Evolution en plan 1876-2007 – Rive Droite Grand Rhône PK 313,75 - 318

Grand Rhône Rive Droite	Evolution	Commentaires	Largeur du ségonnal
313,75 - 315	érosion de 40 à 90 m	aucun	inférieure à 20 m
315 - 317	stable	aucun	inférieure à 20 m
317 – 317,5	accrétion de 70 m	aucun	supérieure à 20 m
317,5 – 318	accrétion de 20 m	érosion en cours (voir ci-dessous)	inférieure à 20 m

En utilisant la superposition des cartes de 1876 et des photos aériennes de 2007, on constate qu'il y a une de l'accrétion (20 mètre environ). Cependant, l'inspection visuelle par voie nautique de mars 2015 montre qu'actuellement le secteur subit des phénomènes d'érosion.

Tableau 61. Evolution en plan 1876-2007 – Rive Droite Grand Rhône PK 318 – 323,5

Grand Rhône Rive Droite	Evolution	Commentaires	Largeur du ségonnal
318 – 318,25	stable	aucun	inférieure à 20 m
318,25 – 320,25	érosion de 15 à 40 m	aucun	supérieure à 20 m (GRD 319 – 319,5) sinon inférieure à 20 m
320,25 - 321	stable	aucun	inférieure à 20 m
321 – 322,5	érosion de 15 à 140 m	aucun	inférieure à 20 m
322,5 – 323,5	érosion de 10 m	aucun	supérieure à 20 m

Figure 143. Zone d'érosion importante PK 321 – 322,5 (GRD)

2.7.4 Evolution du profil en long entre 1876 et 2007

Les modifications observées en 2D (surfaces) depuis une cinquantaine d'années sont modestes, comme nous venons de le voir. On peut se demander si cette stabilité apparente ne s'accompagne pas d'approfondissement du chenal. Les évolutions de profil en long suivantes ont été analysées par Christelle Antonelli dans sa thèse (CEREGE 2002) [M006] et par le service hydraulique de SAFEGE Environnement [M013] dont les données principales sont extraites de la thèse de Gilles ARNAUD-Fassetta [M005]. Les commentaires ci-dessous sont issus de ces diverses sources.

a) Evolution du profil en long entre 1907 et 1967

Les graphiques suivants précisent les profils longitudinaux du Grand Rhône, ainsi que leur évolution dans le temps entre 1907 et 1967.

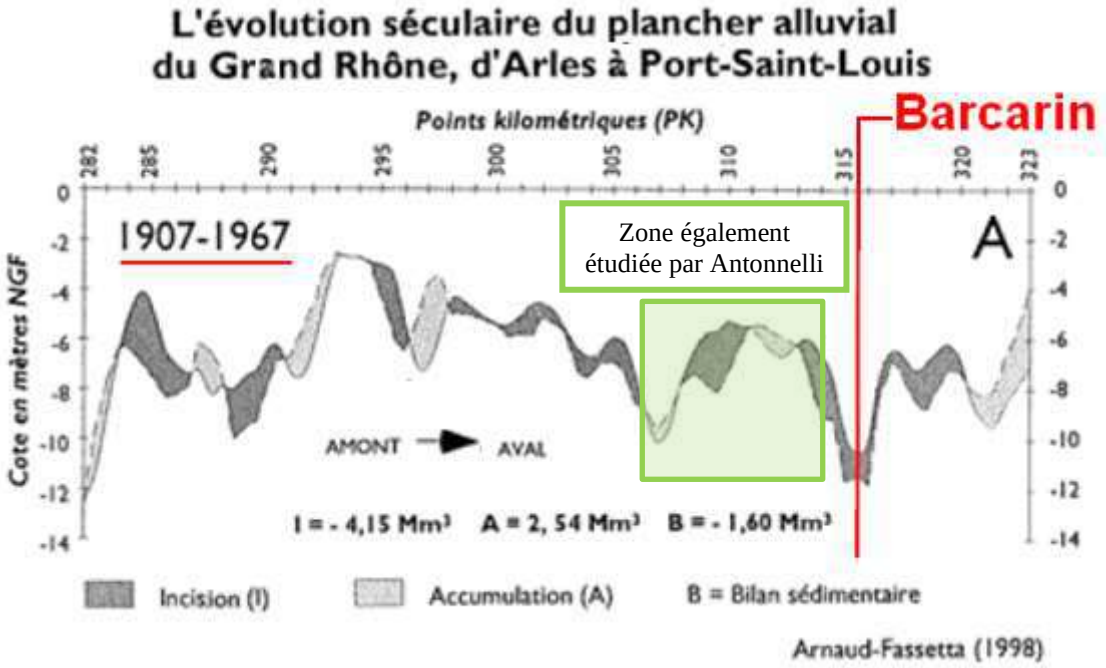


Figure 144. Evolution séculaire du plancher alluvial du Rhône (Source : Synthèse de Thèse : Quatre mille ans d'histoire Hydrologique dans le Delta du Rhône – Gilles ARNAUD-FASSETTA – 2000 – Edition GRAFIGEO)

Le Grand Rhône est caractérisé par une succession de seuils et de mouilles. On constate que l'érosion affecte plutôt les seuils que les mouilles.

Dans sa thèse, Christelle Antonnelli a également étudié l'évolution du profil en long entre les dates 1908 et 1965, mais seulement entre les PK 306 et 314 (zone verte dans le graphique précédent). La figure suivante représente les valeurs d'incision moyenne calculées en fonction de leur localisation sur le profil en long de 1908 (Talweg).

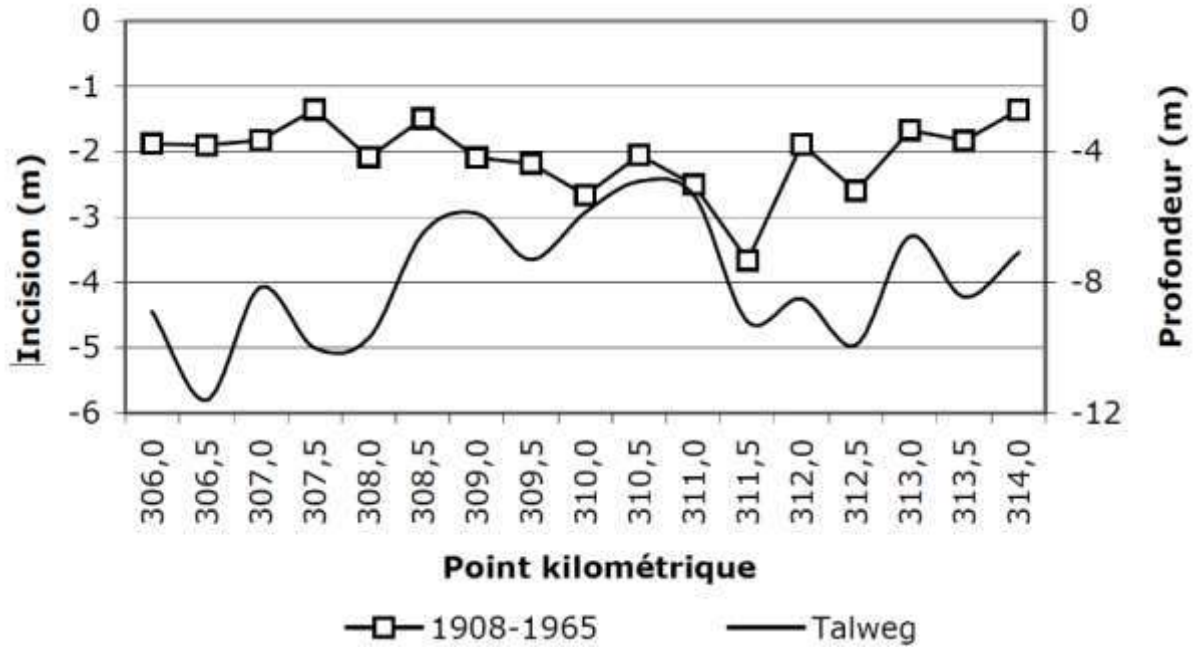


Figure 145. Distribution spatiale de l'incision moyenne mesurée sur le site aval du Grand Rhône entre 1908 et 1965 (Talweg de 1908) (source CEREGE 2002 / C. Antonelli)

La comparaison des profils de 1908 et de 1965 met en évidence une incision moyenne de 2,06 mètres, comprise entre 1,36 et 3,67 mètres en moyenne du PK 306 au PK 314. Les valeurs d'incisions observées par Antonneli sont légèrement différentes de celles de Fassetta. De plus, Antonelli ne retrouve pas une zone d'accumulation franche comme a pu le montré Fassetta. Cette différence est probablement due à la légère différence d'espace temporel (1907/1967 pour Fassetta et 1908/1965 pour Antonelli). Cependant, le phénomène d'incision est bien omniprésent.

La figure ci-dessous, réalisée du PK 306 au PK 314 permet de visualiser les variations latérales des phénomènes d'incision-accumulation affectant les profils en travers étudiés.

Elle permet de constater qu'à l'échelle du profil en travers, les mouvements verticaux peuvent être localement plus importants que la moyenne calculée. Par exemple, l'incision moyenne mesurée dans le chenal du profil PK 311,5 (encadré rouge ci-dessous) est de 3,66 mètres alors que l'incision maximale sur ce même profil est de 15,1 mètres et que l'accumulation, certes très locale, atteint 2,65 mètres.

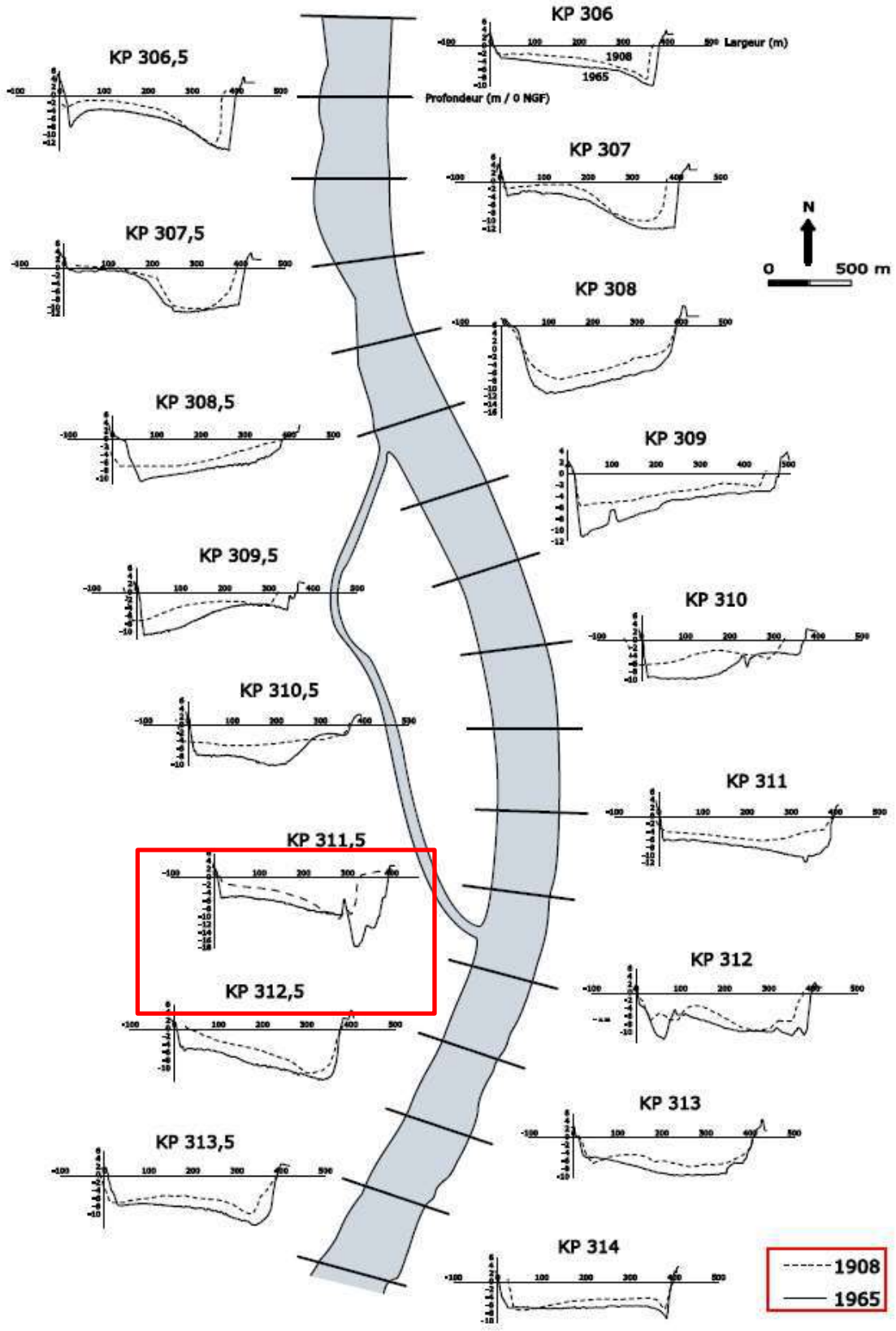


Figure 146. Mise en évidence de la variabilité latérale et longitudinale des processus d'incision/accumulation observés entre 1908 et 1965 sur le secteur aval du Grand Rhône. (source CEREGE 2002 / C. Antonelli)

b) Evolution du profil en long entre 1964 et 1999

Dans sa thèse, Christelle Antonnelli a également étudié l'évolution du profil en long entre les dates 1964 et 1999 du PK 292 au PK 296 et du PK 306 au PK 314.

- **Secteur PK 292 au PK 296**

La superposition des profils de 1964 et de 1999 permet de mesurer une incision moyenne de 0,42 mètre du PK 292 au PK 296. Cette moyenne est cependant comprise entre une valeur maximale d'incision de 1,08 mètre (PK 294,8) et une valeur maximale d'accumulation de 0,17 mètre (PK 293,3). La figure suivante représente l'évolution spatiale de ces valeurs. D'une manière générale, on constate que l'incision est plus marquée sur la partie amont entre les PK 292 et 292,6 et sur la partie aval du PK 294,5 au PK 296. La partie centrale, qui correspond au seuil de Terrin est peu affectée par l'incision entre ces deux dates. Au contraire, on constate par endroit une légère tendance à l'accrétion (comprise entre 3 et 17 centimètres).

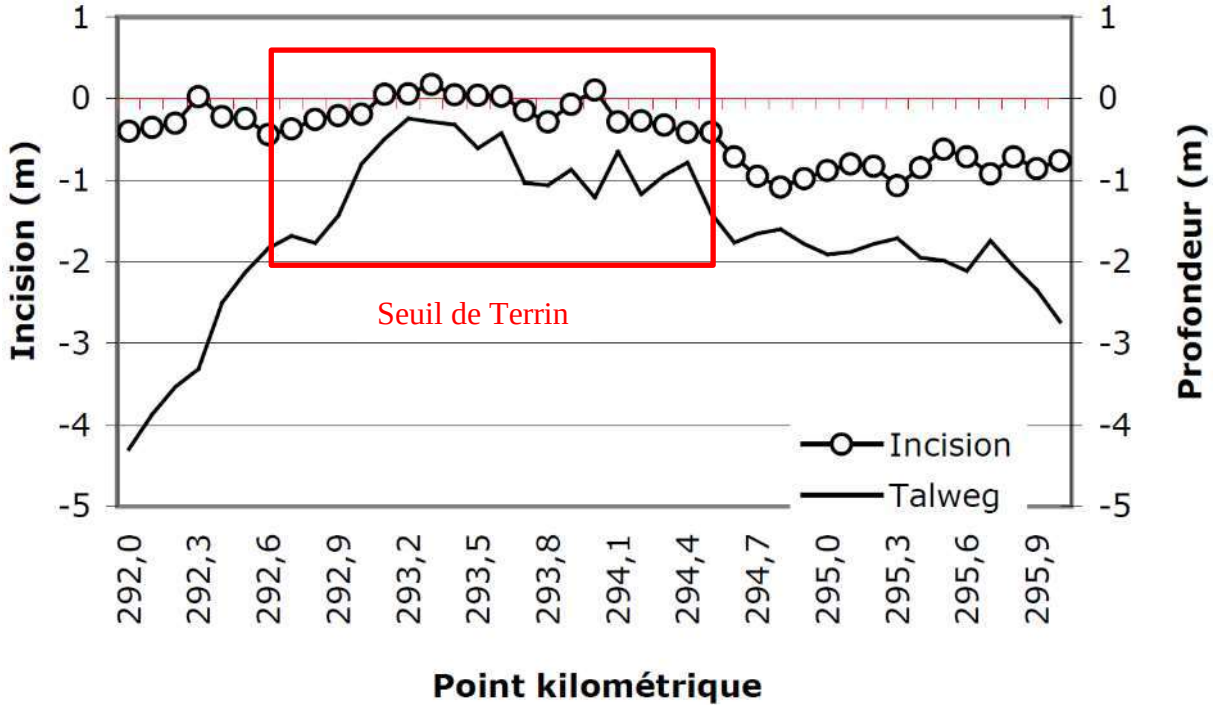


Figure 147. Evolution de l'incision mesurée entre 1964 et 1999 sur le profil en long du PK 292 au PK 296 du Grand Rhône. (source CEREGE 2002 / C. Antonelli)

Une campagne intermédiaire a été levée en 1986 et permet de détailler plus précisément l'évolution sur ce secteur en opposant une période hydrologique sans grandes crues (entre 1965 et 1986, pas d'événements supérieurs à 7 500 m³/s à Beaucaire) à une période plus active qui a enregistré le passage de 4 crues supérieures à 7 500 m³/s entre 1986 et 1999. On retiendra que ce secteur (PK 292 au PK 296) enregistre une incision du chenal durant les 35 dernières années du 20ème siècle. Toutefois, les ajustements verticaux qui s'y produisent sont variables dans l'espace et dans le temps : d'une part, le seuil est moins affecté par l'incision que les mouilles qui l'encadrent, quelle que soit la période examinée. D'autre part, les taux d'incision semblent s'atténuer, voire localement s'inverser durant la période la plus récente

(1986-1999) : les valeurs moyennes mesurées sur l'ensemble du secteur passent de –1,58 cm/an entre 1964 et 1986 à -0,5 cm/an entre 1986 et 1999.

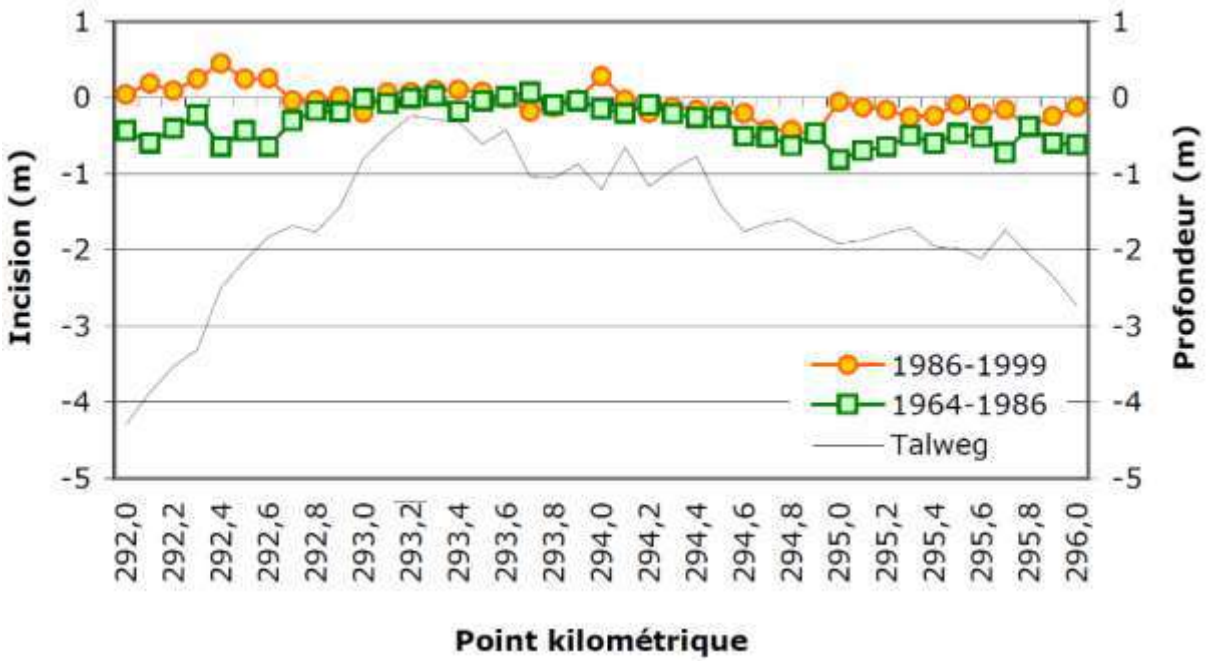


Figure 148. Evolution de l'incision moyenne mesurée sur les profils en travers entre 1964 et 1986 et entre 1986 et 1999. (source CEREGE 2002 / C. Antonelli)

Cependant, ces évaluations doivent être nuancées, en prenant en compte les déroctages effectués pour l'approfondissement du chenal de navigation, imposés par l'évolution des normes européennes du gabarit des péniches.

- **Secteur PK 306 au PK 314**

L'évolution du profil en long entre les dates 1965 et 1999 du PK 306 au PK 314 est donnée dans le graphique ci-dessous.

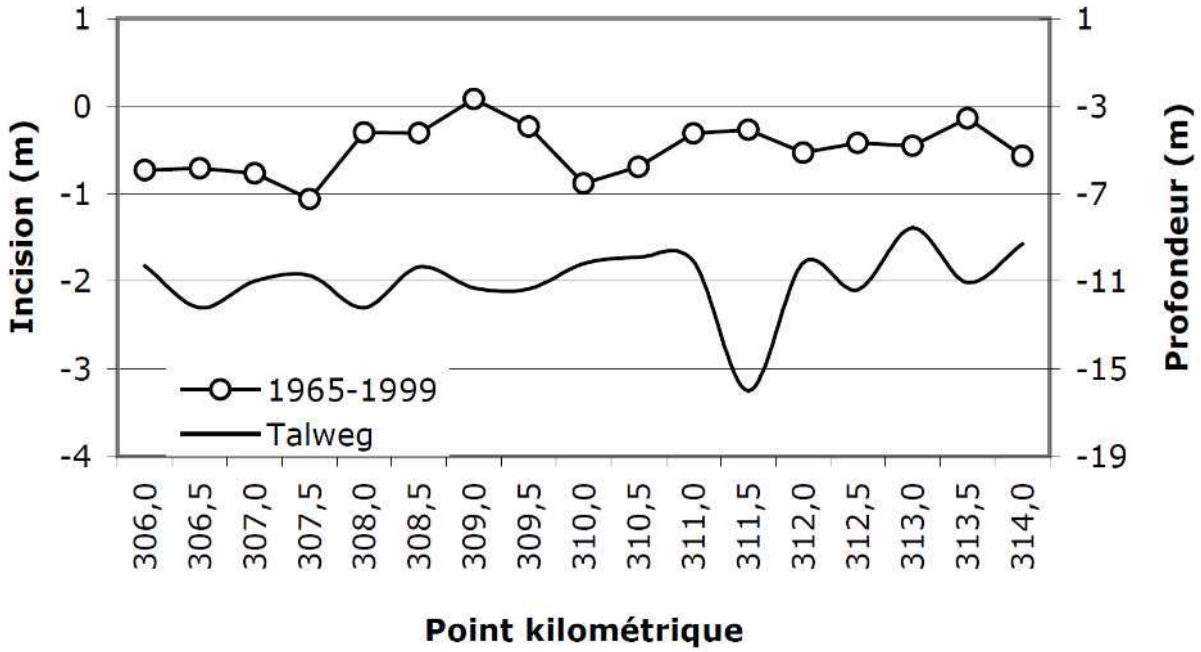


Figure 149. Distribution spatiale de l'incision moyenne mesurée sur le site aval du Grand Rhône entre 1965 et 1999. (source CEREGE 2002 / C. Antonelli)

La superposition des profils levés en 1965 et en 1999 permet de mesurer une incision moyenne sur le secteur de 0,48 mètre (soit 1,43 cm/an) comprise entre –1,05 mètre (PK 307,5) et + 0,08 mètre (PK 309). La distribution spatiale précédemment exposée ne met en évidence aucune organisation de l'incision sur ce secteur. On constate également qu'il enregistre une incision plus importante que le secteur plus en amont, au droit du seuil de Terrin.

Des levés ont été effectués par la CNR en 1999. Ces levés ayant été réalisées dans l'axe du chenal, il se peut que les plus profondes mouilles ne soient pas représentées. Les deux figures ci-dessous présentent ces levées selon deux axes : la profondeur (en m), et la côté (en m NGF).

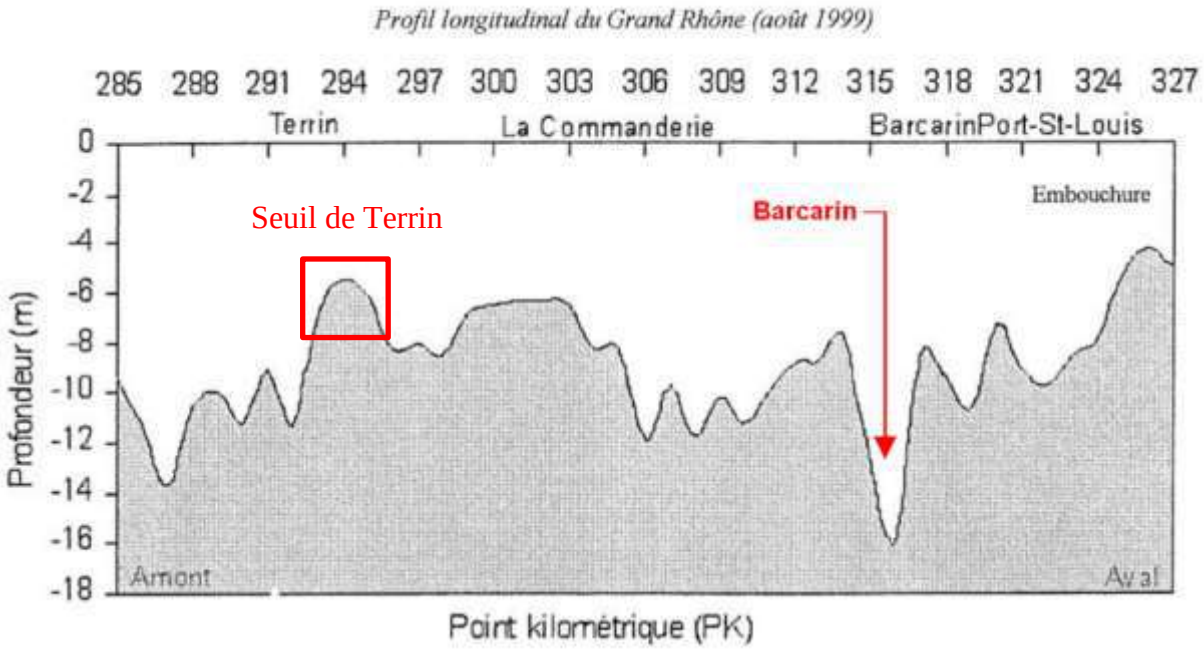


Figure 150. D'après levés bathymétriques (profondeur en mètre) CNR 1999 – Axe du Chenal

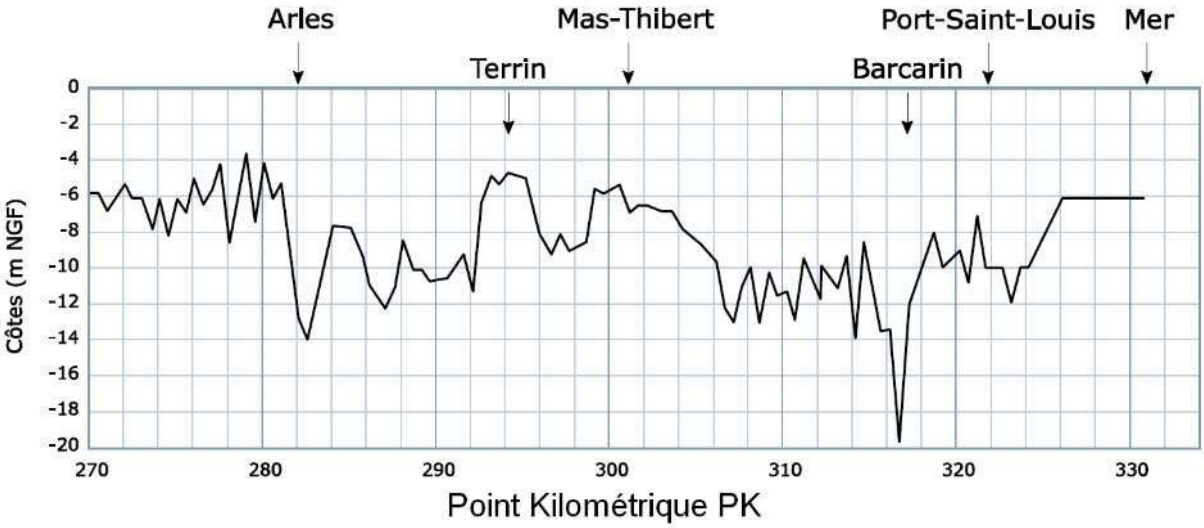


Figure 151. Données CNR (côte en m NGF) – Axe du Chenal

En conclusion, on constate une incision chronique des planchers alluviaux du Grand Rhône. Les équipements mis en place dans le bassin versant et le delta (barrage de Vallabrègues, déroctage, etc.) ont contribué à une modification notable du transit sédimentaire et de la morphologie des lits fluviaux (Bravard 1994, Landon et Pigay, 1994), ayant pour conséquence la réduction de la charge alluviale et l'incision constatée. Cette incision constitue une des origines des dégradations (sapements et affouillements) de berges et de pied de digues, notamment en l'absence de ségonal.

2.7.5 Impact des crues de 2002 et de la crue de 2003 sur le Rhône et Grand Rhône

Selon différents experts, un transport solide intense a eu lieu durant la crue de décembre 2003, en mobilisant les fonds lors de cet événement. La bathymétrie des fonds a ainsi évolué de manière significative par endroits.

L'évolution bathymétrique des fonds entre 2002 et 2007 a pu être estimée sur le Rhône et le Grand Rhône à partir des données bathymétriques CNR de 1999 et 2006 :

- Sur le Grand Rhône, les fonds sont constitués de seuils et de mouilles, les seuils restant stables et les mouilles se creusant depuis 5 ans. Ce phénomène de décaissement est particulièrement visible en aval du seuil de Terrin ;
- Dans le Rhône, comme pour le Grand Rhône, les seuils sont restés stables et les mouilles se sont plus ou moins enfoncées.

Les évolutions bathymétriques entre 1999 et 2006 sont précisées dans la figure suivante.

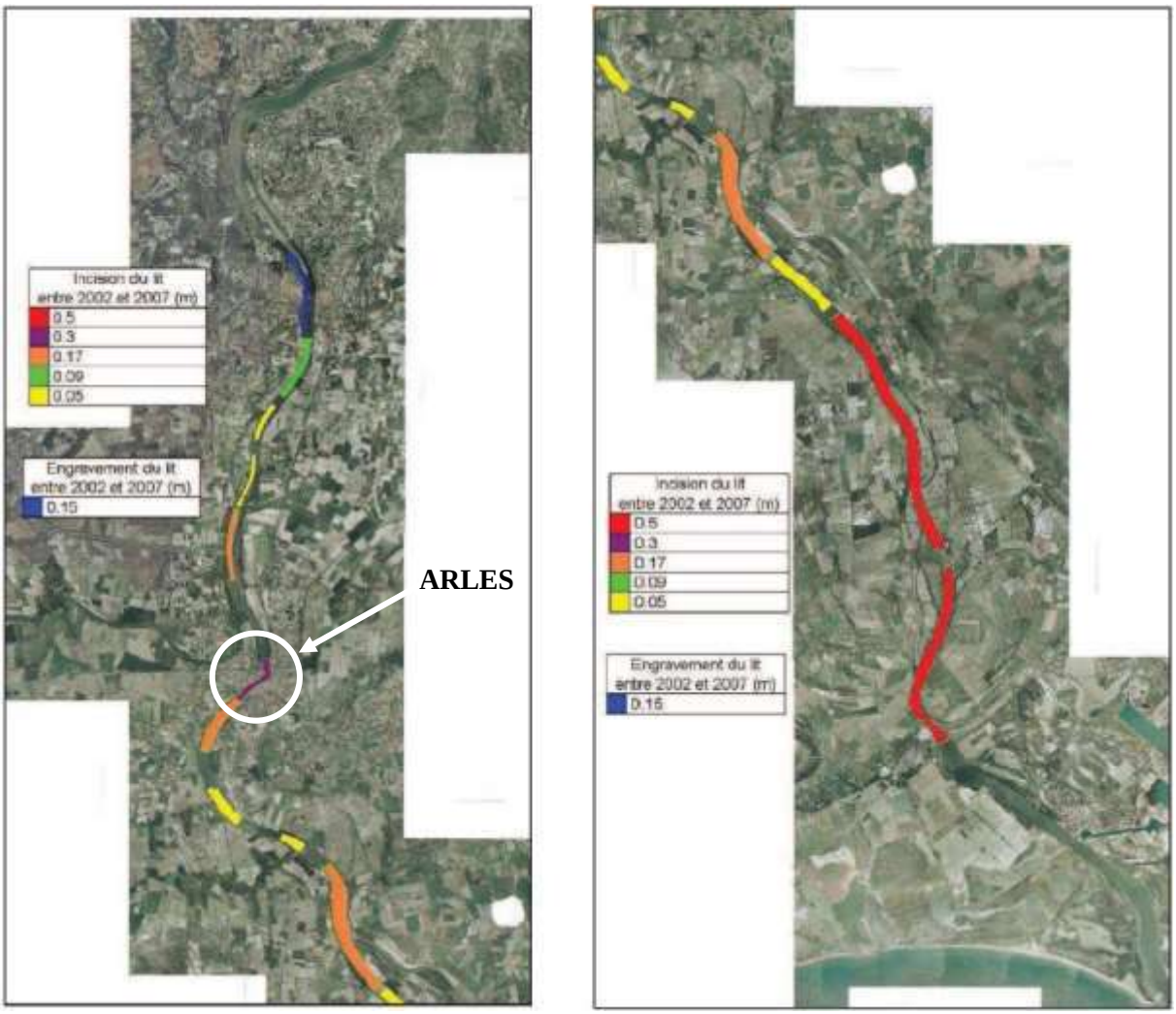


Figure 152. Evolution bathymétrique du Rhône et du Grand Rhône entre 2002 et 2007 (Etude de calage [K100]

2.7.6 Comparaison des bathymétries 1999 et 2006 au droit des zones à enjeux

Des levés bathymétriques ont été effectués en 1999 et 2006 par la CNR sur le Grand Rhône. Seulement les zones à enjeux, dont le ségonnal est inférieur à 20 mètres, ont été étudiées dans la présente étude. Ces zones à enjeux figurent dans le tableau ci-dessous.

Tableau 62. Comparaison bathymétrique au droit des zones à enjeux

Grand Rhône Rive Gauche (GRG)	
Nom du tronçon	**PK début – PK fin**
a) Mas de la ville – Grand Mollégès	290,5 – 292,5
b) Raccordement RD 35	293
c) Grand Passon – Canal du Rhône à Fos	312 – 315,5
d) Barcarin – Bois François	317 – 318,5
Grand Rhône Rive Droite (GRD)	
e) Triquette – Petite Montlong	286 – 288,9
f) Petite Montlong – Fort de Pâques	288,9 – 290,5
g) Aube de Bouic	297 – 298
h) Tour du Cazeau	301,5 – 302
i) Commanderie – Petit Patis	306 – 307,5
j) Amérique – Chamone	314 – 315
k) Petit Peloux – Barcarin	315,5 – 317
l) Ancien bac ferroviaire – Esquineau	317,5 – 319
m) Esquineau – RD 36d	319,5 – 322,5

Grand Rhône Rive Gauche

a) Mas de la ville – Grand Mollégès (Grand Rhône Rive Gauche PK 290,5 au PK 292,5)

On constate principalement que les mouilles ont été approfondies. Ces mouilles ont tendance à se situer sur la rive gauche du Grand Rhône car le fleuve présente un extrados léger sur ce secteur. Le phénomène d'approfondissement de ces mouilles est important du PK 292 au PK 292,300 avec des variations de profondeur de 1 à 2 m.

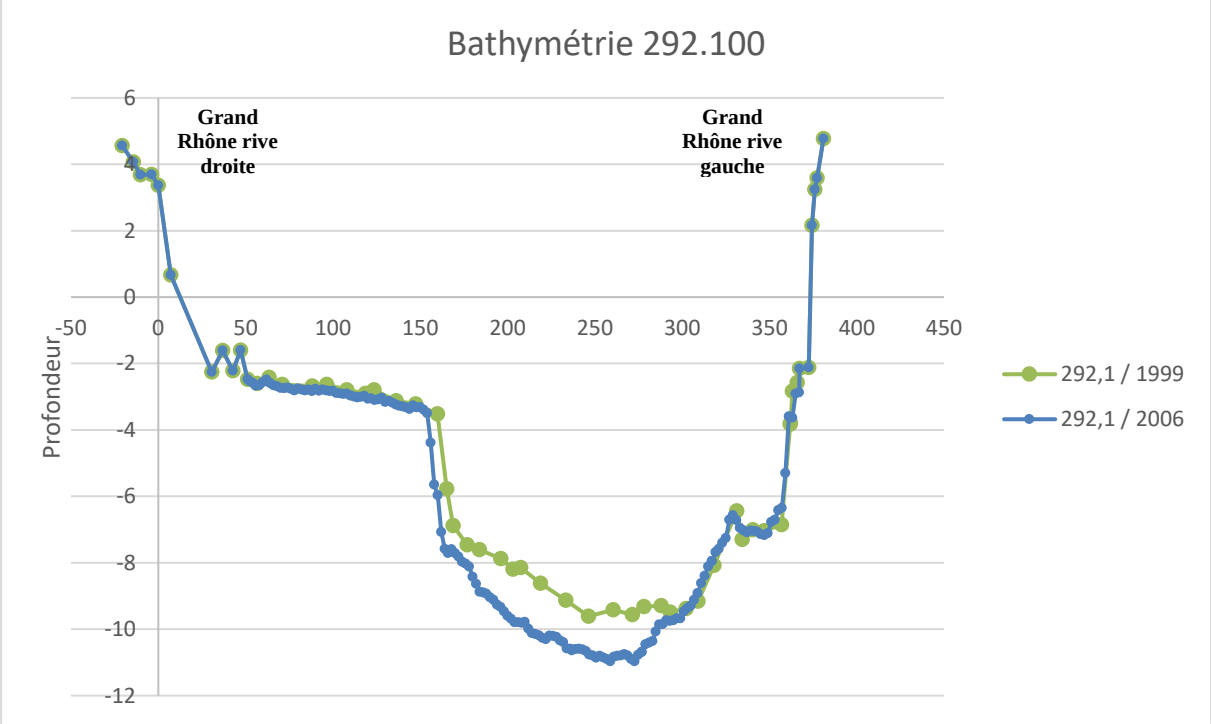


Figure 153. Comparaison de la bathymétrie de 1999 et 2006 au PK 292,1

Les fonds de la rive droite ont, quant à eux, tendance à se stabiliser, sauf très localement où le pied de berge a été érodé, comme par exemple au PK 290,800.

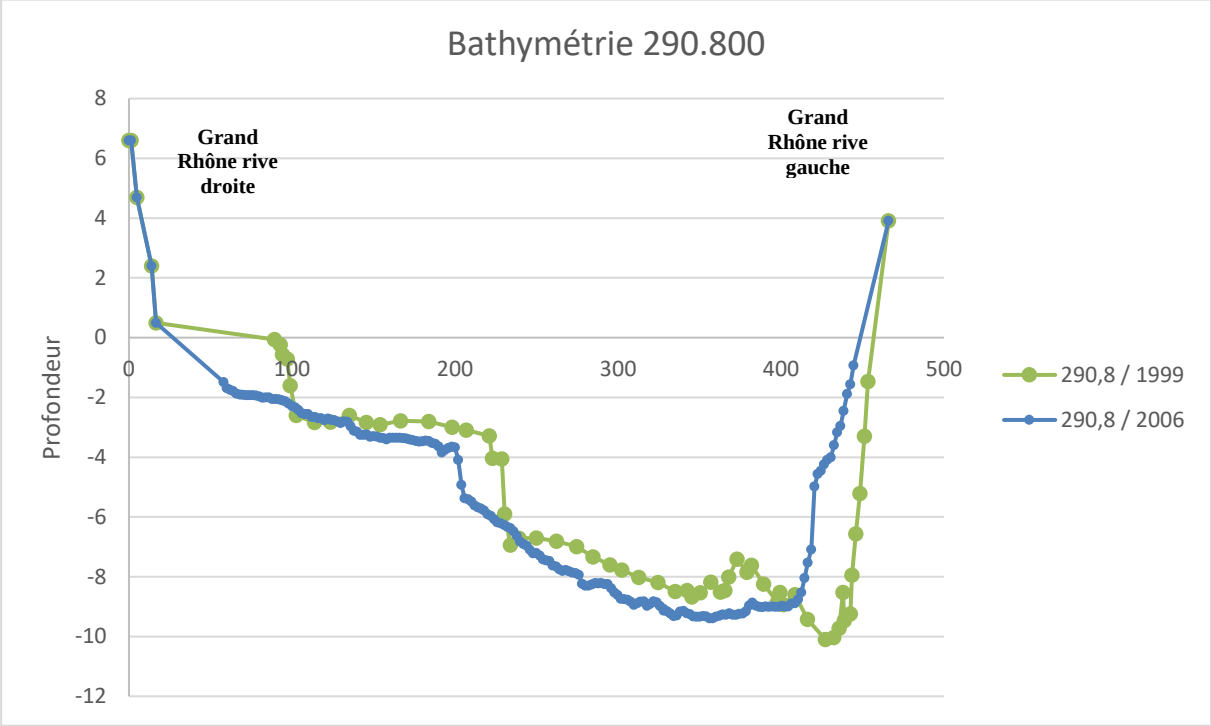


Figure 154. Comparaison de la bathymétrie de 1999 et 2006 au PK 290,800

Concernant les pentes des berges, on constate quelques singularités. Elles sont exposées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 63. Synthèse PK 290,6 à 292,5

PK	Commentaire
290,6	Destruction de la pente du pied de berge rive gauche : 20 m en tête (voir graphique ci-dessous)
290,8	Diminution de la pente du pied de berge en rive gauche
291	Erosion du pied de berge avec approfondissement de 2 m semblable à une faille
292,4	Elargissement du fond de la mouille d'environ 5 m
292,5	Evolution inconnue sur environ 15 m, avec érosion possible (voir graphique ci-dessous)

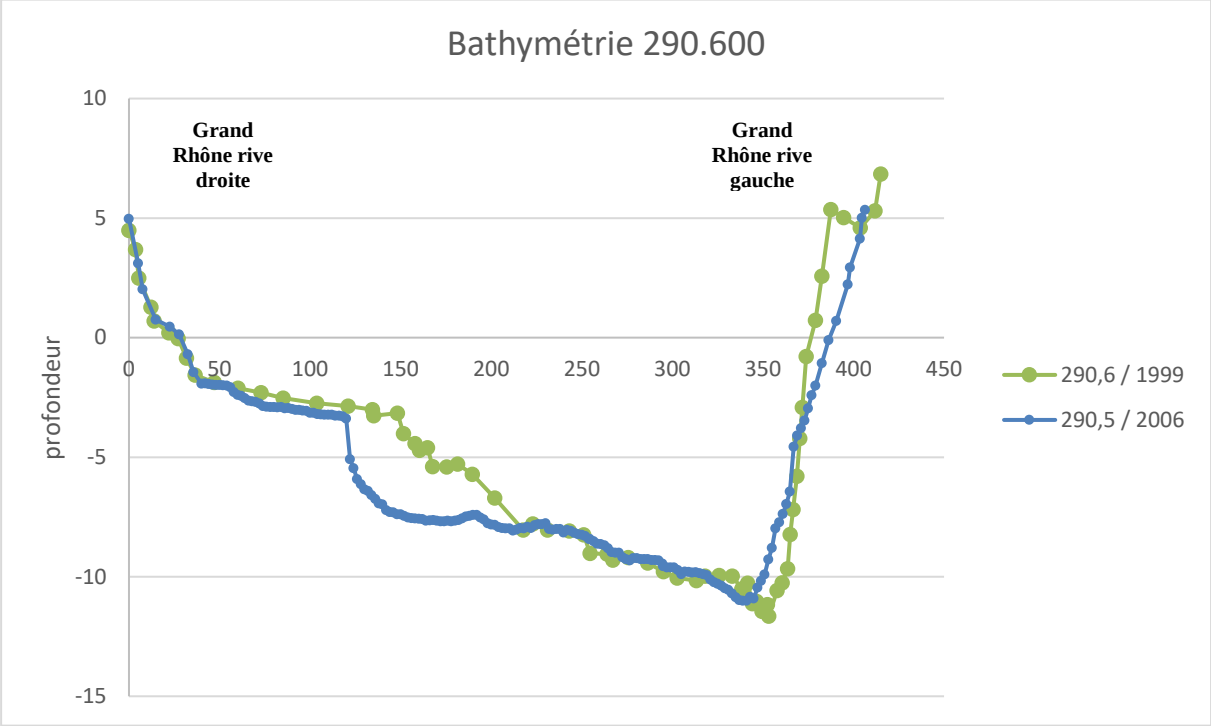


Figure 155. Comparaison de la bathymétrie de 1999 et 2006 au PK 290,600, destruction du pied de berge rive gauche du grand Rhône

Des données sont manquantes sur le profil de 1999 au PK 292.5, il n'est pas impossible qu'il y ait une érosion en pied de rive gauche

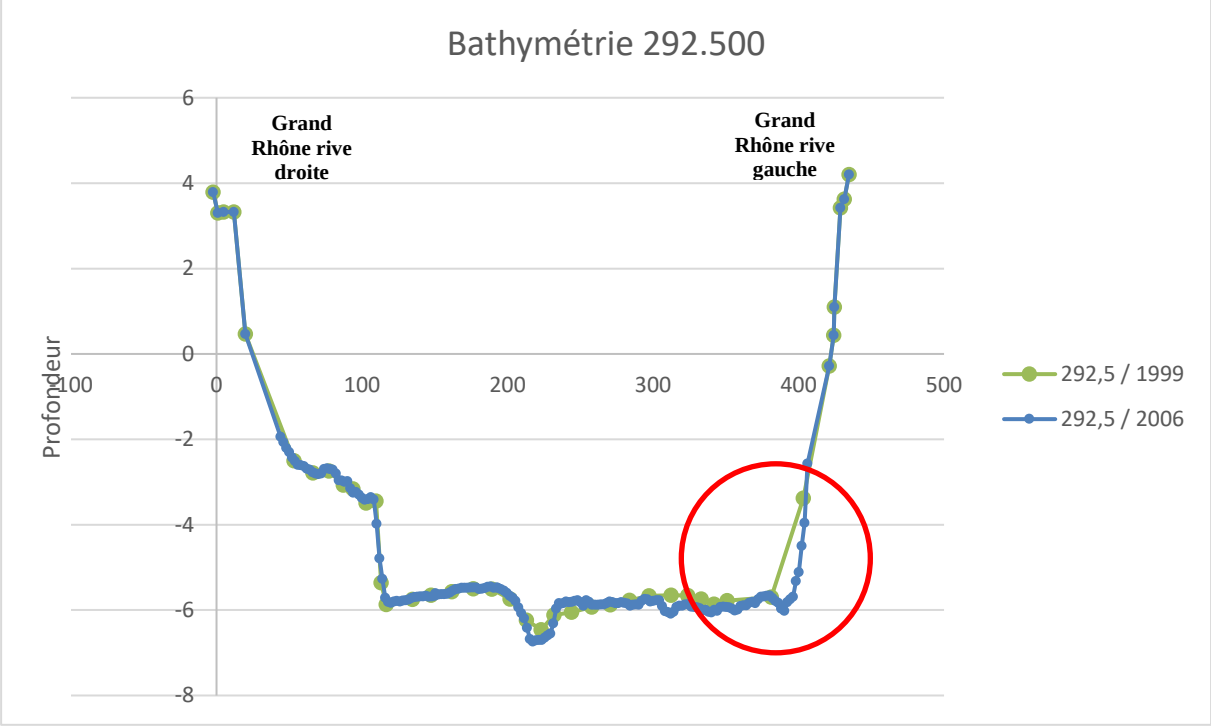


Figure 156. Comparaison de la bathymétrie de 1999 et 2006 au PK 292,500, manque de données sur environ 15 m

b) Raccordement RD 35 (Grand Rhône Rive Gauche PK 293)

Au droit du raccordement avec la RD 35 (PK 293), on ne constate pas d'évolution pour les pieds de berge (rive droite comme rive gauche), les mouilles et les seuils. La bathymétrie sur ce secteur ne semble que peu évoluée.

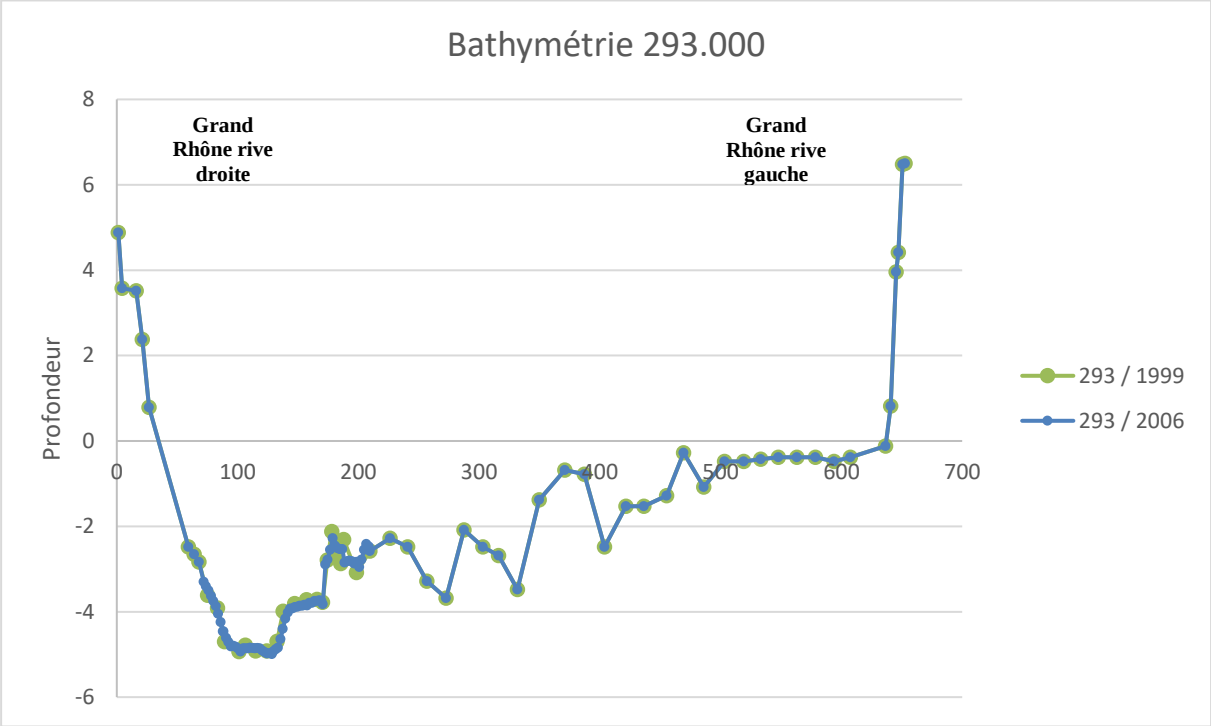


Figure 157. Comparaison de la bathymétrie de 1999 et 2006 au PK 293, raccordement avec la RD 35

c) Grand Passon – Canal du Rhône à Fos (Grand Rhône Rive Gauche PK 312 au PK 315,5)

Dans ce secteur, on observe un approfondissement systématique des mouilles plus ou moins marqué. Le PK 315,5 constitue un extrados important notant ainsi une incision d'environ 2 m de la mouille (graphique ci-dessous). Les incisions plus généralement constatées sont de l'ordre du mètre.

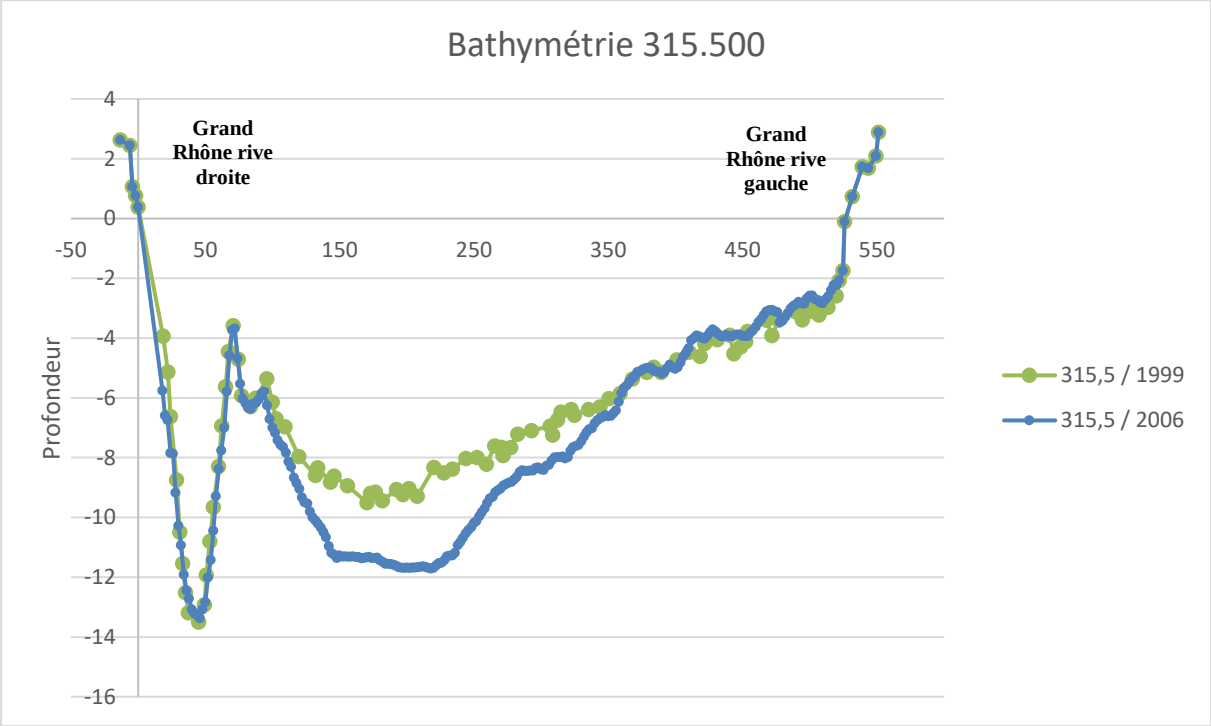


Figure 158. Comparaison de la bathymétrie de 1999 et 2006 au PK 315,5

On note également que les pentes des pieds de berge en rive droite ont tendance à légèrement se raidir à cause de l'érosion. Ce n'est pas le cas sur la rive gauche où les pentes des pieds de berges sont stables (graphique ci-dessous).

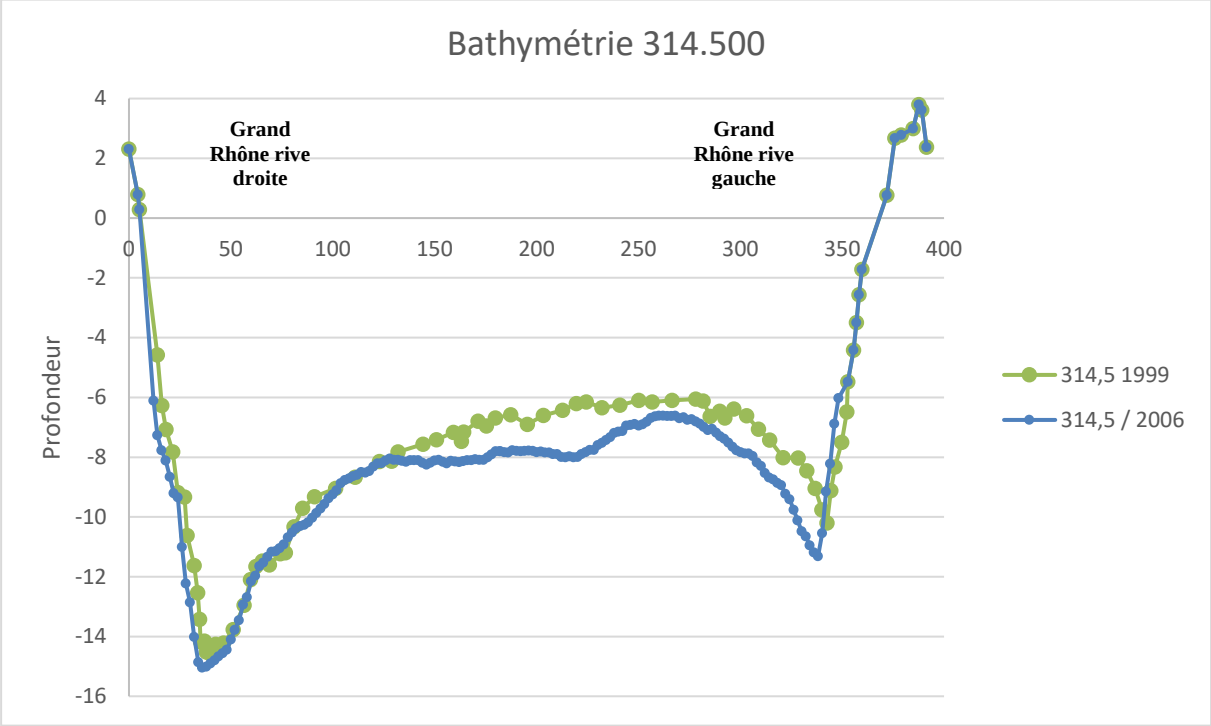


Figure 159. Comparaison de la bathymétrie de 1999 et 2006 au PK 314,5

d) Barcarin – Bois François (Grand Rhône Rive Gauche PK 317 au PK 318,5)

Pour ce secteur, nous ne disposons pas des relevés bathymétriques pour l'année 1999 du PK 317,5 au PK 318,5. Seul le PK 317 fait état d'un relevé en 1999 et 2006. On constate majoritairement que la mouille a été érodée sur sa partie la moins profonde, tandis que des matériaux (probablement des sols fins) sont venus remblayer la partie la plus profonde. Le fond de la mouille a ainsi été aplani. Le PK 317 se trouve en zone mixte (ni extrados, ni intrados).

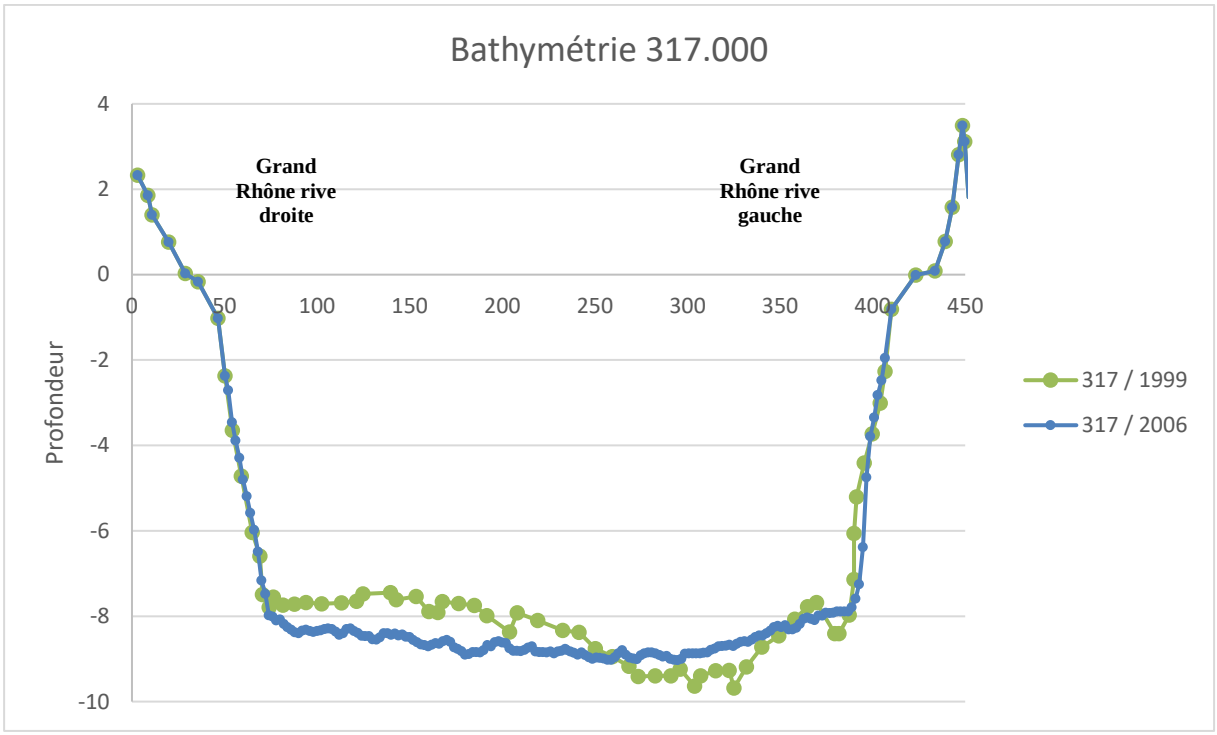


Figure 160. Comparaison de la bathymétrie de 1999 et 2006 au PK 317

Grand Rhône Rive Droite

e) Triquette – Petite Montlong (Grand Rhône Rive Droite PK 286 au PK 288,9)

Au vu de l'étendu de la zone d'étude du secteur (environ trois kilomètres), plusieurs phénomènes peuvent être constatés en rive droite du Grand Rhône. D'une manière générale, les mouilles ont tendance à s'éroder. Ces érosions de fond varient pour la plus part de quelques centimètres mais peuvent atteindre ponctuellement 2 à 3 mètres.

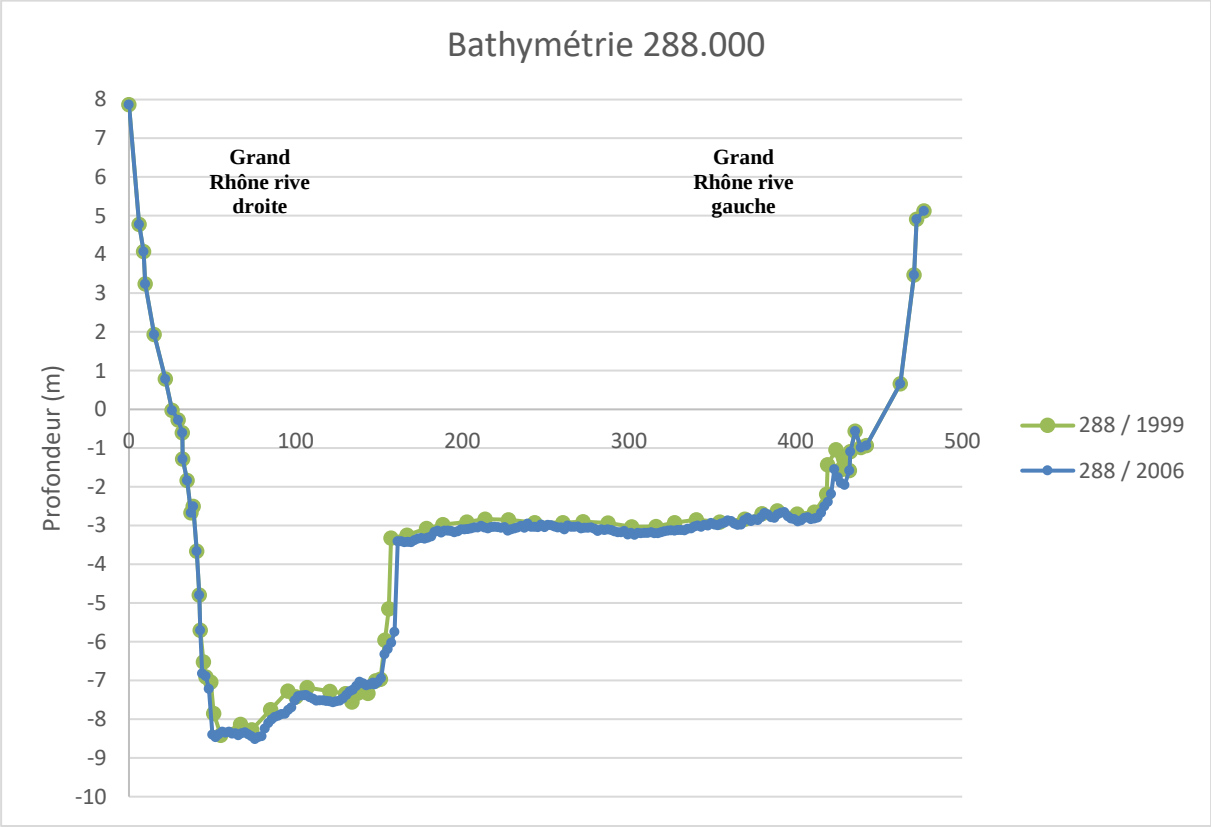


Figure 161. Comparaison de la bathymétrie de 1999 et 2006 au PK 288, érosion du fond de quelques centimètres

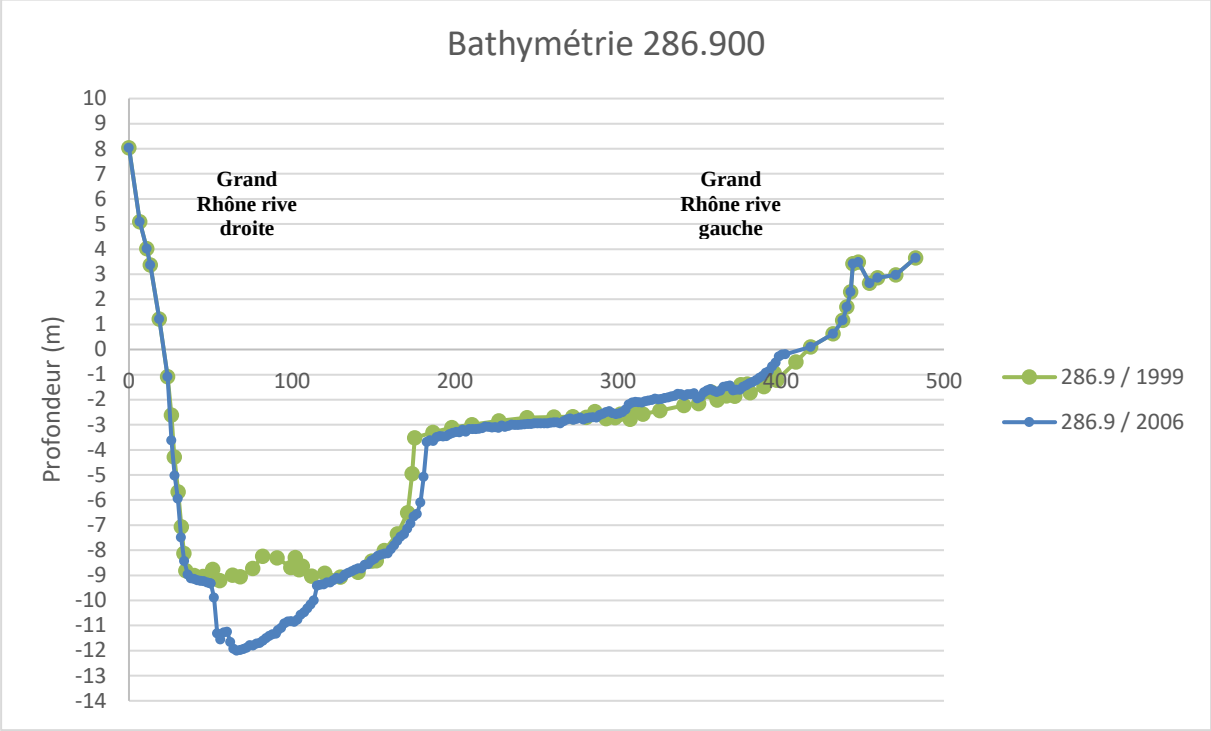


Figure 162. Comparaison de la bathymétrie de 1999 et 2006 au PK 286,9, érosion ponctuelle du fond de 3 mètres

On remarque également des phénomènes de raidissement des pieds de berge. La zone étudiée se trouve dans un extrados léger, ce qui pourrait expliquer ces phénomènes d'érosion de pied de berge en rive droite. Les raidissements les plus importants sont présents au PK 286 / 286,3 / 286,6 / 287,4 / 288,6.

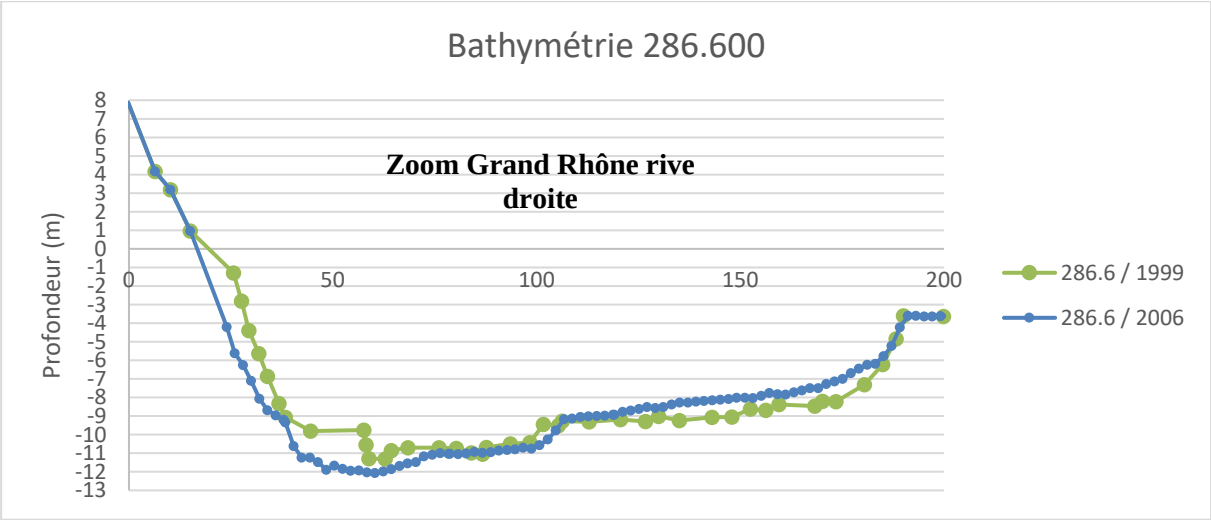


Figure 163. Comparaison de la bathymétrie de 1999 et 2006 au PK 286,600, zoom rive droite phénomène raidissement des pieds de berge

Ces phénomènes sont également présents au PK 286,4 / 287,2 / 288,3, mais sont moins prononcés.

f) Petite Montlong – Fort de Pâques (Grand Rhône Rive Droite PK 288,9 – 290,5)

On constate sur ce secteur une légère érosion des fonds (environ 50 cm). Ponctuellement au PK 289,8, l'érosion des fonds est d'environ 1 mètre. Du PK 288,9 jusqu'au PK 290, on observe un raidissement des pieds de berges de la rive droite.

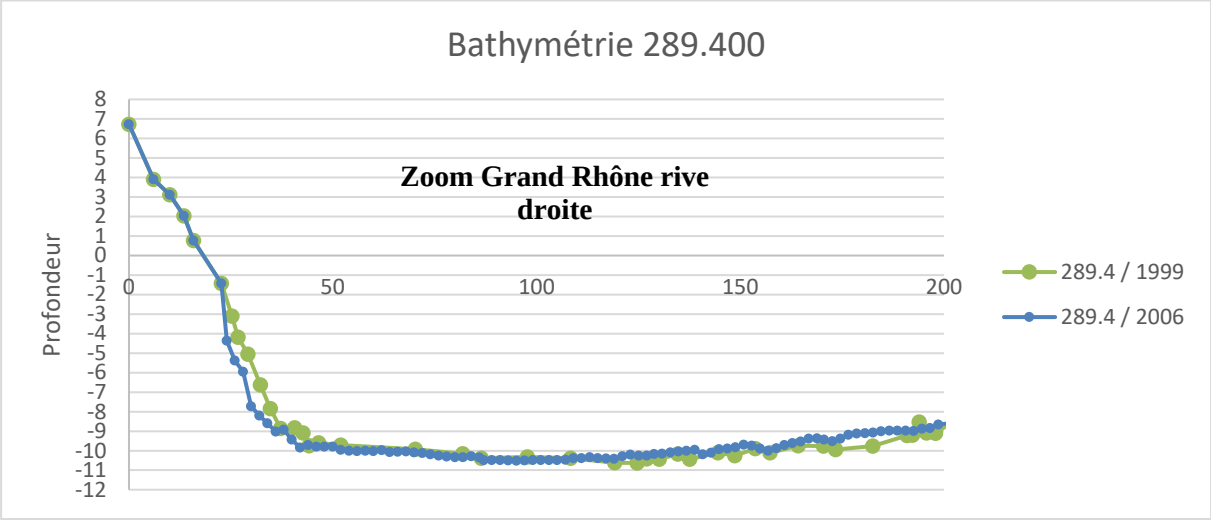


Figure 164. Comparaison de la bathymétrie de 1999 et 2006 au PK 289,4, érosion du pied de berge et du fond (50 cm environ)

g) Aube de Bouic (Grand Rhône Rive Droite PK 297 – 298)

Du PK 297 au PK 297,5, on remarque principalement une quasi-stabilité des fonds avec ponctuellement des zones d'accrétion au droit des mouilles les plus profondes.
Du PK 297,5 au PK 298, les fonds sont également stables, mais leurs tendances est à l'érosion (quelques centimètres).
Sur ce secteur, les pentes des pieds de berge sont stables.

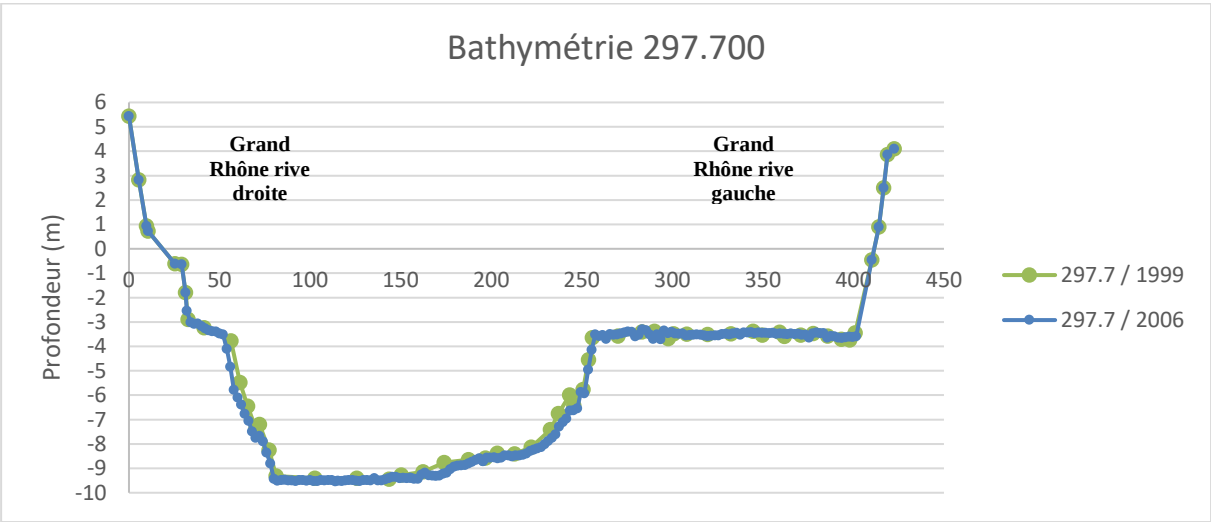


Figure 165. Comparaison de la bathymétrie de 1999 et 2006 au PK 297,7

h) Tour du Cazeau (Grand Rhône Rive Droite PK 301,5 – 302)

Comparativement en 1999, ce secteur présente en 2006 des fonds plus profonds (érosion) et des pentes de pieds de berge en rive droite plus importantes.

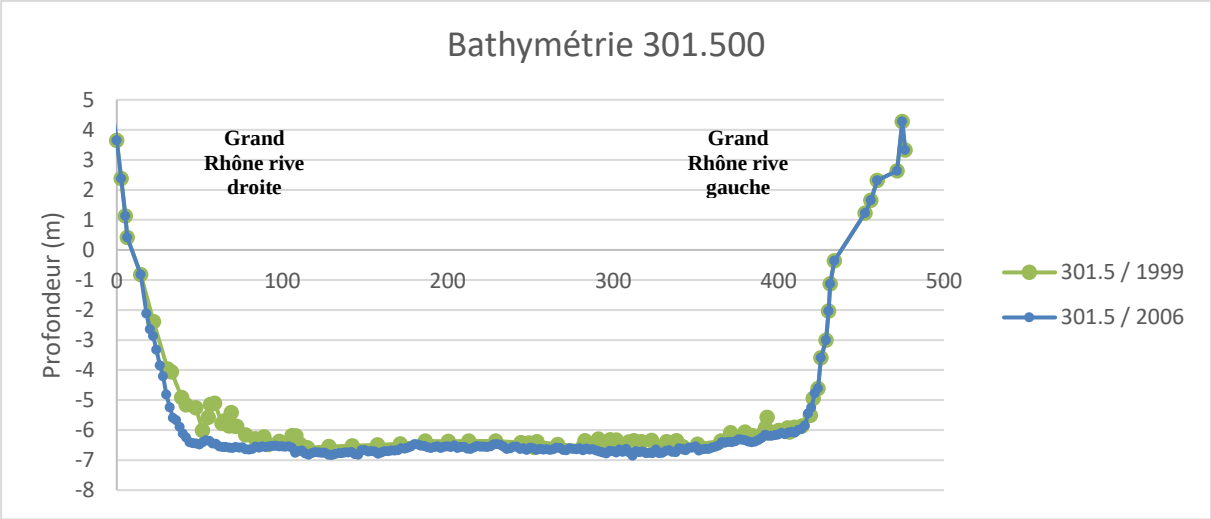


Figure 166. Comparaison de la bathymétrie de 1999 et 2006 au PK 301,5

i) <u>Commanderie – Petit Patis (Grand Rhône Rive Droite PK 306 – 307,5)</u>

Sur ce secteur sont visibles de nombreuses et profondes fosses. Elles présentent toutes des phénomènes d'érosion importants variant de 1 à 2 mètres maximum.

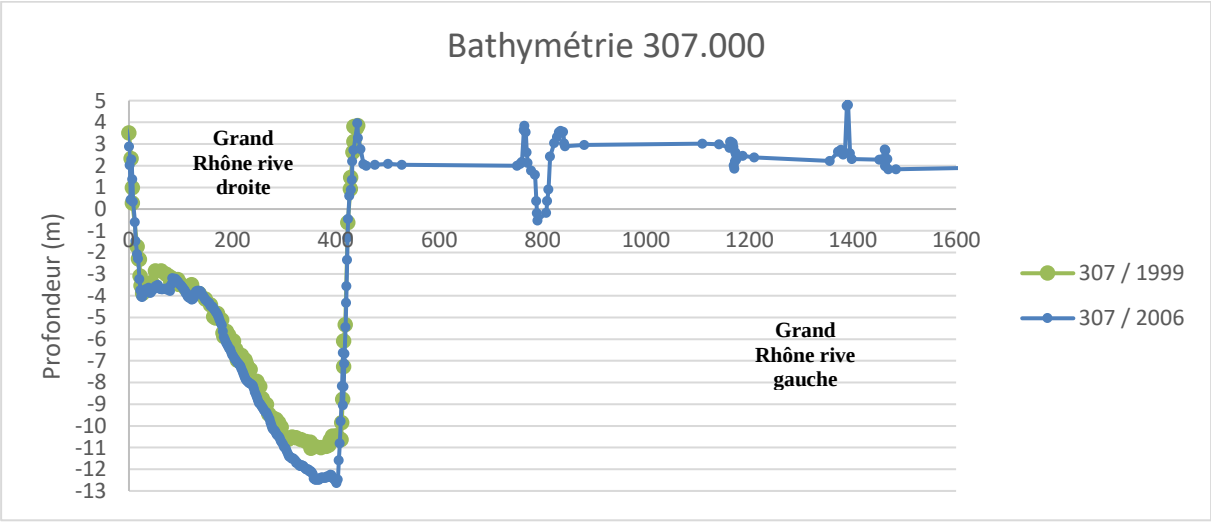


Figure 167. Comparaison de la bathymétrie de 1999 et 2006 au PK 307, érosion importantes des fosses

j) <u>Amérique – Chamone (Grand Rhône Rive Droite PK 314 – 315)</u>

Le phénomène observé est similaire au secteur précédent avec des érosions moins importantes (au maximum 1 mètre). La pente du pied de berge s'est légèrement accrue en rive droite. Les seuils n'ont pas été érodés.

k) Petit Peloux – Barcarin (Grand Rhône Rive Droite PK 315,5 – 317)

Au droit du PK 315,5, un fossé s'est creusé dans l'axe du Grand Rhône sur environ 2 m de profondeur et sur 200 m de large. Au PK 316 et 317 on observe principalement de l'érosion (50 cm à 1 m). Au PK 316,5 (entrée du canal du Rhône à Fos), la pente du pied de talus s'est accrue mais du dépôt a eu lieu au droit de la mouille.

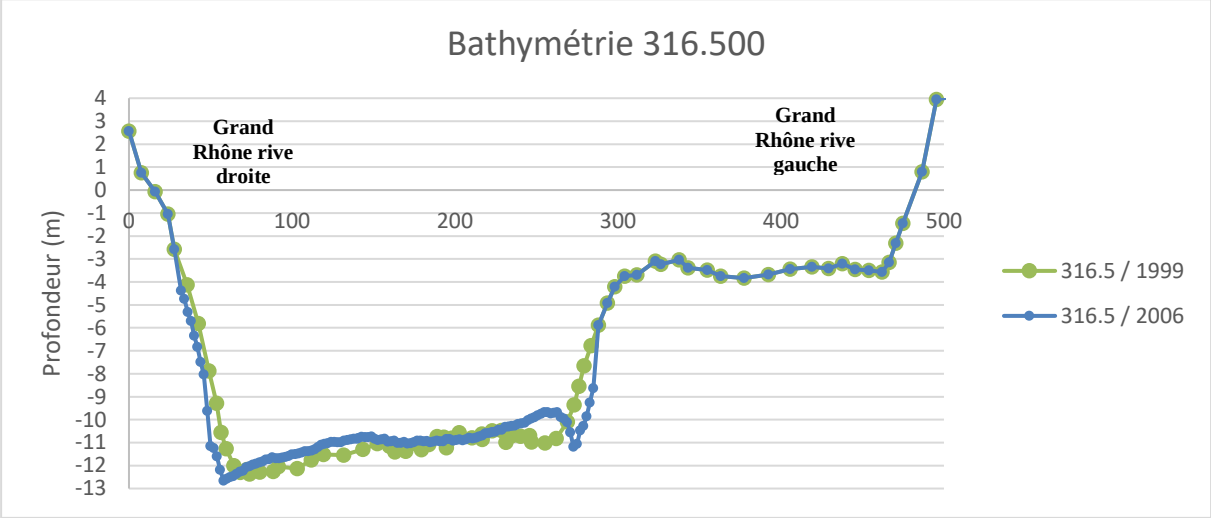


Figure 168. Comparaison de la bathymétrie de 1999 et 2006 au PK 316,5

l) Ancien bac ferroviaire – Esquineau (Grand Rhône Rive Droite PK 317,5 – 319)

Pas de données en 1999 sur ce secteur. Evolution bathymétrique impossible.

m) Esquineau – RD 36d (Grand Rhône Rive Droite PK 319,5 – 322,5)

Pas de données en 1999 sur ce secteur. Evolution bathymétrique impossible.

2.7.7 Evolution de la bathymétrie en traversée d'Arles

Des levés bathymétriques ont été réalisés en traversée d'Arles du PK 281.5 au PK 283.5 en 2007, 2010 et 2015. En 2015, les fonds ont été cartographiés par INGEO [B005].

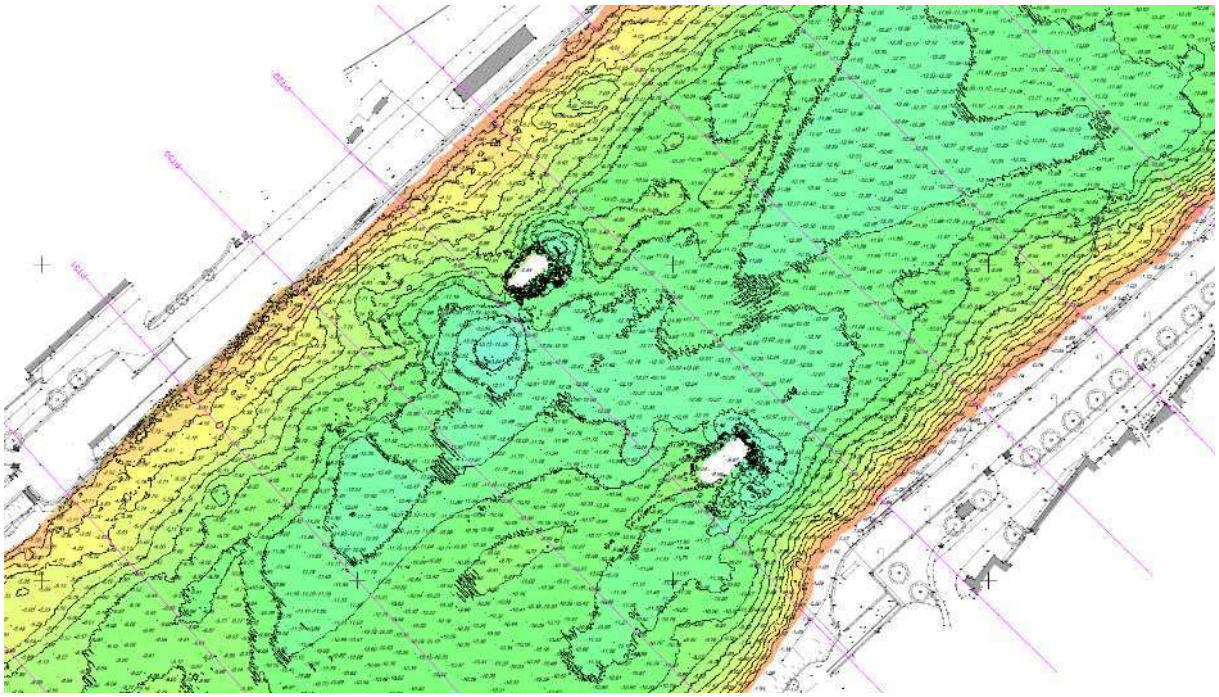


Figure 169. Cartographie des fonds des levés bathymétriques de 2015 au droit du pont de la RN 113

Du PK 281,5 au PK 281,800 (pont des lions), la bathymétrie est peu profonde (environ 10 m). Du pont des lions jusqu'au PK 282,700, des profondeurs de l'ordre de 16 m en moyenne dessinent le fond du Grand Rhône. Ces profondeurs sont plus conséquentes car le secteur est en extrados et se rétrécie, passant ainsi de 290 m sur le secteur précédent à 150 m environ en traversée de la roquette. Du PK 282,700 au PK 283,5, les profondeurs sont de l'ordre de 9 m environ, le fleuve s'élargissant à nouveau.

Plusieurs campagnes de levés bathymétriques ont été effectuées. En 2007, environ 18 profils en travers ont été réalisés en traversée d'Arles. En 2010, la campagne a été effectuée le long des quais de la gare maritime du PK 282,5 au PK 282,300 environ. En 2015, des profils en travers ont été réalisés tous les 50 m environ, générant ainsi 38 profils.

Grace à ces différentes campagnes, une évolution de la bathymétrie en traversée d'Arles a été effectuée.
On observe principalement une incision du lit d'environ 30 cm en moyenne.

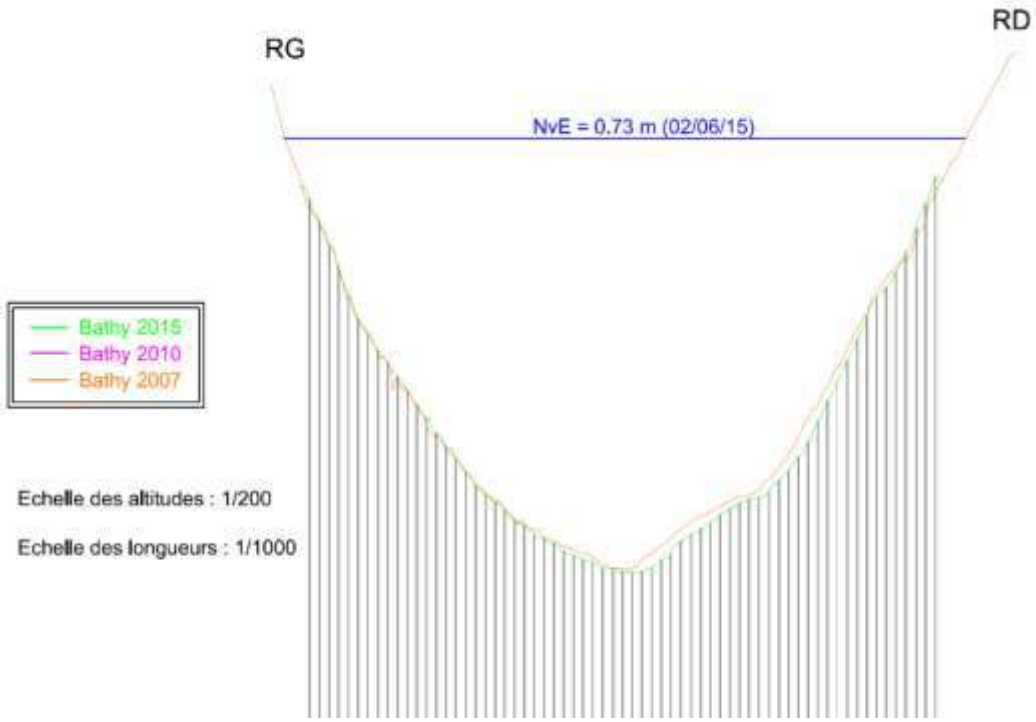


Figure 170. Exemple d'incision du lit en traversée d'Arles (PK 282,400 environ)

Ponctuellement, de l'accumulation s'est produite, comme par exemple en amont du pont de la RN 113 (PK 282,900). Les talus de la rive gauche n'ont subi aucune modification majeure entre 2007 et 2015, contrairement à ceux de la rive droite où ils ont tendance à s'éroder.

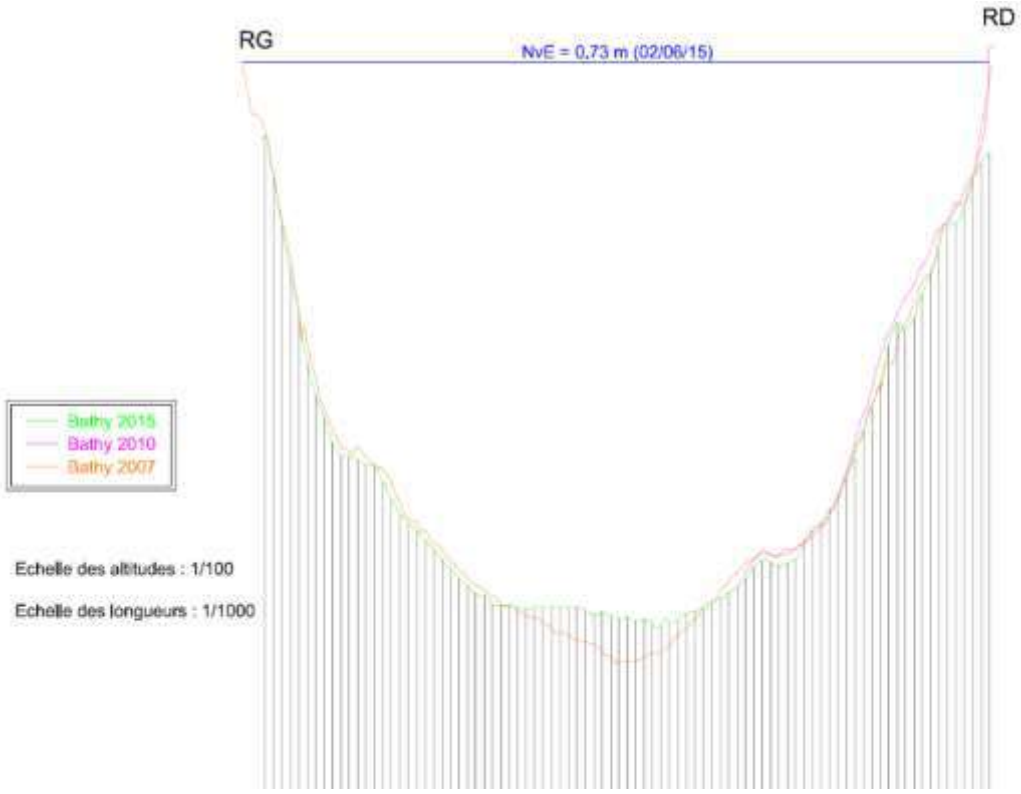


Figure 171. Exemple d'accumulation traversée d'Arles et évolution des talus (PK 282,900 environ)

2.8 INSPECTION NAUTIQUE DES BERGES

L'examen visuel des berges par voie nautique permet de contribuer à la détermination de l'état-limite de rupture par affouillement externe en observant les différents éléments suivants : état des berges, linéaire d'érosion, présence de dispositif de protection, présence d'aménagements, nature de la ripisylve, présence d'ouvrage … .

Une inspection des berges par voie nautique a été effectuée en mars 2015. Les secteurs disposant d'un ségonal faible (inférieur à 20 m) ont été inspectés.

2.8.1 Berges du Grand Rhône

Sur les 40 km de digue présents au Sud d'Arles cinq secteurs disposent d'un ségonal faible en rive gauche du Grand Rhône et neuf en rive droite du Grand Rhône. Il est nécessaire d'inspecter ces zones de faible ségonal car ce sont des zones à enjeux où toute érosion peut être néfaste pour la stabilité du pied de berge ou la digue elle-même.

Les zones à enjeux du Grand Rhône inspectées par voie nautique en mars 2015 sont les suivantes :

Tableau 64. Zone à enjeux inspectées par voie nautique (mars 2015) – Grand Rhône Rive Droite et Gauche

Grand Rhône Rive Gauche (GRG)	
Nom du tronçon	**PK début – PK fin**
1) Mas de la ville – Grand Mollégès	290,5 – 292,5
2) Raccordement RD 35	293
3) Grand Passon – Canal du Rhône à Fos	312 – 315,5
4) Barcarin – Bois François	317 – 318,5
Grand Rhône Rive Droite (GRD)	
1) Triquette – Petite Montlong	286 – 288,9
2) Petite Montlong – Fort de Pâques	288,9 – 290,5
3) Aube de Bouic	297 – 298
4) Tour du Cazeau	301,5 – 302
5) Commanderie – Petit Patis	306 – 307,5
6) Amérique – Chamone	314 – 315
7) Petit Peloux – Barcarin	315,5 – 317
8) Ancien bac ferroviaire – Esquineau	317,5 – 319
9) Esquineau – RD 36d	319,5 – 322,5

Grand Rhône Rive Gauche

1) Mas de la ville/Tour d'Aling – Grand Mollégès (GRG 290,5 – 293)

Ce secteur est situé en extrados et présente des berges de hauteur moyenne (entre 2 et 4 m) recouvertes d'une ripisylve continue haute et basse (excepté aux panneaux des PK).

Il a été observé différentes dégradations telles que des arbres couchés ou une érosion faible sur le linéaire. Il y a également deux zones particulières : au GRG 290,6, il y a de l'érosion à l'aval de l'épi du Mas de la ville et au GRG 292,3 un arbre a été déraciné et a emporté une partie de la berge.

Sur le long terme le secteur est stable, les épis et enrochements marqués sur les plans de 1876 sont d'ailleurs toujours visibles.

Le risque vis-à-vis de l'érosion est faible mais bien présent, en particulier à l'amont où la berge descend à -11 m et présente des débuts d'érosion.

2) Raccordement à la RD35 (GRG 293)

Ce secteur est situé en extrados, les berges ont une hauteur moyenne et la ripisylve qui les recouvre est continue haute et basse.
Aucun point de défaillance n'a été relevé, mais l'inspection a été faite de loin car il n'y avait pas suffisamment de fond pour y accéder en bateau. Il n'y a donc pas de grosse dégradation. Le fruit du talus de berge est pourtant très important (environ 1 pour 1).

Le secteur est également stable sur le long terme.

Il n'y a actuellement pas de risque vis-à-vis de l'érosion sur ce secteur.

3) Grand Passon – Canal du Rhône à Fos (GRG 312 – 315,5)

- Secteur GRG 312 – 313,6

Situé en zone mixte, ce secteur comprend des berges hautes et moyennes. La ripisylve basse est continue (excepté aux PK) et la ripisylve haute est discontinue.

Des arbres couchés sont présents et il y a de l'érosion sur l'ensemble du secteur avec trois endroits où elle est très importante : au GRG 313 ; 313,3 ; 313,7.

Sur le long terme le secteur est plutôt stable mais avec de l'érosion au niveau des épis : l'épi de brammaire a disparu et celui des pilotes s'érode par l'aval.

Le secteur connaît de fortes érosions avec de plus une bathymétrie qui descend rapidement à -10 m environ. Par endroits, c'est la digue elle-même qui est érodée, **le risque est très important sur ce secteur**.

- Secteur GRG 314 – 315,5

Ce secteur est en zone mixte avec des berges basses. La ripisylve basse est continue (excepté aux PK) et la ripisylve haute est discontinue.

Des arbres couchés sont présents et il y a de l'érosion sur l'ensemble du secteur avec deux endroits où elle est très importante : au GRG 314,2 et 314,5.

Sur le long terme le secteur est en érosion.

Le secteur connaît de fortes érosions avec de plus une bathymétrie qui descend rapidement à -10 m environ. Par endroits, c'est la digue elle-même qui est érodée, **le risque est très important sur ce secteur**.

4) Du bac routier à Bois François (GRG 317 – 318,2)

Ce secteur est en zone mixte, il présente des berges basses sur lesquelles pousse une ripisylve basse (principalement des cannes de Provence).

Deux zones de faible érosion ont été relevées : au GRG 317,35 où on peut apercevoir le grillage anti-fouisseur juste à l'aval d'un ouvrage hydraulique et au GRG 317,9 où les enrochements sont discontinus.
Sur le long terme le secteur connait une faible érosion.
Le secteur semble bien se comporter mais sa dynamique à long terme impose une certaine vigilance, le risque est faible.

Grand Rhône Rive Droite

1) Triquette – Petite Montlong (Grand Rhône Rive Droite PK 286 au PK 288,9)

Ce secteur est en extrados avec des berges de hauteur faible (< 2 m). La ripisylve est continue basse. On observe notamment des érosions légères causées par le batillage des bateaux. Néanmoins, des érosions beaucoup plus importantes sont présentes du GRD 287,5 au GRD 288. Le pied de digue est attaqué par l'érosion. Les palplanches mises en place lors des travaux de renforcement sur ce secteur sont visibles. Le grillage anti-fouisseur sous le talus également. Ponctuellement ce grillage anti-fouisseur est très détérioré laissant apparaître le corps digue. La fonction étanchéité du talus amont n'est plus assurée.

La zone (GRD 287,5 au GRD 288) présente un danger immédiat et important pour la stabilité du pied de digue.

2) Petite Montlong – Fort de Pâques (Grand Rhône Rive Droite PK 288,9 – 290,5)

Du GRD 288,9 au GRD 289,8 : ce secteur est en extrados avec des berges de hauteur faible (< 2 m). La ripisylve est continue basse. L'ancien perré de 1876 et les anciens enrochements sont encore présents et en bon état. La bathymétrie est très peu profonde (- 1 m NGF environ).

Ce secteur (GRD 288,9 au GRD 289,8) ne présente aucun danger.

Du GRD 289.8 au GRD 290.5 : ce secteur est en extrados avec des berges de hauteur moyenne (entre 2 et 4 m). La ripisylve est discontinue. Deux érosions importantes sont à noter notamment au droit du GRD 289,8 et du GRD 290. Sur ces secteurs, la berge constitue en partie le pied de digue et notamment au droit du GRD 289,8.

Sur ce secteur (GRD 289.8 au GRD 290.5), à court terme comme à long terme, l'érosion pourrait atteindre le talus amont de la digue au vu de l'ampleur du phénomène d'érosion et sa dynamique.

3) Aube de Bouic (Grand Rhône Rive Droite PK 297 – 298)

Ce secteur est en zone mixte avec des berges de hauteur moyenne (entre 2 et 4 m). La ripisylve (basse et haute) est tantôt continue tantôt discontinue. On note la présence d'arbres couchés. La bathymétrie est faible (environ – 4 m NGF). Les érosions les plus importantes à noter sont les suivantes :

- GRD 297 : arbres arrachés ayant emporté la berge, berge constituant le pied de digue ;
- GRD 298 : arbres arrachés ayant emporté la berge, berge constituant le pied de digue ;

Le secteur très critique au GRD 297 a fait l'objet de travaux de réparation en 2016.

GRD 296,5 au GRD 297,25 puis du GRD 298 au GRD 298,1 : en comparant les cartes de 1876 et 2007 on remarque qu'il y a eu de l'accrétion. Néanmoins, on constate que ces zones

sont en cours d'érosion, probablement causé par le batillage. A court terme elles ne constituent pas un danger pour la stabilité du pied de digue car leur dynamique est faible. En revanche, elles sont à surveiller.

4) Tour du Cazeau (Grand Rhône Rive Droite PK 301,5 – 302)

Ce secteur est en zone mixte avec des berges de hauteur principalement faible (< 2 m). La ripisylve (basse et haute) est discontinue. La bathymétrie est moyennement profonde (environ – 6 m NGF). Les érosions les plus importantes à noter sont les suivantes :

- GRD 301,7 : Anciens enrochements détruits mais quelques-uns persistent dans la zone érodée. Proche du pied de digue. Arbres menaçant de tomber : **risque important** ;
- GRD 302 : arbres menaçant de tomber, érosion (batillage) : **risque important potentiel à long terme**.

Du GRD 301,7 au GRD 302 on note que la totalité de la berge a été érodée sur une hauteur de 1 m.
Dans sa globalité, le linéaire étudié est en érosion, avec ponctuellement des zones menaçantes à court terme comme à long terme.

5) Commanderie – Petit Patis (Grand Rhône Rive Droite PK 306 – 307,5)

Ce secteur est en zone mixte avec des berges de hauteur moyenne (entre 2 et 4 m). La ripisylve (basse et haute) est continue. On note la présence de nombreux arbres couchés. En comparant les cartes de 2007 à celle de 1876, on remarque une importante érosion de la berge, de l'ordre de 30 à 75 m. Cette érosion est nettement perceptible au vu des nombreux arbres déracinés et ripisylve basse dans l'eau.
Les linéaires de digue où le ségonal est faible, les anciens enrochements sont présents mais présentent un état dégradé. Sur le long terme, ces secteurs représentent un risque.
Au droit du GRD 305,6, on observe un trou d'animal fouisseur dans la berge. Cependant le ségonal est relativement important (> 10 m). Le risque de détérioration prématurée de la berge et du pied de digue reste faible.

Il faut noter que, l'érosion la plus importante est la suivante :

- GRD 306 : Erosion sur toute la hauteur de la berge. Présence d'un réseau racinaire ouvert entrant dans la berge. Néanmoins, la berge ne constitue pas le pied de digue. Un risque est quand même encouru sur le long terme au vue de la cinétique de l'érosion sur ce secteur.

Dans sa globalité, le linéaire étudié est en érosion, avec ponctuellement une zone plus menaçante (GRD 306). La majorité du linéaire érodé ne constitue pas le pied de digue est le risque à court terme reste moyennement élevé.

6) Amérique – Chamone (Grand Rhône Rive Droite PK 314 – 315)

Ce secteur est en extrados avec des berges de hauteur moyenne (entre 2 et 4 m). La ripisylve est basse mais peu fournie à cause de la présence de zones avec enrochements. La bathymétrie de 2006 indique la présence d'une fosse à -14 m NGF environ. Au droit de Chamone, GRD 315, les enrochements sont en très bon état malgré quelques maçonneries déchaussées très

localement. En aval de Chamone, la berge présente une érosion sur environ la totalité de sa hauteur, soit approximativement 2 m. A noter qu'au droit de cette érosion jusqu'au PK 315,5 l'érosion est importante mais le ségonal est important aussi.

Ce secteur peut potentiellement présenter un risque d'affouillement au vu de la fosse à -14 m NGF.

7) Petit Peloux – Barcarin (Grand Rhône Rive Droite PK 315,5 – 317)

Ce secteur est en extrados avec des berges de hauteur moyenne (entre 2 et 4 m). La ripisylve (basse et haute) est discontinue.
Du GRD 315,5 au GRD 315,7, l'ancien perré est en très bon état. Les enrochements sont cependant dégradés. Au droit du PK 315,7 les enrochements récents sont en bon état. Au droit du GRD 315,9 des blocs maçonnés se sont effondrés sous les effets de l'érosion et des crues. Cependant le perré historique est toujours en place derrière ces blocs.
Il faut noter que, l'érosion la plus importante est la suivante :

- **GRD 315,5 : Arbres menaçant de tomber, berge constituant le pied de digue, fosse (-13 m NGF environ) : risque d'affouillement très important.**

8) Ancien bac ferroviaire – Esquineau (Grand Rhône Rive Droite PK 317,5 – 319)

Ce secteur est en zone mixte avec des berges de hauteur faible (< 2 m). La ripisylve basse est continue. De nombreux débris de végétaux morts flottent à la surface de l'eau réduisant considérablement la visibilité. Cependant, on suggère que certaines zones sont érodées. En comparant les cartes de 2007 et de 1876, on remarque qu'il y a eu de l'accrétion après 1876 mais qu'actuellement il y a de l'érosion. La bathymétrie est faible (- 5 m NGF environ). La berge constitue le pied de digue sur une grande partie du linéaire et présente des zones d'érosion importantes : GRD 317,6 ; GRD 317,8 GRD 317,9 ; GRD 318,6 (fin des enrochements récents).

- **Ces points précis peuvent s'avérer être dangereux pour le pied de digue. Secteur très sensible.**

Autrement, la totalité du linéaire peut être menacée sur le long terme au vu de l'érosion systématique s'y produisant, mais en l'état actuel le risque d'affouillement est faible.

9) Esquineau – RD 36d (Grand Rhône Rive Droite PK 319,5 – 322,5)

Ce secteur est en zone mixte avec des berges de hauteur faible (< 2 m). La ripisylve (basse et haute) est continue. En comparant les cartes de 2007 à celle de 1876, on remarque une importante érosion de la berge, de l'ordre d'une centaine de mètre environ par endroit. La bathymétrie évolue de -6 à -11 m NGF.

Il faut noter que, les points menaçants le pied de digue sont les suivants :

- **GRD 320** : en amont et aval des enrochements récents : érosion qui reprend aux extrémités, risque d'affouillement très important ;

- **GRD 321,2** : En amont et aval des enrochements récents, l'érosion reprend aux extrémités. Il y a des affaissements locaux dans les enrochements (notamment GRD 321,5), risque d'affouillement très important.

Des phénomènes d'érosion locale sont également présents mais ne menacent pas directement le pied de digue :

- **GRD 321,1 et GRD 321,2** : trois trous d'érosion. Le risque d'affouillement reste faible sur le court terme. L'évolution de ces trous d'érosion est à contrôler.

Du GRD 320 au GRD 321 : on note le bon état général de l'ensemble : ancien perré + ancien enrochements. Risque d'affouillement faible.

2.8.2 Berges du Petit Rhône

Sur les 55 km de digue jalonnant le Petit Rhône, 18 secteurs disposent d'un ségonal faible en rive gauche du Petit Rhône et également 18 en rive droite du Petit Rhône. Il est nécessaire d'inspecter ces zones de faible ségonal car ce sont des zones à enjeux où toute érosion peut être néfaste pour la stabilité du pied de berge ou la digue elle-même.

Les zones à enjeux du Petit Rhône inspectées par voie nautique en mars 2015 sont les suivantes :

Tableau 65. Zone à enjeux inspectées par voie nautique en mars 2015 – Petit Rhône Rive Gauche

Petit Rhône Rive Gauche (PRG)	
Nom du tronçon	**PK début – PK fin**
1) Pont suspendu – Cazeneuve	281 – 282,5
2) Aval Caseneuve	283
3) Mas de Rey – Mas Médaille	285,5 – 286,5
4) Mas Trésorière – Mas de Roy	289 – 290,5
5) Mas Léotaud	291,25 – 292,25
6) Portamaud	292,75 – 293,75
7) Pont de Cavalès – Mas de la Vinasse	294,25 – 296,5
8) Figarès	297,75 – 299
9) Casebrune – Mas de la Vigne	300,75 – 305,5
10) Traversée d'Albaron	306 – 309
11) Le Paty de la Trinité – Mas Eymini	309,75 – 312,25
12) Grande Cabanne de Vaccarès	315,25 – 316
13) Mas Ballarin - Duroure	316,75 – 317,25
14) Bergerie Duroure – Sylvéréal	318,5 – 321,5

15) Château d'Astouin - Baumelles	324,5 – 326
16) La Fadaise	330 – 330,75
17) Port Dromar	333,5 – 335
18) L'Amarée	336 – 336,5

Tableau 66. Zone à enjeux inspectées par voie nautique en mars 2015 – Petit Rhône Rive Droite

Petit Rhône Rive Droite (PRD)	
Nom du tronçon	**PK début – PK fin**
1) Tourette	284 – 285
2) Aval Tourette	285,5
3) Petit Argence – A54	287,5 – 288,5
4) Grand Cabanne	290,5 – 291
5) Domaine de Marsane à Mas Berthaud	291,25 – 293
6) Mas d'Auzière – Pont de Cavalès	293,5 – 294,6
7) Pont de Saint Gilles (Amont/Aval)	295,5 – 298
8) Ecluse de Saint-Gilles (Amont/Aval)	299 – 299,75
9) Ecluse St Gilles – La Motte	299,75 – 306,5
10) La Motte	307 – 307,75
11) Mas de Claire Farine – Mas Beauregard	308,75 – 311
12) Mas des Pradeaux	312,25 – 314,25
13) Coude de Capette	314,5 – 315,5
14) Coude de la Montcalm	318 – 318,5
15) Mas de Liviers	320 – 320,75
16) Traversée de Sylvéréal	321,25 – 322
17) Sylvéréal – Mas du Juge	322 – 324,5
18) Pin Fourcat	326,75 – 328,75

Petit Rhône Rive Gauche

1) Pont suspendu – Cazeneuve (PRG 281 – 282,5)

Ce secteur est en extrados avec des berges de hauteur moyenne (entre 2 et 4 m). La ripisylve basse est continue tandis que la ripisylve haute est discontinue. Différents trous, soit d'arbres tombés soit d'animaux, sont présents et pourraient engendrer un début d'érosion. Les enrochements anciens présents sur ce secteur sont très dégradés voir détruits aux droits des zones érodées. En comparant les cartes de 2007 à celle de 1876 il n'y a aucune évolution des berges (ni d'érosion, ni d'accrétion). Néanmoins lors de la visite par voie nautique, nous avons constaté des signes d'érosion. La bathymétrie du pied de berge est peu profonde (environ -3 m NGF).
Actuellement, ce secteur ne comporte aucun risque majeur, cependant, certaines zones peuvent prétendre à s'éroder davantage sur le long terme. **Le secteur est à surveiller.**

2) Aval Caseneuve (PRG 283)

Ce secteur est en extrados avec des berges de hauteur moyenne (entre 2 et 4 m). La ripisylve (basse et haute) est continue. Aucun signe d'érosion ni de potentielle faiblesse a été décelé durant la visite. Les enrochements anciens présentent un état correct. La berge est en bon état. De plus, la bathymétrie du pied de berge est peu profonde (environ -3 m NGF).
Il n'y a actuellement pas de risque sur ce secteur.

3) Mas de Rey – Mas Médaille (PRG 285,5 – 286,5)

Ce secteur est en extrados avec des berges de hauteur importante (> 4 m). La ripisylve (basse et haute) est continue. On note la présence d'arbres couchés. En comparant les cartes de 2007 à celle de 1876 il n'y a aucune évolution des berges (ni d'érosion, ni d'accrétion). Néanmoins lors de la visite par voie nautique, nous avons constaté des signes d'érosion. Notamment au droit du PRG 286.1 et sur un linéaire de 100 m où la berge constituant le pied de digue a subit une érosion importante malgré la présence des panneaux de fond (non visibles lors de la visite car niveau d'eau trop important) et une faible bathymétrie (environ - 3 m NGF).
Risque important potentiel à court terme pour le pied de digue (PR 286.1)

4) Mas Trésorière – Mas de Roy (PRG 289 – 290,5)

Ce secteur est en zone mixte avec des berges de hauteur moyenne (entre 2 et 4 m). La ripisylve (basse et haute) est continue. En comparant les cartes de 2007 à celle de 1876 on constate que la zone est en accrétion (entre 15 et 40 mètres environ). Les enrochements anciens sont supposés être recouverts par le dépôt ainsi formé. Un épi est encore visible (PR 290). De plus, la bathymétrie du pied de berge est peu profonde (environ -3 m NGF).
La zone ne présente aucun danger.

5) Mas Léotaud (PRG 291,25 – 292,25)

Ce secteur est en intrados avec des berges de hauteur moyenne (entre 2 et 4 m). La ripisylve (basse et haute) est continue. On note la présence d'arbres couchés. Sur une partie du linéaire (PR 291.5 au PR 291.6) on observe la présence de dépôt d'environ 5 à 10 mètres (comparaison des cartes 1876/2007). De plus, la bathymétrie du pied de berge est peu profonde (environ -5 m NGF). Ce secteur (PRG 291.5 au PRG 291.6) ne présente aucun danger, même à long terme.
Au droit du PRG 291.9 on remarque la présence d'un arbre déraciné ainsi que des signes d'érosion sur un linéaire de 50 mètres. La largeur du ségonal étant très faible à cet endroit (< 2 m), la zone présente un danger pour la pérennité du pied de digue.
Ce secteur (PRG 291.9) présente un risque potentiel important.

6) Portamaud (PRG 292,75 – 293,75)

Ce secteur est en intrados avec des berges de hauteur moyenne (entre 2 et 4 m). La ripisylve (basse et haute) est continue. On note la présence d'arbres couchés. En comparant les cartes de 2007 à celle de 1876 on constate que la zone est en accrétion (entre 15 et 40 mètres environ). Les panneaux de fond, non visible lors de la visite, permettent d'expliquer cette zone d'accrétion importante. Les enrochements anciens sont supposés être recouverts par le dépôt ainsi formé. Ce dépôt semble être légèrement en érosion ponctuellement, probablement à cause du batillage. La bathymétrie du pied de berge est très peu profonde (environ -3 m NGF à - 0.50 m par endroit).
Ce secteur ne semble présenter aucun danger.

7) Pont de Cavalès – Mas de la Vinasse (PRG 294,25 – 296,5)

Ce secteur est en extrados avec des berges de hauteur moyenne (entre 2 et 4 m). La ripisylve basse est continue tandis que la ripisylve haute est discontinue. Tout le linéaire semble être en légère accrétion (environ 15 m). Les deux épis du secteur (PRG 295.1 et PRG 294.75) sont encore visibles.
Néanmoins, du PRG 295.5 au PRG 295.65, différents trous, soit d'arbres tombés soit d'animaux, sont présents et pourraient engendrer un début d'érosion. Les enrochements anciens présents sur ce secteur sont très dégradés voir détruits. En comparant les cartes de 2007 à celle de 1876 il n'y a aucune évolution des berges (ni d'érosion, ni d'accrétion). Néanmoins lors de la visite par voie nautique, nous avons constaté des signes d'érosion. Par rapport à la totalité du linéaire, la bathymétrie du pied de berge sur ce secteur semble s'approfondir, passant de -3 m NGF à environ -5.5 m NGF.
Ce secteur (PRG 295.5 au PRG 295.65) est à surveiller.

8) Figarès (PRG 297,75 – 299)

Ce secteur est en zone mixte avec des berges de hauteur moyenne (entre 2 et 4 m). La ripisylve (basse et haute) est continue. En comparant les cartes de 2007 à celle de 1876, généralement, il n'y a aucune évolution des berges (ni d'érosion, ni d'accrétion). Hormis au droit du PRG 299 où nous pouvons remarquer une zone d'accrétion importante (environ 50 mètres). Cependant, lors de la visite par voie nautique, nous avons constaté des signes d'érosion (et détériorations de la berge). Au droit des zones érodées, les enrochements anciens sont très dégradés voir détruits. La bathymétrie du pied de berge est peu profonde (environ -4 m NGF. Par endroit, le ségonal est faible (< 2 m).

Au vu de ces constatations, du PRG 297.75 au PRG 298.5, les signes d'érosion et dégradations ponctuels sont à surveiller.
A terme, le pied de digue peut être réellement menacé.

9) Casebrune – Mas de la Vigne (PRG 300,75 – 305,5)

Ce secteur est tantôt en zone mixte (PRG 300 au PRG 302) tantôt en extrados (PRG 302 au PRG 305.5) avec des berges de hauteur moyenne (entre 2 et 4 m). La ripisylve basse est continue tandis que la ripisylve haute est discontinue. On note la présence d'arbres couchés. Les enrochements anciens sont dégradés dans la zone mixte où on constate en comparant les cartes de 2007 à celle de 1876 que le secteur est en cours d'érosion (largeur de berge érodée : +25 m environ). Ce situe également dans ce secteur, la brèche de Casebrune (PRG 301). Les sacs ne semblent avoir subi aucun désordre depuis 1994. La bathymétrie du pied de berge est peu profonde (environ -4 m NGF). Des signes d'érosion (arbres couchés, linéaire légèrement érodé probablement à cause du batillage) sont également présents en aval du PRG 305. On note que la berge est détériorée sur 30 m par l'aménagement de tierces personnes au droit du PRG 303.25.

De par l'érosion constatée en comparant les cartes ainsi que les désordres observés (dégradations enrochements, ancienne brèche, effets du batillage) **ces secteurs (PRG 300.75 au PRG 302 et en aval du PRG 305) sont à surveiller.**

10) Traversée d'Albaron (PRG 306 – 309)

Ce secteur est en extrados avec des berges de hauteur importante (> 4 m). La ripisylve basse est continue tandis que la ripisylve haute est discontinue. En comparant les cartes de 2007 à celle de 1876, généralement, il n'y a aucune évolution des berges (ni d'érosion, ni d'accrétion). Néanmoins, sur toute la traversée du village d'Albaron les anciens enrochements sont détruits. On note également la présence d'érosion ponctuelle au droit d'un arbre et une détérioration de la berge par des tierces personnes. La bathymétrie est comprise entre -3 et -6 m NGF sur toute la traversée d'Albaron.
Ce secteur ne présente pas de danger immédiat, mais pourrait sur le long terme en présenter avec notamment une érosion accentuée au droit des anciens enrochements détruits. Le village d'Albaron se trouvant à proximité immédiate de la digue dans le val, **le secteur est à surveiller.**

11) Le Paty de la Trinité – Mas Eymini (PRG 309,75 – 312,25)

Ce secteur est en zone mixte avec des berges de hauteur moyenne (entre 2 et 4 m). La ripisylve basse est continue tandis que la ripisylve haute est discontinue. En comparant les cartes de 2007 à celle de 1876, généralement, il n'y a aucune évolution des berges (ni d'érosion, ni d'accrétion). Les enrochements anciens présentent un état bon à dégradé selon les secteurs. De plus la bathymétrie est peu profonde (comprise en -3 et -5 m NGF). Ce secteur ne semble présenter aucun danger.

Cependant, on note la présence d'une érosion ponctuellement importante au droit d'un arbre (PRG 310.8). A terme, cet arbre pourrait s'arracher et ainsi emporter la berge. On remarque néanmoins que la berge ne constitue pas directement le pied de digue comme cela pourrait être le cas sur le reste du linéaire.

Ce secteur et cette érosion ponctuelle, PRG 310.8, sont à surveiller.

12) Grande Cabanne de Vaccarès (PRG 315,25 – 316)

Ce secteur est en extrados avec des berges de hauteur moyenne (entre 2 et 4 m). La ripisylve basse est continue tandis que la ripisylve haute est discontinue. On note la présence d'arbres couchés. En comparant les cartes de 2007 à celle de 1876 il n'y a aucune évolution des berges. Néanmoins, les anciens enrochements présentent un état très dégradé à totalement détruits. Nous avons également constaté des signes d'érosion notamment en aval du PRG 315.5. Au droit de ce point, la bathymétrie de 2009 indique la présence d'une fosse à environ – 10 m en pied de berge.
Ce secteur présente un risque potentiel important pour le pied de berge. Des phénomènes d'affouillement externe pourraient se produire. Secteur sensible.

13) Mas Ballarin - Duroure (PRG 316,75 – 317,25)

Ce secteur est en zone mixte avec des berges de hauteur moyenne (entre 2 et 4 m). La ripisylve (basse et haute) est continue. Aucun signe d'érosion ni de potentielle faiblesse a été décelé durant la visite. Les enrochements anciens présentent un état correct. La berge est en bon état. De plus, la bathymétrie du pied de berge est peu profonde (environ -6 m NGF).
Il n'y a actuellement pas de risque sur ce secteur.

14) Bergerie Duroure – Sylvéréal (PRG 318,5 – 321,5)

Ce secteur est en zone mixte avec des berges de hauteur moyenne (entre 2 et 4 m). La ripisylve basse est continue tandis que la ripisylve haute est discontinue. En comparant les cartes de 2007 à celle de 1876 il n'y a aucune évolution des berges. Néanmoins, les anciens enrochements présentent un état très dégradé à totalement détruits. On note la présence d'une érosion ponctuellement importante au droit d'arbres (entre PRG 319.5 et PRG 319.9). A terme, ces arbres pourraient s'arracher et ainsi emporter la berge. De plus, le ségonal est faible environ 5 m. La bathymétrie du pied de berge est peu profonde (entre -4 et – 5.5 m NGF).
Au vu de ces constatations, les signes d'érosion et dégradations ponctuelles sont à surveiller.
A terme, le pied de digue peut être réellement menacé.

15) Château d'Astouin - Baumelles (PRG 324,5 – 326)

Ce secteur est en extrados avec des berges de hauteur faible (< 2 m). La ripisylve (basse et haute) est discontinue. En aval du PRG 325.3, les berges sont aménagées (pontons, cabanons). Il nous a été difficile d'émettre un diagnostic de l'état précis de ces berges. Nous pouvons cependant remarquer que les anciens enrochements sont à priori présents malgré leur état très dégradé. La bathymétrie présente ponctuellement des fosses (par exemple, PRG 326, au droit des aménagements : - 13 m NGF).
Les aménagements ainsi que la bathymétrie profonde en aval du PRG 325.3, affaiblissent la berge et peuvent engendrer des phénomènes d'affouillements externes. **Secteur sensible car bathymétrie profonde.**
En amont, les enrochements présentent un état dégradé. La bathymétrie est peu profonde et ne se présente pas sous la forme d'une fosse.
Cependant, aucun danger potentiel n'est à déplorer sur ce secteur.

16) La Fadaise (PRG 330 – 330,75)

Ce secteur est en extrados avec des berges de hauteur moyenne (entre 2 et 4 m). La ripisylve (basse et haute) est discontinue. Les enrochements de l'ouvrage hydraulique de la Fadaise sont en bon état. Aucun danger potentiel.
En aval de la station de pompage, à partir du PRG 330.25, on observe des signes d'érosion. En comparant les cartes de 2007 et 1876, la largeur érodée atteint un maximum de 75 m environ. La bathymétrie présente une fosse d'environ -14 m NGF. On note aussi que la berge est aménagée (pontons, cabanons).
Les aménagements, la bathymétrie profonde et l'érosion, sont autant de facteurs qui affaiblissent la berge et peuvent engendrer des phénomènes d'affouillements externes.
Le secteur est très sensible et présente un risque important. A court terme comme à long terme.

17) Port Dromar (PRG 333,5 – 335)

Secteur non vu lors de l'inspection des berges en mars 2015 pour des raisons de sécurité (vent et vague très violents).

18) L'Amarée (PRG 336 – 336,5)

Secteur non vu lors de l'inspection des berges en mars 2015 pour des raisons de sécurité (vent et vague très violents).

Petit Rhône Rive Droite

1) Tourette (PRD 284 – 285)

Ce secteur est en extrados avec des berges de hauteur moyenne (entre 2 et 4 m). La ripisylve haute et basse est continue. Différents trous, soit d'arbres tombés soit d'animaux, sont présents et pourraient permettre un début d'érosion. La présence de panneaux de fond (non visibles lors de l'inspection du fait du niveau d'eau trop important) est au contraire une barrière à l'érosion.
Sur le long terme le secteur est stable, il faut simplement s'assurer que les trous n'entrainent pas d'érosion.

2) Aval Tourette (PRD 285,5)

Ce secteur, très localisé, possède des berges de hauteur moyenne dont la ripisylve est continue. Il n'a pas été relevé de zone de danger est le secteur est en légère accrétion sur le long terme.
Il n'y a actuellement pas de risque sur ce secteur.

3) Petit Argence – A54 (PRD 287,5 – 288,5)

- Du PRD 287,6 au PRD 287,7

En extrados, ce secteur a des berges hautes (> 4 m) pour une bathymétrie faible et de faible pente. De plus, il y a des panneaux de fond le long de la berge (non visible le jour de l'inspection, le niveau d'eau étant trop élevé). A long terme, ce secteur est stable.
Il n'y a actuellement pas de risque sur ce secteur.

- Du PRD 288 au PRD 288,5

Situé en zone mixte, ce secteur comporte des berges hautes avec une ripisylve basse continue et une ripisylve haute plus discontinue. Il n'a pas été repéré de zones de danger mais autour du panneau de PK la ripisylve a été volontairement supprimée ; facteur négatif, comme on peut le voir sur Grand Rhône rive gauche aval.
Il n'y a actuellement pas de risque sur ce secteur.

4) Grand Cabanne (PRD 290,5 – 291)

Les berges, de hauteur moyenne, sont situées en zone mixte ; la ripisylve qui les recouvre est continue. Il n'y a pas de grosse érosion mais une érosion faible est présente sur l'ensemble du secteur, malgré la présence de panneaux de fond. La faible érosion observée va à l'encontre de l'évolution géomorphologique qui tend plutôt à l'accrétion, il faut s'assurer que la tendance n'est pas à l'érosion.

5) Domaine de Marsane à Mas Berthaud (PRD 291,25 – 293)

- Du PRD 291,4 au PRD 291,6

Ce secteur comporte des berges de hauteur moyenne et est situé en zone mixte. La ripisylve est continue. Aucune dégradation n'a été observée et, même s'ils n'ont pas été vus, le secteur comporte des panneaux de fond. Le secteur est en accrétion sur le long terme.
Il n'y a actuellement pas de risque sur ce secteur.

- Du PRD 292 au PRD 292,2

Situées en extrados, les berges de ce secteur sont hautes et recouvertes de façon continue de ripisylve. Aucun risque n'a été repéré et le secteur est stable sur le long terme.
Il n'y a actuellement pas de risque sur ce secteur.

- Du PRD 292,2 au PRD 293

Ce secteur, en extrados, comporte des berges de hauteur moyenne avec une ripisylve continue. Une légère érosion est observée sur le linéaire : apparait creusé sous les racines. Le secteur est néanmoins stable à long terme.
Il n'y a actuellement pas de risque sur ce secteur, **mais il est à surveiller.**

6) Mas d'Auzière – Pont de Cavalès (PRD 293,5 – 294,6)

En zone mixte, les berges sont de hauteur moyenne avec une ripisylve continue et dense. L'état général est très bon, il y a tout de même un trou, certainement dû à un arbre déraciné au PK 294.4. A long terme ce secteur est stable, ce qui se confirme par la présence d'enrochements, comme signalés sur les plans de 1876. Il le risque est très faible sur ce secteur mais il faut s'assurer que la tendance n'est pas à l'érosion au niveau du trou repéré (très localisé).

7) Pont de Saint Gilles (Amont/Aval) (PRD 295,5 – 298)

Pour ce secteur les berges sont en extrados, elles ont une hauteur moyenne et possèdent une ripisylve basse continue et une haute discontinue. Un affaissement local s'est produit au PK 297.1, la végétation ayant fortement poussée, il n'est que très peu visible depuis le fleuve, il a été repéré grâce aux rubalises mises en place. Sur l'ensemble du secteur la ripisylve est dense mais il ne semble pas y avoir d'autres zones à risque. Des panneaux de fond sont présents sur le linéaire. Sur le long terme la tendance est à l'accrétion.
Il n'y a actuellement pas de risque sur ce secteur, mais **le comportement au droit de l'affaissement est à surveiller.**

8) Ecluse de Saint-Gilles (Amont/Aval) (PRD 299 – 299,75)

Les berges hautes de ce secteur situé en extrados sont recouvertes d'une ripisylve continue. Il n'y a pas de défauts de repéré sur ce linéaire qui comporte des panneaux de fond (non observés dû au niveau de l'eau). La zone est en accrétion sur le long terme.
Il n'y a actuellement pas de risque sur ce secteur.

9) Ecluse St Gilles – La Motte (PRD 299,75 – 306,5)

- Du PRD 299,9 au PRD 303,3

Ce secteur de plus de 3km comporte des zones mixtes et des zones en extrados, dans les deux cas la berge est de hauteur moyenne avec une ripisylve continue. Il n'y a pas de défauts de repéré sur ce linéaire. La zone est stable sur le long terme, les enrochements/perrés ont été observés en alternance.
Il n'y a actuellement pas de risque sur ce secteur.

- Du PRD 303,6 au PRD 304,5

Le secteur est situé en extrados, il comporte des berges de hauteur moyenne qui sont recouvertes d'une ripisylve basse continue et haute discontinue. Il n'y a pas de défauts de repérés sur ce linéaire. La zone est stable sur le long terme, excepté entre les PK 304.25 et 304.4 ou la tendance long terme est à l'érosion.
Il n'y a actuellement pas de risque sur ce secteur, **la partie aval, en érosion depuis 1876, doit néanmoins être surveillée.**

- Du PRD 304,8 au PRD 305,6

La berge est située en extrados, elle est de hauteur moyenne et recouverte d'une ripisylve basse continue et haute discontinue. Au PK 304.9, une tierce personne a aplanie la berge jusqu'à une hauteur nulle au droit du fleuve, certainement pour créer un accès. Au PK305.4 il y a eu une brèche ou une zone à fort risque qui a été protégée par des enrochements. Le ségonal, très faible, est stable sur le long terme.
Il faut s'assurer qu'il n'y a pas d'érosion qui se créée aux deux zones citées ci-dessus.

- Du PRD 306 au PRD 306,4

Situé en intrados, ce secteur a des berges basses (< 2 m) comportant une ripisylve basse continue et haute discontinue. Rien n'a été observé sur ce secteur. A long terme c'est une zone stable.
Il n'y a actuellement pas de risque sur ce secteur.

10) La Motte (PRD 307 – 307,75)

Situé en intrados, ce secteur a des berges de hauteur moyenne et comporte une ripisylve basse continue et haute discontinue. Rien n'a été observé sur ce secteur. A long terme c'est une zone stable.
Il n'y a actuellement pas de risque sur ce secteur.

11) Mas de Claire Farine – Mas Beauregard (PRD 308,75 – 311)

- Du PRD 308,8 au PRD 309,1

Dans ce secteur le ségonal est très faible, il est situé en zone mixte avec des berges basses à moyennes qui sont recouvertes d'une ripisylve basse continue. Il y a un affaissement au PK 309, celui-ci est léger mais le ségonal étant absent dans cette zone il est à surveiller. Sur le long terme le secteur est stable ou en accrétion (jusqu'à 30 m). Le secteur se comporte

globalement bien mais **l'affaissement cité ci-dessus et l'absence de ségonal indiquent que le risque d'érosion de la digue est présent.**

- Du PRD 309,4 au PRD 309,6

Ce secteur est en zone mixte avec des berges basses et une ripisylve basse continue sur les 100 premiers mètres et absente sur les 100 derniers. Cette absence de végétation est due à une ancienne brèche de 2003, qui a été réparée et renforcée par des enrochements. Aujourd'hui il n'y a pas de zone à risque. Le secteur est stable sur le long terme. Le secteur se comporte globalement bien mais **son historique force à la prudence.**

- Du PRD 310,2 au PRD 310,8

Ce secteur en intrados possède des berges basses avec une ripisylve basse continue et dense. Aucun désordre n'a été repéré dans cette zone. A long terme le secteur est stable.
Il n'y a actuellement pas de risque sur ce secteur.

12) Mas des Pradeaux (PRD 312,25 – 314,25)

Ce secteur est en intrados, ses berges sont de hauteur moyenne et recouvertes d'une ripisylve basse continue et haute discontinue. Ce secteur comporte à minima deux trous dus à des arbres déracinés (PK 312.9 et PK 313.9) et il y a une légère érosion de pied de berge au droit de la berge abrupte (PK 313.2 à 313.9). Sur le long terme le secteur est globalement stable avec la zone aval plutôt en accrétion. **Il faut s'assurer qu'il n'y a pas d'érosion qui se créée au droit des zones citées ci-dessus.**

13) Coude de Capette (PRD 314,5 – 315,5)

Situées en extrados, les berges de ce secteur sont de hauteur moyenne et possèdent une ripisylve continue, haute comme basse. Un gros affaissement est visible au PK 314.7 et, jusqu'au PK 315, il y a de l'érosion de pied par intermittence, plutôt légère. La bathymétrie indique une fosse à -17 m en pied de berge. Le secteur est, sur le long terme, stable et les enrochements et perrés de 1876 sont encore visibles. Malgré sa stabilité à long terme se secteur dois être contrôlé vis-à-vis de l'érosion, **la dynamique au PK 314.7 est à l'érosion.**

14) Coude de la Montcalm (PRD 318 – 318,5)

Ce secteur est en zone mixte avec une hauteur de berge moyenne et une ripisylve continue haute et basse. Aucun désordre n'a été relevé sur ce tronçon. A long terme c'est une zone en accrétion.
Il n'y a actuellement pas de risque sur ce secteur.

15) Mas de Liviers (PRD 320 – 320,75)

Zone située en intrados présentant des berges basses avec une ripisylve basse continue et haute discontinue. Le secteur a un bon état général, excepté une légère érosion qui a creusé

sous les racines d'un arbre au PK 320.45. Le secteur est stable à long terme. Il n'y a actuellement pas de risque sur ce secteur.

16) Traversée de Sylvéréal (PRD 321,25 – 322)

Ce secteur est en extrados, ses berges sont de hauteur moyenne avec une ripisylve discontinue haute et basse. Il existe deux zones où il y a absence de ripisylve : au niveau de la base de canoë (PK 321.8) et d'une habitation (PK 321.95). Il existe deux zones de forte érosion : en pied de berge à la base de canoë et sous l'ouvrage hydraulique au PK 321.9. Sur le long terme la zone est en légère accrétion.
Même si sur le long terme le comportement est bon, **il existe des zones de faiblesses qui comportent des risques vis-à-vis de l'érosion.**

17) Sylvéréal – Mas du Juge (PRD 322 – 324,5)

- Du PRD 322,3 au PRD 322,7

Ce secteur est situé en zone mixte avec une berge basse sans ripisylve. Tout le tronçon est érodé, il n'y a pas de ségonal, il n'y a pas de ripisylve. Sur le long terme le secteur a connu une érosion (env. 10 m). **Le secteur a de gros risques d'érosion de digue.**

- Du PRD 322,8 au PRD 324,3

Ce secteur est situé en extrados avec une berge basse sans ripisylve à l'amont (jusqu'à 323.7) et une berge moyenne avec une ripisylve discontinue à l'aval. Tout l'amont du tronçon est érodé, il n'y a pas de ségonal, il n'y a pas de ripisylve, il existe des zones de très forte érosion. Sur le long terme le secteur connait des zones en érosion, stables et en accrétion. **Le secteur a de gros risques d'érosion de digue.**

18) Pin Fourcat (PRD 326,75 – 328,75)

- Du PRD 326,8 au PRD 327

Ce secteur est en zone mixte avec une hauteur de berge moyenne et une ripisylve continue haute et basse. Aucun désordre n'a été relevé sur ce tronçon. A long terme c'est une zone en accrétion.
Il n'y a actuellement pas de risque sur ce secteur.

- Du PRD 327,8 au PRD 328,3

Situé en zone mixte, ce secteur a des berges de hauteur moyenne avec une ripisylve basse continue. Il y a un peu d'érosion en limite amont des enrochements (PK 328.1) et une zone d'érosion à l'aval du secteur, où la largeur du ségonal augmente. A long terme le secteur a subi une forte érosion car le fleuve a déplacé son lit, non endigué à l'époque. **Le risque d'érosion est légèrement présent sur ce secteur, la limite amont des enrochements est à surveiller.**

- Du PRD 328,5 au PRD 328,7

Ce secteur est situé en extrados, il possède une berge basse et sa ripisylve est uniquement constituée de cannes de Provence, présentes en alternance. L'état global du tronçon est moyen avec des alternances de zones érodées et saines. A long terme le secteur a subi une forte érosion car le fleuve a déplacé son lit, non endigué à l'époque. **Le risque d'érosion est présent sur ce secteur.**

2.9 SYNTHESE ET CONCLUSION SUR LE RISQUE D'AFFOUILLEMENT EXTERNE

2.9.1 Grand Rhône

L'analyse des différents points évoqués ci-dessus permet de conclure quant au risque d'affouillement externe.

Grand Rhône Rive Gauche

Le risque d'affouillement externe est estimé comme **faible** sur un linéaire de 36 km environ, soit 85% de la rive gauche du Grand Rhône.

Le risque d'affouillement externe est estimé comme **modéré** sur un linéaire de 3 km environ, soit 7 % de la rive gauche du Grand Rhône.

Le risque d'affouillement externe est estimé comme **fort** sur un linéaire de 500 m environ, soit environ de 2 % de la rive gauche du Grand Rhône. Ces érosions sont ponctuelles et proche de la digue. La piste amont de la digue est érodée.

Le risque d'affouillement externe est estimé comme **très fort** sur un linéaire de 1,5 km environ, soit 3 % de la rive gauche du Grand Rhône. Ces érosions sont ponctuelles et très proche de la digue et s'opèrent au droit des panneaux indiquant les PK pour la navigation principalement. Le pied de la digue est érodé souvent.

Environ 1,5 km de digues ne sont pas gérés par le SYMADREM en rive gauche du Grand Rhône, soit 3% de la rive gauche environ.

Ci-dessous les commentaires sur les risques d'affouillement externe perçus comme fort et très fort.

GRG 311,75 : l'évolution en plan à moyen terme est à l'érosion. Une centaine de mètre se sont érodés entre 1876 et 2007 au droit de ce PK 311,75. Il est à noter que des phénomènes d'érosion (entre 20 et 75 m) sont aussi présents du GRG 311,25 au GRG 312,5. Les fonds s'incisent sur le long terme comme entre 2002 et 2007 (impact des crues récentes). On observe approximativement à 200 m que la bathymétrique est de – 10 m NGF, ce qui peut être considéré comme une fosse de profondeur moyenne. L'inspection des berges par voie nautique a permis de relever la présence d'arbres couchés, un mauvais état des berges, ainsi que l'absence de protection. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** au droit du GRG 311,75.

Photo 1. GRG 311,75 – Risque d'affouillement externe très fort

GRG 313 : l'évolution en plan à moyen terme est à l'érosion. Environ 20 mètres se sont érodés entre 1876 et 2007 au droit de ce PK. Les fonds s'incisent sur le long terme comme entre 2002 et 2007 (impact des crues récentes). La bathymétrie est de – 6 m NGF, ce qui peut être considéré comme une valeur moyennement faible. L'inspection des berges par voie nautique a permis de relever la présence d'une anse d'érosion au droit du panneau PK 313, c'est-à-dire, un mauvais état des berges, ainsi que l'absence de protection. De plus sur ce secteur, la berge constitue le pied de digue et cela s'avère très dangereux. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** au droit du GRG 313.

Photo 2. GRG 313 – Risque d'affouillement externe très fort

GRG 313,25 : ce secteur est similaire au précédent. Cependant, il n'a pas été relevé de phénomènes d'érosion lors de l'inspection nautique, et l'évolution est stable, ce qui n'exclut pas un risque important. C'est pourquoi le risque d'affouillement externe est considéré comme **fort** au droit du GRG 313,25. Pas de photo disponible.

GRG 314,25 : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme comme entre 2002 et 2007 (impact des crues récentes). La bathymétrie est d'environ – 8 m NGF, ce qui peut être considéré comme une valeur moyenne. Sur ce secteur, la berge constitue le pied de digue et cela s'avère très dangereux. Cinquante mètre plus en amont (GRG 314,200) un affouillement externe s'est produit lors de la crue de décembre 2003. Aucun confortement n'a été opéré depuis mais il fait l'objet d'une surveillance. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** au droit du GRG 314,250 et plus particulièrement aussi au droit du GRG 314,200.

Photo 3. GRG 314,25 – Risque d'affouillement externe très fort

GRG 314,5 : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme comme entre 2002 et 2007 (impact des crues récentes). La bathymétrie est d'environ - 8 m NGF, ce qui peut être considéré comme une valeur moyennement faible. L'inspection des berges par voie nautique a permis de relever la présence d'une anse d'érosion au droit du panneau PK 314,5 c'est-à-dire, un mauvais état des berges, ainsi que l'absence de protection. De plus sur ce secteur, la berge constitue le pied de digue et cela s'avère très dangereux. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** au droit du GRG 314,5.

Photo 4. GRG 314,5 – Risque d'affouillement externe très fort

GRG 315 : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme comme entre 2002 et 2007 (impact des crues récentes). La bathymétrie est de – 7 m NGF, ce qui peut être considéré une valeur moyenne. Sur ce secteur, la berge constitue le pied de digue et cela s'avère très dangereux. L'inspection des berges par voie nautique a permis de révéler la présence d'enrochements anciens en état correct dont leur rôle pressenti semble bon. Cependant, un affouillement externe s'est produit lors de la crue de décembre 2003. Aucun confortement n'a été opéré mais le secteur reste sous étroite surveillance. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **fort** au droit du GRG 315.

Photo 5. GRG 315 – Risque d'affouillement externe fort

GRG 316,75 : l'évolution en plan à moyen terme est à l'érosion. Environ 10 mètres se sont érodés entre 1876 et 2007 au droit de ce PK. Les fonds s'incisent sur le long terme comme entre 2002 et 2007 (impact des crues récentes). La bathymétrie est d'environ – 6 m NGF, ce qui peut être considéré comme une valeur faible. Aucun confortement n'a été opéré mais le secteur reste sous étroite surveillance. L'inspection des berges par voie nautique a permis de révéler la présence d'enrochements anciens en état correct dont leur rôle pressenti semble bon. Cependant, un affouillement externe s'est produit lors de la crue de décembre 2003. Pour tous ces points évoqués ci-dessus et notamment le dernier, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** au droit du GRG 316,75. Pas de photo disponible.

Le tableau ci-dessous synthétise les différents points évoqués précédemment dans ce chapitre et détaille les conclusions précédentes concernant le risque d'affouillement externe sur le Grand Rhône Rive Gauche.

Grand Rhône Rive Gauche

PK	Evolution en plan long terme	Evolution en plan moyen terme	Evolution du lit long terme	Bathymétrie	Accidentologie	Impact des crues récentes (bathymétrie entre 2002 et 2007	Etat des berges	Etat de la ripisylve	Présence protection	Rôle pressenti de la protection	Risque d'affouillement	Observations
281,5		stable	incision	-	-	incision de 30 cm	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	faible	*quais d'Arles*
281,75		stable	incision	-	-	incision de 30 cm	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	faible	*quais d'Arles*
282		stable	incision	-	-	incision de 30 cm	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	faible	*quais d'Arles*
282,25		stable	incision	-	-	incision de 30 cm	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	faible	*quais d'Arles*
282,5		stable	incision	-	-	incision de 30 cm	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	faible	*quais d'Arles*
282,75		stable	incision	-	-	incision de 30 cm	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	faible	*quais d'Arles*
283		stable	incision	-	Affouillement de pied en 2002	incision de 30 cm	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	faible	*quais d'Arles - travaux de confortement post 2002 terminés*
283,25		stable	incision	-	-	incision de 30 cm	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	faible	*quais d'Arles*
283,5		stable	incision	-	-	incision de 30 cm	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	faible	*quais d'Arles*
283,75		stable	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
284		accrétion de 30 m	incision	-5 m	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
284,25		accrétion de 75 m	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
284,5		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
284,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*

285		Indéfini (accrétion)	incision	≥ -5 m	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
285,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
285,5		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
285,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
286		Indéfini (accrétion)	incision	≥ -5 m	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
286,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
286,5		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	indéfinie					faible	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
286,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	indéfinie					faible	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
287		Indéfini (accrétion)	incision	≥ -5 m	-	incision de 5 cm					faible	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
287,25		Indéfini (stable)	incision	-	-	incision de 5 cm					faible	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
287,5		Indéfini (stable)	incision	-	-	incision de 5 cm					faible	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
287,75		Indéfini (stable)	incision	-	-	incision de 5 cm					faible	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
288		Indéfini (stable)	incision	≥ -5 m	-	incision de 5 cm					faible	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
288,25		Indéfini (stable)	incision	-	-	indéfinie					faible	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
288,5		Indéfini (stable)	incision	-	-	indéfinie					faible	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
288,75		Indéfini (stable)	incision	-	-	indéfinie					faible	*Digue Sud d'Arles - ségonal*

												important
289		stable	incision	≥ -5 m	-	indéfinie					faible	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
289,25		stable	incision	-	-	indéfinie					faible	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
289,5		stable	incision	-	-	indéfinie					faible	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
289,75		érosion de 15 m	incision	-	-	indéfinie					faible	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
290		érosion de 10 m	incision	-10 m	-	incision de 5 cm					faible	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
290,25		accrétion de 10 m	incision	-	-	incision de 5 cm					faible	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
290,5		stable	incision	-	-	incision de 5 cm	moyen	bon	non		faible	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
290,75		stable	incision	-	-	incision de 5 cm	mauvais	présence d'arbres couchés	non		faible	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
291		stable	incision	-8 m	-	incision de 5 cm	bon	bon	oui	bon	faible	*Digue Sud d'Arles*
291,25		stable	incision	-	-	indéfinie	bon	bon	oui	bon	faible	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
291,5		stable	incision	-	-	indéfinie	moyen	bon	non	non	faible	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
291,75		stable	incision	-	-	indéfinie	moyen	présence d'arbres couchés	oui	bon	faible	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
292		stable	incision	-12 m	-	indéfinie	bon	bon	oui	bon	faible	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
292,25		stable	incision	-	-	indéfinie	mauvais	présence d'arbres	non	non	modéré	*Digue Sud d'Arles*

								couchés				
292,5		stable	incision	-	-	incision de 17 cm	moyen	présence d'arbres couchés	non		modéré	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
292,75		stable	incision	-	-	incision de 17 cm	moyen	présence d'arbres couchés	non		modéré	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
293		stable	incision	≥ -5 m	-	incision de 17 cm	érosion (PK)	présence d'arbres couchés	oui	défectueuse	modéré	*Digue Sud d'Arles - ségonal important*
293,25		stable	incision	≥ -5 m	-	incision de 17 cm	bon	bon	non		modéré	*Ségonal ~ 10m mais plateau peu profond*
293,5		stable	incision	≥ -5 m	-	incision de 17 cm	bon	bon	non		modéré	*Ségonal ~ 10m mais plateau peu profond*
293,75		stable	incision	≥ -5 m	-	incision de 17 cm	bon	bon	non		modéré	*Ségonal ~ 10m mais plateau peu profond*
294		stable	incision	≥ -5 m	-	incision de 17 cm	bon	bon	non		modéré	*Ségonal ~ 10m mais plateau peu profond*
294,25		stable	incision	≥ -5 m	-	incision de 17 cm	bon	bon	non		modéré	*Ségonal ~ 10m mais plateau peu profond*
294,5		stable	incision	≥ -5 m	-	incision de 17 cm	bon	bon	non		modéré	*Ségonal ~ 10m mais plateau peu profond*
294,75		stable	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
295		Indéfini (accrétion)	incision	≥ -5 m	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
295,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
295,5		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
295,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
296		Indéfini	incision	≥ -5 m	-	incision de 17					faible	*ségonal important*

		(accrétion)				cm						
296,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
296,5		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
296,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
297		Indéfini (accrétion)	incision	≥ -5 m	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
297,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 5 cm					faible	*ségonal important*
297,5		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 5 cm					faible	*ségonal important*
297,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 5 cm					faible	*ségonal important*
298		Indéfini (accrétion)	incision	≥ -5 m	-	incision de 5 cm					faible	*ségonal important*
298,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 5 cm					faible	*ségonal important*
298,5		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 5 cm					faible	*ségonal important*
298,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 5 cm					faible	*ségonal important*
299		Indéfini (accrétion)	incision	≥ -5 m	-	incision de 5 cm					faible	*ségonal important*
299,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 5 cm					faible	*ségonal important*
299,5		stable	incision	-	-	incision de 5 cm					faible	*ségonal important*
299,75		stable	incision	-	-	incision de 5 cm					faible	*ségonal important*
300		stable	incision	≥ -5 m	-	incision de 5 cm					faible	*ségonal important*
300,25		stable	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
300,5		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
300,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
301		Indéfini (accrétion)	incision	-6 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
301,25		Indéfini	incision	-	-	incision de 50					faible	*ségonal important*

		(accrétion)				cm						
301,5		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
301,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
302		Indéfini (accrétion)	incision	≥ -5 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
302,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
302,5		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
302,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
303		Indéfini (accrétion)	incision	-6 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
303,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
303,5		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
303,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
304		Indéfini (accrétion)	incision	≥ -5 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
304,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
304,5		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
304,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
305		Indéfini (accrétion)	incision	≥ -5 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
305,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
305,5		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
305,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
306		Indéfini (accrétion)	incision	-12 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
306,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*

306,5		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
306,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
307		Indéfini (accrétion)	incision	-12 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
307,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
307,5		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
307,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
308		Indéfini (accrétion)	incision	-8 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
308,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
308,5		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
308,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
309		Indéfini (accrétion)	incision	≥ -5 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
309,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
309,5		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
309,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
310		érosion de 15 m	incision	≥ -5 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
310,25		érosion de 30 m	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
310,5		stable	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
310,75		stable	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
311		stable	incision	-11 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
311,25		érosion de 50 m	incision	-	-	incision de 50 cm	mauvais				faible	*ségonal important*
311,5		érosion de	incision	-	-	incision de 50	mauvais				faible	*ségonal important*

		75 m				cm						
311,75		érosion de 100 m	incision	-	-	incision de 50 cm	mauvais	mauvais	non		très fort	
312		érosion de 20 m	incision	-10 m	-	incision de 50 cm	mauvais				faible	*ségonal important*
312,25		érosion de 20 m	incision	-	-	incision de 50 cm	mauvais				faible	*ségonal important*
312,5		érosion de 40 m	incision	-	-	incision de 50 cm	mauvais	bon	oui	bon	modéré	
312,75		stable	incision	-	-	incision de 50 cm	mauvais	bon	oui	bon	faible	*épi des pilotes*
313		érosion de 20 m	incision	-6 m	-	incision de 50 cm	mauvais	mauvais	non		très fort	
313,25		stable	incision	-	-	incision de 50 cm	mauvais	mauvais	non		fort	
313,5		stable	incision	-	Affouillement externe en 2003	incision de 50 cm					modéré	*enrochements récents post crue 2003*
313,75		stable	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
314		stable	incision	-9 m	-	incision de 50 cm	mauvais	mauvais	oui	défectueuse	modéré	
314,25		stable	incision	-	Affouillement externe en 2003 (314,200)	incision de 50 cm	mauvais	mauvais	non		très fort	
314,5		stable	incision	-	-	incision de 50 cm	mauvais	mauvais	non		très fort	
314,75		stable	incision	-	-	incision de 50 cm	moyen	bon	oui	bon	faible	
315		stable	incision	-7 m	Affouillement externe en 2003	incision de 50 cm	moyen	bon	oui	bon	fort	
315,25		stable	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
315,5		stable	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
315,75		stable	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
316		stable	incision	≥ -5 m	-	incision de 50					faible	*ségonal important*

						cm						
316,25		indéfini	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*canal du Rhône à Fos*
316,5		indéfini	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*canal du Rhône à Fos*
316,75		érosion de 10 m	incision		Affouillement externe en 2003	incision de 50 cm	bon	bon	oui	bon	très fort	
317		érosion de 10 m	incision	-6 m	-	incision de 50 cm	bon	bon	oui	bon	modéré	
317,25		érosion de 10 m	incision	-	-	indéfinie	bon	bon	oui	bon	modéré	
317,5		érosion de 10 m	incision	-	-	indéfinie	bon	bon	oui	bon	modéré	
317,75		érosion de 10 m	incision	-	-	indéfinie	bon	bon	oui	bon	modéré	
318		érosion de 20 m	incision	-	-	indéfinie	moyen	aucune	oui	bon	modéré	
318,25		stable	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
318,5		stable	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
318,75		stable	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
319		stable	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
319,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
319,5		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
319,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
320		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
320,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
320,5		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
320,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
321		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*

321,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
321,5		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
321,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
322		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
322,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
322,5		stable	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
322,75		stable	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
323		stable	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
323,25		stable	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*

Grand Rhône Rive Droite

Le risque d'affouillement externe est estimé comme **faible** sur un linéaire de 35 km environ, soit 83 % de la rive droite du Grand Rhône.

Le risque d'affouillement externe est estimé comme **modéré** sur 1 km environ, soit moins de 2 % de la rive droite du Grand Rhône.

Le risque d'affouillement externe est estimé comme **fort** sur un linéaire de 2 km environ, soit moins de 5 % de la rive droite du Grand Rhône. Ces érosions sont ponctuelles et proches de la digue. La piste amont de la digue est érodée.

Le risque d'affouillement externe est estimé comme **très fort** sur un linéaire de 4 km environ, soit moins de 10 % de la rive droite du Grand Rhône.

Ci-dessous les commentaires sur les risques d'affouillement externe perçus comme fort et très fort.

GRD 287,5 au GRD 288 : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme comme entre 2002 et 2007 (impact des crues récentes). La bathymétrie est d'environ – 9 m NGF, ce qui peut être considéré comme une fosse de profondeur moyenne. L'inspection des berges par voie nautique a permis de révéler la mise à nu du grillage anti-fouisseur déposé lors des travaux de 2005 et ainsi mettre directement en contact le corps de digue avec le Grand Rhône (la berge constitue le pied de digue, voir le talus). Pour tous ces points évoqués ci-dessus et notamment le dernier, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** du GRD 287,5 au GRD 288.

Photo 6. GRD 287,5 au GRD 288 – Risque d'affouillement externe fort

GRD 289,8 : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme. L'impact des crues récentes est indéfini. La bathymétrie est d'environ – 6 m NGF, ce qui peut être considéré une valeur moyenne. L'inspection des berges par voie nautique a permis de révéler la présence d'une anse d'érosion importante et aucune protection de berge.

Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** au droit du GRD 289,8.

Photo 7. GRD 289,8 – Risque d'affouillement externe fort

GRD 290 : même constatation qu'au GRD 289,8. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** au droit du GRD 290. On retrouve une nouvelle fois ce phénomène d'anse d'érosion 10 m en aval du GRD 290.

Photo 8. GRD 290 – Risque d'affouillement externe fort

GRD 297 : l'évolution en plan à moyen terme est dû à l'érosion. Les fonds s'incisent sur le long terme comme entre 2002 et 2007 (impact des crues récentes). La bathymétrie est peu profonde (supérieure à -5 m NGF environ), ce qui est une valeur faible. L'inspection des berges par voie nautique a permis de révéler la présence d'une anse d'érosion importante avec de nombreux arbres déracinés témoignant du caractère érosif de la zone et aucune protection de berge n'a été aperçue. Sur ce secteur, le pied de digue est directement concerné. Pour tous

ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** au droit du GRD 297.

Photo 9. GRD 297 – Risque d'affouillement externe fort

GRD 297,25 (Aube de Bouic) : l'évolution en plan à moyen terme est à l'érosion. Les fonds s'incisent sur le long terme comme entre 2002 et 2007 (impact des crues récentes : - 5 cm). La bathymétrie est peu profonde (supérieure à -5 m NGF environ), ce qui est une valeur faible. L'inspection des berges par voie nautique a permis de révéler la présence d'une ancienne protection en enrochements qui ne joue plus son rôle car le secteur est sujet à une très forte érosion. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **fort** au droit du GRD 297,25.

Photo 10. GRD 297,25 – Risque d'affouillement externe fort

GRD 301,75 : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme comme entre 2002 et 2007 (impact des crues récentes : - 50 cm). La bathymétrie est d'environ -6 m NGF, ce qui est une valeur faible. L'inspection des berges par voie nautique a permis de révéler la présence de phénomène d'érosion et d'arbres couchés. Sur ce secteur, le

pied de digue est directement concerné et il n'y a pas de protection de berge. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** au droit du GRD 301,75.

Photo 11. GRD 301,75 – Risque d'affouillement externe fort

GRD 306,25 au GRD 306,75 : l'évolution en plan à moyen terme est à l'érosion (30 à 75 m). Les fonds s'incisent sur le long terme comme entre 2002 et 2007 (impact des crues récentes : - 50 cm). La bathymétrie est peu profonde (supérieure à -5 m NGF environ), ce qui est une valeur faible. L'inspection des berges par voie nautique (malgré une végétation dense) a permis de révéler la présence de phénomène d'érosion et d'arbres couchés. Sur ce secteur, le pied de digue est directement concerné et il n'y a pas de protection de berge. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** au droit du GRD 306,25 au GRD 306,75.

Photo 12. GRD 306,25 au GRD 306,75 – Risque d'affouillement externe fort

GRD 315,5 : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme comme entre 2002 et 2007 (impact des crues récentes : - 50 cm). La bathymétrie semble être profonde (entre -10 m et -15 m NGF (pas assez de données bathymétriques disponibles)), ce qui peut être considéré, à priori, comme une fosse. L'inspection des berges par voie

nautique a permis de révéler la présence de phénomène d'érosion sous forme d'anse. Sur ce secteur, l'ancienne protection en enrochements ne semble plus être efficace. Des affouillements externes se sont produits en 2003 environ 500 m en amont et en aval de ce secteur. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** au droit du GRD 315,5.

Photo 13. GRD 315,5 – Risque d'affouillement externe fort

GRD 316 : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme comme entre 2002 et 2007 (impact des crues récentes : - 50 cm). La bathymétrie est profonde et d'environ – 15 m NGF, ce qui peut être considéré comme une fosse. Les berges présentent un état mauvais et constitue le pied de digue. Cent mètre plus en amont (GRD 315,900) un affouillement externe s'est produit lors des crues de 2002 et 2003. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** au droit du GRD 316 et plus particulièrement aussi au droit du GRG 315,900.

Photo 14. GRD 316 – Risque d'affouillement externe très fort

GRD 316,5 au GRD 317 : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme comme entre 2002 et 2007 (impact des crues récentes : - 50 cm). La bathymétrie est peu profonde (environ – 5 m NGF). Cependant, nous n'avons pas pu nous approcher du bord car les fonds étaient faibles. Il se peut que la bathymétrie soit largement inférieure à celle annoncée précédemment. Les berges présentent un état mauvais et constitue le pied de digue. La ripisylve est dans un état moyen. De nombreux débris sont présents. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **fort** au droit du GRD 316,5 au GRD 317.

Photo 15. GRD 316,5 au GRD 317 – Risque d'affouillement externe fort

GRD 317,75 : l'évolution en plan à moyen terme est à l'accrétion (20 m environ). Les fonds s'incisent sur le long terme mais l'impact des crues récentes n'est pas quantifié. La bathymétrie est peu profonde (environ – 5 m NGF au maximum). Cependant, nous n'avons pas pu nous approcher du bord car les fonds étaient faibles. Il se peut que la bathymétrie soit largement inférieure à celle annoncée précédemment. Les berges présentent un état mauvais et constitue le pied de digue. On peut faire la même constatation pour la ripisylve. Des phénomènes d'érosion sont clairement identifiables par voie nautique, comme depuis la digue. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** au droit du GRD 317,75.

Photo 16. GRD 317,75 – Risque d'affouillement externe très fort

GRD 318,5 : l'évolution en plan à moyen terme est à l'érosion (entre 15 et 40 m). Les mêmes constatations que précédemment peuvent être effectuées. Pour tous ces points, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** au droit du GRD 318,5.

Photo 17. GRD 318,5 – Risque d'affouillement externe très fort

Du GRD 319,5 au GRD 320,25 (750 m) et du GRD 321,75 au GRD 322,25 (500 m) : ces deux secteurs sont similaires. En effet, leurs évolutions en plan à moyen terme est à l'érosion (de 15 à 40 m pour le 1er secteur et de 15 à 140 m pour le 2ème secteur).). Les fonds s'incisent sur le long terme mais l'impact des crues récentes n'est pas quantifié. La bathymétrie est peu à moyennement profonde (entre -5 et -8 m NGF au maximum). Cependant, nous n'avons pas pu nous approcher du bord car les fonds étaient faibles. Il se peut que la bathymétrie soit largement inférieure à celle annoncée précédemment. L'état des berges est mauvais pour les deux secteurs et il n'y a pas de protection de berge. Des affouillements externes ce sont produits lors de la crue de 2002 au GRD 320 et GRD 321,86. Pour tous ces points, le risque d'affouillement est considéré comme fort sur ces secteurs avec ponctuellement un risque considéré comme **très fort** au droit du GRD 320 et du GRD 321,75 et plus particulièrement au GRD 321,86.

Photo 18. GRD 320 – Risque d'affouillement externe très fort

Photo 19. GRD 321,75 – Risque d'affouillement externe très fort

Le tableau ci-dessous synthétise les différents points évoqués précédemment dans ce chapitre et détaille les conclusions précédentes concernant le risque d'affouillement externe sur le Grand Rhône Rive Droite.

Grand Rhône Rive Droite

PK	Evolution en plan long terme	Evolution en plan moyen terme	Evolution du lit long terme	Bathymétrie	Accidentologie	Impact des crues récentes (bathymétrie entre 2002 et 2007	Etat des berges	Etat de la ripisylve	Présence protection	Rôle pressenti de la protection	Risque d'affouillement	Observations
281,50		stable	incision	-	-	incision de 30 cm	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	faible	*quais d'Arles*
281,75		stable	incision	-	-	incision de 30 cm	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	faible	*quais d'Arles*
282,00		stable	incision	-	-	incision de 30 cm	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	faible	*quais d'Arles*
282,25		stable	incision	-	-	incision de 30 cm	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	faible	*quais d'Arles*
282,50		stable	incision	-	-	incision de 30 cm	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	faible	*quais d'Arles*
282,75		stable	incision	-	-	incision de 30 cm	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	faible	*quais d'Arles*
283,00		stable	incision	-	-	incision de 30 cm	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	faible	*quais d'Arles*
283,25		stable	incision	-	-	incision de 30 cm	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	faible	*quais d'Arles*
283,50		stable	incision	-	-	incision de 30 cm	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	faible	*quais d'Arles*
283,75		stable	incision	-	-	incision de 17 cm	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	*quais d'Arles*	faible	*quais d'Arles*
284,00		Indéfini (accrétion)	incision	-7 m	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
284,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
284,50		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
284,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
285,00		Indéfini	incision	-7 m	-	incision de 17					faible	*ségonal important*

		(accrétion)				cm						
285,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
285,50		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
285,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
286,00		Indéfini (accrétion)	incision	-11 m	-	indéfinie	bon	bon	oui	moyen	modéré	*érosion due aux batillages observée*
286,25		stable	incision	-	-	indéfinie	bon	bon	oui	moyen	faible	*érosion due aux batillages observée*
286,50		stable	incision	-	-	indéfinie	bon	bon	oui	moyen	faible	*érosion due aux batillages observée*
286,75		stable	incision	-	-	indéfinie	bon	bon	oui	moyen	faible	*érosion due aux batillages observée*
287,00		stable	incision	-12 m	-	incision de 5 cm	bon	bon	oui	moyen	modéré	*érosion due aux batillages observée*
287,25		stable	incision	-	-	incision de 5 cm	bon	bon	oui	moyen	faible	*érosion due aux batillages observée*
287,50		stable	incision	-	-	incision de 5 cm	mauvais	bon	oui	moyen	très fort	*érosion du pied de digue important*
287,75		stable	incision	-	-	incision de 5 cm	mauvais	bon	oui	moyen	très fort	*érosion du pied de digue important*
288,00		stable	incision	-9 m	-	incision de 5 cm	mauvais	bon	oui	moyen	très fort	*érosion du pied de digue important*
288,25		stable	incision	-	-	indéfinie	bon	bon	oui	moyen	faible	*érosion due aux batillages observée*
288,50		stable	incision	-	-	indéfinie	bon	bon	oui	moyen	faible	*érosion due aux batillages observée*
288,75		stable	incision	-	-	indéfinie	bon	bon	oui	moyen	faible	*érosion due aux batillages observée*
289,00		stable	incision	-10 m	-	indéfinie	bon	bon	oui	moyen	modéré	*érosion due aux batillages observée*
289,25		stable	incision	-	-	indéfinie	bon	bon	oui	bon	faible	
289,50		stable	incision	-	-	indéfinie	bon	bon	oui	bon	faible	
289,75		stable	incision	-	-	indéfinie	mauvais		non		très fort	
290,00		stable	incision	-6 m	-	incision de 5 cm	mauvais	présence d'arbres couchés	non		très fort	

290,25		stable	incision	-	-	incision de 5 cm	bon	bon	oui	bon	faible	
290,50		stable	incision	-	-	incision de 5 cm	bon	bon	oui	bon	faible	
290,75		Accrétion de 10 m	incision	-	-	incision de 5 cm					faible	*ségonal important*
291,00		Accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	-	incision de 5 cm					faible	*ségonal important*
291,25		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
291,50		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
291,75		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
292,00		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	≥ -5 m	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
292,25		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
292,50		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
292,75		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
293,00		érosion de 30 m	incision	≥ -5 m	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
293,25		érosion de 30 m	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
293,50		stable	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
293,75		stable	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
294,00		stable	incision	≥ -5 m	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
294,25		stable	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*

294,50		stable	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
294,75		stable	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
295,00		stable	incision	-6 m	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
295,25		stable	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
295,50		stable	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
295,75		stable	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
296,00		stable	incision	-7 m	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
296,25		stable	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
296,50		Accrétion de 40 m	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
296,75		Accrétion de 40 m	incision	-	-	incision de 17 cm					faible	*ségonal important*
297,00		érosion	incision	≥ -5 m	-	incision de 17 cm	mauvais	présence d'arbres couchés	non		très fort	*aube de bouic*
297,25		érosion	incision	-	-	incision de 5 cm	bon	bon	oui	défectueuse	fort	*aube de bouic*
297,50		érosion	incision	-	-	incision de 5 cm	bon	bon	oui	bon	faible	
297,75		érosion	incision	-	-	incision de 5 cm	bon	bon	oui	bon	faible	
298,00		érosion	incision	≥ -5 m	-	incision de 5 cm	mauvais	présence d'arbres couchés	non		modéré	*ségonal d'environ 20 m*
298,25		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-	-	incision de 5 cm					faible	*ségonal important*
298,50		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-	-	incision de 5 cm					faible	*ségonal important*
298,75		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-	-	incision de 5 cm					faible	*ségonal important*

299,00		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-6 m	-	incision de 5 cm					faible	*ségonal important*
299,25		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-	-	incision de 5 cm					faible	*ségonal important*
299,50		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-	-	incision de 5 cm					faible	*ségonal important*
299,75		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-	-	incision de 5 cm					faible	*ségonal important*
300,00		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-6 m	-	incision de 5 cm					faible	*ségonal important*
300,25		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
300,50		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
300,75		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
301,00		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-6 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
301,25		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
301,50		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-	-	incision de 50 cm	bon	bon	oui	bon	faible	*léger effet du batillage*
301,75		stable	incision	-	-	incision de 50 cm	mauvais	présence d'arbres couchés	non		très fort	
302,00		stable	incision	-7 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
302,25		stable	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
302,50		stable	incision	-	-	incision de 50					faible	*ségonal important*

						cm						
302,75		stable	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
303,00		stable	incision	≥ -5 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
303,25		stable	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
303,50		stable	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
303,75		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
304,00		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-8 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
304,25		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
304,50		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
304,75		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
305,00		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-8 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
305,25		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
305,50		Accrétion de 50 m à 200 m	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
305,75		érosion de 30 à 75 m	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
306,00		érosion de 30 à 75 m	incision	≥ -5 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
306,25		érosion de 30 à 75 m	incision	-	-	incision de 50 cm	mauvais	présence d'arbres couchés	non		très fort	*végétation dense lors de l'inspection*

306,50		érosion de 30 à 75 m	incision	-	-	incision de 50 cm	mauvais	présence d'arbres couchés	non		très fort	*végétation dense lors de l'inspection*
306,75		érosion de 30 à 75 m	incision	-	-	incision de 50 cm	mauvais	présence d'arbres couchés	non		très fort	*végétation dense lors de l'inspection*
307,00		érosion de 30 à 75 m	incision	≥ -5 m	-	incision de 50 cm	bon	bon	oui	bon	faible	
307,25		érosion de 30 à 75 m	incision	-	-	incision de 50 cm	bon	bon	oui	bon	faible	
307,50		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
307,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
308,00		Indéfini (accrétion)	incision	-13 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
308,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
308,50		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
308,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
309,00		Indéfini (accrétion)	incision	-13 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
309,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
309,50		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
309,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
310,00		Indéfini (accrétion)	incision	-10 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
310,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
310,50		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
310,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
311,00		Indéfini (accrétion)	incision	-8 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
311,25		Indéfini	incision	-	-	incision de 50					faible	*ségonal important*

		(accrétion)				cm						
311,50		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
311,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
312,00		Indéfini (accrétion)	incision	-7 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
312,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
312,50		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
312,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
313,00		Indéfini (accrétion)	incision	-7 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
313,25		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
313,50		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
313,75		Indéfini (accrétion)	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
314,00		érosion de 40 à 90 m	incision	-6 m	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
314,25		érosion de 40 à 90 m	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*
314,50		érosion de 40 à 90 m	incision	-	Affouillement externe en 2003	incision de 50 cm	bon	bon	oui	bon	faible	*enrochements récents post crue 2003*
314,75		érosion de 40 à 90 m	incision	-	Affouillement externe en 2003	incision de 50 cm	bon	bon	oui	bon	faible	*enrochements récents post crue 2003*
315,00		érosion de 40 à 90 m	incision	-10 m	Affouillement externe en 2003	incision de 50 cm	bon	bon	oui	bon	faible	*dégradation très ponctuelle du perré (enrochements récents post crue 2003)*
315,25		stable	incision	-	-	incision de 50 cm					faible	*ségonal important*

315,50		stable	incision	-	-	incision de 50 cm	mauvais	déracinement en cours	oui	défectueuse	très fort	
315,75		stable	incision	-	-	incision de 50 cm	bon	bon	oui	bon	faible	
316,00		stable	incision	-15 m	Affouillement externe en 2002 et 2003 (315,9)	incision de 50 cm	mauvais	bon	oui	moyen	très fort	*érosion ponctuelle*
316,25		stable	incision	-	-	incision de 50 cm	bon	bon	oui	bon	faible	*insfrastructure métallique solvay - emerys*
316,50		stable	incision	-	-	incision de 50 cm	mauvais	moyen	non		fort	*zone peu accessible en bateau (fond peu profonde)*
316,75		stable	incision	-	-	incision de 50 cm	bon	bon	oui	bon	faible	*zone peu accessible en bateau (fond peu profonde)*
317,00		stable	incision	-5 m	-	incision de 50 cm	mauvais	moyen	non		fort	*zone peu accessible en bateau (fond peu profonde)*
317,25		Accrétion de 70 m	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
317,50		Accrétion de 70 m	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
317,75		Accrétion de 20 m	incision	-	-	indéfinie	mauvais	mauvais	non		très fort	*zone peu accessible en bateau (fond peu profonde)*
318,00		Accrétion de 20 m	incision	≥ -5 m	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
318,25		stable	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
318,50		érosion de 15 à 40 m	incision	-	-	indéfinie	mauvais	moyen	non		très fort	*zone peu accessible en bateau (fond peu profonde)*
318,75		érosion de 15 à 40 m	incision	-	-	indéfinie	bon	bon	oui	bon	faible	*ségonal important*

319,00		érosion de 15 à 40 m	incision	≥ -5 m	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
319,25		érosion de 15 à 40 m	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
319,50		érosion de 15 à 40 m	incision	-	-	indéfinie	mauvais	moyen	non		fort	
319,75		érosion de 15 à 40 m	incision	-	-	indéfinie	mauvais	moyen	non		fort	
320,00		érosion de 15 à 40 m	incision	-6 m	Affouillement externe en 2002	indéfinie	mauvais	mauvais	non		très fort	*zone peu accessible en bateau (fond peu profonde)*
320,25		érosion de 15 à 40 m	incision	-	-	indéfinie	mauvais	moyen	non		fort	
320,50		stable	incision	-	-	indéfinie	bon	bon	oui	bon	faible	
320,75		stable	incision	-	-	indéfinie	bon	bon	oui	bon	faible	
321,00		stable	incision	-11 m	-	indéfinie	bon	bon	oui	bon	faible	
321,25		érosion de 15 à 140 m	incision	-	-	indéfinie	bon	bon	oui	bon	faible	*érosion ponctuelle aux extrémités des enrochements*
321,50		érosion de 15 à 140 m	incision	-	-	indéfinie	bon	bon	oui	bon	faible	*érosion ponctuelle aux extrémités des enrochements*
321,75		érosion de 15 à 140 m	incision	-	Affouillement externe en 2002 (321,86)	indéfinie	mauvais	moyen	non		très fort	
322,00		érosion de 15 à 140 m	incision	-8 m	-	indéfinie	mauvais	moyen	non		fort	
322,25		érosion de 15 à 140 m	incision	-	-	indéfinie	mauvais	moyen	non		fort	
322,50		érosion de 15 à 140 m	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
322,75		érosion de 10 m	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
323,00		érosion de 10 m	incision	-8 m	-	indéfinie					faible	*ségonal important*
323,25		érosion de 10 m	incision	-	-	indéfinie					faible	*ségonal important*

2.9.2 Petit Rhône

Petit Rhône Rive Gauche

Pour des raisons de sécurité (vent et vague très violents) lors de la visite des berges du Petit Rhône Rive Gauche en Mars 2015, les berges du PRG 334 à l'embouchure n'ont pas été inspectées soit environ 3 km (4%) de la rive gauche du Petit Rhône.

Le risque d'affouillement externe est estimé comme **faible** sur un linéaire de 37 km environ, soit 67 % de la rive gauche du Petit Rhône.

Le risque d'affouillement externe est estimé comme **modéré** sur un linéaire de 12,5 km environ, soit 23 % de la rive gauche du Petit Rhône.

Le risque d'affouillement externe est estimé comme **fort** sur un linéaire de 2,5 km environ, soit 4 % de la rive gauche du Petit Rhône.

Le risque d'affouillement externe est estimé comme **très fort** sur un linéaire de 1 km environ, soit 2 % de la rive gauche du Petit Rhône. Ces érosions sont ponctuelles et très proches de la digue.

Ci-dessous les commentaires sur les risques d'affouillement externe perçus comme fort et très fort.

PRG 285,75 : l'évolution en plan à moyen terme est à l'accrétion (entre 10 et 75 m). Les fonds s'incisent sur le long terme mais entre 2001 et 2004, 1 à 2 cm sont venus se déposer au fond du lit (impact des crues récentes). On observe une bathymétrie peu profonde (supérieure à -5 m NGF). L'inspection des berges par voie nautique a permis de relever la présence d'arbres couchés, un mauvais état des berges, ainsi que l'absence de protection. La berge constitue le pied de digue sur ce secteur. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** au droit du PRG 285,75, malgré que le secteur soit en accrétion et que la bathymétrie soit peu profonde.

Photo 20. PRG 285,75 – Risque d'affouillement externe très fort

PRG 286,25 : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme mais entre 2001 et 2004, 1 à 2 cm sont venus se déposer au fond du lit (impact des crues récentes). On observe une bathymétrie peu profonde (supérieure à -5 m NGF). L'inspection des berges par voie nautique a permis de relever la présence d'arbres couchés, un mauvais état des berges, ainsi que l'absence de protection. La berge constitue le pied de digue sur ce secteur. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** au droit du PRG 286,25, malgré que le secteur soit stable et que la bathymétrie soit peu profonde.

Photo 21. PRG 286,25 – Risque d'affouillement externe très fort

PRG 292 : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme mais entre 2001 et 2004, on y observe ni dépôt ni incision (impact des crues récentes). La bathymétrie est peu profonde (supérieure à -5 m NGF). L'inspection des berges par voie nautique a permis de relever une zone d'érosion ponctuelle, un mauvais état des berges, ainsi que l'absence de protection. La berge constitue le pied de digue sur ce secteur. Ces observations ont plus précisément été faites au droit du PRG 291,9. Pour tous ces points

évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** au droit du PRG 292 (précisément PRG 291,9), malgré que le secteur soit stable et que la bathymétrie soit peu profonde.

Photo 22. PRG 292 (291,9) – Risque d'affouillement externe très fort

PRG 300,75 : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme. Entre 2001 et 2004, nous ne disposons d'aucune donnée pour caractériser l'impact des crues récentes. La bathymétrie est moyennement profonde (environ -9 m NGF). Cette observation est faite 100 m en aval du PRG 300,75, soit le PRG 300,85. Au droit de ce PRG, il n'y a aucun ségonal, la berge constitue le pied de digue. Une lacune de relevé d'informations lors de l'inspection des berges par voie nautique n'a pas permis de dresser un état des lieu de l'état des berges, de la ripisylve et de la présence d'une protection. Cependant, le secteur est sujet à des désordres portant à la prudence. En effet, la brèche de Casebrune se trouve à proximité de ce secteur et la berge constitue le pied de digue. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, malgré un manque d'informations, le risque d'affouillement est considéré comme **fort** au droit du PRG 300,75 (précisément PRG 300,85). Pas de photo disponible.

PRG 305 : l'évolution en plan à moyen terme est à l'accrétion (environ 20 m). Les fonds s'incisent sur le long terme. Entre 2001 et 2004, nous ne disposons d'aucune donnée pour caractériser l'impact des crues récentes. La bathymétrie est peu profonde (supérieure à -5 m NGF). L'inspection des berges par voie nautique a permis de relever la présence ponctuelle d'un arbre couché, un état moyen des berges, ainsi que l'absence de protection. La berge constitue le pied de digue sur ce secteur. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **fort** au droit du PRG 305.

Photo 23. PRG 305 – Risque d'affouillement externe fort

PRG 307,75 : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme. Entre 2001 et 2004, nous ne disposons d'aucune donnée pour caractériser l'impact des crues récentes. La bathymétrie est moyennement profonde (environ -10 m NGF) ce qui peut être considéré comme une petite fosse. L'inspection des berges par voie nautique a permis de relever un état correct des berges et de la ripisylve, mais l'absence de protection. Sur ce secteur, la berge constitue le pied de digue et le fleuve forme un extrados. Combiné avec une fosse bathymétrique et un resserrement du lit, le risque d'affouillement est considéré comme **fort** au droit du PRG 307,75. Pas de photo disponible.

PRG 310,75 : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme. Entre 2001 et 2004, nous ne disposons d'aucune donnée pour caractériser l'impact des crues récentes. La bathymétrie est peu profonde (supérieure à -5 m NGF). L'inspection des berges par voie nautique a permis de relever un mauvais état des berges et de la ripisylve, ainsi que l'absence de protection et d'érosion ponctuelle. Sur ce secteur, la berge ne constitue pas le pied de digue, on a la présence d'une petit ségonal. Ces observations ont pu être effectuées plus précisément au droit du PRG 310,8. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **fort** au droit du PRG 310,75 (310,8).

Photo 24. PRG 310,75 (310,8) – Risque d'affouillement externe fort

Du PRG 319,5 au PRG 320 (500 m) : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme. Entre 2001 et 2004, nous ne disposons d'aucune donnée pour caractériser l'impact des crues récentes. La bathymétrie est principalement peu profonde (supérieure à -5 m NGF) sauf au droit du PRG 319 où il y a fosse (-10 m NGF). L'inspection des berges par voie nautique a permis de relever sur ce linéaire, un mauvais état des berges et de la ripisylve, mais la présence d'une protection. Cependant, elle ne semble pas jouer convenablement son rôle. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **fort** du PRG 319,5 au PRG 319,75 et **très fort** au droit du PRG 320 à cause d'une bathymétrie profonde.

Photo 25. PRG 319,5 au PRG 320 – Risque d'affouillement externe fort

PRG 324,75 : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme. Entre 2001 et 2004, nous ne disposons d'aucune donnée pour caractériser l'impact des crues récentes. La bathymétrie est principalement très profonde (environ -15 m NGF) ce qui peut être considéré comme une fosse importante. L'inspection des berges par voie nautique a permis de relever un état moyen des berges et de la ripisylve, mais la présence d'une protection. Cependant, elle ne semble pas jouer convenablement son rôle. De plus, la berge

est située sur l'extrados. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **fort** au droit du PRG 324,75. Pas de photo disponible.

PRG 325,25 : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme. Entre 2001 et 2004, nous ne disposons d'aucune donnée pour caractériser l'impact des crues récentes. La bathymétrie est principalement profonde (environ -10 m NGF) ce qui peut être considéré comme une fosse. L'inspection des berges par voie nautique a permis de relever un état correct des berges et de la protection. Cependant, une ancienne brèche est supposée dans ce secteur et la berge est située sur l'extrados. Pour tous ces points évoqués ci-dessus et notamment la brèche supposée et la bathymétrie profonde, le risque d'affouillement est considéré comme **fort** au droit du PRG 325,25. Pas de photo disponible.

PRG 325,75 : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme. Entre 2001 et 2004, nous ne disposons d'aucune donnée pour caractériser l'impact des crues récentes. La bathymétrie est principalement très profonde (environ -14 m NGF) ce qui peut être considéré comme une fosse importante. L'inspection des berges par voie nautique a permis de relever un état moyen des berges et de la ripisylve, mais la présence d'une protection. Cependant, elle ne semble pas jouer convenablement son rôle. De plus, la berge est située sur l'extrados et de nombreux cabanons sont recensés sur celle-ci. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **fort** au droit du PRG 325,75. Pas de photo disponible.

PRG 330,25 : l'évolution en plan à moyen terme est à l'érosion (environ 75 m). Les fonds s'incisent sur le long terme. Entre 2001 et 2004, nous ne disposons d'aucune donnée pour caractériser l'impact des crues récentes. La bathymétrie est principalement très profonde (environ -15 m NGF) ce qui peut être considéré comme une fosse importante. L'inspection des berges par voie nautique a permis de relever un état mauvais des berges et de la ripisylve et l'absence d'une protection. De plus, la berge est située sur l'extrados. Cependant, le ségonal est d'environ une dizaine de mètre. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **fort** au droit du PRG 330,25.

Photo 26. PRG 330,25 – Risque d'affouillement externe fort

Le tableau ci-dessous synthétise les différents points évoqués précédemment dans ce chapitre et détaille les conclusions précédentes concernant le risque d'affouillement externe sur le Petit Rhône Rive Gauche.

Petit Rhône Rive Gauche

PK	Evolution en plan long terme	Evolution en plan moyen terme	Evolution du lit long terme	Bathymétrie	Accidentologie	Impact des crues récentes (bathymétrie entre 2001 et 2004)	Etat des berges	Etat de la ripisylve	Présence protection	Rôle pressenti de la protection	Risque d'affouillement	Observations
281		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 1 et 2 cm	moyen	bon	oui	défectueuse	modéré	*plusieurs érosions ponctuelles repérées*
281,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable	moyen	bon	oui	défectueuse	modéré	
281,5		stable	incision	-5 m	pas d'affouillement	stable	moyen	bon	oui	défectueuse	modéré	
281,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 1 et 2 cm	moyen	bon	oui	défectueuse	modéré	
282		stable	incision	-8 m	pas d'affouillement	stable	moyen	bon	oui	défectueuse	modéré	
282,25		stable	incision	-8 m	pas d'affouillement	stable	moyen	bon	oui	défectueuse	modéré	
282,5		stable	incision	-8 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
282,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
283		stable	incision	-7 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm	bon	bon	oui	moyen	faible	
283,25		stable	incision	-5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
283,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
283,75		érosion de 20 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
284		accrétion de 10 à 75 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*

284,25		accrétion de 10 à 75 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
284,5		accrétion de 10 à 75 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
284,75		accrétion de 10 à 75 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
285		accrétion de 10 à 75 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
285,25		accrétion de 10 à 75 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
285,5		accrétion de 10 à 75 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
285,75		accrétion de 10 à 75 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm	mauvais	mauvais	non		très fort	*berge constituant le pied de digue*
286		stable	incision	≥ -5 m	affouillement externe en 2003 (285,92 et 285,97)	dépôt 1 à 2 cm	bon	bon	oui	bon	modéré	*enrochements récents post crue 2003 - le risque reste existant*
286,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm	mauvais	mauvais	non		très fort	*berge constituant le pied de digue*
286,5		accrétion de 50 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm					faible	*ségonal important*
286,75		accrétion de 75 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 2 et 10 cm					faible	*ségonal important*
287		accrétion de 30 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
287,25		accrétion de 20 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
287,5		accrétion de 20 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
287,75		accrétion de 20 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
288		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm					faible	*ségonal important*
288,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm					faible	*ségonal important*
288,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
288,75		accrétion de 30 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm					faible	*ségonal important*
289		accrétion de	incision	≥ -5 m	pas	stable					faible	*ségonal important*

		30 m			d'affouillement							
289,25		accrétion de 10 m	incision	-10 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm	moyen	moyen	non vu		modéré	*zone d'accrétion antérieure qui s'érode actuellement*
289,5		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable	moyen	moyen	non vu		modéré	*zone d'accrétion antérieure qui s'érode actuellement*
289,75		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable	moyen	moyen	non vu		modéré	*zone d'accrétion antérieure qui s'érode actuellement*
290		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable	moyen	moyen	non vu		modéré	*zone d'accrétion antérieure qui s'érode actuellement*
290,25		accrétion de 50 m	incision	-5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
290,5		accrétion de 30 m	incision	-5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
290,75		accrétion de 30 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
291		accrétion de 50 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
291,25		accrétion de 50 m	incision	-5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
291,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable	bon	bon	non		faible	*zone de dépôt*
291,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable	bon	bon	non		faible	*zone de dépôt*
292		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable	mauvais	mauvais	non		très fort	*berge constituant le pied de digue*
292,25		accrétion de 50 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
292,5		accrétion de 30 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
292,75		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
293		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable	bon	bon	non		faible	*zone de dépôt*
293,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable	bon	bon	non		faible	*zone de dépôt*
293,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable	bon	bon	non		faible	*zone de dépôt*

293,75		accrétion de 50 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
294		accrétion de 50 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm					faible	*ségonal important*
294,25		accrétion de 20 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm					faible	*ségonal important*
294,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 1 et 2 cm	bon	bon	non		faible	
294,75		stable	incision	-9 m	pas d'affouillement	incision entre 2 et 10 cm					faible	*ségonal important*
295		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 1 et 2 cm					faible	*ségonal important*
295,25		stable	incision	-11 m	affouillement externe en 2003 (295,2 et 295,3)	incision entre 2 et 10 cm	bon		bon	bon	modéré	*enrochements récents post crue 2003 - le risque reste existant*
295,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 2 et 10 cm	moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	*érosion locale*
295,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm	moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	*érosion locale*
296		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm	moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	*érosion locale*
296,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 2 et 10 cm	moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	*érosion locale*
296,5		accrétion de 50 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 0 et 1 cm					faible	*ségonal important*
296,75		accrétion de 50 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
297		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 0 et 1 cm					faible	*ségonal important*
297,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
297,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
297,75		stable	incision	≥ -5 m	pas	stable					faible	*ségonal important*

					d'affouillement							
298		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable	moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	
298,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable	moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	*érosion locale*
298,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable	moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	*érosion locale*
298,75		accrétion de 10 à 100 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 2 à 7 cm					faible	*ségonal important*
299		accrétion de 10 à 100 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
299,25		accrétion de 10 à 100 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
299,5		accrétion de 10 à 100 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
299,75		accrétion de 10 à 100 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 2 et 10 cm					faible	*ségonal important*
300		accrétion de 10 à 100 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 2 et 10 cm					faible	*ségonal important*
300,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
300,5		érosion de 20 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
300,75		stable	incision	-9 m	brèche casebrune à proximité						fort	*ségonal important au PRG 300,75 Cependant, bathymétrie égale à -9 m environ 100 m en aval du PRG 300,75 SANS ségonnal*
301		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui (sacs)	moyen	modéré	*brèche de Casebrune*
301,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	moyen	modéré	
301,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	moyen	modéré	
301,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	moyen	modéré	

302		érosion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	moyen	modéré	
302,25		érosion de 20 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	moyen	modéré	
302,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	non		faible	
302,75		stable	incision	-6 m	pas d'affouillement		bon	bon	non		faible	
303		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	non		faible	
303,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	non		modéré	*dégradation ponctuelle*
303,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	non		faible	
303,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	non		faible	
304		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	non		faible	
304,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	non		faible	
304,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	non		faible	
304,75		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	non		faible	
305		accrétion de 20 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		moyen	mauvais	non		fort	*arbre couché et érosion*
305,25		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	non		modéré	
305,5		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
305,75		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
306		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
306,25		accrétion de 10 m	incision	-7 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui	moyen	faible	
306,5		stable	incision	-9 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui	bon	faible	*ouvrage hydraulique*
306,75		stable	incision	-6 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui	moyen	faible	
307		stable	incision	-6 m	pas		bon	bon	non		faible	

					d'affouillement							
307,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		moyen	bon	non		modéré	*berge détériorée par tierces personnes*
307,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	non		faible	
307,75		stable	incision	-10 m	pas d'affouillement		bon	bon	non		fort	*fosse (bathymétrie profonde) et extrados*
308		stable	incision	-7 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui	moyen	faible	
308,25		stable	incision	-9 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui	moyen	faible	
308,5		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
308,75		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
309		accrétion de 20 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
309,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
309,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
309,75		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
310		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	
310,25		accrétion de 10 m	incision	-5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	
310,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	
310,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		mauvais	mauvais	non		fort	*érosion locale importante cependant petit ségonnal*
311		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	
311,25		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	
311,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	
311,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	

312		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	
312,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
312,5		érosion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
312,75		érosion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
313		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
313,25		stable	incision	-6 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
313,5		stable	incision	-5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
313,75		accrétion de 20 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
314		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
314,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
314,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
314,75		stable	incision	-10 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
315		stable	incision	-14 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
315,25		stable	incision	-5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	
315,5		stable	incision	-5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	
315,75		stable	incision	-5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	
316		stable	incision	-5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
316,25		stable	incision	-5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
316,5		stable	incision	-6 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
316,75		stable	incision	-6 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
317		stable	incision	-12 m	pas		bon	bon	oui	moyen	modéré	

					d'affouillement							
317,25		stable	incision	-9 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui	moyen	faible	
317,5		accrétion de 20 m	incision	-5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
317,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
318		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
318,25		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
318,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
318,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
319		stable	incision	-6 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	
319,25		stable	incision	-5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	
319,5		stable	incision	-10 m	pas d'affouillement		mauvais	mauvais	oui	défectueuse	très fort	*menace le pied de digue*
319,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		mauvais	mauvais	oui	défectueuse	fort	*menace le pied de digue*
320		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		mauvais	mauvais	oui	défectueuse	fort	*menace le pied de digue*
320,25		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	
320,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	
320,75		stable	incision	-5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
321		stable	incision	-6 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	
321,25		stable	incision	-5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	
321,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
321,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
322		accrétion de 30 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*

322,25		accrétion de 30 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
322,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
322,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
323		accrétion de 20 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
323,25		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
323,5		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
323,75		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
324		stable	incision	-5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
324,25		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
324,5		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
324,75		stable	incision	-15 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	défectueuse	fort	*extrados*
325		stable	incision	-6 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	
325,25		stable	incision	-10 m	brèche supposée		bon		oui	bon	fort	
325,5		stable	incision	-9 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	*nombreux cabanons*
325,75		stable	incision	-14 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	défectueuse	fort	*nombreux cabanons*
326		stable	incision	-9 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
326,25		érosion de 10 m	incision	-5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
326,5		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
326,75		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
327		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
327,25		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*

327,5		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
327,75		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
328		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
328,25		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
328,5		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
328,75		accrétion de 100 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
329		accrétion de 200 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
329,25		indéfini (érosion)	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
329,5		indéfini (érosion)	incision	-6 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
329,75		indéfini (érosion)	incision	-11 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
330		indéfini (érosion)	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
330,25		érosion de 75 m	incision	-15 m	pas d'affouillement		mauvais	mauvais	non		fort	*extrados important conjugué à bathymétrie profonde*
330,5		stable	incision	-16 m	affouillement externe en 2003		bon		oui	bon	modéré	*enrochements récents post crue 2003 - le risque reste existant*
330,75		érosion de 50 m	incision	-5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	oui	défectueuse	modéré	
331		érosion de 20 m	incision	-5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
331,25		indéfini (érosion)	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
331,5		indéfini (érosion)	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
331,75		indéfini (érosion)	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
332		indéfini (érosion)	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
332,25		indéfini	incision	≥ -5 m	pas						faible	*ségonal important*

		(érosion)			d'affouillement							
332,5		érosion de 50 m	incision	-11 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
332,75		érosion de 20 m	incision	-8 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
333		érosion de 10 m	incision	-7 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
333,25		stable	incision	-13 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
333,5		stable	incision	-12 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
333,75		stable	incision	-12 m	pas d'affouillement		*non vu*	*non vu*	*non vu*	*non vu*		
334		stable	incision	-12 m	pas d'affouillement		*non vu*	*non vu*	*non vu*	*non vu*		
334,25		érosion de 10 m	incision	-6 m	pas d'affouillement		*non vu*	*non vu*	*non vu*	*non vu*		
334,5		érosion de 10 m	incision	-7 m	pas d'affouillement		*non vu*	*non vu*	*non vu*	*non vu*		
334,75		érosion de 60 m	incision	-11 m	pas d'affouillement		*non vu*	*non vu*	*non vu*	*non vu*		
335		érosion de 100 m	incision	-5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
335,25		accrétion de 20 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
335,5		accrétion de 100 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
335,75		accrétion de 50 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		*non vu*	*non vu*	*non vu*	*non vu*		
336		érosion de 75 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		*non vu*	*non vu*	*non vu*	*non vu*		
336,25		érosion de 75 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		*non vu*	*non vu*	*non vu*	*non vu*		
336,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		*non vu*	*non vu*	*non vu*	*non vu*		
336,75		érosion de 20 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		*non vu*	*non vu*	*non vu*	*non vu*		*enrochements type épis (digue mer)*
337		érosion de 60 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		*non vu*	*non vu*	*non vu*	*non vu*		*enrochements type épis (digue mer)*

Petit Rhône Rive Droite

Le risque d'affouillement externe est estimé comme **faible** sur un linéaire de 41 km environ, soit 80 % de la rive droite du Petit Rhône.

Le risque d'affouillement externe est estimé comme **modéré** sur un linéaire de 4 km environ, soit 8 % de la rive droite du Petit Rhône.

Le risque d'affouillement externe est estimé comme **fort** sur un linéaire de 3 km environ, soit 6 % de la rive droite du Petit Rhône. Ces érosions sont ponctuelles et proche de la digue. La piste amont de la digue est érodée.

Le risque d'affouillement externe est estimé comme **très fort** sur un linéaire de 3 km environ, soit 6 % de la rive droite du Petit Rhône. Ces érosions sont ponctuelles et très proche de la digue. Le pied de la digue est érodé. Ces érosions s'opèrent principalement, mais pas que, au droit des panneaux indiquant les PK pour la navigation.

Ci-dessous les commentaires sur les risques d'affouillement externe perçus comme fort et très fort.

PRD 302,25 au GRD 302,75 : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme. Entre 2001 et 2004, nous ne disposons d'aucune donnée pour caractériser l'impact des crues récentes. La bathymétrie est principalement très profonde (comprise entre -12 et -14 m NGF) ce qui peut être considéré comme des fosses importantes. L'inspection des berges par voie nautique a permis de relever un état correct des berges et de la ripisylve. La présence d'une protection s'effectue en alternance. Son action protectrice n'est ainsi pas optimale. Des phénomènes d'affouillements externes ce sont produits en décembre 2003 au droit du PRD 302,25 et PRD 302,5. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** au droit du PRD 302,25 et PRD 302,5 et **fort** au droit du PRD 302.75. Pas de photo disponible.

PRD 304,5 : l'évolution en plan à moyen terme est à l'érosion (10 m environ). Les fonds s'incisent sur le long terme. Entre 2001 et 2004, nous ne disposons d'aucune donnée pour caractériser l'impact des crues récentes. La bathymétrie est profonde (environ -10 m NGF) ce qui peut être considéré comme des fosses importantes. L'inspection des berges par voie nautique a permis de relever un état correct des berges et de la ripisylve. Comme sur le secteur précédent, la présence d'une protection s'effectue en alternance. Son action protectrice n'est ainsi pas optimale. Aucun phénomène d'affouillement externe ce sont produits sur ce secteur. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **fort** au droit du PRD 304,5. Pas de photo disponible.

PRD 309 et PRD 309,5 : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme. Entre 2001 et 2004, nous ne disposons d'aucune donnée pour caractériser l'impact des crues récentes. La bathymétrie est moyenne (maximum -7 m NGF). L'inspection des berges par voie nautique a permis de relever un état correct des berges et de la ripisylve.

La protection est toujours présente cependant, son rôle semble être défectueux. Deux brèches se sont produites sur ces secteurs, respectivement en 2002 et 2003. De plus, la berge constitue le pied de la digue. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** au droit du PRD 309 et PRD 309,5. Pas de photo disponible.

PRD 313 : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme. Entre 2001 et 2004, nous ne disposons d'aucune donnée pour caractériser l'impact des crues récentes. La bathymétrie est moyenne (maximum -7 m NGF). L'inspection des berges par voie nautique a permis de relever un état mauvais des berges et moyen de la ripisylve (arbres déracinés ponctuellement). La protection n'est plus présente. En 2003, des phénomènes d'affouillements externes ce sont produits sur ce secteur. De plus, la berge constitue le pied de la digue. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** au droit du PRD 313. Pas de photo disponible.

PRD 314,75 : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme. Entre 2001 et 2004, nous ne disposons d'aucune donnée pour caractériser l'impact des crues récentes. La bathymétrie est très profonde (-16 m NGF) ce qui représente une fosse importante. L'inspection des berges par voie nautique a permis de relever un état mauvais des berges et moyen de la ripisylve (arbres déracinés ponctuellement). La protection est cependant toujours présente. Des départs de brèche ont eu lieu sur ce secteur en 1993 (ou 1994) notamment et plus précisément au PRD 314,7. Sur cette berge le lit présente un extrados très prononcé (presque 180°). Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** au droit du PRD 314,75.

Photo 27. PRD 314,75 – Risque d'affouillement externe très fort

PRD 321,75 : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme. Entre 2001 et 2004, nous ne disposons d'aucune donnée pour caractériser l'impact des crues récentes. La bathymétrie est profonde (-10 m NGF). L'inspection des berges par voie nautique a permis de relever un état moyen des berges et de la ripisylve. Il n'y a pas de protection de berge. Sur cette berge le lit présente un extrados prononcé. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **fort** au droit du PRD 321,75 (base de canoé-kayak de Sylvéréal).

Photo 28. PRD 321,75 – Risque d'affouillement externe fort

PRD 322 : l'évolution en plan à moyen terme est stable. Les fonds s'incisent sur le long terme. Entre 2001 et 2004, nous ne disposons d'aucune donnée pour caractériser l'impact des crues récentes. La bathymétrie est très profonde (-18 m NGF) ce qui représente l'une des fosses les plus profondes du Petit Rhône. L'inspection des berges par voie nautique a permis de relever un état mauvais des berges et de la ripisylve. Il n'y a pas de protection de berge. Des départs de brèche ont eu lieu sur ce secteur en 1843 et des phénomènes d'érosions externes ont pu être constatés lors des crues récentes. Sur cette berge le lit présente un extrados prononcé. Les érosions sous l'ouvrage en béton proche de l'entrée du canal du Bourgidou menacent actuellement de le faire rompre et d'emporter avec lui une partie de la digue. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** au droit du PRD 322.

Photo 29. PRD 322 – Risque d'affouillement externe très fort

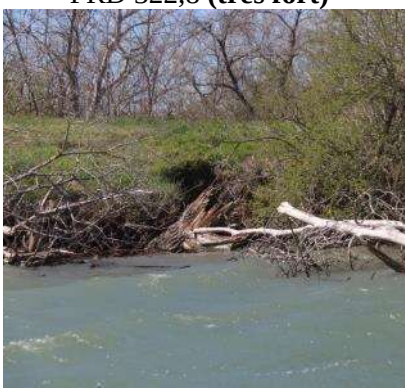
Du PRD 322,25 au PRD 324,25 : sur ce secteur l'évolution en plan a majoritairement été stable. Localement on a de l'accrétion (PRD 322,75, environ 30 m) et la fin du secteur est en

légère érosion (du PRD 324 au 324,25, érosion de 5 m). Les fonds s'incisent sur le long terme. Entre 2001 et 2004, nous ne disposons d'aucune donnée pour caractériser l'impact des crues récentes. La bathymétrie est peu profonde à profonde variant ainsi de -5 m NGF à -12 m NGF. L'inspection des berges par voie nautique a permis de relever un état mauvais des berges et de la ripisylve. Il n'y a pas de protection de berge. Des phénomènes d'érosions externes ont pu être constatés lors des crues récentes (2002 : PRD 322,75 / 2003 : PRD 323 et PRD 323,160). La berge constitue le pied de digue sur ce linéaire. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **fort** sur l'ensemble du secteur sauf du PRD 322,75 au PRD 323,160 où l'on peut quantifier le risque comme **très fort** à cause des affouillements externes qui se sont produits.

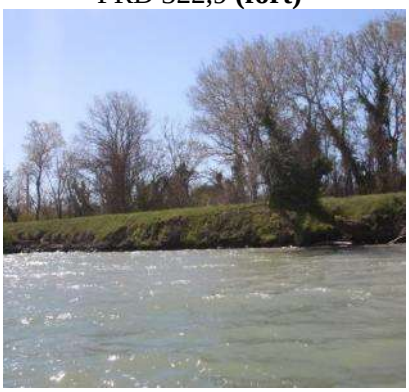
PRD 322,8 **(très fort)**

PRD 322,9 **(fort)**

PRD 323 **(très fort)**



PRD 323,2 **(fort)**



PRD 323,3 **(fort)**

PRD 323,6 **(fort)**

PRD 323,7 **(fort)**

Photo 30. PRD 322,25 au PRD 324,25 – Risque d'affouillement externe fort et très fort

Du PRD 328 au PRD 328,5 : sur ce secteur l'évolution en plan a majoritairement été à l'érosion (entre 10 et 75 m érodé environ selon les secteurs). Les fonds s'incisent sur le long

terme. Entre 2001 et 2004, nous ne disposons d'aucune donnée pour caractériser l'impact des crues récentes. La bathymétrie est moyenne à profonde variant ainsi de -5 m NGF à -12 m NGF. L'inspection des berges par voie nautique a permis de relever un état mauvais des berges et un état moyen de la ripisylve. Il n'y a pas de protection de berge. Des phénomènes d'érosions externes ont pu être constatés lors de la crue de 2002 (PRD 328 et PRD 328,25). La berge constitue le pied de digue sur ce linéaire. Pour tous ces points évoqués ci-dessus, le risque d'affouillement est considéré comme **très fort** sur l'ensemble du secteur sauf au PRD 328,5 où l'on peut quantifier le risque comme seulement **fort** car il n'y a jamais eu de phénomène d'affouillements externes dans le passé.

PRD 328,1 **(très fort)**

PRD 328,3 **(très fort)**

PRD 328,5 **(fort)**

Photo 31. PRD 328 au PRD 328,5 – Risque d'affouillement externe fort et très fort

Le tableau ci-dessous synthétise les différents points évoqués précédemment dans ce chapitre et détaille les conclusions précédentes concernant le risque d'affouillement externe sur le Petit Rhône Droit.

Petit Rhône Rive Droite

PK	Evolution en plan long terme	Evolution en plan moyen terme	Evolution du lit long terme	Bathymétrie	Accidentologie	Impact des crues récentes (bathymétrie entre 2001 et 2004)	Etat des berges	Etat de la ripisylve	Présence protection	Rôle pressenti de la protection	Risque d'affouillement	Observations
279,5		accrétion de 200 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
279,75		accrétion de 150 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
280		accrétion de 20 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
280,25		accrétion de 50 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
280,5		accrétion de 50 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
280,75		accrétion de 20 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
281		érosion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 2 et 10 cm					faible	*ségonal important*
281,25		accrétion de 10 à 30 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 1 et 2 cm					faible	*ségonal important*
281,5		accrétion de 10 à 30 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 1 et 2 cm					faible	*ségonal important*
281,75		accrétion de 10 à 30 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 1 et 2 cm					faible	*ségonal important*
282		accrétion de 10 à 30 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 1 et 2 cm					faible	*ségonal important*
282,25		accrétion de 10 à 30	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*

		m										
282,5		accrétion de 10 à 30 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
282,75		accrétion de 60 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm					faible	*ségonal important*
283		accrétion de 60 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm					faible	*ségonal important*
283,25		accrétion de 60 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 1 et 2 cm					faible	*ségonal important*
283,5		accrétion de 60 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
283,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
284		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 1 et 2 cm					faible	*ségonal important*
284,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 1 et 2 cm					faible	*ségonal important*
284,5		stable	incision	≥ -5 m	Départ brèche en 1840	stable	moyen	présence d'arbres couchés	non		modéré	*Nombreux trous dans la berge*
284,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 1 et 2 cm	moyen	présence d'arbres couchés	non		modéré	*Nombreux trous dans la berge*
285		accrétion de 20 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 1 et 2 cm	moyen	présence d'arbres couchés	non		modéré	*Nombreux trous dans la berge*
285,25		accrétion de 60 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 1 et 2 cm					faible	*ségonal important*
285,5		accrétion de 20 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable	bon	bon	non		faible	
285,75		accrétion de 60 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
286		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
286,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 1 et 2 cm					faible	*ségonal important*

286,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
286,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 1 et 2 cm					faible	*ségonal important*
287		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
287,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
287,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable	moyen	moyen	non		faible	
287,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 2 et 10 cm	moyen	moyen	non		faible	
288		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 1 et 2 cm					faible	*ségonal important*
288,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 1 et 2 cm					faible	*ségonal important*
288,5		érosion de 10 m	incision	-6 m	pas d'affouillement	incision entre 2 et 10 cm					faible	*ségonal important*
288,75		érosion de 10 m	incision	-10 m	pas d'affouillement	incision entre 2 et 10 cm					faible	*ségonal important*
289		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
289,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
289,5		accrétion de 10 à 30 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
289,75		accrétion de 10 à 30 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
290		accrétion de 10 à 30 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
290,25		accrétion de 10 à 30	incision	-5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*

		m										
290,5		accrétion de 10 à 30 m	incision	-5 m	Départ brèche en 1840 (290,4)	stable					faible	*ségonal important*
290,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 1 et 2 cm	moyen	moyen	oui	défectueuse	faible	
291		accrétion de 10 à 30 m	incision	-5 m	pas d'affouillement	stable	moyen	moyen	oui	défectueuse	faible	
291,25		accrétion de 10 à 30 m	incision	≥ -5 m	Départ brèche en 1840	stable	bon	bon	oui	défectueuse	faible	
291,5		accrétion de 10 à 30 m	incision	-5 m	pas d'affouillement	stable	bon	bon	oui	défectueuse	faible	
291,75		accrétion de 10 à 30 m	incision	-5 m	pas d'affouillement	stable	bon	bon	oui	défectueuse	faible	
292		accrétion de 10 à 30 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable	bon	bon	oui	défectueuse	faible	
292,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm	bon	bon	oui	défectueuse	faible	
292,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm	moyen	bon	oui	défectueuse	faible	
292,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm	moyen	bon	oui	défectueuse	faible	
293		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm	moyen	bon	oui	défectueuse	faible	
293,25		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
293,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm					faible	*ségonal important*
293,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
294		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 1 et 2 cm	bon	bon	oui	bon (à l'étiage)	faible	

294,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 1 et 2 cm	bon	bon	oui	bon (à l'étiage)	faible	*PRD 294,4 érosion localisée*
294,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm	bon	bon	oui	bon (à l'étiage)	faible	
294,75		accrétion de 30 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm					faible	*ségonal important*
295		accrétion de 20 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm					faible	*ségonal important*
295,25		érosion de 10 m	incision	-7 m	pas d'affouillement	incision entre 2 et 10 cm					faible	*ségonal important*
295,5		accrétion de 20 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm					faible	*ségonal important*
295,75		accrétion de 5 à 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm	bon	bon	non		faible	
296		accrétion de 5 à 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm	bon	bon	non		faible	
296,25		accrétion de 5 à 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm	bon	bon	non		faible	
296,5		accrétion de 5 à 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm	bon	bon	non		faible	
296,75		accrétion de 5 à 10 m	incision	-5 m	pas d'affouillement	dépôt 1 à 2 cm	bon	bon	non		faible	
297		accrétion de 5 à 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 2 et 10 cm	bon	bon	non		modéré	*PRD 297,1 érosion localisée - affouillement réparé par génie végétal (été 2016)*
297,25		stable	incision	-5 m	pas d'affouillement	incision entre 2 et 10 cm			oui	bon	faible	*Pont de Saint-Gilles*
297,5		accrétion de 5 à 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 2 et 10 cm	bon	bon	non		modéré	*affouillement réparé par génie végétal (été 2016)*

297,75		accrétion de 5 à 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 2 et 10 cm	bon	bon	non		faible	
298		accrétion de 30 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 2 et 10 cm					faible	*ségonal important*
298,25		accrétion de 75 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
298,5		accrétion de 75 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
298,75		accrétion de 30 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable					faible	*ségonal important*
299		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable	bon	bon	non		faible	
299,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable	bon	bon	non		faible	
299,5		érosion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable	bon	bon	non		faible	
299,75			incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	stable	bon	bon	non		faible	*construction écluse de Saint-Gilles*
300		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement	incision entre 2 et 10 cm	bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	faible	
300,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	faible	
300,5		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	faible	
300,75		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	faible	
301		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	faible	
301,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	faible	
301,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	faible	
301,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	faible	
302		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	faible	
302,25		stable	incision	-10 m	affouillement		bon	bon	oui	moyen	très fort	

					externe en 2003				(alternance)	(alternance)		
302,5		stable	incision	-7 m	affouillement externe en 2003		bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	très fort	
302,75		stable	incision	-12 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	fort	
303		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	faible	
303,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	faible	
303,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	faible	
303,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	faible	
304		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	faible	
304,25		érosion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	faible	
304,5		érosion de 10 m	incision	-10 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	fort	
304,75		érosion de 10 m	incision	-6 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	faible	
305		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	faible	
305,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui	bon	faible	*PRD 305,4 enrochements récents*
305,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	faible	
305,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	faible	
306		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	faible	
306,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui (alternance)	moyen (alternance)	faible	
306,5		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
306,75		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
307		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*

307,25		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
307,5		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	oui	bon	faible	
307,75		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
308		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
308,25		accrétion de 10 m	incision	-5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
308,5		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
308,75		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
309		stable	incision	-7 m	brèche 2002		bon	bon	oui	défectueuse	très fort	*berge constitue le pied de digue*
309,25		stable	incision	-7 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
309,5		stable	incision	≥ -5 m	brèche 2003						très fort	*berge constitue le pied de digue*
309,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
310		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
310,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	non visible	non visible	faible	
310,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	non visible	non visible	faible	
310,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	bon	non visible	non visible	faible	
311		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
311,25		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
311,5		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
311,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
312		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
312,25		stable	incision	≥ -5 m	pas						faible	*ségonal important*

					d'affouillement							
312,5		stable	incision	-5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
312,75		stable	incision	-6 m	pas d'affouillement		mauvais	moyen (arbres déracinés ponctuellement)	non		modéré	
313		stable	incision	-7 m	affouillement externe en 2003		mauvais	moyen (arbres déracinés ponctuellement)	non		très fort	*berge constitue le pied de digue*
313,25		stable	incision	-9 m	pas d'affouillement		mauvais	moyen (arbres déracinés ponctuellement)	non		modéré	
313,5		stable	incision	-6 m	pas d'affouillement		mauvais	moyen (arbres déracinés ponctuellement)	non		modéré	
313,75		stable	incision	-5 m	pas d'affouillement		mauvais	moyen (arbres déracinés ponctuellement)	non		modéré	
314		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		mauvais	moyen (arbres déracinés ponctuellement)	non		modéré	
314,25		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
314,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
314,75		stable	incision	-16 m	départ brèche 1993 ou 1994		mauvais	moyen (arbres déracinés ponctuellement)	oui	bon	très fort	*notamment au PRD 314,7*
315		stable	incision	-11 m	pas d'affouillement		mauvais	moyen (arbres déracinés ponctuellement)	oui	moyen	modéré	*érosion de pied*
315,25		accrétion de 10 à 50 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		mauvais	moyen (arbres déracinés ponctuellement)	oui	moyen	modéré	*érosion de pied*
315,5		accrétion de 10 à 50 m	incision	-5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
315,75		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
316		accrétion de 10 à 50	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*

		m										
316,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	moyen	non		faible	*zone très ponctuelle*
316,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
316,75		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
317		stable	incision	-5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
317,25		stable	incision	-5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
317,5		stable	incision	-11 m	pas d'affouillement		bon	moyen	non		faible	*zone très ponctuelle*
317,75		accrétion de 30 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
318		accrétion de 10 m	incision	-8 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
318,25		stable	incision	-16 m	pas d'affouillement		bon	moyen	oui	moyen	faible	
318,5		stable	incision	-7 m	pas d'affouillement		bon	moyen	oui	moyen	faible	
318,75		accrétion de 20 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	moyen	oui	moyen	faible	
319		accrétion de 20 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
319,25		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
319,5		stable	incision	-6 m	brèche par retour de 1840						faible	*ségonal important*
319,75		stable	incision	-6 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
320		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
320,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	moyen	oui	défectueuse	faible	
320,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		bon	moyen	oui	défectueuse	modéré	*érosion de pied*
320,75		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
321		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*

321,25		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
321,5		accrétion de 20 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		moyen	moyen	non		faible	
321,75		stable	incision	-10 m	pas d'affouillement		moyen		non		fort	*au droit de la base de canoé*
322		stable	incision	-18 m	Affouillement externe + départ brèche 1843		mauvais	mauvais	non		très fort	*ouvrage bétonné proche de l'entrée du canal du Bourgidou*
322,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		mauvais	mauvais	non		fort	
322,5		stable	incision	-9 m	pas d'affouillement		mauvais	mauvais	non		fort	*bathymétrie -9 m environ 100 m en amont du PRD 322,5*
322,75		accrétion de 30 m	incision	-6 m	Affouillement externe en 2002		mauvais	mauvais	non		très fort	
323		stable	incision	≥ -5 m	Affouillement externe en 2003 (323 et 323,160)		mauvais	mauvais	non		très fort	
323,25		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		mauvais	mauvais	non		fort	
323,5		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		mauvais	mauvais	non		fort	
323,75		stable	incision	-12 m	pas d'affouillement		mauvais	mauvais	non		fort	*-15 m environ 100 m en aval du PRD 323,75 (limnimètre CNR)*
324		érosion de 5 m	incision	-6 m	pas d'affouillement		mauvais	mauvais	non		fort	
324,25		érosion de 5 m	incision	-5 m	pas d'affouillement		mauvais	mauvais	non		fort	
324,5		érosion de 15 m	incision	-6 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
324,75		accrétion de 20 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
325		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
325,25		accrétion	incision	≥ -5 m	pas						faible	*ségonal important*

		de 10 m			d'affouillement							
325,5		accrétion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
325,75		accrétion de 10 m	incision	-6 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
326		accrétion de 10 m	incision	-5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
326,25		accrétion de 10 m	incision		pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
326,5		stable	incision	-14 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
326,75		accrétion de 10 m	incision	-14 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
327		stable	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		mauvais	moyen			modéré	
327,25		érosion de 40 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		mauvais	moyen			modéré	
327,5		érosion de 40 m	incision	-5 m	pas d'affouillement		mauvais	moyen			modéré	
327,75		érosion de 10 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement		mauvais	moyen			modéré	
328		érosion de 10 m	incision	-6 m	Affouillement externe en 2002		mauvais	moyen			très fort	*érosion en amont enrochements*
328,25		érosion de 20 m	incision	-5 m	Affouillement externe en 2002		mauvais	mauvais			très fort	*présence d'un petit ségonnal*
328,5		érosion de 75 m	incision	-12 m	pas d'affouillement		mauvais	moyen			fort	
328,75		érosion de 100 m	incision	-12 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
329		accrétion de 75 m	incision	-5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
329,25		accrétion de 100 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
329,5		accrétion de 75 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
329,75		érosion de 150 m	incision	≥ -5 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*
330		stable	incision	-7 m	pas d'affouillement						faible	*ségonal important*

3 LE VENT

Une des actions du vent est de générer des vagues sur le plan d'eau qui peuvent se propager en direction de l'ouvrage. Lorsque ces vagues vont rencontrer l'ouvrage, elles vont engendrer une remontée d'eau le long du parement amont appelé « run-up ».

Lorsque le vent souffle sur une étendue d'eau, il exerce une contrainte horizontale ce qui entraîne un basculement du plan d'eau. Cela a pour conséquence un soulèvement de la surface de l'eau au droit de l'ouvrage si l'on considère que le vent souffle vers la digue. Ce soulèvement se nomme « wind setup » ou soulèvement dû au vent.

3.1 DONNEES DE VENTS

Quatre stations sont présentes dans le Delta du Rhône et une station est située en périphérie.

Tableau 67. Stations météo dans le Delta du Rhône

Nom	Coordonnées		Lambert II étendu		Altitude	Producteurs
ARLES	Latitude	43°30'36"N	Lambert Y (hm)	18371	1 m	Tour du Valat
	Longitude	4°41'36"E	Lambert X (hm)	7908		
STES-MARIES-DE-LA-MER	Latitude	43°26'54"N	Lambert Y (hm)	18296	1 m	AUTRES
	Longitude	4°25'24"E	Lambert X (hm)	7691		
TARASCON	Latitude	43°49'42"N	Lambert Y (hm)	1872	15 m	METEO-FRANCE
	Longitude	4°38'24"E	Lambert X (hm)	7854		
AIGUES-MORTES	Latitude	43°32'12"N	Lambert Y (hm)	18390	1 m	Autres
	Longitude	4°12'24"E	Lambert X (hm)	7513		
NIMES-GARONS	Latitude	43°45'24"N	Lambert Y (hm)	18640	92 m	METEO-FRANCE
	Longitude	4°24'42"E	Lambert X (hm)	7673		

Les deux figures ci-après présentent les roses des vents des stations météorologiques respectivement de Nîmes Courbessac (source météo France) et d'Arles (source Tour du Valat).

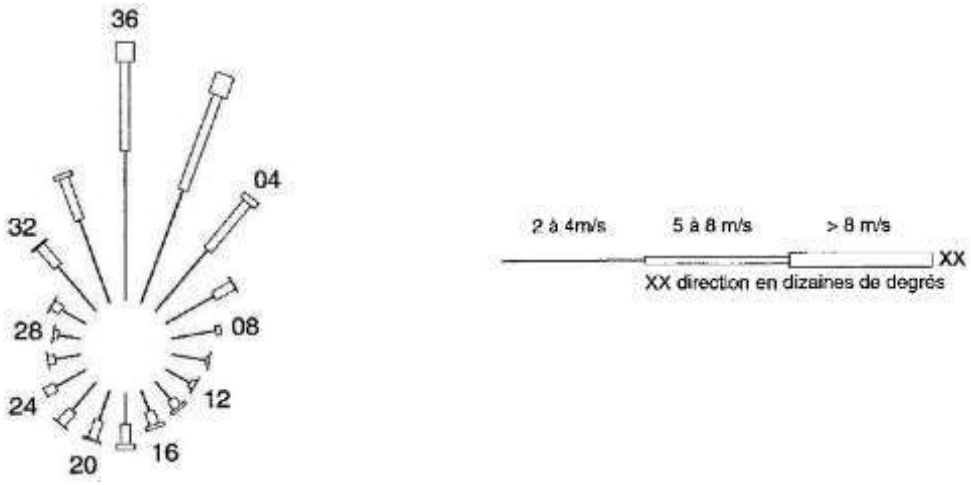


Figure 172. rose des vents à Nimes-Courbessac (source Météo-France)

La rose des vents de la station de Nîmes Courbessac montre des vents dominants du Nord et du Nord Nord Est.
La rose des vents de la station d'Arles située à la Tour du Valat soit dans la partie Sud Est de la Camargue Insulaire montre quant à elle des vents dominants du Nord/Nord-Ouest et Sud-Est avec une fréquence de vents avec des vitesses supérieures à 8 m/s relativement fréquentes.

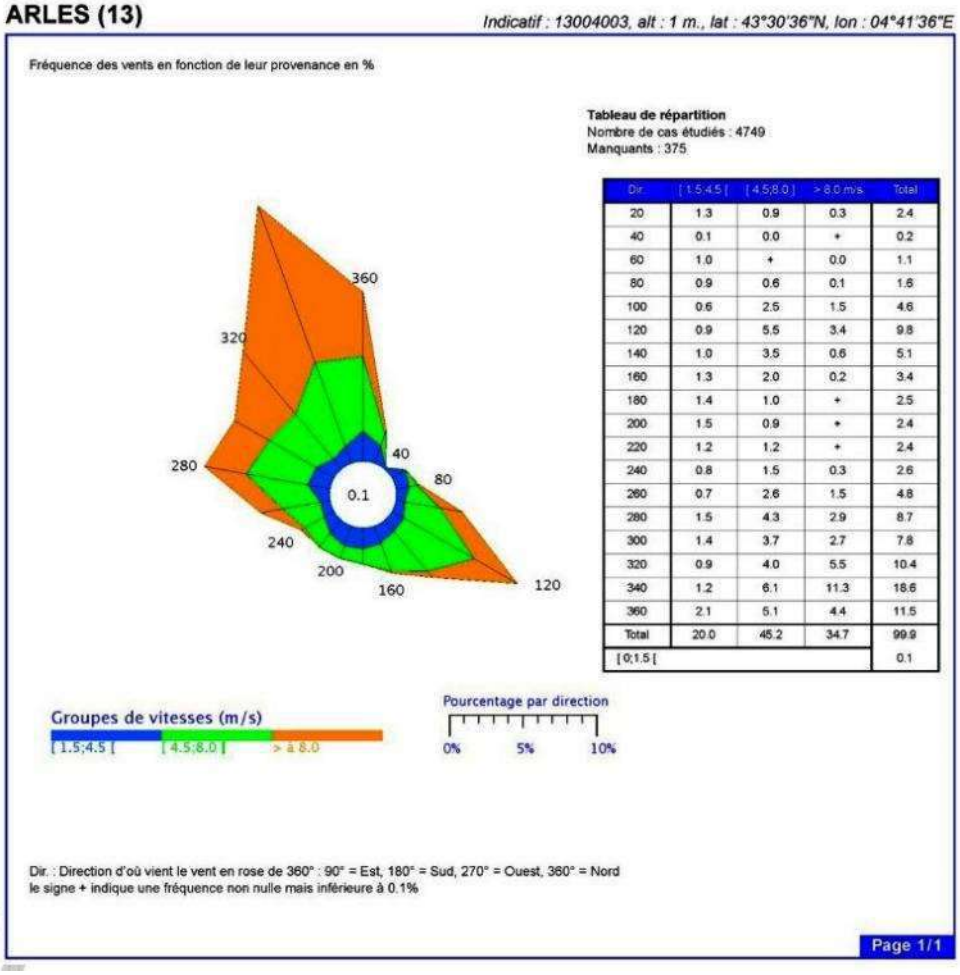


Figure 173. Rose des vents à Arles Tour du Valat

La carte de vitesse moyenne des vents réalisée par Météo France indique une vitesse moyenne de 8.7 m/s dans le Delta du Rhône.

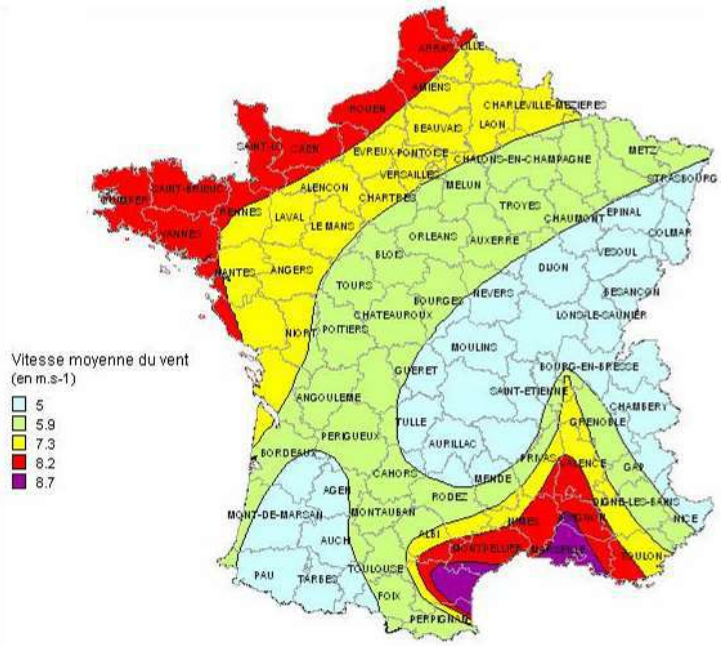


Figure 174. Carte de France des vents moyens

La carte ci-dessous extraite de l'Eurocode 1 : EN1991-1-4:2005 donne un vent de référence (période de retour de 50 ans) compris entre 28 et 30 m/s.

* Cette carte est donnée à titre indicatif mais n'a pas de caractère contractuel.
Pour préciser les limites des zones, reportez vous à la liste des cantons ci-jointe.

zones	1	2	3	4	5
V_{ref} (m/s)(a 10 m)	24	26	28	30	34

Figure 175. Vent de référence (source eurocode 1)

La vitesse de vent pour une période de retour *T* en années est donnée par :

$$\frac{V_T}{V_{50}} = \sqrt{\frac{1 - 0{,}33.ln\left(-ln\left(1 - 1/T\right)\right)}{2{,}29}}$$

ou par le tableau suivant :

Tableau 68. Facteur multiplicatif entre la vitesse du vent 50 ans et la vitesse du vent T ans

Période de retour *T* (ans)	**Facteur multiplicatif**
5	0,81
10	0,87
20	0,93
50	1
100	1,05
200	1,10
500	1,15
1000	1,20
10000	1,33

On retient que la vitesse du vent pour une période de retour 1000 ans vaut 1,2 fois celle pour 50 ans et la vitesse du vent pour une période de retour 5 ans, vaut 0,8 fois celle pour 50 ans. Par exemple, si la vitesse de vent cinquantennale vaut 100 km/h, la vitesse millénale vaut 120 km/h et la vitesse quinquennale 80 km/h.

3.2 VENTS OBSERVES LORS DES CRUES SUP. A LA DECENNALE DEPUIS 1993

Les figures ci-après illustrent la direction et la force des vents aux cinq stations précitées lors des crues respectivement d'octobre 1993, janvier 1994, novembre 1994, novembre 1996, septembre 2002, novembre 2002 et décembre 2003.

Le niveau du Rhône (en m NGF) à la station de Beaucaire/Tarascon permet de voir l'évolution du vent au cours de la crue.

3.2.1 Direction et force du vent lors de la crue d'octobre 1993

Lors de la crue d'octobre 1993, le vent était principalement orienté Sud-Est/Est. La vitesse du vent moyen était en amont du Delta de l'ordre de 5 m/s et dans la partie sud du Delta entre 6 et 10 m/s, ce qui donne des vents moyens.

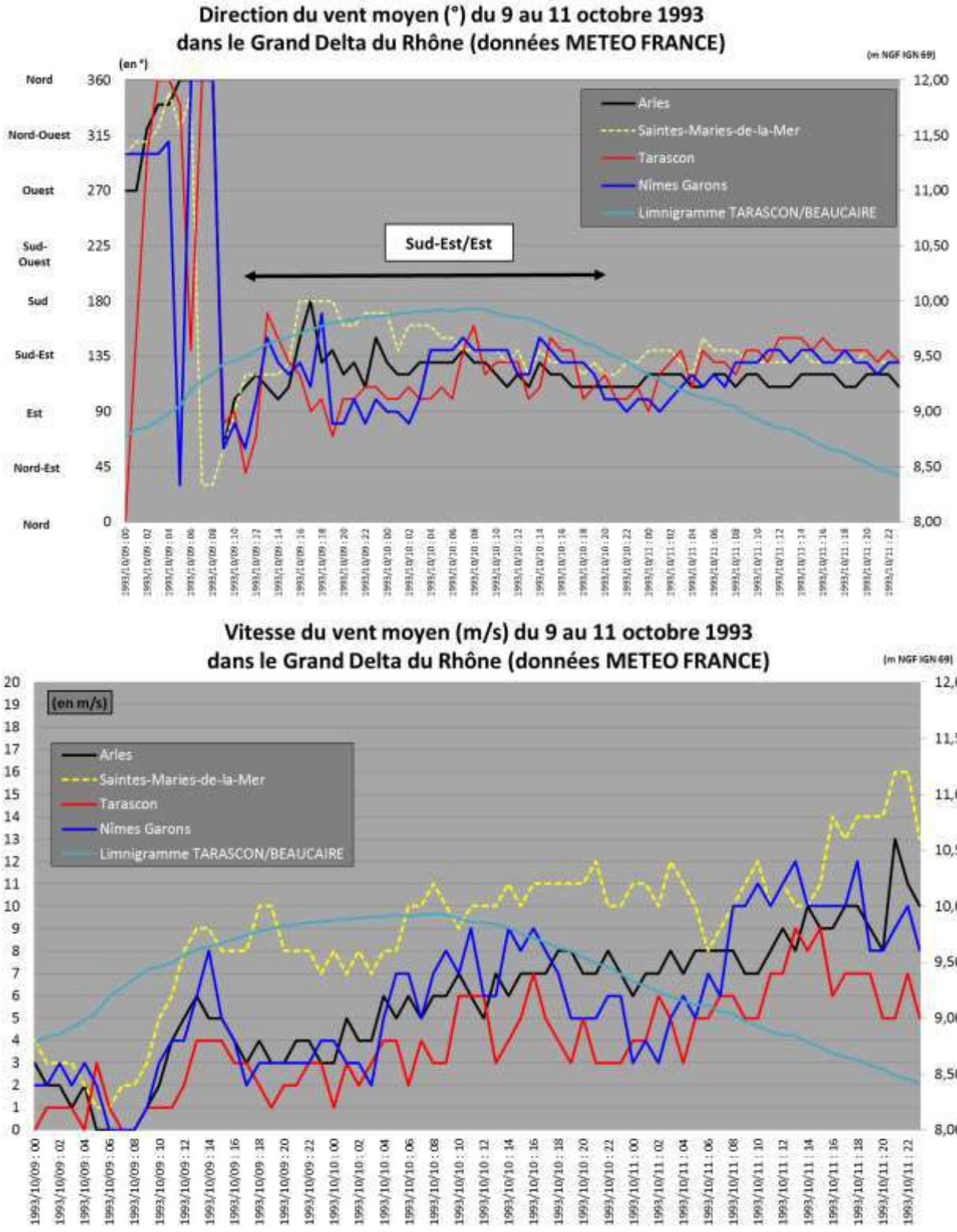


Figure 176. Direction et force du vent moyen dans le Delta lors de la crue d'octobre 1993

3.2.2 Direction et force du vent lors de la crue de janvier 1994

Lors de la crue de janvier 1994, le vent était principalement orienté Nord. La vitesse du vent moyen dans le Delta, lors de la pointe de crue était inférieure à 4 m/s, ce qui est faible. On note des vents avec des vitesses comprises entre 8 et 14 m/s dans la journée précédant la crue.

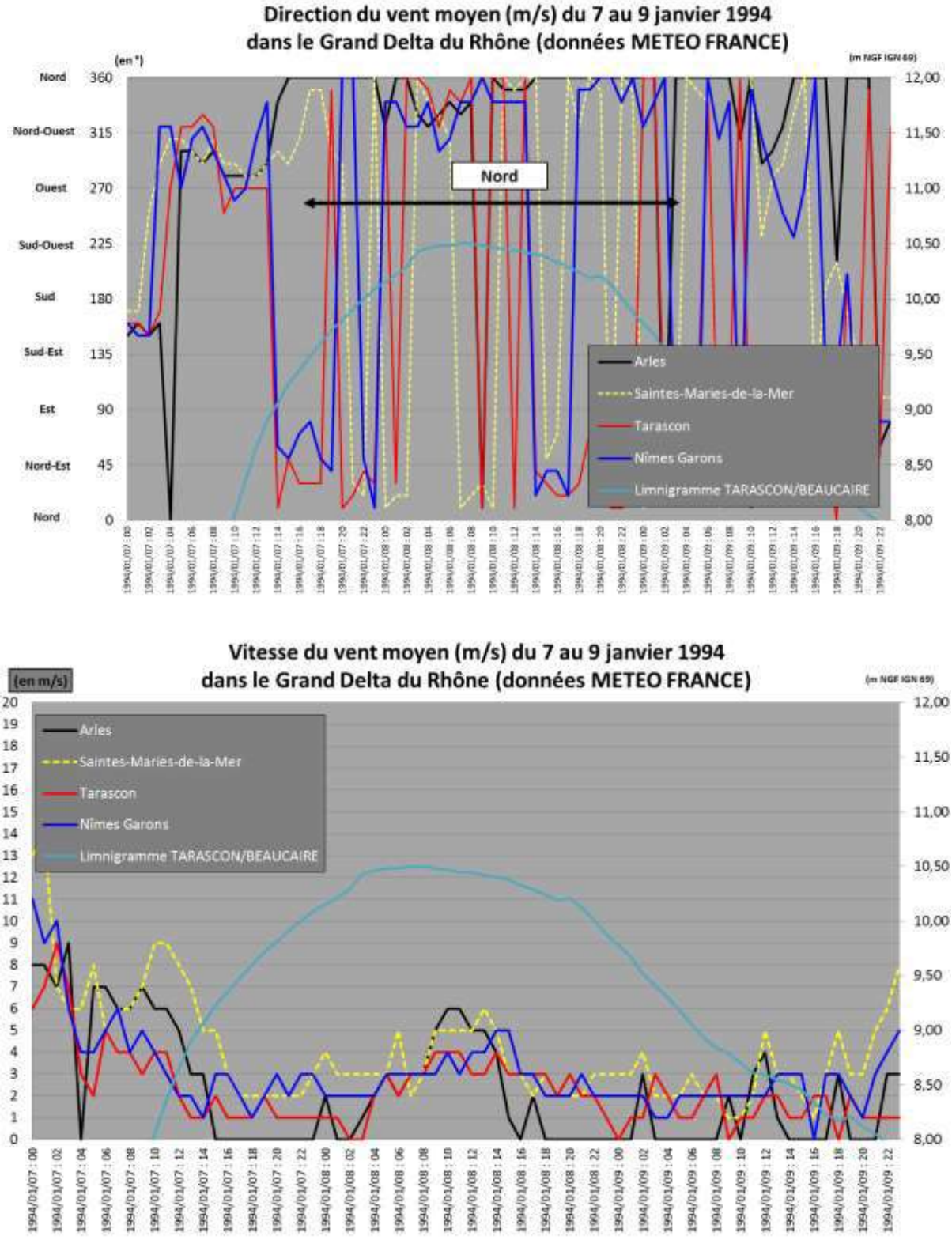


Figure 177. Direction et force du vent moyen dans le Delta lors de la crue de janvier 1994

3.2.3 Direction et force du vent lors de la crue de novembre 1994

Lors de la crue novembre 1994, le vent était orienté Sud-Est à la station de Tarascon et Nord-Ouest/Nord-Est dans le Delta et en périphérie avec un vent variable à la station des Saintes-Maries-de-la-Mer. La vitesse du vent moyen était en amont du Delta de l'ordre de 8 m/s et inférieure à 4 m/s dans les autres stations. La force du vent dans la journée précédant la crue était du même ordre de grandeur.

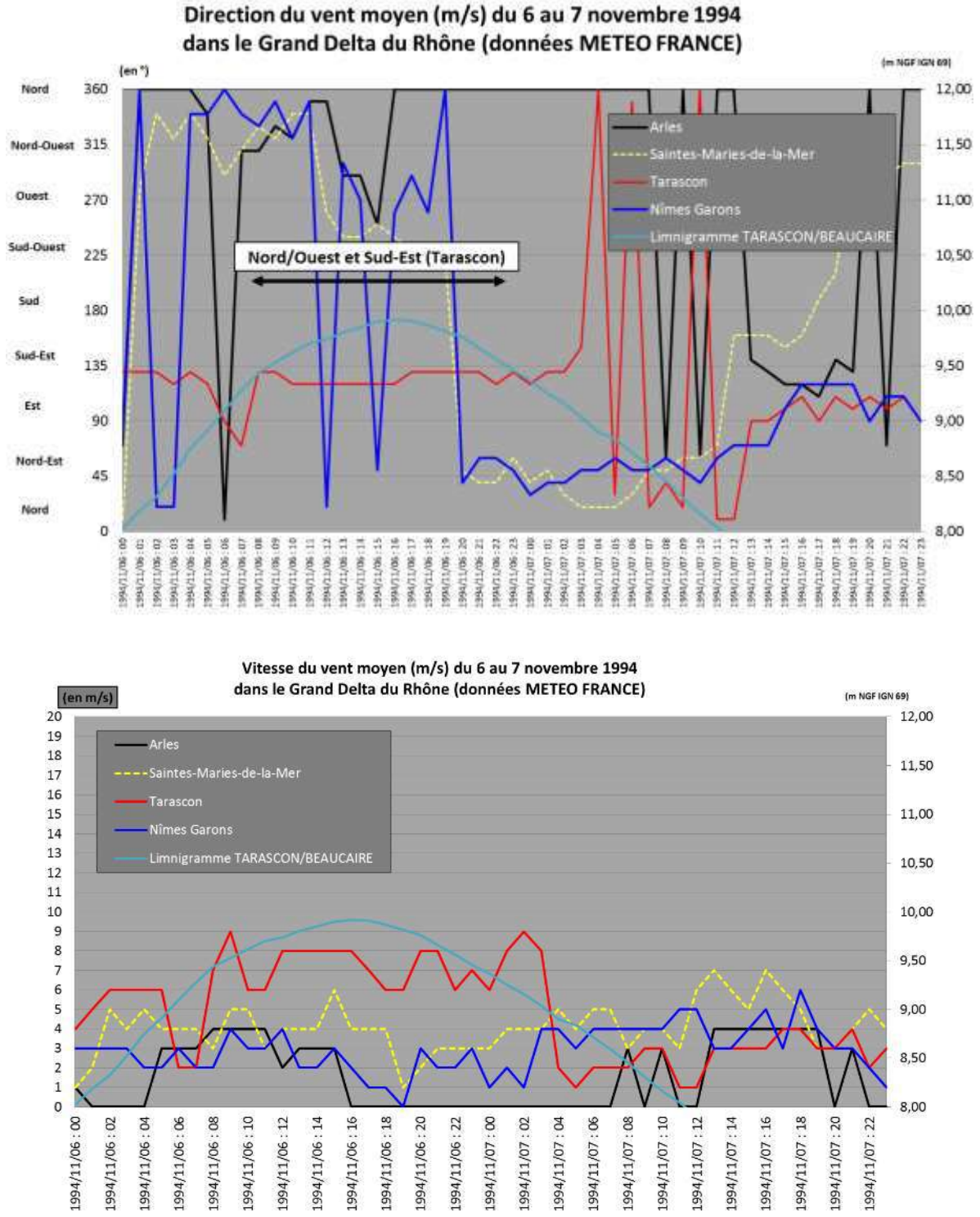


Figure 178. Direction et force du vent moyen dans le Delta lors de la crue de novembre 1994

3.2.4 Direction et force du vent lors de la crue de novembre 1996

Lors de la crue novembre 1996, le vent était orienté Nord dans l'ensemble du delta. La vitesse du vent moyen était comprise entre 4 et 6 m/s. On note des vents avec des vitesses de l'ordre de 10 m/s dans la journée précédant la crue.

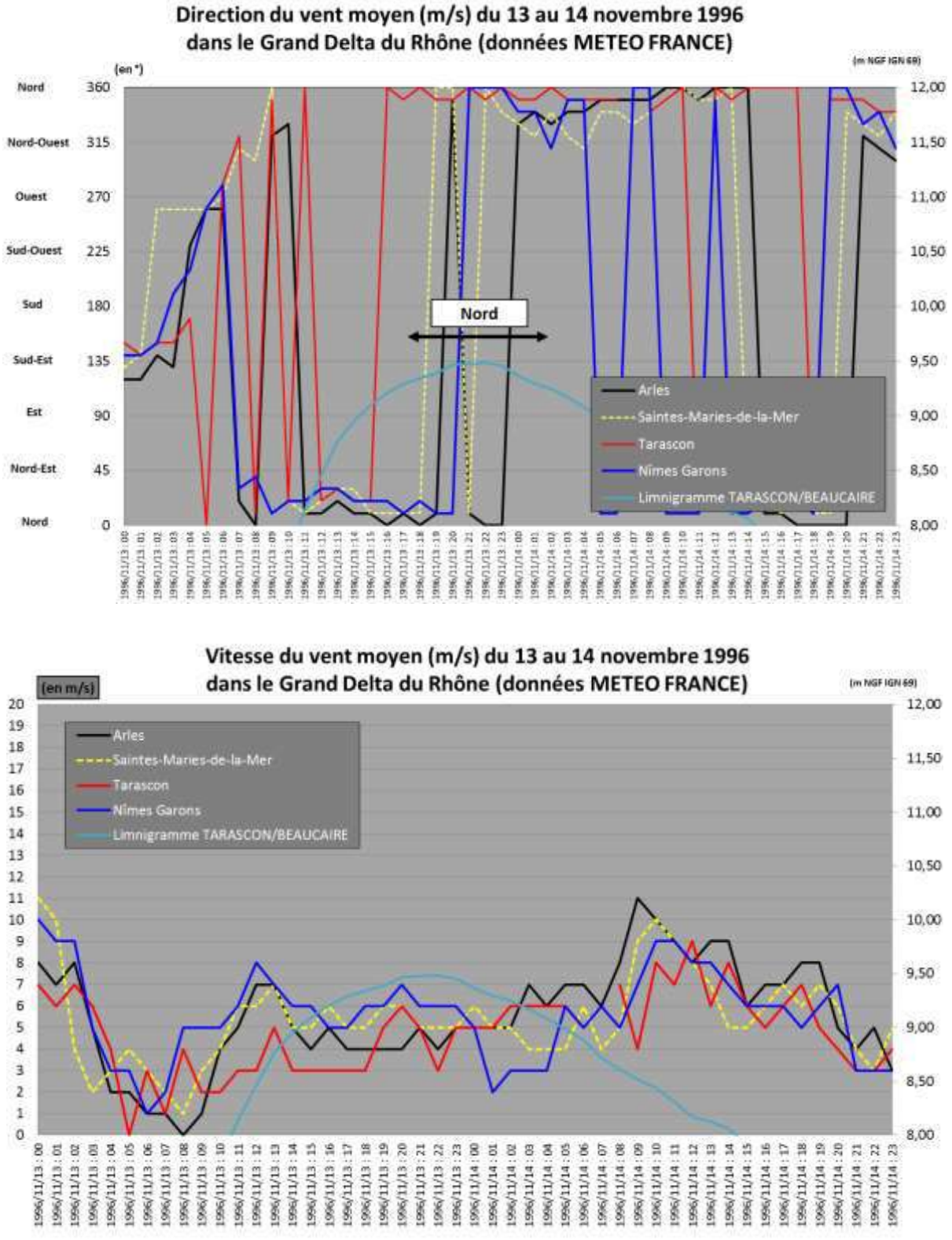


Figure 179. Direction et force du vent moyen dans le Delta lors de la crue de novembre 1996

3.2.5 Direction et force du vent lors de la crue de septembre 2002

Lors de la crue de septembre 2002, le vent était orienté Nord/Nord-Ouest dans l'ensemble du delta. La vitesse du vent moyen était comprise entre 2 et 4 m/s. On note des vents avec des vitesses comprises entre 10 et 16 m/s dans la journée précédant la crue et une direction orientée Sud-Est.

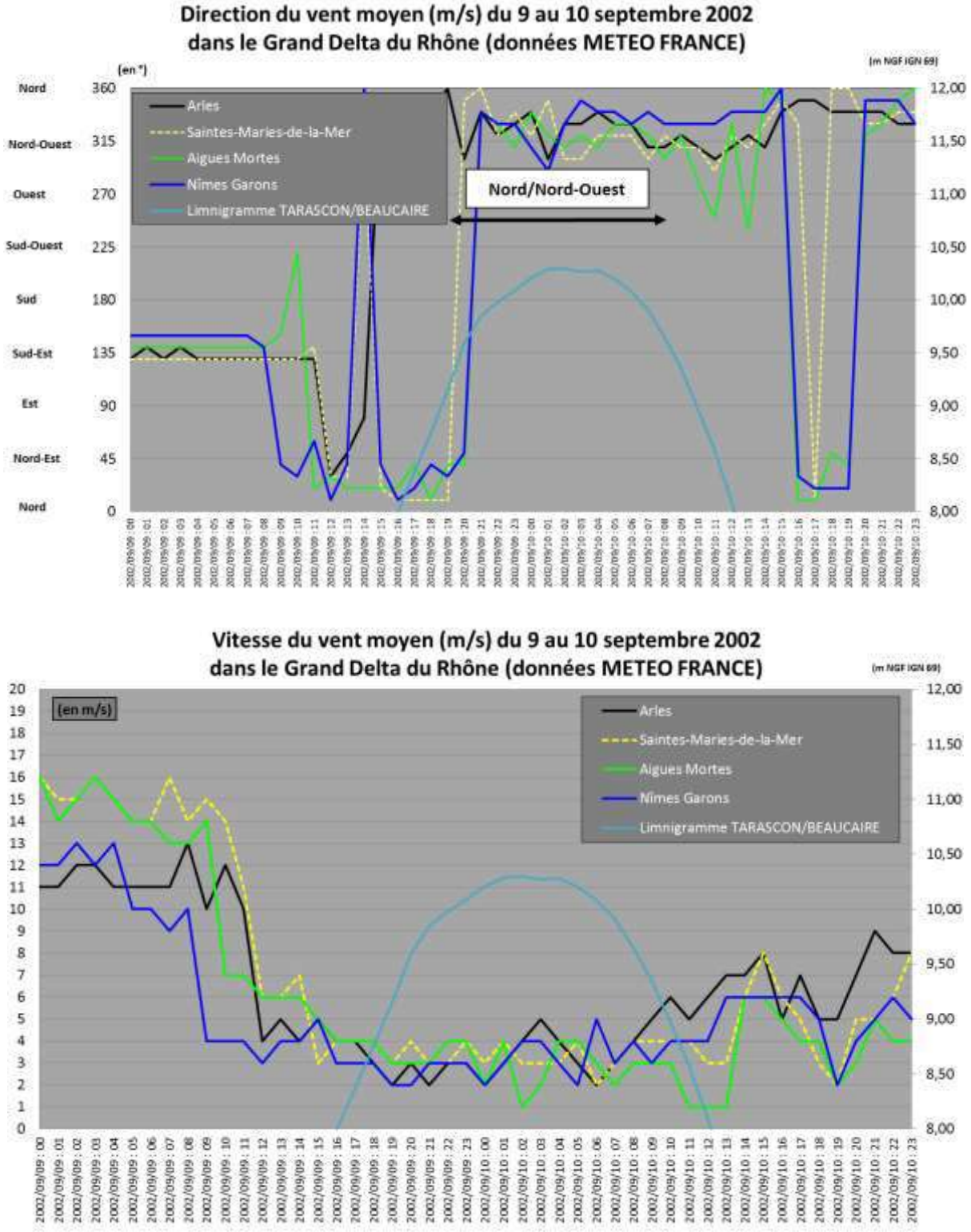


Figure 180. Direction et force du vent moyen dans le Delta lors de la crue de septembre 2002

3.2.6 Direction et force du vent lors de la crue de novembre 2002

Lors de la 1ère pointe de crue en novembre 2002, le vent était orienté Sud/Sud-Est dans l'ensemble du delta. La vitesse du vent moyen était comprise entre 1 et 8 m/s. On note des vents avec des vitesses comparables dans la journée précédant et suivant la crue avec une direction orientée Nord.

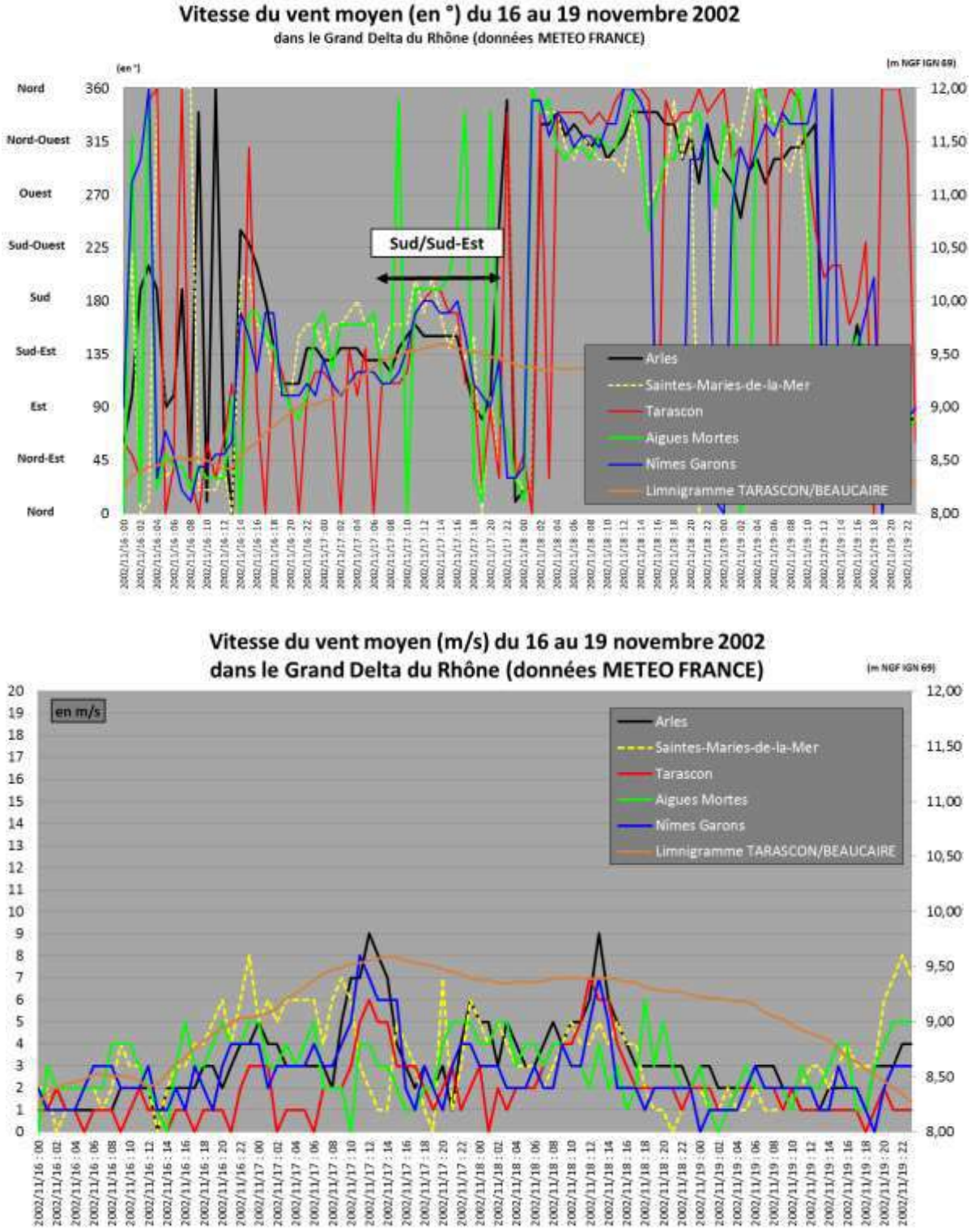


Figure 181. Direction et force du vent moyen dans le Delta lors de la crue de novembre 2002 (1ère pointe)

Lors de de la 2ème pointe de crue en novembre 2002, le vent était orienté Nord dans l'ensemble du delta. La vitesse du vent moyen était comprise entre 6 et 10 m/s. On note des vents avec des vitesses moins élevées dans la journée précédant et suivant la crue avec une direction orientée plutôt Sud.

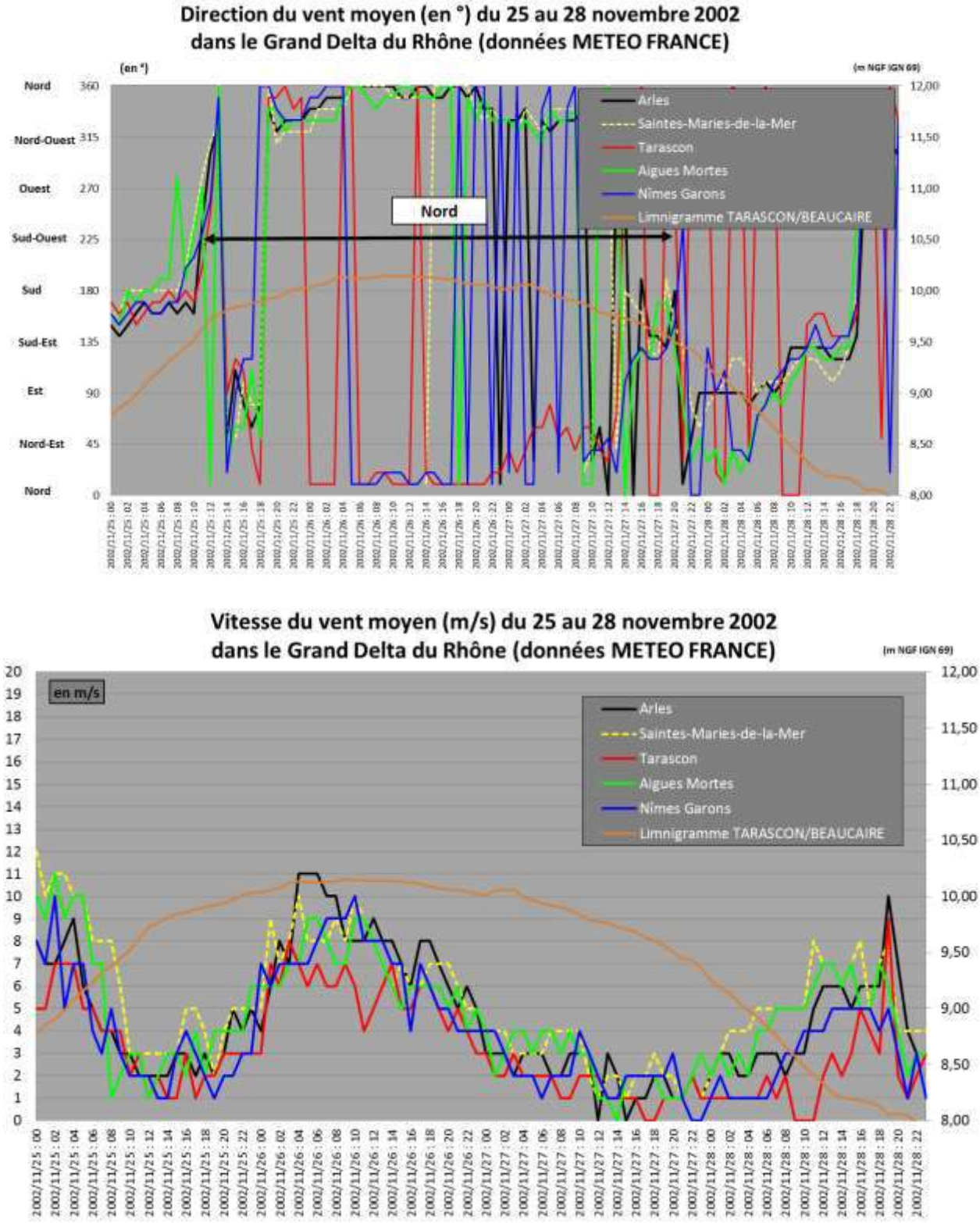


Figure 182. Direction et force du vent moyen dans le Delta lors de la crue de novembre 2002 (2ème pointe)

3.2.7 Direction et force du vent lors de la crue de décembre 2003

Lors de la crue en décembre 2003, le vent était orienté Nord/Nord-Est puis Sud-Est/Sud lors de la montée de crue. Lors de la pointe, sa direction est passée au Nord-Est/Est et lors de la décrue il était orientée Sud/Sud-Est dans l'ensemble du delta. Le vent s'est levé lors de la montée de crue. La vitesse du vent moyen était comprise entre 9 et 11 m/s en tête de delta et en périphérie. Dans le sud du delta, les vitesses étaient comprises entre 12 et 15 m/s et même des vitesses de 18 m/s lors de la montée de crue.

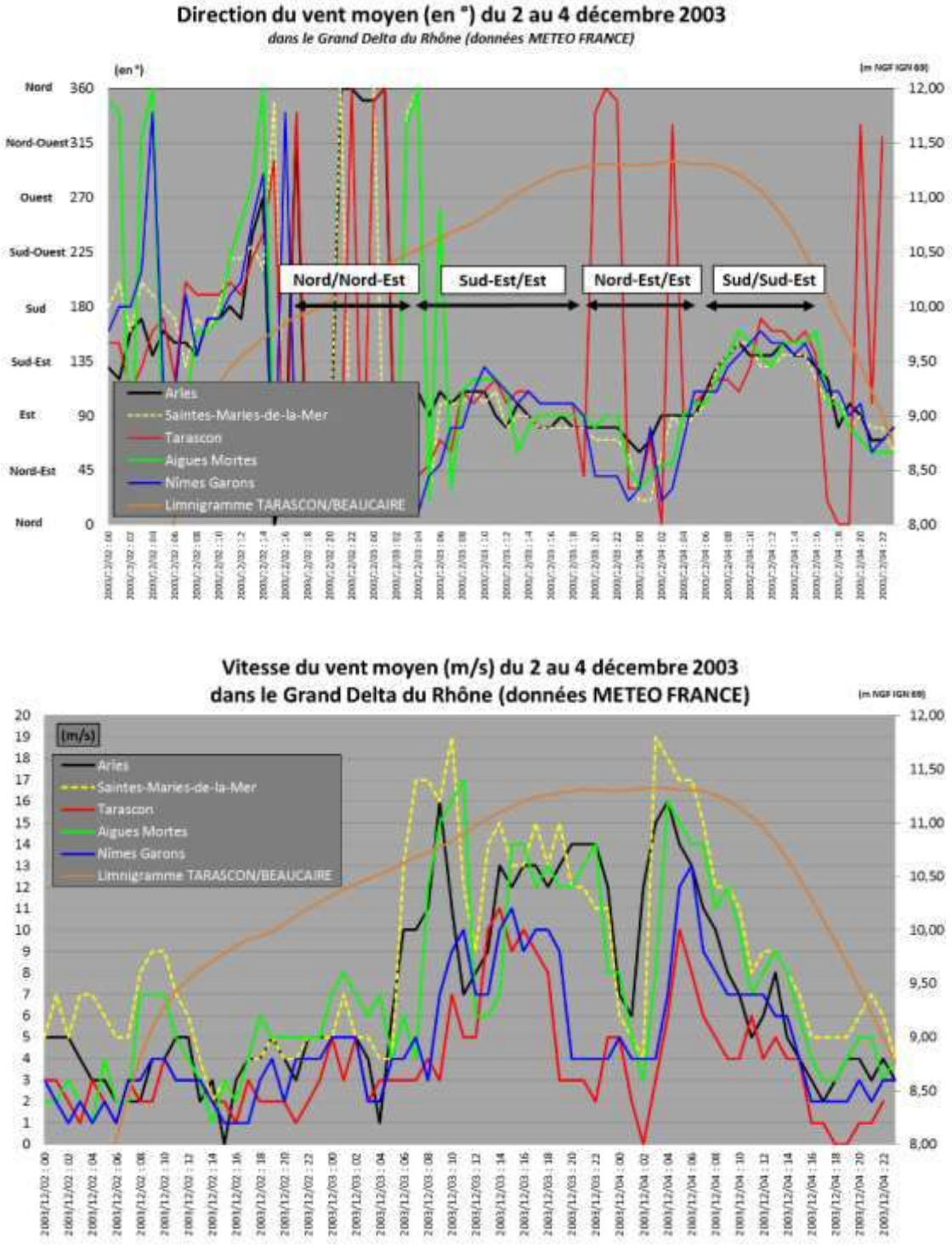


Figure 183. Direction et force du vent moyen dans le Delta lors de la crue de décembre 2003

3.2.8 Synthèse

L'analyse du vent lors des 8 crues supérieures à la crue décennale entre 1993 et 2003 montre que les vents dominants lors des crues sont orientés Nord ou Sud-Est, mais peuvent changer de direction en crue, comme cela fut le cas en décembre 2003. Si l'on excepte la crue de décembre 2003, la force du vent lors des crues est inférieure à 10 m/s, ce qui est très inférieure au vent annuel. La crue de décembre 2003, dont la période de retour est d'environ 100 ans montre néanmoins qu'on peut avoir des vents importants en crue sans néanmoins atteindre des vitesses supérieures à 18 m/s, ce qui correspond à quasiment un vent de fréquence annuel (en considérant une période de retour de 50 ans pour des vitesses de vent de 30 m/s).

Tableau 69. Direction et force du vent lors des crues importantes de 1993 à 2003

crue	Direction du vent moyen	Force du vent moyen
Octobre 1993	Sud-Est/Est	Entre 5 et 10 m/s
Janvier 1994	Nord	Inférieure à 4 m/s
Novembre 1994	Nord et Sud-Est	Entre 4 et 8 m/s
Novembre 1996	Nord	Entre 4 et 6 m/s
Septembre 2002	Nord/Nord-Ouest	Entre 2 et 4 m/s
Novembre 2002 (1ère)	Sud/Sud-Est	Entre 1 et 8 m/s
Novembre 2002 (2ème)	Nord	Entre 6 et 10 m/s
Décembre 2003	Sud-Est/Est puis Nord-Est Puis Sud/Sud-Est	Entre 9 et 11 m/s - nord du delta et 12 et 18 m/s - sud du delta

3.3 RUN-UP

La figure ci-dessus illustre le phénomène de run-up

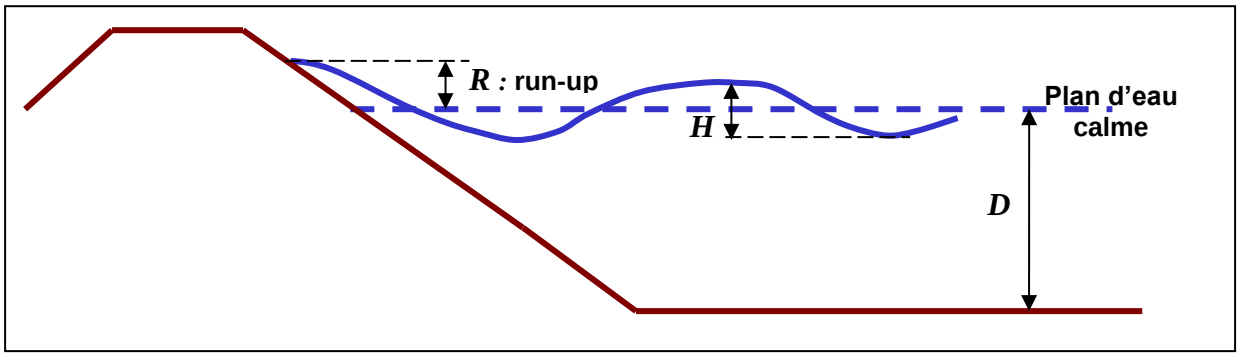


Figure 184. Déferlement (run-up) des vagues (source CFBR [X040])

De nombreuses formules empiriques permettent d'apprécier la hauteur de vagues significative en fonction du vent, qui est la hauteur moyenne du tiers supérieur de toutes les vagues du spectre.
Ces formules ont été établies pour des retenues de barrage ou les digues littorales donc dans des espaces « ouverts » sans obstacle. Pour l'estimation de la hauteur spécifique des vagues dans le cas de Fetchs restreints, le CFBR recommande la formule de Jane M. Smiths (1991) adaptée aux conditions d'eau profonde :

$$H_S = 0.0015 \left(\frac{\hat{U}_a^2}{g} \right) \left(\frac{gF}{\hat{U}_a^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Avec :

Hs : hauteur significative des vagues en m ;
F : longueur du fetch en m ;
Ûa : vitesse efficace ajustée du vent à 10 m de hauteur en m/s, soit Ûa = Ua.cos(θ) avec θ l'angle entre les directions du vent et des vagues.

$U_a = U\sqrt{(0{,}75 + 0{,}067 \times U)}$ (formule de Garrat 1977)

avec *U* vitesse moyenne sur une heure du vent à 10 m au-dessus de la surface de l'eau, pour la période de retour considérée. Sans information sur la direction des vents, on prend $\hat{U}_a = U_a$.

Tableau 70. Vitesse et vitesse efficace du vent

U (en m/s)	Ua (en m/s)
5	5
10	12
20	29
30	50

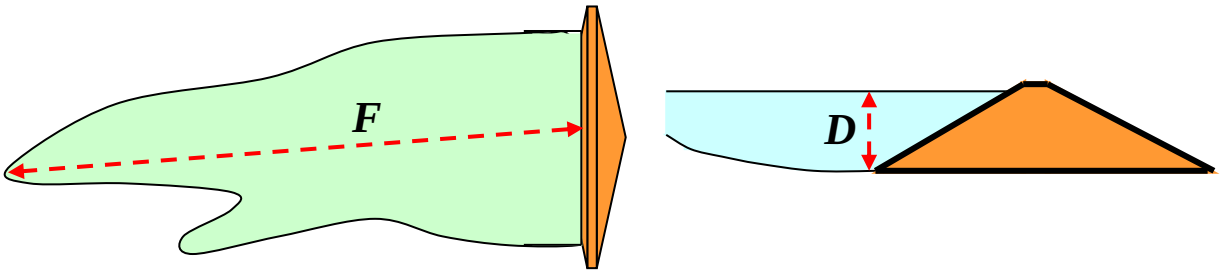


Figure 185. Paramètres intervenant dans le calcul des vagues (source CFBR [X040])

La figure ci-dessous donne la hauteur de vagues spécifiques en fonction de la longueur de Fetch effectif et de la vitesse du vent U

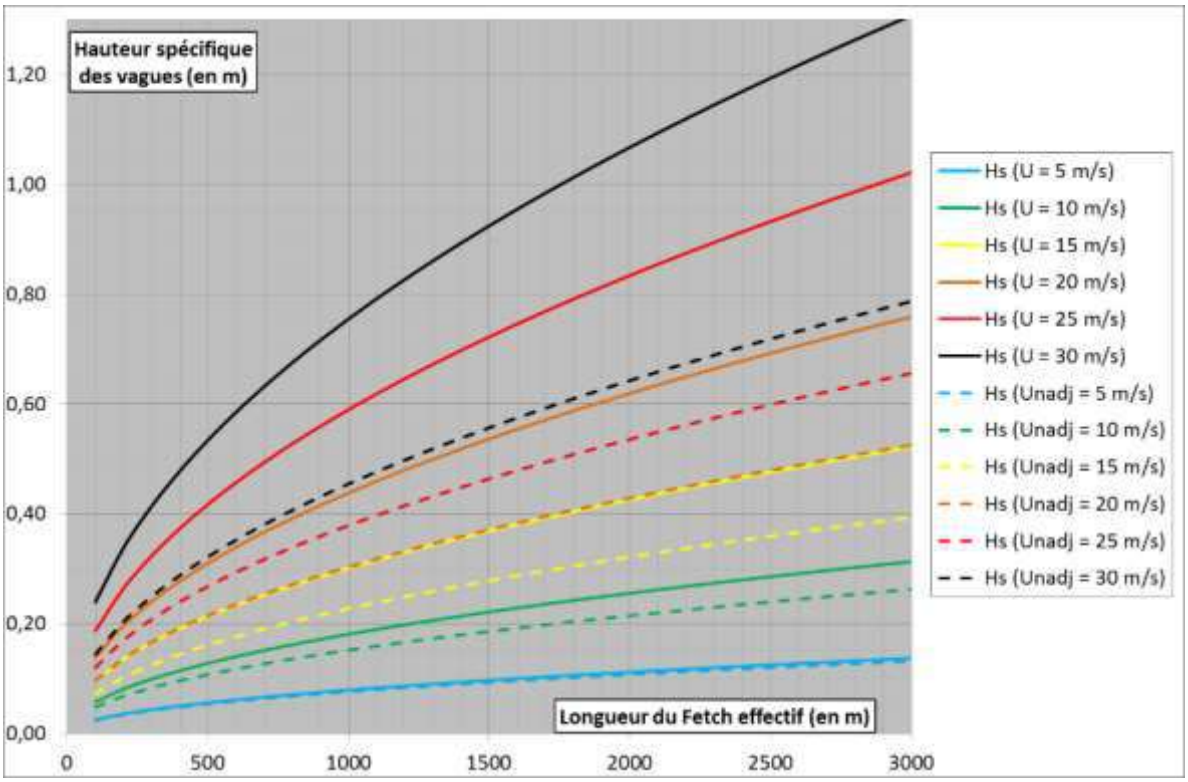


Figure 186. hauteur de vagues spécifiques en fonction du Fetch effectif et de la vitesse du vent

La formule de Smiths peut donner avec des vents ajustés suivant la formule de Garrat des hauteurs de vagues significatives supérieures au mètre sans compter l'effet de run-up.

Pour les barrages en remblai, qu'on peut assimiler aux digues du Symadrem, la CIGB recommande de ne laisser passer que 5 % des vagues sur la crête et préconise pour cela de multiplier la hauteur des vagues significatives par un coefficient multiplicateur de 1,25 pour obtenir la « hauteur de projet ».

Le run-up pour des parements lisses ou imperméables, auxquels peuvent être assimilés les parements végétalisés des digues du SYMADREM est donné par l'abaque de Saville figurant ci-dessous :

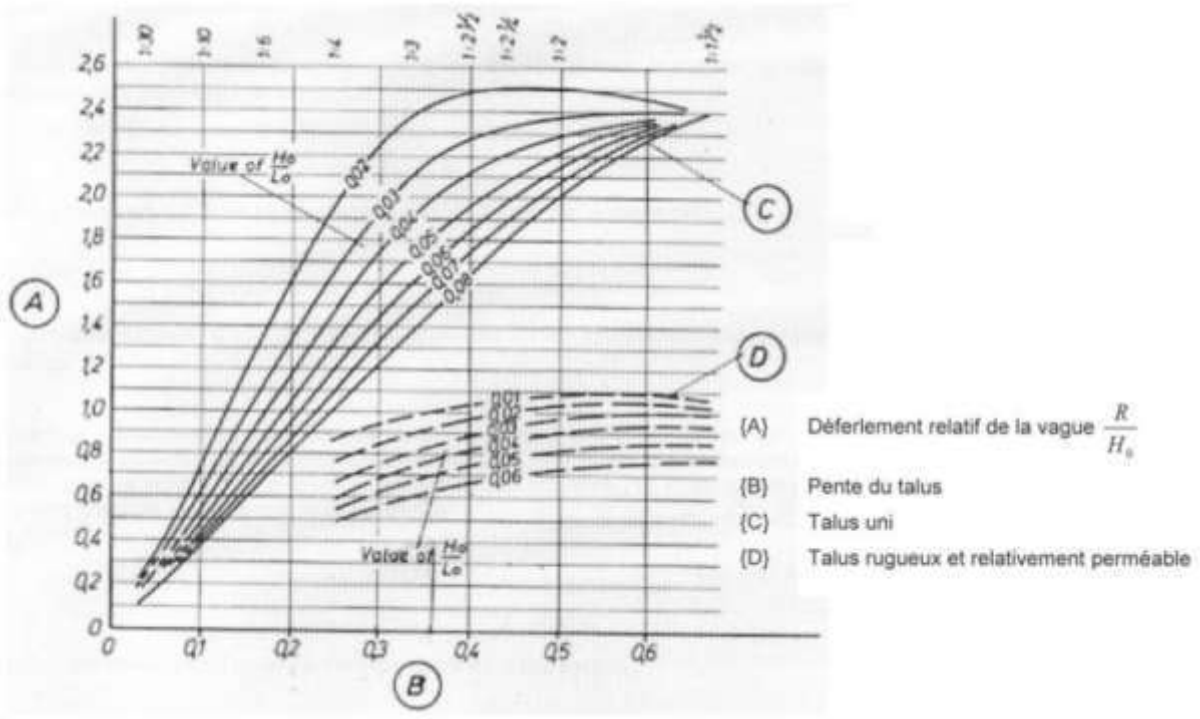


Figure 187. Abaque de Saville

La longueur d'ondes des vagues L, est donnée en eau profonde par la formule suivante (si D> L/2) :

$$\text{Eau profonde : } L = \frac{g\,T^2}{2\pi} = 1.56\,T^2$$

Où Tp est la période du pic spectral des vagues en s estimée par la formule suivante :

$$T_p = 0.3704 \left(\frac{\hat{U}_a}{g} \right) \left(\frac{g\,F}{\hat{U}_a^2} \right)^{0.28}$$

On obtient un rapport H_0/L_0 compris entre 0,06 et 0,09. En assimilant les talus des digues à des talus rugueux et relativement perméable (végétation sur les digues) de fruit compris entre 1,5 et 2, on obtient un rapport R/H au maximum de 0,8, ce qui tend à montrer un amortissement de la vagues à l'arrivée sur le talus.

Pour les talus uni comme les perrés en béton ou perrés maçonnés, ce rapport R/H donne des valeurs proches de 2.

3.3.1 Retour d'expérience des observations faites en décembre 2003

Les valeurs de run-up sont donc égales à 0,8 fois la hauteur des vagues significatives de la figure ci-avant, ce qui peut donner des valeurs de l'ordre du mètre alors qu'en décembre 2003 Les agents du SYMADREM chargés de la surveillance n'ont pas observé de vagues significatives sur le Rhône.

Des témoignages sur le tronçon de digue situé en amont de la brèche d'Argence font état de vagues d'une hauteur de 20 à 30 cm.

Trois cas sont analysés ci-après à partir des observations faites en décembre 2003 :

- Les témoins ayant observé les prémices de la brèche de Petit Argence, le 3 décembre 2003 à 10 heures ont fait part de vaguelettes de 20 à 30 cm. Par ailleurs, une laisse de crue relevée à la station de Petit Argence a été levée à 7,83 NGF sur un parement béton, alors que le niveau de crue estimé à partir des différentes modélisations donne un niveau de 7,4 m NGF, ce qui donnerait un run-up de 45 cm environ ;
- La vidéo tournée par le directeur du SIDR aux abords de la maison du garde digues de Fourques, le 3 décembre 2003 à 15 heures montre des vaguelettes de 10 cm ;
- La vidéo tournée par un cadre de la mairie d'Arles au moment de la formation de la brèche de l'Armellière, le 3 décembre 2003, 6 à 12 heures montre l'absence de vagues.

A partir des données recueillies auprès de Météo France et en pondérant par l'inverse de la distance entre ces stations et ces trois sites, on peut estimer que :

- Au droit de la prise d'eau de Petit Argence, le vent moyen avait le 3 décembre 2003 à 10 heures, une force de 11 m/s et une direction de 115 ;
- Au droit de la prise d'eau de l'Armelière, le vent moyen avait le 3 décembre 2003 à 12 heures, une force de 7m/s et une direction de 89 ° ;
- Au droit de la maison du garde digues de Fourques, le vent moyen avait le 3 décembre 2003 à 15 heures, une force de 11 m/s et une direction de 90° ;

Tableau 71. Force et direction du vent moyen à 3 points caractéristiques

	Arles	**Saintes Maries**	**Tarascon**	**Aigues Mortes**	**Nîmes Garons**	**Paramètres retenus**
Distance Argence (en km)	26	30	15	31	16	
Pondération Argence	0,16	0,14	0,29	0,14	0,27	
Force Vent le 3/12 à 10 h (en m/s)	11	19	7	16	9	**11**
Direction Vent 3/12 à 10 h (en °)	110	100	110	120	130	**115**
Distance Armelière (en km)	8	24	27	39	35	
Pondération Armelière	0,48	0,16	0,14	0,10	0,11	
Force Vent le 3/12 à 12 h (en m/s)	8	9	5	6	7	**7**
Direction Vent 3/12 à 12 h (en °)	80	80	100	110	110	**89**
Distance Fourques (en km)	22	30	14	35	21	
Pondération Fourques	0,20	0,15	0,32	0,13	0,21	
Force Vent le 3/12 à 15 h (en m/s)	12	13	9	14	11	**11**
Direction Vent 3/12 à 15 h (en °)	80	80	100	90	100	**92**

1er cas : prise d'eau de Petit Argence

En retenant l'hypothèse que les rangées d'arbres cassent l'effet des vagues et limitent le développement du Fetch, la figure ci-dessus montre qu'avec une direction de 115°, la longueur du Fetch est de 300 m (hyp.1). Cette longueur passe à 1300 m avec une direction de vent moyen de 123° (hyp.2). En retenant l'hypothèse que les rangées d'arbres ne brisent pas l'effet des vagues, avec une direction de 123°, la longueur du Fetch est portée à 1700 m (hyp. 3).

Suivant la formule de Smiths, la hauteur des vagues spécifiques (Hs) et le Run-up (R) estimé à 2,1 fois cette hauteur suivant l'abaque de Saville (parement bétonné du talus amont de la prise d'eau) donne les résultats suivants :

- Hyp. 1 : Hs = 11 cm / R = 23 cm
- Hyp. 2 : Hs = 22 cm / R = 46 cm
- Hyp. 3 : Hs = 26 cm / R = 55 cm

L'hypothèse 2 semble « valider » l'observation des témoins et la laisse de crue levée sur la prise d'eau, sans qu'il ne soit possible d'écarter l'hypothèse 3.

Les recommandations de l'USACE préconisent de calculer le Fetch autour d'un angle de 15°, ce qui, dans un espace contraint par les digues et la végétation, donne des valeurs fortement variables ; confirmé dans le cas présent.

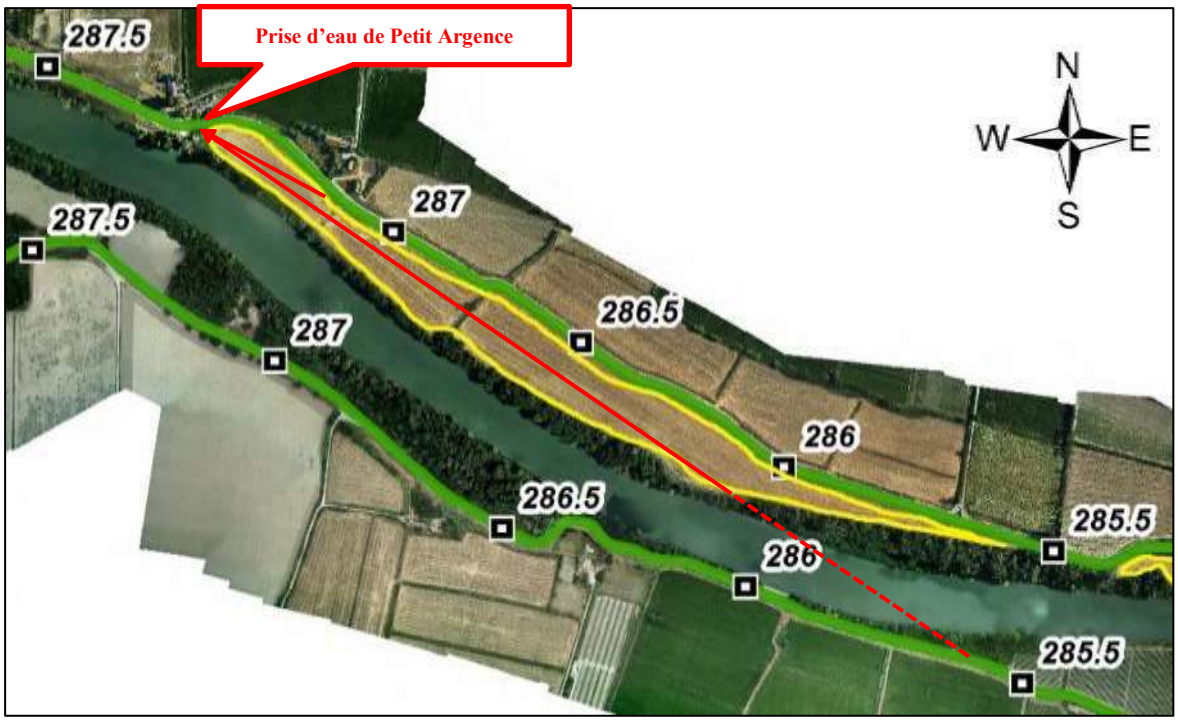


Figure 188. Calcul du Fetch dans le cas de la prise d'eau de Petit Argence en décembre 2003

Photo 32. Laisses de crues relevées à la station de Petit Argence située 700 m en amont de la brèche

2ème cas : maison du garde digues de Fourques

La lecture de la vidéo tournée par le directeur du SIDR donne une estimation de la hauteur des vagues d'une quinzaine de centimètres.

En retenant l'hypothèse que les rangées d'arbres cassent l'effet des vagues et limitent le développement du Fetch, la figure ci-après montre qu'avec une direction de 92°, la longueur du Fetch est de 350 m (hyp.1 trait plein). En retenant l'hypothèse que les rangées d'arbres ne brisent pas l'effet des vagues, la longueur du Fetch est portée à 1500 m (hyp. 2 trait plein + pointillés).

Avec un vent moyen estimé à 11 m/s, la formule de Smiths et l'abaque de Saville (parement rugueux et relativement perméable) donnent respectivement les hauteurs des vagues spécifiques (Hs) et le Run-up R (estimé à 0,7 fois cette hauteur) suivants :

- Hyp. 1 : Hs = 12 cm / R = 9 cm
- Hyp. 2 : Hs = 25 cm / R = 18 cm

Photo 33. Extrait de la vidéo tournée par le SIDR en décembre 2003 à Fourques

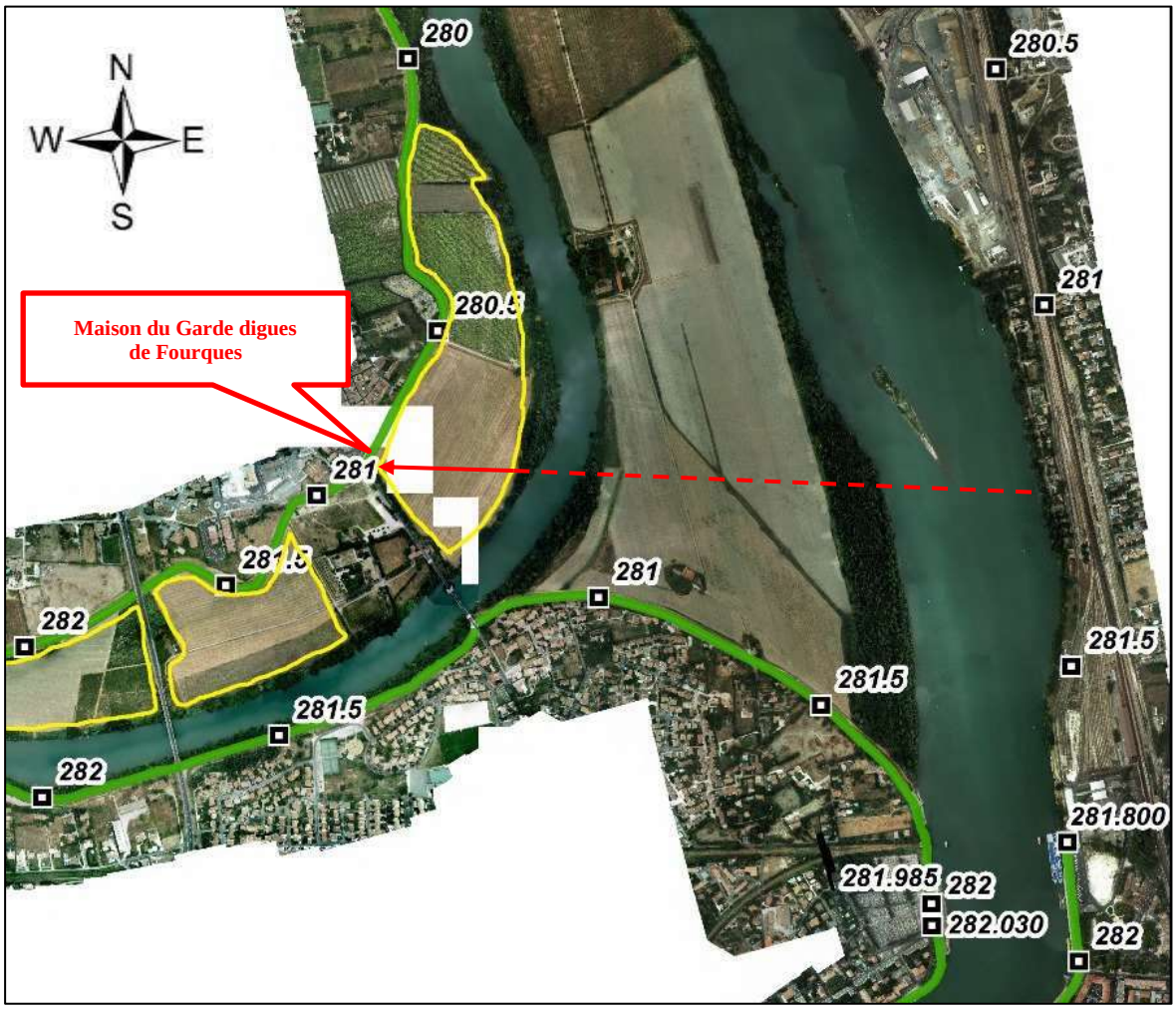


Figure 189. Calcul du Fetch dans le cas de la maison du garde digues en décembre 2003

La lecture de la vidéo semble valider l'hypothèse 1

<u>3ème cas : brèche de l'Armelière</u>

La lecture de la vidéo tournée par un cadre de la mairie d'Arles ne montre pas de vagues déferlant sur la digue.

Le vent moyen avait une direction estimée à 89° et une force de 7 m/s.

En retenant l'hypothèse (hyp. 1) que les rangées d'arbres cassent l'effet des vagues et limitent le développement du Fetch, le Fetch est nul et il est donc logique de ne pas retrouver de vagues. En retenant l'hypothèse que les rangées d'arbres ne brisent pas l'effet des vagues, la longueur du Fetch est portée à 1500 m (hyp. 2 trait pointillé).

La formule de Smiths et l'abaque de Saville (parement rugueux et relativement perméable) donnent une hauteur des vagues spécifiques Hs de 14 cm et un Run-up R de 10 cm.

La lecture de la vidéo semble valider l'hypothèse 1

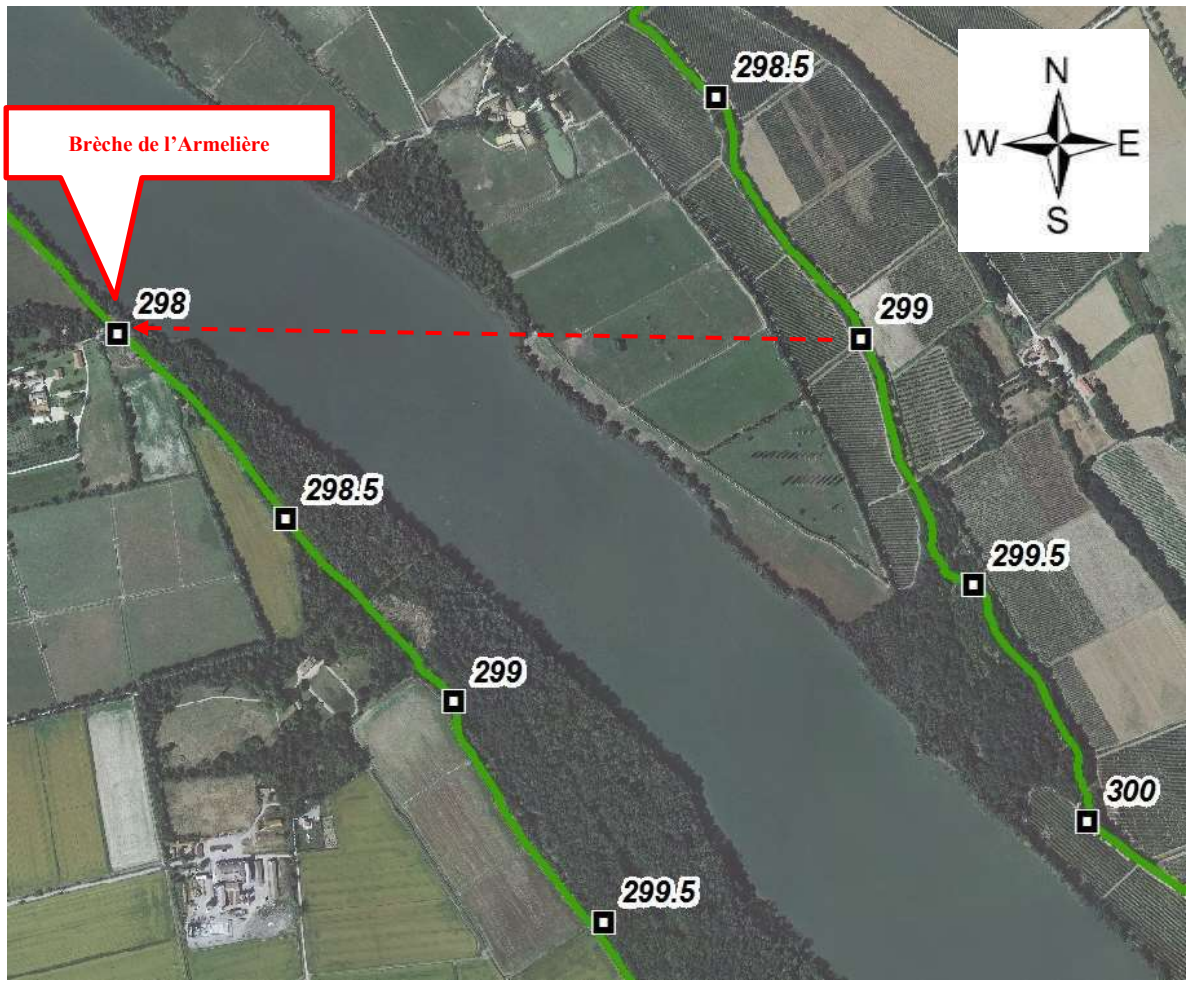


Figure 190. Calcul du Fetch dans le cas de la brèche de l'Armelière en décembre 2003

Photo 34. Extrait de la vidéo tournée la mairie d'Arles en décembre 2003 à l'Armelière

3.4 CONCLUSION ET IDENTIFICATION DES SECTEURS EXPOSES AU EFFET DU VENT

L'analyse des données de vents relatives aux crues supérieures à la crue décennale de 1993 à 2003 tend à montrer :

- des vitesses de vent de fréquence annuelle, voire moins ;
- des directions de vent très variables au cours de la crue ;
- l'effet joué par la végétation le long des berges du fleuve qui limite le développement de longs Fetch et donc des hauteurs de vagues spécifiques ;
- L'espace « contraint » que représente le lit endigué qui limite également le développement de longs Fetch (règle des 15°).

Le lit endigué a fait l'objet d'une analyse de la végétation à partir des orthophotographies réalisées lors de la campagne FLIMAP. Des « petites retenues » où des vagues peuvent potentiellement se développer ont été définies.

Cette analyse montre que le développement de Fetch supérieur à 500 m est peu probable.

En retenant un vent de référence de 30 m/s quel que soit sa direction, la formule de Smiths donne une valeur de hauteur de vague significative de 53 cm et un run-up de 37 cm. Avec un vent de fréquence annuel arrondi à 15 m/s et un vent biennal arrondi à 20 m/s, le run-up est respectivement de 15 et 20 cm, ce qui est faible.

Le retour d'expérience accidentologique de la crue de décembre 2003 n'a pas montré d'érosion liée aux vagues sur les parements végétalisés des digues. L'abaque ci-dessous extrait de l'ILH [X015] donne la résistance d'un parement plus ou moins végétalisé en fonction de la durée de sollicitations et de la hauteur de vague spécifique. Cet abaque tend à montrer que la hauteur des vagues a vraisemblablement été inférieure à 25 cm.

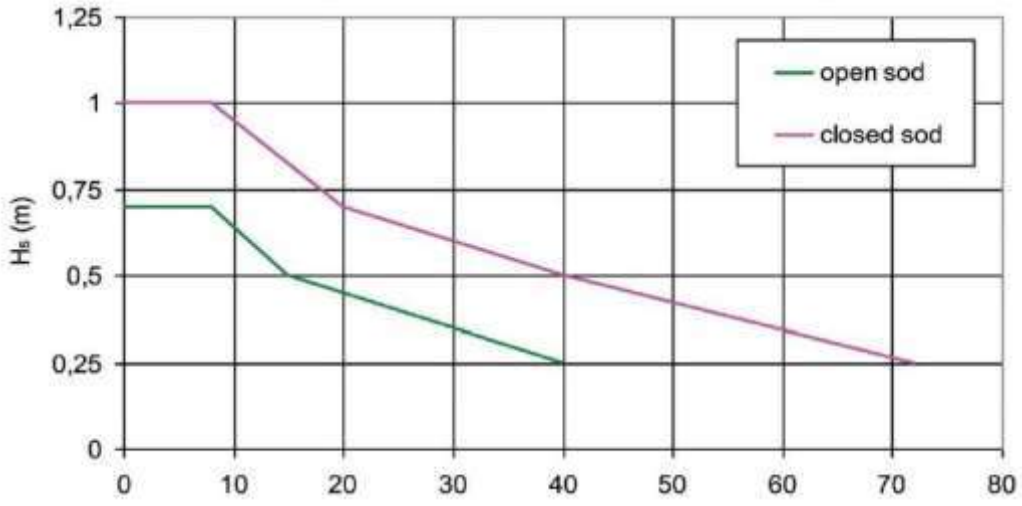


Figure 191. Résistance du parement d'une digue végétalisée en fonction de la hauteur spécifique des vagues (source ILH [X015])

3.4.1 Rive droite

Deux zones méritent une attention :

- le tronçon de digue situé au droit de la prise d'eau de Petit Argence, qui sur un linéaire très limité peut être très exposé au vent comme ce fut le cas en décembre 2003,
- le tronçon de digue situé juste en amont de la station de la Tourette, qui peut être sur un tronçon très limité également exposé à un vent du Sud Est.

Figure 192. Tronçon situé en amont de la station de la Tourette exposé sur un linéaire limité au vent du Sud Est

Sur ces deux tronçons, la longueur du Fetch est estimée au maximum à 1300 m (plus faible en réalité compte tenu de l'angle de 15° qu'il faudrait théoriquement prendre suivant les recommandations de l'USACE) ce qui donne les valeurs suivantes.

Tableau 72. Force du vent, hauteur spécifique et run-up

Force du vent	Hauteur de vague significative	Run-up (R/H = 0,7)
15 m/s	34 cm	24 cm
20 m/s	50 cm	50 cm
30 m/s	86 cm	60 cm

Il est à noter que sur des structures bétonnées comme la prise d'eau d'Argence, le rapport R/H permettant de calculer le run-up est de l'ordre de 2, mais la structure même de ces ouvrages permet également de tolérer des petites surverses.

3.4.2 Rive gauche

En rive gauche du Rhône, les digues où de longs Fetch peuvent se développer sont exposées au vent d'Ouest et Sud-Ouest. Au regard des données historiques récentes ou anciennes, la probabilité d'avoir un vent important d'Ouest ou Sud-Ouest concomitamment avec la pointe de crue est très faible. On peut considérer le risque d'érosion, liée au vagues, très faible et le risque de déferlement inférieur au 35 cm pris en compte dans la revanche de 50 cm.

La digue de la Montagnette exposée au vent du Nord pourrait présenter un risque d'exposition aux vagues important. Cependant la haie d'arbres disposée au nord de la digue joue un rôle de protection en dissipant les vagues potentiellement déferlantes.

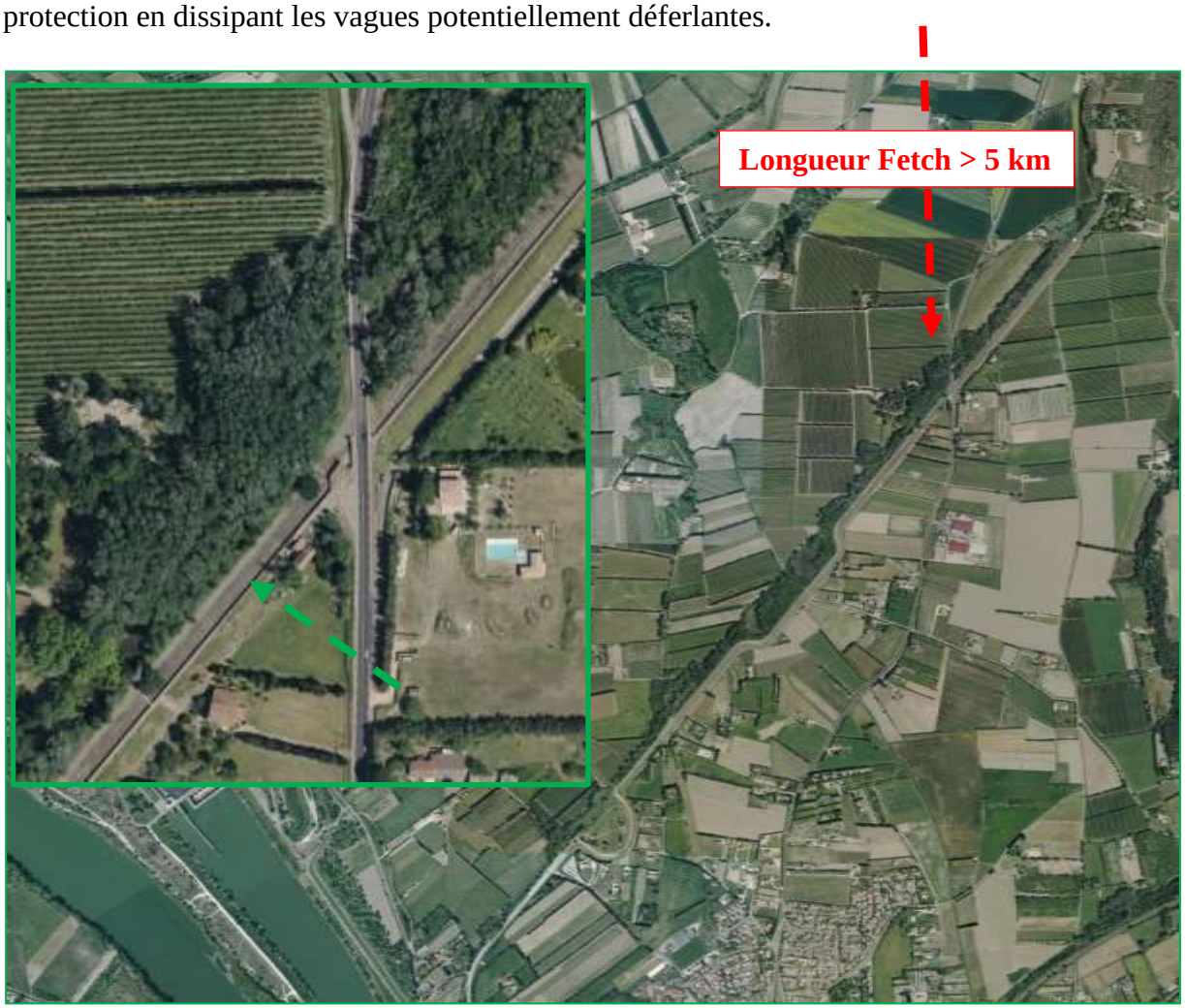


Figure 193. Digue de la Montagnette et exposition aux vagues éventuelles

3.4.3 Camargue Insulaire

Les digues exposées au vent sont :

- celles situées sur le Grand Rhône rive droite notamment en aval de Salin de Giraud (vent du sud-Est et entrées maritimes),
- celles situées sur le Petit Rhône riva gauche au droit de l'Amarée (vent du Sud-Ouest et entrées maritimes),
- celle du Défluent (vent du Nord)

L'étude accidentologique a montré que les deux premières digues étaient fréquemment sollicitées par les vents marins que ce soit en période de crues ou hors période de crues.

La digue du défluent est exposée au vent du Nord avec un Fetch potentiel de 1,5 km. Le retour d'expérience des crues passées n'a pas montré de risque d'érosion liée aux vagues. La digue présente une revanche confortable par rapport à la crue exceptionnelle. Compte tenu des enjeux humains, il conviendrait d'envisager la plantation d'une haie d'arbres au nord de la digue de manière à dissiper l'énergie des vagues et réduire le risque de déferlement sur la digue qu'on peut évaluer à 40 cm en cas de vent annuel concomitant avec une crue.

Figure 194. Digue du défluent

4 SEISMES

Suivant le nouveau zonage sismique de la France en vigueur à partir du 1er mai 2011, l'ouvrage se situe dans une zone de risque faible à très faible, comme le montrent les cartes ci-après. La carte nationale et les informations locales disponibles sur le site du BRGM indiquent même un niveau très faible pour la commune des Saintes Maries de la Mer. Nous retiendrons le risque faible, qui apparait sur la carte régionale.

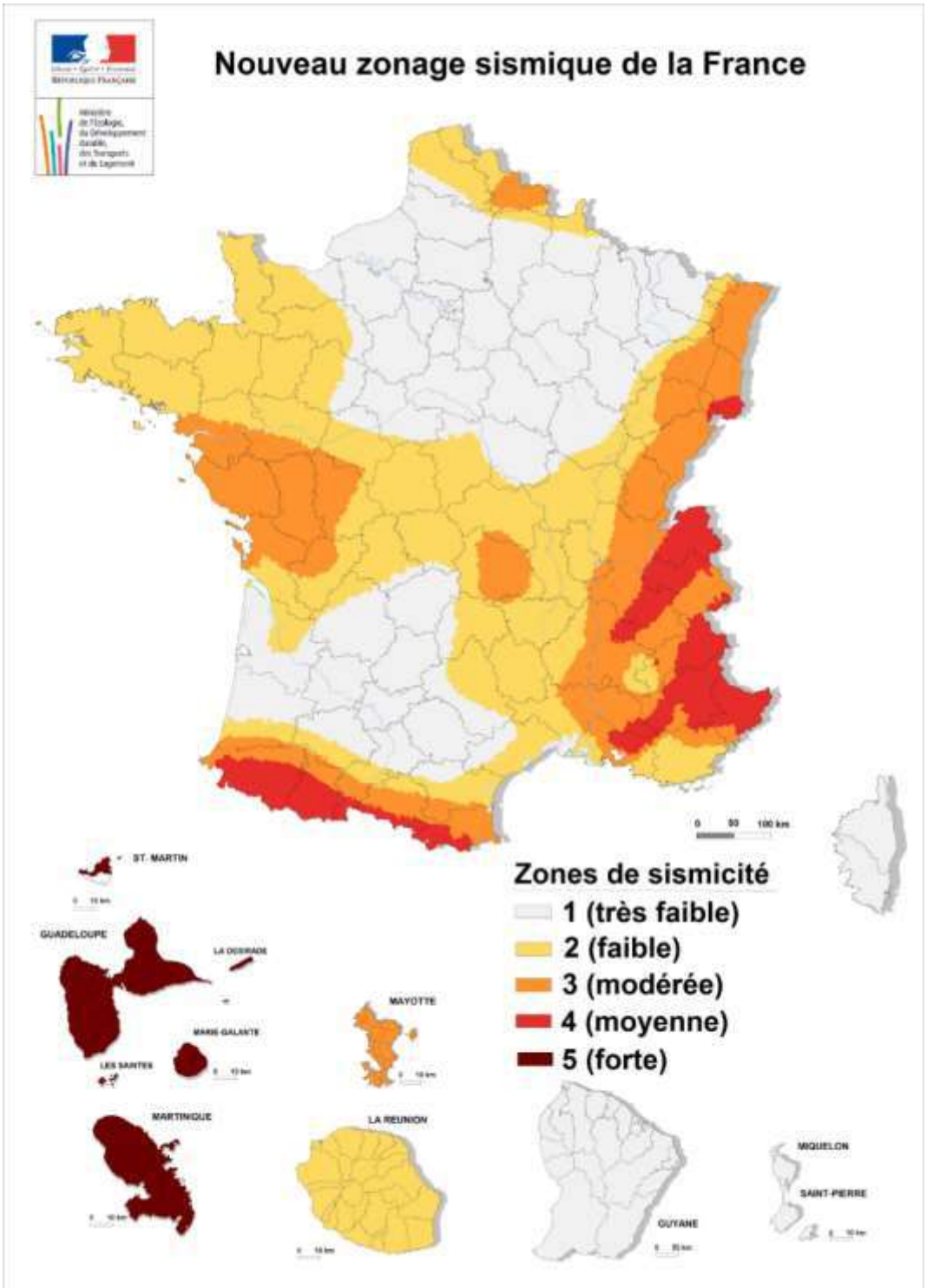


Figure 195. Zonage sismique de la France

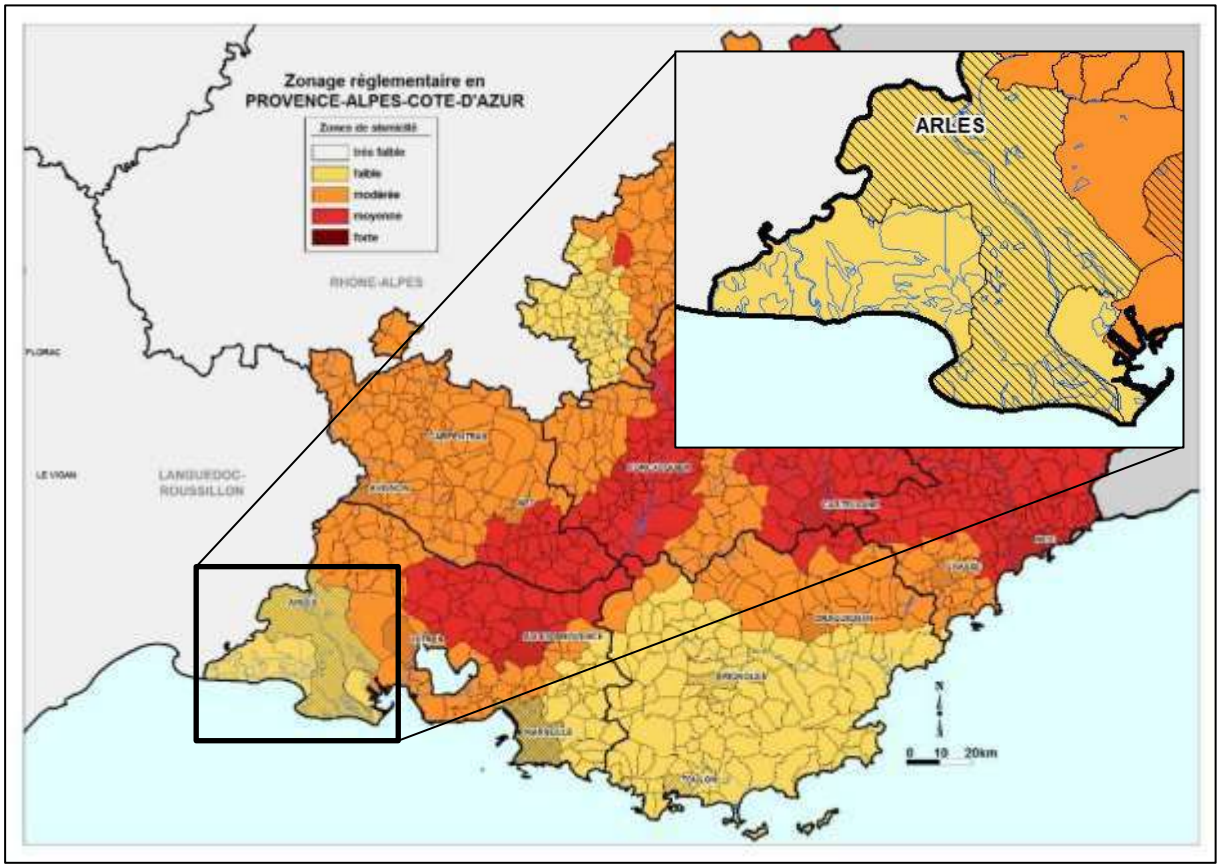


Figure 196. Zonage sismique de la France – Région PACA, zoom sur la Camargue

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT FLUVIAL CAMARGUE INSULAIRE

CHAPITRE 5 :

CHAPITRE N°5.0 : DESCRIPTION GEOTECHNIQUE **1**

CHAPITRE N°5.1 : DESCRIPTION DES OUVRAGES **50**

CHAPITRE N°5.2 : DESCRIPTION DES OUVRAGES PROJETES **270**

CHAPITRE N°5.3 : IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES POTENTIELS DE DANGER **271**

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT

CAMARGUE INSULAIRE

DOCUMENT B

CHAPITRE N°5.0 : DESCRIPTION GEOTECHNIQUE

SOMMAIRE

1. Introduction 3

2. Description des campagnes 3
2.1. Digue du défluent 3
2.2. Les quais d'Arles 3
2.3. GRD entre Les quais et Petite Montlong 3
2.4. GRD entre Petite Montlong et la Louisiane 4
2.5. GRD à l'aval de la Louisiane 4
2.6. PRG entre le centre d'Arles et Albaron 4
2.7. PRG au niveau d'Albaron 5
2.8. PRG entre Albaron et Sénebier 5
2.9. PRG Vers Sénebier 5
2.10. PRG en aval de Sénebier 6

3. Analyse et résultats 7
3.1. Méthode d'analyse 7
3.2. Corrélation des analyses carottés/CPT 7
3.3. Répartition des valeurs clés 11
3.4. Corrélation entre les différentes mesures et la résistance à l'érosion de conduit 34
3.5. Evolution dans le temps 38
3.6. Perméabilité de Hazen 40

4. Conclusion 42
4.1. Coupe de la zone d'étude 43
4.2. Description des tronçons homogènes 43
4.3. Résumé 47

1. INTRODUCTION

Une analyse géotechnique a été menée lors de l'étude de dangers du système d'endiguement « Rive Gauche », afin de déterminer la corrélation entre résultats des sondages carottés et ceux des CPT.
Les sondages réalisés sur le secteur concerné par l'étude de dangers « Camargue Insulaire » sont présentés si dessous. La répartition des valeurs clés a été déterminée par type de sol afin de caler les lois de probabilité. L'analyse de ces sondages a également permis de constituer des profils en long géotechniques.

2. DESCRIPTION DES CAMPAGNES

2.1. DIGUE DU DEFLUENT

Des sondages tarières de 8m environ ont été réalisés par Fondasol en 1994 [G1001] pour le compte de la CNR, 3 étaient situés sur la digue du défluent. Des travaux ont été réalisés depuis (années 2000 et 2001).

Parmi les campagnes récentes de 2016-2017, une s'est concentrée sur les masques étanches réalisés depuis 1998 [G801] ; le secteur du Défluent en faisait partie et 4 sondages carottés inclinés courts ont été réalisés.

2.2. LES QUAIS D'ARLES

Entre 2002 et 2004, des sondages ont été réalisés par FUGRO lors de cinq campagnes ([G707] à [G711]).
Les sondages de 2002 comprenaient 3 tarières et 5 CPT localisés sur le quai Saint Pierre, ils ont permis de préparer les travaux de 2003.
En 2003, c'est le quai de la gare maritime qui a fait l'objet de reconnaissances, avec 1 Carotté, 1 Tarière et 1 CPT. La même année, une campagne plus générale a été réalisée, avec 2 essais de pénétration dynamique et 9 sondages tarière ou destructif.
En 2004, pour préparer les travaux, de nouveaux sondages ont été réalisés sur le secteur de la gare maritime. Ils comprenaient 2 sondages destructifs longs, 13 sondages destructifs, 6 sondages à la pelle et 7 CPT. Une dernière campagne sur les quais a été faite en préparation des travaux sur la porte des Curatiers, elle comprenait 4 sondages destructifs.

2.3. GRD ENTRE LES QUAIS ET PETITE MONTLONG

Avant les travaux sur ce secteur, des sondages ont été réalisés par Fondasol en 1994 [G701], entre les PR 284 et 286. Cette campagne comprenait 6 sondages carottés.
Entre Emmaus et Passerons, Fugro a réalisé en 2001 [G706], après les travaux de 1998 : 6 sondages tarières, 2 Carottés et 4 CPT.
Entre Passerons et Montlong, c'est SicSol, devenu Fugro, qui la même année a réalisé 1 profil électromagnétique, 8 CPT et 9 sondages tarière ; avant les travaux de 2004 [705].

Parmi les campagnes récentes, une s'est concentrée sur les masques étanches réalisés depuis 1998 [G801] ; ce secteur en faisait partie et 11 sondages carottés inclinés courts ont été réalisés.
Une autre campagne [G1014], de CPT systématiques, comprenait ce secteur ; lors de cette dernière 22 CPT ont été réalisés afin d'avoir une connaissance régulière des digues et de leurs fondations.

2.4. GRD ENTRE PETITE MONTLONG ET LA LOUISIANE

Quelques sondages ponctuels ont été réalisés dans ce secteur :
En 1994 [G701], lors de la campagne menée par Fondasol sur l'ensemble du delta, le site du Sambuc a été analysé, avec 6 sondages, tarière ou carottés, implantés entre GRD302 et GRD305.
En 1995 [G702], Fondasol a réalisé deux sondages supplémentaires au droit de brèches suite aux crues de 1993 et 1994, 1 au Mas neuf des Sansouires (GRD 290.8) et 1 à Chartrouse (GRD 311.5).
En 2005 [G712], Sol Provençal a réalisé une campagne au droit de réparations d'urgence suites aux crues de 1993 à 2003, à l'Armelière 2 CPT ont été réalisés.

Une des campagnes récentes de 2016-2017 [G1014], de CPT systématiques, comprenait ce secteur ; lors de cette dernière 94 CPT ont été réalisés afin d'avoir une connaissance régulière des digues et de leurs fondations.

2.5. GRD A L'AVAL DE LA LOUISIANE

5 sondages de 5 m environ ont été réalisés en 1994 par Fondasol [701], entre les GRD 315.5 et 318.
En 2007, lors de la construction de nouvelles cales d'accostage du bac de Barcarin [G713], des sondages ont été réalisés entre autre sur les digues proches du bac, Fugro a réalisé 1 CPT et 1 Sondage pressiométrique sur la digue ainsi qu'un second CPT, 1 carotté et 3 sondages à la pelle à proximité.
En 2009, pour l'étude d'AVP de la digue des Salins [G715], une campagne géophysique a été réalisée sur l'ensemble du secteur (313-323). En termes de sondage, 38 CPT dont 3 à 25m ont été réalisés ainsi que 14 carottés et quelques sondages à la pelle.

Une campagne de sondages carottés [G717] a été réalisée en 2017 ; lors de cette dernière, 5 sondages cours (3m) ont été réalisés sur ce secteur.

2.6. PRG ENTRE LE CENTRE D'ARLES ET ALBARON

Au cours des différentes campagnes menées sur ce secteur, des zones ont été investiguées.

En 1994 [G1001], avant les travaux de 1997, l'extrémité amont du Petit Rhône rive gauche (PRG 281-283) a été sondé avec 2 carottés et 4 tarières par Fondasol.
Lors de la même campagne, 2 sondages carottés et 3 à la tarière ont été réalisé près de Saliers, entre les PRG 295 et 296.

En 1995 [G1002], 3 sondages supplémentaires ont été réalisés par Fondasol sur le secteur : 1 au PRG 288, 1 au PRG 298.6 et 1 au PRG 304.7.
En 2001 [G1005], le secteur de Beaumont-Mazel (PRG 287.3 à 288.5) a été investigué par Fugro, suite aux travaux de 1998. Ont été réalisés 4 CPT, 6 sondages tarières et 2 sondages carottés.
En 2005 [G1006], ce sont les secteurs affaiblis lors des crues de 2002-2003 qui ont fait l'objet de reconnaissances par SolProvençal. Au niveau de Beaujeu de Castre (PRG 293), 6 CPT, 1 Sondage carotté et 2 sondages pressiométriques ont été réalisés. A Figarès (PRG 298), 2 sondages destructifs ont été réalisés ; tout comme à la Galante (PRG 300) et à Lauricet (PRG 302.5).

Parmi les campagnes récentes de 2016-2017 [G1014], une s'est concentrée sur ce secteur ; lors de cette dernière 64 CPT ont été réalisés afin d'avoir une connaissance régulière des digues et de leurs fondations. Il y a également eut 4 sondages carottés, aux PR 290.25, 292.21, 297.15 et 299.65, afin d'étudier les couches de sable en profondeur.

2.7. PRG AU NIVEAU D'ALBARON

En 1994 [G1001], 3 sondages de 6 m ont été réalisés par Fondasol.
Une campagne géotechnique a été réalisée en 2001 [G1004], toujours avant les travaux de 2005, par Sicsol. Un profil électromagnétique a été produit, 3 sondages carottés ont été forés et 4 CPT ont été réalisés.

Parmi les campagnes récentes de 2016-2017, une s'est concentrée sur les masques étanches réalisés depuis 1998 [G801] ; le secteur d'Albaron en faisait partie et 4 sondages carottés inclinés courts ont été réalisés.
Une autre campagne [G1014], de CPT systématiques, comprenait ce secteur ; lors de cette dernière, 2 CPT ont été réalisés au niveau de la digue d'Albaron.

2.8. PRG ENTRE ALBARON ET SENEBIER

Aucun sondage ancien n'a été réalisé sur ce secteur.

Une des campagnes récentes de 2016-2017 [G1014], de CPT systématiques, comprenait ce secteur ; lors de cette dernière 49 CPT ont été réalisés afin d'avoir une connaissance régulière des digues et de leurs fondations.

Suite à la crue de 2016, des investigations ont été faite vers Ventabren (PRG 314.1) : 1 CPT et 1 sondage carotté.

2.9. PRG VERS SENEBIER

1 sondage ponctuel a été réalisé dans le cadre de la campagne de 1995 [G1001], menée par Fondasol, il se situe au PRG 321.
Après les travaux de 1998, des sondages ont été réalisés en 2001 par Fugro [1005], ils comprenaient 2 sondages carottés, 6 sondages tarière et 4 CPT.

Parmi les campagnes récentes de 2016-2017, une s'est concentrée sur les masques étanches réalisés depuis 1998 [G801] ; le secteur de Sénebier en faisait partie et 2 sondages carottés inclinés courts ont été réalisés.
Une autre campagne [G1014], de CPT systématiques, comprenait ce secteur ; lors de cette dernière 4 CPT ont été réalisés au niveau de la digue d'Albaron.

2.10. PRG EN AVAL DE SENEBIER

Un profil électromagnétique a été produit sur l'extrémité aval (PRG 330 à 336) lors de la campagne de 1994 de Fondasol [G1001].
Seul 1 sondage ponctuel été réalisé dans le cadre de la campagne de 1995, menée par Fondasol [G1002], il se situe au PRG 324.

Une des campagnes récentes de 2016-2017, de CPT systématiques [G1014], comprenait ce secteur ; lors de cette dernière 18 CPT ont été réalisés afin d'avoir une connaissance régulière des digues et de leurs fondations.

3. ANALYSE ET RESULTATS

3.1. METHODE D'ANALYSE

Afin de représenter une coupe homogènes à partir des différents types de sondages : CPT et carottés principalement, des classes ont été créées. Pour les CPT, elles sont issues des abaques de Robertson et pour les sondages carottés elles proviennent des analyses du géologue/géotechnicien ayant analysé la carotte ; une classe a été attribuée tous les 25 cm de sondage.

La légende retenue pour cette analyse est la suivante :

Tableau 1. Code couleur utilisé pour l'analyse

Couleur	Description Robertson (CPT)		Carottage
	Sols organiques et tourbes Argiles à argiles vasardes	1/2/3	Tourbe/Argile Vasarde
	Argile à Argile silteuse Argiles silteuses à Silts argileux Silts argileux à Argile silteuse Silts argileux à Silts sableux	3/4/5	Argile à Limons Argileux Sable Argileux
	Sables silteux à Silts sableux Sables silteux Sables silteux +/- cimentés	5/6/8	Limons sableux à Sables limoneux
	Sables propres à sables silteux	6	Sable propre
	Sables à sables graveleux	7	Grave
	Sols fins intermédiaires compacts à raides Sols fins intermédiaires compacts à raides Sols fins intermédiaires compacts très raides Sols cimentés ou dilatants	4/5/8/9	Remblai
	Maçonnerie ou roche (arrêt)		Maçonnerie ou roche

Pour chacune des classes, une analyse des différentes caractéristiques des matériaux a été menée. Elle concerne l'indice de plasticité (IP), la valeur au bleu de méthylène (VBS), le passant à 2 et 80 µm (%2µ et %80µ), la perméabilité (K), la cohésion (C), l'angle de frottement interne (φ), la contrainte (τ_c) et/ou l'indice d'érosion (I_e).
Les différentes campagnes ayant été menées indépendamment, toutes ces caractéristiques ne sont pas disponibles pour chaque campagne.

3.2. CORRELATION DES ANALYSES CAROTTES/CPT

Cette corrélation a été réalisée avec les données disponibles lors de la réalisation de l'étude de dangers rive gauche, en 2016.

<u>Données sources</u>

18 sondages carottés ont été réalisés à proximité d'un CPT (distance inférieure à 50 m) ; puis l'interprétation du géologue sur les carottes a été comparée à l'analyse CPT automatique afin de valider ou infirmer la qualité des analyses CPT.

Ces sondages carottés sont issus de 4 campagnes :

- 2 par Ginger CEBTP en 2013 sur la digue de la Montagnette [G112],
- 3 par Ginger CEBTP en 2013 sur le projet de la Digue Sud d'Arles [G113],
- 11 par Ginger CEBTP en 2014 sur le projet de la digue Tarascon-Arles [G114],
- 2 par Hydrogéotechnique en 2014 sur le projet de la digue Tarascon-Arles [G111].

Analyse des CPT

Les analyses de Robertson ont permis de découper le sondage en classes d'épaisseurs variables repérées par la profondeur du toit et de la base de chaque classe. Cette première analyse a été effectuée par les entreprises chargées de réaliser les CPT.
Les cotes de toit et de base ont ensuite été calées en m NGF grâce à la cote des coordonnées des sondages et arrondies à 0,25 m pour être comparables avec les sondages carottés.
Suivant le tableau présenté au paragraphe 3.2, une couleur a été attribuée pour chaque tranche de 0,25m.

Analyse des carottés

A l'ouverture des carottes, le géologue de l'entreprise ayant réalisé le sondage a procédé à une description des sols en notant les profondeurs associées.
Les cotes des profondeurs ont été calées en m NGF grâce à la cote des coordonnées de sondage et arrondies à 0,25m pour être comparable avec les CPT.
Suivant le tableau présenté au paragraphe 2.2, une couleur a été attribuée pour chaque tranche de 0,25 m.

Etude de la corrélation – Méthode

Pour toutes les tranches de 25 cm où il y avait à la fois le CPT et le carotté, les couleurs utilisées dans le Tableau 1 ont été affectées d'un numéro suivant le tableau suivant :

Tableau 2. Valeurs associées pour la comparaison entre les carottés et les CPT

Couleur attribuée	Valeur associée
	1
	2
	3
	4
	5
	6
	7

La différence entre la valeur associée au sondage carotté et au CPT a été calculée pour chaque tranche. Au total ce sont 1045 tranches de 25 cm qui ont été comparées de cette manière.

Une loi linéaire a été utilisée pour quantifier la corrélation entre les deux interprétations : une différence nulle représente une correspondance de 100%, une différence de +/- 1 représente une correspondance de 75%, une différence de +/- 2 représente une correspondance de 50%, une différence de +/- 3 représente une correspondance de 25% et une différence de +/- 4, 5 ou 6 représente une correspondance nulle. Le principe de l'analyse est illustré dans la figure ci-après.

Carotte	CPT	Différence	Corrélation
6	6	0	100%
6	6	0	100%
6	6	0	100%
6	6	0	100%
6	6	0	100%
3	3	0	100%
3	2	1	75%
3	2	1	75%
3	2	1	75%
3	2	1	75%
3	2	1	75%
3	2	1	75%
3	2	1	75%
3	2	1	75%
3	2	1	75%
3	2	1	75%
3	2	1	75%
3	3	0	100%
3	3	0	100%
3	3	0	100%
3	3	0	100%
3	3	0	100%
4	3	1	75%
4	4	0	100%
4	4	0	100%
4	4	0	100%
4	4	0	100%
4	4	0	100%
		Moyenne :	90%

Carotte	CPT	Différence	Corrélation
6	6	0	100%
3	6	-3	25%
3	6	-3	25%
3	6	-3	25%
2	3	-1	75%
2	2	0	100%
2	2	0	100%
2	3	-1	75%
2	3	-1	75%
3	3	0	100%
3	2	1	75%
2	2	0	100%
2	3	-1	75%
2	2	0	100%
2	2	0	100%
2	2	0	100%
3	2	1	75%
3	2	1	75%
3	2	1	75%
3	2	1	75%
4	3	1	75%
4	5	-1	75%
4	5	-1	75%
4	5	-1	75%
4	5	-1	75%
4	5	-1	75%
5	5	0	100%
5	4	1	75%
		Moyenne :	78%

Figure 1. Exemples : sondage carotté et CPT au RG 270,55 (gauche) et au RG 271,1 (droite)

Etude de la corrélation – Analyse

Le nombre de tranches ayant un écart de 0, 1, 2, 3, 4, 5 et 6 ont été comptabilisées et les résultats sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3. Résultats de la corrélation

nb identiques	nb écart 1	nb écart 2	nb écart 3	nb écart 4 ou +
490	335	145	62	13

Sur plus de 1000 tranches étudiées, quasiment la moitié ont une corrélation de 100% (47% des tranches comparées). En moyenne la différence (en valeur absolue) est inférieure à 1 et on obtient une corrélation moyenne de 79%.
Le premier mètre de sol est souvent différent entre les deux sondages car, même s'ils sont au même PR, ils ne sont pas nécessairement sur la même partie de la digue (côté talus ou milieu de crête) et une couche de remblai peut exister sur une des deux interprétations (sur le sondage ayant la cote de toit la plus basse). L'écart engendré est néanmoins faible (corrélation moyenne de 83% si on ne considère pas les couches de remblai), ceci est dû à la profondeur moyenne des comparaisons qui est de 15 m.

Afin de dégager d'autres corrélation, une modification des valeurs affectées aux type de couche a été effectuée afin de regrouper dans un premier temps les limons (vert clair) et les argiles (bleu clair) et dans un second temps les limons et les sables (jaune).

Le taux de correspondance est alors légèrement meilleur, en assemblant les argiles et les limons (83% et 88% sans considérer le remblai) ou en assemblant les sables et les limons (83% et 86% sans considérer le remblai).

Tableau 4. Valeurs associées pour comparer Carottés et CPT, avec regroupement

Couleur attribuée	Regroupement argiles-limons	Regroupement limons-sables
	Valeur associée	Valeur associée
	1	1
	2	2
	2	3
	3	3
	4	4
	5	5
	6	6

La même analyse a été réalisée en diminuant la distance maximale entre CPT et carotté à 5 m ; il y a alors 3 fois moins de couples comparables mais on peut voir une augmentation du taux de correspondance de 4 à 5 % :

Tableau 5. Résultats de la corrélation suivant distance en CPT et Carottés

		Pas de fusion		Argiles + Limons		Limons + Sables	
Distance	**Nombre de couples**	**Corresp. globale**	**Corresp. sans remblai**	**Corresp. globale**	**Corresp. sans remblai**	**Corresp. globale**	**Corresp. sans remblai**
50m	18	79 %	83 %	83 %	88 %	83 %	86 %
5m	6	84 %	87 %	87 %	92 %	87 %	90 %

Etude de la corrélation - Conclusion

La corrélation entre les deux modes d'analyse est bonne sans être parfaite. Plus les CPT utilisés sont proches des sondages carottés meilleure est la correspondance, ce qui tend à valider le principe d'utilisation des CPT pour établir un modèle géotechnique de la digue et de sa fondation.
Le CPT est idéal pour avoir une vision globale du profil géotechnique ; pour les zones litigieuses des carottés sont nécessaires afin d'affiner la connaissance du sol car ils permettent de réaliser des essais menant aux paramètres géotechniques du sol.

3.3. REPARTITION DES VALEURS CLES

Comme pour la corrélation, les données issues des sondages en rive gauche ont été utilisées, mais celles des sondages réalisés en Camargue Insulaire ont également été intégrées.

Les essais effectués lors des campagnes ont permis de mesurer l'indice de plasticité (IP), la valeur au bleu de méthylène (VBS), le passant à 2 et 80 µm (%2µ et %80µ), la perméabilité (K), la cohésion (C), l'angle de frottement interne (φ), la contrainte (τc) et/ou l'indice d'érosion (Ie).
Pour chaque type de sol, la répartition de ces valeurs a été analysée.

Valeurs disponibles

Le tableau ci-dessous répertorie pour les différents types de sol et les différentes caractéristiques le nombre de valeurs exploitées (Nb), les valeurs extrêmes mesurées (Min et Max), les valeurs moyennes (Moy) ainsi que l'écart type (E.T.).
Au vue des analyses réalisées, il apparait que limon et argile ont des caractéristiques très proches, ils ont donc été assemblés sous le nom argile+limon, ce qui fait un matériau supplémentaire pour l'analyse.
Le seul écart notoire est sur la perméabilité, d'après les données étudiées, le limon est moins perméable que l'argile ce qui est contraire à ce qui est couramment admis. Des mesures de perméabilités sur des couches de limons et d'argiles lors des campagnes géotechniques à venir permettront de confirmer, ou au contraire infirmer (ce qui est probable), cette analyse.

Les probabilités de non dépassement à 5% (5%) et 95% (95%) ont été calculées à partir d'une loi de Gumbel, calée graphiquement sur les fréquences de non-dépassement de Hazen. (Sauf pour le passant à 80 µm où une loi exponentielle représentait mieux la probabilité de non dépassement, cf. §2.2.3.5)

L'indice de plasticité (IP) et la valeur au bleu (VBS) sont sans unité ; les passants à 2 et 80 µm sont en % de la masse totale ; la perméabilité (K) est en m/s ; la cohésion (C) est en kPa ; l'angle de frottement (φ) est en degrés ; la contrainte critique (τc) est en Pa et l'indice d'érosion (Ie) est sans unité.
Chaque échantillon de données a été affecté d'une couleur en fonction de la possibilité d'exploitation statistique dépendant elle-même du nombre de données disponibles (Nb).

- Nb ≤ 10 ; surligné en rouge : données non exploitable statistiquement, aucune loi de probabilité n'a été calée,
- 11 < Nb ≤ 19 ; surligné en jaune : données exploitables mais peu fiables, une loi de probabilité a été calée mais reste indicative ; les probabilités de non dépassement sont notées en italique,
- Nb > 20 ; surligné en vert : données exploitables de façon correcte pour une analyse.

** : L'analyse est menée sur log (K) et non K car c'est sur ce paramètre qu'a pu être calée la loi de non dépassement.*
*** : Certaines de ces données brutes ont été supprimées car jugées erronées, soit par la mesure soit par l'attribution au matériau. Cette valeur est notée entre parenthèse et la suite de l'analyse n'en tient pas compte.*

Tableau 6. Synthèse des valeurs mesurées pour chaque type de sol

Tourbe	**Nb***	**Min**	**Max**	**Moy**	**E.T.**	**5%**	**95%**
IP	8	12	122	37,6	36,0		
VBS	7	0,07	8	3,8	3,2		
%80µ	12	1,7	98,3	70,9	30,5	98,3	0,14
%2µ	10	4,5	38	24,6	10,9		
Log K*	0						
C	0						
φ	0						

Argile	**Nb***	**Min**	**Max**	**Moy**	**E.T.**	**5%**	**95%**
IP	85	3,4	23	12,82	4,39	21,88	5,61
VBS	97	0,5	4,8	2,03	0,83	3,58	0,73
%80µ	125	31,3	100	88,77	14,04	89,70	49,03
%2µ	108	3,9	50	22,68	8,59	37,79	9,32
Log K*	41	-8,10	-5	-6,48	0,76	-5,22	-7,66
C	20	0	27	13,70	8,86	26,79	-1,68
φ	20	21	37	27,10	4,75	34,40	20,16

Limon	Nb*	Min	Max	Moy	E.T.	5%	95%
IP	57	5	17	10,15	2,82	15,13	5,37
VBS	86	0,2	2,96	1,62	0,64	2,78	0,34
%80µ	105	14	99,9	80,90	19,12	89,70	49,03
%2µ	78	2	39,3	19,16	8,42	33,79	5,32
Log K*	26** (27)	-9** (-12)	-4,82	-6,54	1,1	-4,53	-8,60
C	23	0	27	11,96	8,67	22,82	-1,58
φ	23	20	36	28,52	4,29	34,40	20,16

Sable	Nb*	Min	Max	Moy	E.T.	5%	95%
IP	8	6,8	13	9,68	2,14		
VBS	61	0,01	1,9	0,33	0,43	0,80	0
%80µ	65	1,7	96,3	25,85	29,33	21,35	1,01
%2µ	37	0,5	23,7	7,67	7,20	12,90	0
Log K*	24	-7,22	-2,15	-5,26	1,37	-3,72	-6,98
C	8	0	12	2,75	4,86		
φ	8	26	40	34,50	4,78		

Grave	Nb*	Min	Max	Moy	E.T.	5%	95%
IP	0						
VBS	8	0,03	0,79	0,28	0,27		
%80µ	9	2,3	34,1	10,97	9,75		
%2µ	5	0,5	6	2,05	2,32		
Log K*	5	-5,82	-3,76	-4,61	0,82		
C	0						
φ	0						

Remblai	Nb*	Min	Max	Moy	E.T.	5%	95%
IP	5	12	32	19,40	8,14		
VBS	7	0,22	1,99	1,34	0,63		
%80µ	8	12,4	87,7	53,95	22,12		
%2µ	5	13	23	18,60	4,04		

Log K*	1	-5,62	-5,62	-5,62			
C	0						
φ	0						

Argile + Limon	**Nb***	**Min**	**Max**	**Moy**	**E.T.**	**5%**	**95%**
IP	142	3,4	23	11,75	4,05	15,93	5,76
VBS	183	0,20	4,80	1,84	0,77	2,83	0,39
%80µ	230	14	100	85,18	16,97	98,97	40,09
%2µ	186	2	50	21,20	8,67	37,76	5,22
Log K*	68	-12,00	-4,82	-6,59	1,12	-5,12	-8,38
C	43	0	27,00	12,77	8,70	23,32	0
φ	43	20	37	27,86	4,51	34,60	20,36

Représentation graphique

Pour chaque combinaison de type de sol / paramètre, un graphique représentant la densité de répartition, la fréquence de Hazen et la loi de Gumbel, ou exponentielle, (de probabilité de non-dépassement calée sur la fréquence de Hazen) a été tracé lorsque le nombre de données était suffisant. La légende ci-après est valable pour l'ensemble de ces graphiques :

Figure 2. Légende des graphiques du chapitre 3.3

Toutes les valeurs sont entre 0 et 100% mais pour améliorer la lisibilité, deux échelles sont utilisées : l'échelle de non dépassement est à gauche ; l'échelle de densité de répartition est à droite.

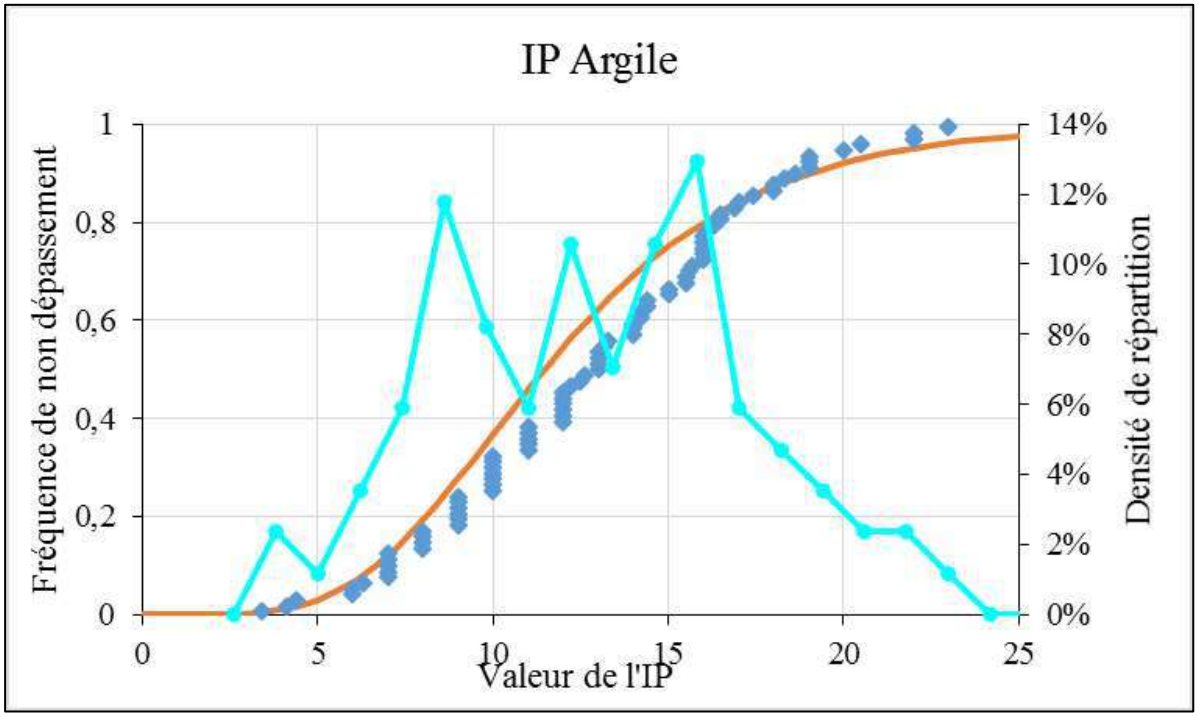
Pour chaque type de sol et chaque paramètre, la plage de valeurs a été divisée en 20 classes. Par exemple pour l'IP du limon une classe de répartition représente une fourchette de 0.7 de large ; sur le graphique on peut voir que les points sont plus resserrés que pour l'argile où une classe de répartition fait 1,2 de large, l'écart entre les valeurs extrêmes étant plus important.

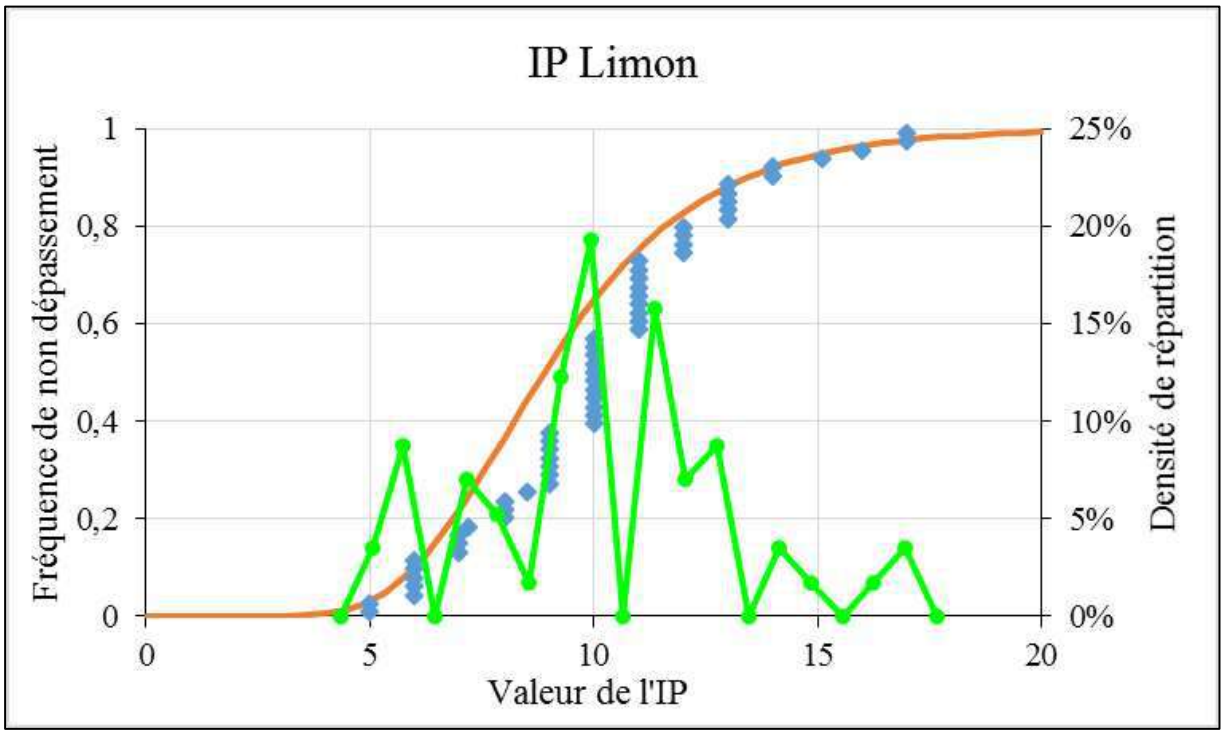
Tableau 7. Largeur des classes de répartition

	Tourbe	Argile	Limon	Sable	Grave	Remblai	Argile+ Limon
IP		1,2	0,7				1,1
VBS		0,23	0,17	0,1			0,25
%80µm	5,5	3	4	5,5			5
%2µm	2,2	2,5	2,1	1,3			2,5
K		6,00E-07	8,00E-07	1,00E-04			8E-07
Log(K)		0,17	0,45	0,3			0,25
C		1,5	1,5				1,5
Phi		1	1				1

L'indice de plasticité : IP

Des mesures d'IP ont été réalisées sur une partie des sols argileux et des sols limoneux.
Pour les matériaux argileux, les IP mesurés sont compris entre 3 et 23 dont 50% entre 6 et 10.
Les matériaux limoneux ont un IP légèrement plus resserré : entre 5 et 17.





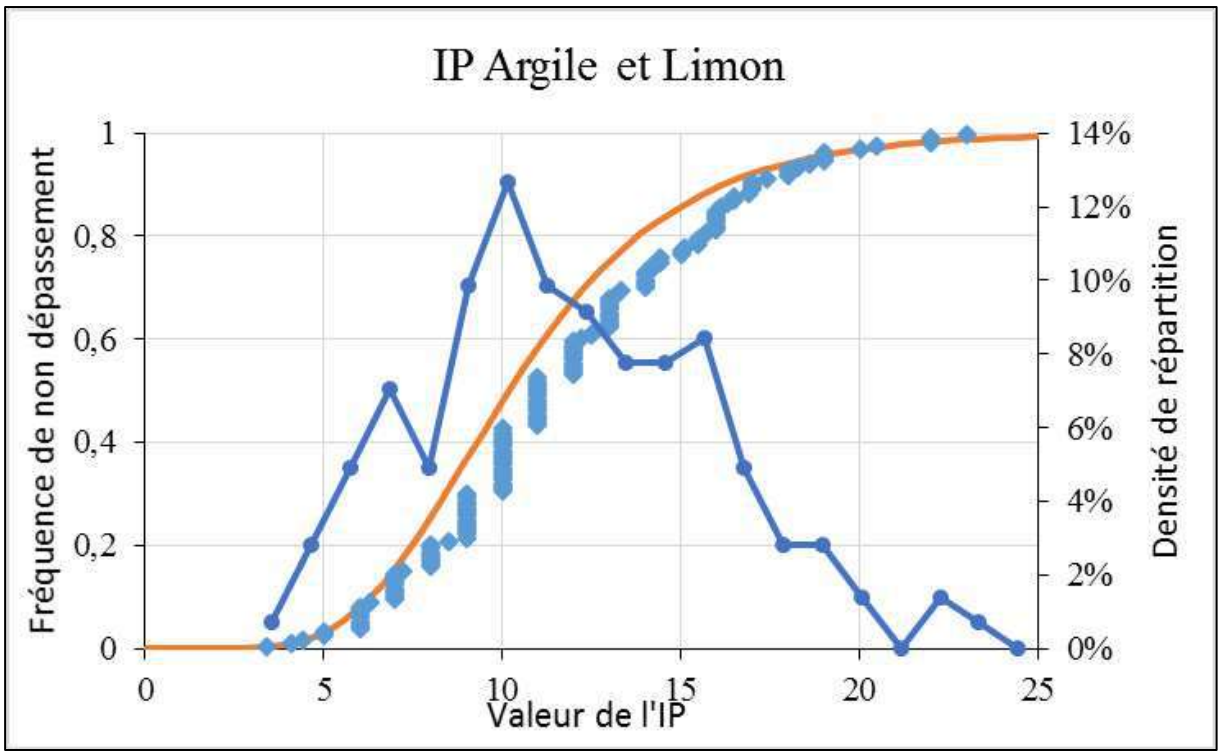


Figure 3. Indice de Plasticité – fréquence de non dépassement et densité de répartition par classe de sols

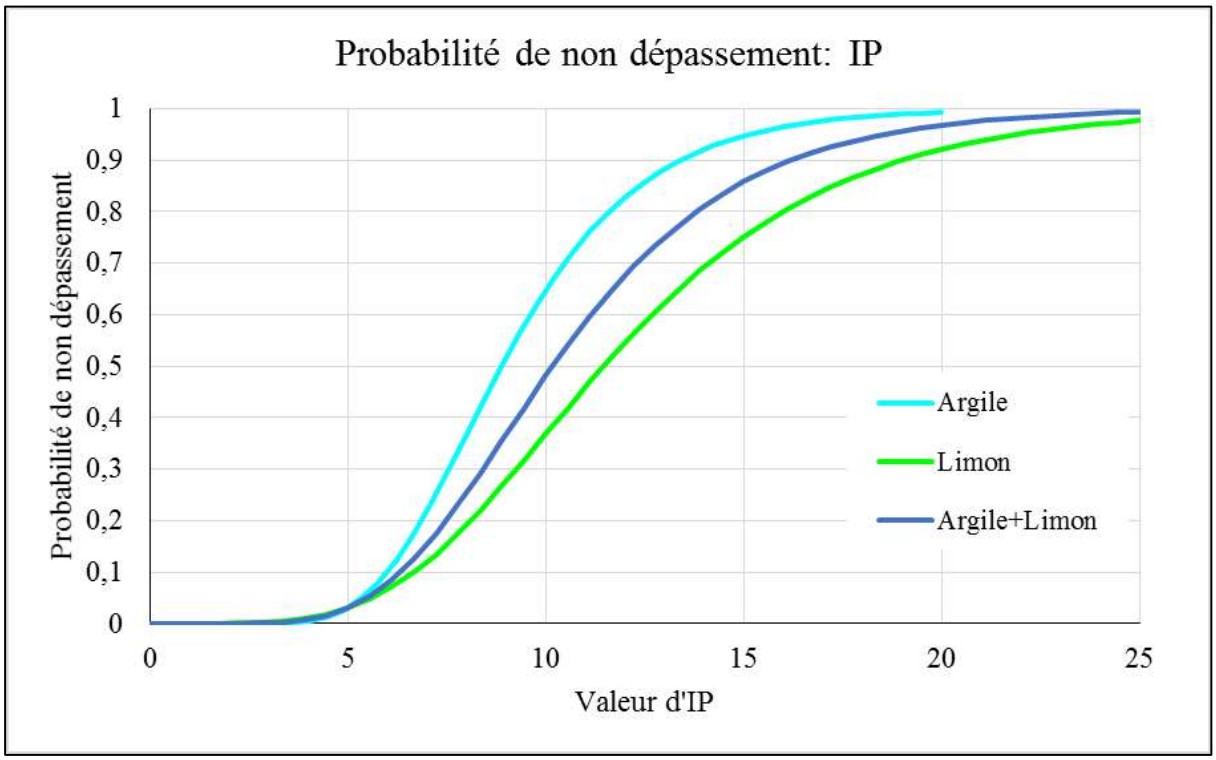
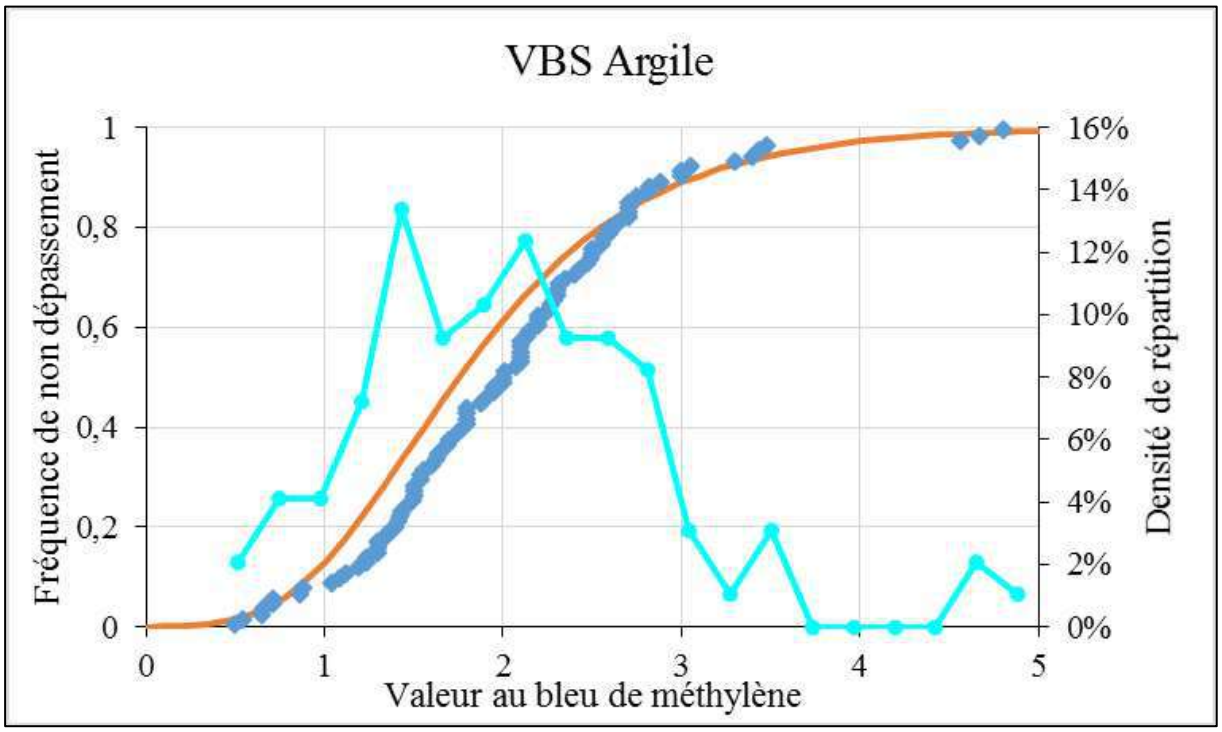


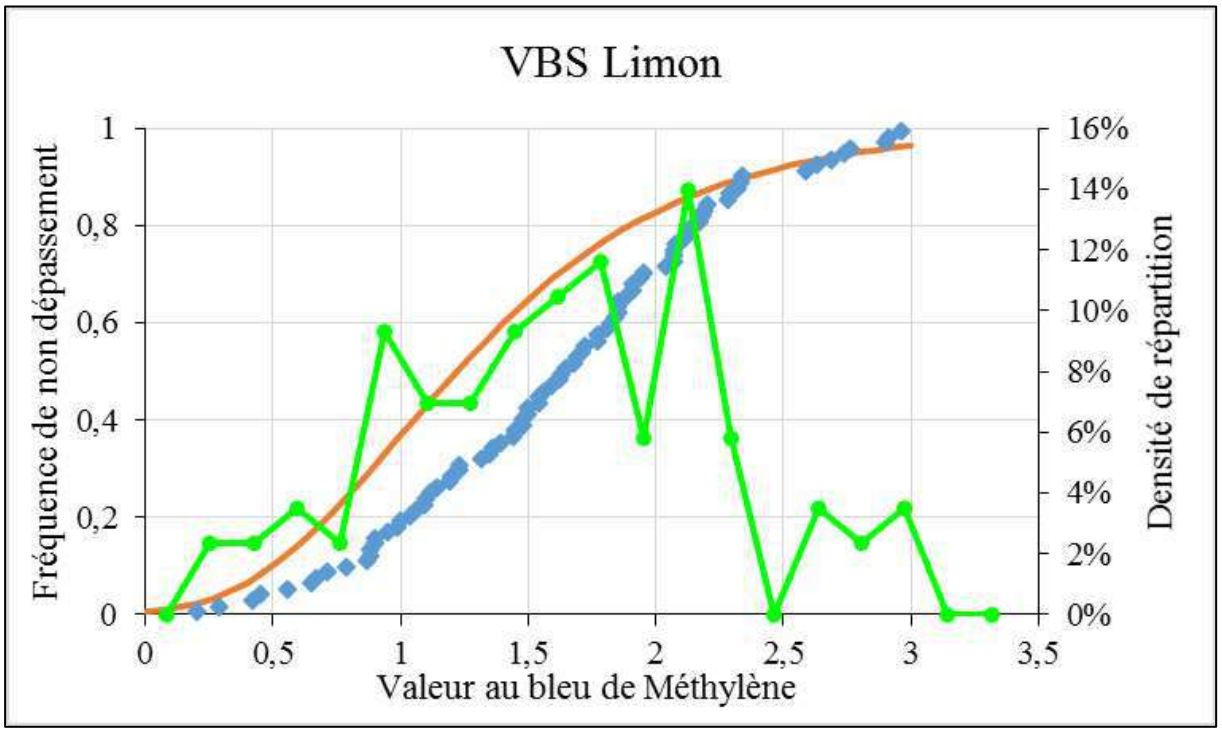
Figure 4. Indice de Plasticité – fréquence de non dépassement par classe de sols

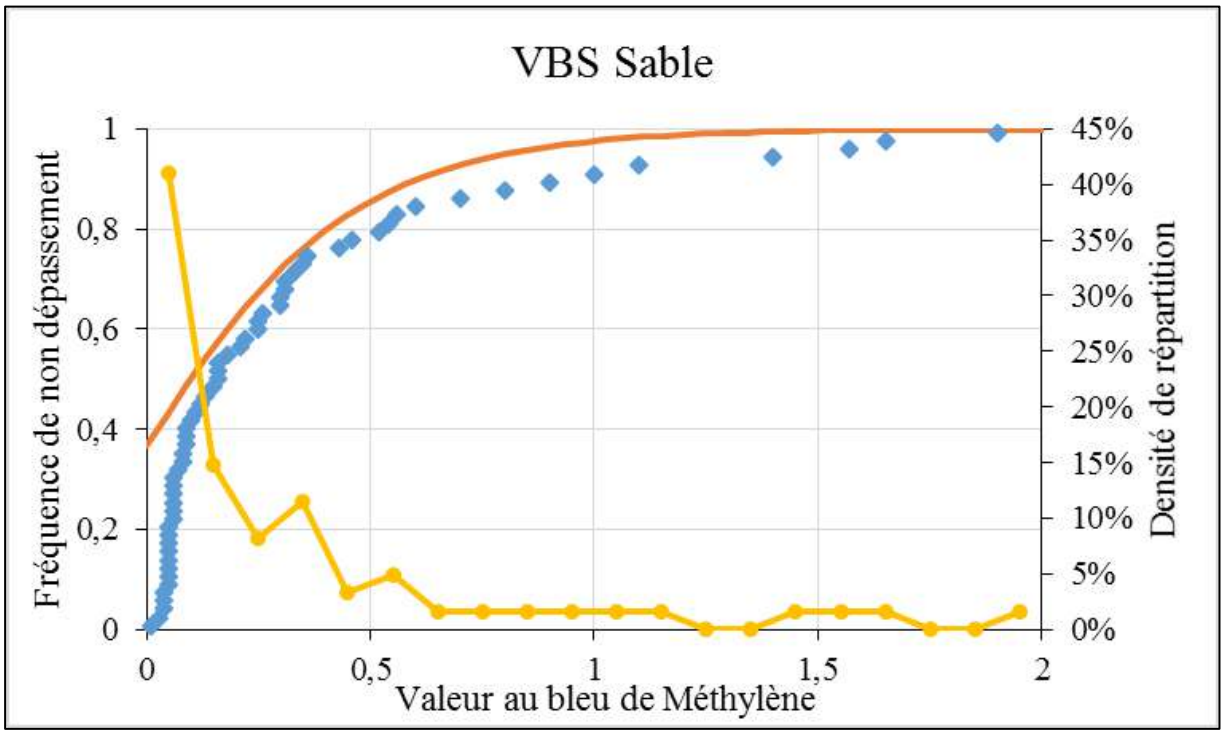
La valeur au bleu de méthyle : VBS

Les VBS réalisées sur la tourbe, la grave et le remblai sont trop rares pour avoir une analyse.

L'argile et le limon ont des comportements semblables : pas de valeur prépondérante mais une répartition entre 0 et 3 pour le limon, et entre 0.5 et 3.5 pour les argiles. Pour les sables, la VBS est bien plus faible avec 75% des valeurs inférieures à 0.35.


VBS Argile
Fréquence de non dépassement
Densité de répartition
Valeur au bleu de méthylène
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
0%
2%
4%
6%
8%
10%
12%
14%
16%
0
1
2
3
4
5


VBS Limon
Fréquence de non dépassement
Densité de répartition
Valeur au bleu de Méthylène
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
0%
2%
4%
6%
8%
10%
12%
14%
16%
0
0,5
1
1,5
2
2,5
3
3,5



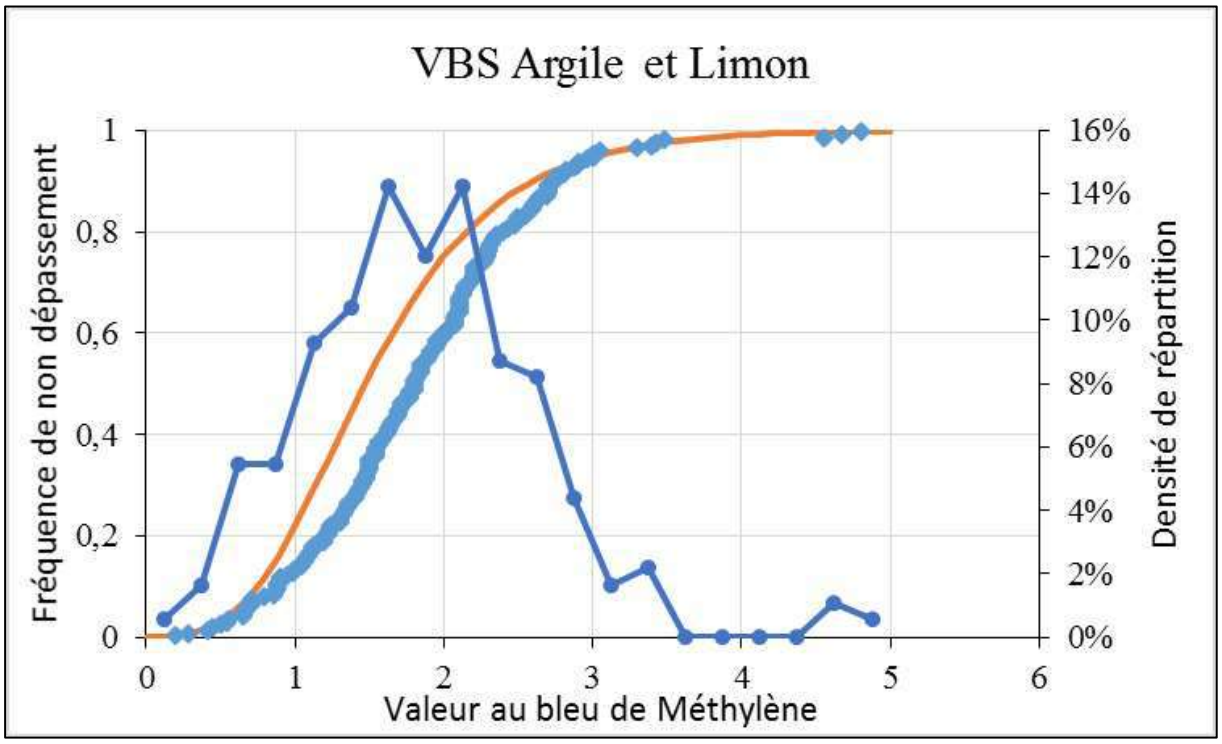


Figure 5. Valeur au bleu de méthylène – fréquence de non dépassement et densité de répartition par classe de sols

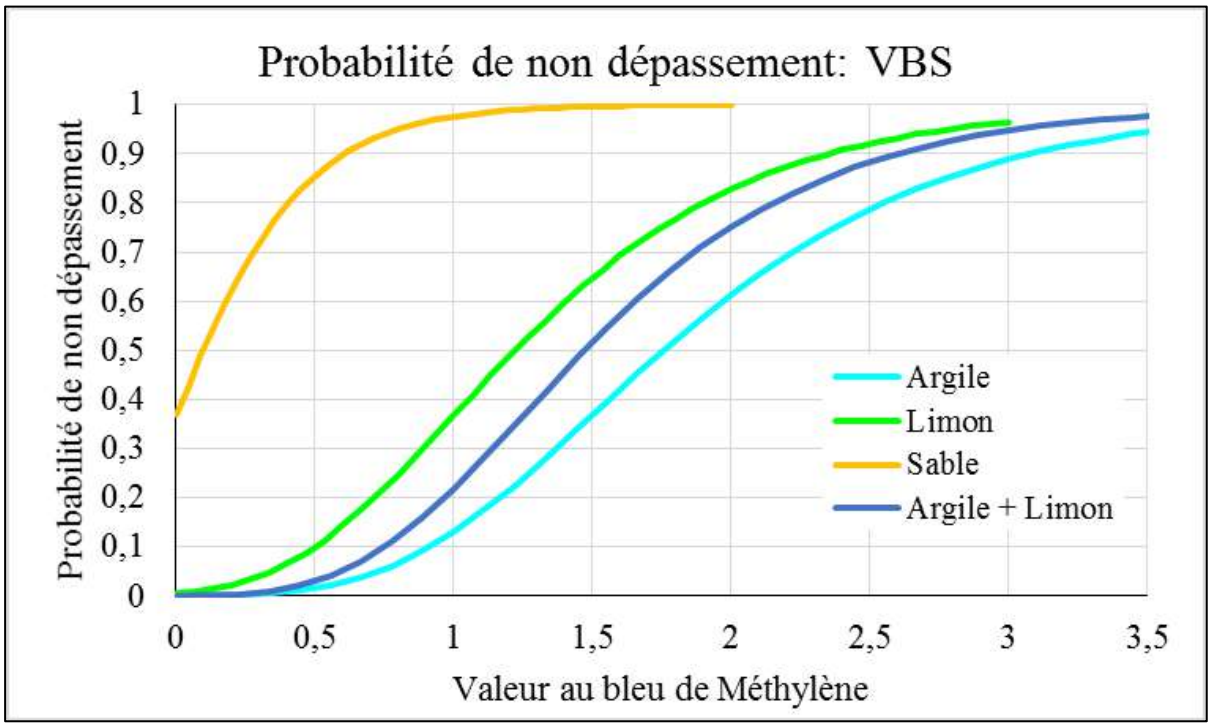
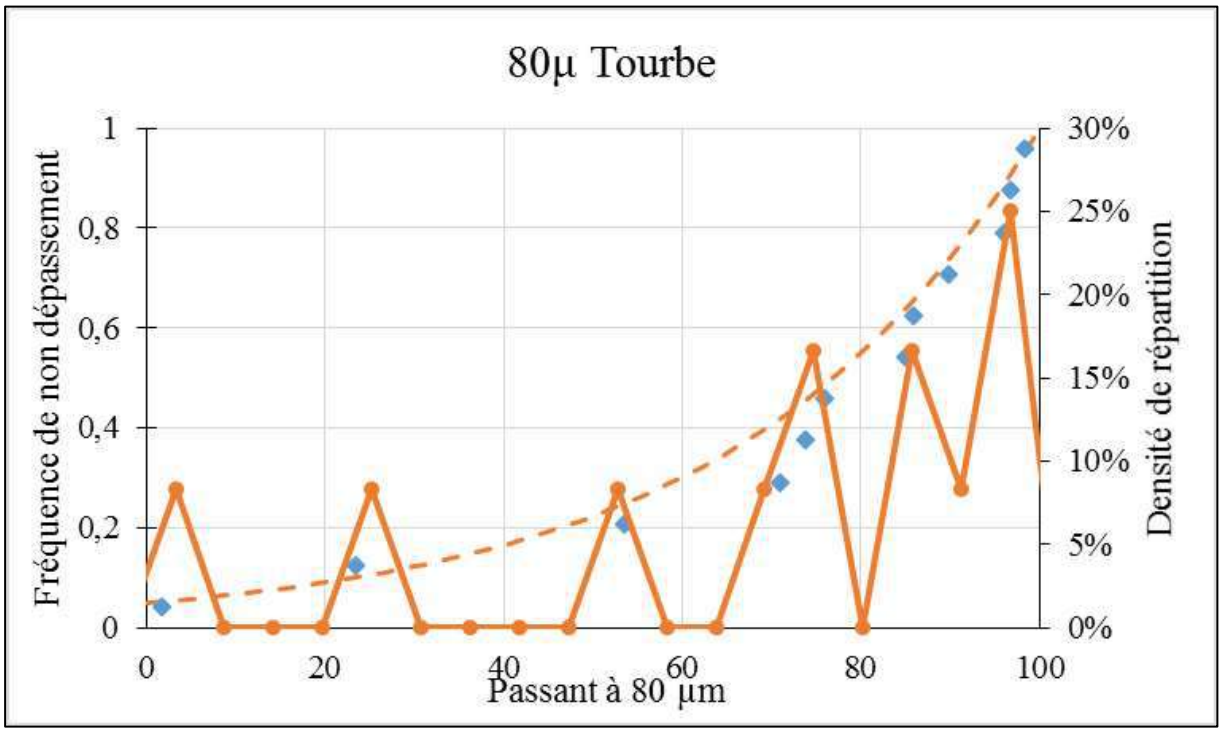


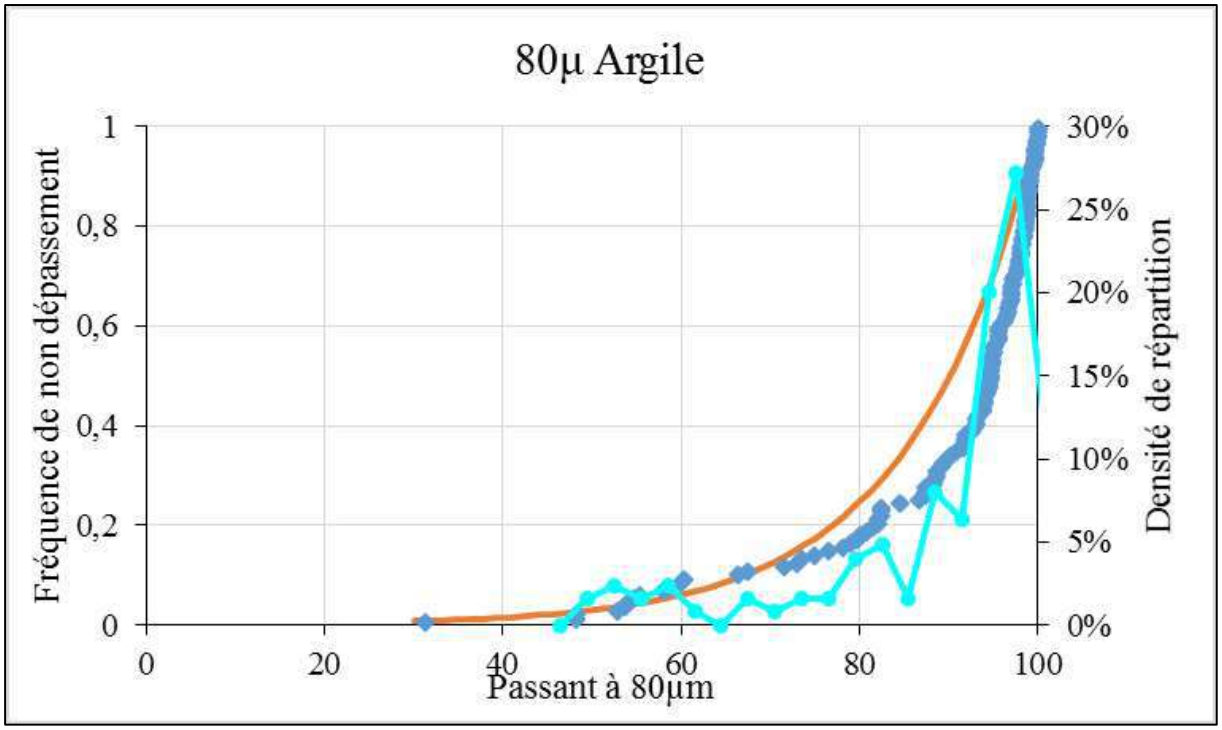
Figure 6. Valeur au bleu de méthylène – fréquence de non dépassement par classe de sols

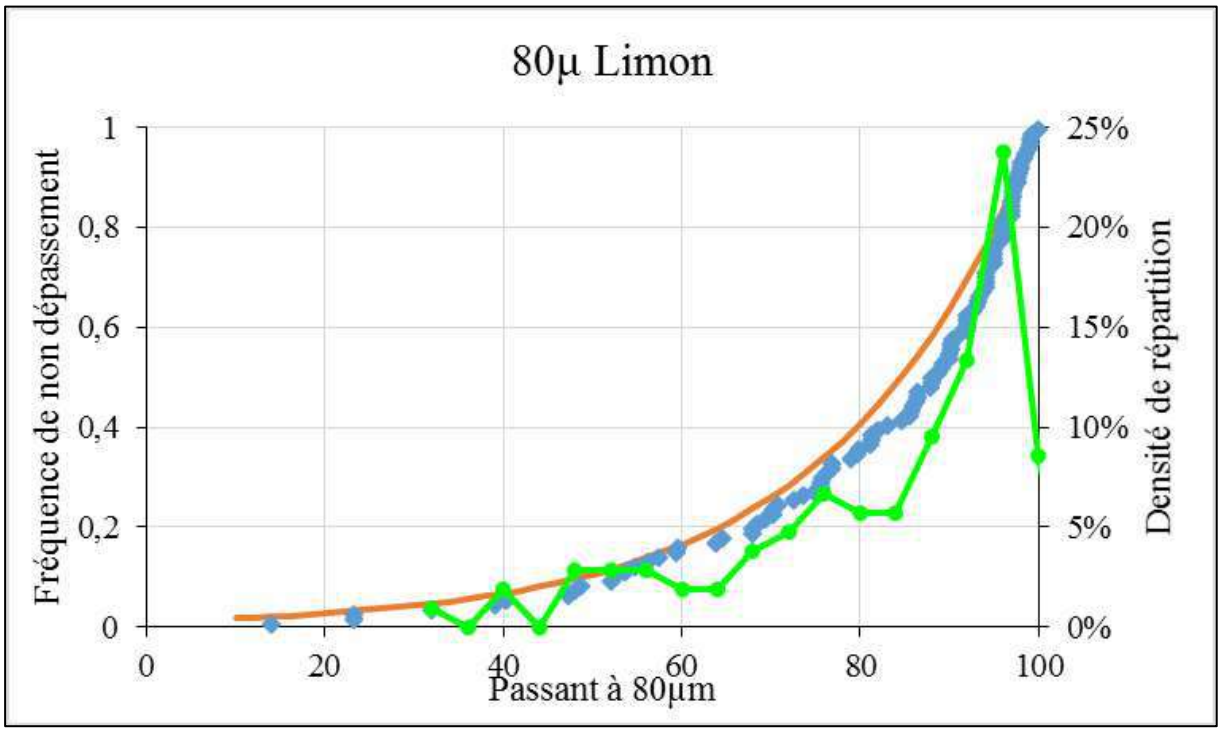
Le passant à 80 µm : %80µm

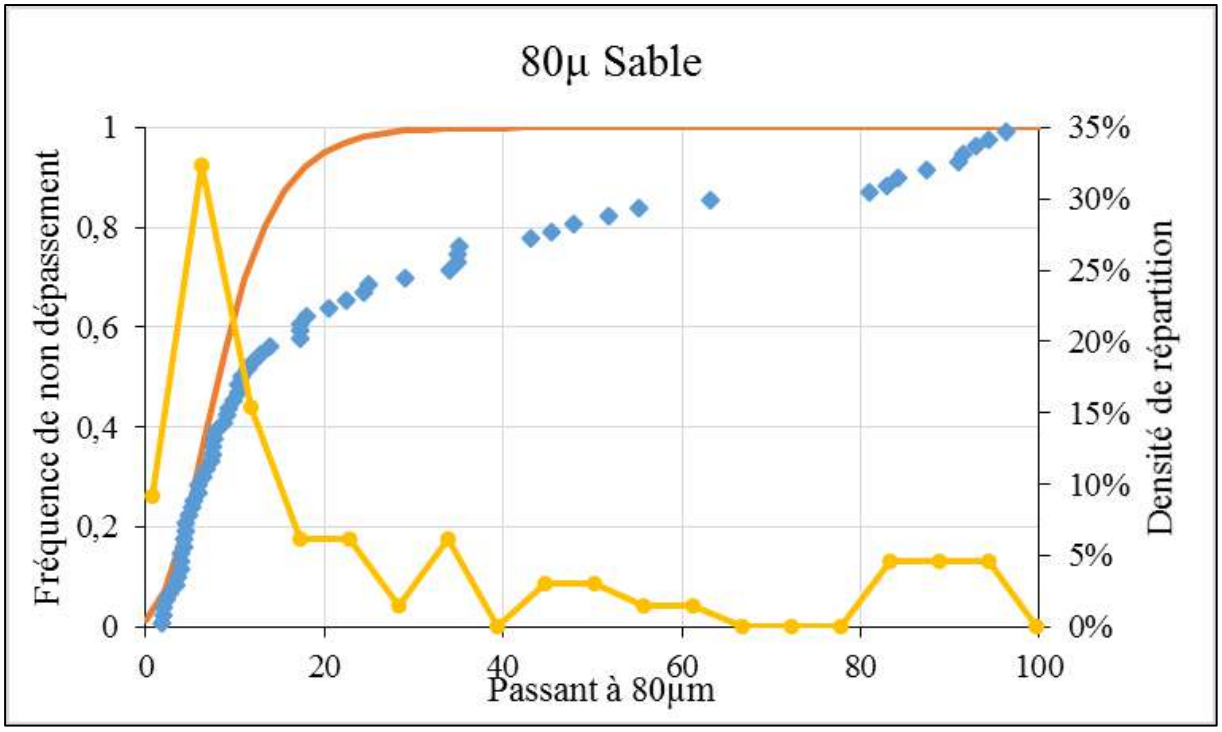
Les remarques concernant la grave et le remblai sont les mêmes que pour la VBS.
Argiles et limons et tourbe semblent suivre la même tendance : valeur maximale vers 100% et plus le passant est faible, plus la probabilité d'occurrence est faible. Au contraire le sable a un passant principal de 10% et la probabilité d'occurrence diminue quand le passant augmente.

Nous pouvons remarquer que la probabilité de non dépassement, pour la tourbe, l'argile et le limon ne suivent pas une loi de Gumbel, en particulier car on atteint le maximum (100%) ; une loi exponentielle a alors été utilisée ; c'est également cette dernière qui a permis de calculer les valeurs de non dépassement à 95 %.


80µ Tourbe
Fréquence de non dépassement
Densité de répartition
Passant à 80 µm
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
0%
5%
10%
15%
20%
25%
30%
0
20
40
60
80
100


80µ Argile
Fréquence de non dépassement
Densité de répartition
Passant à 80µm
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
0%
5%
10%
15%
20%
25%
30%
0
20
40
60
80
100


80µ Limon
Fréquence de non dépassement
Densité de répartition
Passant à 80µm
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
0%
5%
10%
15%
20%
25%
0
20
40
60
80
100


80µ Sable
Fréquence de non dépassement
Densité de répartition
Passant à 80µm
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
0%
5%
10%
15%
20%
25%
30%
35%
0
20
40
60
80
100

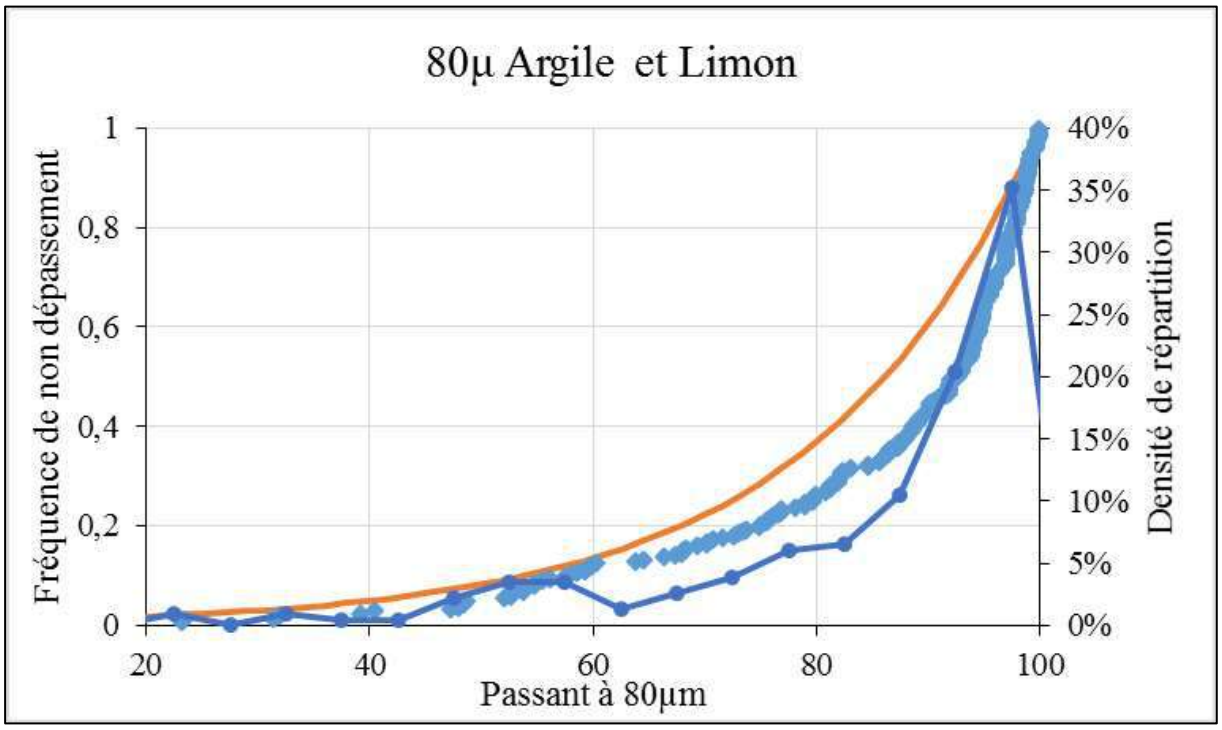


Figure 7. Passant à 80 µm – fréquence de non dépassement et densité de répartition par classe de sols

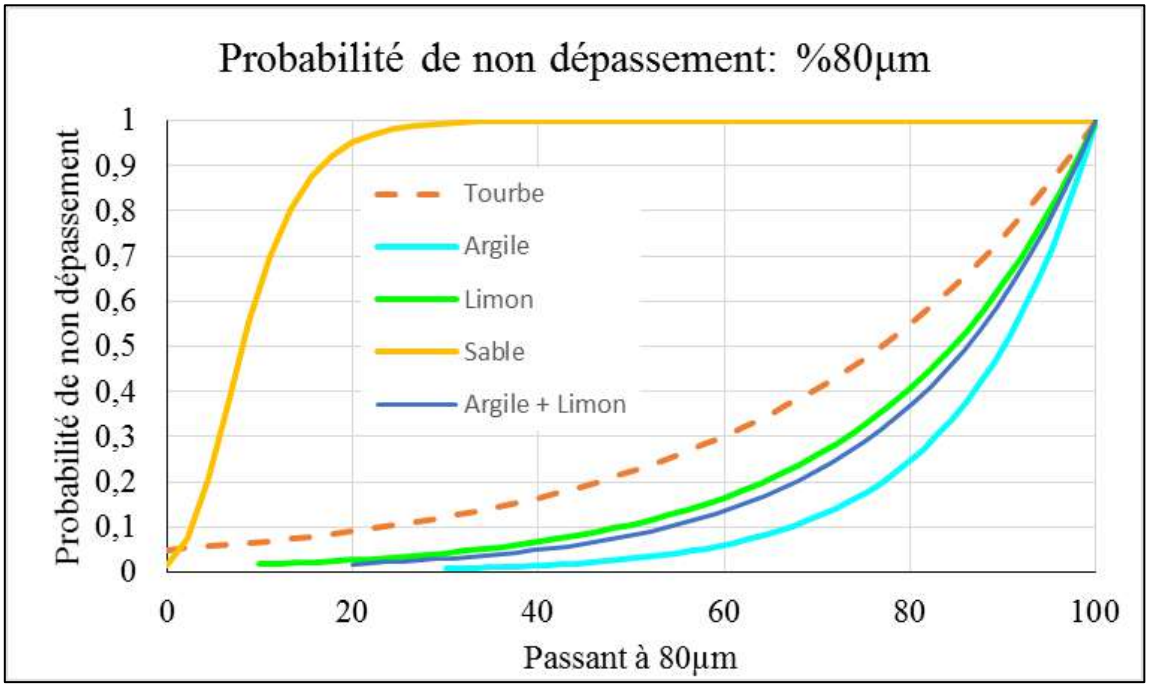
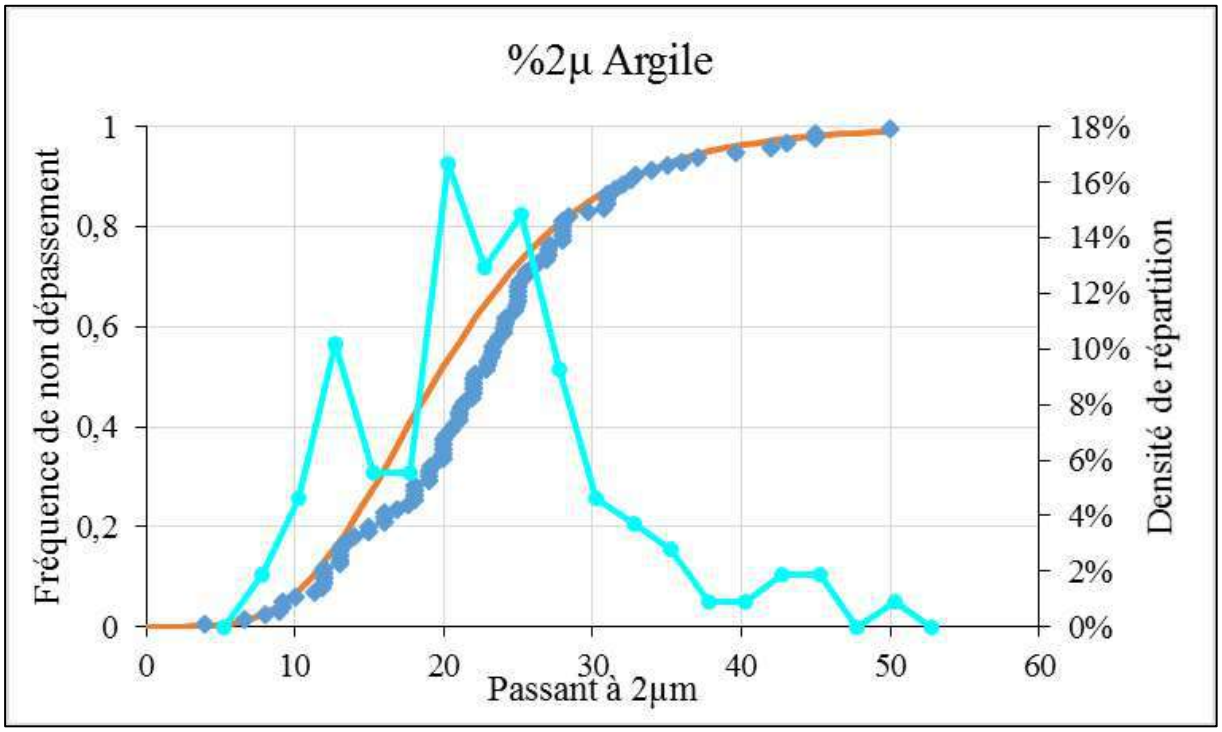


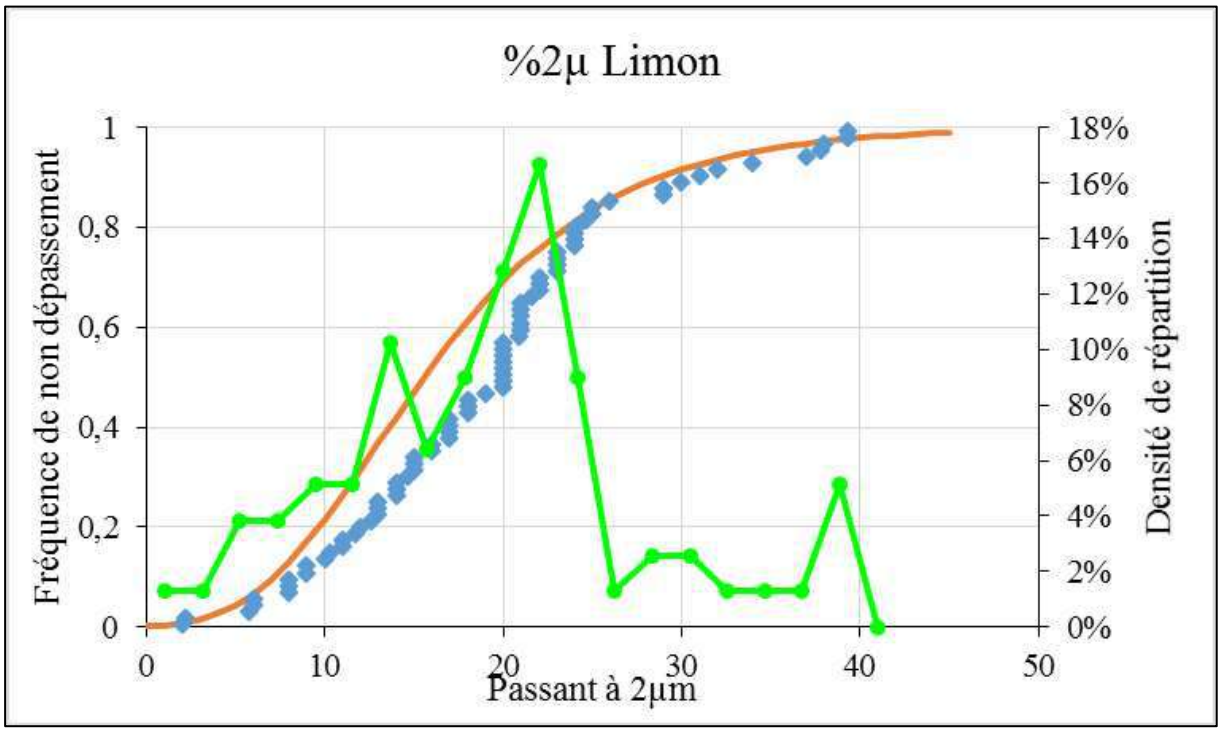
Figure 8. Passant à 80 µm – fréquence de non dépassement par classe de sols

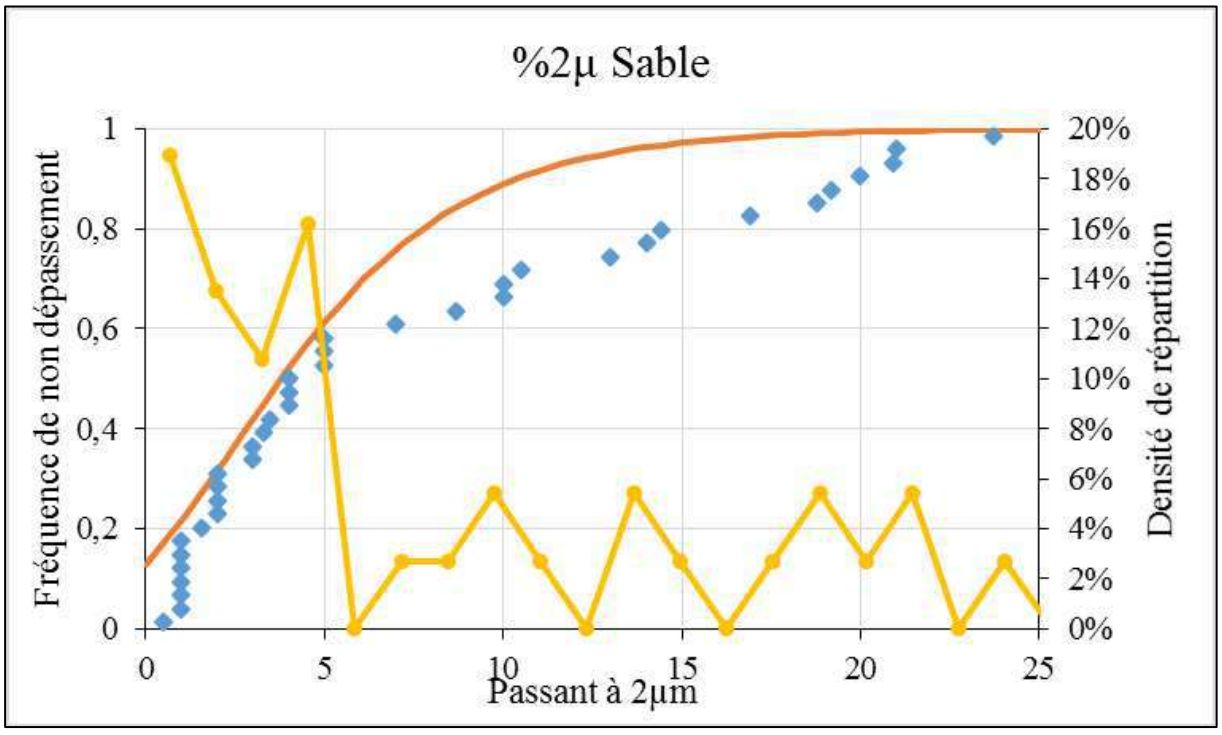
Le passant à 2µm : %2µm

Comme pour la plus part des paramètres, seuls les argiles, limons et sables ont suffisamment de données pour être exploitées.

Argiles et limons suivent exactement la même tendance : valeur maximale vers 45% et une répartition centrée autour de 20%. Au contraire le sable a des valeurs de passant à 2 µm très faibles : 60% sont inférieurs à 5 %.
Pour les graves et la tourbe, le nombre de données est trop faible pour analyser une tendance mais les valeurs sont du même ordre de grandeur que pour les sables pour les graves et que les argiles pour la tourbe.




%2µ Limon
Fréquence de non dépassement
Densité de répartition
Passant à 2µm
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
0%
2%
4%
6%
8%
10%
12%
14%
16%
18%
0
10
20
30
40
50


%2µ Sable
Fréquence de non dépassement
Densité de répartition
Passant à 2µm
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
0%
2%
4%
6%
8%
10%
12%
14%
16%
18%
20%
0
5
10
15
20
25

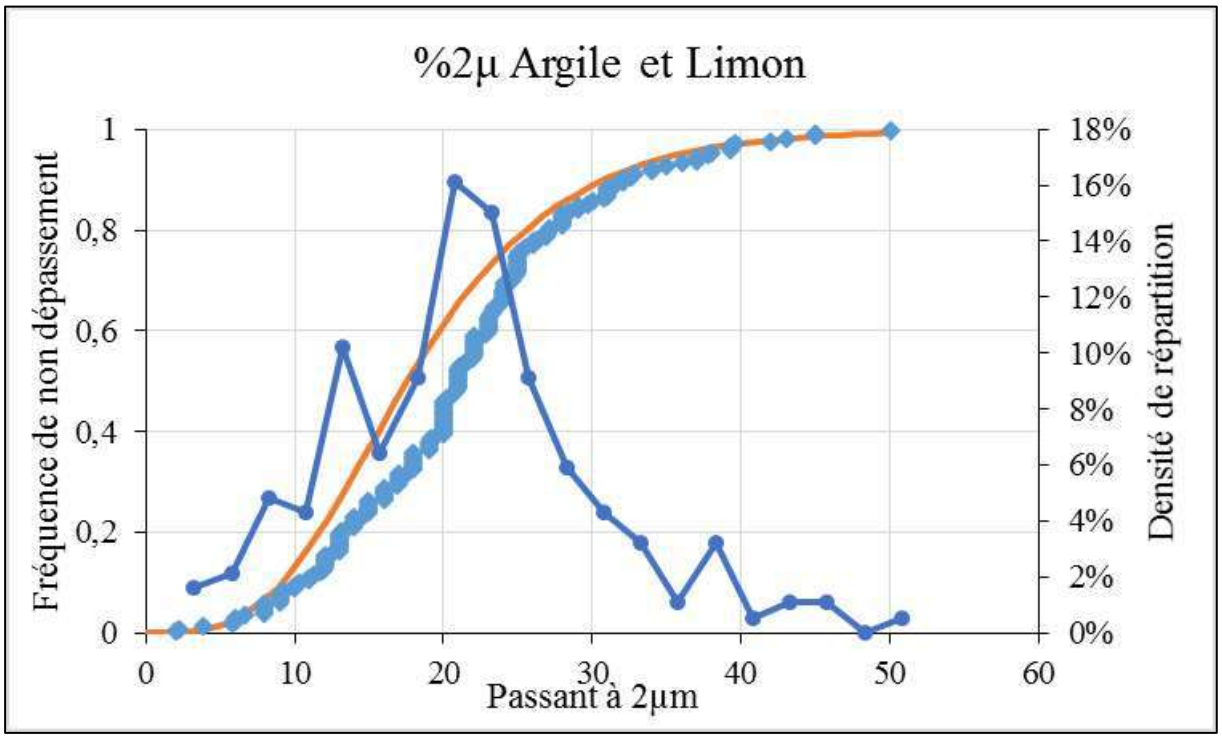


Figure 9. Passant à 2 µm – fréquence de non dépassement et densité de répartition par classe de sols

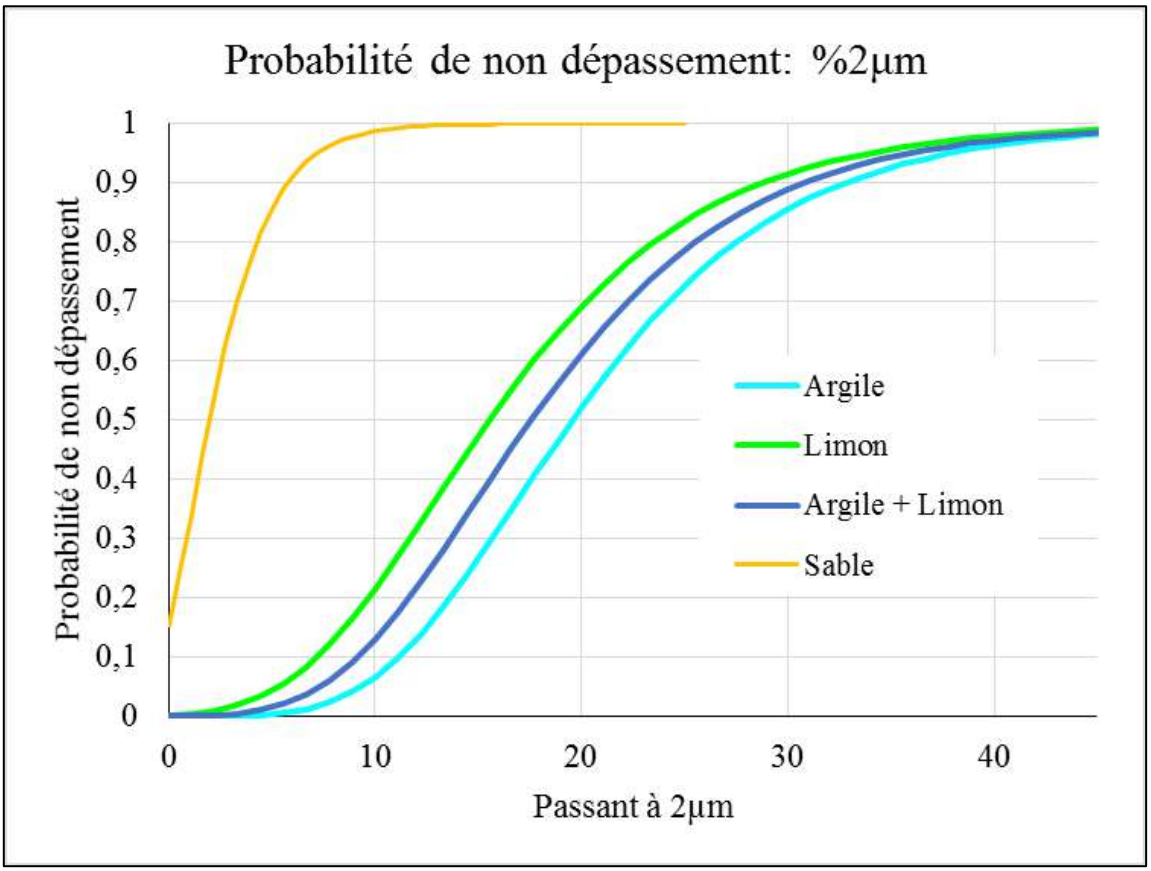


Figure 10. Passant à 2 µm – fréquence de non dépassement par classe de sols

La perméabilité : K

L'analyse de répartition des valeurs de perméabilité a été réalisée sur log(K), en effet le rapport entre les valeurs minimales et maximales étant de 10^8, toutes les valeurs ayant un rapport avec la valeur maximale supérieur à 100 se retrouvaient en 0.

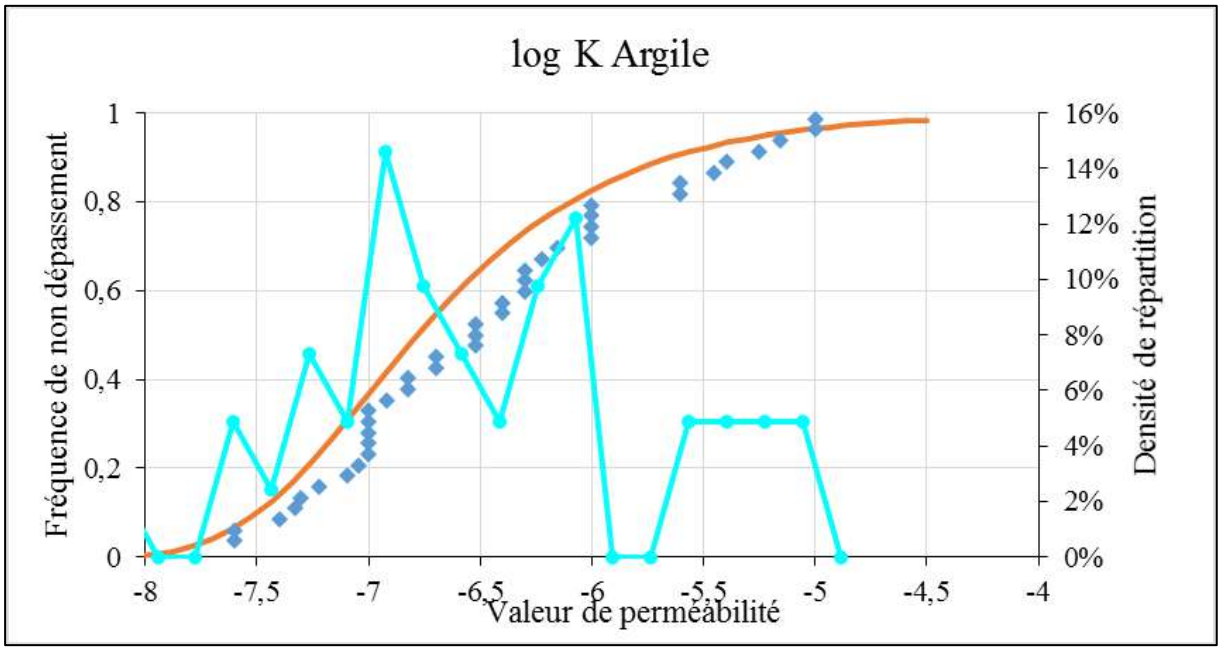
Il n'y a pas de données pour la tourbe et trop peu pour que le remblai ou les graves soient analysés.

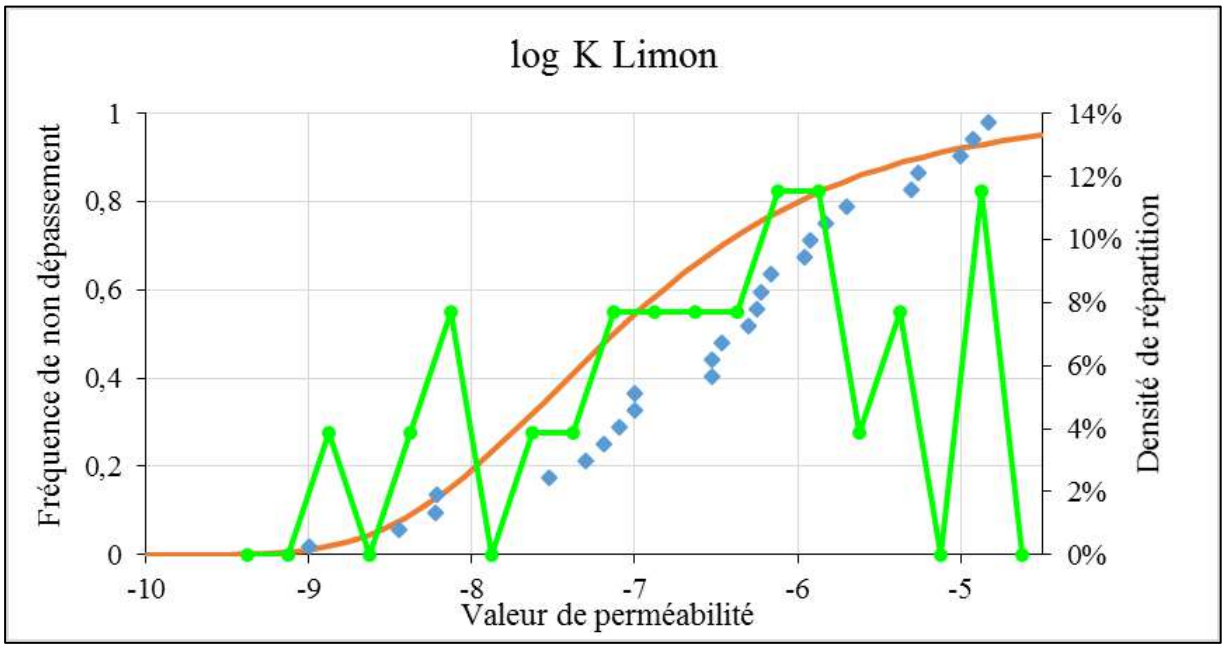
La perméabilité des sols sableux est comprise entre 10^{-7} m/s et 10^{-3} m/s avec des valeurs principalement centrées autour de 10^{-6} m/s.

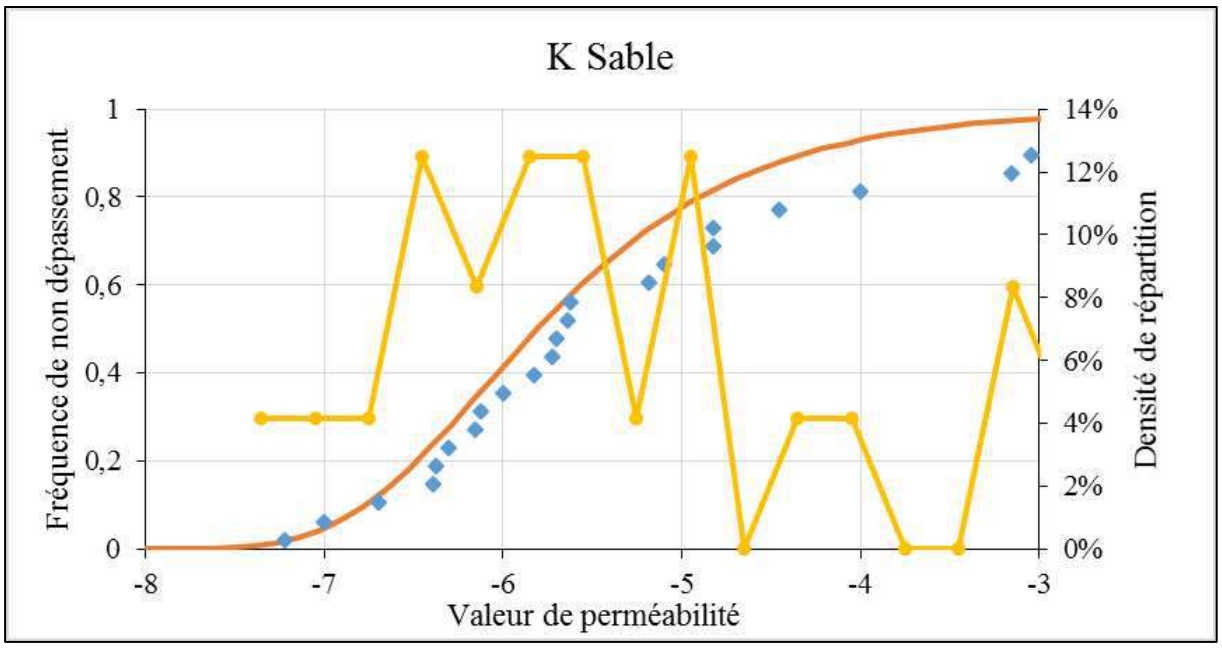
Les quelques valeurs de perméabilité des sols limoneux varient de 10^{-9} m/s à 10^{-5} m/s et semblent réparties sur cette fourchette de valeurs. Une perméabilité de 10^{-12} m/s a également été mesurée mais n'a pas été retenue car en dehors de la précision de l'essai et peu probable.

Pour l'argile, les valeurs de perméabilité mesurées sont réparties, de façon homogène, entre 10^{-8} et 10^{-5} m/s. Contrairement au limon, les perméabilités maximales semblent élevées ; les 8 valeurs les plus élevées (>10^{-6} m/s) sont à la limite de la catégorie argile, elles sont issues :

- d'une couche d'argile limoneuse située entre deux couches de grave
- d'une couche de sable argileux (sableux au niveau de l'échantillon)
- d'une couche de limon très argileux avec passe caillouteuse
- d'une couche à la limite entre un limon (30 cm) et un limon argileux (70 cm)




log K Limon
Fréquence de non dépassement
Densité de répartition
Valeur de perméabilité
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
14%
12%
10%
8%
6%
4%
2%
0%
-10
-9
-8
-7
-6
-5


K Sable
Fréquence de non dépassement
Densité de répartition
Valeur de perméabilité
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
14%
12%
10%
8%
6%
4%
2%
0%
-8
-7
-6
-5
-4
-3

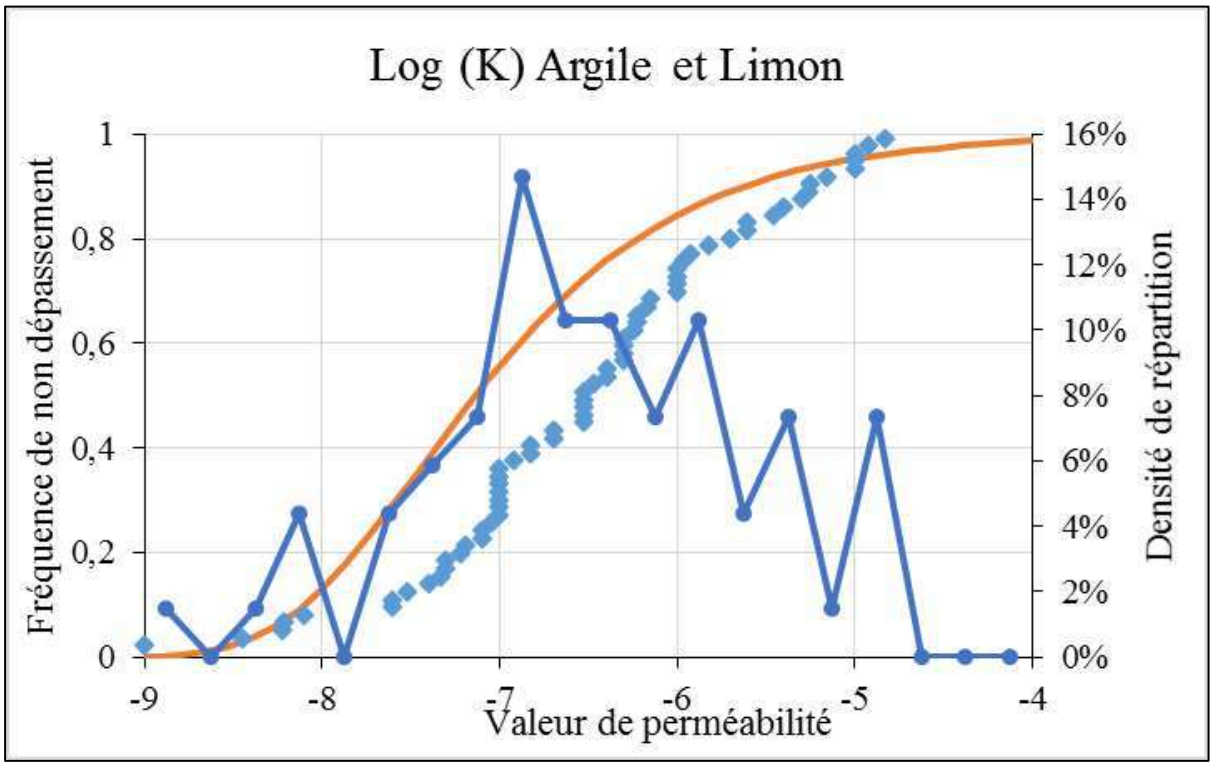


Figure 11. Perméabilité – fréquence de non dépassement et densité de répartition par classe de sols

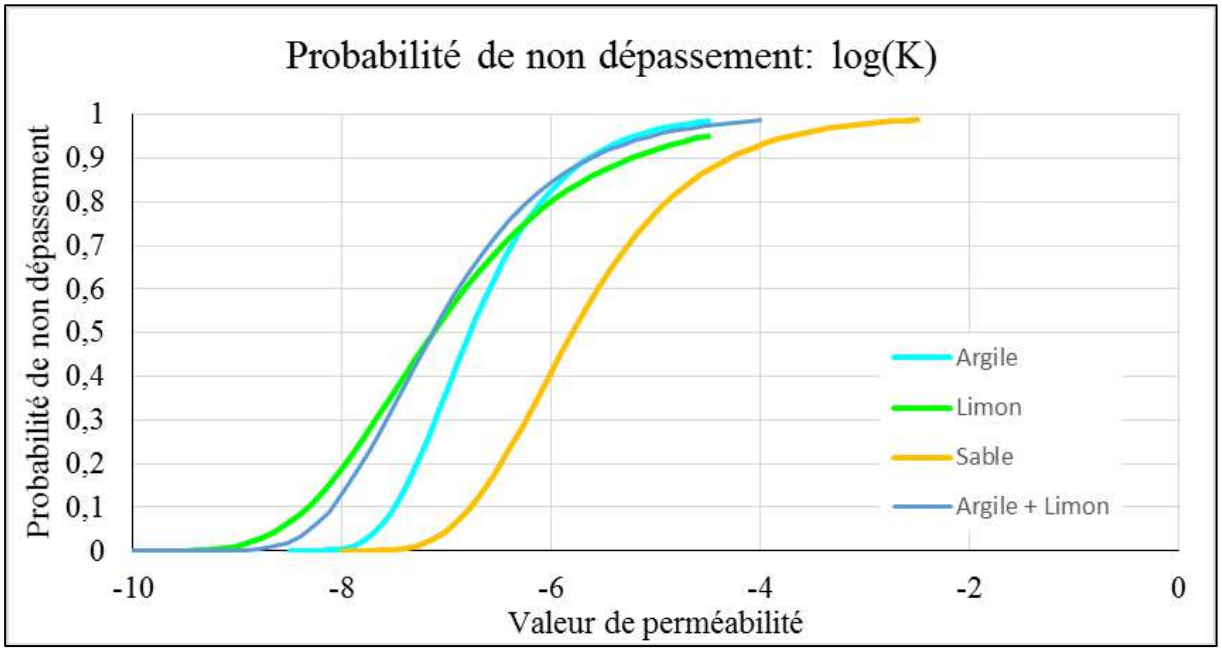


Figure 12. Perméabilité – fréquence de non dépassement par classe de sols

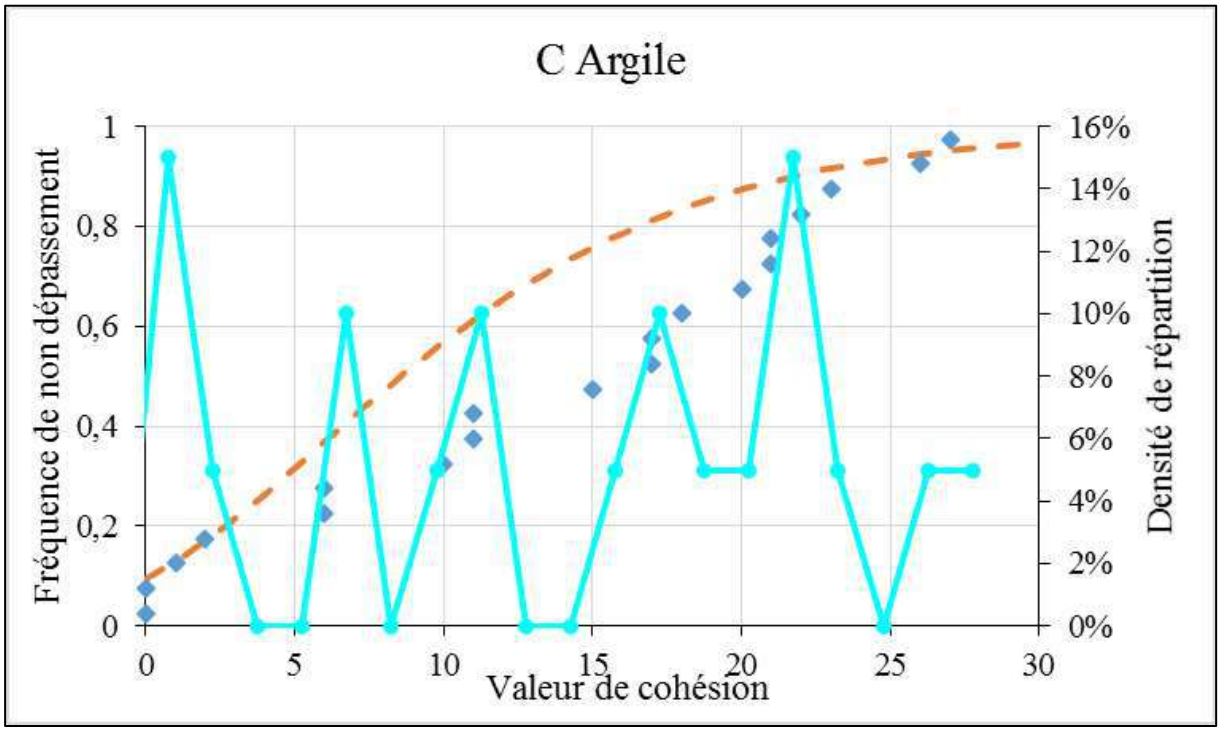
La cohésion : C

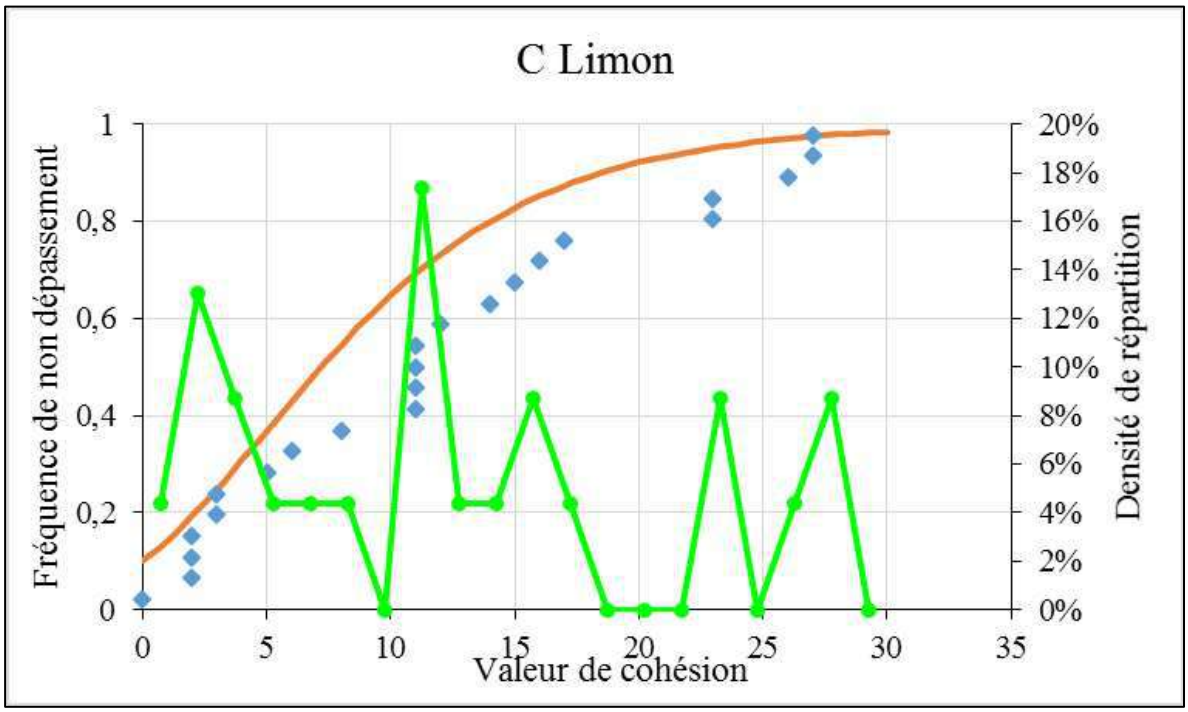
Il n'y a pas de données pour la tourbe, le remblai ou les graves.

La cohésion des sables est faible (<=1 kPa sauf deux valeurs à 9 et à 12 kPa) avec plus de 50% des valeurs inférieures à 1 kPa. Les valeurs de 9 et 12kPa ont été mesurées dans des sols décrits comme « Sable fin limoneux gris » et « Sable fin légèrement limoneux ».

Pour les limons les données sont plus disparates (entre 0 et 27 kPa) avec une valeur prépondérante autour de 11 kPa.

Comme pour les limons, les argiles ont des valeurs importantes ont une grande étendue de valeurs, malgré un faible nombre d'essais.





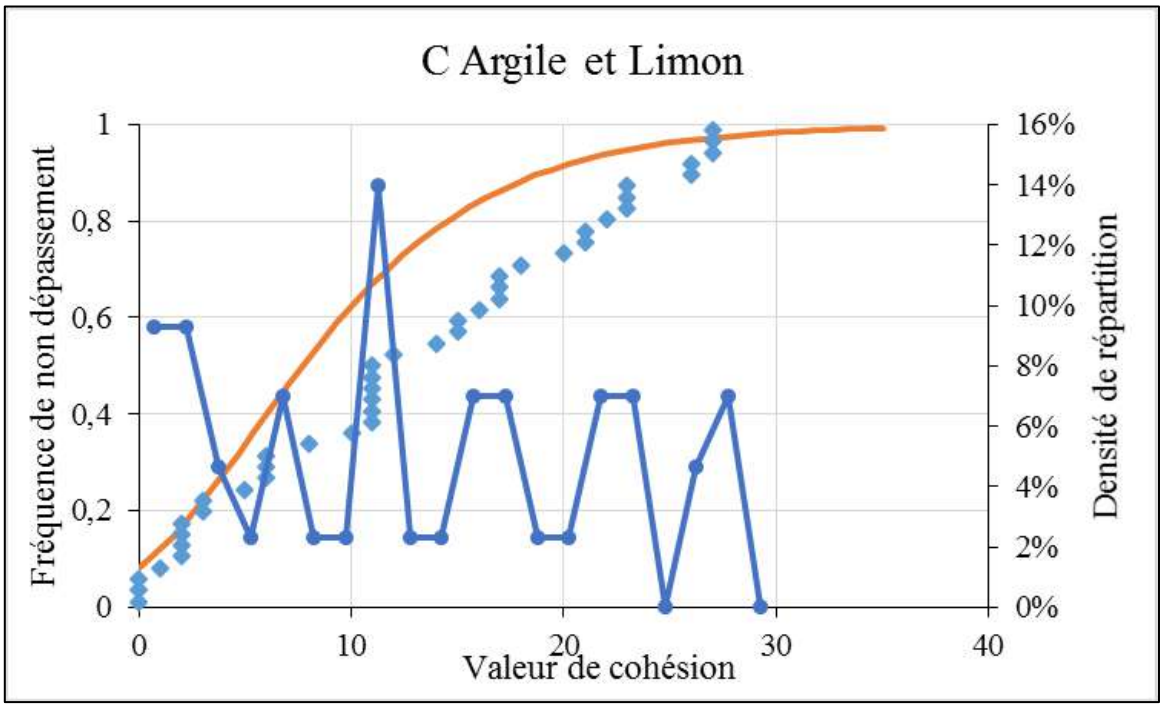


Figure 13. Cohésion – fréquence de non dépassement et densité de répartition par classe de sols

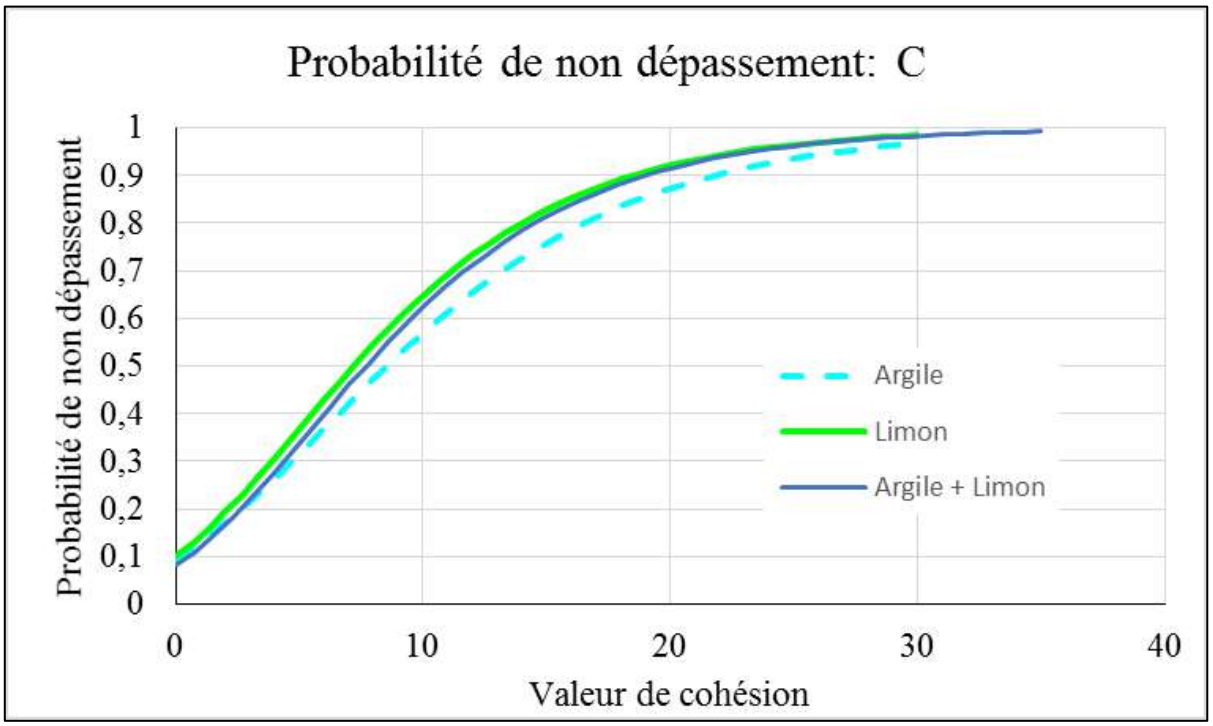
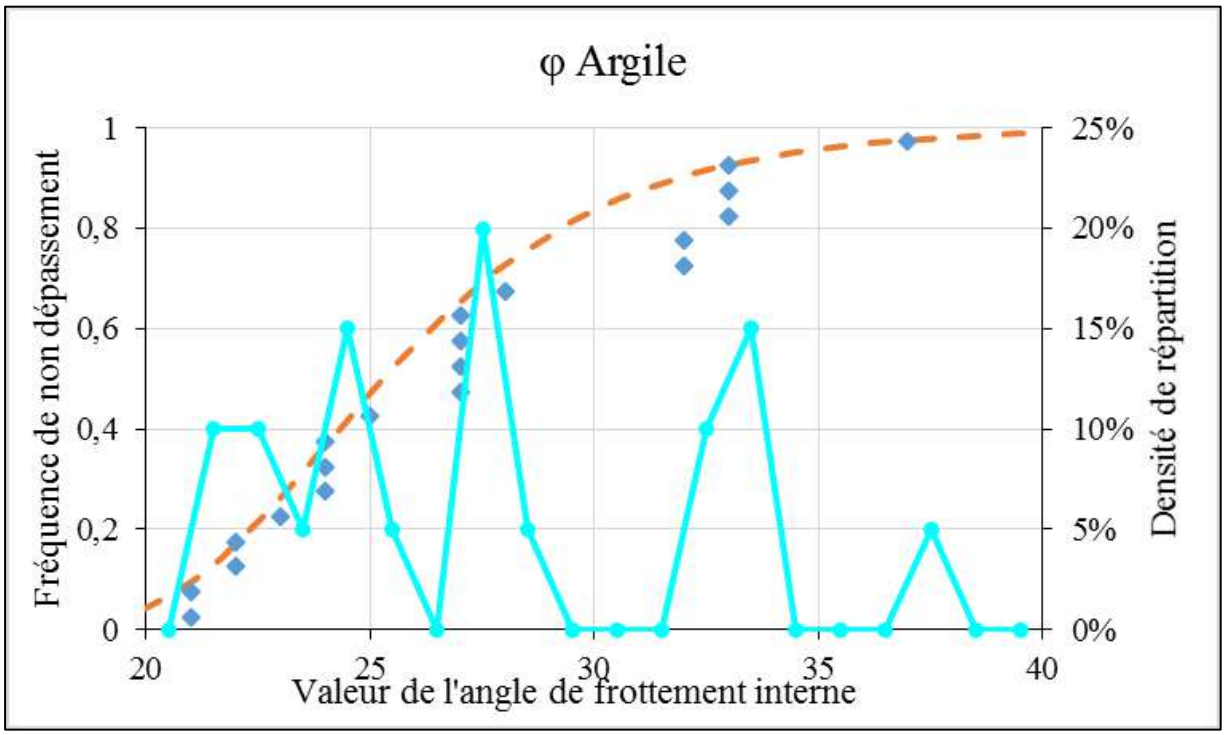
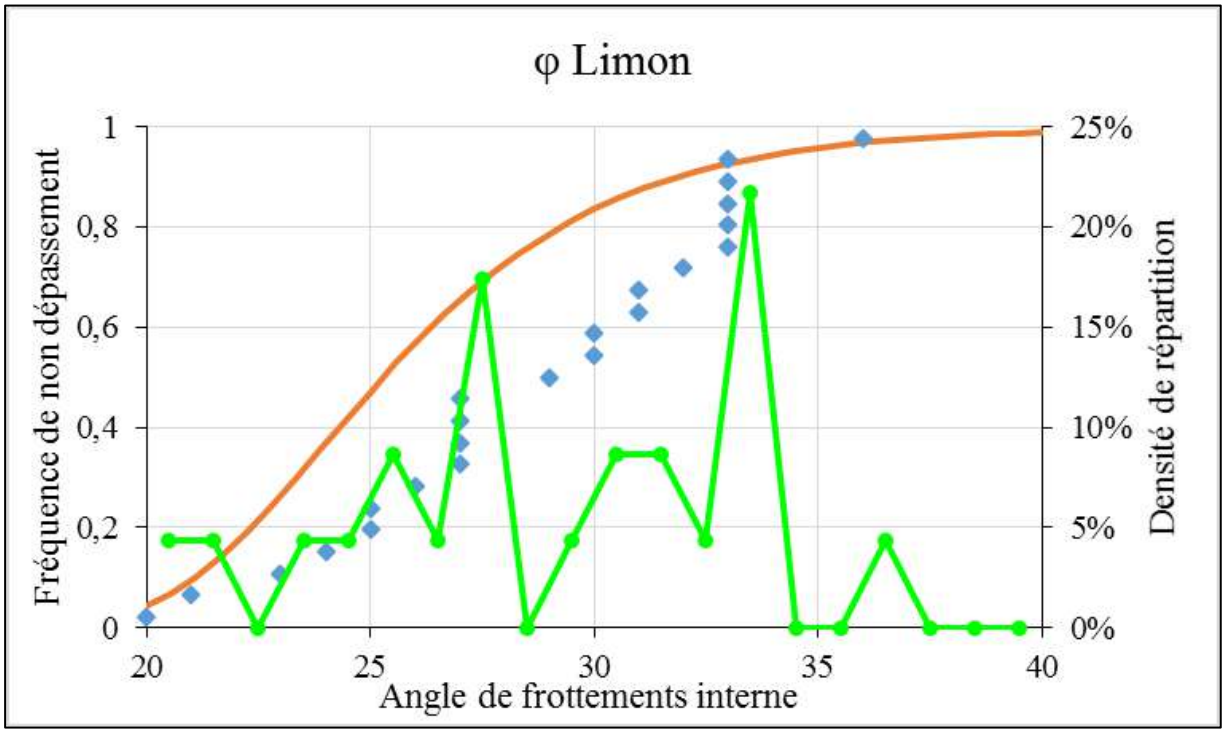


Figure 14. Cohésion – fréquence de non dépassement par classe de sols

L'angle de frottement interne : Φ

Les données venant des mêmes essais que pour la cohésion, il n'y a pas de données pour la tourbe, le remblai ou les graves et trop peu sur les sols sableux.
Pour l'argile, le limon et le sable il y a une répartition homogène des valeurs, entre 20 et 40 °, en moyenne le sable a un angle de frottement un peu plus important.





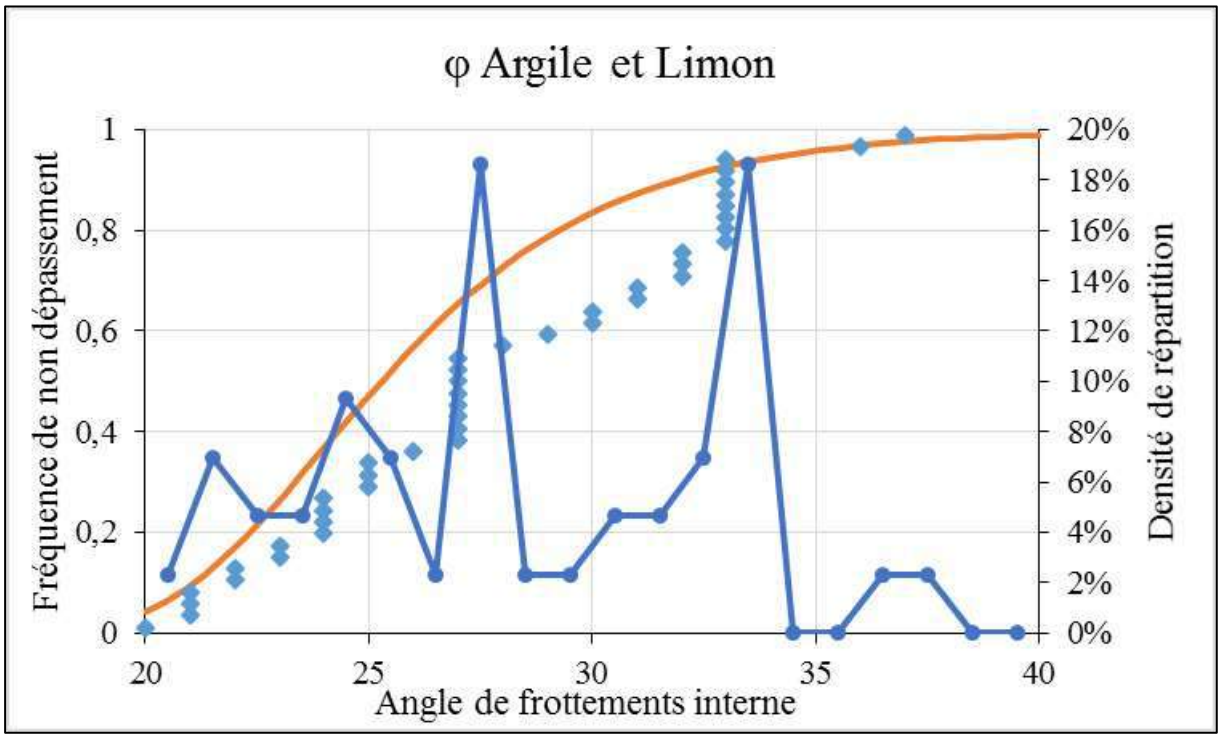


Figure 15. Angle de frottement interne – fréquence de non dépassement et densité de répartition par classe de sols

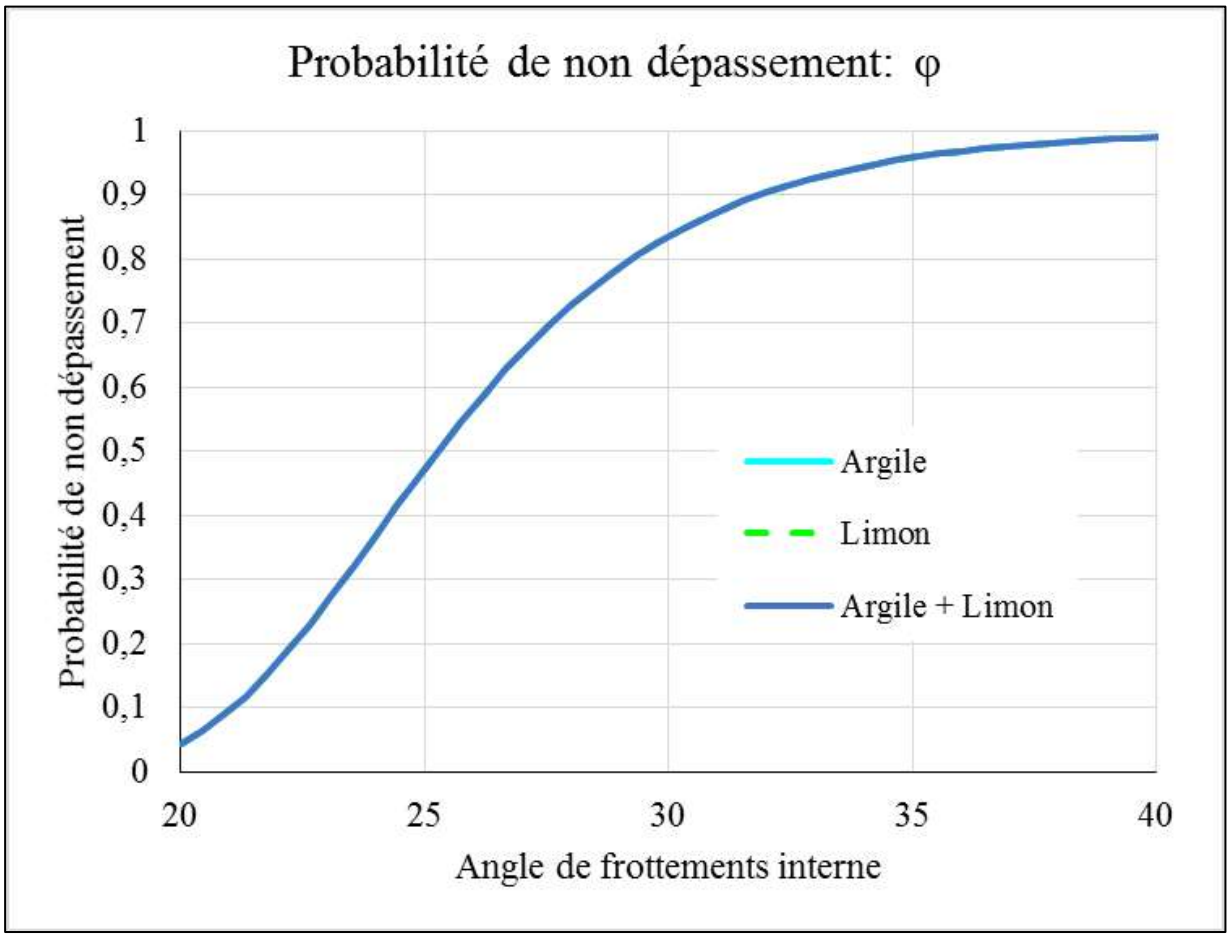


Figure 16. Angle de frottement interne – fréquence de non dépassement par classe de sols

3.4. CORRELATION ENTRE LES DIFFERENTES MESURES ET LA RESISTANCE A L'EROSION DE CONDUIT

Le nombre d'essais HET réalisés sur les digues est limité aux campagnes les plus récentes (96 lors des campagnes [G1013], [G802], [G801], [G208], [G209], [G417] et [G505]), réalisées sur l'ensemble du delta. La corrélation entre les paramètres d'érosion (τc et Ie) et les différents paramètres mécaniques a donc été réalisée sans considérer les essais HET des matériaux de zone d'emprunt que sont la lône et l'atterrissement à proximité de la digue Tarascon-Arles (27) qui sont des échantillons remaniés (voir paragraphe 3.5).

Il y a peu d'essais HET où la perméabilité, la cohésion ou l'angle de frottement ont été calculés à proximité. L'indice de plasticité, la valeur au bleu et les passants à 2 et 80 µm ont en revanche été étudiés.

S'il n'apparait pas de corrélation forte entre ces différents paramètres, certaines tendances sont néanmoins notables.

Figure 17. Corrélation matériau/érosion

Corrélation avec le passant à 2µm

Même si la corrélation n'est pas très importante, il ressort que le passant à 2 µm influe sur l'érodabilité : τc et Ie augmentent tous deux avec le passant à 2 µm. Bien que faible, la corrélation entre le passant à 2 µm et l'indice de résistance est la plus importante parmi les paramètres étudiés.

Corrélation avec le passant à 80µm

La corrélation entre le passant à 80 µm et la contraite critique est quasi nulle. Bien que faible, la corrélation entre le passant à 80 µm et l'indice de résistance montre une augmentation de l'indice d'érosion avec le passant à 80 µm.

Corrélation avec l'indice de plasticité

Comme pour le passant à 2 µm, τc et Ie augmentent tous deux avec l'IP mais la corrélation n'est pas importante.

Corrélation avec la Valeur au Bleu de Méthylène

Comme pour le passant à 2 µm ou l'indice de plasticité, τc et Ie augmentent tous deux avec la VBS mais la corrélation n'est pas importante.

Répartition des caractéristiques d'érosion en fonction du type de matériau

Pour l'analyse suivante, les jeux de données utilisés sont d'un côté les essais réalisés avant 2015 (noté Old) et ayant servis à caler les lois de non dépassement (noté EDD) et d'un autre coté les essais réalisés en 2016-2017 (noté New).

Il apparait que pour la contrainte critique le calage qui avait été réalisé est plutôt sécuritaire et peu convenir pour la présente étude. En revanche, pour l'indice d'érosion il apparait que pour les deux types de matériaux étudiés (A1 et A2) les courbes de non dépassement sont entre les deux définies lors de la précédente étude.

L'analyse de la cinétique d'érosion a alors été calculée sur la base de la courbe EDD A1+A2. La différenciation a en revanche bien été prise en compte pour la probabilité d'initiation.

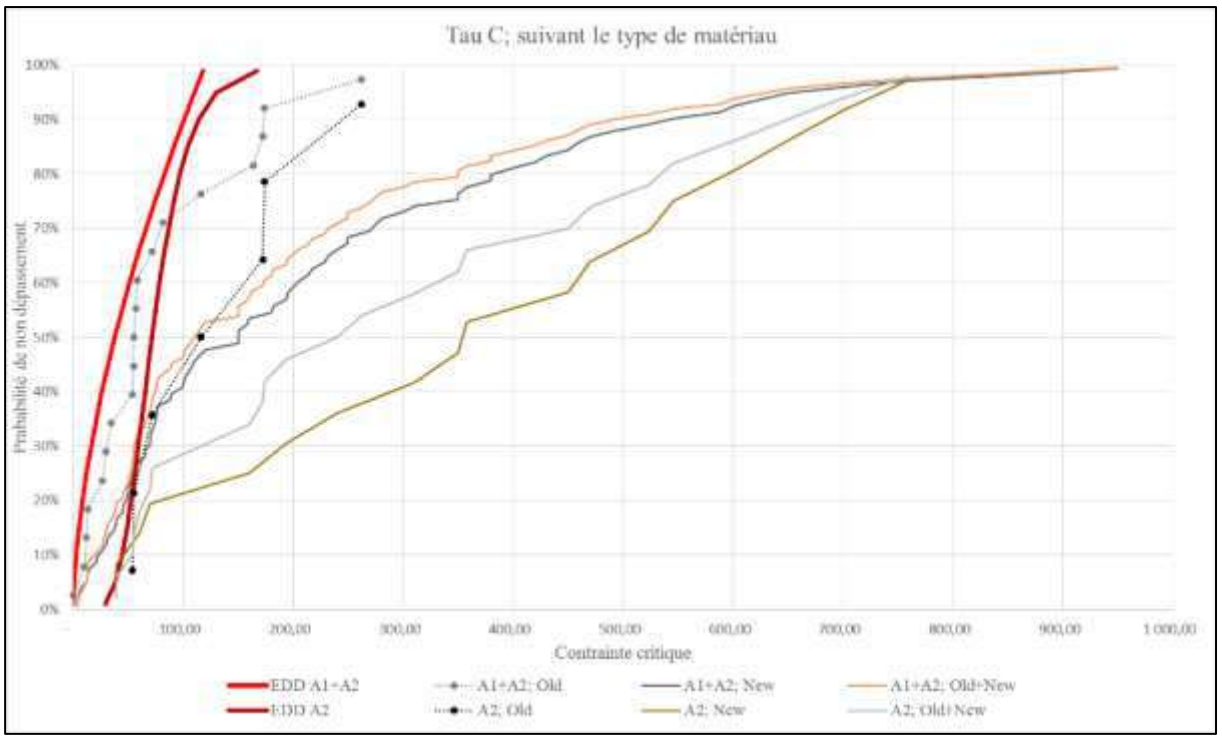


Figure 18. Probabilité de non dépassement de la contrainte critique (Hazen)

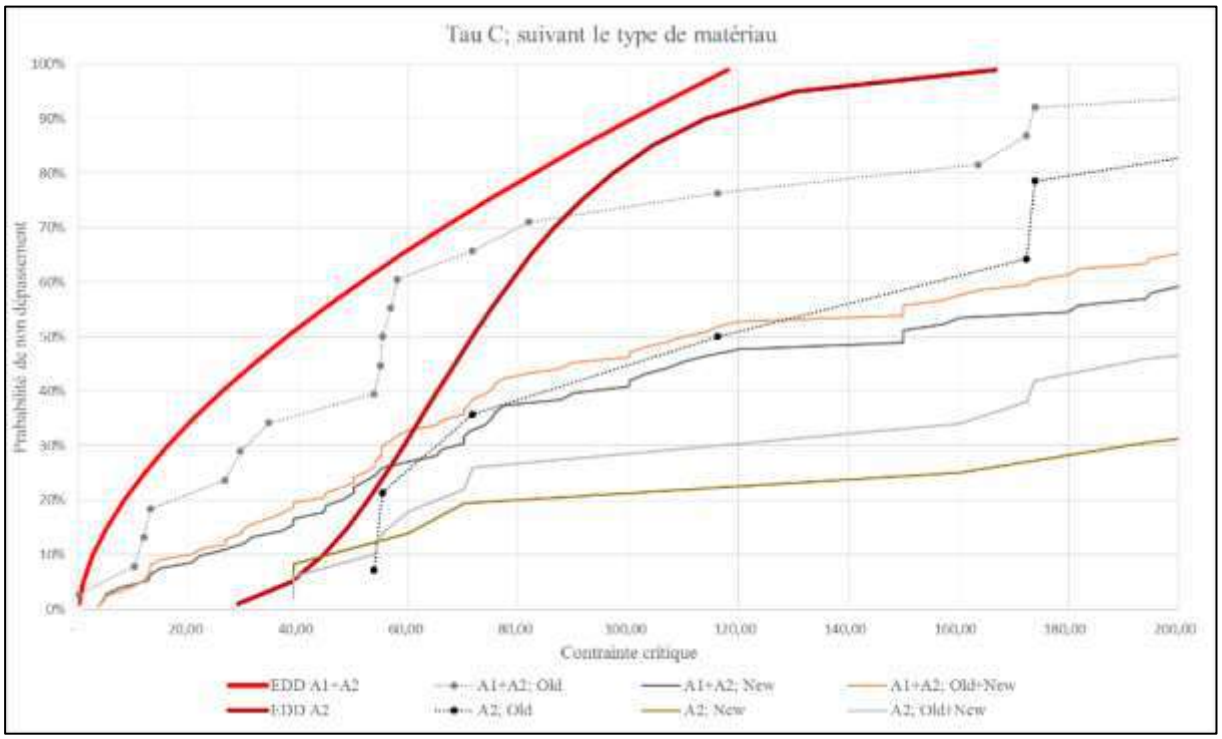


Figure 19. Probabilité de non dépassement de la contrainte critique (Hazen)-ZOOM

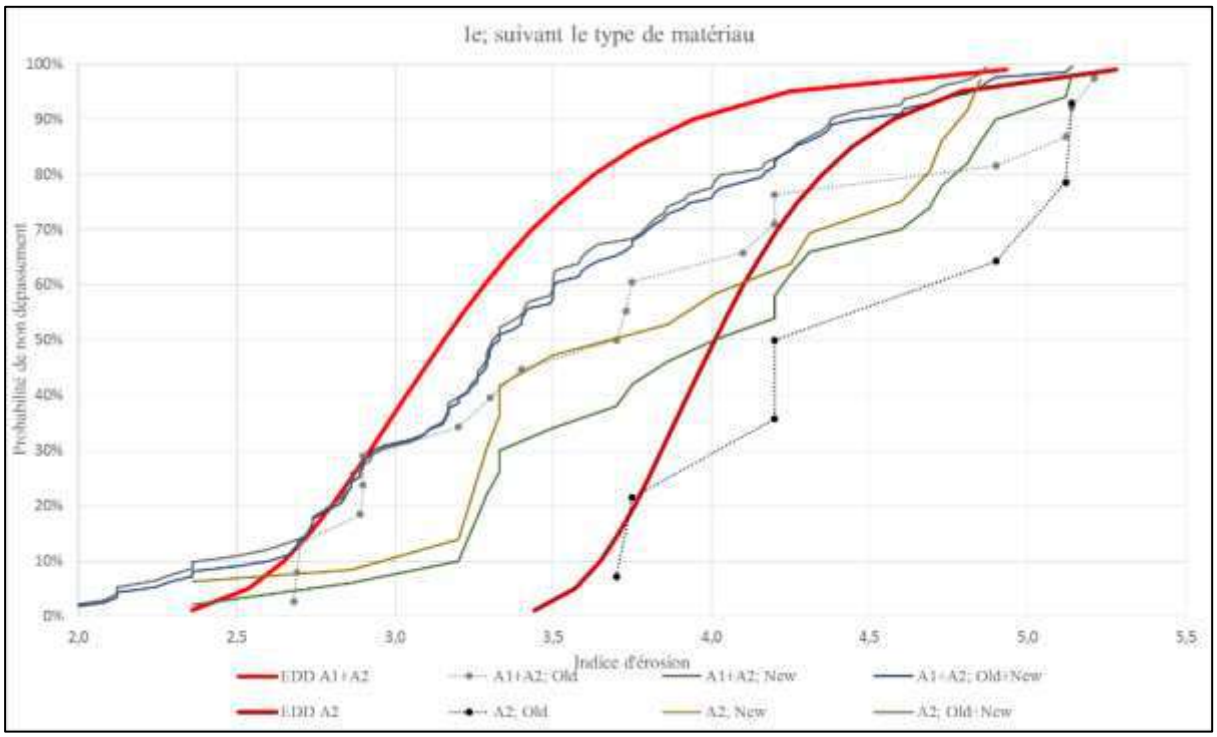


Figure 20. Probabilité de non dépassement de l'indice d'érosion (Hazen)

3.5. EVOLUTION DANS LE TEMPS

Les résistances à l'érosion des matériaux issus des sites d'emprunt que sont la lône et l'atterrissement, remaniés à 95 % de l'OPN avec des méthodes de compactage statique ou dynamique, semblent faibles. IRSTEA [G205] dans une étude menée sur ces résultats a néanmoins souligné l'importance du temps de cure sur la résistance à l'érosion de ce type de matériaux.
Le SYMADREM a profité d'une réparation de digue maritime suite à une tempête pour tester en grandeur nature la résistance à moyen terme à l'érosion de conduit des matériaux d'emprunts destinés à la création de la digue. C'est ainsi que le remblai de sol limoneux (type A1 dans la classification GTR) mis en œuvre par compactage pour la réparation a fait l'objet d'un suivi spécifique : à différents temps après la mise en place du sol (3, 7, 28, 94 et 360 jours), des échantillons intacts de 2 m de profondeur ont été prélevés par carottage sur une zone d'environ 5 m de longueur et 1,5 m de largeur. Un tronçon de chacune de ces carottes, localisé entre 1,0 et 1,4 m de profondeur, a été découpé et a fait l'objet d'un HET. Le reste du sol a été utilisé pour des essais d'identifications. Les identifications ont montré une très bonne homogénéité des différents échantillons, tous classés A1 dans la classification GTR, avec des granulométries similaires (passant à 80 µm entre 79 et 84 %, et passant à 2 µm entre 17 et 25 %), une plasticité proche (Indice de plasticité entre 7 et 12, VBS entre 1,37 et 1,52) et un Optimum Proctor Normal semblable (teneur en eau entre 18 et 21 %, densité sèche entre 1,63 et 1,67). L'état de densité et la teneur en eau des échantillons sont demeurés comparables, avec une teneur en eau de +3,0 à +5,3 % par rapport à l'Optimum et une densité correspondant à entre 88 et 97 % de la densité de l'Optimum Proctor. Aucune évolution significative des caractéristiques du remblai avec le temps n'a pas donc été mise en évidence par les essais d'identification.

Les résultats des essais d'érosion de conduits ont montré une augmentation peu significative de la résistance à l'érosion par rapport aux incertitudes de l'essai de J+3 à J+94. Celle-ci devient en revanche significative à J+360, avec une contrainte critique multipliée par 7 (50 et 55 Pa à respectivement J+3 et J+7, contre 350 Pa à J+360) et un indice d'érosion ayant augmenté d'environ une unité (2,84 et 2,50 à respectivement J+3 et J+7, contre 3,42 à J+360). Le sol est ainsi passé d'une vitesse d'érosion « Très rapide » jusqu'à J≤28 selon la classification de Fell à une vitesse d'érosion « Modérément rapide » (Figure et tableau ci-après).

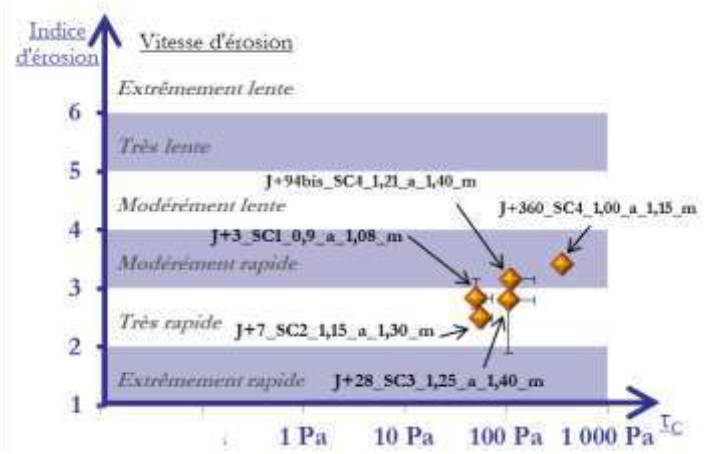


Figure 21. Augmentation de la résistance à l'érosion avec le temps - digue de l'Amarée

Tableau 8. Résultats des essais sur la digue de l'Amarée [G207]

	SC1_0,9_a_1,08_m I+3	SC2_1,15_a_1,30_r I+7	SC3_1,25_a_1,40_r I+28	SC4_1,10_a_1,21_r I+94	SC4_1,21_a_1,40_r I+94 bis	SC5_1,00_a_1,15_r I+360
Résultats						
Contrainte critique τ_c	50 Pa	55 Pa	105 Pa	200 Pa	110 Pa	350 Pa
$\tau_{c\ min}$	62 Pa	60 Pa	84 Pa	198 Pa	111 Pa	338 Pa
$\tau_{c\ max}$	72 Pa	71 Pa	189 Pa	253 Pa	120 Pa	432 Pa
Indice d'érosion Ie	2,84	2,50	2,80	3,63	3,15	3,42
Ie min	2,66	2,33	1,89	3,51	3,11	3,25
Ie max	3,18	2,74	3,06	3,78	3,39	3,51
Coefficient d'érosion de Hanson k_d	0,90 cm-3xN-1s-1	2,20 cm-3xN-1s-1	1,00 cm-3xN-1s-1	0,15 cm-3xN-1s-1	0,45 cm-3xN-1s-1	0,25 cm-3xN-1s-1
Coefficient d'érosion de Fell Ce	1,4E-03 s/m	3,2E-03 s/m	1,6E-03 s/m	2,3E-04 s/m	7,0E-04 s/m	3,8E-04 s/m
Remarques	Conduit asymétrique		Incertitude sur le coefficient d'érosion (dispersion des modélisations en début d'essai)	Présence d'un gravier dans le conduit		

En appliquant des valeurs sécuritaires d'accroissement de la résistance à l'érosion de conduit des matériaux destinés à la construction de la digue Tarascon-Arles, on retrouve des répartitions de valeurs très proches de celles des matériaux globaux (A1+A2) étudiés sur l'ensemble du delta (Old), comme le montre les deux graphiques suivants :

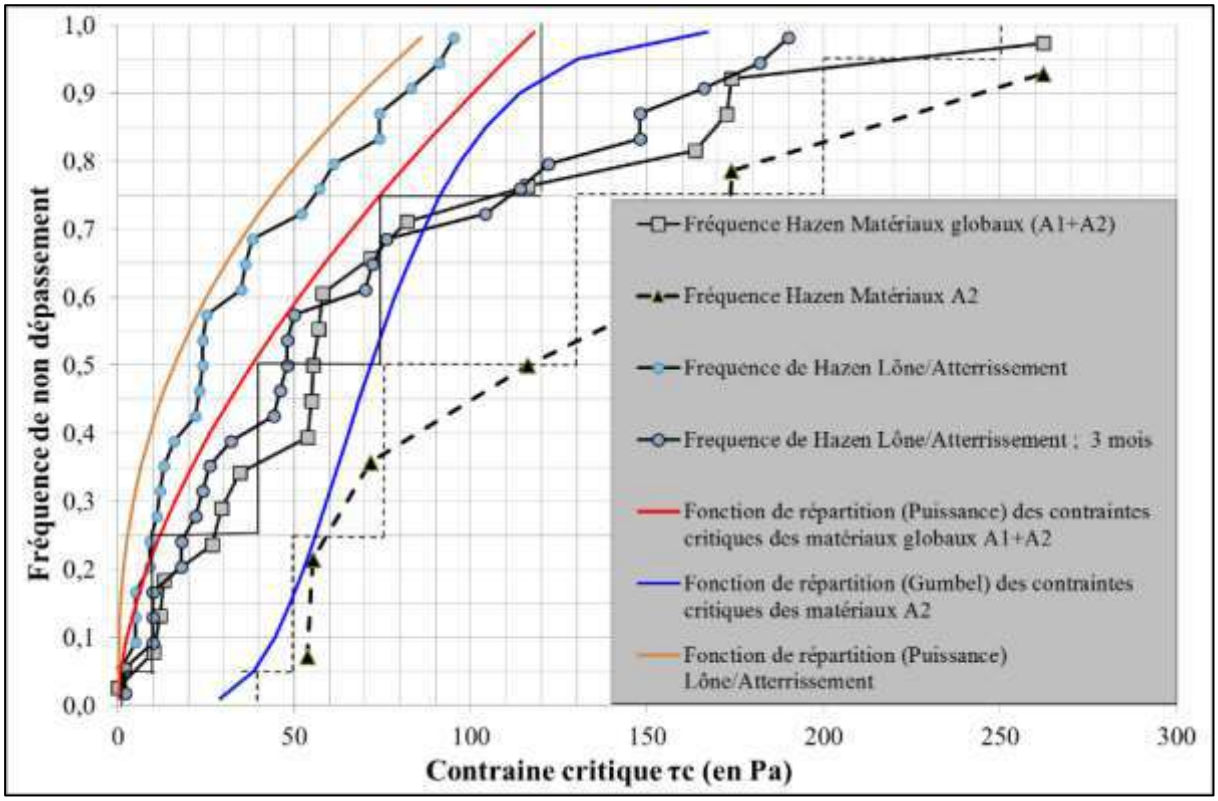


Figure 22. Répartition des valeurs de contrainte critique

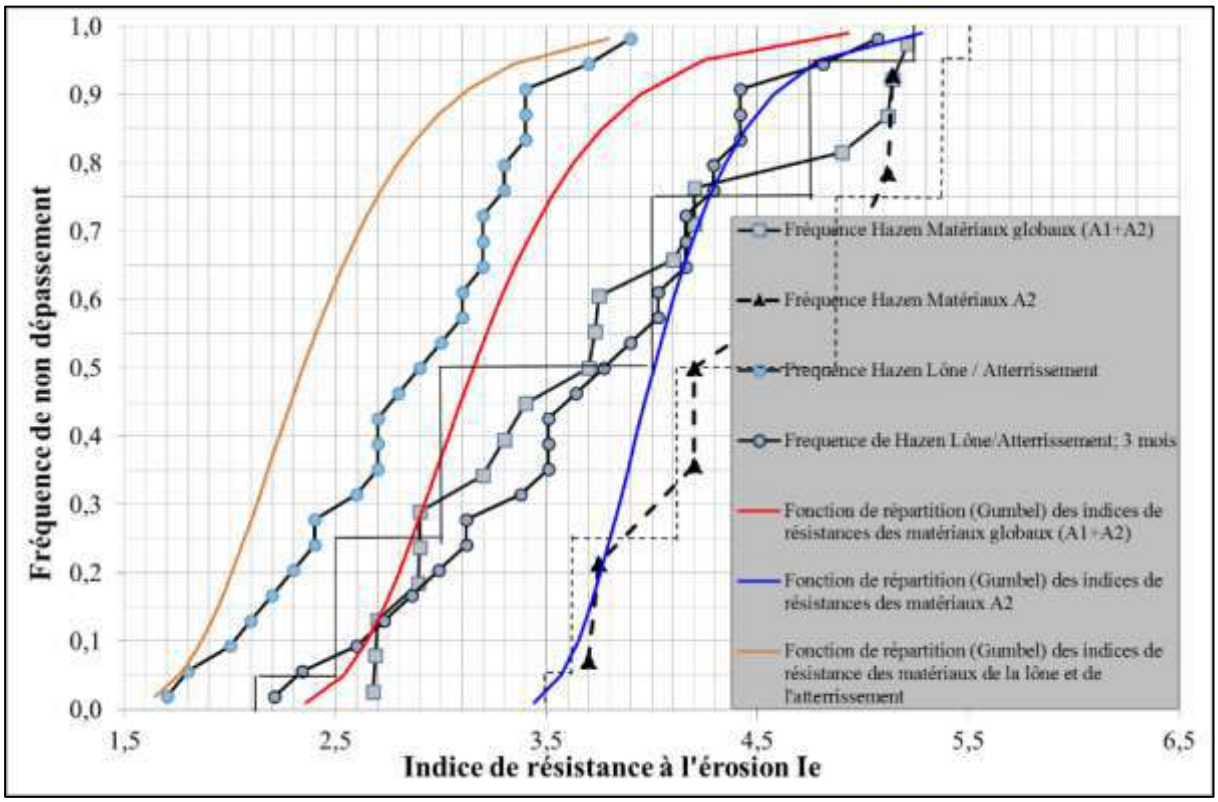


Figure 23. Répartition des valeurs d'indice d'érosion

Afin d'évaluer les caractéristiques d'un sol il est donc préférable d'utiliser des échantillons intacts.

3.6. PERMEABILITE DE HAZEN

15 essais de perméabilité ont été réalisés dans des sols constitués principalement de sable ou de grave. 7 essais correspondaient aux critères d'application de la formule de Hazen :

- $0.1\ mm < d_{10} < 3\ mm$
- $C = \frac{d_{60}}{d_{10}} < 5$

Rappel de la formule de Hazen :

$$K\ [m/s] = C\ .\ d_{10}^2[mm]$$

$$Avec\ C\ pris\ égal\ à\ \frac{1}{100}\left(entre\ \frac{1}{50}\ et\ \frac{1}{150}\ suivant\ les\ matériaux\right)$$

Sur l'ensemble des mesures effectuées, la formule de Hazen donne une perméabilité plus importante d'un facteur 10 à 200, ceci est encore vrai pour les sables étudiés en dehors des critères d'application.
Il est donc possible d'utiliser cette formule pour avoir une valeur sécuritaire de la perméabilité d'un sol mais elle n'est pas suffisamment précise pour pouvoir remplacer un essai de perméabilité.

Sur le graphique ci-dessous est représenté, par essai, la valeur de perméabilité mesurée par l'essai Lefranc (courbe bleue) et celle évaluée par la formule de Hazen (courbe orange). Pour cette dernière les points sont matérialisés de couleur différente suivant qu'il respecte ou non le critère de Hazen et si les essais, ont été réalisés à la même profondeur que l'analyse granulométrique : voir tableau ci-dessous.

Tableau 9. Classe couleur, des perméabilités calculées

		Mesure d_{10} et de perméabilité à la même profondeur		
		Oui	En partie	Non
Critère de Hazen respecté	Oui			
	Non			

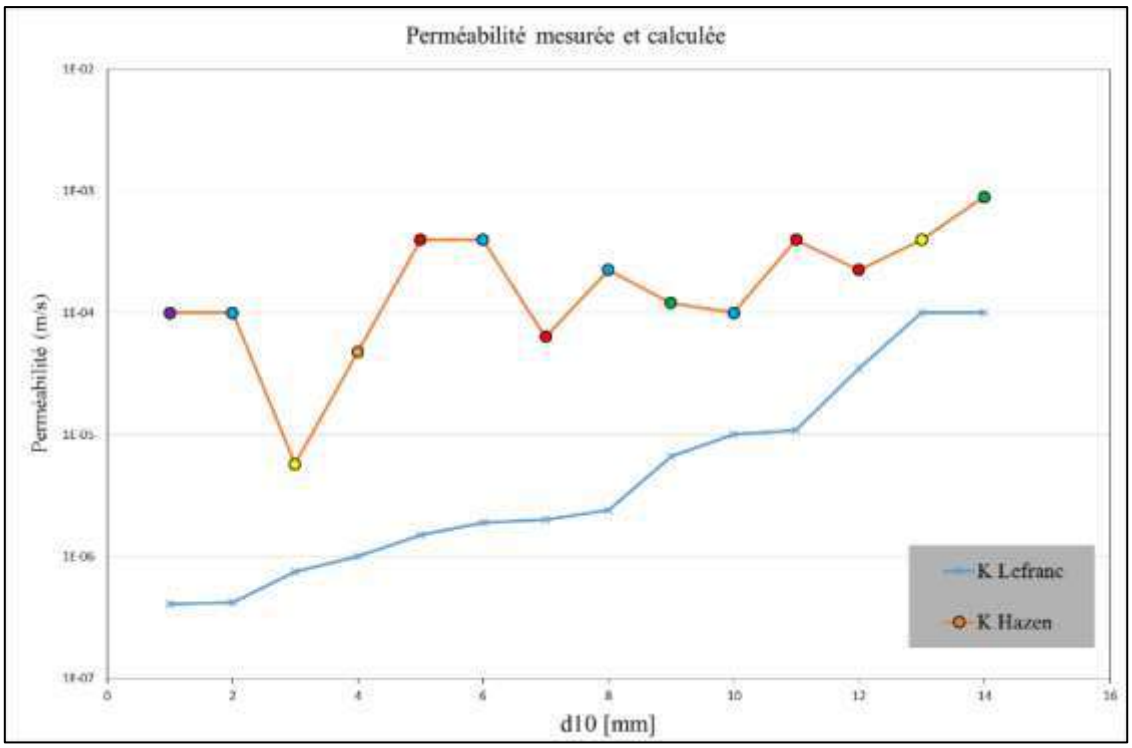


Figure 24. Perméabilité des sables et graves

Suite à cette analyse sur un nombre limité d'échantillons, on constate un écart d'un log (rapport 10) entre la perméabilité obtenue par les essais Lefranc et la perméabilité calculée à l'aide de la formule de Hazen. Ceci peut-être dû au fait que lors de l'essai Lefrance, les matériaux fins viennent en partie obstruer la crépine, la perméabilité mesurée devient plus faible que la perméabilité en grand des matériaux étudiés.

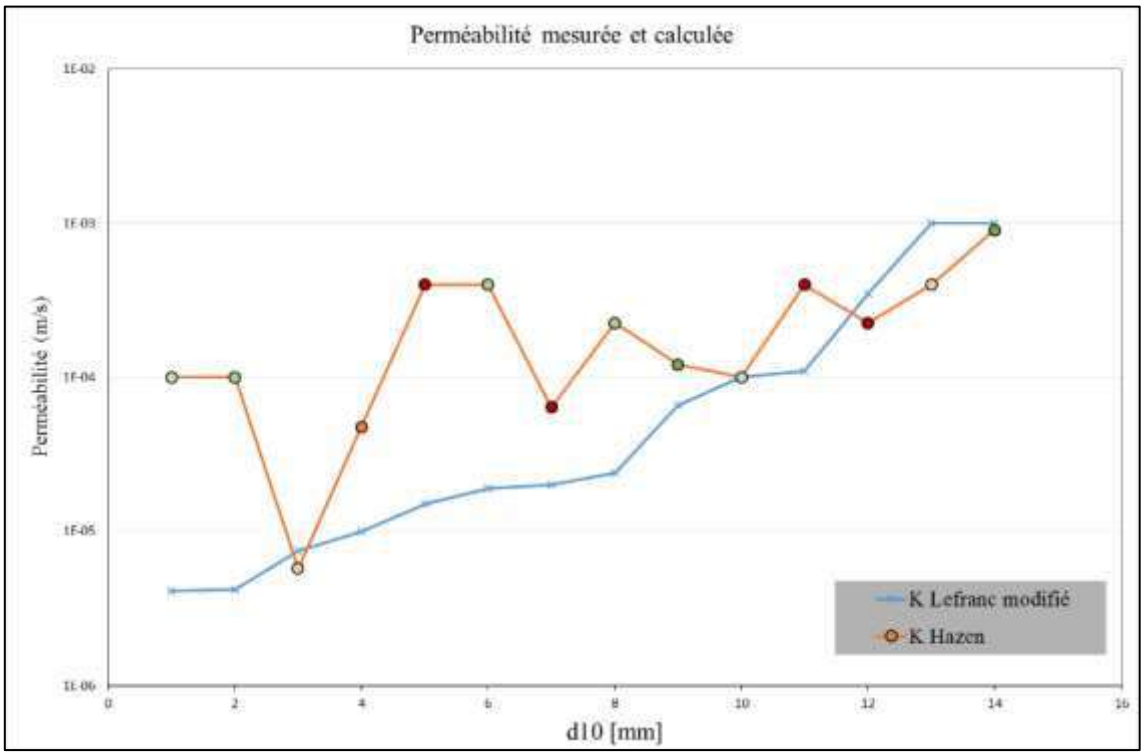


Figure 25. Comparaison entre la perméabilité mesurée, modifiée d'un facteur 10, et celle calculée

4. CONCLUSION

Une étude des campagnes géotechniques réalisées sur les rives du delta du Rhône a été effectuée, comprenant :

- une analyse des différents paramètres mesurés (indice de plasticité -IP-, valeur au bleu de méthylène –VBS-, passant à 2 et 80 µm -%2µ- %80µ-, perméabilité –K-, cohésion –C-, angle de frottement interne –φ-, contrainte –τc- et indice d'érosion –Ie-),
- une comparaison du classement entre les carottés et les CPT,
- une étude de la corrélation des paramètres sur l'érosion de conduit
- et une vérification de la validité de la formule de perméabilité de Hazen.

La corrélation entre les deux modes d'analyse est bonne, le CPT peut être utilisé pour avoir une bonne vision globale du profil géotechnique mais pour les zones litigieuses des sondages carottés sont nécessaires pour affiner la connaissance du sol.

De ces campagnes on peut conclure que la catégorie « sable » se distingue nettement des limons qui ont des propriétés très proches des argiles.

Concernant l'érosion de conduit il ne ressort aucune corrélation entre l'érodabilité et les différents paramètres étudiés. Néanmoins les matériaux A2 présentent à la fois une contrainte critique supérieure et un indice d'érosion plus important par rapport aux matériaux A1, une VBS ou un IP élevé est donc préférable.

La perméabilité calculée par la formule de Hazen donne une perméabilité plus importante que celle calculée avec des essais de perméabilité tels que l'essai Lefranc. Or les quelques valeurs issues d'essais de pompages donnent des valeurs de l'ordre de grandeur de Hazen, cela peut être dû au fin que l'essai Lefranc est fortement influencé par la proportion de fines, qui peut colmater la crépine et ainsi baisser la perméabilité.

4.1. COUPE DE LA ZONE D'ETUDE

Un profil en long représentant l'ensemble des sondages anciens réalisés sur le secteur Camargue Insulaire est présenté au chapitre 10 : Cartographie. Il y a également des profils pour l'ensemble des campagnes récentes. La mise en commun de l'ensemble sera réalisée une fois les campagnes en cours terminées.

4.2. DESCRIPTION DES TRONÇONS HOMOGENES

Entre Arles et la mer, la coupe géotechnique varie fortement. Il est proposé le découpage en tronçon homogène suivant :

4.2.1. Digue du défluent

Les sondages disponibles concernent la digue et même plus précisément le masque étanche. Ce masque argileux/limoneux rempli son rôle d'étanchéité et résistance à l'érosion : les essais réalisés en 2017 indiquent un indice d'érosion supérieur à 2.5 et une contrainte critique de 50Pa minimum.

D'après les données géologiques, le sous-sol est composé d'une couche d'alluvions récentes du Rhône (limon, sables et silts pouvant contenir des passées graveleuses) dont l'épaisseur est voisine de 20m.
Les sondages tarières réalisés en 2002 à proximité confirme un corps en limon sableux A1 qui est imperméable (k=5.10-7) ; en fondation il y a une couche d'environ 2m de sable limoneux, également classé A1, avec des passes de B5, puis un matériau plus compacte qui pourrait être les alluvions.

4.2.2. GRD les quais d'Arles

D'après les données géologiques, le sous-sol est composé d'une couche d'alluvions récentes du Rhône (limon, sables et silts pouvant contenir des passées graveleuses) dont l'épaisseur est voisine de 20 m.
Les sondages réalisés dans les remblais du quai de la gare maritime montrent que les remblais sont très hétérogènes (blocs+limon) sur quelques mètres, la première couche de fondation qui a certainement été remaniée et en partie intégrée aux remblais, est en sable limoneux. Il y a ensuite, aux alentours de -4mNGF des sables plus graveleux.

4.2.3. GRD entre les quais et Petite Montlong

Les sondages anciens comme ceux des campagnes récentes indiquent un corps de digue limoneux et une fondation en alternance entre des matériaux argileux et limoneux.
Il y a également des passes sableuses en profondeur (<2 m NGF) entre les Quais et le GRD 285.
Il y a ensuite une couche de sable importante en profondeur entre les GRD 285 et 286, à partir de 2 m NGF et jusqu'à la base des sondages (ici entre -2 et -6 m NGF).
Jusqu'au GRD 289 la fondation est plus argileuse, des lentilles de sable de moins d'un mètre ont parfois été repérées à des profondeurs variables, il ne semble pas y avoir de continuité sableuse.

La digue croise un paléo-chenal vers le GRD 285.4 soit au niveau de la couche de sable repérée.

4.2.4. GRD entre Petite Montlong et la Louisiane

Un seul sondage ancien a été réalisé sur ce secteur : au GRD 304.7 ; l'analyse est donc basée sur la campagne CPT de 2016, ces derniers mesuraient 10 m et étaient implantés en crête.
Jusqu'au GRD 292 la fondation est plus argileuse, des lentilles de sable de moins d'un mètre ont parfois été repérées à des profondeurs variables, il ne semble pas y avoir de continuité sableuse. Deux sondages indiquent des lentilles plus épaisses (1.5-2 m environ) : au GRD 290 et au GRD 292.
A partir du GRD 293, la base des sondages est sableuse ; le toit de cet horizon sableux remonte de -2 à 1 NGF entre les GRD 293 et 294.25. Le cœur de cette zone semble se trouver au GRD 294 ou elle mesure 4 m d'épaisseur.
A partir du GRD 295 la fondation est argileuse avec de légères passes limoneuses
Entre les GRD 296.5 et 302, la fondation est hétérogène avec de nombreuses alternances argile-limon ainsi que la présence de passes sableuses.
Entre les GRD 302 et 303 la fondation superficielle est argileuse mais il y a une épaisse poche de sable en profondeur : environ 4 m d'épaisseur et un toit à 1 m NGF soit 3 m sous le terrain naturel.
Entre les GRD 303 et 310 on retrouve une fondation hétérogène mais à forte dominance sableuse en dessous de 2 m NGF (proche de la surface).
Entre les GRD 310 et 312 la fondation est sableuse en dessous de 1 m NGF, sur au moins 5-6 m.
La fin du secteur est à nouveau hétérogène.

La digue croise un paléo chenal au début du secteur (GRD 289), puis un second vers GRD 303 et GRD 308.5. Elle en longe un dernier du GRD 307.5 au GRD 311 environ. La correspondance avec les sondages est bonne puisque seul le paléochenal amont ne présente pas de fondation sableuse.

4.2.5. GRD à l'aval de la Louisiane

La quasi-totalité des sondages réalisés dans le cadre de l'AVP des travaux de Salin de Giraud indique une fondation sableuse. Elle est plus limoneuse autours du GRD315 et du GRD316.

La digue coupe 2 paléo chenaux sur le secteur : au niveau du GRD 315 et du GRD 316. La présence de limon au niveau des anciens bras du Rhône avait été relevée dans le diagnostic de la digue de Salin de Giraud, ces limons épais seraient la trace d'anciens lits en voie de colmatage.

4.2.6. PRG entre le centre d'Arles et Albaron

La fondation des digues est à dominante argileuse et parfois limoneuse. L'argile peut devenir vasarde en profondeur.
4 sondages indiquent une fondation sableuse à moyenne profondeur qui n'apparait pas sur les sondages réalisés à environ 100 m en amont et en aval. Il apparait que ces faciès sont plutôt des sables limoneux, le rapport sable / limon doit être ponctuellement un peu plus important.
Les CPT réalisés récemment montrent que la fondation profonde est légèrement sableuse autour du PRG 292.

Le paléo chenal qui traverse la digue vers PRG 281 et PRG 287 n'apparait pas sur les sondages. De même entre PRG 295 et PRG 300.5, le petit Rhône a eu un tracé au niveau de la digue actuelle, ce qui ne ressort pas et il croisait la digue vers le PRG 304.3, une fondation profonde sableuse n'apparait que sur le sondage de la brèche de Lauricet mais pas quelques dizaines de mètres en amont et en aval.
En revanche les zones sableuses autour du PRG 292 sont en accord avec un autre paléo chenal.

4.2.7. PRG au niveau d'Albaron

En amont de la partie habitée, il y a deux sondages disponibles ; ils indiquent une fondation argileuse qui devient vasarde en profondeur (-7 m NGF) sur l'un et qui est vasarde en fondation superficielle sur l'autre.
Au niveau de la partie habitée (307.05-307.65), il y a également 2 sondages qui indiquent tous deux une fondation argileuse avec des passées sableuses en profondeur (20 cm à 5 m sous la crête et 50 cm à 7.5 m sous la crête ; la digue fait environ 3m dans ce secteur).

Deux paléo chenaux rejoignaient le tracé actuel du fleuve au niveau d'Albaron.

4.2.8. PRG entre Albaron et Sénebier

La fondation est principalement argileuse avec de faibles passes sableuses ou limoneuses. La fondation profonde (<-1m NGF) est sableuse et une veine de sable d'une épaisseur variant autour d'1 m est présente du PRG 310 à 312.5, aux alentours de 1 m NGF.
A partir du PRG 313 l'horizon sableux n'apparait plus, il y a 10 m de fondation argileuse, localement limoneuse.
Entre le PRG 314.5 et 318 un horizon sableux réapparait dont le toit s'établit vers -1 m NGF et une épaisseur de 4 m minimum (base des sondages).
Entre les PRG 318 et 319.75 la fondation est principalement argileuse mais il y a une lentille sableuse importante au PRG 318.5 (à -2mNGF soit 4 m sous le TN)

Entre les PRG 320 et 320.25 il y a une passée sableuse à 0.8 m NGF soit 1.5 m sous le TN, de 2 m d'épaisseur.
Sur la fin du secteur cette passée sableuse se réduit à environ 20 cm d'épaisseur et un horizon sableux apparait vers -3m NGF (5 m sous le TN).

Dans ce secteur les bras du Rhône ont évolué~~s~~ et les anciens tracés permettent d'éclaircir les données des sondages.
En amont du 311 un paléo-chenal indique un tracé légèrement différent, à l'Est des digues actuelles et non à l'Ouest, ce qui pourrait expliquer la veine sableuse. De même au 312.5, la digue croise un paléo-chenal.
Entre PRG 313 et 314.5, la digue est éloignée des paléo-chenaux puis entre 315 et 317 elle le longe ; la digue coupe ce paléo-chenal au niveau du PRG 318.5.
Seule la passée sableuse vers le 320 ne trouve pas d'explication directe par l'analyse des paléo-chenaux.

4.2.9. PRG Vers Sénebier

La fondation est argileuse avec une passe limoneuse vers 0mNGF et une fondation profonde qui devient progressivement sableuse à partir de -3mNGF.

En se rapprochant de l'aval l'analyse des paléo chenaux est moins pertinente mais la digue croise probablement un paléo chenal vers le PRG 321.

4.2.10. PRG en aval de Sénebier

Entre les PRG 322 et 326, la fondation superficielle est argilo limoneuse elle repose sur une couche sableuse dont le toit fluctue entre 0.5 et -1.5 mNGF ; soit entre 2 et 4m sous le TN.
Le secteur entre 326 et 329.5 n'a pas été investigué.
Entre les PRG 329.5 et 331.5, la couche argileuse de fondation superficielle est fine (de l'ordre du mètre), elle repose également sur une couche sableuse mais cette dernière est moins importante qu'en amont car une couche limoneuse apparait en dessous, à partir de -3mNGF en moyenne (soit une couche de sable de 3m d'épaisseur.
Le secteur entre 331.5 et 334.5 n'a pas été investigué.
Le secteur entre 334.5 et 336.5 n'a pas été directement investigué mais des sondages ont été réalisés non loin, sur le fuseau de recul prévu à l'AVP des travaux sur le Petit Rhône (recul variant de 25 à 160m. Sur ces sondages l'horizon sableux est rapidement atteint, il est à moins d'1m du TN ; son épaisseur semble être de plus de 5m (jusqu'à 14m sur un sondage vers le PRG 334.5) mais il est parfois moins important (couche de limon après environ 3m de sable sur les sondages entre 335.5 et 336.2).

Il n'y a plus de paléo chenaux connus sur cette partie aval mais les bras et l'embouchure ont fortement évolués et la fondation de la digue actuelle a souvent été dans le cône de déjection du delta, d'où sa composition sableuse.

4.3. RESUME

Les risques repérables sur le profil en travers sont :

- Une couche de grave dans la digue, cette dernière peut être sujette à la suffusion ; améliorer l'imperméabilité amont voir, lorsque c'est très localisé, reprendre la structure de la digue pour purger la couche permet de pallier ce risque ;
- Du sable en fondation, si la couche qui le surplombe subit un claquage hydraulique, une érosion régressive de la couche de sable peut se produire ; pour pallier ce risque, on peut allonger le chemin hydraulique avec par exemple un rideau de palplanche ou limiter le risque de claquage en drainant le pied aval ;
- Grave en fondation, une érosion de contact peut apparaitre, les solutions sont similaire au traitement de la couche de sable ;
- Tourbe en fondation, caractéristiques de matériaux très variables, zone à surveiller ;
- Paléo- chenal, zone à risque de par son histoire, représente une couche épaisse de sable/grave en profondeur.

Le tableau page suivante présente les différents risques présents sur le linéaire, au vu de la coupe géotechnique illustrée ci-après.

Les principaux défauts repérés sont rappelés ci-dessous :

- Il y a présence de couches de sable et de grave sous les quais d'Arles mais le rideau de palplanches descend jusqu'au substratum rocheux et coupe donc la circulation hydraulique.
- Les couches de sables repérées au niveau du paléo-chenal vers le GRD 285.4 restent en profondeur (>2 m).
- Les couches de sables repérées sous la digue du Grand Rhône rive droite entre les GRD 289 et 313 sont à plus de 2 m sous le TN ce qui réduit très fortement les risques de claquage hydraulique ; en revanche au niveau du GRD 304, le toit se trouve à environ 1 m sous le niveau du pied aval, il en est de même au niveau du GRD 310.5 ; il n'est pas prévu de travaux à court terme.
- A l'aval de la Louisiane, des couches de sables semblent proches de la surface, des campagnes géotechniques supplémentaires (CPT + Carottés) vont être réalisées en 2018 ; les travaux prévus pour 2020 pourront alors s'adapter à ces données.
- Entre Albaron et Sénebier les couches de sable sont à plus de 2 m sous le TN ce qui réduit très fortement les risques de claquage hydraulique ; pour les zones autour du PRG 310, du PRG 312 ; du PRG 316 et du PRG 320, le toit de l'horizon sableux se rapproche de la surface. Aucun désordre ou brèche n'a été repéré dans ces secteurs et il n'est pas prévu de travaux à court terme.
- A l'aval de Sylvéréal, les données sont éparses mais les couches de sables semblent proches de la surface, en particulier entre le PRG 325 et la mer, des campagnes géotechniques supplémentaires (CPT + Carottés) vont être réalisées en 2018 ; les travaux prévus pour 2020 pourront alors s'adapter à ces données.

Tableau 10. Résumé des risques liés aux différents tronçons (Grand Rhône)

	Défluent	**Quais d'Arles**	**Quai – Pte Montlong**	**Pte Montlg-Louisiane**	**Embouchure Gd Rhône**
Grave dans la digue	NON	Dans le remblai, derrière les maçonneries	NON	NON	NON
Sable en fondation	Oui mais limoneux	Oui mais limoneux	Localement : Vers GRD 285 -286	Oui Profondeur et épaisseur très variables	Oui : sur l'intégralité du tracé ; à 1m sous le TN
Grave en fondation	NON	Sables graveleux en fondation profonde : 10m sous TN	NON	NON	NON
Tourbe en fondation	NON	NON	NON	NON	NON
Paléochenal (Cerege)	NON	NON	Oui : GRD 285.4	Oui : GRD 289, GRD 304, GRD 308.5 ; GRD 307.5-311	Oui : GRD 315, GRD 316
Paléochenal possible (interprétation coupe)	NON	NON	Pas en plus	Vers le GRD 294	Pas en plus

Tableau 11. Résumé des risques liés aux différents tronçons (Petit Rhône)

	Arles-Albaron	**Albaron**	**Albaron-Sénebier**	**Sénebier**	**Embouchure Pt Rhône**
Grave dans la digue	NON	NON	NON	NON	NON (lorsqu'il y a des données)
Sable en fondation	NON Apparait sur des sondages mais profond et ponctuel	NON	Oui Profondeur et épaisseur très variables	En fondation profonde	Oui, dès la fondation peu profonde
Grave en fondation	NON	NON	NON	NON	NON (lorsqu'il y a des données)
Tourbe en fondation	Localement, en fondation profonde	Oui : Sur la partie amont	NON	NON	NON (lorsqu'il y a des données)
Paléochenal (Cerege)	Oui : PRG 281 PRG 287 PRG 292 PRG 295-300 PRG 304.3	Oui, deux différents au PRG 307	Oui : PRG 307-311 PRG 312.5 PRG 315-317 PRG 318.5	Certainement vers PRG 321	NON
Paléochenal possible (interprétation coupe)	NON	NON	NON	NON	NON (Embouchure)

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT FLUVIAL CAMARGUE INSULAIRE

DOCUMENT B

CHAPITRE N°5.1 : DESCRIPTION DES OUVRAGES EXISTANTS

SOMMAIRE

1. Digue du Défluent 53
1.1. Préambule 54
1.2. Présentation Générale 54
1.3. Décomposition fonctionnelle 60

2. Quais d'Arles 62
2.1. Quais de St Pierre et Trinquetaille 63
2.2. Quai de la Gare Maritime 81
2.3. Quai de la Gabelle 96
2.4. Décomposition fonctionnelle 101

3. Digue des Papèteries Etienne 103
3.1. Préambule 104
3.2. Présentation Générale 104
3.3. Décomposition fonctionnelle 115

4. Digue d'Emmaüs-Passerons 117
4.1. Préambule 118
4.2. Présentation Générale 118
4.3. Décomposition fonctionnelle 122

5. Digue de Passerons à Grande Montlong 125
5.1. Préambule 126
5.2. Présentation Générale 126
5.3. Décomposition fonctionnelle 142

6. Digue de Grande à Petite Montlong 144
6.1. Préambule 145
6.2. Présentation Générale 145
6.3. Décomposition fonctionnelle 151

7. Digue de Petite Montlong à la Louisiane 153
7.1. Préambule 159
7.2. Présentation Générale 159
7.3. Décomposition fonctionnelle 168

8. Digue de la Louisiane à l'embouchure 174
8.1. Préambule 176
8.2. Présentation Générale 176
8.3. Décomposition fonctionnelle 188

9. Digue du Défluent à Albaron 191
9.1. Préambule 199
9.2. Présentation Générale 199
9.3. Décomposition fonctionnelle 216

10. Digue d'Albaron 223
10.1. Préambule 224
10.2. Présentation Générale 224
10.3. Décomposition fonctionnelle 237

11. Digue d'Albaron au Mas d'Icard 239
11.1. Préambule 243
11.2. Présentation Générale 243
11.3. Décomposition fonctionnelle 247

12. Digue du Mas d'Icard (PRG 329.5) àu Tiki (PRG 336.5) 251
12.1. Préambule 256
12.2. Présentation Générale 256
12.3. Décomposition fonctionnelle 260

13. Digue du Tiki (embouchure) 265
13.1. Préambule 266
13.2. Présentation Générale 266
13.3. Décomposition fonctionnelle 268

1. DIGUE DU DEFLUENT (D1)

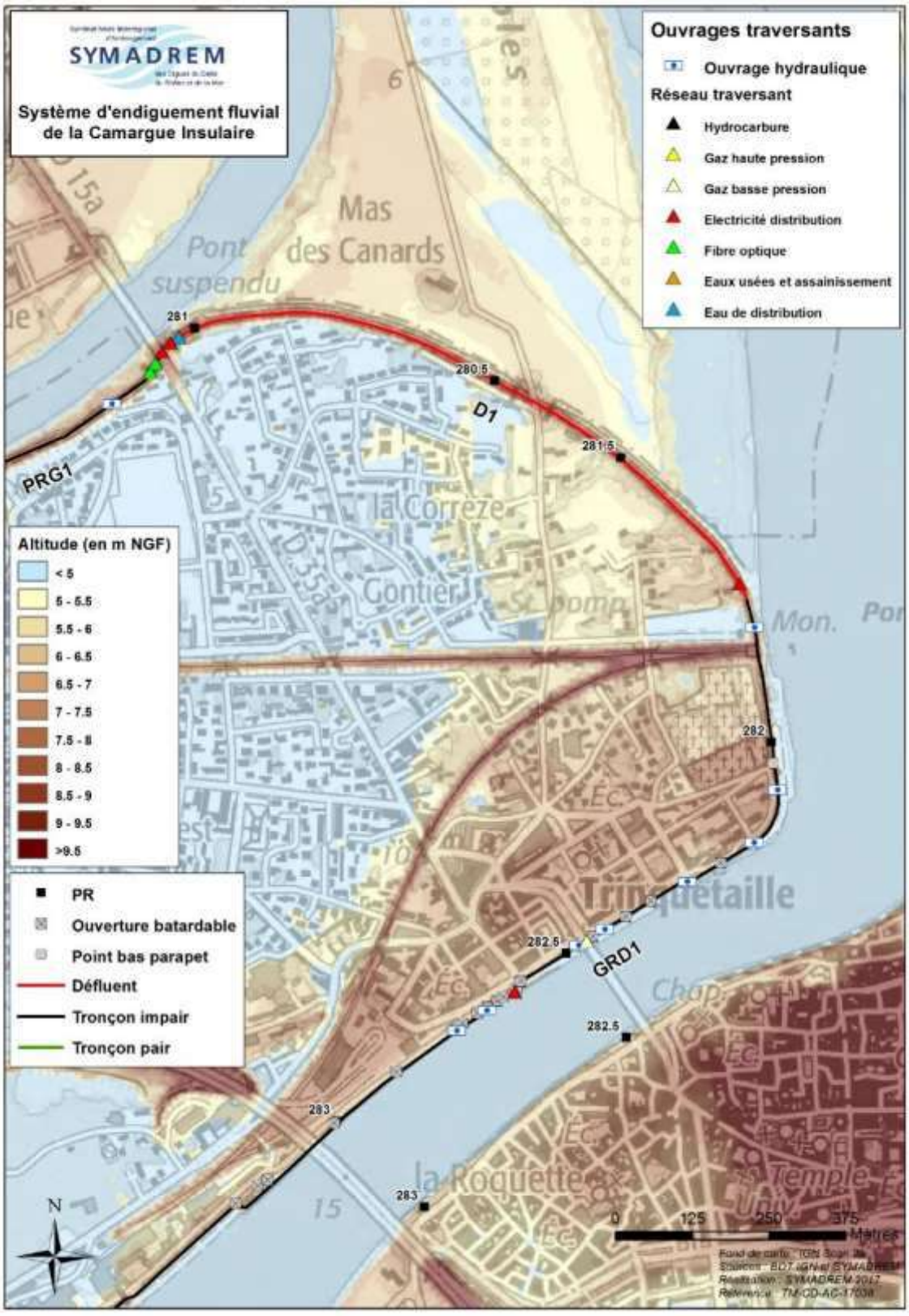


Figure 1. Plan de situation de la digue du défluent

1.1. PREAMBULE

La digue du défluent est située entre les PRG 281.17 et GRD 281.8. Elle a fait l'objet de travaux de confortement sous la maitrise d'ouvrage du SYMADREM suite à l'arrêté préfectoral du 17 août 1999. Ces travaux ont eu pour objet de confectionner une clé d'ancrage côté fleuve en amont de la digue existante et d'effectuer un épaississement par un matériau de type A1. La cote de sûreté de cet ouvrage correspond à la crue de période de retour de 1000 ans. Lors de l'étude de calage précis entre Beaucaire et Arles, la cote de la crue exceptionnelle a été estimée à 9.25 m NGF, tandis que la cote de la crête de digue est égale à 9.50 m NGF. La digue du défluent, dans son état actuel, répond aux objectifs de protection.

1.2. PRESENTATION GENERALE

1.2.1. Description historique

La digue du défluent constitue un ouvrage majeur de la lutte contre les inondations. Elle se trouve à la diffluence du Rhône et donne naissance au Petit Rhône et au Grand Rhône. Lors de la crue de 1856, une brèche d'environ 300 m s'ouvrait dans cette digue, juste dans l'axe du quartier Arlésien de Trinquetaille. La photographie ci-dessous illustre la digue du défluent en mai 1996.

Photo 1. Défluent - Mai 1996

Entre novembre 2000 et septembre 2001, l'ouvrage a été intégralement conforté. Des précédentes études géotechniques concernant le confortement de la digue du défluent ont essentiellement été réalisées en 1994 par la CNR et en 1996 par SCP id. Ces études montrent que sur l'ensemble du linéaire, le corps de la digue en place à cette date est constitué principalement d'un matériau limoneux plus ou moins sableux de classification B5 à A1.

Il s'agit de matériaux dont la perméabilité varie de 10^{-4} m/s pour les limons sableux à 5.10^{-6} m/s pour les limons argileux. Un perré maçonné est également présent sur le parement amont de cette digue. A la suite des travaux de confortement, cette digue et ce perré sont toujours en place. Un remblai en matériau A1 est venu épaissir l'ouvrage côté fleuve et l'ensemble a été rendu carrossable en crête par une piste de 4,50 m de large afin d'en assurer l'entretien et la surveillance. Une piste en pied du talus amont a aussi été créée pour les mêmes raisons.
Du pont de Fourques (PRG 281.17) jusqu'à la voie communale n°101, la hauteur de la crête de digue oscille entre 9.79 m NGF et 9.97 m NGF (avec un point bas au niveau du pont de

Fourques à 9.72 m NGF). De la voie communale n°101 jusqu'à la station hydrométrique de la CNR (GRD 281.8), la crête de digue oscille entre 9.63 m NGF et 9.81 m NGF (avec deux point bas à 9.56 et 9.39 m NGF). La digue atteint ses hauteurs maximales côté Petit Rhône et atteint ses hauteurs minimales aux abords de la station hydrométrique côté Grand Rhône. Le fruit des talus côté amont est de 1 pour 2, tandis que côté aval, il varie selon l'espace disponible entre 1 pour 1.5 et 1 pour 2.

Les travaux réalisés ont consisté à :

- Nettoyer l'ancien perré,
- Déposer un géotextile de liaison perré/remblai,
- Créer une clé d'ancrage amont,
- Mettre en place un géotextile de transition,
- Protéger le talus et le pied de talus amont par enrochements,
- Protéger l'extrémité de la digue au droit de la station hydrométrique par dépose d'enrochements (200-800 mm),
- Déposer un grillage anti-fouisseur recouvert d'une terre végétale sur le parement aval,
- Créer une piste carrossable en crête de 4,50 m et en pied amont,
- Sécuriser l'accès à la digue par mise en place de barrières et ponctuellement par des clôtures.

1.2.2. Sectorisation

Suite à la réalisation de ces travaux, la digue sur la totalité de son linéaire constitue un unique tronçon homogène de 1.21 km dont la description est donnée ci-après.

1.2.3. Description du tronçon

1.2.3.1. Raccordement

Coté Petit Rhône, la digue vient se lier à la maçonnerie du pont de Fourques.
Au niveau du grand Rhône, la liaison avec la pile du pont de Lunel (ou pont des Lions) a été intégrée aux travaux des quais de Saint Pierre, réalisés en 2010.

1.2.3.2. Description générale :

Pour le talus amont, une clé d'ancrage d'une ouverture de 2.50 m minimum de large et de 2 m environ de profondeur a été créée en amont de la digue déjà existante. Les matériaux sableux ont pu être ainsi retirés. La réalisation de cette clé d'ancrage a laissé apparaitre l'ancien perré qui a été nettoyé et conservé. Une recharge amont de matériau type A1 sur 1 m d'épaisseur est mise en place sur ce perré existant en interposant un géotextile MACMAT qui permet d'assurer une liaison mécanique avec le perré. Le géotextile est fiché sur le perré désherbé, mis en place de bas en haut et fiché à l'avancement afin de limiter les tractions dues au compactage du remblai. Ce géotextile présente la particularité de posséder une face tissée résistante qui permet son fichage sur un support dur et une face constituée de fibres lâches entremêlées permettant une adhérence avec le remblai. Le géotextile est ancré en crête de digue.

Photo 2. Défluent - Terrassement de la clef d'ancrage

Photo 3. Défluent - Compactage du matériau argileux A2

Photo 4. Défluent - Géotextile d'accroche

Un géotextile de transition a été mis en place sur les matériaux A1 remblayés. Une protection du talus et du pied de talus amont a été réalisée par enrochement (100-500 mm) formant une épaisseur de 80 cm à 1 m. Ces enrochements ont été recouverts de terre végétale. Une protection de l'extrémité de la digue au droit de la station hydrométrique a également été effectuée par dépose d'enrochements (200-800 mm) afin de limiter les effets d'érosion et d'affouillements.

Photo 5. Défluent - Géotextile et enrochements – station hydrométrique

Le talus aval est protégé par un grillage anti-fouisseurs sur lequel est mise en place une couche de terre végétale.

La crête de la digue est aménagée en piste circulable de 4.50 m de large. Elle est réalisée par une couche de grave non traitée d'épaisseur 12 cm. Une piste de roulement en pied du talus amont a été créée de la même façon.

Les photos suivantes illustrent l'état actuel de la digue du défluent.

Photo 6. Défluent - Talus amont actuel (2012)

Photo 7. Défluent - Crête actuelle – Janvier 2015

La coupe type des aménagements du tronçon est donnée sur la figure suivante.

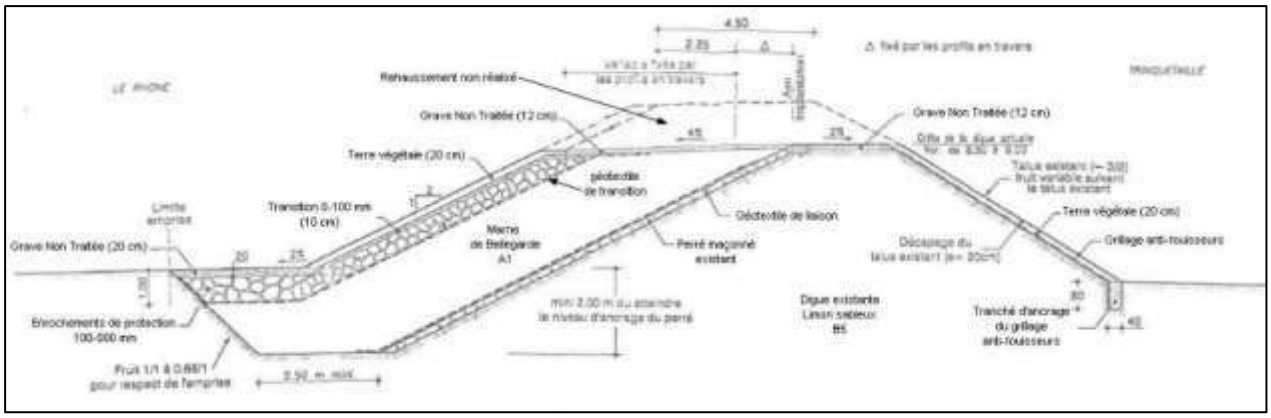


Figure 2. Défluent – Coupe-type

1.2.3.3. Caractéristiques des matériaux utilisés

La plupart des matériaux utilisés durant les travaux disposent de fiche d'agrément ou de planche d'essais. Les caractéristiques principales de chaque matériau sont résumées ci-après.

<u>Matériau sableux du corps de l'ancienne digue maintenue en place :</u> Ce matériau est de classe B5. Selon les essais géotechniques de 1994 de la CNR et de l'entreprise SCP id en 1996 les valeurs caractéristiques de ce matériau sont les suivantes :

Le d_{max} est compris entre 6 et 10 mm,
Le % d'éléments < 2 µm est compris entre 12 et 13 %,
Le % d'éléments < 80 µm est compris 28 et 32 %,

L'indice de plasticité varie entre 5 et 7,
La limite de liquidité varie de 20 à 28 %.

Matériau argileux A1 issus des déblais : C'est le matériau constitutif de la clé d'ancrage et du corps de digue amont. Ce matériau est de classe A1. Selon les essais géotechniques de 1994 de la CNR et de l'entreprise SCP id en 1996 les valeurs caractéristiques de ce matériau sont les suivantes :

Le d_{max} est compris entre 1 et 10 mm,
Le % d'éléments < 2 µm est compris entre 22 et 26 %,
Le % d'éléments < 80 µm est compris 70 et 73 %,
L'indice de plasticité varie entre 10 et 11,
La limite de liquidité varie de 29 à 31 %

Matériau argileux A1 : les « marnes » de Bellegarde : C'est également le matériau constitutif de la clé d'ancrage et du corps de digue amont. Il s'agit d'un matériau d'apport pour pallier au manque de matériau argileux A1 issus des déblais du site. Les marnes de Bellegarde sont en réalité des limons argileux sur-consolidés. La structure originelle est détruite lors de la mise en dépôt. Ses principales caractéristiques figurent dans le tableau ci-dessous qui a été extrait du dossier d'agrément de ce matériau.

Tableau 1. Défluent – Caractéristiques géotechniques des « marnes de Bellegarde »

"Marnes de BELLEGARDE"

Tableau de synthèse des caractéristiques géotechniques

		Moyenne essais antérieur	25/11/99	09/12/99	21/01/00			13/03/00	24/04/00	07/07/00	13/12/00	Moyenne générale
Identification					M1	M2	M3					
Teneur en eau	%	25	22.6					23.6	23.8		**26.8**	24.36
passant à 80µ	%	97	89					96	93		**95.0**	94.00
passant à 10µ	%										**43.0**	43
Valeur au bleu		1.95	2.7					1.98	2.2		**1.68**	2.10
Limite de liquidité	%										**41.2**	41.2
Indice de plasticité	%	11.2									**11.4**	11.3
Limite de retrait	%										**28.6**	28.6
Classification GTR		A1/A2	A2					A1	A1/A2		A1	
Essais de compactage PROCTOR Normal												
Teneur en eau OPN	%	17.20	21.00	19.50	16.50	16.50	18.80	17.20	18.50	18.90		18.23
Densité max OPN	T/m3	1.70	1.65	1.67	1.73	1.76	1.70	1.69	1.70	1.72		1.70
Essais mécaniques sur échantillons triturés												
Cu	kPa				40	30	28					
ϕu	°				35	19.5	19					
C'	kPa				0	0	0					
ϕ'	°				38	34	31					
Compacité correspondante	%				99	97	96					

Géotextile de liaison au perré MACMAT 20 : Géotextile tridimensionnel d'épaisseur 20 mm et de résistance à la traction de 2 kN/m.

Enrochements : Les enrochements proviennent de la carrière OLIVIER à Salon-de-Provence (13). Le matériau se classe dans la catégorie R2 de la norme NF P 11-300 de septembre 1992.

1.2.3.4. Suivi de chantier

Des contrôles de compactage au pénétromètre et de densification au gamma densimètre ont été réalisés pour vérifier la qualité du compactage. Le remblai a été mis en œuvre par couche de 40 à 50 cm et compacté au rouleau à pied dameur classé VP 4. Trois passes ont été nécessaires pour atteindre les objectifs fixés par le cahier des charges, soit une compacité moyenne supérieure à 97 %.
Des contrôles de compactage au gamma densimètre ont été réalisés pour vérifier la qualité du compactage. Le Proctor de référence est celui correspondant au matériau prélevé en cours d'exécution de la planche d'essai.

Photo 8. Défluent - Essai au gamma densimètre

La compacité requise étant de 97%, l'objectif est obtenu avec 3 passes. Le tableau suivant résume les principaux résultats :

Tableau 2. Défluent – Résultat des planches d'essai de compactage

Couche	Compactage	épaisseur de la couche	Teneur en eau moyenne %	Compacité moyenne %
1	4 passes avec vibration	0.50	18.6	97.7
2	3 passes avec vibration	+ 0.40	17.8	100.2
	1 passe supplémentaire		16.9	103.2
3	3 passes avec vibration	+ 0.40	19.5	101

Des essais de limites d'Atterberg ont également été effectués sur les marnes de Bellegarde une fois compactée. Les résultats figurent dans le tableau suivant :

Tableau 3. Défluent – Résultats des essais de limites d'Atterberg

	Essai 1	**Essai 2**
Wn : Teneur en eau naturelle %	20.5	19.2
Wl : Limite de liquidité au caune %	33.9	33.3
Wp : limite de plasticité au rouleau	23	22.7
IP / IC Indice de plasticité / Indice de consistance	10.9 / 1.22	10.6 / 1.33

1.2.4. Accessibilité

La digue du défluent comporte 3 accès. Un premier accès se trouve au droit du pont suspendu de Fourques (PRG 281.17), le deuxième à l'intersection de la digue et de la voie communal n°101 et le troisième se trouve au droit du pont des Lions (GRD 281.8). Ces accès sont fermés par des barrières DFCI pivotantes.

Tableau 4. Franchissements, Section Défluent

Nom	PM
Pont de Fourques	0
VC 101	650
Pont des Lions	1200

1.2.5. Ouvrages englobés

Aucun ouvrage hydraulique n'est présent sur ce tronçon de digue.
La digue est traversée par la voie communale n°101. A cette intersection, la crête de digue se trouve à 9.82 m NGF et ne présente donc pas de point bas.

1.3. DECOMPOSITION FONCTIONNELLE

1.3.1. Géométrie

Tableau 5. Synthèse de géométrie, tronçon Défluent

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	9,8	9,4	9,6	0,1
Cote de pied de digue aval	m NGF	7,3	5,7	6,3	0,6
Cote à 20m du pdav	m NGF	6,8	4,4	5,5	1,0
Cote de pied de digue amont	m NGF	6,1	3,1	5,3	1,0
Cote à 20m du pdam	m NGF	6,1	1,0	4,8	1,7
Hauteur de digue coté aval	m	4,0	2,3	3,3	0,7
Hauteur de digue côté amont	m	6,5	3,6	4,4	1,0
Fruit aval	L/V	2,6	1,6	2,0	0,4
Fruit amont	L/V	3,1	1,6	2,2	0,4
Largeur du ségonnal	m	426	25	204	134

1.3.2. Données hydrauliques

Tableau 6. Données hydrauliques, tronçon Défluent

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	6,1	5,7	3,7	3,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9
8500	7,0	6,6	2,7	2,9	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
9500	7,4	7,0	2,3	2,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,6
10500	7,8	7,4	2,0	2,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
11500	8,3	8,0	1,4	1,5	0,1	0,1	0,0	0,0	0,4
12500	8,6	8,3	1,1	1,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,3
14160	8,7	8,4	1,0	1,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,3

1.3.3. Etanchéité

En plus du masque amont en matériaux A2 qui est la principale barrière étanche, l'ancien perré permet également de limiter les écoulements.

1.3.4. Filtration-Drainage

La digue ne possède pas de système de filtration ou de drainage.

1.3.5. Stabilité

Le fruit aval est compris entre 1.5/1 et 2/1, ce qui est correct.
Le fruit amont est de 2/1. Le perré maçonné, maintenant compris en cœur de digue, améliore la stabilité du parement amont, un géotextile de liaison permet d'améliorer la résistance au frottement du contact remblais A2 et perré.
La présence d'une piste en pied sur l'ensemble du linéaire évite qu'il y ait un fossé, ce qui aurait été négatif.

1.3.6. Protection

Le talus amont est protégé par des enrochements. La protection aval, notamment contre les fouisseurs est assurée par un grillage anti-fouisseurs.

1.3.7. Evacuation

Il n'y a pas de secteur résistant à la surverse sur la digue du défluent compte tenu du calage de l'ouvrage.

1.3.8. Sécurité

L'intégralité de la crête est carrossable. Elle a actuellement une largeur variable, comprise autour de 4.5 m.
Tout le linéaire présente une piste de pied amont carrossable. Localement une route est présente en pied aval : sur 200m vers la VC101, coté Petit Rhône.

2. QUAIS D'ARLES (GRD1)

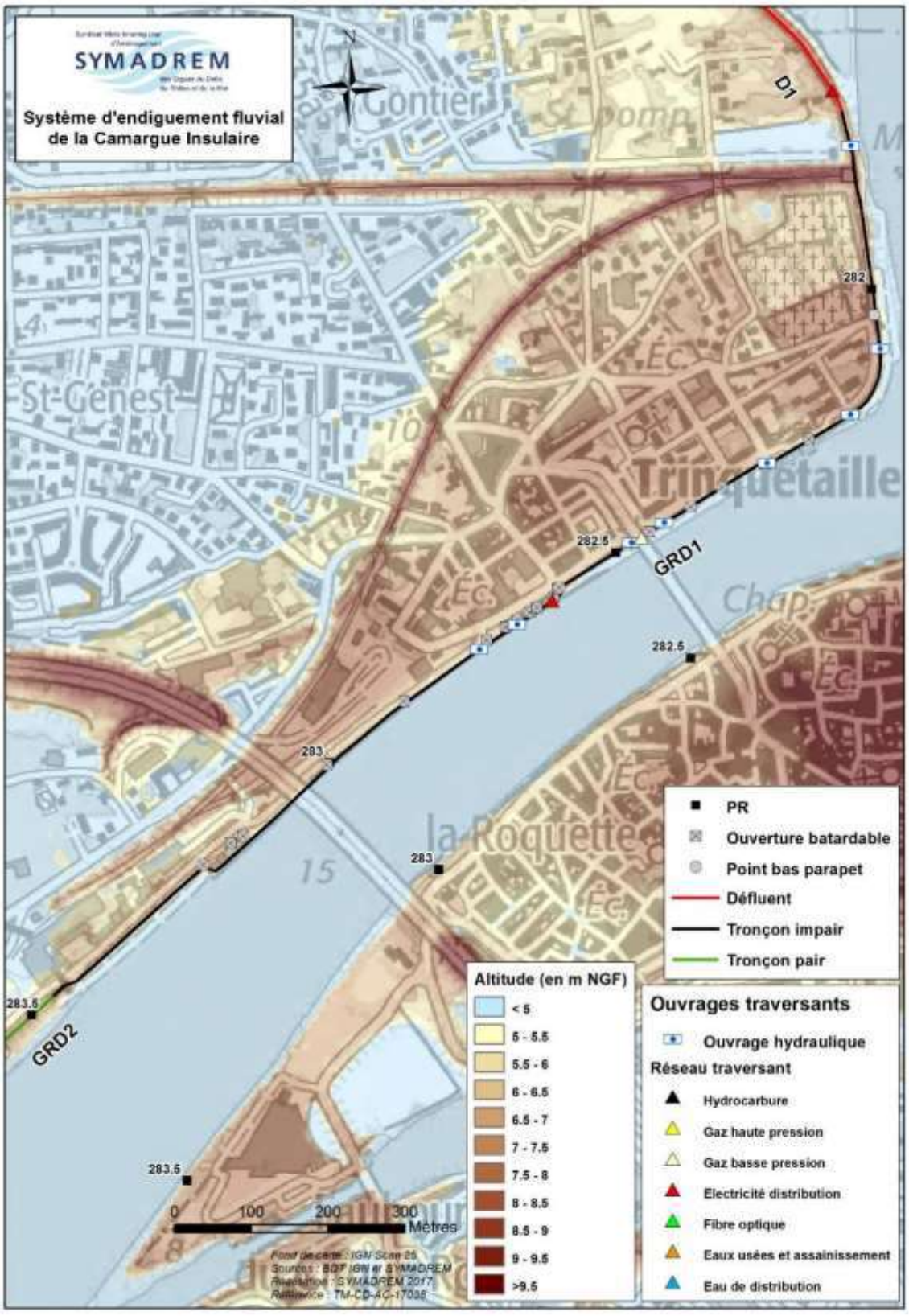


Figure 3. Plan de situation des quais d'Arles

2.1. QUAIS DE ST PIERRE ET TRINQUETAILLE

2.1.1. Préambule

Les quais Saint-Pierre et Trinquetaille sont situés entre les GRD 281.8 et 282.5. Ils ont fait l'objet de plusieurs campagnes de travaux de confortement sous la maîtrise d'ouvrage du SYMADREM entre 2009 et 2011.
Le SYMADREM ne prévoit pas de nouvelle intervention sur cet ouvrage dont l'état actuel permet d'assurer les objectifs de protection et de sécurité recherchés.

2.1.2. Présentation Générale

2.1.2.1. Description historique

Selon la nomenclature adoptée depuis l'étude de diagnostic des quais d'Arles réalisée en 2002, le quai de Trinquetaille recouvre les secteurs S4 et S5 et le quai Saint Pierre recouvre les secteurs S6, S7, S8.
Les secteurs S4, S5, S6 et S7 correspondent à la section de quai comprenant un double perré avec quai intermédiaire supportant un chemin de halage. Le secteur S8 correspond au secteur de la cale de mise à l'eau où le quai bas s'élargi singulièrement pour former une large plate-forme.
A ces secteurs, le secteur S8bis a été ajouté en 2007. Il correspond au quai en amont du secteur S8 avec pour limite amont la station hydrométrique de la CNR. Il comprend la culée rive droite du pont des lions.
En 2004, un confortement a été réalisé en urgence sur environ 20 m au droit de la halte fluviale suite à une fissuration du quai.
Entre 2009 et 2011, les ouvrages ont été intégralement confortés et restaurés. Aucun désordre n'est apparu depuis la réalisation des travaux. L'ouvrage est en bon état général.

Les travaux réalisés entre 2009 et 2011 ont consisté à :

- régénérer la fondation du quai et le protéger contre les affouillements : réalisation d'un rideau de palplanches en pied,
- rénover ou reconstruire le perré inférieur selon son état,
- agrémenter le terre-plein du quai inférieur par une dalle en béton désactivé,
- localement améliorer des ancrages pour le perré supérieur,
- créer ou moderniser les batardeaux,
- mettre en sécurité les ouvrages traversants.

2.1.2.2. Sectorisation

Suite à la réalisation de ces travaux, les quais de Saint-Pierre et de Trinquetaille se composent de 3 sous-tronçons homogènes dont la découpe en tronçon et la description sont données ci-après.

Figure 4. Quais Saint-Pierre/Trinquetaille – Sous-Tronçons

Le tableau suivant présente les spécificités propres à chaque tronçon.

Tableau 7. Sectorisation Quais Saint-Pierre/Trinquetaille

Tronçon	PR	Quai bas	Quai haut	Terre-plein	Exutoires	Batardeaux
1	281.8 au 282.05	Palplanches Enrochements Maçonneries restaurées Béton fibré	Piste de crête	Aucun terre-plein	1	0 (1 ouverture non-batardable)
2	282.05 au 282.1	Palplanches Enrochements Maçonneries restaurées Béton fibré Béton désactivé	Maçonneries restaurées Injections (mur poids)	Béton désactivé	2	1
3	282.1 au 282.5	Palplanches Enrochements Maçonneries restaurées Béton fibré	Maçonneries restaurées Injections (mur poids)	Béton désactivé	3	9

Total	6	10

La description des tronçons est donnée ci-après.

2.1.2.3. Description des tronçons

Description générale :

Tronçon 1 : secteur S8 bis

Le secteur S8bis est un ouvrage en remblai comprenant un unique grand perré. Il s'étend du GRD 281.8 (au droit de la station hydrométrique de la CNR) jusqu'au GRD 282.05, soit 250 ml environ.
Sur une petite partie du linéaire, un rideau de palplanches de type PU8 de 7 m de long dont la cote supérieure est de 2 m NGF a été réalisé en 2003 sous maîtrise d'œuvre DDE. Le rideau comprenait également une poutre de couronnement en béton armé.
En 2009, l'ouvrage a été profondément repris avec :

- après démolition des parties du perré les plus dégradées, le reprofilage du talus côté fleuve au moyen de ballast ensuite revêtu d'un masque en béton fibré,
- la restauration (rejointoiement) ou la reconstruction du perré,
- la prolongation du rideau de palplanches existant étendu sur l'ensemble du linéaire (type PU11R nuance E360 de 6 m de longueur fichée jusqu'à –5 m NGF) ; les enrochements sont venus en butée contre le rideau,
- la réalisation d'un massif en enrochements en pied qui permet de protéger le pied, d'améliorer la stabilité et de lisser la géométrie au raccordement au secteur S8,
- la reprise de la crête et du talus côté terre de manière rendre la digue carrossable ; cette action a localement nécessité un soutènement en gabion côté terre au droit d'une habitation,
- la protection du talus aval par un grillage anti-fouisseur nappé de terre végétale enherbée.

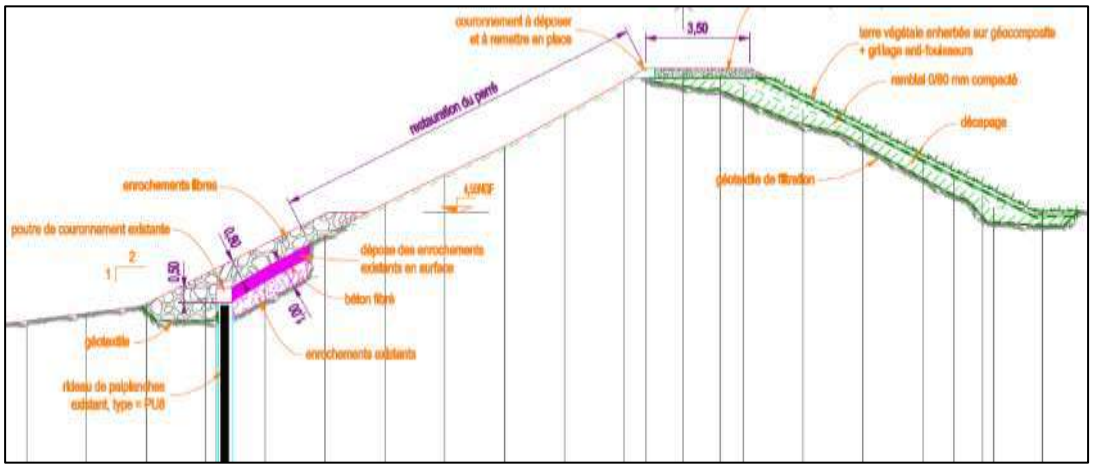


Figure 5. Quais Saint-Pierre/Trinquetaille – Tronçon 1 - Coupe-type 1

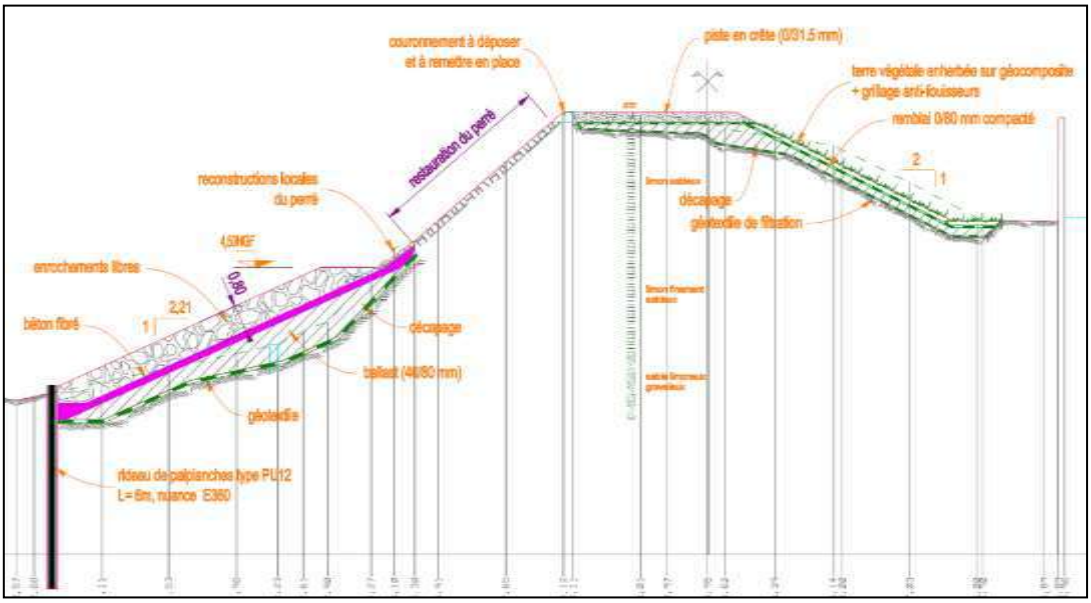


Figure 6. Quais Saint-Pierre/Trinquetaille – Tronçon 1 - Coupe-type 2

Les photos ci-dessous illustrent le tronçon 1 avant et après travaux de confortement.

Photo 9. Quais St-Pierre/Trinq. – Tronçon 1 – 1999 (Avant)

Photo 10. Quais St-Pierre/Trinq. – Tronçon 1 – 2009 (Aprés)

Photo 11. Quais Saint-Pierre/Trinquetaille – Tronçon 1

A l'occasion des travaux, des terrassements ont été réalisés afin de permettre la circulation depuis la crête du secteur S8 vers la crête du secteur S8bis en franchissant le remblai SNCF débouchant sur la pile du pont des Lions.

Tronçon 2 : secteur S7 et S8 : cale de mise à l'eau

Le tronçon 2 comprend la cale de mise à l'eau ainsi que le quai supérieur lui référant. Ce tronçon s'étend du GRD 282.05 au GRD 282.1, soit 50 ml environ.
Les figures suivantes présentent les travaux réalisés au droit du secteur S7 et S8.

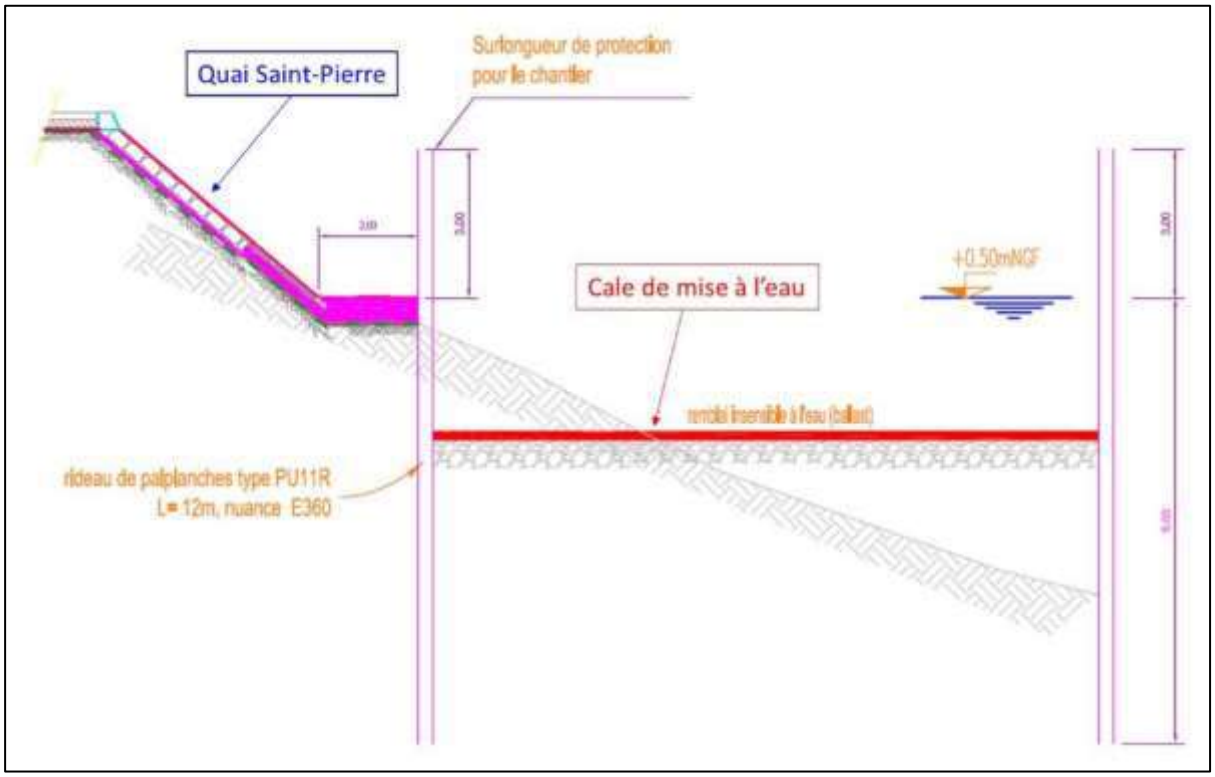


Figure 7. Quais Saint-Pierre/Trinquetaille – Tronçon 2 – Coupe type 2

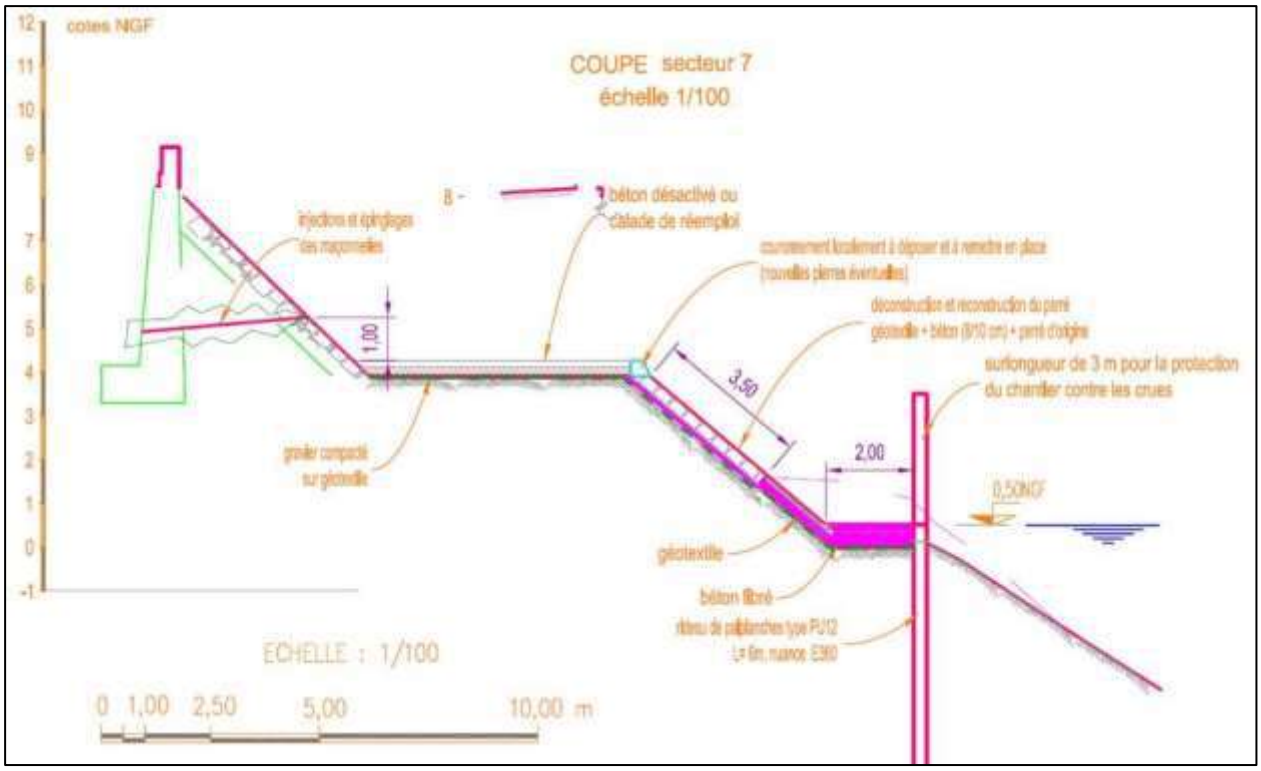


Figure 8. Quais Saint-Pierre/Trinquetaille – Tronçon 2 – Coupe type (secteur S7)

La reprise de l'ouvrage a été profonde avec en particulier la déconstruction du quai bas qui a été reconstruit selon un tracé en plan modifié en supprimant la grande cale de mise à l'eau (deux cales ayant été restaurées plus en aval).

En aval du pont des Lions :

- les maçonneries du perré supérieur ont été restaurées (nettoyage, rejointoiement et injection de fissure),
- le vaste terre-plein séparant les deux talus a été recouvert d'une dalle en béton désactivé en surface,
- le perré a été reconstruit en maçonnant des pierres sur un talus revêtu de béton fibré,
- un rideau de pied (type PU11R nuance E360 de 6 m de longueur fiché jusqu'à –5,5 m NGF) a été fiché en pied ; ce rideau a été réalisé dans la continuité du rideau réalisé en amont du pont des Lions.

Ces dispositions ont été reconduites en aval : sur l'ensemble du quai de Trinquetaille jusqu'au raccordement avec le quai de la Gare Maritime c'est à dire sur les secteurs S4, S5, S6.

Photo 12. Quais St-Pierre/Trinq : Cale de mise à l'eau (Tronçon 2) - 2008 (avant)

Photo 13. Quais St-Pierre/Trinq : Cale de mise à l'eau (Tronçon 2) – 2009 (après)

Photo 14. Quais St-Pierre/Trinq : Détail du pied de la cale de mise à l'eau (Tronçon 2)

Photo 15. Quais St-Pierre/Trinq : Raccordement entre tronçon 1 et 2 pendant les travaux de 2009

Tronçon 3 : secteur S4, S5, S6.

Ce dernier tronçon s'étend du GRD 282.1 au GRD 282.5. Les dispositions sur ce tronçon sont les mêmes que celle du tronçon 2 précédemment décrit. La figure suivante présente les travaux réalisés au droit du secteur S4, S5, S6.

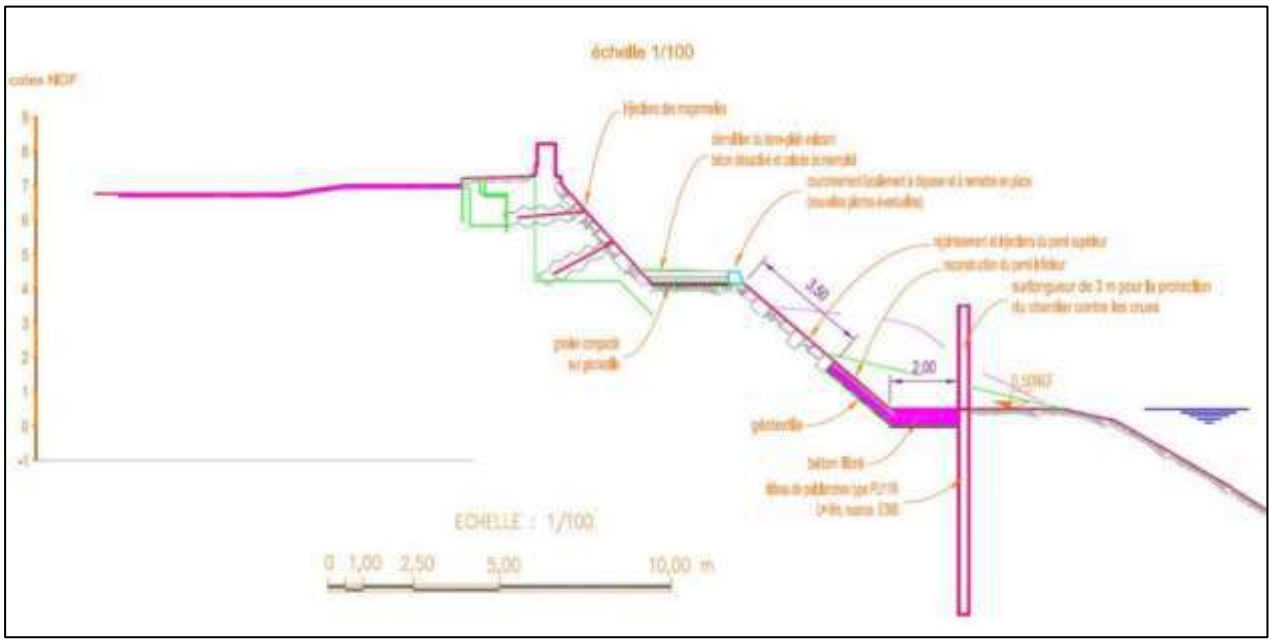


Figure 9. Quais Saint-Pierre/Trinquetaille – Tronçon 3 – Coupe type (secteur S4, S5, S6)

Les photographies suivantes illustrent le tronçon 3 avant et après travaux de confortement.

Photo 16. Quais St-Pierre/Trinq : Tronçon 3 (S4, S5, S6) – 2009 (avant)

Photo 17. Quais St-Pierre/Trinq : Tronçon 3 (S4, S5, S6) – 2009 (pendant)

Photo 18. Quais St-Pierre/Trinq : Tronçon 3 (S4, S5, S6) – 2010 (après)

Points singuliers des secteurs S4, S5, S6, S7, S8

Quai supérieur sur secteur S6 et S7

Ces deux secteurs constituent une partie du tronçon 2 (aval de la cale de mise à l'eau) et la partie amont du tronçon 3. Outre les travaux sur la partie inférieure, les deux maçonneries (perré et mur vertical) ont été rendues solidaires au moyen d'ancrage (cf. Figure 9) afin de s'approcher de la sécurité offerte par une structure poids à l'ouvrage et prévenir un glissement du talus à la décrue.

Les ancrages sont constitués par des barres en acier de 25 mm (Fe 510) insérés dans des forages de diamètre 64 mm. Ils sont réalisés à une hauteur de 1 m à l'horizontale. La longueur des ancrages est de 4 m. Le volume de coulis par ancrage est compris entre 175 et 350 L (pour 200 L prévu). L'effort d'arrachement minimum mobilisable a été estimé à 3,8 T par ancrage.

Photo 19. Quais Saint-Pierre/Trinquetaille – Point singulier – Tirant d'ancrage

Quai supérieur sur secteur S4 et S5 (tronçon 3)

Sur les secteurs S4 et S5 du tronçon 3 (320 ml), la structure du quai supérieur a pu être appréciée au moyen de reconnaissances géotechniques réalisées en 2007/2008. Le quai est un ouvrage poids au profil triangulaire de 3 à 4 m de hauteur.

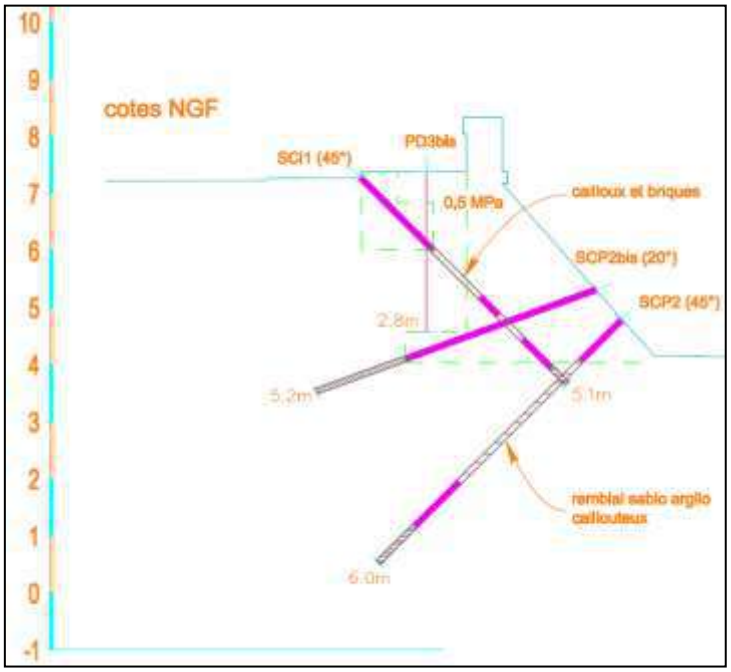


Figure 10. Quais Saint-Pierre/Trinquetaille – Point singulier – Reconnaissances géologique

Ce mur a été injecté au moyen de forage lors des travaux réalisés en 2009 afin d'améliorer sa densité, ses caractéristiques mécaniques et son étanchéité. Les forages ont été réalisés selon deux files (une haute et une basse) avec un entraxe de 2 m entre chaque forage d'injection sur chaque file. Les deux files ont été forées en quinconce. La file inférieure comprend 172 forages, la file supérieure 166.

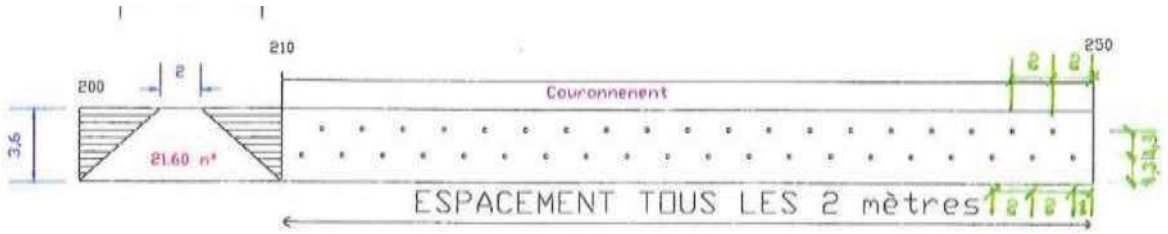


Figure 11. Quais Saint-Pierre/Trinquetaille – Point singulier – Forages d'injection

Le file haute est située environ 2,4 m au-dessus du quai bas et la file basse 1,2 m au-dessus du quai bas.
Le coulis injecté avait une densité de 1,5 et la consommation en coulis a été de 330 à 470 L par forage sur la ligne basse (pour 300 L prévu) et de 330 L par forage sur la ligne haute (pour 300 L prévu).
Cales de mise à l'eau du secteur S7 (tronçon 2)
Compte tenu de la profondeur d'eau plus importante que la moyenne au voisinage immédiat de la cale de mise à l'eau du secteur S7, il a été décidé de tenir en tête le rideau au moyen de tirants forés de type Ischebeck Titan 20/40 espacés de 1,2 m. Les tirants sont inclinés à 30° par rapport à l'horizontale et ont une longueur de 10 m.
La solution adoptée a fait l'objet d'une note de calcul réalisée par l'entreprise dans le cadre des études d'exécution. Cette note est disponible dans le DOE (Dossier des Ouvrages Exécutés).

Caractéristiques des matériaux utilisés

Les matériaux utilisés pour la réalisation des travaux disposent de fiche d'agréments et leurs mises en œuvre sont détaillées dans des procédures de réalisation. Des essais de convenance ont été réalisés (béton, micropieux,…).

Suivi de chantier

Sur l'ensemble des tranches travaux des réparations des quais, des comptes rendus hebdomadaires de réunion ont été rédigés ainsi que des fiches de suivis de travaux. Des photos illustrent l'avancée des travaux.

2.1.2.4. Accessibilité

La partie haute du quai se trouve en ville le long d'une route et est donc intégralement accessible.
Le quai bas est carrossable est accessible aux véhicules à deux endroits ; 5 escaliers sont également utilisables par les piétons.

Tableau 8. Franchissements, Section Quais St Pierre et Trinquetaille

Nom	GRD

Cimetière	282.04
Porte des Curatiers	282.23

2.1.2.5. Ouvrages englobés

Six ouvrages traversants sont présents sur le quai. Les noms des ouvrages hydrauliques (OH1, OH3…) ont été gardés pour rester conforme à la nomenclature adoptée depuis l'étude de diagnostic des quais d'Arles réalisée en 2002.

Tableau 9. Quais Saint-Pierre/Trinquetaille – Ouvrages englobés

Numéro	Gestionnaire et référence	Localisation	Dimensions	Usage	Etat	Fiche OT
OH1	SEA	S8bis (tronçon 1)	Buse 1800 mm	Exutoire pluvial	Conforté en 2010 (curage, clapet, grille)	GRD_EPL_281,83
OH3	Mairie	S7 (tronçon 2)	Buse 300mm	Exutoire pluvial	Conforté en 2010 (changement de canalisation + regard et clapet)	GRD_EPL_282,06
OH5	Mairie E5	S7 (tronçon 2)	Buse 300mm	Exutoire pluvial	Conforté en 2010 (changement de canalisation + regard et clapet)	GRD_EPL_282,13
OH6 (Porte des Curatiers)	Mairie E13	S6 (tronçon 3)	Buse 300mm	Exutoire pluvial	Conforté en 2005 (chemisage + nouvelle vanne)	GRD_EPL_282,23
OH7	Mairie E14	S5 (tronçon 3)	Buse 400mm	Exutoire pluvial	Conforté en 2010 (changement de canalisation + regard et clapet)	GRD_EPL_282,41
OH8	Mairie E15	S4 (tronçon 3)	Canal voûté et ovoïde	Exutoire pluvial	Conforté en 2010 (reconstruction + regard et clapet)	GRD_EPL_282,47

Photo 20. Quais Saint-Pierre/Trinquetaille – Ouvrage hydraulique OH1 (tronçon 1)

Le schéma suivant, issu du dossier de récolement, indique le mode de confortement retenu pour les ouvrages traversants OH3, 5, 7 et 8.

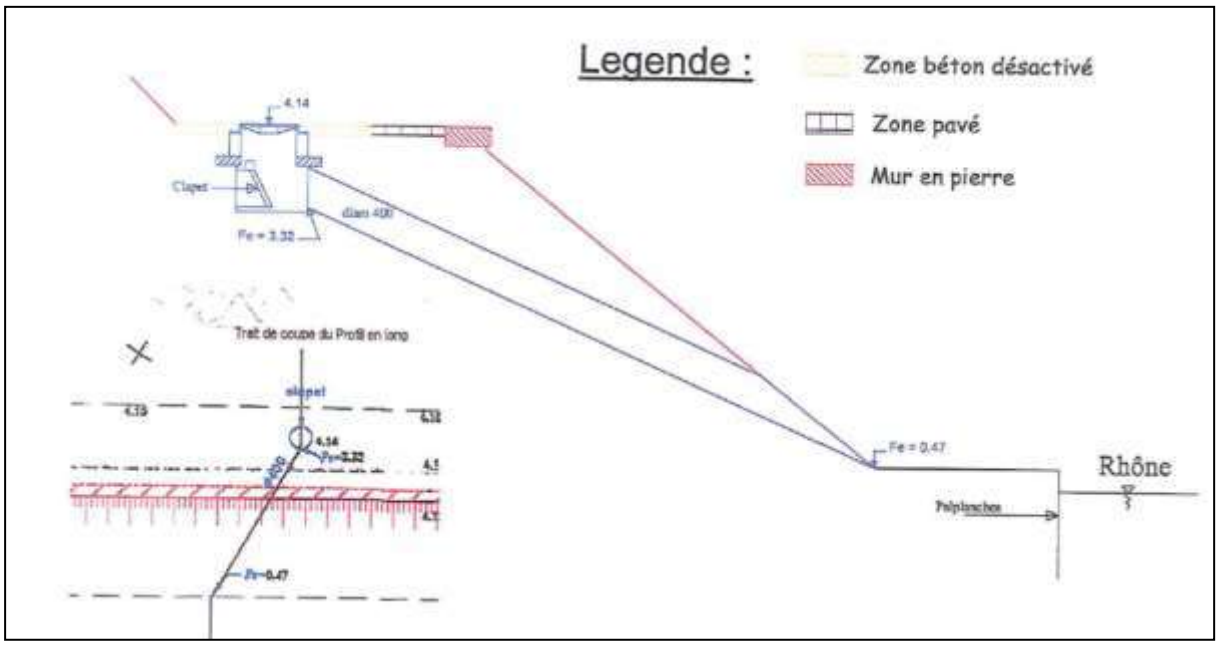


Figure 12. Quais Saint-Pierre/Trinquetaille – Mode de confortement des OH3, 5, 7, 8.

La porte des Curatiers correspond à la transition entre les secteurs S5 et S6 (tronçon 3). Il s'agit d'un ouvrage poids maçonné.
Il comprend en outre :

- le batardeau B08, plus important batardeau des quais d'Arles, dont il constitue l'une des culées,
- l'ouvrage traversant OH6 qui passe sous le mur poids et dont la dégradation a été estimée à l'origine des désordres (départ de matériaux sous le mur par les fissures affectant l'ouvrage sous le mur poids).

Photo 21. Quais Saint-Pierre/Trinquetaille – Tronçon 3 – Porte des Curatiers

L'ouvrage a subi des désordres suite à la crue de décembre 2003 (ouverture de fissures centimétriques et basculement perceptible vers le fleuve…). Suite à cette constatation, le SYMADREM a engagé des travaux de confortement réalisés en 2004.
Dans le cadre de ces travaux, les interventions suivantes ont été réalisées :

- l'épinglage des maçonneries de part et d'autre des fissures,
- la réfection des maçonneries,
- le colmatage et l'injection des fissures,
- la reprise en sous œuvre par 10 micropieux de 18,5 m de longueur dont 3 inclinés,
- le traitement de l'ouvrage traversant (OH6) par chemisage de la conduite et remplacement de la vanne.

2.1.2.6. Ouvertures dans le parapet (batardables et non batardables)

Avant les travaux réalisés entre 2009 et 2011, dix-sept batardeaux étaient présents en crête de quai, au travers du parapet ou au travers du quai supérieur pour le batardeau B08 (porte des Curatiers).
Lors des travaux, 10 d'entre eux ont été modernisés (batardeaux manu portables en aluminium) et 7 ont été définitivement condamnés. Il s'agit principalement d'accès piéton par des escaliers dont l'usage était déjà interdit par des grilles métalliques.
Les caractéristiques géométriques des batardeaux sont les suivantes :

- largeur comprise entre 3 et 5 m pour ceux permettant l'accès de véhicules sur les quais,
- largeur comprise entre 0,8 et 1,6 m pour ceux permettant l'accès de piétons sur les quais,
- hauteur généralement comprise entre 1,1 et 1,6 m à l'exception du batardeau de la porte des Curatiers dont la hauteur est de 2,7 m.

Les implantations de ces ouvertures figurent sur la carte suivante :

Figure 13. Ouverture sur les Quais St Pierre et Trinquetaille

Le tableau ci-après précise :

- la dénomination et le type (batardable ou non batardable) des ouvertures,
- le Point Repère du SYMADREM (GRD),
- les largeurs et hauteurs maximales des ouvertures,
- la cote du seuil de l'ouverture et la cote du parapet.

Tableau 10. Quais Saint-Pierre/Trinquetaille – Synthèse des batardeaux

Nom Ouvrage	Type d'ouverture	GRD	Largeur ouverture (m)	Hauteur ouverture (m)	Cote du seuil (NGF)	Cote parapet (m NGF)
S7-B1	non batardable	282,03	0,00	0,00	9,10	9,35
T10	batardable	282,18	1,60	1,30	7,59	8,89
T9	batardable	282,23	1,60	1,30	7,56	8,86
T1	batardable	282,29	5,00	2,70	5,91	8,72
T8	batardable	282,35	1,60	1,30	7,32	8,62
T7	batardable	282,40	3,00	1,30	7,23	8,53
T6	batardable	282,45	3,00	1,30	6,96	8,26
T5	batardable	282,48	3,15	1,12	7,10	8,22
T2	batardable	282,59	4,20	1,50	6,59	8,21
T3	batardable	282,59	1,25	1,50	6,59	8,21

Le principe de confortement a consisté à :

- sécuriser le bâti reprenant les efforts lors de la fermeture des batardeaux (radier en béton armé et culée en maçonnerie),
- remplacer les madriers en bois par des éléments en aluminium (poteaux et poutrelles) afin de les rendre manu portables.

Deux batardeaux nécessitent un poteau intermédiaire (T1 et T2).

Seule la porte des Curatiers est équipée de jambe de force au niveau du poteau intermédiaire.

On notera que les poutrelles de certains batardeaux sont de mêmes dimensions facilitant ainsi la gestion et la mise en œuvre.

L'extrait de plan suivant présente le dispositif au droit de la porte des Curatiers.

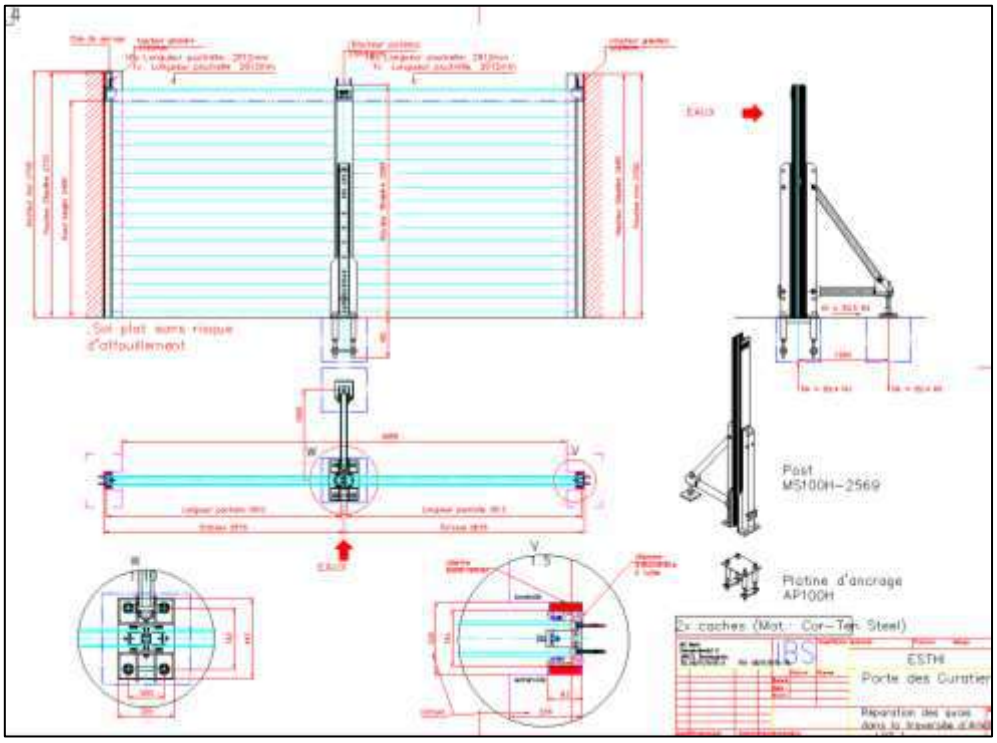


Figure 14. Quais Saint-Pierre/Trinquetaille – Plan du batardeau de la porte des Curatiers

Les massifs de fondation ont fait l'objet de notes de calcul de dimensionnement. L'extrait suivant précise les dimensions et le ferraillage de la fondation du poteau intermédiaire du batardeau de la porte des Curatiers.

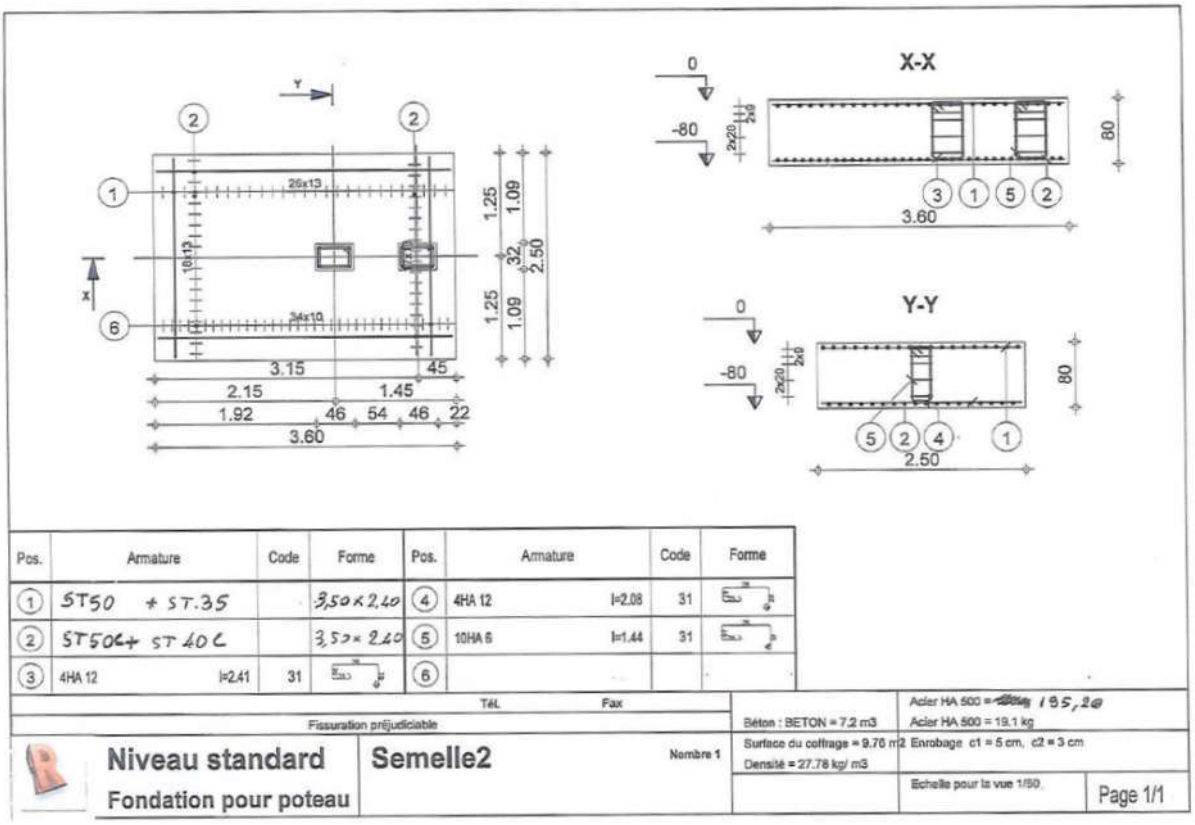


Figure 15. Quais Saint-Pierre/Trinquetaille – Semelle de fondation du batardeau Curatiers

Photo 22. Quais Saint-Pierre/Trinquetaille – Portes des Curatiers

2.2. QUAI DE LA GARE MARITIME

2.2.1. Préambule

Le quai de la gare maritime est situé en rive droite du Grand Rhône, entre les GRD 282.5 et 283.2. La partie basse du quai a fait l'objet de deux campagnes de confortement en 2003 et 2005 sous la maitrise d'ouvrage du SYMADREM. Dans le cadre des 5ème et 6ème tranches de travaux sur les quais d'Arles, les travaux réalisés sur le quai bas ont été parachevés et la partie supérieur du quai a été rehaussée afin d'atteindre les objectifs de protection et de sécurité recherchés. Lors de l'étude de calage précis entre Beaucaire et Arles, la cote de la crue exceptionnelle est estimée à 7.49 m NGF, tandis que la cote des parapets est comprise entre 7.60 m NGF et 8.50 m NGF. Le quai de la gare maritime, dans son état actuel, répond aux objectifs de protection.
Le quai de la gare maritime présente une géométrie homogène sur l'ensemble du linéaire (630 m environ). Il recouvre les secteurs :
Du GRD 282.5 au droit des bâtiments de VNF jusqu'au GRD 283.0,
Du GRD 283.0 au GRD 283.5 environ au droit de la station d'avitaillement conforté en 1981.

2.2.2. Présentation Générale

2.2.2.1. Description historique

Les travaux ont consisté à poser un rideau de palplanches en pied complété sur une partie par des micropieux et des enrochements dans le lit du Rhône, construire un mur poids en pierres maçonnées, rénover le parement dégradé du quai qui a été revêtu d'un masque en béton armé scellé à la résine par des tirants, rehausser la partie supérieur du quai, fermer les accès par des batardeaux aluminium amovibles.

2.2.2.2. Sectorisation

Suite à la réalisation des travaux, 3 sous-tronçons ont pu être identifiés. La découpe de ces tronçons est donnée sur la figure suivante :

Figure 16. Quai gare maritime – Sous-Tronçons

Le tableau suivant présente les spécificités propres à chaque tronçon.

Tableau 11. Sectorisation Quai de la gare maritime

Tronçon	PR	Quai bas	Quai haut	Terre-plein	Exutoires	Batardeaux
1	282.50 au 282.65	Palplanches Micropieux Enrochements Maçonneries restaurées	Mur béton armé en L / mur béton armé en T	Dalle en béton désactivé de 20 cm en surface	2	8
2	282.65 au 283.15		Mur auto stable mixte en béton armé et maçonnerie		0	3
3	283.15 au 283.20	Palplanches Enrochements Maçonneries restaurées	Mur béton armé en L	Aucun terre-plein	0	2
Total batardeaux						13

La description des tronçons est donnée ci-après.

2.2.2.3. Description des tronçons

Description générale :

Tronçon 1 : Au droit des locaux VNF : bâtiment et parking du GRD 282.50 au GRD 282.65

La protection des bâtiments VNF d'Arles est constituée par un mur en L en béton armé coulé en place, sur semelle en béton armé fondée hors gel à -50 cm par rapport au terrain naturel. Le voile est réalisé au plus proche du bâtiment pour limiter l'emprise de l'aménagement sur la crête de quai. Il est complété par la réalisation d'un enduit ton pierre pour permettre une meilleure intégration paysagère. La réalisation du mur est accompagnée d'aménagements permettant la continuité des usages et la mise en sécurité des éléments pour la crue de référence :

- l'ensemble des appuis de fenêtre situés sous la cote de protection (Q_{1000}) avec revanche de 0,50 m sont rehaussés, avec modification des huisseries,
- mise en place de trappes étanches au droit des ouvertures de soupiraux,
- mise en place de batardeaux amovibles en aluminium au droit des portes et portails d'accès.

Quant à la protection du parking des services VNF, elle est constituée d'un mur en T en béton armé coulé en place, sur semelle en béton armé fondée hors gel à -50 cm par rapport au terrain naturel, avec bèche d'ancrage amont permettant d'éviter les phénomènes de glissement. Le voile est complété par la réalisation d'un enduit ton pierre pour permettre une meilleure intégration paysagère et d'une clôture scellée sur l'arase du voile pour atteindre une hauteur de fermeture de 2 m minimum. Un batardeau a également été constitué au droit du raccordement avec le hangar amont pour permette le passage de véhicules entre la zone de parking et le terre-plein du quai.

Pour ces deux ouvrages de protection, bâtiments et parking, les maçonneries du quai bas ainsi que les grands escaliers sont entièrement restaurées, tandis que les petits escaliers présents avant les travaux n'existent plus. Un rideau de palplanches PU16 S240 GP de longueur 6 m a été dressé en pied. Le parement du quai bas est complété par des micropieux inclinés ou verticaux. Les armatures des micropieux sont des tubes de 89.5 mm de diamètre et de 9.5 mm d'épaisseur. Ils sont scellés dans des forages de 150 mm. Des essais de traction ont été réalisés en préalable aux travaux pour adapter les longueurs au contexte géotechnique variable. La coupe-type du confortement par micropieux exploitant les deux techniques (micropieux inclinés et verticaux) est présentée sur la figure suivante.

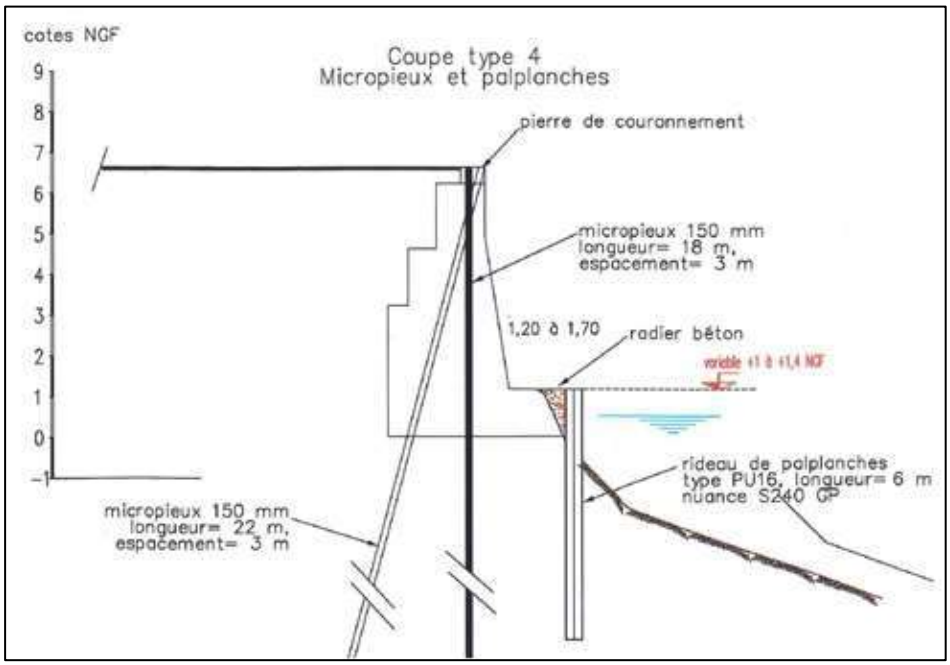


Figure 17. Quai gare maritime – Tronçon 1 – Coupe type des micropieux mis en place

L'étanchéité du terre-plein entre le quai bas et le voile en béton armé a été réalisée avec une dalle en béton désactivé de 20 cm d'épaisseur.
Les coupes suivantes illustrent le principe retenu.

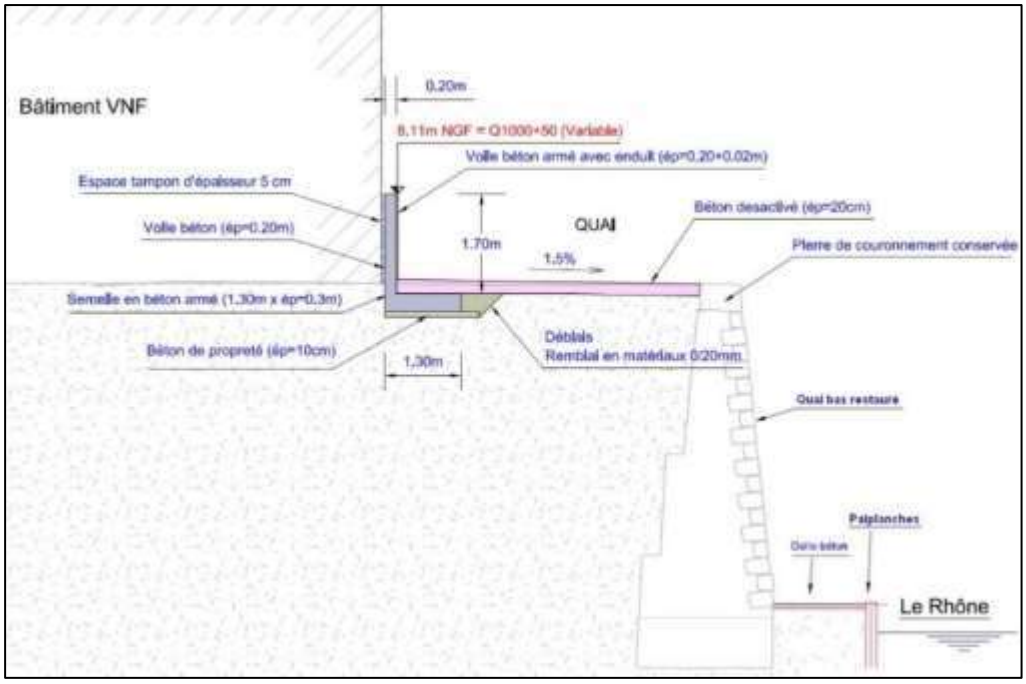


Figure 18. Quai gare maritime – Tronçon 1 – Coupe-type au droit des bâtiments VNF

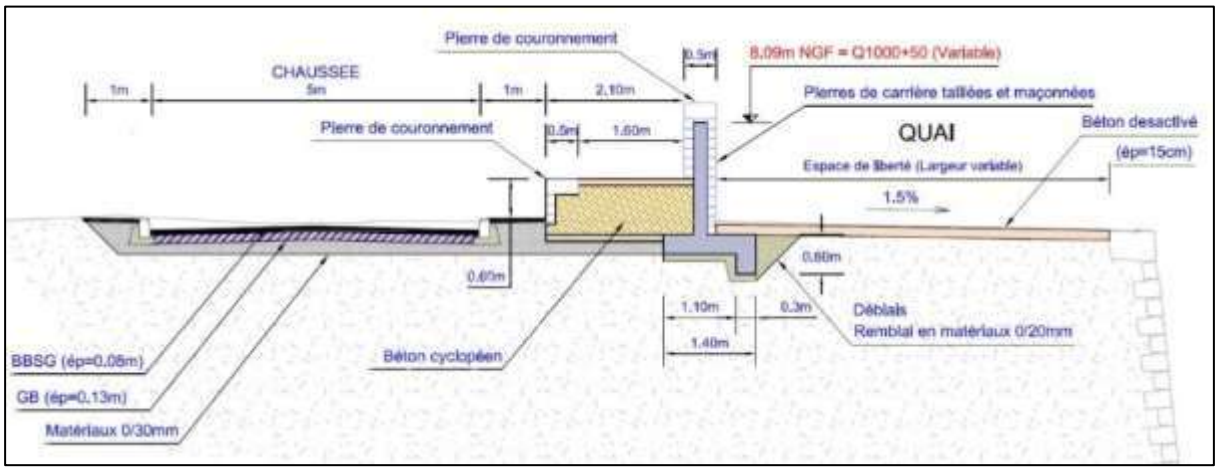


Figure 19. Quai gare maritime – Tronçon 1 – Coupe-type au droit du parking des services VNF

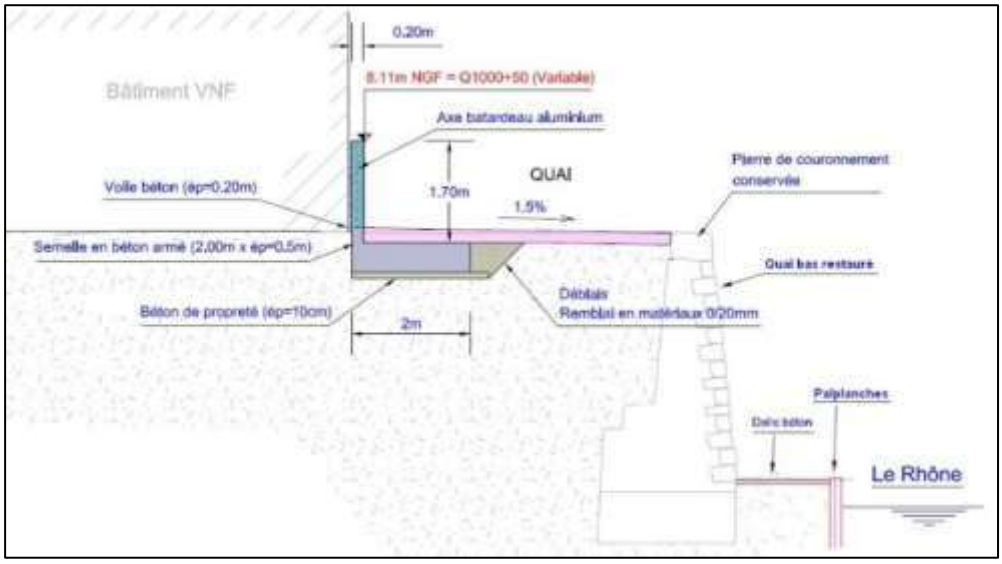


Figure 20. Quai gare maritime – Tronçon 1 – Coupe-type du quai avec batardeau

Tronçon 2 : des installations VNF à la station d'avitaillement du GRD 282.65 au GRD 283.15

Sur ce tronçon de 500 ml environ, la protection contre les crues du Rhône est assurée par la réalisation d'un mur auto stable mixte en béton armé et maçonnerie, construit selon les caractéristiques du mur poids historique présent sur les parties hautes des différents quais et calé à la cote de protection.

Photo 23. Quai gare maritime - Travaux : clef d'ancrage, géotextile, GNT compactés (2012)

Un mur de rehausse est placé à 5 m minimum de la bordure du quai, permettant de disposer d'un espace d'entretien et de promenade au bord du fleuve.

Photo 24. Quai gare maritime - Travaux : Mur de rehausse (2013)

Photo 25. Quai de la gare Maritime (2017)

Sur la partie aval, l'axe du mur est progressivement écarté de la bordure de quai vers le point de raccordement à l'angle de la clôture de la station d'avitaillement, correspondant également à un point de raccordement sur la partie haute du quai de la Gabelle. Deux batardeaux ont été constitués sur le linéaire de protection pour permettre un accès au bord du fleuve. Une nouvelle chaussée a été constituée, avec réseau d'assainissement pluvial drainé vers l'exutoire pluvial n°17 de la ville d'Arles. L'implantation de l'ouvrage côté fleuve par rapport à la voirie permet de supprimer tous les points bas.
L'étanchéité du terre-plein entre le quai bas et parapet est réalisée avec une dalle en béton désactivé en surface. Sur une partie du linéaire, approximativement entre les bâtiments VNF et le pont de la voie rapide RN113, la partie haute du quai bas a été démoli pour être reconstruit en utilisant un mur poids.
Un rideau de palplanches est présent en pied complété par des micropieux. Les maçonneries sont également restaurées. Pour pallier à l'enfoncement constaté de la bathymétrie devant le rideau de palplanches en pied de quai, ce rideau est doublé dans les secteurs où il est le plus court (6 m) par des palplanches plus longues (12 m).

Photo 26. Quai gare maritime - Travaux : Pose du double rideau de palplanches et remplissage de l'entre-deux

Des enrochements ont été déposés dans le lit du fleuve. L'implantation de ces nouvelles palplanches en parallèle des premières débute du GRD 283 et se poursuit jusqu'au GRD 283.2 (soit 50 m en amont du pont de la RN 113, jusqu'à la jonction avec le quai de la gabelle au droit de la station d'avitaillement.).
Le tableau suivant récapitule les palplanches et micropieux en place des tronçons 1 et 2.

Tableau 12. Quai gare maritime – Palplanches et micropieux en place des tronçons 1 et 2

Zone	PR	Linéaire	Travaux Réalisés
A	282.5 à 282.67	17 ml	micropieux de 21 à 26 ml inclinés (15 à 17°) avec espacement de 3 m micropieux de 16 ml verticaux avec espacement de 3 m palplanches PU16 S240 GP (longueur 6 m)
B1	282.7 à 282.83	130 ml	palplanches PU25 S240 GP (longueur 11,5 m)
B2	282.83 à 282.86	30 ml	palplanches PU25 S355 GP (longueur 13,5 m)
B3	282.86 à 282.91	50 ml	palplanches PU25 S240 GP (longueur 11,5 m)
C	282.91 à 282.98	70 ml	micropieux de 22 ml inclinés de 17° avec espacement de 3 m

			micropieux de 18 ml verticaux avec espacement de 3 m palplanches PU16 S240 GP (longueur 6 m)
D	282.98 à 283.06	80 ml	palplanches PU25 S240 GP (11,5 m)
E	283.06 à 283.09	30 ml	micropieux de 22 ml inclinés de 17° avec espacement de 3 m micropieux de 18 ml verticaux avec espacement de 3 m palplanches PU16 S240 GP (longueur 6 m)

Les coupes types des aménagements des installations VNF à la station d'avitaillement est donnée dans la figure suivante.

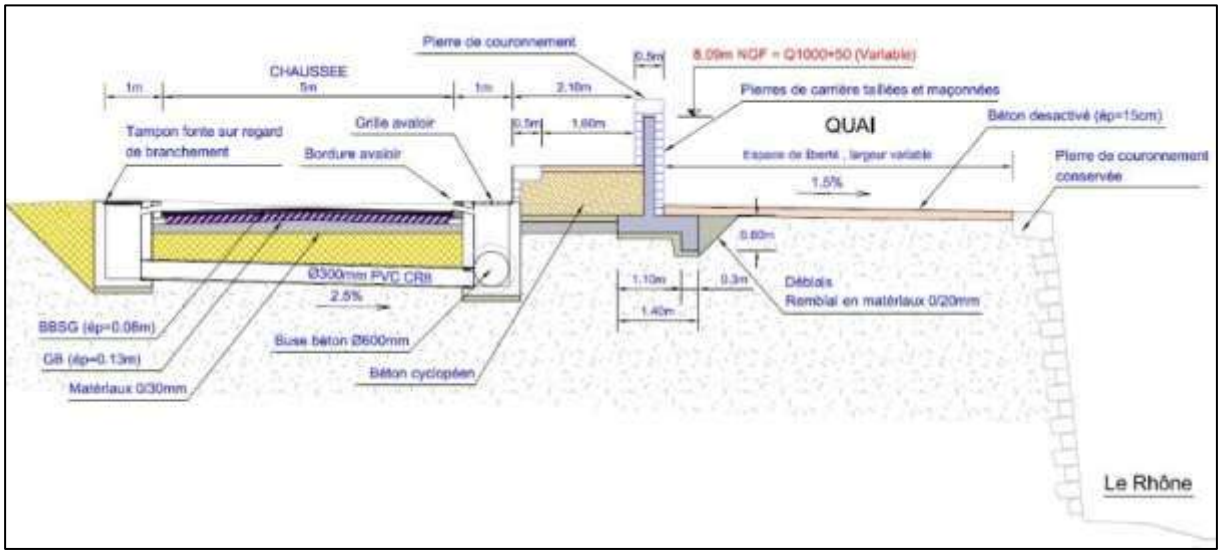


Figure 21. Quai gare maritime – Tronçon 2 – Coupe type du muret de réhausse

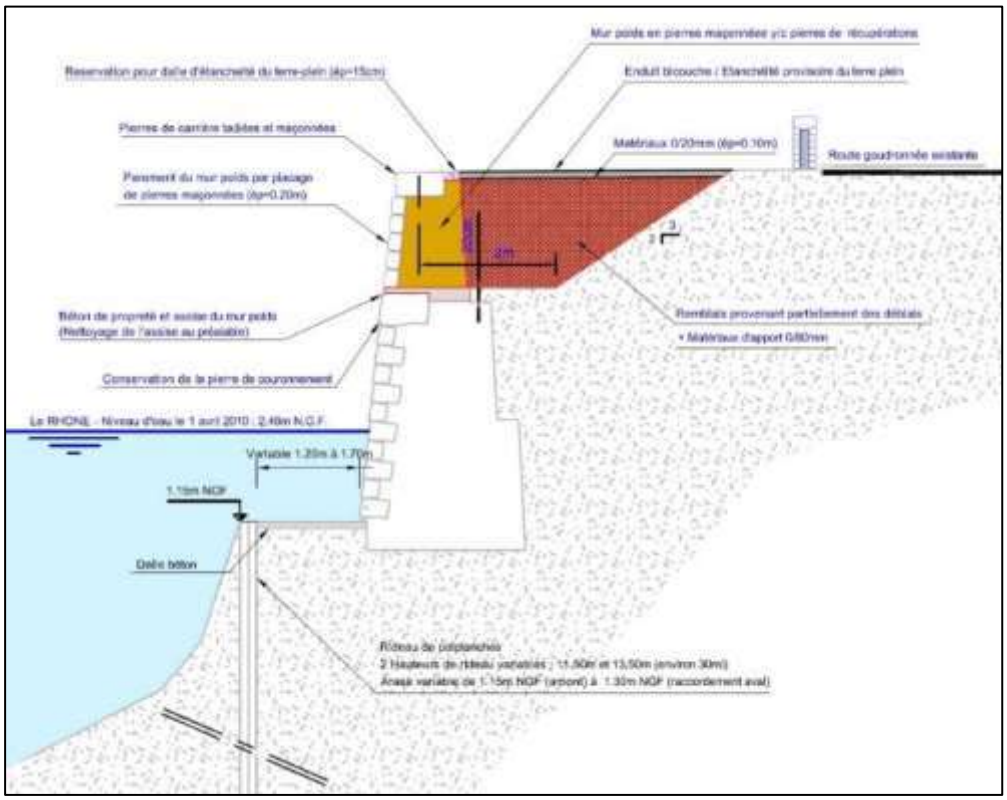


Figure 22. Quai gare maritime – Tronçon 2 – Coupe type du linéaire du quai bas conforté

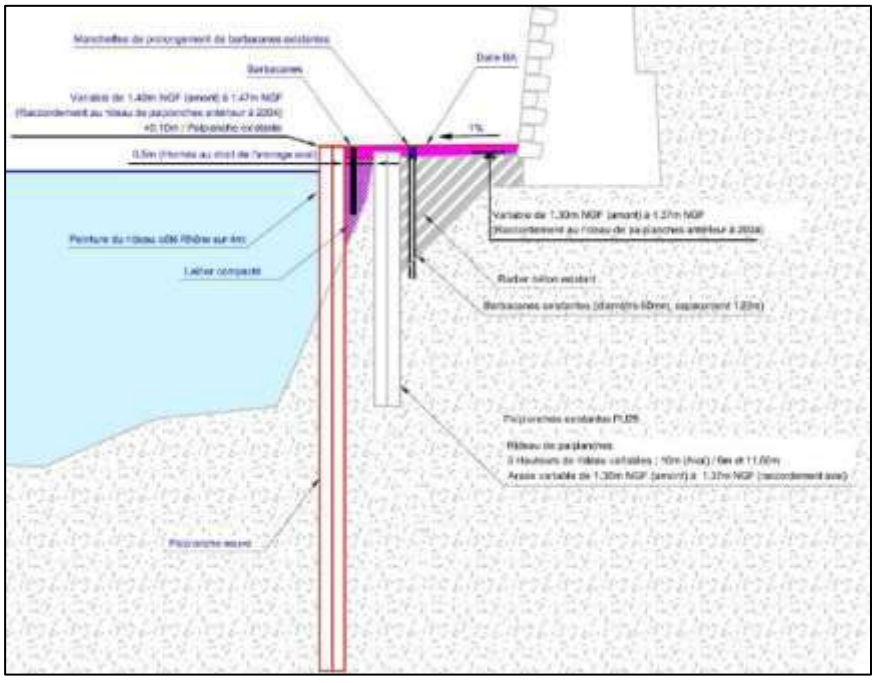


Figure 23. Quai gare maritime – Tronçon 2 – Coupe type avec palplanches doublées

Les photographies suivante donnent une vision de l'ensemble tronçon 1 et tronçon 2 dans l'état actuel.

Photo 27. Quai gare maritime - Bâtiments VNF (tronçon 1)	**Photo 28.** Quai gare maritime - tronçon 2

Tronçon 3 : au droit de la station d'avitaillement du GRD 283.15 au GRD 283.20

Un rideau de palplanches de type Larssen III de 10 m de longueur (recépé à + 1,3 m NGF) a été fiché sur une longueur de 45 m. Le couronnement du rideau a été coiffé par une poutre en bois permettant l'accostage des bateaux. Comme précédemment, un double rideau plus profond est présent en parallèle de celui-ci. (Voir Photo 26 ci-dessus)
Le parement au droit de la partie courbe du quai (environ 15 ml) est revêtu d'un masque en béton armé de 0,2 m d'épaisseur ancré dans les maçonneries à raison d'un tirant HA14 de 0,70 m scellé à la résine tous les 0,5 m².
Dans le cadre des 5ème et 6ème tranches de travaux sur les quais d'Arles, un voile en béton armé fondé sur une semelle a été réalisé contre la station d'avitaillement. Le voile du mur en L est réalisé au plus proche du bâtiment, cependant la fondation à -70 cm engendre un léger décalage de l'axe du voile, qui empiète sur la chaussée entre les deux batardeaux. Les murs béton sont complétés par la réalisation d'un enduit ton pierre pour permettre une meilleure intégration paysagère, les maçonneries du muret existant ont été nettoyées et rejointoyées sur les deux faces.
Pour pallier à l'enfoncement constaté de la bathymétrie devant le rideau de palplanches en pied de quai, ce rideau est doublé dans les secteurs où il est le plus court (6 m) par des palplanches plus longues (12 m).

Les coupes suivantes illustrent le principe retenu.

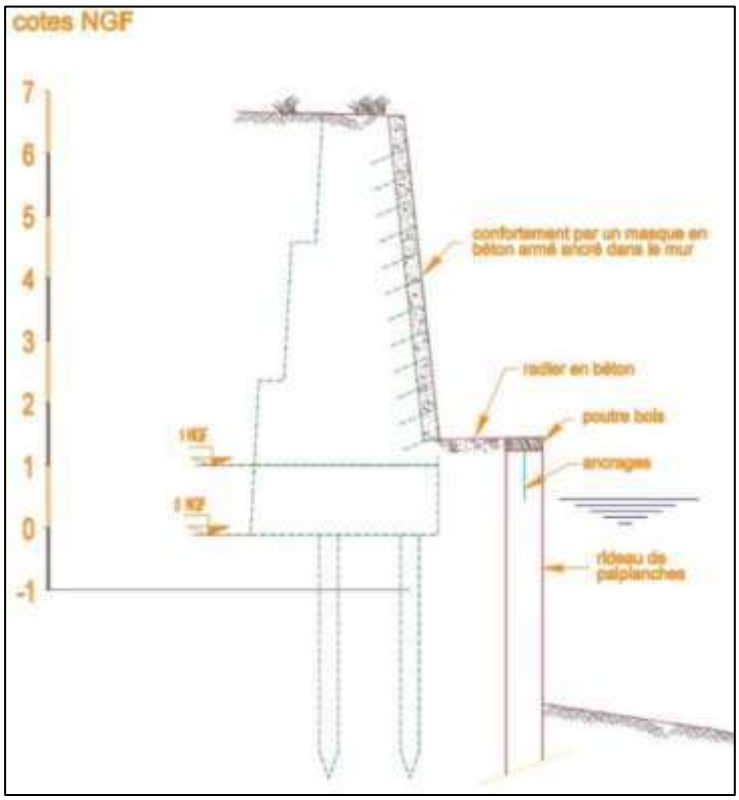


Figure 24. Quai gare maritime – Tronçon 3 – Coupe type du quai bas – Station d'avitaillement

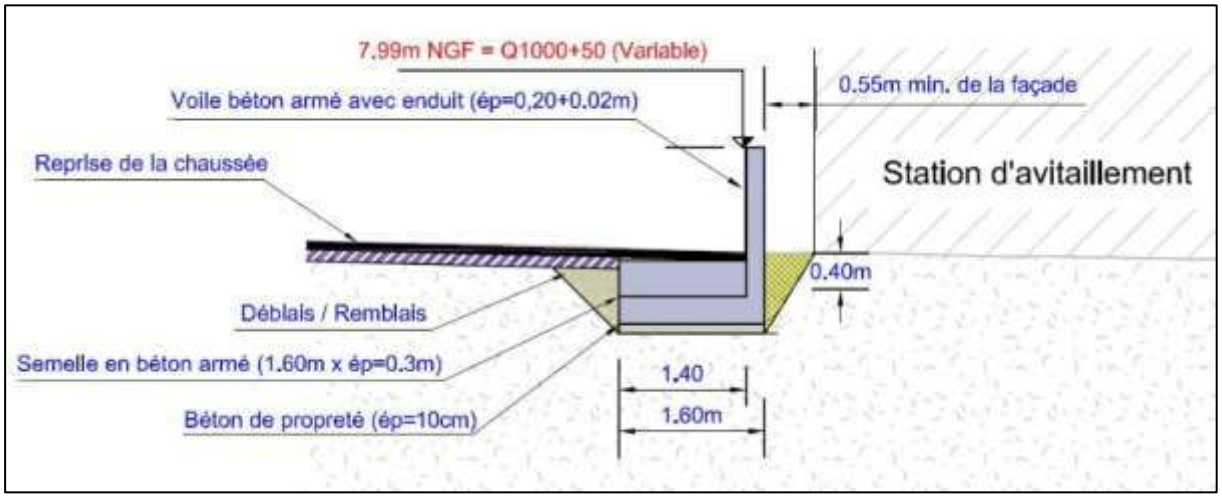


Figure 25. Quai gare maritime – Tronçon 3 – Coupe du quai haut – station d'avitaillement

Caractéristiques des matériaux utilisés

Les matériaux utilisés pour la réalisation des travaux disposent de fiche d'agréments et leurs mises en œuvre sont détaillées dans des procédures de réalisation. Des essais de convenance ont été réalisés (béton, …)

Suivi de chantier

Sur l'ensemble des tranches travaux des réparations du quai de la gare maritime, des comptes rendus hebdomadaires de réunion ont été rédigés ainsi que des fiches de suivis de travaux. Des photos illustrent l'avancée des travaux.

2.2.2.4. Accessibilité

Le quai de la gare maritime dispose de deux accès. Un premier accès est situé au droit du bâtiment VNF (GRD 282.5). Le deuxième est situé en aval du bâtiment VNF, au droit du parking GRD 282.7.
Une route longe l'ouvrage coté protégé.

Tableau 13. Franchissements, Section Quais Gare Maritime

Nom	GRD
Amont VNF	282.5
Aval VNF	282.7

2.2.2.5. Ouvrages englobés

Deux ouvrages traversants sont recensés sur le quai de la gare maritime : l'exutoire E16 et l'exutoire E17. Afin de garantir un niveau de protection retenu, leur mise en sécurité a été réalisée. Leur implantation est donnée sur la figure suivante.

Figure 26. Quai gare maritime – Localisation des ouvrages hydrauliques E16 et E17

Mise en sécurité effectué sur OH E16
L'exutoire d'eaux pluviales référencé E16 par la mairie d'Arles est situé au droit du bâtiment VNF. C'est un ouvrage maçonné voûté ayant une section de 1,5 m de haut pour 1 m de large pour une longueur de 16 m. Le réseau pluvial est composé d'un dalot de 300x400 collectant les eaux le long de la voirie du quai de la gare maritime par l'intermédiaire de 4 avaloirs.
Une nouvelle vanne a été mise en place dans le regard de raccordement situé sous le trottoir en pied de quai. Cette vanne peut être submergée en cas de crue importante.
Il est à noter que des fissures apparues lors des travaux de 2004 visant à conforter le quai de la gare maritime ont été colmatées durant ce même chantier (mise en place de bandes de géo membranes).
Réfection des maçonneries

Sur l'ensemble de son linéaire soit 16 m, l'ouvrage a fait l'objet d'un curage permettant de retrouver la pleine capacité d'écoulement de l'exutoire. L'ensemble de la paroi a été lavée avec une projection d'eau à haute pression de manière à décaper les joints friables et tous autres matériaux non stables.
Le repiquage des maçonneries a également été réalisé et un béton projeté hydrofuge a été appliqué et lissé pour assurer l'étanchéité uniforme de l'ouvrage.
Réfection de l'ouvrage de vannage
L'ensemble des éléments du dispositif de vannage ont été remplacés (pelle, guides de la pelle, feuillures scellées, dispositif de manœuvre…). Avant la mise en place du nouveau dispositif, l'ensemble des impacts de fixation et des cavités relatives aux réserves de l'ancien ouvrage de vannage ont été colmatés. Le nouveau dispositif est une vanne martelière étanche en inox (feuillures, vannes). Les nouveaux éléments du système de vannage sont scellés sur les maçonneries du regard principal, qui est équipé d'une nouvelle dalle de couverture.

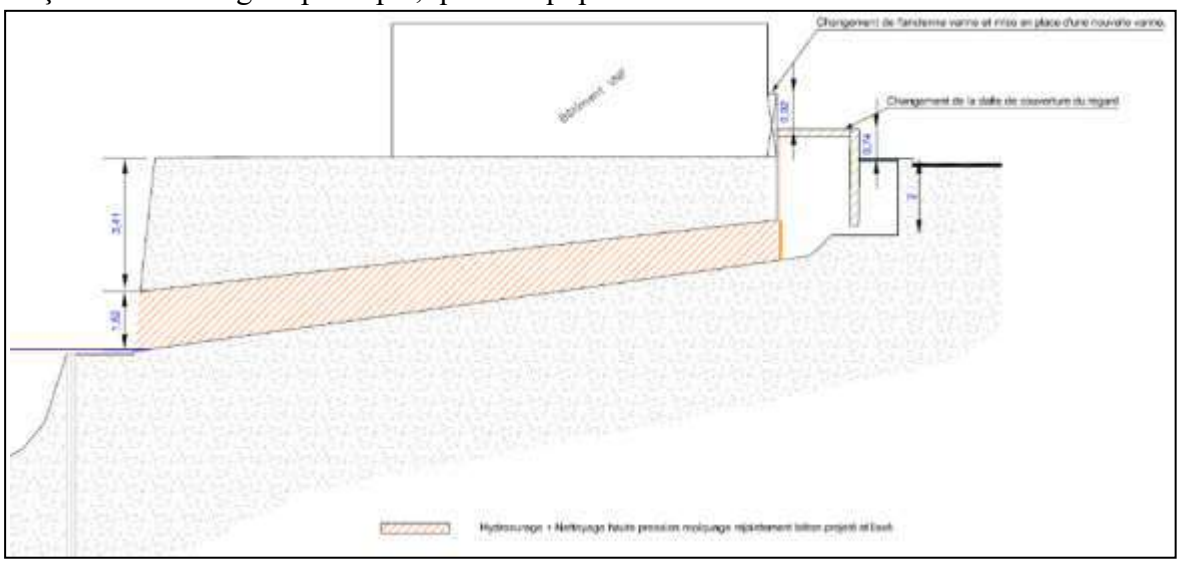


Figure 27. Quai gare maritime – Principe de l'intervention sur l'ouvrage hydraulique E16

Mise en sécurité effectué sur OH E17

L'exutoire E17 collecte l'écrêtage des eaux usées de la station de refoulement St Pierre (by-pass en cas d'orage ou de problème sur une pompe). Au niveau du regard situé sur le quai de la gare maritime (entre le Rhône et la station St Pierre), une canalisation de Ø1000 mm collectant le pluvial de la station Galliéni et l'écrêtage des eaux usées de la station Camargue rejoint l'exutoire E17.
Réfection des maçonneries
Sur l'ensemble de son linéaire, soit 17 m, l'ouvrage a fait également l'objet d'un curage et d'un nettoyage haute-pression. L'ancien enduit déjà existant a été ausculté systématiquement pour déterminer les zones de décollement ou fissuration. Des repiquages localisés ont été effectués pour purger les parties instables puis un béton projeté a été appliqué et lissé au droit des zones de repiquage, pour assurer l'étanchéité uniforme de l'OH E17. Une arrivée correspondant à l'air de lavage de VNF a été obstruée.
Réfection et création des ouvrages de vannage
L'ensemble des éléments du dispositif de vannage ont été remplacés (pelle, guides de la pelle, feuillures scellées, dispositif de manœuvre…). Avant la mise en place du nouveau dispositif, l'ensemble des impacts de fixation et des cavités relatives aux réserves de l'ancien ouvrage de

vannage ont été colmatés. Le nouveau dispositif est une vanne martelière étanche en inox (feuillures, vannes). Les nouveaux éléments du système de vannage sont scellés sur les maçonneries du regard principal, qui est équipé d'une nouvelle dalle de couverture.
Pour éviter les remontées d'eau par la station de refoulement de Saint-Pierre, le dispositif de vannage a été complété par un clapet anti-retour. Ces dispositifs sont en inox compte tenu des possibilités de passage d'effluents domestiques plus corrosifs que les eaux du Rhône.
Sur le collecteur de rejet de la Station de Gallieni
Une inspection caméra du collecteur a été réalisé jusqu'au droit du futur regard à créer dans la structure du quai. Celle-ci a permis de constater des fuites qui, lors des épisodes de mise en charge, peuvent lessiver les matériaux du sol en place et provoquer des renards dans le corps du quai.
Un double regard a été réalisé de manière à assurer la mise en place d'une vanne sur la canalisation Ø1000 mm et la mise en place d'une bâche de pompage de sécurité.
Cette bâche de pompage est utilisée lors d'évènements concomitants entre le Rhône en crue et un ruissellement pluvial important. Les eaux de la station de Gallieni ne pouvant pas s'acheminer de façon gravitaire au fleuve, elles seront pompées via le regard vers le Rhône.

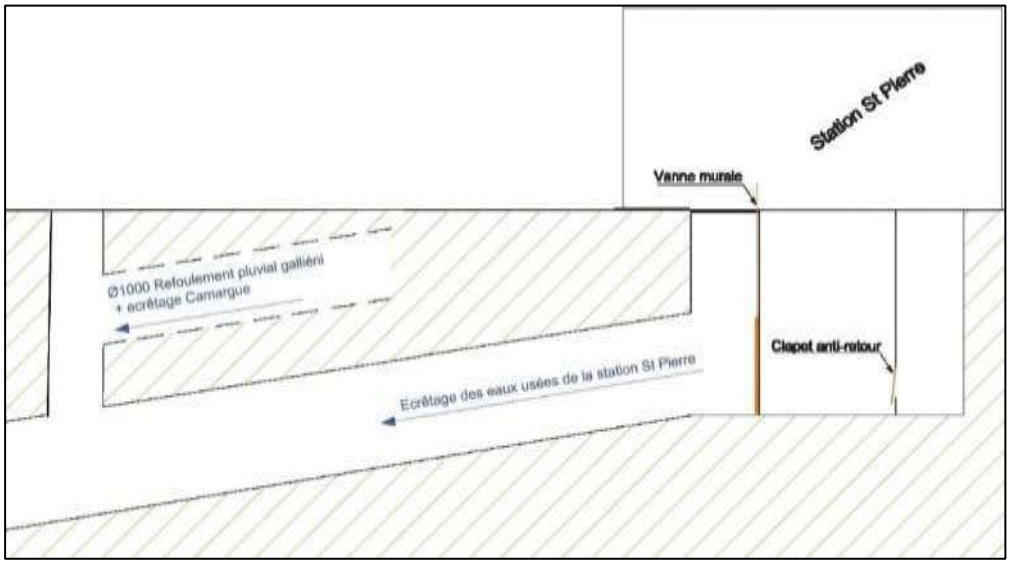


Figure 28. Quai gare maritime – Schéma de principe de l'intervention sur l'OH17

2.2.2.6. Batardeaux

Afin d'assurer la continuité de l'étanchéité le long de la rehausse de la protection sur le quai de la gare maritime, 13 batardeaux sont présents.
Les batardeaux sont présentés ci-après de l'amont vers aval. Leurs dimensions ont été homogénéisées pour faciliter leur mise en œuvre (poutrelles de 1,5 m uniquement). Cependant certains batardeaux de 3 m ou plus possèdent donc des poteaux de renfort centraux.

Les implantations de ces ouvertures sont présentées sur la figure suivante.

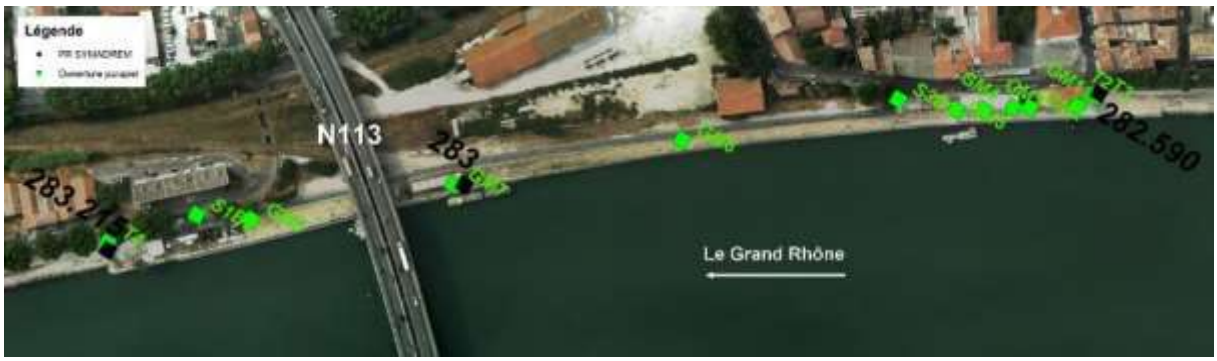


Figure 29. Quai gare maritime – Localisation des batardeaux

Le tableau ci-après précise :

- la dénomination et le type (batardable ou non batardable) des ouvertures,
- le point repère du SYMADREM (GRD),
- les largeurs et hauteurs maximales des ouvertures,
- la cote du seuil de l'ouverture et la cote du parapet.

Tableau 14. Quai gare maritime – Synthèse des batardeaux

Nom Ouvrage	Type d'ouverture	GRD	Largeur ouverture (m)	Hauteur ouverture (m)	Cote du seuil (NGF)	Cote parapet (m NGF)
T2	batardable	282,59	4,20	1,50	6,59	8,21
T3	batardable	282,59	1,25	1,50	6,59	8,21
GM1	batardable	282,61	1,50	1,70	6,50	8,00
GM2	batardable	282,64	3,00	1,70	6,50	8,00
GM3	batardable	282,65	1,50	1,70	6,50	8,00
GM4	batardable	282,66	3,00	1,70	6,50	8,00
GM5	batardable	282,68	4,50	1,70	6,50	8,00
S3B3	batardable	282,72	6,00	1,70	6,50	8,00
GM6	batardable	282,86	4,50	1,70	6,50	8,00
GM7	batardable	283,01	4,50	1,00	7,00	8,00
GM8	batardable	283,12	6,00	1,00	7,00	8,00
S1B2	batardable	283,15	6,00	1,20	7,06	8,21
T4	batardable	283,21	4,20	1,28	6,90	8,22

2.3. QUAI DE LA GABELLE

2.3.1. Préambule

Le quai de la Gabelle est situé en rive droite du Grand Rhône entre les GRD 283.2 et 283.5. Il a fait l'objet de plusieurs campagnes de travaux de confortement sous la maîtrise d'ouvrage du SYMADREM entre 2001 et 2011.
A l'exception de la modernisation d'un batardeau, le SYMADREM ne prévoit pas de nouvelle intervention sur cet ouvrage dont l'état actuel permet d'assurer les objectifs de protection et de sécurité recherchés.

2.3.2. Présentation Générale

2.3.2.1. Description historique

Selon la nomenclature adoptée depuis l'étude de diagnostic des quais d'Arles réalisée en 2002, le quai de la Gabelle recouvre le secteur S1. La géométrie du quai est homogène sur l'ensemble du linéaire (260 m). Il quai comprend :

- un perré inférieur en maçonnerie dont la fondation est calé à une cote de l'ordre de 0.5 NGF et dont le fruit est de l'ordre de 1H/1V,
- un chemin de halage revêtu de béton d'environ 3 m de largeur et calé à une cote de l'ordre de 4,2 m NGF,
- un perré supérieur en maçonnerie qui est en fait un ouvrage poids au profil triangulaire,
- une crête revêtue de graviers et calée à une cote de l'ordre 8,0 m NGF soit environ 1,4 m au-dessus du terrain naturel aval,
- un talus aval enherbé de pente 1,8/1.

Le quai comprenant un double perré avec un chemin de halage. Le perré supérieur est en fait un mur poids au profil triangulaire.
L'ouvrage, en partie enfoui sous les limons jusqu'en 2000, a été redécouvert lors des travaux de confortement réalisés en 2001 sous la Maîtrise d'Ouvrage du SYMADREM. La coupe-type proposée par le maître d'œuvre (DDE des Bouches du Rhône) est figurée ci-dessous :

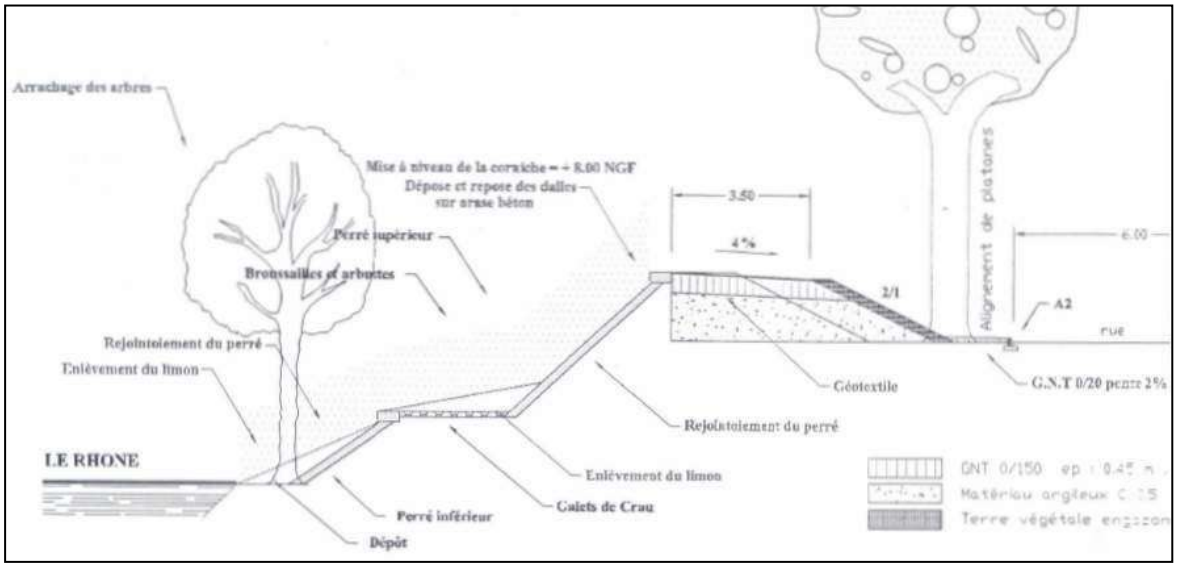


Figure 30. Quai de la Gabelle – Coupe-type des travaux de restauration (source DDE 13)

Les travaux ont été les suivants :

- déboisement du pied du quai,
- terrassement des limons recouvrant l'ouvrage,
- rejointoiement grossier des parements et réfection du terre-plein au moyen d'une dalle en béton désactivé,
- mise en place d'un cordon d'enrochements libres au pied de l'ouvrage,
- bétonnage superficiel du couronnement des enrochements libres,
- déblaiement des limons en retrait du quai en crête et compactage de limons argileux en retrait du quai en crête,
- enherbement du talus et aménagement d'une piste en crête,

Les terrassements réalisés pour mettre en place le remblai limoneux ont mis à jour un parement vertical.

Photo 29. Quai de la Gabelle - Terrassement en retrait du mur

Photo 30. Quai de la Gabelle - Travaux de déboisement achevé

Cette observation, ainsi que les nombreuses investigations géotechniques réalisées sur le quai de Trinquetaille en 2007, permettent de conclure que le quai supérieur est constitué par un ouvrage poids au profil triangulaire.

En 2007, des appontements commerciaux ont été réalisés dans l'emprise de l'ouvrage. Les travaux relatifs à ces appontements sont illustrés par les photographies suivantes.

Photo 31. Quai de la Gabelle – Duc D'albe

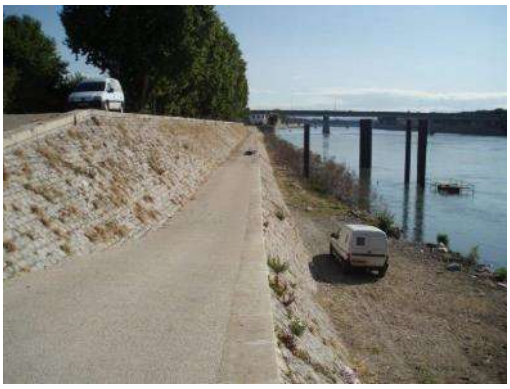


Photo 32. Quai de la Gabelle - Vue vers l'aval

2.3.2.2. Sectorisation

Suite à la réalisation de ces travaux, la digue sur la totalité de son linéaire constitue un unique tronçon homogène dont la description est donnée ci-après.

2.3.2.3. Description du tronçon

Description générale :

Un rideau de palplanches similaires à celui réalisé sur le quai de Trinquetaille a été mis en œuvre (PU11R de 6 m avec une arase supérieur à 0,5 m NGF). Le perré inférieur a été repris en partie basse et restauré en partie supérieure. Ces travaux de confortement de pied ont étaient réalisés en 2009-2010. La figure suivante présente la coupe-type des travaux.

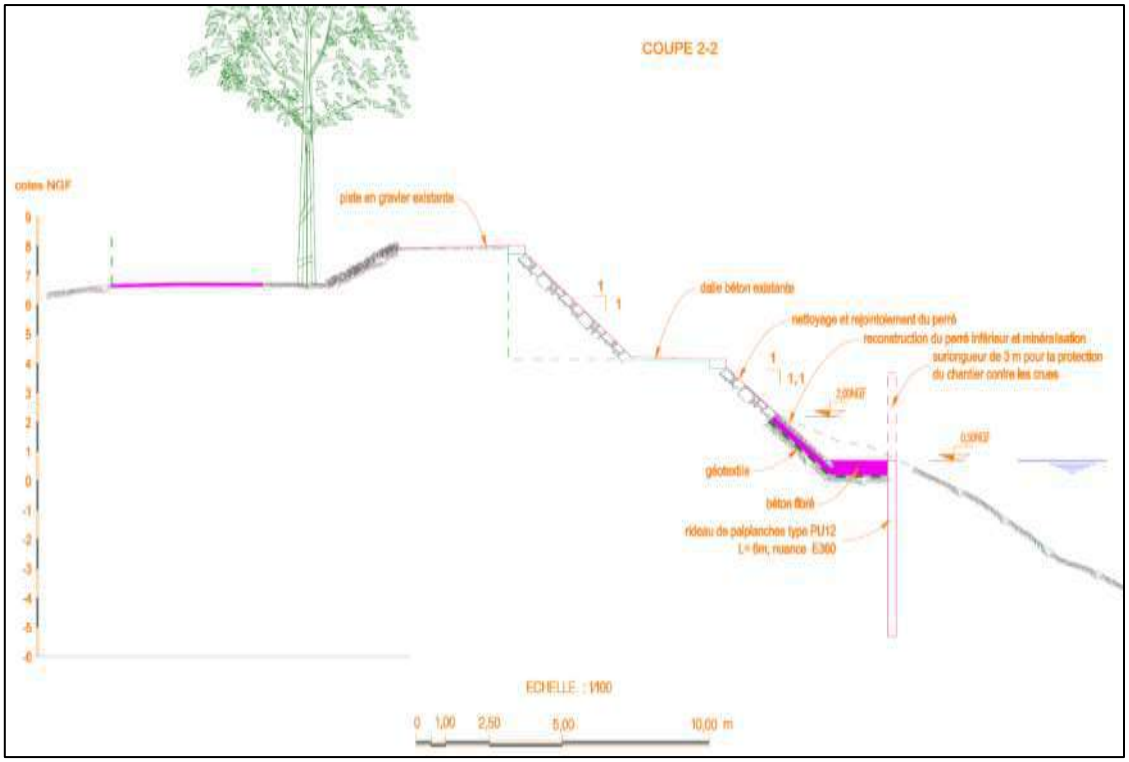


Figure 31. Quai de la Gabelle – Coupe-type du tronçon

Caractéristiques des matériaux utilisés

Les matériaux utilisés pour la réalisation des travaux disposent de fiches d'agrément et leurs mises en œuvre sont détaillées dans des procédures de réalisation.

Suivi de chantier

Sur l'ensemble des tranches travaux des réparations du quai, des comptes rendus hebdomadaires de réunion ont été rédigés ainsi que des fiches de suivis de travaux. Des photos illustrent également l'avancée des travaux.

Photo 33. Quai de la Gabelle - Vue d'ensemble avant travaux (2009)

Photo 34. Quai de la Gabelle - Vue d'ensemble pendant travaux (2010)

Photo 35. Quai de la Gabelle - Vue d'ensemble actuelle (2012)

2.3.2.4. Accessibilité

Le quai de la gabelle comporte 2 accès. Un premier se trouve au droit de la station d'avitaillement (GRD 283.2), le deuxième se trouve au GRD 283.5 à la jonction avec la digue des papeteries Etienne.

Photo 36. Quai de la Gabelle - Vue sur la crête et barrière de fermeture (2012)

Tableau 15. Franchissements, Section Quai de la Gabelle

Nom	GRD
Avitaillement	283.2
Papeteries	283.5

2.3.2.5. Ouvrages englobés

Aucun ouvrage englobé n'est présent sur le quai de la Gabelle.

2.4. DECOMPOSITION FONCTIONNELLE

2.4.1. Géométrie

Tableau 16. Synthèse de géométrie, tronçon Quais d'Arles

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	9,6	7,8	8,4	0,6
Cote de pied de digue aval	m NGF	8,5	6,5	7,3	0,7
Cote à 20m du pdav	m NGF	8,1	5,6	6,9	0,8
Cote de pied de digue amont	m NGF	7,4	4,2	5,6	1,2
Cote à 20m du pdam	m NGF	4,4	0,5	0,9	1,1
Hauteur de digue coté aval	m	1,6	0,7	1,2	0,3
Hauteur de digue côté amont	m	4,9	1,3	2,8	1,4
Fruit aval	L/V	4,8	0,0	0,8	1,6
Fruit amont	L/V	2,4	0,0	0,8	0,7
Largeur du ségonnal	m	30	5	11	7

2.4.2. Données hydrauliques

Tableau 17. Données hydrauliques, tronçon Quais d'Arles

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	5,7	5,0	2,8	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
8500	6,5	5,8	2,0	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
9500	7,0	6,1	1,6	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
10500	7,4	6,5	1,3	1,7	0,3	0,0	0,0	0,0	0,9
11500	8,0	7,0	0,8	1,1	2,8	0,3	0,0	0,0	0,7
12500	8,2	7,2	0,6	0,9	3,9	0,4	0,0	0,0	0,6
14160	8,4	7,3	0,5	0,8	4,5	0,5	0,0	0,0	0,5

2.4.3. Etanchéité

L'étanchéité est assurées la maçonnerie des quais et les palplanches en fondation.

2.4.4. Filtration-Drainage

Il n'y a ni système de filtration ni système de drainage sur les quais.

2.4.5. Stabilité

L'ensemble des quais est maçonné et leur stabilité a été validée lors des différentes phases de travaux. Des tirants ont été mis en place lorsque la stabilité de la structure était incertaine.

2.4.6. Protection

Les parements sont naturellement protégés des terriers de par leur nature et leur localisation (zone urbaine)

2.4.7. Evacuation

Il n'y a pas de secteur résistant à la surverse sur les quais compte tenu du calage de l'ouvrage. Néanmoins pour une petite surverse pourrai être traitée par le réseau d'eau pluviale si le niveau du Rhône redescend suffisamment rapidement.

2.4.8. Sécurité

Le secteur est carrossable coté zone protégée sur sa totalité car une route longe la base des quais. La crête étant un muret de protection il n'est pas carrossable. Le quai bas ou quai coté fleuve est également carrossable.

3. DIGUE DES PAPETERIES ETIENNE (GRD2)

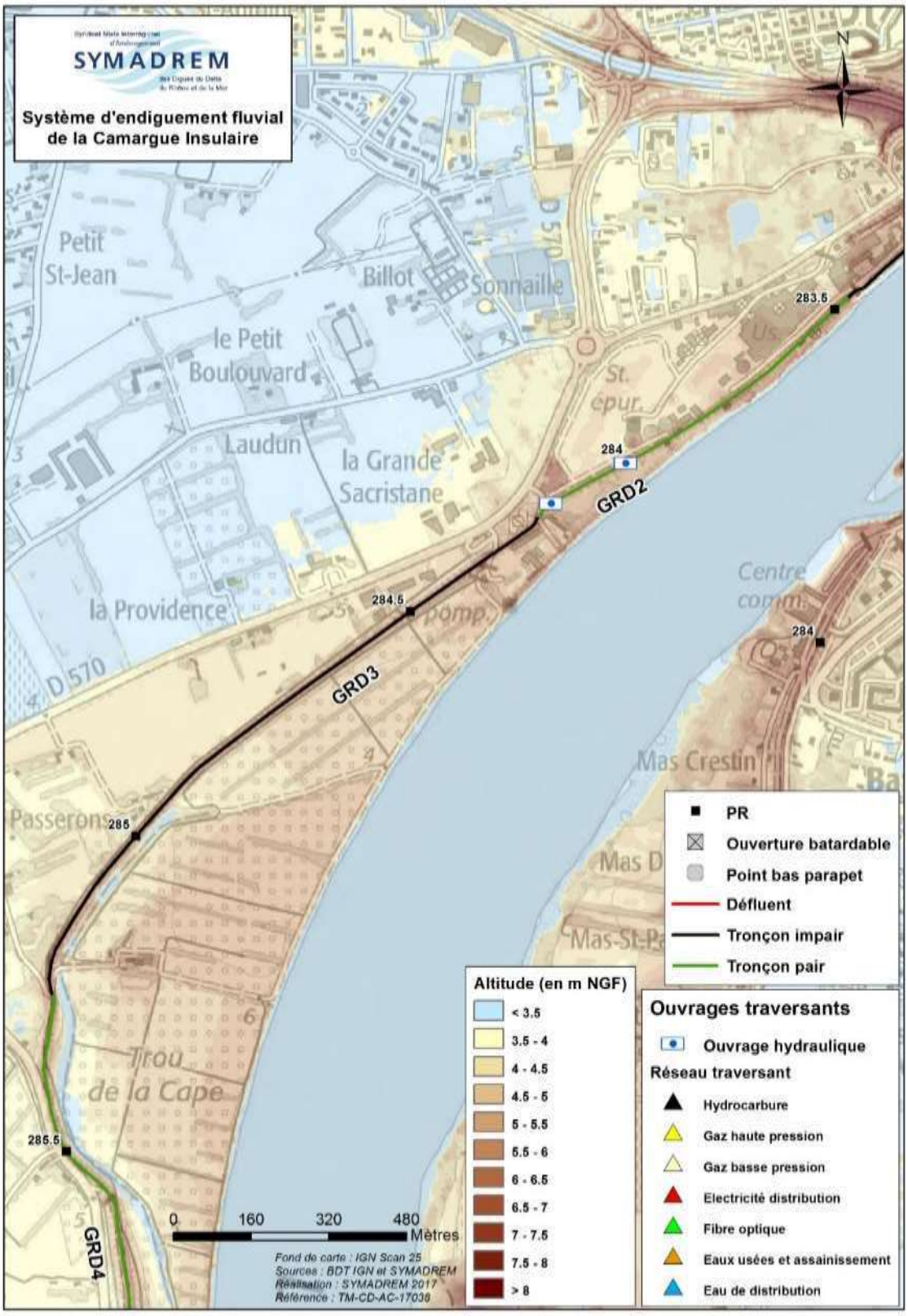


Figure 32. Plan de situation des Papèteries Etienne (GRD2)

3.1. PREAMBULE

La digue des papeteries Etienne est située en rive droite du Grand Rhône entre les GRD 283.5 et GRD 284.1, dans le prolongement du quai de la Gabelle, le long des papeteries Etienne. La longueur de l'ouvrage avoisine les 940 m. Elle a été construite dans la deuxième partie du XIXème siècle, afin de protéger le quartier de Trinquetaille. Dans le cadre des 5ème et 6ème tranches de travaux sur les quais d'Arles, la digue a entièrement été reconstruite afin d'atteindre les objectifs de protection et de sécurité recherchés. Les ouvrages de protection ont été confortés de 2014 à 2015 sous la maitrise d'ouvrage du SYMADREM.

3.2. PRESENTATION GENERALE

3.2.1. Description historique

La digue des papeteries Etienne est séparée du Rhône par un ségonal de largeur variable (de 15 à 70 m).
Les travaux ont consisté à reconstruire une digue en lieu et place de l'ancienne digue, réaliser un masque étanche en argile, supprimer les nombreuses prises d'eau abandonnées, protéger les talus avec des grilles géo-synthétiques et grillages anti-fouisseurs, permettre la circulation en crête et en pied de digue.

L'ouvrage de protection possède les caractéristiques géométriques suivantes :
- Hauteur de l'ouvrage de protection : 8,30 m NGF,
- Largeur de piste en crête : 4,5 m,
- Fruit côté amont : 2,5H/1V,
- Fruit côté aval : 2,5H/1V,
- Largeur de la piste de pied côté Rhône : 4,5 m,
- Largeur de la piste de pied côté terre : 4 m.

L'ouvrage est calé à 8,30 m NGF au niveau du point bas de la piste de crête. La cote de sûreté étant calculée à 7,39 m NGF au plus pessimiste sur le secteur étudié, la revanche de sécurité est au minimum de 0,91 m pour l'ouvrage.

3.2.2. Sectorisation

Suite à la réalisation des travaux, la digue est homogène.

Tableau 18. Sectorisation Digue des Papeteries Etienne

Tronçon	PR	Talus amont	Talus aval	Pistes	OT

1	283.5 au 284.1	Clé d'ancrage Remblai A1 compacté Grillage anti-fouisseurs Géotextile bidimensionnel Terre végétale	Remblai A1 compacté Grillage anti-fouisseurs Toile de jute Terre végétale	Pistes : Géotextile non tissé Matériaux graveleux 0/150 mm pour fondation Matériaux 0/20 mm pour roulement	2
Total d'ouvrages traversants					2

A partir de 283.88, il n'y a plus de piste en pied coté zone protégée.

La description du tronçon est donnée ci-après.

3.2.3. Description du tronçon

3.2.3.1. Raccordement avec le quai de la Gabelle

Le raccordement amont entre la digue des papeteries et le quai de la Gabelle a été conçu pour maintenir les différents accès existants (accès aux papeteries Etienne, au ségonal, au quai haut et au chemin de halage de la Gabelle) et de créer un accès à la piste de crête de la digue des papeteries. L'encoule est calée à 7,90 m NGF. La rampe permettant l'accès à la digue monte progressivement afin de se raccorder à la piste de crête à 8, 30 m NGF. L'opération a consisté à :

Réaliser une structure de chaussée avec une couche de fondation en matériaux 0/150 mm de 25 cm d'épaisseur et une couche de finition de 15 cm d'épaisseur en matériaux 0/20 mm sur l'emprise de la rampe,

Réaliser la couche de roulement en béton bitumineux sur 6 cm d'épaisseur côté ville et sur la rampe d'accès à la crête de digue,

Réaliser un revêtement en béton désactivé sur le côté Rhône, dans le prolongement de l'existant sur le quai de la Gabelle,

Installer une barrière DFCI au droit de chaque accès à la digue des papeteries Etienne (en crête de digue, aux accès côté Rhône et côté terre).

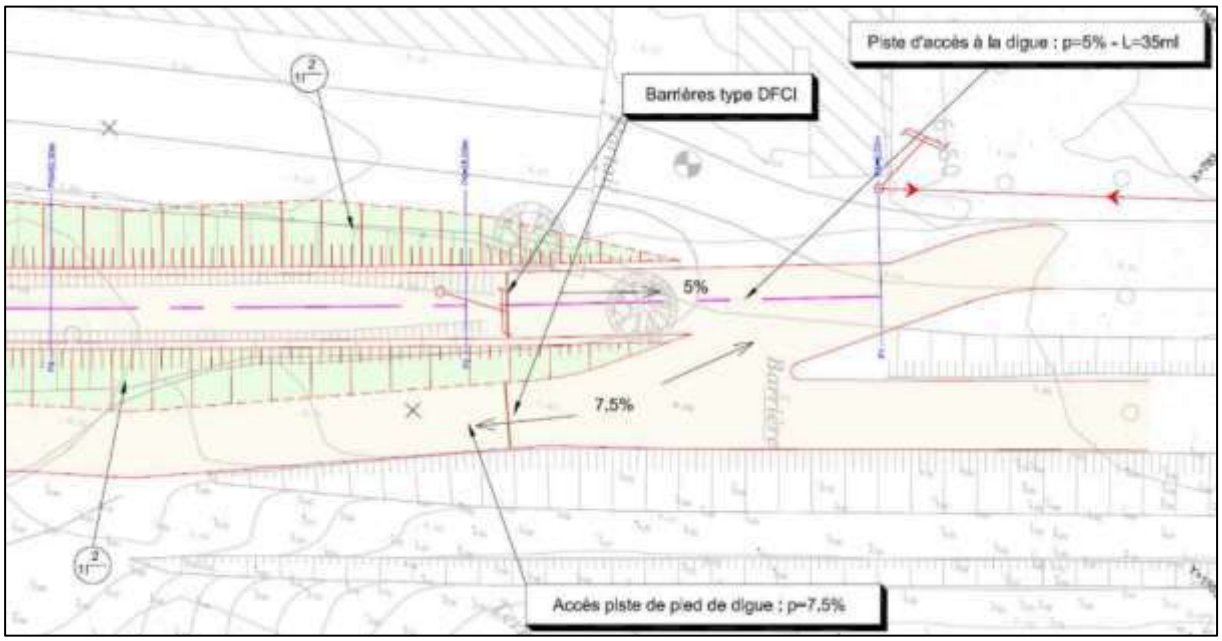


Figure 33. Digue des papeteries Etienne – Point singulier – Raccordement amont vue en plan

3.2.3.2. Description générale :

Tronçon 1 : du raccord avec le quai de la gabelle jusqu'au début du bassin de rétention (GRD 283.5 au GRD 283.88)

Sur le talus amont, une clé d'ancrage a été constituée. Elle se trouve positionnée au-delà du plan du perré historique, dans les remblais anthropiques réalisés pour le quai de déchargement. La clé d'ancrage a alors été élargie à plus de 2 m (largeur variable) de manière à purger l'ensemble du perré situé au-dessus du niveau de fondation de la clé. Outre sa fonction d'étanchéité en fondation, elle permet également de s'assurer qu'il n'a plus d'ouvrages traversants sous la digue. Elle est réglée avec une pente à 1H/1V. Préalablement à son remblaiement, une campagne de reconnaissance géophysique a été exécutée pour vérifier la présence éventuelle de réseaux en profondeur. Rien n'a été décelé. Elle a ensuite été remblayée par un matériau A1 convenablement compacté provenant du ségonal afin de constituer un masque étanche. Un grillage anti-fouisseur a été placé sur le talus puis recouvert par un nappage de 20 cm de terre végétale ensemencée puis par un géo-synthétique bidimensionnel et un enherbement. La pente du talus est de 2,5H/1V.

Photo 37. Digue des papeteries Etienne - Avant travaux

Photo 38. Digue des papeteries Etienne – Aval - Phase travaux (2013)

Photo 39. Digue des papeteries Etienne – Amont - Terrassement (2013)

Le talus aval est constitué principalement des déblais de l'ancienne digue. Un grillage anti-fouisseurs a été placé sur le talus puis recouvert par un nappage de 20 cm de terre végétale ensemencée puis par de la toile de jute et a été enherbé. La pente du talus est de 2,5H/1V.

La digue comporte une piste en crête d'une largeur de 4,5 m, réalisée avec une épaisseur de 25 cm de matériaux 80/150 mm pour la couche de base et une épaisseur de 15 cm de matériaux 0/20 mm pour la couche de roulement. La piste côté Rhône mesure 3 m de large et a été conçue avec les mêmes matériaux que la piste de crête. Quant à elle, la piste côté val mesure 4 m de large. Les opérations de compactage ont été effectuées au compacteur type V3 pied de mouton par tranches de 30 cm avec une vitesse 2 km/h et 6 passes, soit un Q/S de 0.05.

La coupe type des aménagements du tronçon 1 est donnée sur la figure suivante.

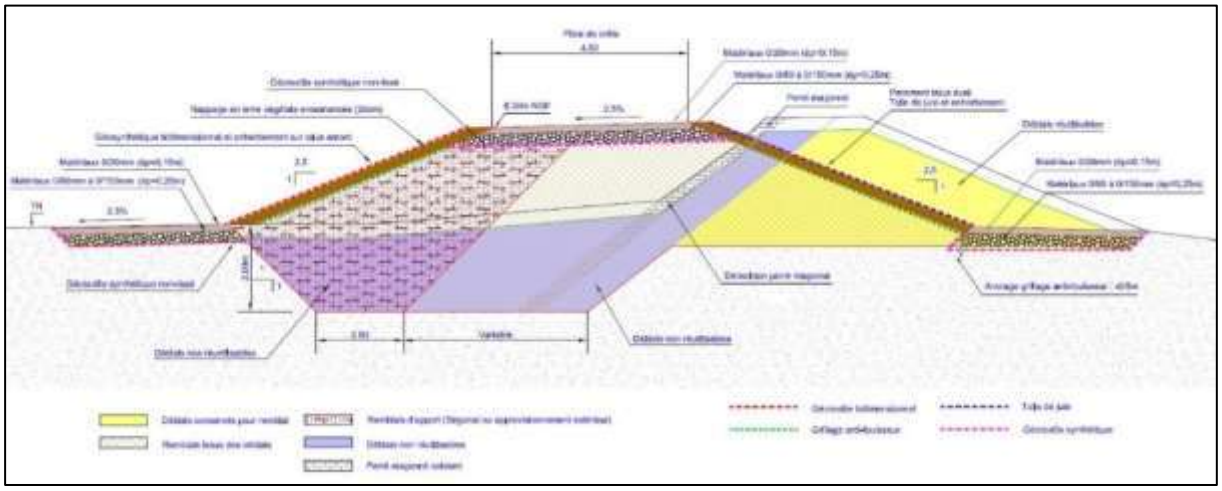


Figure 34. Digue des papeteries Etienne – Tronçon 1 – Coupe type

Tronçon 2 : au droit du bassin de rétention, du GRD 283.88 au GRD 284.1
Sur le talus amont, une clé d'ancrage est constituée côté Rhône à -2 m sous le TN. Elle mesure 2 m de large en fond de fouille et le fruit des parois est de 1H/1V. Elle a ensuite été remblayée par un matériau A1 convenablement compacté provenant du ségonal afin de constituer un masque étanche. Un grillage anti-fouisseur a été placé sur le talus puis recouvert par un nappage de 20 cm de terre végétale ensemencée puis par un géo-synthétique bidimensionnel et un enherbement. La pente du talus est de 2,5H/1V.

Le talus aval est constitué principalement des déblais de l'ancienne digue qui ont été conservés. Un grillage anti-fouisseurs a été placé sur le talus puis recouvert par un nappage de 20 cm de terre végétale ensemencée puis par de la toile de jute et a été enherbé. La pente du talus est de 2,5H/1V.

La digue comporte une piste en crête d'une largeur de 4,5 m, réalisée avec une épaisseur de 25 cm de matériaux 80/150 mm pour la couche de base et une épaisseur de 15 cm de matériaux 0/20 mm pour la couche de roulement. La piste côté Rhône mesure 4 m de large est a été conçue avec les mêmes matériaux que la piste de crête tout comme la piste côté val.
Les opérations de compactage ont été effectuées au compacteur type V3 pied de mouton par tranches de 30 cm avec une vitesse 2 km/h et 6 passes, soit un Q/S de 0.05.
La coupe type des aménagements du tronçon 2 est donnée sur la figure suivante.

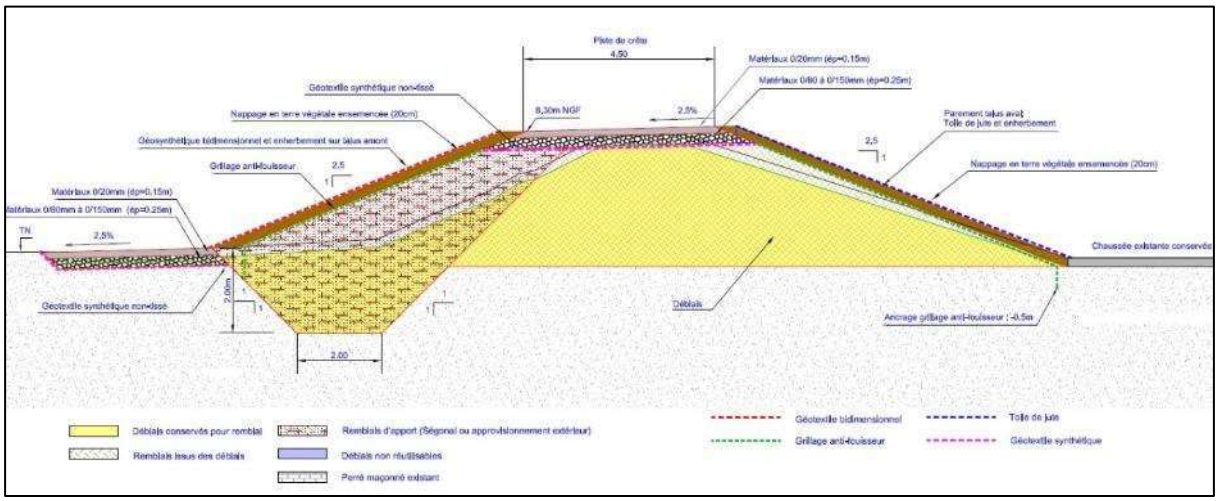


Figure 35. Digue des papeteries Etienne – Tronçon 2 – Coupe type

Figure 36. Digue des papèteries Etienne – Fin des travaux

3.2.3.3. Aménagement du ségonal

Afin de constituer une partie des remblais de la digue, le ségonal en aval de la digue des papeteries a servi de zone d'emprunt. Les matériaux en place du ségonal ont été excavés. La zone d'emprunt a été déblayée jusqu'à environ 2,5 m NGF. La crête de la zone déblayée se situe à une distance supérieure à 5 m du pied de digue des papeteries afin de ne pas altérer la stabilité du pied de l'ouvrage.

Photo 40. Digue des papeteries Etienne - Aménagement du ségonal (2013)

Afin d'assurer le remplissage progressif du ségonal en période de crue et le bon drainage des eaux pluviales, différentes ouvertures sont présentes dans la digue existante le long du Rhône pour permettre de créer des chenaux de remplissage et des exutoires à la zone d'emprunt. Les ouvertures situées à l'amont sont réalisées plus hautes que l'ouverture principale à l'aval, pour favoriser le remplissage par remous aval en période de crue et éviter les phénomènes d'érosion qui pourraient être engendrés par la création d'un chenal parallèle au lit du Rhône.
L'amélioration de la transparence hydraulique sur le ségonal implique de sécuriser les bâtiments d'Emmaüs situés à l'aval immédiat du ségonal. Pour répondre à cette problématique, une diguette à la même cote que la digue des papeteries, raccordant la digue longeant le Rhône à la digue des Papeteries a été créé. L'ouvrage est constitué de matériaux d'emprunt du ségonal. Ses dimensions sont de 1,5 m de haut, les talus comportent un fruit à 2H/1V et la piste a une largeur en crête de 3 m.

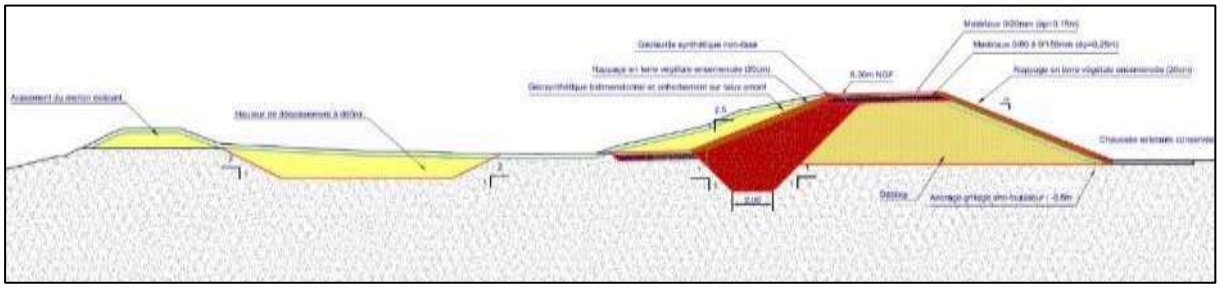


Figure 37. Digue des papeteries Etienne – Ségonal – Coupe-type

3.2.3.4. Caractéristiques des matériaux utilisés

Les matériaux utilisés pour la réalisation des travaux disposent de fiche d'agréments. Des essais de convenance ont été réalisés.
Ci-dessous, une liste de fiches d'agrément acceptée par le maitre d'œuvre du chantier (issue des comptes rendus de réunion de chantier).

Fiche n°	Indice	Désignation	Décision du MOE		
			Acceptation	Refus	Commentaires
1	A	Sable drainant filtrant	Oui (1)		Voir remarque ci-dessous
2	A	Grillage anti fouisseur SAGGAM	Oui		
3	A	Grillage simple torsion	Oui		
4	A	Clôture rigide – Languedoc clôture	Oui		
5	A	Géotextile non-tissé - SICAM	Oui		
6	A	Géotextile non tissé sous enrochement	Oui		
7	A	Géogrille SOGEBIO	Oui		
8	A	Toile de jute SOGEBIO	Oui		

Tableau 19. Digue des papeteries Etienne – Fiches d'agrément acceptées

Ci-dessous un exemple de résultats concernant des essais de perméabilité et essai de cisaillement.

Zone d'emprunt	Perméabilité	Essai de cisaillement	
		C'p	Ø'p
	2,0 E-09 m/s et 4,1 E-09 m/s	4 et 5	40 et 42

Digue existante	Perméabilité	Essai de cisaillement	
		C'p	Ø'p
	2,4 E-10 m/s et 4,8 E-11 m/s	7	45

Tableau 20. Digue des papeteries Etienne – Essais (Perméabilité, cisaillement)

3.2.3.5. Suivi de chantier

Sur l'ensemble des travaux effectués, des comptes rendus hebdomadaires de réunion ont été rédigés ainsi que des fiches de suivis de travaux. Des photos illustrent l'avancée des travaux.

3.2.4. Accessibilité

La digue des papeteries Etienne disposent de deux accès. Ces accès sont respectivement situés au droit de l'entrée du bâtiment d'Emmaüs (GRD 284.1) et au raccord avec le quai de la Gabelle (GRD 283.5). Ces accès sont fermés par des barrières DFCI pivotantes.

Photo 41. Digue des papeteries Etienne - Raccord quai de la Gabelle (2013)

Photo 42. Digue des papeteries Etienne - Raccord au droit d'Emmaüs

Tableau 21. Franchissements, Section papèteries

Nom	GRD
Gabelle	283.5
Emmaüs	284.2

3.2.5. Ouvrages englobés

Tableau 22. Papèteries – Ouvrages englobés

Gestionnaire et référence	Localisation	Dimensions	Usage	Etat	Fiche OT
Symadrem	PR 284.1	Buse Ø1000 mm	Condamné	Vanne murale, clapet anti-retour, dissipateur d'énergie en enrochements liaisonnés	GRD_EPL_284,10
CG13 / ACCM eau	Rejet au droit d'Emmaüs PR 284.17	Buse Ø800 mm	Exutoire pluvial	Vanne murale, clapet anti-retour, dissipateur d'énergie en enrochements liaisonnés	GRD_EPL_284,17
France télécom	Franchissement de la digue (Emmaüs) PR 284.20	---	---	Enterré sous la chaussé de digue	
Enedis		---	---	Réseau aérien	

Ouvrage hydraulique d'évacuation d'eaux pluviale Ø800 mm.

Les eaux pluviales du passage inférieur du giratoire du Vitier sont pompées et rejetées dans le Rhône au droit d'Emmaüs. L'exutoire de l'ouvrage se situe en pied de digue amont. Le drainage des eaux pluviales se fait ensuite à travers le ségonal, dans une cunette de ressuyage avec une pente vers le Rhône.
L'ouvrage est équipé d'une vanne murale de sécurité dans un regard implanté en pied de digue côté Rhône.
La section comprise entre le regard et l'exutoire dans le bassin est d'un diamètre égal à 800 mm. A son exutoire dans le bassin, la canalisation est équipée d'une tête d'ouvrage, d'un clapet anti-retour Ø800 mm et d'un dissipateur d'énergie en enrochements liaisonnés.

Photo 43. Digue des papeteries Etienne - Enrochements de l'ouvrage hydraulique au droit d'Emmaüs (2013)

Photo 44. Digue des papeteries Etienne - Clapet anti-retour de l'ouvrage hydraulique au droit d'Emmaüs (2013)

De plus, pour permettre le drainage des éventuelles infiltrations, un drain en matériaux granulaires est réalisé sur le quart aval de la digue.

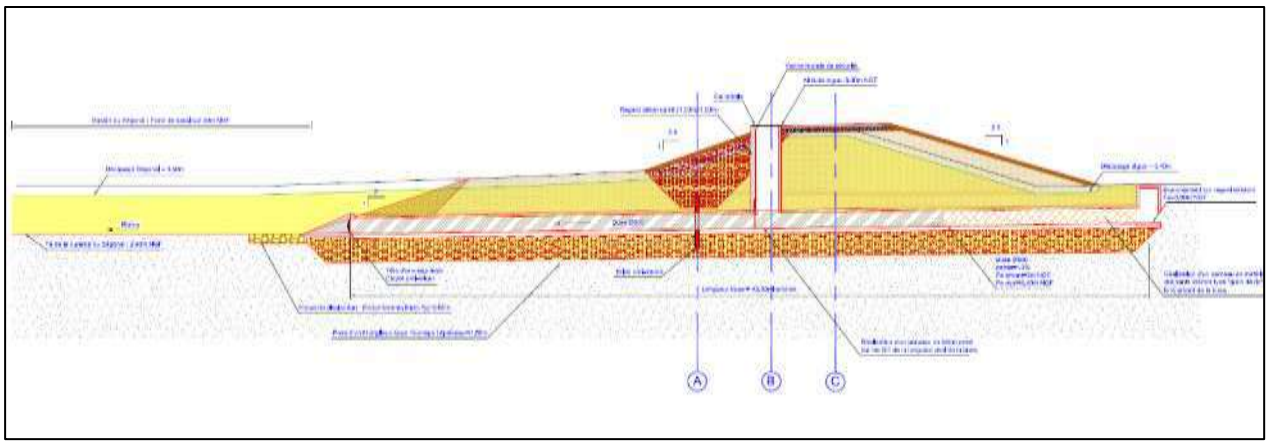


Figure 38. Digue des papeteries Etienne – Coupe type – Ouvrage hydraulique (Emmaüs)

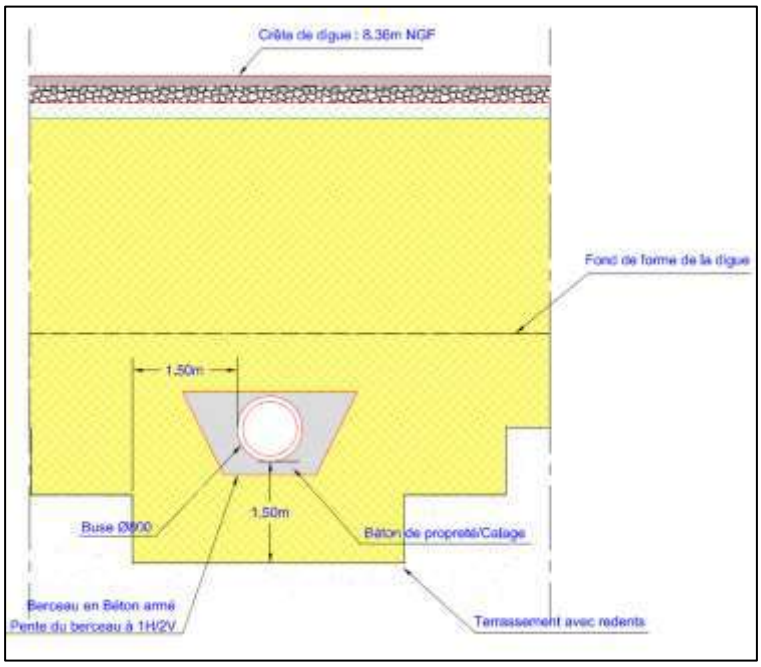


Figure 39. Digue des papeteries Etienne – Coupe transversale – Ouvrage hydraulique (Emmaüs)

Ouvrage hydraulique de drainage pluvial de la plateforme des papeteries Etienne
Cet ouvrage a pour objectif de drainer les surfaces imperméabilisées du site des papeteries et permettre d'éventuels raccordements ultérieurs sans nouvelle intervention au travers de la digue. L'ouvrage traversant, d'un diamètre égal à 1000 mm a été réalisé selon les mêmes dispositions que l'ouvrage réalisé en amont d'Emmaüs.
Le raccordement des réseaux de drainage se fait dans un regard avaloir sur la plateforme, en pied de digue côté terre.

Réseau France Télécom aval
Ce réseau a été enterré sous la chaussée lors de la réalisation du franchissement routier. Le réseau passe ensuite en souterrain dans le franchissement de la digue pour aller se raccorder directement au bâtiment d'Emmaüs.

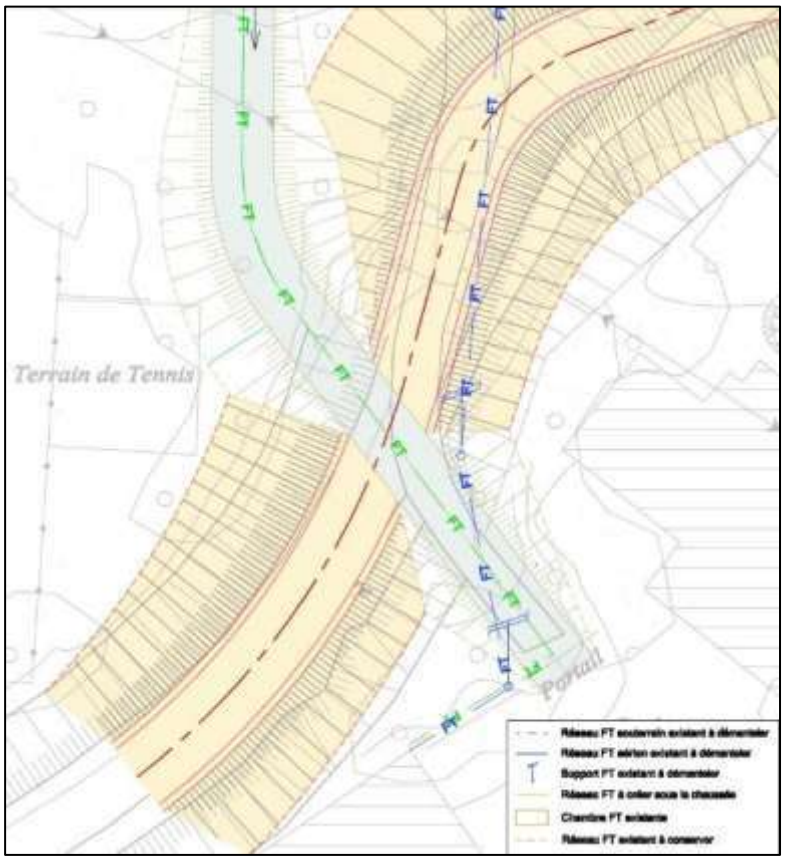


Figure 40. Digue des papeteries Etienne – Localisation du réseau France Télécom

Réseau aérien Enedis aval
Ce réseau est aérien est ne génère aucun impact hydraulique sur la digue.

3.3. DECOMPOSITION FONCTIONNELLE

3.3.1. Géométrie

Tableau 23. Synthèse de géométrie, tronçon des papèteries

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	8,3	8,3	8,3	0,0
Cote de pied de digue aval	m NGF	5,8	4,9	5,2	0,3
Cote à 20m du pdav	m NGF	7,2	4,1	5,2	1,0
Cote de pied de digue amont	m NGF	6,6	5,6	6,0	0,4
Cote à 20m du pdam	m NGF	5,9	4,5	5,3	0,4
Hauteur de digue coté aval	m	3,5	2,5	3,1	0,3
Hauteur de digue côté amont	m	2,7	1,7	2,3	0,4
Fruit aval	L/V	2,5	2,1	2,3	0,2
Fruit amont	L/V	2,3	2,0	2,2	0,1
Largeur du ségonnal	m	82	29	43	21

3.3.2. Données hydrauliques

Tableau 24. Données hydrauliques, tronçon des papèteries

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	5,0	5,0	3,3	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
8500	5,7	5,7	2,6	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9
9500	6,1	6,1	2,2	2,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,8
10500	6,4	6,5	1,8	1,8	0,1	0,1	0,0	0,0	0,7
11500	7,0	7,0	1,3	1,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
12500	7,2	7,3	1,0	1,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
14160	7,3	7,4	0,9	0,9	0,1	0,1	0,0	0,0	0,4

3.3.3. Etanchéité

La digue est zonée et le masque amont en matériaux mixtes (A1 et A2) assure l'étanchéité de l'ouvrage.

3.3.4. Filtration-Drainage

Sur la partie aval, un géotextile a été mis en place à l'interface masque/remblai ; il est à la fois filtrant et drainant.

3.3.5. Stabilité

La stabilité de la digue est garantie par sa géométrie : les talus, amont comme aval, ont des fruits supérieurs à 2.

3.3.6. Protection

Un grillage anti-fouisseur a été mis en place pour protéger les deux talus.

3.3.7. Evacuation

Il n'y a pas de secteur résistant à la surverse sur la digue des papeteries compte tenu du calage de l'ouvrage. Réalisé lors des travaux dits des invariants (pas de modification de cote), la cote est calée environ 40cm au-dessus de l'objectif actuel de Q1000+50cm.

3.3.8. Sécurité

Le tronçon est intégralement carrossable en crête ; il possède également une piste de chaque côté de la digue.

4. DIGUE D'EMMAÜS-PASSERONS (GRD3)

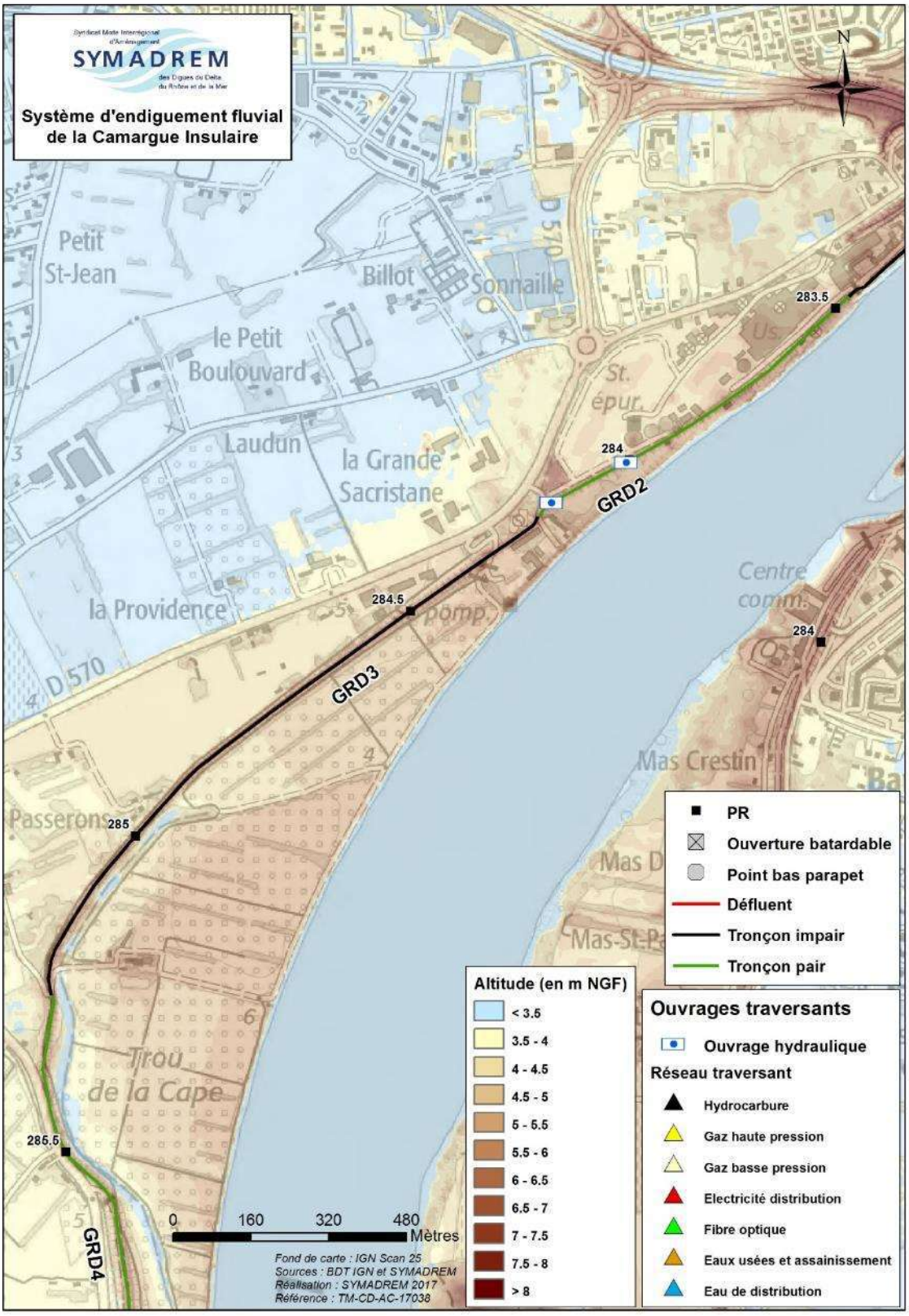


Figure 41. Plan de situation de la digue d'Emmaüs-Passerons

4.1. PREAMBULE

La digue, s'étend du GRD 284.1 au GRD 285.25 en rive droite du Grand Rhône. Les ouvrages de protection ont été confortés de janvier à mai 1998 suite à un arrêté préfectoral d'urgence sous la maîtrise d'ouvrage du SIDRHEMER et sous maitrise d'œuvre de la DDE des Bouches-Du-Rhône. Le chantier a consisté à améliorer l'étanchéité et la stabilité de l'ouvrage sous l'effet de l'eau ; permettre la circulation des véhicules pour la surveillance et les interventions d'urgence comme en décembre 2003 ; protéger la solidité de la digue des nuisances dues aux animaux fouisseurs.

4.2. PRESENTATION GENERALE

4.2.1. Description historique

Les travaux ont consisté à réaliser un masque amont étanche en argile, épaissir la digue côté val, protéger les talus avec des grillages anti-fouisseurs, et permettre la circulation de véhicule en crête de digue. La cote de la crête de digue oscille entre 8.16 m et 8.53 m NGF.

4.2.2. Sectorisation

Suite à la réalisation des travaux, la digue d'Emmaüs-Passerons constitue un unique tronçon homogène sur l'intégralité de son linéaire.
La description de ce tronçon est donnée ci-après.

4.2.3. Description du tronçon

4.2.3.1. Raccordement avec la digue des papeteries

Ce raccord consiste à assurer la transition entre les remblais de la digue d'Emmaüs et la digue des papeteries Etienne. Il consiste à marier les deux remblais au droit du franchissement assurant l'accès nord à Emmaüs, qui n'avait pas été repris lors des travaux de confortement effectués en 2001/2002. Les talus du franchissement comportent une pente à 2H/1V.
L'opération a consisté à :
Réaliser un cavalier routier en écharpe au-dessus du nouveau profil de digue,
Réaliser une structure de chaussée avec une couche de fondation en matériaux 0/150 mm de 25 cm d'épaisseur et une couche de finition de 15 cm d'épaisseur en matériaux 0/20 mm sur l'emprise de la rampe,
Réaliser la couche de roulement en béton bitumineux sur 6 cm d'épaisseur,
Installer une barrière DFCI en crête de digue au droit d'Emmaüs.

Le raccord de la digue des papeteries Etienne à la digue d'Emmaüs est assuré par des rends d'ancrage dans les remblais existants, pour marier les matériaux des deux ouvrages.

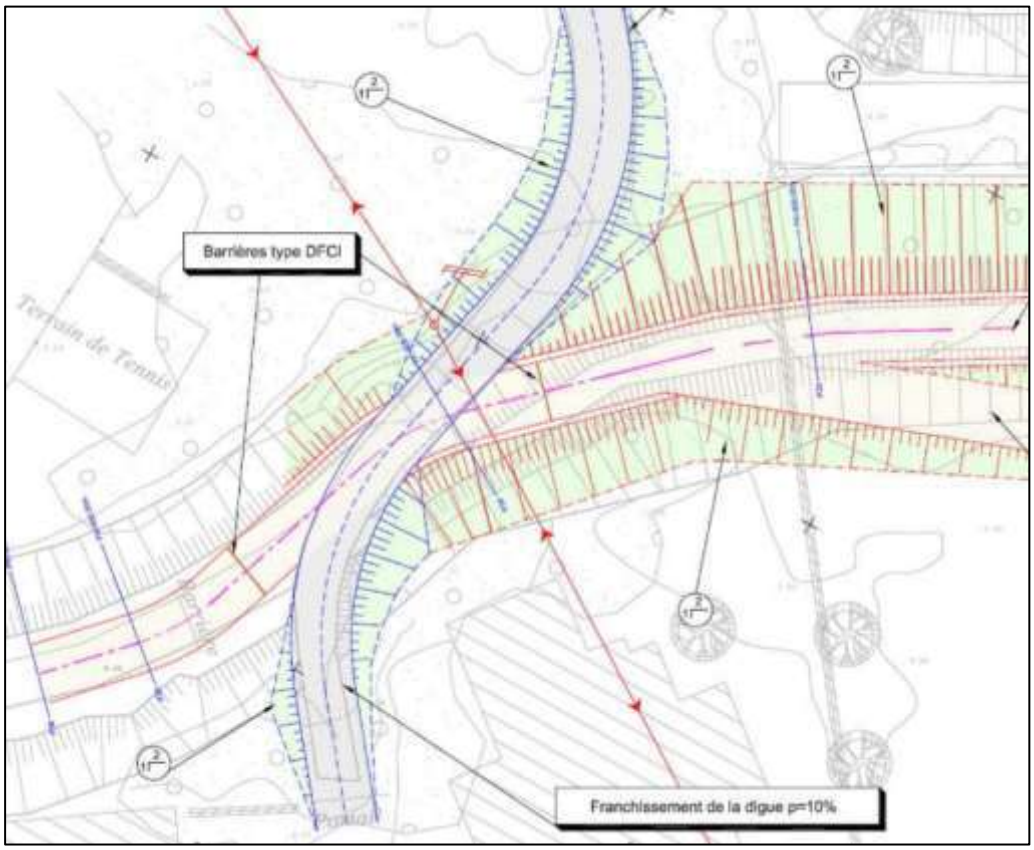


Figure 42. Digue des papeteries Etienne – Point singulier – Raccordement aval vue en plan

4.2.3.2. Description générale :

Sur le talus amont, une tranchée d'ancrage a été réalisée sur environ 1,50 m de profondeur sur 3,50 m de largeur. Des redents d'accrochages ont été effectués sur le talus avant que la digue ne soit remblayée par un matériau provenant de zones d'emprunts suivantes :

- le long du canal de la Triquette,
- le long du chemin communal 125,
- en face le mas POMEL,
- les berges du canal d'Arles à Bouc au niveau du pont de Beynes.

Chacun de ces matériaux dans ces différentes zones d'emprunts ont été analysés en laboratoire. Tous sont des matériaux argileux A2. Ce matériau a été compacté en effectuant 6 passes avec un compacteur de type V3 sur une épaisseur de 30 cm. De nombreux essais de compacité ont été effectués. Les essais donnent une teneur en eau comprise entre 93 et 97 % de la teneur en eau à l'OPN. Ces informations ont été recueillies grâce à l'analyse des comptes rendus de réunion que nous avons pu retrouver.
Un grillage anti-fouisseurs a été placé sur le talus, puis a été recouvert de terre végétale.
Le talus aval a été en partie déblayé puis engraissé à l'aide du matériau ainsi déblayé. Avant son engraissement, un géotextile drainant a été posé. Un grillage anti-fouisseurs a également été mis en place puis recouvert par de la terre végétale. La pente des talus est de 2H/1V.

La piste de crête, d'une largeur de 4.50 m, est constituée d'une épaisseur de 30 cm de matériaux graveleux (0/150 mm) mis en œuvre sur un géotextile synthétique de classe 7.

Photo 45. Digue d'Emmaüs - Travaux de terrassement (1998)

Photo 46. Digue d'Emmaüs - Crête de digue en l'état actuelle (2012)

La coupe type des aménagements du tronçon est donnée sur la figure suivante.

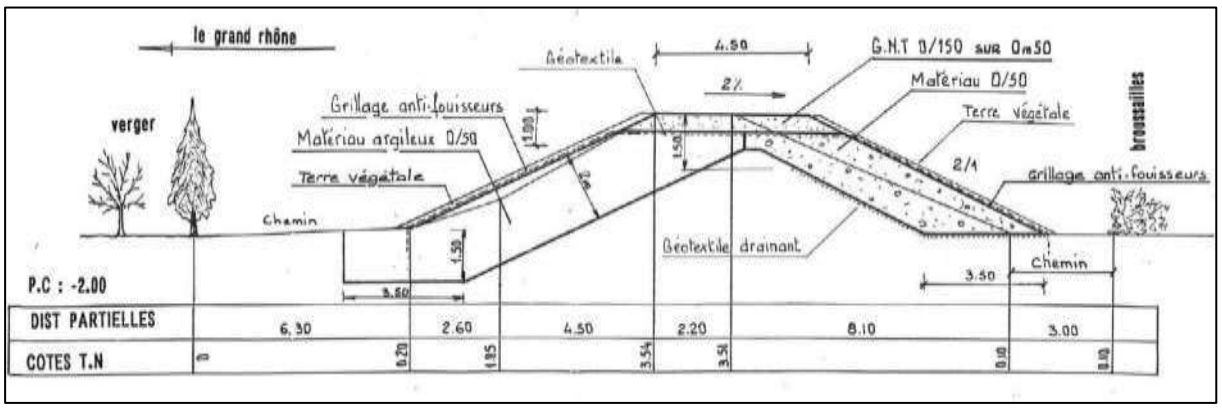


Figure 43. Digue d'Emmaüs – Coupe type

4.2.3.3. Caractéristiques des matériaux utilisés

La plupart des matériaux utilisés durant les travaux disposent de fiches d'agrément ou de planche d'essais. Néanmoins, elles n'ont pu être retrouvées. En revanche, les comptes rendus de réunion hebdomadaires en mentionnent la présence ainsi que leur approbation par le maitre d'œuvre. Il figure également dans ces comptes rendus de réunion, le résultat des essais de compactage.

Les principales informations provenant des comptes rendus de réunion sont résumées ci-dessous :
Le géotextile sous la piste en crête est un géotextile de classe 7,
Le grillage anti-fouisseur provient de la société SAGGAM,
Le géotextile drainant provient de la société AKZO NOBEL,
La GNT 0/150 provient de la carrière de granulats de la Crau à Istres,
Les essais de laboratoire classent les matériaux des zones d'emprunts utilisés pour le masque amont en matériaux argileux A2,

Les essais de compacité donnent des résultats de 93 à 97% de l'Optimum Proctor.

Suite à des sondages à la pelle réalisés en 2017 à différents endroits dans le talus aval, nous avons pu vérifier que le grillage était galvanisé et en parfait état après 20 ans et que le géodrain utilisé est un géotextile non tissé qui c'est également très bien comporté dans le temps.

Photo 47. Digue d'Emmaüs – Grillage anti-fouisseur

Photo 48. Digue d'Emmaüs – Géotextile drainant (en place et échantillon)

4.2.3.4. Suivi de chantier

Des comptes rendus hebdomadaires de réunion ont étaient rédigés et précisent l'avancée des travaux.

4.2.4. Accessibilité

La digue d'Emmaüs dispose de trois accès dont deux permettent d'accéder en crête de digue et pied amont. Ces accès sont respectivement situés au GRD 284.2 au droit d'Emmaüs, le second au GRD 285.25. Le troisième permet d'accéder au pied de digue aval et se situe GRD 285.

Photo 49. Digue d'Emmaüs - Accès à la digue d'Emmaüs (GRD 284.1)

Photo 50. Digue d'Emmaüs - Jonction avec la digue de « Passerons à Grande Montlong » (GRD 285.25)

Tableau 25. Franchissements, Section Emmaüs

Nom	GRD
Emmaüs	284.2
Passerons	285.25

4.2.5. Ouvrages englobés

Aucun ouvrage englobé n'est présent sur la digue d'Emmaüs.

4.3. DECOMPOSITION FONCTIONNELLE

4.3.1. Géométrie

Tableau 26. Synthèse de géométrie, tronçon Emmaüs-Passerons

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	8,5	8,2	8,3	0,1
Cote de pied de digue aval	m NGF	6,2	4,6	5,1	0,5
Cote à 20m du pdav	m NGF	5,1	3,7	4,5	0,4

Cote de pied de digue amont	m NGF	6,1	4,6	5,4	0,5
Cote à 20m du pdam	m NGF	5,4	2,1	4,2	1,4
Hauteur de digue coté aval	m	3,8	2,4	3,3	0,4
Hauteur de digue côté amont	m	3,6	2,3	2,9	0,4
Fruit aval	L/V	2,2	1,8	2,0	0,1
Fruit amont	L/V	2,2	1,9	2,1	0,1
Largeur du ségonnal	m	454	101	280	133

4.3.2. Données hydrauliques

Tableau 27. Données hydrauliques, tronçon Emmaüs-Passerons

Débit	Cote ligne d'eau m NGF		Revanche m		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	5,0	4,9	3,2	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9
8500	5,7	5,7	2,4	2,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
9500	6,1	6,1	2,0	2,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,6
10500	6,5	6,5	1,7	1,9	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
11500	7,0	7,0	1,1	1,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,4
12500	7,2	7,2	0,9	1,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,3
14160	7,3	7,3	0,8	1,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,3

4.3.3. Etanchéité

Lors des travaux de 1998, un masque a été ajouté à l'amont ; il était prévu en matériau A2 mais les sondages récemment réalisés montrent qu'il est plutôt en matériaux A1 et A2 ; ce qui assure néanmoins une bonne étanchéité.

4.3.4. Filtration-Drainage

Un géotextile filtrant/drainant a été mis en place sous le remblai aval ; il est toujours en très bon état.

4.3.5. Stabilité

Les talus amont et aval ont des fruits autour de 2, avec un minimum de 1.8 pour le talus aval et 1.9 pour le talus amont.

4.3.6. Protection

Un grillage anti-fouisseur a été mis en place pour protéger la digue de la présence de terriers.

4.3.7. Evacuation

Il n'y a pas de secteur résistant à la surverse sur la digue entre Emmaüs et Passeron compte tenu du calage de l'ouvrage.

4.3.8. Sécurité

Le tronçon est intégralement carrossable en crête ; il possède également une piste de chaque côté de la digue.

5. DIGUE DE PASSERONS A GRANDE MONTLONG (GRD4)

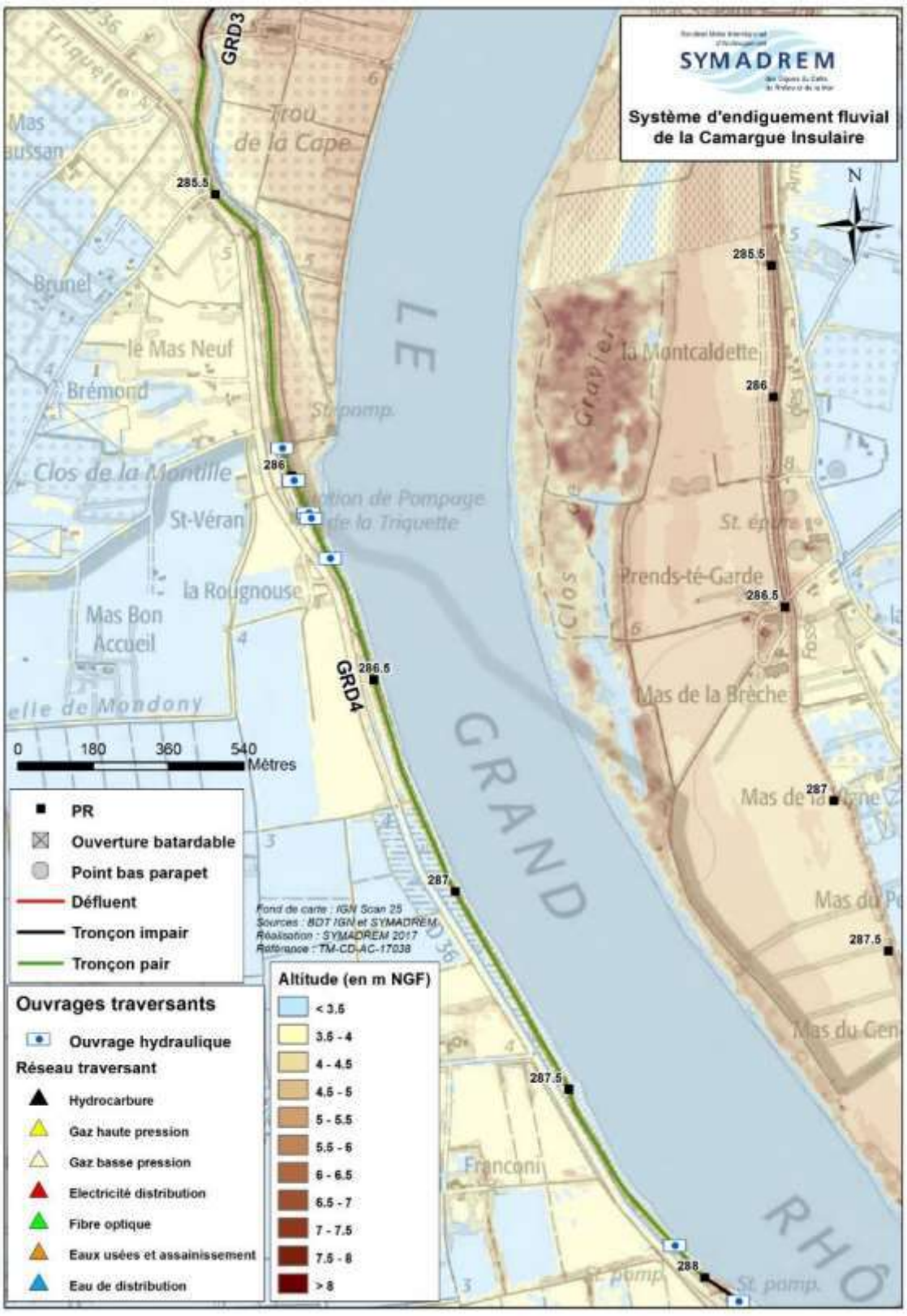


Figure 44. Plan de situation de Passerons à Grande Montlong

5.1. PREAMBULE

La digue de passerons à Grande Montlong s'étend du GRD 285.25 au GRD 288.1 en rive droite du Grand Rhône. Les ouvrages de protection ont été confortés en plusieurs tranches de travaux. La première tranche de travaux a été réalisée d'avril 2003 à mars 2004 sous la maîtrise d'ouvrage du SYMADREM, la deuxième tranche a été réalisée de mars 2005 à mars 2006 toujours sous la maitrise d'ouvrage du SYMADREM.
Le chantier a consisté à améliorer l'étanchéité et la stabilité de l'ouvrage sous l'effet de l'eau ; permettre la circulation des véhicules pour la surveillance et les interventions d'urgence comme en décembre 2003 ; protéger la solidité de la digue des nuisances dues aux animaux fouisseurs et sécuriser les ouvrages hydrauliques traversant la digue.

5.2. PRESENTATION GENERALE

5.2.1. Description historique

Les travaux ont consisté à conforter la digue par la confection d'un masque étanche en matériaux argileux, épaissir la digue côté terre en utilisant les déblais du site et argiles provenant de la carrière de Bellegarde et de Calvière, mettre en œuvre un rideau de palplanches en pied de digue côté fleuve, supprimer les prises d'eau abandonnées et sécuriser les autres par des siphons inversés, protéger les talus avec des grillages anti-fouisseurs. Des pistes de circulation en crête et en pied ont également été créées. La cote de la crête de digue oscille entre 7.69 m et 8.52 m NGF. Les cotes les plus faibles sont situées sur la partie aval (GRD 288).

5.2.2. Sectorisation

Suite à la réalisation des travaux, la digue de Passerons à la station de pompage de la Grande Montlong dispose 6 tronçons homogènes. La découpe de ces tronçons est donnée sur les figures ci-dessous.

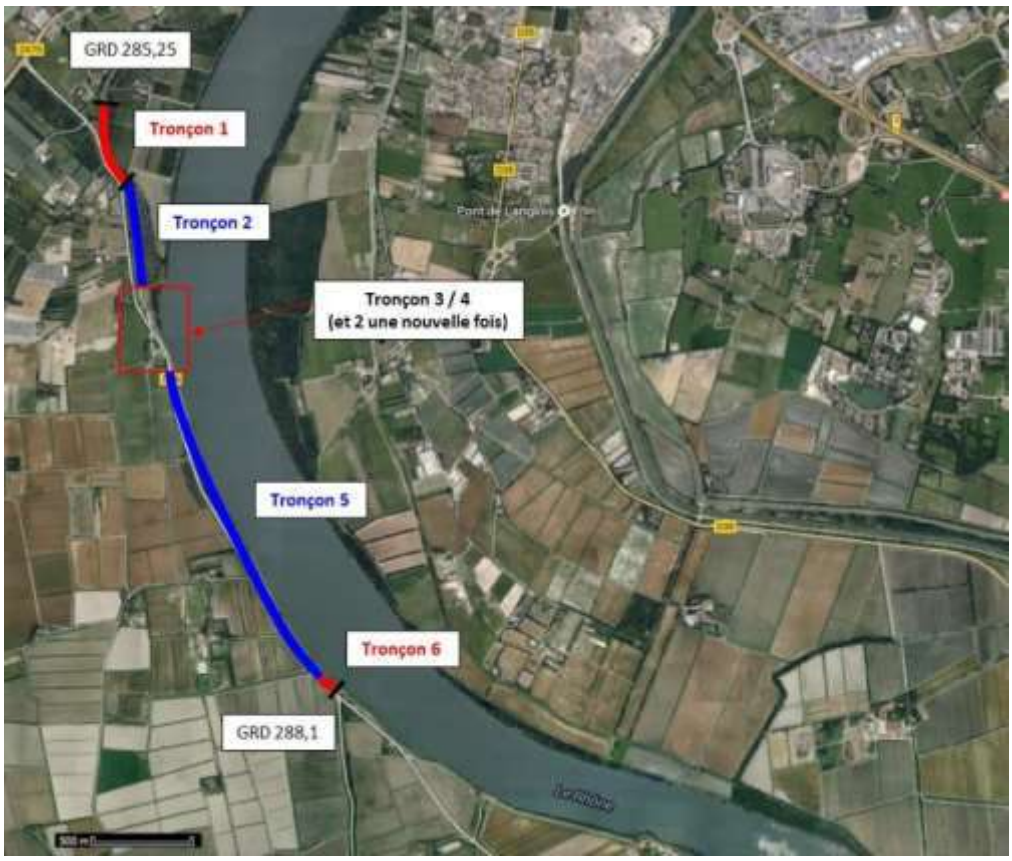


Figure 45. Digue de Passerons à Gd. Montlong – Sous-Tronçons

Figure 46. Digue de Passerons à Gd. Montlong – Sous-Tronçon 3, 4 (et 2 de nouveau)

Le tableau suivant présente les spécificités propres à chaque tronçon.

Tableau 28. Sectorisation Digue de Passerons à Montlong

Tronçon	PR (GRD)	Talus amont	Talus aval	Pistes	Ouvrages traversants
1	285.25 au 285.62	- Remblai compacté (clé d'ancrage) - Rideau de palplanches - Grille géosynthétique - Grillage anti-fouisseurs - Terre végétale	- Simple talutage - Grillage anti-fouisseurs - Terre végétale	- Géotextile non tissé - Matériaux graveleux 0/150 mm pour fondation - Matériaux 0/31.5 mm pour roulement - En amont côté fleuve : grave calcaire concassé 0/31.5 mm pour étanchéité	0
2	285.62 au 286.03 286.12 au 286.2	- Clé d'ancrage - Rideau de palplanches - Remblai A2 compacté - Grille géosynthétique - Grillage anti-fouisseurs - Terre végétale	- Matériaux A1/A2 compacté - Cordon drainant dans un géotextile - Grillage anti-fouisseurs - Terre végétale		2
3	286.03 au 286.12	- Clé d'ancrage - Rideau de palplanches - Remblai A2 compacté - Grille géosynthétique - Grillage anti-fouisseurs - Terre végétale	- Massif cage gabion renforcé dans géotextile - Grillage anti-fouisseurs - Terre végétale		4
4	286.2 au 286.35	- Clé d'ancrage - Rideau de palplanches et enrochements - Remblai A2 compacté - Grille géosynthétique - Grillage anti-fouisseurs - Terre végétale	- Mur de soutènement en L - Cordon drainant - Remblai compacté A1/A2 - Grillage anti-fouisseurs - Terre végétale		1
5	286.35 au 288.02	- Clé d'ancrage - Rideau de palplanches et enrochements - Remblai A2 compacté - Grille géosynthétique - Grillage anti-fouisseurs - Terre végétale	- Matériaux A1/A2 compacté - Cordon drainant dans un géotextile - Grillage anti-fouisseurs - Terre végétale		1
6	Au droit du puit à crémaillère du 288.02 au 288.07	- Clé d'ancrage - Double rideau de palplanches - Tirants d'ancrage - Enrochements - Remblai A2 compacté - Grille géosynthétique - Grillage anti-fouisseurs - Terre végétale	- Matériaux A1/A2 compacté - Grillage anti-fouisseurs - Terre végétale ou - Système de soutènement M3S® - Grillage anti-fouisseurs		1
Total d'ouvrages traversants					9

La description des tronçons est donnée ci-après.

5.2.3. Description des tronçons

5.2.3.1. Raccordement

La liaison avec la digue d'Emmaüs Passerons se fait au niveau du chemin des Passerons. Ce dernier était intégré aux travaux de 1998, dans lesquels il était appelé encoule de la cappe.

5.2.3.2. Description générale :

Photo 51. Digue de Passerons à Gd. Montlong - Crête de digue et talus en l'état actuel (2012)

Photo 52. Digue de Passerons à Gd. Montlong - Crête de digue et talus en l'état actuel (2012)

Tronçon 1 :

Sur tout ce tronçon, le ségonal est important. Un remblai d'une hauteur de 1 m a ainsi été terrassé et compacté à l'intérieur de ce ségonal afin de constituer une clé d'ancrage. Après son exécution, un écran étanche a été mis en place au fond de cette clé d'ancrage. Il a été battu jusqu'à la cote 0 NGF pour améliorer l'étanchéité de la fondation. Sa profondeur varie de 2.5 m à 5 m avec une profondeur moyenne de l'ordre de 3.8 m.

Photo 53. Digue de Passerons à Gd. Montlong - Battage palplanches - Tronçon 1 et 2 (2004)

La clé d'ancrage a ensuite été remblayée par un matériau A2 convenablement compacté provenant de la carrière de Bellegarde afin de constituer un masque étanche. Le parement

amont est protégé du batillage par un géosynthétique et un grillage anti-fouisseurs agrafé et fixé par des fers à béton. Ils sont ancrés en tête et en pied dans une tranchée de 40 cm de profondeur remblayé en matériaux A2 compacté. L'ensemble a été recouvert de terre végétale puis a été engazonné. La pente du talus est de 2H/1V.
Sur le talus aval, lorsque cela a été nécessaire, le talus du côté aval de la digue a été engraissé par une épaisseur très faible de matériau A1 compacté afin d'assurer une pente de talus de 2H/1V. Seul un grillage anti-fouisseurs a été mis en place et a été recouvert de terre végétale engazonnée.
La piste de crête est constituée d'une épaisseur de 30 cm de grave non traitée (0/150 mm) mis en œuvre sur un géotextile filtrant non tissé de catégorie 7. Elle est régalée et compactée en une seule couche, d'abord au rouleau lisse vibrant lourd puis au rouleau à pneus lourd. La densité sèche obtenue est de l'ordre de 90 % de l'Optimum Proctor modifié. Une épaisseur de 10 cm de matériaux 0/31.5 mm est également utilisée comme couche de roulement de la piste. Elle est régalée et compactée en une seule couche au rouleau lisse vibrant lourd. La densité sèche obtenue est de 90% de l'optimum Proctor modifié. En amont de la piste en crête, une grave non traitée 0/31.5 mm est mise en œuvre sur 40 cm d'épaisseur pour une meilleure étanchéité.
Une piste d'une largeur de 4,5 m a été créée en pied en amont de la digue. Sa réalisation à consister à mettre en œuvre une couche de base en grave 0/150 mm de 30 cm d'épaisseur. Elle est régalée et compactée en une seule couche, d'abord au rouleau lisse vibrant lourd puis au rouleau à pneus lourd. La densité sèche obtenue est de l'ordre de 90 % de l'Optimum Proctor modifié. Une épaisseur de 10 cm de matériaux 0/31.5 mm est également utilisée comme couche de roulement

La coupe type des aménagements du tronçon 1 est donnée sur la figure suivante.

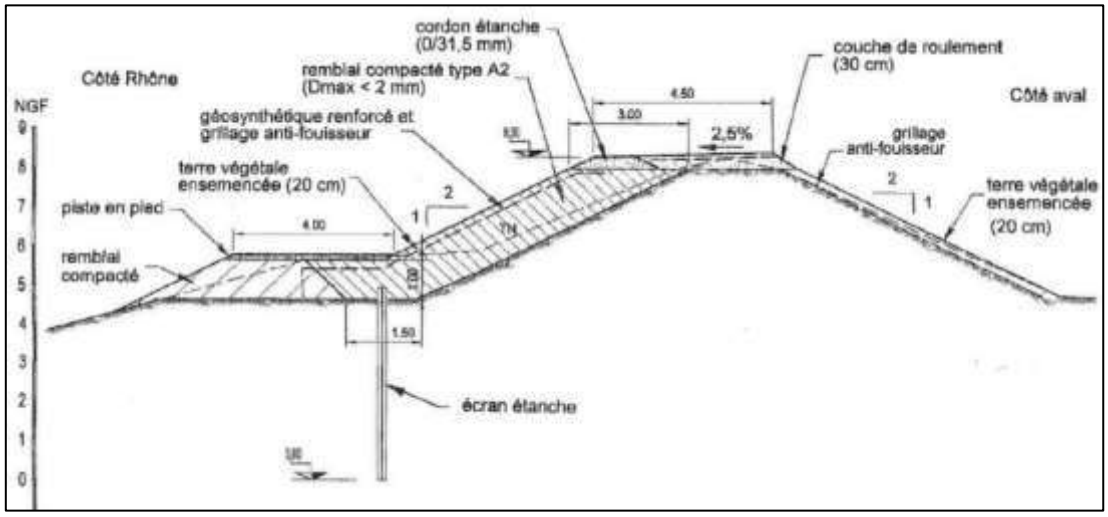


Figure 47. Digue de Passerons à Gd. Montlong – Tronçon 1 – Coupe type

Tronçon 2 :
Sur le talus amont, une tranchée d'ancrage d'environ 1 m de profondeur a été réalisée. Après son exécution, un écran étanche a été mis en place au fond de cette clé d'ancrage. Il a été battu jusqu'à la cote 0 NGF pour améliorer l'étanchéité de la fondation. Sa profondeur varie de 2.5 m à 5 m avec une profondeur moyenne de l'ordre de 3.8 m. La clé d'ancrage a ensuite été remblayée par un matériau A2 convenablement compacté provenant de la carrière de

Bellegarde afin de constituer un masque étanche. Le parement amont est protégé du batillage par un géosynthétique et un grillage anti-fouisseurs agrafé et fixé par des fers à béton. Ils sont ancrés en tête et en pied dans une tranchée de 40 cm de profondeur remblayé en matériaux A2 compacté. L'ensemble a été recouvert de terre végétale puis a été engazonné. La pente du talus est de 2H/1V.
Le talus aval a été engraissé par du matériau A1 convenablement compacté provenant de la carrière de Bellegarde ou provenant des déblais du site, côté Rhône. Sur ce tronçon, le pied du talus est pourvu d'un cordon drainant de 50 cm d'épaisseur dans une chaussette géotextile et de largeur variable. Le cordon drainant est constitué de matériau 4/16 mm. Un grillage anti-fouisseurs a également été mis en place puis recouvert par 20 cm de terre végétale. La pente du talus est de 2H/1V.
La piste de crête est constituée d'une épaisseur de 30 cm de grave non traitée (0/150 mm) mis en œuvre sur un géotextile filtrant non tissé de catégorie 7. Elle est régalée et compactée en une seule couche, d'abord au rouleau lisse vibrant lourd puis au rouleau à pneus lourd. La densité sèche obtenue est de l'ordre de 90 % de l'Optimum Proctor modifié. Une épaisseur de 10 cm de matériaux 0/31.5 mm est également utilisée comme couche de roulement de la piste. Elle est régalée et compactée en une seule couche au rouleau lisse vibrant lourd. La densité sèche obtenue est de 90% de l'optimum Proctor modifié. En amont de la piste en crête, une grave non traitée 0/31.5 mm est mise en œuvre sur 40 cm d'épaisseur pour une meilleure étanchéité.

La coupe type des aménagements du tronçon 2 est donnée sur la figure suivante.

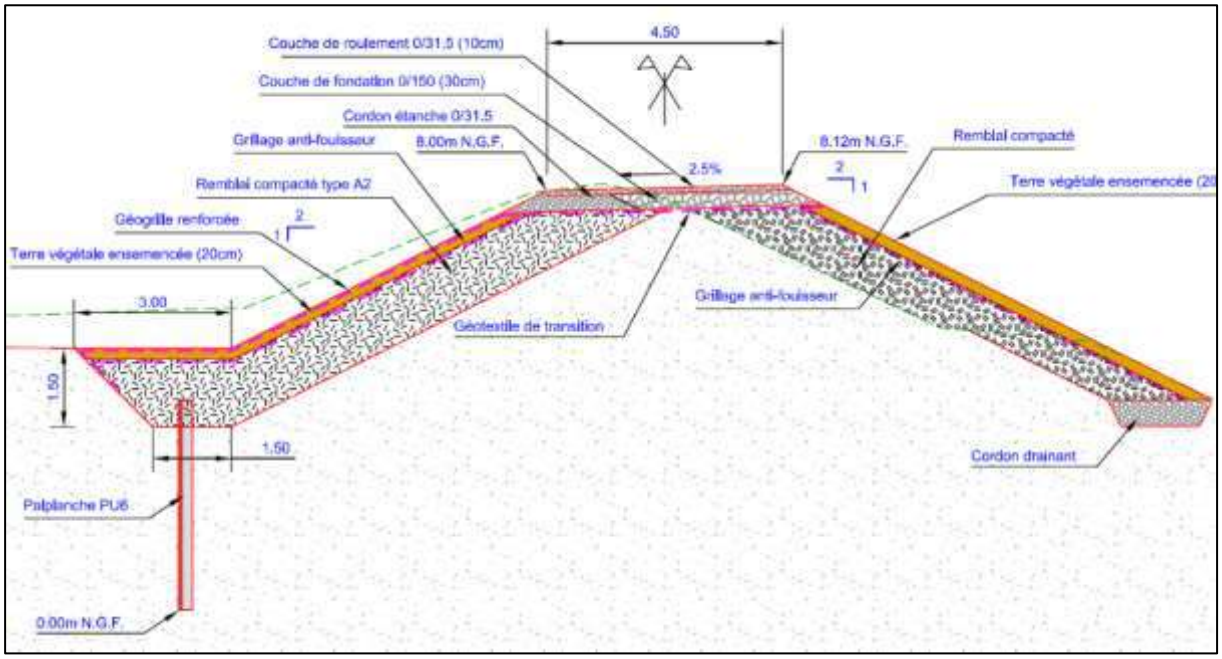


Figure 48. Digue de Passerons à Gd. Montlong – Tronçon 2 – Coupe type

Tronçon 3 :

Concernant le talus amont, une tranchée d'ancrage de 1.5 m de profondeur environ a été réalisée. Le rideau de palplanches PU6 de 4.5 m de longueur a été battu au fond de cette

tranchée jusqu'à la côté 0 m NGF. Elle a ensuite été remblayée par un matériau A2 compacté provenant de la carrière de Bellegarde afin de constituer un masque étanche. Des quantités supplémentaires en matériaux A2 ont été extraites de la carrière Calvière.
Un grillage anti-fouisseurs ainsi qu'une géogrille synthétique renforcée pour lutter contre l'érosion de surface ont été placés sur le talus amont puis recouvert par 20 cm de terre végétale ensemencée. La pente du talus est de 2H/1V.
Sur le talus aval, l'emprise foncière étant limitée par la station de pompage de la Triquette, le dispositif de soutènement mis en place a donc été assuré par un dispositif de massif cage gabion renforcé d'une hauteur de 2 m et d'une largeur de 1,5 m. Ce soutènement dispose d'une clé d'ancrage et a été déposé sur un géotextile de filtration. Pour assurer une pente de talus de 2H/1V, du matériau type A1/A2 a été compacté. Un grillage anti-fouisseur a été placé sur le talus puis recouvert par 20 cm de terre végétale ensemencée.

Photo 54. Digue de Passerons à Gd. Montlong – Tronçon 3 - Soutènement minéral et géotextile

La piste de crête est constituée d'une épaisseur de 30 cm de grave non traitée (0/150 mm) mis en œuvre sur un géotextile filtrant non tissé de catégorie 7. Une épaisseur de 10 cm de matériaux 0/31.5 mm est également utilisée comme couche de roulement de la piste. Le tout a été compacté au rouleau à bille lisse. En amont de la piste en crête, une grave non traitée 0/31.5 mm est mise en œuvre sur 40 cm d'épaisseur afin de constituer un cordon étanche. La piste de crête mesure 4.5 m de large.
Une piste est présente en aval de la digue.
La coupe type des aménagements du tronçon 3 est donnée sur la figure suivante.

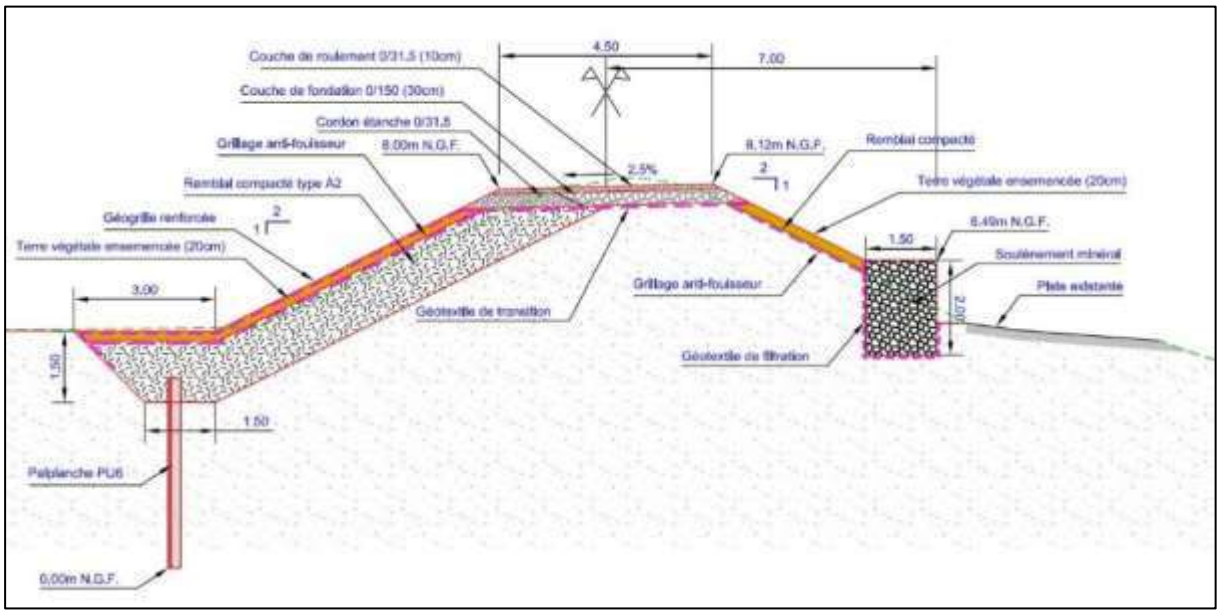


Figure 49. Digue de Passerons à Gd. Montlong – Tronçon 3 – Coupe type

Tronçon 4 :

Sur le talus amont, une tranchée d'ancrage de 1.5 m de profondeur environ a été réalisée. Le rideau de palplanches PU6 de 4.5 m de longueur a été battu au fond de cette tranchée jusqu'à la côté -2 m NGF environ. Elle a ensuite été remblayée par un matériau A2 compacté provenant de la carrière de Bellegarde et de Calvière afin de constituer un masque étanche. En amont du rideau de palplanches, côté Rhône, des enrochements issus principalement des déblais de démolition d'un perré maçonné de l'ancienne digue ont été disposés dans une chaussette géotextile afin de constituer une protection mécanique et un maintien en position du rideau. Ils ont été recouverts par un remblai végétal. Un grillage anti-fouisseurs ainsi qu'une géogrille synthétique renforcée pour lutter contre l'érosion de surface ont été placés sur le talus amont puis ont été recouverts par 20 cm de terre végétale ensemencée. La pente du talus est de 2H/1V.

Photo 55. Digue de Passerons à Gd.
Montlong - Enrochements de pied

Sur le talus aval, l'emprise foncière est limitée par la route départementale RD36. Ainsi, le dispositif de soutènement mis en place a donc été assuré par des murs préfabriqués de soutènement en L d'une hauteur de 1.20 mètres posés sur une semelle en béton armé pour renforcer la stabilité. Une glissière en béton adhérent (GBA) protège le mur de soutènement. L'espacement entre le mur de soutènement et la GBA a été comblé par du matériau drainant 4/16 mm. Ce même matériau a également servi à constituer un cordon drainant de 50 cm d'épaisseur dans une chaussette géotextile à la base du mur de soutènement. Le talus aval a été remblayé et compacté par du matériau A1/A2 provenant du site et de la carrière de Bellegarde. Un grillage anti-fouisseur a été placé sur le talus puis recouvert par 20 cm de terre végétale ensemencée. La pente du talus est de 2H/1V.

Photo 56. Digue de Passerons à Gd.
Montlong – Glissière de sécurité GBA

La piste de crête est constituée d'une épaisseur de 30 cm de grave non traitée (0/150 mm) mise en œuvre sur un géotextile de transition. Une épaisseur de 10 cm de matériaux 0/31.5 mm est également utilisée comme couche de roulement de la piste. Le tout a été compacté au rouleau à bille lisse. En amont de la piste en crête, une grave non traitée 0/31.5 mm est mise en œuvre sur 40 cm d'épaisseur afin de constituer un cordon étanche. La piste de crête mesure 4.5 m de large.

La coupe type des aménagements du tronçon 4 est donnée sur la figure suivante.

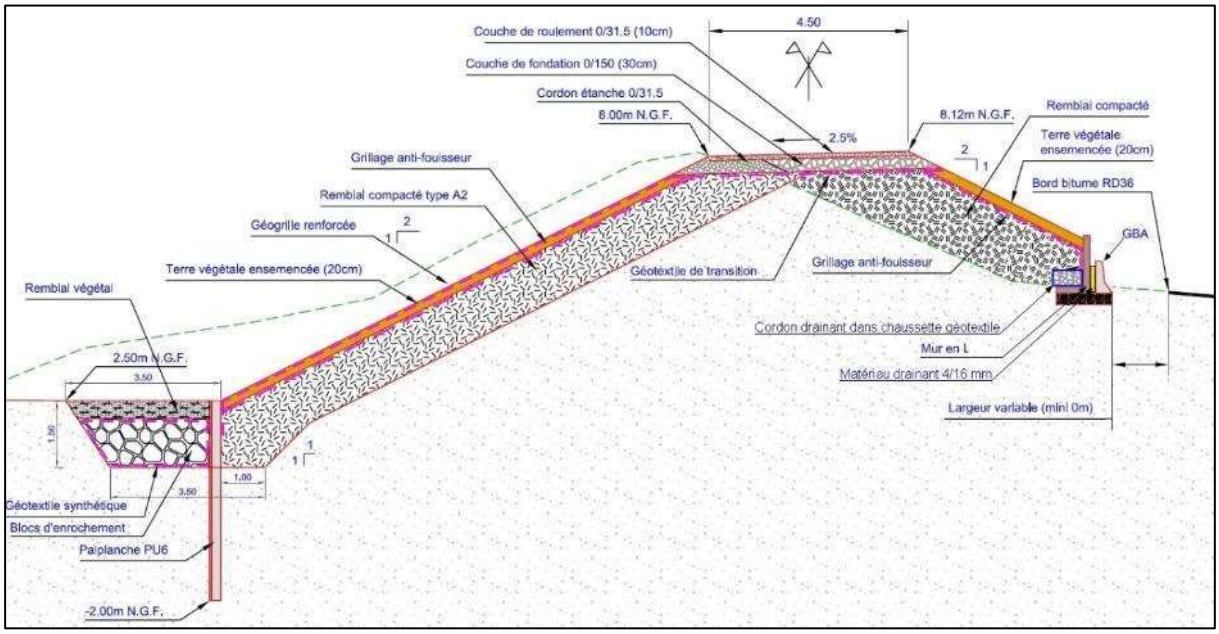


Figure 50. Digue de Passerons à Gd. Montlong – Tronçon 4 – Coupe type

Tronçon 5 :

Le linéaire de ce tronçon représente 1,8 km environ.

Sur le talus amont, afin d'assurer une bonne étanchéité entre le talus amont et le rideau de palplanches, le talus a d'abord été engraissé par du matériau A2 en provenance de la carrière de Bellegarde ou de Calvière. Le rideau de palplanches PU6 de 4.5 m de longueur a ensuite été battu jusqu'à la côté 0 m NGF environ. Le rideau de palplanche dispose de liernes en tête.

Photo 57. Digue de Passerons à Gd. Montlong - Battage palplanches - Tronçon 5 (2004)

En amont du rideau de palplanches, côté Rhône, le matériau A2 a été déblayé et des enrochements sur un géotextile ont été disposés afin de constituer une protection mécanique et un maintien en position du rideau de palplanches. Ils ont été recouverts par un remblai végétal.

Un grillage anti-fouisseurs agrafé par des fers à béton ainsi qu'une géogrille synthétique renforcée pour lutter contre l'érosion de surface ont été placés sur le talus amont puis recouvert par 20 cm de terre végétale ensemencée.
Le talus aval a été engraissé par du matériau type A1/A2 convenablement compacté. Dans ce secteur, le pied du talus est pourvu d'un cordon drainant de 50 cm d'épaisseur dans une chaussette géotextile. Le cordon drainant est constitué de gravillon 4/16 mm. Un grillage anti-fouisseurs a également été mis en place puis recouvert par 20 cm de terre végétale. La pente du talus est de 2H/1V.
La piste de crête est constituée d'une épaisseur de 30 cm de grave non traitée (0/150 mm) mis en œuvre sur un géotextile de transition. Une épaisseur de 10 cm de matériaux 0/31.5 mm est également utilisée comme couche de roulement de la piste. Le tout a été compacté au rouleau à bille lisse. En amont de la piste en crête, une grave non traitée 0/31.5 mm est mise en œuvre sur 40 cm d'épaisseur afin de constituer un cordon étanche. La piste de crête mesure 4.5 m de large.
Une piste en aval de la digue a été créée sur la parcelle du SYMADREM (GRD 286.75). Elle est constituée d'une couche de fondation en matériau 0/150 mm sur un géotextile de transition. Elle mesure 4 m de large.
La coupe type des aménagements du tronçon 5 est donnée sur la figure suivante.

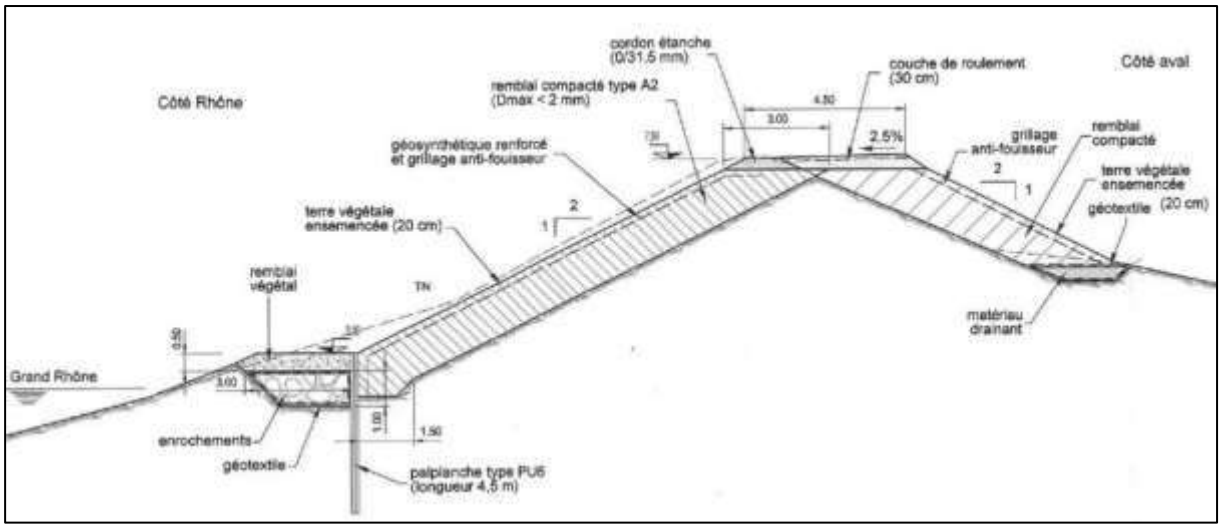


Figure 51. Digue de Passerons à Gd. Montlong – Tronçon 5 – Coupe type

Tronçon 6 :
Ce tronçon constitue le raccordement avec le tronçon au départ de la station de pompage de la Triquette. Selon que l'on se trouve en amont ou en aval par rapport au puit à crémaillère, la coupe type est différente. Sur ce secteur, l'ancienne digue a été démolie et a été complètement reconstruite. Le matériau constitutif de la digue est du matériau A2 en provenance de la carrière de Bellegarde compacté au rouleau à pied de mouton.

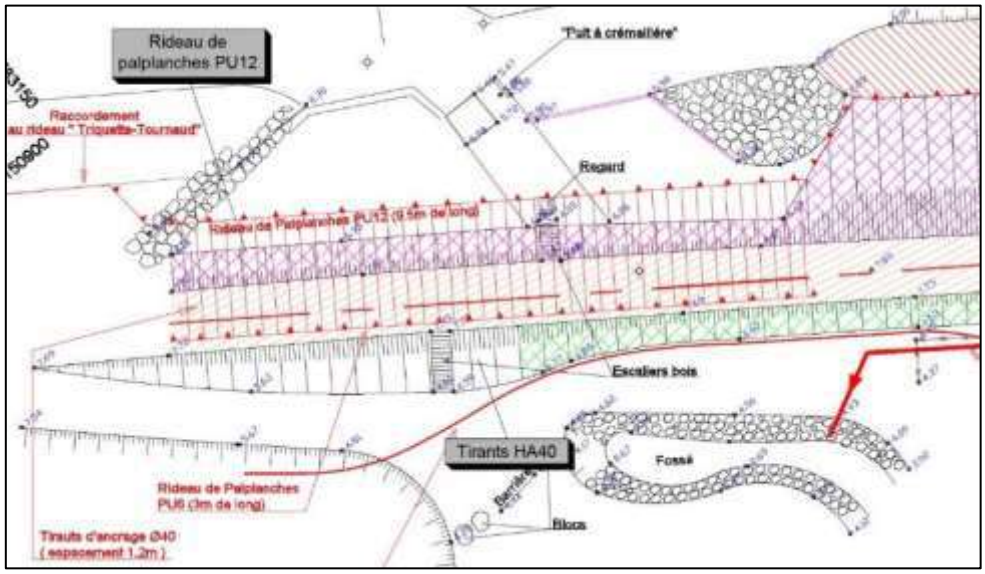


Figure 52. Digue de Passerons à Gd. Montlong – Tronçon 6 – Vue en plan des aménagements

En amont du puit à crémaillère : talus amont et aval
Le talus amont est composé d'un double rideau de palplanches reliées entre eux par des tirants d'ancrage de diamètre 40 mm espacés de 1.20 m. Le premier rideau de palplanches, côté Rhône, est constitué de palplanches PU12 de 9.5 m de longueur ancrée à la côté – 5 m NGF. Le second rideau de palplanches, côté terre, est constitué de palplanches PU6 de 3 m de long. Un grillage anti-fouisseur ainsi qu'une géogrille synthétique ont été déposés sur le remblai constitué de matériaux A2 compactés. Des enrochements en pied de talus ont été déposés pour limiter les effets d'érosion. Le talus aval dispose simplement d'un grillage anti-fouisseur. De la terre végétale ensemencée est venue recouvrir les talus. Les pentes des talus sont de 2H/1V.

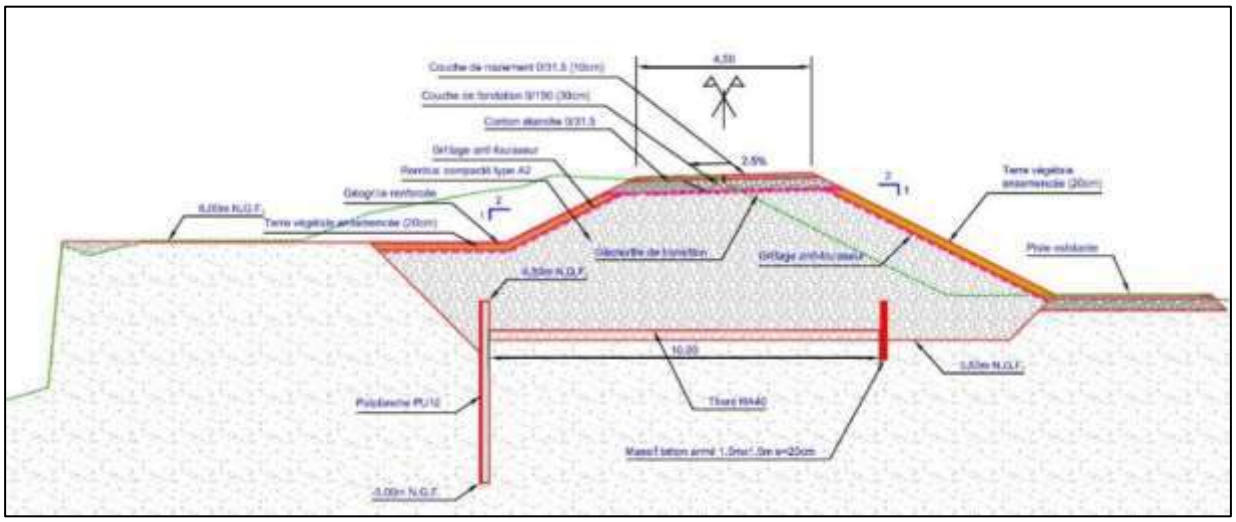


Figure 53. Digue de Passerons à Gd. Montlong – Tronçon 6 – Coupe type amont

Photo 58. Digue de Passerons à Gd. Montlong - Dépose d'enrochements puit à crémaillère

En aval du puit à crémaillère : talus amont et aval
Le talus amont conserve la même description que précédemment. La pente du talus est de 2H/1H. L'emprise foncière avale est limitée par la présence de la station de pompage de la Grande Montlong, ne permettant pas un élargissement par engraissement. Un dispositif de soutènement par massif d'alvéoles M3S® végétalisé a donc ainsi été mis en place. La pente du parement végétal ainsi constitué est de 2H/3V.

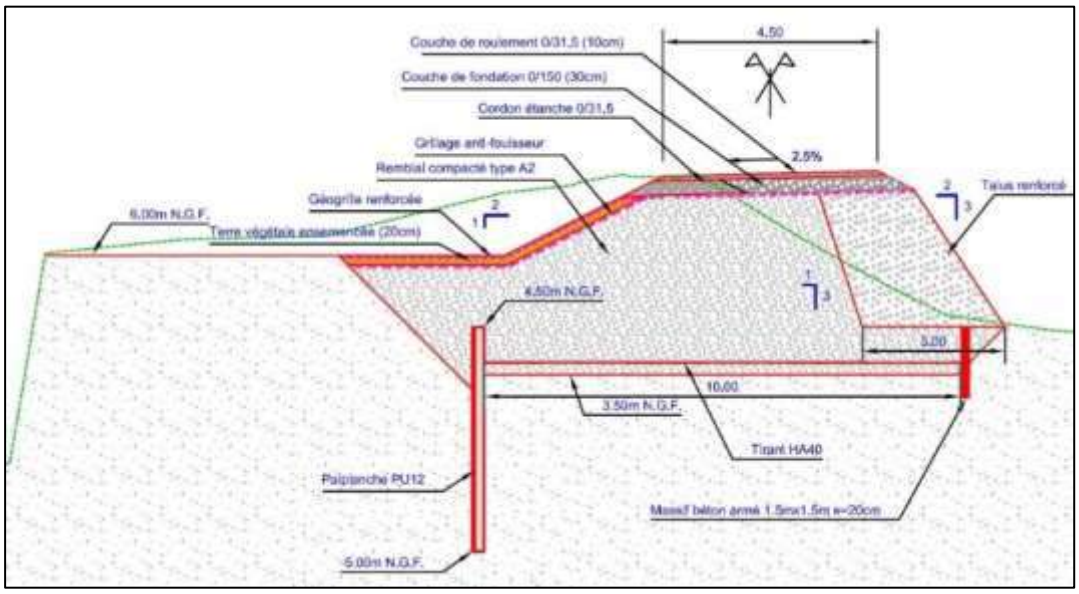


Figure 54. Digue de Passerons à Gd. Montlong – Tronçon 6 – Coupe type aval

Photo 59. Digue de Passerons à Gd. Montlong – Talus aval en aval du puit à crémaillière

Sur les pistes
La piste de crête est constituée d'une épaisseur de 30 cm de grave non traitée (0/150 mm) mis en œuvre sur un géotextile de transition. Une épaisseur de 10 cm de matériaux 0/31.5 mm est également utilisée comme couche de roulement de la piste. Le tout a été compacté au rouleau à bille lisse. En amont de la piste en crête, une grave non traitée 0/31.5 mm est mise en œuvre sur 40 cm d'épaisseur afin de constituer un cordon étanche. La piste de crête mesure 4.5 m de large.

5.2.3.3. Caractéristiques des matériaux utilisés

Les matériaux utilisés pour la réalisation des travaux disposent de fiches d'agrément. Des essais de convenance ont été réalisés (compactage, teneur en eau,…). Ces données sont disponibles dans le DOE.

5.2.3.4. Suivi de chantier

Sur l'ensemble des travaux, des comptes rendus hebdomadaires de réunion ont été rédigés ainsi que des fiches de suivis de travaux. Des photos illustrent l'avancée des travaux. Ces données sont disponibles dans le DOE.
On donne ci-dessous le résultat de quelques essais géotechniques effectués sur le tronçon n°5 selon la sectorisation préalablement effectuée.

ESSAIS D'IDENTIFICATION				Classification	Teneur en eau	Valeur au bleu
Ouvrage	Sondages	Profondeurs(m)	Nature/couleur	GTR	W%	VBS
			Normes AFNOR	11-300	94-050	94-068
remblai corps de digue	P45C	0.20	limon gris	A2	19.6%	2.52%
remblai corps de digue	P44D	0.20	limon gris	A2	18.4%	2.54%
remblai corps de digue	P44C	0.20	limon gris	A2	20.6%	2.74%
remblai corps de digue	P43B	0.20	limon gris	A2	15.8%	2.66%
remblai corps de digue	P43C	0.20	limon gris	A2	16.7%	2.65%

Figure 55. Digue de Passerons à Gd. Montlong – Tronçon 5 – Essais identification

N°essai	localisation	Coefficient de perméabilité K (m/s)
G1	3 m avant P 45	1.7×10^{-8}
G2	45 m avant P 46	1.0×10^{-11}
G3	P 33A	6.7×10^{-8}
G4	P 29	1.5×10^{-7}

Figure 56. Digue de Passerons à Gd. Montlong – Tronçon 5 – Perméabilité (zone graveleuse)

Moyenne des résultats obtenus sur le matériau A2									
Essai	IC	Wp (%)	Wl (%)	IP	VBS	W_{opn}	Perméabilité	Passant à 2 mm	Passant à 80 µm
Nombre d'essais	5	4	10	10	21	1	13	2	3
Moyenne	0.86	17.95	33.66	14.11	2.61	18.3	3.18×10^{-8}	99.85	89.03

Tableau 29. Digue de Passerons à Gd. Montlong – Synthèse géotechnique matériau A2

Moyenne des résultats obtenus sur le matériau A1							
Essai	IC	Wl (%)	IP	VBS	Perméabilité	Passant à 2 mm	Passant à 80 µm
Nombre d'essais	2	2	2	14	2	1	1
Moyenne	2.12	33.5	2.12	2.17	1.819×10^{-8}	99.8	60.2

Tableau 30. Digue de Passerons à Gd. Montlong – Synthèse géotechnique matériau A1

5.2.4. Accessibilité

Les accès à la digue de Passerons à Grande Montlong sont recensés dans le tableau suivant :

Tableau 31. Franchissements, Section Passerons-Montlong

Accès	Crête	Pied amont	Pied aval
GRD \ Nombre	5	2	4
285.25	X		X
285.63	X	X	X
285.98	X	X	
286.4	X		X
286.75			X
288	X		

5.2.5. Ouvrages englobés

Tableau 32. Ouvrages englobés, Digue de Passerons à Montlong

GRD	Fiche	Gestionnaire	Type d'ouvrage	Tuyauterie	
				Caractéristique	Diamètre
Tronçon 1 : pas d'OHT					
Tronçon 2 : 2 OHT					
285.96	GRD_IRR_285,96	ASA Roubine de la Triquette	Pompage - Dispose d'un regard	---	1000 mm
286.02	GRD_IRR_286,02	ASA Roubine de la Triquette	Pompage - Dispose d'un regard	---	800 mm
Tronçon 3 : 2 OHT					
286.1	GRD_IRR_286,1	ASA de la Triquette	Pompage	Canalisation sous le corps de digue avec brides anti-renard dans le masque d'argile	2*800 mm
286.11	GRD_IRR_286,11	ASA de la Triquette	Pompage	Canalisation en siphon inversé avec brides anti-renard dans le masque d'argile	2*Ø 1000 mm dans digue ; 2*Ø 800 mm amont et aval

Tronçon 4 : 1 OHT					
286.21	GRD_IRR_286,21	Mas Colombeaud	Pompage	Canalisation en siphon inversé avec brides anti-renard dans le masque d'argile	300 mm
Tronçon 5 : 1 OHT					
287.91	GRD_IRR_287,91	ASA Canal en relief Grande Montlong	Pompage	----	500 mm
Tronçon 6 : pas d'OHT					

5.3. DECOMPOSITION FONCTIONNELLE

5.3.1. Géométrie

Tableau 33. Synthèse de géométrie, tronçon Passerons-Montlong

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	8,5	7,7	8,0	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	6,1	3,7	4,6	0,6
Cote à 20m du pdav	m NGF	4,5	2,6	3,9	0,5
Cote de pied de digue amont	m NGF	6,2	2,6	4,1	1,3
Cote à 20m du pdam	m NGF	5,2	0,7	1,9	1,8
Hauteur de digue coté aval	m	4,6	2,1	3,4	0,6
Hauteur de digue côté amont	m	5,4	2,0	3,9	1,1
Fruit aval	L/V	2,5	1,4	2,0	0,3
Fruit amont	L/V	4,0	1,8	2,1	0,4
Largeur du ségonnal	m	420	6	72	116

5.3.2. Données hydrauliques

Tableau 34. Données hydrauliques, tronçon Passerons-Montlong

Débit	Cote ligne d'eau m NGF		Revanche m		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	4,9	4,6	3,0	3,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,8
8500	5,7	5,4	2,2	2,4	0,1	0,0	0,1	0,0	0,6
9500	6,1	5,8	1,9	2,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,5
10500	6,4	6,1	1,5	1,7	0,1	0,1	0,1	0,0	0,4
11500	7,0	6,6	1,0	1,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3
12500	7,2	6,9	0,8	0,9	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2

14160	7,3	7,0	0,7	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2

5.3.3. Etanchéité

Un masque en matériaux A2 a été mis en place sur le talus amont et permet d'assurer l'étanchéité de la digue.

5.3.4. Filtration-drainage

Un complexe drainant-filtrant est placé soit sous la recharge aval soit à la limite du muret dans les zones à confortement aval.

5.3.5. Stabilité

Localement le mur de soutènement assure la stabilité aval mais de façon générale c'est la géométrie de la digue qui remplit ce rôle, les fruits des talus sont d'environ 2/1, avec des zones plus abruptes avec 1.7/1 à l'aval ou 1.8 à l'amont.

5.3.6. Protection

Les parements sont couverts de grillage anti-fouisseur lorsqu'il n'y a pas de mur de soutènement.

5.3.7. Evacuation

Il n'y a pas de secteur résistant à la surverse sur la digue entre Passeron et Montlong compte tenu du calage de l'ouvrage.

5.3.8. Sécurité

Le tronçon est intégralement carrossable en crête ; il possède également une piste coté fleuve lorsqu'il y a suffisamment de ségonnal et une piste coté terre, localement remplacée par la route.

6. DIGUE DE GRANDE A PETITE MONTLONG (GRD5)

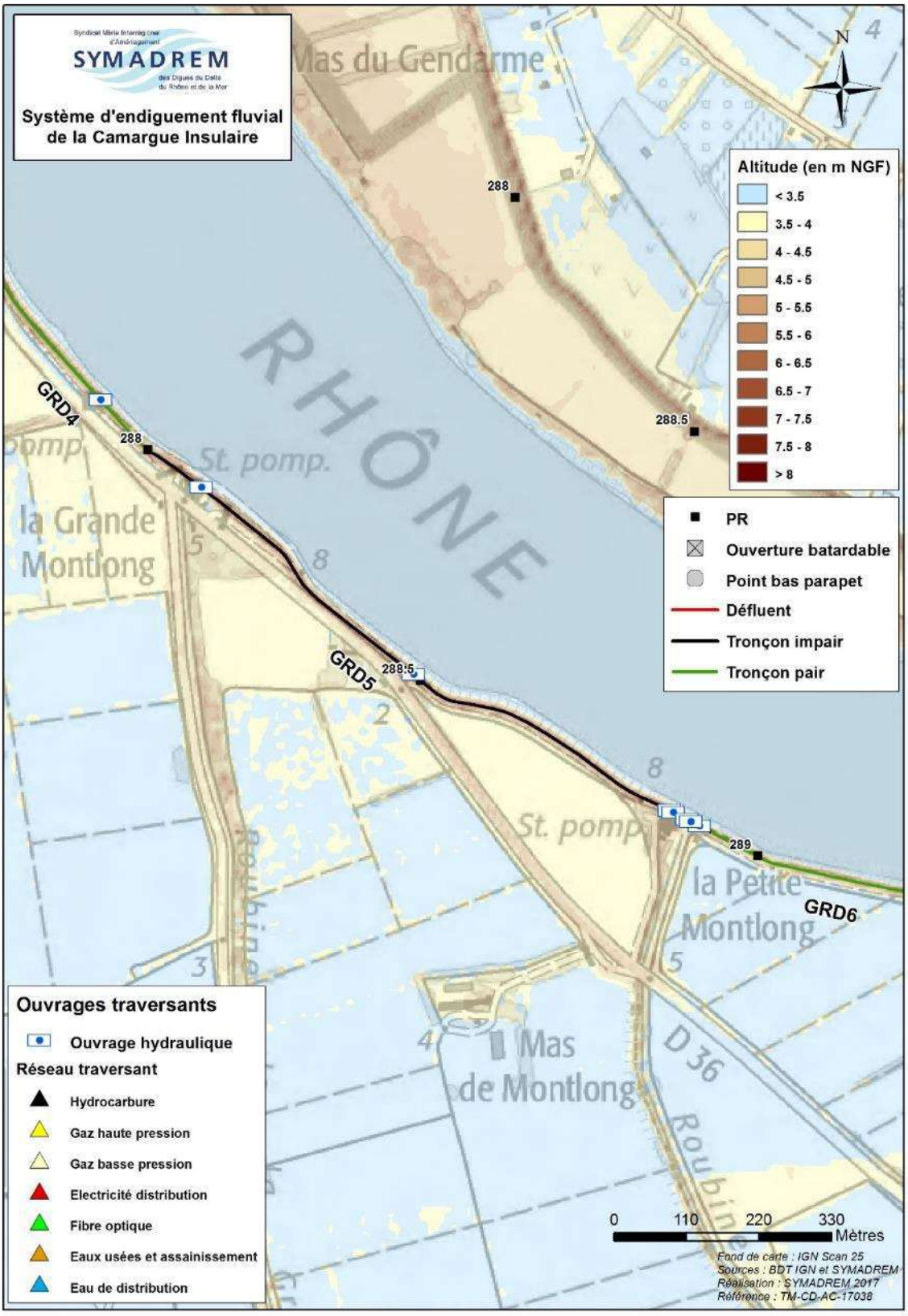


Figure 57. Plan de situation de Grande à Petite Montlong

6.1. PREAMBULE

La digue de Grande Montlong à Petite Montlong s'étend du GRD 288.1 au GRD 288.9 en rive droite du Grand Rhône. Les ouvrages de protection ont été confortés de mars 2005 à mars 2006 toujours sous la maitrise d'ouvrage du SYMADREM.
Le chantier a consisté à améliorer l'étanchéité et la stabilité de l'ouvrage sous l'effet de l'eau ; permettre la circulation des véhicules pour la surveillance et les interventions d'urgence comme en décembre 2003 ; protéger la solidité de la digue des nuisances dues aux animaux fouisseurs et sécuriser les ouvrages hydrauliques traversant la digue.

6.2. PRESENTATION GENERALE

6.2.1. Description historique

Les travaux ont consisté à conforter la digue par la confection d'un masque étanche en matériaux argileux, épaissir la digue côté terre en utilisant les déblais du site et argile provenant de la carrière de Bellegarde et de Calvière, mettre en œuvre un rideau de palplanches en pied de digue côté fleuve, supprimer les prises d'eau abandonnées et sécuriser les autres par des siphons inversés, protéger les talus avec des grillages anti-fouisseurs. Des pistes de circulation en crête et en pied ont également été créées. La cote de la crête de digue oscille entre 7.54 m et 7.71 m NGF.

6.2.2. Sectorisation

Suite à la réalisation des travaux, la digue de la station de pompage de la Grande Montlong à la station de pompage de la Petite Montlong dispose 3 tronçons homogènes ont pu être identifiés.

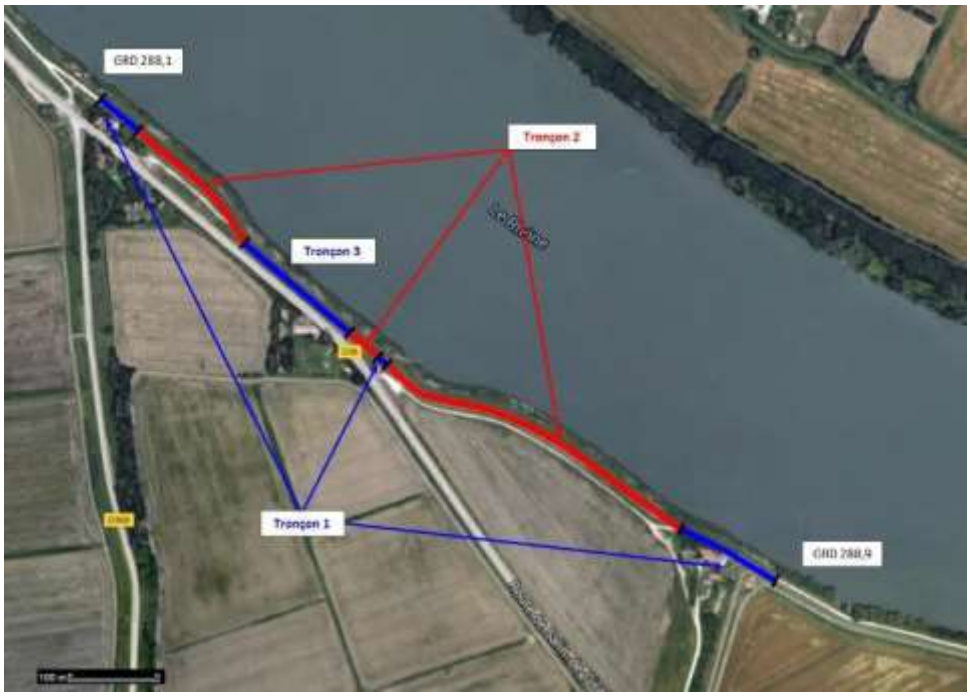


Figure 58. Digue de Gde. Montlong à Petite. Montlong – Localisation des tronçons 1, 2 et 3

Le tableau suivant présente les spécificités propres à chaque tronçon.

Tableau 35. Sectorisation, section Montlong

Tronçon	PR (GRD)	Talus amont	Talus aval	Pistes	Ouvrages traversants
1	288.07 au 288.12 (Grande Montlong) 288.47 au 288.48 (Station M.Boyer) 288.83 au 288.9 (Petite Montlong)	- Clé d'ancrage - Rideau de palplanches et enrochements - Remblai A2 compacté - Grille géosynthétique - Grillage anti-fouisseurs - Terre végétale	- Système de soutènement M3S® - Grillage anti-fouisseurs - Parement végétalisé ou minéral	- Géotextile non tissé - Matériaux graveleux 0/150 mm pour fondation - Matériaux 0/31.5 mm pour roulement - En amont côté fleuve : grave calcaire concassé 0/31.5 mm pour étanchéité	6
2	288.12 au 288.27 288.42 au 288.47 288.48 au 288.83		- Matériaux A1/A2 compacté - Cordon drainant dans un géotextile - Grillage anti-fouisseurs - Terre végétale		0
3	288.27 au 288.42		- Mur de soutènement en L - Cordon drainant - Remblai compacté A1/A2 - Grillage anti-fouisseurs - Terre végétale		0
Total d'ouvrages traversants					7

La description des tronçons est donnée ci-après.

6.2.3. Description des tronçons

6.2.3.1. Raccordement

Au niveau de Grande Montlong, Les palplanches ont été raccordées entre les deux phases de travaux. Les travaux se sont également recoupés sur environ 20m pour une meilleure transition.

6.2.3.2. Description générale :

Tronçon 1 :
Sur le talus amont, une tranchée d'ancrage de 1.5 m de profondeur environ a été réalisée. Le rideau de palplanches PU6 de 4.5 m de longueur a été battu au fond de cette tranchée jusqu'à la côté -2 m NGF environ. Elle a ensuite été remblayée par un matériau A2 compacté provenant de la carrière de Bellegarde et de Calvière afin de constituer un masque étanche. En amont du rideau de palplanches, côté Rhône, des enrochements issus principalement des déblais de démolition d'un perré maçonné de l'ancienne digue ont été disposés dans une

chaussette géotextile afin de constituer une protection mécanique et un maintien en position du rideau. Ils ont été recouverts par un remblai végétal. Un grillage anti-fouisseurs ainsi qu'une géogrille synthétique renforcée pour lutter contre l'érosion de surface ont été placés sur le talus amont puis recouvert par 20 cm de terre végétale ensemencée.

Photo 60. Digue de Gde. à Petite. Montlong - Terrassement

Photo 61. Digue de Gde. à Petite. Montlong - Masque amont A2 et palplanches

Photo 62. Digue de Gde. à Petite. Montlong - Grille géosynthétique

Photo 63. Digue de Gde. à Petite. Montlong - Grillage anti-fouisseurs

Sur le talus aval, dans ce secteur, l'emprise foncière avale est limitée par : la présence de la station de pompage de la Grande Montlong, par la station de pompage de M. BOYER, par la station de pompage de la petite Montlong. Ces stations de pompage ne permettant pas un élargissement par engraissement. Un dispositif de soutènement par massif d'alvéoles M3S® a donc ainsi été mis en place. Selon les stations de pompage, le parement du mur vertical du système de soutènement ainsi créé a été végétalisé ou a été habillé par des galets de Crau. Le produit est une structure textile tridimensionnelle et se présente sous forme de nappes alvéolaires (assemblage de bande de géotextile entre elles) qui s'utilise en association avec un matériau de remplissage compactable en qualité Q4 au sens du GTR. Le réseau cellulaire obtenu, créé un mécanisme de confinement du matériau qui améliore sa résistance au cisaillement et à la traction. Les deux premières couches alvéolaires ont été remblayées de matériau drainant roulé de type 4/16 mm. Le reste de l'ouvrage a été remblayé avec le matériau propre de la digue en place.

Photo 64. Digue de Gde. à Petite. Montlong - Système soutènement M3S

La piste de crête est constituée d'une épaisseur de 30 cm de grave non traitée (0/150 mm) mise en œuvre sur un géotextile de transition. Une épaisseur de 10 cm de matériaux 0/31.5 mm est également utilisée comme couche de roulement de la piste. Le tout a été compacté au rouleau à bille lisse. En amont de la piste en crête, une grave non traitée 0/31.5 mm est mise en œuvre sur 40 cm d'épaisseur afin de constituer un cordon étanche. La piste de crête mesure 4.5 m de large.

La coupe type des aménagements du tronçon est donnée sur la figure suivante.

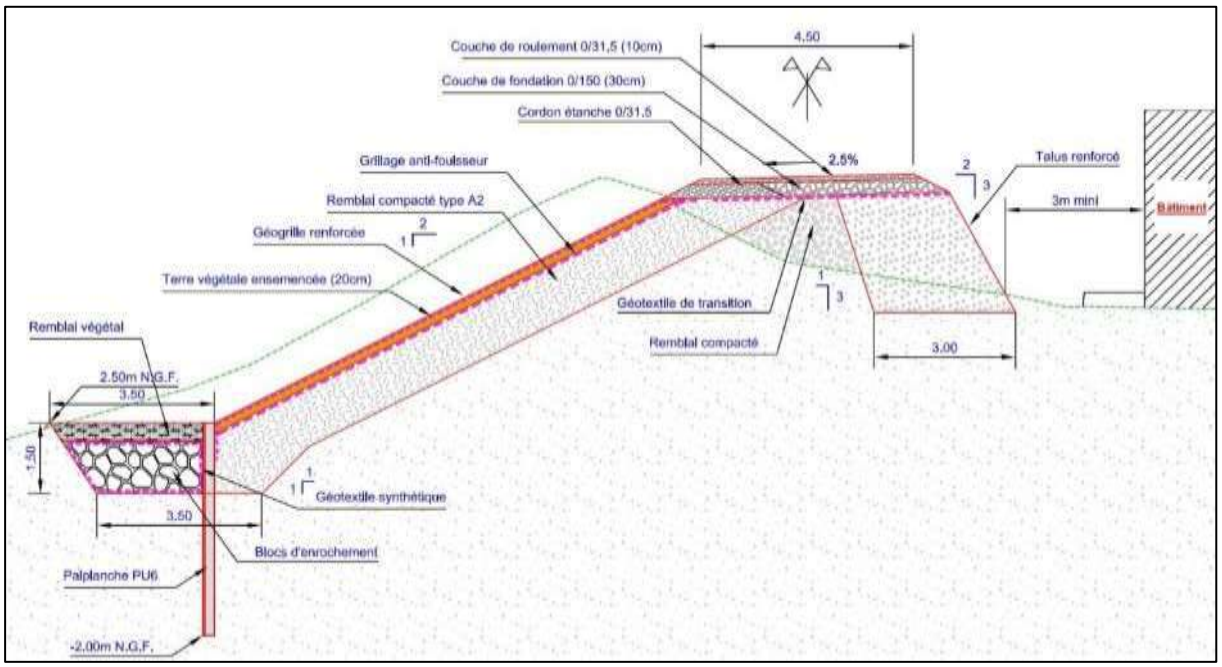


Figure 59. Digue de Gde. Montlong à Petite. Montlong – Tronçon 1 – Coupe type

Photo 65. Digue de Gde. à Petite. Montlong - Travaux de carrossabilité

Tronçon 2

Le tronçon 2 a les mêmes caractéristiques que le tronçon 5 de la digue de Passerons à Grande Montlong.

Tronçon 3

Le tronçon 3 a les mêmes caractéristiques que le tronçon 4 de la digue de Passerons à Grande Montlong.

6.2.3.3. Caractéristiques des matériaux utilisés

Les matériaux utilisés pour la réalisation des travaux disposent de fiche d'agréments. Des essais de convenance ont été réalisés (béton, compactage, teneur en eau,…). Ces données sont disponibles dans le DOE.

6.2.3.4. Suivi de chantier

Sur l'ensemble des travaux, des comptes rendus hebdomadaires de réunion ont été rédigés ainsi que des fiches de suivis de travaux. Des photos illustrent l'avancée des travaux. Ces données sont disponibles dans le DOE.
On retrouve principalement les mêmes caractéristiques géotechniques que sur le tronçon n°5 de la digue de Passerons à Grande Montlong.

6.2.4. Accessibilité

Les accès à la digue de Passerons à Grande Montlong sont recensés dans le tableau suivant :

Tableau 36. Franchissements, Section Montlong

Accès	Crête	Pied amont	Pied aval
GRD \ Nombre	2	0	3
288	X		
288.2	X		X
288.5			X
288.82			X

6.2.5. Ouvrages englobés

Tableau 37. Section Montlong – Ouvrages englobés

GRD	Fiche	Gestionnaire	Type d'ouvrage	Tuyauterie	
				Caractéristique	Diamètre
288.09	GRD_IRR_288,09	Mas du grand Gageron	Pompage	canalisation en siphon inversé traversant la digue avec bride anti-renard dans le masque argileux	600 mm
288.48	GRD_IRR_288,48	M. BOYER (Mas Montlong)	Pompage	canalisation en siphon inversé traversant la digue avec bride anti-renard dans le masque argileux	500 mm
288.867	GRD_IRR_288,87	ASA Petite Montlong	Pompage	Canalisation en siphon inversé avec brides anti-renard dans le masque d'argile	1000 mm
288.87	GRD_IRR_288,87_1	ASA Petite Montlong	Pompage	Canalisation en siphon inversé avec brides anti-renard dans le masque d'argile	1000 mm
288.89	GRD_DRA_288,89	ASA Petite Montlong	Gravitaire vers le Rhône --- Protection enrochements	Ouvrage à l'horizontal sous la digue	800 mm

288.899	GRD_IRR_288,9	ASA Petite Montlong	Pompage	Canalisation en siphon inversé avec brides anti-renard dans le masque d'argile	900 mm
288.91	GRD_IRR_288,91	M. ARSAC (Fort de Pâques)	Pompage		500 mm

Photo 66. Digue de Gde. à Petite. Montlong - Mur gabion et siphon inversé (Station M. Boyer GRD 288.47)

6.3. DECOMPOSITION FONCTIONNELLE

6.3.1. Géométrie

Tableau 38. Synthèse de géométrie, tronçon Montlong

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	7,7	7,5	7,6	0,1
Cote de pied de digue aval	m NGF	5,5	4,3	4,7	0,4
Cote à 20m du pdav	m NGF	5,2	3,2	4,2	0,6
Cote de pied de digue amont	m NGF	3,0	2,4	2,6	0,2
Cote à 20m du pdam	m NGF	1,6	0,6	0,9	0,3
Hauteur de digue coté aval	m	3,4	2,2	2,9	0,4
Hauteur de digue côté amont	m	5,2	4,6	5,0	0,2
Fruit aval	L/V	2,1	0,8	1,7	0,4
Fruit amont	L/V	2,3	2,1	2,2	0,1
Largeur du ségonnal	m	14	5	9	3

6.3.2. Données hydrauliques

Tableau 39. Données hydrauliques, tronçon Montlong

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	4,6	4,5	3,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9
8500	5,4	5,2	2,2	2,3	0,0	0,0	0,1	0,0	0,7
9500	5,8	5,6	1,8	1,9	0,1	0,0	0,1	0,0	0,5
10500	6,1	6,0	1,5	1,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4
11500	6,6	6,5	1,0	1,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3
12500	6,9	6,7	0,7	0,8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
14160	7,0	6,8	0,6	0,7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2

6.3.3. Etanchéité

Le parement amont est recouvert d'un masque argileux en matériaux A2 et l'étanchéité est prolongée en fondation par un rideau de palplanche court.

6.3.4. Filtration-Drainage

Un complexe filtre-drain est présent dans le talus aval ; dans les zones confortées, un filtre est compris entre les géo-matériaux et les gabions, qui assurent le drainage.

6.3.5. Stabilité

Localement le mur de soutènement assure la stabilité aval mais de façon générale c'est la géométrie de la digue qui remplit ce rôle, les fruits des talus sont d'environ 2/1, avec des zones plus abruptes avec 1.8/1 à l'aval.

6.3.6. Protection

Un grillage anti-fouisseur permet la protection des talus.

6.3.7. Evacuation

Il n'y a pas de secteur résistant à la surverse sur la digue de Montlong compte tenu du calage de l'ouvrage.

6.3.8. Sécurité

La digue est intégralement carrossable en crête et, lorsqu'elle n'est pas longée par la route, il y a une piste en pied coté terre. Coté fleuve le ségonnal est trop étroit pour accueillir une piste.

7. DIGUE DE PETITE MONTLONG A LA LOUISIANE (GRD6-GRD11)

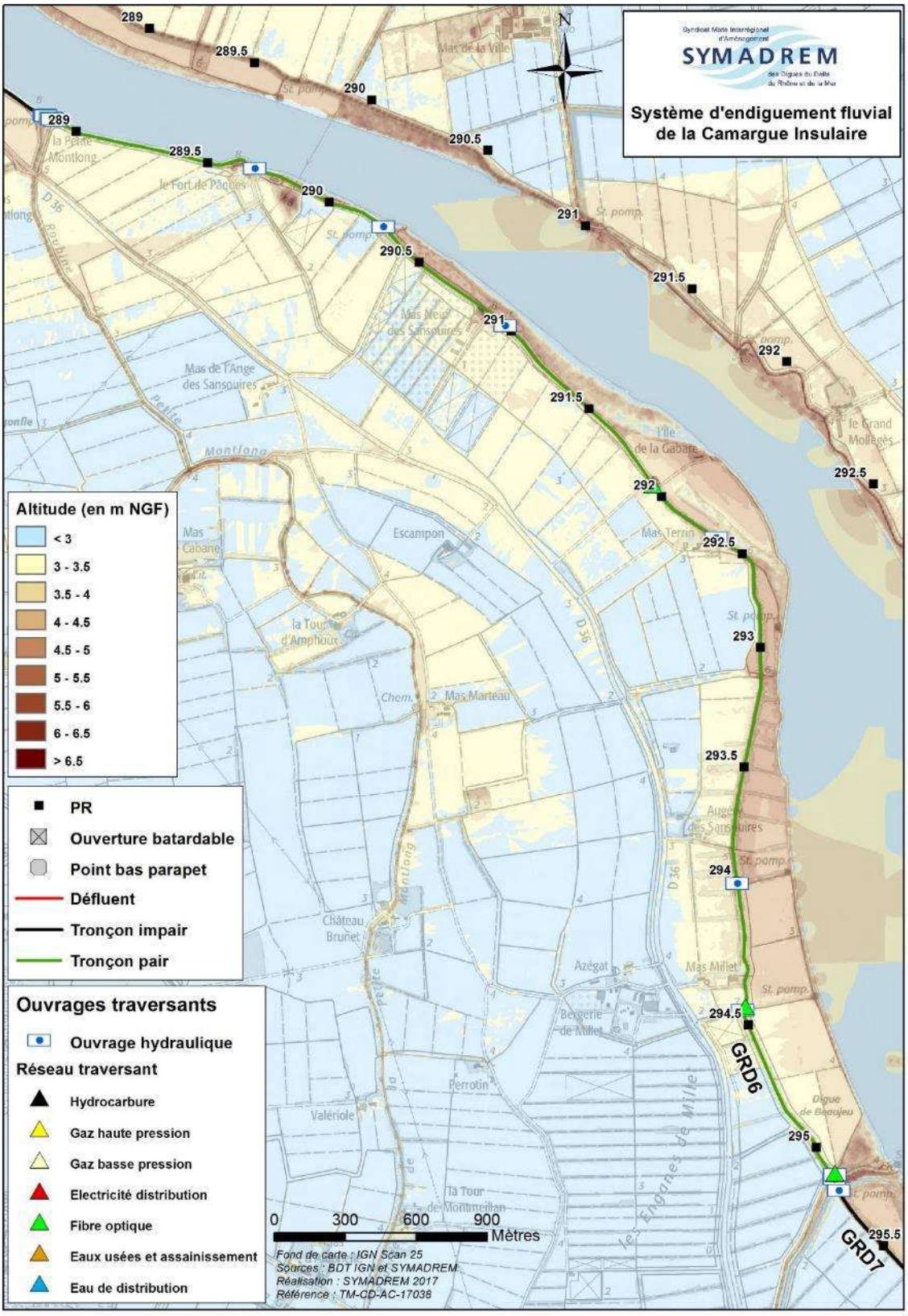


Figure 60. Plan de situation de Montlong à la Louisiane 1 : Montlong-Beaujeu

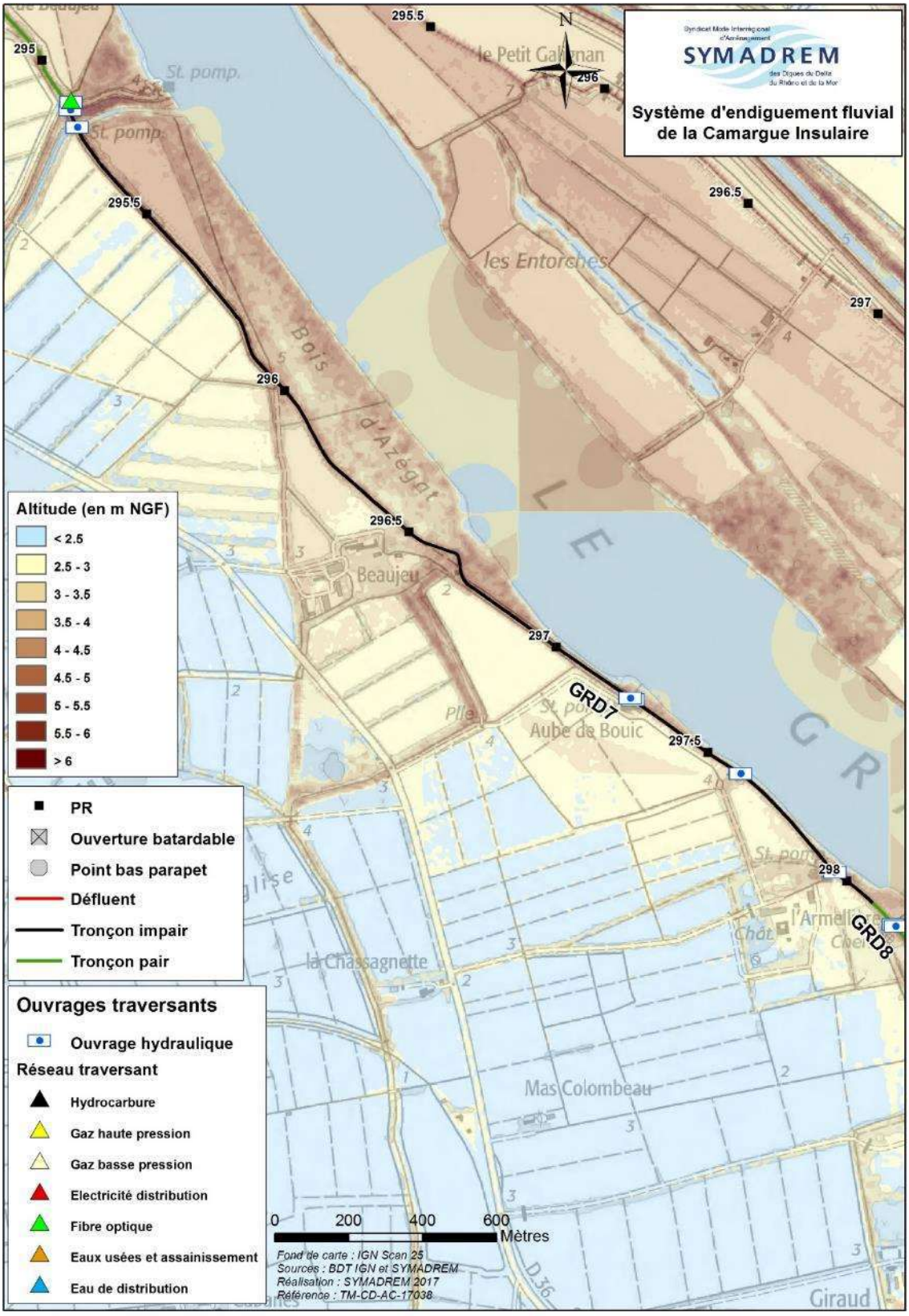


Figure 61. Plan de situation de Montlong à la Louisiane 2 : Beaujeu-l'Armelière

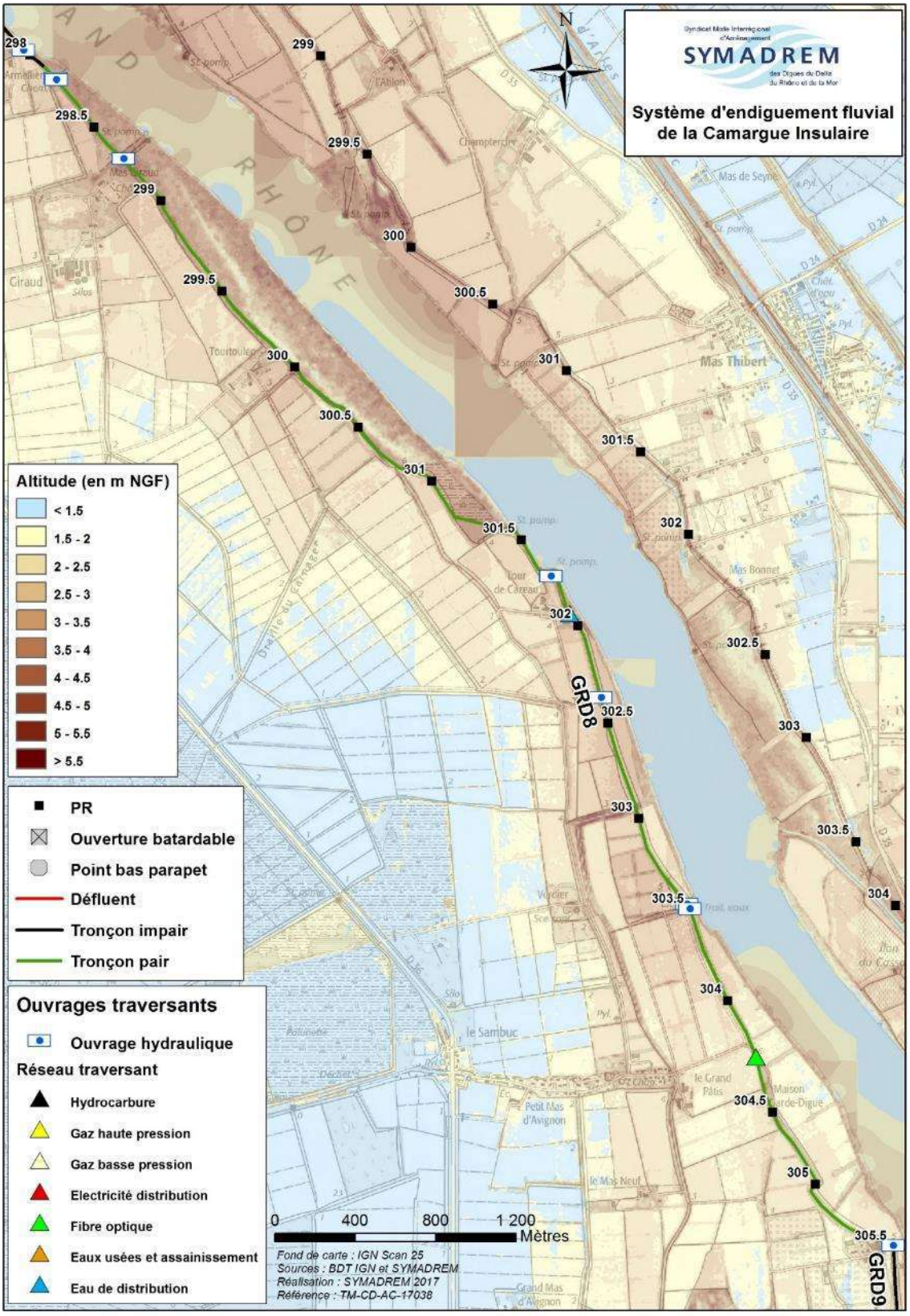


Figure 62. Plan de situation de Montlong à la Louisiane 3 : L'Armelière-La Commanderie

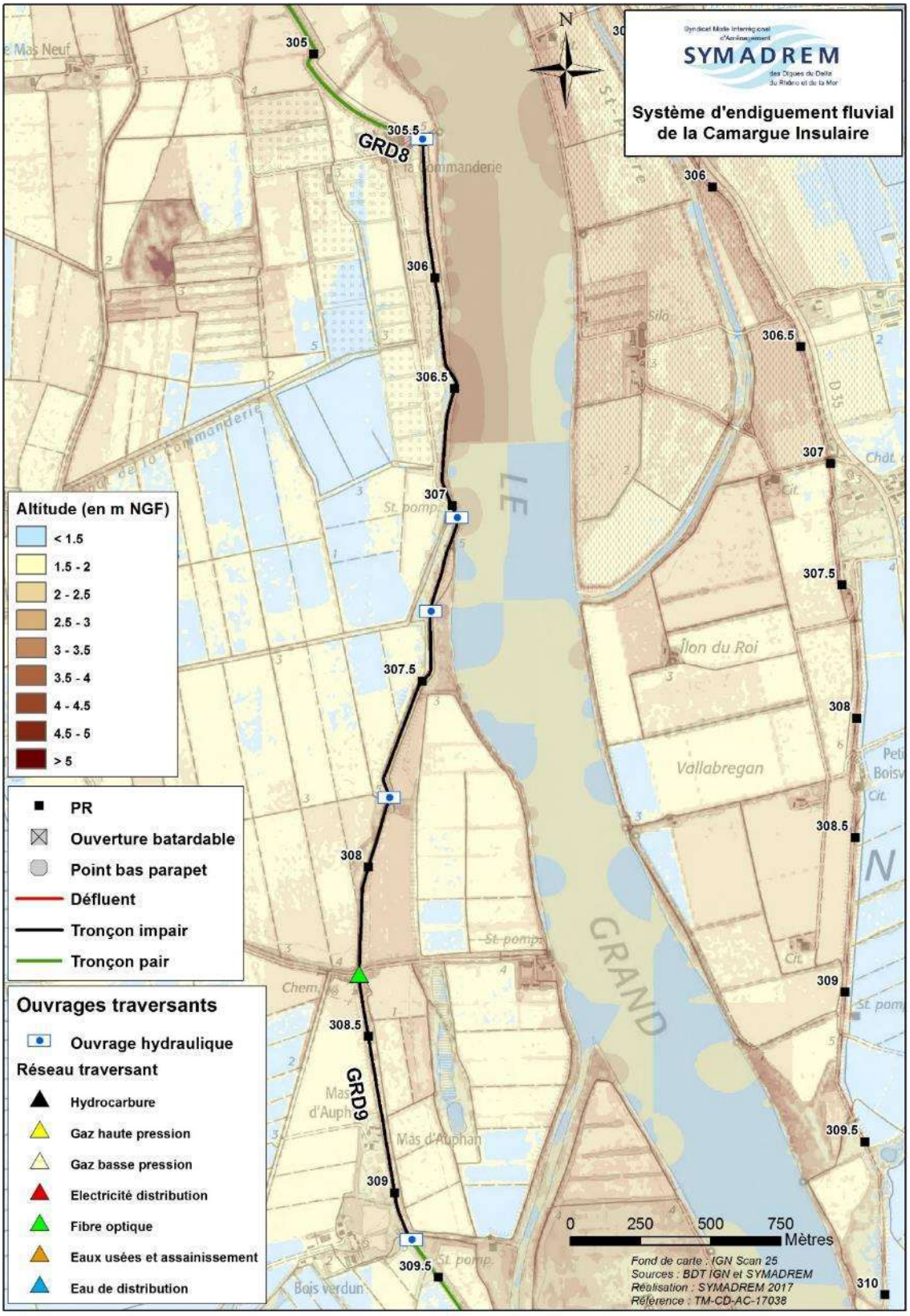


Figure 63. Plan de situation de Montlong à la Louisiane 4 : La Commanderie-Bois Verdun

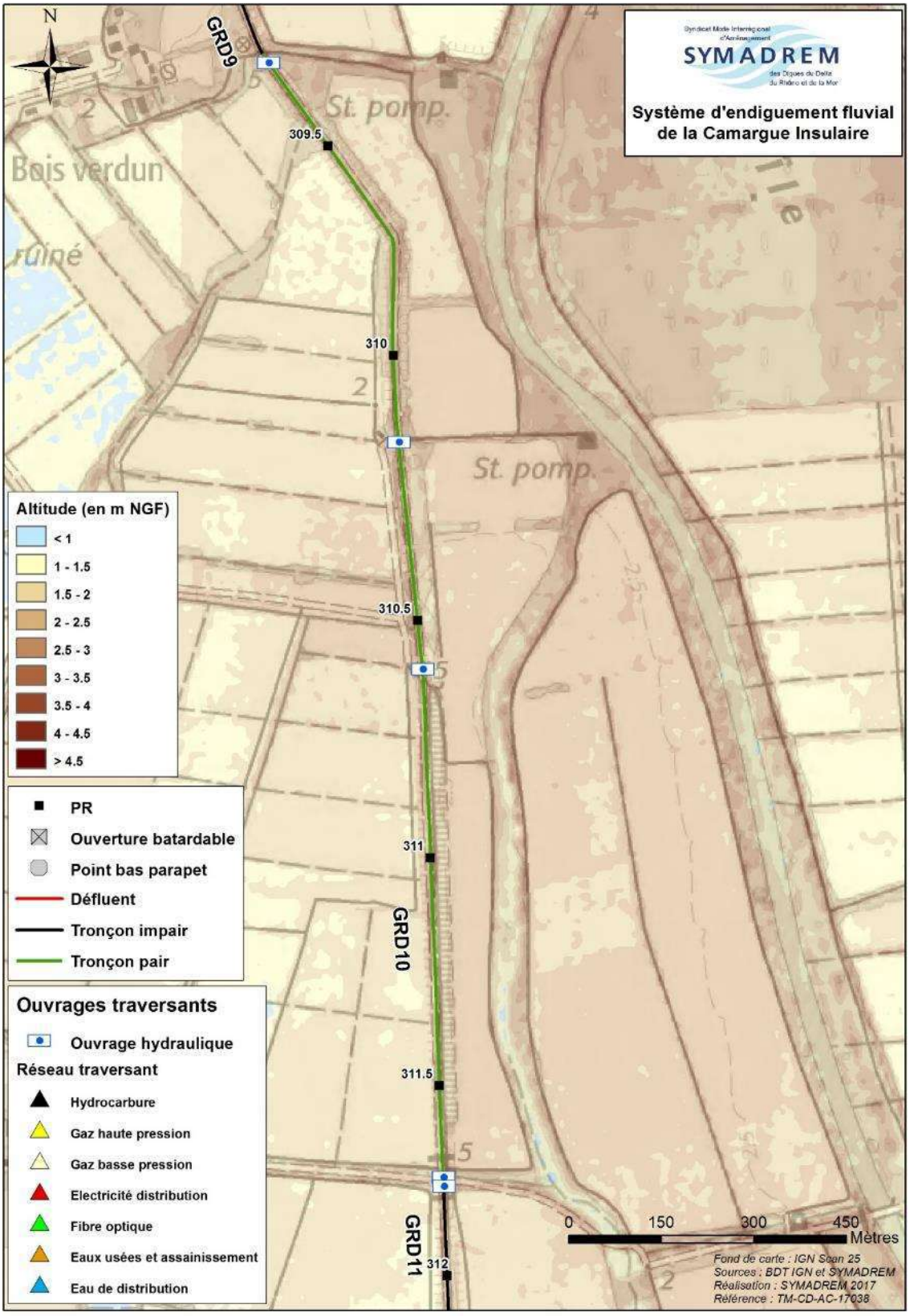


Figure 64. Plan de situation de Montlong à la Louisiane 5 : Bois Verdun-Chartrouse

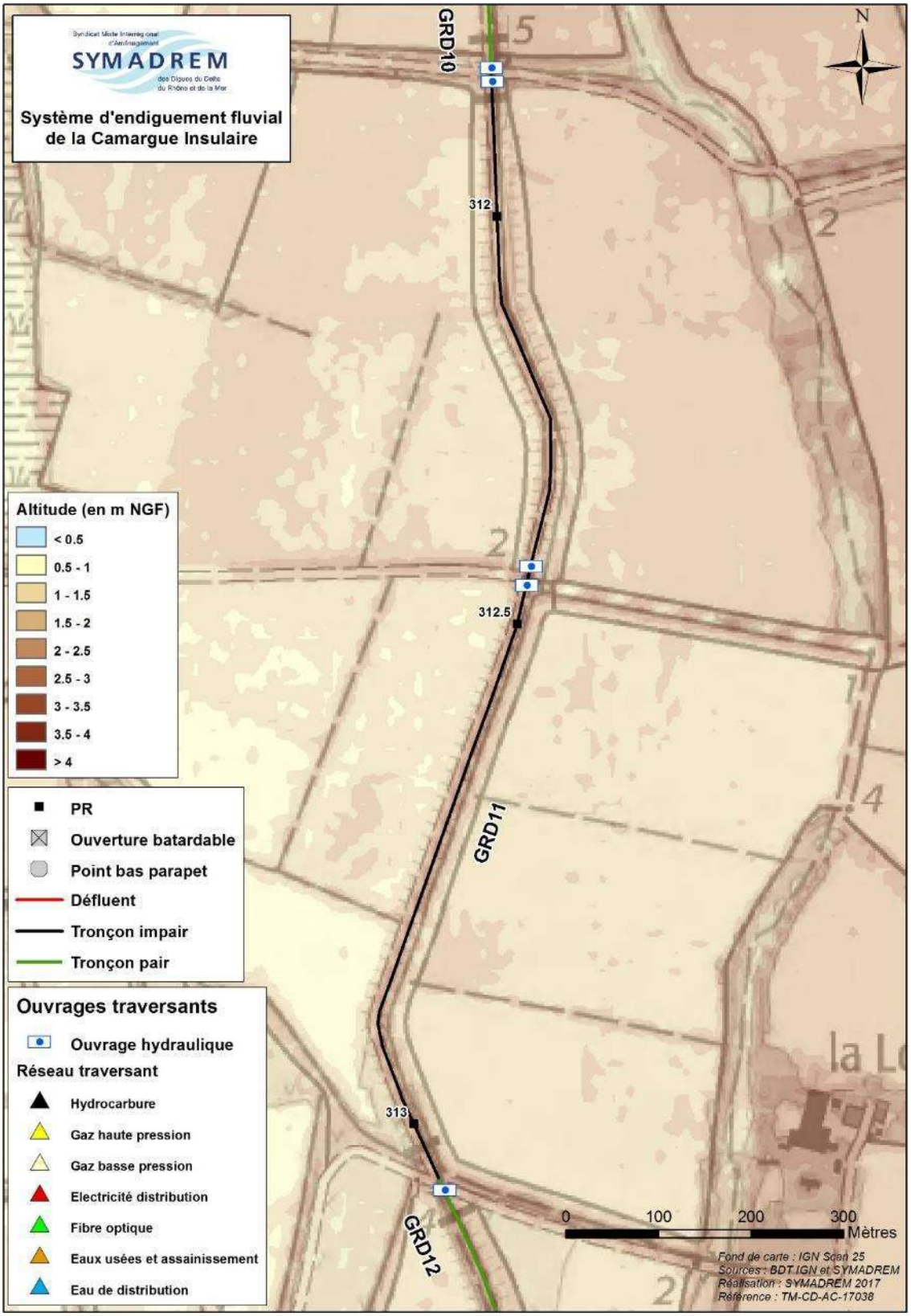


Figure 65. Plan de situation de Montlong à la Louisiane 6 : Chartrouse-La Louisiane

7.1. PREAMBULE

Depuis le XII^{ème} siècle et même peut-être avant, les habitants de la Camargue ont construit des digues de protection, le long des bras du Rhône.
Au cours du temps, ces ouvrages ont été rehaussés ou bien reconstruits à plusieurs reprises. La dernière surélévation date des années 1859, réalisée après la très importante crue de 1840. Depuis 150 ans environ, les digues ont acquis les caractéristiques que l'on connaît aujourd'hui.

7.2. PRESENTATION GENERALE

7.2.1. Description historique

Suite à la crue de 1810, les digues de la Grande Camargue ont fait l'objet d'un exhaussement généralisé de 35 cm.

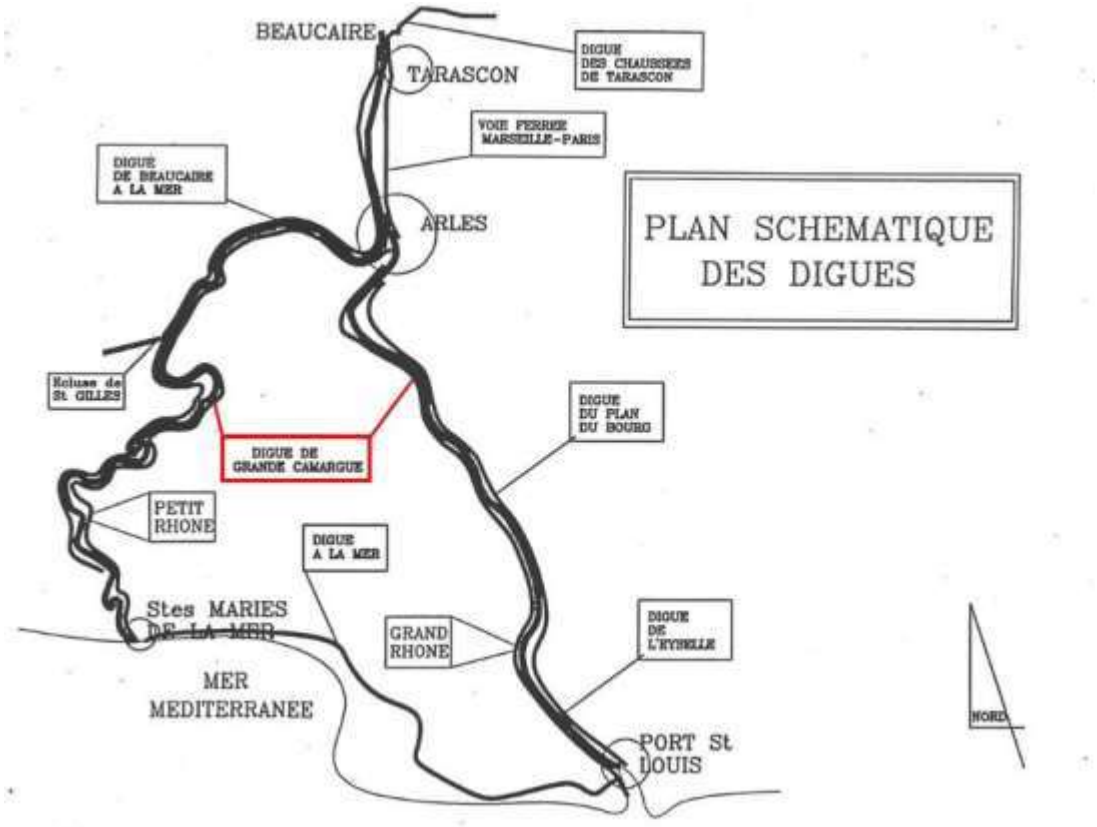


Figure 66. Digues de grande Camargue (PRG et GRD)

A la suite d'un décret organique paru en 1849, l'ingénieur Surell lança un premier programme de rehaussement des digues. Le projet concernait l'intégralité des digues syndicales, soit de la pointe de la Camargue jusqu'au Grau de Piémanson, sur une longueur de 44 kilomètres le long du Grand Rhône (et d'une longueur de 56 kilomètres sur le Petit Rhône).

L'exhaussement basé sur la crue de 1843, devait donner aux digues du Grand Rhône une revanche de 1.50 m en amont en déclinant progressivement en aval d'Arles à 0.70 m sur le Grand Rhône (et 0.20 m sur le Petit Rhône).
Le projet non réalisé, il fallut attendre la crue de 1856 pour qu'il soit relancé. La ligne d'eau ayant été plus haute qu'en 1843, l'ingénieur Bernard proposa, en 1857, de passer à un exhaussement de 1.80 m, au-dessus du niveau atteint en 1856 sur le tronçon compris entre Tarascon et Arles et de diminuer progressivement vers l'aval à 0.90 m sur le Grand Rhône (et 0.20 m sur le Petit Rhône).
Les travaux furent approuvés par décision ministérielle le 5 juillet 1858. En 1869, l'intégralité des digues du Syndicat de la Grande Camargue était rehaussée.
Tout le linéaire du secteur a été rendu carrossable en 2010. Ce linéaire s'étend de la station de pompage de la petite Montlong (GRD 288.9) jusqu'au GRD 313. Des opérations ponctuelles de confortement ont été réalisées suite notamment à la crue de décembre 2003. L'ensemble de ces travaux est exposé dans les parties suivantes.

7.2.2. Sectorisation

En dehors de deux points singuliers, la digue de Petite Montlong (GRD 288.9) jusqu'à la Louisiane (GRD 313) est homogène en termes d'historique, la division en sous tronçons a alors été faite, de façon à ne pas avoir des secteurs trop long, par rapport aux calculs de probabilité du chapitre 7. La décomposition est présentée ci-dessous :

Tableau 40. Sectorisation, Section Montlong-Louisiane

Tronçon	**PR (GRD)**	**Description sommaire section courante**	**Ouvrage traversant**
1	GRD 288.9 au GRD 295	Digue de Camargue ; voir la description géotechnique et coupes type paragraphes suivants	6
2	GRD 295 au GRD 298.2		9
3	GRD 298.2 au GRD 305.4		5
4	GRD 305.4 au GRD 309.3		5
5	GRD 309.3 au GRD 311.5		2
6	GRD 311.5 au GRD 313		4

Point singulier 1	GRD 290.8 : Mas Neuf de Sansouires	Comblement brèche avec du tout-venant roulé, plus ou moins compacté avec pose des matériaux sur une bâche plastique	---
Point singulier 2	GRD 298 : Armellière	Engraissement amont A2	---
Total d'ouvrages traversants			31

La description des tronçons est donnée ci-après.

7.2.3. Description des tronçons

7.2.3.1. Raccordement

La liaison avec les travaux en amont n'est pas décrite, à la jonction la crête de digue se rétrécit mais il n'y a pas d'autre changement visible, c'est la structure interne de la digue qui est modifiée. Au niveau de la berge, des arbres prennent le relai des enrochements.

7.2.3.2. Description générale, tronçons 1 à 6 :

Caractéristiques géotechniques sur les ouvrages de protection de Salin de Giraud étendues aux digues de Camargue :
Dans le cadre des actions définies dans le Pré-Schéma Sud, des investigations géotechniques ont eu lieu en octobre 2009 sur les ouvrages de protection de Salin de Giraud (GRD 313 au GRD 323.5) soit environ 10 km de digue. Ce linéaire constitue un tronçon de digue datant de 1869 semblable, à priori, au reste de la digue de Petite Montlong jusqu'à la Louisiane.

Photo 67. Digue de Petite Montlong à la Louisiane - Digue au droit du fort de Pâques (GRD 289.6)

Photo 68. Digue de Petite Montlong à la Louisiane - Crête de digue et talus amont/aval

Photo 69. Digue de Petite Montlong à la Louisiane - Un des nombreux accès à la crête de digue

Photo 70. Digue de Petite Montlong à la Louisiane - Crête de digue (GRD 301.5 environ)

Au vu des résultats homogènes trouvés sur ces 10 km d'investigations géotechniques (coupe type représentant 90% du linéaire, voir 8), nous pouvons supposer que le secteur de digue de Petite Montlong jusqu'à la Louisiane, datant également de 1869, présente les mêmes caractéristiques géotechnique que les 10 kms digues inspectés.
On distingue alors sur la zone d'étude 2 grandes coupes types lithologiques.

La section courante correspond à pas moins de 90% du linéaire, d'où la supposition du résultat au reste de la digue de Petite Montlong jusqu'à la Louisiane. Elle se présente selon une structure digue-fondation qui peut être assimilée à un corps de digue et deux couches de fondations. La figure ci-dessous est issue du rapport géotechnique de l'étude de diagnostic du renforcement de la digue du Grand Rhône Rive droite à Salin de Giraud.

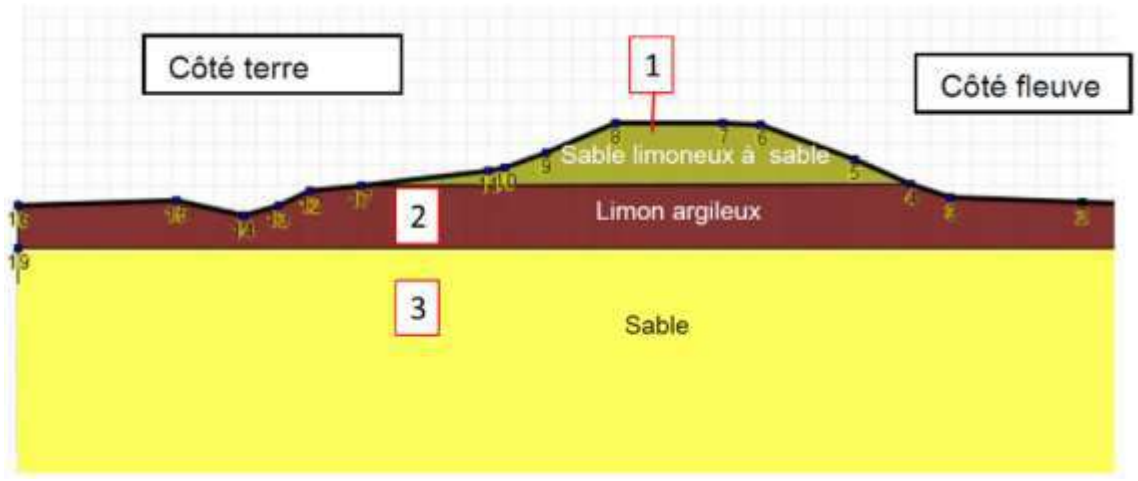


Figure 67. Digue de Petite Montlong à la Louisiane – Coupe stratigraphique type (courante)

Les 10% restants de digue non concernés par la section courante précédemment citée représente des cas spécifiques et sont en particulier des anciens bras du Rhône. La structure géotechnique (digue + fondation) peut être décomposée en 2 zones distinctes :

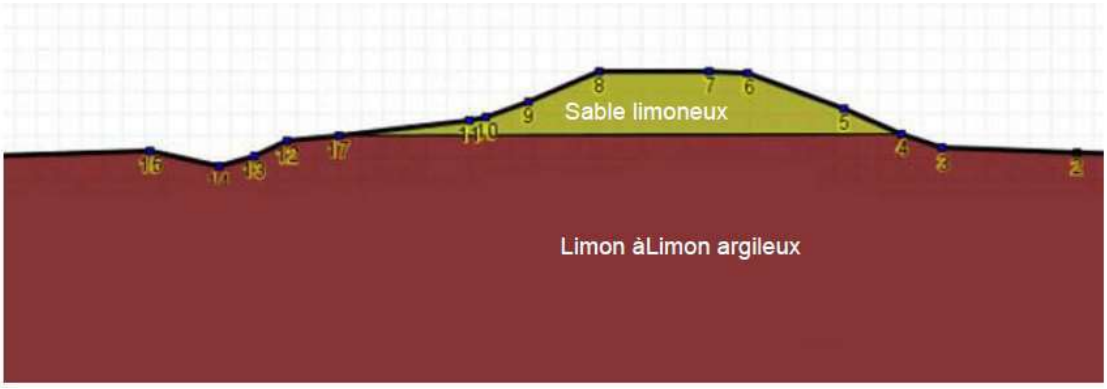


Figure 68. Digue de Petite Montlong à la Louisiane – Coupe stratigraphique type (particulière)

Les travaux de carrossabilité du GRD 288.9 au GRD 313, et suppression des ouvrages hydrauliques traversants, ont été réalisés en 2010 ; en dehors des points singuliers ce sont les seuls travaux qui ont été réalisés sur ce secteur.

La mise en carrossabilité des digues consiste à remplacer les premiers décimètres de la crête de digue par un matériau approprié qui sera assimilé à une couche de forme. Sur la base des études géotechniques réalisées (essais en laboratoire et in situ), et des guides techniques spécifiques (GTR 2000), il a été préconisé une solution de base en GNT ou laitier sur le principe des coupes présentées ci-dessous.
Les travaux consistent à réaliser une couche de forme avec la structure suivante :
Décapage sur une épaisseur de 10 cm,
Déblais sur une épaisseur de 15 cm maxi avec une pente de 1.5 %,
Pose d'un géotextile anti-contaminant et renforcé RP 35/35,
Couche de 25 cm d'épaisseur en GNT 0/40 compacté au rouleau à billes lisses de type V3.
Le profil en long actuel de la crête de digue n'a pas été modifié mis à part dans les zones de points bas (effondrements, orniérages dus à des passages de véhicules…).

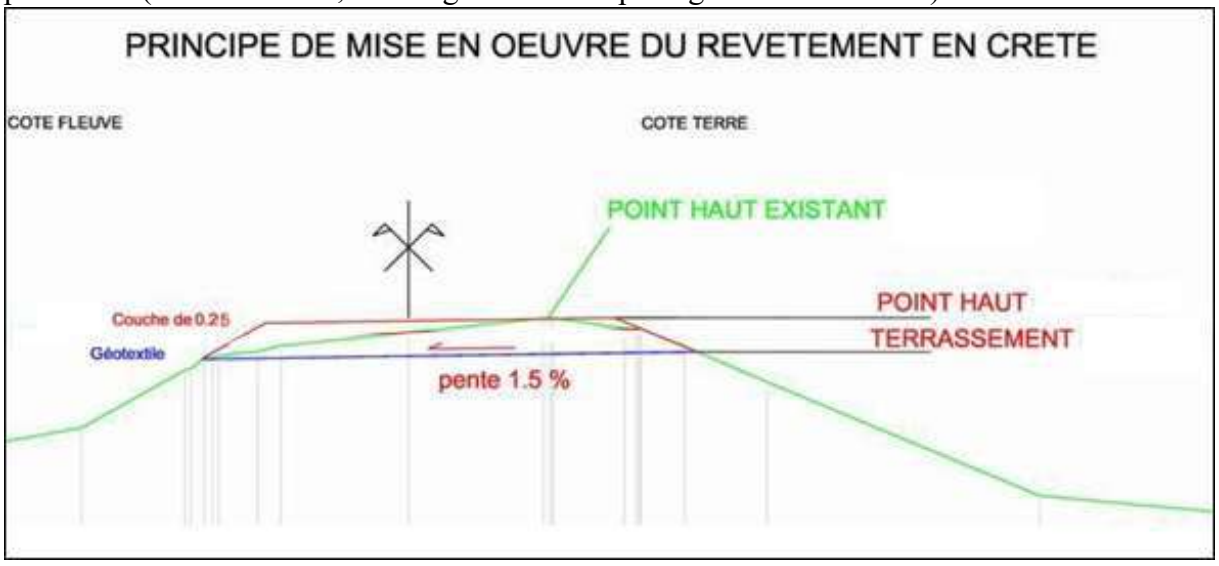


Figure 69. Digue de Petite Montlong à la Louisiane – Carrossabilité – Coupe

Des essais de convenance ont été réalisés afin de s'assurer que les objectifs de portance sont atteints, des comptes rendus de réunion hebdomadaires ont été rédigés, les matériaux

disposent de fiches d'agrément et des photos illustrent l'avancée des travaux. Ces éléments sont disponibles dans le DOE concernant la carrossabilité des digues.

Les travaux de suppression d'ouvrages traversants hors service ont également été réalisé. Ils ont consisté en :
L'ouverture de la digue et de sa fondation,
La démolition de l'ouvrage en totalité,
La reconstitution du corps de digue et de la fondation.

Le schéma de principe des travaux figurent ci-après :

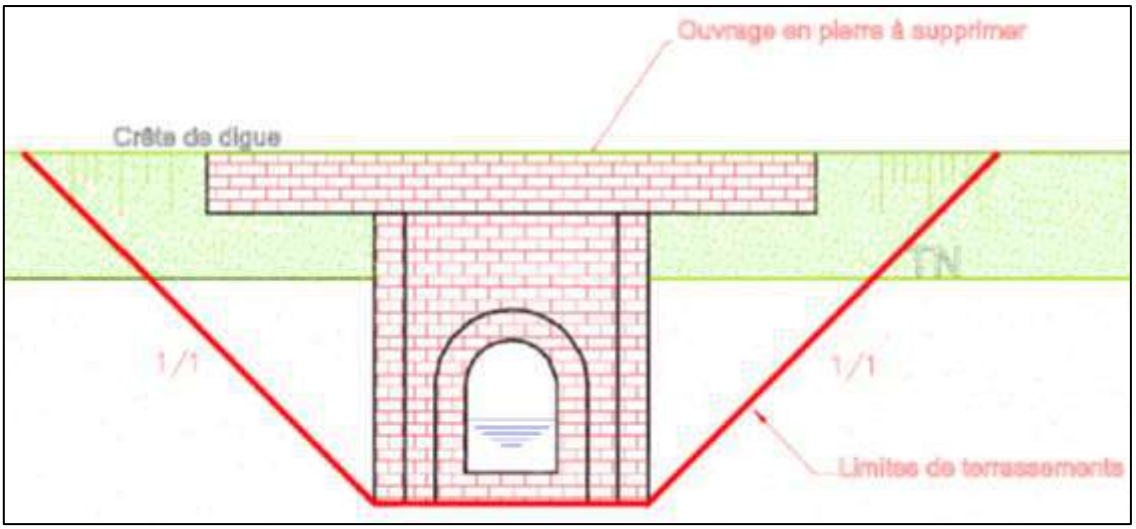


Figure 70. Digue de Petite Montlong à la Louisiane – Suppression des ouvrages (SAFEGE)

7.2.3.3. Description des points singuliers

Confortement de la brèche du mas neuf de Sansouires (GRD 290.8)

La brèche est survenue en 1993. Sa largeur a été estimée à 10 mètres. Le colmatage a été réalisé en urgence sous le contrôle des propriétaires. Le comblement a été fait avec du tout-venant roulé, plus ou moins compacté. On notera que la pose des matériaux s'est fait sur une bâche plastique.

Confortement de la berge à l'Aube de Bouic (GRD 297)
Suite à une érosion localisée, des travaux de confortement ont été réalisés. Lors de ces travaux, le talus de berge a été retaillé et comblé par du tout-venant, séparé du talus en terre par un géotextile de filtration. Un géotextile anti poinçonnement a ensuite été mis en place sur le tout-venant afin de le séparer de la protection finale en enrochement. Les enrochements sont des blocs 100/400 sur 1.5m plus un sabot de 3m de long et 1m d'épaisseur.

Photo 71. Berge confortée à l'Aube de Bouic

Confortement au droit de l'Armellière (GRD 298)

Lors de la crue du 3 décembre 2003 l'érosion sur les digues est telle, qu'un début de brèche se déclare sur le site de l'Armellière. A 12h30 un trou de 30 cm de profondeur est signalé. Une heure plus tard, les équipes techniques du SYMADREM interviennent pour réaliser un enrochement d'urgence en arc de cercle devant la brèche côté fleuve. Les 2/3 de la digue avaient alors déjà disparu. Il a fallu 27 semi-remorques et 40 tonnes de matériaux pour la combler. Sans cette intervention, la digue aurait cédé 30 minutes plus tard. Cette intervention correspond à la 1ère phase des travaux d'urgence suite à cette crue de décembre 2003.
La seconde phase correspond aux travaux de confortement réalisés en 2006. Ces travaux ont consisté à reprendre complètement la digue sur environ 20 mètres, rechercher et évacuer la canalisation existante. La digue a été engraissé côté fleuve par du matériau A2 correctement compacté dans une clé d'ancrage. Un géotextile drainant a été déposé en base du talus aval. Des grillages anti-fouisseurs ont été mis en place. Une piste de circulation de 4.5 m de large a également été réalisée. Ci-dessous une vue en plan et une coupe type de la digue issues de la phase projet. La côté de la crête de digue est de 6.06 m NGF.

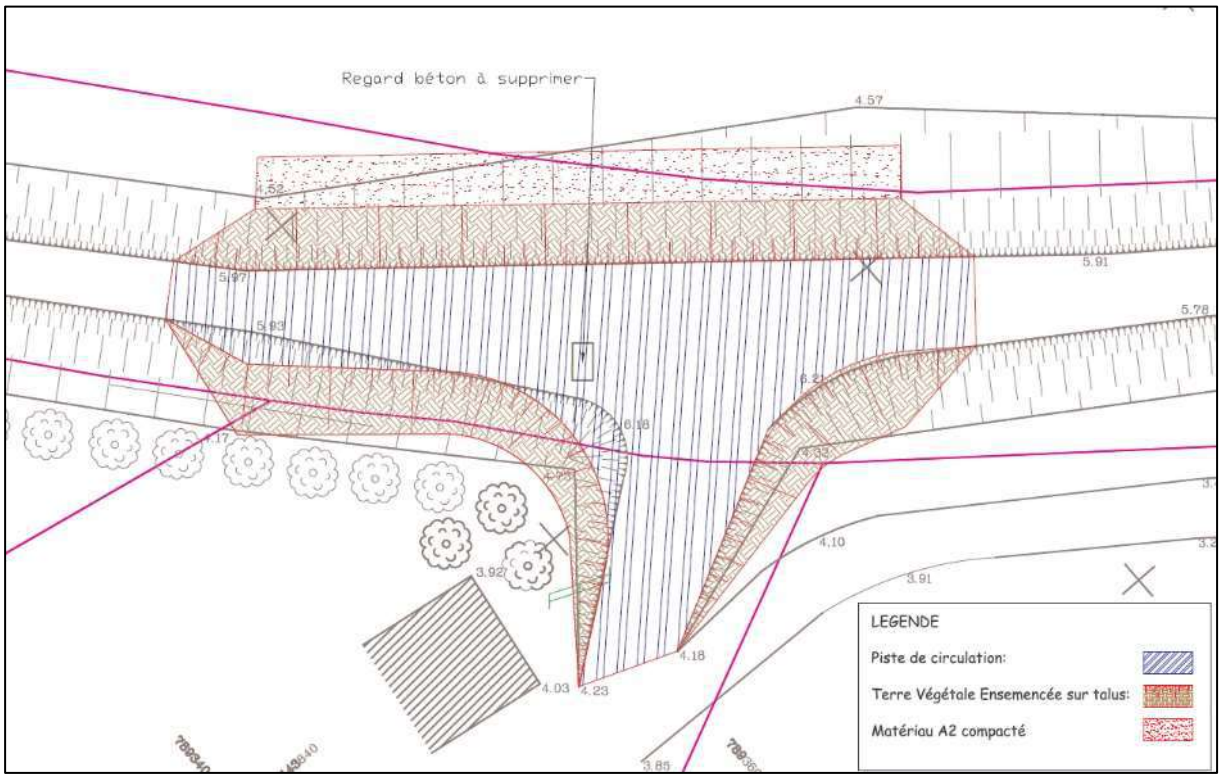


Figure 71. Digue de Petite Montlong à la Louisiane – Armellière – Vue en plan (projet)

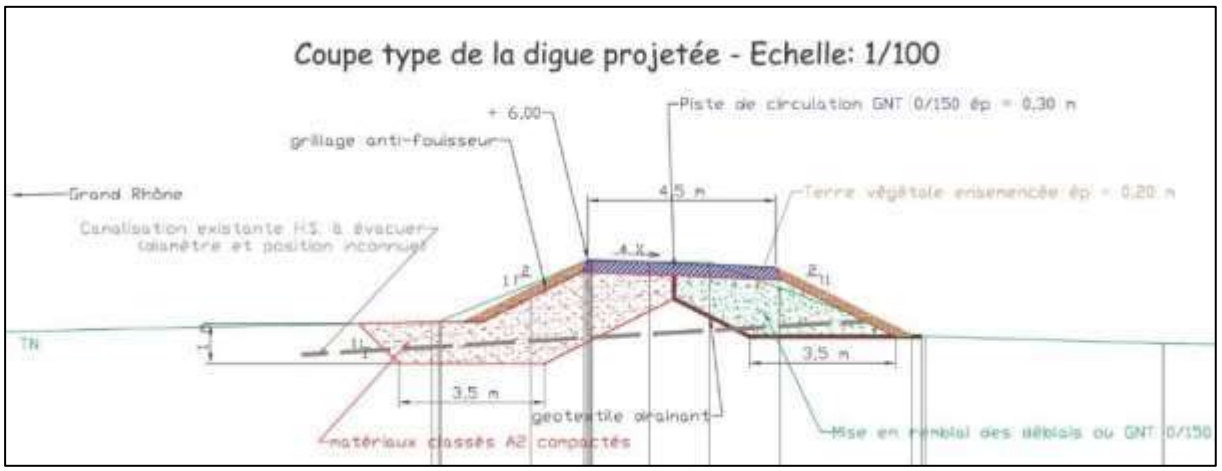


Figure 72. Digue de Petite Montlong à la Louisiane – Armellière – Coupe type (projet)

7.2.4. Accessibilité

De nombreux accès aux digues du Grand Rhône rive droite de Petite Montlong à la Louisiane sont recensés.

Tableau 41. Franchissements, Section Montlong-Louisiane

Nom	GRD
1	289,55

2	290,87
3	291,95
4	292,57
5	293,12
6	293,85
7	294,45
8	295,13
9	295,95
10	297,98
11	298,7
12	300
13	301,93
14	302,92
15	303,45
16	304,22
17	304,38
18	305,50
19	309,25
20	310,63
21	311,75
22	313,06

7.2.5. Ouvrages englobés

De nombreux ouvrages hydrauliques sont à dénombrer.

Tableau 42. Digue de Petite Montlong à la Louisiane – Ouvrages englobés

N°	PR	Fiche	Réseaux humides	Implantation	Diamètre (mm)
1	289,69	GRD_IND_289,69	IND	Enterré	
2	290,27	GRD_IND_290,27	IND		
3	290,97	GRD_IRR_290,9	IRR	Enterré	500
4	292,35	GRD_IRR_292,35	IRR	Enterré	300
5	294,01	GRD_IRR_294,01	IRR	Enterré	
6	294,47	GRD_IRR_294,47	IRR	Enterré	
7	295,14	GRD_IRR_295,14	IRR	Enterré	
8	295,15	GRD_IND_295,15	IRR	Enterré	500
9	295,20	GRD_DRA_295,2	DRA	Enterré	
10	297,24	GRD_IRR_297,24	IRR	Enterré	3*1000
11	297,25	GRD_IRR_297,25	IRR	Enterré	400
12	297,48	GRD_IRR_297,48	IRR	Superficiel	600

13	297,96	GRD_IRR_297,96	IRR	Superficiel	2*300
14	298,19	GRD_IRR_298,19	IRR	Enterré	600
15	298,20	GRD_IRR_298,20	IRR	Enterré	600
16	298,72	GRD_IRR_298,72	IRR	Enterré	
17	301,73	GRD_IRR_301,73	IRR	Enterré	
18	302,38	GRD_IND_302,38	IND	Enterré	
19	303,46	GRD_IRR_303,46	IRR	Enterré	1000
20	303,49	GRD_IRR_303,49	IRR	Enterré	500
21	305,50	GRD_IRR_305,5	IRR	Enterré	350
22	307,04	GRD_IRR_307,04	IRR	Superficiel	2*600
23	307,30	GRD_DRA_307,3	DRA	Enterré	
24	307,82	GRD_IRR_307,82	IRR	Enterré	
25	309,27	GRD_IRR_309,27	IRR	Superficiel	800
26	310,17	GRD_IRR_310,17	IRR	Enterré	
27	310,61	GRD_IRR_310,61	IRR	Enterré	
28	311,75	GRD_DRA_311,75	DRA	Enterré	
29	311,77	GRD_IND_311,77	IRR	Enterré	600
30	312,42	GRD_IRR_312,42	DRA	Enterré	
31	312,44	GRD_IRR_312,44	IRR	Enterré	700

7.3. DECOMPOSITION FONCTIONNELLE

Etant donné la longueur du secteur, la décomposition fonctionnelle est présentée par tronçon.

7.3.1. Géométrie - tronçon Montlong-Beaujeu

Tableau 43. Synthèse de géométrie, tronçon Montlong - Beaujeu

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	7,6	6,4	6,9	0,3
Cote de pied de digue aval	m NGF	6,6	3,1	4,0	0,7
Cote à 20m du pdav	m NGF	4,8	2,3	3,4	0,5
Cote de pied de digue amont	m NGF	6,1	0,7	4,2	1,3
Cote à 20m du pdam	m NGF	5,1	0,6	3,6	1,4
Hauteur de digue coté aval	m	3,8	0,5	2,9	0,7
Hauteur de digue côté amont	m	6,7	0,3	2,7	1,5
Fruit aval	L/V	9,7	1,6	2,5	1,3
Fruit amont	L/V	4,9	1,7	2,3	0,6
Largeur du ségonnal	m	324	1	140	101

7.3.2. Données hydrauliques - tronçon Montlong-Beaujeu

Tableau 44. Données hydrauliques, tronçon Montlong - Beaujeu

Débit	Cote ligne d'eau	Revanche	Gradient	Gradient	Revanche

	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	4,5	3,6	2,1	2,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,8
8500	5,2	4,3	1,4	2,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,6
9500	5,6	4,6	1,1	1,8	0,1	0,1	0,1	0,0	0,5
10500	5,9	4,9	0,8	1,5	0,2	0,1	0,1	0,0	0,4
11500	6,4	5,4	0,3	1,0	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3
12500	6,7	5,6	0,1	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2
14160	6,8	5,7	0,0	0,7	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2

7.3.3. Géométrie - tronçon Beaujeu – l'Armelière

Tableau 45. Synthèse de géométrie, tronçon Beaujeu – l'Armelière

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	6,8	6,1	6,4	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	5,5	3,6	4,3	0,5
Cote à 20m du pdav	m NGF	4,2	2,4	2,9	0,4
Cote de pied de digue amont	m NGF	5,7	2,4	4,2	0,8
Cote à 20m du pdam	m NGF	4,5	0,5	2,9	1,4
Hauteur de digue coté aval	m	2,8	0,7	2,1	0,5
Hauteur de digue côté amont	m	3,9	0,8	2,2	0,8
Fruit aval	L/V	7,1	1,7	2,6	1,1
Fruit amont	L/V	10,2	1,6	2,6	1,7
Largeur du ségonnal	m	254	8	124	94

7.3.4. Données hydrauliques - tronçon Beaujeu – l'Armelière

Tableau 46. Données hydrauliques, tronçon Beaujeu – l'Armelière

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	3,6	3,4	2,6	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
8500	4,3	4,0	2,0	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
9500	4,6	4,3	1,7	2,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,9
10500	4,9	4,6	1,4	1,7	0,1	0,0	0,1	0,0	0,8
11500	5,4	5,1	0,9	1,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,6
12500	5,6	5,3	0,7	1,0	0,2	0,1	0,1	0,0	0,5
14160	5,7	5,4	0,6	0,9	0,2	0,1	0,1	0,0	0,4

7.3.5. Géométrie - tronçon L'Armelière - La Commanderie

Tableau 47. Synthèse de géométrie, tronçon L'Armelière - La Commanderie

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	6,4	5,5	5,9	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	5,6	2,6	3,9	0,6
Cote à 20m du pdav	m NGF	4,9	2,2	3,1	0,6
Cote de pied de digue amont	m NGF	5,1	2,5	3,9	0,6
Cote à 20m du pdam	m NGF	4,6	0,5	3,0	0,8
Hauteur de digue coté aval	m	3,0	0,8	2,0	0,5
Hauteur de digue côté amont	m	3,3	0,9	2,0	0,5
Fruit aval	L/V	5,5	1,6	2,4	0,6
Fruit amont	L/V	5,2	1,6	2,3	0,6
Largeur du ségonnal	m	327	12	163	82

7.3.6. Données hydrauliques - tronçon L'Armelière - La Commanderie

Tableau 48. Données hydrauliques, tronçon L'Armelière - La Commanderie

Débit	Cote ligne d'eau m NGF		Revanche m		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	3,4	2,8	2,5	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9
8500	4,0	3,3	2,0	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
9500	4,2	3,4	1,8	2,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,8
10500	4,6	3,8	1,5	1,8	0,1	0,0	0,1	0,0	0,7
11500	5,0	4,1	1,0	1,4	0,1	0,1	0,1	0,0	0,5
12500	5,2	4,3	0,9	1,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,4
14160	5,3	4,4	0,8	1,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,4

7.3.7. Géométrie - tronçon La Commanderie – Bois Verdun

Tableau 49. Synthèse de géométrie, tronçon La Commanderie – Bois Verdun

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	5,5	4,6	5,0	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	4,3	2,2	2,7	0,6
Cote à 20m du pdav	m NGF	3,2	1,0	2,2	0,4
Cote de pied de digue amont	m NGF	4,4	2,2	3,2	0,5
Cote à 20m du pdam	m NGF	3,2	0,5	2,2	0,9
Hauteur de digue coté aval	m	3,0	0,9	2,3	0,6
Hauteur de digue côté amont	m	2,5	0,8	1,9	0,3
Fruit aval	L/V	6,9	1,7	2,5	1,1
Fruit amont	L/V	2,9	1,6	2,2	0,4

Largeur du ségonnal	m	712	10	260	271

7.3.8. Données hydrauliques - tronçon La Commanderie – Bois Verdun

Tableau 50. Données hydrauliques, tronçon La Commanderie – Bois Verdun

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	2,8	2,6	2,0	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9
8500	3,3	3,0	1,5	1,9	0,1	0,0	0,1	0,0	0,8
9500	3,4	3,1	1,4	1,7	0,1	0,1	0,1	0,0	0,8
10500	3,8	3,5	1,0	1,4	0,1	0,1	0,1	0,0	0,6
11500	4,1	3,8	0,7	1,0	0,2	0,1	0,1	0,0	0,5
12500	4,3	4,0	0,5	0,9	0,2	0,1	0,1	0,0	0,4
14160	4,4	4,1	0,4	0,8	0,2	0,1	0,1	0,0	0,4

7.3.9. Géométrie - tronçon Bois Verdun - Chartrouse

Tableau 51. Synthèse de géométrie, tronçon Bois Verdun - Chartrouse

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	4,8	4,0	4,4	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	3,8	1,8	2,4	0,5
Cote à 20m du pdav	m NGF	2,6	1,5	2,0	0,3
Cote de pied de digue amont	m NGF	3,6	2,2	2,6	0,3
Cote à 20m du pdam	m NGF	2,9	1,6	2,4	0,3
Hauteur de digue coté aval	m	2,8	0,6	2,0	0,5
Hauteur de digue côté amont	m	2,3	0,9	1,7	0,3
Fruit aval	L/V	23,1	1,9	3,4	4,5
Fruit amont	L/V	5,7	1,8	2,6	1,0
Largeur du ségonnal	m	628	152	402	160

7.3.10. Données hydrauliques - tronçon Bois Verdun - Chartrouse

Tableau 52. Données hydrauliques, tronçon Bois Verdun - Chartrouse

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	2,6	2,4	1,6	1,9	0,1	0,0	0,0	0,0	0,8
8500	3,0	2,8	1,2	1,5	0,1	0,1	0,1	0,0	0,6
9500	3,1	2,9	1,1	1,4	0,1	0,1	0,1	0,0	0,6
10500	3,5	3,3	0,8	1,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,4

11500	3,8	3,6	0,5	0,7	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3
12500	4,0	3,7	0,3	0,6	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2
14160	4,0	3,8	0,3	0,5	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2

7.3.11. Géométrie - tronçon Chartrouse - la Louisiane

Tableau 53. Synthèse de géométrie, tronçon Chartrouse - la Louisiane

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	4,1	3,9	4,0	0,1
Cote de pied de digue aval	m NGF	2,5	1,8	2,1	0,2
Cote à 20m du pdav	m NGF	1,9	1,3	1,6	0,2
Cote de pied de digue amont	m NGF	3,2	1,8	2,4	0,5
Cote à 20m du pdam	m NGF	2,2	1,9	2,1	0,1
Hauteur de digue coté aval	m	2,1	1,6	1,9	0,2
Hauteur de digue côté amont	m	2,3	0,8	1,6	0,5
Fruit aval	L/V	3,4	2,3	2,8	0,3
Fruit amont	L/V	3,8	1,8	2,5	0,6
Largeur du ségonnal	m	896	649	782	96

7.3.12. Données hydrauliques - tronçon Chartrouse - la Louisiane

Tableau 54. Données hydrauliques, tronçon Chartrouse - la Louisiane

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	2,4	2,3	1,5	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7
8500	2,8	2,7	1,1	1,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
9500	2,9	2,8	1,0	1,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
10500	3,3	3,1	0,7	0,8	0,1	0,1	0,0	0,0	0,3
11500	3,6	3,4	0,4	0,5	0,2	0,1	0,0	0,0	0,2
12500	3,7	3,5	0,3	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1
14160	3,8	3,6	0,2	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1

7.3.13. Etanchéité

Il n'y a pas d'organe ayant pour rôle spécifique l'étanchéité ; ce sont les matériaux du corps de digue qui assurent cette étanchéité.

7.3.14. Filtration-Drainage

Il n'y a pas de système de filtration ou de drainage

7.3.15. Stabilité

La stabilité de la digue se fait naturellement par sa géométrie ; le fruit des talus est en moyenne à plus de 2.5/1 mais peut localement descendre à 1.6/1.

7.3.16. Protection

Les terriers, de blaireaux principalement, sont régulièrement réparés mais il n'y a pas de protection particulière.

7.3.17. Evacuation

Il n'y a pas de secteur résistant à la surverse sur la digue de Petite Montlong à la Louisiane, malgré le calage de l'ouvrage.

7.3.18. Sécurité

L'intégralité de la digue est carrossable en crête ; il y a généralement des pistes en pied mais pas de façon systématique.

8. DIGUE DE LA LOUISIANE A L'EMBOUCHURE (GRD12-GRD13)

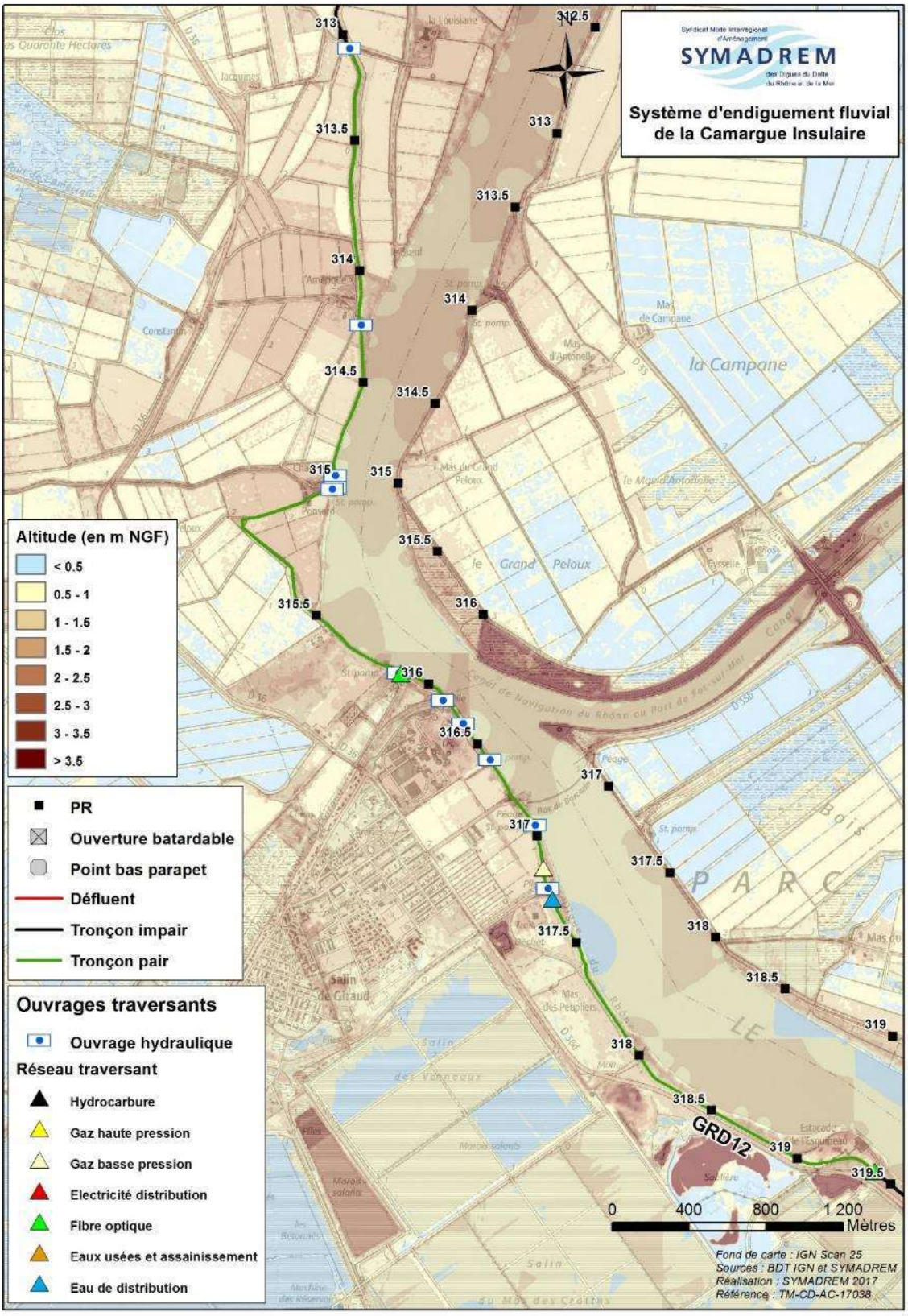


Figure 73. Plan de situation de la Louisiane à l'Embouchure 1 : La Louisiane-l'Esquineau

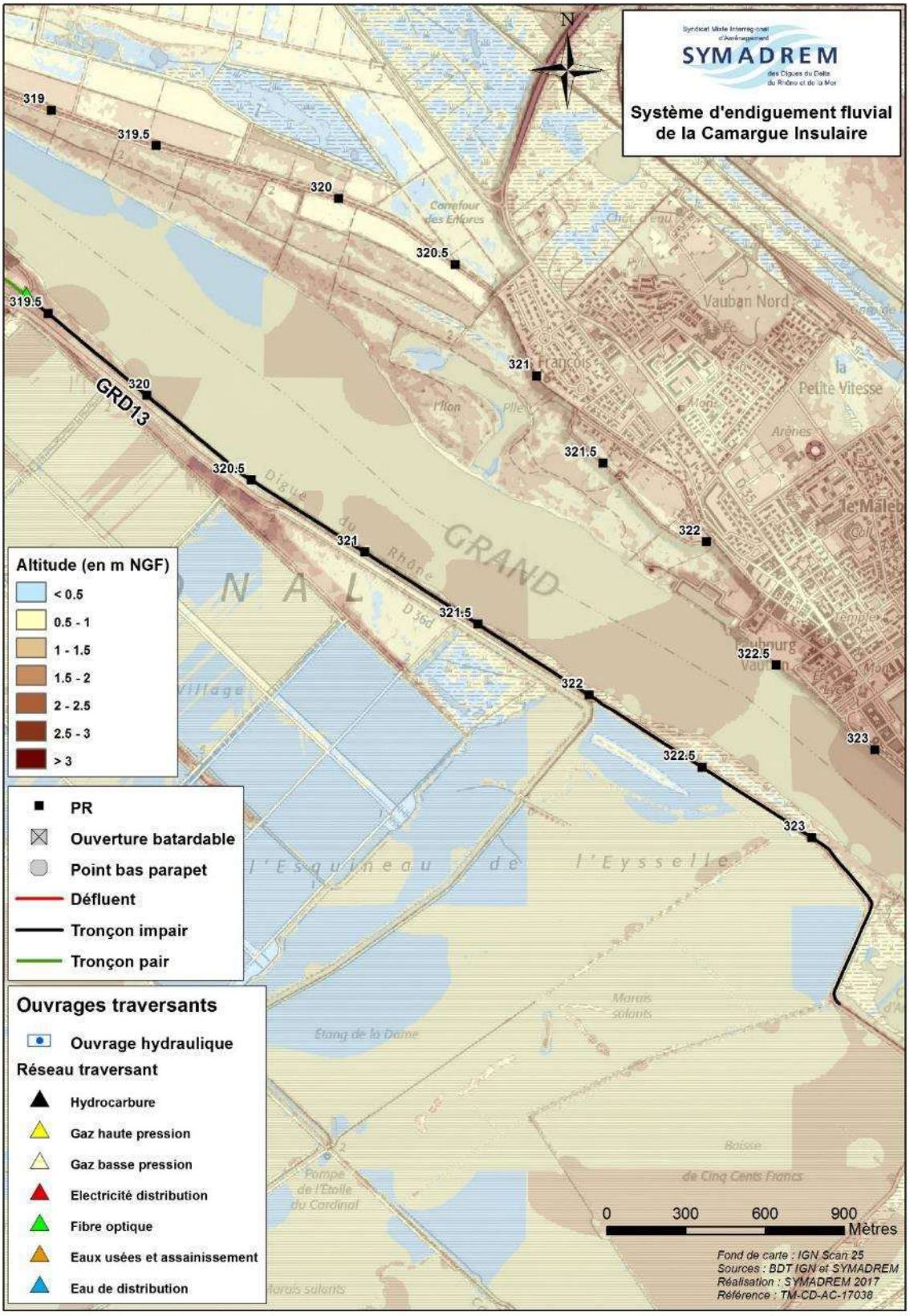


Figure 74. Plan de situation de la Louisiane à l'Embouchure 1 : l'Esquineau-L'Embouchure

8.1. PREAMBULE

Depuis le XII^{ème} siècle et même peut-être avant, les habitants de la Camargue ont construit des digues de protection, le long des bras du Rhône.
Au cours du temps, ces ouvrages ont été rehaussés ou bien reconstruits à plusieurs reprises. La dernière surélévation date des années 1859, réalisée après la très importante crue de 1840. Depuis 150 ans environ, les digues ont acquis les caractéristiques que l'on connaît aujourd'hui.

8.2. PRESENTATION GENERALE

8.2.1. Description historique

En dehors de la carrossabilité, ce secteur connait le même historique que le précédent.

Une partie du linéaire Grand Rhône rive droite a été rendu carrossable en 2010 ; mais ce secteur a été rendu carrossable lors d'une seconde tranche de carrossabilité, en 2016.
Des opérations ponctuelles de confortement ont été réalisées suite notamment à la crue de décembre 2003. L'ensemble de ces travaux est exposé dans les parties suivantes.
Des travaux, actuellement en phase d'avant-projet, seront prochainement réalisés sur ce secteur.

8.2.2. Sectorisation

La digue de la Louisiane (GRD 313) jusqu'à l'embouchure peut être sectorisée de manière à être en accord avec les travaux à venir.
Le tableau suivant récapitule les spécificités de chaque tronçon.

Tableau 55. Sectorisation, Section Louisiane - Embouchure

Tronçon	**PR (GRD)**	**Description sommaire section courante**	**Ouvrage traversant**
1	GRD 313 à 319.4	Digue de Camargue ; voir la description géotechnique et coupes type paragraphes suivants	16
2	GRD 319.4 à 323.3		---
Point singulier 1	GRD 315.25 au GRD 315.5 : Chamone	Engraissement amont A2	---
Point singulier 2	GRD 315.8 : Barcarin	Enrochements	---
Point singulier 3	GRD 321 : L'Esquineau	Enrochements	---
Total d'ouvrages traversants			16

La description des tronçons est donnée ci-après.

8.2.3. Description des tronçons

8.2.3.1. Raccordement

Il n'y a pas de raccordement spécifique car le secteur amont à subit les mêmes phases de travaux. La seconde phase de carrossabilité c'est raccordé à la première sur les décimètres supérieurs de la digue, sans modification de la structure.

8.2.3.2. Description générale :

Caractéristiques géotechniques sur les ouvrages de protection de Salin de Giraud étendues aux digues de Camargue :
Dans le cadre des actions définies dans le Pré-Schéma Sud, des investigations géotechniques ont eu lieu en octobre 2009 sur les ouvrages de protection de Salin de Giraud (GRD 313 au GRD 323.5) soit environ 10 km de digue. Ce linéaire constitue un tronçon de digue datant de 1869.

Photo 72. Digue de la Louisiane à l'embouchure - GRD 315.3 : Chamone (engraissement A2) point singulier n°3

Photo 73. Digue de la Louisiane à l'embouchure - GRD 316.5

Photo 74. Digue de la Louisiane à l'embouchure - GRD 321.5

Photo 75. Digue de la Louisiane à l'embouchure - GRD 323.25

Il s'agit plus précisément d'une étude de diagnostic de l'ouvrage actuel et d'un avant-projet de renforcement de la digue du Grand Rhône rive droite à Salin de Giraud. Sur ce secteur, les digues qui protègent Salin de Giraud ont résisté en 2003 : ces agglomérations n'ont pas été inondées. Mais les observations réalisées pendant la crue ont montré qu'elles demeuraient des points de fragilité. La digue rive droite, reste irrégulière, parfois étroite, et d'une fiabilité globale incertaine, ce qui avait conduit le SYMADREM à la placer en priorité dans les travaux du Plan Rhône. La zone d'étude pour le diagnostic de digue se situe sur la commune d'Arles, à Salin de Giraud, entre les GRD 313 et GRD 319.5. Le linéaire de digue est de 7.9 km.

Le programme de reconnaissance a été le suivant :

Investigation géophysique	**Investigation géotechnique**	**Essais en laboratoire**
Panneaux électriques	17 essais CPT, 12 CPTU (mesure de la pression interstitielle), 5 sondages carottés, 10 essais d'eau pour mesure la perméabilité, des essais à la pelle mécanique.	Identification, Granulométrie et sédimentométrie, Densités, Teneur en eau et en matière organique, Essais triaxiaux, Essais œdométriques.

Tableau 56. Digue de la Louisiane à l'embouchure – Programme géotechnique

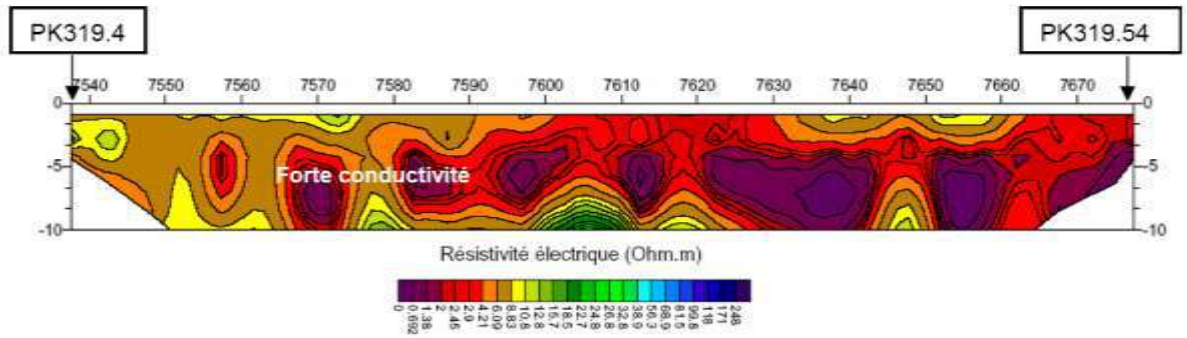


Figure 75. Digue de la Louisiane à l'embouchure – Essai par panneaux électriques.

Les données ci-dessus sont issues du rapport géotechnique de l'étude de diagnostic du renforcement de la digue du Grand Rhône Rive droite à Salin de Giraud. Dans son ensemble, on observe une bonne corrélation entre la géophysique, les CPT et les sondages carottés. La géophysique a permis de mettre en évidence les anomalies, les variations de la lithologie du sol. Ces résultats ont été confirmés par les essais géotechniques. Les CPT et les sondages carottés réalisés à proximité montrent globalement des résultats très ressemblants. Les distinctions résident seulement sur des différences décimétriques concernant les épaisseurs des horizons. Les reconnaissances géotechniques indiquent, par zone (corps de digue et fondation), une bonne homogénéité de la nature des matériaux ainsi que des caractéristiques mécaniques et hydrauliques des matériaux.
Suivant la position géographique de la digue, on observe des différences sur la structure géotechnique de la fondation. Au droit des deux anciens bras du Rhône, au niveau du coude

de Salin de Giraud, on peut en effet observer que la constitution de la fondation n'est pas identique au reste du linéaire.

On distingue alors sur la zone d'étude 2 grandes coupes types lithologiques.

Coupes type sur les ouvrages de protection de Salin de Giraud

La section courante correspond à pas moins de 90% du linéaire. Elle se présente selon une structure digue-fondation qui peut être assimilée à un corps de digue et deux couches de fondations. La figure ci-dessous est issue du rapport géotechnique de l'étude de diagnostic du renforcement de la digue du Grand Rhône Rive droite à Salin de Giraud.

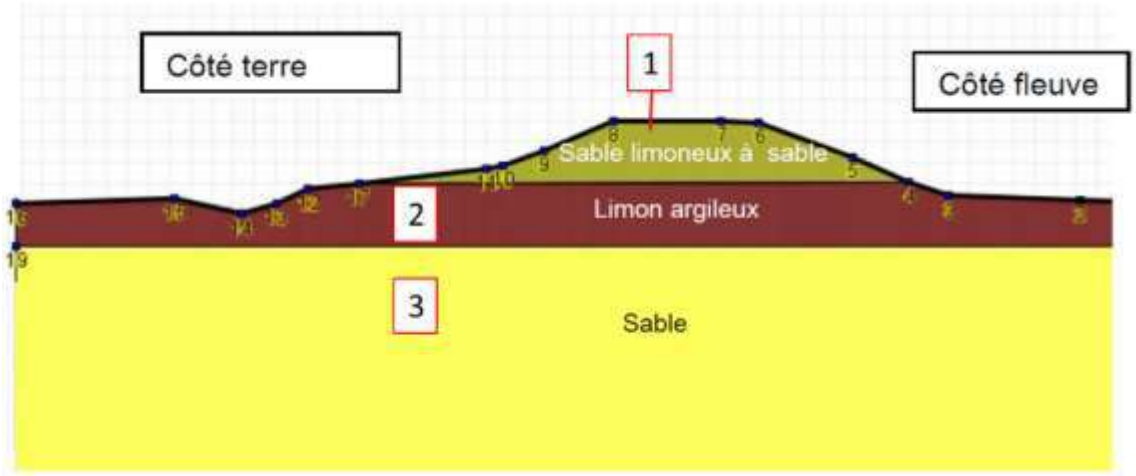


Figure 76. Digue de la Louisiane à l'embouchure – Coupe stratigraphique type (courante)

1- Le corps de digue d'une hauteur de l'ordre de 2,0 m est constitué d'un matériau limono-sableux.

La granulométrie indique que le passant au tamis de 80 µm est compris entre 81 et 97 %. On observe que les échantillons testés au niveau du corps de digue correspondent à des matériaux de classe A1 (limons peu plastiques, sables fin peu pollués) ou A2 (sables fins argileux, limons).

On observe toutefois sur plusieurs essais CPT le passage de lentilles sableuses plus importantes (passages donc plus perméables). Ces couches perméables (sable propre) peuvent par contre constituer une initiation potentielle à l'érosion interne. Elles favorisent les circulations de l'eau, pouvant à terme par le mécanisme d'érosion interne, endommager l'ouvrage jusqu'à la création d'un renard, voire d'une brèche.

Le croisement des données géotechniques et celles de l'inspection visuelle montrent que les zones où la digue a été diagnostiquée comme en mauvais état ou présentant des anomalies (résurgence d'eau) se situent sur des secteurs particuliers où la proportion de sable est importante :

En amont de l'Amérique (problème de résurgence d'eau côté val de la digue),

Au niveau du secteur du Petit Peloux (travaux d'urgence : comblement en matériaux de la digue pour stopper le départ d'une brèche),

Au niveau du quai d'embarcation des Salins du Midi (digue en mauvais état).

2- La couche de fondation supérieure constituée d'un matériau limono- argileux. Son épaisseur varie entre 1 et 2 mètres. La granulométrie indique que le passant au tamis de 80 µm est de l'ordre de 90 %. Les échantillons des matériaux testés dans la fondation sont plus hétérogènes. On constate des matériaux de classe A (sols fins) et des matériaux de classe B (sols sableux avec fines).

3- La couche de fondation inférieure, allant de 2 à 8 m de profondeur sous le TN est constituée d'un matériau sableux. A noter qu'on observe, entre 11 et 20 mètres de profondeur sous la crête de digue, des matériaux limoneux. La granulométrie indique que le passant au tamis de 80 µm est compris entre 4 et 30 %. Les échantillons des matériaux testés dans la fondation sont plus hétérogènes. On constate des matériaux de classe A (sols fins) et des matériaux de classe B (sols sableux avec fines).

Ci-dessous le tableau des propriétés retenues pour les études de stabilité de la digue, issu du rapport géotechnique de l'étude de diagnostic du renforcement de la digue du Grand Rhône Rive droite à Salin de Giraud.

Profondeur (m)	Description	Cohésion c_{cu} Angle de frottement $Ø_{cu}$ — Résistance de pic (Critère 2 du Laboratoire)*	Cohésion c' Angle de frottement Ø' — Résistance post-pic (Critère 1 du Laboratoire)*	Poids volumique γ (kN/m³)	K (perméabilité)
0 à 1 mètre	Digue : sable limoneux	C' = 6 kPa Ø' = 30 degrés	C' = 3 kPa Ø' = 31 degrés	18	1.10^{-6} m/s
		C_{cu} = 3 kPa $Ø_{cu}$ = 31 degrés	C_{cu} = 19 kPa $Ø_{cu}$ = 16 degrés		
1.30 à 1.75 mètres	Digue + fondation : limon argileux	C' = 27 kPa Ø' = 23 degrés	C' = 24 kPa Ø' = 24 degrés	20	1.10^{-7} m/s
		C_{cu} = 44 kPa $Ø_{cu}$ = 12 degrés	C_{cu} = 44 kPa $Ø_{cu}$ = 15 degrés		
1 à 2 mètres	Digue : limon sableux	C' = 2 kPa Ø' = 33 degrés	C' = 2 kPa Ø' = 32 degrés	19.4	$1.5.10^{-5}$ m/s
		C_{cu} = 26 kPa $Ø_{cu}$ = 21 degrés	C_{cu} = 38 kPa $Ø_{cu}$ = 23 degrés		
2.50 à 3.30 mètres	Fondation Sable fin limoneux	C' = 27kPa Ø' = 33 degrés C_{cu} = 96 KPa $Ø_{cu}$ = 21 degrés	C' = 0kPa Ø' = 35 degrés	20	1.10^{-5} m/s

Tableau 57. Digue de le Louisiane à l'embouchure – Propriétés des couches

La compacité des matériaux des digues est faible : les analyses exécutées dans le cadre des études préliminaires de la CNR, mettent en évidence cette faiblesse. Dans le meilleur des cas, le compactage est égal à 90 % de l'Optimum Proctor Normal. Les notions de compactage à l'optimum Proctor n'étaient pas connues à l'époque (1869). Ce n'est qu'au début des années 1930, que ces notions ont été connues grâce aux travaux de l'ingénieur Ralph R. PROCTOR (1933).

Les 10% restants de digue non concernés par la section courante précédemment citée représente des cas spécifiques et sont en particulier des anciens bras du Rhône. La structure géotechnique (digue + fondation) peut être décomposée en 2 zones distinctes :
1- Le corps de digue est constitué d'un matériau limono- sableux.
2- La fondation est constituée d'un matériau limoneux à limono- argileux.

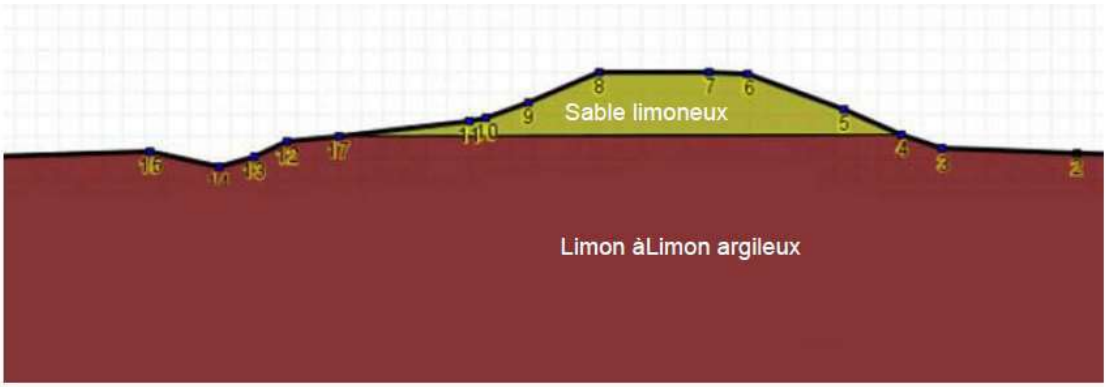


Figure 77. Digue de la Louisiane à l'embouchure – Coupe stratigraphique type (particulière)

La coupe type a été modifiée sur sa partie supérieure puisqu'il y a aujourd'hui une piste carrossable en crête.
En dehors des points singuliers présentés ci-après, les travaux de carrossabilité et suppression des ouvrages hydrauliques traversants de deuxième phase, du GRD 313 au GRD 322 datent de 2016 et sont les seuls travaux réalisés sur ce secteur.
Sur le dernier kilomètre (à l'aval du PR 322), c'est la digue route qui fait protection, avec un merlon qui est d'abord à l'ouest puis à l'est de la route. Ce merlon n'a pas fait l'objet de carrossabilité car la route est par définition carrossable.

Les travaux menés sont identiques à ceux réalisés en amont, à savoir :
La mise en carrossabilité des digues consiste à remplacer les premiers décimètres de la crête de digue par un matériau approprié qui sera assimilé à une couche de forme. Sur la base des études géotechniques réalisées (essais en laboratoire et in situ), et des guides techniques spécifiques (GTR 2000), il a été préconisé une solution de base en GNT ou laitier sur le principe des coupes présentées ci-dessous.
Les travaux consistent à réaliser une couche de forme avec la structure suivante :
Décapage sur une épaisseur de 10 cm,
Déblais sur une épaisseur de 15 cm maxi avec une pente de 1.5 %,
Pose d'un géotextile anti-contaminant et renforcé RP 35/35,
Couche de 25 cm d'épaisseur en GNT 0/40 compacté au rouleau à billes lisses de type V3.

Le profil en long de la crête de digue n'a pas été modifié mis à part dans les zones de points bas (effondrements, orniérages dus à des passages de véhicules…).

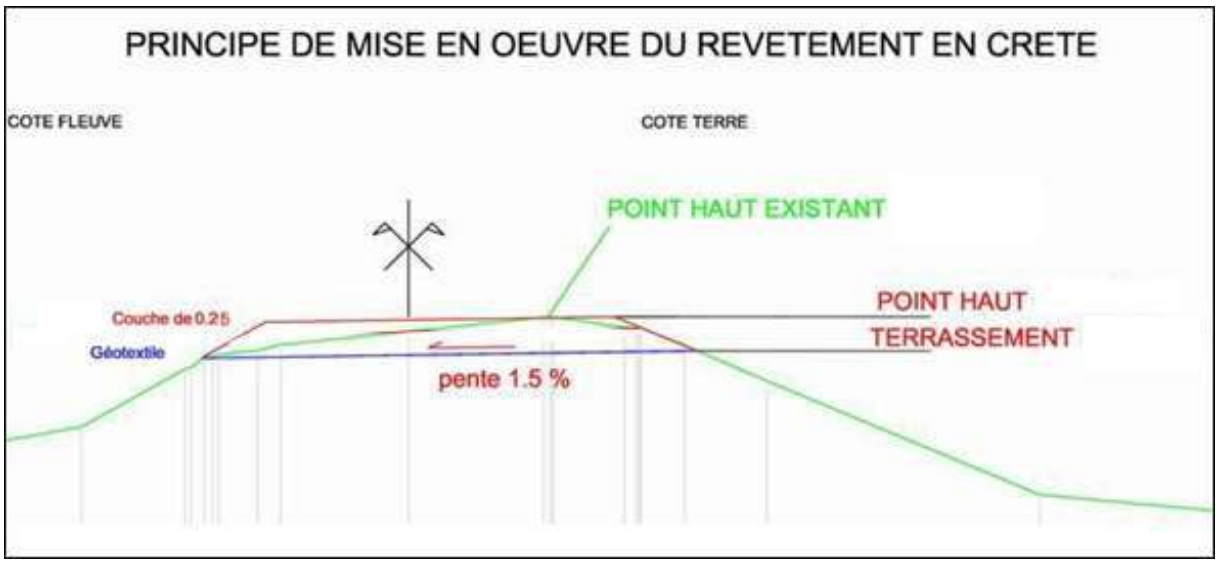


Figure 78. Digue de la Louisiane à l'embouchure – Carrossabilité – Coupe

Des essais de convenance ont été réalisés afin de s'assurer que les objectifs de portance sont atteints, des comptes rendus de réunion hebdomadaires ont été rédigés, les matériaux disposent de fiches d'agrément et des photos illustrent l'avancée des travaux. Ces éléments sont disponibles dans le DOE concernant la carrossabilité des digues.

Les travaux de suppression d'ouvrages traversants hors service ont également été réalisé. Ils ont consisté en :

- L'ouverture de la digue et de sa fondation,
- La démolition de l'ouvrage en totalité,
- La reconstitution du corps de digue et de la fondation.

5 ouvrages étaient concernés.

8.2.3.3. Points singuliers de la digue de la Louisiane (GRD 313) jusqu'à l'embouchure

<u>Confortement de la brèche du Petit Peloux</u> (Chamone) du GRD 315.25 au GRD 315.5

La brèche est survenue en 1993. Sa largeur a été estimée à 10 mètres. Le colmatage a été réalisé en urgence sous le contrôle des propriétaires. Le comblement a été fait avec du tout-venant roulé, plus ou moins compacté. Des travaux de confortement ont été réalisés dans le cadre des opérations d'urgence suite à la crue de décembre 2003. Les travaux, réalisés en 2006, ont consisté à engraisser la digue côté fleuve par du matériau A2 correctement compacté dans une clé d'ancrage. Un géotextile drainant a été déposé en base du talus aval. Des grillages anti-fouisseurs ont été mis en place. Une piste de circulation de 4.5 m de large a également été réalisée. Ci-dessous une coupe type de la digue issue de la phase projet. La cote de la crête de digue oscille entre 3.16 m et 3.53 m NGF.

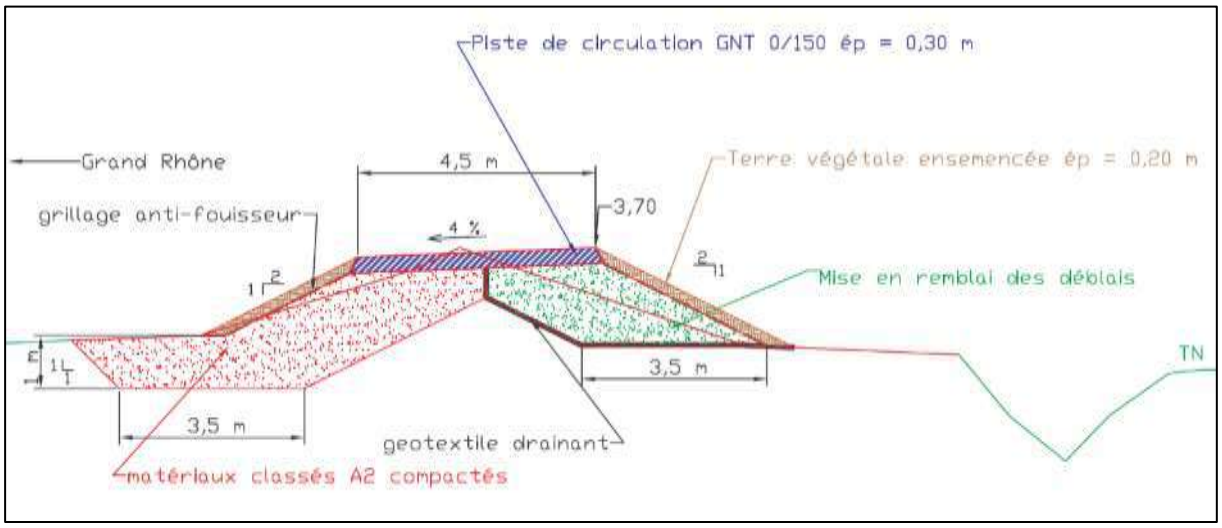


Figure 79. Digue de la Louisiane à l'embouchure – Chamone – Coupe type (projet)

Confortement au droit de Barcarin GRD 315.8

Comme précédemment, ce confortement s'insère dans le cadre des opérations d'urgence suite à la crue de décembre 2003. Les travaux, réalisés en 2006, ont consisté à reprendre et à compléter des enrochements sur environ 100 m. Les enrochements ont été déposés sur un géotextile drainant. Une piste de crête a également été créée. La cote de la crête de digue est de 3.68 m NGF.

Ci-dessous une vue en plan issu du DOE et une coupe type de la digue issues de la phase projet.

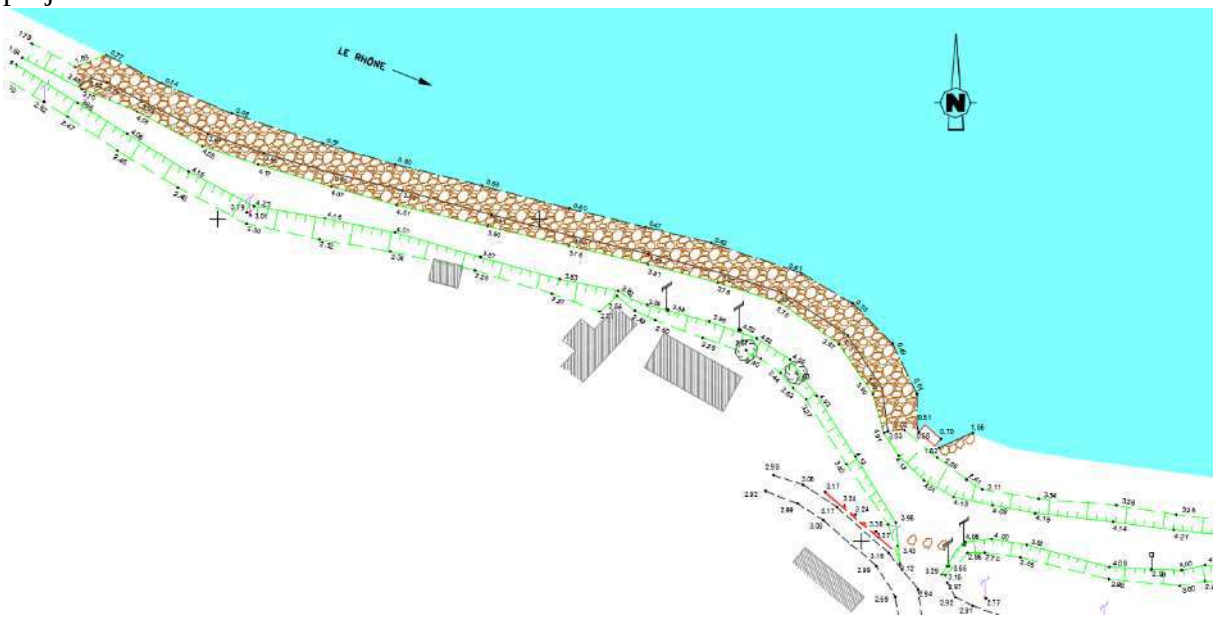


Figure 80. Digue de la Louisiane à l'embouchure – Barcarin – Vue en plan (DOE)

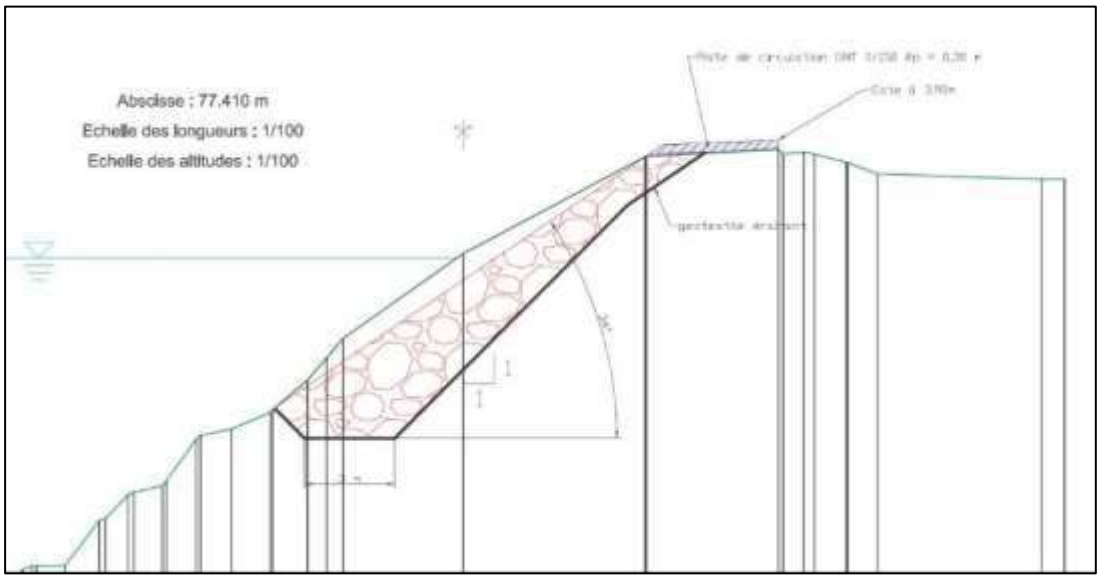


Figure 81. Digue de la Louisiane à l'embouchure – Barcarin – Coupe type (projet)

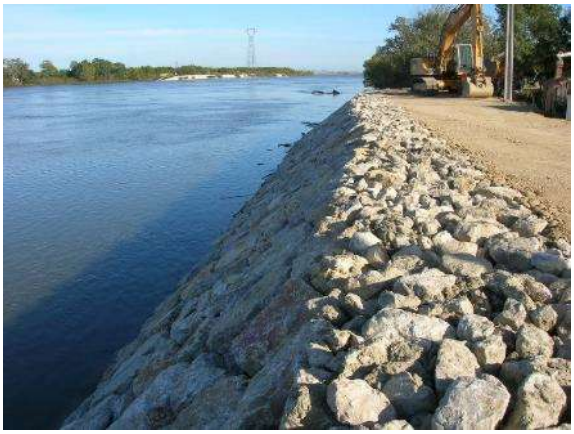


Photo 76. Barcarin - Durant les travaux de 2006

Photo 77. Barcarin - Enrochements lors de la visite des berges par voie nautique (mars 2015)

Réparation d'urgence à l'Esquineau, 1997 (GRD 321)

Le 17,18 et 19 décembre 1997, une tempête a sévi sur le littoral de la Camargue causant de nombreux dégâts sur les ouvrages de protection contre les eaux de mer, mais également sur les digues du Grand Rhône situées près de l'embouchure.

Le 17 décembre 1997, l'élévation du plan d'eau de la mer a provoqué la remonté de la ligne d'eau du Rhône près de l'embouchure avant que ne se fassent sentir les effets de la crue du Rhône. De même, les forts vents ont engendré une forte houle qui s'est propagée dans les bras du Rhône remontant à plus de 15 km depuis l'embouchure. Ces deux phénomènes ont provoqué des dégâts importants au GRD 321, au lit-dit de l'Esquineau, au sud de Salin De Giraud. Déjà en 1996 des dégâts similaires s'étaient produits en ce lieu.

Le 18 décembre 1997 il était constaté, en ce point de digue, des glissements de partie de talus avec affouillements importants mettant en péril la stabilité. Une intervention d'urgence a alors été réalisée.

Le confortement a consisté à mettre en œuvre sur le talus côté fleuve, des enrochements afin d'arrêter l'érosion et renforcer la digue. Aucun géotextile à usage de filtre et de transition entre le talus et les enrochements n'a été mis en œuvre car les conditions ne le permettaient pas. A la place, il a été mis en œuvre du tout venant d'abattage de carrière comportant des éléments de blocométrie variable pour remplir au mieux les vides.
La largeur de la crête de digue a été portée de 2.90 m à 4.50 m environ. La longueur d'application a été de 50 m environ, en continuité de la réparation de 1996. Les travaux ont duré 3 jours. La cote de la crête de digue est de 2.72 m NGF.

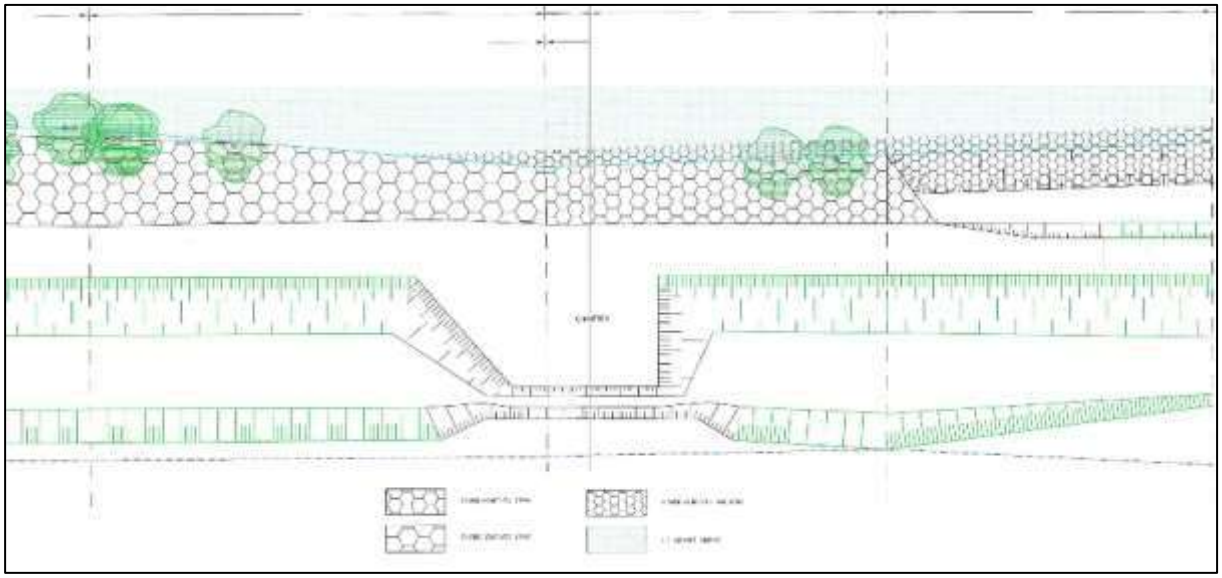


Figure 82. Digue de la Louisiane à l'embouchure – L'Esquineau – Profil en long

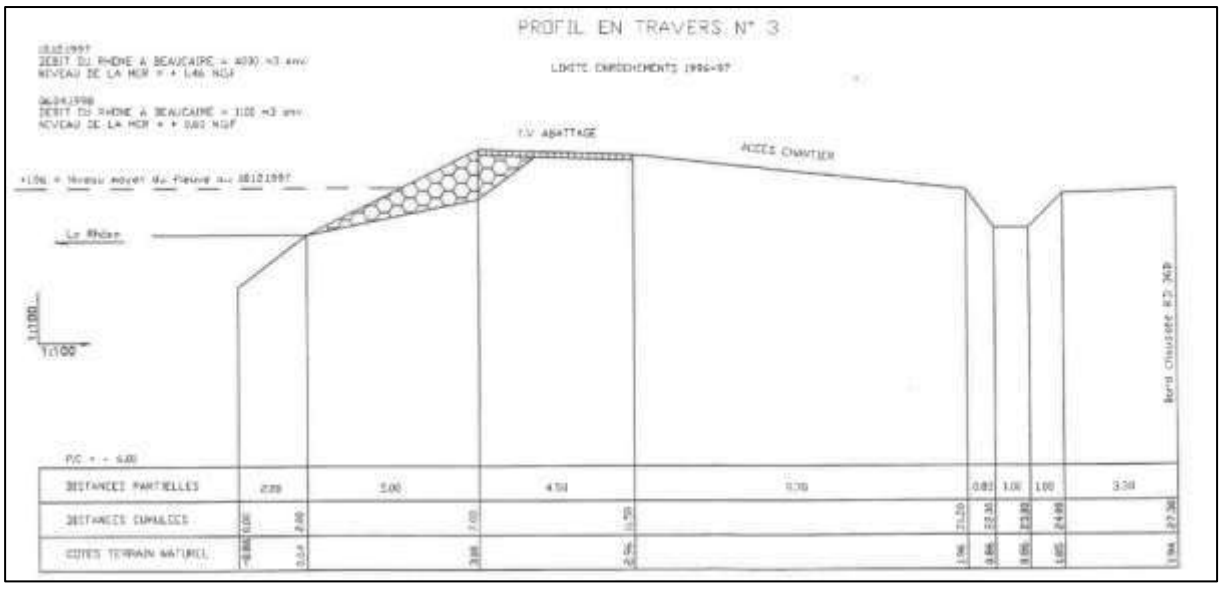


Figure 83. Digue de la Louisiane à l'embouchure – L'Esquineau – Profil en travers

Photo 78. L'Esquineau - Glissement dans le talus de digue (1997)

Photo 79. L'Esquineau - Travaux terminés

Autres points singulier : confortements ponctuels

Des confortements par enrochements ont également été réalisés en certain point ponctuel et notamment au droit des panneaux de la CNR indiquant les Points Kilométriques. Ci-dessous quelques photographies illustratives des travaux de confortement. Ces confortements font l'objet de travaux annuels, la partie à l'aval du GRD 318 étant régulièrement sujette aux érosions par la houle lors des forts vents venant du Sud-Est.

Photo 80. Exemple : GRD 318.5 – Confortement (travaux de 2011)

Photo 81. Exemple : GRD 318.5 – Nouvelle zone d'érosion en aval du confortement (mars 2015, repris depuis)

Photo 82. Exemple : GRD 320 – Confortement (travaux de 2011)

Photo 83. Exemple : GRD 320– Nouvelle zones d'érosion en amont et en aval du confortement (mars 2015, repris depuis)

8.2.4. Accessibilité

De nombreux accès aux digues du Grand Rhône rive droite de la Louisiane à l'embouchure sont recensés.

Tableau 58. Franchissements, Section Louisiane - Embouchure

Nom	GRD
1	313,06
2	313,9
3	314,20
4	315,21
5	315,9
6	316,8
7	317,25
8	318,53
9	320,64
10	321
11	321,5

8.2.5. Ouvrages englobés

De nombreux ouvrages hydrauliques sont à dénombrer.

Tableau 59. Digue de la Louisiane à l'embouchure – Ouvrages englobés

N°	PR	Fiche	Réseaux humides	Implantation	Diamètre (mm)
1	313,08	GRD_IRR_313,08	Irrigation	Enterré	1000
2	314,25	GRD_IRR_314,25	Irrigation	Enterré	600

3	314,25	GRD_DRA_314,25	Drainage	Enterré	?
4	314,97	GRD_IRR_314,97	Irrigation	Enterré	800
5	314,99	GRD_IRR_314,99	Eaux de distribution	Superficiel	32
6	315,01	GRD_IRR_315,01	Irrigation	Siphon Inversé	2*600
7	315,02	GRD_IRR_315,015	Irrigation	Enterré	600
8	315,02	GRD_IRR_315,02	Indéfini	Enterré	1500
9	315,88	GRD_DRA_315,88	Drainage	Enterré	3*1000
10	316,14	GRD_IRR_316,14	Irrigation	Enterré	1100
11	316,25	GRD_IND_316,25	?	?	?
12	316,34	GRD_IND_316,34	?	Superficiel	400
13	316,34	GRD_IND_316,34	?	Superficiel	100
14	316,62	GRD_DRA_316,62	Drainage	Siphon Inversé	500
15	316,95	GRD_IRR_316,94	Irrigation	Enterré	300
16	317,24	GRD_DRA_317,23	Drainage	Siphon Inversé	2*600

8.3. DECOMPOSITION FONCTIONNELLE

La description est scindée en deux afin de décrire les deux sous-tronçons.

8.3.1. Géométrie - tronçon Louisiane - Esquineau

Tableau 60. Synthèse de géométrie, tronçon Louisiane - Esquineau

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	4,2	2,9	3,4	0,4
Cote de pied de digue aval	m NGF	3,9	0,4	1,9	0,8
Cote à 20m du pdav	m NGF	3,2	0,5	1,5	0,5
Cote de pied de digue amont	m NGF	3,9	0,3	1,9	0,6
Cote à 20m du pdam	m NGF	3,7	0,3	1,2	0,8
Hauteur de digue coté aval	m	2,6	0,0	1,5	0,5
Hauteur de digue côté amont	m	3,8	0,3	1,5	0,5
Fruit aval	L/V	100,0	1,1	5,2	14,0
Fruit amont	L/V	6,8	1,1	2,6	1,0
Largeur du ségonnal	m	703	2	113	175

8.3.2. Données hydrauliques - tronçon Louisiane - Esquineau

Tableau 61. Données hydrauliques, tronçon Louisiane - Esquineau

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	2,3	1,7	1,0	1,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
8500	2,7	1,9	0,8	1,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,6

9500	2,8	2,1	0,6	1,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,5
10500	3,1	2,4	0,3	0,7	0,2	0,1	0,0	0,0	0,4
11500	3,4	2,6	0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2
12500	3,5	2,7	0,0	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2
14160	3,6	2,7	0,0	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2

8.3.3. Géométrie - tronçon Esquineau - Palissade

Tableau 62. Synthèse de géométrie, tronçon Esquineau - Palissade

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	3,1	2,3	2,7	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	2,4	0,0	1,2	0,6
Cote à 20m du pdav	m NGF	2,0	0,2	0,9	0,5
Cote de pied de digue amont	m NGF	2,3	0,2	1,3	0,6
Cote à 20m du pdam	m NGF	2,0	-0,2	0,6	0,6
Hauteur de digue coté aval	m	2,6	0,4	1,5	0,6
Hauteur de digue côté amont	m	2,6	0,2	1,4	0,7
Fruit aval	L/V	10,4	1,7	2,8	1,6
Fruit amont	L/V	5,7	1,2	2,4	0,9
Largeur du ségonnal	m	100	2	36	30

8.3.4. Données hydrauliques - tronçon Esquineau - Palissade

Tableau 63. Données hydrauliques, tronçon Esquineau - Palissade

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	1,7	1,4	0,9	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,6
8500	1,9	1,4	0,8	1,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,5
9500	2,1	1,6	0,6	0,8	0,2	0,1	0,0	0,0	0,5
10500	2,4	1,9	0,4	0,5	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3
11500	2,5	2,0	0,3	0,4	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2
12500	2,6	2,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2
14160	2,7	2,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1

8.3.1. Etanchéité

Il n'y a pas d'organe ayant pour rôle spécifique l'étanchéité ; ce sont les matériaux du corps de digue qui assurent cette étanchéité.

8.3.2. Filtration-Drainage

Il n'y a pas de système de filtration ou de drainage

8.3.3. Stabilité

La stabilité de la digue se fait naturellement par sa géométrie ; le fruit des talus est en moyenne à plus de 2.5/1 mais peut localement descendre à 1.1/1.

8.3.4. Protection

Les terriers, de blaireaux principalement, sont régulièrement réparés mais il n'y a pas de protection particulière.

8.3.5. Protection

Il n'y a pas de protection contre le fouisseurs, les terriers sont régulièrement rebouchés ; par contre dans les zones d'affouillement, des protections en enrochement ont été mises en place.

8.3.6. Evacuation

Il n'y a pas, pour l'instant, de secteur résistant à la surverse sur la digue de la Louisiane à l'embouchure, malgré le calage de l'ouvrage.

8.3.7. Sécurité

L'intégralité du linéaire est carrossable et il y a parfois des pistes en pied ; une route départementale longe la protection sur toute la partie à l'aval du GRD 318.

9. DIGUE DU DEFLUENT A ALBARON (PRG1-PRG8)

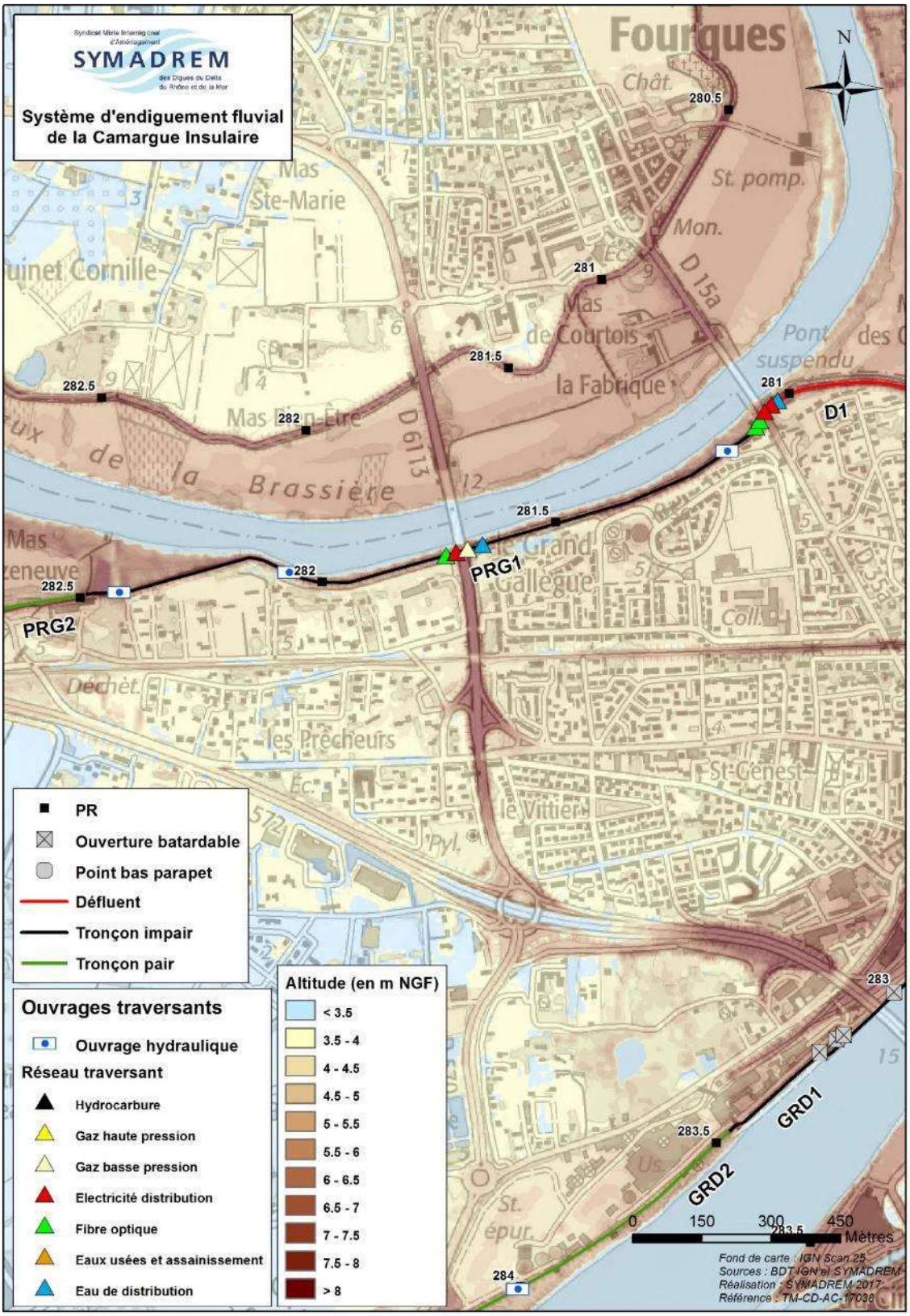


Figure 84. Plan de situation du défluent à Albaron 1 : Trinquetaille

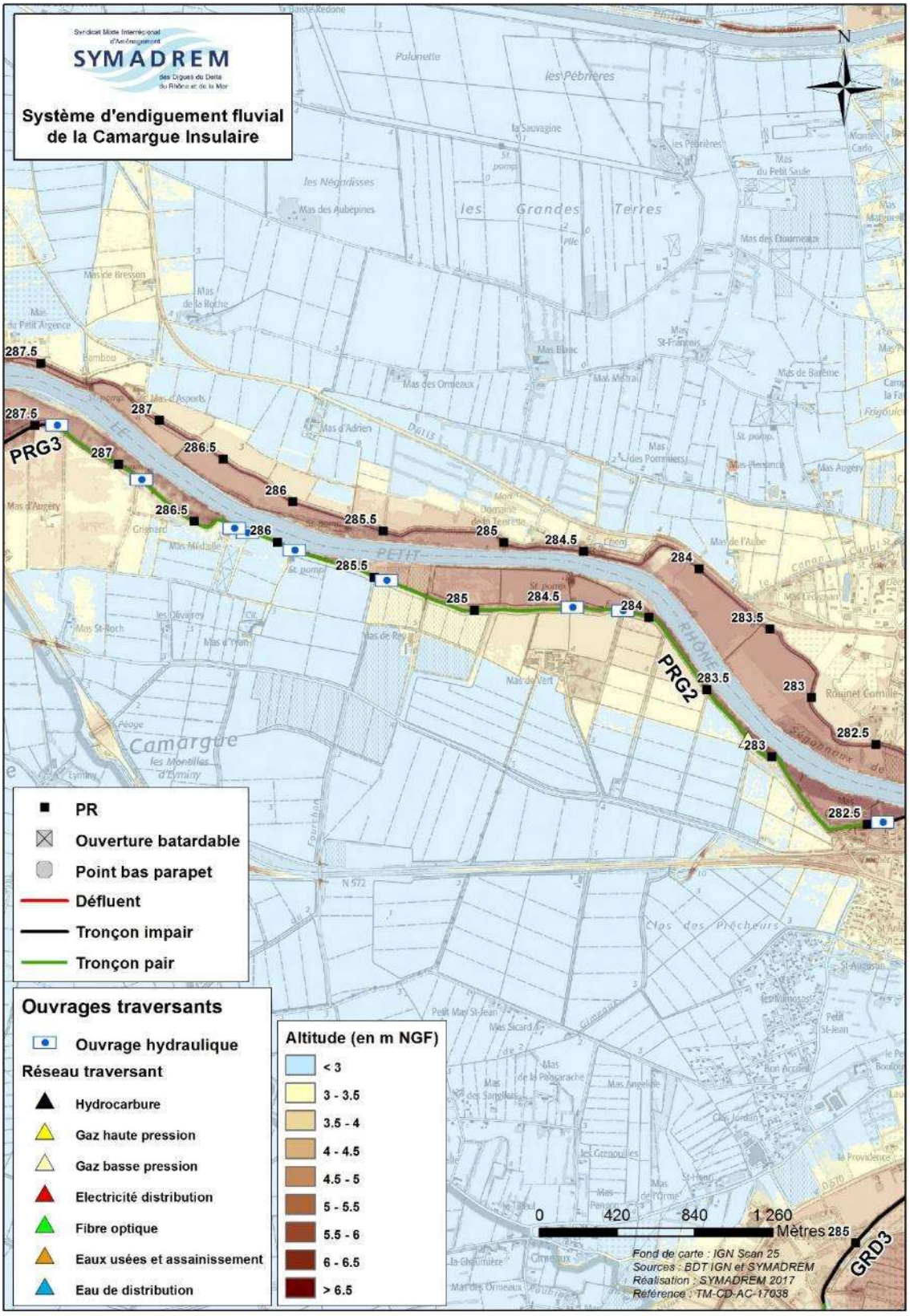


Figure 85. Plan de situation du défluent à Albaron 2 : Cazeneuve-Augéry

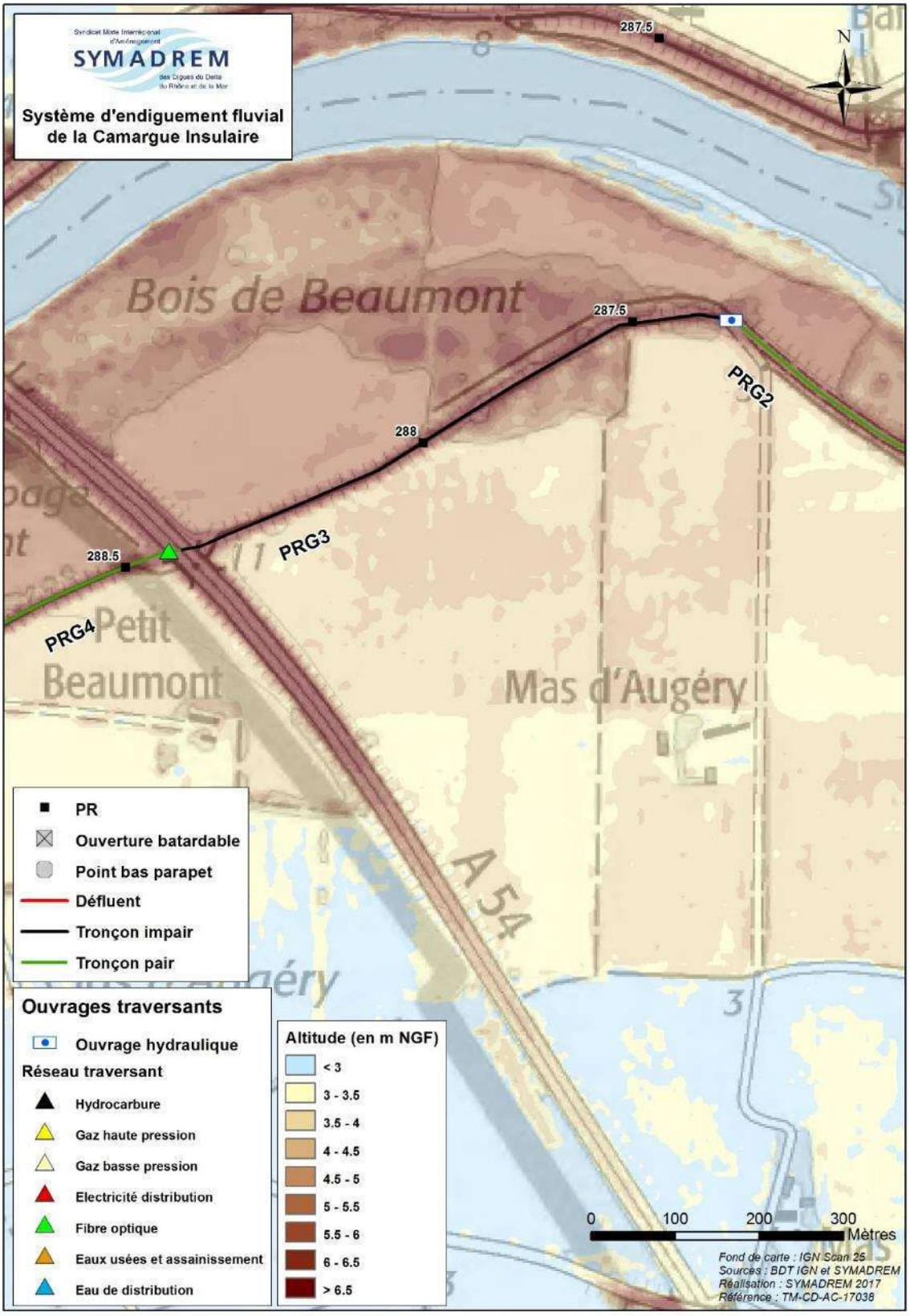


Figure 86. Plan de situation du défluent à Albaron 3 : Bois de Beaumont

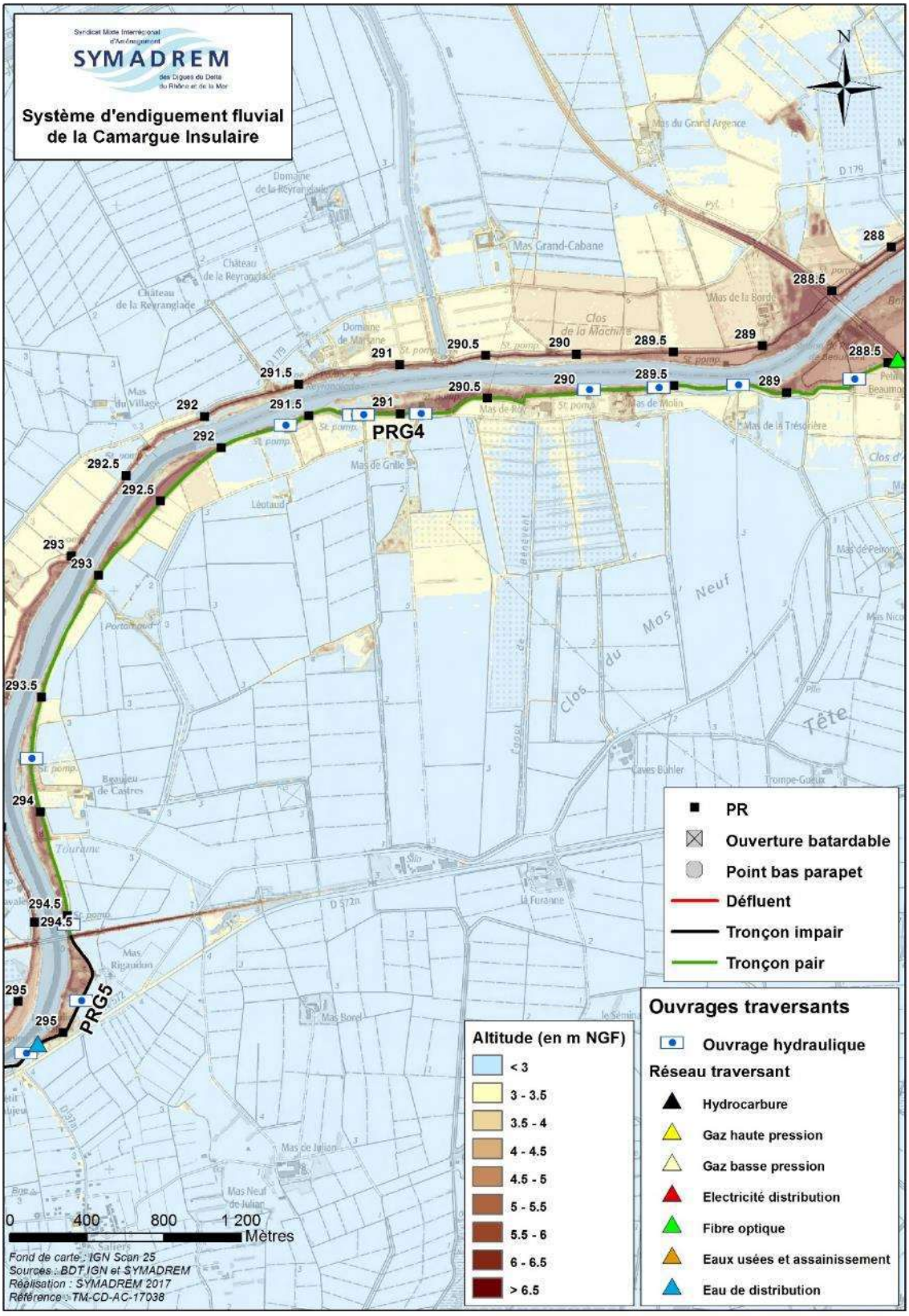


Figure 87. Plan de situation du défluent à Albaron 4 : Beaumont-Cavalès

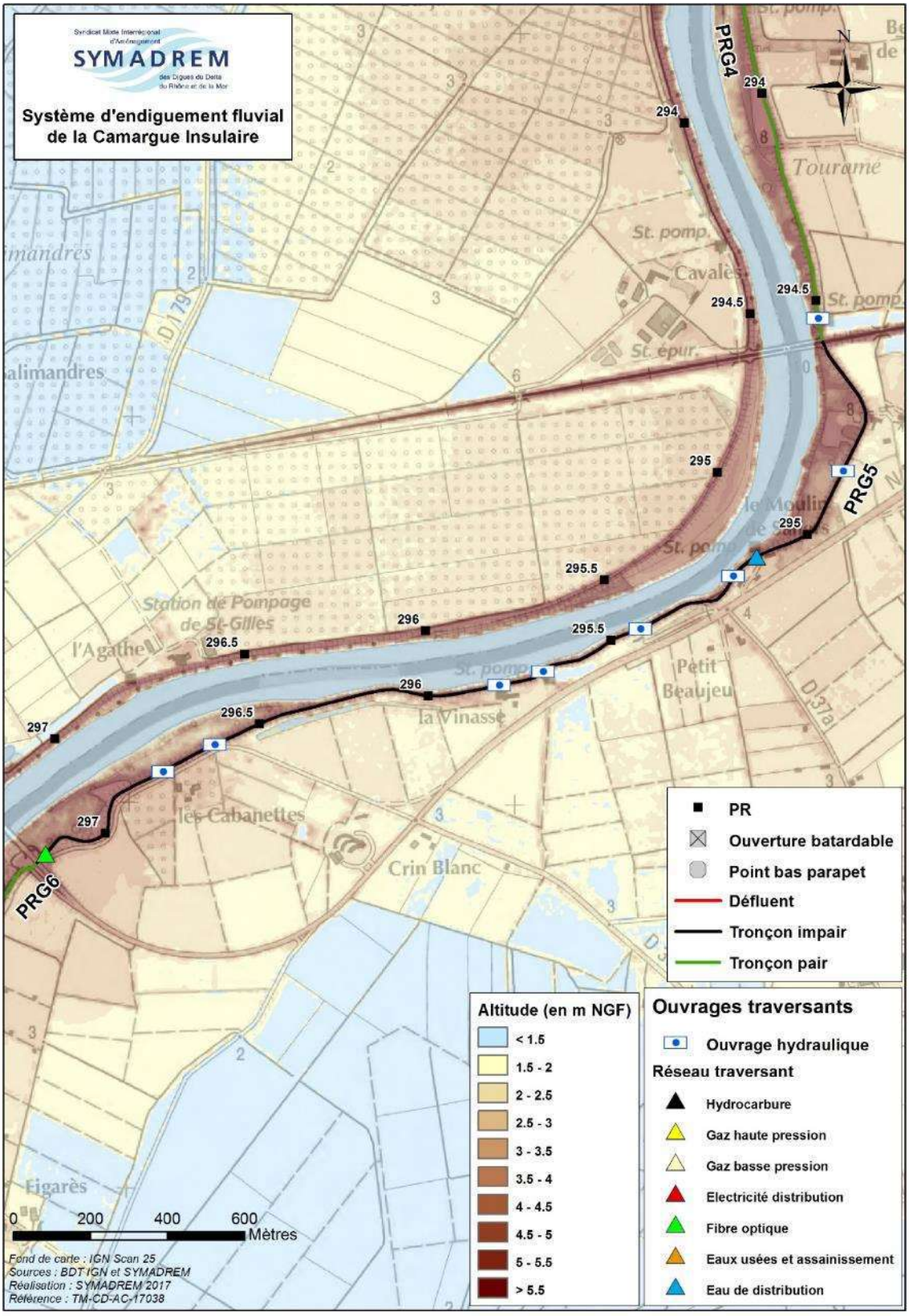


Figure 88. Plan de situation du défluent à Albaron 5 : Cavalès-St Gilles

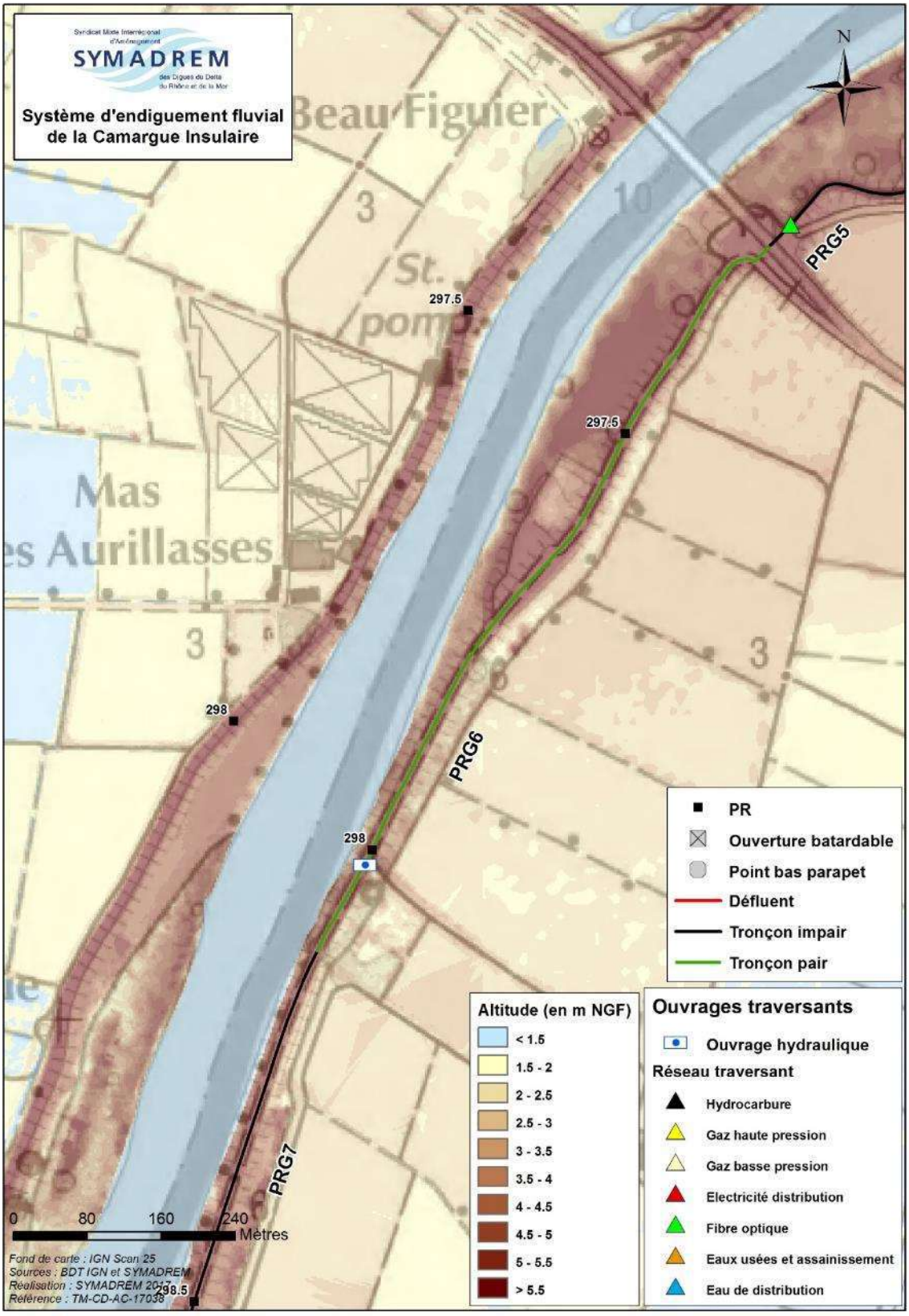


Figure 89. Plan de situation du défluent à Albaron 6 : St Gilles-Figarès

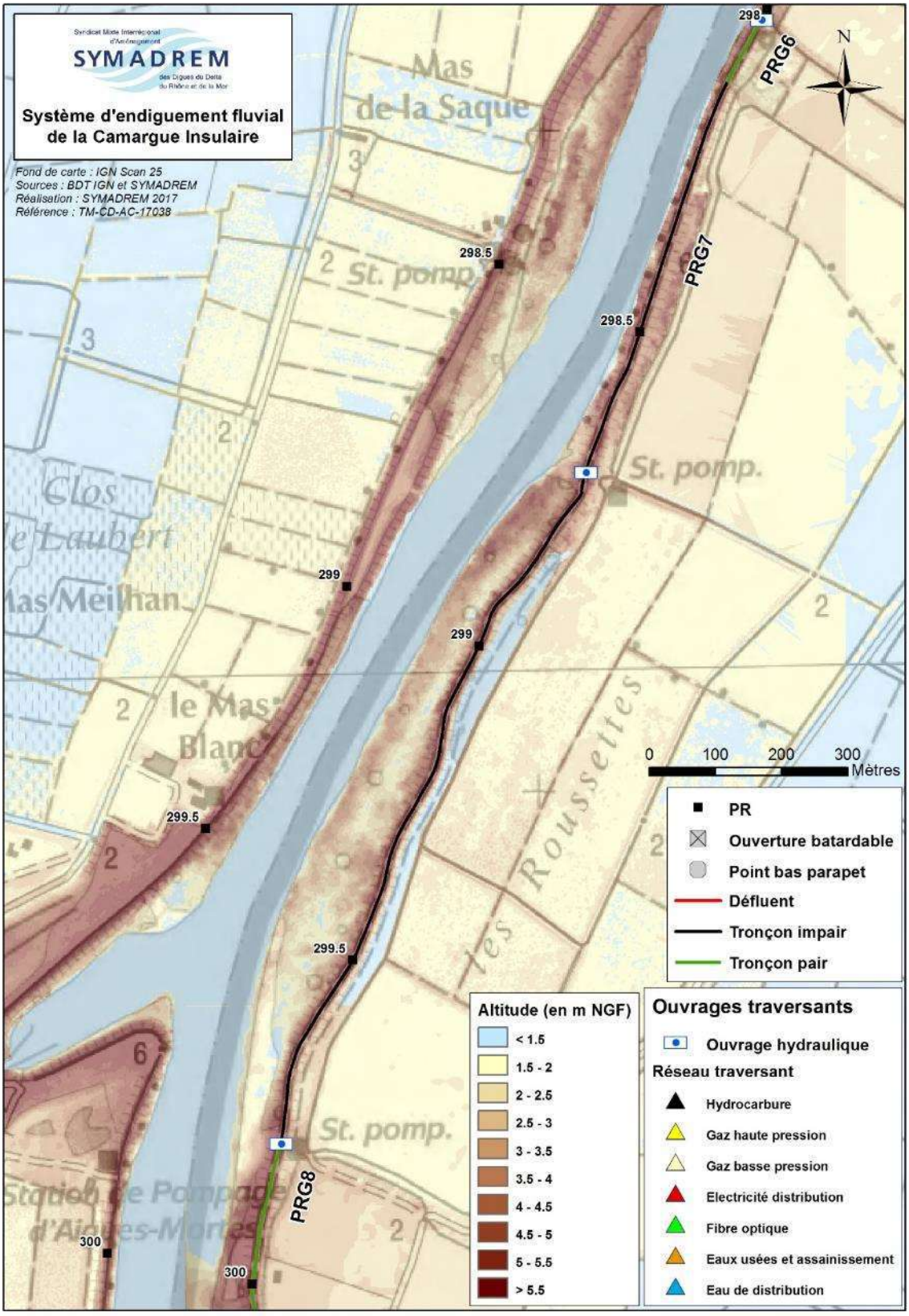


Figure 90. Plan de situation du défluent à Albaron 7 : Figarès

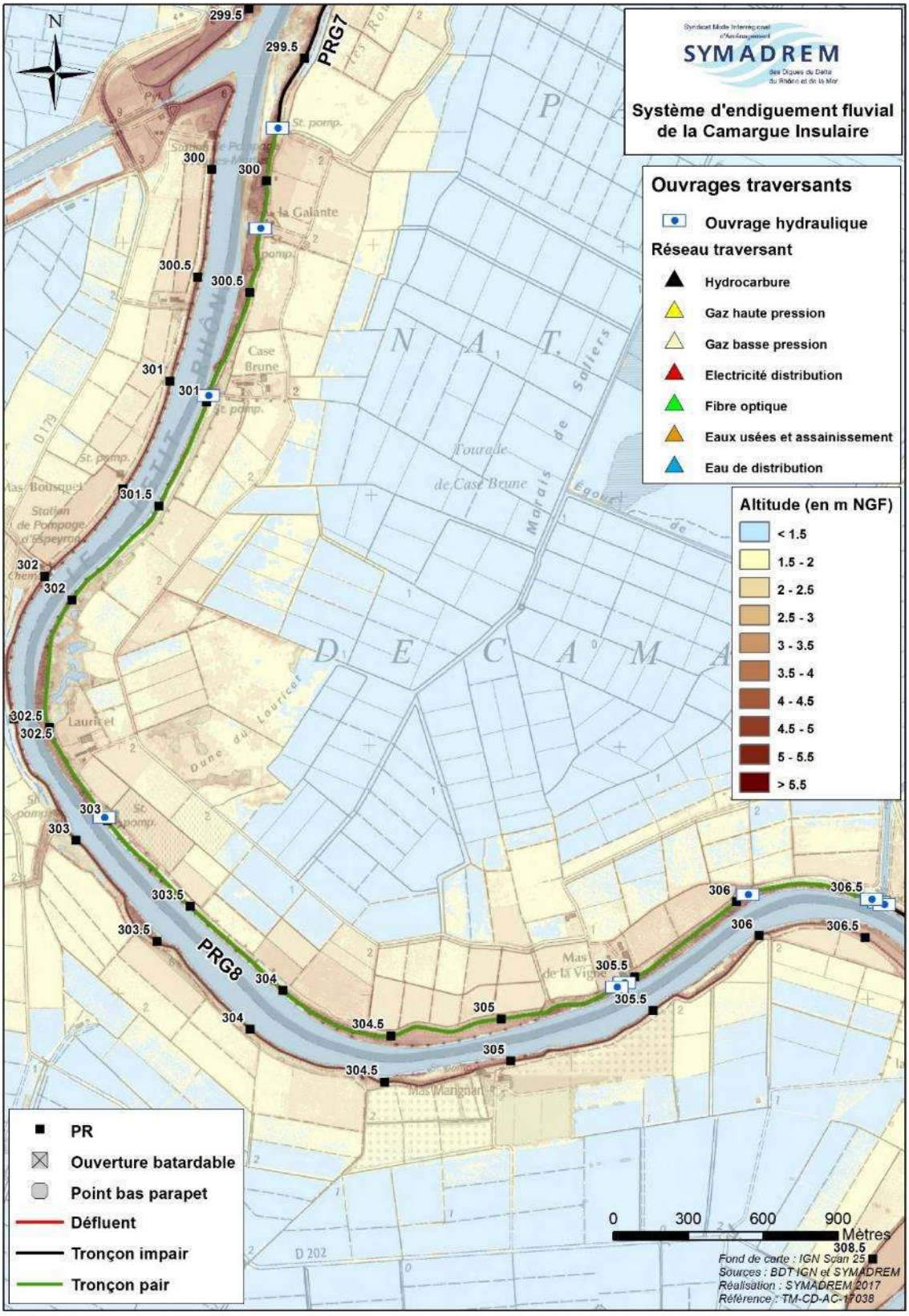


Figure 91. Plan de situation du défluent à Albaron 8 : La Galante-Albaron

9.1. PREAMBULE

Tout comme les digues du Grand Rhône, celles du Petit Rhône ont été rehaussées ou bien reconstruits à plusieurs reprises. La dernière surélévation date des années 1859, réalisée après la très importante crue de 1840. Depuis 150 ans environ, les digues ont acquis les caractéristiques que l'on connaît aujourd'hui.

9.2. PRESENTATION GENERALE

9.2.1. Description historique

Suite à la crue de 1810, les digues de la Grande Camargue ont fait l'objet d'un exhaussement généralisé de 35 cm. (cf. 9.2.1 : présentation des digues de Grande Camargue).
La totalité du linéaire de la zone d'étude (PRG 281.17 au PRG 306.6) a été rendu carrossable, de nombreux ouvrages hydrauliques ont ainsi été supprimés. Ce linéaire s'étend de la digue du défluent jusqu'à la digue d'Albaron. De multiples opérations ponctuelles de confortement ont été réalisées suite notamment aux crues de 1993 et 1994. L'ensemble de ces travaux est exposé dans les parties suivantes.
De nouveaux travaux sont prévus dans le cadre de l'opération PR1 du programme de sécurisation.

9.2.2. Sectorisation

Les digues du Petit Rhône conservent cette coupe type sur tout le secteur d'étude. La digue de la rive gauche du Petit Rhône du défluent à Albaron peut être ainsi sectorisée de la manière suivante :

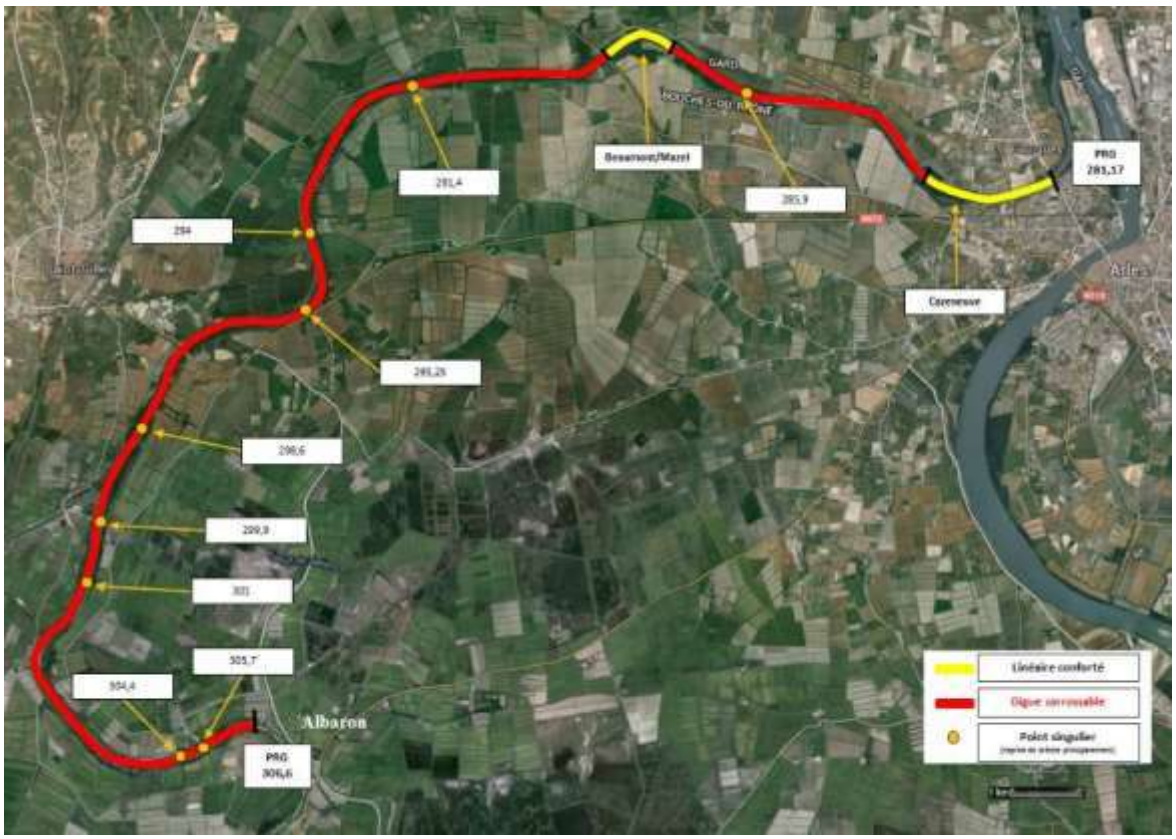


Figure 92. Digue du défluent à Albaron – Tronçons

Les spécificités de chaque tronçon sont données dans le tableau ci-dessous.
Pour la majeur partie du linéaire, et afin d'éviter d'avoir des tronçons trop longs, le découpage a été fait en prenant en compte à la fois les travaux à venir et les résultats de calcul.

Tableau 64. Sectorisation, Section Défluent-Albaron

Tronçon de la zone d'étude	**PRG**	**Description sommaire section courante**	**Ouvrage traversant**
Linéaire conforté 1	Trinquetaille	Recharge aval matériaux graveleux	3
T1	282.5-287.3	Digue de Camargue	8
Linéaire conforté 2	Beaumont 287.3-288.5	Recharge aval dans clef d'ancrage	0
T2	288.5-294.6	Digue de Camargue	10
T3	294.6-297.2		8
T4	297.2-298.2		1
T5	298.2-299.8		2

T6	299.8-306.55		8
Point singulier 1	PRG 285.9 Mas Médaille	Confortement en enrochements 50 m	0
Point singulier 2	PRG 289.75 Mas Molin	Brèche colmatée par de la terre argileuse	0
Point singulier 3	PRG 291.4 Léautaud	Affaissement comblé par matériaux d'emprunts (arbres coupés, branchages, terre limoneuse)	0
Point singulier 4	PRG 294 Beaujeu de Castres	Masque argileux A2 amont	0
Point singulier 5	PRG 295.25 Saliers	Enrochements et masque argileux A2 amont	0
Point singulier 6	PRG 298.6 Figarès	Enrochements et reconstitution du ségonal par clapage de graviers du Rhône	0
Point singulier 7	PRG 299.9 La Galante	Noyau reconstitué avec du tout-venant 0/300 et 0/150 argileux	0
Point singulier 8	PRG 301 Casebrune	Dépose de sac de tout-venant	0
Point singulier 9	PRG 304.4 Lauricet	Dépose de sac de tout-venant	0
Point singulier 10	PRG 305.7 Mas de la Vigne	Masque argileux A2 amont	0
Total ouvrages traversants			40

La description des tronçons est donnée ci-après.

9.2.3. Description des tronçons

9.2.3.1. Raccordement

Le raccordement avec la digue du défluent ce fait au niveau du pont de Fourques. Nous n'avons pas de source explicitant cette transition mais le compactage au droit de la pile du pont semble correct car il n'y a pas de retour d'infiltration ou d'autre désordre à cet endroit.

9.2.3.2. Section courante du défluent à Albaron, T1 à T6

Dans le cadre du Plan Rhône, une opération de décorsetage du Petit Rhône est prévue. Cette opération s'inscrit dans le cadre du volet inondation du pré-schéma sud du plan Rhône. Des investigations géotechniques ont ainsi été menées sur la zone d'étude. La coupe type des digues du Petit Rhône rive gauche est similaire à celles des digues du Grand Rhône rive droite (cf. 8.2.3).

On rappelle donc, ci-dessous la coupe type des digues de Camargue.

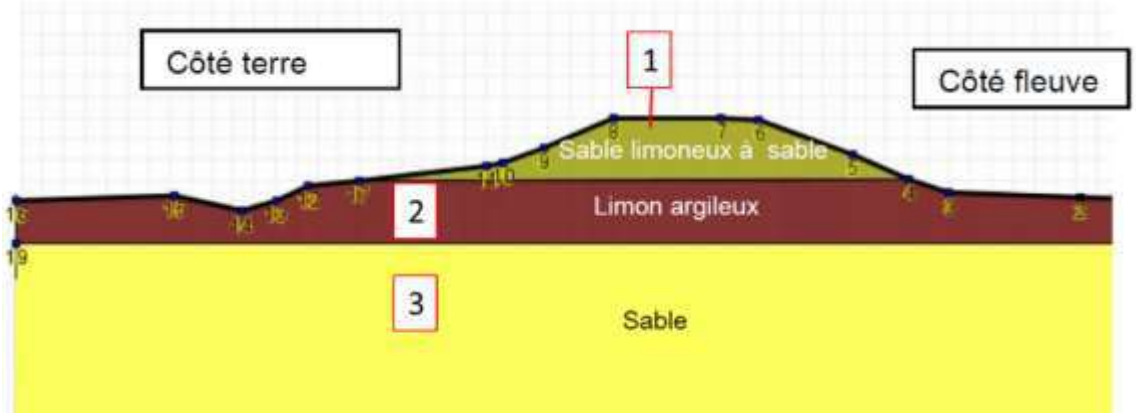


Figure 93. Digue de Camargue – Coupe stratigraphique type (courante)

La carrossabilité de ce secteur a été établie lors de la première phase de travaux, en 2010. Comme présenté précédemment, la cote et la structure des ouvrages n'ont pas été modifiées, seuls les 30 cm supérieurs ont été repris. Quelques ouvrages traversants ont également été supprimés lors de ces travaux.

Photo 84. PRG 284.5 (2012)

Photo 85. PRG 290 (2012)

Photo 86. Digue entre Saint-Gilles et Albaron : PRG 297.3 au PRG 306.5 (2012)

9.2.3.3. Linéaires confortés de la digue du défluent à Albaron

Trinquetaille : du pont suspendu (PRG 281.17) au PRG 283

Ce confortement a été réalisé dans le cadre des opérations d'urgence suite aux crues de 1993 et 1994. En effet, lors de ces évènements, de nombreuses venues d'eaux ont été observées. Ainsi, deux opérations ont été effectuées.
Dans un premier temps, en 1994, une recharge aval en matériaux graveleux a été réalisée du pont suspendu (PRG 281.17) jusqu'au PRG 283. Ces matériaux ont été déposés sur un géotextile et jusqu'à mi-hauteur de l'ancienne digue. Voir le schéma de principe ci-dessous.

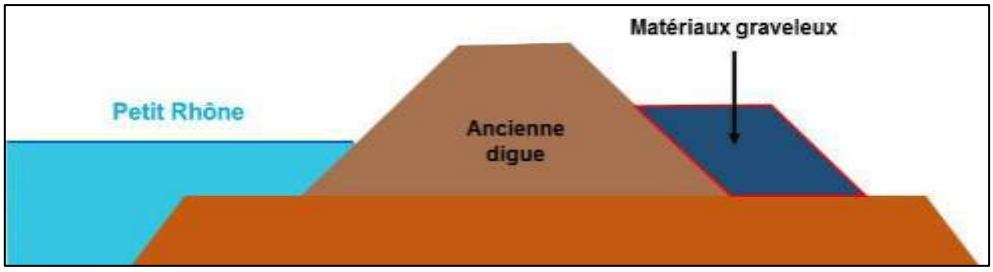


Figure 94. Digue du défluent à Albaron – Pont suspendu au PRG 283 – Principe phase 1

Cette coupe de digue constitue le confortement de **type 2** (voir plan de localisation ci-après)

Une second opération a consisté à terminer cette recharge aval en la rehaussant jusqu'à la même altimétrie de l'ancienne digue avec du matériau graveleux. Cette opération a été réalisée seulement du pont suspendu jusqu'au PRG 282.50. Voir le schéma de principe ci-dessous.

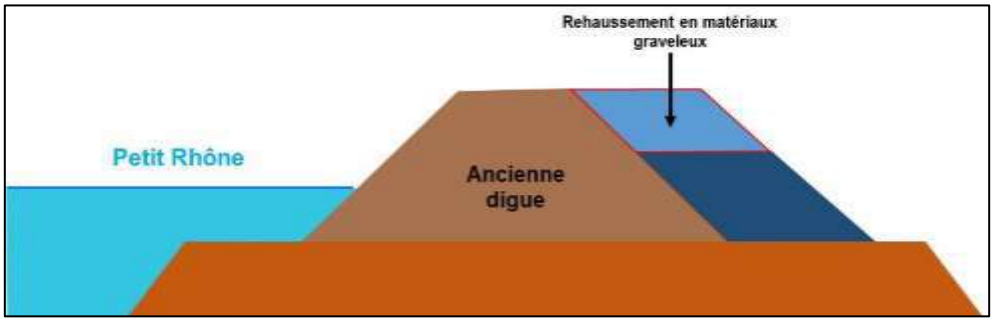


Figure 95. Digue du défluent à Albaron – Pont suspendu au PRG 282.50 – Principe phase 2

Cette coupe de digue constitue le confortement de **type 1** (voir plan de localisation ci-après)

Figure 96. Digue du défluent à Albaron – Pont suspendu au PRG 282.5 – Plan confortements

Sur tout le linéaire, la côté de la crête de digue oscille entre 8.40 NGF et 9.38 m NGF.
Du PRG 281.17 au PRG 282.5 (confortement de type 1), la côté en pied de digue côté aval oscille entre 3.89 et 4.88 m NGF.
Du PRG 282.5 au PRG 283 (confortement de type 2), la côté en pied de digue côté aval oscille entre 6.13 et 7.82 m NGF.

Photo 87. Pont suspendu au PRG 282.50 - Confortement de type 1 - Digue large, recharge complètement effectuée

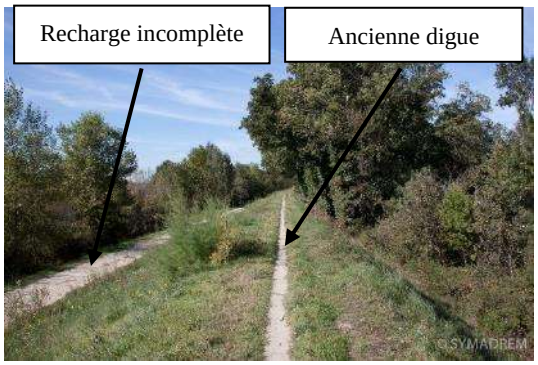


Photo 88. PRG 282.50 au PRG 283 - Confortement de type 2 – Recharge incomplète

<u>Confortement de la brèche de Beaumont et travaux sur secteur Beaumont / Mazel</u> (PRG 287.3 au PRG 288.75)

La brèche est apparue lors de la crue de janvier 1994. Sa largeur été de 35 m. Les travaux de colmatage ont débuté dans la journée ; dans un premier temps par des interventions héliportées (4 pumas) larguant des sacs de 1,5 tonnes de tout-venant. La proximité de l'autoroute A54 a permis l'acheminement d'engins de terrassement.

Photo 89. Beaumont / Mazel – Colmatage de la brèche en 1994

Les ouvrages de protection ont été ensuite confortés de janvier à mai 1998 suite à un arrêté préfectoral d'urgence sous la maîtrise d'ouvrage du SIDRHEMER et sous maitrise d'œuvre de la DDE des Bouches-Du-Rhône. Le chantier a porté sur la réparation définitive de la brèche survenue en 1994. Les travaux ont consisté à réaliser une recharge aval. Une clef d'ancrage a été réalisée et un géotextile drainant mis en place sous la recharge. Nous n'avons que très peu de documents concernant ces travaux hormis quelques photos permettant d'avoir un aperçu sommaire des travaux et moyens mis en œuvre.
Néanmoins de nombreux travaux ont été réalisés à la même époque, tous selon le principe suivant : masque étanche coté amont, un remblai coté aval avec un drain et des grillages anti-fouisseurs sur les deux parements. C'est donc très probablement ce qui a été mis en place lors de ces travaux.

Photo 90. Beaumont / Mazel : Terrassement de la clé d'ancrage (source : archives)

Photo 91. Beaumont / Mazel : Recharge aval sous le géotextile (source : archives)

9.2.3.1. Points singuliers de la digue du défluent à Albaron

Confortement au droit du Mas Médaille (PRG 285.9)

Ce confortement s'insère dans le cadre des opérations d'urgence suite à la crue de décembre 2003. Les travaux, réalisés en 2006, ont consisté à reprendre complétement la digue à l'aide d'enrochements sur environ 50 mètres. La cote de la crête de digue est d'environ 8.32 m NGF.

Figure 97. Digue du défluent à Albaron – Mas Médaille – Confortement enrochements

Confortement de la brèche du Mas de Molin (PRG 289.75)

La brèche, apparue en octobre 1993, d'une largeur de 6 mètres a été initiée le long d'un petit tuyau alimentant en eau le mas de Molin qui été disposé le long d'un ancien aqueduc désaffecté. L'érosion le long du tuyau a provoqué la création d'un trou de 6 mètres de diamètre dans le corps de digue, jusqu'à rupture et déversement. L'intervention d'urgence a consisté à déposer des sacs de tout-venant côté fleuve pour limiter le débit passant. Ces sacs ont ensuite été purgé et la brèche a été colmatée par de la terre argileuse. La cote de la crête de digue est d'environ 7.87 m NGF.

Photo 92. Mas de Molin – Opération de colmatage d'urgence (1993).

Affaissement de grille Léautaud (PRG 291.4)

Cet affaissement de la digue sur 20 mètres est apparu pendant la crue d'octobre 1993. Les causes sont indéterminées. Les travaux ont consisté à mettre en place des matériaux d'emprunts (arbres coupés, branchages, terre limoneuse). La cote de la crête de digue est d'environ 7.85 m NGF.

Photo 93. Léotaud – Affaissement de grille (1993)

Beaujeu de Castres (PRG 294)

Ce confortement s'insère dans le cadre des opérations d'urgence suite à la crue de décembre 2003. Les travaux, réalisés en 2006, ont consisté à reprendre complétement la digue sur environ 170 mètres. La digue côté fleuve a été engraissée par du matériau A2 correctement compacté dans une clé d'ancrage. Un géotextile drainant a été déposé en base du talus aval. Des grillages anti-fouisseurs ont été mis en place. Une piste de circulation de 4.5 m de large a également été réalisée. Un grillage anti-fouisseur côté val a été mis en œuvre. Ci-dessous une coupe type de la digue issue de la phase projet. La cote de la crête de digue est d'environ 7.80 m NGF.

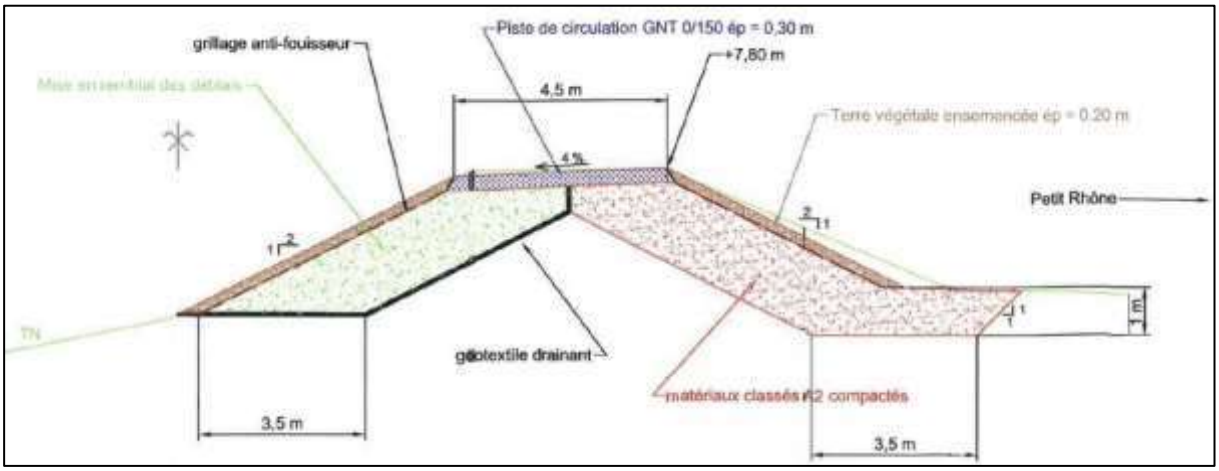


Figure 98. Digue du défluent à Albaron – Beaujeau de Castres – Coupe type (projet)

Saliers PRG 295.25

Comment précédemment, ce confortement s'insère dans le cadre des opérations d'urgence suite à la crue de décembre 2003. Les travaux, réalisés en 2006, ont consisté à reprendre les enrochements sur environ 100 mètres ainsi que reprendre la prise d'eaux et évacuer les canalisations existantes. Les enrochements ont été déposés sur un géotextile anti-poinçonnement.
Le corps de digue à reprendre est constitué d'un matériau classé A2 compacté sur un géotextile drainant, une canalisation traversant le corps de digue en siphon inversé est présente. Une piste de crête a également été créée. La cote de la crête de digue est d'environ 7.35 m NGF.

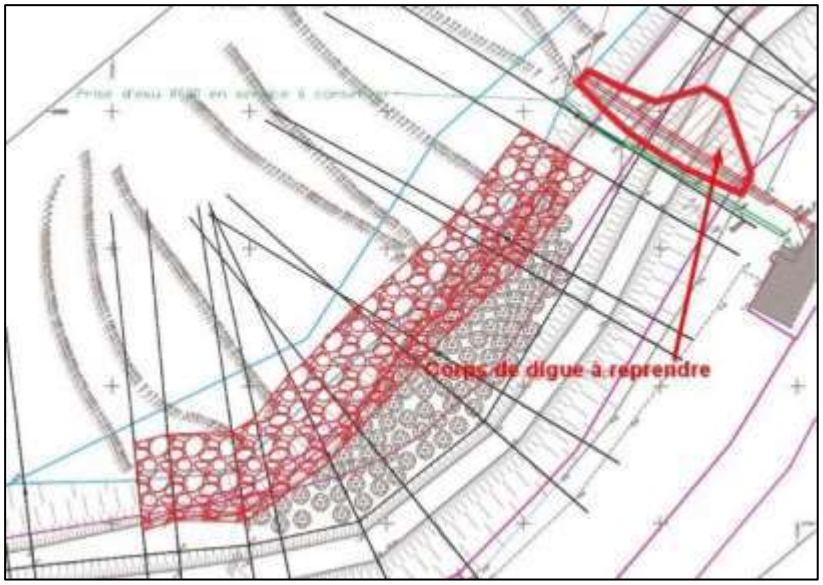


Figure 99. Digue du défluent à Albaron – Saliers – Vue en plan (projet)

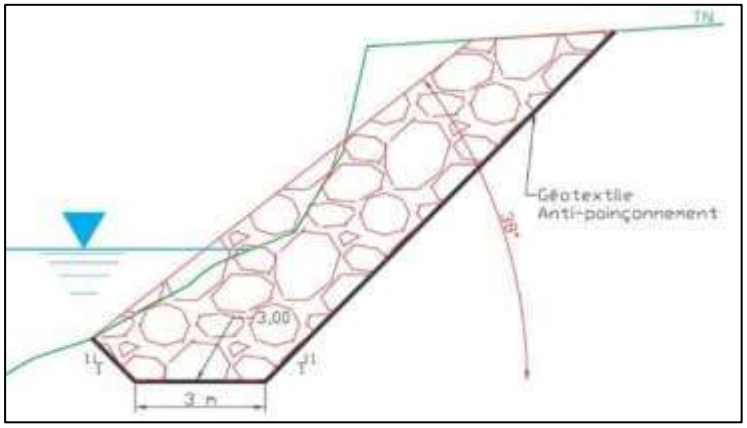


Figure 100. Digue du défluent à Albaron – Saliers – Coupe type, enrochements

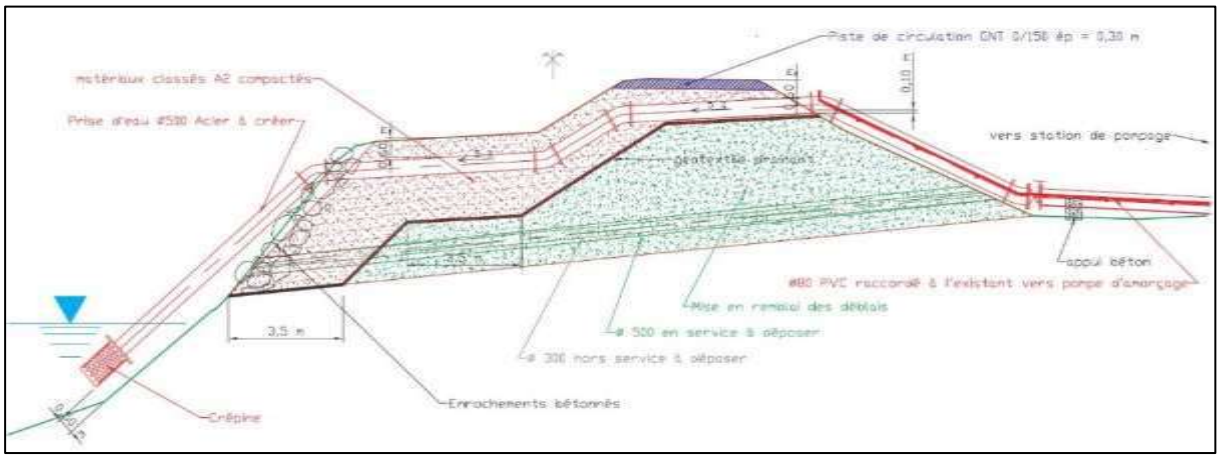


Figure 101. Digue du défluent à Albaron – Saliers – Coupe type, corps de digue

Photo 94. Confortement de Saliers PRG 295.25 (2012)

Photo 95. Saliers – Enrochements lors de la visite par voie nautique (Mars 2015)

Confortement de la brèche de Figarès (PRG 298.6)

La brèche de Figarès est survenue pendant la crue d'octobre 1993. Elle a atteint une largeur de 40 mètres. Le colmatage de la brèche a été dirigé par la mairie d'Arles puis repris en phase terminale par le Service Navigation Rhône Saône. Il a consisté :

- dans un 1er temps, au largage par voie aérienne de matériaux divers (traverses de chemin de fer, sacs remplis de tout-venant ou de ciment) ;

- dans un 2ème temps, à la tentative infructueuse d'obstruction de la brèche par une péniche désaffectée (difficulté de manœuvre + rupture du bateau lors du largage de sacs destinés à la couler). En parallèle, à la création d'une piste en tête depuis le pont de Saint Gilles (géotextile + laitier) pour déverser des matériaux : enrochements 1000/2000 (4400 tonnes) ; tout venant de carrière 0/300 (7300 tonnes) et 0/150 argileux (6500 tonnes) ;
- dans un dernier temps, à la reconstitution du ségonal par clapage de graviers du Rhône.

La figure ci-dessous provient du rapport sur l'analyse de quelques incidents survenus sur les digues de la basse vallée du Rhône (CEMAGREF).

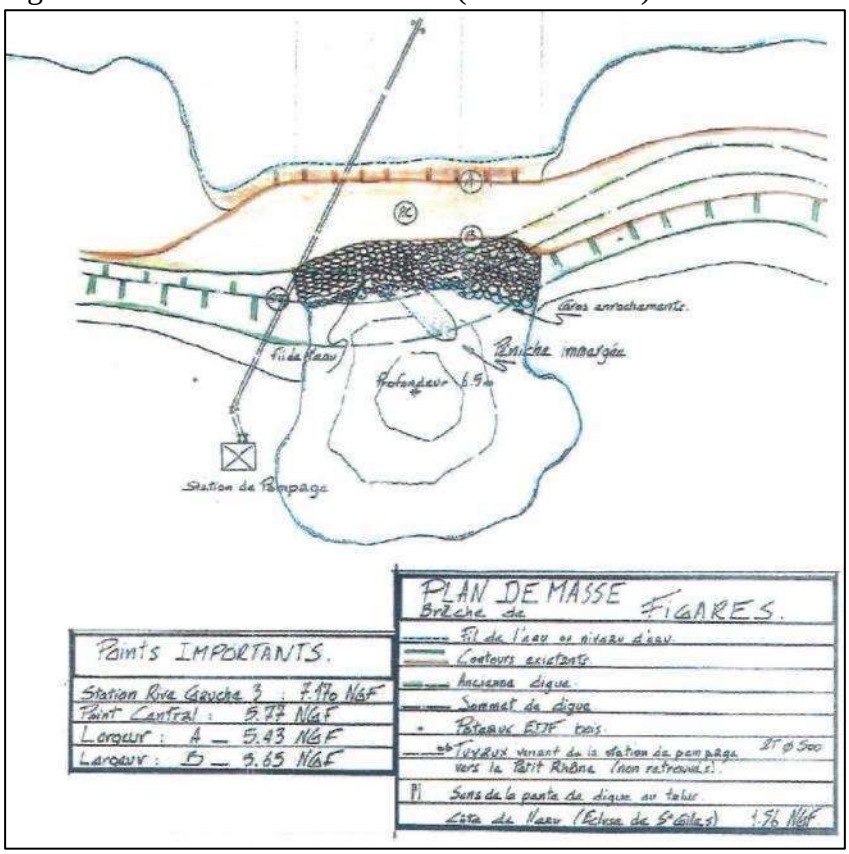


Figure 102. Digue du défluent à Albaron – Figarès – Confortement

Le rapport d'expertise précise que :
Le colmatage est beaucoup trop hétérogène pour que l'étanchéité totale soit assurée (écoulement en fondation),
La digue reconstituée est inférieure d'environ 1,40 m par rapport à la cote initiale et se situe en limite de la ligne d'eau supposée de la crue centennale,
Le rehaussement de la digue à sa cote initiale ne devra être effectué qu'après destruction de la piste de chantier qui crée un plan d'écoulement préférentiel non tolérable.

La cote de la crête de digue est d'environ 6.50 m NGF.

<u>Confortement de la brèche de la Galante</u> (PRG 299.9)

La brèche est survenue lors de la crue d'octobre 1993. Sa largeur est de 15 mètres. La brèche a été colmatée par largage de sacs remplis de tout-venant ou de ciment afin de limiter les

entrées d'eau. Le noyau a été reconstitué avec du tout venant de carrière 0/300 et du 0/150 argileux en crête sur une épaisseur d'au moins trois mètres côté fleuve. La cote de la crête de digue est d'environ 6.90 m NGF.

Photo 96. La Galante (1993) – Colmatage de la brèche

Confortement de la brèche de Casebrune (PRG 301)

La brèche est survenue lors de la crue d'octobre 1993. Sa largeur est de 17 mètres. L'intervention d'urgence a consisté à déposer des sacs de tout-venant côté fleuve pour limiter le débit passant. Ces sacs constituent encore le corps de digue actuelle, comme nous avons pu le voir lors de la visite des berges par voie nautique de mars 2015. La cote de la crête de digue est d'environ 6.6 m NGF.

Photo 97. Brèche de Casebrune – Sacs lors de la visite des berges par voie nautique – Mars 2015

Confortement de la brèche de Lauricet (PRG 304.4)

C'est la première brèche qui est apparue dans les digues du Petit Rhône en octobre 1993. La largeur de la brèche a été estimée à 40 mètres. Les travaux de colmatage ont été identiques à ceux menés sur les brèches de la Galante et de Casebrune (dépose de sacs). Ils ont été réalisés depuis le fleuve compte tenu du manque d'accès par voie terrestre.
En 1994 une nouvelle brèche apparait à 5 mètres de celle apparue en 1993. Les travaux de colmatage ont nécessité l'aménagement d'un accès depuis le mas de la vigne, doublés d'interventions héliportés (largage de poutrelles, big-bag). La cote de la crête de digue est d'environ 5.85 m NGF.

Photo 98. Brèche de Lauricet (1994)

Brèches mas de la vigne (PRG 305.650 / PRG 305.7 / PRG 305.8)

Trois brèches se sont formées juste en aval du mas de la vigne d'une largeur respective de 12, 17 et 3 mètres. Les travaux de colmatage ont été identiques à ceux menés sur les brèches de la Galante et de Casebrune (dépose de sacs). Ces sacs ont été purgés en mai 1997 pendant des travaux de confortement. Ces travaux de confortement ont consisté à :
Création d'une clé d'ancrage amont et remblai en argile de cette clé,
Mise en place d'un grillage anti-fouisseur en amont et en aval,
Recouvrement par de la terre végétale,
Création d'une piste de crête en GNT 0/150 mm.

La cote de la crête de digue est d'environ 5.80 m NGF.

Photo 99. Mas de la vigne - Remblai en argile dans clé d'ancrage

Photo 100. Mas de la vigne - Grillage anti-fouisseurs aval

Photo 101. Mas de la vigne - Grillage anti-fouisseurs amont

9.2.4. Accessibilité

Tableau 65. Franchissements, Section Défluent-Albaron

N°	PRG
1	281.17
2	281.2
3	281.3
4	281,70
5	281,72
6	282,4
7	282,42
8	282,5
9	282,55
10	282,60
11	282,63
12	283
13	284,25

N°	PRG
14	285,23
15	285,9
16	286,8
17	288,73
18	289,22
19	290,16
20	290,7
21	290,9
22	291,6
23	294,14
24	294,67
25	295,14

N°	PRG
26	295,28
27	296,6
28	296,8
29	297,2
30	297,30
31	298
32	298,7
33	300,13
34	301
35	305,5
36	306,47
37	306,56

9.2.5. Ouvrages englobés

Tableau 66. Section Défluent-Albaron – Ouvrages englobés

N°	PR	Fiche	Réseaux humides	Implantation	Diamètre (mm)
1	281.13	PRG_EPL_281,13	Eaux pluviales	Enterré	250
2	282.07	PRG_IRR_282,07	Irrigation	Superficiel	50
3	282.42	PRG_IRR_282,43	Irrigation	Enterré	600
4	284.14	PRG_IND_284,14	Indéfini	Enterré	?
5	284.44	PRG_IRR_284,45	Irrigation	Enterré	2*500
6	285.43	PRG_IRR_285,43	Irrigation	Enterré	1000
7	285.91	PRG_IRR_285,91	Irrigation	Enterré	400
8	286.17	PRG_IRR_286,17	?	?	?
9	286.25	PRG_IRR_286,25	Irrigation	Superficiel	160
10	286.85	PRG_IRR_286,85	Irrigation	Enterré	600
11	287.38	PRG_IRR_287,38	Irrigation	Enterré	400
12	288.67	PRG_IRR_288,67	Irrigation	Enterré	850
13	289.23	PRG_IRR_289,23	?	?	?
14	289.59	PRG_IRR_289,59	Irrigation	Enterré	400+500
15	289.96	PRG_IRR_289,96	Irrigation	Enterré	400
16	290.89	PRG_IRR_290,89	Irrigation	Superficiel	500
17	291.19	PRG_IRR_291,2	?	?	?
18	291.25	PRG_IRR_291,25	Irrigation	Enterré	700+ ?
19	291.63	PRG_IRR_291,64	Irrigation	Enterré	400
20	293.78	PRG_IRR_293,78	Irrigation	Enterré	700+800
21	294.55	PRG_IRR_294,55	Irrigation	Superficiel	400
22	294.83	PRG_IRR_294,83	Irrigation	Enterré	100
23	295.13	PRG_IRR_295,13	Eaux de distribution	Enterré	?
24	295.2	PRG_IRR_295,2	Irrigation	Superficiel	500+600
25	295.44	PRG_IRR_295,44	Irrigation	Enterré	400
26	295.7	PRG_IRR_295,71	Irrigation	Enterré	1000+800
27	295.82	PRG_IRR_295,83	Irrigation	Superficiel	400
28	296.63	PRG_IRR_296,63	Irrigation	Superficiel	300
29	296.78	PRG_IRR_296,78	Irrigation	Superficiel	200
30	298	PRG_IRR_298,02	Irrigation	Superficiel	500
31	298.71	PRG_IRR_298,72	Irrigation	Superficiel	500+600
32	299.8	PRG_IRR_299,8	Irrigation	Superficiel	400+ ?
33	300.23	PRG_IRR_300,23	Irrigation	Enterré	250+100
34	301	PRG_IRR_301,03	Irrigation	Superficiel et enterré	2*400
35	302.67	PRG_IND_302,67	Indéfini	Enterré	63
36	303	PRG_IRR_303,01	Irrigation	Enterré	500
37	305.45	PRG_IRR_305,45	Eaux de distribution	Enterré	63
38	305.48	PRG_IRR_305,48	Irrigation	Enterré	?
39	306.05	PRG_IRR_306,05	Irrigation	Enterré	400
40	306.52	PRG_IRR_306,52	Irrigation	Enterré	63
41	306.55	PRG_IRR_306,55	Irrigation	Superficiel	2*1200
42	306.57	PRG_DRA_306,57	Drainage	Enterré	4*600

9.3. DECOMPOSITION FONCTIONNELLE

Les données hydrauliques et de géométries sont données sur chaque tronçon afin de limiter la longueur et ainsi gagner en pertinence.

9.3.1. Géométrie - tronçon Trinquetaille

Tableau 67. Synthèse de géométrie, tronçon Trinquetaille

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	9,4	8,9	9,0	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	7,9	3,9	4,7	1,2
Cote à 20m du pdav	m NGF	4,8	2,5	4,2	0,7
Cote de pied de digue amont	m NGF	7,3	5,7	6,6	0,5
Cote à 20m du pdam	m NGF	6,6	1,0	2,2	2,1
Hauteur de digue coté aval	m	5,3	1,0	4,4	1,3
Hauteur de digue côté amont	m	3,2	1,8	2,4	0,4
Fruit aval	L/V	5,4	1,6	2,3	1,1
Fruit amont	L/V	3,7	2,0	2,5	0,5
Largeur du ségonnal	m	87	11	24	23

9.3.2. Données hydrauliques - tronçon Trinquetaille

Tableau 68. Données hydrauliques, tronçon Trinquetaille

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	6,1	6,0	2,8	3,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,6
8500	7,0	6,9	1,9	2,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,4
9500	7,4	7,3	1,5	1,7	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3
10500	7,8	7,7	1,1	1,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3
11500	8,3	8,2	0,6	0,8	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2
12500	8,6	8,5	0,3	0,5	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
14160	8,7	8,6	0,2	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1

9.3.3. Géométrie - tronçon Cazeneuve-Augéry

Tableau 69. Synthèse de géométrie, tronçon Cazeneuve-Augéry

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	9,1	8,3	8,7	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	7,8	3,2	4,9	1,2
Cote à 20m du pdav	m NGF	5,4	2,7	3,7	0,6

Cote de pied de digue amont	m NGF	8,4	1,4	6,2	1,2
Cote à 20m du pdam	m NGF	7,7	1,0	5,0	1,6
Hauteur de digue coté aval	m	5,5	0,6	3,8	1,2
Hauteur de digue côté amont	m	6,9	0,6	2,5	1,2
Fruit aval	L/V	3,4	1,3	2,1	0,4
Fruit amont	L/V	8,3	1,6	2,5	1,4
Largeur du ségonnal	m	242	2	104	73

9.3.4. Données hydrauliques - tronçon Cazeneuve-Augéry

Tableau 70. Données hydrauliques, tronçon Cazeneuve-Augéry

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	6,0	5,7	2,4	2,8	0,1	0,1	0,0	0,0	0,6
8500	6,9	6,6	1,5	2,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,4
9500	7,3	7,0	1,1	1,5	0,2	0,1	0,0	0,0	0,3
10500	7,7	7,3	0,7	1,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,2
11500	8,2	7,9	0,2	0,7	0,2	0,2	0,0	0,0	0,1
12500	8,5	8,1	-0,1	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0	0,1
14160	8,6	8,2	-0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	0,0	0,1

9.3.5. Géométrie - tronçon Bois de Beaumont

Tableau 71. Synthèse de géométrie, tronçon Bois de Beaumont

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	10,0	8,5	8,8	0,5
Cote de pied de digue aval	m NGF	7,4	3,8	5,2	1,5
Cote à 20m du pdav	m NGF	6,6	3,6	4,3	1,0
Cote de pied de digue amont	m NGF	8,0	5,1	6,1	0,9
Cote à 20m du pdam	m NGF	7,3	5,2	5,8	0,7
Hauteur de digue coté aval	m	6,2	1,3	3,6	1,6
Hauteur de digue côté amont	m	4,9	0,9	2,7	1,0
Fruit aval	L/V	4,5	1,8	2,5	1,0
Fruit amont	L/V	2,7	2,0	2,3	0,2
Largeur du ségonnal	m	378	127	284	83

9.3.6. Données hydrauliques - tronçon Bois de Beaumont

Tableau 72. Données hydrauliques, tronçon Bois de Beaumont

Débit	Cote ligne d'eau	Revanche	Gradient	Gradient	Revanche

	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	5,7	5,5	2,9	3,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
8500	6,5	6,4	2,0	2,3	0,1	0,1	0,1	0,0	0,5
9500	7,0	6,8	1,6	1,8	0,1	0,1	0,1	0,0	0,4
10500	7,3	7,2	1,3	1,5	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3
11500	7,8	7,7	0,8	1,0	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2
12500	8,1	7,9	0,5	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2
14160	8,2	8,0	0,4	0,7	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1

9.3.7. Géométrie - tronçon Beaumont-Cavalès

Tableau 73. Synthèse de géométrie, tronçon Beaumont-Cavalès

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	8,6	7,3	7,9	0,3
Cote de pied de digue aval	m NGF	6,3	3,3	4,2	0,6
Cote à 20m du pdav	m NGF	5,2	2,6	3,3	0,4
Cote de pied de digue amont	m NGF	8,6	4,9	6,2	1,0
Cote à 20m du pdam	m NGF	8,5	0,9	4,4	2,4
Hauteur de digue coté aval	m	4,8	2,0	3,7	0,6
Hauteur de digue côté amont	m	3,7	0,0	1,8	0,9
Fruit aval	L/V	3,4	1,8	2,2	0,4
Fruit amont	L/V	136,1	1,4	7,8	21,7
Largeur du ségonnal	m	251	10	60	52

9.3.8. Données hydrauliques - tronçon Beaumont-Cavalès

Tableau 74. Données hydrauliques, tronçon Beaumont-Cavalès

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	5,5	5,1	2,1	2,6	0,1	0,1	0,1	0,0	0,6
8500	6,4	5,9	1,3	1,7	0,2	0,1	0,1	0,0	0,4
9500	6,8	6,3	0,9	1,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3
10500	7,2	6,6	0,6	1,0	0,2	0,2	0,1	0,0	0,2
11500	7,7	7,0	0,2	0,6	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
12500	7,9	7,2	0,0	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1
14160	8,0	7,2	-0,1	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1

9.3.9. Géométrie - tronçon Cavalès-St Gilles

Tableau 75. Synthèse de géométrie, tronçon Cavalès-St Gilles

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	7,9	6,9	7,4	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	6,3	2,3	3,7	0,9
Cote à 20m du pdav	m NGF	4,9	0,9	2,6	0,9
Cote de pied de digue amont	m NGF	7,1	4,6	5,5	0,7
Cote à 20m du pdam	m NGF	7,0	0,7	3,2	2,3
Hauteur de digue coté aval	m	5,2	1,2	3,6	0,9
Hauteur de digue côté amont	m	3,0	0,6	1,8	0,6
Fruit aval	L/V	4,8	1,5	2,2	0,7
Fruit amont	L/V	6,3	1,6	2,5	1,3
Largeur du ségonnal	m	133	6	48	41

9.3.10. Données hydrauliques - tronçon Cavalès-St Gilles

Tableau 76. Données hydrauliques, tronçon Cavalès-St Gilles

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	5,1	4,9	1,9	2,4	0,2	0,1	0,0	0,0	0,5
8500	5,9	5,7	1,2	1,6	0,2	0,1	0,1	0,0	0,4
9500	6,3	6,0	0,8	1,2	0,2	0,2	0,1	0,0	0,3
10500	6,6	6,3	0,5	0,9	0,2	0,2	0,1	0,0	0,2
11500	7,0	6,6	0,1	0,6	0,3	0,2	0,1	0,0	0,1
12500	7,2	6,7	0,0	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0	0,1
14160	7,2	6,8	0,0	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0	0,1

9.3.11. Géométrie - tronçon St Gilles-Figarès

Tableau 77. Synthèse de géométrie, tronçon St Gilles-Figarès

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	10,0	6,7	7,5	1,1
Cote de pied de digue aval	m NGF	4,8	3,1	3,7	0,7
Cote à 20m du pdav	m NGF	4,0	1,9	3,2	0,7
Cote de pied de digue amont	m NGF	6,8	4,0	5,2	0,9
Cote à 20m du pdam	m NGF	6,4	0,7	3,0	2,3
Hauteur de digue coté aval	m	5,2	2,4	3,7	0,9
Hauteur de digue côté amont	m	4,1	0,2	2,3	1,3
Fruit aval	L/V	2,2	1,9	2,0	0,1
Fruit amont	L/V	12,3	1,8	4,0	3,4

Largeur du ségonnal	m	87	10	48	32

9.3.12. Données hydrauliques - tronçon St Gilles-Figarès

Tableau 78. Données hydrauliques, tronçon St Gilles-Figarès

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	4,9	4,8	1,9	2,6	0,1	0,1	0,0	0,0	0,6
8500	5,6	5,5	1,2	1,9	0,2	0,1	0,0	0,0	0,4
9500	6,0	5,9	0,8	1,5	0,2	0,1	0,0	0,0	0,3
10500	6,3	6,2	0,5	1,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3
11500	6,6	6,5	0,2	0,9	0,2	0,2	0,1	0,0	0,2
12500	6,7	6,5	0,1	0,8	0,2	0,2	0,1	0,0	0,2
14160	6,8	6,6	0,1	0,8	0,2	0,2	0,1	0,0	0,2

9.3.13. Géométrie - tronçon Figarès

Tableau 79. Synthèse de géométrie, tronçon Figarès

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	6,9	6,3	6,6	0,1
Cote de pied de digue aval	m NGF	4,7	2,5	3,3	0,9
Cote à 20m du pdav	m NGF	4,4	2,0	2,9	0,8
Cote de pied de digue amont	m NGF	5,5	4,7	5,2	0,2
Cote à 20m du pdam	m NGF	3,3	0,7	1,9	0,8
Hauteur de digue coté aval	m	4,2	1,8	3,4	0,9
Hauteur de digue côté amont	m	1,7	1,3	1,5	0,1
Fruit aval	L/V	2,3	1,8	2,0	0,2
Fruit amont	L/V	5,0	1,8	2,6	0,9
Largeur du ségonnal	m	119	13	64	38

9.3.14. Données hydrauliques - tronçon Figarès

Tableau 80. Données hydrauliques, tronçon Figarès

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	4,8	4,6	1,7	1,9	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
8500	5,5	5,4	0,9	1,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3
9500	5,9	5,7	0,6	0,8	0,2	0,2	0,1	0,0	0,2
10500	6,2	6,0	0,3	0,5	0,2	0,2	0,1	0,0	0,1

11500	6,5	6,3	0,0	0,2	0,2	0,2	0,1	0,0	0,1
12500	6,5	6,3	-0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0
14160	6,6	6,4	-0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0

9.3.15. Géométrie - tronçon La Galante-Albaron

Tableau 81. Synthèse de géométrie, tronçon La Galante-Albaron

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	7,2	5,7	6,4	0,3
Cote de pied de digue aval	m NGF	5,3	1,9	3,0	0,7
Cote à 20m du pdav	m NGF	3,3	0,9	2,3	0,6
Cote de pied de digue amont	m NGF	5,5	3,8	4,6	0,4
Cote à 20m du pdam	m NGF	5,3	0,5	2,2	1,8
Hauteur de digue coté aval	m	4,6	1,0	3,3	0,9
Hauteur de digue côté amont	m	2,7	1,2	1,8	0,3
Fruit aval	L/V	4,2	1,5	2,1	0,4
Fruit amont	L/V	10,2	1,6	2,6	1,6
Largeur du ségonnal	m	76	2	24	16

9.3.16. Données hydrauliques - tronçon La Galante-Albaron

Tableau 82. Données hydrauliques, tronçon La Galante-Albaron

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	4,6	4,1	1,6	2,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,5
8500	5,4	4,7	0,9	1,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3
9500	5,7	5,0	0,6	1,0	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2
10500	6,0	5,2	0,3	0,7	0,2	0,2	0,1	0,0	0,2
11500	6,3	5,4	0,1	0,5	0,3	0,2	0,1	0,0	0,1
12500	6,3	5,4	0,1	0,5	0,3	0,2	0,1	0,0	0,1
14160	6,4	5,5	0,1	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0	0,1

9.3.17. Etanchéité

En dehors du secteur de Beaumont où un masque amont en argile A2 a été mis en place, il n'y a pas de barrière étanchéité autre que le corps de digue en lui-même.

9.3.18. Filtration-Drainage

Sur le secteur de Trinquetaille la recharge aval drainante a été placée sur un géotextile filtrant. Au bois de Beaumont, un complexe filtre drain a été mis en place sous le recharge aval.

Pour le reste du tronçon il n'y a pas de filtre ou de drain.

9.3.19. Stabilité

La stabilité est assurée par la géométrie de la digue. Le fruit moyen du talus aval est de 2.2/1 mais il descend localement à 1.25/1 ; pour le talus amont il y a une moyenne de 3.9/1 et un minimum de 1.45/1.

9.3.20. Protection

Hors digue de Beaumont il n'y a pas de protection anti-fouisseur. A Trinquetaille la recharge graveleuse et la situation en zone urbaine limite la présence de fouisseur.

9.3.21. Evacuation

Il n'y a pas, pour l'instant, de secteur résistant à la surverse sur la digue en amont d'Albaron, malgré le calage de l'ouvrage.

9.3.22. Sécurité

La digue est intégralement carrossable en crête, le franchissement des ponts se fait coté zone protégée. Entre les PRG 282.5 et 283 la piste carrossable n'est pas exactement en crête mais sur la recharge aval. Il y a généralement un piste de pied coté zone protégée et parfois coté fleuve.

10.DIGUE D'ALBARON (PRG9)

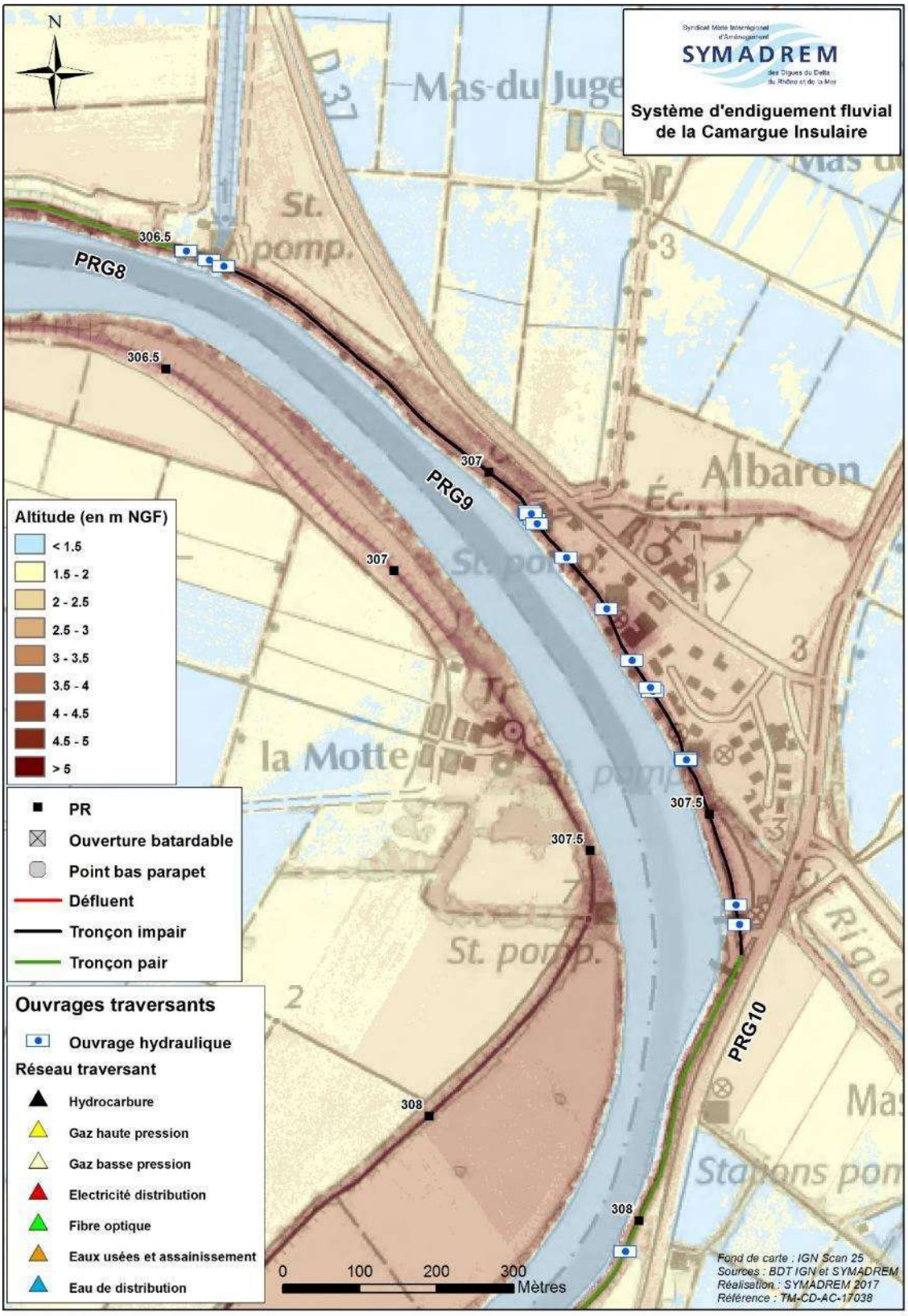


Figure 103. Plan de situation de la digue d'Albaron

10.1. PREAMBULE

La digue, située au droit du hameau d'Albaron, s'étend du PRG 306.6 au PRG 307.6 en rive gauche du Petit Rhône. Les ouvrages de protection ont été confortés de mars 2004 à janvier 2005 sous la maîtrise d'ouvrage du SYMADREM. Le chantier a consisté à améliorer l'étanchéité et la stabilité de l'ouvrage sous l'effet de l'eau ; permettre la circulation des véhicules pour la surveillance et les interventions d'urgence comme en décembre 2003 ; protéger la solidité de la digue des nuisances dues aux animaux fouisseurs ; sécuriser les ouvrages hydrauliques traversant la digue. Le perré (talus en pierres assemblées) de l'époque de napoléon III et la végétation présente dans le ségonal ont été conservés.

10.2. PRESENTATION GENERALE

10.2.1. Description historique

Les travaux ont consistés à poser un rideau de palplanches côté fleuve (1 160 mètres linéaires), réaliser un masque étanche en argile (12 000 m^3), épaissir la digue côté habitations (45 000 m^3 de remblais), supprimer les prises d'eau abandonnées et sécuriser les autres par des siphons inversés, protéger les talus avec des grillages anti-fouisseurs.

10.2.2. Sectorisation

Suite à la réalisation des travaux, 5 tronçons de digue homogène ont pu être identifiés. La découpe de ces tronçons est donnée sur la figure suivante :

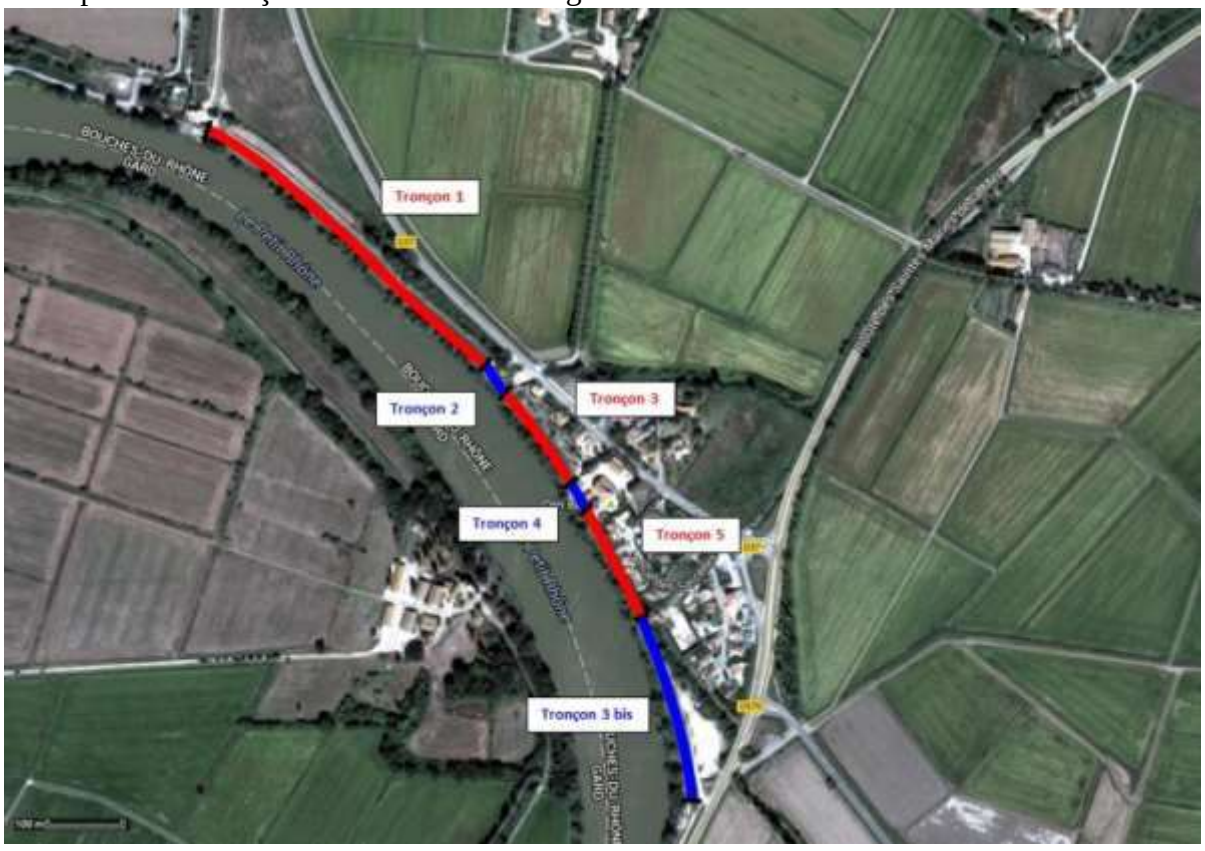


Figure 104. Digue d'Albaron – Tronçons

Le tableau suivant présente les spécificités propres à chaque tronçon.

Tableau 83. Sectorisation, Section Albaron

Tronçon	PR (PRG)	Talus amont	Talus aval	Pistes	Ouvrages traversants
1	306.6 au 307.05	- Ancien perré maçonné - Clé d'ancrage - Rideau de palplanches - Remblai A2 compacté - Géotextile biodégradable coco - Grillage anti-fouisseurs - Terre végétale	- Matériaux A1 compacté - Cordon drainant dans un géotextile - Grillage anti-fouisseurs - Terre végétale	- Géotextile non tissé - Matériaux graveleux 0/150 mm pour fondation - Matériaux 0/25 mm pour roulement - En amont côté fleuve : grave calcaire concassé 0/25 mm pour étanchéité	0
2	307.05 au 307.1	- Clé d'ancrage - Rideau de palplanches - Remblai A2 compacté - Grillage anti-fouisseurs - Terre végétale	- Murs préfabriqués de soutènement		5
3	307.1 au 307.25	- Clé d'ancrage - Rideau de palplanches - Remblai A2 compacté - Géogrille synthétique tridimensionnelle - Grillage anti-fouisseurs - Terre végétale	- Matériaux A2/A1 compacté - Cordon drainant dans un géotextile - Grillage anti-fouisseurs - Terre végétale		3
3 bis	307.5 au 307.6				6
4	307.25 au 307.3	- Rideau de palplanches	- Nivellement du terrain		0
5	307.3 au 307.5	- Clé d'ancrage - Rideau de palplanches - Remblai A2 compacté - Géogrille synthétique tridimensionnelle - Grillage anti-fouisseurs - Terre végétale	- Système de soutènement M3S® - Grillage anti-fouisseurs - Parement végétalisé		3
Total d'ouvrages traversants					17

La description des tronçons est donnée ci-après.

10.2.3. Description des tronçons

10.2.3.1. Raccordement

La jonction des tronçons se fait au niveau de la station de pompage de Corrège Major qui ne faisait pas partie des travaux d'Albaron. Le compactage le long de la station permet de raccorder correctement les deux tronçons. Le rideau de palplanche est arrêté environ 20m avant la station.

10.2.3.2. Tronçon 1 : du PRG 306.6 au PRG 307.05

Sur le talus amont, un perré maçonné est présent sur la totalité du linéaire, enfoui sous le talus amont de la digue. Une tranchée d'ancrage de 2,5 m de profondeur environ a été réalisée en aval de ce perré. Le rideau de palplanches PU6 a été battu au fond de cette tranchée. Elle a ensuite été remblayée par un matériau A2 convenablement compacté provenant du site afin de constituer un masque étanche. Un grillage anti-fouisseurs de maille 50 mm a été placé entre le perré et la crête de digue. Le parement amont a été réglé et protégé par un géotextile biodégradable coco puis enherbé. La pente du talus est de 2H/1V.
Le talus aval a été engraissé par du matériau A1 compacté provenant du site. Dans ce secteur, le pied du talus est pourvu d'un cordon drainant de 0.50 m d'épaisseur dans une chaussette géotextile de type B. Le cordon drainant est constitué de gravillon roulé lavé 12.5/25 mm. Un grillage anti-fouisseurs a également été mis en place puis recouvert par 4 à 5 cm de terre végétale. La pente du talus est de 2H/1V.
La piste de crête est constituée d'une épaisseur de 30 cm de matériaux graveleux (0/150 mm) mis en œuvre sur un géotextile synthétique non tissé de type A sauf à l'amont où, sur une largeur de 1 m, une grave calcaire concassée 0/25 mm est mise en œuvre pour une meilleure étanchéité. Une épaisseur de 10 cm de matériaux 0/25 mm est également utilisée comme couche de roulement de la piste. La cote de la crête de digue oscille entre 5.75 et 6.08 m NGF.

La coupe type des aménagements du tronçon 1 est donnée sur la figure suivante.

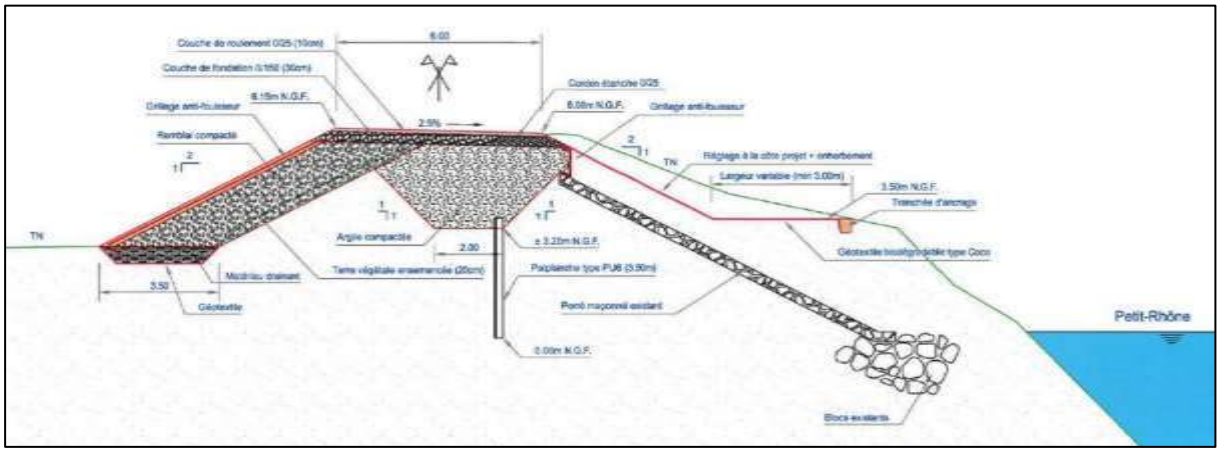


Figure 105. Digue d'Albaron – Tronçon 1 – Coupe type

Photo 102. Albaron - Clef d'ancrage et rideau de palplanches

Photo 103. Albaron - Cordon drainant dans chaussette géotextile

Photo 104. Albaron - Terrassement de la cef d'ancrage

10.2.3.3. Tronçon 2 : au droit de la station « Teulon – Noury – Rozière » du PRG 307.05 au PRG 307.1

Sur le talus amont, une tranchée d'ancrage de 2,5 m de profondeur environ a été réalisée. Le rideau de palplanches PU6 a été battu au fond de cette tranchée. Elle a ensuite été remblayée par un matériau A2 compacté provenant du site afin de constituer un masque étanche. Un grillage anti-fouisseur a été disposé sur le talus amont puis recouvert de terre végétale. La pente du talus est de 2H/1V.

Quant au talus aval, l'emprise foncière est limitée mais le linéaire est faible (22 mètres environ). Ainsi, le dispositif de soutènement mis en place a donc été assuré par des murs préfabriqués de soutènement en T d'une hauteur de 2 mètres. Ces murs préfabriqués ont été déposés sur une semelle en grave non traitée compactée et sur un béton de propreté. Les matériaux derrière les murs de soutènement ont été remblayés en utilisant les spécificités des remblais « techniques » contre ouvrages.

Un mur béton de soutènement a également été réalisé sur la face sud-est d'un bâtiment afin de maintenir en place le remblai du talus aval du tronçon 3.

La piste de crête est constituée d'une épaisseur de 30 cm de matériaux graveleux (0/150 mm) mis en œuvre sur un géotextile synthétique non tissé de type A sauf à l'amont où, sur une largeur de 1 m, une grave calcaire concassée 0/25 mm est mis en œuvre pour une meilleure étanchéité. Une épaisseur de 0.1 m de matériaux 0/25 mm est également utilisée comme couche de roulement de la piste. La cote de la crête de digue est d'environ 6.07 m NGF.

La coupe type des aménagements du tronçon 2 est donnée sur la figure suivante.

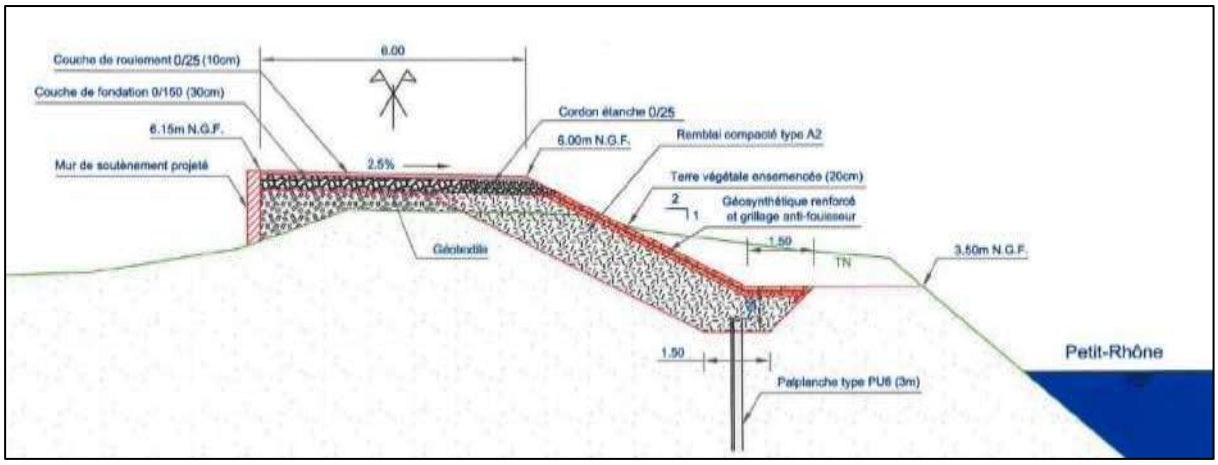


Figure 106. Digue d'Albaron – Tronçon 2 – Coupe type

Photo 105. Albaron – Au droit de la station « Teulon – Noury – Rozière »

10.2.3.4. <u>Tronçon 3 :</u> du PR 307.1 au PR 307.25

Au niveau du talus amont, une tranchée d'ancrage de 2,5 m de profondeur environ a été réalisée en amont de l'ancienne digue déjà existante. Un rideau de palplanches PU6 a été battu au fond de cette tranchée. Elle a ensuite été remblayée par un matériau A2 convenablement compacté provenant du site afin de constituer un masque étanche. Pour protéger ce parement du batillage, une géogrille synthétique tridimensionnelle d'épaisseur 8 mm a été posée sur tout le linéaire ainsi qu'un grillage anti-fouisseurs de maille 50 mm. De la terre végétale sur 4 à 5 cm est venue recouvrir la totalité du linéaire du talus. La pente du talus est de 2H/1V.

Le talus aval a été engraissé par du matériau A2 ou A1 convenablement compacté provenant du site. Dans ce secteur, le pied du talus est pourvu d'un cordon drainant de 50 cm d'épaisseur dans une chaussette géotextile de type B. Le cordon drainant est constitué de gravillon roulé lavé 12.5/25 mm. Un grillage anti-fouisseurs a également été mis en place puis recouvert par 4 à 5 cm de terre végétale. La pente du talus est de 2H/1V.
La piste de crête est constituée d'une épaisseur de 30 cm de matériaux graveleux (0/150 mm) mis en œuvre sur un géotextile synthétique non tissé de type A sauf à l'amont où, sur une largeur de 1 m, une grave calcaire concassée 0/25 mm est mise en œuvre pour une meilleure étanchéité. Une épaisseur de 10 cm de matériaux 0/25 mm est également utilisée comme couche de roulement de la piste.
La cote de la crête de digue est d'environ 6.10 NGF.
La coupe type des aménagements du tronçon 3 est donnée sur la figure suivante.

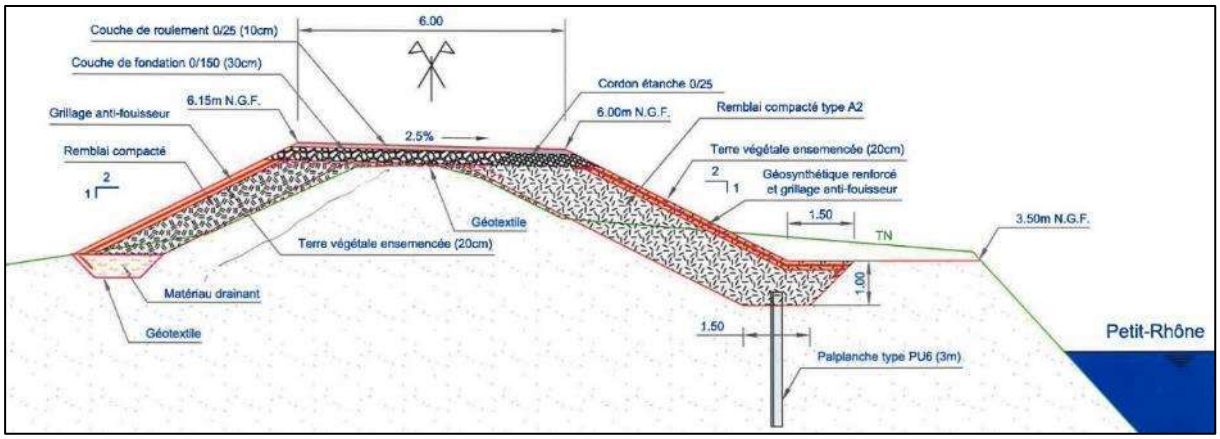


Figure 107. Digue d'Albaron – Tronçon 3 – Coupe type

10.2.3.5. Tronçon 3 bis : du PRG 307.5 au PRG 307.6

Ce tronçon, en termes de travaux effectués, est identique au tronçon 3, à savoir :

- sur le talus amont : un rideau de palplanches battu au fond de la tranché de la clé d'ancrage ; un talus compacté en matériau A2 ; un grillage anti-fouisseurs et une géogrille synthétique ; une couverture de terre végétale,
- sur le talus aval : talus engraissé et compacté avec du matériau A1 ; cordon drainant en pied de talus ; un grillage anti-fouisseurs ; une couverture de terre végétale,
- sur les pistes de crête : un géotextile sous une couche de fondation et une couche de roulement ; un cordon étanche sur l'amont.

Comparativement au tronçon 3, on notera la présence d'une piste de roulement côté terre entre la digue et l'aire de stockage appartenant au SYMADREM.
La coupe type du tronçon 3 bis est la même que celle du tronçon 3.
La cote de la crête de digue est d'environ 6.1 m NGF.

10.2.3.6. <u>Tronçon 4 :</u> au droit du mas d'Albaron du PRG 307.25 au PRG 307.3

Sur tout ce secteur, qui couvre un linéaire approximatif de 60 mètres, aucune clé d'ancrage en amont de la digue n'a été effectuée. En revanche, un rideau de palplanche PU6 a été ancré à

environ 6 mètres de profondeur. Deux rampes d'accès ont été créés afin d'accéder en pied de talus côté fleuve.
Sur le talus aval, compte tenu de la hauteur des terres en aval de la digue, un simple rattrapage du terrain naturel par nivellement a été effectué.
Un mur béton de soutènement a également été réalisé sur la face sud-ouest d'un bâtiment afin de maintenir le remblai du talus aval de la digue.
La piste de crête est constituée d'une épaisseur de 30 cm de matériaux graveleux (0/150 mm) mis en œuvre sur un géotextile synthétique non tissé de type A sauf à l'amont où, sur une largeur de 1 m, une grave calcaire concassée 0/25 mm est mis en œuvre pour une meilleure étanchéité. Une épaisseur de 10 cm de matériaux 0/25 mm est également utilisée comme couche de roulement de la piste. La cote de la crête de digue est d'environ 6.1 m NGF.
La coupe type des aménagements du tronçon 4 est donnée sur la figure suivante.

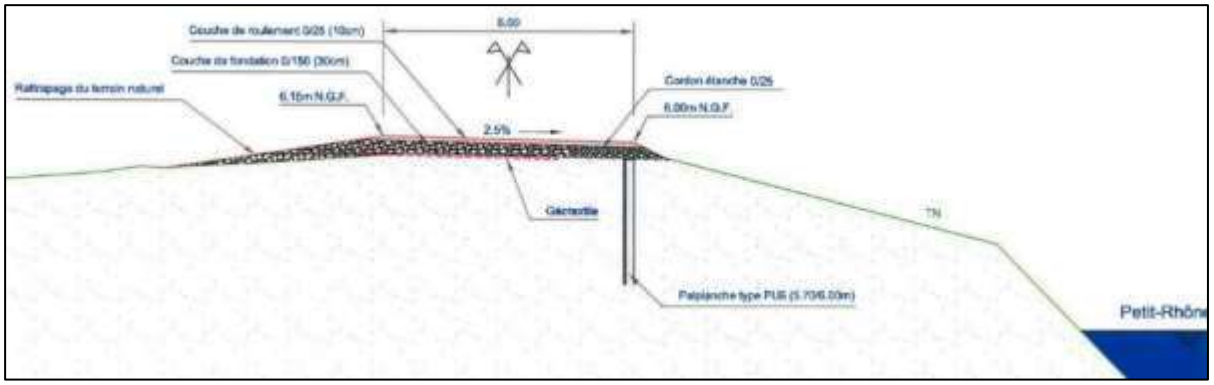


Figure 108. Digue d'Albaron – Tronçon 4 – Coupe type

Aucun ouvrage traversant n'est présent sur ce linéaire.

10.2.3.7. Tronçon 5 : au droit du lotissement d'Albaron du PR 307.3 au PR 307.5

Concernant le talus amont, aucun perré maçonné enfoui n'est présent. Une tranchée d'ancrage de 2,5 m de profondeur environ a été réalisée en amont de l'ancienne digue déjà existante. Un rideau de palplanches PU6 a été battu au fond de cette tranchée. Elle a ensuite été remblayée par un matériau A2 exclusivement convenablement compacté provenant du site afin de constituer un masque étanche. Pour protéger ce parement du batillage, une géogrille synthétique tridimensionnelle d'épaisseur 8 mm a été posée sur tout le linéaire ainsi qu'un grillage anti-fouisseurs de maille 50 mm. De la terre végétale sur 4 à 5 cm est venue recouvrir la totalité du linéaire du talus. La pente du talus est de 2H/1V.
Talus aval : dans ce secteur, l'emprise foncière avale est limitée par la présence du lotissement d'Albaron, ne permettant pas un élargissement par engraissement. Un dispositif de soutènement par massif d'alvéoles M3S® a donc ainsi été mis en place. Le produit est une structure textile tridimensionnelle et se présente sous forme de nappes alvéolaires (assemblage de bande de géotextile entre elles) qui s'utilise en association avec un matériau de remplissage compactable en qualité Q4 au sens du GTR. Le réseau cellulaire obtenu, créé un mécanisme de confinement du matériau qui améliore sa résistance au cisaillement et à la traction.

Photo 106. Albaron - Soutènement M3S® par matériaux type 4-16 mm

L'ouvrage réalisé s'étend sur 180 m avec une hauteur oscillant entre 3,7 et 5 m. Les deux premières couches alvéolaires de 2,48 m de largeur ont été remblayées de matériau drainant roulé de type 4/16 mm. Le reste de l'ouvrage a été remblayé avec le matériau propre de la digue en place. Ce matériau a été identifié A1 au sens du GTR avec une teneur en eau de 15 % à l'OPN. Pour respecter les critères de compactage au sein des structures alvéolaires (95% de l'OPN) la teneur en eau a été contrôlée deux à trois fois par jour afin de valider l'état moyennement humide souhaité. Le renforcement par géotextile proposé a permis de s'adapter à l'ensemble des contraintes du chantier avec notamment la mise en place des ouvrages de pompage traversants. Un grillage anti-fouisseur a été déposé sur le talus ainsi qu'un support pour parement végétalisé. La pente du talus est de 2H/1V.
La piste de crête est constituée d'une épaisseur de 30 cm de matériaux graveleux (0/150 mm) mis en œuvre sur un géotextile synthétique non tissé de type A sauf à l'amont où, sur une largeur de 1 m, une grave calcaire concassée 0/25 mm est mise en œuvre pour une meilleure étanchéité. Une épaisseur de 10 cm de matériaux 0/25 mm est également utilisée comme couche de roulement de la piste. La cote de la crête de digue est d'environ 6.1 m NGF.

La coupe type des aménagements du tronçon 5 est donnée sur la figure suivante.

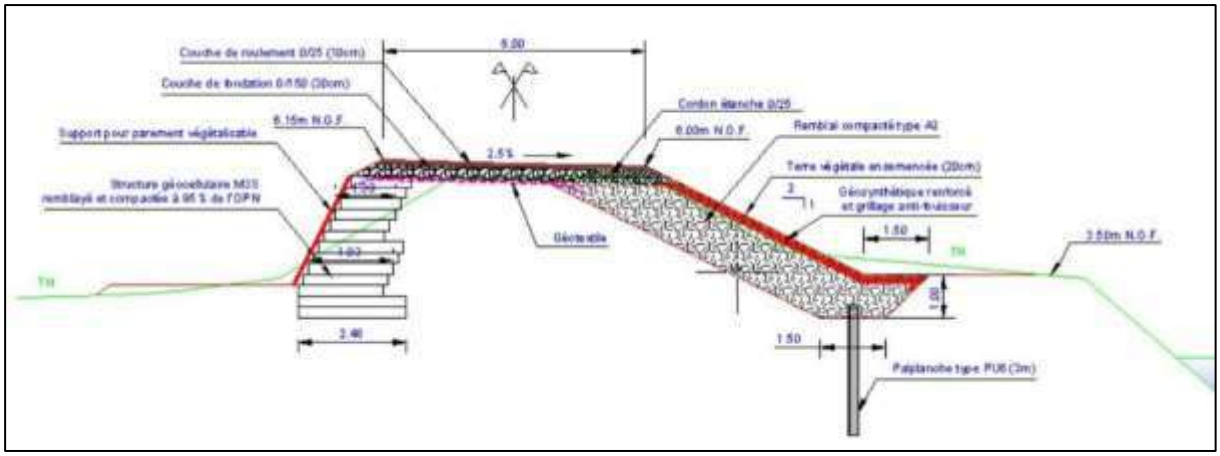


Figure 109. Digue d'Albaron – Tronçon 5 – Coupe type

Photo 107. Albaron - Piste de crête	**Photo 108.** Albaron - Digue en l'état actuel (2012)

10.2.3.8. Caractéristiques des matériaux utilisés

La plupart des matériaux utilisés durant les travaux disposent de fiche d'agrément ou de planche d'essais.

10.2.3.9. Suivi de chantier

Des réunions hebdomadaires ont été assurées et un journal quotidien de chantier a été rédigé. Ces comptes rendus précisent la présence d'apport d'argile supplémentaire en provenance de la carrière de Bellegarde (matériau A2). Des photos des travaux ont également été prises. Un suivi de compactage a été réalisé sur l'ensemble des matériaux compactés de la digue soit en utilisant un gamma densimètre soit en effectuant des essais au pénétromètre dynamique léger.
Le sol A1 a été compacté par l'intermédiaire d'un compacteur de type VP4. L'objectif de densification Q2 (98.5% OPN) a été atteint en mettant en place une couche d'épaisseur égale à 30 cm, en fixant la vitesse du compacteur à 3 km/h et en effectuant 6 passes. Deux essais de contrôle de compactage au gamma densimètre ont été effectués par l'entreprise RINCENT BTP SERVICES. Le pourcentage de compacité moyen obtenu est de 100.3 %.
Le sol A2 a été compacté par l'intermédiaire d'un compacteur de type VP4. L'objectif de densification Q2 (98.5% OPN) a été atteint en mettant en place une couche d'épaisseur égale à 30 cm, en fixant la vitesse du compacteur à 3 km/h et en effectuant 6 passes. Quatre essais de contrôle de compactage au gamma densimètre ont été effectués par l'entreprise RINCENT BTP SERVICES. Le pourcentage de compacité moyen obtenu est de 99.65 %.
Une vérification du compactage a également été faite au pénétromètre dynamique léger sur la crête de digue jusqu'à une profondeur de 2.60 mètres. Le programme d'investigation contient 6 essais. Les résultats montrent que les valeurs de référence sont inférieures aux valeurs limites de l'enfoncement (el), ce qui montre que le niveau de compacité est satisfaisant. Les écarts type étant faibles et homogènes, le compactage est également régulier.

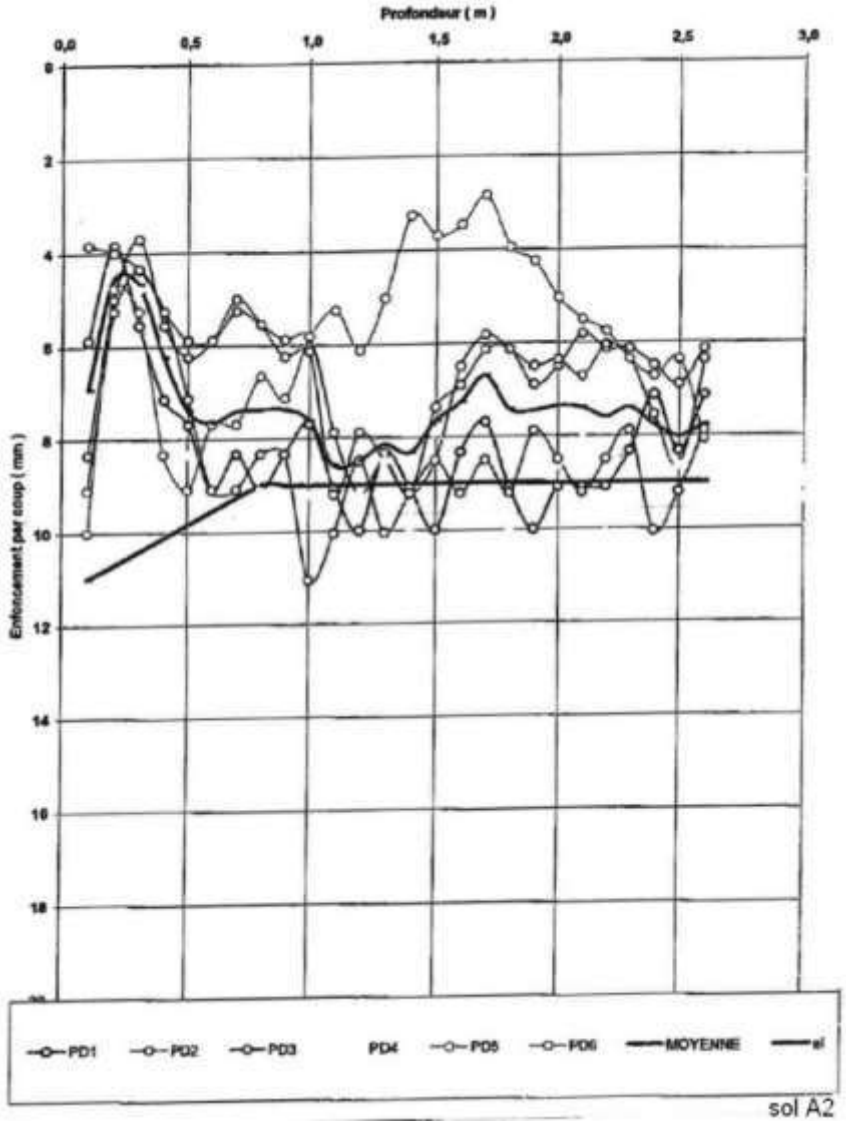


Figure 110. Digue d'Albaron – Essais au pénétromètre dynamique léger sur sol A2

Un total de 13 autres essais au pénétromètre dynamique léger ont été effectués sur le sol A2/A1 sur l'ensemble du linéaire de la crête de digue, donnant des résultats satisfaisants similaires.

10.2.4. Accessibilité

La digue d'Albaron dispose de 4 accès à la crête de digue, répertoriés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 84. Franchissements, Section Albaron

Nom	PRG
1	306.6

2	307.1
3	307.25
4	307.6

10.2.5. Ouvrages englobés

Tableau 85. Albaron – Ouvrages englobés

PR	Fiche	Gestionnaire	Type d'ouvrage	Tuyauterie	
				Caractéristique	Diamètre
Tronçon 1					
Tronçon 2					
307,08	PRG_IRR_307,079	M. TEULON	Pompage	Canalisation en siphon inversé	420 mm
307,08	PRG_IRR_307,082	M. TEULON	Pompage	Canalisation en siphon inversé	520 mm
307,08	PRG_IRR_307,084	M. NOURY	Pompage	Canalisation en siphon inversé	620 mm
307,09	PRG_IRR_307,09	SCEA Domaine Saint Andiol Signoret	Pompage	Canalisation en siphon inversé	520 mm
307,10	PRG_IRR_307,1	SCEA Domaine Saint Andiol Signoret	Pompage	Canalisation en siphon inversé (1)	420 mm
Tronçon 3					
307,15	PRG_IRR_307,15	M. AYMES	Pompage	Canalisation en siphon inversé	63 mm
307,25	PRG_DRA_307,25	Société des eaux d'Arles	Vidange du réservoir d'eau d'Albaron – Refoulement vers le Rhône	Tuyau à l'horizontale dans le masque en argiles	63 mm + 300 mm
307,30	PRG_IRR_307,30	M. CUISSARD	Pompage	Canalisation en siphon inversé	200 mm
Tronçon 4					
Tronçon 5					
307,31	PRG_IRR_307,31	M. FAGES	Pompage	Canalisation en siphon inversé	63 mm
307,34	PRG_IRR_307,34	M.GOBLET	Pompage	Canalisation en siphon inversé	100 mm
307,35	PRG_IRR_307,31	M. AYMES	Pompage	Canalisation en siphon inversé	63 mm
Tronçon 3 bis					
307,44	PRG_IRR_307,439	Société RICARD	Pompage	Canalisation en siphon inversé	640 mm
307,44	PRG_IRR_307,443	M.DIJOL	Pompage + Elec	Canalisation en siphon inversé	520 mm

307,44	PRG_IRR_307,442	Société RICARD	Prise d'eau gravitaire	Ouvrage maçonné sous le corps de digue et pompage (2)	400
307,46	PRG_DRA_307,46	Société des eaux d'Arles	Refoulement (exutoire de la station d'épuration d'Albaron)	Canalisation à l'horizontale dans le corps de digue	200 mm
307,62	PRG_IRR_307,62	M.PAGES	Prise d'eau gravitaire	Prise d'eau à l'horizontale sous la digue (3)	1400
307,64	PRG_IRR_307,64	M. MANDROLINI	Pompage	Canalisation en siphon inversé	400

(1): Siphon inversé réalisé par le propriétaire avant le commencement des travaux. Blocage du siphon dans un cavalier en crête de digue.
(2) : Prise d'eau gravitaire selon les niveaux du petit Rhône ; complétée par un ouvrage de pompage en période d'étiage
(3) : Pompe de relevage dans une cuve côté fleuve pour refouler à l'arrière de la martelière lorsque le petit Rhône est trop bas. Le propriétaire n'a autorisé aucune intervention sur cet ouvrage.
Une vue en plan issue du dossier de récolement des ouvrages hydrauliques traversants est donnée sur la figure suivante.

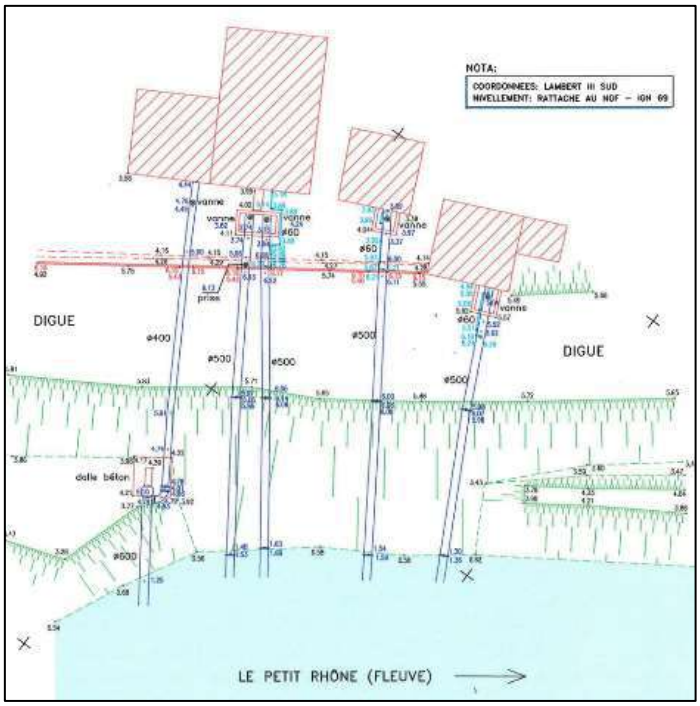


Figure 111. Digue d'Albaron – Tronçon 2 – Implantation des ouvrages hydrauliques (DOE)

10.3. DECOMPOSITION FONCTIONNELLE

10.3.1. Géométrie

Tableau 86. Synthèse de géométrie, tronçon Albaron

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	6,1	6,0	6,1	0,0
Cote de pied de digue aval	m NGF	5,5	2,7	3,7	0,9
Cote à 20m du pdav	m NGF	4,6	2,2	3,1	0,8
Cote de pied de digue amont	m NGF	5,1	3,6	4,0	0,5
Cote à 20m du pdam	m NGF	0,5	0,5	0,5	0,0
Hauteur de digue coté aval	m	3,3	0,6	2,3	0,9
Hauteur de digue côté amont	m	2,5	1,1	2,1	0,5
Fruit aval	L/V	67,5	1,8	9,6	21,7
Fruit amont	L/V	3,9	2,2	2,7	0,5
Largeur du ségonnal	m	13	10	12	1

10.3.2. Données hydrauliques

Tableau 87. Données hydrauliques, tronçon Albaron

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	4,1	4,0	1,9	2,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
8500	4,7	4,6	1,3	1,4	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
9500	5,0	4,9	1,0	1,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,4
10500	5,2	5,1	0,8	0,9	0,1	0,1	0,1	0,0	0,3
11500	5,4	5,2	0,6	0,8	0,1	0,1	0,1	0,0	0,3
12500	5,4	5,2	0,6	0,7	0,1	0,1	0,1	0,0	0,3
14160	5,4	5,3	0,6	0,7	0,1	0,1	0,1	0,0	0,3

10.3.3. Etanchéité

L'étanchéité est assurées à la fois par le parement amont qui est composé d'argile A2 et par le rideau de palplanche qui la prolonge en profondeur.

10.3.4. Filtration-Drainage

Un filtre est présent à la limite avec la structure aval, que ce soit un remblai, un mur de soutènement ou un soutènement en M3S. Le géotextile de filtration est également drainant et une chaussette drainante termine le drain en pied aval.

10.3.5. Stabilité

En dehors des zones avec soutènement aval, où ce soutènement assure la stabilité, c'est la géométrie de la digue avec des talus à minimum 2/1 qui permet la stabilité.

10.3.6. Protection

10.3.7. Evacuation

Il n'y a pas de secteur résistant à la surverse sur la digue d'Albaron compte tenu du calage de l'ouvrage.

10.3.8. Sécurité

La digue est intégralement carrossable en crête et une piste coté aval est présente aux extrémités. Ce tronçon est en zone urbanisée et des routes passent non loin de la digue.

11.DIGUE D'ALBARON AU MAS D'ICARD (PRG10-PRG13)

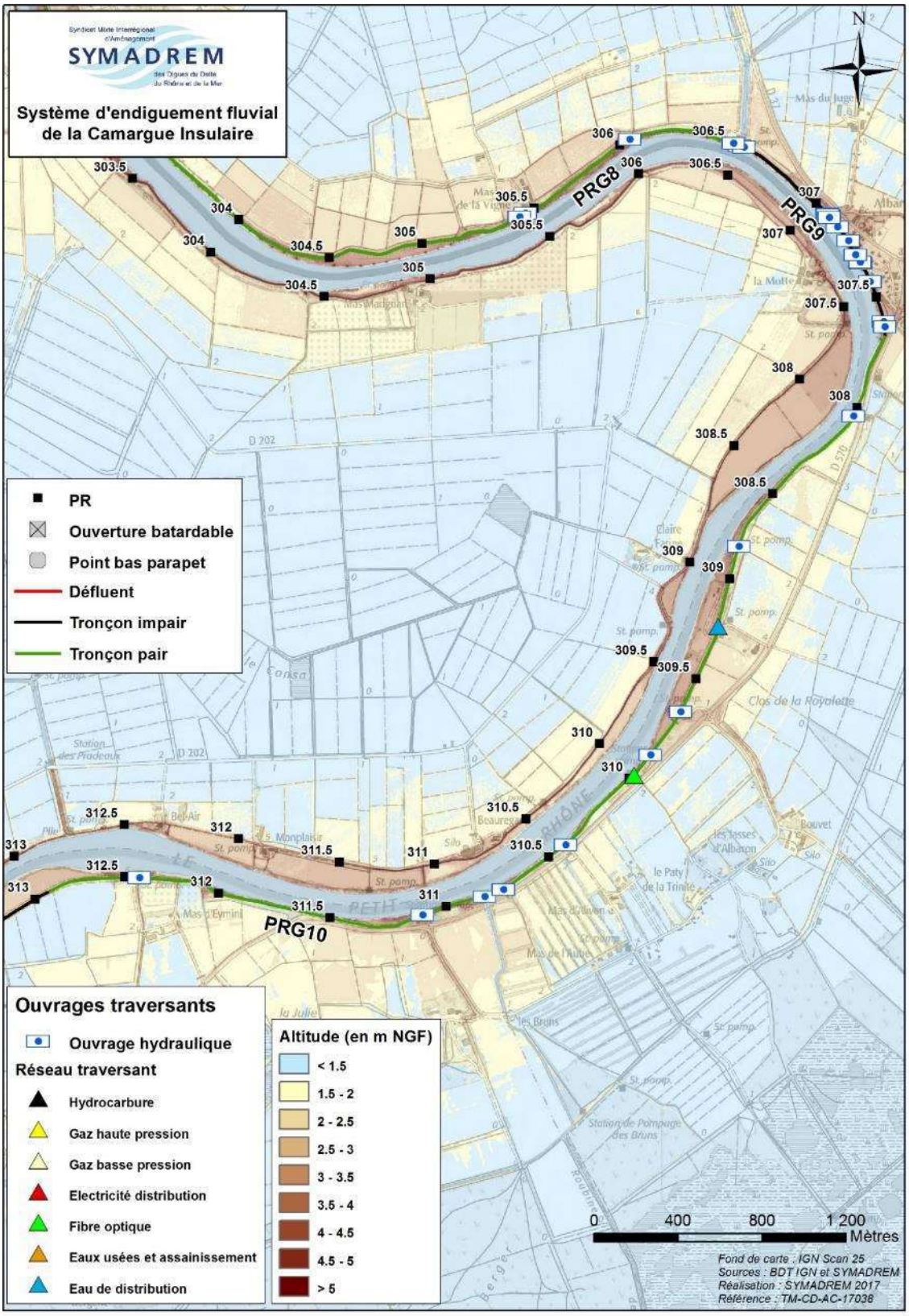


Figure 112. Plan de situation de la digue d'Albaron au Mas d'Icard 1 : Albaron-Eymini

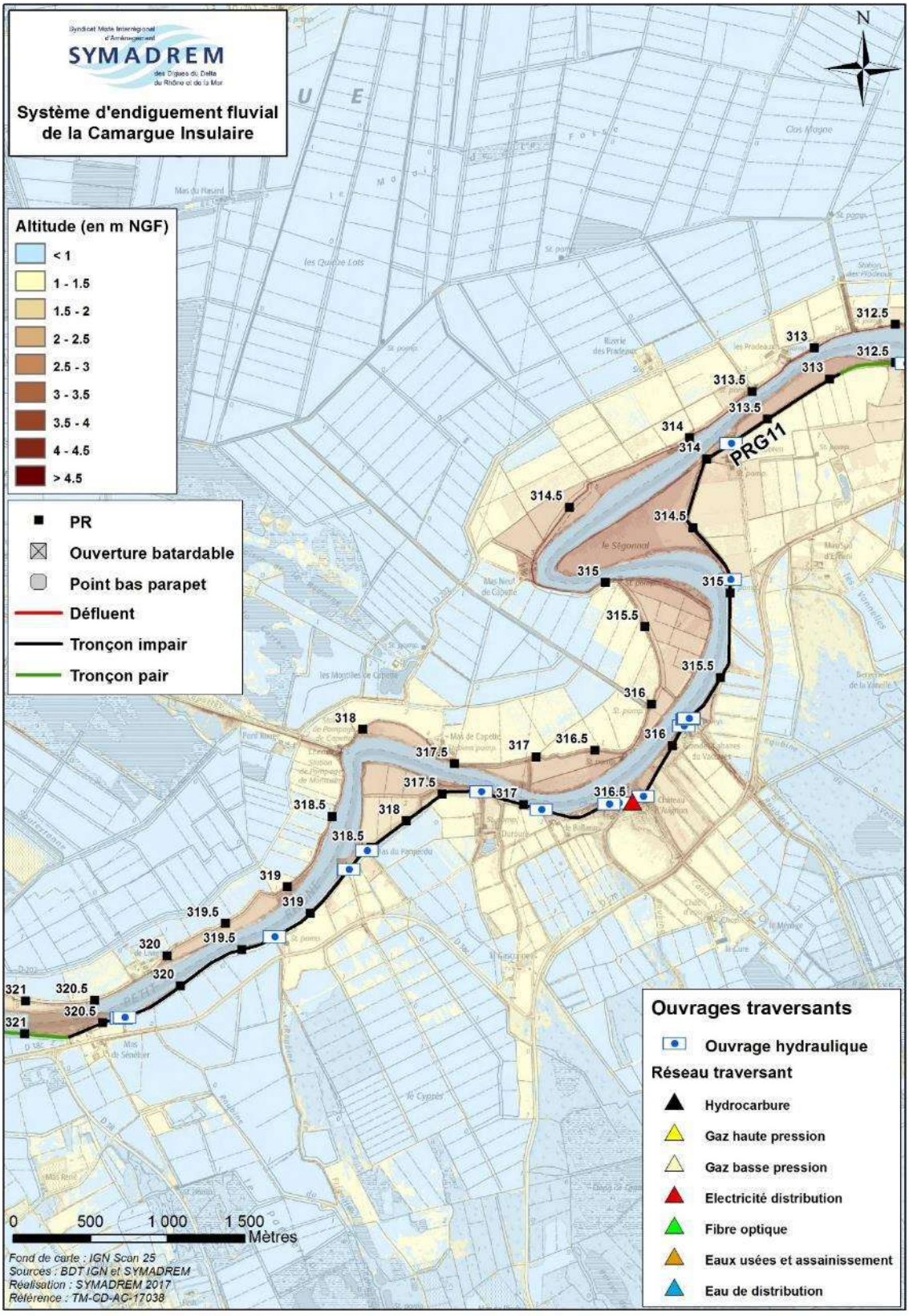


Figure 113. Plan de situation de la digue d'Albaron au Mas d'Icard 2 : Eymini-Sénebier

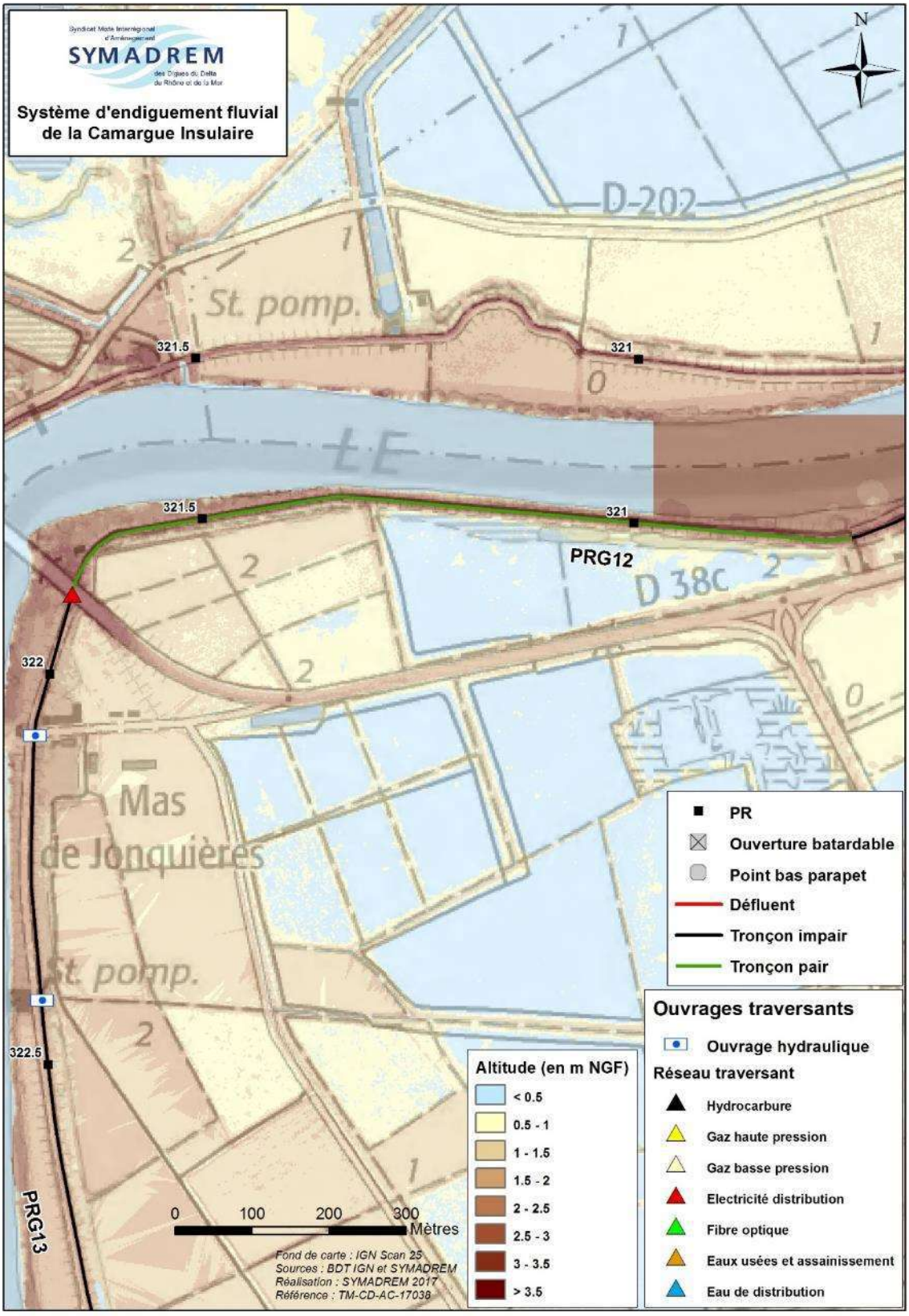


Figure 114. Plan de situation de la digue d'Albaron au Mas d'Icard 3 : Sénebier

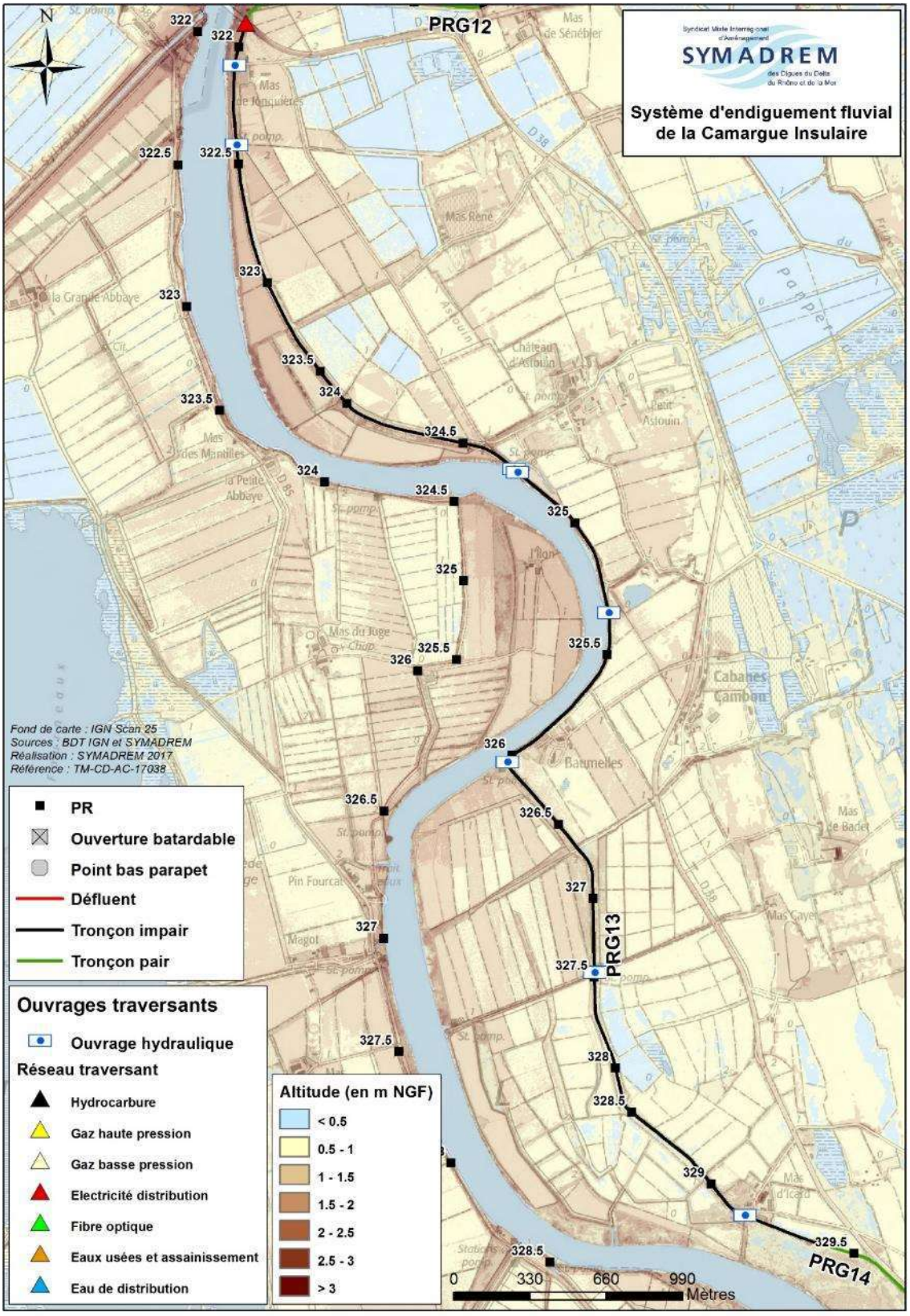


Figure 115. Plan de situation de la digue d'Albaron au Mas d'Icard 4 : Sénebier-Mas d'Icard

11.1. PREAMBULE

Tout comme les digues du Grand Rhône, celles du Petit Rhône ont été rehaussées ou bien reconstruits à plusieurs reprises. La dernière surélévation date des années 1859, réalisée après la très importante crue de 1840. Depuis 150 ans environ, les digues ont acquis les caractéristiques que l'on connaît aujourd'hui.

11.2. PRESENTATION GENERALE

11.2.1. Description historique

Suite à la crue de 1810, les digues de la Grande Camargue ont fait l'objet d'un exhaussement généralisé de 35 cm. (cf. 9.2.1 : présentation des digues de Grande Camargue).
Une partie de la zone d'étude a été rendu carrossable (du PRG 306.6 jusqu'à l'aval du secteur) et de nombreux ouvrages hydrauliques ont ainsi été supprimés. Une opération ponctuelle de confortement a été réalisée suite notamment aux crues de 1993 et 1994 (secteur Senebier / Sylvéréal). L'ensemble de ces travaux est exposé dans les parties suivantes.

11.2.2. Sectorisation

Comme précédemment, la coupe type des digues de Camargue peut être retenue sur la totalité du linéaire, hors Sénebier. La séparation des deux premiers tronçons a été faite, pour ne pas avoir des tronçons trop longs, sur la base d'un changement de pente du fleuve. La digue de la rive gauche du Petit Rhône d'Albaron au mas d'Icard peut être ainsi sectorisée de la manière suivante :

Le tableau suivant présente les spécificités propres à chaque tronçon.

Tableau 88. Sectorisation, Section Albaron-Mas d'Icard

Tronçon de la zone d'étude	PR (PRG)	Description sommaire section courante	Piste	Ouvrage traversant
SC1	PRG 307.7 au PRG 313.1	Digue de Camargue	Carrossable	10
SC2	PRG 313.1 au PRG 320.5	Digue de Camargue	Carrossable	19
Linéaire conforté 1	PRG 320.5 au PRG 322 (Sénebier / Sylvéréal)	Masque argileux amont et épaississement côté terre	Carrossable	---
SC3	PRG 322 au PRG 329.5	Digue de Camargue	Carrossable	10
Total d'ouvrages traversants				39

La description des tronçons est donnée ci-après.

11.2.3. Description des tronçons

11.2.3.1. Raccordement

La jonction se fait après la station de Mandrolini, lorsque la digue rejoint la route. Sur les derniers mètres de travaux, la crête a été rétrécit afin de retrouver les dimensions de la digue en aval et faire une transition progressive.

11.2.3.2. Section Courante (SC1, SC2 et SC3)

Comme pour une grande partie du linéaire en rive gauche du Petit Rhône, il n'y a pas eu de travaux depuis près de 200 ans, les digues sont alors décrites par la coupe type des digues de Camargue qui est rappelée ci-dessous :

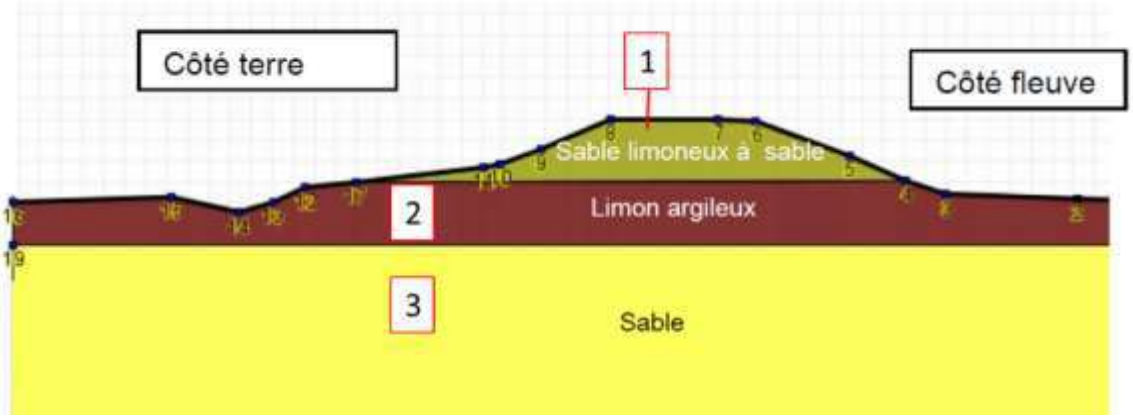


Figure 116. Digue de Camargue – Coupe stratigraphique type (courante)

La carrossabilité de ce secteur a été établie lors de la première phase de travaux, en 2010. Comme présenté précédemment, la cote et la structure des ouvrages n'ont pas été modifiées, seuls les 30 cm supérieurs ont été repris. Quelques ouvrages traversants ont également été supprimés lors de ces travaux.

11.2.3.3. Senebier – Sylvéréal (PRG 320.5 au PRG 322)

La digue, s'étend du PRG 320.5 au PRG 322 en rive gauche du Petit Rhône. Les ouvrages de protection ont été confortés de janvier à mai 1998 suite à un arrêté préfectoral d'urgence sous la maîtrise d'ouvrage du SIDRHEMER et sous maitrise d'œuvre de la DDE des Bouches-Du-Rhône. Le chantier à consister à créer un écran argileux côté fleuve, et épaissir la digue côté terre. La cote de la crête de digue oscille entre 3.93 et 4.12 m NGF.
Le principe de confortement* des digues est le suivant :

- Epaississement du corps de digue sur le talus aval avec création d'une piste en crête d'une largeur de 4.50 m,
- Pente de talus à 2H/1V avec du matériau provenant d'apport ainsi que de la réutilisation des déblais,

- Déblais dans le talus amont du corps de digue avec remblayage et compactage du matériau argileux type A2,
- Mise en place de grillage anti-fouisseur sur les talus de digue**,
- Confection de la piste en crête de digue avec du matériau type Crau.

* ce principe de confortement est issu d'une revue d'informations au public de 1997.
** Les terres utilisées pour recouvrir le grillage étaient salées et ce dernier est aujourd'hui fortement corrodé ; sa fonction est donc altérée.

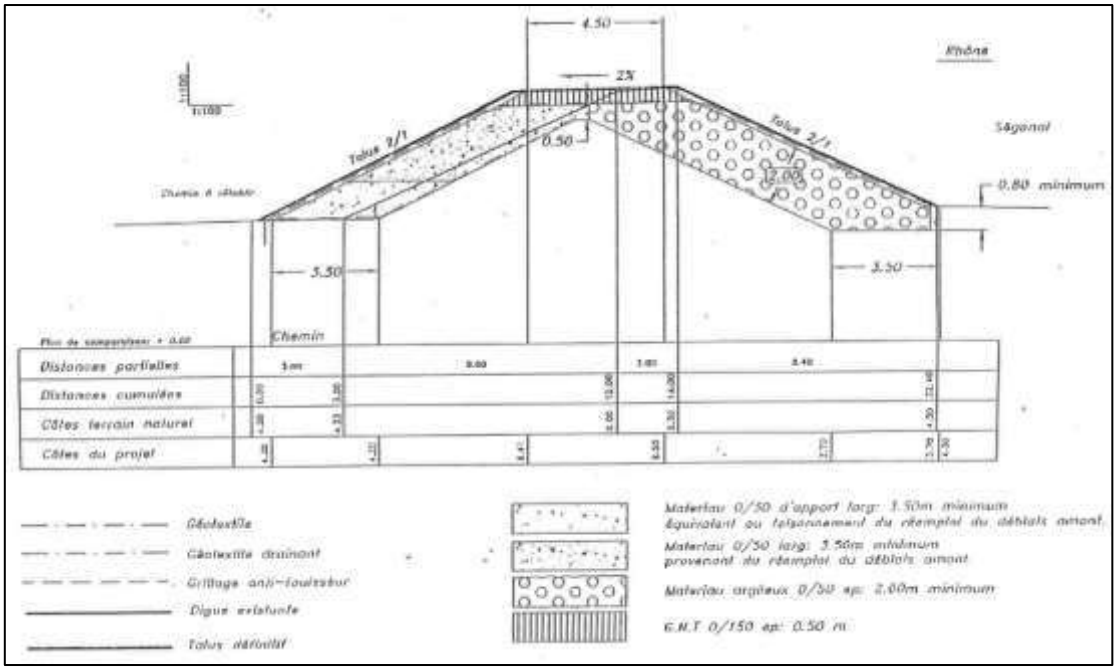


Figure 117. Digue d'Albaron au Mas d'Icard – Senebier/Sylvéréal – Coupe type (DDE 13)

11.2.4. Accessibilité

De nombreux accès aux digues du Petit Rhône rive gauche d'Albaron à l'embouchure sont recensés.

Tableau 89. Franchissements, Section Albaron-Mas d'Icard

N°	PRG
1	309,26
2	309,66
3	309,98
4	311,1
5	311,15
6	312,26
7	312,46
8	313,80

N°	PRG
12	317,18
13	318,06
14	320,72
15	321,7
16	321,92
17	322,4
18	324,55
19	325,24

9	314,85
10	315,84
11	316,40

20	325,63
21	327,46

11.2.5. Ouvrages englobés

De nombreux ouvrages sont recensés sur ce secteur, ils sont répertoriés dans le tableau suivant :

Tableau 90. Albaron-Mas d'Icard – Ouvrages englobés

PR	Fiche	Réseaux humides	Implantation	Diamètre (mm)
307,87	PRG_IND_307,87	Indéfini	?	?
308,04	PRG_IRR_308,04	Irrigation	Superficiel	500
308,84	PRG_IRR_308,84	Irrigation	Enterré	500
309,65	PRG_IRR_309,65	Irrigation	Enterré	600
309,87	PRG_IRR_309,87	Irrigation	Enterré	400
310,42	PRG_IRR_310,42	Irrigation	?	?
310,75	PRG_IRR_310,75	Irrigation	?	?
310,84	PRG_DRA_310,84	Drainage	Enterré	2*1000
311,11	PRG_IRR_311,11	Irrigation	Enterré	800+500
312,45	PRG_IRR_312,45	Irrigation	Enterré	600
313,81	PRG_IRR_313,81	Irrigation	Enterré	600
313,81	PRG_IRR_313,81	Irrigation	Enterré	3*63
314,86	PRG_IRR_314,86	Irrigation	Superficiel	300
315,82	PRG_IRR_315,82	Irrigation	Enterré	2*1200
315,83	PRG_IRR_315,83	Irrigation	Enterré	2*1400
315,88	PRG_IRR_315,88	Irrigation	Enterré	700
316,42	PRG_IRR_316,42	Irrigation	Enterré	900
316,57	PRG_IRR_316,57	Irrigation	Enterré	1400
316,61	PRG_IRR_316,61	Irrigation	Enterré	900
316,93	PRG_IRR_316,93	Irrigation	Enterré	1200
317,28	PRG_IRR_317,28	Irrigation	Enterré	1000
318,53	PRG_DRA_318,53	Drainage	Enterré	600
318,68	PRG_IRR_318,68	Irrigation	Superficiel	400+250+100
319,19	PRG_IRR_319,19	Irrigation	Enterré	500
319,21	PRG_IND_319,21	Indéfini	Enterré	400
319,23	PRG_DRA_319,23	Drainage	Enterré	300
319,27	PRG_IRR_319,27	Irrigation	Enterré	800
320,37	PRG_IRR_320,37	indéfini	Enterré	550
320,39	PRG_IRR_320,39	Irrigation	Enterré	300
322,11	PRG_IRR_322,11	Irrigation	Enterré	700
322,42	PRG_IRR_322,42	Irrigation	Superficiel	400

324,71	PRG_IRR_324,71	Irrigation	Enterré	500
324,73	PRG_IRR_324,73	Irrigation	Enterré	600
325,36	PRG_IRR_325,36	Irrigation	Enterré	400
326,07	PRG_IND_326,07	Indéfini	Enterré	?
327,47	PRG_IRR_327,47	Irrigation	Enterré	500
327,47	PRG_IND_327,47	Irrigation	Enterré	400
327,47	PRG_DRA_327,47	Drainage	Enterré	600
329,15	PRG_IRR_329,15	Irrigation	Enterré	800

11.3. DECOMPOSITION FONCTIONNELLE

Comme sur l'ensemble des secteurs assimilés aux digues de Camargue, qui sont longs, les données géométriques et hydrauliques sont présentées par tronçon.

11.3.1. Géométrie - tronçon Albaron-Eymini

Tableau 91. Synthèse de géométrie, tronçon Albaron-Eymini

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	5,7	5,0	5,3	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	4,6	1,6	2,7	0,7
Cote à 20m du pdav	m NGF	3,4	1,0	2,1	0,5
Cote de pied de digue amont	m NGF	5,0	2,9	3,9	0,3
Cote à 20m du pdam	m NGF	4,3	0,4	2,0	1,4
Hauteur de digue coté aval	m	3,6	0,9	2,6	0,7
Hauteur de digue côté amont	m	2,2	0,2	1,5	0,3
Fruit aval	L/V	3,9	1,9	2,4	0,4
Fruit amont	L/V	14,9	1,8	2,8	2,0
Largeur du ségonnal	m	108	7	32	29

11.3.2. Données hydrauliques - tronçon Albaron-Eymini

Tableau 92. Données hydrauliques, tronçon Albaron-Eymini

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	7200	3,9	3,5	1,5	1,6	0,2	0,1	0,1	0,1
8500	8500	4,6	4,0	0,9	1,1	0,2	0,1	0,1	0,1
9500	9500	4,8	4,2	0,7	0,8	0,2	0,1	0,2	0,1
10500	10500	5,0	4,4	0,5	0,7	0,2	0,2	0,2	0,1
11500	11500	5,2	4,5	0,3	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1
12500	12500	5,2	4,5	0,3	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1
14160	14160	5,2	4,5	0,3	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1

11.3.3. Géométrie - tronçon Eymini-Sénebier

Tableau 93. Synthèse de géométrie, tronçon Eymini-Sénebier

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	4,9	3,8	4,3	0,3
Cote de pied de digue aval	m NGF	4,1	1,1	2,1	0,7
Cote à 20m du pdav	m NGF	2,7	0,8	1,5	0,4
Cote de pied de digue amont	m NGF	3,7	1,2	2,6	0,6
Cote à 20m du pdam	m NGF	3,1	0,3	1,8	1,1
Hauteur de digue coté aval	m	3,2	0,5	2,2	0,7
Hauteur de digue côté amont	m	2,8	0,3	1,6	0,6
Fruit aval	L/V	4,6	1,2	2,6	0,5
Fruit amont	L/V	7,9	2,0	2,8	0,9
Largeur du ségonnal	m	295	5	70	67

11.3.4. Données hydrauliques - tronçon Eymini-Sénebier

Tableau 94. Données hydrauliques, tronçon Eymini-Sénebier

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	3,5	2,4	1,0	1,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,5
8500	4,0	2,7	0,7	0,9	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3
9500	4,2	2,8	0,5	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3
10500	4,3	2,9	0,3	0,6	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2
11500	4,5	2,9	0,2	0,6	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2
12500	4,5	2,9	0,2	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2
14160	4,5	2,9	0,2	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2

11.3.5. Géométrie - tronçon Sénebier

Tableau 95. Synthèse de géométrie, tronçon Sénebier

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	10,0	4,0	4,6	1,8
Cote de pied de digue aval	m NGF	1,9	0,8	1,1	0,3
Cote à 20m du pdav	m NGF	1,8	0,8	1,1	0,3
Cote de pied de digue amont	m NGF	3,0	2,2	2,7	0,2
Cote à 20m du pdam	m NGF	2,6	0,3	1,5	1,1
Hauteur de digue coté aval	m	8,1	2,8	3,5	1,5
Hauteur de digue côté amont	m	7,4	1,1	2,0	1,8
Fruit aval	L/V	2,5	2,1	2,2	0,1
Fruit amont	L/V	2,8	2,2	2,5	0,2

Largeur du ségonnal	m	47	10	23	13

11.3.6. Données hydrauliques - tronçon Sénebier

Tableau 96. Données hydrauliques, tronçon Sénebier

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	2,4	2,2	1,7	2,3	0,1	0,1	0,1	0,0	0,6
8500	2,6	2,4	1,4	2,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5
9500	2,8	2,7	1,3	1,9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5
10500	2,9	2,7	1,2	1,9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5
11500	2,9	2,7	1,2	1,8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5
12500	2,9	2,7	1,2	1,8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5
14160	2,9	2,7	1,2	1,8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4

11.3.7. Géométrie - tronçon Sylvéréal-Icard

Tableau 97. Synthèse de géométrie, tronçon Sylvéréal-Icard

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	3,8	2,4	2,9	0,4
Cote de pied de digue aval	m NGF	2,5	0,7	1,3	0,4
Cote à 20m du pdav	m NGF	1,9	-0,1	1,0	0,4
Cote de pied de digue amont	m NGF	2,5	0,3	1,5	0,6
Cote à 20m du pdam	m NGF	2,4	0,1	1,2	0,6
Hauteur de digue coté aval	m	2,4	0,5	1,6	0,3
Hauteur de digue côté amont	m	2,2	0,4	1,4	0,5
Fruit aval	L/V	5,7	1,8	2,7	0,7
Fruit amont	L/V	8,2	1,9	2,9	1,0
Largeur du ségonnal	m	750	6	281	252

11.3.8. Données hydrauliques - tronçon Sylvéréal-Icard

Tableau 98. Données hydrauliques, tronçon Sylvéréal-Icard

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	2,2	1,4	0,7	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,6
8500	2,4	1,4	0,7	1,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,5
9500	2,6	1,5	0,5	0,9	0,2	0,1	0,0	0,0	0,5
10500	2,7	1,5	0,5	0,8	0,2	0,1	0,0	0,0	0,4

11500	2,7	1,6	0,4	0,8	0,2	0,1	0,0	0,0	0,4
12500	2,7	1,6	0,4	0,8	0,2	0,1	0,0	0,0	0,4
14160	2,7	1,7	0,4	0,8	0,2	0,1	0,0	0,0	0,4

11.3.9. Etanchéité

Sur le secteur de Sénebier il y a un masque amont étanche en argile A2 ; autrement il n'y a pas de système spécifique.

11.3.10. Filtration-Drainage

De même, seul le secteur de Sénebier est équipé d'un géotextile filtre/drain, positionné sous la recharge aval.

11.3.11. Stabilité

La stabilité est obtenue par la géométrie de la digue qui sur ce secteur possède des fruits de talus qui sont en moyenne supérieurs à 2.5/1 mais peuvent localement être à 1.2/1 et 1.8/1 respectivement pour les talus aval et amont.

11.3.12. Protection

Il n'y a pas de protection hormis vers Sénebier où un grillage anti-fouisseur a été mis en place mais ce dernier s'est dégradé (fortement corrodé) du fait du milieu salé et ne remplis plus intégralement son rôle de protection.

11.3.13. Evacuation

Il n'y a pas de secteur résistant à la surverse sur la digue entre Albaron et le Mas d'Icard, malgré le calage de l'ouvrage. Les digues sont correctement calées (crue exceptionnelle plus 50cm) à l'aval du PRG 317.5.

11.3.14. Sécurité

La digue est intégralement carrossable en crête, une piste aval est présente sur la majeure partie du linéaire et il y en a parfois coté fleuve.

12.DIGUE DU MAS D'ICARD AU TIKI (PRG14-PRG18)

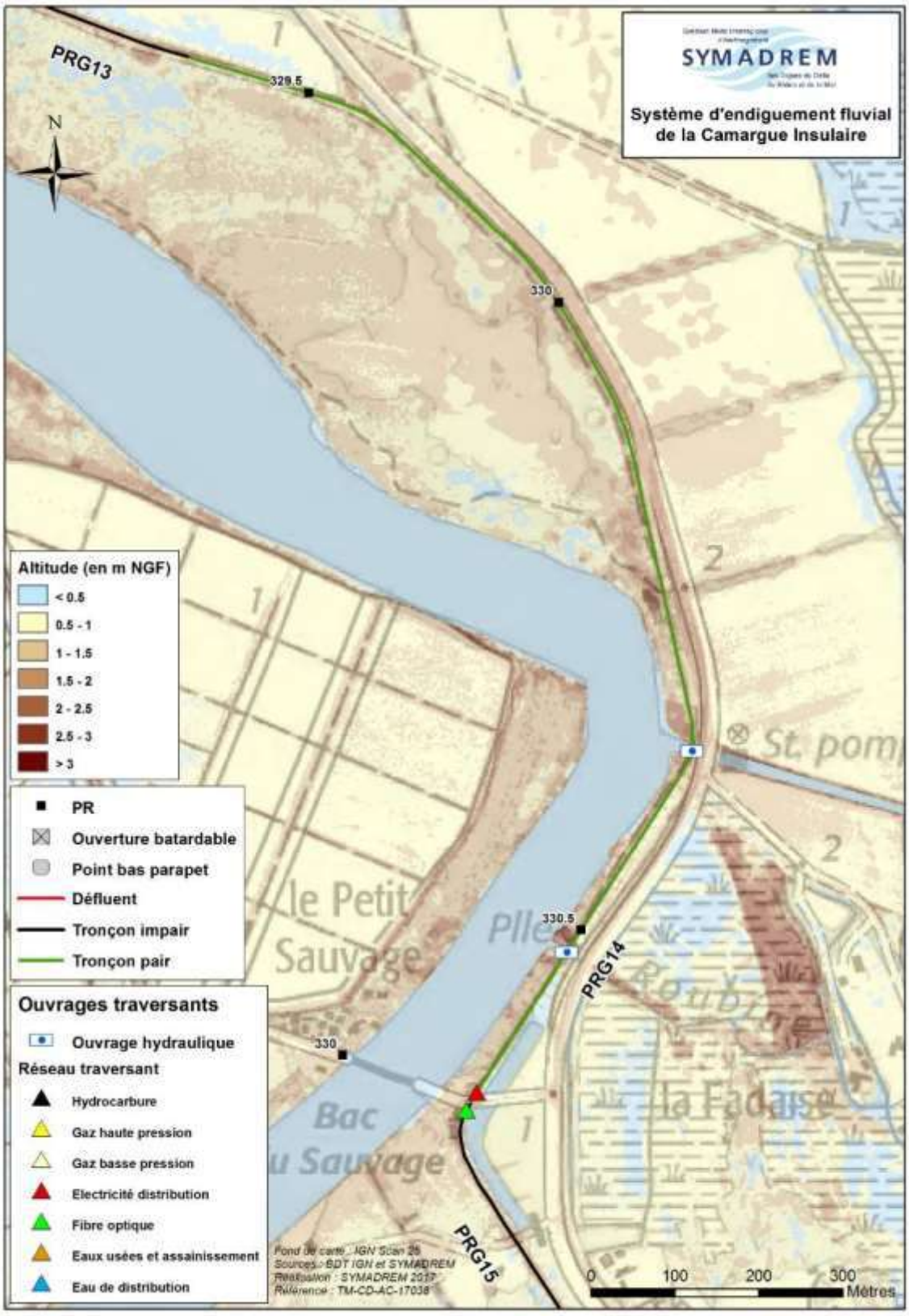


Figure 118. Plan de situation de la digue du mas d'Icard au Tiki 1 : Mas d'Icard-Bac du Sauvage

Figure 119. Plan de situation de la digue du mas d'Icard au Tiki 2 : Aval du bac du Sauvage

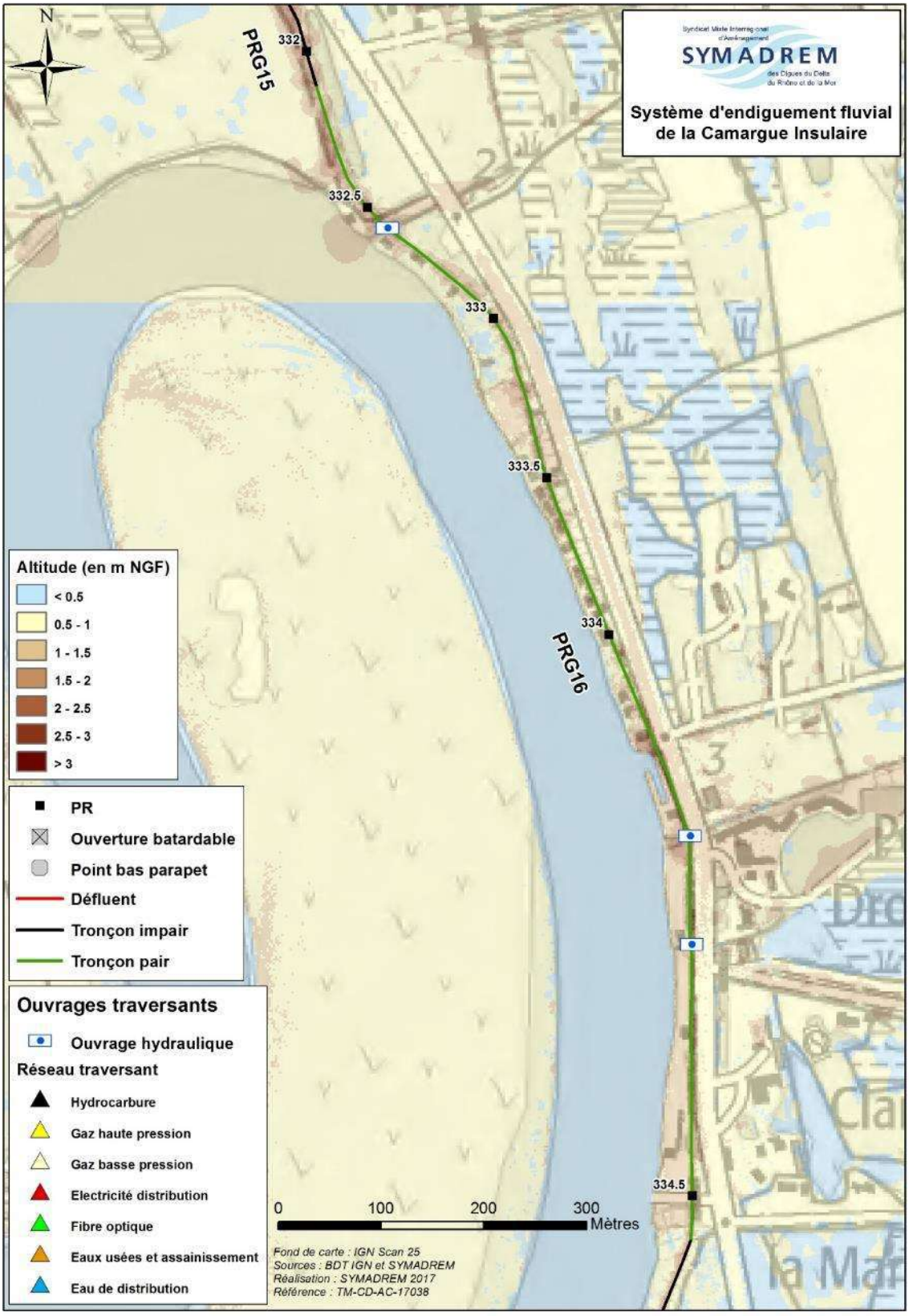


Figure 120. Plan de situation de la digue du mas d'Icard au Tiki 3 : Port Dromar

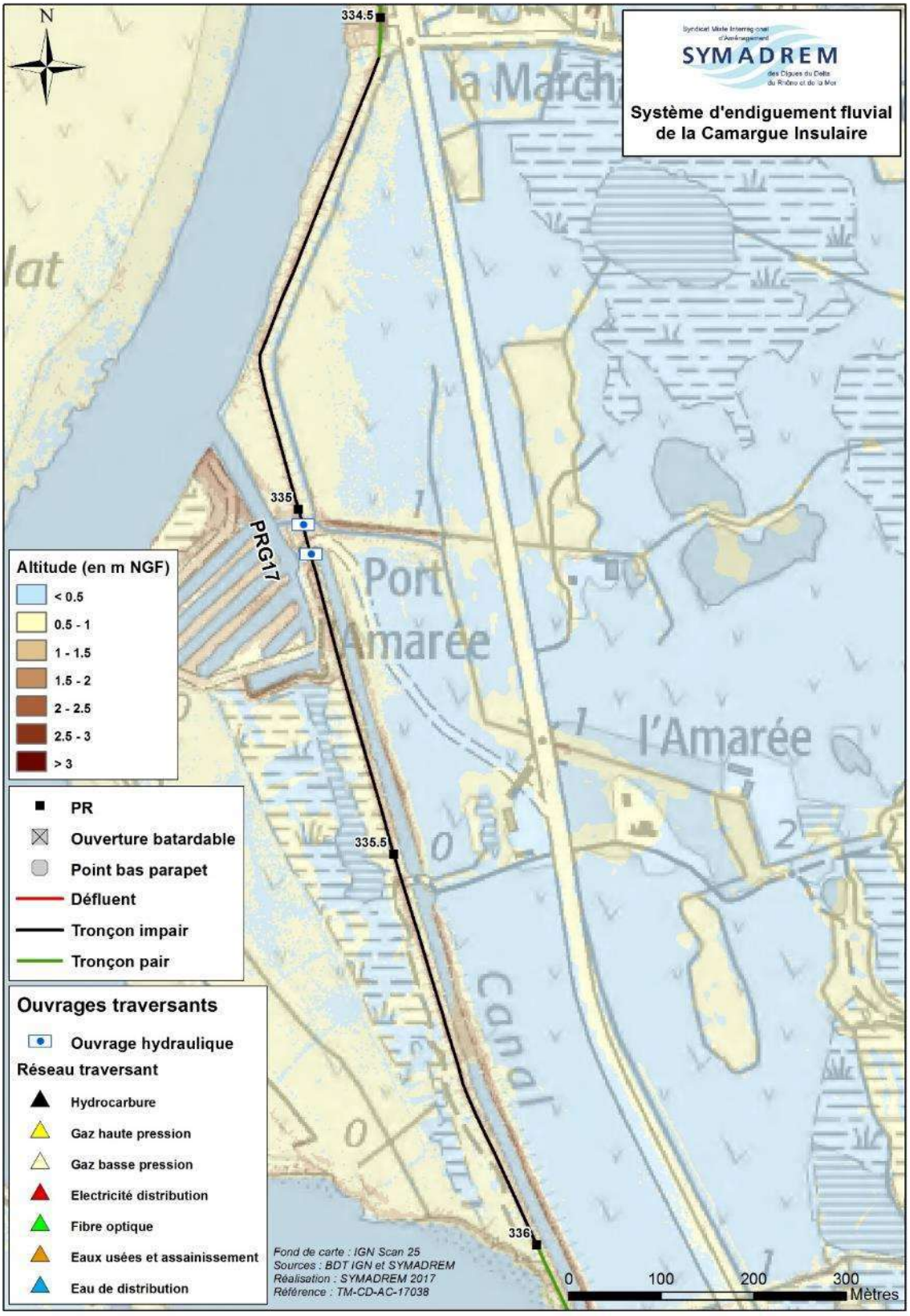


Figure 121. Plan de situation de la digue du mas d'Icard au Tiki 4 : Port de l'Amarée

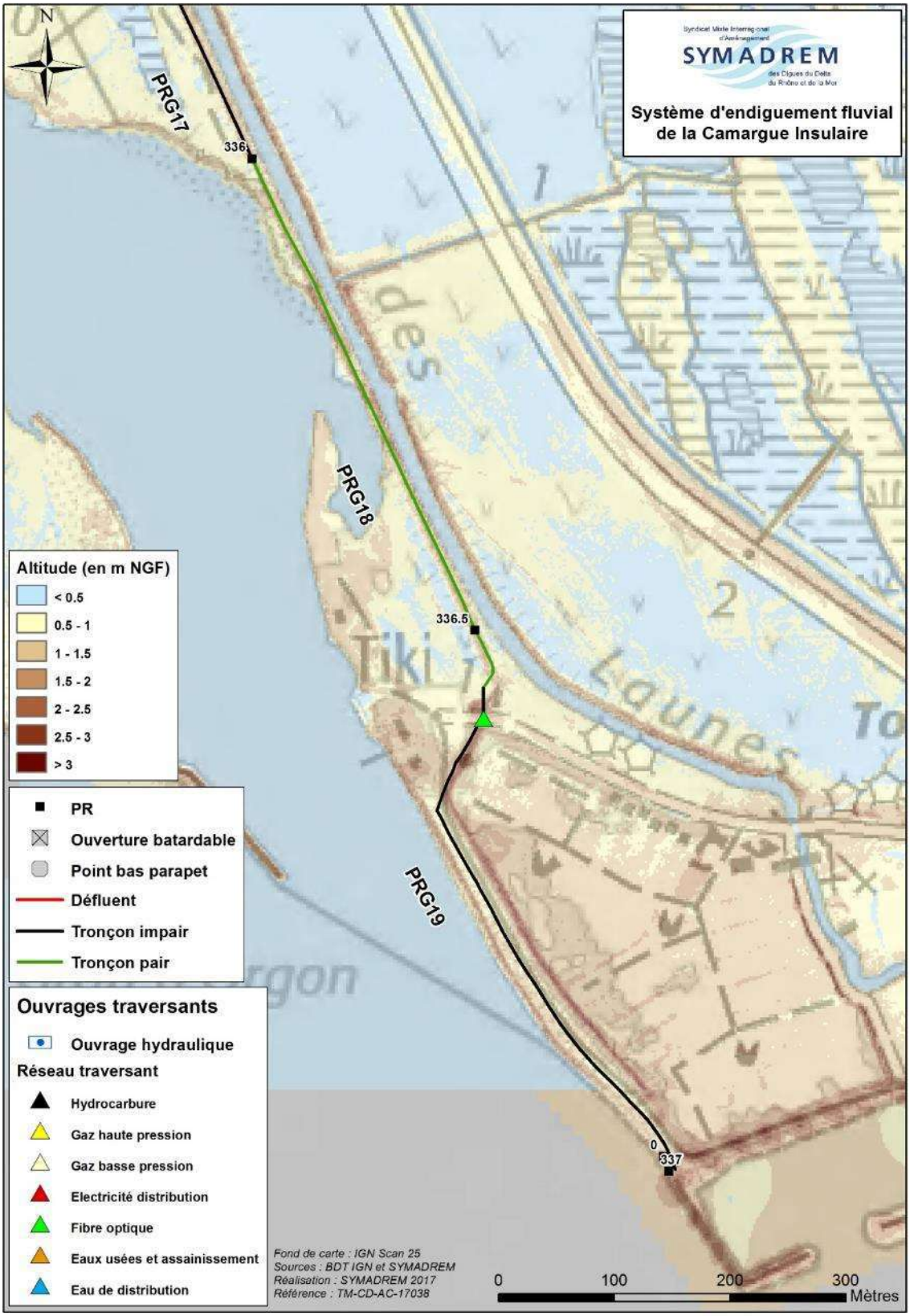


Figure 122. Plan de situation de la digue du mas d'Icard au Tiki 5 : l'Amarée (PRG 18)

12.1. PREAMBULE

Tout comme les digues du Grand Rhône, celles du Petit Rhône ont été rehaussées ou bien reconstruits à plusieurs reprises. La dernière surélévation date des années 1859, réalisée après la très importante crue de 1840. Depuis 150 ans environ, les digues ont acquis les caractéristiques que l'on connaît aujourd'hui.

12.2. PRESENTATION GENERALE

12.2.1. Description historique

Suite à la crue de 1810, les digues de la Grande Camargue ont fait l'objet d'un exhaussement généralisé de 35 cm. (cf. 9.2.1 : présentation des digues de Grande Camargue).
Une opération ponctuelle de confortement a été réalisée suite à la crue de 2003 (secteur de la Fadaise) et une suite à une tempête marine en 2015 (secteur de l'Amarée). L'ensemble de ces travaux est exposé dans les parties suivantes.

12.2.2. Sectorisation

Comme précédemment, la coupe type des digues de Camargue peut être retenue sur la totalité du linéaire. La digue de la rive gauche du Petit Rhône entre le mas d'Icard et le Tiki a été sectorisée de la manière suivante, en prévision des travaux :

Tableau 99. Sectorisation, Section Mas d'Icard-Tiki

Tronçon de la zone d'étude	**PR (PRG)**	**Description sommaire section courante**	**Piste**	**Ouvrages traversant**
Le linéaire 1 : amont du bac	PRG 329.5 au PRG 330.7	Digue de Camargue	Non Carrossable	1
Point singulier 1	PRG 330.35 (La Fadaise)	Reprise d'enrochements	Carrossable	1
Le linéaire 2 : Aval du bac	PRG 330.7 au PRG 332	Digue de Camargue	Non carrossable	0
Le linéaire 3 : Port Dromar	PRG 332 au PRG 334.5	Digue de Camargue	Non Carrossable	3
Le linéaire 4 : Port l'Amarée	PRG 334.5 au PRG 336	Digue de Camargue	Non Carrossable	2
Le linéaire 5 : L'Amarée	PRG 336 au PRG 336.5	Digue de Camargue ; avec enrochements	Non Carrossable	
Total d'ouvrages traversants				7

La description des tronçons est donnée ci-après.

12.2.3. Description des tronçons

12.2.3.1. Raccordement

Il n'y a pas de raccordement particulier dans la structure de la digue mais pour la couche de surface il y a eu des travaux de carrossabilité sur le secteur amont mais pas aval, en prévision travaux à venir.

Photo 109. Raccordement au 329.5

12.2.3.2. Section courante en amont du bac du Sauvage (PRG 329.5-330.7)

Comme pour la majorité du linéaire des digues de Camargue, ce secteur a été rehaussé vers 1810, depuis il n'y a pas eu de travaux majeurs, en dehors du point singulier décrit ci-après.

Point particulier : La fadaise (PRG 330.35)
Ce confortement s'insère dans le cadre des opérations d'urgence suite à la crue de décembre 2003. Les travaux, réalisés en 2006, ont consisté à reprendre les enrochements sur environ 140 mètres. La cote de la crête de digue est d'environ 2.60 m NGF.

Figure 123. Digue d'Albaron à l'embouchure – La Fadaise – Vue en plan (DOE)

Photo 110. Enrochements et enrochements bétonnés au droit de la Fadaise lors de la visite par voie nautique – Mars 2015

12.2.3.1. Section courante en aval du bac du Sauvage (PRG 330.7-332.2)

Comme pour la majorité du linéaire des digues de Camargue, ce secteur a été rehaussé vers 1810 ; ce secteur n'entrait pas dans le programme de carrossabilité.

12.2.3.1. Port Dromar (PRG 332.2-334.1)

Ce tronçon n'a pas connu plus de travaux que le précédent, la digue est actuellement sur des parcelles habitées et clôturées, l'accès y est alors compliqué malgré la présence de la route à

proximité. La berge, qui est proche de la digue, a été renforcée au fil du temps par les habitants

12.2.3.2. L'Amarée (PRG 334.1-336.2)

Comme pour la majorité du linéaire des digues de Camargue, ce secteur a été rehaussé vers 1810 ; ce secteur n'entrait pas dans le programme de carrossabilité.

12.2.3.3. L'Amarée (PRG 336.2-336.5)

Suite aux différentes tempêtes marines, ce secteur à subit de nombreuses érosions qui ont menés à des poses d'enrochements ponctuelles. Aujourd'hui tout le secteur à faible ségonnal est protégé par des enrochements coté fleuve.

12.2.4. Accessibilité

Il existe différents accès à la digue :

Tableau 100. Franchissements, Section Mas d'Icard-Tiki

Nom	PRG
1-Bac du Sauvage	330,43
2-Clos de la Barque *	330,78
3-La Valette *	331.3
4-La Valette 2 *	332.5
5-RD38	334,2
6-Port Dromar	335,12
7- Parking Tiki	336,58

* :Fermé par des barrières privées

12.2.5. Ouvrages englobés

Différents ouvrages traversants sont présents sur le secteur :

Tableau 101. Mas d'Icard-Tiki – Ouvrages englobés

PR	Fiche	Réseaux humides	Implantation	Diamètre (mm)
330.42	PRG_DRA_330,42	Drainage	Enterré	4*900
330.63	PRG_IRR_330,63	Irrigation	Enterré	2*800
332.59	PRG_IRR_332,59	Irrigation	Enterré	300
334.2	PRG_IRR_334,2	Irrigation	Enterré	2000

334.31	PRG_IRR_334,31	Irrigation	Enterré	600
335.11	PRG_IRR_335,11	Irrigation	Enterré	400
335.15	PRG_IRR_335,15	Irrigation	Enterré	1000

12.3. DECOMPOSITION FONCTIONNELLE

12.3.1. Géométrie - tronçon Icard-bac

Tableau 102. Synthèse de géométrie, tronçon Icard-bac

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	2,7	2,3	2,5	0,1
Cote de pied de digue aval	m NGF	1,5	0,6	1,0	0,3
Cote à 20m du pdav	m NGF	1,9	-0,1	1,0	0,6
Cote de pied de digue amont	m NGF	1,7	0,6	1,2	0,3
Cote à 20m du pdam	m NGF	1,3	0,1	0,7	0,5
Hauteur de digue coté aval	m	1,9	1,0	1,5	0,3
Hauteur de digue côté amont	m	1,8	0,8	1,2	0,3
Fruit aval	L/V	3,1	2,2	2,6	0,4
Fruit amont	L/V	4,9	2,0	2,8	0,9
Largeur du ségonnal	m	302	9	165	132

12.3.2. Données hydrauliques - tronçon Icard-bac

Tableau 103. Données hydrauliques, tronçon Icard-bac

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	1,4	1,3	1,0	1,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
8500	1,4	1,3	1,0	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
9500	1,5	1,3	0,9	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
10500	1,5	1,4	0,9	1,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
11500	1,6	1,4	0,8	1,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,6
12500	1,6	1,5	0,8	0,9	0,1	0,1	0,0	0,0	0,6
14160	1,7	1,6	0,7	0,9	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5

12.3.3. Géométrie - tronçon Aval du bac

Tableau 104. Synthèse de géométrie, tronçon Aval du bac

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	2,8	2,0	2,3	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	1,4	0,3	0,9	0,3
Cote à 20m du pdav	m NGF	0,9	0,5	0,7	0,1
Cote de pied de digue amont	m NGF	1,3	0,2	0,6	0,4
Cote à 20m du pdam	m NGF	0,7	0,4	0,5	0,1
Hauteur de digue coté aval	m	2,1	0,7	1,4	0,5
Hauteur de digue côté amont	m	2,5	0,7	1,8	0,6
Fruit aval	L/V	8,5	2,1	3,8	2,2
Fruit amont	L/V	8,7	1,9	3,5	2,0
Largeur du ségonnal	m	525	71	274	150

12.3.4. Données hydrauliques - tronçon Aval du bac

Tableau 105. Données hydrauliques, tronçon Aval du bac

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	1,2	1,1	0,8	1,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
8500	1,3	1,2	0,8	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
9500	1,3	1,2	0,7	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,6
10500	1,3	1,3	0,7	1,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,6
11500	1,4	1,4	0,6	0,9	0,1	0,0	0,0	0,0	0,5
12500	1,5	1,5	0,5	0,9	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
14160	1,6	1,6	0,4	0,8	0,1	0,1	0,0	0,0	0,4

12.3.5. Géométrie - tronçon Port Dromar

Tableau 106. Synthèse de géométrie, tronçon Port Dromar

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	2,9	2,0	2,4	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	1,5	0,0	0,9	0,3
Cote à 20m du pdav	m NGF	1,2	0,1	0,8	0,3
Cote de pied de digue amont	m NGF	2,1	0,4	1,1	0,4
Cote à 20m du pdam	m NGF	1,1	0,2	0,6	0,3
Hauteur de digue coté aval	m	2,6	0,7	1,5	0,4
Hauteur de digue côté amont	m	2,3	0,1	1,3	0,5
Fruit aval	L/V	17,0	1,5	4,0	3,4
Fruit amont	L/V	49,9	1,6	5,2	10,6
Largeur du ségonnal	m	90	4	26	19

12.3.6. Données hydrauliques - tronçon Port Dromar

Tableau 107. Données hydrauliques, tronçon Port Dromar

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	1,1	0,9	1,1	1,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,9
8500	1,1	0,9	1,0	1,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,8
9500	1,2	1,0	0,9	1,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,8
10500	1,2	1,0	0,9	1,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,8
11500	1,4	1,1	0,9	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
12500	1,5	1,3	0,6	1,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,6
14160	1,6	1,5	0,5	0,8	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5

12.3.7. Géométrie - tronçon Port de l'Amarée

Tableau 108. Synthèse de géométrie, tronçon Port de l'Amarée

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	2,1	1,5	1,8	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	1,1	0,5	0,8	0,2
Cote à 20m du pdav	m NGF	1,7	0,4	1,0	0,5
Cote de pied de digue amont	m NGF	1,1	0,2	0,8	0,3
Cote à 20m du pdam	m NGF	0,7	0,2	0,4	0,2
Hauteur de digue coté aval	m	1,5	0,6	1,0	0,3
Hauteur de digue côté amont	m	1,8	0,5	1,0	0,5
Fruit aval	L/V	6,4	2,3	3,9	1,1
Fruit amont	L/V	6,8	1,6	3,6	1,5
Largeur du ségonnal	m	26	12	19	6

12.3.8. Données hydrauliques - tronçon Port de l'Amarée

Tableau 109. Données hydrauliques, tronçon Port de l'Amarée

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	0,8	0,7	0,7	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9
8500	0,9	0,9	0,6	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
9500	1,0	0,9	0,6	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
10500	1,0	0,9	0,6	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
11500	1,1	1,0	0,5	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7
12500	1,3	1,3	0,2	0,5	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
14160	1,5	1,5	0,0	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,3

12.3.9. Géométrie – tronçon l'Amarée

Tableau 110. Synthèse de géométrie, tronçon l'Amarée

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	2,0	1,6	1,8	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	1,0	-0,1	0,4	0,4
Cote à 20m du pdav	m NGF	1,6	0,8	1,2	0,3
Cote de pied de digue amont	m NGF	1,3	0,1	0,5	0,5
Cote à 20m du pdam	m NGF	0,8	0,2	0,6	0,2
Hauteur de digue coté aval	m	1,7	0,9	1,3	0,4
Hauteur de digue côté amont	m	1,7	0,3	1,2	0,6
Fruit aval	L/V	15,9	1,6	4,8	6,2
Fruit amont	L/V	5,1	1,9	3,5	1,4
Largeur du ségonnal	m	102	0	40	39

12.3.10. Données hydrauliques - tronçon l'Amarée

Tableau 111. Données hydrauliques, tronçon l'Amarée

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	0,7	0,7	0,9	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,8
8500	0,9	0,8	0,7	0,9	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
9500	0,9	0,9	0,6	0,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
10500	0,9	0,9	0,6	0,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
11500	1,0	1,0	0,6	0,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,6
12500	1,3	1,3	0,3	0,5	0,1	0,1	0,0	0,0	0,4
14160	1,5	1,5	0,1	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,2

12.3.1. Etanchéité

Il n'y a pas de système d'étanchéité spécifique ; les matériaux de la digue remplissent ce rôle.

12.3.2. Filtration-Drainage

Il n'y a pas de filtre ou de drain installé dans la digue.

12.3.3. Stabilité

La stabilité est obtenue par la géométrie de la digue qui sur ce secteur possède des fruits de talus qui sont en moyenne supérieurs à 3.5/1 mais peuvent localement être à 1.45/1 et 1.55/1 respectivement pour les talus aval et amont.

12.3.4. Protection

Il n'y a pas de protection anti-fouisseur ; une protection contre l'affouillement en enrochement a été mis en place au niveau de la Fadaise et le long de l'Amarée.

12.3.5. Evacuation

Il n'y a pas de secteur résistant à la surverse sur la digue entre le Mas d'Icard et le Tiki. Les ouvrages sont calé à minima à la crue exceptionnelle majorée de 50cm à l'amont du PRG 334.5, mais pas à l'aval.

12.3.6. Sécurité

Le secteur n'est carrossable qu'à ses extrémités : en amont du bac et à l'Amarée. Pour le reste du secteur, la route est non loin de la digue (variable de 0 à 200m), coté zone protégée, des accès privés permettent de rejoindre la digue.

13.DIGUE DU TIKI (EMBOUCHURE, PRG19)

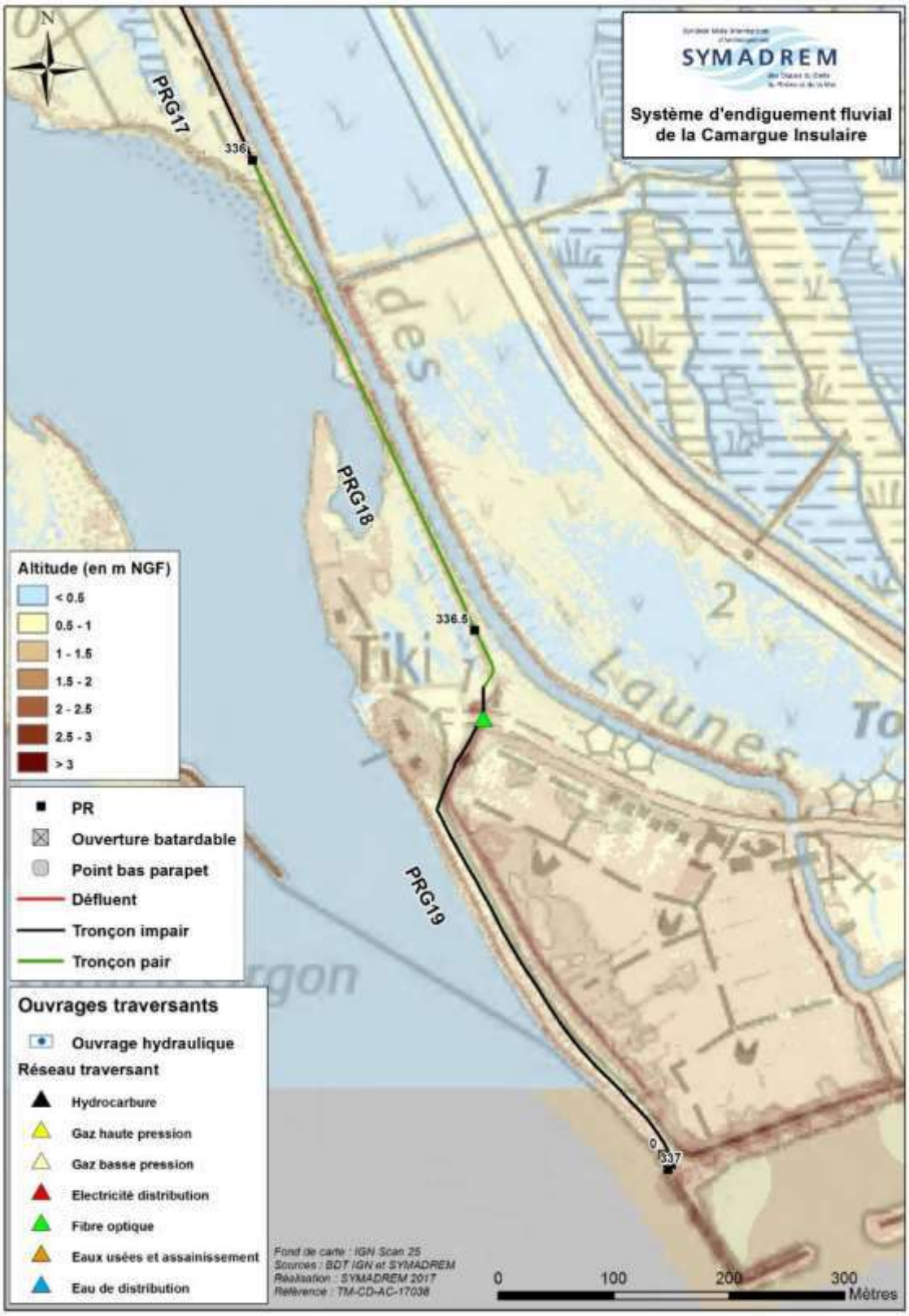


Figure 124. Plan de situation de l'Embouchure

13.1. PREAMBULE

La digue du Tiki est propriété du camping municipal « Le clos du Rhône ». Elle fait la jonction entre l'aval des digues (au PRG 336.5) et la digue à la mer ; afin de fermer la protection contre les venues d'eaux, liées autant aux crues du Rhône qu'aux tempêtes marines.

13.2. PRESENTATION GENERALE

13.2.1. Description historique

Les photos aériennes et plans du milieu du XXème siècle ne montrent pas de protection au niveau de cette zone. Le plus probable est que la protection de berge et la digue aient été érigées en même temps que le camping qui se trouve derrière. L'absence de protection ancienne s'explique par le fait que la zone soit globalement plus élevée que les terrains environnent.

13.2.2. Sectorisation

Ce secteur est court (500m) et homogène, il n'est pas recouper en sous-tronçons.

13.2.3. Description du tronçon

13.2.3.1. Raccordement

La jonction avec la digue est faite par la route menant au Tiki à l'entrée du parking, qui est rehaussée jusqu'au niveau des ouvrages de protection.

13.2.3.2. Description générale :

La digue est un merlon de sable limoneux longeant le camping.
La digue à une largeur en crête de l'ordre du mètre, qui n'est pas circulable ; en revanche il y a une large piste en pied coté fleuve et le camping en pied coté protégé, permettant un accès rapide.
Le fruit coté terre est d'environ 2/1, il est compris entre 2/1 et 3/1 coté fleuve.
Des enrochements sont présents en bordure de fleuve, le long du chemin ; ils sont calés plus haut que le chemin et plus haut que la crue millénale. Ils forment donc une première barrière contre les inondations. Lors de tempêtes marines il peut y avoir de légères entrées d'eau dues aux vagues mais pas de mise en charge de la digue.

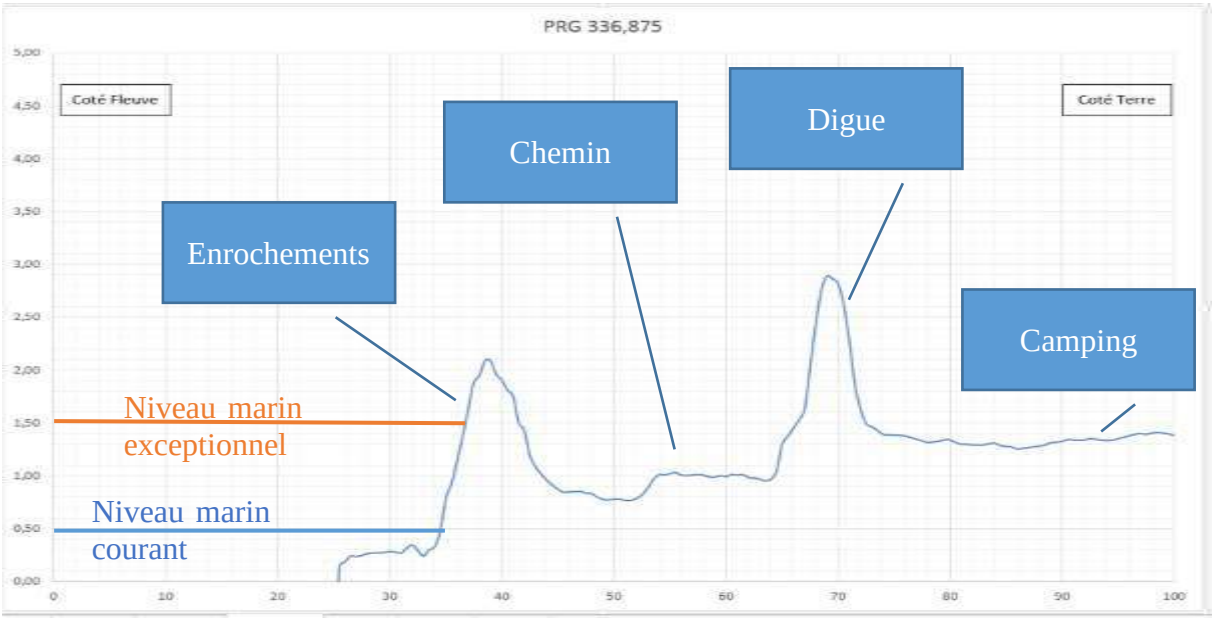


Figure 125. Coupe au PRG 336.875, représentative du tronçon digue du Tiki

Photo 111. Digue du Tiki depuis l'extrémité aval

13.2.4. Accessibilité

Le secteur est accessible par l'amont.

Tableau 112. Franchissements, Section Embouchure

Nom	GRD
parking	336.55

13.2.5. Ouvrages englobés

Il n'y a pas d'ouvrage traversant connu sur ce tronçon.

13.3. DECOMPOSITION FONCTIONNELLE

13.3.1. Géométrie

Tableau 113. Synthèse de géométrie, tronçon Embouchure

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	3,1	1,8	2,6	0,6
Cote de pied de digue aval	m NGF	1,7	1,4	1,5	0,1
Cote à 20m du pdav	m NGF	1,6	0,9	1,3	0,3
Cote de pied de digue amont	m NGF	1,6	1,0	1,3	0,3
Cote à 20m du pdam	m NGF	1,2	-1,8	0,3	1,4
Hauteur de digue coté aval	m	1,8	0,2	1,1	0,7
Hauteur de digue côté amont	m	1,9	0,2	1,3	0,8
Fruit aval	L/V	14,4	1,9	5,4	6,0
Fruit amont	L/V	27,3	2,1	9,0	12,2
Largeur du ségonnal	m	48	17	32	13

13.3.2. Données hydrauliques

Tableau 114. Données hydrauliques, tronçon Embouchure

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient digue		Gradient fondation		Revanche /Haval
	m NGF		m						
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7200	0,6	0,6	1,2	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
8500	0,8	0,8	1,0	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
9500	0,9	0,9	0,9	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
10500	0,9	0,9	0,9	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
11500	1,0	1,0	0,9	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
12500	1,3	1,3	0,5	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9
14160	1,5	1,5	0,3	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8

13.3.3. Etanchéité

Aucun élément n'a pour rôle l'étanchéité

13.3.4. Filtration-Drainage

Il n'y a pas de filtre ou de drain.

13.3.5. Stabilité

La stabilité est faite par la géométrie, ce merlon de faible hauteur présente des fruits de 1.9/1 et 2.1/1 au minimum, respectivement pour les talus aval et amont.

13.3.6. Protection

Une protection de berge en enrochement est présente, il n'y a par contre pas de protection anti-fouisseur.

13.3.7. Evacuation

Ce tronçon n'est pas résistant à la surverse ; la crête est calée en conséquence

13.3.8. Sécurité

Le merlon n'est pas carrossable, la circulation peut se faire par le camping (coté zone protégée) et hors crue par la piste présente entre les enrochements et le merlon.

Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT FLUVIAL CAMARGUE INSULAIRE

DOCUMENT B

CHAPITRE N°5.2 : DESCRIPTION DES OUVRAGES PROJETES

SANS OBJET

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT FLUVIAL CAMARGUE INSULAIRE

DOCUMENT B

CHAPITRE N°5.3 : IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES POTENTIELS DE DANGERS

SOMMAIRE

1 Ecoulements autour de la zone protégée 273
2 Identification et caractérisation des potentiels de dangers 274
3 Caractérisation des potentiels de danger 276
3.1 Hydrogramme résultant d'une brèche 277
3.2 Hydrogramme résultant d'un dysfonctionnement d'un ouvrage hydraulique traversant 279
3.3 Hydrogramme résultant d'une surverse contrôlée 280
4 Ecoulement pour les différents niveaux de protections 281

1 ECOULEMENTS AUTOUR DE LA ZONE PROTEGEE

La zone protégée du système d'endiguement fluvial Camargue Insulaire a la particularité d'être encadré à l'Est et à l'Ouest par le fleuve dont il assure la protection. Au Sud se trouve la mer.

Avant l'atteinte du niveau de protection, les écoulements qui se produisent autour de la zone protégée sont ceux du Rhône dans son lit mineur puis dans le lit endigué.
Le système d'endiguement fluvial n'ayant pas de rôle face aux submersions marines, lors de tempêtes il peut y avoir des écoulements marins le long de la limite sud de la zone protégée et pour des tempêtes plus importantes des entrées d'eau dans la zone protégée.

Les cours d'eau s'écoulant à proximité de la zone protégée sont séparés de cette dernière par les bras du Rhône.

2 IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES POTENTIELS DE DANGERS

Dans l'état initial (situation actuelle), les potentiels de dangers liés aux ouvrages du système d'endiguement résultent en crue:

- D'une probabilité élevée de rupture d'une partie de la digue (cas n°1), entraînant la formation d'une brèche dans la digue et libérant dans la plaine un volume plus ou moins important suivant l'extension de la partie rompue et de la durée de la crue ; cette rupture peut être provoquée par érosion interne dans le corps du remblai ou le long d'un ouvrage traversant ou par surverse.

  Compte tenu de la longueur de l'ouvrage, la rupture totale n'est pas à envisager. La rupture se traduit par la formation d'une brèche, de longueur limitée, et dont la localisation ne peut être fixée a priori de façon certaine.
- D'une probabilité non négligeable de dysfonctionnement ou d'une non fermeture d'une ou plusieurs vannes d'un ouvrage hydraulique traversant (cas n°3).

Dans l'état final après sécurisation de l'ensemble des ouvrages du système d'endiguement, ces deux potentiels de dangers deviendront très peu probables jusqu'à la crue exceptionnelle du Rhône.

Le potentiel de dangers viendra pour les crues supérieures au niveau de protection d'une surverse organisée et contrôlée (cas n°2) sur les tronçons de digues résistant à la surverse jusqu'à la crue exceptionnelle du Rhône.

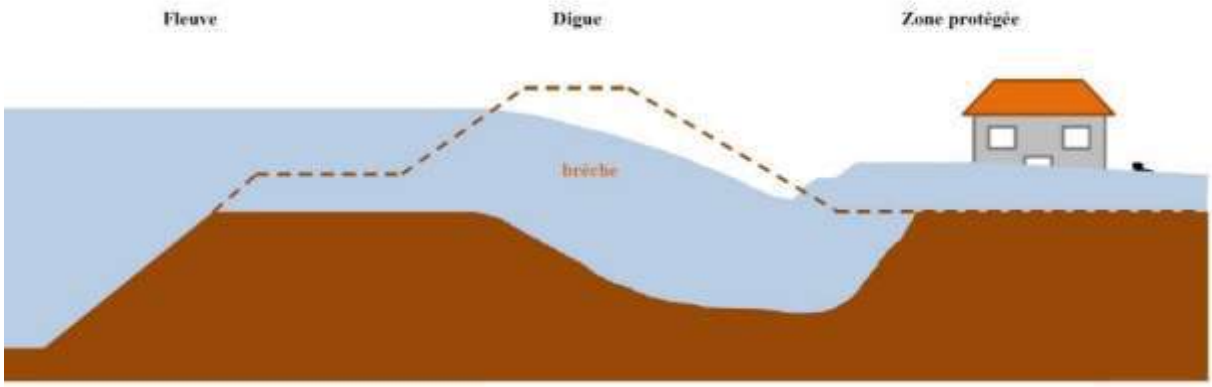


Figure 1. Cas n°1 : Inondation de la zone protégée par brèche dans la digue

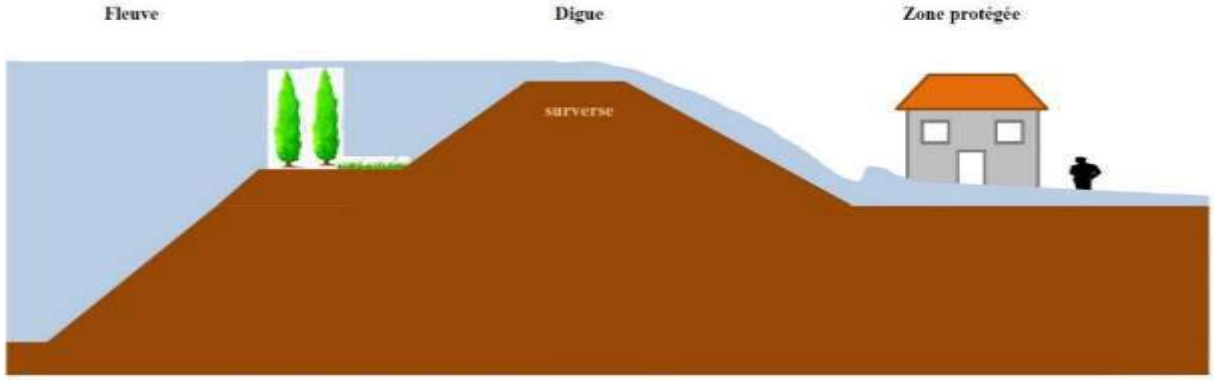


Figure 2. Cas n°2 : Inondation de la zone protégée par surverse (sans brèche) sur la digue

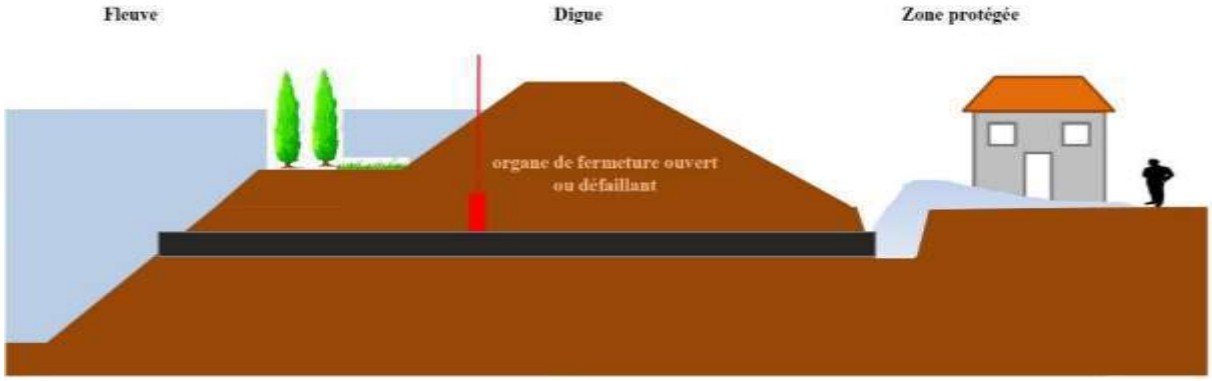


Figure 3. Cas n°3 : Inondation de la zone protégée par défaillance d'un ouvrage hydraulique traversant

3 CARACTERISATION DES POTENTIELS DE DANGER

Les potentiels de dangers se traduisent par des hydrogrammes se propageant dans la plaine.

Les hydrogrammes résultant de la surverse organisée ne dépendent que de la période de retour de la crue considérée.

Les hydrogrammes résultant des ruptures envisagées dépendent de plusieurs paramètres ayant une incidence directe sur leurs caractéristiques :

- niveau de crue,
- durée de la crue,
- mécanisme de rupture conduisant à la formation de la brèche,
- instant et vitesse d'ouverture de la brèche,
- largeur finale de la brèche.

3.1 HYDROGRAMME RESULTANT D'UNE BRECHE

Les hypothèses prises en compte pour les niveaux et durées de crue relativement aux crues génératrices de dangers sont justifiées au chapitre n°4 traitant des aléas naturels.

Les mécanismes de rupture considérés sont décrits au chapitre n°7 traitant de la caractérisation des mécanismes de rupture et des scénarios de brèche envisagés.

Les caractéristiques des brèches sont définies au chapitre n°8 traitant de la propagation des ondes de rupture. Ces dernières ont été définies dans l'état initial à partir de l'étude accidentologique (chapitre n°6) et dans l'état final de façon arbitraire à partir de l'état de l'art disponible.

La localisation des brèches a été fixée parfois au droit des zones à enjeux sans tenir compte de la probabilité de formation pour en mesurer les effets, soit au droit des secteurs comportant des probabilités de brèche très élevées.

La figure ci-dessous donne à titre d'illustration l'hydrogramme simulé d'une brèche dans le petit Rhône au niveau de Figares (PRG 298) dans l'état initial pour la crue 11500m^3/s.

La durée de l'hydrogramme par la brèche est de plus de 50h ; le débit de pointe est de près de 1300 m^3/s (soit la quasi intégralité du débit du Petit Rhône) et le volume de la brèche est supérieur à 110 Millions de m^3.

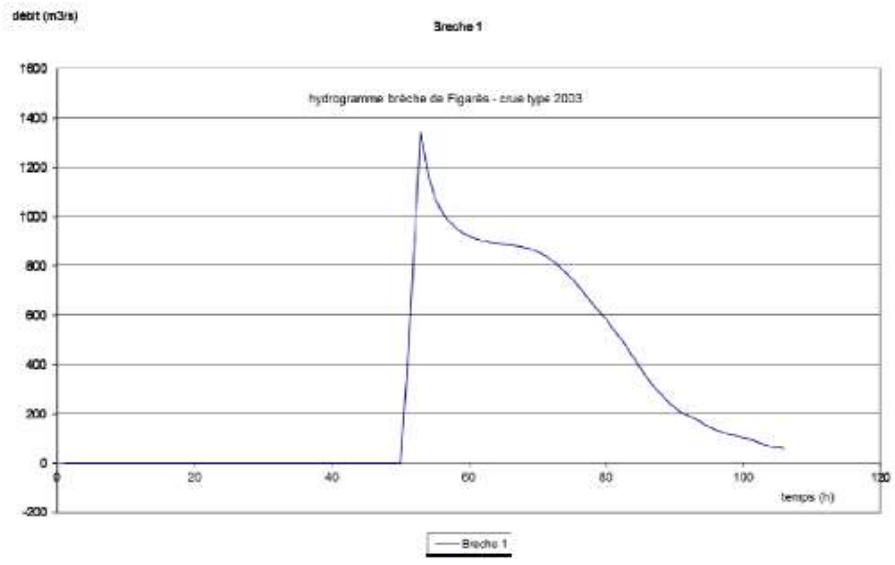


Figure 4. Hydrogramme de brèche au niveau de Figares – état initial

Les hauteurs d'eau résultant de ce type de scénario sont supérieures à 2 mètres dans une grande partie de la zone protégée.

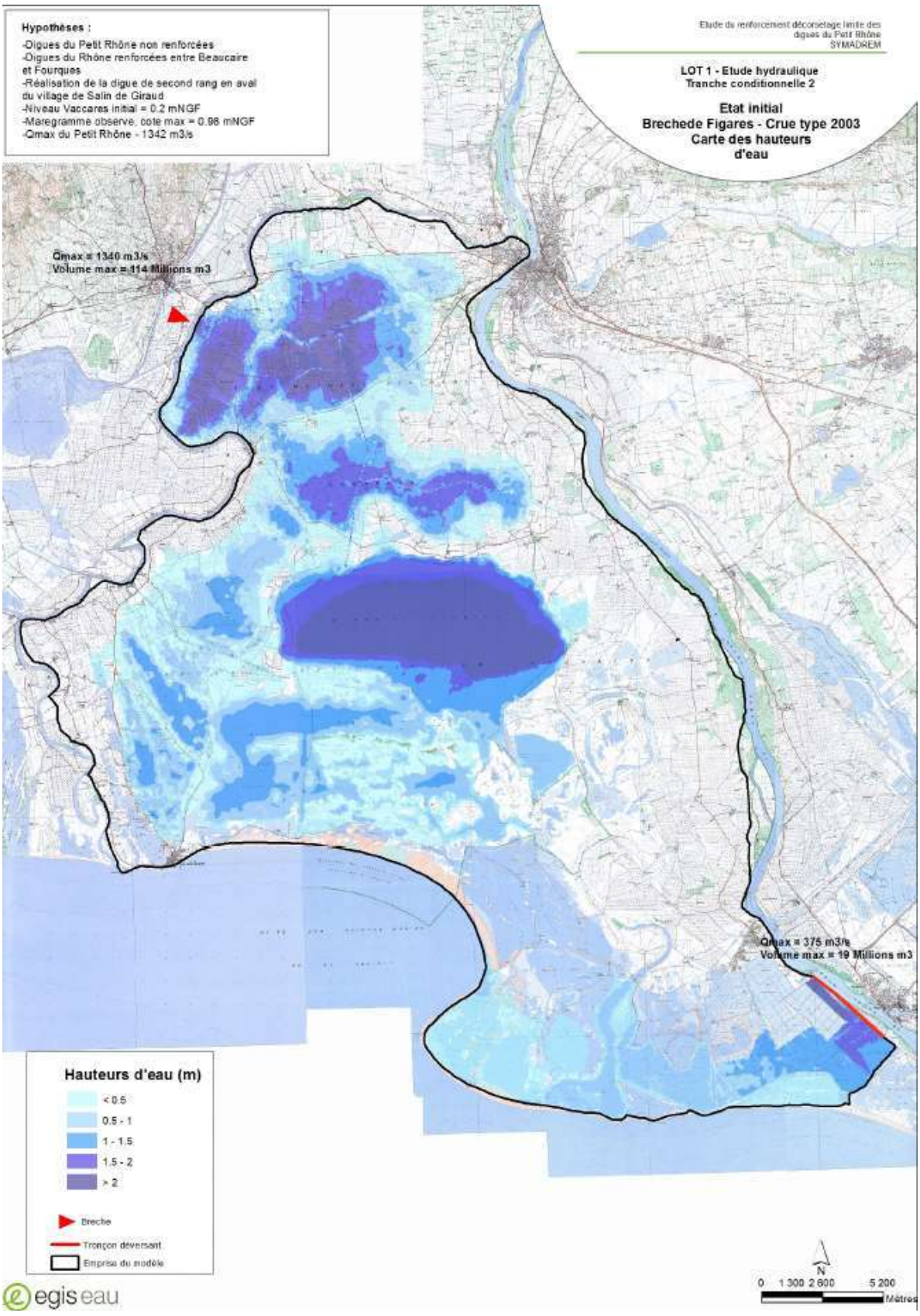


Figure 5. Hauteur d'eau résultant de la formation d'une brèche au niveau de Figares

3.2 HYDROGRAMME RESULTANT D'UN DYSFONCTIONNEMENT D'UN OUVRAGE HYDRAULIQUE TRAVERSANT

Dans le cas d'un dysfonctionnement des organes de fermeture d'un ouvrage hydraulique traversant ou d'un passage batardable, la libération d'eau est contrôlée par les dimensions de l'ouverture. Cette libération ne présente un danger que lorsqu'elle est soudaine, sinon les entrées d'eau sont progressives.

Les vitesses peuvent atteindre 6 à 7 m/s. La probabilité d'intervention consistant à boucher les ouvertures par la mise en œuvre de big-bags ou gros enrochements est très élevée comme le montre l'étude accidentologique.

L'ouverture au niveau du batardeau le plus conséquent (porte des curatiers) est plus importante que pour les ouvrages traversants ; c'est ce dernier qui est étudié.
Le batardeau a une largeur de 5 m. La hauteur de charge pour la crue exceptionnelle est de 1,9 m. Le débit maximum calculé suivant une formule de seuil est estimé à 17 m3/s. La vitesse critique (passage d'un écoulement fluvial à torrentiel) est estimé à 3,25 m/s et la vitesse maximum en aval en supposant un tirant d'eau nul à environ 5,5 m/s. Ces caractéristiques hydrauliques sont similaires à la brèche de Ventabren de novembre 2016 (Cf. chapitre 6 de l'étude de dangers). L'intervention au milieu de la Camargue avait débuté 1 heure après l'observation et s'est achevée 3 heures après le démarrage. En estimant à 1h30, la durée d'entrée d'eau massive, on estime à environ 100 000 m3, le volume libéré dans la zone protégée, ce qui équivaut pour le centre du quartier Trinquetaille à une hauteur moyenne maximale de 40 cm.

Le volume d'eau même sans intervention humaine est très sensiblement moindre à celui résultant d'une brèche.

3.3 HYDROGRAMME RESULTANT D'UNE SURVERSE CONTROLEE

La lame d'eau déversante est contrôlée par la cote des digues résistantes à la surverse.

L'avantage de cette solution est que les hauteurs d'eau dans la zone protégée et leur occurrence sont prévisibles mais qu'une fois l'ensemble du système sécurisé.

Il n'y a pas actuellement de zones résistantes à la surverse dans le système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire ». Les travaux, en phase AVP, qui seront réalisés prochainement prévoient la mise en place d'une digue résistante à la surverse au niveau de Figarès (PRG) et une au niveau des Salins (GRD).

4 ECOULEMENT POUR LES DIFFERENTS NIVEAUX DE PROTECTIONS

Etant donné l'étendue du système d'endiguement il y a des niveaux de protections différents le long des ouvrages et par conséquent des niveaux de protections variés dans la zone protégée, qui a été découpée en sous-zone protégée (voir chapitre 8).

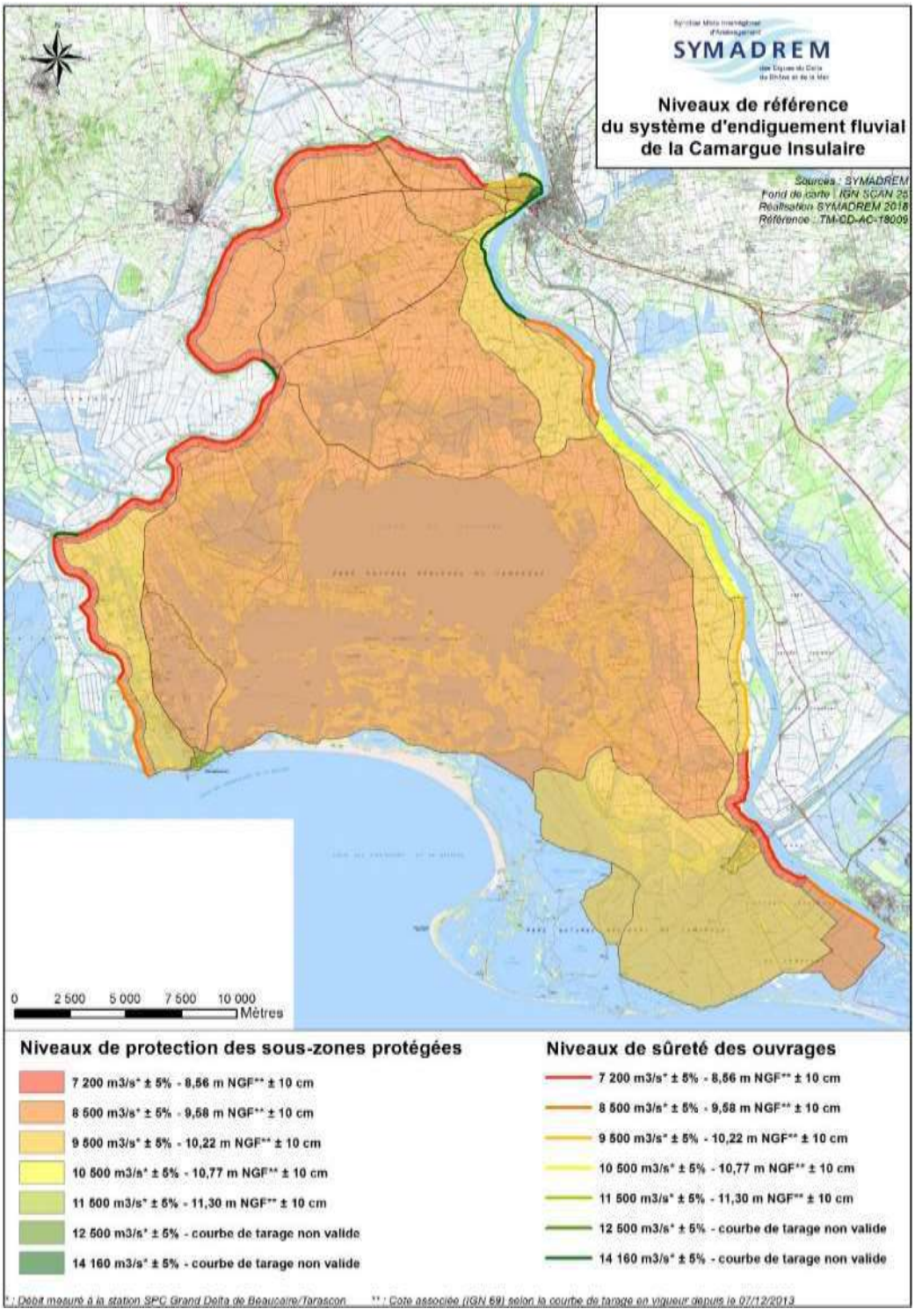


Figure 6. Niveaux de protection des sous- zones protégées

Une fois les premiers niveaux de protection dépassés la zone restant protégée diminue progressivement, passant de l'intégralité de la zone protégée soit 657km² pour un débit de 7200m^3/s, mesuré à la station de Beaucaire/Tarascon, à une partie du quartier de Trinquetaille (0.26 km²) pour un débit de 14160m^3/s. Les écoulements provenant d'une défaillance d'un ouvrage traversant sont localisés et peu dangereux ; ce sont ceux dus aux brèches et surverses qui sont analysés ci-dessous.

Au-delà de 7 200m^3/s, la probabilité de brèche peut dépasser les 5% sur certains secteurs ; des écoulements supplémentaires peuvent se produire dans les bandes de sécurité des digues.

Au-delà de 8 500m^3/s, la probabilité de brèche peut dépasser les 5% sur plus de la moitié du linéaire du système d'endiguement. En cas de brèche sur la partie au Sud d'Albaron, des écoulements peuvent se produire, en restant dans les bandes de sécurité. Si la brèche survient plus en amont, où la charge est plus importante, des écoulements peuvent se produire dans la majeure partie de la Camargue insulaire ; la zone protégée résultante se trouve divisée entre le couloir Trinquetaille / Salin-de-Giraud et la bande Sénebier / Saintes-Maries-de-la-Mer.

Au-delà de 9 500m^3/s, la probabilité de brèche peut dépasser les 5% sur la majeure partie du linéaire et les premiers déversements peuvent se produire au niveau de la route de Chamone (GRD 315.08). Des écoulements sont également possibles, en cas de brèche, sur la quasi-intégralité de la zone protégée initiale, seuls le centre urbain de Trinquetaille (le long des quais et des papeteries Etienne), celui des Saintes-Maries-de-la-Mer et la bande de sécurité longeant la digue du grand Rhône rive droite entre Beaujeu et la Commanderie restent protégés.

Au-delà de 10 500m^3/s, seuls les digues récemment confortées présentent moins de 5% de brèche. Des surverses localisées peuvent se produire en amont du pont de Cavales (PRG 294.5), au niveau de Figarès (PRG 298-299) et autour de Salin de Giraud (GRD 313.5 à GRD 319.5). Des écoulements important sont possibles autour des 2 zones restant protégées que sont le centre-ville des Saintes-Maries-de-la-Mer et le quartier de Trinquetaille proche des quais.

Au-delà de 11 500m^3/s, des écoulements par surverse se produisent sur le petit Rhône amont qui, même sans brèche s'étaleront sur une grande partie de la Camargue insulaire. Le quartier de Trinquetaille proche des quais est le seul encore protégé, il l'est à minima jusqu'à un débit de 14160m^3/s.

Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DES SYSTEMES D'ENDIGUEMENT FLUVIAUX DU DELTA DU RHONE

DOCUMENT B

CHAPITRE N°6 : RETOUR D'EXPERIENCE CONCERNANT LES ZONES PROTEGEES ET LES SYSTEMES D'ENDIGUEMENT

SOMMAIRE

1 Généralités 8
2 Bilan des incidents et accidents survenus sur les ouvrages 10
3 Conséquences des brèches sur les zones protégées 17
4 Crue de Novembre 1840 28
4.1 Limnigramme et instant de formation des principales brèches 28
4.2 Propagation de la crue dans la zone protégée et dommages occasionnés 29
4.3 Laisses de crues dans la zone protégée et champs d'inondation 34
4.4 Bilan des brèches (largeurs, débits et volumes de déversement) 35
4.5 Brèches digue de la Montagnette 39
4.6 GRG 286,7 - Brèche de Prend-té-Garde 42
4.7 RD 269.1 - Brèche de l'abattoir 45
4.8 RD 271.25 - Brèche de Saint Peyre 48
4.9 RD 272.0 et RD 272.5 - Brèches de Saint Denis 49
4.10 RD 273.3 - Brèche du Mas de Ranguy 51
4.11 RD 277,9 - Brèche du mas de Raousset 52
4.12 RD 278.4 - Brèche de la Cine 53
4.13 Brèche vis-à-vis de l'épi de Fourques 54
4.14 PRD 284.2 à 282.8 – « Brèche » de la Tourette 56
4.15 PRD 289.0 – « Brèche » du mas de Laborde 57
4.16 PRD 290.4 et PRD 291.3 – Petite et Grande « Brèche » du mas de Grand Cabane . 59
4.17 PRD 293.1 – Brèche « par retour » du Mas de Bertaud 60
4.18 PRD 319.2 et PRD 321.2 - Brèches « par retour » amont et aval du mas de Liviers 61
4.19 PRG 302.3 - Brèche de Lauricet 62
5 Crue d'octobre 1841 64
5.1 Déroulement et bilan de la crue 64
5.2 Bilan des brèches 66
5.3 Rd - Brèches de l'Abattoir et de Saint Denis 67
5.4 GRG Départs de brèche du Mas de la Ville et du Grand Mollégès 68
6 Crue de novembre 1843 70
6.1 Déroulement de la crue 70
6.2 Crue novembre 1843 – Bilan général des brèches 71
7 Crue d'octobre 1846 73
8 Crue de mai 1856 74
8.1 Bilan général des brèches 74
8.2 Bilan des laisses de crue dans la zone protégée 75

8.3 RG 264 à 265.5 - Brèches dans la digue de la montagnette 77
8.4 RD - Brèche de Saint Peyre 82
8.5 Défluent - Brèche de Trinquetaille 84
8.6 PRG 294,7 à 295 - Brèche de Rigodon 86
8.7 Départ de brèche de Cazeneuve 88
8.8 Brèche ou départ de brèche de Mas de Rey 89
8.9 Départ de brèche de Mas Combet 90
8.10 Départ de brèche de Mas de Brun et Mas d'eybrun 90
8.11 Brèche ou départ de brèche de la Triquette 91
8.12 Brèche ou départ de brèche de Passerons 93
8.13 Brèche ou départ de brèche de Montlong 94
8.14 Brèche ou départ de brèche de Peaudure 94
8.15 Brèches ou départs de brèche de Chartrousse et Jacquières 95
8.16 Brèche de Barcarin 95
8.17 Brèche ou départ de brèche de Galignan 96
8.18 Brèche ou départ de brèche de Parade 97
9 Crue de 1872 99
10 Crue d'octobre 1993 101
10.1 Déroulement de la crue 101
10.2 Bilan des brèches 101
10.3 Bilan de l'inondation du Rhône 104
10.4 PRG 289.76 – Départ de Brèche Molin 106
10.5 PRG 291.50 – Départ de brèche de Grille Léautaud 108
10.6 PRG 298.60 - Brèche de Figarès 110
10.7 PRG 299.90 - Brèche de la Galante 116
10.8 PRG 301.0 - Brèche de Casebrune 120
10.9 PRG 304.40 - Brèche de Lauricet 123
10.10 PRG 305.650/305.700/305.800 – Départs de brèches (3) du mas de la vigne 127
10.11 GRD 290.88 – Départ de brèche du mas neuf de Sansouires 128
10.12 GRD 315.350 – Départ de brèche du Petit Peloux 129
10.13 GRG 299.100/299.150 – Départs de brèches (2) de l'Attilon 130
10.14 GRG 309.90 – Départ de brèche de tour de parade 131
11 Crue de janvier 1994 132
11.1 Déroulement de la crue 132
11.2 Bilan des brèches et des désordres 132
11.3 Bilan de l'inondation du Rhône 132
11.4 PRD 288.16 - Brèche de Beaumont 135

11.4.1 Brèche de Lauricet 137
11.5 Départs de brèche et autres désordres en rive gauche 139
11.6 PRD 289.0 - Intervention d'urgence Mas Laborde 139
12 Crue de Novembre 1994 141
13 Crue de novembre 1996 142
13.1 Bilan général des brèches et départs de brèches 142
13.2 PRD 314.65 – Départ de brèche du Mas Neuf de Capette 142
13.3 PRD 305 à 309 Désordres en rive droite du Petit Rhône 145
13.4 PRG 286.9 - Fontis en rive gauche du Petit Rhône 145
14 Crue de septembre 2002 147
15 Crue de novembre 2002 149
15.1 Bilan général des brèches 151
15.2 Bilan général des désordres 151
15.3 Brèche de Claire Farine 152
15.4 Surverse 157
15.4.1 PRD 322,41 à 324,54 - Aval Sylvéréal Grand Abbaye 157
15.4.2 PRD 312,33 - Bel Air 161
15.4.3 PRG 326.79 - Mas de Badet, Cabannes de Cambon 162
15.4.4 PRD 325 - Mas du juge 162
15.4.5 GRG 322.0 à 322.2 - Port-Saint-Louis-du-Rhône Quartier Vauban 163
15.5 Infiltrations eaux chargées en matériaux fins 164
15.5.1 PRG 283.95 à 284.13 - Affaissement de la crête Mas de Vert Amont 165
15.5.2 PRG 285.74 à 285.88 – Infiltrations Mas d'Yvan 166
15.5.3 PRG 285.97 à 286.18 – Infiltrations Mas Médaille 167
15.5.4 PRG 293.51 à 293.97 - Beaujeau de Castres 168
15.5.5 PRG 299.81 - Brèche de la Galante de 1993 169
15.5.6 PRG 304.36 - Brèche de Lauricet de 1993 et 1994 170
15.5.7 PRG 307,0 et 308,46 – Amont et Aval d'Albaron 171
15.5.8 PRG 312.52, 312.70 et 314.05 - Eymini de Boismeau et Mas de Ventabren 172
15.5.9 PRG 316.24 - Grandes Cabannes du Vaccarès 175
15.5.10 GRD 308.89 à GRD 310.50 - Mas d'Auphan et de Grifeuille 178
15.5.11 GRD 315.27 à 315.34 - Chamone 179
15.6 Infiltrations eaux claires 180
15.6.1 PRG 282.25 à PRG 282.29 - Trou de Fourques 181
15.6.2 PRG 301.03 - Station de pompage de Casebrune 182
15.6.3 PRG 305.63 – Mas de la vigne 183
15.6.4 GRD 313.93 à GRD 314.09 - Mas de l'Amérique 183

15.7 Affouillement externe 184
15.7.1 PRD 322.74 – Mas des Mantilles 185
15.7.2 PRD 327.99 à PRD 328.13 - Pin Fourcat 186
15.7.3 GRD 315.89 - Eglise de Barcarin 187
15.7.4 GRD 320 à GRD 321.86 - L'esquineau 188
15.8 Glissement 189
15.8.1 GRG 283.7 – Embouquement Ecluse d'Arles 189
15.9 Défaillance des ouvrages traversants 191
15.9.1 PRG 282.43 - Mas de Cazeneuve 192
15.9.2 PRG 286.85 - Station de Pompage de la Commanderette ou « Petite Corège » 193
15.9.3 PRG 317.25 - Mas Duroure 194
15.9.4 GRG 316.70 - Bac de Barcarin rive gauche 195
15.9.5 GRD 301.4 - Tour du Cazeau 195
16 Crue de décembre 2003 196
16.1 Bilan général des brèches causées lors de la crue de décembre 2003 197
16.2 Inondation du Rhône causée par ces brèches 199
16.3 Bilan général des autres désordres 202
16.4 Surverse 206
16.4.1 RD277.30 - Mas de Maillan 206
16.4.2 PRD 303.0 à PRD 304.5 - Aval La Fosse 207
16.4.3 PRD 322.41 à PRD 324.54 - Aval Sylvéréal 207
16.4.4 PRG 298.20 à PRD 298.80 - Figarès 209
16.4.5 GRD 315.00 à GRD 315.18 - Chamone 210
16.4.6 GRD 292.00 - Mas millet 210
16.5 Infiltrations d'eaux chargées en fines et affaissement de digues causés par écoulements internes 211
16.5.1 PRG 284.97 à 285.17 et 285.74 à 285.88 et 285.97 à 286.18 – Infiltrations du Mas de Vert au Mas Médaille 213
16.5.2 PRG 293.51 à 293.97 – Infiltrations et fissuration Beaujeu de Castres 215
16.5.3 PRG 298.70 à 298.81 – Amorce renard transition brèche de Figarès 215
16.5.4 GRD 292.47 – terriers de blaireaux traversants avec eau affleurante en sortie côté terre 216
16.5.5 GRD 308.89 et 311.22 – terriers de blaireaux traversants avec eau affleurante en sortie côté terre 216
16.5.6 GRD 315.27 à 315.34 – Terriers blaireaux Chamone 216
16.5.7 GRG 287.01 – Affaissement Mas de la vigne 217
16.5.8 GRG 292.30 – Infiltrations terrier de lapins 219

16.5.9 GRG 303.25 et 304.65 à 305.30 – Infiltrations Mas Thibert et Mas de la Forêt 220
16.5.10 GRG 311.75 – Infiltrations Grand Porcelette 222
16.5.11 GRG 313.50 à 313.80 – Infiltrations Mas Antonelle 223
16.5.12 GRG 318.00 à 320.00 223
16.6 Infiltrations d'eaux claires 224
16.6.1 PRG 281.00 – Infiltration Trou de Fourques 225
16.6.2 PRG 323.02 – Infiltrations Mas de Jonquière 225
16.6.3 PRG 324.76 – Infiltrations Mas d'Astouin 226
16.6.4 PRG 329.36 – Infiltrations Mas d'Icard 226
16.6.5 GRG 284.0 – Infiltrations Patio Barriol (eaux claires) 226
16.6.6 GRG 312.50 à 313.50 – Infiltrations Grand Passon 227
16.6.7 GRG 320.75 à 321.25 et 321.60 à 321.75 – Infiltrations Vauban 228
16.7 Affouillement externe et glissement de berges 229
16.7.1 PRD 302.30 à PRD 302.56 – La Fosse 230
16.7.2 PRD 313.00 à PRD 313.05 – Les Pradeaux 232
16.7.3 PRG 285.92 à 285.97 – Glissement de berges – Mas Médaille 235
16.7.4 PRG 295.20 à 295.29 – Erosion de berge Rigaudon sur 150 m 237
16.7.5 PRG 330.43 à 330.52 – Affouillement Fadaise 240
16.7.6 GRD 315 et 315.89 – Erosion externe Canal du Japon et Eglise de Barcarin . 242
16.7.7 Affouillement externe au droit du Mas Antonelle et lieu-dit du Grand Peloux 246
16.7.8 Bac de Barcarin (GRG 316.70) 248
16.8 Glissement de talus 249
16.9 Défaillance ouvrages traversants 250
16.9.1 PRG 282.43 – Prise d'eau fuyarde Mas de Cazeneuve 251
16.9.2 PRG 287.37 – Prise d'eau du Mas d'Augery 251
16.9.3 PRG 295.14 – Château de Saliers 252
16.9.4 PRG 295.71 – Prise d'eau de Saliers 252
16.9.5 PRG 295.82– Prise d'eau Mas de la Vinasse 253
16.9.6 PRG 316.42 - Erosion le long d'un OHT Mas de la Cure (Château d'Avignon) 253
16.9.7 PRG 319.19 - Infiltration en pied d'ouvrage Sénebier 254
16.9.8 PRG 323.76 – Prise d'eau Mas d'Astouin 254
16.9.9 PRG 326.67 - Prise d'eau fuyarde Badet 255
16.9.10 GRD 294.01 et GRD 294.46 – OHT du Mas Millet 255
16.10 GRD 297.97 - L'Armellière – Départ de brèches 256
16.11 PRD 309,5 - Brèche de Claire Farine 258
16.11.1 Analyse du cahier des charges 260

16.11.2 Analyse technique : Examen du mode de rupture par surverse 261
16.11.3 Analyse technique - examen du mode de rupture par affouillement externe 262
16.11.4 Analyse technique - examen du mode de rupture par glissement 264
16.11.5 Analyse technique - examen du mode de rupture par érosion interne 265
16.11.6 Analyse technique - conclusion 268
17 Crue de novembre 2016 270
17.1 Bilan général des brèches 270
17.2 PRG 314.2 - Brèche du Mas de Ventabren 271
17.3 Terrier de fouisseur 272
17.4 Infiltrations d'eau claires 272
17.5 Défaillance ouvrage traversant 274
17.6 Surverse 276

Ce Chapitre est commun aux Etudes de dangers des systèmes d'endiguement fluviaux du delta du Rhône : « Rive Gauche », « Camargue Insulaire » et « Rive Droite ».

1 GENERALITES

Les définitions des termes : Rupture, Défaillance, Désordres, Accident, Incident, Brèche, Départ de brèche figurent dans le glossaire en annexe.

Les brèches, départs de brèche et désordres ont été localisés et analysés à partir des références « accidentologie » figurant en annexe.

La localisation des désordres et brèches anciennes (hors période 1993-2016) a été faite, soit à partir des plans d'archives pour les plus grandes brèches, soit à partir des documents d'archives qui évoquent ces brèches, notamment par des lieux-dits et par le croisement avec les plans des ponts et chaussées de 1876 [H0003] qui font état localement de la digue en perré, ce qui était le plus souvent la technique de réparation utilisée à l'époque. Un exemple est donné ci-dessous en aval d'Albaron, où les archives font état d'une brèche ou d'un départ de brèche au droit du mas de Combet. L'examen des plans des Ponts et Chaussées de 1876 permet d'identifier un tronçon de digue perreyé sur la face amont de 124 m (IRP), ce qui laisse supposer que la brèche ou le départ de brèche se sont produits à cet endroit.

Figure 1. Brèche du Fer à Cheval à Beaucaire et brèche ou départ de brèche à Combet en 1856

Tableau 1. Typologie des brèches

Code	Typologie des brèches
B1	Surverse
B2	Infiltration (terminologie Ponts et Chaussées utilisée au XIX^{ème} siècle
B3	Erosion de conduit dans un terrier
B4	Erosion de conduit le long d'un ouvrage traversant

Tableau 2. Typologie des désordres

Code	Typologie des désordres
D1	Venue d'eau claire en pied de digue / quai côté terre
D2	Venue d'eau boueuse en pied de digue / quai côté terre
D3	Venue d'eau par terriers d'animaux fouisseurs
D4	Venue d'eau autour de canalisations et ouvrages hydrauliques traversants
D5	Fuite au droit de vannes ou d'ouvrages hydrauliques traversants
D6	Surverse de la digue / quai
D7	Surverse avec érosion de la partie supérieure de la digue/quai et du talus côté terre
D8	Affaissement localisé dans le talus côté terre
D9	Affaissement ponctuel en partie supérieure de la digue/quai
D10	Affaissement localisé dans le talus côté fleuve (partie restant visible)
D11	Erosion du talus côté fleuve (partie restant visible)
D12	Fissure dans le talus côté fleuve
D13	Fissure dans le talus côté terre
D14	Fissure longitudinale en partie supérieure de la digue/quai
D15	Arbre couché dont le pied a provoqué une cavité dans les talus côté fleuve et/ou côté terre
D16	Désorganisation de moellons, fissures dans les perrés et ouvrages maçonnés
D17	Autres

Le retour d'expérience concernant la zone protégée et le système d'endiguement est découpé en plusieurs chapitres :

- un chapitre relatif au bilan des incidents et accidents survenus en crues sur les ouvrages des systèmes d'endiguement fluviaux du delta du Rhône et le choix des scénarios de défaillance mis en évidence par l'étude accidentologique, retenus pour l'analyse de risques ;
- un chapitre relatif aux conséquences des brèches causées dans les systèmes d'endiguement sur les zones protégées associées à ces systèmes d'endiguement ;
- quatorze chapitres relatifs aux 14 crues étudiées listant et analysant, quand les informations étaient disponibles, de manière détaillée les incidents (désordres) et accidents (départs de brèche et brèches) occasionnés lors de ces événements.

2 BILAN DES INCIDENTS ET ACCIDENTS SURVENUS SUR LES OUVRAGES

En ce qui concerne le bilan des incidents et accidents survenus sur les ouvrages en périodes de crues et plus particulièrement sur les désordres, départs de brèche et brèches, l'analyse a été menée sur 14 crues couvrant la période 1840 – 2016. Le bilan des brèches et départs de brèche par crue analysée figure ci-dessous :

Tableau 3. Bilan quantitatif des désordres, départs de brèche et brèche par crue analysée

Crue	Brèche (Nb.)	Départ de brèche (Nb)	Désordre (Nb.)
Novembre 1840	18	4	Non connu
Novembre 1841	8	2	Non connu
Novembre 1843	10	17	Non connu
Octobre 1846	0	2	Non connu
Mai 1856	9	14	Non connu
Octobre 1872	0	1	Non connu
Octobre 1993	4	10	Non connu
Janvier 1994	2	2	Non connu
Novembre 1994	0	0	8
Novembre 1996	0	1	1
Septembre 2002	0	1	5
Novembre 2002	1	1	32
Décembre 2003	4	2	68
Novembre 2016	1	0	15

Pour l'analyse, nous avons considéré d'une part la période 1840 – 2016 et d'autre part la période plus récente s'étalant de 1993 à 2016.

Le recensement des ruptures dans les barrages en remblai réalisé par la CIGB donne les statistiques suivantes :

Tableau 4. statistique des ruptures de barrages en remblai (CIGB 2015 d'après Foster § Al.)

Mécanisme de rupture	Erosion		Glissement	
Mode de rupture	Surverse	Erosion interne	Instabilité statique	Instabilité sismique
Statistiques	48 %	46 %	4 %	2 %
	94 %		6 %	

L'étude accidentologique sur les brèches et départs de brèches dans les digues du SYMADREM ainsi que sur les désordres/incidents observés lors des crues récentes (1993 à 2016), donne une tendance similaire avec 100 % des brèches et des départs de brèche dus à des phénomènes d'érosion répartis comme suit :

- Brèche par surverse : 33 % (période 1840-2016) et 25 % (période 1993-2016)
- Brèche par érosion interne : 67 % (période 1840-2016) et 75 % (période 1993-2016)

L'absence de brèche par glissement de talus sous sollicitation hydrostatique ou sismique s'explique pour le premier cas par le caractère transitoire des crues, qui compte tenu de la perméabilité des sols en place, n'ont pas le temps de saturer le corps de digue et pour le deuxième cas par la très faible probabilité d'occurrence d'un séisme concomitamment avec une crue. Des glissements se sont bien produits, mais sans atteindre la crête et sans engendrer de départ de brèche. Ils ont souvent été causés par l'initiation d'une fuite localisée dans la digue ou la conséquence d'un raidissement de talus suite à un affouillement en pied de digue.

Certaines brèches par érosion interne restent non élucidées, sur le mode de rupture initiateur. Elles représentent 8 % des cas (période 1993-2016).

L'étude accidentologique a montré que les brèches ont été initiées, soit par surverse, soit par érosion de conduit de manière sûre. Des cas liées à l'érosion régressive sont également pressenties en ce qui concerne les brèches de la crue de mai 1856, sans en être vraiment certains.

L'étude accidentologique a également montré que l'affouillement externe pouvait être une source de désordre, mais sans conduire à la formation de brèche.

Aucun cas de brèches ou départs de brèches liés au glissement en masse n'a été identifié comme mécanisme d'initiation. Les seuls cas sont le résultat d'infiltration ou d'affouillement externe.

La plupart des désordres sont occasionnés sur les secteurs proches du fleuve (largeur < 20 mètres) ou dans les secteurs où des paléo-chenaux sont connus ou pressentis.

Sur la période s'étalant de la crue de novembre 1840 à celle de novembre 2016, on recense au total 57 brèches, 57 départs de brèches et 3 brèches par retour du fleuve dans son lit.

La ventilation par initiateur de rupture figure ci-dessous. Si on ne prend en compte que les brèches (donc ayant donné lieu à libération d'eau dans la zone protégée), elles sont au nombre de 57. 33 % ont été initiées par la surverse et 67 % par érosion interne.
Les brèches par infiltrations, qui est la terminologie utilisée au XIX^{ème} siècle pour l'érosion interne, représentent 51 % des brèches. Si on compare avec l'époque récente, il est très probable qu'elle soit due à l'érosion de conduit dans un terrier ou le long de d'un ouvrage traversant, mais l'érosion régressive n'est pas à écarter.

Si on ajoute les départs de brèche et les brèches par retour du fleuve dans son lit, on dénombre au total **117 brèches et départs de brèche en 156 ans**. La part des brèches et départs de brèche par surverse passe de 33 à 18 %. On note quelques départs de brèches par affouillement externe (7). Ce mode de rupture n'a engendré aucune brèche totale. On notera qu'aucun départ de brèche ou de brèche ne sont imputés au glissement talus terre ou talus

fleuve. Des glissements ont été occasionnés, souvent à l'origine d'infiltrations localisées mais qui n'ont donné lieu qu'à des glissements du talus n'allant pas jusqu'à la crête de l'ouvrage, ce qui ne permet pas de les qualifier de départs de brèche.

Tableau 5. Période 1840/2016 – Bilan brèches et départs de brèche par initiateur de rupture

Initiateur de la brèche	**Brèches**			**Brèches Départs de brèches Brèches par retour**		
	Nb	**%**		**Nb**	**%**	
Surverse	19	33	33	21	18	18
Infiltrations (term. XIX^{ème} siècle)	29	51	67	65	55	76
Erosion de conduit dans un terrier	6	10		17	15	
Erosion de conduit le long d'un ouvrage traversant	2	4		6	5	
Erosion interne - autre mode de rupture	1	2		1	1	
Affouillement externe	0	0	0	7	6	6
Glissement talus côté fleuve	0	0	0	0	0	0
Glissement talus côté terre	0			0		
TOTAL	57	100		117	100	

Sur la période s'étalant de la crue d'octobre 1993 à celle de novembre 2016, on recense 29 brèches et départs de brèche :

- 12 brèches,
- 17 départs brèches,
- aucune brèche par retour du fleuve dans son lit.

Le bilan des brèches, départs de brèche par initiateur de rupture, figure ci-après. On constate que 25 % des brèches ont été initiées par la surverse et 75 % par érosion interne. Cette proportion passe à 17 % / 83 % en incluant les départs de brèche. Les brèches par érosion de conduit dans des terriers d'animaux fouisseurs représentent 50 % du total des brèches. En incluant les départs de brèches, cette proportion passe à 59 %.

Tableau 6. Période 1993/2016 – Bilan brèches et départs de brèche par initiateur de rupture

Initiateur de la brèche	Brèches totales			Brèches et Départs de brèche		
	Nb	%		Nb	%	
Surverse	3	25	25	5	17	17
Erosion de conduit dans un terrier	6	50	75	17	59	83
Erosion de conduit le long d'un ouvrage traversant	2	17		6	21	
Erosion interne - autre mode de rupture	1	8		1	3	
Affouillement externe	0	0	0	0	0	0
Glissement talus côté fleuve	0	0	0	0	0	0
Glissement talus côté terre	0			0		
TOTAL	12	100		29	100	

L'analyse menée sur les désordres recensés sur les crues importantes (période de retour ≥ 10 ans) récentes (1993-2016) (Cf. tableau ci-après) suit la même tendance.

38 % des désordres proviennent de l'érosion interne, qui demeure l'initiateur privilégié. Plus de la moitié concerne des désordres liés aux fouisseurs.

12 % des désordres concernent des surverses ou des limites de surverse. Les 7 surverses constatées sur des points bas localisés ont donné lieu à des interventions d'urgence réalisées avec succès. 7 surverses, correspondant à des dépassements de cote d'ouvrage, n'ont pas donné lieu à brèche. Il s'agit notamment des surverses observées sur un linéaire de 2 km en partie aval du delta. La faible hauteur des digues à cet endroit (2 m max), la faible lame d'eau (5 cm sur 2 km ; 20 cm localement), malgré une durée de déversement d'une vingtaine d'heures et la présence d'une végétation dense en pied de digue, ont eu pour conséquence de ralentir les vitesses et l'érosion du talus côté protégé. Deux autres secteurs ont fait l'objet de rechargement de grave en crête.

19 % des désordres concernent des fuites dans des ouvrages traversants ; certaines liées à des défaillances d'étanchéité des organes de fermeture, d'autres à l'absence d'obturation des mêmes organes, soit par incapacité à manœuvrer, soit par oubli. Ces désordres ont donné lieu à des interventions d'urgence, toutes couronnées de succès. Depuis, de nombreux ouvrages traversants défaillants ont été purgés (environ 80 sur un parc initial de 400).

17 % des désordres sont des infiltrations d'eaux claires, qui ont fait l'objet d'une surveillance régulière.

11 % concernent des glissements de berge liés à des affouillements externes.

3 % concernent des glissements de talus côté fleuve dus à la raideur des talus ou côté terre, dus à la présence d'une couche sableuse très perméable.

Tableau 7. Période 1993-2016 – Bilan des désordres par initiateur de rupture

Initiateur du désordre		**Nb**	**%**	**Nb**	**%**
Surverse	point bas localisé (encoule)	7	5	16	12
	dépassement cote de l'ouvrage	7	5		
	limite de surverse	2	2		
Infiltrations d'eaux limoneuses (érosion interne)	Dans terriers de fouisseurs (blaireaux ou lapins)	31	23	51	38
	Au droit d'anciennes brèches	11	8		
	Autres (couche de sable, racines mortes, fissures liées au vieillissement, anciens terriers)	2	2		
	Erosion le long d'un ouvrage traversant	7	5		
Défaillance ouvrage traversant	Fuites dans ouvrage	25	19	25	19
Infiltrations d'eaux claires (écoulement sans érosion)	Au droit de paléo-chenaux	4	3	23	17
	Au droit d'anciennes brèches ou transition	10	7		
	Autres	9	7		
Affouillement externe		15	11	15	11
Glissement	Talus côté terre	1	1	3	3
	Talus côté fleuve	2	2		
TOTAL		**133**	**100**	**133**	**100**

Ce bilan est quasiment exhaustif pour les crues de novembre 2002 et décembre 2003. Pour les autres crues, il dépend essentiellement de la richesse des données collectées. Par ailleurs, certains des désordres observés, comme les infiltrations, au droit d'une ancienne brèche, sont comptabilisées à chaque crue, ce qui peut influencer le bilan global. Il a donc été procédé aux bilans respectivement de la crue de novembre 2002, qui est une crue longue et moyenne en termes de débit (Q = 9500 m^3/s - T=20 ans), et de la crue de décembre 2003, qui est une crue rapide et intense (Q = 11500 m^3/s - T=100 ans).

Tableau 8. Crue novembre 2002 et décembre 2003 – Bilan des désordres par initiateur de rupture

Initiateur du désordre		**Nov. 2002**	**Déc. 2003**	**Nov. 2002 Déc. 2003**	
		Nb	**Nb**	**Nb**	**Nb**
Surverse	point bas localisé (encoule)	3	3	6	14
	dépassement cote de l'ouvrage	2	4	6	
	limite de surverse	0	2	2	
Infiltrations d'eaux limoneuses (érosion interne)	Dans terriers de fouisseurs (blaireaux ou lapins)	10	10	20	39
	Au droit d'anciennes brèches	3	8	11	
	Autres (couche de sable, racines mortes, fissures liées au vieillissement, anciens terriers)	0	2	2	
	Erosion le long d'un ouvrage traversant	1	5	6	
Défaillance ouvrage traversant	Fuites dans ouvrage	4	9	13	13
Infiltrations d'eaux claires (écoulement sans érosion)	Au droit de paléo-chenaux	2	0	2	16
	Au droit d'anciennes brèches ou transition	2	4	6	
	Autres	0	8	8	
Affouillement externe		4	11	15	15
Glissement	Talus côté terre	1		1	3
	Talus côté fleuve	1	1	2	
TOTAL		**32**	**68**	**100**	**100**

La comparaison entre les deux crues, montre que grosso modo, il y a plus de 2 fois plus de désordres en 2003 qu'en 2002 malgré le caractère rapide de la crue : l'intensité du chargement prévaut sur la durée. La proportion des désordres liés aux fouisseurs diminue entre 2002 et 2003, ce qui peut s'expliquer par un traitement préventif croissant des terriers entre ces deux dates. La proportion de désordre liée à l'affouillement externe croît sensiblement entre les deux crues. Cela avait été constaté par le CEMAGREF dans ses rapports post-crue. Cela s'explique justement par le caractère plus rapide de la montée de crue et donc l'importance de la pente hydraulique lors de l'événement.

Sur les 32 désordres recensés en novembre 2002, 24 interventions d'urgence ont été commandées. En décembre 2003, 68 désordres ont été recensés et 16 interventions d'urgence ont été commandées. L'augmentation des désordres entre les deux crues s'explique par l'intensité de l'événement (T=20 ans en nov. 2002 et T= 100 ans en déc. 2003). L'écart des interventions d'urgence entre les deux crues s'explique par la durée des crues (15 jours en 2002 et 3 jours en 2003).

De ce retour d'expérience accidentologique, 13 scénarios de brèche ont été pris en compte.

Tableau 9. Identification des différents scénarios de brèches

N° scénario	Modes de rupture	Libellé du scénario de brèche
1	Claquage hydraulique + Erosion de conduit	Claquage hydraulique d'un terrier de blaireau partiellement colmaté et érosion de conduit
2	Erosion de conduit	Erosion de conduit dans un vide le long d'un ouvrage hydraulique traversant
3	Erosion de conduit	Erosion de conduit dans une racine d'arbre mort
4	Erosion de conduit	Erosion de conduit dans une fissure traversante
5	Soulèvement hydraulique + Erosion régressive	Claquage hydraulique d'une couche de sol cohésive surplombant une couche de sable et érosion régressive de cette dernière
6	Claquage hydraulique + Erosion de contact	Claquage hydraulique du masque étanche et érosion de contact le long d'une couche de graviers
7	Claquage hydraulique + Suffusion interne	Claquage hydraulique du masque étanche et suffusion de couche de grave englobée dans la digue
8	Surverse	Surverse sur la digue
9	Affouillement de pied	Affouillement en pied amont de la digue
10	Glissement	Glissement du talus aval en crue
11	Glissement	Glissement du talus amont en crue
12	Mécanique	Stabilité mécanique des ouvrages hors glissement, claquage hydraulique et soulèvement du pied aval
13	Mécanique	Stabilité des parapets et batardeaux

Un scénario spécifique aux ouvrages hydrauliques traversant la digue a également été pris en compte :

- Scénario A : la défaillance des organes de fermeture des ouvrages hydrauliques traversants (le scénario 2 traitant de l'érosion de conduit dans un vide le long d'un ouvrage hydraulique ou d'une transition traversant la digue) ;

Deux scénarios sont spécifiques au remblai ferroviaire entre Tarascon et Arles :

- Scénario B : dans l'état initial : la rupture par érosion de contact du ballast en crête de digue,
- Scénario C : dans l'état après travaux : la rupture du remblai ferroviaire par érosion interne lors du déversement sur la digue résistante à la surverse.

3 CONSEQUENCES DES BRECHES SUR LES ZONES PROTEGEES

Les zones protégées par les systèmes d'endiguement « Rive Gauche » ; « Rive Droite » et « Camargue Insulaire ont été inondés plusieurs fois depuis 1840. Les inondations provoquées par les crues de novembre 1840, novembre 1841, novembre 1843, mai 1856 et plus récemment en octobre 1993, janvier 1994, novembre 2002 et décembre 2003 sont les événements les plus importants depuis le milieu du XIX^{ème} siècle.
La carte ci-dessous illustre les contours des inondations de 1840 et 1856 provoquées par le Rhône.

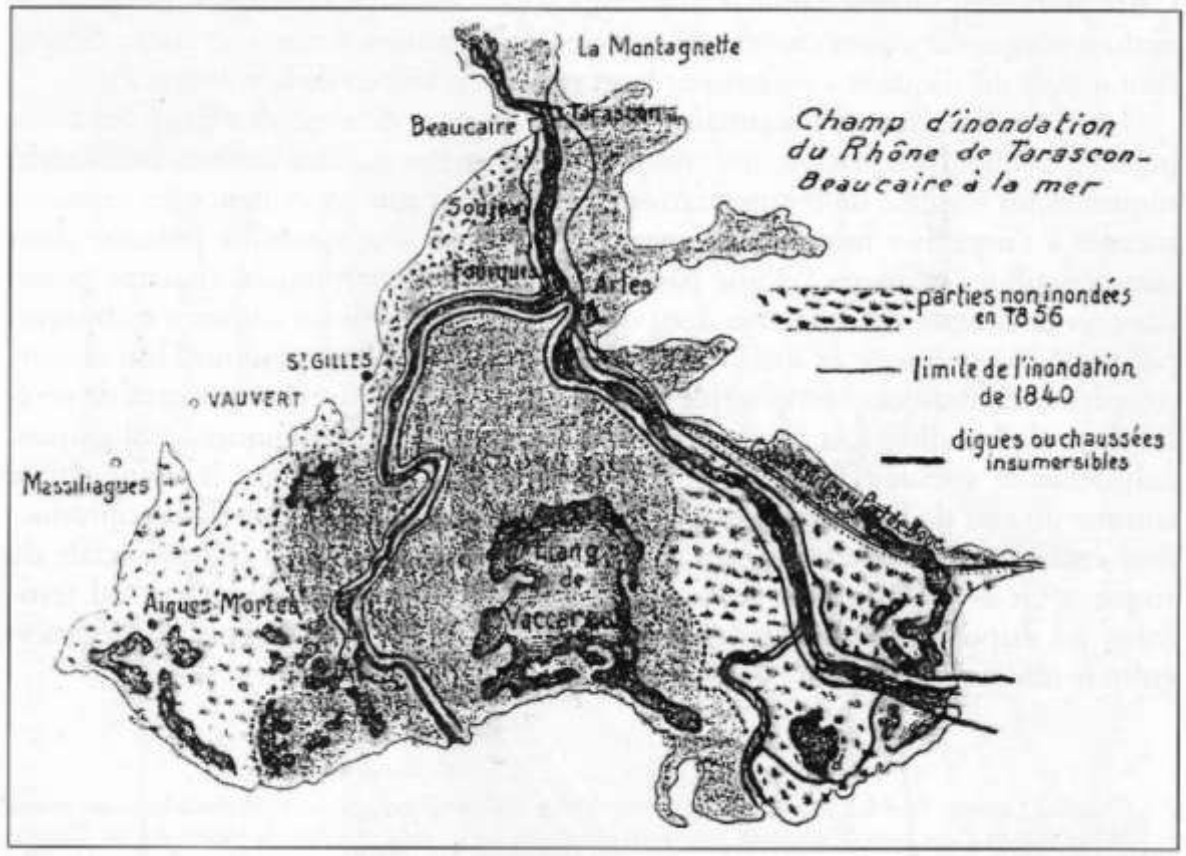


Figure 2. Inondations de 1840 et 1856 (source Pardé)

Les volumes d'eau ayant déversé par les brèches dans le système sont respectivement, pour les 3 crues les plus importantes, les suivants :

Tableau 10. Volume déversé lors des crues historiques de 1840, 1856 et 2003

Zone protégée	Nov. 1840	Mai 1856	Déc. 2003
Rive Droite	1 400 millions de m^3	300 millions de m^3	210 millions de m^3
Camargue Insulaire	800 millions de m^3	1 000 millions de m^3	Pas d'entrée d'eau du Rhône
Rive Gauche	> 600 millions de m^3	500 millions de m^3	17 millions de m^3
TOTAL	**2 800 millions de m^3**	**1 800 millions de m^3**	**227 millions de m^3**

Et pour les crues de 1993, 1994 et 2002, les suivants

Tableau 11. Volume déversé lors des crues de 1993, 1994 et 2002

Zone protégée	Octobre 1993	Janvier 1994	Novembre 2002
Rive Droite	Pas d'entrée d'eau du Rhône	Pas d'entrée d'eau du Rhône	Inférieur à 2 millions de m^3
Camargue Insulaire	130 millions de m^3	20 millions de m^3	Pas d'entrée d'eau du Rhône

Les tableaux ci-après renseignent sur les cotes (en m NGF) de quelques laisses de crues relevées dans la zone protégée pour la crue de 1840, 1843, 1856, 1993 et 1994.

Tableau 12. Laisses des crues de 1840 et 1856 en rive gauche du Rhône

Inondations du Rhône	Lieu	Cote relevée (m NGF)
Novembre 1840	Tarascon – Centre-ville	9,8 (d'après écrit)
	Mas de Grande Parade	7,92
	Château de Barbegal	7,87
	Mas de Truchet	7,68
	Mas de Truchet	7,60
	Amont de l'aqueduc de Pont de Crau	7,71
	Amont de l'aqueduc de Pont de Crau	7,83
Mai 1856	Tarascon – centre ville – rue du château	11,44
	Tarascon –angle rue lubières et rue E. Pelletan	11,56
	Tarascon –Rue Amy, sur les contre fort de l'église	11,49
	Tarascon - angle de la rue de la révolution et de la rue du jeu de Paume	11,68
	Tarascon – rue Jean Jaurès	11,79
	Mas de Lucas	6,78

Tableau 13. Laisses des crues de 1840 et 1856 en rive droite du Rhône

Zone protégée	Lieu	Cote relevée (m NGF)
Novembre 1840	Beaucaire – rue nationale	7,01
	Fourques – Centre village	6,45
	Fourques – Mas de Marguerites	*6,37*
	Fourques – Mas de Marsane	*6,29*
	Bellegarde – rue de Beaucaire	6,23
	Saint Gilles – quai du canal	5,32
	Saint Gilles – avenue Anatole France	5,15
	Aigues Mortes - rempart	2,52
Mai 1856	Pas de laisses de crues recensées	

Tableau 14. Laisses des crues de 1840, 1843, 1856 et 1993 en Camargue Insulaire

Zone protégée	Lieu	Cote relevée (m NGF)
Novembre 1840	Mas des Bernacles	1,89 (3,30 autre relevé)
Novembre 1843	Mas de Bernacles	1,59
Mai 1856	Trinquetaille – avenue Edouard Herriot	6,26
	Mas de Bernacle	2,16
	Mas du Pont de Rousty	2,62
Octobre 1993	Mas du Pont de Rousty	2,42

L'image spot ci-après illustre quant à elle l'inondation des zones protégées Rive Gauche et Rive Droite en décembre 2003 provoquée par le Rhône (plaine du Trébon), le Vigueirat et l'impluvium local (Ancien marais d'Arles et Marais des Baux) en rive gauche et par le Rhône et l'impluvium en rive droite.

Elle est suivie par des extraits de la modélisation hydraulique réalisée par EGISeau dans le cadre de l'étude de ressuyage [K107].
Les cotes relevées dans la plaine du Trébon sont comprises entre 5,1 et 5,6 m NGF. Dans le casier des alpilles, le Rhône a atteint la cote de 7,9 m NGF.
Dans les anciens marais d'Arles et les marais de la vallée des Baux, les laisses de crues relevées donnent des cotes comprises entre 2 et 2,1 m NGF

La comparaison de ces cotes permet de mesurer l'ampleur des inondations de 1840 et 1856 provoquées par la formation de brèches dans la digue de la Montagnette et en comparaison avec celle de 2003 provoquée par des brèches dans les digues de protection des trémies du remblai ferroviaire pour la partie Trébon et par une brèche dans le Vigueirat et l'impluvium local pour la partie marais.

12 000 habitants ont été inondés en décembre 2003 (1/3 en rive droite et 2/3 en rive gauche). Le montant des dommages est estimé à 700 millions d'euros de dommages répartis 50/50 entre les deux rives du Rhône.

Figure 3. Inondations de 2003 (image SPOT IGN)

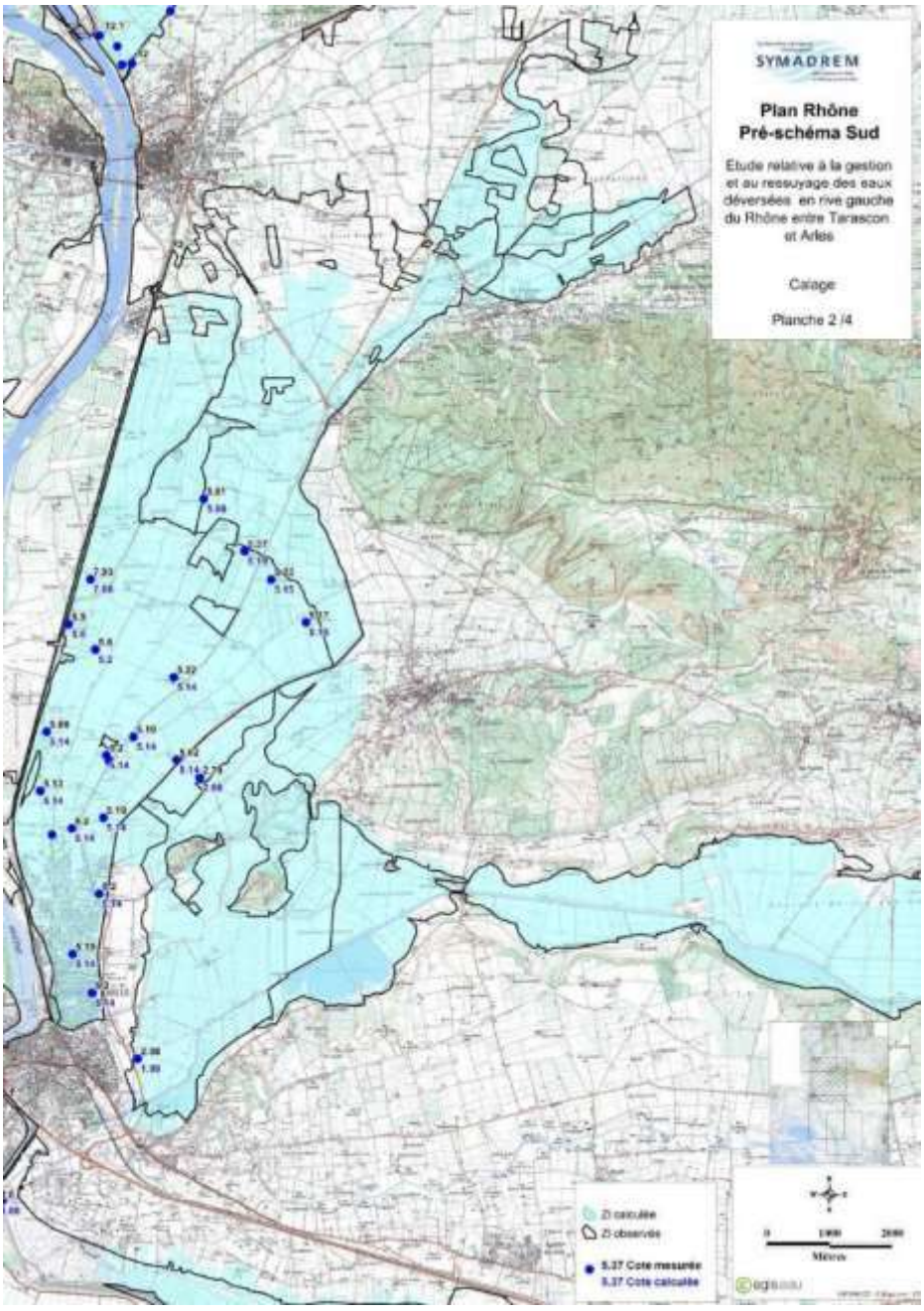


Figure 4. Inondations du Rhône, du Vigueirat et Impluvium local de 2003 cotes relevées et modélisées (Source EGISeau)

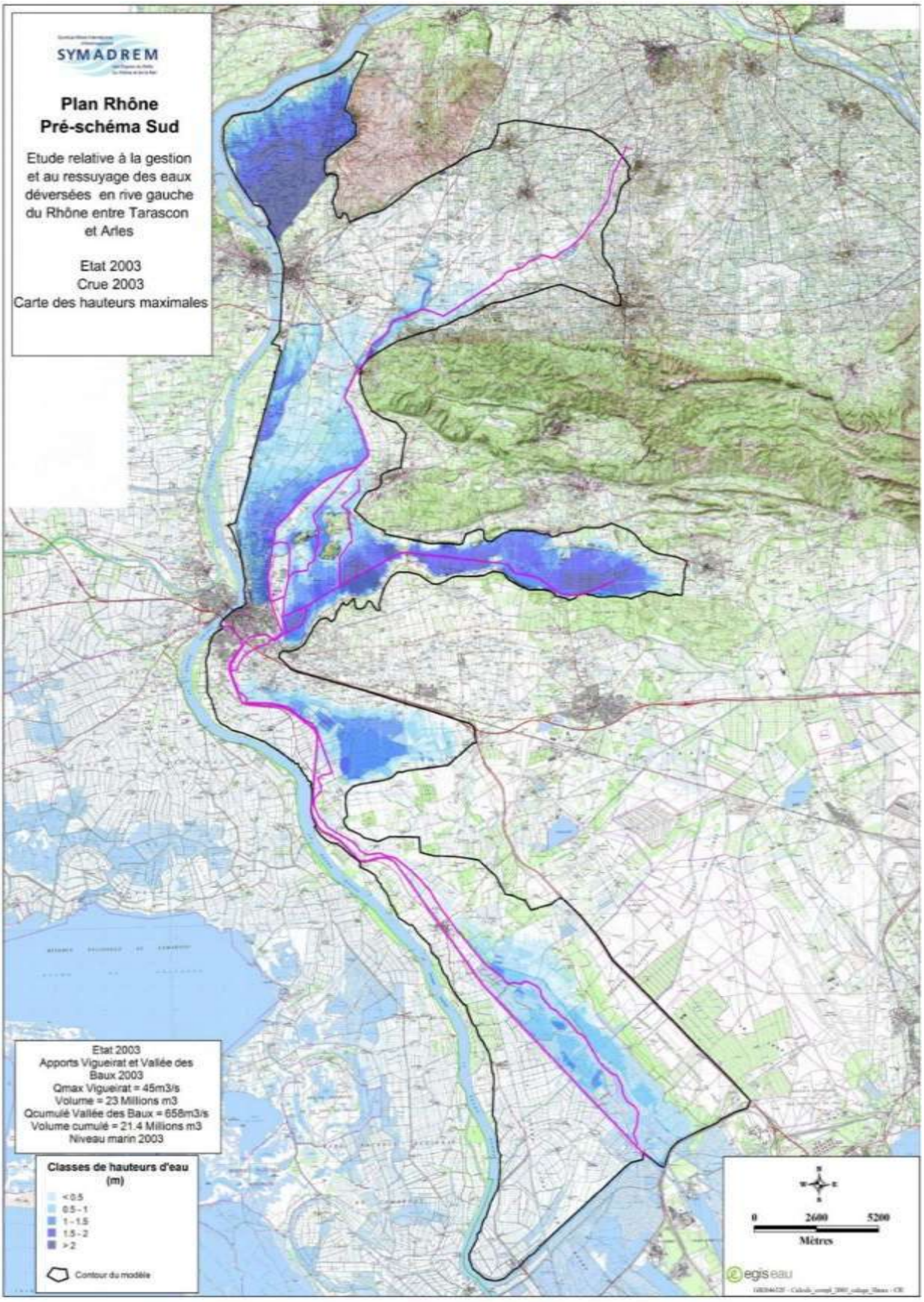


Figure 5. Inondations du Rhône, du Vigueirat et Impluvium local de 2003 hauteurs d'eau modélisées (EGISeau])

La carte ci-après est extraite de la modélisation hydraulique réalisée par ISL dans le cadre de l'étude de la digue Beaucaire-Fourques.
A l'instar de la rive gauche du Rhône, la comparaison des laisses de la crue de 2003 avec celles de 1840 et 1856 permet de mesurer l'ampleur des inondations du XIXème siècle en comparaison avec celle de 2003.
Les cotes relevées dans la plaine de Beaucaire sont d'environ 3,4 m NGF, soit 3 m de moins qu'en novembre 1840. Dans le couloir de Saint Gilles, elles sont d'environ 3 m NGF, soit 2,5 m de moins qu'en novembre 1840

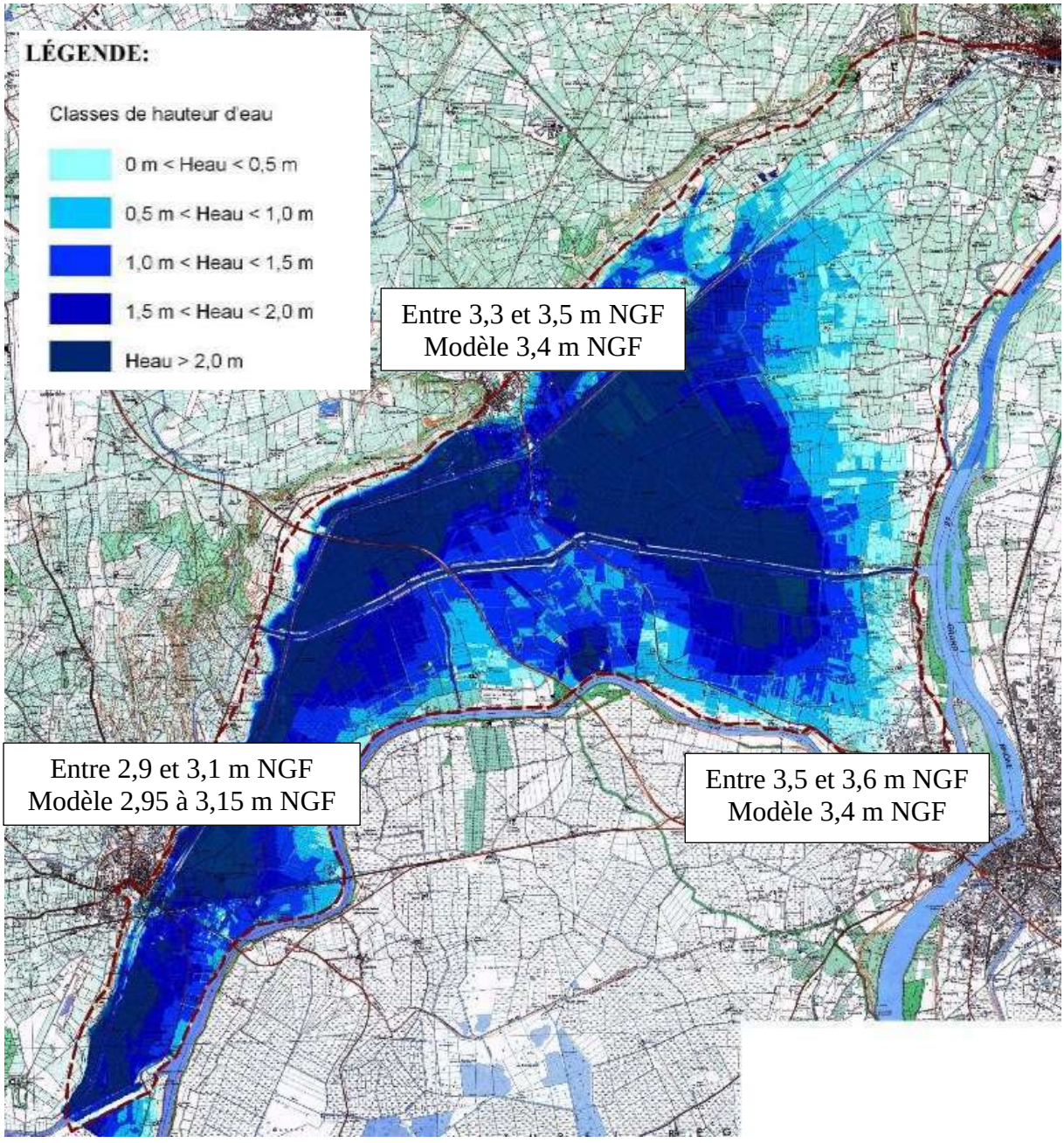


Figure 6. Inondations du Rhône – Déc. 2003 – Plaine de Beaucaire (ISL 2009)

Les deux cartes ci-après sont extraites de la modélisation hydraulique réalisée par EGISeau respectivement dans l'étude d'amélioration du ressuyage en rive gauche et dans l'étude de renforcement des digues du Petit Rhône.

Les cotes relevées en Camargue Gardoise au nord de la RD58 sont d'environ 1,5 à 1,7 m NGF, soit 1 m de moins qu'en novembre 1840.

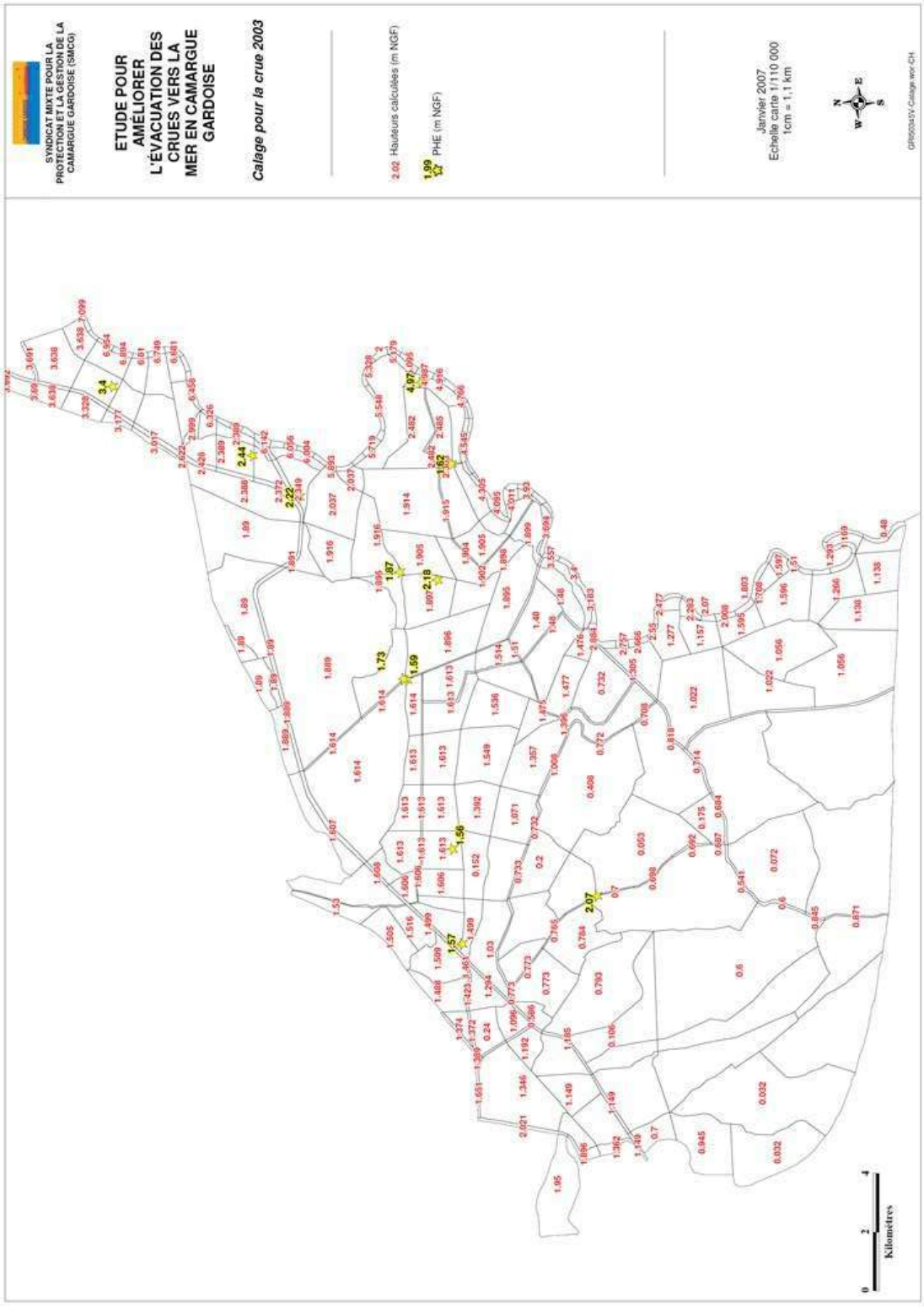


Figure 7. Camargue Gardoise - Inondations du Rhône décembre 2003 cotes relevées et modélisées (opération ressuyage) (Source EGISeau 2009)

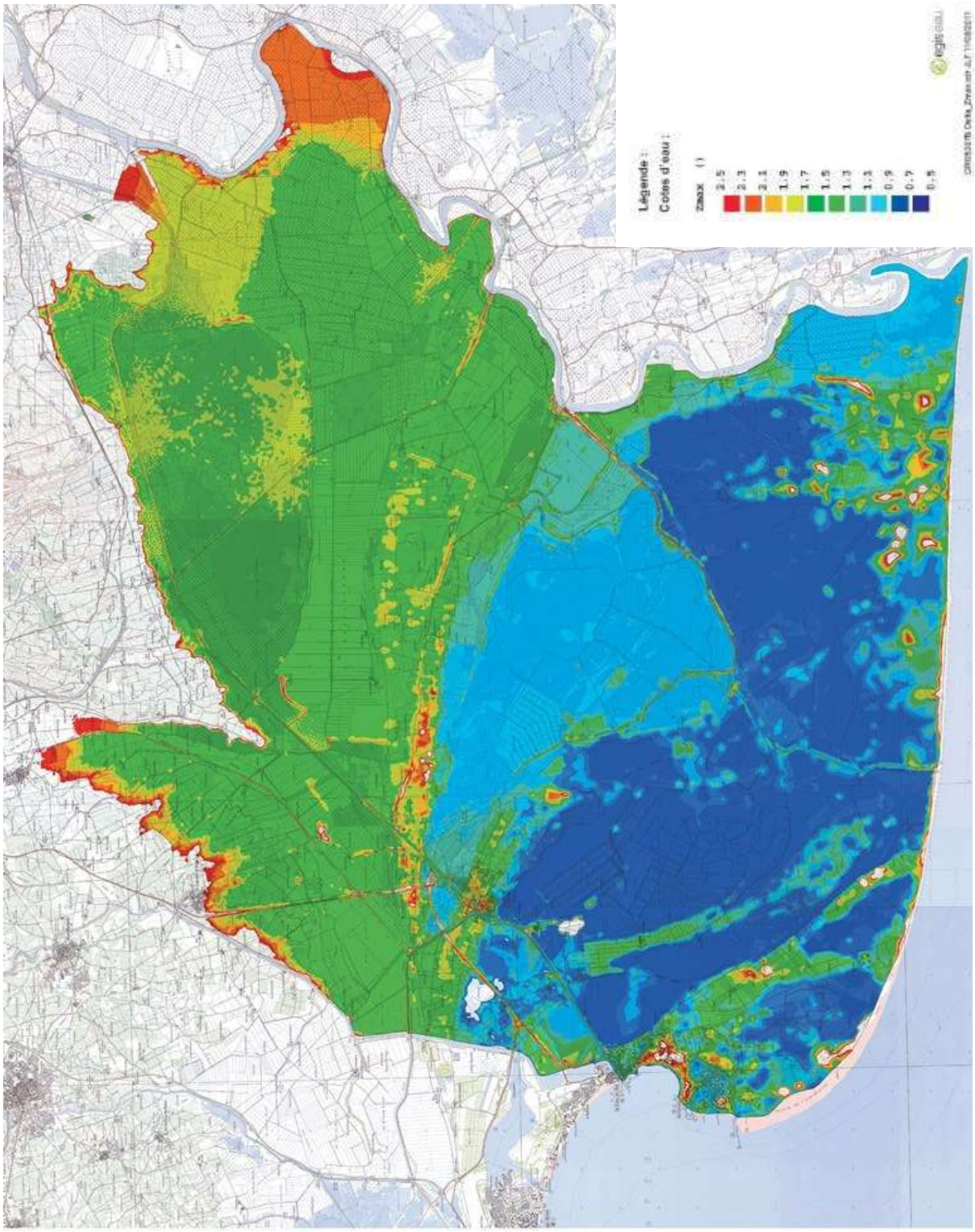


Figure 8. Camargue Gardoise - Inondations du Rhône décembre 2003
cotes relevées et modélisées (opération digues petit Rhône) (Source EGISeau 2011)

La carte ci-après illustre l'inondation la zone protégée en octobre 1993.

Le volume d'eaux déversées a été estimé à environ 130 millions de m^3.

450 maisons ont été inondées. La surface agricole touchée a été estimée à 13 000 ha sous une hauteur d'eau moyenne de 1 m.

Une partie de ce volume, 51 millions de m^3 a été rejeté dans le Rhône par les stations de pompage d'Albaron (PRG) et Beaujeu (GRD). La plus grande partie s'est écoulée vers le canal de Rousty et l'Etang de Vaccarès. De là, cette eau a été évacuée à la Mer, en partie gravitairement par le pertuis de la Fourcade (28 millions de m^3) et par pompage (44 millions de m^3). Ces pompages effectués pour éviter l'inondation des Saintes-Maries-de-la-Mer ont nécessité l'installation de puissantes pompes d'une capacité totale d'environ 14 m^3/s. Ils ont duré deux mois.

L'image satellitaire et la photographie aérienne ci-après illustre l'ampleur de l'inondation.

Figure 9. Inondation du Rhône d'octobre 1993 – source Spot [A1993 04]

En janvier 1994, le volume d'eaux déversées a été estimé à 20 millions de m^3, ce qui est plus faible qu'en janvier 1994, mais s'explique par la décrue qui a été plus rapide et par l'importance des moyens d'interventions.

La surface touchée a été de 2000 Ha et le nombre d'habitations touchées : 45.

Le montant des dommages des crues d'octobre 1993 et janvier 1994 a été estimé sommairement dans le rapport Dambre à 200 millions de Francs, soit 30 millions d'euros. Cette estimation ne tient pas compte des dommages domestiques, dommages aux infrastructures et des interventions de moyens militaires.

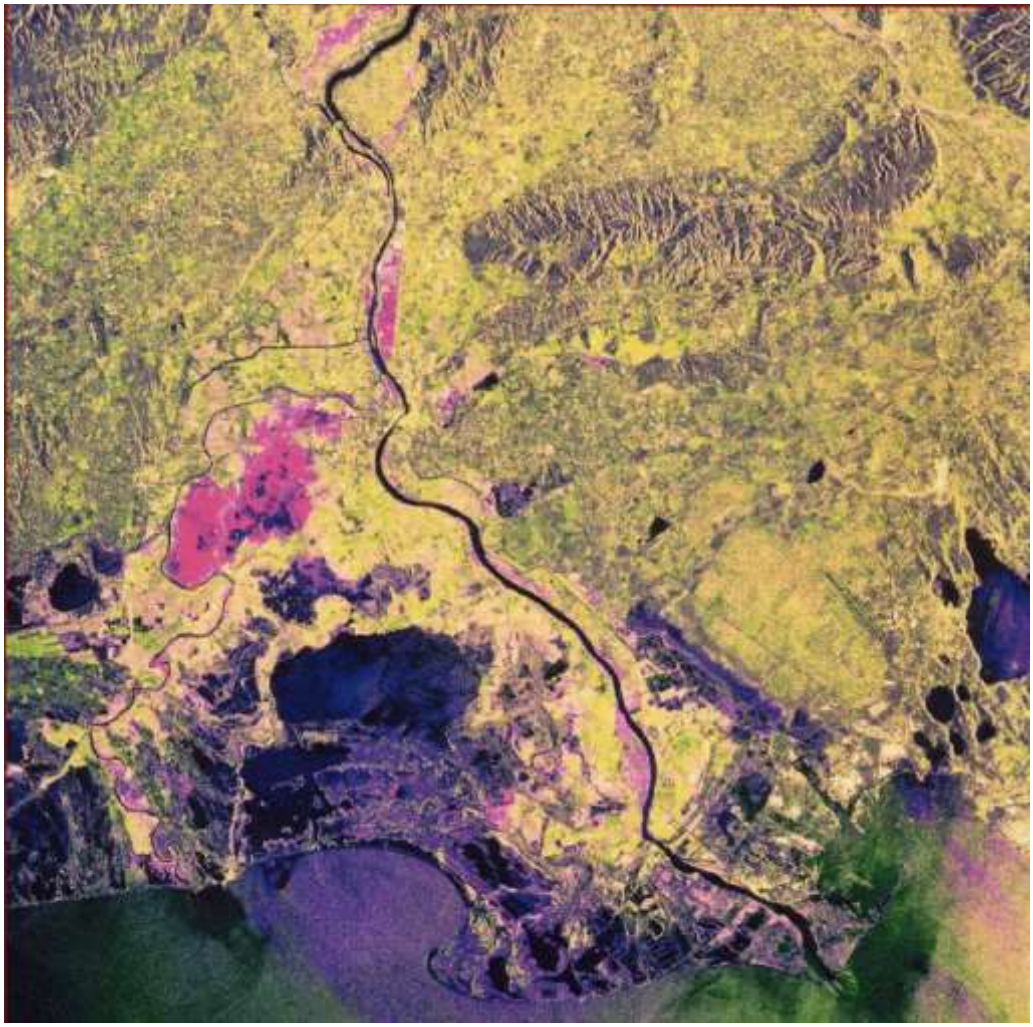


Figure 10. Inondation du Rhône de janvier 1994 – source SPOT [A1994 02]

4 CRUE DE NOVEMBRE 1840

Les données relatives à la crue figurent au chapitre n°4.

4.1 LIMNIGRAMME ET INSTANT DE FORMATION DES PRINCIPALES BRECHES

La figure ci-dessous permet de voir l'évolution des niveaux en m NGF aux échelles de Beaucaire et Arles. Le limnigramme sans brèche estimé par Pardé permet de voir que la crue se serait maintenue au-dessus de 6500 m^3/s pendant plus de 13 jours et au-dessus de 8500 m^3/s pendant plus de 8 jours.

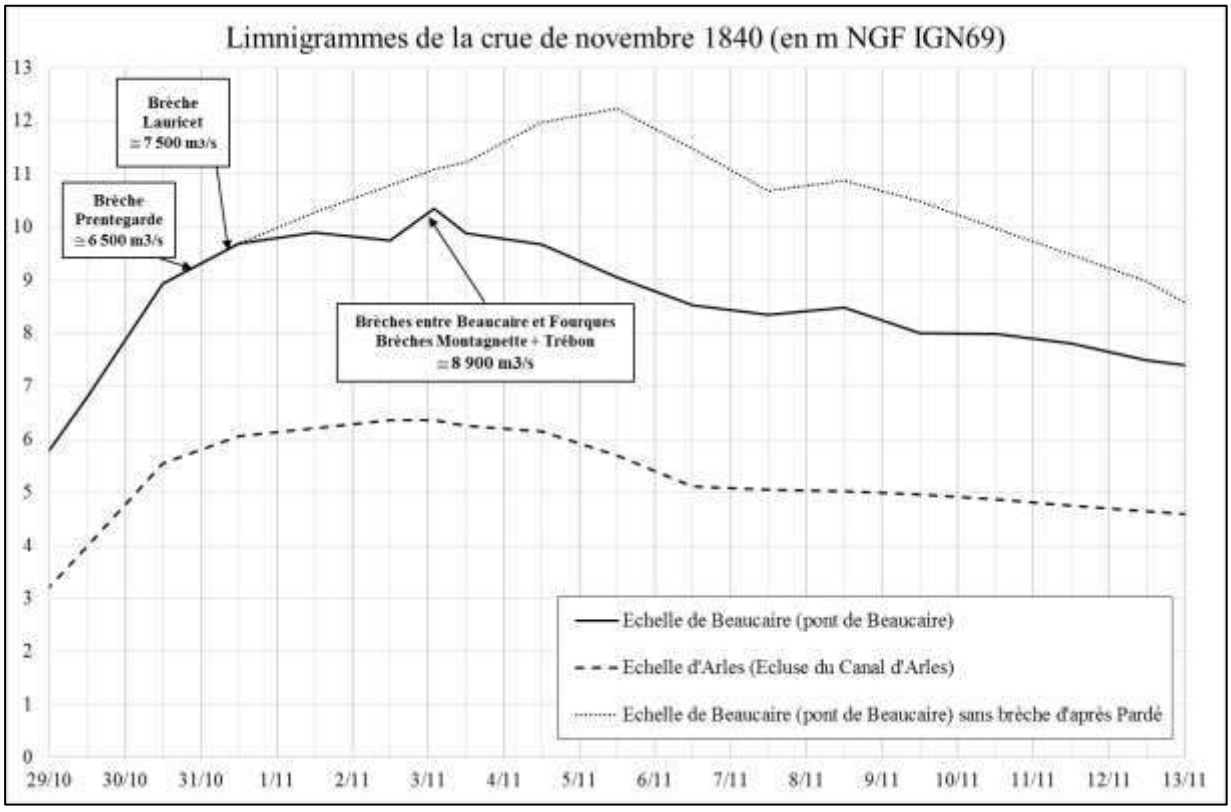


Figure 11. Crue novembre 1840 – limnigrammes aux échelles de Beaucaire et Arles (en m NGF)

On estime à plus de 2 milliards de m^3, le volume de crue ayant transité en traversée de Beaucaire-Tarascon au-dessus du débit annuel de 4200 m^3/s.

Il aurait été de 6 milliards de m^3 en l'absence de brèches.

4.2 PROPAGATION DE LA CRUE DANS LA ZONE PROTEGEE ET DOMMAGES OCCASIONNES

Quelques éléments de cinétique de l'inondation figurent dans Pardé [O0001] et sont reproduits ci-dessous :

« En rive gauche (Source Pardé), la digue de la Montagnette a été « pulvérisée » en maints endroits. Elle a provoqué à l'Est de Tarascon l'irruption d'une masse d'eau assez formidable pour submerger toute la contrée jusqu'à la mer entre le Grand Rhône et la Crau ; bien plus les flots recouvrant le canal d'Arles à Bouc se répandirent dans le plan du Bourg, prirent à revers la digue de la rive gauche en aval d'Arles et la rompirent pour rentrer dans le fleuve (la lecture des journaux de l'époque révèle un scénario différent ; en effet la brèche de Prentégarde est apparue lors de la montée de crue pour un débit estimé à 6500 m^3/s, ce qui est très bas). *35 000 hectares furent engloutis. Sur la rive droite, le fleuve y fit cinq ou six brèches, d'après Pardé, dont deux énormes* (vraisemblablement celle de l'Abattoir et de Saint Denis). *Il s'étala sur une superficie de 44 000 hectares, envahit les salines de Peccais et cerna Aigues-Mortes.*
La Camargue fut aussi inondée quoique moins gravement ».

Dans le livre édité par Elie Bataille, maire de Bellegarde, après la crue de décembre 2003 [A2003 18], un récit de la crue de 1840 écrit par Marcel Avignon et présenté lors de la conférence du 19 nov. 1994 à Saint-Gilles permet d'avoir une idée de propagation des eaux provenant des brèches dans la plaine. On y parle d'une vitesse de propagation de 3 m/s, noyant tout sur son passage. Dans le courant de la matinée du 3 novembre 1840, la hauteur de l'eau dans les bas quartiers progresse à raison de 15 à 18 cm/h. Cette vitesse est moindre en soirée avec une vitesse de l'ordre de 6 à 8 cm/h. Les habitants des mas de la plaine sont partout cernés par les eaux qui va de 2 à 4 mètres, selon que l'on se trouve proche ou loin du Rhône. On enregistre une hauteur d'eau de 4 mètres aux portes de Saint Gilles dans les marais de la Palunette et des Castagnottes.

Le jeudi 5 novembre 1840 à 3 heures du matin (soit 48 heures après la formation des brèches), l'inondation a atteint son point maximum à Saint-Gilles : 3,60 m au-dessus des quais du port du canal, 1,50 m dans la rue Emile Jamais et 1,20 m devant le temple place Frédéric Mistral. En soirée vers 17 heures, l'eau commence lentement à baisser. Il faudra attendre 1 mois pour voir disparaître en totalité les eaux des quartiers de Saint-Gilles.
A Aigues Mortes, l'inondation fit son apparition dans la journée du 4 novembre 1840. Dans la nuit vers 2 heures du matin, l'eau d'inondation commence à arriver aux pieds des remparts et pénètre dans la ville par divers égouts. Les portes de l'enceinte fortifiée furent fermées, si bien qu'on réussit à maintenir l'eau à l'extérieur des remparts. La force de l'inondation emporta les digues des salines de Peccais. Les eaux envahirent et détruisirent les 420 ha de marais Salants. Deux ans furent nécessaires pour remettre en état toutes les installations et un an d'évaporation pour enfin pouvoir reprendre la production de sel.

A Fourques, le village fut submergé en totalité sous 2,50 à 3,0 m d'eau, y compris le cimetière

L'article du Censeur du 14 novembre 1840 [A1840 02] décrit précisément les événements relatés dans l'album Arlésien. Il est repris partiellement en page suivante.

On note que *« Dans cette terrible journée du 31, 1e vent du nord, qui avait soufflé un instant le samedi, céda au vent du sud-est qui refoula les eaux du Rhône et augmenta ainsi l'inondation, tandis que la pluie tombait avec abondance et sans interruption ».*

N° 1853. SAMEDI 14 NOVEMBRE 1840.

ON S'ABONNE :

PRIX DE L'ABONNEMENT :
Pour Lyon et le département du Rhône, 16 francs pour 3 mois, 32 francs pour 6 mois, 64 francs pour l'année.
Hors du département, 1 franc de plus par trimestre.
Prix des annonces : 25 c. la ligne.

LE CENSEUR,

Journal de Lyon,

POLITIQUE, INDUSTRIEL ET LITTÉRAIRE.

INONDATIONS.

Voici, d'après l'*Album arlésien*, le précis, heure par heure, des événements qui ont marqué l'inondation d'Arles depuis le 29 octobre à 8 heures du soir jusqu'au 6 novembre à midi. Ce tableau exact, quoique décoloré, fera mieux connaître la marche et la grandeur du fléau que des récits plus animés.

Le 29 octobre, à huit heures du matin, le Rhône était à 3 m. 70 c. au-dessus de l'étiage de la mer. Le 30, à huit heures du matin, il s'élevait à 4 m. 15 c., et le pont de bateaux était rompu par un train de bois. Le même jour, à dix heures du soir, brèche à *Prentegarde* (plan du Bourg); le 31, à neuf heures du matin, brèche à Lauricet en Camargue sur le petit Rhône. Entre onze heures et midi, le pont de Saint-Gilles est emporté par l'impétuosité des eaux. Les bas quartiers de la ville et la promenade de la Lice sont inondés. A minuit, le fleuve avait atteint 4 m. 92 c.

Dans cette terrible journée du 31, le vent du nord, qui avait soufflé un instant le samedi, céda au vent du sud-est qui refoula les eaux du Rhône et augmenta ainsi l'inondation, tandis que la pluie tombait avec abondance et sans interruption. Le plan du Bourg ne formait plus qu'un vaste lac depuis les chaussées du fleuve jusqu'au canal de Bouc. En Camargue, toute la ligne du petit Rhône était inondée, et au centre de l'île, la vaste brèche de Lauricet avait laissé arriver le pont de Saint-Gilles jusque dans les marais de Solliers. Le Siphon, qui donne passage aux eaux de dessèchement du Trébon et du plan du Bourg, reçut au contraire celles du Rhône; la plus grande partie des marais desséchés fut inondée derechef. Les quartiers bas de la ville étaient inondés à plusieurs pieds de hauteur, et des bateaux d'un port considérable parcouraient la Roquette et les rues adjacentes.

La journée du 1er novembre vit l'inondation se soutenir sans accidents nouveaux.

Le 2, à huit heures du matin, les berges de la rive droite du canal de navigation, entre Montcalde et le mas de Laville, sont rompues sur plusieurs points par les eaux de la brèche de Prentegarde. Le même jour, les eaux du canal de navigation versent dans le Viguérat par la demi-écluse du port de Gleize et dans le *Vuidange* par les martelières de Montcalde. Enfin, ce jour-là, tous les canaux de dessèchement fonctionnent en sens inverse.

A onze heures et demie, le tocsin sonne, le fleuve est à 5 m. 05. La population de la ville se porte sur la chaussée du Trébon. Les habitants du faubourg de Trinquetaille se portent sur la chaussée de la pointe de la Camargue, et demandent du secours à l'aide d'un porte-voix. En ce moment ont lieu les ruptures de la chaussée du Trébon, au mas de Piquet, Lausac, Boulbon, Rognonas, sur la Durance, et de plus trois ou quatre brèches entre Foulques et Beaucaire.

Le moment de cette crue si féconde en désastres eut un caractère d'horreur que rien ne saurait dépeindre. Le tocsin sonnait aux quatre paroisses et au bourdon de la Grande-Horloge, et depuis trois quarts d'heure on l'entendait retentir à Trinquetaille, dont toutes les communications étaient interceptées. La pluie était épaisse, l'obscurité profonde, et le vent soufflait avec fureur.

M. le maire et M. le commissaire de marine étaient accourus sur la chaussée de la Cavalerie, qui était couverte de monde; mais, au milieu de cet immense danger, rien ne pouvait dompter la confusion. Les ordres étaient transmis avec peu de fermeté; le plus grand nombre ne recevaient pas d'exécution.

A Trinquetaille, les habitants, moins nombreux, agirent avec plus d'accord et de succès : hommes, femmes, enfants, bêtes de trait, tout fut mis à l'œuvre. La chaussée de la pointe risquait d'être enlevée et la moitié du faubourg détruite. On s'empressa de voiturer sur ce point de grosses pièces de bois; les femmes et les enfants portaient de la terre; les hommes élevaient partout des travaux de défense. Sur presque toute la ligne, des travaux du même genre furent exécutés avec vigueur, et sauvèrent une partie du territoire.

Vers deux heures du matin, le Rhône baissa de vingt-cinq centimètres. On crut le danger fini, et les habitants se retirèrent; le fleuve venait de rompre les digues de Beaucaire et d'inonder toutes les campagnes.

Le 3, à sept heures du matin, la malle-poste de Marseille à Toulouse, qui était partie d'Arles pour Tarascon quelques instants auparavant, rentre en ville et annonce que les eaux ont envahi tout le grand Trébon.

Cette malle-poste fut obligée de prendre le galop pour fuir devant l'inondation qu'elle eut le bonheur de gagner de vitesse.

A huit heures, les eaux arrivèrent au pied de la croix de la porte de la Cavalerie. On fit alors un batardeau.

A dix heures du soir, les eaux s'élevaient à la hauteur du pont de Crau. Elles venaient, peu d'instants auparavant, de renverser les berges de la rive gauche du canal de navigation près Montcalde.

Le 4, à huit heures du soir, heure de la plus haute élévation des eaux hors du lit du fleuve, elles arrivent au pied de la croix de la Genouillade et à 25 centimètres au-dessous du couronnement de l'aqueduc du pont de Crau. Le batardeau fait à la porte de la Cavalerie avait été rompu dès le matin: tout le quartier de la Cavalerie était inondé. On aperçoit un navire voguant à pleines voiles dans le plan du Bourg, sur des champs ensemencés.

L'aqueduc du pont de Crau formait comme un barrage au courant, qui allait du Trébon au plan du Bourg; on craignit que les débris entraînés par les eaux ne vinssent à boucher les arcades et que l'aqueduc ne pût alors résister à cette pression. Cette crainte, assurément très-fondée, donna lieu à un ordre inhumain. On commanda d'incendier les meules de paille et de foin, et tout ce qui pouvait faire obstacle au courant en amont de l'aqueduc; on voulut aussi couper le canal de Craponne, les habitants résistèrent à cette mesure qui aurait amené de nouveaux malheurs.

La diminution des eaux a commencé le 5 novembre à huit heures du matin; le 6, à midi, elle était d'un mètre au pont de Crau. Les bas quartiers de la ville se dégageaient, mais le territoire était encore inondé tout entier. Le bateau à vapeur *l'Aigle* n° 5 avait été envoyé au mas Thibert et ramena dans la soirée environ 80 personnes. Des embarcations, expédiées par l'administration de la marine, ont parcouru tout le territoire pour remplir cette mission d'humanité. Une très-grande quantité de pain a été envoyée dans les campagnes.

L'Album déclare avoir la certitude que l'immense portion du territoire qui est sous l'eau est infestée de malfaiteurs qui profitent de la calamité publique pour ravager et piller. Dans la nuit du 5 au 6 novembre, on a dévalisé le domaine de Sainte-Luce, appartenant à M. Bonnardel : on a scié en plein jour des arbres plantés dans les divers héritages. Les restes des maisons et cabanes sont la proie du premier occupant.

Figure 12. Le Censeur – édition du 14 novembre 1840 – bibliothèque numérique de Lyon

La lecture de ces différents journaux, des autres sources bibliographiques et des limnigrammes nous permet de reconstituer la chronologie des événements.

En ce qui concerne les brèches occasionnées dans les digues du Rhône :

- Le 30 octobre 1840 à 22h00, brèche à Prentegarde ($Q_{beaucaire/tarascon} \cong 6\ 500\ m^3/s$) ;
- Le 31 octobre 1840 à 9h00, brèche à Lauricet ($Q_{beaucaire/tarascon} \cong 7\ 500\ m^3/s$) ;
- Le 2 novembre 1840 vers 12h00, rupture de la chaussée du Trébon au Mas de Piquet et Lansac et trois à quatre brèche entre Beaucaire et Fourques ($Q_{beaucaire/tarascon} \cong 8\ 000\ m^3/s$) ;
- Le 3 novembre 1840 à 2h00, brèche de Beaucaire et plusieurs brèches dans la digue de la Montagnette ($Q_{beaucaire/tarascon} \cong 8\ 900\ m^3/s$) ;
- Le 7 novembre, la grande brèche de Beaucaire est fermée ;
- 9 brèches sont dénombrées entre Beaucaire et Fourques.

Dans le journal de Toulouse, on peut lire que le 30 octobre *« la rupture de la chaussée de la Montcalde a donné lieu à un trait de dévouement qu'il est juste de signaler. Quelques marins employés à la garde du pont sur la chaussée de Camargue ayant entendu au milieu de la nuit, les cris poussés sur l'autre rive se sont précipités au nombre de cinq dans une embarcation, qu'ils ont, malgré le péril, lancé par la brèche, et sont parvenus à sauver une femme et trois enfants qui, abandonnés dans une cabane, allaient être engloutis par les eaux.*
Nous n'avons pu recueillir que les noms de trois de ces marins : Chabert, Bourde et Fusa »

On peut lire dans le Censeur du 14 novembre 1840 *« la chaussée de la pointe risquait d'être enlevée et la moitié du faubourg détruite. On s'empressa de voiturer sur ce point de grosses pièces de bois; les femmes et les enfants portaient de la terre; les hommes élevaient partout des travaux de défense. Sur presque toute la ligne, des travaux du même genre furent exécutés avec vigueur, et sauvèrent une partie du territoire »*.

En ce qui concerne la propagation des eaux en rive gauche

- Le 31 octobre 1840, *« les bas quartiers de la ville et la promenade de la Lice sont inondés »* ;
- Le 1er novembre, *« le plan du Bourg ne formait plus qu'un vaste lac depuis les chaussées du fleuve jusqu'au canal de Bouc…. Le Siphon, qui donne passage aux eaux de dessèchement du Trébon et du plan du Bourg, reçut au contraire celles du Rhône ; la plus grande partie des marais desséchés fut inondée… Les quartiers bas de la ville étaient inondés à plusieurs pieds de hauteur, et des bateaux d'un port considérable parcouraient la Roquette et les rues adjacentes*
- *Le 2, à huit heures du matin, les berges de la rive droite du canal de navigation, entre Montcalde et le mas de Laville, sont rompues sur plusieurs points par les eaux de la brèche de Prentegarde. Le même jour, les eaux du canal de navigation versent dans le Vigueirat par la demi-écluse du port de Gleize et dans le Vuidange par les martelières de Montcalde. Enfin, ce jour-là, tous les canaux de dessèchement fonctionnent en sens inverse.*
- *Le 3, à sept heures du matin, la malle-poste de Marseille à Toulouse, qui était partie d'Arles pour Tarascon quelques instants auparavant, rentre en ville et annonce que les eaux ont envahi tout le grand Trébon*

- Le 3, à huit heures, les eaux arrivèrent au pied de la croix de la porte de la Cavalerie. On fit alors un batardeau.
- Le 3 *A dix heures du soir, les eaux s'élevaient à la hauteur du pont de Crau. Elles venaient, peu d'instants auparavant, de renverser les berges de la rive gauche du canal de navigation près Montcalde.*
- *Le 4, à huit heures du soir, heure de la plus haute élévation des eaux hors du lit du fleuve, elles arrivent au pied de la croix de la Genouillade et à 25 centimètres au-dessous du couronnement de l'aqueduc du pont de Crau. Le batardeau fait à la porte de la Cavalerie avait été rompu dès le matin : tout le quartier de la Cavalerie était inondé. On aperçoit un navire voguant à pleines voiles dans le plan du Bourg, sur des champs ensemencés. L'aqueduc du pont de Crau formait comme un barrage au courant, qui allait du Trébon au plan du Bourg; on craignit que les débris entraînés par les eaux ne vinssent à boucher les arcades et que l'aqueduc ne pût alors résister à cette pression. Cette crainte, assurément très-fondée, donna lieu à un ordre inhumain. On commanda d'incendier les meules de paille et de foin, et tout ce qui pouvait faire obstacle au courant en amont de l'aqueduc ; on voulut aussi couper le canal de Craponne, les habitants résistèrent à cette mesure qui aurait amené de nouveaux malheurs.*
- *La diminution des eaux a commencé le 5 novembre à huit heures du matin ; le 6, à midi, elle était d'un mètre au pont de Crau. Les bas quartiers de la ville se dégageaient, mais le territoire était encore inondé tout entier.*
- *Le bateau à vapeur l'Aigle n° 5 avait été envoyé au mas Thibert et ramena dans la soirée environ 80 personnes. Des embarcations, expédiées par l'administration de la marine, ont parcouru tout le territoire pour remplir cette mission d'humanité. Une très grande quantité de pain a été envoyée dans les campagnes. L'Album déclare avoir la certitude que l'immense portion du territoire qui est sous l'eau est infestée de malfaiteurs qui profitent de la calamité publique pour ravager et piller, Dans la nuit du 5 au 6 novembre, on a dévalisé le domaine de Sainte-Luce, appartenant à M. Bonnardel ; on a scié en plein jour des arbres plantés dans les divers héritages. Les restes des maisons et cabanes sont la proie du premier occupant.*

En ce qui concerne <u>la propagation des eaux en rive droite</u>

- *les francs-bords du canal ont été emportés ; trois portes de l'écluse de Nourriguier ont été entraînées par la violence des eaux. Toute communication entre Beaucaire et les autres villes est interrompue*
- *Le bateau à vapeur l'aigle n°5 est allé hier sauver dans la plaine des malheureux réfugiés sur les toits et sur des arbres. Il en a ramené 110 ; c'était principalement des enfants. Il est impossible d'exprimer la douloureuse émotion que l'on ressentait en considérant les traces profondes d'effroi empreintes sur les figures de ces infortunés que l'on venait d'arracher à la mort,*
- Le 5 novembre 1840, on note 4 mètres d'eau aux portes de la ville (Mémoire Gilles Bernard [A1840 17])
- Le 5 novembre 1840, vers 17 heures, la décrue semble s'amorcer
- *Les eaux baissent bien lentement. Tons les travaux de dessèchement du canal de Beaucaire sont détruits. Dans le court trajet de cette ville à Fourgues, le Rhône s'est frayé 9 passages à travers la plaine.*
- Dans la journée du 6, on a entendu le canon d'alarme tirer à Aigues-Mortes.

- Le 7 novembre *« La plaine d'Aigues mortes est submergée à une hauteur de 7 à 8 pans »* (soit un peu plus de 2 mètres)
- *A Saint-Gilles, le Rhône a porté ses eaux jusqu'à la Ménagerie, c'est-à-dire 1,000 pieds plus loin que la fameuse inondation de 1755.*
- A Bellegarde, les eaux du Rhône, après avoir brisé les digues, se sont répandues jusqu'à environ 200 mètres de la ville.

En ce qui concerne la propagation des eaux en Camargue Insulaire

- Le 1er novembre, *« En Camargue, toute la ligne du petit Rhône était inondée, et au centre de l'île, la vaste brèche de Lauricet avait laissé arriver le pont de Saint-Gilles jusque dans les marais de Solliers »* ;
- Le 4 décembre, *La brèche de Lauricet, dont les travaux sont avancés et qui ne présente plus qu'une ouverture de 25 à 30 mètres, ne peut encore être fermée, malgré l'activité qui a été déployée pour y parvenir.»*

En ce qui concerne les dommages, on peut lire

L'agriculture a considérablement souffert; les semailles étaient faites en presque totalité, et le séjour des eaux ne permettra de les renouveler ni dans le Trébon, ni dans les marais, ni dans le plan du Bourg. La Camargue sera plus heureuse, la plus grande partie n'a eu qu'un débordement accidentel dont les traces ont à peu près disparu….
…Les mas ou domaines du Trébon et du plan du Bourg ont considérablement souffert; plusieurs sont écroulés et ensevelis sous les eaux, d'autres crevassés de manière à compromettre entièrement leur solidité. On cite particulièrement, parmi les mas écroulés, ceux de Vallier, de Desvignes, de Rochi, et une foule d'autres.
…. Jusqu'à ce moment les pertes matérielles ne sont pas très-grandes ; nous avons eu 25 brebis noyées au pont de Crau, et nous venons d'apprendre la perte d'une marque de 2 à 3,000 têtes, qui a été emportée sur les chaussées du Rhône, entre Beaucaire et Fourques, sans qu'on ait pu sauver une seule brebis.
Dans nos contrées, les travaux opérés par l'OEuvre de dessèchement, et qui avaient si fort augmenté notre richesse territoriale, sont complètement anéantis. Quand les eaux se retireront, le grand canal du Viguiérat sera à peu près comblé, les Vuidanges et tous les canaux accessoires le seront aussi; le canal de navigation, qui a été submergé et détruit comme tout le reste, sera hors d'état de fournir à l'Oeuvre ruinée et comblée le secours de ses biefs, comblés comme elle. Cependant Tarascon va exiger le rétablissement du Viguiérat, qui est son canal d'écoulement jusqu'à la mer ; cette réparation sera énorme. On ne pourra songer â relever les Vuidanges; ce serait trop exiger de la part des propriétaires ruinés par une inondation qui est loin d'avoir cessé, en admettant qu'elle puisse finir pour les marais. Quant aux réparations du canal de Bouc, qu'on évalue déjà à plusieurs millions, il est plus que probable que le gouvernement n'y songera de longtemps. Ainsi, des propriétés qui, avant l'inondation, valaient des sommes immenses, et qui étaient affermées à des milliers de petits agriculteurs, sont réduites à néant.

4.3 LAISSES DE CRUES DANS LA ZONE PROTEGEE ET CHAMPS D'INONDATION

Le tableau ci-après donne quelques laisses de crues dans la zone de protégée. Elles permettent de mesurer l'ampleur de l'inondation.

Tableau 15. Laisses de crue 1840 dans la zone protégée

Zone protégée	Lieu	Cote relevée par SYMADREM (m NGF)
Rive Gauche	*Tarascon – Centre-ville*	*9,8 (d'après écrit)*
	Mas de Grande Parade	7,92
	Château de Barbegal	7,87
	Mas de Truchet	7,68
	Mas de Truchet	7,60
	Amont de l'aqueduc de Pont de Crau	7,71
	Amont de l'aqueduc de Pont de Crau	7,83
Rive Droite	Beaucaire – rue nationale	7,01
	Fourques – Centre village	6,45
	Fourques – Mas de Marguerites	*6,37*
	Fourques – Mas de Marsane	*6,29*
	Bellegarde – rue de Beaucaire	6,23
	Saint Gilles – quai du canal	5,32
	Saint Gilles – avenue Anatole France	5,15
	Aigues Mortes - rempart	2,52
Camargue Insulaire	Mas des Bernacles	1,89 (3,30 autre relevé)

Le champ d'inondation de la crue de 1840, ainsi que celui de 1856 figure ci-dessous.

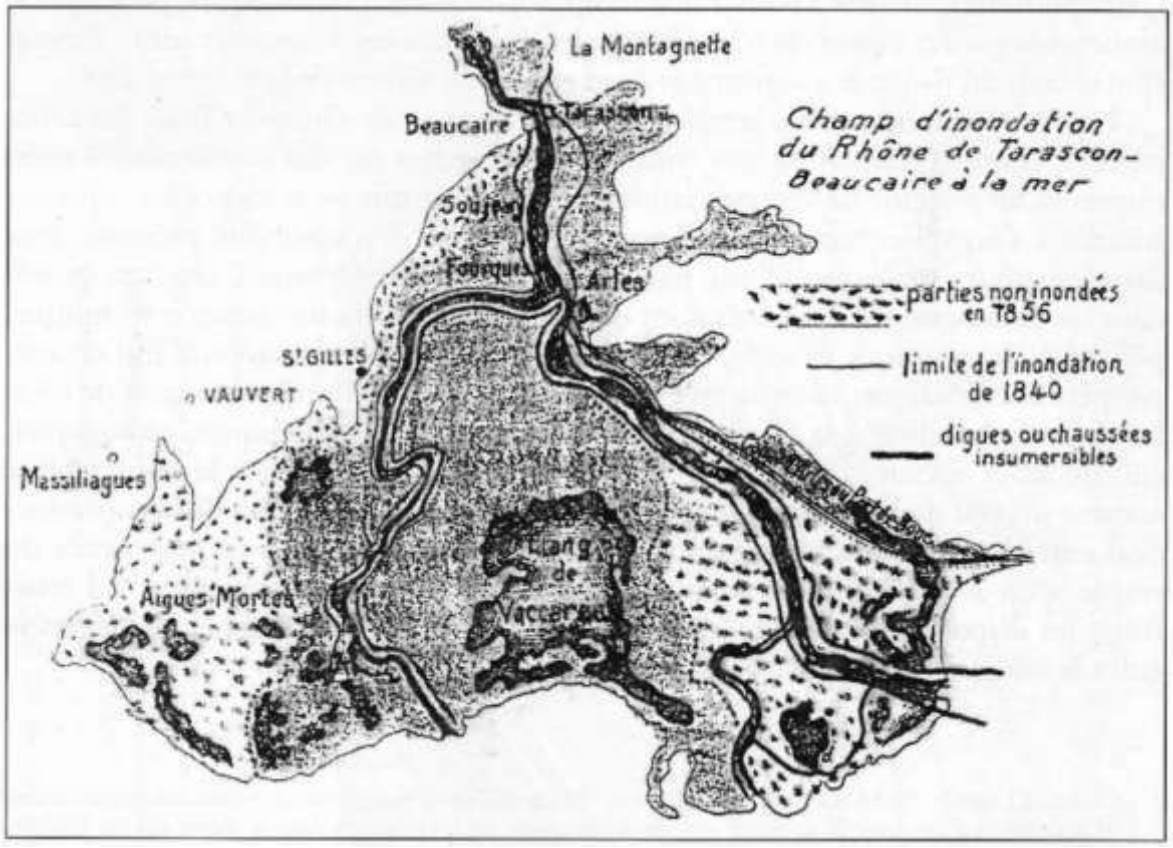


Figure 13. Inondations de 1840 et 1856 (source Pardé)

4.4 BILAN DES BRECHES (LARGEURS, DEBITS ET VOLUMES DE DEVERSEMENT)

La crue a occasionné 18 brèches et 4 départs de brèche. Sur les 18 brèches totales, 16 sont dues à la surverse et 2 ont pour origine des infiltrations (comprendre l'érosion interne).

Les brèches se sont produites dans la nuit du 2 au 3 novembre 1840, vers 2 heures du matin. Pardé [K001] donne quelques informations sur ces brèches, notamment celle de la Montagnette en rive gauche.

En rive droite, dès le 8 décembre 1840, les ingénieurs des ponts et chaussées [A1840 06] établissent un bilan de 8 brèches. Le mode de rupture des brèches est indiqué comme étant la **surverse** par Pardé [K001] et repris dans Mejean [H0080].

Le décompte général définitif établi en juillet 1841 par le Service Spécial du Rhône [A1840 13] dresse un bilan plus étendue, notamment sur le Petit Rhône en y ajoutant 7 brèches. Ont-elles été totales ou partielles ? Il est peu probable qu'elles aient été totales et même provoquées par surverse, sinon elles auraient été recensées dans le bilan de décembre 1840. Par ailleurs, l'examen des laisses de crue donne un niveau de crue sur le Petit Rhône relativement bas, qui s'explique d'une part par les dérivations de débit en amont et d'autre part par l'apparition de la brèche au droit du mas de Lauricet lors de la montée de crue ($Q \approx 7500$ m^3/s), qui a limité la montée du Rhône.

Pour les 4 départs de brèches (ou brèches partielles) (Tourette, Mas laborde, Grand Cabane amont et aval) situées sur l'amont du Petit Rhône, l'origine semble être plutôt l'érosion

interne, d'autant plus que 3 des 4 brèches sont à proximité d'un paléo-chenal. L'affouillement externe n'est cependant pas à écarter. En effet, les niveaux bas sur le Petit Rhône liés à la brèche de Lauricet conjugués à la montée des niveaux en amont a sans doute provoqué une pente d'écoulement et des vitesses sur le Petit Rhône relativement élevées. Par ailleurs, les reconnaissances géotechniques dans ces 4 secteurs ont montré la présence de sols sableux sujets à l'érosion (interne ou externe).

On notera également que le secteur en aval de l'A54 a fait l'objet d'une grande brèche en 1755 d'après A. SURREL [H0024] et d'infiltrations en 1993. En ce qui concerne les brèches de Bertaud et Mas Liviers Amont et Aval, la formation de ces brèches est intervenue le 17 novembre 1840 ([A2003 18] / [A1840 17]), soit 15 jours après la pointe de crue. Le niveau dans la plaine était encore très élevé et celui dans le Rhône revenu à un niveau bas. Les brèches se sont alors produites par écoulement dans la fondation de la zone protégée vers le fleuve. Ces faits sont notamment relatés dans le rapport de A.VALT de 1877 [A1877].

Tableau 16. Bilan général des brèches et départs de brèche lors de la crue de nov. 1840

Nom de la brèche	Type	PR digue	Largeur (m)	Initiateur rupture
Rhône rive gauche				
Montagnette (6 brèches)	Totale	RG 264,6	900 m	Surverse
Mas de Piquet	Totale	Anc. chaussées du Trébon	??	Surverse
Mas de Lansac	Totale		??	Surverse
Rhône rive droite				
Aval abattoir	Totale	RD 269,1	480 m	Surverse
Saint Peyre	Totale	RD 271,25	50 m	Surverse
Saint Denis 1ère	Totale	RD 272,0	200 m	Surverse
Saint Denis 2ème	Totale	RD 272,3	150 m	Surverse
Mas de Ranguy	Totale	RD 273,3	50 m	Surverse
Mas de Raousset	Totale	RD 277,9	50 m	Surverse
La Cine	Totale	RD 278,4 Ou PRD 279,7	100 m	Surverse
Petit Rhône rive droite				
Epi de Fourques	Totale	PRD 280,5	150 m	Surverse
Tourette	Départ de brèche	PRD 284,6	15 m	Infiltration/affouillement pas de paléo- chenal connu, sols sableux
Mas Laborde	Départ de brèche	PRD 289,1	26 m	Brèche de 1755 infiltration en 1993 paléo-chenal à proximité
Mas de Grand Cabane 1ère	Départ de brèche	PRD 290,4	19,40 m	Infiltration/affouillement paléo-chenal à proximité
Mas de Grand Cabane 2ème	Départ de brèche	PRD 291,3	13,50 m	Infiltration/affouillement paléo-chenal à proximité
Mas de Bertaud	Totale ?	PRD 293,1	90 m	Brèche par retour au Rhône le 17/11/1840 (infiltration dans le sens lit protégé/lit endigué) paléo-chenal à proximité
Mas Livier Amont	Totale ?	PRD 319,2	60 à 100 m	
Mas Livier Aval	Totale ?	PRD 321,2		
Petit Rhône rive gauche				
Lauricet	Totale	PRG 302,3	≅ 250 m	Erosion interne
Grand Rhône rive gauche				
Prend-té-Garde	Totale	GRG 286,7	≅ 100 m	Erosion interne
Total du linéaire de brèches par surverse : 2 130 mètres (estimation minimum) **Total du linéaire de brèches par infiltration (érosion interne) : ≅ 350 m** **Total du linéaire de départs de brèches par infiltration ou affouillement : ≅ 74 m** **Total du linéaire de brèches par retour au Rhône : 150 à 190 m**				

Certaines cinétiques ou caractéristiques de brèches ont pu être reconstituées à partir des documents ou plans d'archives disponibles. Elles sont résumées dans le tableau ci-dessous et justifiées dans les paragraphes ci-après :

Tableau 17. Bilan des volumes de déversement liés aux brèches de 1840

Brèche	Largeur max	Débit de pointe	Volume de déversement	Zone protégée
Montagnette (6 brèches)	900 m	1 900 m^3/s	0,8 milliard m^3	Rive gauche
Prend-té-Garde	100 m	200 m^3/s	0,05 milliard m^3	
Abattoir	480 m	4 200 m^3/s	1,2 milliard m^3	Rive droite
Saint Peyre	50 m	350 m^3/s	0,1 milliard m^3	
Saint Denis	350 m	3 300 m^3/s	1,0 milliard m^3	
Ranguy	50 m	500 m^3/s	0,15 milliard m^3	
Raousset	50 m	400 m^3/s	0,1 milliard m^3	
La cine	100 m	750 m^3/s	0,2 milliard m^3	
Epi de Fourques	150 m	1000 m^3/s	0,2 milliard m^3	
Lauricet	200 m	800 m^3/s	0,35 milliard m^3	Camargue insulaire

Ce qui donne par zone protégée, les volumes déversés au travers des brèches suivants :

- Rive droite : environ 3 milliards de m^3,
- Camargue Insulaire : environ 400 millions de m^3,
- Rive gauche : environ 850 millions de m^3.

Soit un volume total de 4,2 milliards de m^3. Ce volume correspond à la différence du volume au-dessus de 4200 m^3/s calculé suivant les limnigrammes observés et estimés suivant Pardé (Chapitre n°4).

Un autre calcul [A0011] (en supposant des niveaux statiques ce qui n'est pas une hypothèse totalement infondée au regard de la durée de la crue) a été fait à partir des laisses de crues, du champ d'expansion et du modèle numérique de terrain de la BDT IGN, il donne les résultats suivants :

- Rive droite : environ 1,4 milliards de m^3,
- Camargue Insulaire : environ 800 millions de m^3 (avec une laisse à 1,9 m NGF),
- Rive gauche : environ 600 millions de m^3 (non prise en compte des volumes en aval de Meyranne).

Soit un volume total de 2,8 milliards de m^3. Ce volume correspond à la différence du volume au-dessus de 6000 m^3/s calculé suivant les limnigrammes observés et estimés suivant Pardé (Chapitre n°4).

En l'absence de modélisations hydrauliques, on retiendra un volume de déversement de l'ordre de 3 milliards de m^3.

4.5 BRECHES DIGUE DE LA MONTAGNETTE

Plusieurs brèches ont été occasionnées dans la digue de la Montagnette. La carte de Poulle extraite de l'étude historique de G. PICHARD [H0004] en localise six (6).

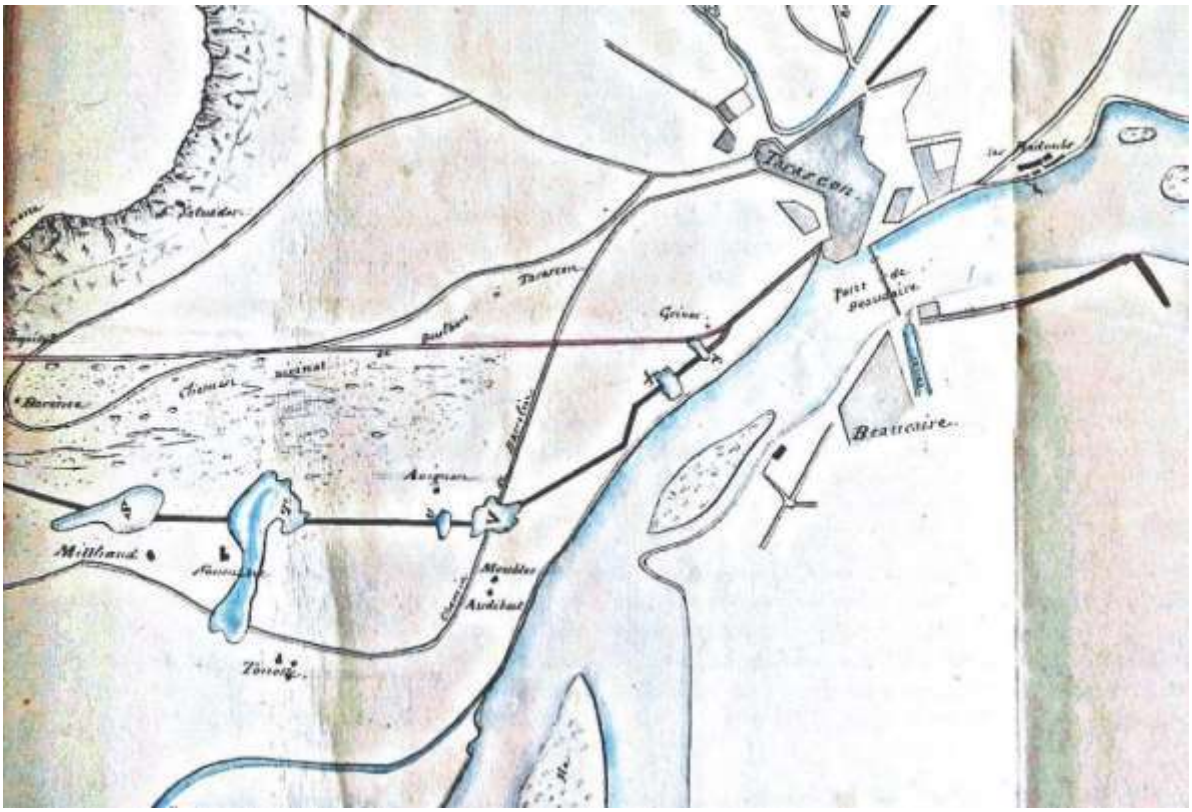


Figure 14. Crue nov. 1840 – Carte de Poulle – brèches dans la Montagnette (Pichard [H0004])

L'examen des plans d'archives des ponts et chaussées donne une largeur de la principale brèche d'environ 400 mètres.

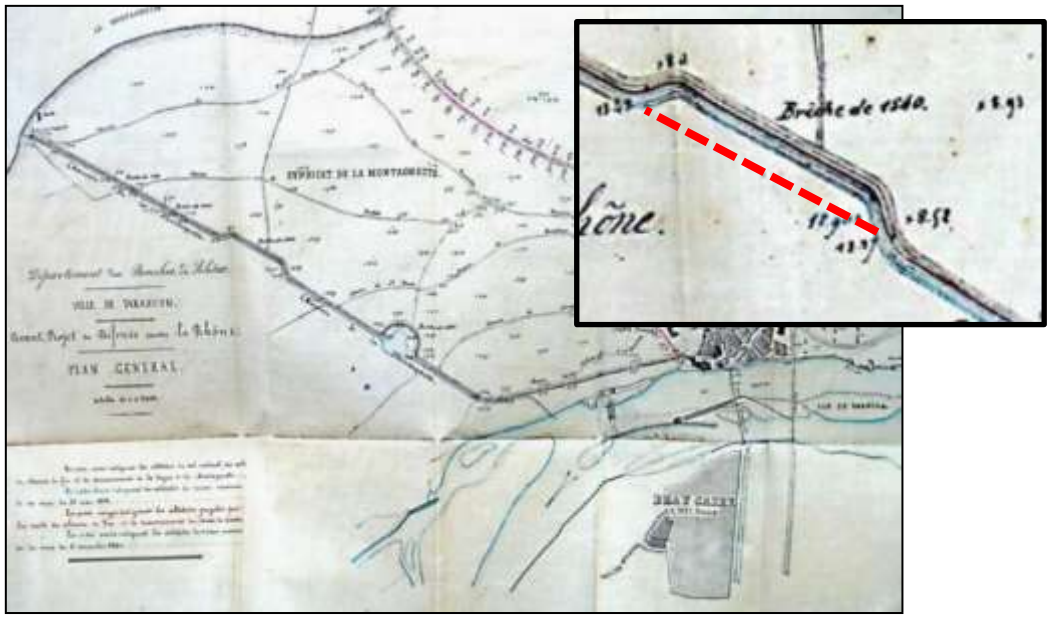


Figure 15. Carte d'avant-projet de défense de Tarascon contre le Rhône – Secteur amont de Tarascon (Archives départementales des Bouches-du-Rhône) Source DDE 13 [A1856 06]

On peut estimer la longueur totale des brèches à environ 900 mètres. Le mode de rupture initiateur semble être la surverse d'après Pardé [K001] et un rapport du Service Spécial du Rhône. En ajoutant un dénivelé hydraulique de 90 cm au niveau max de la crue estimé à 10,36 m NGF le 3 novembre 1840 à 2 heures du matin à l'échelle du pont de Beaucaire, la cote maximum est estimée à 11,26 m NGF au moment de la rupture, soit un peu moins de 3 m au-dessus du terrain naturel (8,5 m NGF) et 3 m en dessous de la crête de digue actuelle (cote du parapet : env. 14 m NGF).
Le modèle numérique de terrain ci-après réalisé par l'IGN en 2009 [C202] permet de voir les cônes de déjection en amont des brèches créés par l'accélération des vitesses. On peut également voir des marques de paléo-chenaux.

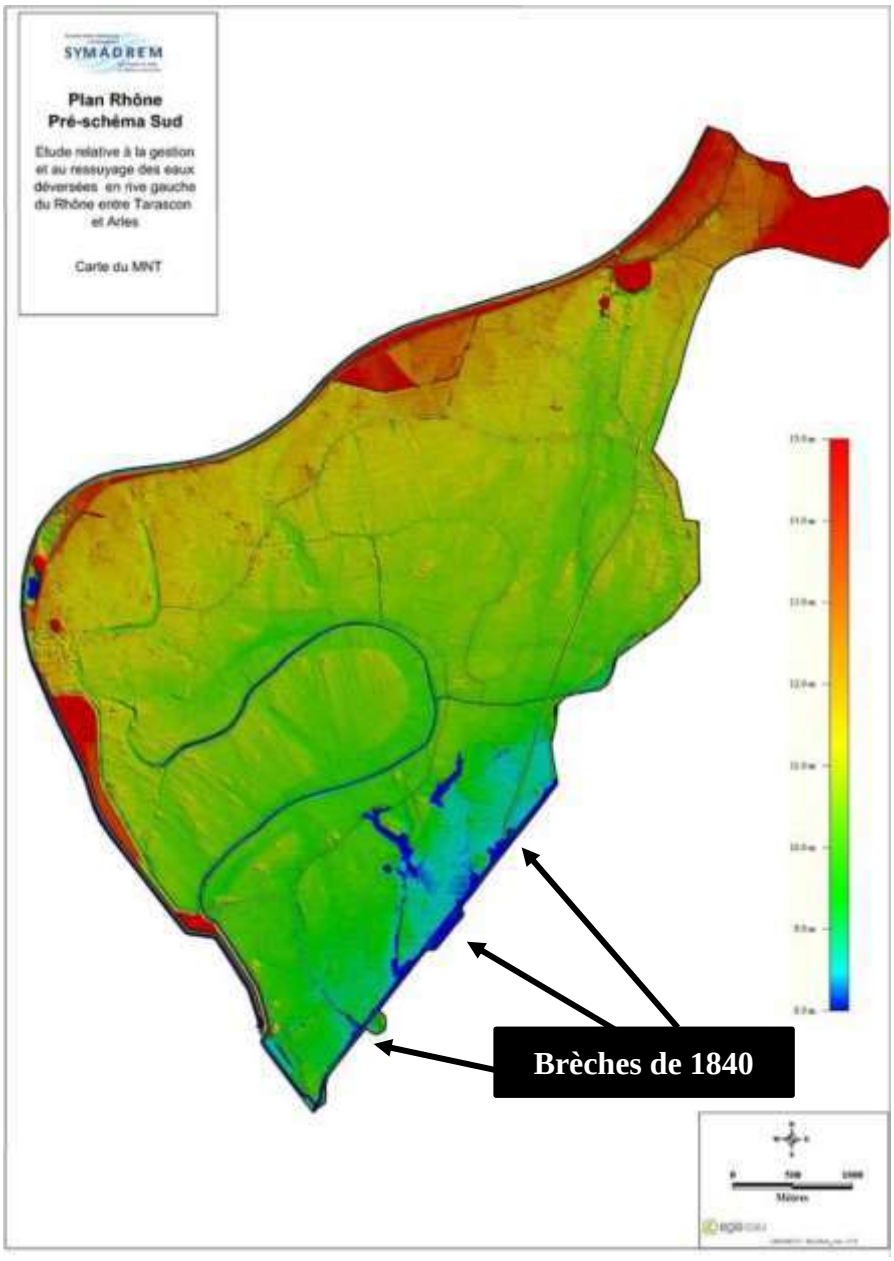


Figure 16. Modèle numérique de terrain (BDT IGN [C202])

A partir du limnigramme à l'échelle de Beaucaire recalé dans le référentiel NGF IGN 69 (le zéro de l'échelle était calé à 3,49 m NGF) et en retenant les hypothèses suivantes :

- Dénivelé hydraulique entre l'échelle de Beaucaire et la brèche : 90 cm
- Largeur des brèches : 900 mètres
- Coefficient de seuil : 0,3
- Cote du terrain naturel aval : 8,5 m NGF
- Temps d'ouverture : quelques heures

On estime la somme des débits de pointe des 6 brèches à environ 4 000 m^3/s et un volume total de déversement de 800 millions de m^3 du 3 nov. 1840 à 2 heures du matin au 7 novembre 1840, date à laquelle le niveau de la crue est redescendu sous le niveau du terrain naturel.

Ce volume de brèches apparait comme un bon ordre de grandeur au regard de la laisse de crue à Pont de Crau de 7,7 m NGF et des résultats du scénario de brèche n°7 issu de l'étude de dangers de RFF, qui donne un niveau modélisé de 7,5 m NGF pour un volume de brèche de 660 millions de m^3.

4.6 GRG 286,7 - BRECHE DE PREND-TE-GARDE

Cette brèche est mentionnée dans Pardé [K001] comme étant une brèche par retour du Rhône dans son lit. La lecture des journaux de l'époque nous indique qu'il s'agit en fait d'une brèche occasionnée très tôt le 30 octobre 1840, soit 3 jours avant la pointe de crue pour un débit estimé à 6500 m^3/s. Il est donc probable que les eaux provenant des brèches de la Montagnette soient retournées en partie dans le Rhône par cette ouverture.

Cette rupture a vraisemblablement été initiée par érosion interne. La présence de sable B5 (suivant la GTR) traversant la digue et de sable D1 en fondation a en effet été observée lors des investigations géotechniques menées sous la direction d'$EGIS_{eau}$ dans le cadre des travaux de confortement de la digue du Grand Rhône rive gauche au sud d'Arles.

Les études de projet [D603] réalisées par $EGIS_{eau}$ permettent de nous donner quelques informations supplémentaires sur la présence possible d'un paléo-chenal dans ce secteur du fleuve.
« L'étude des cartes anciennes et des différentes sources inventoriant les paléo-chenaux du Rhône ne permet pas de définir la présence d'anciens lits recoupant l'axe de la protection.
La seule information permettant de supposer la présence d'un ancien méandre du Rhône au droit de la zone d'étude est le cadastre napoléonien, qui permet d'observer une répartition du parcellaire agricole perpendiculaire à des axes de roubines de largeur variable, avec bandes de terrains longitudinales non cultivées.
Cette disposition des structures du paysage est caractéristique de la recolonisation d'anciens méandres par l'homme (maintien d'un drainage dans les points bas, installation du parcellaire agricole dans l'ancien lit…). Les principales roubines perdurent aujourd'hui dans le paysage et sont utilisées pour le ressuyage des rizières du Mas de la Ville. »

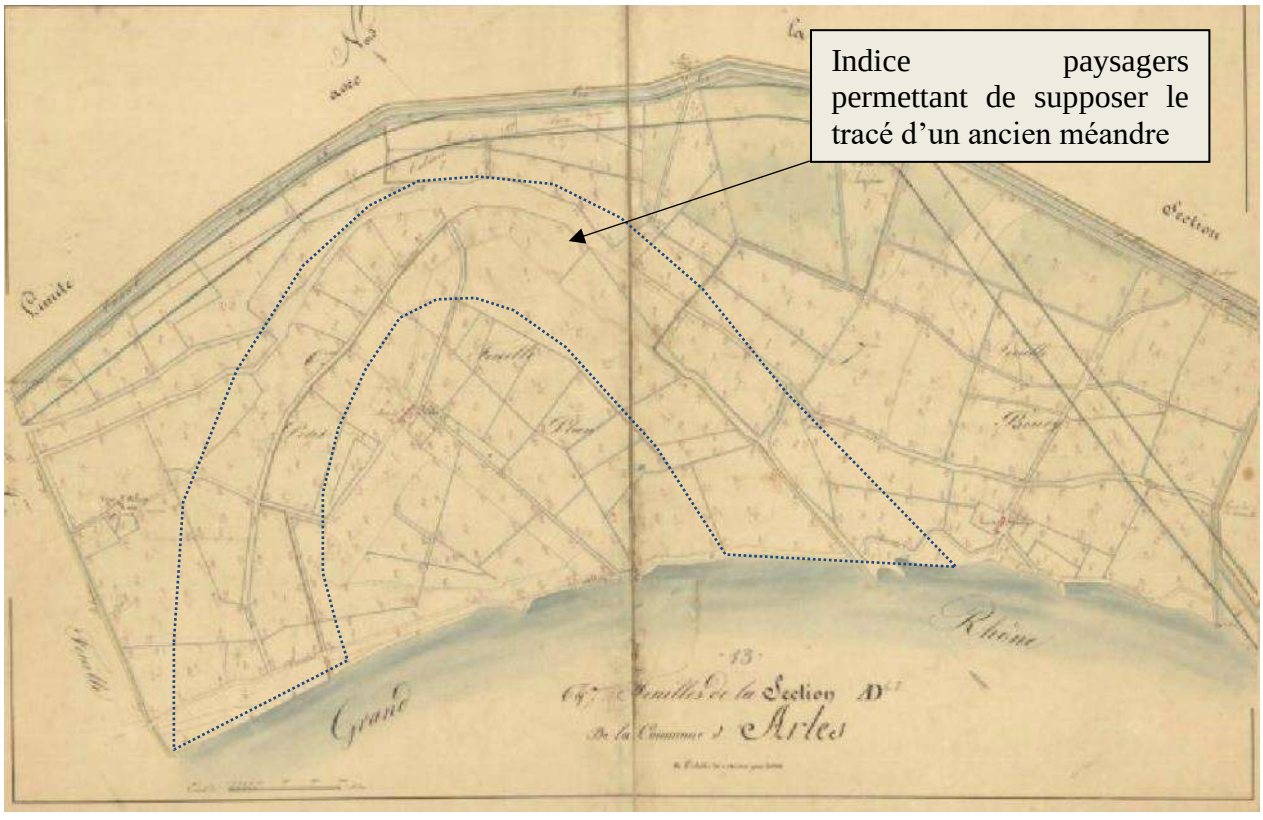


Figure 17. Extrait du cadastre napoléonien sur le secteur du Petit Plan du Bourg

L'amont du paléo-chenal semble néanmoins se situer au sud de la brèche.

Dans la même étude, EGISeau note que sur la partie située juste en aval du lieu-dit « prends-té-garde », ainsi que sur le cadastre napoléonien, que l'axe de digue effectue une brusque angulation, qui n'apparait plus sur la carte des Ponts et Chaussées de 1876 [H0003] ni sur le tracé actuel.

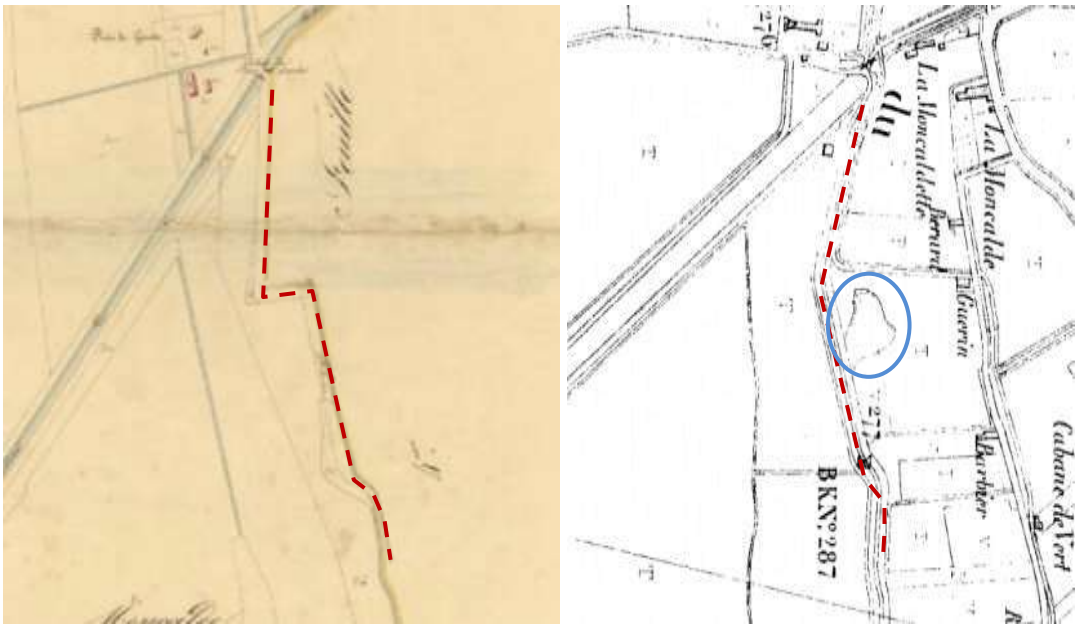


Figure 18. Comparaison des tracés de digue en aval du Mas de Prends-Té-Garde

L'axe de la digue semble donc avoir été légèrement déplacé vers le fleuve, très probablement suite à une brèche. En effet, la toponymie récente mentionne le « Mas de la brèche » au droit du secteur, de plus la carte des Ponts et Chaussées permet d'observer une zone qui tranche avec le parcellaire agricole plutôt géométrique et qui pourrait s'apparenter à une fosse d'affouillement (entourée en bleu sur la figure précédente).

Cette zone n'est plus visible aujourd'hui, cependant elle peut être observée sur la photo aérienne de 1942, où une zone (boisée/humide ?) reste présente au droit de la brèche supposée et recoupe le parcellaire agricole.

Cette photo permet également de visualiser l'emprise de l'ouvrage de jonction entre le Vigueirat et le Rhône, retrouvé sur la carte de 1642 et sur le cadastre napoléonien.

Figure 19. Extrait de photo aérienne de 1942 / encart de 2005 – Source IGN

Certains indices témoins de cette brèche perdurent aujourd'hui sur site :

- La coupe de l'angle de la parcelle de verger,
- La présence de produits divers sur la parcelle, traduisant de son remblaiement avec des produits anthropiques,
- La topographie du site, située en moyenne 50 cm sous le niveau des terrains alentours en amont et en aval (niveau entre 3 et 3,2 m NGF au droit du secteur remblayé, niveaux homogènes à 3,7 m NGF de part et d'autre).

A partir du limnigramme à l'échelle d'Arles recalé dans le référentiel NGF IGN 69 (le zéro de l'échelle était calé à 1,30 m NGF) et en retenant les hypothèses suivantes :

- Dénivelé hydraulique entre l'échelle d'Arles et la brèche : 20 cm
- Cote maximum de la crue au droit de la brèche : 6,15 m NGF
- Hauteur d'eau par rapport au terrain naturel : 1,45 m
- Largeur de la brèche : 100 mètres
- Coefficient de seuil : 0,24
- Cote du terrain naturel aval : 4,7 m NGF
- Temps d'ouverture : quelques heures

On estime le débit de pointe dans la brèche à environ 200 m^3/s et un volume de déversement de 50 millions de m^3 du 30 octobre 1840 au 3 novembre 1840, date à laquelle de nombreuses brèches se sont produites en amont d'Arles et ont eu pour effet d'inverser le sens de l'inondation. Ce volume reste faible au regard de la durée de l'événement mais s'explique par l'éloignement de la digue par rapport au fleuve et l'altimétrie relativement élevé du ségonnal qui a la hauteur de déversement et donc le débit.

4.7 RD 269.1 - BRECHE DE L'ABATTOIR

La brèche de l'abattoir est située au RD 269,1, soit environ 1 km en aval du viaduc ferroviaire Beaucaire/Tarascon. A cet endroit, la digue est située à l'ouest du Site-Industrialo-Portuaire actuel de Beaucaire, qui est venu se substituer dans les années 1970 à la protection que constituait cette digue.

Figure 20. Orthophotoplans FLIMAP 2007 [T0003] et Plan d'archives localisant la brèche de l'abattoir [A1841 03]

L'examen des plans et documents d'archives [A1840 06] donne les indications suivantes :

- Largeur de la brèche : 480 mètres
- Extension de la fosse en aval de la brèche : 300 mètres pour une hauteur de crue par rapport au terrain naturel de 4,5 mètres.
- Niveau de 7 mètres entre l'étiage et la cote de la digue (d'après [A1841 03])

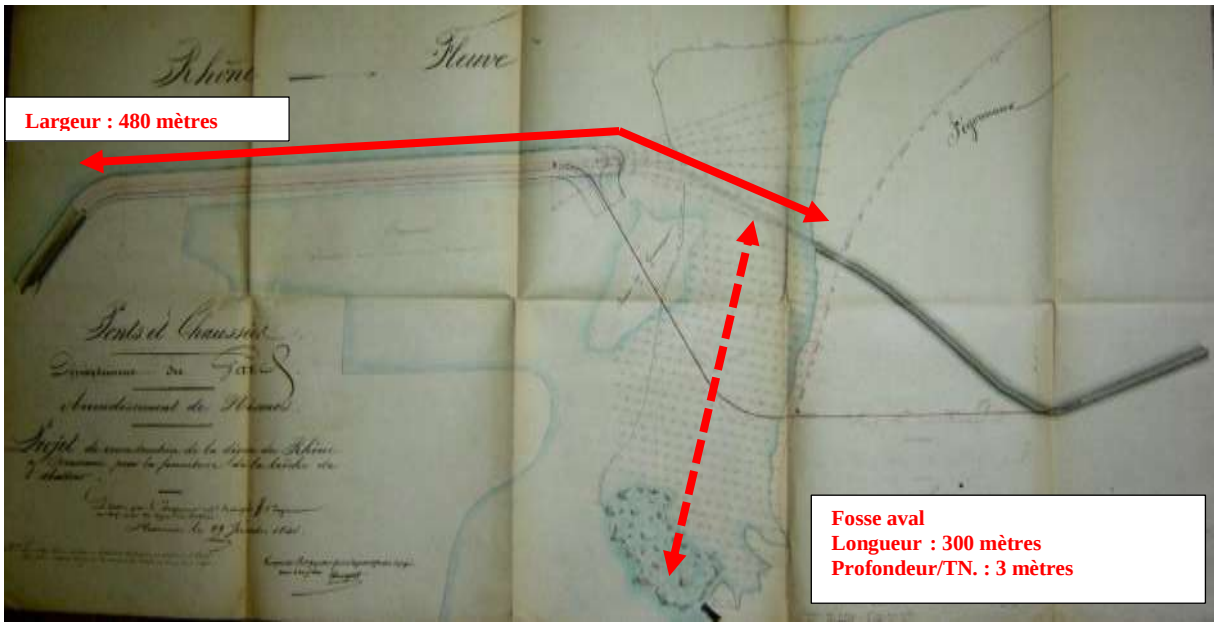


Figure 21. Vue en plan de la brèche de l'abattoir SSR [A1841 03]

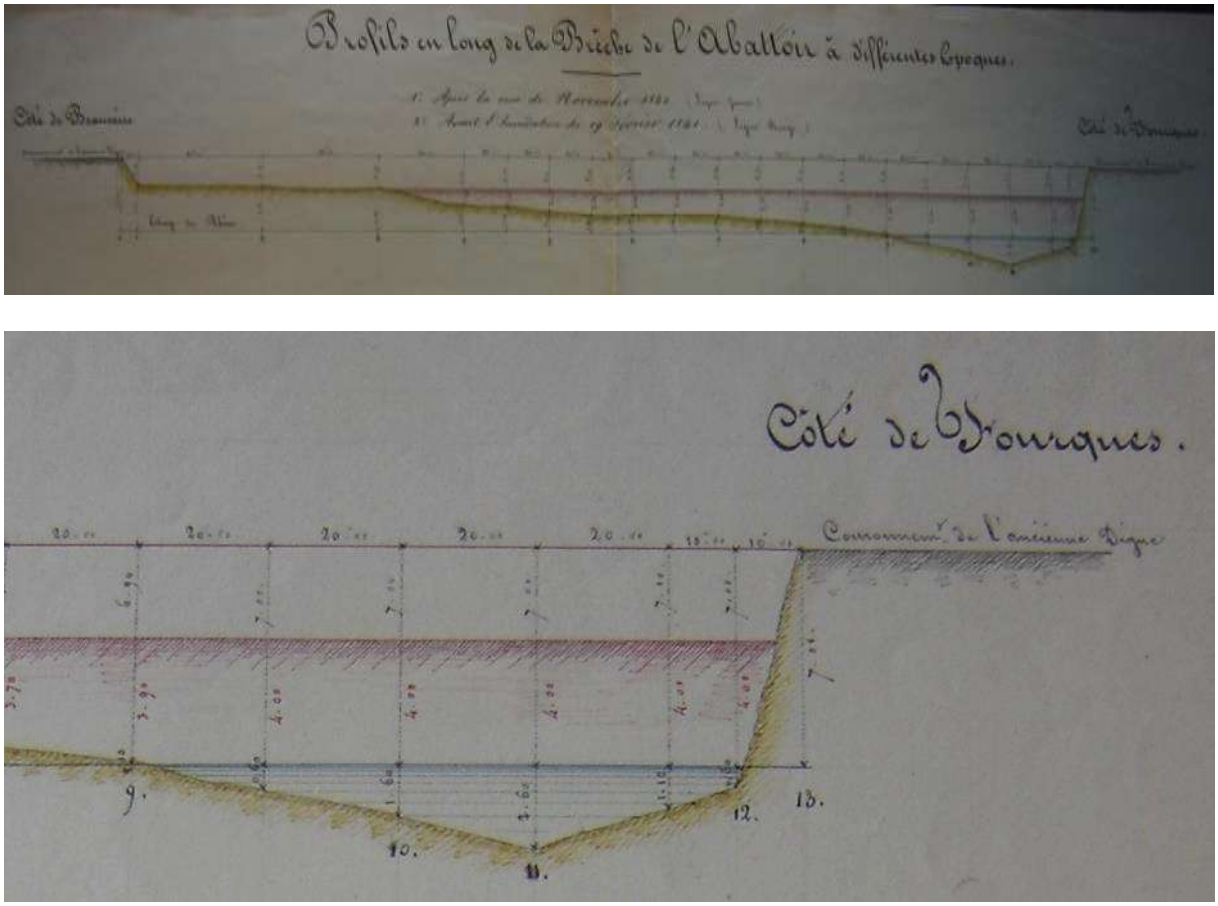


Figure 22. Profil en long de la brèche de l'abattoir SSR [A1841 03]

Concernant cette rupture de digue, plusieurs versions se sont propagées et notamment la suivante : « L'autorité de la ville de Beaucaire, craignant que la partie basse de la ville soit

engloutie par le fleuve, aurait facilité la rupture de la chaussée tout près de l'abattoir au-dessous de la ville pour prévenir de malheurs infiniment plus grands… ».

A partir des limnigrammes des échelles de Beaucaire et d'Arles recalés dans le référentiel NGF IGN 69 et interpolés au droit de la brèche et en retenant les hypothèses suivantes :

- Cote maximum estimée de la crue au droit de la brèche : 10 m NGF
- Hauteur estimée de la digue par rapport au terrain naturel : 4,5 m
- Largeur de la brèche : 480 mètres
- Coefficient de seuil : 0,24
- Cote du terrain naturel aval : 5,5 m NGF
- Temps d'ouverture : quelques heures

On estime le débit de pointe dans la brèche à environ 4 200 m^3/s et un volume de déversement de 1,2 milliard de m^3 du 3 nov. 1840 à 2 heures du matin au 7 novembre 1840, date de fermeture de la brèche. Ce volume est considérable mais l'ordre de grandeur reste probable compte tenu des faits relatés dans [A2003 18] et de la topographie du nord de la plaine de Beaucaire faisant la forme d'un cône d'érosion [C202].

4.8 RD 271.25 - BRECHE DE SAINT PEYRE

La brèche de l'abattoir est située au RD 271,25, soit environ 2 km en aval du viaduc ferroviaire. A cet endroit, la digue est située à l'ouest du Site-Industrialo-Portuaire actuel de Beaucaire qui est venu se substituer en tant que protection à la digue d'origine dans les années 1970. L'examen des documents d'archives [A1840 06] donne les indications suivantes :

- Largeur de la brèche : 50 mètres
- Niveau de 4 mètres entre l'étiage et la cote de la digue

Sur les ortho-photo plans, on peut encore apercevoir la fosse d'affouillement en aval de la brèche, dont l'extension aval est estimée à 50 m pour une hauteur d'eau de 4 mètres par rapport au terrain naturel.

Figure 23. Localisation de la brèche de Saint Peyre – crue novembre 1840

A partir des limnigrammes des échelles de Beaucaire et d'Arles recalés dans le référentiel NGF IGN 69 et interpolés au droit de la brèche et en retenant les hypothèses suivantes :

- Cote maximum estimée de la crue au droit de la brèche : 9,5 m NGF
- Hauteur estimée de la digue par rapport au terrain naturel : 4 m
- Largeur de la brèche : 50 mètres
- Coefficient de seuil : 0,24
- Cote du terrain naturel aval : 5,5 m NGF
- Temps d'ouverture : quelques heures

On estime le débit de pointe dans la brèche à environ 350 m^3/s et un volume de déversement de 100 millions de m^3 du 3 nov. 1840 à 2 heures du matin au 7 novembre 1840, date de fermeture de la brèche..

4.9 RD 272.0 ET RD 272.5 - BRECHES DE SAINT DENIS

Les deux brèches de Saint-Denis sont situées entre le RD 272 et 272,5 au lieu-dit du « fer à cheval ». Le mode de rupture ayant provoqué la brèche en novembre 1840 est la surverse d'après Pardé [K001]. Les travaux de réparation effectués après la crue de novembre 1840 ont consisté à reconstruire une nouvelle digue au milieu de la fosse d'affouillement aval suivant le tracé figurant ci-dessous. Une petite crue en février 1841 et une crue importante en novembre 1841 ont rompu l'ouvrage, ce qui a amené les ingénieurs de l'époque à reconstruire l'ouvrage en contournant la fosse d'affouillement par l'aval, formant un fer à cheval, qui a donné son nom au lieu.

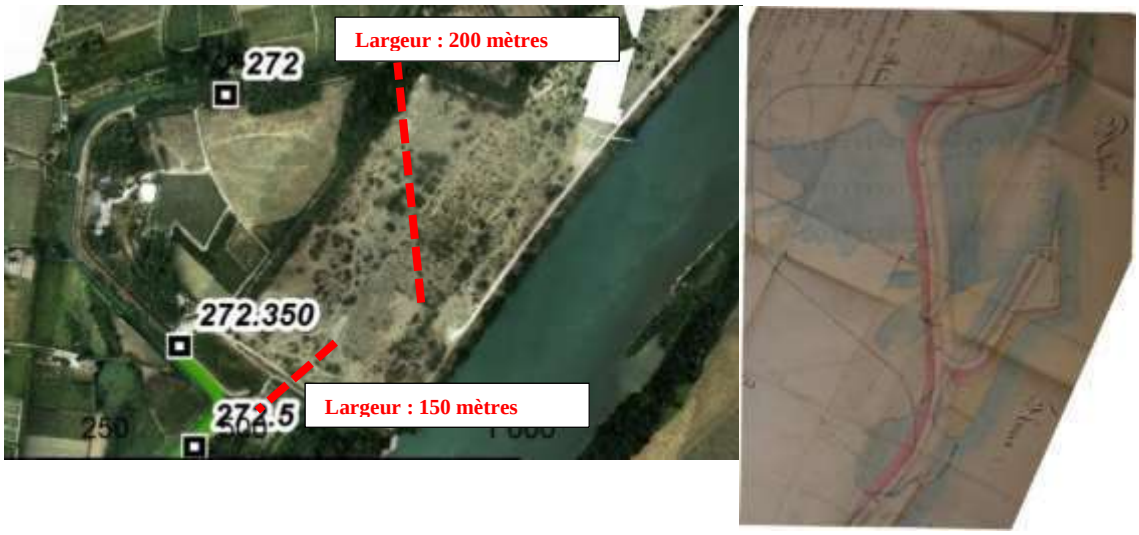


Figure 24. Localisation des deux brèches de Saint Denis – crue nov. 1840 (SSR [A1840 11])

L'examen des plans et documents d'archives [A1840 06] donne les indications respectives pour la 1ère et la 2ème brèche de Saint Denis :

- Largeur de la brèche : 200 mètres (Br1) et 150 mètres (Br2)
- Extension de la fosse en aval de la brèche : 500 mètres (Br1) et 100 mètres (Br2) pour une hauteur d'eau d'au moins 4,80 mètres par rapport au terrain naturel

A partir des limnigrammes des échelles de Beaucaire et d'Arles recalés dans le référentiel NGF IGN 69 et interpolés au droit des brèches et en retenant les hypothèses suivantes :

- Cote maximum estimée de la crue au droit des brèches : 9,3 m NGF
- Hauteur estimée de la digue par rapport au terrain naturel : 4,8 m
- Largeur de la brèche : 350 mètres
- Coefficient de seuil : 0,24
- Cote du terrain naturel aval : 4,5 m NGF
- Temps d'ouverture : quelques heures

On estime le débit de pointe dans la brèche à environ 3 300 m^3/s et un volume de déversement de 1 milliard de m^3 du 3 nov. 1840 à 2 heures du matin au 7 novembre 1840, date de fermeture de la brèche. Ce volume est considérable mais l'ordre de grandeur reste probable

compte tenu des faits relatés dans [A2003 18] et de la topographie du nord de la plaine de Beaucaire faisant la forme d'un cône d'érosion [C202].

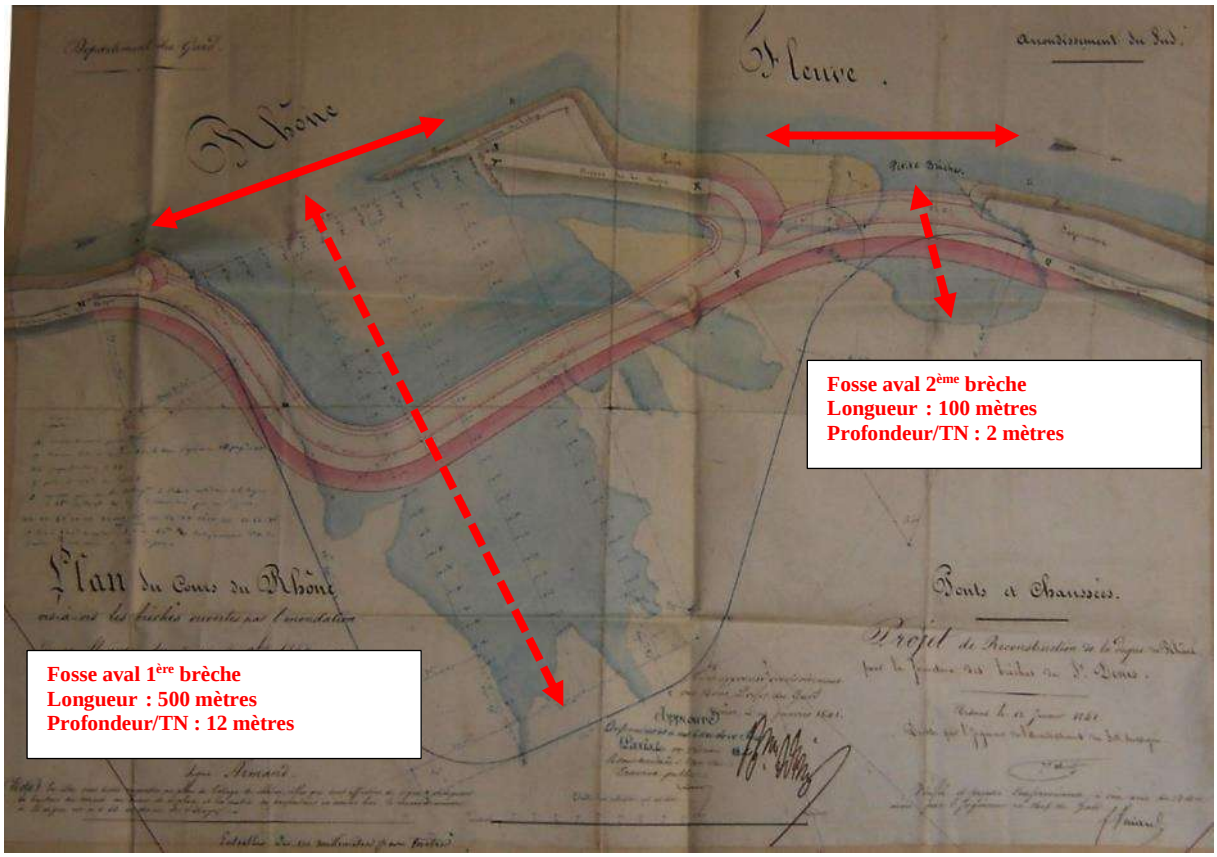


Figure 25. Vue en plan des deux brèches de Saint-Denis – crue nov. 1840 (SSR [A1840 11])

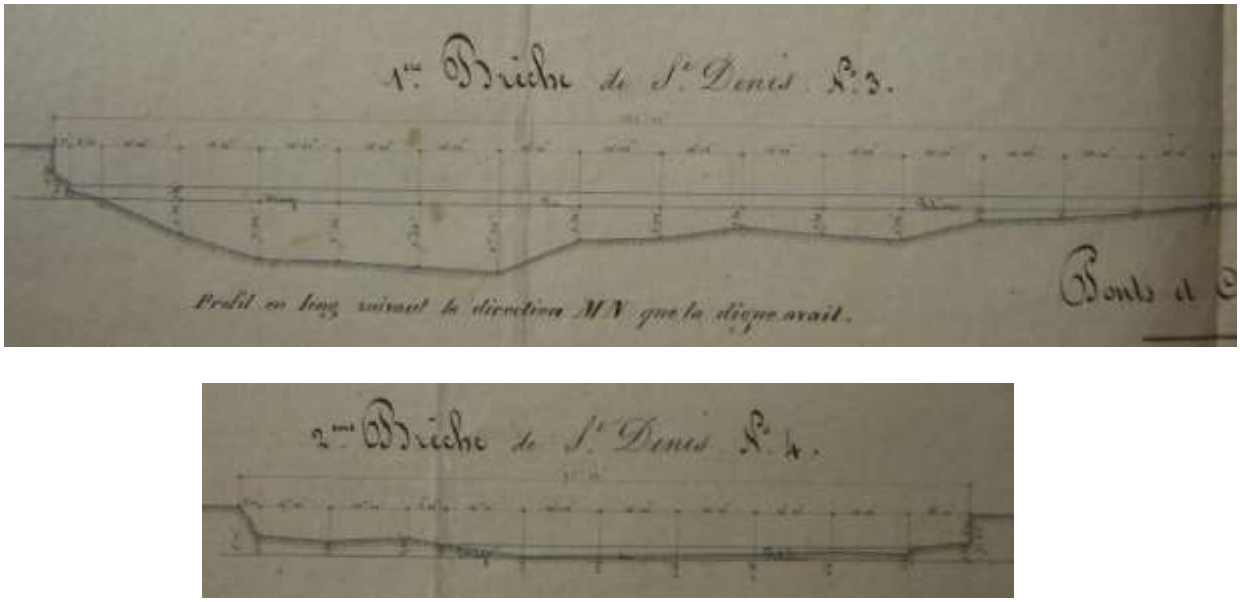


Figure 26. Profil en long des deux brèches de Saint Denis – crue nov. 1840 (SSR [A1840 11])

4.10 RD 273.3 - BRECHE DU MAS DE RANGUY

La brèche du Mas de Ranguy est située au RD 273,3. Le mode de rupture ayant provoqué la brèche est la surverse d'après Pardé [K001]. Aucune vue en plan des Ponts et Chaussées positionnant la brèche n'a été trouvée dans les archives départementales ou communales.

Son positionnement a été estimé à partir de la carte des ponts et chaussées de 1876 [H0003], qui localise sur une longueur de 90 m une digue avec un perré sur le talus amont (Code IRP), qui est la technique utilisée au XIX^{ème} siècle pour la réparation des anciennes brèches (SSR [A1840 06]). L'examen des documents d'archives [A1840 08] donne les indications suivantes :

- Largeur de la brèche : 50 mètres
- Niveau de 4 mètres entre l'étiage et la cote de la digue

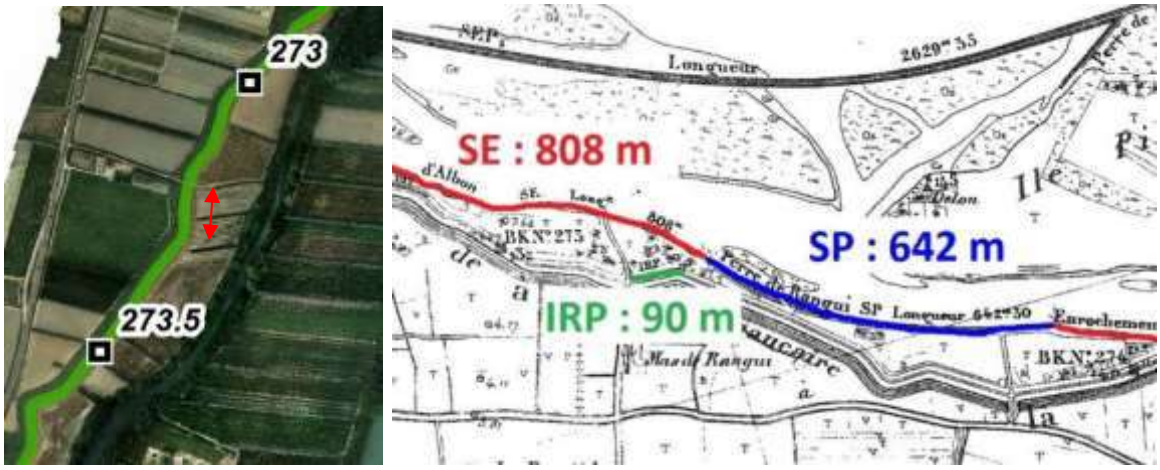


Figure 27. Localisation de la brèche de Ranguy – crue nov. 1840

A partir des limnigrammes des échelles de Beaucaire et d'Arles recalés dans le référentiel NGF IGN 69 et interpolés au droit des brèches et en retenant les hypothèses suivantes :

- Cote maximum estimée de la crue au droit de la brèche : 9,1 m NGF
- Hauteur estimée de la digue par rapport au terrain naturel : 4,6 m
- Largeur de la brèche : 50 mètres
- Coefficient de seuil : 0,24
- Cote du terrain naturel aval : 4,5 m NGF
- Temps d'ouverture : quelques heures

On estime le débit de pointe dans la brèche à environ 500 m^3/s et un volume de déversement de 150 millions de m^3 du 3 nov. 1840 à 2 heures du matin au 7 novembre 1840, date de fermeture de la brèche.

4.11 RD 277,9 - BRECHE DU MAS DE RAOUSSET

La brèche du Mas de Raousset est située au RD 277,9. Le mode de rupture ayant provoqué la brèche est la surverse d'après Pardé [K001]. Son positionnement a été déduit à partir de la localisation du mas de Raousset et du tracé de la digue qui forme un petit « fer à cheval » en amont du mas. L'examen des documents d'archives [A1840 08] donne les indications suivantes :

- Largeur de la brèche : 50 mètres
- Niveau de 4 mètres entre l'étiage et la cote de la digue

Figure 28. Localisation de la brèche de Raousset – crue nov. 1840

A partir des limnigrammes des échelles de Beaucaire et d'Arles recalés dans le référentiel NGF IGN 69 et interpolés au droit des brèches et en retenant les hypothèses suivantes :

- Cote maximum estimée de la crue au droit de la brèche : 8 m NGF
- Hauteur estimée de la digue par rapport au terrain naturel : 4,0 m
- Largeur de la brèche : 50 mètres
- Coefficient de seuil : 0,24
- Cote du terrain naturel aval : 4,0 m NGF
- Temps d'ouverture : quelques heures

On estime le débit de pointe dans la brèche à environ 400 m^3/s et un volume de déversement de 100 millions de m^3 du 3 nov. 1840 à 2 heures du matin au 7 novembre 1840, date de fermeture de la brèche.

4.12 RD 278.4 - BRECHE DE LA CINE

La brèche de la Cine est difficile à localiser. Le lieu-dit de la Cine est situé aujourd'hui vers le PK 279. Le « fer à cheval » situé au RD 278,4 laisse penser que la brèche a pu se produire à cet endroit. Le mode de rupture ayant provoqué la brèche est la surverse d'après Pardé [K001]. L'examen des documents d'archives [A1840 08] donne les indications suivantes :

- Largeur de la brèche : 100 mètres
- Niveau de 5 mètres entre l'étiage et la cote de la digue

Figure 29. Localisation probable de la brèche de la Cine – crue novembre 1840

A partir des limnigrammes des échelles de Beaucaire et d'Arles recalés dans le référentiel NGF IGN 69 et interpolés au droit des brèches et en retenant les hypothèses suivantes :

- Cote maximum de la crue au droit de la brèche : 7,9 m NGF
- Hauteur estimée de la digue par rapport au terrain naturel : 3,9 m
- Largeur de la brèche : 100 mètres
- Coefficient de seuil : 0,24
- Cote du terrain naturel aval : 4,0 m NGF
- Temps d'ouverture : quelques heures

On estime le débit de pointe dans la brèche à environ 750 m^3/s et un volume de déversement de 200 millions de m^3 du 3 nov. 1840 à 2 heures du matin au 7 novembre 1840, date de fermeture de la brèche.

4.13 BRECHE VIS-A-VIS DE L'EPI DE FOURQUES

La brèche de l'épi de Fourques est située au RD 280. Le mode de rupture ayant provoqué la brèche est la surverse d'après Pardé [K001].
Son positionnement a été estimé à partir de la carte des ponts et chaussées de 1876 [H0003], qui localise en amont du RD280 sur une longueur de 328 m une digue avec un perré sur le talus amont (Code IRP), qui est la technique utilisée au XIX^{ème} siècle pour la réparation des anciennes brèches [A1840 06]. Son positionnement peut être également vérifié à partir d'un plan d'archives de 1856 sur la corrosion observée sur la rive opposée. L'examen des documents d'archives [A1840 08] donne les indications suivantes :

- Largeur de la brèche : 150 mètres
- Niveau de 6 mètres entre l'étiage et la cote de la digue

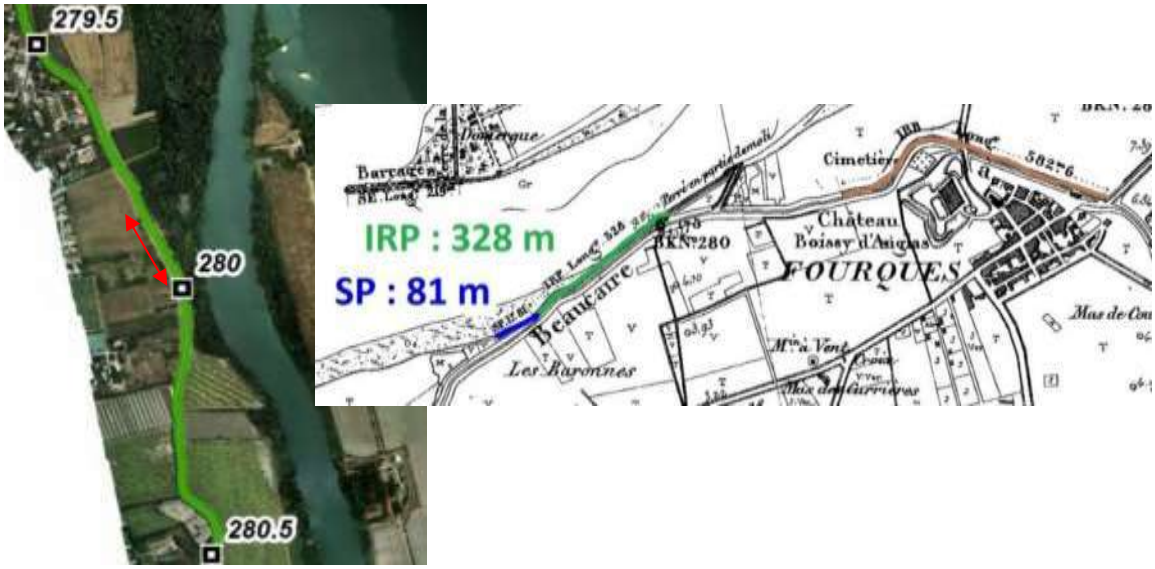


Figure 30. Localisation de la brèche de l'Epis de Fourques – crue nov. 1840

A partir des limnigrammes des échelles de Beaucaire et d'Arles recalés dans le référentiel NGF IGN 69 et interpolés au droit des brèches et en retenant les hypothèses suivantes :

- Cote maximum estimée de la crue au droit de la brèche : 7,5 m NGF
- Hauteur estimée de la digue par rapport au terrain naturel : 3,5 m
- Largeur de la brèche : 150 mètres
- Coefficient de seuil : 0,24
- Cote du terrain naturel aval : 4,0 m NGF
- Temps d'ouverture : quelques heures

On estime le débit de pointe dans la brèche à environ 1000 m^3/s et un volume de déversement de 200 millions de m^3 du 3 nov. 1840 à 2 heures du matin au 7 novembre 1840, date de fermeture de la brèche.

On notera la laisse de crue relevée à 6,5 m NGF dans le centre du village pour un terrain naturel à environ 4 m NGF, soit une hauteur d'eau de 2,5 m, ce qui est conforme aux faits relatés.

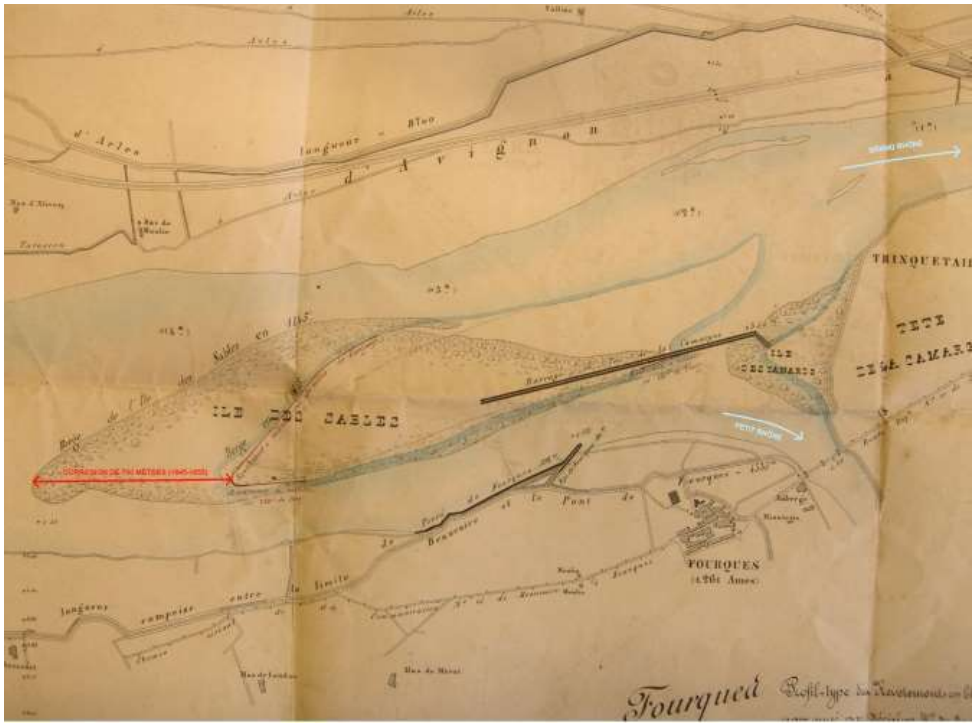


Figure 31. Corrosion de l'ile des Sables entre 1845 et 1855 (Ponts et Chaussées, 1856 source [H0080])

4.14 PRD 284.2 A 282.8 – « BRECHE » DE LA TOURETTE

Les autres brèches ne figurent pas dans le bilan établi en décembre 1840. En revanche, elles figurent dans le décompte général définitif de 1841 du Service Spécial du Rhône [A1840 13]. Leur largeur est plus faible, ce qui laisse penser à des départs de brèches ou gros désordres.

Le départ de brèche de la Tourette d'une longueur de 15 m est située en le PRD 284,2 et 284,8. Son origine peut être l'affouillement externe ou l'érosion interne. Les reconnaissances géotechniques menées lors des études du Plan Rhône ont révélé la présence de sable en fondation (aucun paléo-chenal n'est recensé dans ce secteur du fleuve, la présence de sable peut avoir une origine anthropique lors du comblement de la fosse d'affouillement de la brèche). Des infiltrations dans le sens zone protégée/fleuve ont été observées lors des périodes d'étiage en 1877 (rapport d'A. VALTZ - [A1877 01]) juste après la construction du canal d'irrigation de Beaucaire en pied aval de la digue (éloigné d'une dizaine de mètres depuis).
Le positionnement de la brèche a été estimé à partir de la carte des ponts et chaussées de 1876 [H0003], qui localise, sur une longueur de 729 m, une digue avec un perré sur le talus amont (Code IRP), qui est la technique utilisée au XIX^{ème} siècle pour la réparation des anciennes brèches.

Figure 32. Localisation de la brèche de la Tourette – crue nov. 1840

4.15 PRD 289.0 – « BRECHE » DU MAS DE LABORDE

Le départ de brèche de la Laborde d'une longueur de 26 m est située en le PRD 289,0 et 289,5, vraisemblablement juste en aval du PRD 289,0. Son origine semble être l'érosion interne. En effet, l'éloignement de la digue du fleuve nous permet d'écarter l'affouillement externe comme mode de rupture. La surverse n'est également pas privilégiée compte tenu de l'absence de mention de cette brèche dans le bilan établi en décembre 1840 (SSR [A1840 08]).

L'érosion interne semble être le mode de rupture privilégiée compte tenu de :

- L'observation d'infiltrations sur un linéaire important lors des crues d'octobre 1993 et de janvier 1994. Ces dernières ont été traitées par la réalisation d'un remblai drainant [A1994 04],
- La proximité d'un paléo-chenal (Cf. Chap. 4),
- La présence de montilles de sables sur la carte des ponts et chaussées de 1876 [H0003],
- La présence d'une paléo-brèche en 1755 mentionnée dans Surrel [H1009] et confirmée par les travaux effectués par le CEREGE sur la carte géologique. Ces travaux montrent en effet dans le secteur situé juste en aval de l'autoroute A54, des couches sableuses sont disposées sous la forme de cône d'érosion laissant supposer une ancienne brèche. Il est très fort probable qu'il s'agisse de la brèche de 1755 relaté par Surrel et Pichard [H0004]. L'extrait de la carte géologique figure ci-dessous.

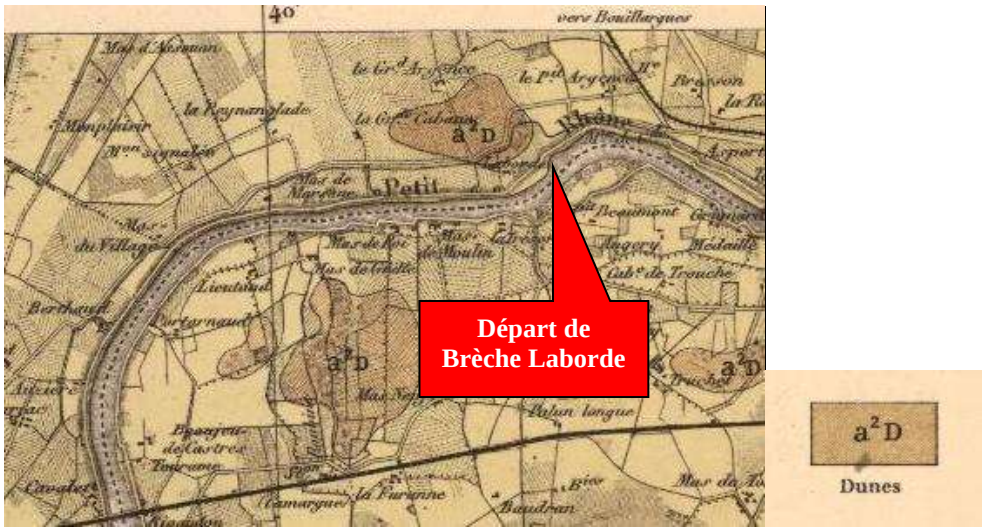


Figure 33. Carte géologique dans le secteur d'Argence [M002]

Figure 34. Localisation de la brèche de Laborde – crue nov. 1840

4.16 PRD 290.4 ET PRD 291.3 – PETITE ET GRANDE « BRECHE » DU MAS DE GRAND CABANE

Les petite et grande brèches, très vraisemblablement partielles du mas de Grand Cabane, d'une longueur respective de 19,40 et 13,50 d'après les documents d'archives [A1840 13] se situent aux PRD 290,4 et 291,3. Leur positionnement a été estimé à partir de la carte des ponts et chaussées de 1876 [H0003] qui localise aux PRD supra, deux tronçons de digue de 35 et 50 m avec un perré sur le talus amont (Code IRP), qui est la technique utilisée au XIX^{ème} siècle pour la réparation des anciennes brèches [A1840 06]. Le mode de rupture ayant provoqué la brèche semble s'orienter vers l'érosion interne ou l'affouillement externe. Pour des raisons analogues aux brèches de Tourette et Laborde, la surverse doit être écartée. En revanche, compte tenu de la proximité du fleuve et la pente hydraulique qui a vraisemblablement été élevée (Cf. remarques supra), l'affouillement externe ne peut être complétement écarté. La proximité d'un paléo-chenal peut nous conduire également à privilégier l'érosion interne comme un mode de rupture possible.

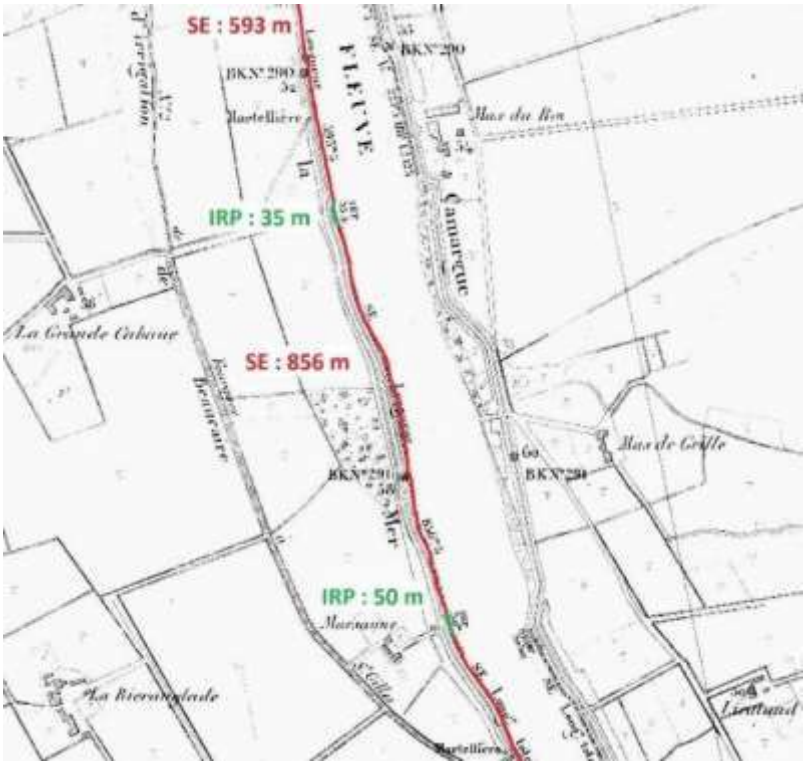


Figure 35. Localisation des brèches de Grand Cabane – crue nov. 1840

4.17 PRD 293.1 – BRECHE « PAR RETOUR » DU MAS DE BERTAUD

La brèche du Mas Bertaud d'une longueur de 90 m et située au PRD 293,1 est une brèche par retour du Rhône dans le lit du fleuve. Le mode de rupture diverge néanmoins suivant les sources. La lecture de Pardé [K001] semble privilégier la surverse par retour du fleuve dans son lit, ce qui est possible compte tenu des milliards de m^3 s'écoulant par les brèches de l'Abattoir et de Saint Denis citées supra et de ce que la hauteur des digues était moins importante à cette époque qu'actuellement. Néanmoins, ces brèches ont été occasionnées vers le 16/17 septembre d'après [A2003 18], soit plus de 15 jours après la formation des brèches et lorsque le fleuve était redescendu à un niveau relativement bas, ce qui laisse penser plutôt à un mécanisme d'érosion interne en fondation, renforcé par la proximité de la digue du fleuve, la proximité de secteur de divagation du Rhône (Cf. Chapitre n°4) et du fait que ce mécanisme a été confirmé par A. VALTZ dans son rapport de 1877 [A1877 01] sur les problèmes d'érosion observés au droit de la station de Tourettes, pour lesquels il fait une analogie avec les brèches du mas de Liviers citées ci-après.

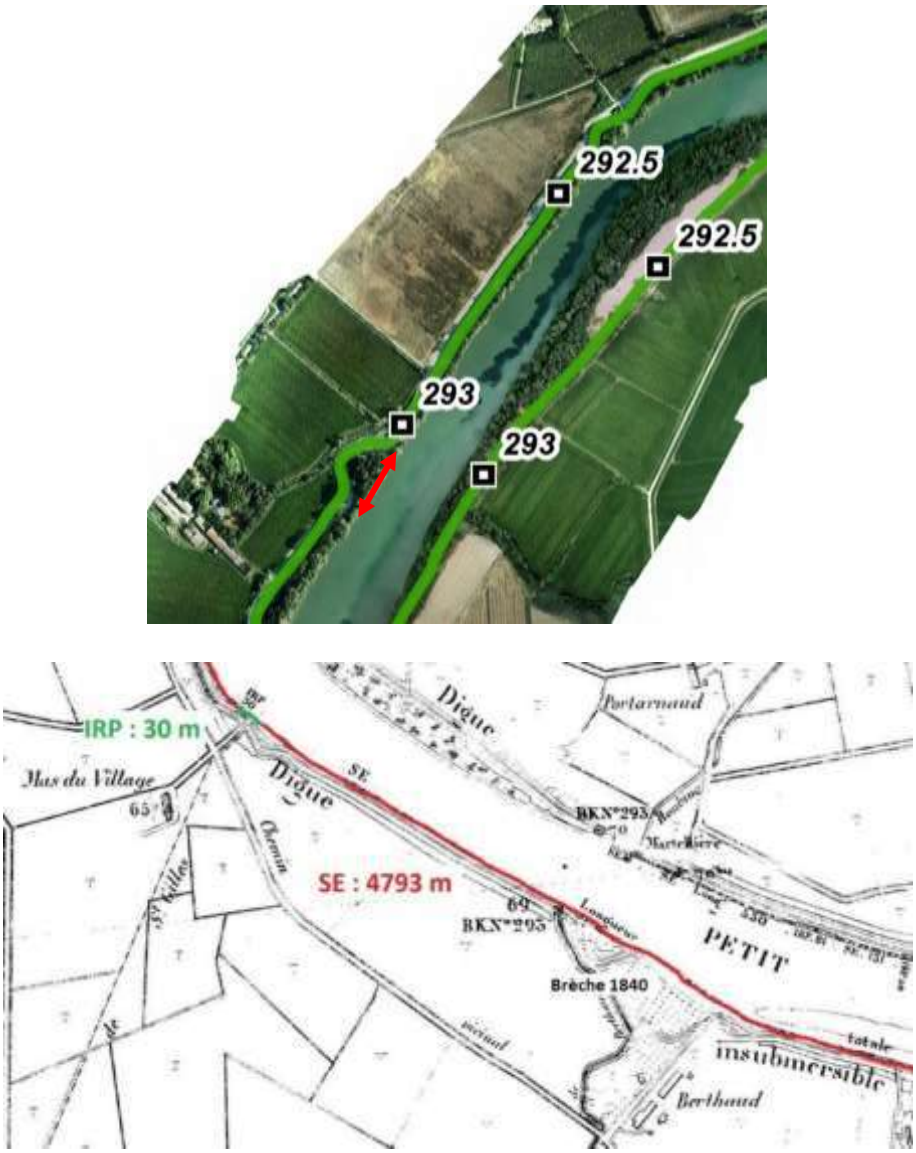


Figure 36. Localisation de la brèche de Bertaud – crue nov. 1840

4.18 PRD 319.2 ET PRD 321.2 - BRECHES « PAR RETOUR » AMONT ET AVAL DU MAS DE LIVIERS

Les deux brèches du Mas de Liviers d'une longueur de 60 à 100 m se situent respectivement aux PRD 319,2 et 321,2. Ce sont des brèches par retour du fleuve dans son lit. A l'instar de la brèche de Bertaud, le mode de rupture privilégié est l'érosion interne compte tenu des observations faites par A. VALTZ [A1877 01] dans son rapport sur les problèmes observés au droit de la station de la Tourette et de la proximité d'un paléo-chenal dans ce secteur du fleuve.

Figure 37. Localisation de la brèche de Bertaud – crue nov. 1840

On notera également la présence dans la zone protégée à une centaine de mètres en aval de la digue, d'un fontis observé et relaté dans l'étude menée ARTELIA sur le décorsetage limité des digues du Petit Rhône, mais dont l'origine précise reste à éluder.

4.19 PRG 302.3 - BRECHE DE LAURICET

La brèche de Lauricet est mentionnée dans les journaux de l'époque [A1840 01 et A1840 02]. Cette brèche dont la longueur est estimée à 250 mètres est l'unique brèche recensée dans nos sources d'archives ayant inondé la Camargue Insulaire en 1840. Le positionnement de la brèche au PRG 302,3 est confirmé par :

- la présence d'une fosse d'affouillement en aval de la digue observable dans le paysage (Cf. ortho- photo ci-dessous).
- la carte des ponts et chaussées de 1876 [H0003] qui localise au PRGsupra, deux tronçons de digue de longueurs respectives de 81 et 263 m avec un perré sur le talus amont (Code IRP), qui est la technique utilisée au XIX^{ème} siècle pour la réparation des anciennes brèches
- les travaux du CEREGE sur les cartes géologiques qui montrent la présence de couches sableuses en forme de cône d'érosion (Cf. figure ci-dessous)
- La base de données topographique de grande précision réalisée par l'IGN dans le cadre du plan Rhône, qui montre les apports sédimentaires disposés en cône d'érosion [C202].

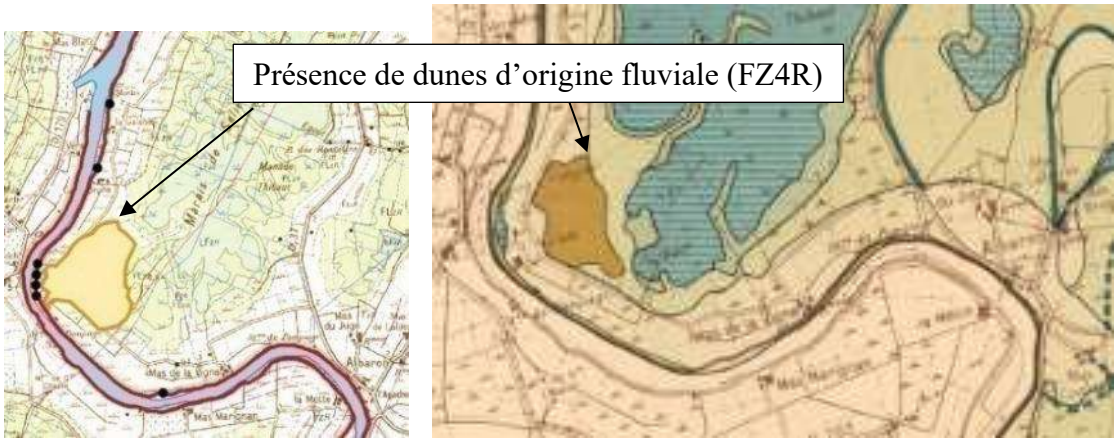


Figure 38. Extraits respectifs des atlas géomorphologiques réalisés par le CEREGE en 2007 (à gauche) et la DDAF 13 en 1970 (à droite)

Figure 39. Extrait base de données topographiques Plan Rhône [C202]

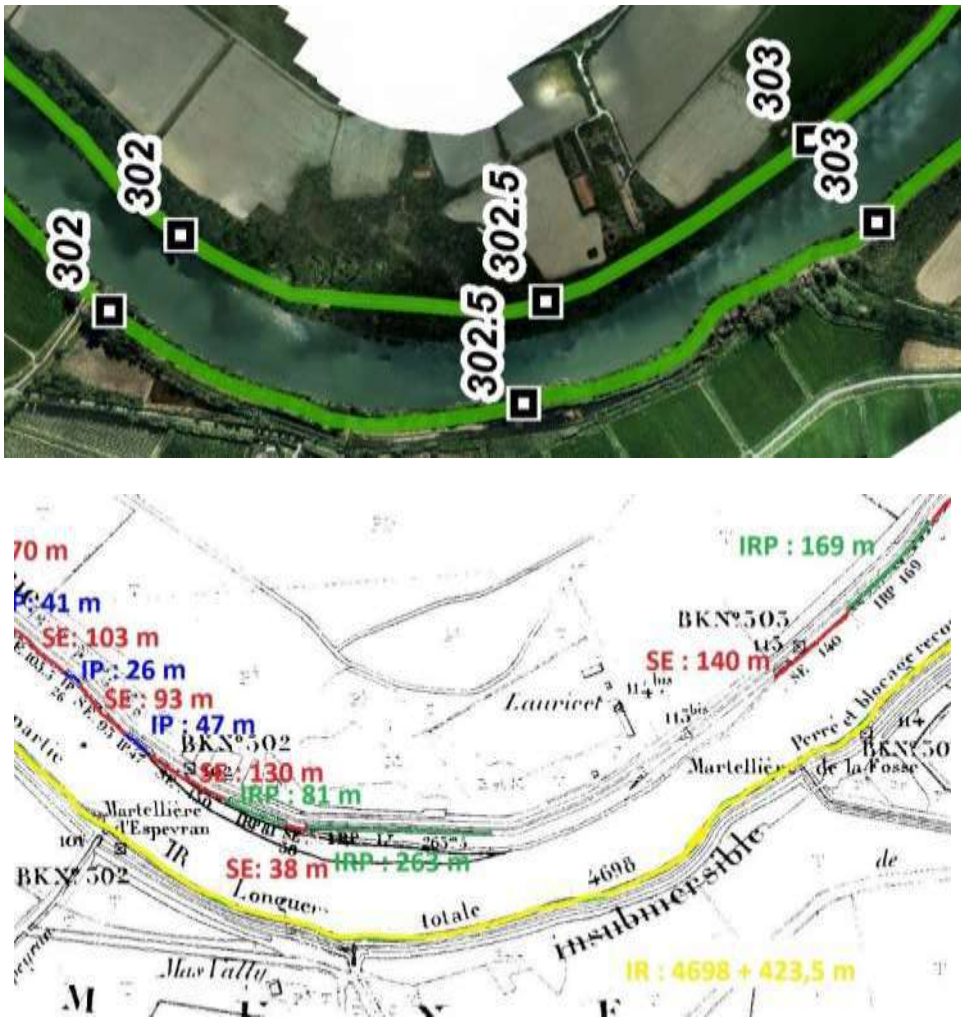


Figure 40. Localisation de la brèche de Lauricet – crue nov. 1840

Compte tenu de son apparition en début de montée de crue (Q≈7500 m^3/s), de la nature sableuse des matériaux dans la digue et la présence avérée de blaireaux dans ce secteur, il est très probable que l'érosion interne soit à l'origine de la brèche.

A partir des limnigrammes des échelles de Beaucaire et d'Arles recalés dans le référentiel NGF IGN 69 et interpolés au droit des brèches et en retenant les hypothèses suivantes :

- Cote maximum de la crue au droit de la brèche : 4,5 m NGF
- Hauteur estimée de la digue par rapport au terrain naturel : 2 m
- Largeur de la brèche : 250 mètres
- Coefficient de seuil : 0,24
- Cote du terrain naturel aval : 2,5 m NGF
- Temps d'ouverture : quelques heures

On estime le débit de pointe dans la brèche à environ 800 m^3/s et un volume de déversement de 400 millions de m^3 du 31 octobre 1840 au 12 novembre 1840, date à laquelle le niveau du fleuve est redescendu sous le niveau du terrain naturel.

5 CRUE D'OCTOBRE 1841

5.1 DEROULEMENT ET BILAN DE LA CRUE

La crue d'Octobre 1841 a un atteint un débit de pointe estimé à 8500 m^3/s (période de retour 10 ans) selon Pardé [K001].

La lecture des journaux de Toulouse [A1841 01] et du censeur de Lyon [A1841 02] permet de reconstituer le déroulement de la crue, d'y recenser les brèches et d'estimer l'ampleur de l'inondation.

En ce qui concerne les brèches et la propagation de la crue en rive droite, on peut lire dans le courrier du Gard

« Beaucaire, le 26 octobre. - 5 h. 1/2 du matin.
Les eaux du Rhône, sans avoir atteint la hauteur de l'année dernière, ont fait irruption dans notre plaine. Les nouvelles chaussées de Saint-Denis et de l'Abattoir ont été emportées ; les mesures les plus activés sont prises pour la conservation des habitants des campagnes surpris par les eaux

« Bellegarde, le 26 octobre.
Le territoire de cette commune se trouve, à cette heure presque entièrement submergé. Toutes les terres étaient préparées pour être ensemencées ; plusieurs avaient déjà reçu leur semence. Les habitants des campagnes de la plaine, dans la crainte d'être envahis par les eaux, ont de grand matin abandonné leurs habitations, emportant avec eux ce qu'ils avaient de plus précieux. La consternation est extrême. »

Beaucaire, le 27 octobre. – 11h. du matin.
La nuit dernière le Rhône a considérablement diminué. Cette heure il paraît vouloir se maintenir. Les portes de la ville ont été fortifiées ; le sauvetage des personnes, organisé ce matin, promet les plus heureux résultats. Douze embarcations ont reçu l'ordre de parcourir tous les points menacés, et de recueillir tous les malheureux Des sacs de pains ont été remis à la disposition des mariniers.

St-Gilles, 27 octobre, 10 h. du matin.
Les eaux augmentent toujours la population est consternée et désespérée. Une grande partie des semailles était faite ; les eaux ont tout emporté. La désolation est à son comble…. Un service de bateaux est organisé, Pont- visiter les campagnes, rétablir les communications avec la Camargue et faire le service de la partie de la ville qui est occupée par les eaux. Nous n'avons encore à déplorer, grâce à Dieu, la mort de personne.

Aigues-Mortes, le 27 octobre 181.
Les eaux du Rhône se répandent dans nos canaux. La population encore émue des désastres de l'année dernière, redoute le renouvellement des inondations dont elle a eu tant à souffrir. Nous espérons néanmoins que nous n'aurons pas à déplorer des malheurs pareils à ceux de 1840.

Le préfet et MM. les ingénieurs se sont rendus à Beaucaire le 26, et par leurs soins un service de sauvetage a été organisé pour porter secours aux habitons des campagnes isolées au milieu de l'inondation. M. de Jessaint s'est également rendu à St Gilles.

En ce qui concerne les brèches et la propagation de la crue en rive gauche, on peut lire dans le Sémaphore de Marseille et dans le courrier du Gard :

« Le 26 octobre, à deux heures du matin, le tocsin sonna à toutes les paroisses de Tarascon et de Beaucaire ; ce signal d'alarme annonçait la rupture des chaussées du Rhône. Au même instant, les eaux ont déversé dans le bassin des Alpines par trois grandes brèches formées aux nouvelles chaussées, et se sont répandues dans la plaine avec une impétuosité effroyable ; »

« Des lettres d'Arles à la date du 26, arrivées hier à Marseille, annoncent que le Rhône a de nouveau brisé les digues en plusieurs points, que le territoire de Beaucaire est complètement sous l'eau, que la digue au-dessous de Tarascon a été rompue, et que les campagnes d'Arles sont de nouveau inondées. La ville de Tarascon, au dire de quelques voyageurs, aurait aussi vu se renouveler au milieu d'elle les ravages du précédent débordement. »

« Ces deux inondations survenant presque coup sur coup ont frappé de terreur les riverains du Rhône; il s'en fallait de beaucoup que les désastres de 1a première fussent réparés quand une seconde est venue aggraver une situation intolérable. Eclairé par ces calamités qui plongent tant de personnes dans la misère, le gouvernement ne peut reculer l'emploi des mesures propres à en prévenir le retour. C'est en contenant par de solides digues ces cours d'eaux qui menacent la vie et la fortune de tant de gens, qu'on combattra efficacement des débordements devenus pour ainsi dire périodiques. Les lenteurs des formes administratives doivent disparaître devant de si grands malheurs, et le ministre qui prendra sur lui d'ordonner et d'activer des travaux destinés à rassurer tant de propriétaires justement alarmés, obtiendra facilement de la reconnaissance publique, un billet d'acquittement pour avoir négligé d'éternelles formalités. »

« On écrit d'Arles, à la date du 27 (10 heures du matin) :
L'inondation a envahi tout notre territoire depuis les brèches de Panisse jusqu'à la mer, mais heureusement l'eau n'est qu'à une faible hauteur; on peut même s'attendre à sa prochaine disparition, et nous aimons à conserver l'espérance que les dommages ne seront pas considérables »

« Nous concevons les plus vives inquiétudes au sujet de la chaussée de Tarascon ; on nous assure qu'elle résiste encore. La Camargue est restée à l'abri de l'inondation ; un membre de la commission centrale n'abandonne pas la chaussée.
6 heures du soir. - Les eaux ont baissé de 4 mètres. Cependant l'inondation s'étend encore à un quart de lieue d'Arles; les eaux, qui ont presque totalement envahi le Trébon, ont pénétré par deux brèches très voisines l'une de l'autre; la plus grande est celle dit mas de Panisse, qui a une ouverture d'environ trente mètres de largeur. »

« Tarascon, 26 octobre
Nos chaussées nouvellement construites ont été emportées en partie, et les brèches sont telles, que tout notre terroir est de nouveau submergé, toute communication est interrompue….. Les eaux sont déjà répandues dans plusieurs quartiers de la ville. Les nouvelles brèches de la nouvelle chaussée répandent de l'eau d'une manière effrayante ; demain peut-être tout Tarascon sera inondé. Dans la campagne, il y a déjà trois mètres d'eau. Il est impossible de vous faire le tableau de nos désastres ».

On apprend que « 3 ou 4 brèches existaient à la chaussée de Tarascon…. »

L'inondation a été suffisamment importante pour *« le seul moyen de communication qu'ait la ville d'Arles avec la terre-ferme est le parapet de l'aqueduc de Craponne. »*

En ce qui concerne la Camargue Insulaire

« Les nouvelles les plus rassurantes étaient parvenues de Camargue, où les brèches de Lauricet et celle qui allait se former au mas de Moulin, avaient été dominées à force de travail et d'énergie.
La chaussée de Lauricet a donné les plus vives inquiétudes; le 26 au soir, on croyait qu'elle avait cédé. Il n'en a rien été heureusement. La Camargue est entièrement préservée. »

5.2 BILAN DES BRECHES

Le bilan général des brèches s'établit ainsi à 8 brèches et 2 départs de brèche qui ont été toutes initiées par infiltrations (comprendre érosion interne) pour reprendre la terminologie utilisée à l'époque.

En sus des brèches citées dans les journaux de l'époque, l''étude historique menée par Adrien Mejean en 2007 [H0080] recense également deux brèches sur les digues du Grand Rhône rive gauche :

- Une brèche au Mas de la ville,
- Une brèche au droit du mas Mollégès,

Ces brèches n'étant pas citées dans les journaux de l'époque, il est probable qu'il s'agisse de départ de brèches.

Tableau 18. Crue nov 1841 – Bilan général des brèches et départs de brèche

Nom de la brèche	Type	PR digue	Largeur (m)	Initiateur rupture
Rhône rive gauche				
Chaussées de Tarascon (3)	Totale		??	Infiltrations
Mas de panisse (3)	Totale	Anc. chaussées du Trébon	30 m	Infiltrations
Mas de la ville	Départ		??	Infiltrations
Mas de Grand Mollégès	Départ		??	Infiltrations
Rhône rive droite				
Abattoir	Totale	RD 269,1	??	Infiltrations
Saint Denis	Totale	RD 272,1	??	Infiltrations

5.3 RD - BRECHES DE L'ABATTOIR ET DE SAINT DENIS

En rive droite, deux brèches ont été occasionnées par infiltration au droit des deux grandes brèches de novembre 1840 respectivement de l'Abattoir au RD 269,1 et de Saint Denis au RD 272,3, dont les terres n'avaient pas eu le temps de prendre persistance d'après les ingénieurs des ponts et chaussées [A1840 17]. Le projet de fermeture de la brèche de Saint Denis au RD 272,3 a subi de nombreuses modifications qui sont détaillées dans l'étude menée par Bernard Gilles [A1840 17] et qui peuvent être résumées ainsi :

- un 1er tracé est envisagé à 100 mètres en aval de la grande brèche. Il traverse la fosse d'affouillement de 1840. La difficulté de mise en œuvre et une petite crue en février 1841 amènent les ingénieurs à envisager un 2ème tracé ;
- un 2ème tracé plus en recul est en cours de réalisation quand la crue d'octobre 1841 se produit et vient ruiner l'ouvrage ;
- Un 3ème tracé est finalement retenu en novembre 1841, qui est le tracé formant le fer à cheval actuel.

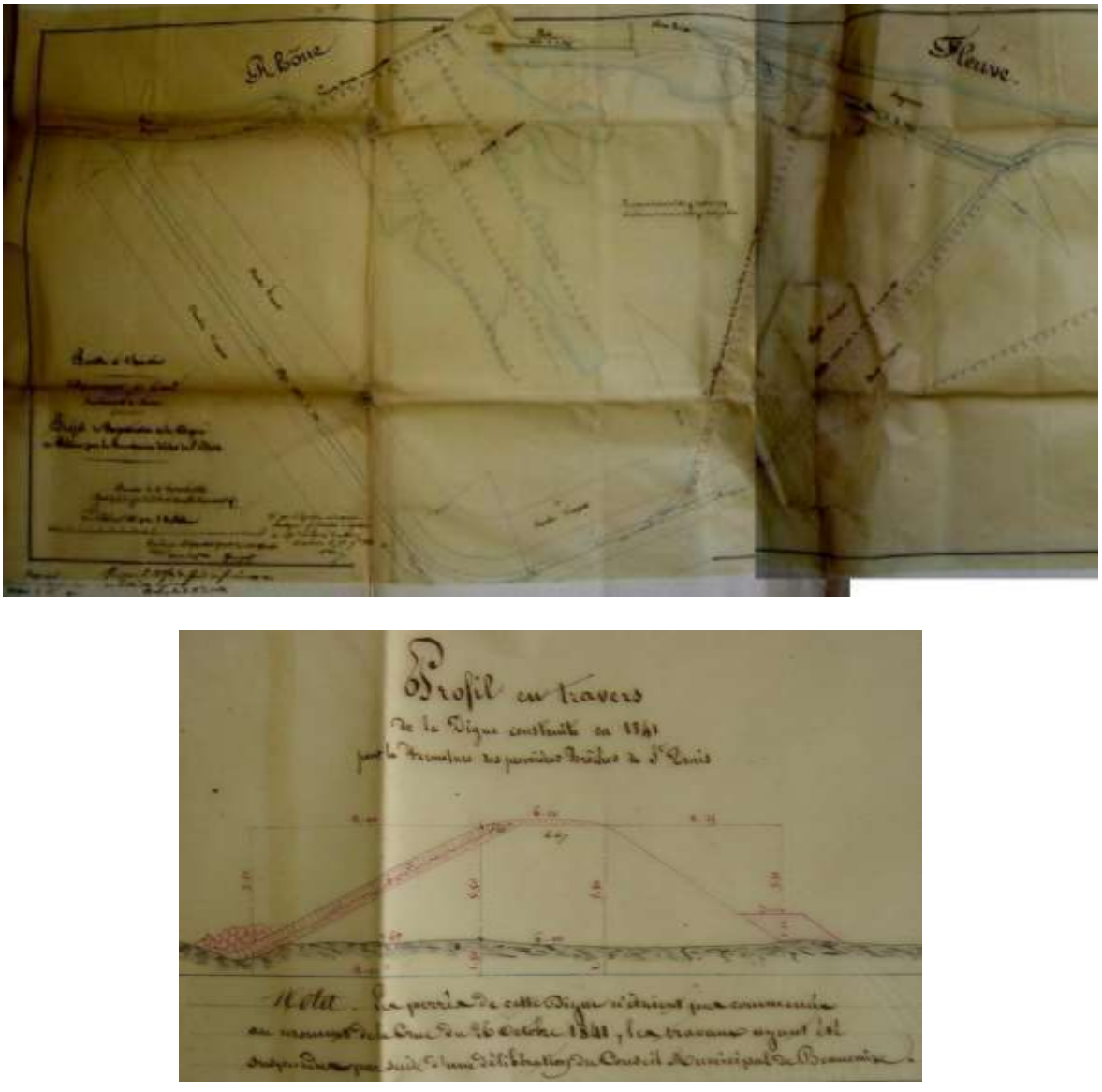


Figure 41. Projet de fermeture de la brèche de Saint Denis – Novembre 1841[A1841 04]

5.4 GRG DEPARTS DE BRECHE DU MAS DE LA VILLE ET DU GRAND MOLLEGES

L'examen des cartes des ponts et chaussées de 1876 [H0003] permet de localiser une brèche au GRG 291,4, qui pourrait être la brèche du mas de la ville lui-même situé au GRG 291.

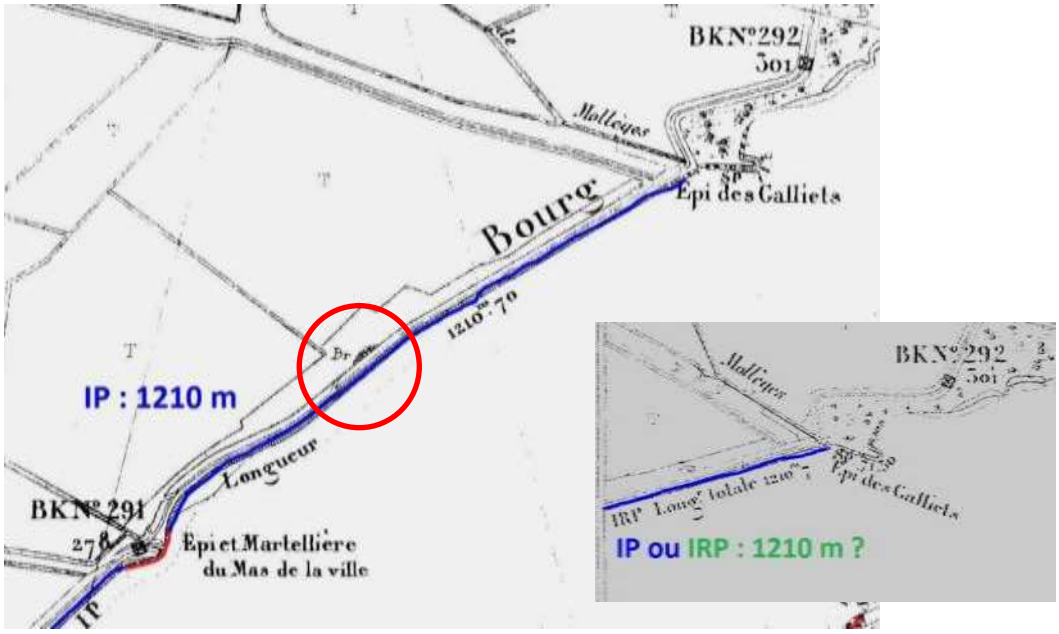


Figure 42. Localisation possible de la Brèche du mas de la Ville – Crue d'oct. 1841

Figure 43. Localisation possible de la Brèche du mas de la Ville – Crue d'oct. 1841

On note également que sur la feuille n°46 des cartes de 1876 [H0003], l'ouvrage est indiqué IP, ce qui signifie que la berge est perreyée, alors que sur la feuille n°47, l'ouvrage est indiqué IRP (Cf. figure supra), ce qui signifie que la digue est perreyée dans sa totalité.

L'examen des cartes des ponts et chaussées de 1876 permet également de localiser la présence d'une digue perreyée sur la face amont au GRG 293 (longueur 136 m), ce qui pourrait laisser

penser à la brèche de Grand Mollégès citée dans les documents d'archives, à moins que cette dernière ne soit située au droit du fer à cheval situé juste en amont du GRG 293.

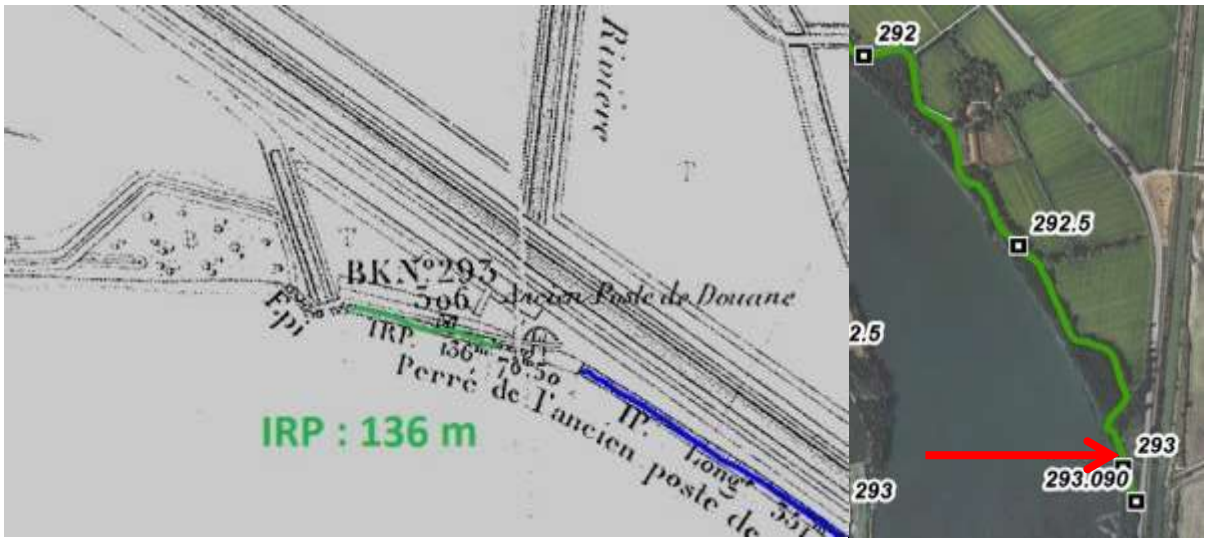


Figure 44. Localisation possible de la Brèche du Grand Mollégès – Crue d'oct. 1841

6 CRUE DE NOVEMBRE 1843

Les données relatives à la crue figurent au chapitre n°4.

6.1 DEROULEMENT DE LA CRUE

La lecture des journaux de Toulouse [A1843 01] et du censeur de Lyon [A1843 02] permet de reconstituer le déroulement de la crue, d'y recenser les brèches et d'estimer l'ampleur de l'inondation.

En ce qui concerne la rive droite, on peut lire :

« Dans le courrier du Gard les détails suivants, qu'on lira avec intérêt, bien que les faits soient en partie connus : « A la suite des pluies continuelles et torrentielles dont nous avons déjà parlé, la ville de Beaucaire a failli voir se renouveler les désastres du 2 novembre 1840. Dans les journées de jeudi et de vendredi derniers, le fleuve s'était élevé à 6.80, quelques centimètres de plus qu'à cette époque de douloureuse mémoire. Encore quelques centimètres, et la ville de Beaucaire était de nouveau inondée! Toute cette population épouvantée offrait un douloureux spectacle ; les femmes fuyaient, emportant leurs enfants dans leurs bras, et se rendaient en toute hâte sur les hauteurs qui bornent la ville au nord.
A la première nouvelle du débordement des eaux, M. le préfet du Gard, M. Vinard, ingénieur en chef des ponts et chaussées, et M. Talabot, se rendirent sur les lieux, accompagnés d'un détachement militaire, et des mesures actives de prévoyance et de sûreté furent prises aussitôt. M. Surrel, ingénieur du service spécial du Rhône, avait pris l'initiative, et c'est à lui que revient la première et la plus grande part d'éloges pour son infatigable activité et les efforts intelligents qu'il a faits pour s'opposer à l'envahissement des eaux. Tous les points menacés furent fortifiés, et trois cents ouvriers, sans compter un détachement du régiment de chasseurs qui avait été obligé de quitter Tarascon pour se réfugier à Beaucaire, ont travaillé sans relâche à défendre les chaussées contre les envahissements du Rhône. Leurs efforts ont été couronnés de succès, le fleuve a été contenu. Les portes des maisons riveraines ont eu seules à souffrir de la violence des eaux; on a craint un instant pour la porte de la Couronne, mais tout le monde a redoublé d'ardeur, et la porte, calfeutrée et étayée à la hâle, a résisté à la fureur des flots.
.... Enfin, le 3 au matin, le Rhône était stationnaire et dans la journée les eaux qui effleuraient déjà les bords des digues ont baissé de 1 mètre 3 centimètres. Le 4, 1e fleuve était en pleine décroissance, les populations riveraines étaient rassurées et tout le danger était passé. »

....on a remblayé les endroits où les infiltrations étaient les plus fortes, on a construit des batardeaux sur les points les plus menacés, et le succès a couronné tous ces efforts. Des travaux semblables ont été exécutés à Fourques, à Bellegarde et à Saint-Gilles; les habitants de cette dernière ville ont élevé spontanément un bourrelet de 30 centimètres en moyenne sur un développement de 2,000 mètres.

En ce qui concerne la rive gauche, on peut lire :

La rive gauche du Rhône a eu davantage à souffrir; la digue de Boulbon, en amont de Tarascon a été rompue; la chaussée d'Arles a cédé également à l'impétuosité du fleuve.
La hauteur des eaux en 1840, que l'on avait présentée comme maxima, a été dépassée en 1843 de 3 cm à Beaucaire et de 25 centimètres à Aramon;

La lecture du journal de Toulouse du 10 novembre 1843 confirme néanmoins la présence de brèches totales sans qu'il soit possible d'en donner le nombre.
« Le Rhône, qui depuis le 31, avait crû considérablement, s'était élevé, dans la nuit du 2, vers minuit, à 4 m20 au-dessus de l'étiage. Vers les 11 heures, il avait atteint 4 m. 90. La chaussée du Trébon a été emportée vers minuit à 2,000 mètres de la Cavalerie [soit vers le RG 280].
A cette heure, Trinquetaille sonnait le tocsin et paraissait tenir encore. Du côté de la ville, le canal de Craponne déversait en inondant toute la Lice, le quartier de la Roquette et le Port.
Le Rhône atteignait 5 m. 05 c. Au matin l'on a pu reconnaître que tout le Trébon était inondé ».
« Du côté du Trébon, [les eaux] se précipitent avec violence sur le pont de Crau, dont la ruine est certaine »
« ... Les eaux ont couvert tous les marais d'Arles jusqu'à Mouriès, Fontvieille, Maussane, Paradou. Enfin, la situation est la même qu'en 1840 et s'annonce d'une manière désastreuse. L'on n'a eu à déplorer la mort de personne….. »

« A Tarascon le Rhône a entièrement submergé la ville. Une brèche considérable s'est formée au-dessous de la caserne. »

En ce qui concerne la Camargue Insulaire, on peut lire :

« Toute la Camargue a été inondée, et le fleuve s'est répandu dans toutes les plaines. En fortifiant les digues insubmersibles, en les élevant sur tous les points d'environ 1 mètre 50 centimètres, on pourrait peut-être prévenir le retour de semblables désastres.

Journal de Toulouse du 10 novembre 1843
« ...En Camargue, une brèche s'était déclarée entre le mas de Vert et le mas de Rey. L'on distingue de la tour des Arènes, les plaines de Caseneuve, de Vert et de Saliers entièrement couvertes par les eaux, qui, du côté du Trébon, se précipitent avec violence sur le pont de Crau, dont la ruine est certaine »

On écrit d'Arles à la date du 17 novembre à propos de brèche :
« Celle du mas d'Yvan, sur le Petit-Rhône, est d'une largeur considérable. Les travaux de fermeture se poursuivent avec la plus grande activité. »

6.2 CRUE NOVEMBRE 1843 – BILAN GENERAL DES BRECHES

Un bilan des brèches est donné dans l'édition du Censeur du 23 novembre 1843.
« Les dernières nouvelles portent à cinq les brèches faites à la chaussée du Rhône, du côté de la Cavalerie. Il en existe sur le Petit-Rhône : une au Mas d'Yvan ; une à Lauricet ; une du côté du Languedoc, au-dessus de Sylvéréal. Les eaux commencent à se montrer dans la plaine de Bellegarde ; on suppose qu'elles proviennent de Beaucaire. Sur le grand Rhône, en Camargue, il n'existe qu'une brèche peu importante, à Fume-Morte.
A Tarascon le Rhône a entièrement submergé la ville. Une brèche considérable s'est formée au-dessous de la caserne. »

Un cahier des charges établi par A. SURREL fait état de nombreuses brèches dans la chaussée du Trébon située sur le tracé du canal des Alpilles, qui faisait office d'ouvrage de protection avant la réalisation du remblai ferroviaire entre Tarascon/Arles. 13 brèches y sont recensées sur la commune de Tarascon et 10 brèches sur la commune d'Arles [A1843 03 et 04]. Il est

vraisemblable qu'il s'agisse d'un bilan en rive gauche incluant les brèches totales supra et des départs de brèches.

Au total, le bilan estimatif des brèches est le suivant : 10 brèches totales et 17 départs de brèche ; Tous initiés par infiltrations (comprendre érosion interne) pour reprendre la terminologie utilisée à l'époque.

Tableau 19. Crue nov 1843 – Bilan général des brèches et départs de brèche

Nom de la brèche	Type	PR digue	Largeur (m)	Initiateur rupture
Rhône rive gauche				
Commune de Tarascon (1)	Totale	Montagnette ? Au sud Caserne ?	??	Infiltrations
Commune de Tarascon (12)	Départ	??	??	Infiltrations
Commune d'Arles (5)	Totale	Anc. chaussées du Trébon	30 m	Infiltrations
Commune d'Arles (5)	Départ		??	Infiltrations
Camargue Insulaire				
Mas d'Yvan	Totale	PRD 285,7	considérable	Infiltrations
Lauricet	Totale	PRG 302,2	??	Infiltrations
Fume morte (GRD)	Totale	??	??	Infiltrations
Rive droite				
Sylvéréal	Totale	PRD 322	??	Infiltrations

La lecture du Censeur du 23 novembre 1843 laisse penser que la largeur des brèches totales en rive gauche n'a pas été importante puisque moins de 15 jours après la crue on écrit d'Arles à la date du 17 novembre :
« La route d'Arles à Tarascon est entièrement délivrée des eaux de l'inondation et même des dépôts vaseux. » Toutes les communications avec les communes de l'arrondissement sont libres et praticables. » Presque toutes les brèches faites à la chaussée du Rhône sur le territoire d'Arles et du côté du Trébon sont entièrement réparées. »

7 CRUE D'OCTOBRE 1846

Les données relatives à la crue figurent au chapitre n°46.

La crue du 17 octobre 1846 a un débit de pointe inférieure à 8 500 m^3/s d'après Pardé [K001].

On note dans le rapport du 26 octobre 1846 établi par l'ingénieur Bouvier et relaté dans A. Méjean [H0080] que la digue a rompu en 2 endroits entre les mas Chabert et Beaumelle, « notant un fer à cheval ». La chaussée fut construite en 1841 par les soins du syndicat des Saintes Maries.

« Les chaussées ne présentaient aucune consistance, ayant étaient construite sans choix de terre, avec du sable ou sansouire, c'est à dire aucune matière excessivement friable à cause du principe salin dont elle est mélangée et que le contact de l'eau liquéfie immédiatement. »

Le mas des Beaumelle est situé au PRG 326, l'examen des plans d'archives de 1876 [H0003] ne montre pas de digue perreyée (Identifiant IRP) dans ce secteur mais révèle la présence d'une protection en enrochements, ce qui laisse penser que l'origine de ce qui semble orienter vers un départ de brèche est due à l'affouillement externe.

Figure 45. Départ de brèche de Beaumelle – crue de nov. 1846

8 CRUE DE MAI 1856

Les données relatives à la crue figurent au chapitre n°4. Les digues du delta du Rhône subirent de nombreuses brèches. Contrairement à la crue de 1840, les digues rompirent par infiltration (sources Pardé [K001] et Service Spécial du Rhône [H0036]). La crue a occasionné 9 brèches et 14 départs de brèche. Toutes les brèches totales ont pour origine des infiltrations (comprendre l'érosion interne). Sur les 14 départs de brèches, 10 sont dus aux infiltrations et 4 à l'affouillement externe. Le bilan des brèches recensées figurent dans le tableau ci-après.

8.1 BILAN GENERAL DES BRECHES

Tableau 20. Bilan général des brèches dans le Delta du Rhône en mai 1856

Nom	Type	PR digue	Largeur (m)	Origine rupture
Rhône rive gauche - Digue de la montagnette				
pont boulbon	totale	RG 264,1	100 m	Infiltrations – paléo-chenal
petit servan	totale	RG 264,2	100 m	Infiltrations – paléo-chenal
Barallier	totale	RG 265,5	250 m	Infiltrations – paléo-chenal
Rhône rive droite				
Saint Peyre	totale	RD 271,25	100 m	Infiltrations – anc. brèche 1840
Diffluence				
Trinquetaille	totale	GRD 281	500 m	Infiltrations – paléo-chenal
Petit Rhône rive gauche				
Cazeneuve	Départ	PRG 281,8	Faible linéaire	Infiltrations – paléo-chenal
Mas de Rey	Départ	PRG 285 à 286	50 m	Infiltrations – prox. paléo-chenal
Rigodon (4)	Totale	PRG 295	180 m	Infiltrations – paléo-chenal + extrados
Mas Combet	Départ	PRG 307,75	125 m	Infiltrations – paléo-chenal/affouillement
Mas de Brun Mas d'eybrun	Départ	PRG 311	Faible linéaire	Affouillement externe
Grand Rhône rive droite				
Triquette (1)	Totale ?	GRD 283,7	150 m	Infiltrations – paléo-chenal
Triquette (2)	Totale ?	GRD 285,4	150 m	Affouillement ancienne divagation
Passerons	Totale ?	GRD 286,25	50 m	Infiltrations – paléo-chenal
Montlong	Totale ?	GRD 288,4	50 m	Infiltrations – paléo-chenal
Peaudure	totale ?	GRD 310,5	??	Infiltrations – ancienne divagation
Chartrousse	totale ?	GRD 312,4	??	Infiltrations – ancienne divagation
Jacquières	totale ?	GRD 313,25	??	Infiltrations – ancienne divagation
Barcarin	départ	GRD 315,75	??	Erosion du fleuve - affouillement
Grand Rhône rive gauche				
Galignan	Totale ?	GRG 295,9	??	Infiltrations
Parade	Départ	GRG 311,4	??	Infiltrations – paléo-chenal
Total du linéaire de brèches connues : 1 230 mètres				

8.2 BILAN DES LAISSES DE CRUE DANS LA ZONE PROTEGEE

Les laisses de crue relevées dans la zone protégée sont les suivantes

Tableau 21. Laisses de crue 1856 dans la zone protégée

Zone protégée	Lieu	Cote relevée (m NGF)
Rive Gauche	Tarascon – centre-ville – rue du château	11,44
	Tarascon –angle rue Lubières et rue E. Pelletan	11,56
	Tarascon –Rue Amy, sur les contre fort de l'église	11,49
	Tarascon - angle de la rue de la révolution et de la rue du jeu de Paume	11,68
	Tarascon – rue Jean Jaurès	11,79
	Mas de Lucas	6,78
Camargue Insulaire	Trinquetaille – avenue Edouard Herriot	6,26
	Mas de Bernacle	2,16
	Mas du Pont de Rousty	2,62

Le champ d'inondation de la crue de 1840, ainsi que celui de 1856 figure ci-dessous.

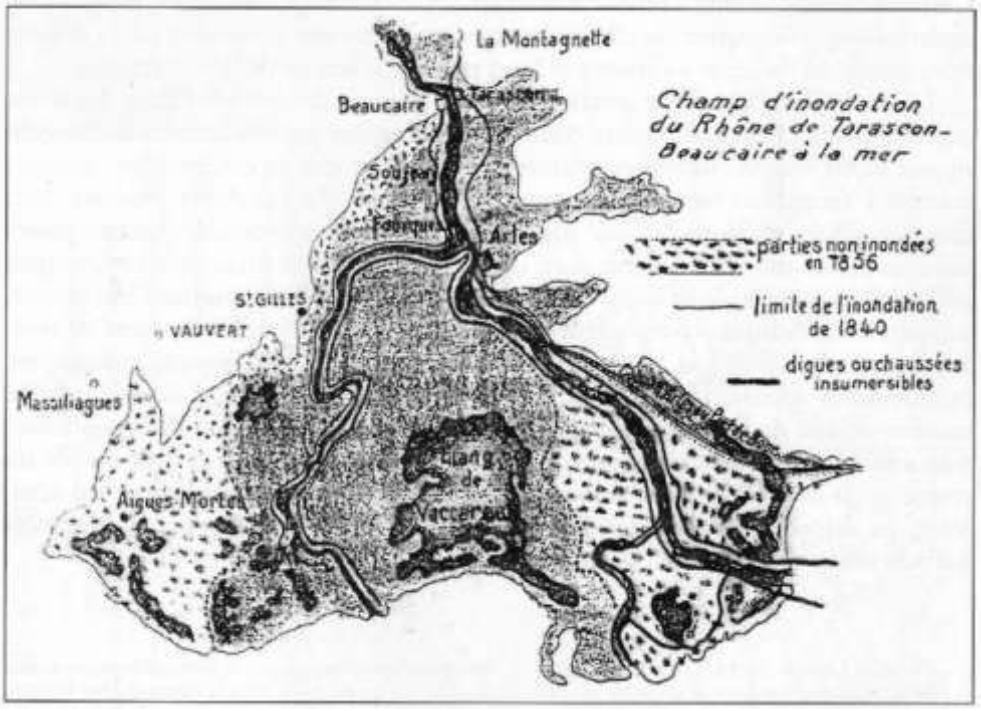


Figure 46. Inondations de 1840 et 1856 (source Pardé)

Certaines cinétiques ou caractéristiques de brèches ont pu être reconstituées à partir des documents ou plans d'archives disponibles. Elles sont résumées dans le tableau ci-dessous et justifiées dans les paragraphes ci-après :

Tableau 22. Bilan des volumes de déversement liés aux brèches de 1856

Brèche	Largeur max	Débit de pointe	Volume de déversement	Zone protégée
Montagnette	250 m	2 800 m^3/s	650 millions m^3	Rive gauche
Défluent	500 m	2 300 m^3/s	600 millions m^3	Camargue Insulaire
Rigodon	180 m	1 200 m^3/s	400 millions m^3	
Saint Peyre	100 m	1 000 m^3/s	300 millions m^3	Rive droite

Un calcul [A0011] (en supposant des niveaux statiques ce qui est une hypothèse conservatrice compte tenu de la durée de crue qui a été moins importante qu'en 1840) a été fait à partir des laisses de crues, du champ d'expansion et du modèle numérique de terrain de la BDT IGN, il donne les résultats suivants :

- Rive droite : environ 300 millions de m^3,
- Camargue Insulaire : environ 1 milliard de m^3,
- Rive gauche : environ 500 millions de m^3

Soit un volume total de 1,8 milliards de m^3. Ce volume est supérieur à la différence du volume au-dessus de 6000 m^3/s calculé suivant les limnigrammes observés et estimés suivant Pardé (Chapitre n°4). On retiendra un volume d'environ 1,8 milliard de m^3.

8.3 RG 264 A 265.5 - BRECHES DANS LA DIGUE DE LA MONTAGNETTE

La digue de la montagnette s'est rompue le 31 mai 1856 à 18 heures en trois points. La formation de ces trois brèches s'est traduite immédiatement par une baisse du niveau du Rhône dans le fleuve en traversée de Beaucaire/Tarascon.

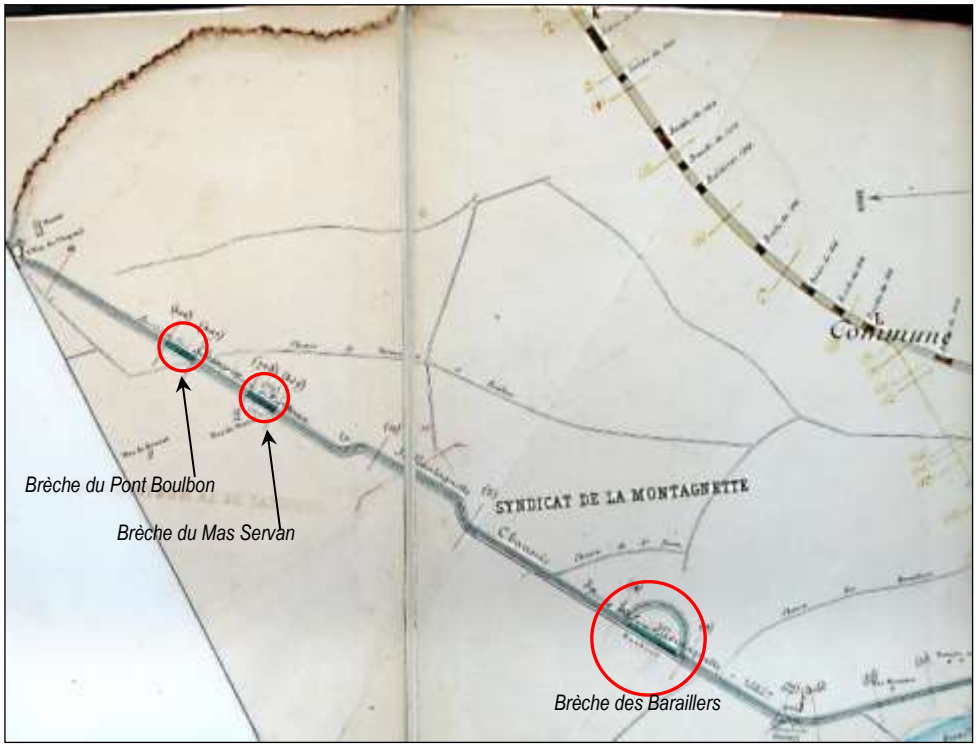


Figure 47. Localisation des brèches dans la digue de la montagnette (Source SSR [A1856 06])

Le chemin de fer situé en aval du centre-ville a retenu dans un premier temps les eaux, ce qui a provoqué une montée très rapide des eaux, avant d'être à son tour emporté. Un véritable déluge a balayé l'ensemble de la rive gauche sur plus de 23 000 hectares.

Le soir du 31 mai vers 20h45, les maisons de l'enceinte de Tarascon furent ainsi inondées sous plus de 3 à 4 mètres d'eau. La situation de calme devait laisser place à celle de la désolation. Les eaux du Rhône envahissaient Tarascon par le Nord et se précipitaient avec une violence inimaginable dans les rues, emportant tout sur leur passage et piégeant la population dans les étages des habitations : *« avant huit heure et demie, on n'observait dans la ville que d'insignifiantes flaques d'eau produites par les infiltrations du Rhône, dont la pression devait agir fortement ; mais un moment après, un bruit sourd et sinistre (…) annonça le venue des eaux du Rhône » (revue L'Illustration intitulé « Rupture du chemin de fer », du 21 juin 1856)*
« Je les ai vues se précipiter avec une violence inimaginable dans les rues de la ville, et j'ai failli être emporté en voulant sauter sur le premier jet pour entrer dans une maison hospitalière, où j'ai vu, dans ***l'espace d'un quart d'heure, arriver l'eau à 3 m de hauteur »*** *(revue L'Illustration intitulé « Rupture du chemin de fer », du 21 juin 1856).*

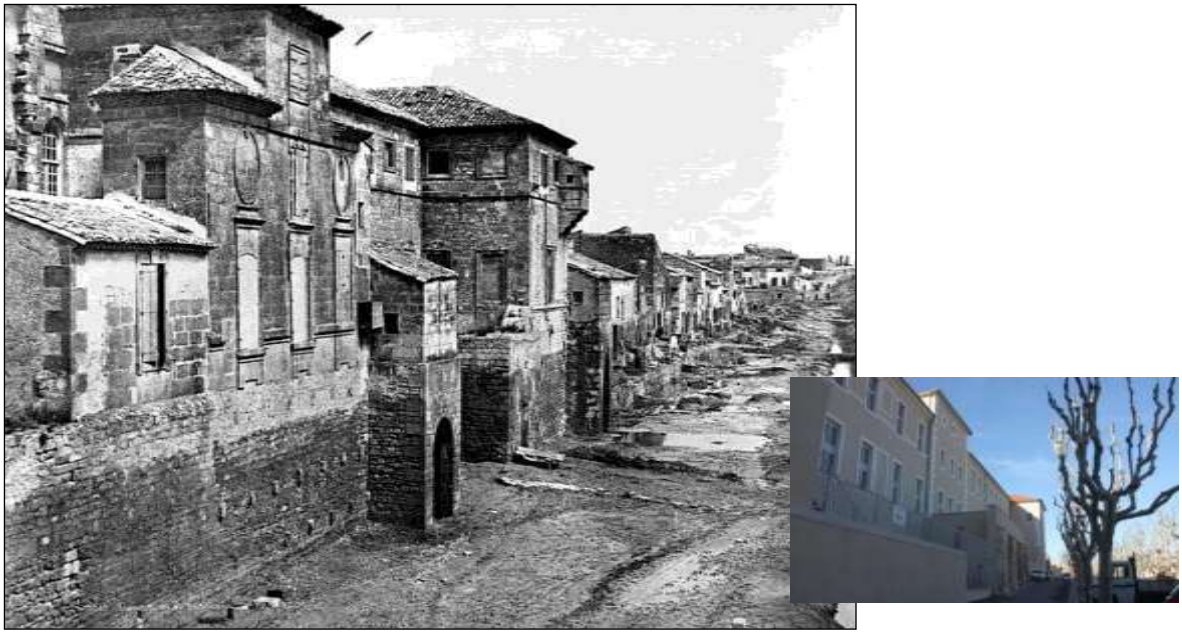


Figure 48. Dommages survenus aux maisons de Tarascon suite à l'inondation du Rhône de mai 1856. (© E. Balbus - source DDE 13 [A1856 06])

La propagation de la crue de 1856 depuis l'amont de Tarascon a été reproduite sur les cartes schématiques ci-après.

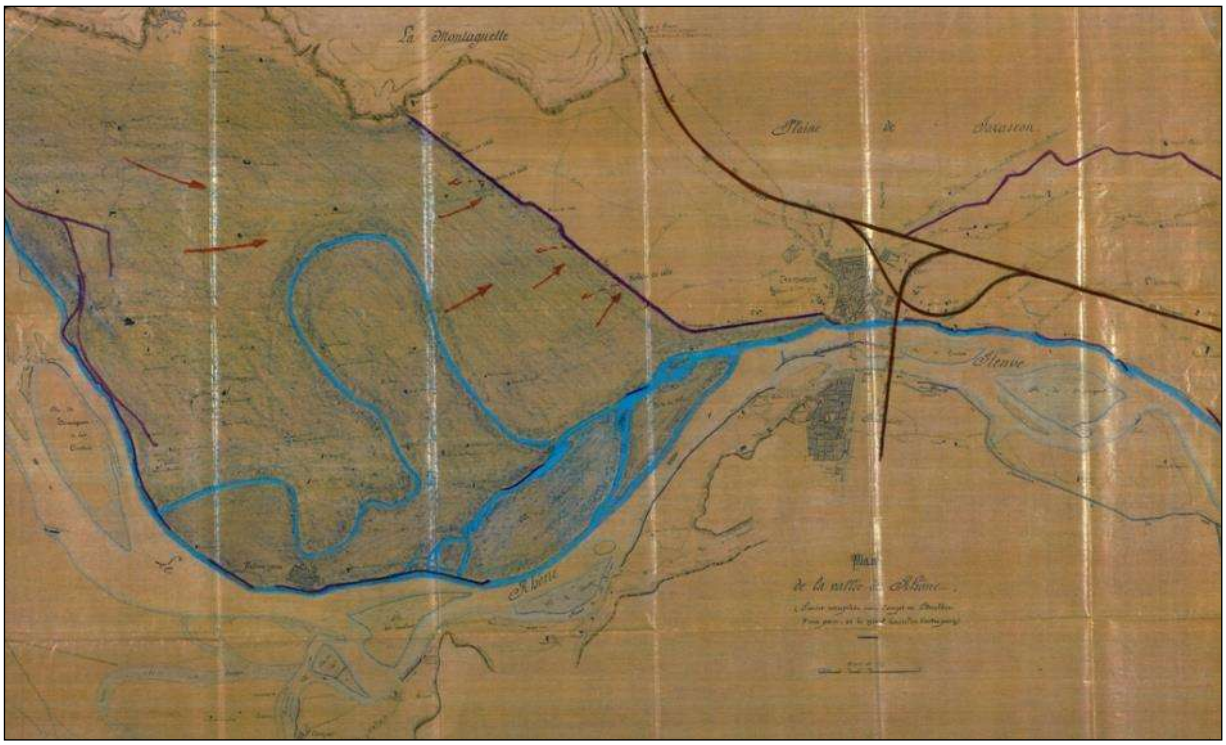


Figure 49. Invasion par les eaux des communes de Barbentane, Rognonas, Vallabrègues et Boulbon suite à la rupture de la chaussée de Mézoargues (source SSR [A1856 06])

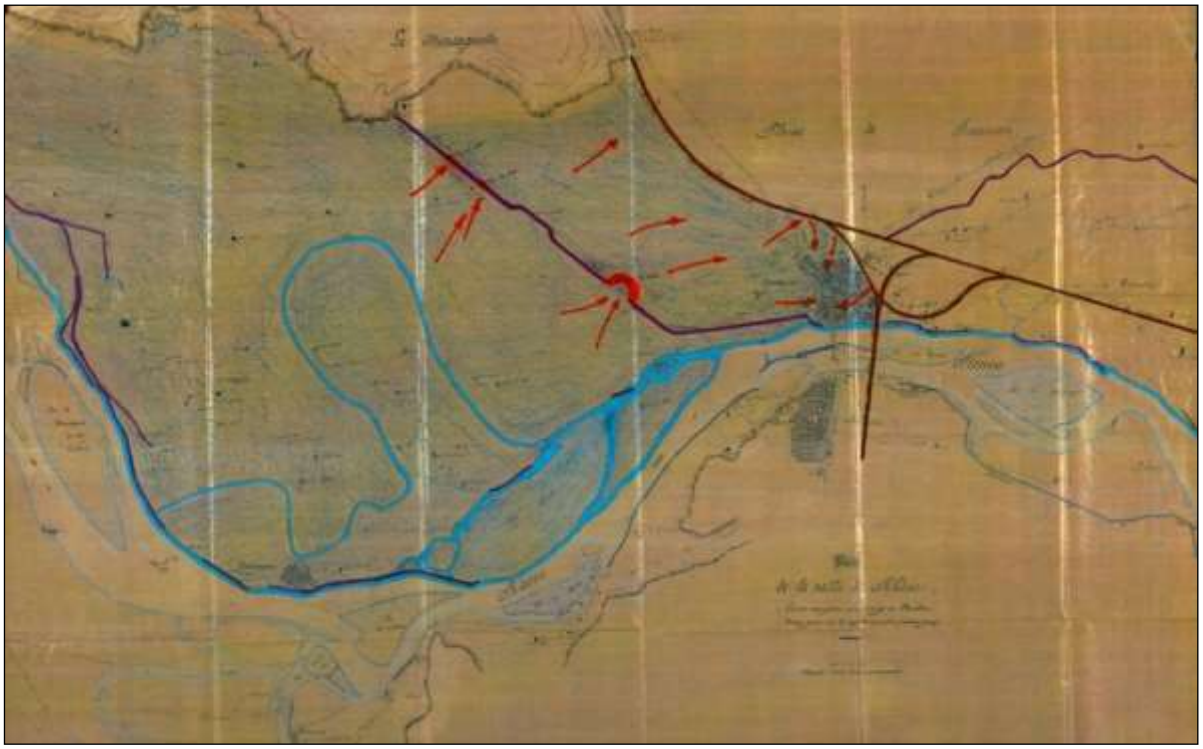


Figure 50. Invasion par les eaux du territoire communal de Tarascon et de l'enceinte de la ville suite à l'ouverture de trois brèches au niveau de la Montagnette (source SSR [A1856 06])

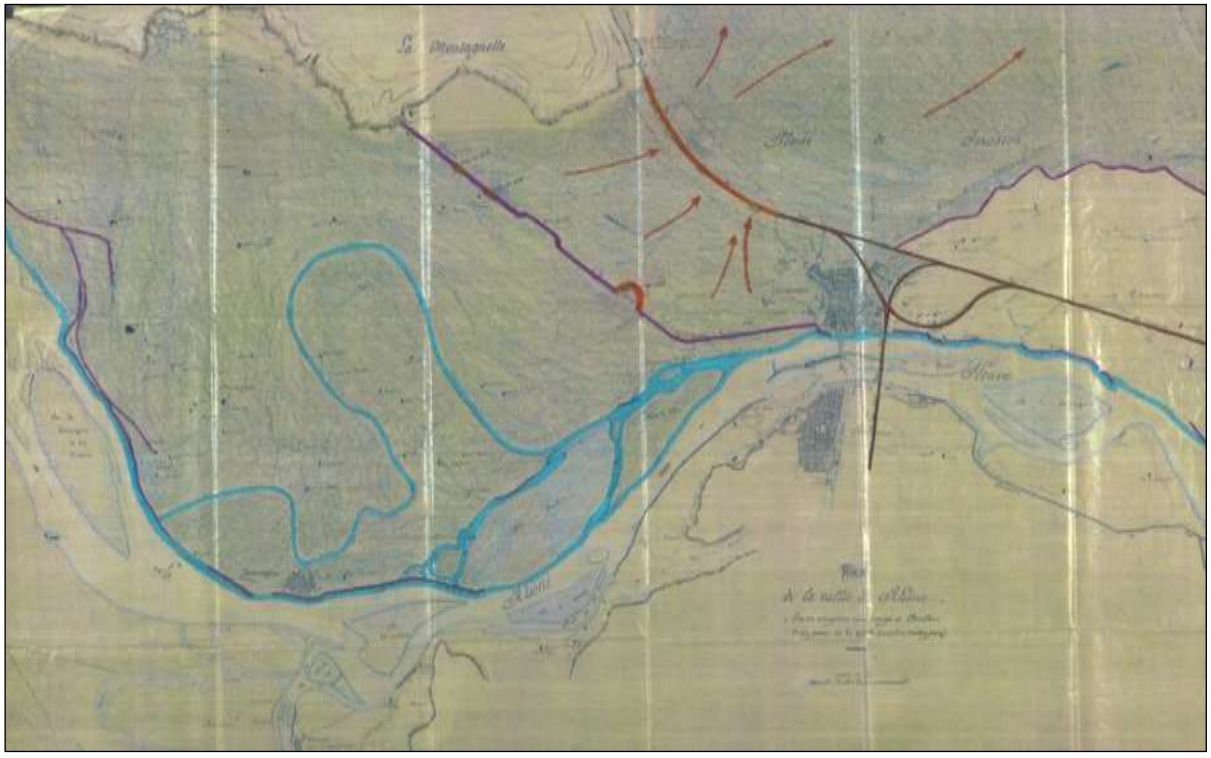


Figure 51. Invasion par les eaux de la plaine de Tarascon suite aux ouvertures de brèches au niveau de la levée de chemin de fer (source SSR [A1856 06])

Légende :

Cours d'eau (le Rhône)

Ouvrages de protection (perrés, chaussées ou digues)

Voie de chemin de fer PLM

Zones de brèches

Sens d'écoulement des eaux d'inondation

Le croisement de Pardé [K001] et DDE13 [A1856 06] laissent penser que les trois brèches se sont formées en 2h30 le 31 mai 1856 de 18 h à 20h30.

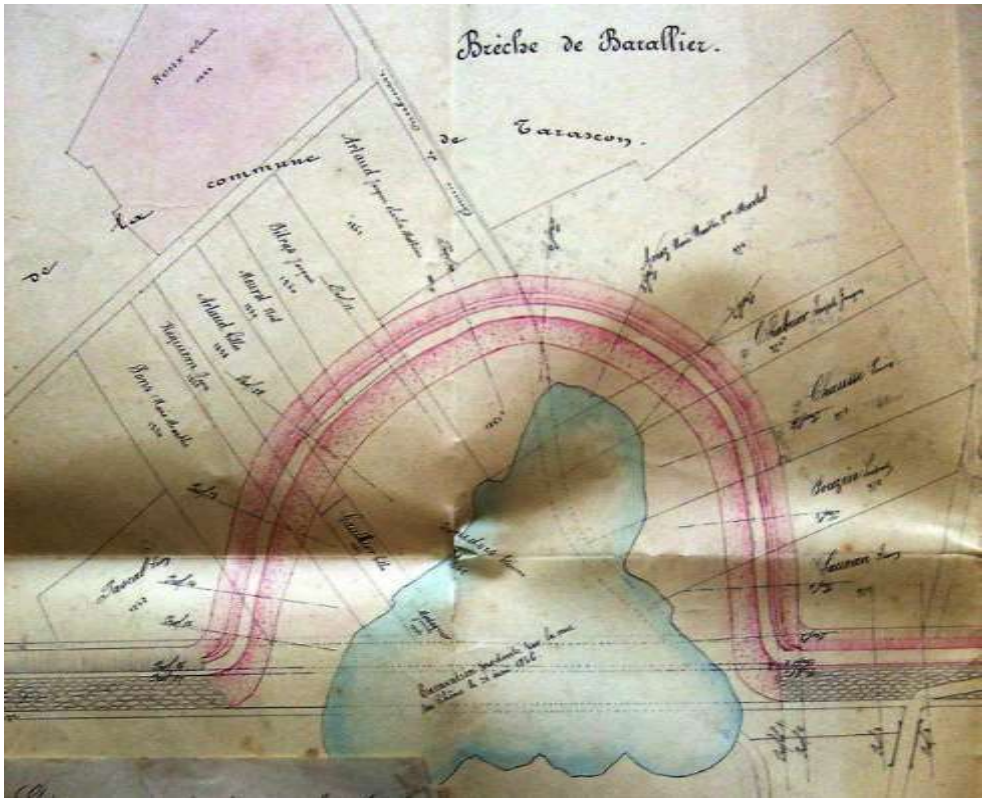


Figure 52. Brèche de Barallier (source SSR [H0005])

A partir de la laisse de crue (12,9 m NGF) et en retenant les hypothèses suivantes :

- Largeur de la principale brèche : 250 mètres
- Coefficient de seuil : 0,27
- Cote du terrain naturel aval : 8,5 m NGF
- Temps d'ouverture : 3 heures

On estime le débit de pointe dans les trois brèches à 2 800 m^3/s

La surface de la zone protégée comprise entre la digue de la montagnette et la voie ferrée étant d'environ 5 km², on estime le volume de déversement cumulé à

- 19 h : 2,5 millions de m^3 – hauteur moyenne dans Tarascon de 1 mètre
- 20 h : 10 millions de m^3 – hauteur moyenne dans Tarascon de 3 mètres
- 21 h : 20 millions de m^3 – rupture de la voie ferrée au sud du centre-ville

Ce qui est conforme avec les témoignages de la revue illustration d'un déferlement soudain.

Le déversement dans les brèches s'est poursuivi jusqu'au 12 juin 1856. Mais à partir du 6 juin 1856, les niveaux étaient stabilisés.

Le volume de déversement du 31 mai au 6 juin 1856 est estimé à environ 650 millions de m^3.

8.4 RD - BRECHE DE SAINT PEYRE

La brèche de Saint Peyre s'est produite par infiltration au droit d'une ancienne brèche de 1840. C'est la seule brèche qui s'est produite en rive droite du Rhône. L'inondation fut également extrêmement forte d'après Pardé, mais moins étendue qu'en 1840.

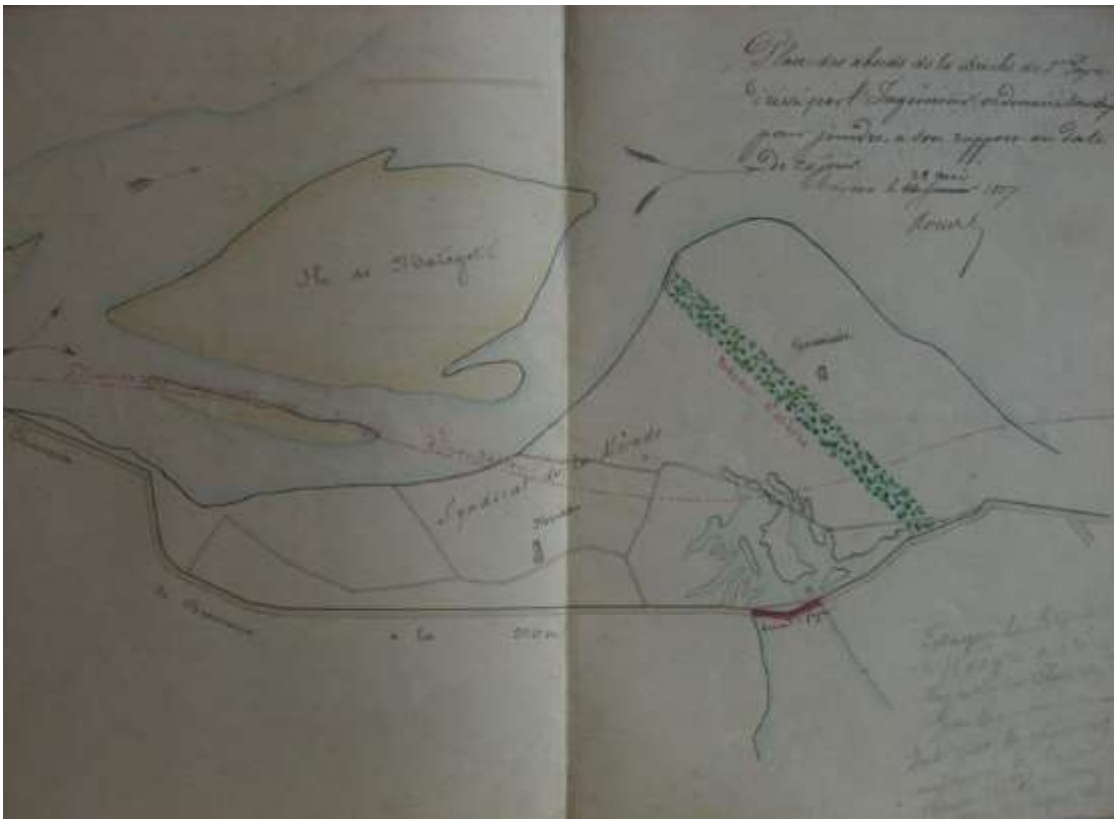
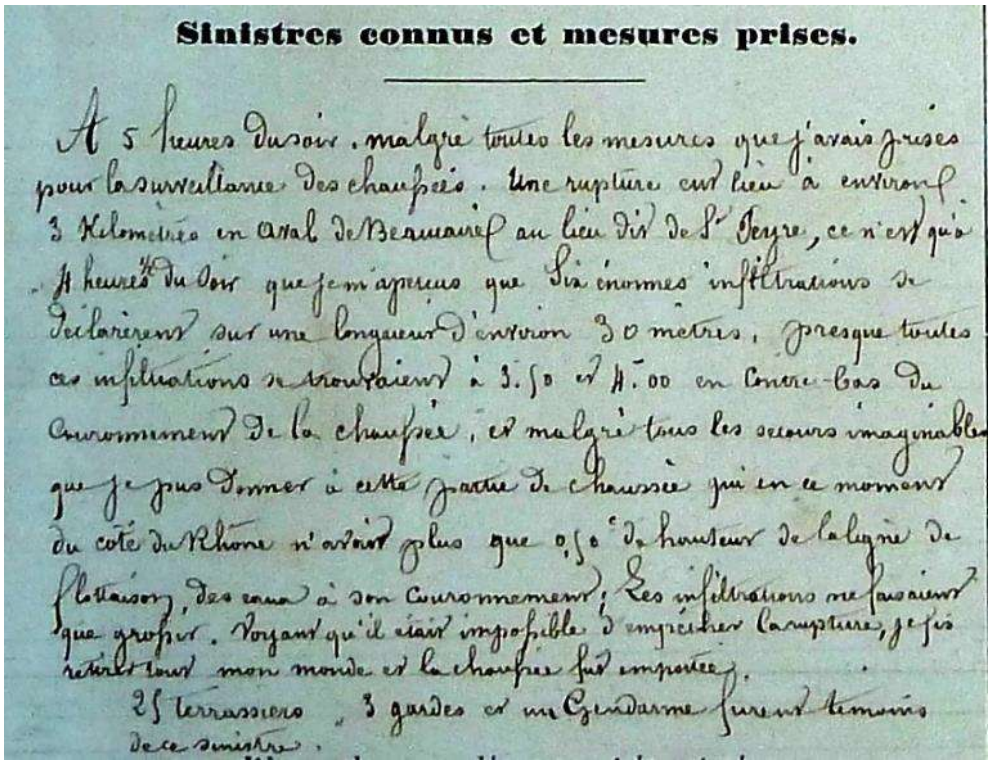


Figure 53. Brèche de St Peyre (source SSR - 1857)

Le témoignage de la brèche figure dans le bulletin horaire de la crue tenu par l'ingénieur des Ponts et Chaussées [O1856 01].

On peut y lire que d'énormes infiltrations se déclarèrent sur une longueur d'environ 30 mètres. Ces infiltrations étaient situées à 3,50 à 4,0 m en contrebas de la digue et que le niveau du Rhône au moment de la rupture était situé 50 cm sous le couronnement de la chaussée.

Dans la suite des bulletins, on peut y lire qu'une digue provisoire fut construite dans la plaine pour limiter la propagation. Le colmatage de la brèche débuta le 10 juin 1856.



Sinistres connus et mesures prises.

A 5 heures du soir, malgré toutes les mesures que j'avais prises pour la surveillance des chaussées, une rupture eut lieu à environ 3 Kilomètres en aval de Beaucaire au lieu dit de St Pierre, ce n'est qu'à 4 heures ½ du soir que je m'aperçus que six énormes infiltrations se déclarèrent sur une longueur d'environ 30 mètres, presque toutes ces infiltrations se trouvaient à 3.50 et 4.00 en contre-bas du couronnement de la chaussée, et malgré tous les secours imaginables que je pus donner à cette partie de chaussée qui en ce moment du côté du Rhône n'avait plus que 0,50 c de hauteur de la ligne de flottaison, des eaux à son couronnement; les infiltrations ne faisaient que grossir. Voyant qu'il était impossible d'empêcher la rupture, je fis retirer tout mon monde et la chaussée fut emportée.

25 terrassiers, 3 gardes et un Gendarme furent témoins de ce sinistre.

Figure 54. Observations écrites de l'Ingénieur des Ponts et Chaussées (source SSR [O1856 01])

A partir du limnigramme à l'échelle de Beaucaire recalé dans le référentiel NGF IGN 69 (le zéro de l'échelle était calé à 3,49 m NGF) et en retenant les hypothèses suivantes :

- Dénivelé hydraulique entre l'échelle de Beaucaire : 1,6 cm
- Largeur de la brèche : 100 mètres
- Coefficient de seuil : 0,24
- Cote du terrain naturel aval : 5,5 m NGF
- Temps d'ouverture : 1 heure

On estime le débit de pointe dans la brèche à 1 000 m^3/s et un volume de déversement de 300 millions de m^3 au 10 juin 1856, quand débuta le colmatage. Ce volume de déversement est conforme aux modélisations réalisées dans le cadre des études de renforcement de la digue entre Beaucaire et Fourques.

8.5 DEFLUENT - BRECHE DE TRINQUETAILLE

La cinétique de la brèche de Trinquetaille a été reconstituée dans la monographie réalisée par la DDE13 [A1856 06]. Elle est la suivante

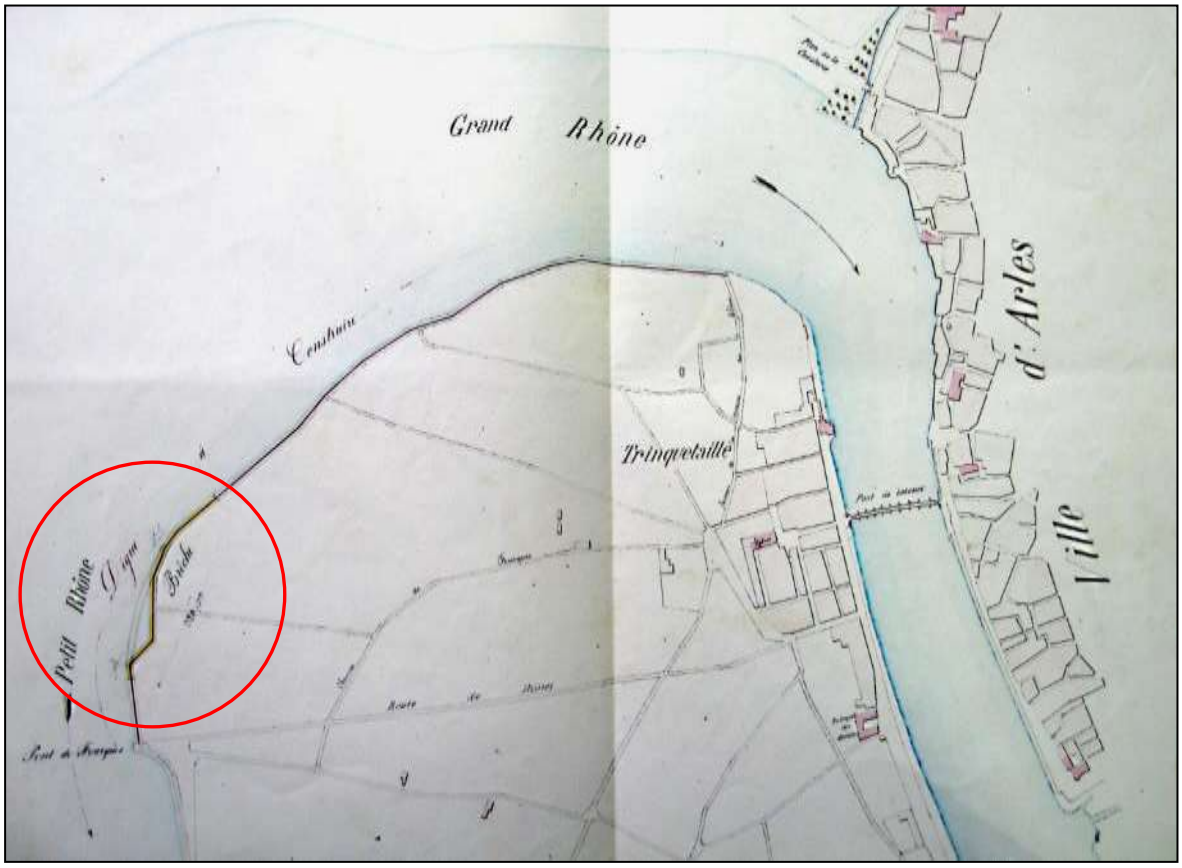


Figure 55. Carte de localisation de la brèche de Trinquetaille située à 80 environ, côté Nord, du Pont de Fourques (Source : Archives des Ingénieurs des Ponts et Chaussées – [A1856 06])

Le **31 mai**, aux environs de 17h00, une importante brèche de plus de 100 m de long s'ouvrit à la pointe de la Camargue entre le Pont de Fourques et Trinquetaille (brèche dite de Trinquetaille)

Elle a de trois à quatre cent mètres de largeur et débite un volume énorme d'eau. Une personne qui a parcouru avec le Sous-Préfet la tête de la Camargue jusque vers Gimeau [Gimeau] et le Mas-de-Vert, a trouvé partout, excepté sur une petite lisière, vers Caseneuve et le Mas-de-Vert, 2 à 2.50 mètres d'eau » (propos extrait d'une lettre d'Arles datée du 3 juin 1856 reprise par la Gazette du Midi, juin 1856).

« Depuis Arles, le 1er juin, 7 heures du soir : la brèche faite aux chaussées de Camargue, entre le Pont de Fourques et la porte de Trinquetaille, occupe maintenant 4 ou 500 m ; les eaux s'étendent du bassin de Corrège, et elles arrivent jusqu'aux anciens ségonnaux du Rhône, Saint-Férréol vers Cabassole, le mas d'Agon et Méjaunes ; là elles tendront à se niveler, et viendront battre les bords du chemin de Villeneuve jusqu'aux portes d'Arles » (récits de 1856, manuscrit).

Il est à noter que Pardé parle d'une longueur de 360 mètres dans [K001].

A partir du limnigramme à l'échelle de Fourques recalé dans le référentiel NGF IGN 69 (le zéro de l'échelle en 1911 était calé à 1,24 m NGF ; cependant afin de retrouver les niveaux communément retenus, une majoration de 0,50 m a été effectué) et en retenant les hypothèses suivantes :

- Largeur de la brèche : 100 mètres à 400 mètres
- Coefficient de seuil : 0,27
- Cote du terrain naturel aval : 4,5 m NGF
- Temps d'ouverture : 24 heures

On estime le débit de pointe dans la brèche à 1 000 m^3/s dans les premières heures et 2 300 m^3/s au maximum de l'extension, la durée de la crue peut expliquer que la brèche s'est étendue jusqu'à 400 ou 500 mètres suivant les documents d'archives. Le volume global d'eaux déversées au travers de la brèche est estimé à 600 millions m^3 au 6 juin 1856.

La digue fut entièrement perreyée (confirmé lors des travaux de renforcement réalisés en 2000) lors des travaux de réparations qui furent menés suivant le même tracé.

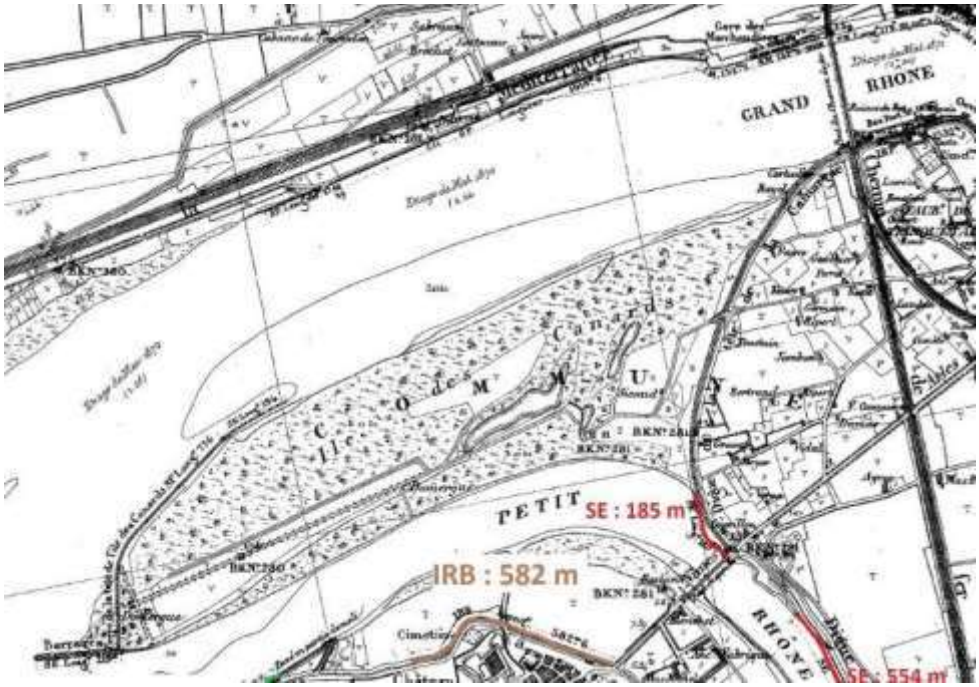


Figure 56. Carte des Ponts et Chaussées de 1876

8.6 PRG 294,7 A 295 - BRECHES DE RIGODON

Les 4 brèches de rigodon se sont produites entre le PRG 294,7 et PRG 295 au droit d'un paléo-chenal et en extérieur d'un coude prononcé.

Le positionnement des brèches au PRG 294,7 est confirmé par :

- Les plans d'archives des ponts et chaussées figurant dans la monographie de la DDE 13 sur la crue de mai 1856 [A1856 06],
- la carte des ponts et chaussées de 1876 [H0003], qui localise sur la partie aval de la brèche, deux tronçons de digue de longueurs respectives de 28 et 44 m avec un perré sur le talus amont (Code IRP), qui est la technique utilisée au XIX^{ème} siècle pour la réparation des anciennes brèches
- les travaux du CEREGE [M0001] sur les cartes géologiques qui montrent la présence de couches sableuses en forme de cône d'érosion (Cf. figure ci-dessous)
- La base de données topographique de grande précision réalisée par l'IGN [C202] dans le cadre du plan Rhône, qui montre les apports sédimentaires disposés en cône d'érosion

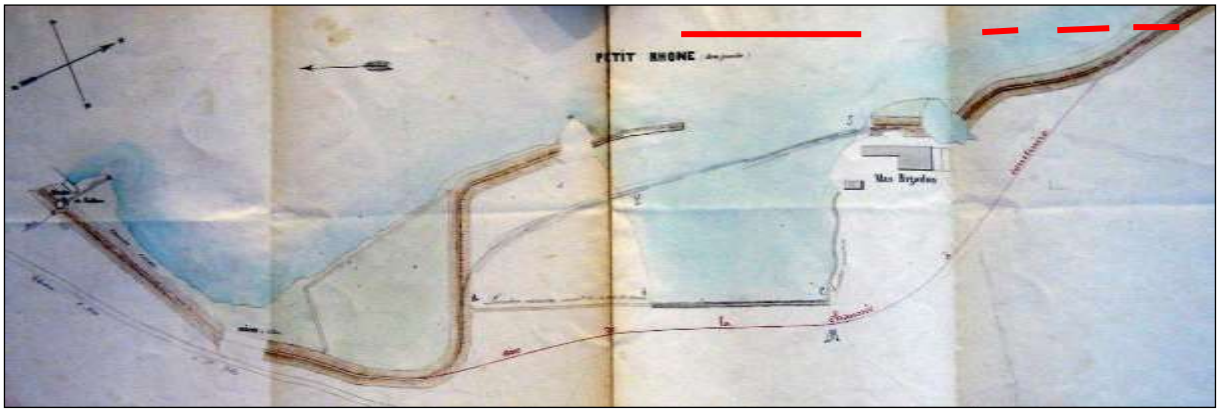


Figure 57. Brèches survenues dans le secteur de Rigodon (Source : Archives des Ingénieurs des Ponts et Chaussées – [A1856 06])

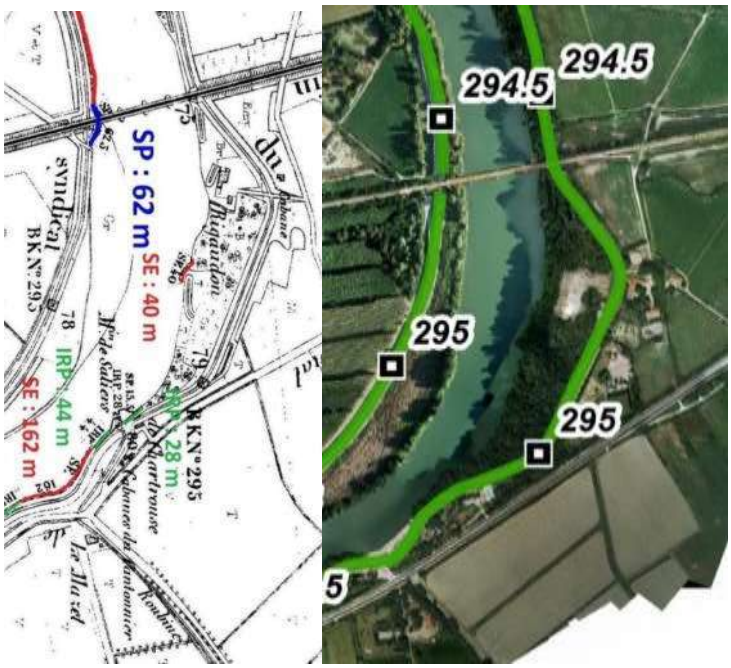


Figure 58. Localisation de la brèche de Rigodon – Crue Mai 1856

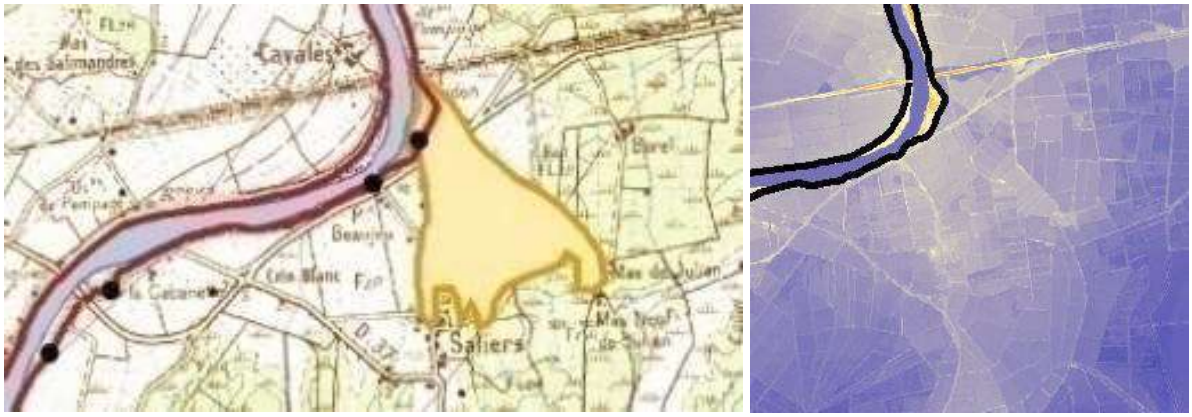


Figure 59. Extrait de la carte géologique exploitée par le CEREGE [M0001] et BDT Rhône de l'IGN (à droite) – [T0002]

4 brèches, de longueur respectives 25, 110, 20 et 25 m totalisant un linéaire de 180 m se sont produites sur moins de 500 mètres.

A partir des limnigrammes de Fourques et Saint Gilles (source SSR [O1856 02]), et en réalisant les corrections permettant de convertir les hauteurs d'eau aux échelles en cote NGF IGN 69 suivant le plan [O1856 07], et en retenant les hypothèses suivantes :

- Largeur de la brèche : 180 mètres
- Coefficient de seuil : 0,24
- Cote du terrain naturel aval : 2 m NGF
- Temps d'ouverture : 3 heures

On estime le débit de pointe dans la brèche à 1 200 m^3/s et un volume global d'eaux déversées au travers de la brèche d'environ 400 millions de m^3 au 6 juin 1856, ce qui explique son impact sur la carte géologique.

8.7 DEPART DE BRECHE DE CAZENEUVE

Aucune vue en plan de la « brèche », de faible linéaire d'après [A1856 06] n'a été retrouvée dans les archives du Service Spécial du Rhône. Sur la carte de 1876 [H0003], l'ouvrage est indiqué IP de part et d'autre du PRG 282, ce qui signifie que la berge est perreyée dans cette partie du fleuve. Il est possible que la brèche soit localisée dans cette partie du fleuve vers le PRG 281,8 (en aval du pont actuel de la RN113), d'autant plus que, ce tronçon de digue, localisé au droit du lieu-dit le « trou de Fourques » a connu d'importantes infiltrations en 1993, 1994, 2002 et 2003. Il est par ailleurs localisé au droit d'un paléo-chenal.

Figure 60. Localisation possible de la brèche de Cazeneuve – Crue mai 1856

8.8 BRECHE OU DEPART DE BRECHE DE MAS DE REY

Aucune vue en plan de la brèche, d'une longueur de 50 mètres d'après [A1856 06], n'a été retrouvée dans les archives du Service Spécial du Rhône. Sur la carte de 1876 [H0003], un tronçon de 53,5 mètres est indiqué IRP vers le PRG 285,7, ce qui signifie que la digue est totalement perreyée, ce qui était la technique utilisée au XIX^{ème} siècle pour le colmatage des brèches. La zone comprise entre le PRG 284,9 et 286,3 est une zone connue d'importantes infiltrations, bien qu'aucun paléo-chenal n'y soit recensée. Le plus proche étant plus en aval vers le PRG 287. On notera cependant qu'une brèche d'une largeur « considérable » a été occasionnée en 1843 au droit du Mas d'Yvan.

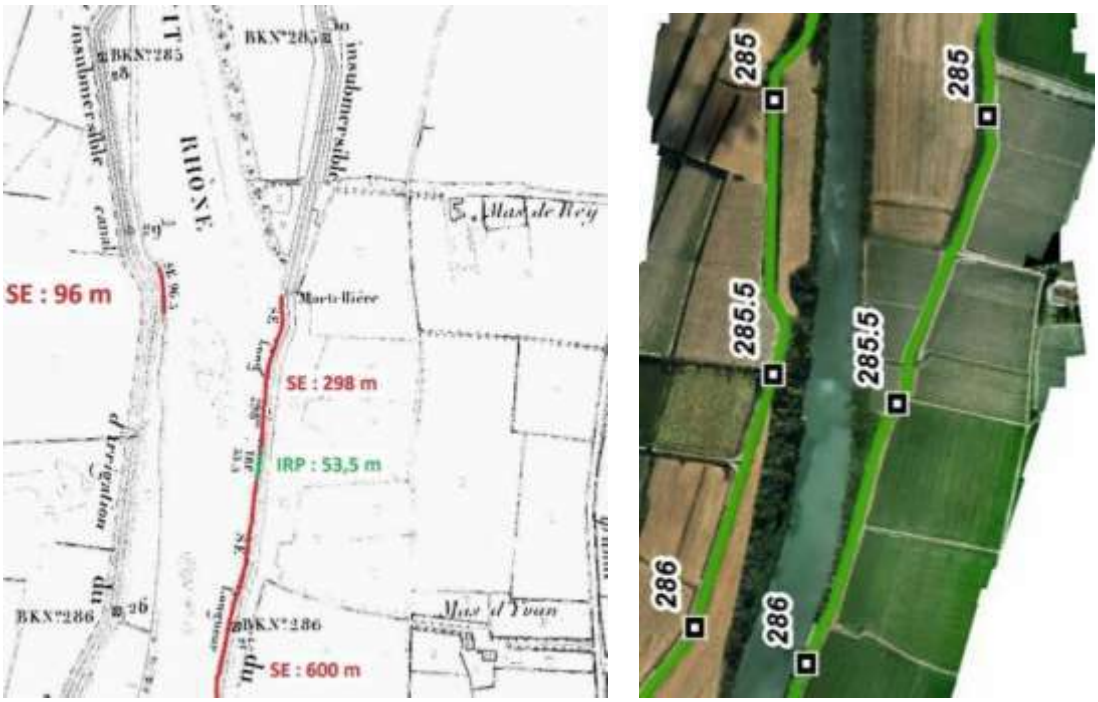


Figure 61. Localisation probable de la brèche ou départ de brèche du Mas de Rey
Crue mai 1856

8.9 DEPART DE BRECHE DE MAS COMBET

Aucune vue en plan de la brèche n'a été retrouvée dans les archives du Service Spécial du Rhône. Sur la carte de 1876 [H0003], un tronçon de 124 mètres est indiqué IRP vers le PRG 307,75, ce qui signifie que la digue est totalement perreyée, technique utilisée au XIX^{ème} siècle pour le colmatage des brèches. Compte tenu du linéaire et de la faiblesse de la charge d'eau à cet endroit, il est peu probable qu'il s'agisse d'une brèche totale et qu'on soit en présence d'un départ de brèche lié à l'affouillement ou à des infiltrations.

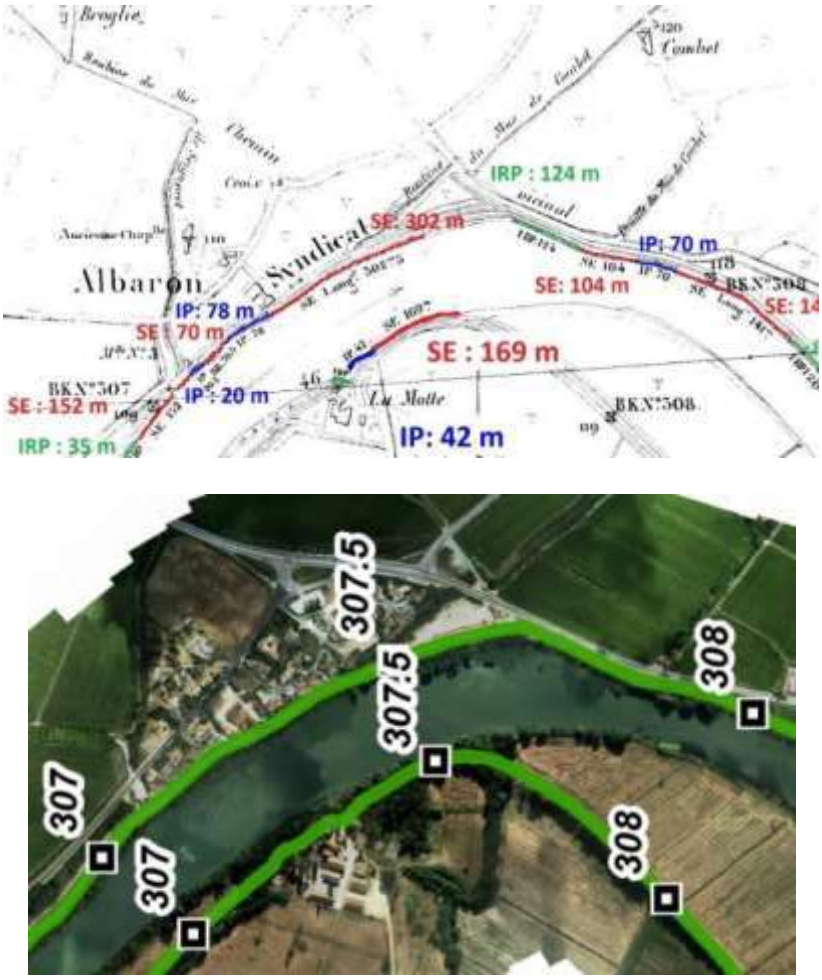


Figure 62. Localisation probable de la brèche du Mas de Combet – Crue mai 1856

8.10 DEPART DE BRECHE DE MAS DE BRUN ET MAS D'EYBRUN

L'étude historique menée par GINGER pour le compte de la DDE 13 [A1856 06] évoque deux brèches de faible linéaire respectivement aux Mas de Brun et Mas d'Eybrun (est-ce le même Mas) sans localiser les brèches. On notera que le Mas de Brun est situé au droit du PRG 311 en extrado. Il est possible qu'il agisse d'un désordre lié à l'affouillement externe.

8.11 BRECHE OU DEPART DE BRECHE DE LA TRIQUETTE

L'étude historique menée par GINGER pour le compte de la DDE 13 [A1856 06] cite plusieurs brèches dénommées « Triquette » « Passerons » « Montlong » qui correspondent à des lieux-dits actuels situés du GRD 285 à GRG 289, soit au droit de l'ancien bras de Saint Ferréol (Cf. Chapitre n°4).

Figure 63. Extrait de la carte géomorphologique de 1877

La longueur de la brèche ou départ de brèche de la Triquette y est donnée à 150 mètres.
Le lieu-dit de la Triquette, du nom de la roubine est aujourd'hui localisé au GRD 285,4 mais sur la carte des Ponts et Chaussées de 1876 [H0003], il est également situé au GRD 284,2. Sur la carte de 1876 [H0003], un tronçon de 357 mètres est indiqué IRP vers le GRD 283,7 au droit des anciennes Papeteries Etienne, ce qui signifie que la digue est totalement perreyée, technique utilisée au XIX^{ème} siècle pour le colmatage des brèches. Il est possible que ce soit le lieu de la brèche de la Triquette telle que mentionnée dans les documents d'archives.
On notera également qu'un cône d'érosion a été identifié en aval de ce secteur par le CEREGE [M0001].

Figure 64. Cône d'érosion figurant sur la carte géologique [M0001]

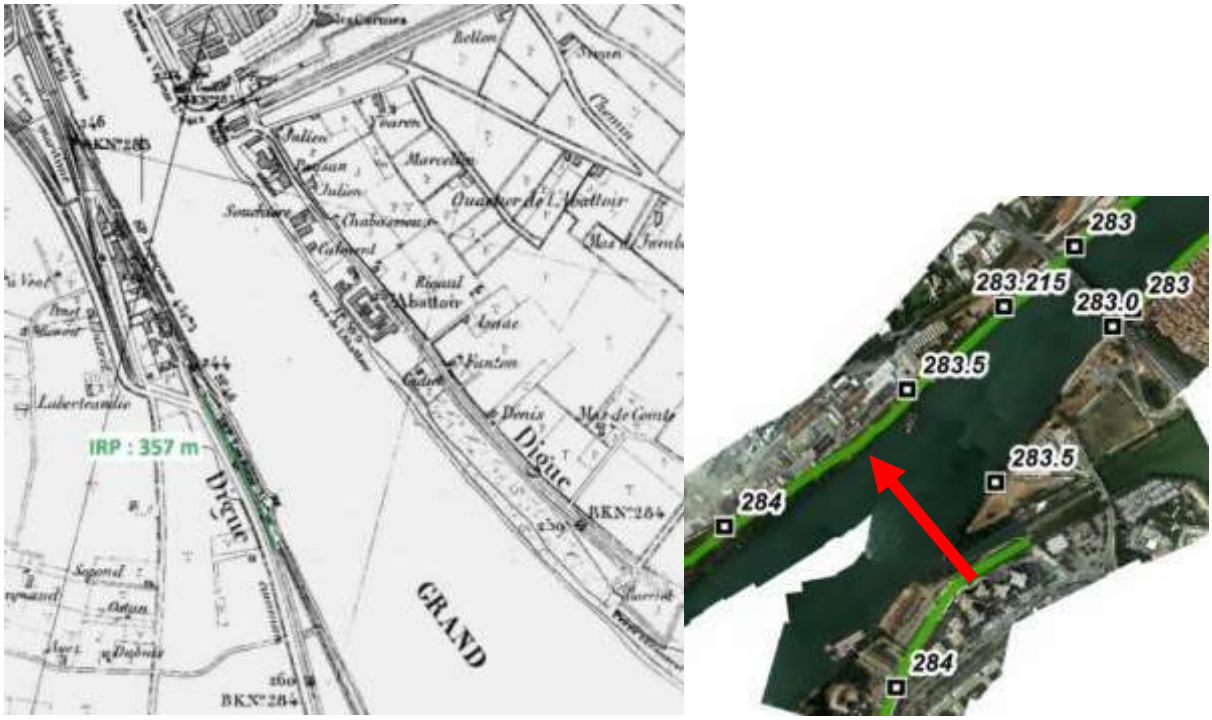


Figure 65. Localisation possible de la brèche ou départ de brèche de la Triquette – mai 1856

On note également sur la carte de 1876, que la roubine de la Triquette est localisée au GRD 285,4 et que ce lieu est appelé aujourd'hui le « Trou de la Cape » nom donné le plus souvent aux anciennes brèches. Aucune digue perreyée n'est présente sur les cartes de 1876. La situation en extrados pourrait expliquer une brèche partielle par affouillement externe.

8.12 BRECHE OU DEPART DE BRECHE DE PASSERONS

La longueur de la « brèche » ou départ de brèche de Passerons est donnée à 50 mètres dans l'étude DDE 13 [A1856 06].

Le lieu-dit Passerons est localisé au GRD 285. Sur la feuille n°46 des cartes de 1876 [H0003], un tronçon de 223,5 mètres est indiqué IRP vers le GRD 286,25, ce qui signifie que la digue est totalement perreyée, technique utilisée au XIX^{ème} siècle pour le colmatage des brèches. Il est possible que ce soit le lieu de la brèche de Passerons telle que mentionnée dans les documents d'archives.

Figure 66. Localisation possible de la Brèche ou départ de brèche de Passerons (Sud) et Triquette 2ème possibilité (Nord)

8.13 BRECHE OU DEPART DE BRECHE DE MONTLONG

La longueur de la brèche ou départ de brèche de Montlong est donnée à 50 mètres dans l'étude DDE 13 [A1856 06].

Le lieu-dit Montlong est localisé entre le GRD 288 et GRD 289. Sur la feuille n°46 des cartes de 1876 [H0003], plusieurs tronçons digue perreyée, totalisant un linéaire de 800 mètres environ (Code IRP) figurent dans ce tronçon du fleuve. Il est très probable que la brèche de Montlong soit localisée sur ce tronçon.

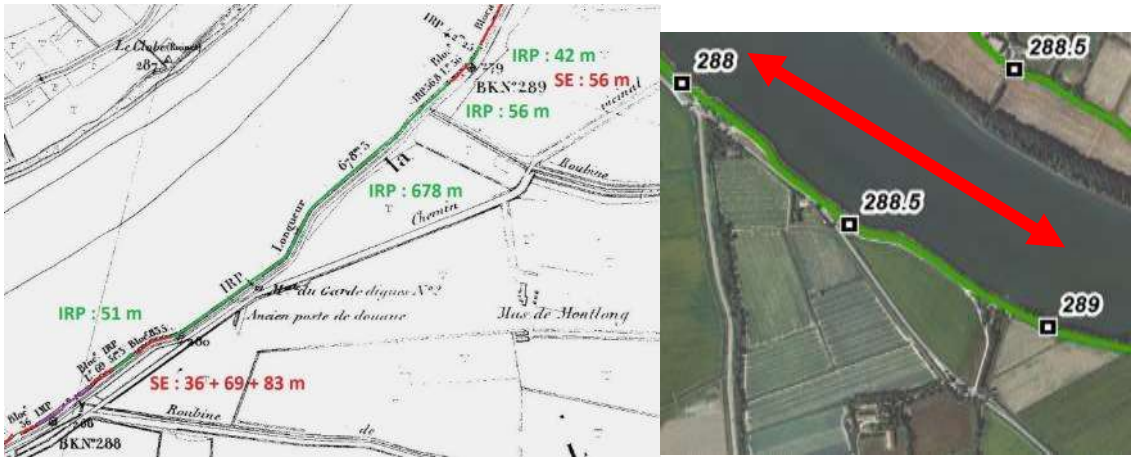


Figure 67. Localisation probable de la brèche de Montlong

8.14 BRECHE OU DEPART DE BRECHE DE PEAUDURE

La brèche ou départ de brèche de Peaudure est citée dans [A1856 06].

Le Mas de Peaudure est situé au droit du GRD 310,5. Aucun ouvrage particulier ne figure sur les plans des Ponts et Chaussées. On notera qu'au droit du GRD 310,5 sur la BDT IGN (cartographie relative au chapitre n°6), les terrains sont légèrement plus élevés, pouvant laisser penser à un cône d'érosion. Compte tenu de cette localisation, à proximité d'anciennes zones de divagation du Rhône, il est très vraisemblable qu'il s'agisse d'une brèche ou départ de brèche par infiltrations.

Figure 68. Localisation possible de la brèche ou départ de brèche de Peaudure

8.15 BRECHES OU DEPARTS DE BRECHE DE CHARTROUSSE ET JACQUIERES

Ces deux brèches sont citées dans [A1856 06]. Le Mas de Chartrousse est situé au droit du GRD 311,7 et le Mas de Jacquines au droit du GRD 313,25.

Aucun ouvrage particulier ne figure sur les plans des Ponts et Chaussées [H0003]. On notera un changement de tracé sur la carte de 1876 laissant penser à une ancienne brèche. Il est situé vers le GRD 312,4. De la même façon, un changement de tracé vers le GRD 313,25 pourrait laisser penser à un changement de tracé lié à une ancienne brèche.

On notera que sur ce tronçon du fleuve, on est dans des anciennes zones de méandre du fleuve et que l'origine des brèches doit très probablement être attribuée à des infiltrations.

Figure 69. Localisation possible des brèches et départs de brèche de Chartrousse et Jacquières

8.16 BRECHE DE BARCARIN

Une brèche partielle a été recensée au GRG 315,5. L'examen des plans d'archives (source SSR [H0005]) montre que la digue est en contact direct avec le fleuve, que seul le talus côté fleuve et la crête de digue ont été endommagés.

La localisation de la digue en extrados du Grand Rhône laisse penser cette brèche partielle est due à un mécanisme de rupture par affouillement externe.

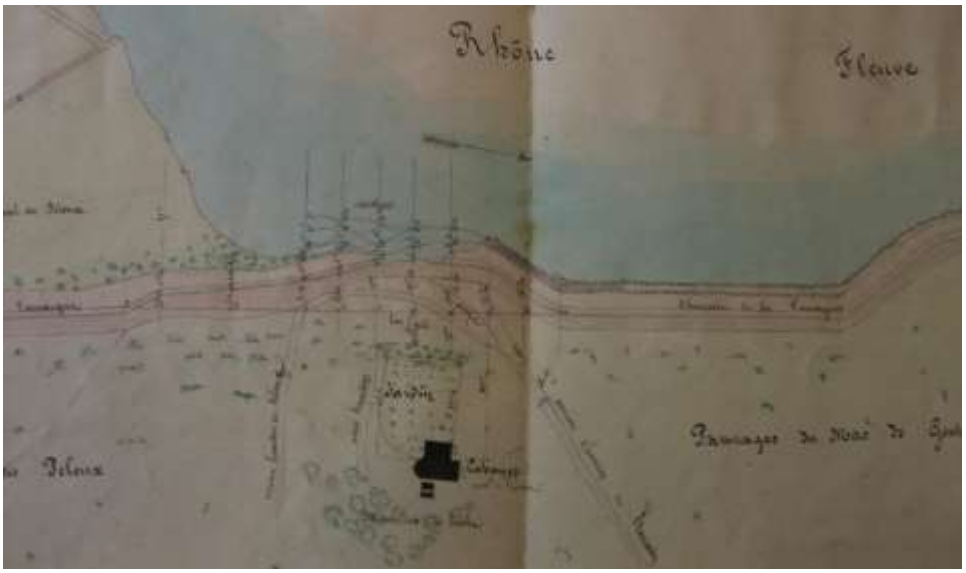


Figure 70. Crue 1856 - Brèche partielle en amont de Barcarin (source SSR [H0005])

Figure 71. Localisation probable de la brèche de Barcarin

8.17 BRECHE OU DEPART DE BRECHE DE GALIGNAN

La brèche de Galignan est citée dans l'étude de la DDTM 13 [A1856 06]. Elle est localisée en rive gauche du Grand Rhône au droit du Mas de Galignan vraisemblablement au GRG 295,9 où la digue fait deux léger décrochés. Son origine semble être les infiltrations, l'affouillement et la surverse étant à écarter.

Figure 72. Localisation probable de la brèche de Galignan

8.18 BRECHE OU DEPART DE BRECHE DE PARADE

La brèche ou le départ de brèche de Parade est citée dans l'étude DDE 13 [A1856 06]. La Tour de Parade est située au droit du GRG 310.

L'examen des cartes de 1876 [H0003] révèle la présence d'une digue perreyée (Code IRP) sur un linéaire de 531 m au droit d'un bras mort (GRG 311,4). Il est très probable que ce soit la localisation de ce départ de brèche et que l'origine en soit les infiltrations.

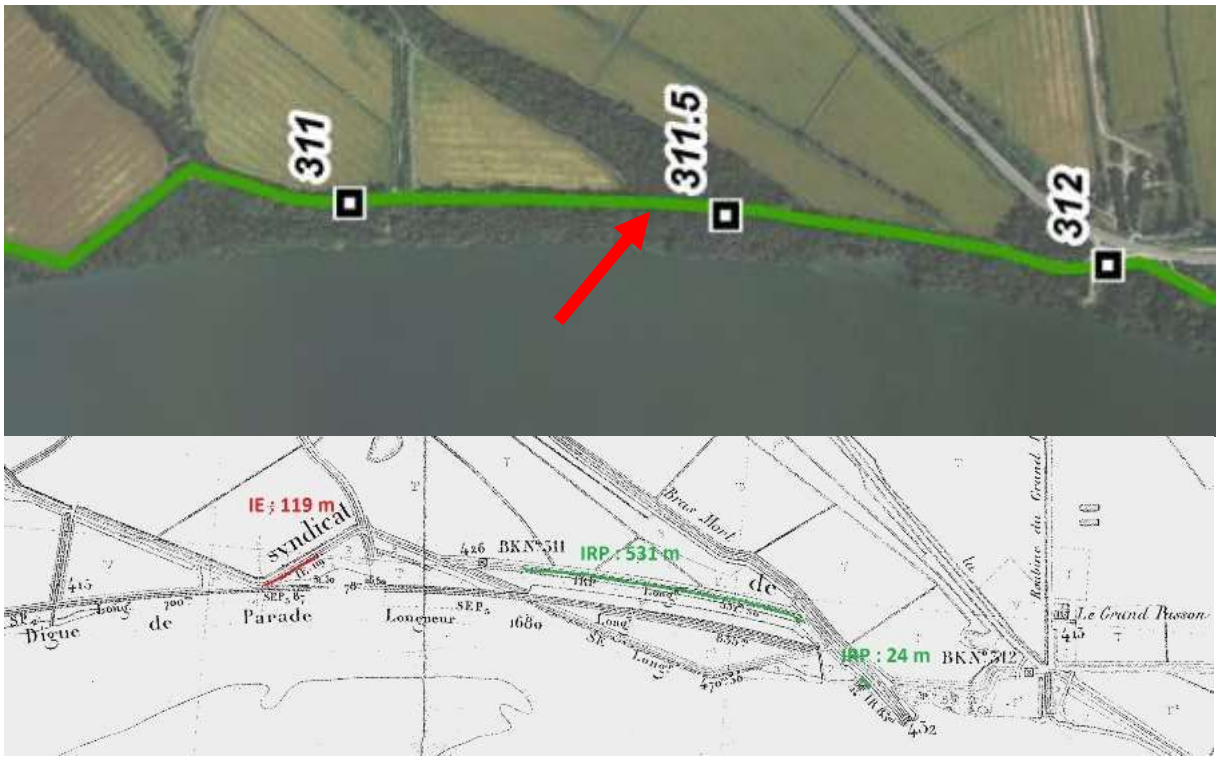


Figure 73. Localisation possible de la brèche de Parade – mai 1856

9 CRUE DE 1872

Lors de cette crue, une seule brèche ou plus précisément un départ de brèche a pu être recensée au GRD 305,2. Sa largeur a été estimée à 60 m. La digue était à l'époque située en contact direct avec un bras secondaire du fleuve et localisée en extrados du fleuve. La crue n'ayant pas été très importante (8400 m3/s – T = 10 ans), le mécanisme de rupture par surverse peut être écarté. Les seuls mécanismes ayant pu provoquer cette brèche semblent être l'érosion interne (érosion de conduit ou érosion régressive) ou l'affouillement externe. L'absence de paléo-chenal dans ce secteur permet d'écarter l'érosion régressive comme mode initiateur de rupture. La localisation de la digue en extrados peut laisser penser à brèche par affouillement externe sans écarter néanmoins une érosion de conduit.

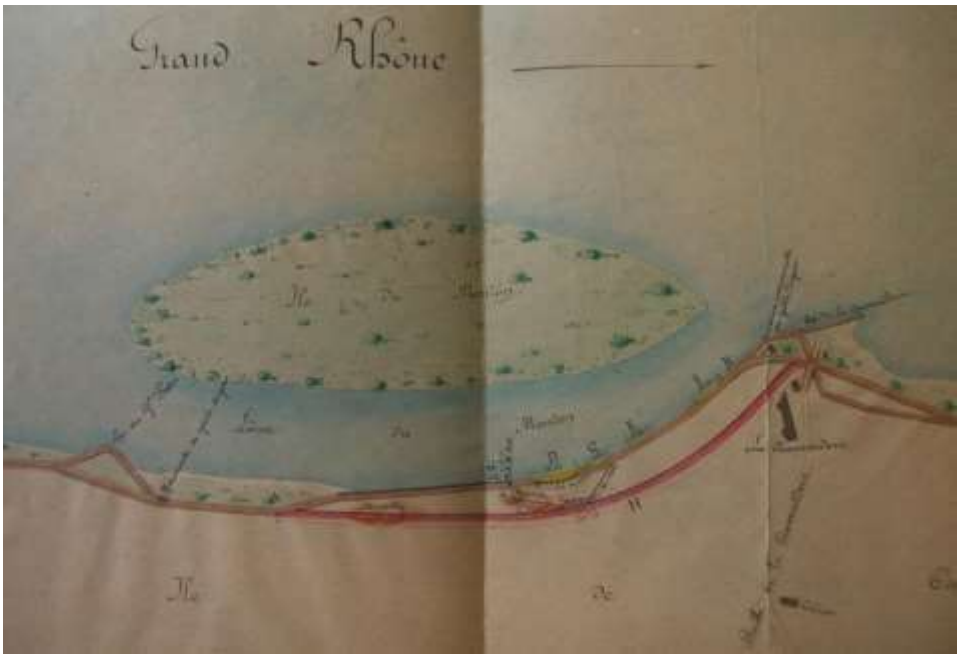


Figure 74. Crue de 1872 – Brèche de la commanderie (source SSR [H0005])

L'examen des cartes de 1876 permet de localiser précisément la brèche dénommée « ancienne digue ». On notera également la présence d'une digue perreyée juste en amont du GRD 305 pouvant laisser penser à un problème d'infiltrations.

Figure 75. Carte des Ponts et Chaussées de 1876 au droit de la Commanderie

Figure 76. Localisation de la brèche de la Commanderie – 1872

10 CRUE D'OCTOBRE 1993

10.1 DEROULEMENT DE LA CRUE

La crue a franchi le seuil de 8,15 m NGF à la station de Beaucaire/Tarascon (environ 6750 m^3/s) du 7/10/1993 en soirée jusqu'au 12/10/1993 en matinée pour atteindre son pic de crue le 10 octobre 1993 à 7h. Les principales caractéristiques de la crue d'octobre 1993 figurent au chapitre n°4 relatif aux aléas naturels.

L'évolution des limnigrammes aux différentes stations du Grand Delta figure en page suivante. Les instants de formation des deux principales brèches (Figarès et Lauricet) et de leurs colmatages sont également indiqués.

10.2 BILAN DES BRECHES

Cette crue a causé une série de rupture de digues se caractérisant par 14 brèches et départs de brèche sur l'ensemble du linéaire du Petit et Grand Rhône dont la plus importante a été celle de « Figarès » en rive gauche du Petit Rhône. Certaines brèches ont été totales et ont provoqué l'inondation de la zone protégée. Elles sont au nombre de 4 (brèches de Figarès, La Galante, Casebrune et Lauricet). D'autres ont été uniquement partielles et n'ont pas donné lieu à inondation. Elles sont au nombre de 10.
Ces 14 ruptures ont été initiées par érosion de conduit (érosion interne) soit dans un terrier creusé par un animal fouisseur (blaireau ou lapin), soit le long de conduites d'ouvrages traversants.

Le tableau ci-après localise l'ensemble de ces ruptures et donne leurs largeurs ainsi que le mode initiateur de la rupture (Les largeurs sont issues des sources suivantes : TA Marseille [A1993 01] et R. Bonnefoy et P. Royet [A1993 03]).

L'origine des brèches liées aux terriers d'animaux fouisseurs d'après Bonnefoy et Royet (source [A1993 03]) semble relever deux origines distinctes :

- le (ou les) trou(s) d'animaux fouisseurs débouche(nt) de part et d'autre du corps de digue. L'écoulement par le trou se forme lors de la montée des eaux. L'agrandissement est généré par entraînement de matériaux (phénomène de renard hydraulique) jusqu'à fissuration du corps de digue côté terre et création de brèche par érosion régressive rapide ;
- le corps de digue se met en charge par des entrées d'eau côté amont qui ne débouchent pas. Le remblai aval se sature, ses caractéristiques mécaniques s'affaiblissent et il finit par s'affaisser. Il s'en suit une rupture progressive vers l'amont jusqu'à création de brèche.

Ces désordres peuvent être aggravés par le vieillissement des digues :

- augmentation de la perméabilité ;
- action des racines des arbres en pied de digues ;
- influence des alternances d'imbibition et de dessiccation ....

Toutefois, certaines entrées d'eau de ce type n'ont pas forcément engendré de brèches parce que le débit courant restait faible et que le corps de digue était composé de matériaux cohérents possédant une bonne tenue à l'entraînement de fines.

Aucune brèche n'a été déplorée côté Gard. La digue était gérée depuis 5 ans par un syndicat intercommunal le SIDR suite à la dissolution de l'ASF en 1987. Le rapport du SIDR d'octobre 1993 [A1993 08] permet de dresser un bilan de la reprise en main par le Syndicat de la gestion des digues depuis sa création. Des préconisations de confortement et d'aménagement, qui ont été par la suite reprises dans le Plan Rhône, y sont également mentionnées.

Tableau 23. Bilan des brèches et désordres lors de la crue d'Octobre 1993 et mode de rupture initiateur

Nom de la brèche	Type brèche	Localisation	Largeur	Origine rupture
de Molin	Partielle	PRG 289.76	6 m	Erosion conduit le long d'un tuyau
Grille Léautaud (affaissement)	Partielle	PRG 291.50	20 m	Erosion conduit dans un terrier
Figarès	Totale	PRG 298.70	40 m	Erosion conduit dans un terrier et éventuellement le long d'une conduite
La Galante	Totale	PRG 299.81	15 m	Erosion conduit le long d'un tuyau
Casebrune	Totale	PRG 301.03	17 m	Erosion conduit le long d'un tuyau
Lauricet	Totale	PRG 304.36	40 m	Erosion conduit dans un terrier
Mas de la Vigne n°1	Partielle	PRG 305.63	12 m	Erosion conduit dans un terrier
Mas de la Vigne n°2	Partielle	PRG 305.70	17 m	Erosion conduit dans un terrier
Mas de la Vigne n°3	Partielle	PRG 305.80	3 m	Erosion conduit dans un terrier
L'Atilon n°1	Partielle	GRG 229.10	5 m	Erosion conduit dans un terrier
L'Atilon n°2	Partielle	GRG 299.15	10 m	Erosion conduit dans un terrier
Tour de parade	Partielle	GRG 309.90	5 m	Erosion conduit dans un terrier
Mas neuf de sansouires	Partielle	GRD 290,88	10 m	Erosion conduit le long d'un ouvrage traversant
Petit Peloux	Partielle	GRD 315,35	10 m	Erosion conduit dans un terrier

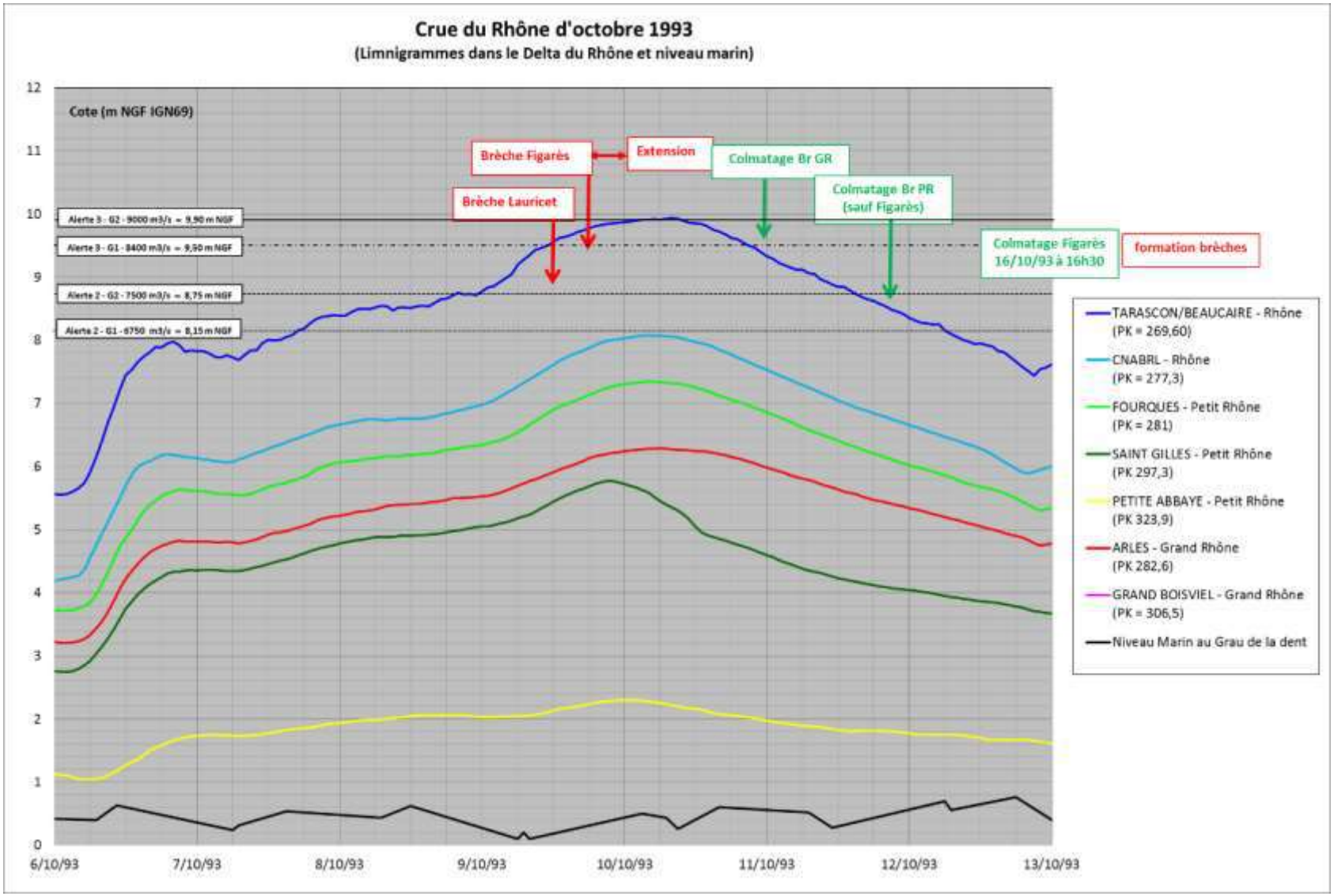


Figure 77. Crue d'octobre 1993 – Limnigrammes dans le Delta du Rhône et niveau marin

10.3 BILAN DE L'INONDATION DU RHONE

Les données ci-après sont extraites du Rapport DAMBRE [I002].

Le volume d'eaux déversées a été estimé à environ 130 millions de m^3.

450 maisons ont été inondées. La surface agricole touchée a été estimée à 13 000 ha sous une hauteur d'eau moyenne de 1 m.

Une partie de ce volume, 51 millions de m^3 a été rejeté dans le Rhône par les stations de pompage d'Albaron (PRG) et Beaujeu (GRD). La plus grande partie s'est écoulée vers le canal de Rousty et l'Etang de Vaccarès. De là, cette eau a été évacuée à la Mer, en partie gravitairement par le pertuis de la Fourcade (28 millions de m^3) et par pompage (44 millions de m^3). Ces pompages effectués pour éviter l'inondation des Saintes-Maries-de-la-Mer ont nécessité l'installation de puissantes pompes d'une capacité totale d'environ 14 m^3/s. Ils ont duré deux mois.

L'image satellitaire et la photographie aérienne ci-après illustre l'ampleur de l'inondation.

Figure 78. Inondation du Rhône d'octobre 1993 – source Spot [A1993 04]

Figure 79. Photographie aérienne (source [A1993 02])

10.4 PRG 289.76 – DEPART DE BRECHE MOLIN

L'origine du départ de brèche est décrite dans [A1993 01]. Ce départ brèche d'une largeur de 6 mètres a été initié le long d'un petit tuyau alimentant en eau le mas de Molin et disposé le long d'un ancien aqueduc désaffecté. La fuite le long du tuyau a entraîné l'effondrement de l'aqueduc et a provoqué la création d'un trou de 6 mètres de diamètre dans le corps de digue, jusqu'à rupture et déversement. Il est à noter que ségonal est très étroit (quelques mètres) et arboré

Figure 80. Crue octobre 1993 – Localisation Départ de brèche Mas Molin

Photo 1. Départ de brèche Mas Molin (source [A1993 06])

Cette érosion le long du tuyau et l'effondrement de l'aqueduc, qui a suivi, n'a pas donné lieu à une brèche totale et inondation comme le montre la vidéo tournée par M. Christian SMIDT de la mairie d'Arles (source [A1993 05]) le 10 octobre 2013 à 14h30, quelques heures après la pointe de crue.

Photo 2. Vidéo brèche Mas Mollin 10 octobre 1993 (source [A1993 05])

L'intervention d'urgence a consisté à disposer des sacs de tout-venant côté fleuve pour limiter le débit passant et à remplir la brèche par de la terre argileuse.

La brèche a été colmatée dans la journée du 12 octobre 1993, quand le Rhône est redescendu en-dessous du seuil des 7000 m^3/s.

Photo 3. Colmatage brèche du Mas Mollin (source [A1993 01])

L'ouvrage traversant est aujourd'hui supprimé.

10.5 PRG 291.50 – DEPART DE BRECHE DE GRILLE LEAUTAUD

Cet affaissement de la digue sur 20 mètres a été recensé comme une brèche. Suivant la terminologie retenue dans la présente étude, il s'agit en fait d'un départ de brèche.

Les causes sont indéterminées. D'après [A1993 01], L'effondrement, suite à la mise en charge de la digue, semble être lié à la présence d'une cave de blaireaux.

Figure 81. Crue octobre 1993 – Localisation affaissement de grille léotaud

Photo 4. Affaissement de grille léotaud (source [A1993 06])

Le ségonnal est étroit et arboré. La brèche a été colmatée dans la journée du 12 octobre 1993 quand le Rhône est redescendu en-dessous du seuil des 7000 m^3/s. Les travaux ont consisté à mettre en place des matériaux d'emprunts (arbres coupés, branchages, terre limoneuse).

La digue a été par la suite refaite en limon avec une banquette en laitier côté terre sur un linéaire d'environ 200 m. Aucun désordre n'a été observé par le garde-digues lors des crues de 2002 et 2003.

Photo 5. Banquette en laitier au droit de la brèche partielle de Léotaud (PRG 291,50)

10.6 PRG 298.60 - BRECHE DE FIGARES

La brèche est localisée au PRG 298,600

Figure 82. Crue octobre 1993 – Brèche de Figarès

La cinétique d'ouverture de la brèche est décrite dans le rapport d'activités de la subdivision d'Arles du Service Navigation (source [A1993 01]). Elle est résumée ci-dessous :

Dans l'après-midi (13 h ?) du samedi 9 octobre 1993 (Q ≈ 8400 m^3/s ancienne courbe de tarage), un agent du service navigation prévient le chef de la subdivision d'une possibilité de rupture près du Mas de Figarès.

A 14 heures, le chef de la subdivision se rend sur les lieux avec un ingénieur de la ville d'Arles. Il constate deux entrées d'eau situées de part et d'autre d'un bâtiment abritant des pompes sur le milieu du flanc de digue, côté terre. Vers 18 heures, le corps de digue situé au-dessus du trou amont s'est affaissé très rapidement et un déversoir s'est créé. Il est à noter que l'entreprise est arrivé sur les lieux à 16 heures avec une pelle mécanique et du matériau de colmatage mais n'a pas pu accéder à la digue, faute d'accès.

La brèche s'est étendue dans la nuit du samedi 9 octobre au dimanche 10 octobre pour constituer une brèche d'une largeur de 40 mètres

Les différentes étapes de formation de la brèche issues des observations figurant dans [A1993 01] ont été les suivantes :

- Un trou de blaireau d'un diamètre de 30 cm traversant la digue de part et d'autre,
- L'écoulement par ce trou lors de la montée des eaux
- L'agrandissement du trou par entraînement des matériaux
- La fissuration de la digue côté terre et création de la brèche

Les photos illustrant les différentes étapes de formation de la brèche figurent ci-après

Photo 6. Ecoulement par le trou de blaireau – vue côté fleuve (source [A1993 01])

Photo 7. Sortie de l'écoulement côté terre (source [A1993 01])

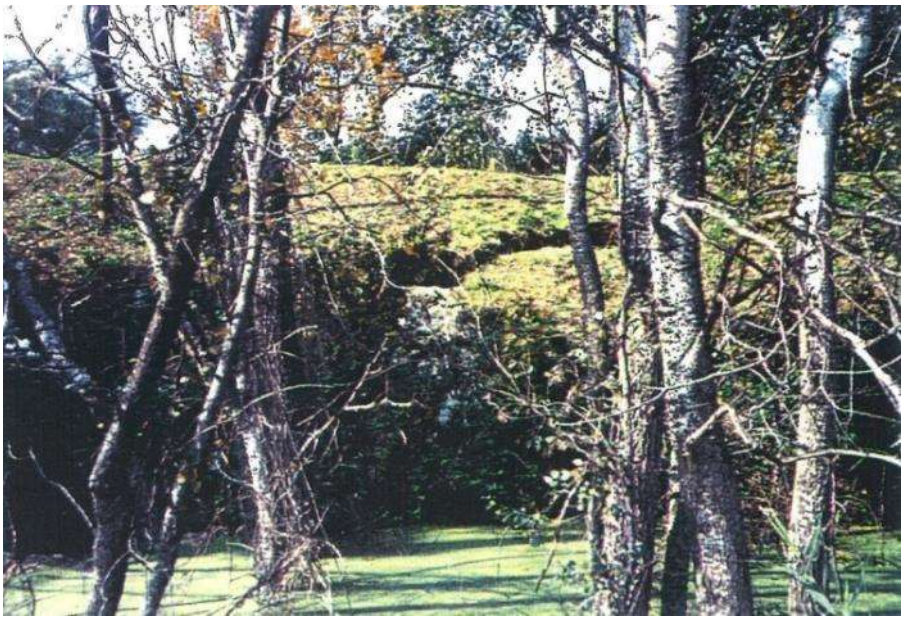


Photo 8. Glissement du talus côté terre suite à l'agrandissement du trou (source [A1993 01])

Photo 9. Brèche de Figarès (source [A1993 01])

Bien que le désordre ait été constaté tôt pendant la crue, aucune intervention rapide par des engins mécaniques n'a pu être possible, compte tenu de :

- La présence d'une caisse d'emprunt noyée en pied de digue
- L'étroitesse de la crête de digue
- La voie fluviale bloquée due au manque de tirant d'air sous le pont de Saint Gilles

Si la cause de la brèche a été imputée à la présence d'un trou de blaireau, on notera la présence de deux tuyaux de diamètre 500 mm tirés en diagonale.

Le colmatage de la brèche a été dirigé par la mairie d'Arles puis repris en phase terminale par le Service Navigation Rhône Saône. Il a consisté :

- dans un 1er temps, en le largage par voie aérienne de matériaux divers (traverses de chemin de fer, sacs remplis de tout-venant ou de ciment) ;
- dans un 2ème temps, en la tentative infructueuse d'obstruction de la brèche par une péniche désaffectée (difficulté de manœuvre + rupture du bateau lors du largage de sacs destinés à la couler) ;
- en parallèle, en la création d'une piste en tête depuis le pont de Saint Gilles (géotextile + laitier) pour déverser des matériaux : enrochements 1000/2000 (4400 tonnes) ; tout venant de carrière 0/300 (7300 tonnes) et 0/150 argileux (6500 tonnes) ;
- dans un dernier temps, en la reconstitution du ségonnal par clapage de graviers du Rhône.

Photo 10. Largage par hélicoptères de traverses SNCF (à gauche) et sacs de tout venant (à droite)

Photo 11. Tentative d'obstruction de la brèche avec une péniche (à gauche) et colmatage en définitif par des engins de terrassement (à droite)

Photo 12. Vue aérienne de la brèche de Figarès d'oct. 1993 lors de la crue de janvier 1994

Le rapport d'expertise précise que :

- Le colmatage est beaucoup trop hétérogène pour que l'étanchéité totale soit assurée (écoulement en fondation)
- La digue reconstituée est inférieure d'environ 1,40 m par rapport à la cote initiale et se situe en limite de la ligne d'eau supposée de la crue centennale
- Le rehaussement de la digue à sa cote initiale ne devra être effectué qu'après destruction de la piste de chantier, qui crée un plan d'écoulement préférentiel non tolérable

La brèche a été colmatée le samedi 16 octobre 1993 à 16h30 ($Q \approx 5\,500$ m^3/s).

A partir des limnigrammes enregistrés par la CNR [O1993 01] et en les interpolant au droit la brèche de Figarès en fonction de la pente hydraulique moyenne entre les stations de Saint Gilles et Petit Abbaye, on estime les cotes de crue au droit de la brèche à 5,3 m NGF (le 9/10/1993 à 13 heures) et 5,5 m NGF (le 9/10/1993 à 18 heures). La cote maximum de 5,77 m NGF à la station de Saint Gilles (PK 297,3) est atteinte à 22 heures le 9/10/1993.
Le profil de la digue et la localisation du désordre peuvent être, quant à eux, reconstitués à partir des plans de la digue réalisés en 1984 par le SNRS (source [H1034]) ou juste après la crue par la mairie d'Arles (source [A1994 01])
Les différentes caractéristiques de la digue au droit la brèche sont les suivantes :

- Largeur ségonnal : 4 m
- Cote ségonnal : entre 5,21 m NGF (PK299) et 5,46 m NGF (PK298)
- Fruit talus : environ 2
- Largeur crête : environ 1,20 m
- Cote de la crête : entre 7,38 m NGF (PK299) et 7,2 m NGF (PK298)

- Cote terrain naturel côté protégé : entre 2,25 m NGF (PK299) et 1,75 m NGF (PK298)

On note que le rapport d'expertise privilégie le trou de blaireau comme étant à l'origine de la brèche. On notera que la cote du ségonnal et du Petit Rhône au moment du démarrage de la brèche étaient identiques (env. 5,3 m NGF). Les photos prises lors de la crue montrent que le trou débouche sur le milieu de talus aval. Il semblerait que le trou était horizontal ou légèrement incliné vers l'aval. Le rapport cite également deux canalisations de 500 mm en diagonal. Si ces dernières étaient à l'origine de l'érosion de conduit, les fuites auraient été observées sur le pied aval, ce qui n'est pas le cas.

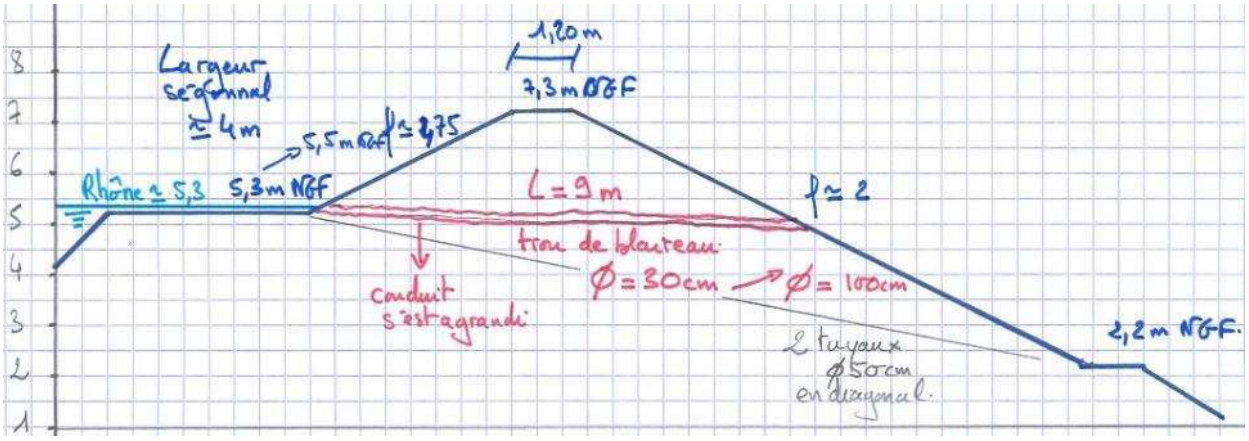


Figure 83. Brèche de Figarès – Géométrie et chargement hydraulique de la digue au moment de l'initiation

Le temps entre la détection du trou de diamètre 30 cm et l'effondrement du trou (diamètre d'environ 1 m) est d'environ 5 heures. On notera que la revanche R < Hauteur côté terre/2.

On retenant les hypothèses suivantes :

- Cote de la crue variant de 5,3 à 5,5 m NGF en 5 heures
- Cote du fil supérieur du conduit 5,2 m NGF et du fil inférieur du conduit 4,9 m NGF (Φ = 30 cm) au démarrage de la brèche
- Cote du fil supérieur du conduit 5,2 m NGF et du fil inférieur du conduit 4,2 m NGF (Φ = 100 cm) au moment de l'effondrement du trou
- L'exutoire du conduit à la cote 5 m NGF et un niveau d'eau dans le fleuve de 5,3 m NGF (± 5 cm)

Et en appliquant les formules de Bonelli et Al. (Cf. chapitre n°7), on en déduit :

- une contrainte critique de l'ordre de 9 Pa (6 Pa et 11,5 Pa avec ± 5 cm,)
- un débit dans le conduit de 9 l/s (avec 8 et 10 l/s ± 5 cm).
- un indice de résistance à l'érosion de l'ordre de 2,7 (2,55 et 2,85 avec ± 5 cm).

Ce qui donne une érosion très rapide suivant la classification de Wan et Fell (Cf. Chapitre n°7).

Cette contrainte critique et cet index de résistance sont conformes aux résultats de l'essai HET réalisé en 2014 sur un prélèvement dans la digue de Lauricet, 3 km plus en aval.

10.7 PRG 299.90 - BRECHE DE LA GALANTE

La brèche est localisée au PRG 299,90. Sa largeur est de 15 mètres.

Figure 84. Crue octobre 1993 – Brèche de la galante

L'origine précise de la brèche est d'après le rapport d'expertise technique indéterminée (source [A1993 01]), car la brèche était déjà formée au moment de sa découverte. La présence de deux tuyaux de diamètre 550 et 400 a néanmoins été constatée, ce qui laisse penser à une érosion de conduit le long des tuyaux.

Le ségonnal était étroit. Le rapport d'expertise technique [A1993 01] mentionne la présence d'enrochements en pied de berge, ainsi que la ligne de charge dans la section du corps de digue avant rupture. Il est très peu probable que le régime permanent ait pu s'établir dans le corps de digue. Il doit plutôt s'agir d'une laisse de crue de l'écoulement dans la brèche.

La brèche a été colmatée par largage de sacs remplis de tout-venant ou de ciment afin de limiter les entrées d'eau. Le noyau a été reconstitué avec du tout venant de carrière 0/300 et du 0/150 argileux en crête sur une épaisseur d'au moins trois mètres côté fleuve.

Photo 13. Brèche de la Galante

Photo 14. Brèche de la galante

Photo 15. Colmatage de la brèche

La brèche a été colmatée dans la journée du 12 octobre 1993 (cote de 3,7 m NGF au droit de la brèche.

A partir des limnigrammes enregistrés par la CNR [O1993 01] et en les interpolant au droit la brèche de Galante en fonction de la pente hydraulique moyenne entre les stations de Saint Gilles et Petit Abbaye, on estime que le Rhône a atteint la cote maximum de 5,43 m NGF à 21 h le 9/10/1993 (la cote maximum de 5,77 m NGF à la station de Saint Gilles (PK 297,3) est atteinte à 22 heures).

Le profil de la digue et la localisation du désordre peuvent être quant à eux reconstitués à partir des plans de la digue réalisés en 1984 par le SNRS (source [H1034]) et juste après la crue par la mairie d'Arles (source [A1994 01])

Les différentes caractéristiques de la digue au droit la brèche sont les suivantes :

- Largeur ségonnal : 4 m
- Cote ségonnal : 5,39 m NGF au droit de la digue et 3,2 m NGF dans le bois
- Fruit talus amont : 1,5
- Fruit talus aval : 2,2
- Largeur crête : environ 1,20 m
- Cote de la crête : 7,15 m NGF (PK300)
- Cote terrain naturel côté protégé : 2,2 m NGF

L'examen des photographies laisse penser que la canalisation était calée à la cote de 3,2 m NGF, soit légèrement au-dessus du terrain naturel aval.

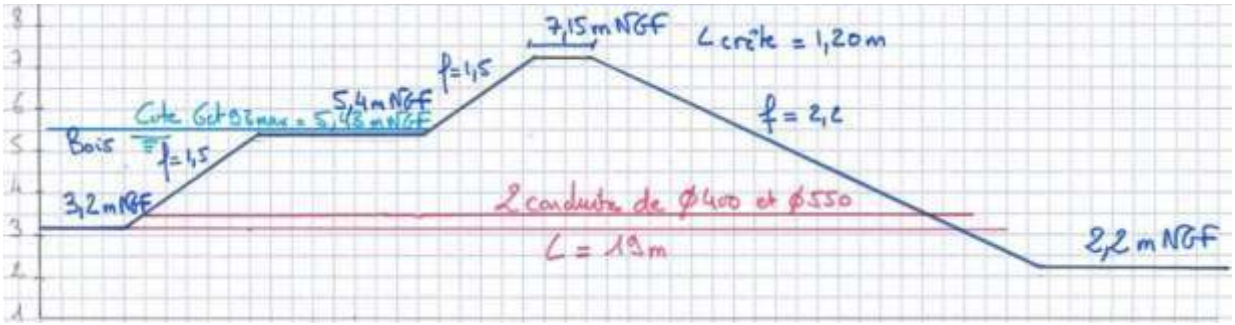


Figure 85. Brèche de la Galante – Géométrie et chargement hydraulique de la digue au moment de l'initiation

On notera que la revanche R < Hauteur côté terre/2.

On retenant les hypothèses suivantes :

- Cote de la crue 5,4 m NGF
- Cote du fil d'eau inférieur de la conduite : 3,2 m NGF
- Longueur de cheminement le long de la conduite : 19 m
- Un conduit traversant de 3 cm de diamètre à l'interface remblai/canalisations
- Ouverture en 5 heures (valeur très hypothétique compte tenu de l'absence de témoignages)

Et en appliquant les formules de Bonelli et Al. (Cf. Chapitre n°7), on en déduit :

- un gradient hydraulique le long de la canalisation de 0,115,
- une contrainte critique de cisaillement de l'ordre de 8 Pa,
- un débit dans le conduit de 0,9 l/s.
- un indice de résistance à l'érosion de l'ordre de 3,2 avec une détection à D = 4 cm.

Ce qui donne une érosion rapide à très rapide suivant la classification de Wan et Fell (Cf. Chapitre n°7)

Cette contrainte critique et cet index de résistance sont conformes aux résultats de l'essai HET réalisé en 2014 sur un prélèvement dans la digue de Lauricet, située 3 km plus en aval.

Avec un conduit traversant de 1 cm, on obtient :

- une contrainte critique de cisaillement de l'ordre de 3 Pa
- un débit dans le conduit de 0,05 l/s.
  un indice de résistance à l'érosion de l'ordre de 3,2 avec une détection à D = 4 cm.

Ce qui donne une érosion rapide à très rapide suivant la classification de Wan et Fell (Cf. Chapitre n°7)

On conclut que l'érosion de conduit a été initiée très probablement dans un conduit de diamètre de 2 à 3 cm, ce qui est assez fort, mais reste possible avec un mauvais compactage autour de la conduite laissant des vides importants.

Aucuns travaux autres que ceux réalisés après la crue de 1993 n'ont été opérés depuis. En période de crues, il est observé des infiltrations d'eaux claires dès que les débits à la station de Beaucaire/Tarascon dépassent 6500 à 7000 m^3/s.

10.8 PRG 301.0 - BRECHE DE CASEBRUNE

La brèche est localisée au PRG 301,00. Sa largeur est de 17 mètres.

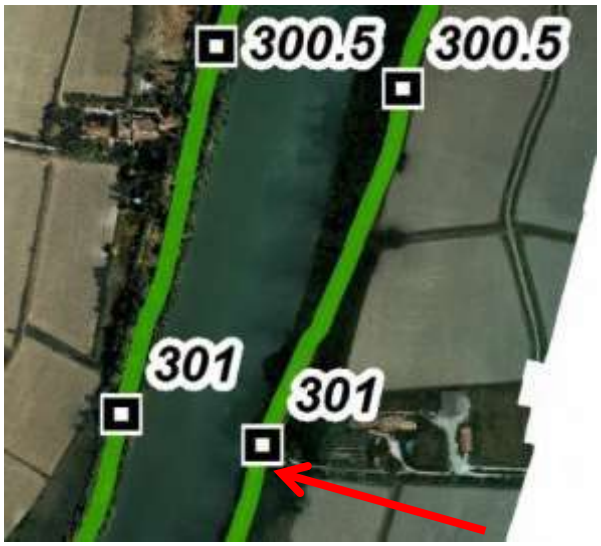


Figure 86. Crue d'octobre 1993 - Brèche de Casebrune

L'origine précise de la brèche est d'après le rapport d'expertise technique indéterminée, car la brèche était déjà formée au moment de sa découverte. La présence de deux tuyaux de diamètre 300 et 400 laisse peu de doute sur la forte probabilité d'une érosion de conduit le long des tuyaux.

Le ségonnal était très étroit et la présence d'arbres en pied de digue a été notée, ainsi que la présence de nombreuses racines (arbres abattus) dans le corps de digue côté fleuve.

Photo 16. Brèche de Casebrune

Photo 17. Brèche de Casebrune – présence de racines dans le corps de digue (à droite)

La brèche a été colmatée dans la journée du 12 octobre 1993.

L'interpolation au droit de la brèche de Casebrune des limnigrammes enregistrés par la CNR [O1993 01] aux stations de Saint Gilles et de Petite Abbaye donne une cote maximum de 5,28 m NGF à 21 heures le 9/10/1993 (la cote maximum de 5,77 m NGF à la station de Saint Gilles (PK 297,3) est atteinte à 22 heures).

Le profil de la digue et la localisation du désordre peuvent être quant à eux reconstitués à partir des plans de la digue réalisés en 1984 par le SNRS (source [H1034]) et juste après la crue par la mairie d'Arles (source [A1994 01]).

Les différentes caractéristiques de la digue au droit la brèche sont les suivantes :

- Largeur ségonnal : 5 m
- Cote ségonnal : 5,02 m NGF (PK 301)
- Fruit talus amont : 1,7
- Fruit talus aval : 2,25
- Largeur crête : environ 1,20 m
- Cote de la crête : 6,99 m NGF (PK300)
- Cote terrain naturel côté protégé : 1,95 m NGF [H1034] ou 2,67 m NGF [A1994 01]

L'examen des photographies laisse penser que la canalisation était calée à la cote du terrain naturel aval.

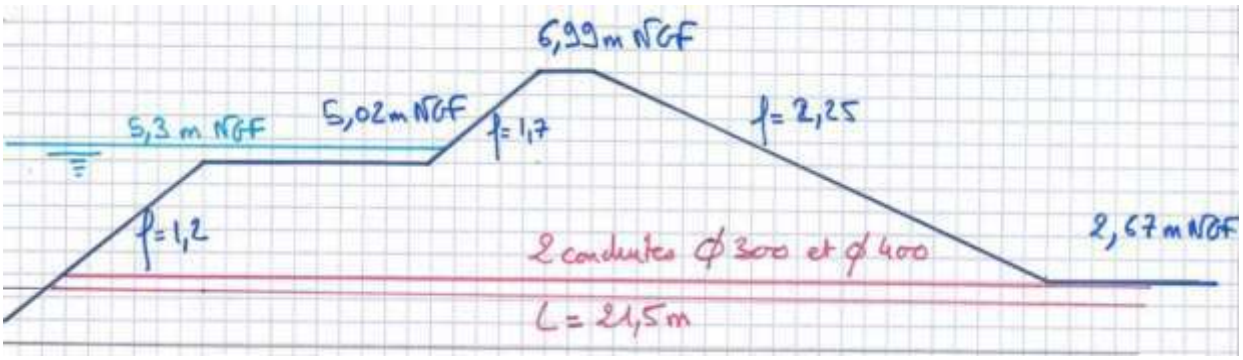


Figure 87. Brèche de Casebrune – géométrie et chargement hydraulique de la digue au moment de l'initiation de la brèche

On notera que la revanche R < Hauteur côté terre/2.

On retenant les hypothèses suivantes :

- Cote de la crue 5,3 m NGF
- Cote du fil d'eau inférieur de la conduite : 2,6 m NGF
- Longueur de cheminement le long de la conduite : 21,5 m

Et en appliquant les formules de Bonelli et Al. (Cf. Chapitre n°7), on en déduit :

- un gradient hydraulique le long de la canalisation de 0,125,
- une contrainte critique de cisaillement de l'ordre de 9 Pa,
- un débit dans le conduit de 0,9 l/s.
- un indice de résistance à l'érosion de l'ordre de 3,2 avec une détection à D = 4 cm et une ouverture en 5 heures.

Ce qui donne une érosion rapide à très rapide suivant la classification de Wan et Fell (Cf. Chapitre n°7)

Cette contrainte critique et cet index de résistance sont conformes aux résultats de l'essai HET réalisé en 2014 sur un prélèvement dans la digue de Lauricet, située 3 km plus en aval.

On conclut que l'érosion de conduit a été initiée très probablement dans un conduit de diamètre supérieur ou égale à 3 cm, ce qui est assez fort, mais peut se concevoir avec un mauvais compactage autour de la conduite laissant des vides importants.

Aucuns travaux autres que ceux réalisés après la crue de 1993 n'ont été opérés depuis. En période de crues, il est observé des infiltrations d'eaux légèrement boueuses, dès que les débits à la station de Beaucaire/Tarascon dépassent 6500 à 7000 m^3/s, sans qu'il soit certain que cette coloration soit due à un phénomène d'érosion.

10.9 PRG 304.40 - BRECHE DE LAURICET

C'est la première brèche qui est apparue dans les digues du Petit Rhône le samedi 9 octobre 1993 à 12 heures (source [A1993 01]).

La largeur de la brèche a été estimée à 40 mètres. L'origine semble être un trou de blaireaux (empreintes visibles à proximité). Le processus de formation de la brèche est identique à celui de Figarès. On note également la présence d'une protection en enrochements.

Figure 88. Crue d'octobre 1993 - Localisation brèche de lauricet

Photo 18. Brèche de Lauricet

Photo 19. Brèche de Lauricet – présence d'une protection en enrochements

Photo 20. Empreintes de blaireaux à proximité

Les travaux de colmatage ont été identiques à ceux menés sur les brèches de la Galante et de Casebrune. Ils ont été réalisés depuis le fleuve compte tenu du manque d'accès par voie terrestre. La brèche a été colmatée dans la journée du 12 octobre 1993

L'interpolation au droit de la brèche de Lauricet des limnigrammes enregistrés par la CNR [O1993 01] aux stations de Saint Gilles et de Petite Abbaye donne une cote de 4,5 m NGF (le 9/10/1993 à 12 heures) et 4,8 m NGF (le 9/10/1993 à 22 heures). La cote maximum de 5,77 m NGF à la station de Saint Gilles (PK 297,3) est atteinte à 22 heures le 9/10/1993.

Le profil de la digue et la localisation du désordre peuvent être quant à eux reconstitués à partir des plans de la digue réalisés en 1984 par le SNRS (source [H1034]) ou juste après la crue par la mairie d'Arles (source [A1994 01]).

Les différentes caractéristiques de la digue au droit la brèche sont les suivantes :

- Largeur ségonnal : > 15 m
- Cote ségonnal : entre 4,54 m NGF (PK304) et 4,64 m NGF (PK305)
- Fruit talus : environ 2
- Largeur crête : environ 1,20 m
- Cote de la crête : entre 6,63 m NGF (PK304) et 6,48 m NGF (PK305)
- Cote terrain naturel côté protégé : entre 2,05 m NGF (PK304) et 2,30 m NGF (PK305)

Le rapport d'expertise privilégie le trou de blaireau comme étant à l'origine de la brèche. On notera que la cote du ségonnal et du Petit Rhône au moment du démarrage de la brèche étaient identiques (env. 4,5 m NGF). Les seules photos disponibles concernent la brèche.

L'intervention d'urgence n'a pas pu être réalisée faute d'accès.

A l'instar de la brèche de Figarès, on peut supposer un conduit quasiment horizontal de diamètre 30 cm. On ne dispose pas de temps d'ouverture entre la mise en charge du conduit et l'effondrement du toit.

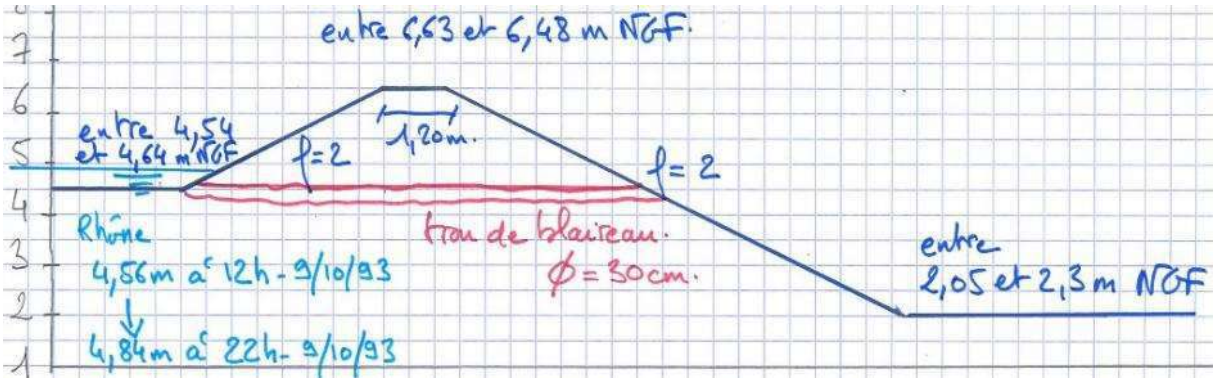


Figure 89. Brèche de Lauricet – Géométrie et chargement hydraulique de la digue au moment de l'initiation

On notera que la revanche R < Hauteur côté terre/2.

On retenant les hypothèses suivantes :

- Cote de la crue variant de 4,5 à 4,8 m NGF
- Cote du fil supérieur du conduit 4,4 m NGF et fil inférieur du conduit 4,1 m NGF (Φ = 30 cm) au démarrage de la brèche
- Cote du fil supérieur du conduit 4,4 m NGF et fil inférieur du conduit 3,4 m NGF (Φ = 100 cm) au moment de l'effondrement du trou

Et en appliquant les formules de Bonelli et Al. (Cf. Chapitre n°7), on en déduit :

- Un gradient moyen d'initiation de 0,01, si l'érosion a été initiée à la cote 4,5 m NGF (Hyp. 1) et 0,025, si l'érosion a été initiée à la cote 4,8 m NGF (Hyp. 2) ;
- une contrainte critique de cisaillement variant de 7 à 16 Pa suivant les deux hypothèses ;

- un débit dans le conduit variant de 85 à 125 l/s ;
- un indice de résistance à l'érosion variant de 2,7 à 3 suivant les deux hypothèses.

Cette contrainte critique et cet index de résistance sont conformes aux résultats de l'essai HET réalisé en 2014 sur un prélèvement dans la digue de Lauricet, située 3 km plus en aval.

Aucuns travaux autres que ceux réalisés après la crue de 1994 n'ont été opérés depuis. En période de crues, il est observé des infiltrations d'eaux claires dès que les débits à la station de Beaucaire/Tarascon dépassent 6000 m^3/s.

10.10 PRG 305.650/305.700/305.800 – DEPARTS DE BRECHES (3) DU MAS DE LA VIGNE

Trois « brèches » se sont formées juste en aval du Mas de la vigne d'une largeur respective de 12, 17 et 3 mètres. D'après le garde digues, il s'agirait plutôt de brèches partielles
.
A l'instar de la brèche de Lauricet, l'origine de la rupture semble être la présence de trous de blaireaux. Le processus de formation a été identique à celui de la brèche de Figarès. Le ségonnal est étroit et des trous de grand diamètre ont été visualisés à proximité immédiate de l'une des trois brèches.

Figure 90. Crue d'octobre 1993 – 3 brèches partielles du Mas de la Vigne

Les travaux de colmatage ont été identiques à ceux menés sur les brèches de la Galante et de Casebrune. L'aménagement d'une piste en crête de digue a été nécessaire. Les brèches ont été colmatées dans la journée du 12 octobre 1993.

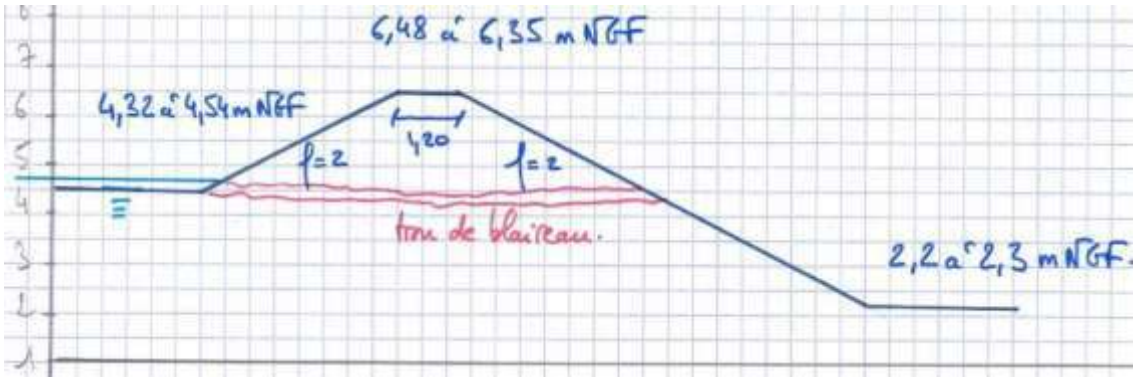


Figure 91. Départs de brèches du Mas de la Vigne – Géométrie et chargement hydraulique de la digue au moment de l'initiation

On notera que la revanche R ≈ Hauteur côté terre/2.

10.11 GRD 290.88 – DEPART DE BRECHE DU MAS NEUF DE SANSOUIRES

Ce départ de brèche est localisé au GRD 290,88. Sa largeur a été estimée à 10 mètres. D'après [A1993 01], l'origine semble être des trous d'animaux fouisseurs, compte tenu de la présence de nouveaux trous lors des opérations de colmatage. D'après le garde digues responsable du secteur à l'époque de la crue, il s'agit d'un début d'érosion interne le long d'un ouvrage hydraulique traversant. Le qualificatif de brèche ou même de départ de brèche ne semble pas d'appliquer. Il pourrait s'agir simplement d'un désordre de type D4 (venue d'eau autour de canalisations et ouvrages hydrauliques traversants). Par prudence, nous maintenons sa qualification en départ de brèche.
Toujours d'après [A1993 01], la digue s'est affaissée, suite sa mise en charge. La formation de la brèche (érosion d'après le garde digues) a débuté sans se développer. Le ségonnal est large et on note l'absence d'arbre.

Figure 92. Crue d'octobre 1993 – brèche partielle du mas neuf de Sansouires

Le colmatage a été réalisé en urgence sous le contrôle des propriétaires. Le comblement a été fait avec du tout-venant roulé, plus ou moins compacté. On notera que la pose des matériaux s'est fait sur une bâche plastique.
La brèche a été colmatée le lundi 11 octobre 1993 au soir.

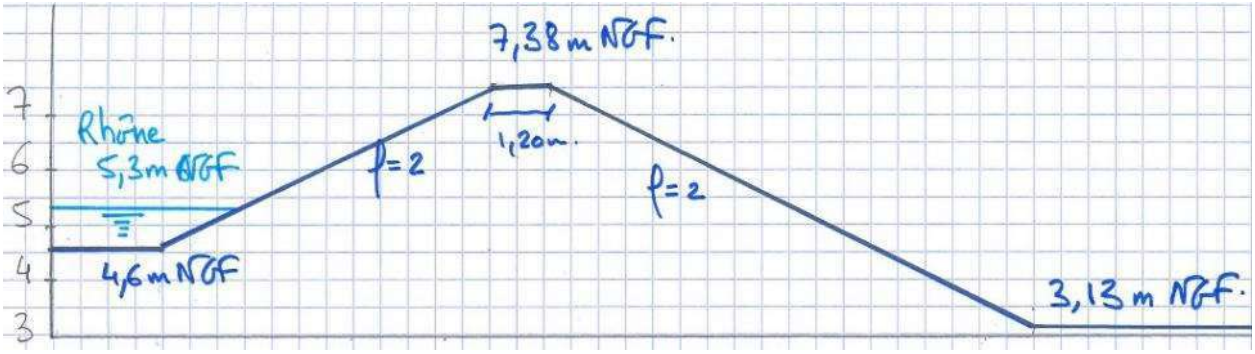


Figure 93. Départ de brèche du Mas de Sansouire – Géométrie et chargement hydraulique de la digue au moment de l'initiation

On notera que la revanche R ≈ Hauteur côté terre/2.

10.12 GRD 315.350 – DEPART DE BRECHE DU PETIT PELOUX

Ce départ de brèche dans [A1993 01] est localisé au GRD 315,35. De légères fuites ont été observées par le service navigation Rhône Saône, dès le vendredi 8 octobre 1993, lors de la montée du Rhône. Une intervention pour le colmatage de la fuite est réalisée avec succès
La largeur de la brèche a été estimée à 10 mètres. L'origine semble être des trous d'animaux fouisseurs, compte tenu de la présence d'un nouveau trou lors des opérations de colmatage.
La digue s'est affaissée, suite sa mise en charge. La formation du désordre a débuté sans se développer suffisamment pour provoquer une brèche. Le ségonnal est large et on note l'absence d'arbre.

Figure 94. Crue d'octobre 1993 – Désordre du Petit Peloux

Une intervention a été réalisée en urgence sous le contrôle des propriétaires. Le comblement a été fait avec du tout-venant roulé, plus ou moins compacté. Le départ de brèche a été colmaté le lundi 11 octobre 1993 au soir.

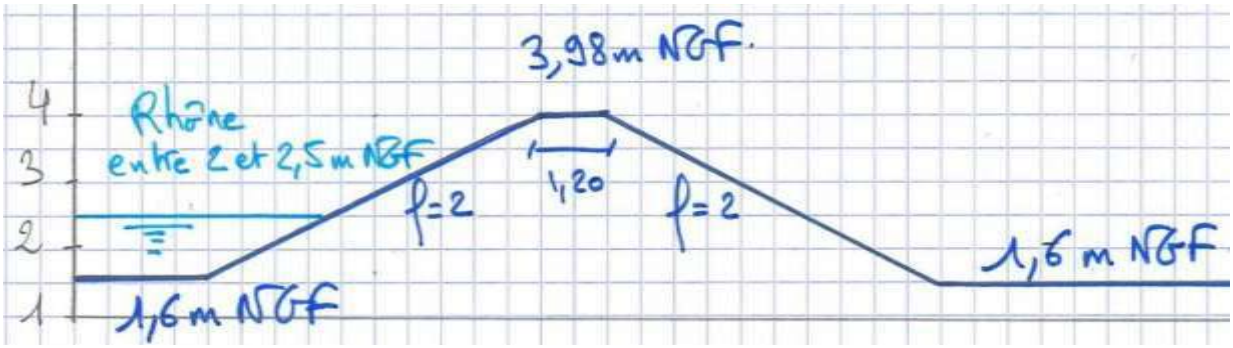


Figure 95. Départ de brèche de Petit Peloux – Géométrie et chargement hydraulique de la digue au moment de l'initiation

On notera que la revanche R > Hauteur côté terre/2.

10.13 GRG 299.100/299.150 – DEPARTS DE BRECHES (2) DE L'ATTILON

Deux départs de brèches se sont formés de largeurs respectives de 5 et 10 mètres entre les GRG 299,100 et 299,150. L'origine et le processus de formation sont identiques à Figarès. La seule différence réside en la présence d'arbres sur le ségonnal jusqu'en pied de digue.

Figure 96. Crue d'octobre 1993 – brèches partielles de l'Attilon

Le colmatage a été réalisé en urgence sous le contrôle des propriétaires avec des matériaux sableux pris sur place. Il est à noter le fichage de petits pieux en bois sur 10 mètres côté fleuve pour la brèche située en aval et la mise en œuvre d'une bâche plastique.

Les départs de brèches ont été colmatés le lundi 11 octobre 1993 au soir.

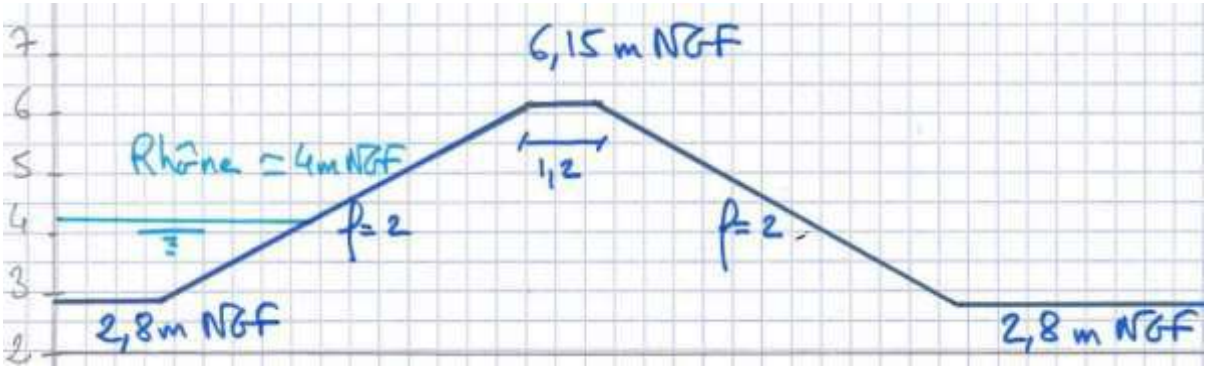


Figure 97. Départs de brèches de l'Attilon – Géométrie et chargement hydraulique de la digue au moment de l'initiation

On notera que la revanche R > Hauteur côté terre/2.

10.14 GRG 309.90 – DEPART DE BRECHE DE TOUR DE PARADE

Ce départ de brèche (ou désordre) est localisé au GRG 309,90. Sa largeur est de 5 mètres. L'origine et le processus de formation semble être un terrier de fouisseurs.

Figure 98. Crue d'octobre 1993 – localisation brèche de Parade

Le colmatage a été fait avec des matériaux très hétérogènes (terre + branchages + herbe) sans compactage. La digue a été colmatée le lundi 11 octobre 1993 au soir.

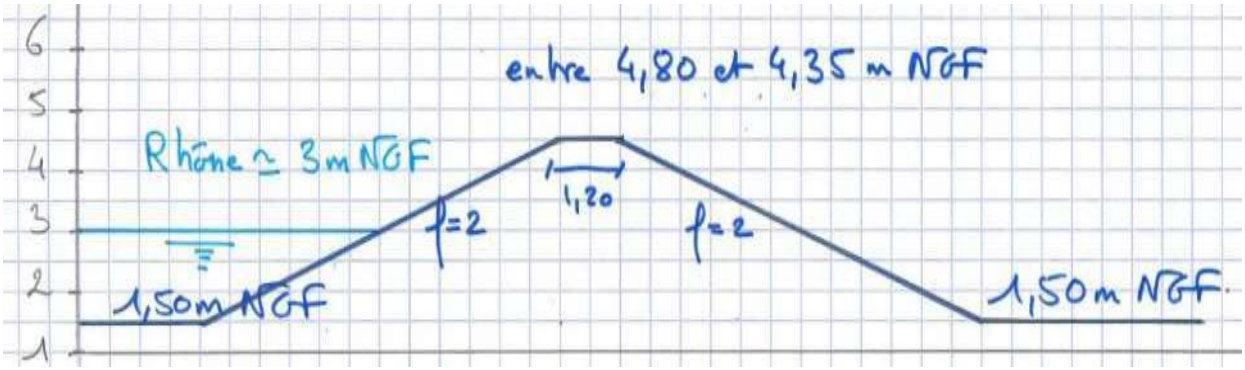


Figure 99. Départ de brèche partielle de Parade – Géométrie et chargement hydraulique de la digue au moment de l'initiation

On notera que la revanche R > Hauteur côté terre/2.

11 CRUE DE JANVIER 1994

11.1 DEROULEMENT DE LA CRUE

La crue a franchi le seuil de 8,15 m NGF (environ 6750 m^3/s) du 7/01/1994 (vers 10h30) en matinée jusqu'au 09/01/1994 en soirée (vers 18h00) pour atteindre son pic de crue le 8 octobre 1993 à 7h à la station de Beaucaire/Tarascon.

L'évolution des limnigrammes aux différentes stations du Grand Delta figure en pages suivantes. Les instants de formation des brèches de Beaumont et Lauricet et de leurs colmatages sont également indiqués.

11.2 BILAN DES BRECHES ET DES DESORDRES

Cette crue, bien que plus intense que celle d'octobre 1993, a causé 2 brèches en rive gauche du Petit Rhône et quelques désordres.

L'origine de ces brèches a été déterminée dans le cadre de la requête contre les associations syndicales forcées gestionnaires des digues au moment de la crue. Le tableau ci-après localise l'ensemble de ces brèches et donne leur largeur ainsi que le mode de rupture initiateur (source TA Marseille [A1993 01] et R. Bonnefoy et P. Royet [A1993 03]).

Tableau 24. Bilan des brèches lors de la crue d'Octobre 1993 et mode de rupture initiateur

Nom de la brèche	Type brèche	Localisation	Largeur (m)	Origine
Beaumont	Totale	PRG 288.16	35	Erosion conduit dans un terrier
Lauricet	Totale	PRG 304.16	65 (80 d'après [I002])	Erosion conduit dans un terrier

A l'instar de la plupart des brèches causées en octobre 1993, l'origine des brèches est liée aux terriers d'animaux fouisseurs d'après Bonnefoy et Royet (source [A1993 03]).

Aucune brèche n'a été déplorée en rive droite du Petit Rhône. D'importantes infiltrations ont été observées au droit du Mas Laborde (PRD 289 à 289,5) et ont fait l'objet d'une intervention consistant à réaliser une banquette drainante en pied de digue.

11.3 BILAN DE L'INONDATION DU RHONE

Le volume d'eaux déversées a été estimé à 20 millions de m^3, ce qui est plus faible qu'en janvier 1994, mais s'explique par la décrue qui a été plus rapide et par l'importance des moyens d'interventions.

La surface touchée a été de 2000 Ha et le nombre d'habitations touchées : 45.

Le montant des dommages des crues d'octobre 1993 et janvier 1994 a été estimé sommairement dans le rapport Dambre à 200 millions de Francs, soit 30 millions d'euros. Cette estimation ne tient pas compte des dommages domestiques, dommages aux infrastructures et des interventions de moyens militaires.

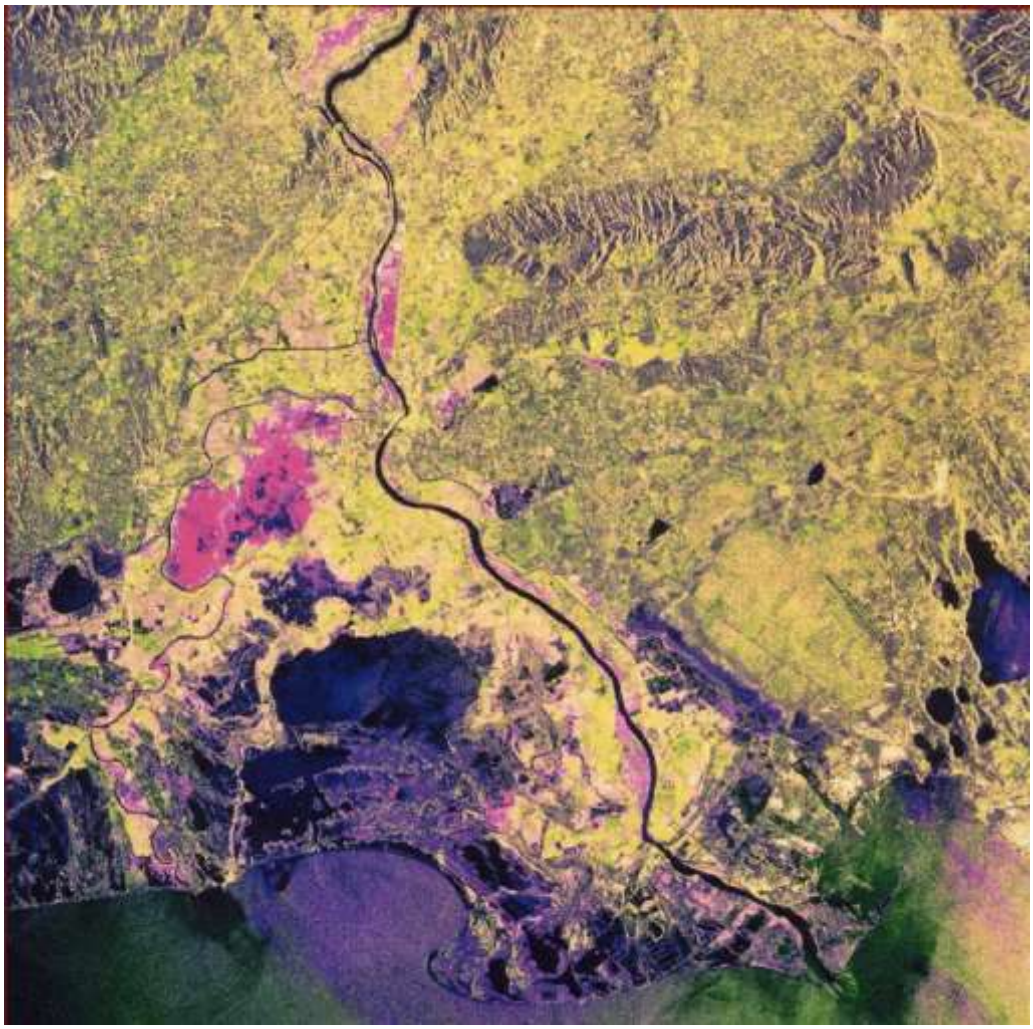


Figure 100. Inondation du Rhône de janvier 1994 – source SPOT [A1994 02]

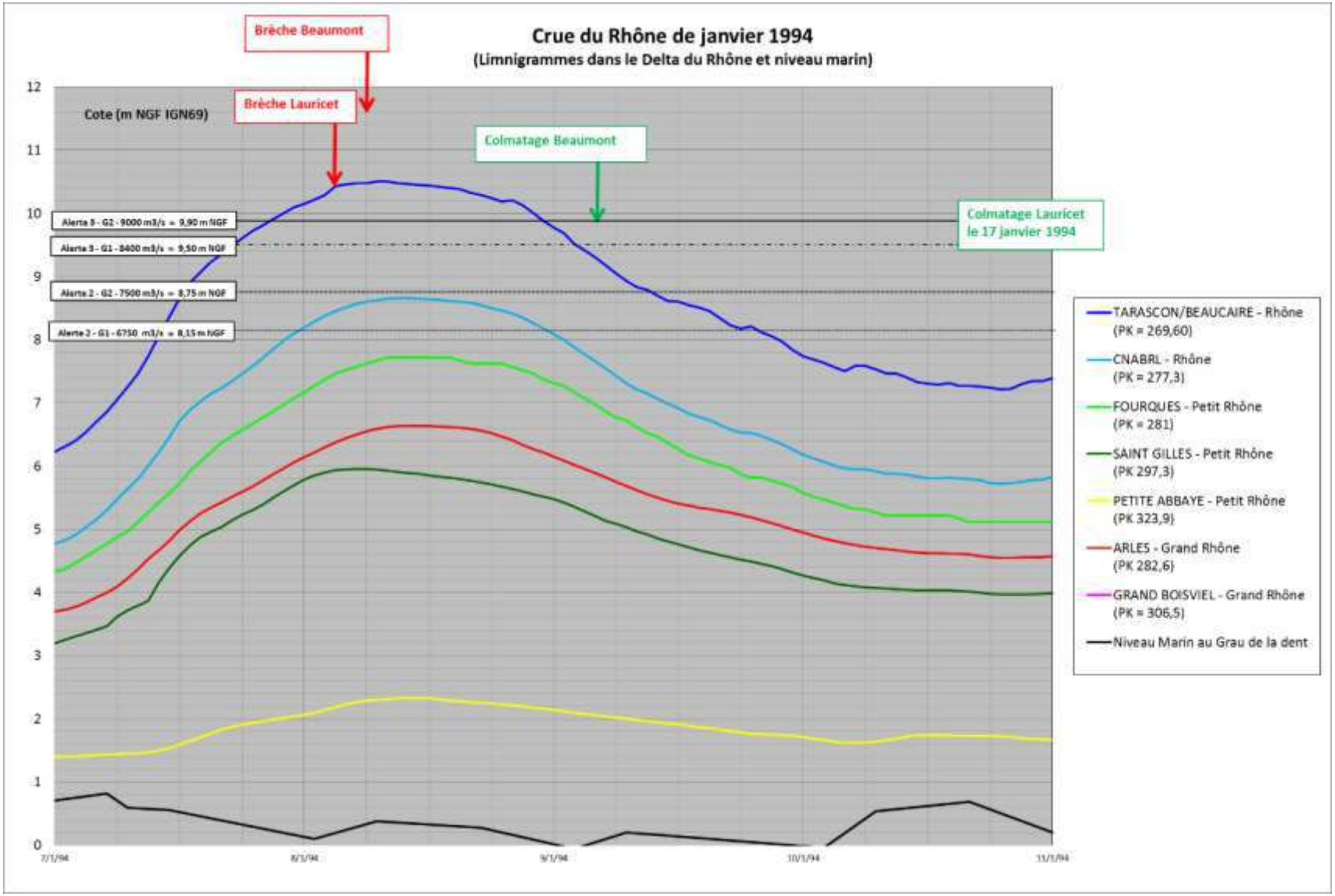


Figure 101. Crue de janvier 1994 – Limnigrammes dans le Delta du Rhône et niveau marin

11.4 PRD 288.16 - BRECHE DE BEAUMONT

La brèche a été détectée, d'après les témoignages du SYMADREM, le 8 janvier 1994 vers 5 / 6 heures du matin. La largeur totale a été de 35 mètres.

Figure 102. Crue de janvier 1994 – localisation brèche de Beaumont

Photo 21. Brèche de Beaumont (source DDE 13 [A1993 06])

Les travaux de colmatage ont débuté dans la journée ; dans un premier temps par des interventions héliportées (4 pumas) larguant des big-bags de 1,5 tonnes de tout-venant. La proximité de l'autoroute A54 a permis l'acheminement d'engins de terrassement. Le colmatage s'est terminé le 9 janvier 1994 dans la matinée.

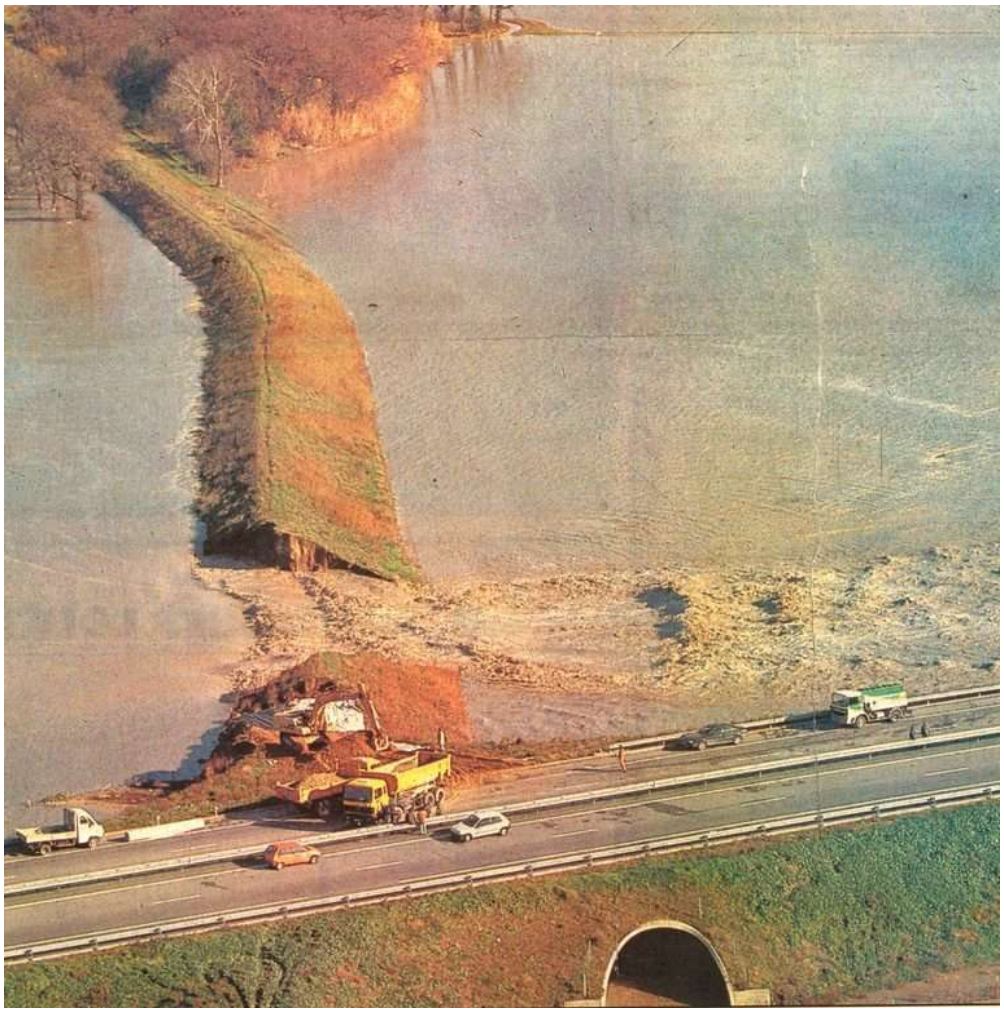


Photo 22. Brèche de Beaumont (source La Provence [A1994 07])

Photo 23. Brèche de Beaumont (source La Provence [A1994 07])

Photo 24. Brèche de Beaumont (@ Y. Cavallini [A1994 05])

11.4.1 Brèche de Lauricet

Selon le compte-rendu du PC de crise de la mairie d'Arles du 8/01/1194 (source TA [A1993 01]), la digue a cédé le 8 janvier 1994 à 3h30 à 5 mètres de la brèche d'octobre 1993. A 4h30, la digue était ouverte sur une largeur de 20 mètres et 4 mètres de hauteur. On évoque un débit de 150 m^3/s

La brèche a atteint une largeur de 50 à 65 m, voire 80 m. Le colmatage par voie héliportée a été rendu difficile compte tenu de la présence d'arbres. L'accès terrestre par la digue était quasiment impossible.

Une digue de 2ème rang a été réalisée pour contenir l'inondation. On évoque des entrées d'eau à raison de 17 millions de m^3/jour.
Les travaux de colmatage ont nécessité l'aménagement d'un accès depuis le mas de la vigne, doublés d'interventions héliportés (largage de poutrelles, big-bag).

La brèche a pu être atteinte le 13 janvier 1994 à 15h30.

Figure 103. Crue de janvier 1994 – localisation brèche de Lauricet

Photo 25. Crue de janvier 1994 – brèche de Lauricet (source DDE 13 [A1993 06])

Photo 26. Crue janvier 1994 – brèche de Lauricet (© P. Blot [A1994 02])

Photo 27. Crue janvier 1994 – brèche de Lauricet (© P. Blot [A1994 02])

11.5 DEPARTS DE BRECHE ET AUTRES DESORDRES EN RIVE GAUCHE

Un trou a été signalé le 8 janvier 1994 vers 0h15 entre le Mas d'Eyminy et le Mas de Ventabren [A1993 01].

Par ailleurs, on note entre le Mas de Rey et le Mas de Vert des petites fuites, qui ont pu être colmatées et des petites brèches (départ de brèche) dans le secteur de Cazeneuve, qui ont pu être colmatées par largage de « big-bag » [A1993 01].

De nombreuses infiltrations ont été observées dans le bois de Beaumont.

A 1 km en amont de Beaumont, un départ de brèche a été comblé par 15 sacs largués par hélicoptères.

Des résurgences ont été observées au droit de la brèche de Casebrune d'octobre 1993.

Sur le Grand Rhône, des infiltrations ont été observées au niveau d'une station de pompage (PK 290) et au niveau de « Chamône » et du lieu-dit « l'Amérique ».

11.6 PRD 289.0 - INTERVENTION D'URGENCE MAS LABORDE

En rive droite du Petit Rhône, d'importantes infiltrations ont été observées du PRD 289 au PRD 289,25, juste en aval du Mas Laborde. Une intervention d'urgence consistant à réaliser une berme aval en tout-venant de carrière a été réalisée de façon préventive. Ces infiltrations sont situées à proximité de la brèche de Laborde de 1840, de celle d'Argence de 1755 et d'un ancien paléo-chenal.

Figure 104. Crue janvier 1994 – Localisation des infiltrations du Mas Laborde

Photo 28. Crue de janvier 1994 – Infiltrations Mas Laborde (© Y. Cavallini [A1994 05])

Photo 29. Crue de janvier 1994 – Interventions d'urgence Mas Laborde (© Y. Cavallini [A1994 05])

12 CRUE DE NOVEMBRE 1994

La crue a franchi le seuil de 8,15 m NGF (environ 6750 m^3/s) du 6/11/1994 (vers 01h00) jusqu'au 07/11/1994 à 10h00. Elle a atteint son pic le 6 novembre 1994 à 16h00 à la station de Beaucaire/Tarascon.

Cette crue très rapide, bien que comparable à celle d'Octobre 1993 en termes de niveaux d'eau, n'a pas causé de brèches. Aucune donnée relative à d'éventuels désordres n'a été trouvée dans les archives du SYMADREM.

13 CRUE DE NOVEMBRE 1996

La crue a franchi le seuil de 8,15 m NGF (environ 6750 m^3/s) du 13/11/1996 à 11h00 jusqu'au 14/11/1994 à 12h00. Elle a atteint son pic le 13 novembre 1996 à 22h00 à la station de Beaucaire/Tarascon.

13.1 BILAN GENERAL DES BRECHES ET DEPARTS DE BRECHES

Cette crue très rapide et bien que moins importante en termes de niveaux que celle de novembre 1994, a causé un départ de brèche en rive droite du Petit Rhône et un désordre important en rive gauche du Petit Rhône.

Tableau 25. Bilan des brèches lors de la crue de novembre 1996 et mode de rupture initiateur

Nom de la brèche	Type brèche	Localisation	Largeur (m)	Origine
Capette	Départ	PRD 314.65	petite	Erosion conduit dans un terrier

13.2 PRD 314.65 – DEPART DE BRECHE DU MAS NEUF DE CAPETTE

Le départ de brèche est localisé dans le coude dit du Mas Neuf Capette vers les PRD 314.65 juste en aval du Mas de Capette. Il est intervenu d'après R. FATER, directeur du SIDR dans la nuit du 13 au 14 novembre vraisemblablement lors de la pointe de crue.

Figure 105. Crue Nov. 1996 – Localisation du départ de brèche de Capette

Photo 30. Coude de Capette lors de la crue de janvier 1994 (© P. BLOT [A1994 02])

Le petit Rhône est monté jusqu'en pied de digue, où des travaux agricoles semblent avoir provoqué un renard, ayant entraîné l'effondrement de la digue (source BRLi [A1996 04] d'après réunion le 14 nov. 1996 en présence du SNRS et du SIDR). Aucune inondation du Rhône n'a été à déplorer. On peut observer sur la photo ci-dessous extraite de BRLi [A1996 04], les différentes phases de construction de la digue et une couche de matériaux qui semble être de la grave.

Photo 31. Crue Nov. 1996 – Départ de brèche du Mas neuf de Capette
Vue vers l'Aval (© BRLi)

Photo 32. Crue Nov. 1996 – Départ de brèche du Mas neuf de Capette
Vue vers l'Amont (© BRLi)

Bien que situé en extrados du fleuve avec une bathymétrie prononcée, l'affouillement externe semble à écarter (largeur de ségonnal entre 5 et 10 mètres) ainsi que le glissement du talus amont (décrue rapide).

On notera que la revanche R était inférieure à Hauteur côté terre/2.

Une visite post crue mai 2013 (débit de pointe d'env. 7000 m^3/s) a montré la présence d'eau en pied de digue une centaine de mètres juste en aval de ce secteur sans qu'il soit possible d'y voir d'éventuelles infiltrations (présence de rizières à proximité et pluviométrie récente)

Photo 33. Crue Mai 2013 – Visite Post-Crue Aval du Mas Neuf de Capette

13.3 PRD 305 A 309 DESORDRES EN RIVE DROITE DU PETIT RHONE

Divers échanges entre le SIDR, la Mairie de Saint-Gilles, la Préfecture du Gard et certains riverains du Rhône ([A1996 05] et [A1996 09]) indiquent la présence de nombreux trous de blaireaux entre le Mas Marignan (PRD 305) et le Mas de Claire Farine (PRD 309) et les travaux d'intervention correspondant.

Certaine factures nous informent également de la présence de trous de blaireaux au droit du Mas des Pradeaux (PRD 313).

13.4 PRG 286.9 - FONTIS EN RIVE GAUCHE DU PETIT RHONE

Un important fontis a été observé à proximité du Mas Médaille. Cette observation n'a pas été directe, compte tenu de la présence de la couche de laitier réalisée suite à la crue de janvier 1994. Suite à l'affaissement de la crête de digue pendant l'intervention d'un camion, la DDE 13 et le SNRS ont procédé à l'ouverture de la digue et c'est à ce moment que le fontis d'une taille importante a pu être observé.

Figure 106. Crue Nov. 1996 – Fontis en crête de digue

Le tronçon de digue situé du PRG 284,9 à PRG 286,3 est connu pour ces infiltrations d'eaux boueuses et a connu également quelques brèches en 1856 et 1843. Par ailleurs, la digue est dans l'axe d'un paléo-chenal.

L'ouverture de la digue a permis d'observer une couche de sable très importante, qui pourrait être le siège d'une érosion régressive ayant abouti au débouché du fontis en crête de digue. D'après le garde-digues du secteur, le fontis serait plutôt dû à la présence de terriers de blaireaux très friands de sols sableux et nombreux dans ce tronçon du fleuve.

Photo 34. Crue de Nov. 1996 – Ouverture de la digue – Mas Médaille

Photo 35. Crue de Nov. 1996 – Ouverture de la digue – Mas Médaille – veine sableuse

14 CRUE DE SEPTEMBRE 2002

La crue de septembre 2002 est la crue la plus rapide depuis 1993. Elle a franchi le seuil de 8,15 m NGF (environ 6750 m^3/s) du 09/09/2002 à 17h00 jusqu'au 10/02/2002 à 11h00. Elle a atteint son pic le 10 septembre 2002 à 2h00 à la station de Beaucaire/Tarascon.

Aucune brèche totale n'a été déplorée. En revanche, le bilan établi par le SYMADREM au lendemain de la crue (source SYMADREM [A2002 03]) fait état de 2 brèches partielles et de 5 désordres, ayant fait l'objet d'interventions d'urgence. La brèche qualifiée de partielle au droit du Mas du Juge a fait l'objet de travaux d'un montant de 1856,00 € TTC. Compte tenu de la faible importance des travaux et du manque d'information, la qualification de brèche semble excessive. Nous l'avons requalifié de désordre.

Tableau 26. Crue de septembre 2002 - Bilan général des brèches

Nom de la brèche	Type brèche	Localisation	Largeur (m)	Origine
Mas d'Augery des Sansouirres	départ	GRD 293,64	35 m (réparation)	Erosion de conduit dans un terrier

Le départ de brèche au droit du Mas d'Augery des Sansouires a nécessité une reprise de la digue sur une longueur de 35 mètres. L'origine du départ de brèche est bien connue. Elle est due à la présence de 5 à 6 terriers de blaireaux dans le talus côté fleuve connectés entre eux mais ne traversant pas la digue. Le talus côté fleuve s'est effondré dans la matinée du 10/09/2002 lors de la décrue du Rhône. Cette brèche partielle n'a pas donné lieu à inondation du Rhône, ce qui nous permet de la qualifier en tant que départ de brèche.

On notera que la revanche R était équivalente à Hauteur côté terre/2.

Tableau 27. Crue de septembre 2002 – Bilan général des désordres et interventions d'urgence

Nom du désordre	Type désordre	PR	Type d'intervention	Initiateur	Code
Mas du juge	Rupture digue	PRD 325.00	Reconstruction digue après crue	terrier	D3
Mas de Rey	Prise d'eau fuyarde en crue	PRG 285.43	Interv. Urg. crue Reprise maçonneries après crue	Ouvrage vétuste	D5
Mas d'Augéry	Prise d'eau masquée à mi-talus localisée par des infiltrations	PRG 286,85	Interv. Urg. crue Purge ouvrage après crue	Ouvrage masqué	D5
Château d'Avignon	Prise d'eau non fermée (mas de la cure)	PRG 316,42	Interv. Urg. crue	Ouvrage vétuste	D5
Petite Abbaye	Surverse	Aval PRD 322,41	Rehausse ponctuel digue	Dépassement cote submersion	D6
Quai Roquette	Fissure Avant Pont	GRG 283	Tvx 2004	Affouillement de pied	D14

Photo 36. Crue Septembre 2002 - Affaissement de la digue du à un terrier de blaireau (La Provence [A2002 01] et SYMADREM [A2002 02])

Photo 37. Digue du Mas d'Augery des Sansouires en 2014

15 CRUE DE NOVEMBRE 2002

La crue de novembre 2002 s'est principalement caractérisée par sa longueur et ses trois pointes successives entre le 15/11/2002 et le 01/12/2002. Elle a franchi une première fois le seuil de 8,15 m NGF (environ 6750 m^3/s) le 16/11/2002 à 0h00 pour atteindre un 1^{er} pic à la cote de 9,60 m NGF le 17/11/2002 à 14h et redescendre sous le seuil de 8,15 m NGF le 20/11/2002 à 2h00.
Le 22/11/2002 à 5h00, le seuil de 8,15 m NGF a été une nouvelle fois franchi. La crue a atteint son $2^{ème}$ pic à la cote de 8,79 m NGF le 22/11/2002 à 13h00 pour redescendre sous le seuil de 8,15 m NGF, le même jour à 22h.
Le 24/11/2002, la crue franchit le seuil de 8,15 m NGF une $3^{ème}$ fois pour atteindre son pic maximum le 26/11/2002 à 9h00 (cote de 10,15 m NGF). La crue est redescendue sous le seuil de 8,15 m NGF le 28/11/2002 à 19h

L'évolution des limnigrammes aux différentes stations du Grand Delta figure en page suivante. L'instant de formation de l'unique brèche totale occasionnée dans le système juste en amont du mas de Claire Farine (PRD 309,0) et la période, pendant laquelle la digue en aval de Sylvéréal a surversé, sont également indiqués.

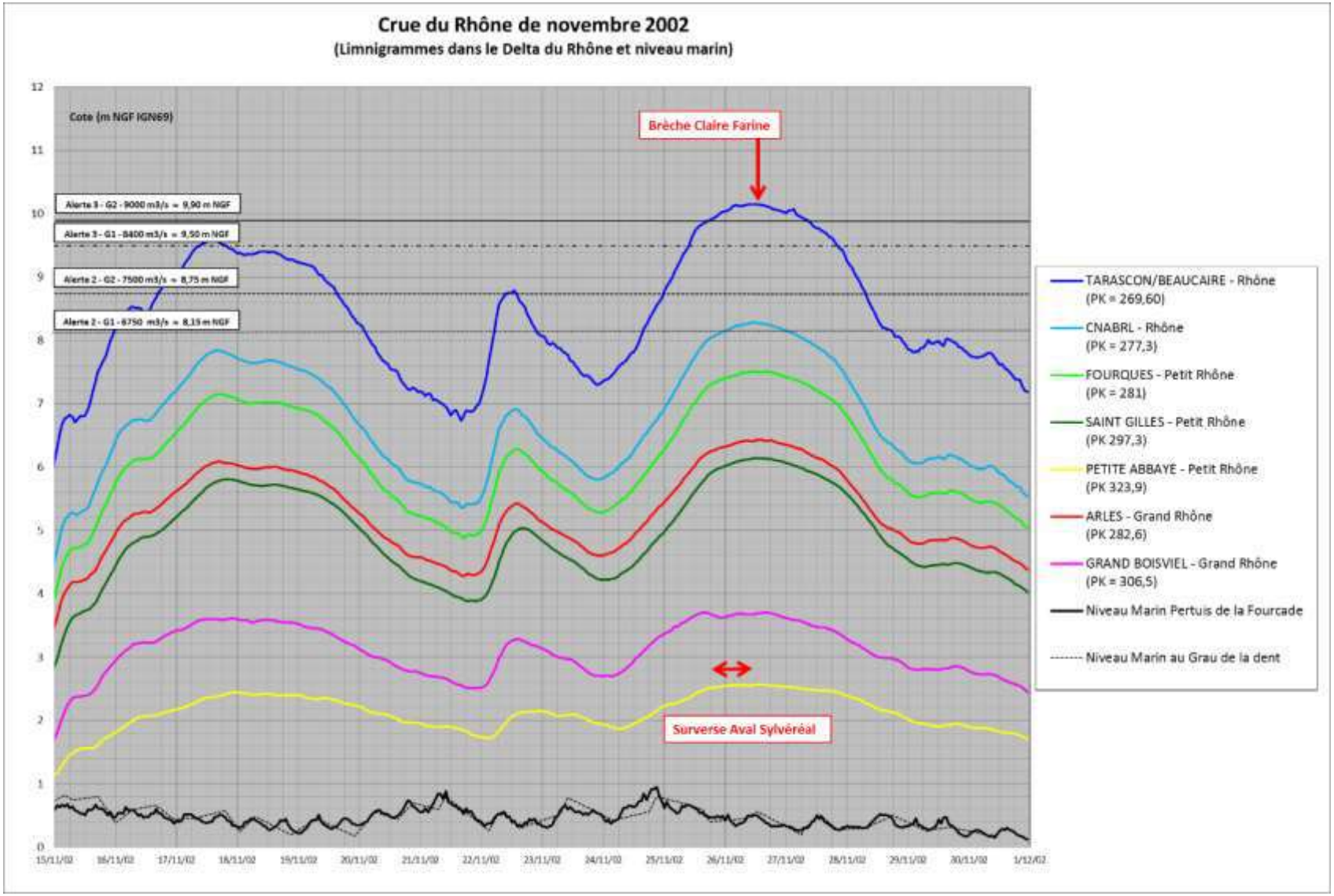


Figure 107. Crue novembre 2002 – limnigrammes stations du Grand Delta du Rhône

15.1 BILAN GENERAL DES BRECHES

Une seule brèche a été occasionnée lors de cette crue juste en amont du PRD 309.00.

Les visites menées en 2014 avec les gardes digues ont permis de reconsidérer un désordre en brèche partielle.

Tableau 28. Bilan des brèches lors de la crue de novembre 2002 et mode de rupture initiateur

Nom de la brèche	Type brèche	PR	Largeur (m)	Initiateur
Claire Farine	Totale	PRD 308,96	15 m	Erosion de conduit dans un ancien terrier après claquage hydraulique ? Erosion de conduit dans des vides à l'interface d'une ancienne brèche et de la digue
Mas des Mantilles	départ	PRD 323.67	Qq mètres	Surverse

15.2 BILAN GENERAL DES DESORDRES

Le dispositif de surveillance mis en place en rive gauche a permis d'éviter la formation de nombreuses brèches. La visite post-crue menée par le CEMAGREF en rive gauche [A2002 07] et droite [A2002 04] permet d'avoir une bonne traçabilité des désordres observés en crue sans certitude d'exhaustivité.

32 désordres ont été ainsi recensés. 24 désordres ont fait l'objet d'interventions d'urgence.

15.3 BRECHE DE CLAIRE FARINE

La brèche de Claire Farine s'est produite sur 15 mètres de longueur, le mardi 26/11/2002 aux alentours de 13 h, soit au moment de la pointe de crue, vers le PK Rhône 309, un peu en amont (au Nord) de la station de pompage de Claire Farine (source CEMAGREF [A2002 04]). La figure et photo ci-après permettent de localiser la brèche.

Figure 108. Localisation brèche de Claire Farine – novembre 2002

Photo 38. Brèche de Claire Farine – Novembre 2002 (source la Provence [A2002 10])

Dans ce secteur, sur quelques 300 mètres, la digue n'est séparée du Petit Rhône que par un ségonnal de 5 mètres de largeur. A la décrue, la DDE 30, assistant à maître d'ouvrage du SIDR a pu constater, sur les bords de la brèche, que le pied de digue côté fleuve était ici renforcé par un perré maçonné (détruit au droit de la brèche).

La cartographie établie par les ingénieurs des Ponts et Chaussées en 1876 [H0003] ainsi qu'un plan datant de 1909 [H1032] concernant l'alimentation d'une station de pompage confirment la présence du perré observé par la DDE sur le talus côté fleuve de la digue et d'une protection de berges respectivement en enrochements (SE sur le plan)) et perreyées (IP) aux abords de la brèche.

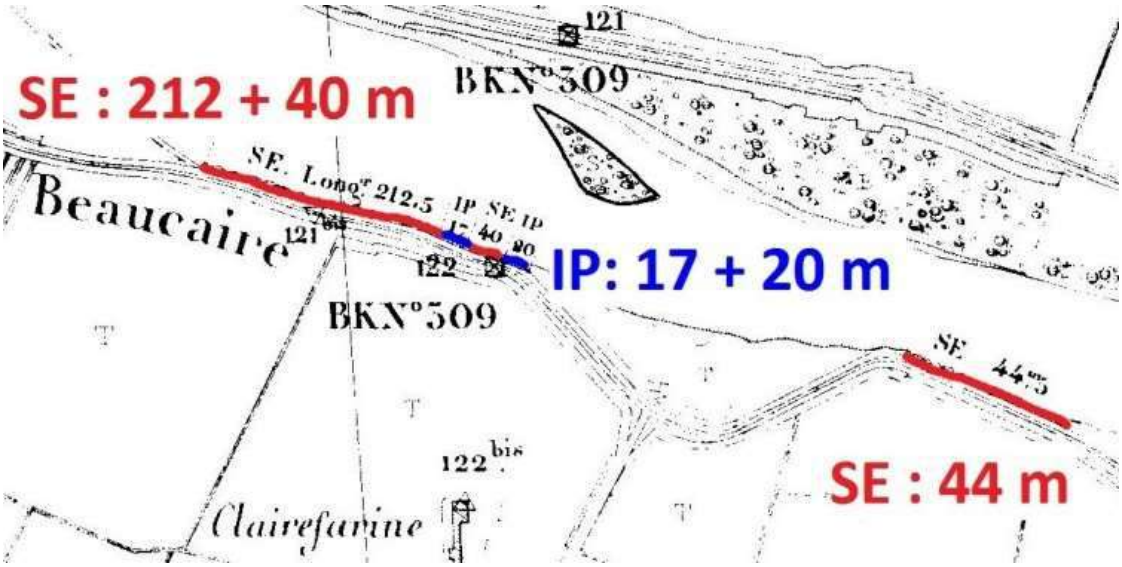


Figure 109. Cartographie des Ponts et Chaussées de 1876 [H0003]

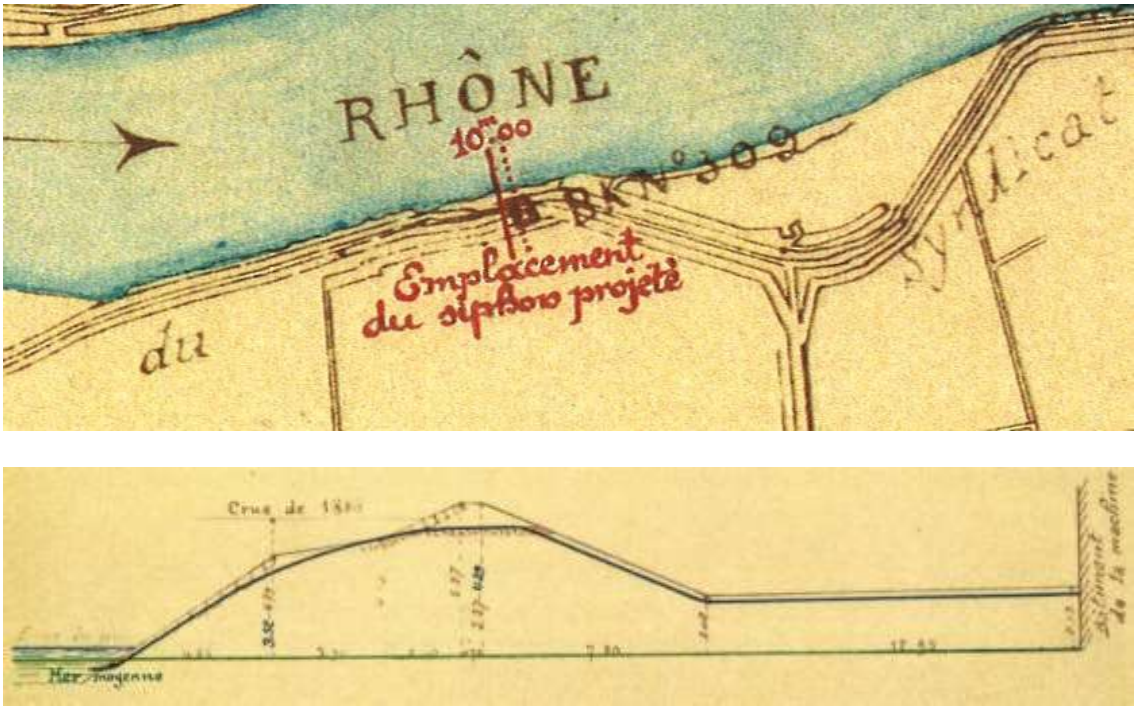


Figure 110. Vue en plan et coupe type du projet d'alimentation en siphon inversé (date 1909) [H1032]

Il est rappelé que la technique, consistant à perreyer le talus de la digue, était souvent utilisée pour la réparation de brèches ou de désordres anciens.
Le projet de siphon inversé semble se situer au droit de la station de pompage actuel, soit en dehors de la zone de brèche (Cf. photo ci-dessus).

Les principales caractéristiques extraites du plan topographique établi en mars 1994 (source SIDR [C001] sont les suivantes :

- largeur en crête : 1,5 m
- Cote de la crête de digue : entre 4,9 et 5,0 m NGF
- Cote du terrain naturel côté terre : 1,6 m NGF (soit une hauteur de 3,5 m)
- Cote du terrain naturel côté ségonnal : 3,7 m NGF (soit une hauteur de 1,5 m)
- Fruit du talus aval : 2
- Fruit du talus amont : 3
- hauteur de berge : 1,5 m
- ségonnal : 2,5 à 5 m de largeur.

Le scénario de la rupture détaillé dans [A2002 04] : est le suivant :

« En milieu de la matinée du 26/11, les agents du Syndicat procédaient au traitement d'une amorce de renard dans le secteur de Claire Farine. Ils avaient fait venir par l'amont (Nord) une pelle à pneus - circulant à grand peine sur la crête de digue (emprise étroite et remblai de digue imbibé d'eau, comme en attestent les nombreuses ornières laissées par la pelle) et avaient réussi à colmater le début de renard en plaquant des bottes de paille côté immergé de la digue, lorsqu'une vingtaine de minutes plus tard, un second renard s'amorça à quelque 20 m en aval du premier. Il était aux alentours de 11h le 26/11/2002. Ce deuxième renard a eu raison de la digue en 2 heures environ, sans qu'il ait été possible de l'enrayer par la même technique que celle mise en œuvre avec succès pour le précédent. »
Il s'agit donc d'une brèche par renard qui s'est déclenchée, alors que le niveau du Petit Rhône affleurait celui de la crête de digue.

Le limnigramme au droit de la brèche a été reconstitué par interpolation à partir des limnigrammes de la CNR situés en amont et en aval de la brèche. Il donne une cote maxi de 4,6 m NGF, soit 35 cm en dessous de la crête de digue. La hauteur d'eau par rapport au ségonnal était respectivement de 0,9 m et par rapport au terrain aval de 3 mètres

Lors du premier pic, la cote maxi au droit de la digue était estimée à 4,3 m NGF, ce qui donne une hauteur d'eau par rapport au ségonnal de 0,6 cm et par rapport au terrain côté val de 2,7 m.

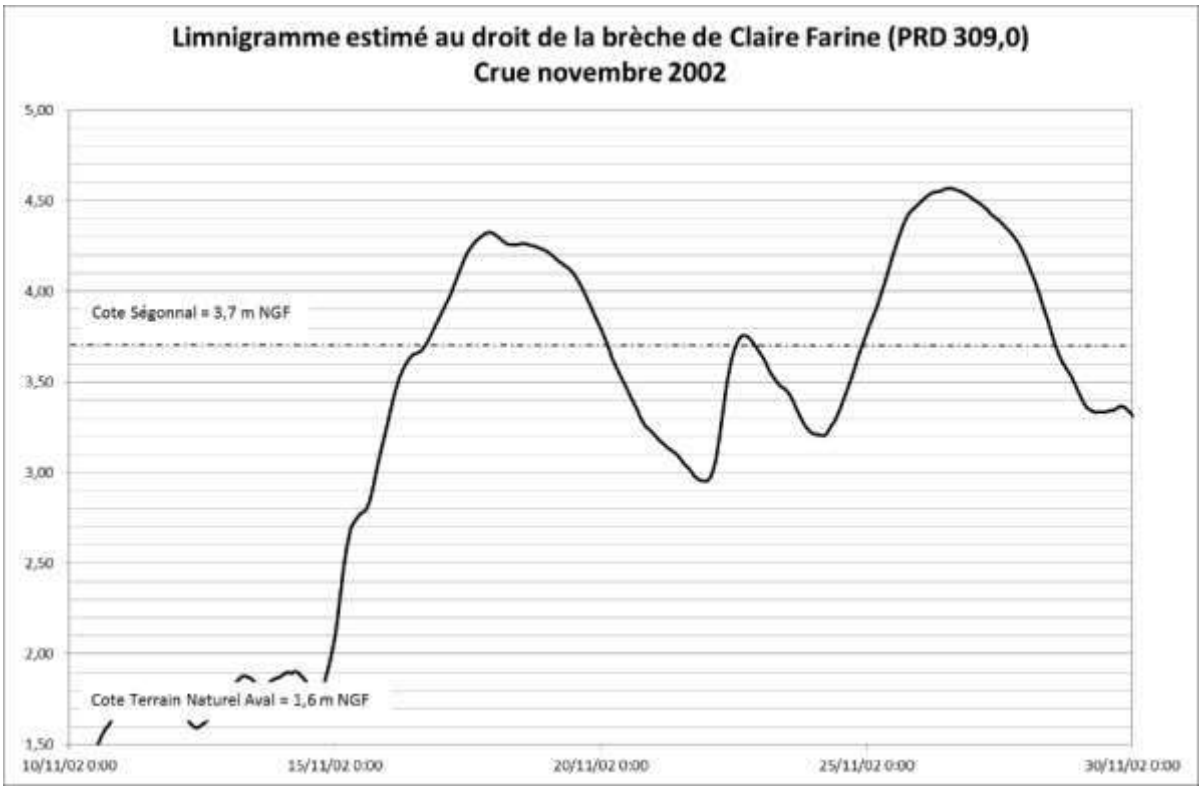


Figure 111. Limnigramme extrapolé au droit de la brèche de Claire Farine (PK 309,0)

En supposant que le ségonnal ait tenu, ce qui est possible compte tenu de la présence d'une protection de berges et de la vidéo tournée par Monsieur Fater [A2002 13], ancien directeur du SIDR, le 28/11/2002 à 12h34, soit deux heures avant que le niveau du Rhône redescende sous la cote du ségonnal avant brèche (3,7 m NGF), le volume de déversement peut être estimé, à partir d'une loi de seuil à 1,6 millions de m^3, ce qui est peu mais s'explique par la faible hauteur de déversement (4,6 – 3,7 = 0,9 m).

Photo 39. Brèche de Claire Farine – novembre 2002 (source SIDR [A2002 13])

L'analyse de la rupture conduit à écarter les modes de rupture suivants :

- La surverse (revanche de 35 cm et vent du nord, soit dans le sens des écoulements)
- Glissement : fruit du talus aval de 2 et perméabilité très faible du corps de digue ;
- Affouillement externe : présence d'une protection de berges après crue et absence d'une fosse d'affouillement en pied de digue (Cf. carte bathymétrique)
- Erosion de conduit le long d'une canalisation (la station de pompage est localisée en aval de la brèche)

Et nous amène à confirmer un phénomène d'érosion interne. Le rapport du CEMAGREF établi à partir du témoignage de Monsieur FATER laisse penser à une érosion de conduit dans des terriers (au-moins deux d'après le témoignage). Etaient-ils visibles ? Aucun témoignage n'en fait part et l'examen des fiches de suivi des gardes digues (source SIDR [A2002 06]), qui étaient en surveillance, ne révèle pas la présence de nouveaux terriers dans ce secteur. Par ailleurs, s'ils étaient visibles, un débit de fuite aurait été observé lors du 1er pic de crue, ce qui n'a pas été le cas. En revanche, les nombreuses correspondances entre le SIDR et les propriétaires riverains suite à la crue de 1996 indiquent que ce tronçon de digue avait été exposé aux terriers d'animaux fouisseurs (sources [A1996 04] à [AA1996 12]) et actes de vandalisme de la part du propriétaire riverain.

Il pourrait donc s'agir d'une érosion de conduit dans des anciens terriers partiellement colmatés suite à un claquage hydraulique du comblement partiel. Il peut également s'agir d'une érosion de conduit le long de vides situés à l'interface d'une ancienne brèche avec la section courante de digue suite à une série de claquages hydrauliques mais ce scénario paraît moins probable.

L'analyse du mode de rupture « claquage hydraulique d'un conduit partiellement colmaté » montre que le critère de sécurité est très sensible aux faibles variations d'eau. Ainsi dans l'hypothèse retenue pour l'analyse de risques au chapitre n°7, un bouchon d'épaisseur 1 mètre se fissurant pour une hauteur d'eau de 0,68 m (Coefficient de sécurité F = 1) présente un niveau de sécurité suffisant (coefficient de sécurité F = 1,3) pour une hauteur d'eau de 0,52 m, soit à peine 16 cm de moins !

Le retour d'expérience de la brèche de Claire Farine 2002 pourrait être révélateur de l'effet dévastateur provoqué par le claquage hydraulique de conduits non visibles hors période de crue.

15.4 SURVERSE

Le bilan général des surverses observées en novembre 2002 figure ci-dessous.

Tableau 29. Crue de novembre 2002 – Bilan général des surverses

Surverse					
Nom du désordre	**Type désordre**	**PR**	**Mesure prise**	**Initiateur pressenti**	**Code**
Claire Farine	Déferlement vagues sur digue	PRD 309.16	Pose de sacs de sable en crête	Dépassement cote de l'ouvrage	D6
Aval Sylvéréal	Surverse sur 1,5 km 5 cm pendant 33 h.	PRD 322,41 PRD 324,54	Interv urgence Recharge GNT	Dépassement cote de l'ouvrage sur 2,1 km	D6
Bel Air	Surverse rampe d'accès à la digue	PRD 312,33	Interv urgence Bottes de paille en crête	Point bas localisé	D6
Mas Badet	Surverse rampe d'accès à la digue	PRG 326,79	Interv urgence Merlon de terre	Point bas localisé	D6
Mas juge	Surverse rampe d'accès à la digue	PRD 325,00	Interv urgence Rehausse GNT	Point bas localisé	D6
Port-Saint-Louis	Surverse	GRG 322,00 GRG 322.20	Interv urgence Merlon de terre	Dépassement cote de l'ouvrage sur 200 mètres	D6

Sur les 5 secteurs déversants, 3 secteurs concernaient des points bas localisés (encoules) et 2 secteurs concernaient des déversements liés à des dépassements de cote d'ouvrage, respectivement sur 200 mètres et 2100 mètres. Sur ce tronçon, un départ de brèche a été observé.

15.4.1 PRD 322,41 à 324,54 - Aval Sylvéréal Grand Abbaye

D'après le rapport du CEMAGREF [A2002 07], une surverse générale s'est produite sur toute la digue le long de la route départementale, soit sur 1,5 km en début de soirée le 25/11/2002 vers 19 heures pour s'arrêter dans la matinée du 26/11/2002 vers 11 h, soit 16 heures de déversement avec une hauteur de lame déversante de l'ordre de 20 cm.

L'examen du limnigramme enregistré à la station de Petit Abbaye [O0105] située au PRD 323,9 soit dans la zone de surverse montre que la variation de niveau n'a été que de 5 cm (2,52 à 2,57 m NGF IGN 69) durant cette période et qu'en supposant la cote de digue constante, la surverse aurait dû être de 33 heures.
Le rapport du CEMAGREF mentionne que des rechargements de crête de digue ont été réalisés avant la surverse jusqu'à ce qu'elle devienne inévitable. En déc. 2003 la main courante atteste d'un début de surverse à 2,30 m NGF, mais le vent orienté Sud Est était fort à ce moment pouvant créer une surcote liée au batillage. On retiendra que la surverse a été moyenne de 5 cm sur 2 km et que localement la lame d'eau a pu atteindre 20 cm.

Si les dégâts sont importants à certains endroits, ils révèlent une très bonne tenue à la surverse. Cette résistance à la surverse a sans aucun doute été renforcée par la faible hauteur de chute et la présence d'une végétation rase mais résistante (herbes et ronces) qui a limité

l'érosion des talus. Les nombreux arbres en pied de digue ont également permis la constitution d'un matelas d'eau en pied de digue qui a permis un ralentissement des vitesses et une bonne dissipation de l'énergie.

Les entretiens avec le garde digues du secteur ont permis d'identifier 1 point, où un départ de brèche par surverse a été initié :

- PRD 323.67 : Une érosion importante du talus côté terre a été observée

Figure 112. Crue Nov. 2002 – localisation surverse Aval Sylvéréal

Les photos ci-après extraites du bulletin municipal de la ville des Saintes-Maries-de-la-Mer illustrent ces surverses

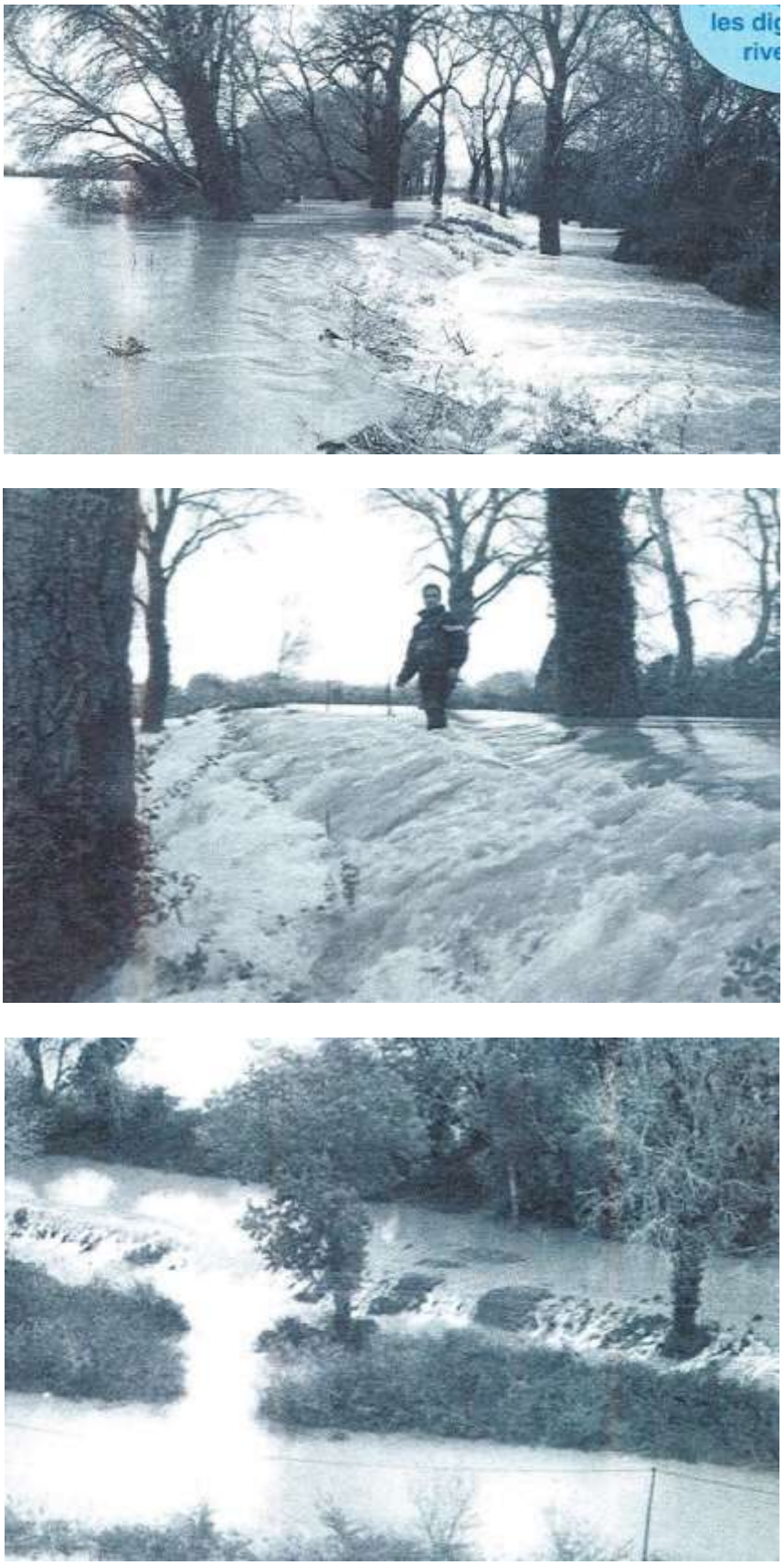


Photo 40. Déversement sur les digues du Petit en rive droite du Rhône aval de Sylvéréal (© Ville Saintes Maries de la Mer [A2002 11])

Les photos ci-dessous illustrent le début d'érosion du talus côté terre.

Photo 41. Digue Petit Rhône rive droite en aval de Sylvéréal après déversement (©Cemagref [A2002 07])

Photo 42. Recharge de la crête en tout venant (©Cemagref [A2002 07])

La photo ci-dessous prise en 2014 illustre la digue au droit du Mas des Mantilles où un départ de brèche par surverse a été initié.

Photo 43. Digue du Petit Rhône rive droite 323.67

15.4.2 PRD 312,33 - Bel Air

Figure 113. Crue Nov. 2002 – localisation surverse Bel Air

Une surverse a été déplorée au lieu-dit Bel Air (PRD 312,3) au droit d'une rampe d'accès à la digue à partir de 04 h du matin le 26/11. Les agents du SIDR ont réussi à stopper la surverse en faisant disposer à la pelle mécanique, sur la crête de digue, une rangée longitudinale de bottes de paille de 150 kg, épaulées côté Camargue par un cordon de matériau argileux.

Photo 44. Crue Nov. 2002 – Surverse Bel Air (©Cemagref [A2002 04])

15.4.3 PRG 326.79 - Mas de Badet, Cabannes de Cambon

Une surverse a eu lieu sur 5 mètres au droit d'un franchissement de digue le 25/11/2002. L'intervention d'urgence a consisté à réaliser un merlon de terre afin de rehausser légèrement l'ouvrage et permettre de stopper la surverse.

Figure 114. Crue Nov. 2002 – localisation surverse Mas de Badet

15.4.4 PRD 325 - Mas du juge

Une surverse a eu lieu le 20/11/2002 au droit d'un franchissement de digue. Des travaux d'urgence ont été réalisé et consisté en le rehaussement du chemin avec de la grave non traitée pour reconstituer le profil initial.

Photo 45. Crue Nov. 2002 - Mas du juge - rehausse de la digue (©Cemagref [A2002 07])

15.4.5 GRG 322.0 à 322.2 - Port-Saint-Louis-du-Rhône Quartier Vauban

Une surverse a commencé à se produire le 19/11/2002 sur la digue de Port-Saint-Louis au droit du quartier Vauban en centre-ville. La digue à cet endroit est de faible hauteur et vient se raccorder sur le terrain naturel.

Les travaux d'urgence ont consisté à rehausser la digue pour éviter la surverse.

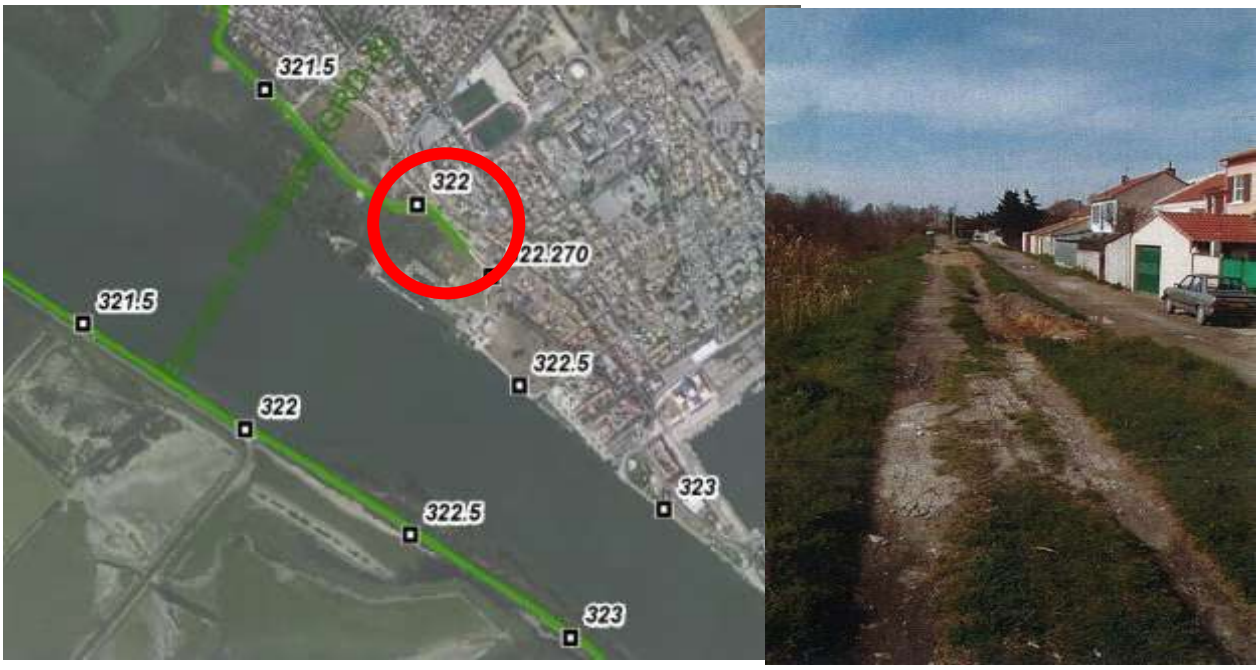


Photo 46. Crue Nov. 2002 – Surverse Port-Saint-Louis (©Cemagref [A2002 07])

15.5 INFILTRATIONS EAUX CHARGEES EN MATERIAUX FINS

On dénombre 13 désordres de type infiltrations d'eaux boueuses hors ouvrages traversants :

- 10 désordres sont dus à des résurgences ou des affaissements (suite à écoulements) d'anciens terriers de lapins ou blaireaux ;
- 3 désordres sont liés à des anciennes brèches.

11 désordres ont fait l'objet d'une intervention d'urgence. Le bilan de ces désordres figure dans le tableau ci-dessous

Tableau 30. Crue nov. 2002 – Bilan général des infiltrations d'eaux boueuses et désordres associés

Infiltrations d'eaux chargées en fines (D2) + D3 (si terrier) ou D9 (affaissement) ou D18 (fontis)					
Nom du désordre	**Type désordre**	**PR**	**Mesures prises**	**Initiateur pressenti**	**Code**
Mas de Vert	Affaissement crête de digue	PRG 283.95 PRG 284.13	Recharge en crête après crue Pas d'incident en 2003 (?)	Terriers blaireaux avant 1993	D9 D3
Mas d'Yvan	Infiltrations eaux boueuses taille d'un poignet	PRG 285.74 PRG 285.88	Intervention Urgence Limons côté fleuve Laitier côté terre	brèche 1856 Erosion contact	D2
Mas Médaille	Infiltration eaux limoneuses	PRG 285.97 PRG 286.18	Intervention Urgence Argile côté fleuve Laitier côté terre	Erosion conduit fouisseurs (canniers)	D2 D3
Beaujeu de Castre	Infiltrations eaux boueuses mi-talus et fissure en crête	PRG 293,51 PRG 293.97	Intervention Urgence Argile côté fleuve	Erosion conduit anciens terriers lapins	D2 D3
Anc. Br. Galante	Infiltrations eaux boueuses à l'interface d'une ancienne brèche	PRG 299.81	Surveillance	brèche 1993 Erosion contact	D2
Anc. Br. Lauricet	Infiltrations eaux boueuses à l'interface d'une ancienne brèche	PRG 304,36	Surveillance	brèche 1993 Erosion contact Paléo-chenal	D2
Albaron Amont	Infiltration pied et résurgence mi-talus	PRG 307,0	Intervention Urgence Argile sur les 2 talus	Erosion de conduit ancien terriers Paléo-chenal	D2 D3
Albaron Aval	Infiltration, fissure et amorce de glissement	PRG 308,46	Intervention Urgence Argile 2 talus	Erosion de conduit ancien terriers Paléo-chenal	D14 D9 D3
Mas d'Eymini	Infiltrations eaux boueuses	PRG 312,52 et PRG 312,70	Intervention Urgence Argile côté fleuve Laitier côté terre	Erosion de conduit anciens terriers lapins	D2 D3

				paléo-chenal	
Mas Ventabren	Infiltrations et résurgences eaux boueuses en pied et mi-talus + fontis	PRG 314,05	Intervention Urgence Argile côté fleuve Laitier côté terre	Erosion de conduit anciens terriers lapins	D2 D3 D18
Grandes Cabannes du Vaccarès	Infiltration chargée + affaissement talus + fissure longitudinal	PRG 316,24	Intervention Urgence Argile côté fleuve Laitier côté terre	Erosion de conduit Anciens terriers de lapin	D2 D3
Mas d'Auphan Griffeuille	Résurgence milieu talus	GRD 308,89 GRD 310.50	Intervention Urgence Argile côté fleuve	Erosion de conduit terriers blaireaux Paléo-chenal	D2 D3
Chamone	Infiltration eaux boueuses	GRD 315,27 GRD 315.34	Intervention Urgence Argile des 2 côtés	Erosion de conduit ancien terriers blaireaux Brèche 1993 Paléo-chenal	D3

15.5.1 PRG 283.95 à 284.13 - Affaissement de la crête Mas de Vert Amont

Des terriers de blaireaux ont été observés sur ce secteur avant les crues de 1993 et 1994. En 2002, un léger tassement dans une zone de traitement avait été renforcé par le régalage de laitiers en crête. L'examen visuel mené suite à la crue de déc. 2003 n'a pas décelé d'évolution d'après le rapport du CEMAGREF. On note cependant que la main courante recense un affaissement au PRG 284 le 4/12 à 10h.

Photo 47. Tassement de crête – Mas de Vert (CEMAGREF [A2003 03])

La digue doit être intégralement reprise dans le cadre de l'opération de renforcement et recul limité des digues du Petit Rhône.

15.5.2 PRG 285.74 à 285.88 – Infiltrations Mas d'Yvan

Une résurgence de la taille du diamètre du poignet a été constatée le 26/11/2002 en pied de digue. L'eau était limoneuse d'après le rapport du CEMAGREF. Sur ce secteur les infiltrations et petites résurgences en pied aval de la digue sont fréquentes et connues. L'intervention d'urgence a eu lieu les 26, 27 et 28 novembre 2002 et a consisté en la mise en œuvre de limons sur le talus côté fleuve, qui compte tenu des conditions n'ont pas pu être compactés. Un engraissement du talus côté terre avec du matériau type laitier a également été opéré.
On notera que cette infiltration s'est produite au droit de la grande brèche de 1843 et d'une ancienne brèche partielle de 1856 qu'on peut localiser sur la carte des ponts et chaussées par la présence d'un perré.

La digue doit être intégralement reprise dans le cadre de l'opération de renforcement et recul limité des digues du Petit Rhône.

Figure 115. Crue novembre 2002 – localisation infiltrations eaux boueuses Mas d'Yvan

Photo 48. Intervention d'urgence Mas d'Yvan côté terre (laitier) et côté fleuve (limons) (©Cemagref [A2002 07])

15.5.3 PRG 285.97 à 286.18 – Infiltrations Mas Médaille

Des infiltrations en pied de talus et des résurgences en milieu de talus entre ont été observées. Une amorce de glissement du talus côté fleuve est également apparue. La présence de fouisseurs dans les canniers présents sur la digue est attestée par le garde-digues.

Une intervention d'urgence a eu lieu le 28/11/2002 et a consisté en une recharge de limons argileux côté fleuve et une recharge de laitier côté terre.

La digue doit être intégralement reprise dans le cadre de l'opération de renforcement et recul limité des digues du Petit Rhône.

Figure 116. Crue Nov. 2002 - localisation infiltrations d'eaux claires Mas Médaille

Photo 49. Intervention d'urgence Mas Médaille côté fleuve (limons) et côté terre (laitier) (© Cemagref [A2002 07])

La figure ci-dessous illustre le schéma de principe des travaux d'urgence opérés.

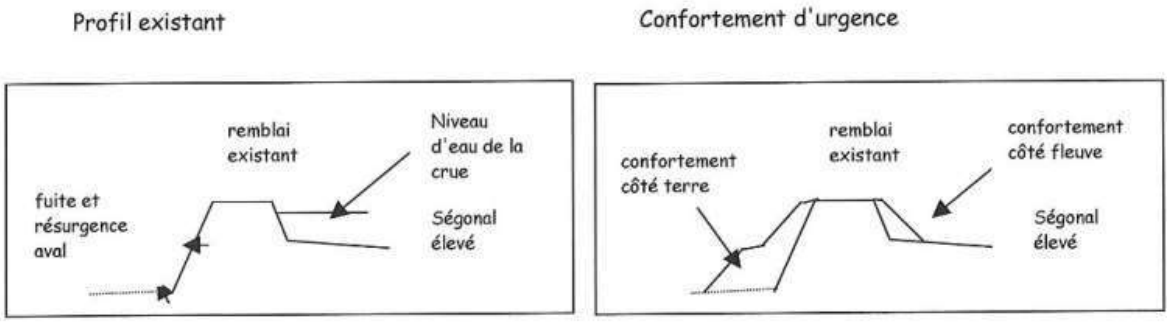


Figure 117. Désordres et interventions d'urgence (source CEMAGREF [A2002 07])

15.5.4 PRG 293.51 à 293.97 - Beaujeau de Castres

Des infiltrations et résurgences importantes sont apparues entre le PRG 293.51 et PRG 293.77 en milieu de talus le 26/11/2002. Sont-elles situées au niveau de la transition entre la couche de laitier et le corps de digue ? D'après le garde-digues, il s'agirait d'infiltrations dans d'anciens terriers de lapins. L'intervention d'urgence a consisté à régaler depuis la crête de digue du limon argileux contre le talus côté fleuve (opération réalisée talus immergé). Des fissures longitudinales importantes en crête de digues ont été observées sur l'aval (PRG 293.83 à 293.97) après crue sans indice d'amorce de glissement circulaire. Il semblerait que cette fissure de la couche de laitier située en crête de digue soit due à la circulation des camions en crête de digue qui pourraient avoir engendré ces fissures par tassement différentiel, d'autant plus que cette couche de laitier a tendance à rapidement faire prise. Suite à la crue de déc. 2003, la fissure s'est élargie (et a fait l'objet d'un traitement ?).

La digue doit être intégralement reprise dans le cadre de l'opération de renforcement et recul limité des digues du Petit Rhône.

Figure 118. Crue nov. 2002 - localisation infiltrations d'eaux boueuses Beaujeu de Castres

Photo 50. Intervention d'urgence Beaujeau de Castres côté fleuve (limons) / Apparition de fissures sur l'aval (© Cemagref [A2002 07])

15.5.5 PRG 299.81 - Brèche de la Galante de 1993

Un renard hydraulique s'est produit le 28/11/2002 à la jonction de l'ancienne brèche (oct. 1993) et du remblai en place. En 1993, l'intervention avait consisté à combler la brèche avec des « big-bags » emplis de terre, lâchés d'hélicoptères ou par déversement d'enrochements directement dans la brèche. Ces derniers avaient été recouverts de terre, apparemment de façon insuffisante.

La digue doit être intégralement reprise dans le cadre de l'opération de renforcement et recul limité des digues du Petit Rhône.

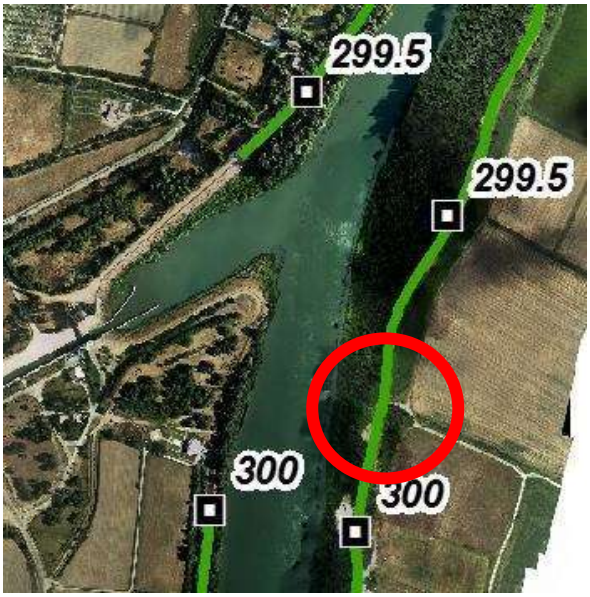


Figure 119. Crue nov. 2002 – localisation infiltrations eaux boueuses le long de l'ancienne brèche de la Galante

Photo 51. Ancienne brèche de la galante – renard hydraulique (©Cemagref [A2002 07]))

15.5.6 PRG 304.36 - Brèche de Lauricet de 1993 et 1994

La brèche de Lauricet a été comblée à l'aide d'enrochements suite à la crue de janvier 1994. Un renard hydraulique, accompagné d'un petit glissement de talus côté terre s'est produit le 26/11/2002.

La digue doit être intégralement reprise dans le cadre de l'opération de renforcement et recul limité des digues du Petit Rhône.

Figure 120. Crue novembre 2002 – localisation infiltrations eaux boueuses et de l'affaissement côté terre le long de l'ancienne brèche de Lauricet

Photo 52. Ancienne brèche de Lauricet – renard hydraulique dans la couche de terre recouvrant les enrochements et glissement de talus côté aval (©Cemagref [A2002 07]))

15.5.7 PRG 307,0 et 308,46 – Amont et Aval d'Albaron

Des infiltrations en pied et résurgences en milieux de talus ont été observées. Une campagne de purge de terriers de blaireaux et de lapins avait été entreprise en 2002.
Suite à un premier incident (départ de fines) au PK 307, une intervention d'urgence a consisté à engraisser les deux talus avec de l'argile

Plus en aval au niveau du Mas d'Albaron (PRG 308.46) dans un secteur ayant fait l'objet de travaux de purge de terriers de blaireaux, une fissure longitudinal est apparue en crête, avec sur un site une amorce de glissement de talus (fissure ouverte et affaissement de 20 cm).
L'intervention a consisté à régaler un matelas d'argile en pied côté fleuve afin de stopper les infiltrations et à conforter le talus aval avec le même matériau.

La digue a été intégralement confortée en 2004 en traversée d'Albaron. Au droit du PRG 308.5, une banquette en laitier a été réalisée côté terre après la crue. Aucun travaux de confortement n'est à ce jour programmé dans le cadre du Plan Rhône.

Figure 121. Crue Nov. 2002 – localisation infiltrations d'eaux chargées Albaron

Photo 53. Crue Nov. 2002 - Engraissement Argile talus côté fleuve et côté terre au PRG 307 (gauche) et en laitier côté terre au PRG 308,43 (droite) (© CEMAGREF [A2002 07])

15.5.8 PRG 312.52, 312.70 et 314.05 - Eymini de Boismeau et Mas de Ventabren

Des infiltrations en pied aval ont été observées, avec des résurgences en milieu de talus au droit d'anciens terriers de lapins traités l'année précédente (source CEMAGREF [A2002 07] et garde digues).

La présence d'un fontis en crête de digue côté talus amont a également été observée au droit du Mas Ventabren.

Figure 122. Crue Nov. 2002 – localisation infiltrations d'eaux boueuses entre les Mas d'Eymini et Ventabren

Photo 54. Crue Nov. 2002 - Mas Ventabren - infiltrations d'eaux boueuses (©PNRC [A2002 12])

Photo 55. Crue Nov. 2002 – Fontis en crête de digue - Mas Ventabren (©SYMADREM [A2002 08])

L'intervention d'urgence a consisté à mettre en œuvre un matelas argileux sur le talus côté fleuve et engraisser le talus côté terre avec du laitier.

Photo 56. Crue Nov. 2002 – Intervention d'Urgence Mas Ventabren (©SYMADREM [A2002 08])

Photo 57. Banquette côté terre en laitier en aval du mas d'Eymini (photo 2014)

Il est à noter la présence d'un paléo-chenal dans ce secteur du fleuve. Aucun travaux de confortement n'est à ce jour programmé sur ce tronçon dans le cadre du Plan Rhône.

15.5.9 PRG 316.24 - Grandes Cabannes du Vaccarès

Dans ce secteur, des infiltrations en pied aval et la présence de terriers de lapins ont été des problèmes récurrents depuis 1994.

Plusieurs incidents ont eu lieu sur le secteur compris entre le PK 315.8 et 316.24 :

- Un affaissement du talus, suivi d'une fissure longitudinale le 19/11/2002
- des infiltrations d'eaux chargées en fines le 25/11/2002

L'affaissement de talus semble trouver son origine dans des anciens terriers de lapins. Un remblai argileux et du tout-venant ont permis un premier colmatage.
Le 25/11 des infiltrations d'eaux chargées en fines se sont accentuées en amont et en aval des Grandes Cabannes du Vaccarès.

Figure 123. Crue Nov. 2002 - localisation infiltrations d'eaux boueuses Cabannes du Vaccarès

Photo 58. Grandes Cabannes de Vaccarès – infiltrations d'eaux boueuses (©PNRC)

Les interventions d'urgence ont consisté à réaliser un chemin de pied côté terre en laitier et à engraisser les talus avec des matériaux argileux prélevés sur place côté terre en retrait de la digue.

Photo 59. Crue Nov. 2002 – Intervention d'urgence Grandes Cabannes du Vaccarès (©Cemagref [A2002 07]))

Le désordre est situé au droit d'un ancien paléo-chenal.

Aucun travaux de confortement n'est à ce jour programmé sur ce tronçon dans le cadre du Plan Rhône.

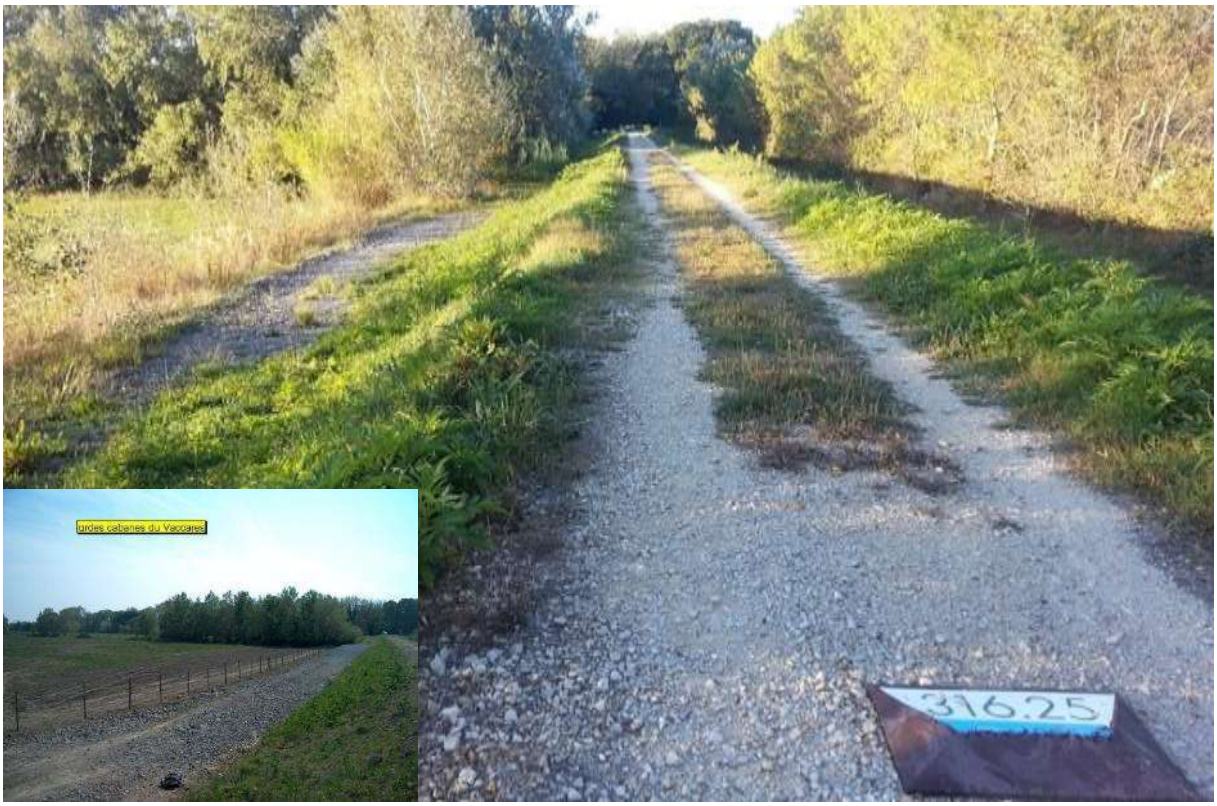


Photo 60. Banquette côté terre en laitier (photo en 2004 et 2014)

15.5.10 GRD 308.89 à GRD 310.50 - Mas d'Auphan et de Grifeuille

Ce site avait fait l'objet de travaux de purge des terriers de blaireau, une quinzaine de trous ayant été traitées. Malgré ces travaux, des fuites sont apparues en milieu de talus côté terre. Une pelle à bras long (18m) a permis de placer en amont un bouchon de terre prélevé dans les terrains en place.

Photo 61. Crue Nov. 2002 – Fuite anciens terriers de blaireaux (©Cemagref [A2002 07])

Photo 62. Digue du Mas d'Auphan (308.9) en 2014

Ce secteur est situé au droit d'un ancien bras secondaire du Rhône. Aucun travaux de confortement n'est à ce jour programmé dans le cadre du Plan Rhône.

15.5.11 GRD 315.27 à 315.34 - Chamone

Un terrier de blaireau a généré, à proximité de la brèche partielle de 1993, une fuite importante en milieu de talus. A 13h30, lors du premier passage du garde, rien n'était visible. A 16 heures, l'eau qui coulait à travers était chargée de limons. L'intervention a consisté à mettre en place avec une pelle long bras un matelas de terre en amont et en aval de la fuite. Elle a débuté à 17h et s'est achevée à 20 heures.

Figure 124. Crue Nov. 2002 - localisation infiltrations d'eaux boueuses Chamone

Photo 63. Crue Nov. 2002 – infilt. eaux boueuses Chamone (©Cemagref [A2002 07])

15.6 INFILTRATIONS EAUX CLAIRES

4 infiltrations d'eaux claires ont été recensées. 3 interventions d'urgence, consistant soit à mettre de l'argile côté fleuve, soit à mettre du matériau drainants côté terre, ont été réalisées pour réduire le débit de fuite.

Deux désordres sont localisés au droit d'anciennes brèches de 1993 et sont directement liés à la perméabilité des matériaux en place.

Deux autres désordres sont localisés à proximité de paléo-chenaux.

Tableau 31. Crue nov. 2002 – Bilan des infiltrations d'eaux claires

Infiltrations d'eaux claires					
Nom du désordre	**Type désordre**	**PR**	**Mesures prises**	**Initiateur pressenti**	**Code**
Trou de Fourques	Infiltration eaux claires en pied de digue dans la recharge aval en laitier	PRG 282.25 PRG 282.29	Interv urgence Remblaiement caisse d'emprunt surveillance	Paléo-chenal brèche de 1856	D1
Station Pompage Casebrune	Ecoulement dans ancienne brèche	PRG 301,03	Interv urgence Recharge tout venant pour limiter les écoulements	brèche de 1993	D1
Mas de la Vigne	Ecoulement anciennes brèches	PRG 305,63	Surveillance	brèche de 1993	D1
Amérique	Infiltrations eaux claires en fondation avec petits geysers	GRD 313,93 GRD 314.09	Interv urgence Argile côté fleuve pour limiter les écoulements	Paléo-chenal	D1

15.6.1 PRG 282.25 à PRG 282.29 - Trou de Fourques

Des infiltrations d'eaux chargées en fines provenant d'anciens terriers de lapins avaient été observées lors des crues de 1993 et 1994. Des travaux post-crue consistant en la mise en œuvre d'un géotextile filtrant et d'une recharge drainante en laitier sur le talus côté terre, avaient été réalisées.

Lors de la crue, des infiltrations d'eaux claires ont été observées en aval de la digue au droit d'un casier d'emprunt. Il est à noter que ce site est en aval d'une ancienne brèche de 1856 et d'un paléo-chenal.

L'intervention a consisté à remblayer le casier et aménager une piste de circulation en pied de digue.

Figure 125. Crue Nov. 2002 - localisation infiltrations d'eaux claires au trou de Fourques

Photo 64. Crue Nov. 2002 – infilt. eaux claires Trou de Fourques (©Cemagref [A2002 07]))

Des travaux de confortement complémentaires à ceux réalisés en 1994 et 1997 sont prévus dans le cadre de l'opération de renforcement et décorsetage limité des digues du Petit Rhône.

15.6.2 PRG 301.03 - Station de pompage de Casebrune

Des résurgences au droit de l'ancienne brèche de 1993 sont observées dès le Rhône franchit 4500 m^3/s. Une recharge en tout venant a été mise en place pendant la crue pour filtrer et limiter les écoulements.

Figure 126. Crue Nov. 2002 - localisation infiltrations d'eaux claires Casebrune

Photo 65. Station de pompage de Casebrune (©Cemagref [A2002 07])

Ce secteur sera conforté dans le cadre de l'opération de renforcement et décorsetage limité des digues du Petit Rhône.

15.6.3 PRG 305.63 – Mas de la vigne

Des infiltrations et résurgences ont été observées sur le talus côté terre au droit des trois brèches partielles occasionnées en octobre 1993.

Figure 127. Crue Nov. 2002 – localisation infiltrations anciennes brèches 1993 du Mas de la Vigne

15.6.4 GRD 313.93 à GRD 314.09 - Mas de l'Amérique

Des résurgences en pied de talus côté terre sont fréquentes sur ce tronçon et apparaissent pour des crues supérieures à 6000 m^3/s. En 2002, un matelas de terre argileuse a été mis en place en pied de talus côté fleuve pour limiter les écoulements.

Ce secteur est situé juste en aval d'un ancien bras secondaire du fleuve et en amont d'un ancien bras principal du fleuve.

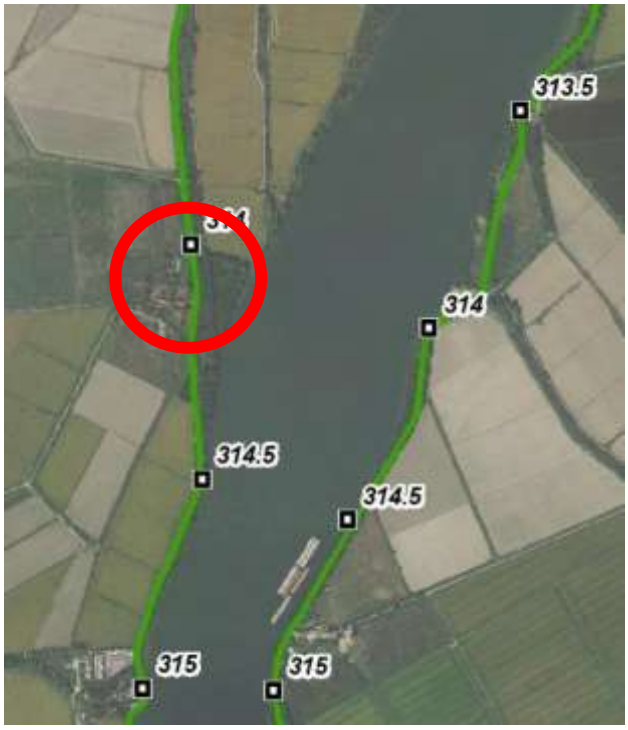


Figure 128. Crue Nov. 2002 – localisation des infiltrations Mas de l'Amérique

15.7 AFFOUILLEMENT EXTERNE

4 désordres par affouillement externe ont été recensés au droit de secteur où le ségonnal est soit inexistant, soit inférieur à 5 mètres :

3 désordres ont entrainés des glissements de berges en décrue. Sur ces 3 désordres, 2 sont situés en extrados et 1 désordre est situé au droit d'une fosse d'érosion liée à un rétrécissement du fleuve.

1 désordre est lié à la présence d'un arbre qui a dévié le courant sur la digue.

Aucune intervention d'urgence n'a eu lieu en crue. Malgré la durée importante de la crue, ces désordres n'ont pas entraîné de départ de brèches.

Tableau 32. Crue nov. 2002 – bilan des affouill. externes et désordres associés (glissement de berges)

Affouillement externe					
Nom du désordre	**Type désordre**	**PR**	**Mesure prise**	**Initiateur pressenti**	**Code**
Mas Montilles	Trou au milieu de la digue et effondrement talus côté fleuve	PRD 322,74	surveillance	Arbre déviant le courant Absence de ségonnal	D15 D11
Pin Fourcat	Affouillement et glissement de berge	PRD 327,99 PRD 328.13	surveillance	Absence de ségonnal Extrado	D11 D10
Barcarin	Affouillement et glissement de berge	GRD 315,89	surveillance	Extrado Fosse très profonde Absence de ségonnal	D11 D10
Esquineau	Affouillement et glissement de berge	GRD 320,00 GRD 321.86	surveillance	Houle Batillage bateaux Absence de ségonnal	D11 D10

15.7.1 PRD 322.74 – Mas des Mantilles

La digue sur ce secteur est proche du fleuve et située en extrado. Un arbre en crête de digue a généré un affouillement externe important autour de son tronc et le talus côté fleuve s'est effondré jusqu'au milieu de la digue.

Figure 129. Crue nov. 2002 – Affouillement dû à la présence d'un arbre mas des mantilles

L'intervention d'urgence a eu lieu après crue et a consisté, après enlèvement de la souche, à reprendre de talus avec du limon compacté. Un bourrelet de terre a été confectionné en crête afin de se prémunir des surverses.

Photo 66. Crue Nov. 2002 - Affouillement externe Mas des Montilles (©Cemagref [A2002 07])

Ce tronçon sera repris dans le cadre de l'opération de renforcement et décorsetage limité des digues du Petit Rhône.

15.7.2 PRD 327.99 à PRD 328.13 - Pin Fourcat

Une amorce de glissement du talus de berge s'est déclarée au niveau d'un embarcadère. Le talus a été conforté avec des enrochements posés lors de la crue. La réalisation d'un sabot de pied et la pose d'une couche de transition n'ont pas été possible compte tenu des conditions d'intervention.

Photo 67. Crue Nov. 2002 - Affouillement ext.et glissement Pin Fourcat (©Cemagref [A2002 07])

Photo 68. Digue du Petit Rhône rive droite (PRD 328.0) en 2014

Aucun travaux de confortement n'est à ce jour programmé dans le cadre du Plan Rhône.

15.7.3 GRD 315.89 - Eglise de Barcarin

Un affaissement d'enrochements posés en confortement de berge et de digue a été constaté.

Ce secteur est connu pour avoir fait l'objet en 1856 d'une brèche partielle probablement par affouillement.
L'absence de ségonnal, la situation de la berge en extrado et la présence d'une fosse d'affouillement profonde de plus de 20 mètres en pied de berge (elle-même due à un rétrécissement du lit endigué), sont 3 conditions cumulatives pouvant provoquer ce type de rupture.
Dans le cadre du projet de renforcement de la digue de Salin de Giraud, il est prévu de combiner des solutions de recul de la digue et de protection en enrochements avec sabots sur les tronçons où le recul n'est pas possible ou insuffisant.

Photo 69. Crue Nov. 2002 - Affouillement ext.et glissement Barcarin (©Cemagref [A2002 07])

15.7.4 GRD 320 à GRD 321.86 - L'esquineau

Ce secteur est connu pour des problèmes d'érosion externe à répétition. Le ségonal a considérablement reculé depuis ces dernières années et la digue est aujourd'hui très proche du fleuve.

En 2002, un glissement d'enrochements anciens et deux petits glissements de talus côté fleuve sont apparus au droit du GRD 320.5. Si le désordre observé est un glissement de berge, le mode de rupture initiateur est l'affouillement externe provoqué par le batillage des vagues générées d'une part par les vents orientées Sud-Est (entrées marines) et par l'accroissement du transport fluvial depuis le déroctage du seuil de Terrin.

Photo 70. Crue Nov. 2002 – Aff. Externe et glissement Aval Esquineau (©Cemagref [A2002 07])

15.8 GLISSEMENT

Un seul glissement a été observé lors de la crue au droit de la digue d'embouquement de l'écluse d'Arles.

Tableau 33. Crue nov. 2002 – Bilan des désordres par glissement

Glissement				
Nom du désordre	**Type désordre**	**Localisation**	**Mesure prise**	**Initiateur pressenti**
Ecluse d'Arles	Glissement	GRG 283,7	Big-bags	Raideur talus

15.8.1 GRG 283.7 – Embouquement Ecluse d'Arles

Quatre glissements à mi-hauteur de talus ont été confortés en crue par la mise en place de sacs de terre appareillés et fondés en pied sur des piquets de bois battus. Ce confortement a permis de stopper les glissements en cours.

Photo 71. Crue Nov. 2002 – Glissement Barriol (©Cemagref [A2002 07])

Ce secteur a fait l'objet de travaux de confortement à la cote identique en 2006 dans le cadre des travaux de 2ème urgence. Ils ont consisté à réaliser un masque en matériaux argileux sur le talus côté fleuve. Lors de notre visite en 2014, un fontis en crête de digue vraisemblablement à l'interface entre la digue d'origine et le masque réalisé en 2006 était visible. Ce dernier peu profond a été traité en 2015 dans le cadre des travaux de renforcement et mise à la cote Q_{1000} + 50 cm.

Photo 72. Embouquement écluse d'Arles – fontis en crête de digue observé en 2014

15.9 DEFAILLANCE DES OUVRAGES TRAVERSANTS

Le bilan des défaillances au droit d'ouvrages traversants figure ci-dessous

Tableau 34. Crue nov. 2002 – Bilan des défaillances des ouvrages traversants

Défaillance ouvrage traversant Fuite le long d'une conduite traversante (D4) ou dans l'ouvrage (D5)					
Nom du désordre	**Type désordre**	**PR**	**Mesure prise**	**Initiateur pressenti**	**Code**
Cazeneuve	Vanne fuyarde	PRG 282,43	Interv. urgence Big-Bag	Ouvrage vétuste	D5
Station Comanderette	Infiltrations eaux boueuses le long d'un ancien aqueduc (OHT)	PRG 286.85	Interv. urgence Argile côté fleuve	Erosion conduit Ancienne brèche supposée	D4
Duroure	Claquage du bouchon de colmatage	PRG 317,25	Interv. urgence Big-Bags	Ouvrage hors service	D5
Barcarin	Vanne fuyarde	GRG 316,70	Interv. urgence Merlon de terre côté terre pour empêcher débordement canal	Ouvrage vétuste	D5
Tour Cazeau	Effondrement d'une vanne bouchée	GRD 301,40	Interv. urgence Bouchon de terre côté fleuve	Ouvrage hors service	D5

Sur ces 5 désordres :

- 2 désordres sont liés à des vannes fuyardes
- 2 désordres sont liés à des colmatages de conduites, qui ont cédé sous la pression de l'eau ou se sont effondrés suite à des écoulements
- 1 désordre est lié à une érosion de conduit le long d'un ouvrage hors service.

Ces 5 désordres ont fait l'objet d'intervention d'urgence consistant à mettre soit de l'argile côté fleuve ou des big-bags au droit des ouvertures. Elles ont toutes permise de stopper le processus d'inondation (D5) ou de brèche (D4).

15.9.1 PRG 282.43 - Mas de Cazeneuve

La vanne de garde amont côté fleuve était fuyarde et laisser passer l'eau pendant la crue. Afin d'y remédier des « big-bag » ont été placés en amont de la vanne par une pelleteuse pendant la crue, ce qui a permis d'arrêter la fuite.

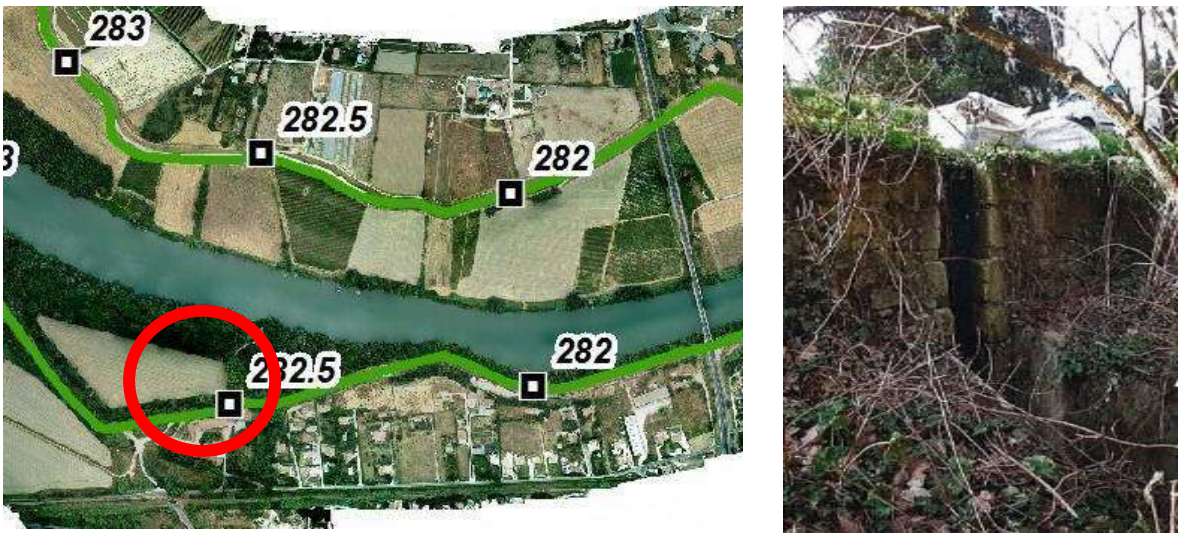


Photo 73. Crue Nov. 2002 – Défaillance Vanne de Cazeneuve (©Cemagref [A2002 07])

Un désordre similaire a été observé en 2003. L'ouvrage a été sécurisé après crue.

15.9.2 PRG 286.85 - Station de Pompage de la Commanderette ou « Petite Corège »

Des fuites sont apparues à travers le perré du talus côté terre. Un entrainement de limons a été observé. A priori, il s'agit d'écoulements internes dans le remblai le long de l'ancien aqueduc, lui-même bouché en amont et en aval. Une intervention d'urgence (non datée) a été réalisée et a consisté en la mise en œuvre d'argile côté fleuve. Aucune évolution notable n'a été observée en déc. 2003. Il est à noter qu'une digue perreyée figure sur la carte de 1876 attestant d'une brèche, d'un désordre ou de fortes infiltrations passées.

Figure 130. Crue nov. 2002 –infiltrations eaux boueuses le long de la station de la comanderette

Photo 74. Intervention d'urgence station de la comanderette – engraissement d'argile et vue caisse d'emprunts côté terre (©Cemagref [A2002 07]))

Photo 75. Prise d'eau de la Commanderette en déc. 2003 (source CEMAGREF [A2003 03])

Cet ouvrage a été supprimé en 2010 lors de la campagne de purge d'une cinquantaine d'ouvrages traversants hors service.

15.9.3 PRG 317.25 - Mas Duroure

Il s'agit d'une ancienne prise d'eau gravitaire hors service dont le bouchon de terre a cédé. Trois « big-bag » emplis de terre ont été déposés devant la vanne ainsi qu'un merlon de terre.

Photo 76. Crue Nov. 2002 – Localisation défaillance Vanne du mas Duroure

Photo 77. Prise d'eau Mas Duroure – colmatage amont de la prise d'eau défaillante

En déc 2003, une fuite similaire a été observée et a donné lieu à une intervention d'urgence par mise en œuvre de big-bags. Cet ouvrage a été supprimé lors de la campagne de 2010.

15.9.4 GRG 316.70 - Bac de Barcarin rive gauche

Il s'agit d'un incident mineur sur une prise, le canal de fuite en charge débordait légèrement compte tenu des fuites dans trois ouvrages traversants.
Un merlon de terre a été installé afin de canaliser les eaux vers le fossé aval.

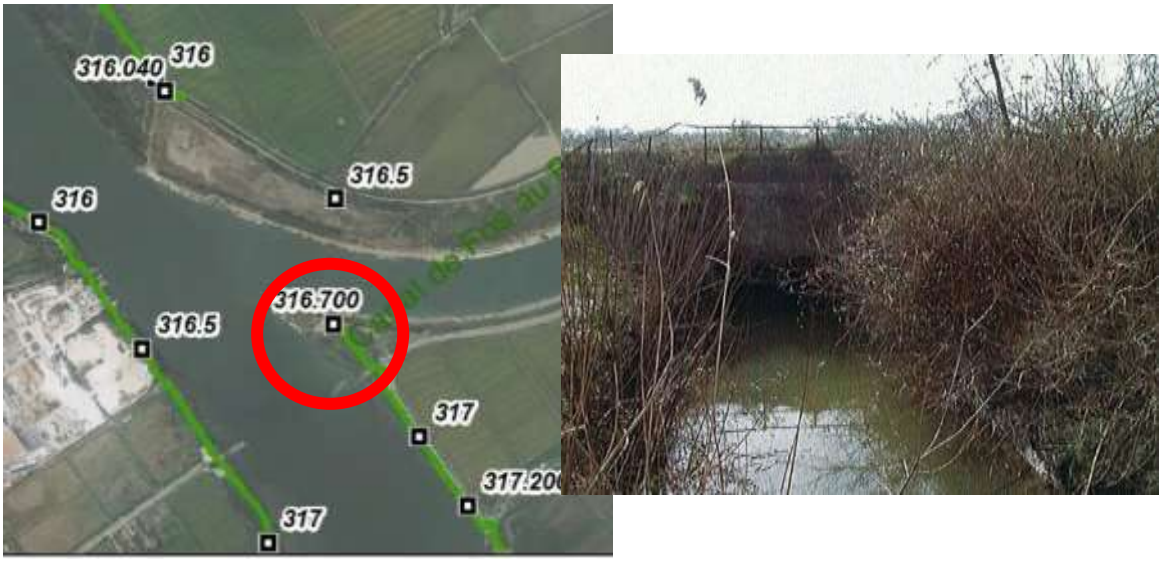


Photo 78. Crue Nov. 2002 – Ouvrage traversant barbarin (©Cemagref [A2002 07])

Cet ouvrage a été supprimé en 2010.

15.9.5 GRD 301.4 - Tour du Cazeau

Il s'agit d'une martelière inusitée et bouchée en 1994. Celle-ci a fui lors de la crue. Une dalle de l'aqueduc en s'effondrant a créé un fontis sur le talus côté fleuve. Un bouchon de terre a été mis en place en amont à l'aide d'une pelle mécanique. L'ouvrage a été supprimé en 2010.

Photo 79. Défaillance ouvrages traversant Tour du Cazeau (©Cemagref [A2002 07])

16 CRUE DE DECEMBRE 2003

La crue de décembre 2003 a franchi le seuil de 8,15 m NGF (environ 6750 m^3/s) du 02/12/2003 à 7h00 jusqu'au 05/12/2003 à 2h00. Elle a atteint son pic le 4 décembre 2003 à 3h00 à la station de Beaucaire/Tarascon. Les principales caractéristiques de la crue de décembre sont les suivantes.

Les limnigrammes dans le Delta du Rhône et le marégramme au Grau de la Dent, ainsi que les instants de formation des brèches figurent en page suivante.

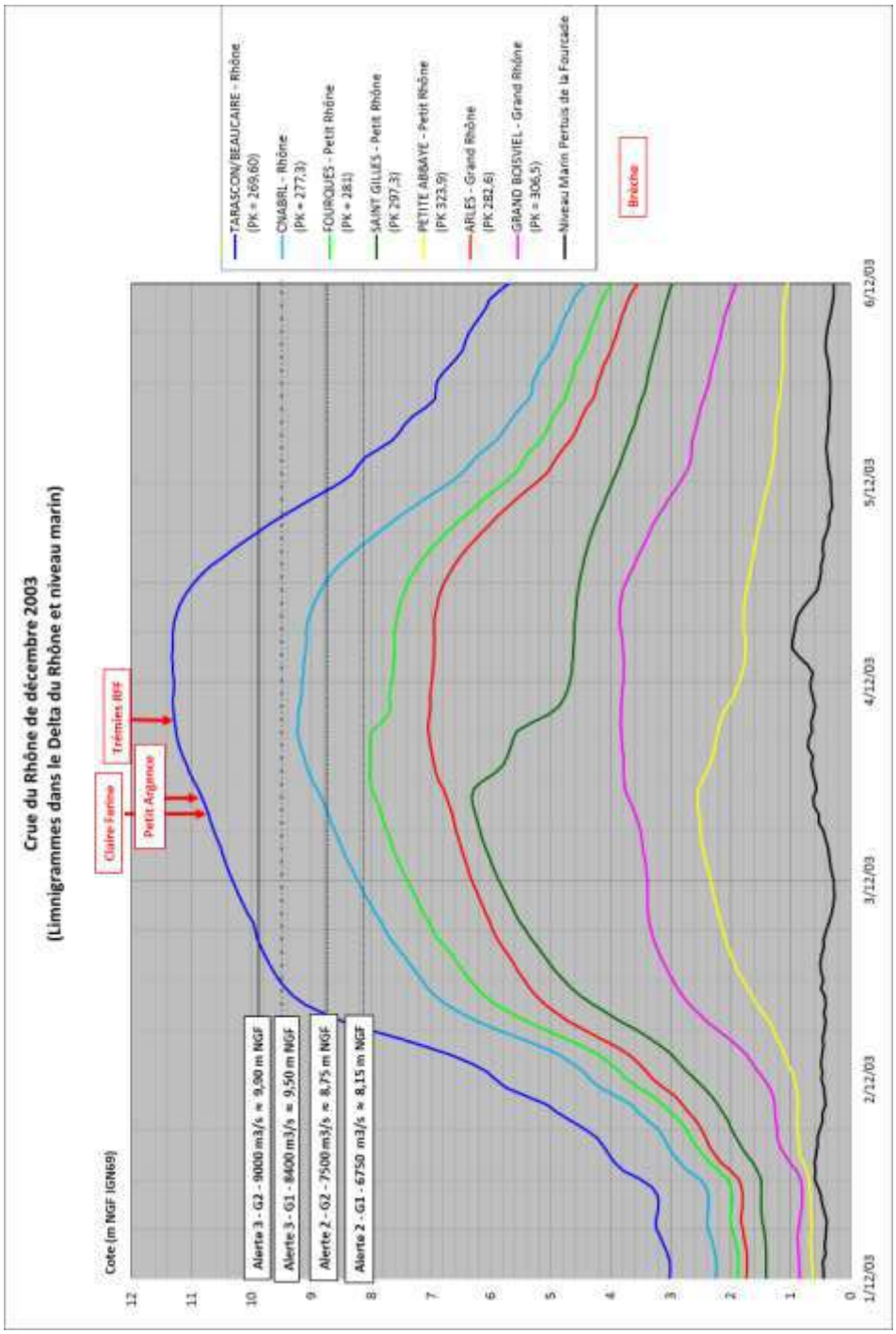


Figure 131. Crue de déc. 2003 : limnigrammes aux principales stations du Grand Delta (source CNR [O0105]) et Marégramme au pertuis de la Fourcade

16.1 BILAN GENERAL DES BRECHES CAUSEES LORS DE LA CRUE DE DECEMBRE 2003

La crue de décembre 2003 a provoqué 4 brèches totales et 2 départs de brèche (Cf. photos ci-dessous) dans le Grand Delta :

- la brèche de Claire Farine en rive droite du Petit Rhône (PK 309,5), qui est intervenue le 3 décembre 2003, vers 8 heures. La longueur maximale de la brèche a été estimée à 120 m,
- la brèche de Petit Argence en rive droite du Petit Rhône (PK 288), qui est intervenue le 3 décembre 2003, vers 10 heures. La longueur maximale de la brèche a été estimée entre 130 et 160 m,
- les deux brèches des digues de protection des trémies du remblai ferroviaire Tarascon/Arles, qui sont intervenues le 3 décembre 2003 vers 21h30,
- le départ de brèche au droit du château de l'Armellière le 3 décembre 2003 vers 12h30,
- Le départ de brèche par surverse au droit de Petite Abbaye le 3 décembre 2003 à 16h30.

Photo 80. brèche de Petite Argence ((©photo-aerienne-france.fr) et brèche de Claire Farine [A2003 18]

Photo 81. Brèche dans les digues de protection des trémies ferroviaires (©ville Tarascon)

Photo 82. Trémies du remblai ferroviaire Tarascon/Arles (©ville Tarascon)

Photo 83. Départs de brèche au château de l'Armelière (© ville Arles [A408]) et Petite Abbaye (©Cemagref [A2003 03]

On note également une brèche par surverse en rive gauche du Vigueirat au droit du lieu-dit Fort d'Herval.

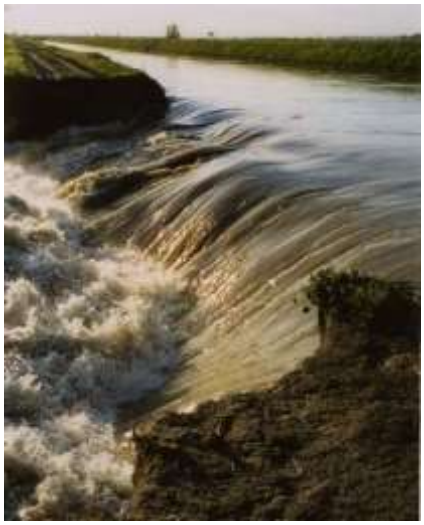


Photo 84. Brèche dans le Vigueirat

Le mode de rupture initiateur des brèches figure dans le tableau ci-dessous :

Tableau 35. Crue de décembre 2003 - Bilan général des brèches

Nom de la brèche	Type brèche	PR	Largeur (m)	Origine
Petit Argence	Totale	PRD 288,0	130 m	Erosion interne
Claire Farine	Totale	PRD 309,5	120 m	Surverse
Trémie du Mas Tessier	Totale	RG 271.3	8 m	Surverse
Trémie des Ségonnaux	Totale	RG 273.8	8 m	Surverse
Armellière	Départ	GRD 297.97	Qq mètres	Effondrement d'un ouvrage traversant masqué
Petite Abbaye	Départ	PRD 323.67	3 mètres	Surverse

16.2 INONDATION DU RHONE CAUSEE PAR CES BRECHES

Ces brèches totales ont occasionné des volumes de débordements très importants, estimés par la $CNR_{ingénierie}$ [K100] pour :

- la brèche de Claire Farine à 73 millions de m^3,
- la brèche de Petite Argence à 137 millions de m^3,
- les brèches des digues de protection des 2 trémies du remblai ferroviaire Tarascon/Arles à 17 millions de m^3.

La photo en page suivante illustre l'ampleur de l'inondation du Rhône en rive droite du Rhône (Plaine de Beaucaire et Camargue Gardoise) et en rive gauche du Rhône (Plaine du Trébon et quartier Nord d'Arles).

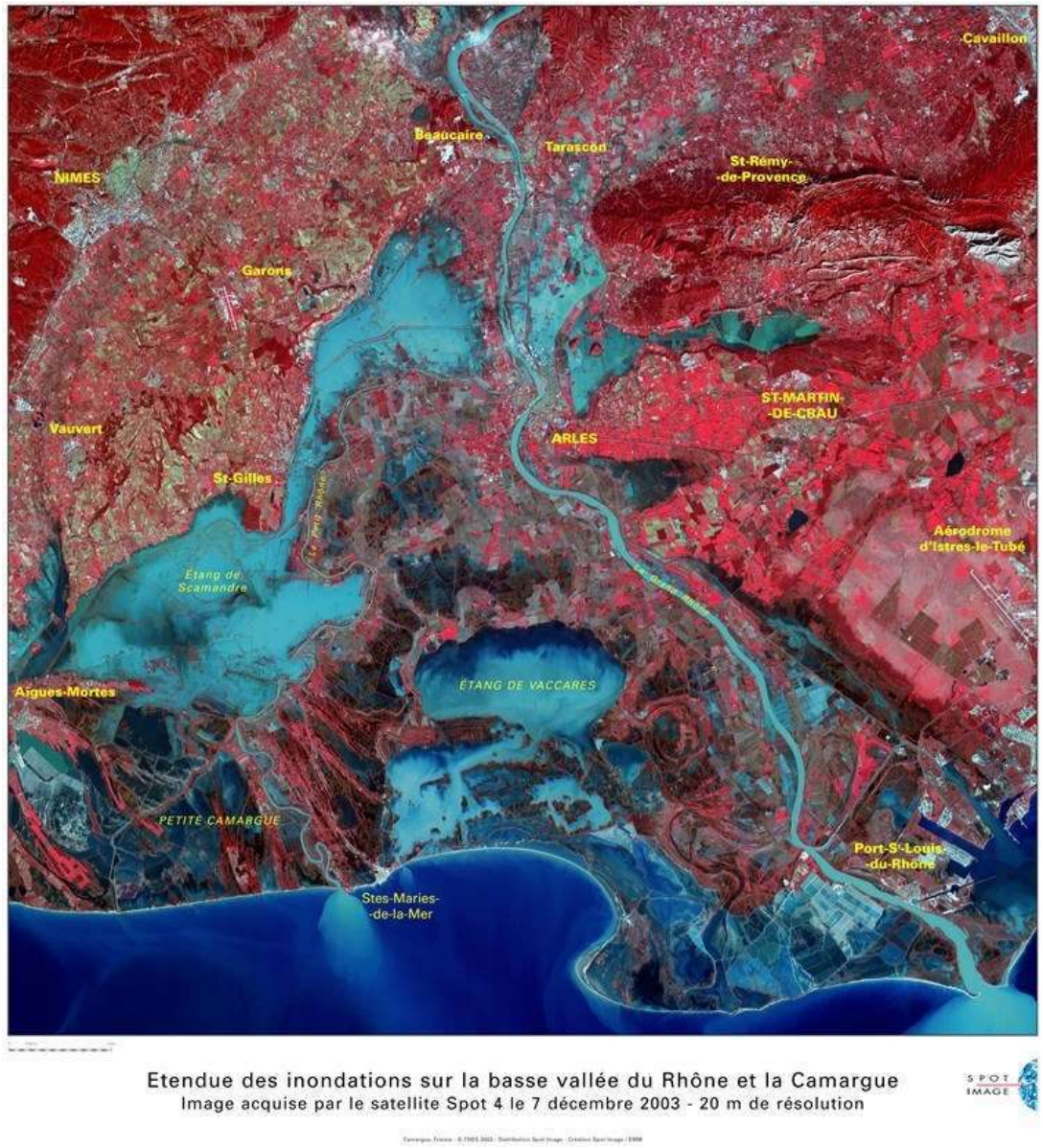


Figure 132. Image SPOT de la crue de décembre 2003 prise le 7 décembre 2003 [A2003 09]

Les figures ci-après, extraites de l'étude de calage précis entre Beaucaire et Arles réalisées par la CNRingénierie [K100] illustrent respectivement :

- Les débits modélisés dans la brèche d'Argence, la brèche de Claire Farine et sur le Petit Rhône à Fourques ;
- Le débit sur le Petit Rhône en amont et en aval d'Argence ainsi que le débit dérivé dans la zone protégée au travers de la brèche d'Argence ;
- Le débit sur le Petit Rhône en amont et en aval de Claire Farine ainsi que le débit dérivé dans la zone protégée au travers de la brèche de Claire Farine;
- Les débits de pointe modélisés aux stations de Beaucaire/Tarascon, Arles et Fourques ;
- La ligne d'eau maximum modélisée sur le Rhône et Petit Rhône lors de la crue de décembre 2003 et la ligne d'eau modélisée pour la même crue en supposant l'absence de brèche ;

- La répartition Petit Rhône/Grand Rhône.

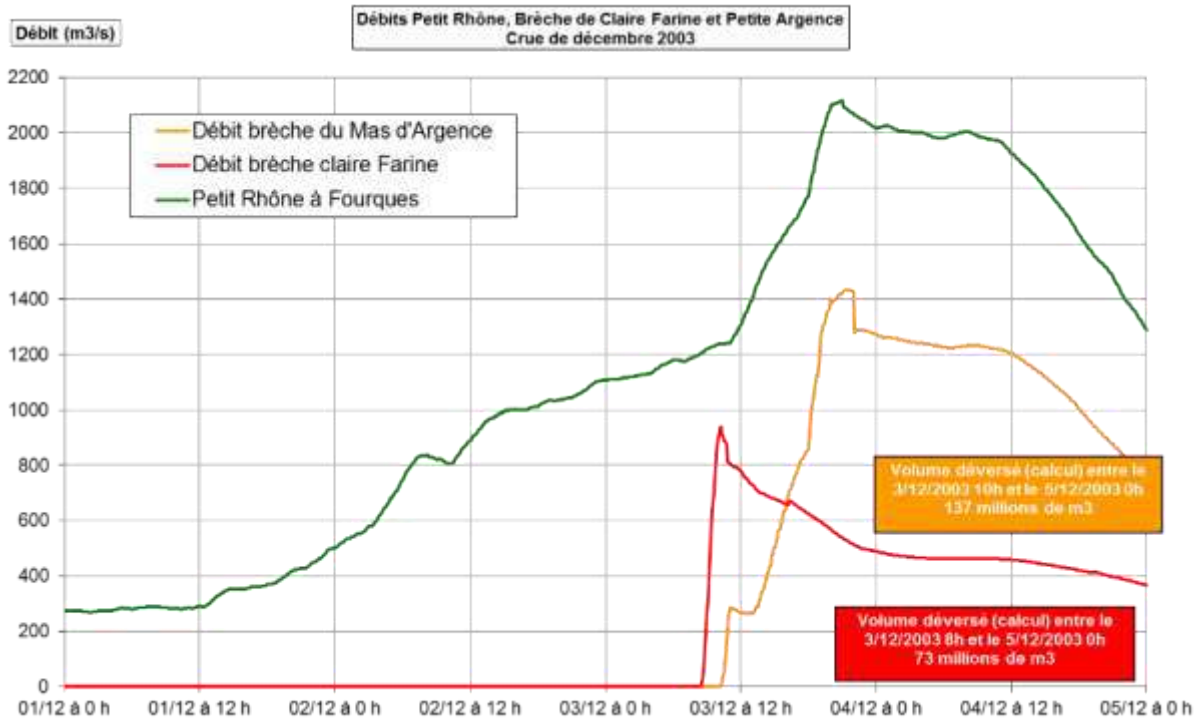


Figure 133. Débits modélisés dans la brèche d'Argence, la brèche de Claire Farine et sur le Petit Rhône à Fourques (source CNR [K100])

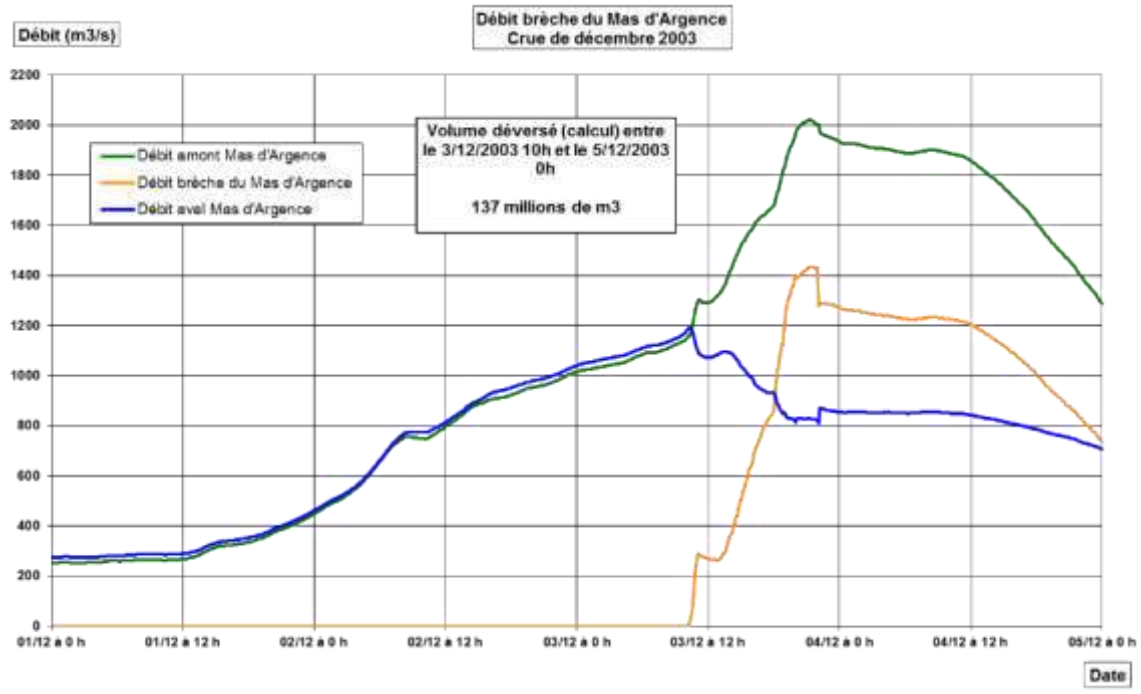


Figure 134. Débit sur le Petit Rhône en amont et en aval d'Argence et dans la brèche d'Argence (source CNRingénierie [K100])

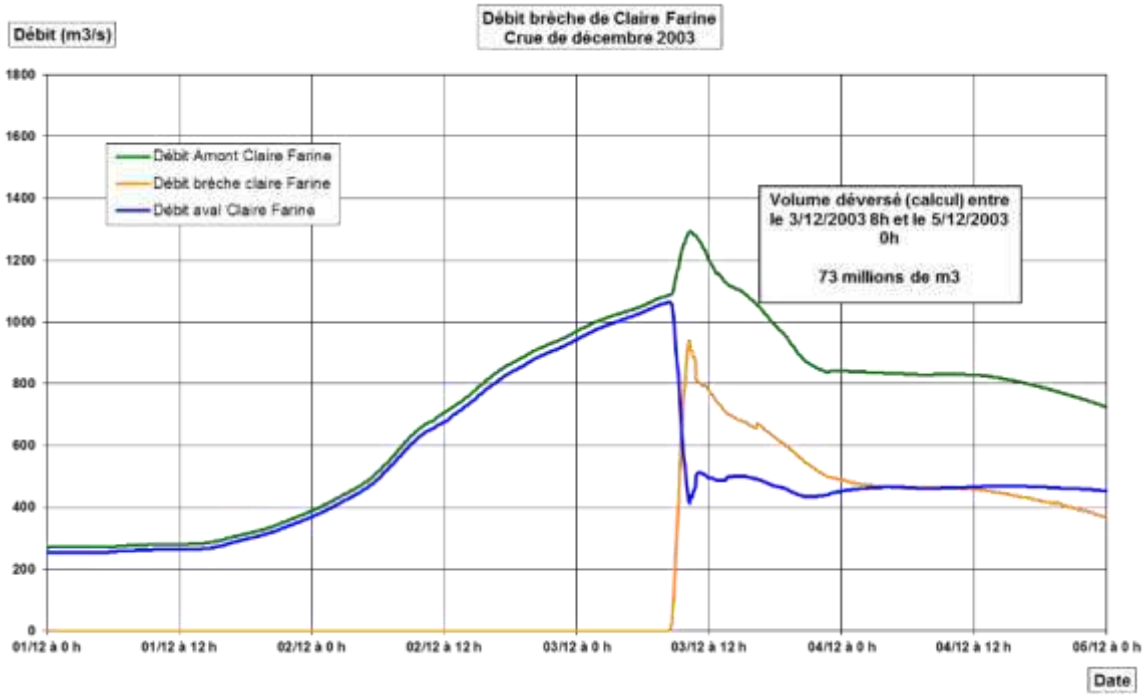


Figure 135. Débit sur le Petit Rhône en amont et en aval de Claire Farine et dans la brèche de Claire Farine (source CNRingénierie [K100])

16.3 BILAN GENERAL DES AUTRES DESORDRES

Sur le périmètre géré, à cette date par le SYMADREM, aucune brèche totale n'a été occasionnée. En revanche de nombreux désordres ont été observés et certains d'entre eux ont fait l'objet d'interventions d'urgence.

Photo 85. Crue de décembre 2003 – Vue sur Trinquetaille (© P. BLOT)

Une main courante a été dressée par le poste de commandement du SYMADREM. Elle est reproduite dans le tableau ci-dessous et complété en ce qui concerne les PR digues.

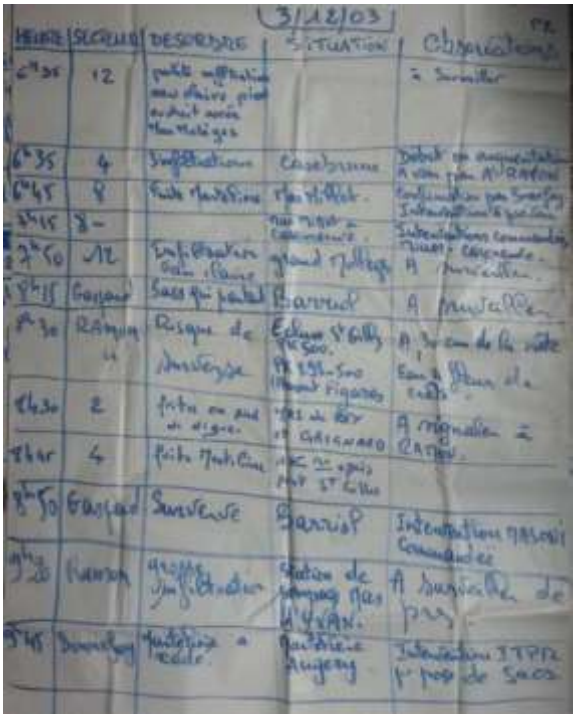


Figure 136. Main courante SYMADREM – journée du 3 décembre 2003

Tableau 36. Crue de décembre 2003 – Main courante du poste de commandement SYMADREM

Date et heure	PR	Code	Type de désordre	Traitement
2/12 – 13h45	PRG 281.5	D1	Infiltration	Vérifié par garde digue
2/12 – 14h00	GRD 315.9	D10	Eboulement enrochements	
2/12 – 14h40	GRD 315.9	D10 D11	Eboulement + érosion talus	A surveiller
2/12 – 17h30	PRG 297 ou 301	D14	Fissure sur digue	A surveiller
2/12 – 17h30	PRG 307	D11	Erosion pied de digue, perré découvert	Intervention entreprise traité
2/12 – 18h35	PRG 299.8	D2	Infiltration ancienne brèche	A traiter rapidement
2/12 – 18h50	GRG 297.5	D5	Défaillance prise d'eau gravitaire les entorches	A voir
2/12 – 19h00	GRD 292.5	D3	Terrier observé mas de terrin	Bouché par un surveillant à surveiller
2/12 – 20h30	PRG 304.2	D1 ou D2	Infiltration ancienne brèche de Lauricet	A vérifier
2/12 – 21h40	GRD 294 GRD 294.5	D5	Martelière du Mas Millet ouverte	
2/12 – 22h30	PRD 322.5 PRD 326	D6	**Surverse généralisée** grande abbaye pin fourcat	

3/12 – 1h45	PRG 305.5	D11	Erosion côté fleuve	Faire confirmer
	PRG 301	D1 ou D2	Infiltration ancienne brèche de case brune	Faire confirmer
3/12 – 3h10	GRD 294 GRD 294.5	D5	Augmentation fuite de la martelière du mas millet	A voir
3/12 – 6h35	GRG 292.3	D1	Infiltration eau claire Au droit accès Mas Mollégès	A surveiller
3/12 – 6h35	PRG 301	D1 ou D2	Augmentation débit d'infiltration ancienne brèche de Casebrune	A surveiller plus fréquemment
3/12 –6h45	GRD 294 GRD 294.5	D5	Confirmation fuite martelière Mas millet	Intervention à prévoir
3./12 – 7h15	GRD 294 PRG 282.4	D5	Martelière mas Millet Martelière mas cazeneuve	Intervention commandée
3/12 –7h50	GRG 292.3	D1	Infiltration eau claire Mas Mollégès	A surveiller
3/12 –8h15	GRG 283.7	D10	Sacs posés en 2002 à Barriol partent	A surveiller
3/12 – 8h30	PRG 300	D6	Risque de surverse (revanche 30 cm)	
3/12 – 8h30	PRG 298,5	D6	Limite surverse	
3/12 – 8h30	PRG 285 A PRG 287	D1	Fuites en pied de digue Mas de Rey et Grignard	A signaler au garde digue
3/12 – 8h45	PRG 298	D5	Fuite martelière après pont de Saint Gille	
3/12 – 8h50	GRG 283.5 GRG 286.5	D6	Surverse Barriol	Intervention commandée
3/12 – 9h20	PRG 285.4	D5	Grosse infiltration station de pompage du Mas d'Yvan	A surveiller
3/12 – 9h45	PRG 287.4	D5	Martelière Mas Augery a cédé	Intervention pose de sacs
3/12 -10h30	298	D3	Trou de blaireau	
3/12 – 11h45	PRG 289.8	D1 ou D2	Infiltration 60 m en amont de la brèche du Mas Molin	A surveiller
3/12 – 11h50	PRG 285.4	D5	Martelière qui fuit par le dessus Mas de Rey	Information garde digue
3/12 – 12h15	PRG 322.74 PRG 323.67	D7	Surverse Petit Abbaye se transforme en brèche	
3/12 – 14h15	GRD 286	D14	Nombreuses fissures station de triquette	Demande d'intervention entreprise
3/12 – 15h20	PRG 301	D1 ou D2	Résurgence 30 m en aval de l'ancienne brèche de Casebrune	A surveiller
3/12 – 15h25	GRG 304.65 GRG 305.30	D1	Infiltration Mas de la Forêt	A surveiller
3/12 – 15h50	GRG 291.78	D5	Surverse sur la martelière Du Mas Mollégès	Intervention urgente
3/12 – 16h30	PRG 307	D5	Fuite sur ancienne prise d'eau d'Albaron	A surveiller

3/12 – 16h35	PRG 322.74 PRG 323.67	D7	Tronçon de digue emporté sur 3 m suite à surverse prolongée	
3/12 – 16h50	GRD	D6	Début surverse encoule du mas millet	Rehausse à effectuer
3/12 – 16h55	GRG 283.5	D1	Infiltration derrière el patio	A surveiller
3/12 -	GRG 292.3	D3	Résurgence Mas Mollégès	Intervention entreprise à surveiller de près
3/12 – 19h15	GRG 309.9	D1	Résurgence tour de parade	A surveiller
3/12 – 22h45	GRD 287 à GRD 287.5	D1	Infiltration	A surveiller
4/12 – 9h30	GRG 287	D1 +D8	Affaissement pied de digue côté terre (mas du Gendarme)	Intervention commandée
4/12 – 10h00	PRG 284	D9	Tassement de la digue	Rechargement en crête commandé
4/12 – 10h15	PRG 285.8	D2	Résurgence en pied de digue Mas d'Yvan	A surveiller régulièrement
4/12 -11h20	PRG 301	D2	Casebrune Fuite au droit de la brèche stable 2ème infiltration ne fuit plus	A surveiller
4/12 – 13h15	GRG 315	D17	Barge qui a rompu ses amarres. L'arrière de la barge frappe les arbres qui protègent la digue Domaine du Grand Peloux	Appel SOGESTRANS pour intervention immédiate
4/12 – 13h35	GRG 315	D17	Information de la mise en route de la procédure pour la barge SOGESTRANS	
4/12 – 13h45		D17	Présence d'un cyprès couché sur la piste d'accès à la digue Mas de la Laune	Information garde digue
4/12 – 14h30	GRG 315	D17	1 pousseur avec amarres est en route pour régler le problème de la barge	
4/12 – 18h35	GRG 314,5		Barge à la dérive Grand Peloux	Opération terminée
4/12 – 23h25	GRG 291,75	D17	Arbre sur la digue Mas de la ville	A dégager par garde digues
5/12 – 2h30	PRG 307,5	D17	Arbre sur la digue Albaron	Prévenir garde digues
5/12 – 6h15	PRG 301	D2	Casebrune +2 fuites en pied de digue	A surveiller
5/12 – 8h30	Halte fluviale Pin Fourcat	D17	Trou dans talus digue côté terre provoqué par la chute d'un arbre	Intervention à prévoir ultérieurement

Certains désordres ne figurent pas sur la main courante. C'est le cas du départ de brèche de l'Armelière qui a été soudain et nécessité une intervention d'urgence. C'est le cas également de certains affouillements externes qui ont été détectés après crue.

16.4 SURVERSE

Le bilan des secteurs en limite de surverse ou en surverse figure dans le tableau ci-dessous

Tableau 37. crue décembre 2003 - bilan général des secteurs en surverse ou limite de surverse

Surverse						
Nom du désordre	**Type désordre**	**PR**	**Mesure prise**	**Initiateur pressenti**	**Code**	**2002**
Mas de Maillan	Surverse encoule	RD 277.30	Apport de matériaux en crête	Point bas localisé	D6	
La Fosse Marignan	Surverse en 5 ou 6 endroits	PRD 303 à 304.5		Dépassement cote de l'ouvrage	D6	
Aval Sylvéréal	Surverse sur 1,5 km	PRD 322,41 PRD 324.54	surveillance	Dépassement cote de l'ouvrage	D6	X
Figares	Limite surverse	PRG 298.20 PRG 298.80	Surveillance			
Mas Badet	Surverse sur 5 m	PRG 326.79	Planche de bois en guise de batardeau	Point bas localisé	D6	X
Mas Millet	Surverse encoule	GRD 294		Point bas localisé	D6	
Chamone	Surverse sur route	GRD 315.13	Mise en œuvre bourrelet	Route faisant office de digue	D6	
Barriol	Surverse sur digue	GRG 283.50 GRG 286.50	Recharge	Dépassement cote ouvrage	D6	
Port-Saint Louis	Limite surverse	GRG 322.00 GRG 322.27				X

Certains de ces désordres sont décrits ci-après.

16.4.1 RD277.30 - Mas de Maillan

Au plus fort de la crue, soit le 3 déc. 2003 à 20 heures d'après le limnigramme de la CNR à la prise BRL, la digue a connu un début de surverse au RD 277,30. Un apport de matériaux en crête sur quelques centimètres d'épaisseur a permis de stopper l'écoulement. Le point bas à l'origine de cette surverse était occasionné par le débouché en crête d'une rampe côté val d'accès à la piste de service (source CEMAGREF [A2003 02]).

Photo 86. Digue Beaucaire-Fourques au droit du Mas de Maillan en 2010

16.4.2 PRD 303.0 à PRD 304.5 - Aval La Fosse

Des surverses sur la digue ont été observées en 5 ou 6 points par le Directeur du SIDR lors du survol en hélicoptère.

16.4.3 PRD 322.41 à PRD 324.54 - Aval Sylvéréal

Ce tronçon de digue avait déjà surversé en septembre 2002 et novembre 2002. L'analyse de la main courante permet de constater que la surverse a débuté le 2 décembre 2003 à 22h30.

L'examen du limnigramme de Petite Abbaye donne une cote de 2.30 m NGF. Pour mémoire, les déversements avaient été constatés en novembre 2002 pour une cote de 2.50 m NGF. L'examen des données de météo-France indique un vent plein nord de 5 m/s à la station des Saintes-Maries-de-la-Mer. Le secteur, où la surverse a été constatée, est exposé au développement de Fetch dans la direction du nord. Il est donc possible que des franchissements de la digue par des vagues aient eu lieu et aient été qualifiés de surverse par les équipes de surveillance.

La lecture de la main courante, croisée avec les données limnimétriques à la station de Petite Abbaye (PK 323.9) donne les informations suivantes au droit de Petite Abbaye (PRD 323.67) :

- 02/12/2003 – 22h30 : début de surverse (2,28 m NGF)
- 03/12/2003 – 12h15 : début d'érosion (2,49 m NGF)
- 03/12/2003 – 16h30 : tronçon de digue emporté sur 3 mètres (2,26 m NGF)

En sachant que le niveau maximum (2,56 m NGF) a été atteint le 3 déc. 2003 vers 9h-10h, soit juste après la brèche de Claire Farine et juste avant celle de Petit Argence.

En retenant l'hypothèse d'un déversement à 2.30 m NGF, la durée de déversement peut être estimée à 16 heures. En retenant une cote de déversement de 2.50 m NGF, cette durée passe à 7 heures.

En tout état de cause, la durée de déversement sur ce tronçon a été sensiblement inférieure à novembre 2002, compte tenu d'une part de la durée de la crue et d'autre part de l'apparition de brèches en amont le 3 décembre 2003 au matin, qui a contribué à faire baisser les niveaux en aval.

D'après le rapport CEMAGREF, les dégâts même s'ils sont importants par endroits révèlent une assez bonne tenue des matériaux à la surverse. Cette tenue de la digue a sans aucun doute été renforcée par la présence de végétation rase, mais résistante (herbes, ronces). La faible hauteur de la lame déversante conjuguée à la faible hauteur de chute a permis également la préservation de l'ouvrage. Aucune brèche n'est à déplorer d'après le Cemagref, ce qui est contraire aux indications de la main courante.

L'observation de la photo en page suivante montre que le talus côté terre a été érodé. On est suivant le glossaire entre le désordre et la brèche partielle.

Figure 137. Crue déc. 2003 – localisation brèche partielle par surverse

Photo 87. Crue déc. 2003 vue aval/amont du site (source CEMAGREF [A2003 03])

16.4.4 PRG 298.20 à PRD 298.80 - Figarès

Ce secteur était en limite de surverse sur près de 600 mètres, dès 8h30 le 3 décembre 2003. Sans les brèches de Claire Farine et Petit Argence, le niveau aurait sensiblement continué d'augmenter et aurait provoqué une surverse généralisée sur ce tronçon de digue.

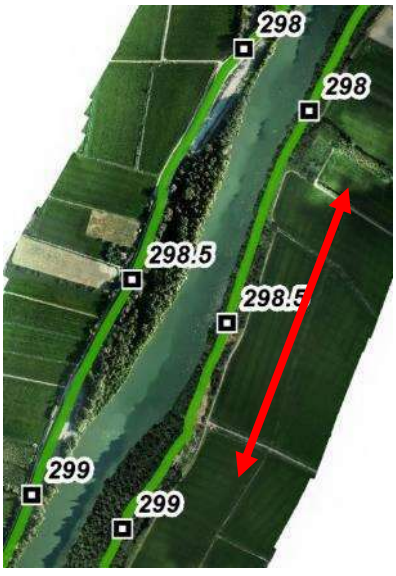


Figure 138. Crue déc. 2003 – Figarès en limite de surverse

16.4.5 GRD 315.00 à GRD 315.18 - Chamone

La protection contre les crues du Rhône est assurée entre le GRD 315.00 et GRG 315.185 par une route communale. En décembre 2003, cette route communale était en limite de surverse. Un bourrelet (démonté après crue) a été réalisé en urgence pour éviter l'inondation de Salin de Giraud par le Rhône.

Figure 139. Localisation et photo de la digue route de Chamone

16.4.6 GRD 292.00 - Mas millet

Au droit de l'encoule dit du Mas Millet, la digue était en limite de surverse. Une rehausse en urgence a été réalisée.

Photo 88. Encoule rehaussée du Mas Millet (CEMAGREF [A2003 03])

16.5 INFILTRATIONS D'EAUX CHARGEES EN FINES ET AFFAISSEMENT DE DIGUES CAUSES PAR ECOULEMENTS INTERNES

Le bilan ci-après recense les infiltrations d'eaux boueuses et les affaissements causés par des écoulements internes.

La distinction entre les infiltrations d'eaux chargées en limons et infiltrations d'eaux claires n'est pas toujours aisée. Les infiltrations d'eaux claires, observées au droit d'anciens terriers, le long de conduites traversantes ou accompagnées de petits trous ou légers affaissements, ont été par prudence qualifiées d'infiltrations d'eaux chargées en fines ; Pour mémoire, nous avons laissé le code D1 correspondant aux infiltrations d'eaux claires.

Quatre affaissements/glissements de digue, directement imputables à des écoulements internes (avec vraisemblablement érosion), ont également été ajoutés au bilan.

En ce qui concerne infiltrations d'eaux boueuses, on notera qu'elle provienne exclusivement d'anciens terriers de fouisseurs, de terriers existants, d'anciennes brèches et pour une brèche d'un paléo-chenal.

Tableau 38. Crue déc. 2003 – Bilan d'eaux chargées en fines

Infiltrations d'eaux chargées en fines						
Nom du désordre	**Type désordre**	**PR**	**Mesure prise**	**Initiateur pressenti**	**Code**	**2002**
Petit Rhône Rive Gauche						
Mas de Rey	Infiltration pied de digue avec résurgence limons	PRG 284.97 PRG 285.17	Laitier côté terre	Anciens terriers	D2	
Mas d'Yvan	Infiltrations pied de digue avec résurgence limons	PRG 285.74 PRG 285.88	Surveillance Mesures prise en 2002	Brèche 1843 Brèche 1856	D2	X
Beaujeu de Castres	Infiltrations et fissures en crête en 2002 Fissure évolutive en 2003	PRG 293.51 PRG 293.97		Anciens terriers	D3 D14	X
Figarès	Amorce renard	PRG 298.70 PRG 299.81	Surveillance	Erosion contact brèche 1993	D2	
La Galante	Infiltration ancienne brèche	PRG 299.81	Surveillance	Erosion contact Brèche 1993	D2	X
Lauricet	Infiltration ancienne brèche	PRG 304.36	Surveillance	Erosion contact Brèche 1994	D2	X
Albaron	Infiltration pied de digue	PRG 307.40		Ancien bras du Rhône Brèche 1856	D2	X
Grand Rhône Rive Droite						
Mas Terrin	Terrier de blaireau traversant avec eau affleurante prête à sortir	GRD 292.47	Surveillance	Terrier Blaireau	D3	

	côté terre					
Mas Chartrousse	Terrier de blaireau traversant avec eau affleurante prête à sortir côté terre	GRD 311.22	Surveillance	Terrier blaireau	D3	
Chamone	Présence blaireau	GRD 315.27 GRD 315.34	Surveillance	Terrier blaireau	D3	X
Grand Rhône Rive Gauche						
Grand Mollégès	Ecoulement d'eau boueuse (celle du Rhône) dans terrier de lapin	GRG 292.30	Argile talus côté terre mettant en pression l'écoulement Intervention interrompue	Terrier de lapin (15 cm)	D3	
Aval Mas Thibert	Infiltrations	GRG 303.25	Surveillance	Anc. Brèche d'après garde digues Digue perreyée 1876	D1 D2	
Mas de la Forêt	Infiltrations eaux claires	GRG 304.65 GRG 305.30	Tvx 2ème urg. Banquette drainante côté val	anciens trous de blaireaux Digue perreyée 1876	D1 D3	
Tour de parade	Résurgences importantes Petits trous et légers affaissements en milieu de talus	GRG 309.90	Surveillance	**Ancienne brèche 1993 ?**	D1 D8 D18	
Grande Porcelette	Infiltrations	GRG 311.75	Surveillance	Ancien bras + Eros.berge + Brèche 1856	D1 D2	
Mas Antonelle	Infiltrations	GRG 313.50 GRG 313.80	Pose d'une tôle talus côté fleuve	anciens terriers de lapins Digue perreyée 1876	D2 D3	

En ce qui concerne les 4 affaissements de digue, deux sont imputables d'anciens terriers, un à une ancienne racine d'arbres et un dû à l'écoulement d'eau dans une veine sableuse (veine sableuse identifiée lors des travaux de confortement en 2015).

Tableau 39. Crue déc. 2003 – Bilan des affaissements de digue dû à des écoulements internes

Affaissement digue avec écoulement interne						
Nom du désordre	**Type désordre**	**PR**	**Mesure prise**	**Initiateur pressenti**	**Code**	**2002**
Petit Rhône Rive Gauche						
Mas de Vert	Affaissement crête le 4/12/2003 à 10h	PRG 284.97 PRG 285.17	Recharge en crête	Anciens terriers blaireaux	D9 D3	X
Grand Rhône Rive Droite						
Chamone	Erosion + affaissement	GRD 315.00		Anciens terriers blaireaux	D3 D9	X
Grand Rhône Rive Gauche						
Mas de la Vigne	Infiltration + glissement talus côté terre	GRG 287.01	Reconstruction digue après crue	Veine de sable découverte pdt tvx 2015	D1 ? D2 ? D8	
Bois-François	Affaissement	GRG 318.00 GRG 320.00	Colmatage	Terriers blaireaux	D3 D9	

Certains désordres sont décrits ci-après

16.5.1 PRG 284.97 à 285.17 et 285.74 à 285.88 et 285.97 à 286.18 – Infiltrations du Mas de Vert au Mas Médaille

Ce secteur souffre de désordres chroniques déjà observés pour certains lors des crues de 1993 et 1994 et également en novembre 2002. Le remblai se tasse dû à la présence d'anciens terriers de blaireaux et des infiltrations avec résurgence en pied de talus côté terre sont constatées. La présence préoccupante d'eaux limoneuses avait même été constatée au droit des PRG 285.8 et 286.0. Suite à la crue de novembre 2002 des travaux d'urgence consistant à réaliser côté terre une recharge en laitier et parfois côté fleuve une recharge en matériaux argileux, ont été réalisés.

Figure 140. Crue déc. 2003 : infiltrations d'eau boueuses du Mas de Vert au Mas Médaille

Photo 89. Crue déc. 2003 – Infiltrations PRG 284.97 à 285.17

En décembre 2003, une résurgence avec entraînement de limons a été observée et s'explique par l'absence de filtre entre la recharge en laitier et le corps de digue. Le Cemagref avait préconisé la reprise de la digue.

Photo 90. Crue déc. 2003 – Infiltrations d'eaux boueuses au droit du Mas d'Yvan malgré travaux 2002 (PRG 286.0)

16.5.2 PRG 293.51 à 293.97 – Infiltrations et fissuration Beaujeu de Castres

Des infiltrations et résurgences importantes sont apparues lors de la crue de novembre 2002 en milieu de talus (interface laitier/limon ?) entre le PRG 293.51 à 293.77. Pour y remédier, des camions de limons argileux ont été déversés en crête et régalés à la pelle mécanique contre le talus côté fleuve. Les opérations se sont déroulées talus immergés. Lors de la visite post-crue 2003, la fissure en crête d'ouvrage qui était apparue au lendemain de nov. 2002 (PRG 293.88 à 293.97) s'était élargie.

Photo 91. Crue déc. 2003 - fissuration en crête de digue (début 2004)

16.5.3 PRG 298.70 à 298.81 – Amorce renard transition brèche de Figarès

Au droit de la réfection de l'ancienne brèche de Figarès, une amorce de renard hydraulique s'est produite à la jonction entre la brèche réparée et l'ancien remblai. Il est très vraisemblable que le renard ait été initié par érosion de contact entre la digue d'origine en limons et la réparation de 1993 en gros enrochements très perméables.

Crue déc. 2003 – Amorce de renard au droit de l'ancienne brèche de Figarès.

16.5.4 GRD 292.47 – terriers de blaireaux traversants avec eau affleurante en sortie côté terre

Au droit du Mas Terrin, 2 terriers traversants de blaireaux situés à 50 cm au-dessus du TN Amont étaient prêt à s'écouler (niveau d'eau affleurant). Les brèches sur le Petit Rhône en créant un appel de débit ont permis d'abaisser les niveaux d'eau de 20 cm, ce qui a vraisemblablement permis d'éviter qu'une érosion de conduit ne se produise.

16.5.5 GRD 308.89 et 311.22 – terriers de blaireaux traversants avec eau affleurante en sortie côté terre

Des terriers de blaireaux traversants avaient nécessité une intervention d'urgence au Mas d'Auphan (GRD 308.89) en novembre 2002. En décembre 2003, des terriers traversants de blaireaux (GRD 311.22) étaient prêt à s'écouler (niveau d'eau affleurant). Seule la baisse des niveaux liée à l'appel de débit créer par les brèches du Petit Rhône a permis d'éviter qu'une érosion de conduit ne se produise. Par ailleurs le CEMAGREF avait détecté également l'apparition de galerie de blaireaux lors de sa visite post-crue en décembre 2004. Ces terriers ont été purgés.

Photo 92. Mas d'Auphan – terriers blaireaux

16.5.6 GRD 315.27 à 315.34 – Terriers blaireaux Chamone

Ce secteur avait l'objet d'une intervention d'urgence en novembre 2002. En décembre 2003, aucune intervention n'a été nécessaire, mais lors de la visite du Cemagref en fév. 2004, les blaireaux avaient reconstruit leurs terriers.

Photo 93. Terriers de blaireaux à Chamone en 2004

16.5.7 GRG 287.01 – Affaissement Mas de la vigne

Cet affaissement s'est produit au droit du Mas de la Vigne (GRG 287.01) entre le Mas de la Brèche plus au nord et Mas des Gendarmes plus au Sud. Ce glissement circulaire de pied de talus est dû à des résurgences visibles en pied de talus ; aggravé par la présence d'un fossé approfondi quelque temps avant la crue et la raideur des talus (34 °).

Photo 94. Mas de la Vigne (GRG 287.01) – Affaissement talus côté terre du à infiltrations (CEMAGREF [A2003 03])

Les travaux réalisés après crue ont consisté à déplacer le fossé et à reprendre le talus.

Photo 95. Mas de la Vigne (GRG 297.01) – Reprise talus après crue

Des travaux de confortement de Prends-té-Garde à Grand Mollégès sont actuellement en cours. Lors des opérations de terrassements une veine de sable propre quasiment traversante d'une épaisseur de50 cm a été localisée au droit de l'affaissement. Elle est très probablement à l'origine des écoulements ayant provoqué l'affaissement de la digue.

Une brèche s'est produite à cet endroit en 1840. Cette veine de sable se situant à l'interface digue/fondation, il est possible que cette couche de sable ait été déposée par la brèche et n'ait pas été purgée lors de la reconstruction de la digue.

Photo 96. Veine de sable traversant la digue au droit du Mas de la vigne (photo 2015)

16.5.8 GRG 292.30 – Infiltrations terrier de lapins

Au droit du Mas de Grand Mollégès (GRG 292.30), un terrier traversant de lapin d'un diamètre de 15 cm a commencé à s'écouler en pied de digue le 3 décembre 2003 vers 6h30. L'eau était claire suivant les informations figurant dans la main courante. D'après le garde digues (entretien en 2014) l'eau était boueuse mais de la même couleur que l'eau du Rhône ; d'après lui, il n'y avait pas d'érosion. Le niveau et le débit continuant d'augmenter, une intervention d'urgence a été commandée le 3 décembre 2003 à 19h50. De l'argile prélevée à proximité a été mise en œuvre sur le talus côté terre sans succès du fait de la montée en pression au moment de la mise en œuvre (Hauteur de charge supérieure à 2 m). Par la suite, et compte tenu apparemment de l'absence d'érosion du conduit, il a été décidé d'abandonner l'intervention d'urgence et de surveiller l'écoulement dans le conduit. Ce dernier a cessé dès que le niveau est redescendu en dessous de l'exutoire côté fleuve.

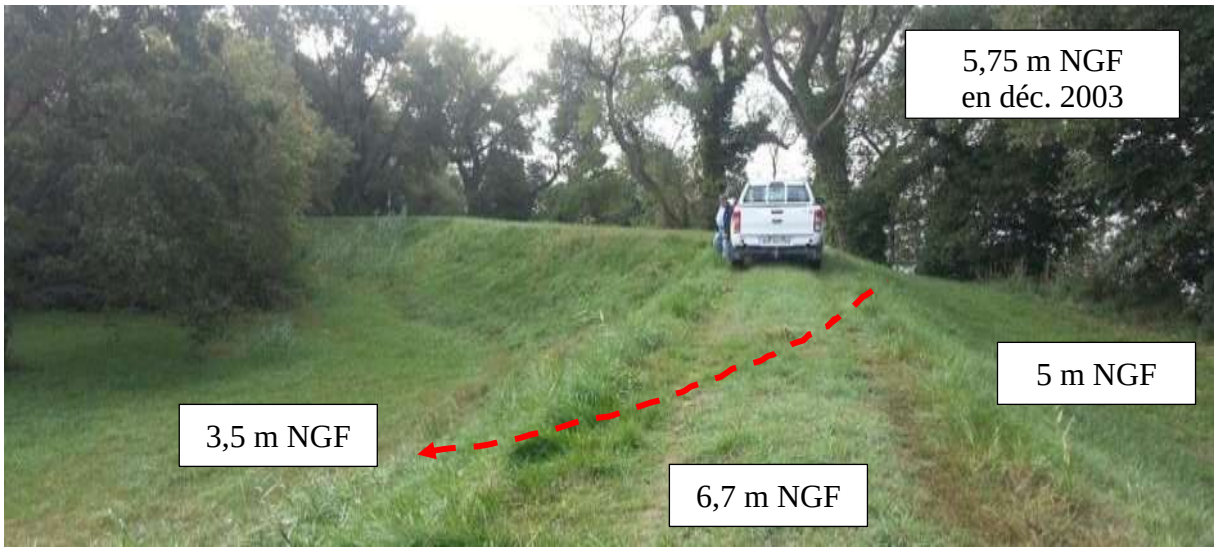


Photo 97. Mas de Grand Mollégès (GRG 292.30) – Ecoulement dans terrier de lapin Φ = 15 cm

L'interpolation des limnigrammes situés en amont (Arles) et en aval (Grand Boisviel) donne une cote de 5.34 m NGF le 3/12/2003 à 6h et une cote de 5.75 m NGF à 19 h au moment de l'intervention, heure qui correspond au pic de crue dans ce secteur du fleuve. Le niveau du fleuve est redescendu sous 5.34 m NGF le 4/12/2003 à 15 heures. Le terrier a débité pendant environ 34 heures.

En supposant que le terrier était calé à la cote 5.3 m NGF côté fleuve et 3,5 m NGF côté terre à son exutoire et que le fleuve soit monté jusqu'à 5,75 m NGF. La charge en pied de digue était de 2,25 m et la longueur du terrier d'environ 13 m, ce qui donne un gradient moyen de 0,173. Suivant les formules de Bonelli et en tenant compte des pertes de charge singulière, on obtient une contrainte de cisaillement d'environ 55 Pa. L'érosion de conduit n'ayant pas été observée, on suppose que la contrainte critique du matériau était supérieure.
Dans le cadre des travaux de renforcement, des essais HET ont été réalisés sur des échantillons intacts en fondation ou remaniés à 95 % de l'OPN pour les matériaux de la digue actuelle destinés à réemploi. 7 essais ont été réalisés : 3 essais ont donné des contraintes critiques respectivement de 48.5, 50 et 50 Pa et 4 essais ont donné des contraintes critiques de 201, 285, 485 et 850 Pa, ce qui corrobore avec le calcul mené.

La brèche a donc pu être évitée grâce à la bonne résistance des matériaux constituant la digue.

16.5.9 GRG 303.25 et 304.65 à 305.30 – Infiltrations Mas Thibert et Mas de la Forêt

Sur ce secteur, des résurgences en pied de talus sont régulièrement observées. D'après l'entretien mené avec le garde-digues en 2015, il pourrait s'agir en ce qui concerne le GRG 303.25 d'une ancienne brèche. Sur la carte de 1876, une digue perreyée sur 457 m est indiquée entre le GRG 303,25 et 303,75, ce qui corrobore les dires du garde-digues.
En ce qui concerne le GRG 304.65 à 305.30, d'anciens terriers de blaireaux pourraient être la cause de ces infiltrations. Il est à noter que la carte de 1876 localise la présence de digues perreyées du GRG 304.75 au GRG 305.25, ce qui atteste de la présence de brèches, désordres ou infiltrations par le passé.

Photo 98. Mas Thibert (GRG 303.25) et Mas de la Forêt (GRG 304.65 à 305.30) – Résurgences en pied de talus (CEMAGREF [A2003 03])

Des travaux de 2ème urgence, du GRG 304.65 à 305.30, consistant à réaliser une banquette drainante en pied de digue ont été réalisés en 2006. Ils ont été complétés en 2010 par des travaux de carrossabilité en crête de digue. Aucune opération n'est à ce jour programmée dans le cadre du Plan Rhône sur ce tronçon.

Photo 99. Mas de la Forêt (GRG 304.65 à 305.30) – Banquette en laitier réalisée en 2006

7.1.1.1. GRG 309.9. – Infiltrations Tour Parade

Ce secteur présente d'importantes résurgences en pied de talus. Des petits trous et de légers affaissements sont visibles en milieu de talus.

Ces infiltrations semblent se situer au droit de la brèche partielle de 1993 pour laquelle nous ne disposons pas d'informations.

Photo 100. Tour Parade (GRG 309.90) – Résurgences importantes en pied de digue (CEMAGREF [A2003 03])

Des travaux de carrossabilité en crête de digue ont été réalisés en 2010. Aucune opération n'est à ce jour programmée dans le cadre du Plan Rhône sur ce tronçon.

Photo 101. Tour Parade (GRG 309.90) – Carrossabilité réalisée en 2010

16.5.10 GRG 311.75 – Infiltrations Grand Porcelette

D'après le Cemagref [A2003 03], des résurgences avec présence signalée de matériaux fins entraînés par les eaux de fuite, ont été observées. En 2015, le garde-digues évoque des infiltrations d'eaux claires.

Ce secteur est situé au droit d'un ancien bras du Rhône (lieu-dit du « bras mort ») et légèrement plus au sud de la brèche partielle de Parade de 1856 (sans inondation).

Des travaux de carrossabilité en crête de digue ont été réalisés en 2010. Aucune opération n'est à ce jour programmée dans le cadre du Plan Rhône sur ce tronçon.

Photo 102. Grand Porcelette (GRG 311,75) – Infiltrations d'eaux boueuses ou claires (source CEMAGREF [A2003 03] – SYMADREM 2014)

16.5.11 GRG 313.50 à 313.80 – Infiltrations Mas Antonelle

Ce secteur présente des infiltrations à travers le remblai reconnu sableux. Deux amorces de renard dans d'anciens terriers de blaireaux ont été comblées côté fleuve par la mise en œuvre d'une tôle. Une digue perreyée juste en amont du GRG 313.5 figure sur la carte de 1876.

Photo 103. Mas Antonelle (GRG 313.50 à 313.80) – Amorces renards (© CEMAGREF [A2003 03])

16.5.12 GRG 318.00 à 320.00

Ce secteur a présenté des instabilités du remblai dues à la présence d'anciens terriers. Un affaissement (Cf. photos ci-dessous) de la crête ainsi que des petits effondrements du talus en sont les indices (source Cemagref). Ce secteur a fait l'objet de travaux de confortement à la cote identique en 2006 et doit être mis à la cote Q_{1000}+50 cm dans le cadre du Plan Rhône (travaux 2018-2020).

Photo 104. Affaissement de la crête du à d'anciens terriers / débouchés de terriers traités en urgence (© CEMAGREF [A2003 03])

16.6 INFILTRATIONS D'EAUX CLAIRES

Le bilan des infiltrations d'eaux claires figurent ci-après

Tableau 40. Crue déc. 2003 – Bilan des infiltrations d'eaux claires

Infiltrations d'eaux claires						
Nom du désordre	**Type désordre**	**PR**	**Type d'intervention d'urgence**	**Initiateur**	**Code**	**2002**
Trou de Fourques	Infiltration fosse d'emprunt	PRG 281.43 PRG 281.75	Comblement fosse d'emprunt	Brèche 1856 Ancien bras		X
Mas de Rey	Infiltrations eaux claires dès présence d'eaux dans les caisses d'emprunt côté fleuve	PRG 285.17	Surveillance	Couche perméable fondation ? Ancienne Brèche ?	D1	
A54	Infiltration transition digue/autoroute	PRG 288.47	Surveillance	Transition	D1	
Aval A54	Infiltration aval A54	PRG 288.47 PRG 289.88	surveillance	??	D1	
Station Sénebier	Infiltration à 7 m du pied de digue	PRG 319.19	Surveillance	Prises d'eau à proximité Ouvrage masqué potentiel	D1 **D4**	
Mas de Jonquières	Infiltration sur 20 m	PRG 323.02	Surveillance	?	D1	
Astouin	Infiltrations	PRG 324.76		?	D1	
Icard	Infiltrations	PRG 329.36	Surveillance			
Grand Rhône Rive Gauche						
Patio	Infiltration	GRG 284.7			D1	
Grand Passon	Infiltrations en fondation	GRG 312.50 GRG 313.50	Surveillance	Anciennes racines d'arbres Digue perreyée 1876	D1	
Vauban	Infiltrations	GRG 320.75 GRG 321.25	Surveillance	Fondation sableuse ?	D1	
Vauban	Infiltrations	GRG 321.60 GRG 321.75	Surveillance		D1	

16.6.1 PRG 281.00 – Infiltration Trou de Fourques

Des infiltrations d'eaux claires ont été observées lors des crues de 1993 et 1994. Ils ont donné lieu en 1997 à un programme de confortement consistant à réaliser une recharge étanche côté fleuve et en la mise en œuvre d'un filtre et d'une recharge drainante sur le talus côté terre.

Le rapport du CEMAGREF fait mention d'infiltrations en 2002 et 2003. Il s'agit d'une fosse d'emprunt en pied de digue, qui a tendance à se remplir par infiltration et/ou par remontée de nappe. Des travaux ont été entrepris en 2003 consistant à remblayer la caisse d'emprunt et à créer un fossé de collecte (Cf. photo ci-dessous).

L'entretien mené avec le garde digues en 2014 ne fait pas mention d'infiltrations. On notera que ce lieu-dit est localisé au droit d'un ancien bras du Rhône et d'une brèche de 1856, d'où sans doute la toponymie de trou de Fourques.

Photo 105. Infiltrations trou de Fourques (© CEMAGREF [A2003 03])

16.6.2 PRG 323.02 – Infiltrations Mas de Jonquière

Des résurgences ont été observées en pied de digue côté terre sur 20 mètres. Sur ce tronçon, il n'y a jamais d'arbres.

Photo 106. Crue déc. 2003 – Infiltrations Mas de Jonquières (© CEMAGREF [A2003 03])

16.6.3 PRG 324.76 – Infiltrations Mas d'Astouin

Des résurgences ont été observées en pied de digue.

Photo 107. Infiltration Mas d'Astouin (© CEMAGREF [A2003 03])

16.6.4 PRG 329.36 – Infiltrations Mas d'Icard

Une résurgence est apparue en pied de talus, d'un diamètre de quelques centimètres. Elle a toujours coulé clair.

Photo 108. Infiltrations Mas d'Icard (© CEMAGREF [A2003 03])

16.6.5 GRG 284.0 – Infiltrations Patio Barriol (eaux claires)

Ce secteur a été le siège d'infiltrations (résurgences visibles en pied de taus côté terre). D'après le Cemagref, elles seraient dues à l'étroitesse du profil et la perméabilité des matériaux du corps de digue.

Des travaux de confortement à la cote identique consistant à réaliser un masque étanche côté fleuve et un engraissement du talus avec drain horizontal côté terre ont été réalisés en 2006/2007. Des travaux de mise à la cote Q1000+50 cm ont été réalisés en 2015. Ils ont consisté en un rechargement de 30 à 50 cm de GNT en crête de digue.

Photo 109. Patio (GRG 284.70) – Infiltrations (résurgences visibles en pied de talus côté terre (CEMAGREF [A2003 03])

16.6.6 GRG 312.50 à 313.50 – Infiltrations Grand Passon

Des résurgences d'eaux claires plus ou moins importantes ont été observées en pied de talus et en fondation notamment au GRG 312.8. L'entretien 2014 avec le garde-digues a permis de qualifier le diamètre de ces infiltrations de 1 à 2 cm, qui pourraient provenir d'anciennes racines d'arbres. Une digue perreyée entre le GRG 312.5 et 312.75 ainsi qu'entre le GRG 313.25 et 313.50 figure sur la carte de 1876 attestant de brèches, désordres ou infiltrations excessives passées.

Photo 110. Grand Passon (GRG 312,80) – Infiltrations d'eaux claires

On notera la présence d'un décroché dans le tracé de la digue pouvant être un indicateur de désordre passé. Ce tronçon du fleuve est en érosion qui serait assez récente d'après le garde digues, ce qui pourrait expliquer la mise en contact d'une veine sableuse avec le fleuve.

Des travaux de carrossabilité en crête de digue ont été réalisés en 2010. Aucune opération n'est à ce jour programmée dans le cadre du Plan Rhône sur ce tronçon.

16.6.7 GRG 320.75 à 321.25 et 321.60 à 321.75 – Infiltrations Vauban

Des infiltrations ont été constatées en pied aval lors des crues de 2002 et 2003. Ce secteur a fait l'objet de travaux de confortement à la cote identique en 2004 et doit être mis à la cote Q_{1000}+50 cm dans le cadre du Plan Rhône (travaux 2018-2020).

GRG 322.50 – Digue Port-Saint-Louis en 2004

16.7 AFFOUILLEMENT EXTERNE ET GLISSEMENT DE BERGES

Le bilan des désordres dont l'initiateur est l'affouillement externe figure ci-dessous.

Tableau 41. Crue déc. 2003 – Bilan des affouillements externes

Affouillement externe						
Nom du désordre	**Type désordre**	**PR**	**Mesure prise**	**Initiateur pressenti**	**Code**	**2002**
La Fosse	Glissement berge à la décrue	PRD 302.30 PRD 302.56	Engraissement côté terre après crue	Extrado Fosse en pied	D11 D10	
Pradeaux	Glissement de berge à la décrue	PRD 313.00 PRD 313.05	Engraissement côté terre après crue	Extrado Rétrecissement lit Fosse en pied	D11 D10	
Aval Sylvéréal	Erosion de berge	PRD 323.04 PRD 323.16	Enrochements après crue	Absence de ségonnal	D11 D10	
Médaille	Glissement après crue suite à affouillement	PRG 285.92 PRG 285.97	Enrochements après crue	Rétrécissement Absence panneaux Pente hydraulique liée à la brèche en aval	D11 D10	
Rigaudon	Erosion de berge	PRG 295.20 PRG 295.29	Enrochements après crue	Extrado Rétrécissement Fosse en pied Absence panneaux	D11 D10	
Station Fadaise	Erosion constatée en 2ème partie de crue	PRG 330.43 PRG 330.52	Enrochements après crue	Extrados Fosse en pied de digue	D11 D10	
Chamone	Erosion digue	GRD 314.5 à 315	Enrochements après crue	Extrado Fosse en pied	D11 D10	
Eglise Barcarin	Erosion digue	GRD 315.89	Enrochements après crue	Extrado Fosse en pied	D11 D10	
Mas antonelle	Erosion	GRG 313.50	Engraissement talus côté aval Reprise talus côté fleuve	Extrado		
Grand Peloux	Erosion	GRG 314.20 GRG 315.00	Surveillance	Extrado	D11 D10	
Barcarin	Erosion	GRG 316.70		Fosse	D11	

16.7.1 PRD 302.30 à PRD 302.56 – La Fosse

La berge attenante à la digue du Petit Rhône rive droite a subi un glissement de berge sur plus de 250 mètres à la décrue. Ce dernier est très probablement dû à la situation de la berge en extrado du fleuve et à la présence d'une fosse d'érosion en pied de berge.

Figure 141. Localis. du glissement de berges au droit de la Fosse et bathymétrie VNF de 2004

L'évolution morphodynamique dans cette partie du fleuve est assez forte depuis 1876 comme le montre ce différentiel bathymétrique extrait de la thèse de G. RACCASI [M0001]. Sur la carte de 1876 figure une digue entièrement perreyée avec une protection de berges. Compte tenu de l'absence de sabot de ces protections et de l'approfondissement en pied de berges, il est fort probable que les enrochements aient glissé progressivement et n'aient plus joué leur rôle de protection entraînant le glissement de berge.

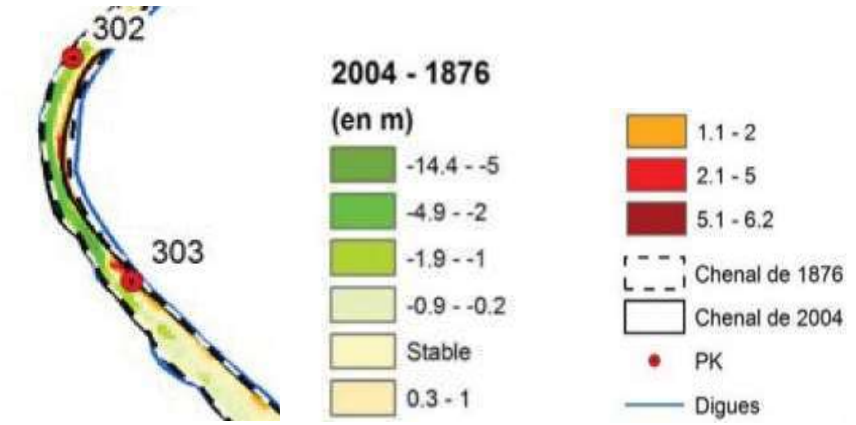


Figure 142. Evolution bathymétrique 1876 – 2004 (G. RACCASI [M0001])

Photo 111. Crue déc. 2003 – glissement de berges au droit du mas de la Fosse

Des travaux d'engraissement du talus côté terre ont été réalisés post-crue et renforcés en 2010.

Dans le cadre de l'opération de renforcement est décorsetage limité des digues du Petit Rhône, il est prévu le recul de la digue.

16.7.2 PRD 313.00 à PRD 313.05 – Les Pradeaux

La berge attenante à la digue du Petit Rhône rive droite a subi un glissement de berge sur plus de 100 mètres à la décrue. La situation de la berge en extrémité aval d'extrado a pu jouer un rôle mais c'est surtout la présence d'une fosse d'érosion en pied de berge qui semble être la cause principale. Cette dernière s'explique par le rétrécissement du lit du fleuve provoquant l'accélération des vitesses en crue.

Figure 143. Crue déc. 2003 : glissement de berges au droit des Pradeaux

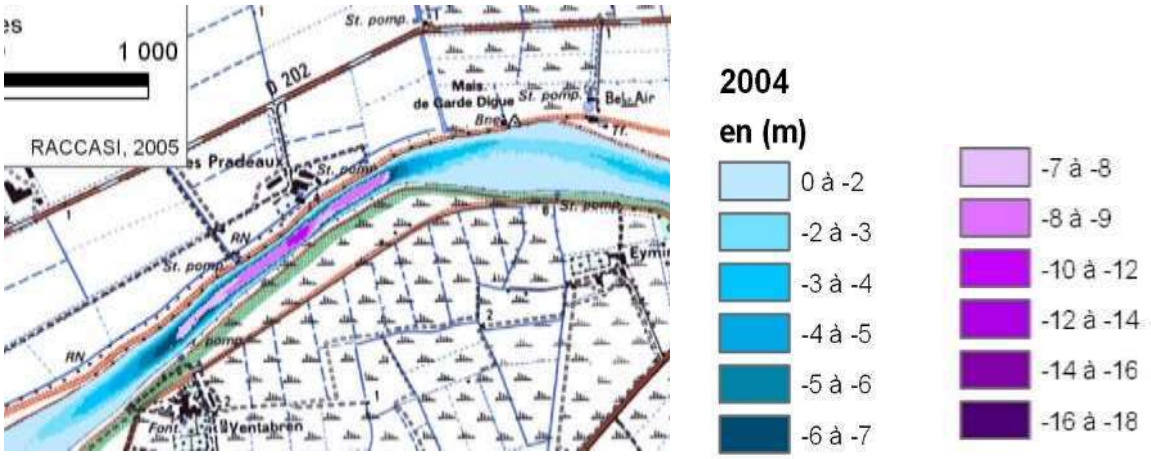


Figure 144. Bathymétrie VNF de 2004

Les deux photos extraites du rapport du Cemagref permettent de voir l'ampleur des dégâts.

Photo 112. Crue déc. 2003 – Glissement de berges Pradeaux (© Cemagref [A2003 02])

Photo 113. Crue déc. 2003 – Glissement de berges Pradeaux (© Cemagref [A2003 02])

L'évolution morphodynamique dans cette partie du fleuve est assez forte depuis 1876 comme le montre ce différentiel bathymétrique extrait de la thèse de G. RACCASI [M0001]. Sur la carte de 1876 figure une berge entièrement perreyée. Compte tenu de l'absence de sabot de ces protections et de l'approfondissement en pied de berges, il est fort probable que le pavage ait glissé progressivement et n'ait plus joué son rôle de protection entraînant le glissement de berge.

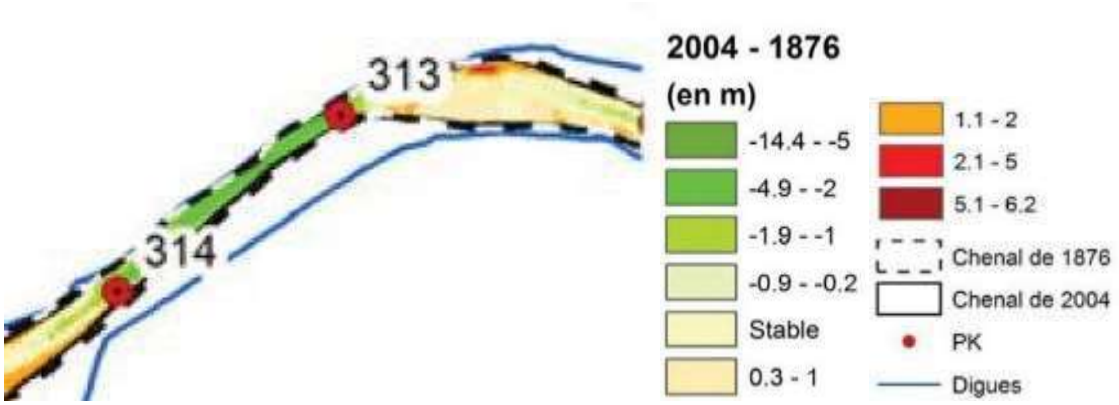


Figure 145. Evolution bathymétrique 1876 – 2004 (G. RACCASI [M0001])

7.1.1.2. PRD 323.04 à PRD 323.13 – Aval Sylvéréal

Un glissement de berge post-crue a été observé sur une centaine de mètres

Figure 146. Crue déc. 2003 – localisation érosion de berge et photo Cemagref [A2003 03]

Depuis la digue a été rendue carrossable. Des travaux de confortement sont prévus dans l'opération de renforcement et décorsetage limité des digues du Petit Rhône

Photo 114. Digue PRD 323.0 à 323.1 en 2014

16.7.3 PRG 285.92 à 285.97 – Glissement de berges – Mas Médaille

Trois semaines après la crue de décembre 2003, une large partie de la berge et du pied de talus de la digue a glissé sur 50 ml. Ce glissement de berge a vraisemblablement été initié par un affouillement du fond lié aux facteurs cumulés suivants (rétrécissement fleuve, absence de panneaux de fond, léger extrado, absence de ségonnal).

Figure 147. Crue déc. 2003 – glissement de berges suite à affouillement

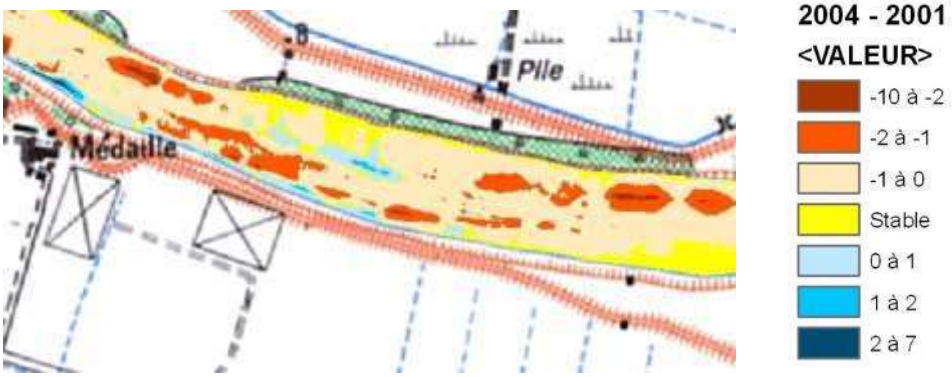


Figure 148. Evolution bathymétrique entre 2001 et 2004

Sur la carte de 1876 figure une digue entièrement perreyée avec une protection de berges. Compte tenu de l'absence de sabot de ces protections historiques et de l'approfondissement en pied de berges depuis 1876, il est fort probable que les enrochements aient glissé progressivement et n'aient plus joué leur rôle de protection entraînant le glissement de berge.

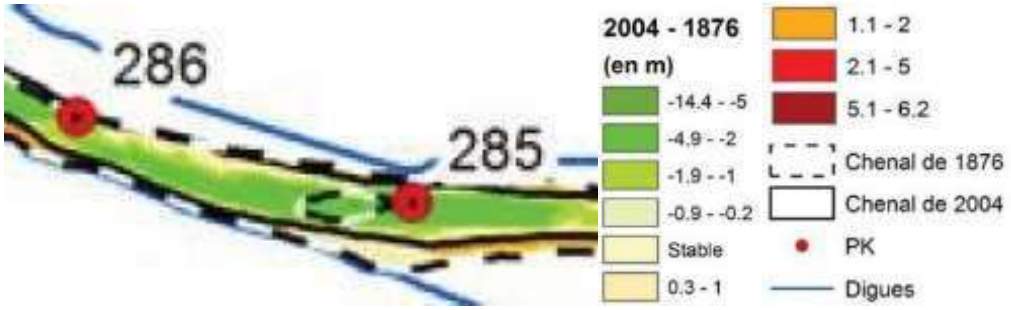


Figure 149. Evolution bathymétrique entre 1876 et 2004

Une protection de berges avec sabot en enrochements a été réalisée dans le cadre de travaux de 2ème urgence menés en 2006.

Photo 115. Protection de berges réalisée début 2004 (sans sabot) et reprise en 2006 (avec sabot)

Photo 116. Glissement de berge en amont de la zone enrochée (©Cemagref [A2003 03])

Dans le cadre de l'opération de renforcement et décorsetage limité des digues du Petit Rhône, il est prévu le recul de la digue.

16.7.4 PRG 295.20 à 295.29 – Erosion de berge Rigaudon sur 150 m

Une érosion de berges en extrados du fleuve a été observée. Ce glissement de berge a vraisemblablement été initié par un affouillement du fond lié aux facteurs cumulés suivants (extrado, rétrécissement fleuve, absence totale de panneaux de fond, présence d'une fosse d'érosion).

Figure 150. Crue déc. 2003 – Glissement de berge Rigaudon

Photo 117. Glissement berges en extrado - Rigaudon (©Cemagref [A2003 03])

Figure 151. Bathymétrie 2004

Figure 152. Evolution bathymétrique entre 2001 et 2004

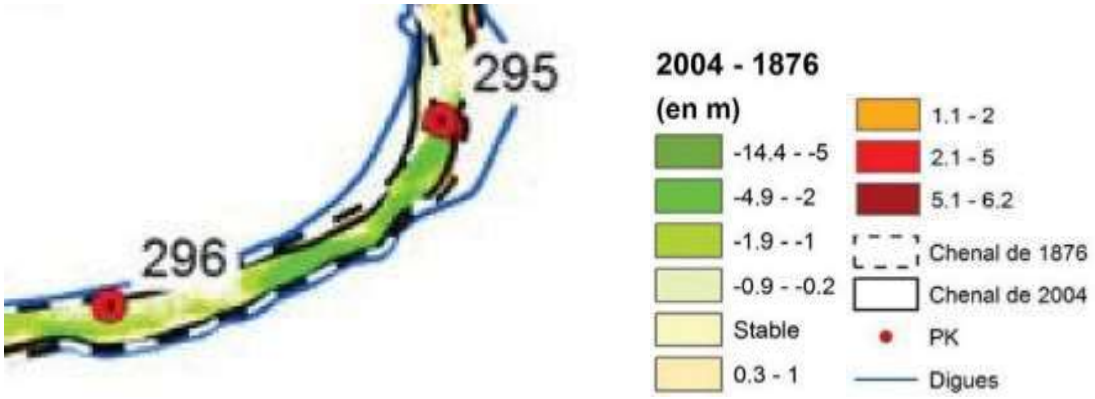


Figure 153. Evolution bathymétrique entre 1876 et 2004

Sur la carte de 1876 figure une digue entièrement perreyée avec une protection de berges. Compte tenu de l'absence de sabot de ces protections historiques et de l'approfondissement en pied de berges depuis 1876, il est fort probable que les enrochements aient glissé progressivement et n'aient plus joué leur rôle de protection entraînant le glissement de berge.

Elle a fait l'objet de travaux de protection de berges avec sabot en 2006 lors des travaux de 2ème urgence.

Photo 118. Berges en enrochements de Rigaudon en 2010 – vue vers l'amont

Photo 119. Berges en enrochements de Rigaudon en 2014 – vue vers l'aval

16.7.5 PRG 330.43 à 330.52 – Affouillement Fadaise

La berge, située en extrados du Petit Rhône, a subit une forte érosion en déc. 2003. Des glissements importants ont eu lieu avec arrachage des arbres et du terrain sur une longueur de plusieurs mètres. L'entretien mené en 2014 auprès du garde-digues a montré que cette érosion avait eu lieu en deuxième partie de crue.

Figure 154. Crue déc. 2003 - localisation affouillement berges station de la Fadaise

La photo ci-après illustre cette érosion. La berge a fait l'objet de travaux de protection de berges en 2006 dans le cadre des travaux de 2ème urgence.

Photo 120. PRG 330.43 à 330.52 – Erosion coude de la Fadaise

Ce glissement de berge a très vraisemblablement été initié par un affouillement du fond lié aux facteurs cumulés suivants (extrado, rétrécissement fleuve, absence totale de panneaux de fond, présence d'une fosse d'érosion).

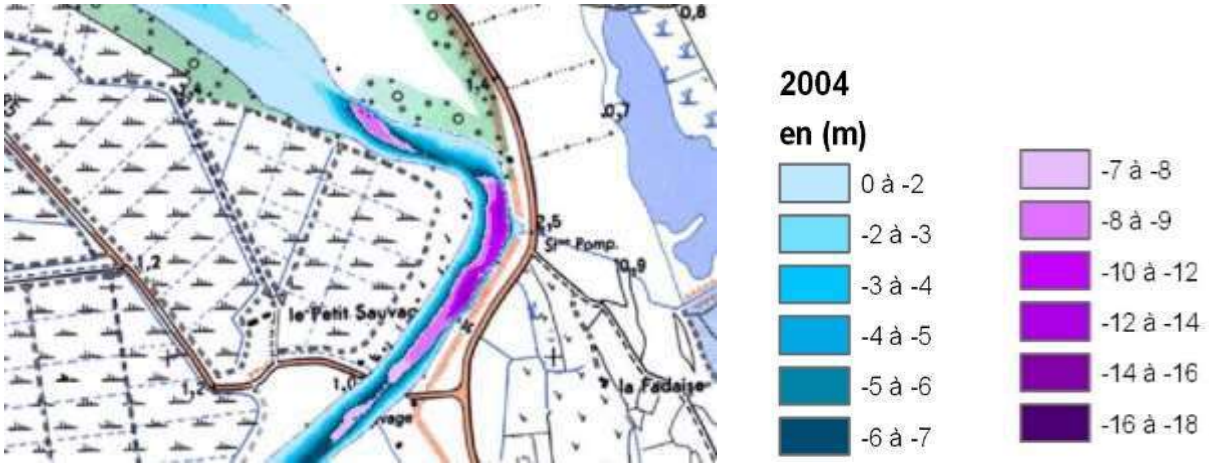


Figure 155. Bathymétrie 2004

Sur la carte de 1876 figure la présence de fascines et enrochements. Compte tenu de l'absence de sabot de ces protections historiques et de l'approfondissement en pied de berges depuis 1876, il est fort probable que les enrochements aient glissé progressivement et n'aient plus joué leur rôle de protection entraînant le glissement de berge.

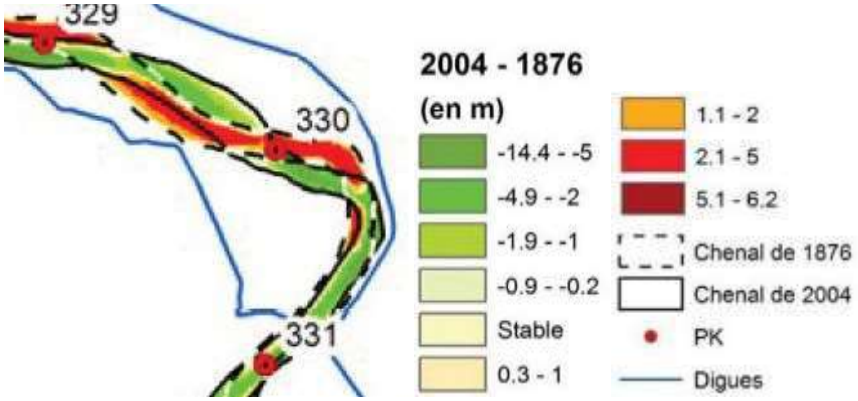


Figure 156. Evolution bathymétrique entre 1876 et 2004

16.7.6 GRD 315 et 315.89 – Erosion externe Canal du Japon et Eglise de Barcarin

Juste en amont de Salin de Giraud, on localise deux secteurs en érosion de berge impactant directement la digue :

- Un premier secteur allant du GRG 314.50 au GRD 315.00 (Canal du Japon)
- Un deuxième secteur au droit du GRD 315.89 (Eglise de Barcarin)

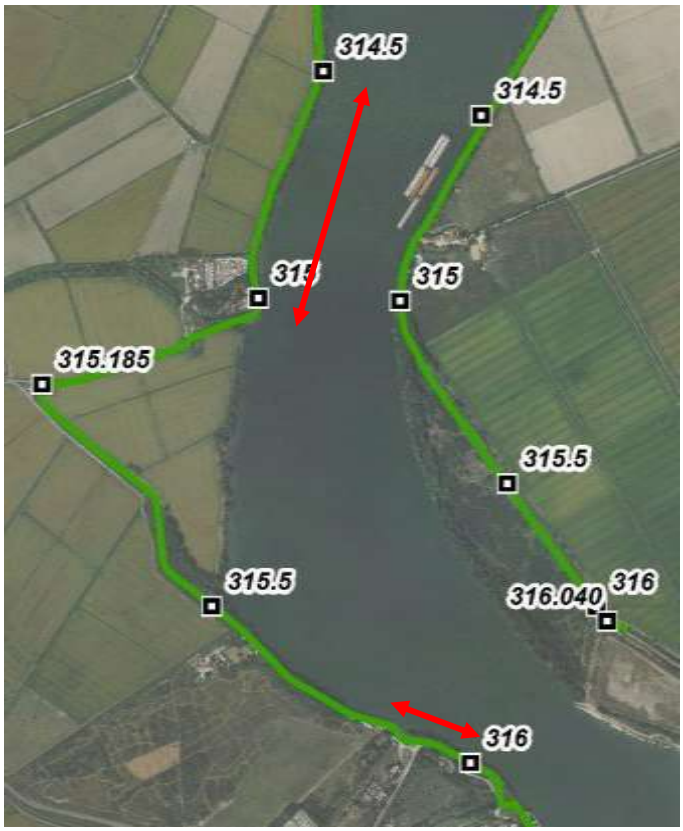


Figure 157. Localisation des érosions de berges

Au débouché du canal du Japon, les berges enrochées ont été déstabilisées et provoqué un glissement de la protection.

Photo 121. Crue déc. 2003 – Affouillement du pied de digue Canal du Japon

Depuis, des travaux de protection de la berge ont été réalisés et ont donné jusqu'à ce jour satisfaction.

Photo 122. Entrée Canal du Japon – protection de berges en 2014

Le deuxième secteur est en sortie de coude. La protection du talus côté fleuve en enrochements s'est affaissée car insuffisamment fondée. Lors de la crue des enrochements ont été déversés en pied de berge afin de conforter l'assise du pied de digue. Ces travaux ont été intégralement repris lors des travaux de 2ème urgence en 2006.

Photo 123. Crue déc. 2003 - Affouillement et glissement de berge - Eglise de Barcarin

Photo 124. Digue de Salin de Giraud au droit de l'église de Barcarin en 2010

La problématique liée aux affouillements de berge dans ce tronçon de fleuve est liée d'une part au rétrécissement de fleuve qui a pour conséquence d'augmenter les vitesses en crue. Cette augmentation des vitesses a eu pour conséquence de créer une fosse d'érosion qui déstabilise les pieds de berges même lors des petites crues (T = 1 à 2 ans).

La bathymétrie réalisée par la CNR permet de localiser les fosses d'érosion en pied de berges.

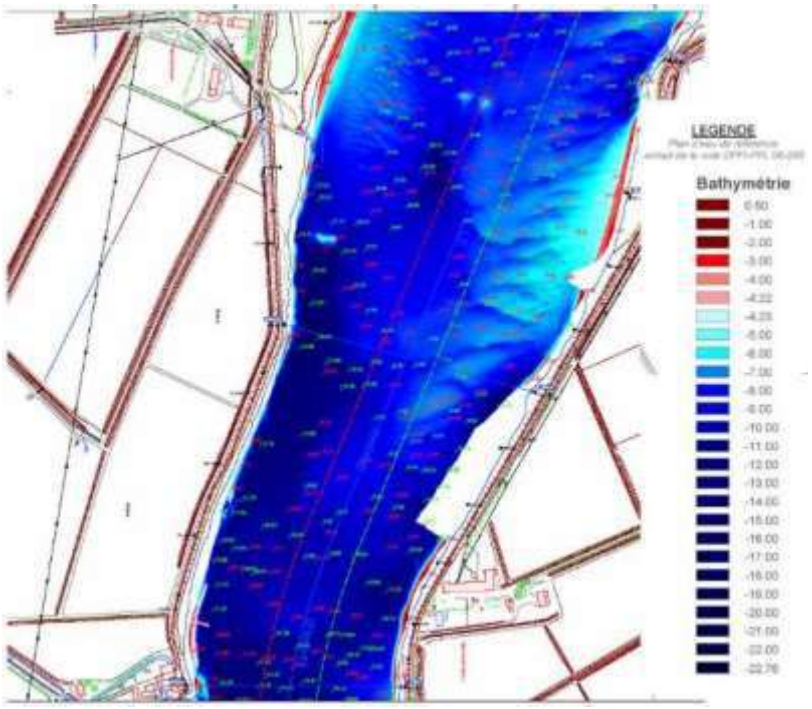


Figure 158. Bathymétrie CNR 2006 – PK 314 à PK 315

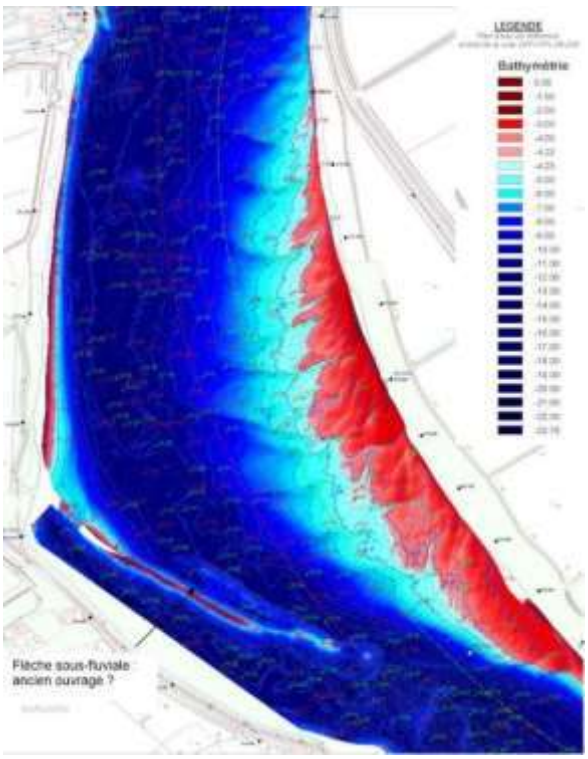


Figure 159. Bathymétrie CNR 2006 – PK 315 à PK 316

16.7.7 Affouillement externe au droit du Mas Antonelle et lieu-dit du Grand Peloux

Ces deux secteurs subissent des érosions de berges :

- Au droit du Mas Antonelle (GRG 313.50)
- En amont du Mas du Grand Peloux (GRG 314.20 à 315.0)

La proximité du fleuve au droit du coude de la digue (face à l'ancienne maison du garde-digues) a conduit le SYMADREM à faire effectuer des travaux de confortement en urgence par recharge de la crête du fait d'un début d'érosion côté fleuve (source CEMAGREF [A2003 03]).

Les travaux réalisés en urgence sont illustrés dans les deux photos ci-après.

Figure 160. Crue déc. 2003 – localisation des affouillements externes

Photo 125. Mas Antonelle (GRG 313.50 à 313.80) – Intervention d'urgence suite à érosion du fleuve (source CEMAGREF [A2003 03])

Entre le GRG 314.20 et 315.0, des érosions de berges ont fait progressivement disparaître le ségonnal. Le Cemagref avait lors de son diagnostic observé la présence de blocs de pierres plus ou moins appareillés, qui peuvent dater de la construction des digues au XIX^{ème} siècle.

Photo 126. Grand Peloux (GRG 314,20 à 315,00) – secteur en affouillement externe

A l'instar de la rive droite, Ces glissements de berges ont une origine hydraulique. Le rétrécissement du lit mineur dans cette partie du fleuve a pour conséquence l'accélération des vitesses en crue entraînant l'érosion du fond du lit et le raidissement des talus.

16.7.8 Bac de Barcarin (GRG 316.70)

Après la crue de décembre, des petits affaissements de talus du côté fleuve ont été renforcés.

Photo 127. Bac de Barcarin (GRG 316.70) – affouillement externe

La bathymétrie du Rhône n'est pas forcément prononcée. Les érosions des berges sont dues à la présence du bac de barcarin, qui créé un batillage endommageant lentement les berges.

16.8 GLISSEMENT DE TALUS

On note un seul glissement du talus côté fleuve

Tableau 42. Crue déc. 2003 – Bilan des glissements de talus

Glissement						
Nom du désordre	**Type désordre**	**PR**	**Type d'intervention d'urgence**	**Initiateur**	**Code**	**2002**
Mas du Juge	Glissement talus côté fleuve à la décrue	PRD 325.73		Caisse d'emprunt Pied de digue	D10	

7.1.1.3. PRD 325.73 – Glissement talus côté fleuve Mas du Juge

Un plan d'eau a été creusé en pied de digue côté fleuve. Il a contribué au glissement du talus (plutôt raide) à la décrue.

Photo 128. Crue déc. 2003 – Glissement talus côté fleuve Mas du Juge

16.9 DEFAILLANCE OUVRAGES TRAVERSANTS

14 défaillances d'ouvrages traversants ont été recensées.

9 désordres, dont 3 ayant fait l'objet d'interventions d'urgence, concernent des fuites des organes de fermeture.

5 désordres, dont 4 ayant fait l'objet d'interventions d'urgence concernent des écoulements le long des conduites.

Tableau 43. Crue déc. 2003 – Bilan des défaillances d'ouvrages traversants

Défaillance ouvrage traversant						
Nom du désordre	**Type désordre**	**PR**	**Type d'intervention d'urgence**	**Initiateur**	**Code**	**2002**
Mas Cazeneuve	Fuite martelière et éboulement du mur côté terre	PRG 282.43	Interv. urgence Big-Bags	Ancienne vanne	D4 D5	X
Mas Augéry	Prise d'eau fuyarde	PRG 287.37	Reprise après crue	Ancienne vanne	D5	X
Château d'eau de Saliers	Fuite dans l'ouvrage	PRG 295.14	Argile et Enrochements sur le talus côté fleuve	Ancien ouvrage	D5	
Saliers	Erosion le long de la conduite	PRG 295.71	Injection de béton	Ouvrage vétuste	D4	
Vinasse	Fuite dans l'ouvrage	PRG 295.82		Ancien ouvrage	D5	
Mas de la cure	Erosion le long de la conduite	PRG 316.42	Big-Bag	Ouvrage non fermé	D4	
Sénebier	Fuite	PRG 319.09		Fuite	D4	
Mas Astouin	Fuite	PRG 323.76	Purge 2010	Ouvrage non étanche	D5	
Mas Badet	Fuite	PRG 326.67	Purge 2010	Ouvrage non étanche	D5	
Mas Icard	Fuite	PRG 329.08	Purge 2003	Ancien ouvrage	D5	
Mas Icard	Résurgence en aval de la digue	PRG 329.36	Purge 2010	OHT masqué	D1+D5	
Mal Millet	Fuite le long d'une conduite	GRD 294.01	sacs Côté Fleuve	Vide le long de conduite	D4	
Mas Millet	Fuite dans ouvrages	GRD 294.46	sacs	Ouvrage vétuste	D5	
Armellière	Ouvrage traversant masqué en charge avec effondrement du mur	GRD 297.97	Enrochements en amont et colmatage argile	OHT masqué	D4+D9	

16.9.1 PRG 282.43 – Prise d'eau fuyarde Mas de Cazeneuve

La vanne de garde de l'aqueduc de la prise d'eau gravitaire est fuyarde et des écoulements le long de la traversée sont probables. Comme lors de la crue de novembre 2002, la fuite a été colmatée à l'aide de gros sacs emplis de terre posés côté fleuve. A la décrue, les sacs ont été retirés et posés en crête. La surcharge a déclenché le glissement du mur de soutènement de la digue dans la propriété. Ce mur, déjà en faux aplomb, menaçait de s'écrouler. La surcharge et la saturation du remblai n'ont fait que déclencher le basculement. Depuis, des travaux de sécurisation de la vanne et reprise du talus côté terre ont été réalisés (sécurisation vis-à-vis des écoulements internes ?).

Photo 129. Crue déc. 2003 - Mas Cazeneuve - Prise d'eau fuyarde (© Cemagref [A2003 03])

Des travaux de confortement sont prévus dans le cadre de l'opération de renforcement et décorsetage limité des digues du Petit Rhône.

16.9.2 PRG 287.37 – Prise d'eau du Mas d'Augery

Ce point de désordre n'a pas été visité en 2002 et 2003 par le Cemagref. Il s'agit d'une prise d'eau qui s'est avérée fuyarde ce qui a conduit le Symadrem à une intervention d'urgence en crue ayant consisté en la pose de big-bags. L'ouvrage a été refait après crue (entretien 2014 avec le garde digues)

Figure 161. Crue déc. 2003 Localisation prise d'eau fuyarde du mas d'Augery

16.9.3 PRG 295.14 – Château de Saliers

Une fuite dans l'ouvrage situé au droit du château d'eau de Saliers a été détectée. L'intervention d'urgence a consisté à colmater l'ouvrage par mise en place d'argile avec des enrochements côté fleuve.

Photo 130. Château d'eau de Saliers

16.9.4 PRG 295.71 – Prise d'eau de Saliers

Lors de la crue de décembre 2003, il s'est produit une amorce de renard le long de la conduite ancienne. La conduite a été colmatée par injection de béton. Une nouvelle canalisation a été posée en siphon inversé par la suite.

Photo 131. Crue déc. 2003 – Prise d'eau Saliers - travaux après crue (© Cemagref [A2003 03])

16.9.5 PRG 295.82– Prise d'eau Mas de la Vinasse

Une fuite dans l'ouvrage a été détectée. L'ouvrage a été repris en siphon inversé après crue.

Photo 132. Crue déc. 2003 Prise d'eau Mas de la Vinasse – Tvx après crue

16.9.6 PRG 316.42 - Erosion le long d'un OHT Mas de la Cure (Château d'Avignon)

Des fuites et résurgences ont été observées le long du bajoyer gauche de la prise d'eau. Lors de la visite post-crue de 2004, la reprise des murs maçonnés des bajoyers ainsi que la remise en état du remblai avaient été entrepris par les propriétaires. L'ancrage des murs bajoyers dans le remblai n'était pas réalisé.

Photo 133. Prise d'eau Château d'Avignon en 2004 (© Cemagref [A2003 03])

16.9.7 PRG 319.19 - Infiltration en pied d'ouvrage Sénebier

Un ancien tuyau fuyard s'est mis en charge lors de la crue et a provoqué une résurgence dans la cour de l'ancienne station de pompage.
Ce secteur est bien connu du garde digues. Le fleuve est très proche et des infiltrations à proximité de l'OHT sont courantes sans qu'il y ait de certitude sur le lien de causalité.
Compte tenu de la multitude d'OHT dans ce secteur, le garde digues suspecte la présente d'ouvrages traversants masqués.

Photo 134. Infiltration au droit de la prise d'eau de Sénebier (© Cemagref [A2003 03])

16.9.8 PRG 323.76 – Prise d'eau Mas d'Astouin

Des fuites ont été observées en 2003. L'ouvrage a été purgé en 2010.

Photo 135. Crue déc. 2003 – Fuites dans l'ouvrage (© Cemagref [A2003 03])

16.9.9 PRG 326.67 - Prise d'eau fuyarde Badet

L'ouvrage hors service en 2003 était fuyard lors de la crue. Il a été supprimé en 2010.

Photo 136. Prise d'eau du Mas de Badet (Cemagref)

16.9.10 GRD 294.01 et GRD 294.46 – OHT du Mas Millet

On note la défaillance de deux ouvrages. Pour l'ouvrage amont, une fuite a été détectée le long de la conduite. Une intervention d'urgence consistant à mettre des sacs côté fleuve a été nécessaire. Pour l'ouvrage aval, le colmatage de la conduite a également été réalisé par des sacs.

Photo 137. Mas Millet – Colmatage de la fuite par des gros sacs posés côté fleuve

Tableau 44. Mas Millet – ouvrages traversants GRD 294.01 et 294.46 – (photo 2014)

16.10 GRD 297.97 - L'ARMELLIERE – DEPART DE BRECHES

Vers 12h30 le 3 décembre 2003, un départ de brèche a été détecté par le garde digues du secteur. Un fontis de 30 cm est apparu en crête de digue presque soudainement. Un ouvrage traversant qui était jusque-là non connu du SYMADREM s'est mis à déverser et a provoqué une érosion du talus côté fleuve ; l'écoulement transitant dans l'ouvrage provoquant de son côté l'érosion du talus côté terre. Une intervention rapide de 13h30 à 17h30 a permis de bloquer ce départ de brèche. L'intervention d'une pelle mécanique à bras long depuis le pied de digue côté terre a pu déverser dans un premier temps des enrochements disposés en becs de canard côté fleuve et dans un second temps des matériaux argileux entre le cordon en enrochements et l'ouvrage masqué. 27 semis ont été nécessaires pour le colmatage de la brèche.

Cette opération en crue a été permise grâce l'existence d'un accès pour les engins mécaniques et a permis d'éviter une inondation qui aurait été catastrophique pour Salin de Giraud.

Photo 138. Crue déc. 2003 – Départ de brèches à l'Armelière – Vidéo Christian SCHMIDT – Ville d'Arles [A2003 08]

Photo 139. L'Armellière après travaux d'urgence (CEMAGREF [A2003 03])

16.11 PRD 309,5 - BRECHE DE CLAIRE FARINE

La brèche de Claire Farine de Décembre 2003 a affecté la digue rive droite du Petit Rhône au PK 309,5, soit 500 mètres à l'aval de la brèche de Novembre 2002.

Figure 162. Crue décembre 2003 - Localisation de la brèche de Claire Farine

Les photos ci-dessous permettent de localiser de cette dernière et de voir même son évolution. La vidéo tournée par le directeur du SIDR à 9h51 soit près de 2 heures après sa formation permet de voir que cette dernière a probablement été initiée au nord du fossé situé côté terre et s'est ensuite élargie vers le sud.

Photo 140. Crue déc. 2003 – brèche de claire farine

Photo 141. Brèche Claire Farine le 3 déc. 2003 à 9h51

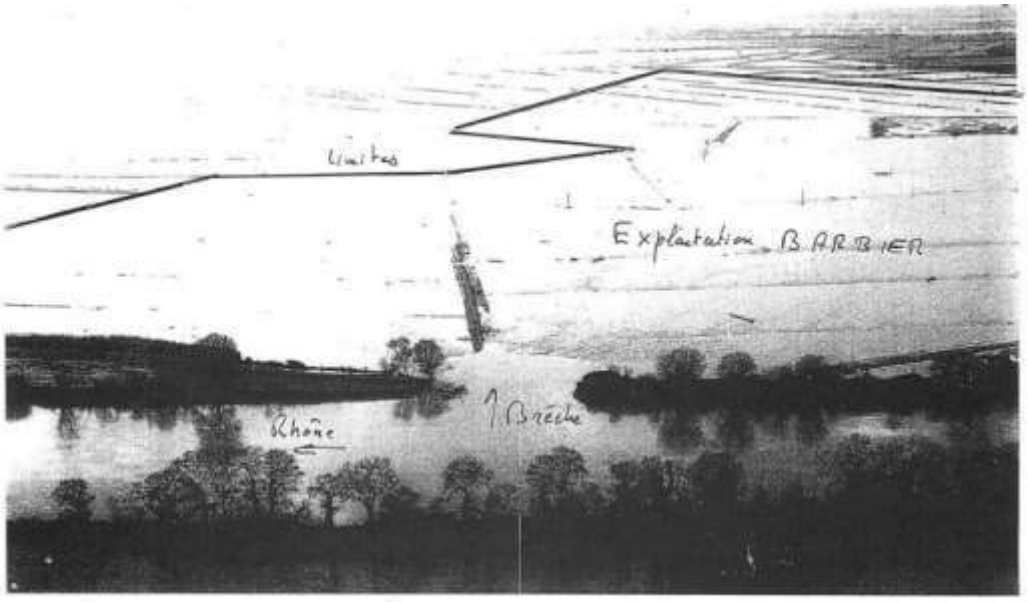


Photo 142. Brèche Claire Farine décembre 2003 (la décrue est amorcée)

La largeur de la brèche a été comprise entre 100 et 120 mètres et sa hauteur maximale est supérieure à 10 mètres (hauteur de la digue + profondeur de la fosse) (d'après le log du sondage 3EDSC4 réalisé au droit de la brèche, la hauteur serait de l'ordre de 13 mètres). La hauteur de digues n'étant que de 2,50 m à 3,0 m, on peut en déduire que la profondeur de la fosse d'affouillement était d'environ 10 mètres.

La fosse d'affouillement s'est étendue côté terre jusqu'à environ 100 mètres, soit 30 à 40 fois la hauteur mesurée entre le niveau du fleuve et le niveau du terrain naturel.

La brèche s'est ouverte le 3 Décembre 2003 vers 8 heures et son ouverture a perduré durant 12 jours car des essais infructueux de colmatage ont échoué.

16.11.1 Analyse du cahier des charges

Les digues du Petit Rhône rive droite ont été construites entre 1846 et 1866. Le cahier des charges de la digue actuelle dressée par Alex. Surrel [H1009] précise que les chaussées devaient résister à une crue dont la durée n'excède pas celle de Novembre 1840 et dont la hauteur ne dépasse pas celle de Novembre 1843.
Ainsi si une crue ne satisfait pas à l'un de ces deux critères, les digues ne sont plus censées assurer leur fonction première de protection.
Le tableau ci-dessous donne les niveaux relevés lors des crues historiques de 1840, 1841, 1843 et 1856. La cote (en m NGF) est estimée à la fois suivant la correction de Pichard figurant dans la thèse de G. Raccasi et suivant le relevé de 1912 que nous privilégierons.

Tableau 45. Niveaux des crues de 1840,1843 et 1856 au pont de Beaucaire

Crue	Hauteur échelle de Beaucaire (PK 267,7)			Débit de pointe estimé à Beaucaire (d'après pardé)
	(en m)	(m NGF) Correction Pichard d'après Raccasi	m NGF (archive 1912)	
Nov. 1840	6,87	10.49 m NGF	10.35	13 000 m^3/s
Nov. 1843	6,75	**10.37 m NGF**	**10,23**	9 000 m^3/s
Mai 1856	7,95	11.57 m NGF	11.43	12 500 m^3/s

Le limnigramme de la crue de décembre 2003 au pont de Beaucaire indique les cotes suivantes :

- Le 3/12/2003 à 8 heures : 11,15 m NGF
- Le 3/12/2003 à 10 heures : 11,28 m NGF
- Le 3/12/2003 à 21 heures : 11,68 m NGF (pic de crue au pont de Beaucaire)

Au moment du démarrage de la brèche de Claire Farine, le niveau du fleuve au pont de Beaucaire dépassait de plus de 90 cm le niveau atteint en 1843 et retenu comme le niveau de protection du tronçon de digue au droit la brèche de Claire Farine.

La crue de décembre 2003 au moment de la formation de la brèche de Claire Farine dépassait le cahier des charges de la conception de la digue, tel qu'il avait été défini par les ingénieurs de l'époque.
En conséquence, la protection des riverains et de leurs biens ne pouvait plus être assurée, car la crue était supérieure à celle pour laquelle la responsabilité du gestionnaire était engagée.

16.11.2 Analyse technique : Examen du mode de rupture par surverse

La cote de l'ouvrage en décembre 2003 au droit de la brèche de claire farine (PK 309,5) est d'après les plans topographiques d'août 2003 comprise entre 4,75 et 4,88 NGF.

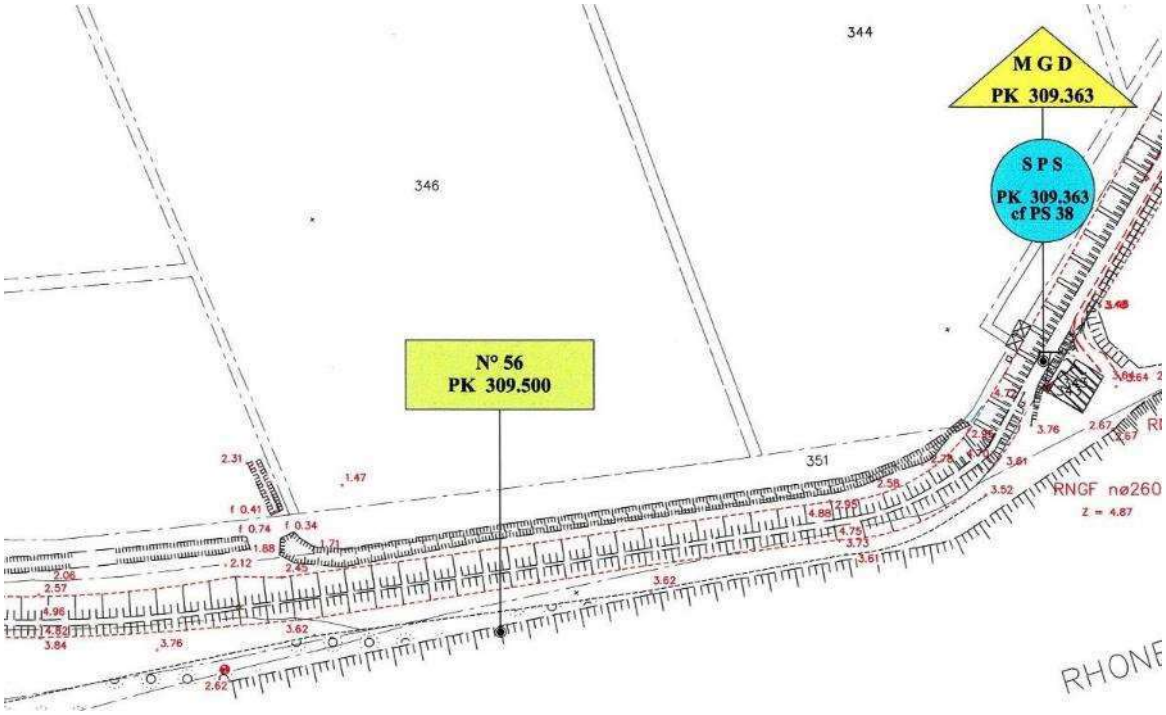


Figure 163. Plans topographiques d'août 2003

Le limnigramme à Saint Gilles (PK297,3) indique : le 3 décembre 2003 à 8 heures un niveau d'eau de 6,27 NGF. Le niveau maximum au limnigramme a été atteint le 3 décembre 2003 à 10 heures. Il était de 6,32 NGF.

Le limnigramme à Petite Abbaye (PK323,9) indique : le 3 décembre 2003 à 8 heures un niveau d'eau de 2,54 NGF. Le niveau maximum au limnigramme a été atteint le 3 décembre 2003 à 9 heures. Il était de 2,56 NGF.

En interpolant les mesures enregistrées à ces deux stations, on estime le niveau d'eau au droit de la brèche de Claire Farine entre 4,56 et 4,60 m NGF entre 8 h et 10 h.

Si l'on analyse les données extraites des modèles hydrauliques disponibles, les niveaux modélisés sont les suivants :

- 4,92 m NGF pour le modèle 1D EGR d'EGIS (anciennement BCEOM) élaboré pour l'EGR et recalé après la crue de décembre 2003 pour les besoins de la DREAL de Bassin.
- 4,61 m NGF pour modèle 2D de la CNR étendu au petit Rhône pour les besoins de l'étude de calage entre Beaucaire et Arles menée dans le cadre du Plan Rhône. Le modèle a été construit postérieurement la crue.
- 4,74 m NGF pour le modèle 2D Plan Rhône d'EGISeau construit spécifiquement pour l'opération de décorsetage limité des digues du Petit Rhône.

Le modèle construit par EGISeau concerne exclusivement sur le Petit Rhône. Il comporte 70 000 mailles et est plus précis que le modèle Petit Rhône, construit par la CNR, qui comprend uniquement 40 000 mailles et qui a été construit uniquement pour les besoins de l'étude de calage entre Beaucaire et Arles avec une bathymétrie datant de 1994.

Les résultats issus du modèle 2D EGISeau sont à privilégier. On retiendra une valeur de 4,74 m NGF au droit du PK 309.5 au moment de l'ouverture de la brèche de Claire Farine.

A cette heure, le vent avait une direction Sud-Est/Est et une force moyenne de 15 m/s environ.

La formule de Smiths ajustée avec la formule de Garrat donne une hauteur significative de vagues de 10 cm. Sur des talus rugueux et relativement perméable de fruit compris entre 1,5 et 2, les abaques de Saville donnent un rapport R/H d'environ 0,8, ce qui tend à montrer un amortissement de la vague à l'arrivée du talus.

Sans prise en compte du vent, on constate que la digue était sur le point de déverser. Avec sa prise en compte, la rupture par surverse devient très probable.

16.11.3 Analyse technique - examen du mode de rupture par affouillement externe

Ce mécanisme de rupture peut s'expliquer au regard des paramètres suivants :

- Vitesses des écoulements
- Bathymétrie en pied de digue
- Présence ou non d'un ségonal

Sur le Petit Rhône, les vitesses calculées sur le modèle 2D d'EGISeau montrent pour une crue type décembre 2003 des vitesses dans le lit mineur inférieures à 2 m/s et des vitesses sur le bord de berge inférieures à 1 m/s. Cependant un modèle 3D serait plus précis pour évaluer les vitesses.

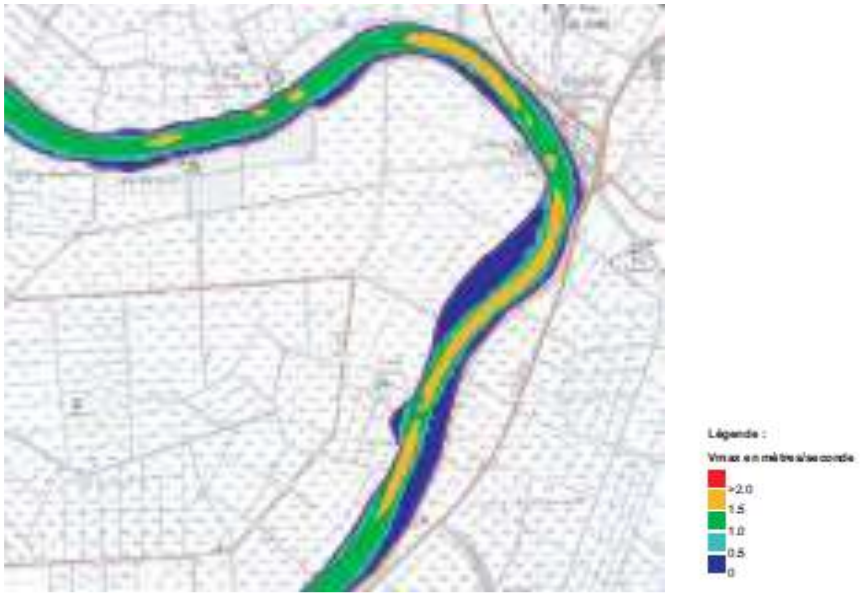


Figure 164. Vitesses des écoulements pour une crue type décembre 2003 sans brèche [O1001]

Des relevés bathymétriques ont été réalisés en 2009 à proximité de la brèche. Ils montrent un surcreusement à -7,5 NGF, ce qui témoignent d'une tendance à l'érosion de pied.

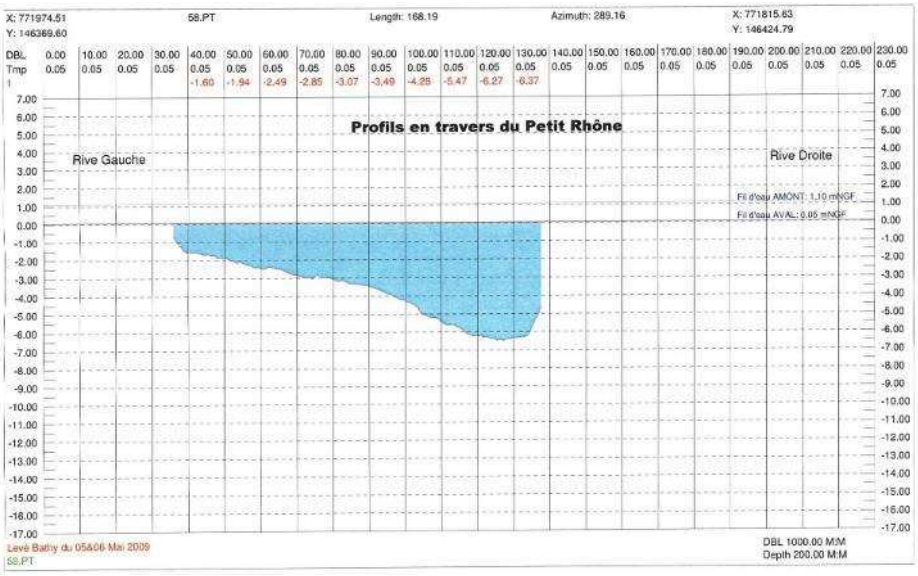


Figure 165. Relevé bathymétrique au droit du PK 309,5 [O1001]

La présence de cette fosse en pied de berge n'était pas apparente sur la bathymétrie de 2004.

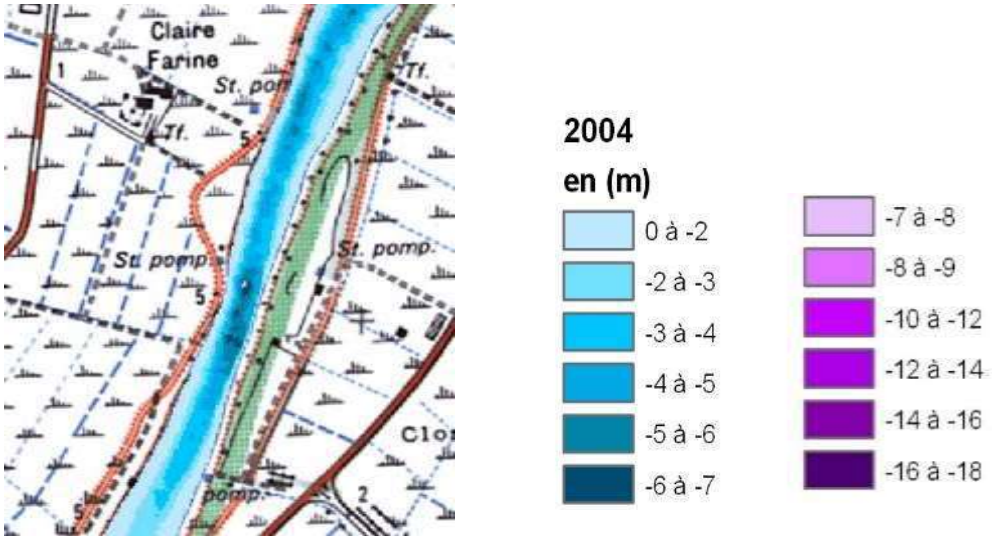


Figure 166. Bathymétrie 2004

La photo ci-dessous extraite de l'examen visuel mené par le CETE durant l'été 2003 montre glissement de berge. On ne distingue pas la digue qui est en retrait de quelques mètres par rapport à la berge. D'après les plans topographiques d'avant crue, le ségonal avait une largeur de 5 mètres, ce qui est peu, mais communément observé sur le Petit Rhône.

Photo 143. Glissement de berge - Etude CETE

L'érosion de pied de la digue si elle avait eu lieu en crue aurait été perceptible. Aucun désordre de type érosion du parement amont n'a été observé pendant la crue. Cette dernière était limitée à la berge.
Par ailleurs deux crues importantes ont eu lieu en septembre 2002 et en novembre 2002. La crue de novembre 2002 a duré 15 jours. Aucun dégât sur la berge ou affouillement n'ont été observé dans le secteur suite à ces deux crues.

La comparaison de la bathymétrie de 2004 avec celle de 1876 montre une légère tendance à l'érosion.

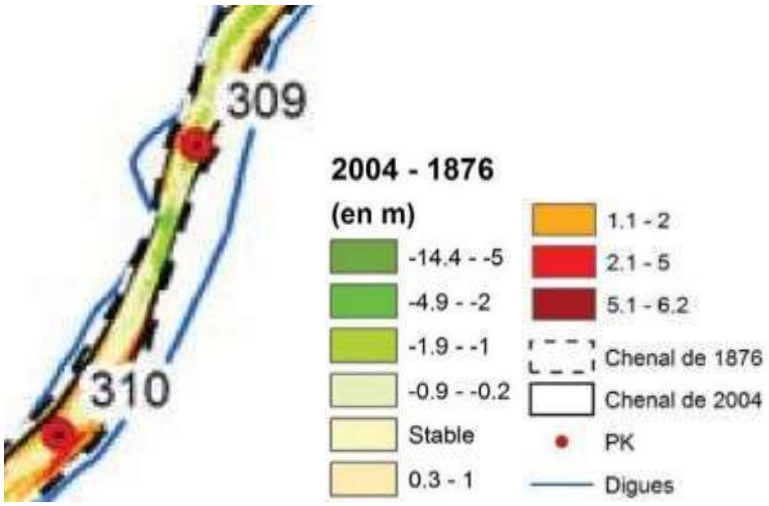


Figure 167. Evolution bathymétrique entre 1876 et 2004

16.11.4 <u>Analyse technique - examen du mode de rupture par glissement</u>

La faible hauteur de digue et le fruit des talus proche de 2 permettent d'écarter ce mode rupture comme étant initiateur de la brèche.

16.11.5 Analyse technique - examen du mode de rupture par érosion interne

L'érosion interne est initiée par quatre phénomènes :

- Une érosion de conduit : vide le long d'un ouvrage traversant mal enrobé ou mal compacté (maison garde digue), terrier d'animaux fouisseurs, ouvrages fissure ou hétérogénéité des sols constituant la digue et la fondation.
- Une érosion régressive repérée par tumulus de sable,
- Une érosion de contact entre deux couches l'une cohérente et l'autre graveleuse,
- Une suffusion par départ du limon dans les vides du sol.
- Ou par une combinaison de plusieurs de ces phénomènes

L'érosion de conduit à travers un terrier semble à écarter. En effet aucun désordre de ce type n'a été relevé par le gardes-digues du secteur depuis les années 1980 et les examens visuels réalisés respectivement par le CETE en 2003 et par le BCEOM en 2000 n'ont pas identifié de terriers dans ce secteur.

L'érosion de conduit le long d'un ouvrage traversant est également à écarter. Aucun ouvrage traversant n'était connu dans ce secteur.

L'érosion de conduit dans une ancienne racine d'arbre est également à écarter. L'examen des photos prises en 2003 montre l'absence d'arbres sur la digue ou en pied de digue.

L'érosion régressive, constatée sur les digues du Rhône, du Mississipi ou des polders de Hollande est repérée par au moins un tumulus par lequel l'eau s'écoule et dépose les grains érodés. Aucun tumulus n'a été signalé avant formation de la brèche.

La suffusion nécessite la présence de grave sableuse ou limoneuse. Aucune investigation géotechnique n'a mis en évidence la présence de couche de grave dans ce secteur.

L'érosion de contact nécessite la présence superposée de couches de limon et de graviers. Aucune investigation géotechnique n'a mis en évidence la présence de couche de graviers dans ce secteur.

Le lendemain de la crue, certaines photos ont été prises de part et d'autre de la brèche. La localisation de ces prises de vues figure ci-dessous.

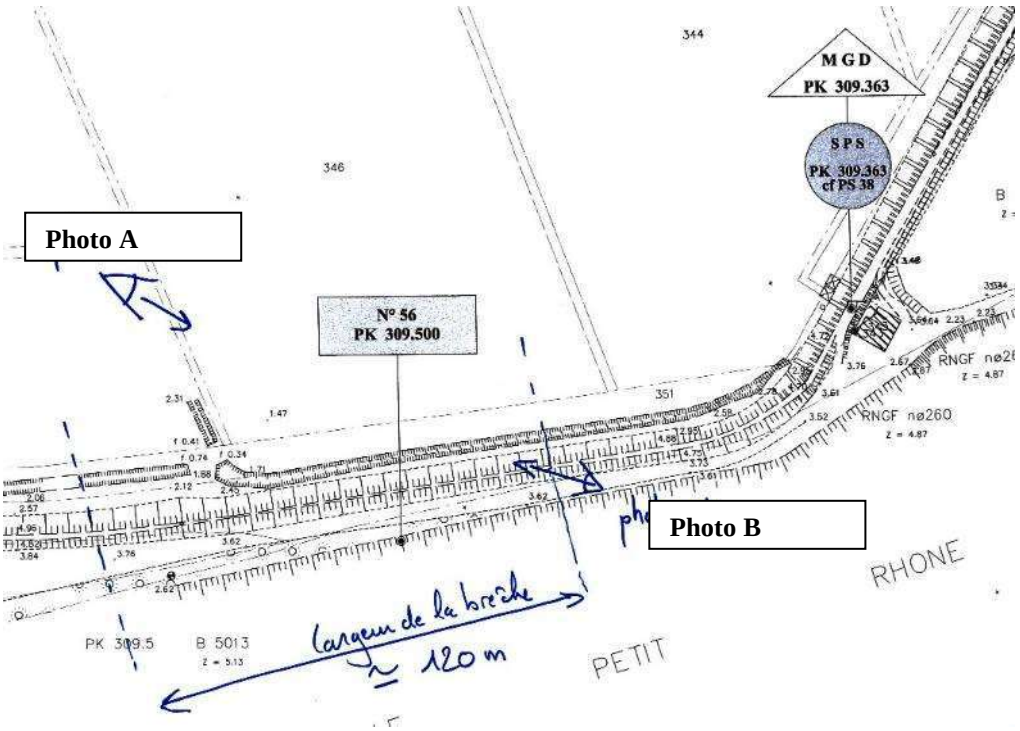


Figure 168. Localisation de la brèche de Claire Farine et prises de vues au lendemain de la crue

La photo A montre l'existence d'une canalisation en pied de digue hors de l'emprise de la digue. On peut également voir la présence de la protection de pied en enrochements et ce qui semble être une couche de sable traversante. La photo B prise de l'autre côté de la brèche ne montre pas la présence de cette canalisation. On peut en déduire que le tracé de la canalisation a changé de direction dans l'espace situé dans la brèche.
La présence de cette canalisation n'était pas connue du SIDR et de VNF gestion du domaine public fluviale. Par ailleurs, elle est située sur la partie nord de la brèche dans la zone d'initiation de cette dernière.

Photo 144. Prise de vue Romain FATER – ancien directeur du SIDR

Photo 145. Prise de vue Bruno DUMAS – garde-digues du SIDR et SYMADREM

En tout état cause, la présence de cette canalisation en pied de digue, avec absence de filtre autour de cette dernière a affaibli la digue vis-à-vis de l'érosion interne et a pu être le mécanisme déclencheur d'un processus d'érosion interne qui aurait pu commencer en 2002 sans montrer d'indice annonciateur. D'autant plus que la fosse d'érosion en pied de berge côté fleuve a pu favoriser le contact entre la couche de sable en fondation entre le lit du fleuve et la partie côté terre et comme on l'a vu les niveaux d'eau dans le secteur sont les plus hauts jamais connus.
La perte de cohésion au droit de la canalisation a concentré les fuites, des érosions de contact ont pu se produire, augmentant les gradients de sortie et débouchant sur une érosion interne.

La figure ci-après illustre un possible scénario à l'origine de la brèche de Claire Farine.

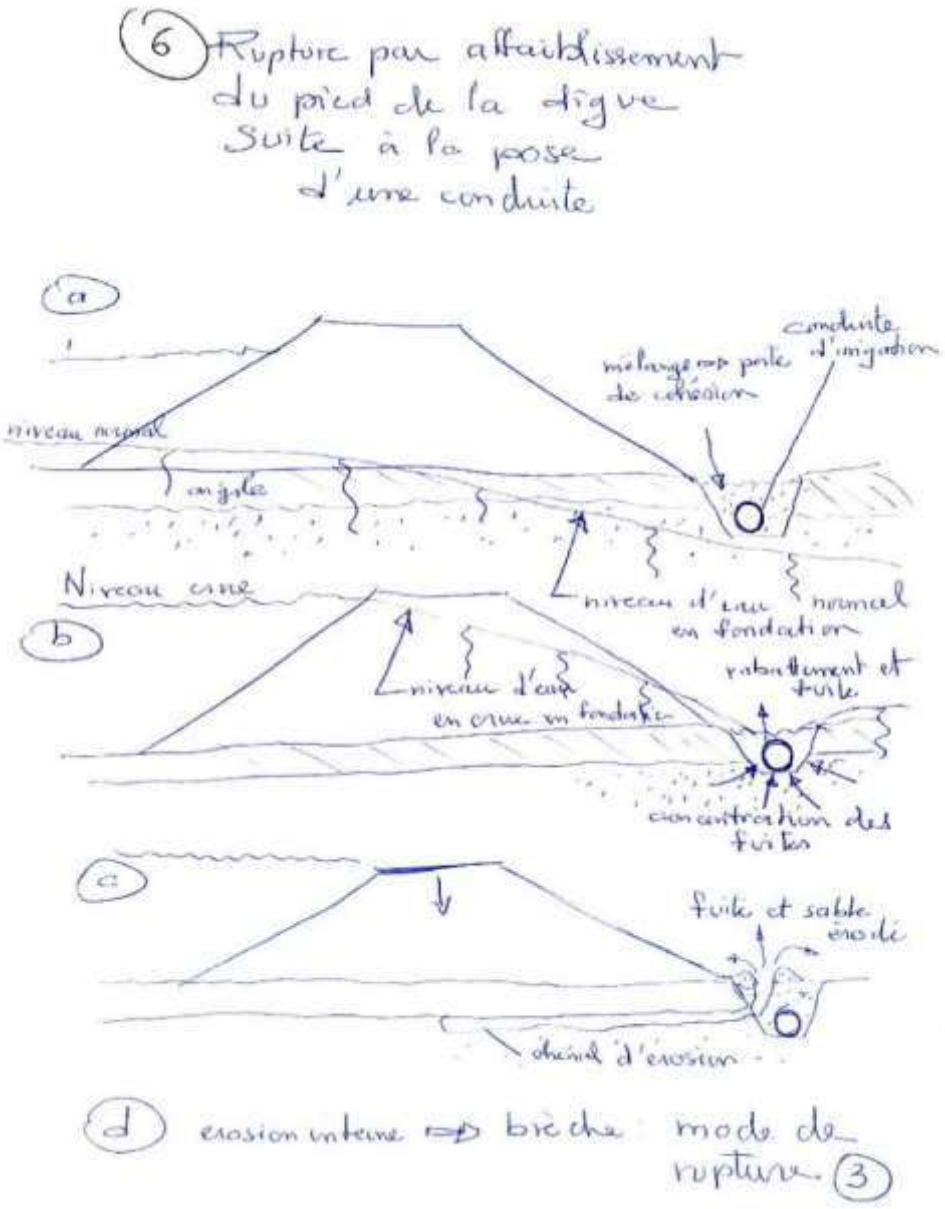


Figure 169. Impact de la canalisation dissimulée en pied de digue – JJ FRY expert EDF CIH et rédacteur du bulletin n°164 de la CIGB concernant l'érosion interne

16.11.6 <u>Analyse technique - conclusion</u>

Des analyses précédentes, on en déduit que :

- une érosion de conduit, identique aux causes des brèches de 1993 et 1994 n'a pas eu lieu. La présence d'un terrier ou celle de racines d'arbres comme un élément initiateur est écartée par les gardes digues et le CETE. Aucun trou de type renard hydraulique n'a été observé avant formation de la brèche.
- une érosion de contact le long d'un ancien ouvrage traversant est écartée
- une érosion régressive avec tumulus est écartée.
- Une suffusion interne ou érosion de contact, à la lumière des connaissances géotechniques actuelle, est loin d'être prouvée.

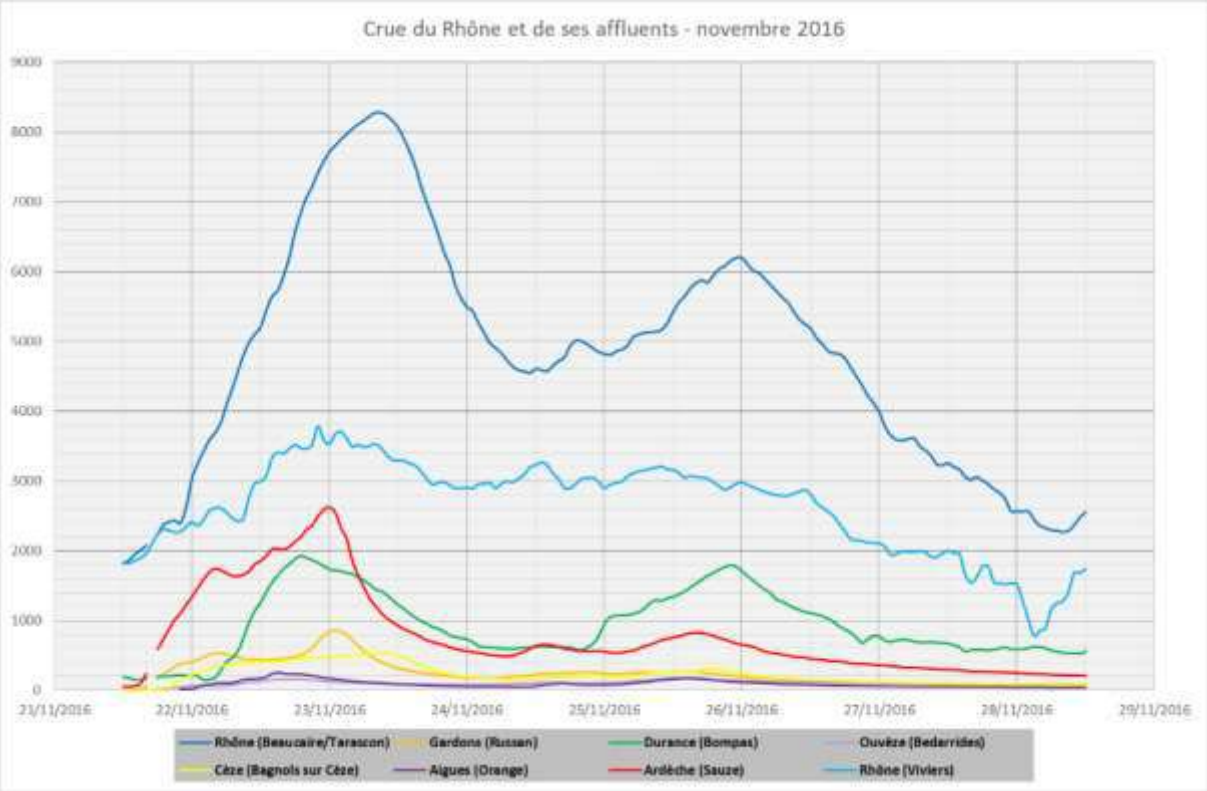
- La présence d'une canalisation en pied de digue hors de l'emprise de l'ouvrage et non connu le jour de la crue a affaibli la cohésion du sol en pied de digue, là où les gradients hydrauliques sont les plus forts en temps de crue.
- Les niveaux d'eau dans ce secteur du fleuve sont les niveaux les plus hauts connus et supérieurs au niveau retenu pour leur dimensionnement réalisé au XIX^{ème} siècle,
- L'analyse hydraulique montre que ce secteur de digue était en début de surverse. Le mode de rupture par surverse est donc très probable et est le scénario privilégié.

Le mécanisme d'affouillement externe comme initiateur de rupture semble très peu probable. Il n'est pas improbable que l'affouillement ait joué un rôle, mais ce n'est pas le rôle principal.

17 CRUE DE NOVEMBRE 2016

La crue de novembre 2016 a franchi le seuil de 8,15 m NGF (environ 6750 m^3/s) du 22/11/2016 à 18h00 au 23/11/2016 à 18h00. Elle a atteint son pic le 23 novembre 2016 à 8h45 à la station de Beaucaire/Tarascon (8300 m^3/s soit une période de retour légèrement inférieure à 10 ans). Le 25 novembre un second pic plus faible a été observé (6200 m^3/s).

Le pic principal est principalement dû à un épisode cévenol. Les hydrogrammes de crues du Rhône et de ces affluents sont présentés ci-dessous :



17.1 BILAN GENERAL DES BRECHES

Cette crue rapide et bien que peu importante en termes de niveaux, a causé une brèche totale en rive gauche du Petit Rhône et quelques désordres dans l'ensemble du delta.

Tableau 46. Bilan des brèches lors de la crue de novembre 2016 et mode de rupture initiateur

Nom de la brèche	Type brèche	Localisation	Largeur (m)	Origine
Ventabrun	Totale	PRG 314.2	3	Probablement une érosion de conduit dans un terrier

17.2 PRG 314.2 - BRECHE DU MAS DE VENTABREN

Lors de la montée de la crue, à 7h le 23/11/2016, la brèche est repérée par le garde-digue alors que le Mas de Ventabren commençait à être inondé. Les travaux d'urgence ont débutés à 8 h et le débit d'entré a été rapidement contrôlé, les travaux se sont terminés dans la nuit du 23 au 24 novembre 2016. Entre 20 000 et 30 000 m^3 d'eau sont entrés dans la zone protégée, dans un rayon de 250 m autour de la brèche.

Photo 146. Zone inondée, mas et champ

La brèche est due à de l'érosion interne, seul phénomène plausible étant donné le niveau de charge. La détection le lendemain d'un terrier de blaireau à environ 250 m en amont de la brèche ; terrier qui n'était pas visible la veille des opérations de surveillance et l'observation de traces de terriers lors des travaux de réparation laissent penser à une érosion de conduit dans un terrier apparu lors de la montée de crue (des blaireaux auraient pu fuir le ségonal lors de la montée de crue et se réfugier dans la digue) ou au claquage d'un ancien terrier de blaireau ou de lapins, suivi d'une érosion de conduit (d'autant plus qu'un désordre ayant occasionné une intervention d'urgence a été détecté dans ce secteur en novembre 2002). La première hypothèse semble être à privilégier.

Photo 147. Crue de Novembre 2016 - Brèche de Ventabrun

Photo 148. Crue de Novembre 2016 – Travaux d'urgence Brèche de Ventabrun

17.3 TERRIER DE FOUISSEUR

Un terrier traversant a été repéré lors de la surveillance en pré-alerte par le garde digue, il a été comblé avant l'arrivée de la crue. Il était situé au GRD 301.5, lieu-dit Tour de Cazeau.

Photo 149. Travaux de mise en sécurité

17.4 INFILTRATIONS D'EAU CLAIRES

Différentes infiltrations d'eaux claires ont été observées dans les secteurs suivants :

- RG : (Trémie des Ségonnaux du remblai SNCFR, hors périmètre du Symadrem)

Photo 150. Débit de fuite dans les trémies

- PRG 293.45 (Mas Beaujeu de Castres) : infiltration faible
- PRG 299.74 (Mas de la Galante) : infiltration au droit de l'ancienne brèche

Photo 151. Infiltration d'eau claire au Mas de la Galante

- PRG 301 (Mas de Case Brune) : infiltration faible au droit de l'ancienne brèche

Photo 152. Infiltration d'eau claire au Mas de Case Brune

- PRG 304.5 (Mas de Lauricet) : infiltration au droit de l'ancienne brèche

17.5 DEFAILLANCE OUVRAGE TRAVERSANT

Les défaillances d'ouvrages traversant sont de diverses natures, et détaillées ci-après ; aucune n'a dégradé la digue et les faibles débits d'eaux sont restées dans les porteaux des ouvrages. :

- PRD 284.7 (Station de la Tourette) : ouvrage non étanche au niveau de la martelière
- PRD 290.75 (Station BRL de Grand Cabanne) : Infiltration dans des fissures de l'ouvrage maçonné.

Photo 153. Fuite par les fissures de la maçonnerie, Grand Cabanne

- PRD 302.8 (Pompe Canevere) : ouvrage non étanche au niveau de la martelière

Photo 154. Fuite à la martelière de Canavère

- PRD 321.5 (ASA de la Souteyranne) : ouvrage non étanche au niveau de la martelière

Photo 155. Fuite à la martelière de l'ASA de la Souteyranne

- PRD 325.5 (Mas du Juge) : ouvrage non étanche ; déchargement de terre depuis la digue sur la martelière côté Rhône

Photo 156. Remblaiement sauvage de l'ouvrage du Mas du Juge

- GRD 282 (Quais) : légère fuite due à une mauvaise fermeture de la vanne
- GRD 284 (Papeteries) : légère fuite due à une mauvaise fermeture de la vanne
- GRG 302.36 (Mas Thibert) : fuite due à la non fermeture de la martelière

17.6 SURVERSE

Il y a eu un départ de surverse à l'aval du Petit Rhône en rive droite, elle était située au niveau de la RD85, au Sud de Pin Fourcat. Il n'y a pas eu d'érosion due à cette surverse.

Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DES SYSTEMES D'ENDIGUEMENT FLUVIAUX DU DELTA DU RHONE

DOCUMENT B

CHAPITRE N°7.1 : DIAGNOSTIC APPROFONDI

DES ELEMENTS CONSTITUTIFS DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT ET TENUE DES OUVRAGES (METHODOLOGIE D'IDENTIFICATION ET DE CARACTERISATION DES RISQUES EN TERMES DE PROBABILITE D'OCCURRENCE)

Sommaire

1 Introduction 4
2 Caractérisation de la rupture par erosion interne 10
2.1 généralités 10
2.2 Caractérisation de la rupture par érosion de conduit 12
2.3 Rupture par érosion régressive 37
2.4 Rupture par érosion de contact 63
2.5 Rupture par suffusion interne 68
2.6 Synthèse sur l'initiation d'érosion interne 76
2.7 Caractérisation de la filtration 77
2.8 Caractérisation de la progression de l'érosion interne 80
3 Caractérisation de la rupture par claquage et soulèvement du pied aval 83
3.1 Rupture par soulèvement du pied de talus coté terre 83
3.2 Rupture par claquage hydraulique d'un conduit partiellement colmaté 90
4 Caractérisation des ruptures par erosion externe 95
4.1 Rupture par surverse 95
4.2 Rupture par affouillement du pied amont 107
4.3 Rupture par batillage 117
5 Caracterisation des Ruptures par glissement 119
5.1 Description du phénomène 119
5.2 Méthode de de caractérisation du CFBR 120
5.3 Probabilité de rupture par glissement 122
5.4 Calcul des facteurs de sécurité 124
5.5 Stabilité des digues d'origine à l'aide du logiciel Seep/Geoslope 126
5.6 Formulation simplifiée du facteur de sécurité 141
6 Autres mécanismes 142
6.1 Modes de rupture peu commun pouvant affecter les digues 142
6.2 Mécanismes de rupture affectant les ouvrages poids et rideaux de palplanches 151
7 Caractérisation de la Surveillance, détection et intervention en périodes de crues 152
8 Scenarios de brèche 156
8.1 Scénario de brèche n°1 : Claquage hydraulique d'un ancien terrier de blaireau partiellement colmaté et érosion de conduit 156
8.2 Scénario de brèche n°2 : Erosion de conduit dans un vide le long d'un ouvrage hydraulique ou d'une transition traversant 164
8.3 Scénario de brèche n°3 : Erosion de conduit dans une ancienne racine morte 173
8.4 Scénario de brèche n°4 : Erosion de conduit dans une fissure traversante 177

8.5 Scénario de brèche n°5 : Claquage hydraulique d'une couche de sol cohésif surplombant une couche de sable et érosion régressive de la couche de sable 181
8.6 Scénario de brèche n°6 : Erosion de contact le long d'une couche de graviers 189
8.7 Scénario de brèche n°7 : Suffusion dans une couche de grave 194
8.8 Scénario de brèche n°8 : Surverse 199
8.9 Scénario de brèche n°9 : Affouillement externe 201
8.10 Scénario de brèche n°10 : Glissement du talus aval 204
8.11 Scénario de brèche n°11 : Glissement du talus amont 205
8.12 Scénario de brèche 12 : stabilité mécanique hors glissement 208
8.13 Scénario de brèche 13 : stabilité mécanique des parapets et batardeaux 214
8.14 Scénario A : Défaillance d'un OHT 217
8.15 Scénario de brèche B : Remblai ferroviaire – érosion de contact de la couche de graviers en crête 219
8.16 Scénario C : Brèche dans le remblai ferroviaire rendu transparent hydrauliquement 221

Ce Chapitre est commun aux études de dangers des systèmes d'endiguement fluviaux du delta du Rhône : « Rive Gauche », « Camargue Insulaire » et « Rive Droite ».

1 INTRODUCTION

La méthodologie est basée sur les étapes suivantes :

1) Détermination et caractérisation des modes ou états-limites de ruptures susceptibles d'être à l'origine d'une brèche dans la digue ;
2) Détermination des barrières de sécurité ou fonctions, sous-fonctions et composants permettant d'agir sur ces modes de rupture ;
3) Réalisation d'investigations, études et reconnaissances (diagnostic approfondi) pour permettre de déterminer les actions et leur occurrence et de caractériser les différentes fonctions et modes de rupture ;
4) Détermination de lois de probabilité ou courbes de fragilité par état-limite de rupture
5) Détermination, à partir des résultats d'études et de l'étude accidentologique de scénarios de brèche impliquant un ou plusieurs modes de rupture et construction d'arbres de défaillance ;
6) Détermination pour chaque scénario de brèche de lois de probabilité ;
7) Détermination pour chaque profil géométrique (espacé de 125 mètres environ) et chaque scénario de brèche (11 scénarios pris en compte) de la probabilité conditionnelle de brèche pour une crue donnée (sur un panel de 9 crues);
8) Détermination de la probabilité annuelle de brèche par profil géométrique et analyse par tronçon homogène
9) Identification des potentiels de dangers (brèche, surverse et défaillance ouvrage traversant)
10) Modélisation de scénarios d'inondation dans la zone protégée ;
11) Estimation de la gravité et criticité des scénarios ;
12) Détermination des niveaux de protection ;
13) Détermination des mesures de réduction du risque.

Le présent chapitre traite des 6 premières étapes. Le chapitre 7.2. traite des étapes 7 et 8 et le chapitre 8 des étapes 9 à 12. Les mesures de réduction du risque sont traitées au Chapitre n°9bis.

Le rapport comporte 8 parties :

- La partie 1 relative à la méthodologie générale,
- La partie 2 traite de la caractérisation de l'érosion interne (érosion de conduit, érosion régressive, érosion de contact, suffusion interne) et du rôle joué par la filtration,
- La partie 3 traite de la caractérisation du claquage hydraulique et du soulèvement hydraulique du pied aval,
- La partie 4 traite de la caractérisation de l'érosion externe par surverse, affouillement de pied et batillage,
- La partie 5 est relative à la caractérisation du glissement des talus en crue et décrue,
- La partie 6 traite des autres modes de rupture,

- La partie 7 est relative à la prise en compte de la surveillance et des interventions d'urgence dans la détermination de la probabilité de brèche,
- La partie 8 traite de la caractérisation des 13 scénarios de brèche identifiés comme importants suite à la caractérisation des différents modes de rupture et du retour d'expérience de l'étude accidentologique.

Les différents modes de rupture considérés dans la présente étude de dangers pour les digues en remblais sont ceux figurant dans CFBR 2015 [X020], qui traite des modes de rupture « mécaniques » et du bulletin n°164 de la CIGB [X001], qui traite des 4 modes de rupture par érosion interne non traités dans les recommandations du CFBR. Sont également pris en compte les modes de rupture par érosion externe que sont la surverse et l'affouillement par érosion de pied ainsi que ceux décrits par Fry & Courivaud 2013 [X021].

Ces modes de rupture sont :

- la stabilité d'ensemble (glissement) ;
- le soulèvement hydraulique du pied de digue aval ;
- le claquage hydraulique,
- le défaut de portance (poinçonnement de la fondation)
- l'affouillement du pied de digue côté amont ;
- l'affouillement du talus amont par batillage ;
- la surverse ;
- l'érosion de contact ;
- la suffusion interne ;
- l'érosion régressive (y compris la boulance) ;
- l'érosion de conduit ;
- la liquéfaction sous sollicitation sismique.

Le tassement qui correspond à un mode de déformation suivant CFBR 2015 [X020] est également pris en compte.

Ils peuvent être regroupés sous la forme suivante :

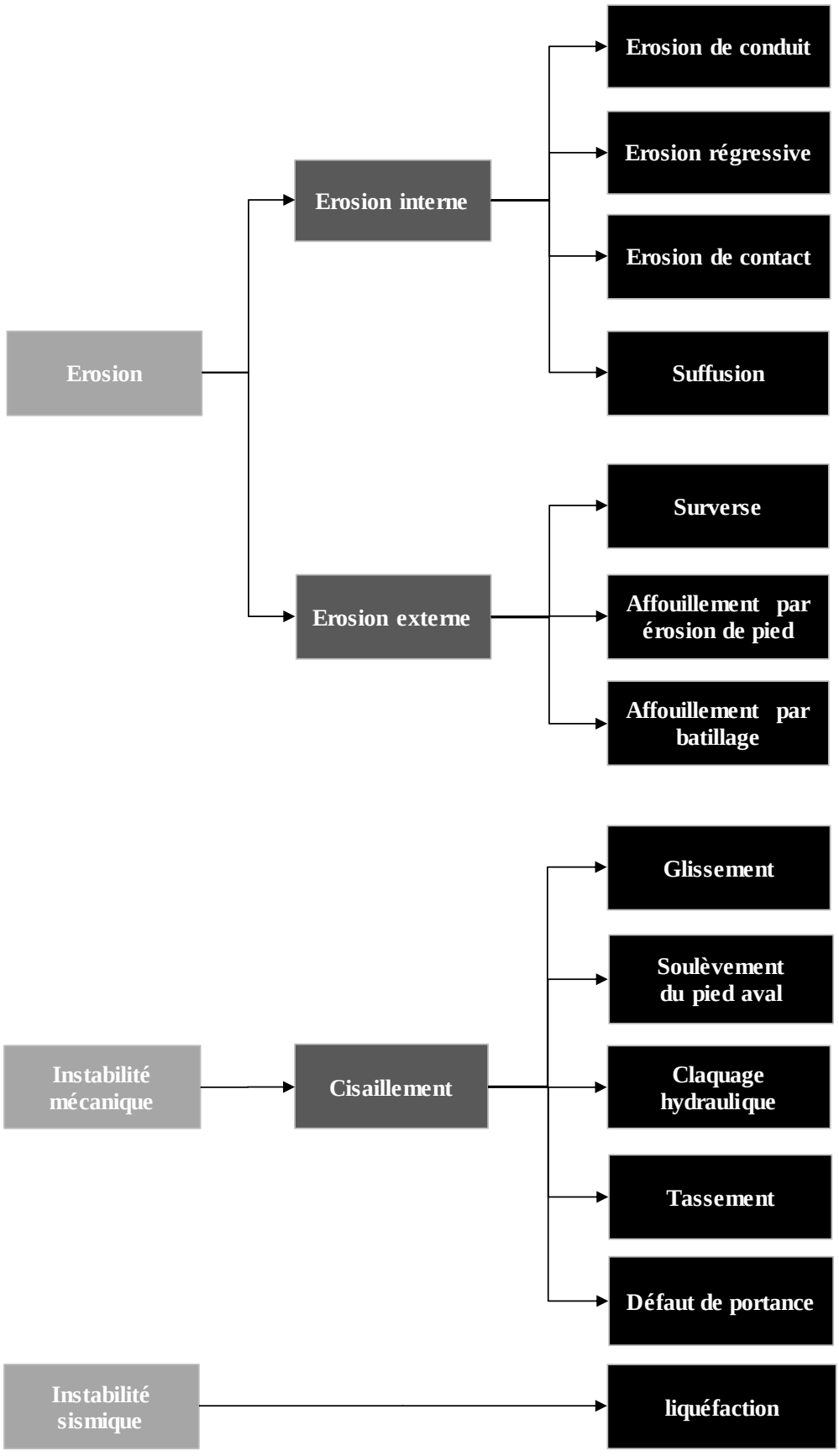


Figure 1. Modes de rupture étudiés dans l'étude de dangers pour les digues en remblais

A ces modes de rupture s'ajoutent les suivants qui concernent spécifiquement les ouvrages poids en béton ou maçonnerie :

- Glissement du mur sur sa base;
- Renversement du mur ;
- Poinçonnement du sol sous la base du mur;
- Rupture combinée dans le sol et la structure ;
- Instabilité d'ensemble ;
- Mouvements excessifs ;
- Rupture d'un élément de structure ou des liaisons entre ces éléments (notamment liaison portes/mur) ;
- Fissuration par traction du parement amont.

Et ceux concernant spécifiquement les rideaux de palplanches :

- la stabilité de l'écran vis-à-vis d'une rupture par défaut de butée (stabilité externe) ;
- la résistance de la structure de l'écran (stabilité interne) ;
- la portance de l'écran (stabilité externe) ;
- la stabilité des tirants d'ancrage (stabilité interne) ;
- l'absence d'interaction entre l'écran et un ancrage (stabilité externe) ;
- la stabilité du fond du lit (stabilité hydraulique) ;
- la stabilité d'ensemble de l'écran (stabilité globale).

La justification d'un écran palplanches vis-à-vis des états-limites de service consiste à vérifier :

- que les efforts supportés par l'écran restent admissibles pour la structure de l'écran (pour éviter par exemple une fissuration inacceptable, ou des problèmes de corrosion) ;
- et le cas échéant, que l'effort supporté par un tirant reste admissible pour sa structure et pour éviter un fluage important de l'ancrage ;
- que les déplacements de l'écran et la modification des efforts qu'ils engendrent (pressions interstitielles, poussée) ne remettent pas en cause sa tenue et la résistance à l'érosion interne.

Le déplacement de l'écran de soutènement est principalement lié :

- à l'équilibre entre la poussée amont des charges et la butée aval mobilisée
- à sa réalisation (battage de palplanches, forage et injections des tirants, etc…) ;
- à ses déformations propres sous l'effet des sollicitations qui lui sont appliquées, donc à sa raideur et à celle de ses appuis ;
- aux déformations d'ensemble du massif, notamment dans le cas d'ancrages multiples;
- à l'effet d'un rabattement, ou de la modification des niveaux d'eau (par exemple due à l'effet barrage d'un écran) ;
- au caractère gonflant et rétractable ou évolutif des sols.

Pour la vérification du rideau de palplanches vis-à-vis de l'ensemble de ces états-limites, il convient de tenir compte de l'influence des affouillements sur l'évolution du fond du lit (érosion des matériaux en pied de berges et diminution de la butée de pied).

Pour ces deux dernières catégories d'ouvrages (ouvrages poids et rideau de palplanches) qui concernent :

- Les quais d'Arles (mur + parapet)

L'approche calculatoire s'est limitée aux phénomènes communs aux digues en remblais (érosion interne, érosion externe et glissement). Pour les états limites spécifiques précités, il est fait référence aux études de projet ou aux études de dangers d'ouvrages, réalisées par les maîtres d'œuvre qui ont traité ces problématiques et nous avons retenu une probabilité annuelle de brèche dont l'acceptabilité a été vérifiée.

Le tableau ci-après donne les scénarios de brèches retenus et évalués dans l'étude de dangers. Ces scénarios ont été définis à partir de l'étude accidentologique et de la caractérisation des modes de rupture décrite ci-après.

Deux scénarios ont également été analysés et écartés du fait de leur très faible probabilité : la brèche par liquéfaction sous sollicitation sismique du fait de la très faible occurrence de la concomitance d'une crue et d'un séisme et la brèche par érosion liée au batillage intégrée dans le scénario de surverse et d'affouillement de pied.

La stabilité des digues sous sollicitation sismique est a vérifiée pour les ouvrages confortés ou à conforter dans le cadre du Plan Rhône suivant les recommandations du CFBR [X020] et du groupe de travail mis en place sous l'égide du Ministère de l'Ecologie [X044].

Tableau 1. Identification des différents scénarios de brèches

N° scénario	Modes de rupture	Libellé du scénario de brèche
1	Claquage hydraulique + Erosion de conduit	Claquage hydraulique d'un terrier de blaireau partiellement colmaté et érosion de conduit
2	Erosion de conduit	Erosion de conduit dans un vide le long d'un ouvrage hydraulique traversant
3	Erosion de conduit	Erosion de conduit dans une racine d'arbre mort
4	Erosion de conduit	Erosion de conduit dans une fissure traversante
5	Soulèvement hydraulique + Erosion régressive	Claquage hydraulique d'une couche de sol cohésive surplombant une couche de sable et érosion régressive de cette dernière
6	Claquage hydraulique + Erosion de contact	Claquage hydraulique du masque étanche et érosion de contact le long d'une couche de graviers
7	Claquage hydraulique + Suffusion interne	Claquage hydraulique du masque étanche et suffusion de couche de grave englobée dans la digue
8	Surverse	Surverse sur la digue
9	Affouillement de pied	Affouillement en pied amont de la digue
10	Glissement	Glissement du talus aval en crue
11	Glissement	Glissement du talus amont en crue
12	Mécanique	Stabilité mécanique des ouvrages hors glissement, claquage hydraulique et soulèvement du pied aval
13	Mécanique	Stabilité des parapets et batardeaux

Un scénario spécifique aux ouvrages hydrauliques traversant la digue a également été pris en compte :

- Scénario A : la défaillance des organes de fermeture des ouvrages hydrauliques traversants (le scénario 2 traitant de l'érosion de conduit dans un vide le long d'un ouvrage hydraulique ou d'une transition traversant la digue) ;

Deux scénarios spécifiques au remblai ferroviaire entre Tarascon et Arles ont également été étudiés :

- Scénario B : dans l'état initial : la rupture par érosion de contact du ballast en crête de digue
- Scénario C : dans l'état après travaux : la rupture du remblai ferroviaire par érosion interne lors du déversement sur la digue résistante à la surverse

2 CARACTERISATION DE LA RUPTURE PAR EROSION INTERNE

2.1 GENERALITES

L'érosion interne intervient lorsque la force d'écoulement est supérieure à la somme des autres forces appliquées sur les grains (pesanteur, forces de contact), soit lorsque le gradient hydraulique local i est supérieur à un seuil appelé gradient critique des matériaux constituants la digue. On verra plus loin que le paramètre déterminant n'est pas toujours le gradient hydraulique. Il peut s'agir de la contrainte de cisaillement pour l'érosion de conduit ou de la vitesse de Darcy pour l'érosion de contact.

Pour tous les modes de rupture par érosion interne, environ 2/3 des ruptures et 50 % des accidents sont intervenues lors du premier remplissage d'un barrage ou dans les 5 premières années de fonctionnement. Par ailleurs, la très grande majorité des ruptures par érosion interne a été occasionnée pour les plus hautes eaux observées ou dans une revanche de 1 mètre par rapport à ce maximum de niveau (CIGB 2015 [X001]).

Le processus d'érosion interne peut être divisé en quatre étapes (CIGB 2015 d'après Fell et Foster 1999) :

- L'initiation : un mécanisme d'érosion s'enclenche et des particules sont entraînées par l'écoulement,
- La continuation ou la non-filtration : l'ensemble des particules entraînées par l'érosion n'est pas bloqué par un filtre et la plupart des particules cheminent jusqu'à un exutoire non filtré,
- La progression : le processus se poursuit sans stabilisation, il déclenche un autre phénomène (tassement, instabilité, claquage) ou s'accélère,
- La rupture : développement jusqu'à initier une brèche.

Quatre types de conditions aux limites initient l'érosion interne des sols (CIGB 2015 [X001]) :

- L'érosion de conduit où l'écoulement dans une fissure, un trou, ou une cavité, en érode les parois,
- L'érosion régressive où l'écoulement érode la surface du sol d'où il surgit, provoquant une érosion régressive (de l'aval vers l'amont) de cette surface de sortie,
- Une érosion de contact où l'écoulement dans un sol très perméable érode l'interface d'un sol fin,
- Une suffusion où l'écoulement érode les petits grains à travers les pores des plus gros.

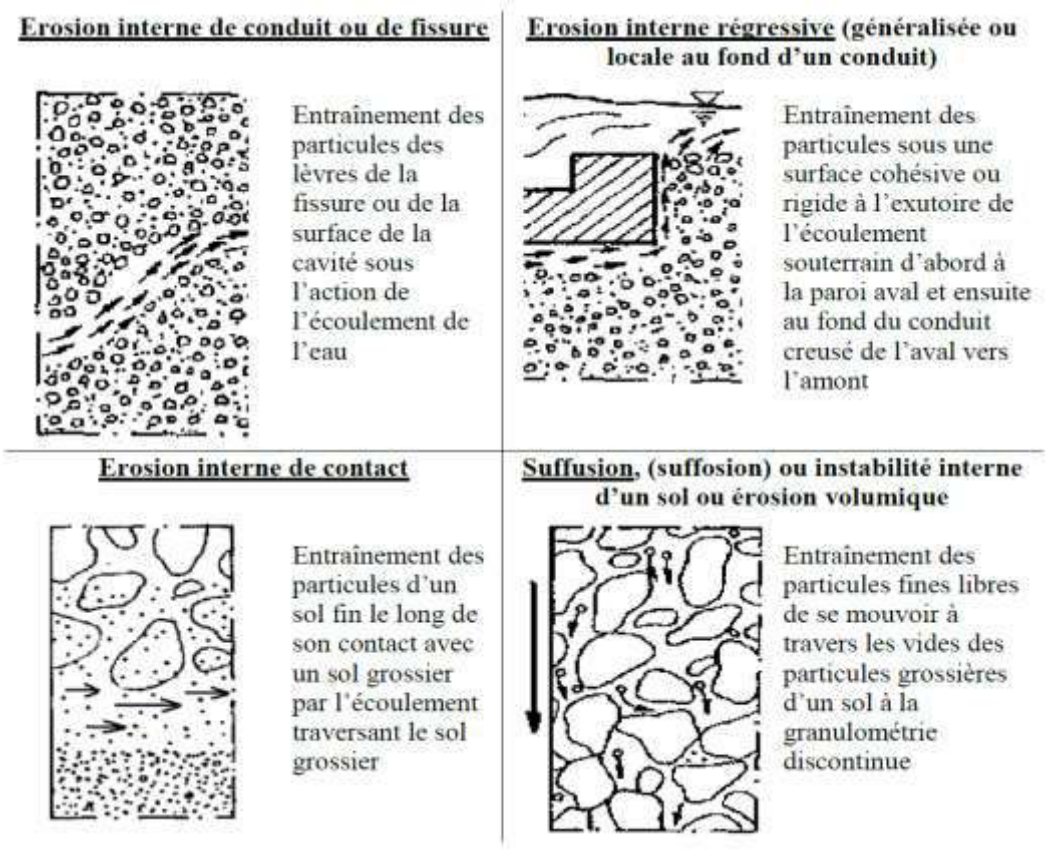


Figure 2. Les quatre formes d'érosion étudiés (Fell R., FRY J.J., Internal erosion of dams and their foundations, Taylor § Francis, Oxom, Royaume Uni, 2007)

La nature des sols détermine leur vulnérabilité vis-à-vis de l'érosion. Trois classes doivent être distinguées (Deroo L. & Fry J.J. 2013 [X007]) :

- **Les matériaux pulvérulents** (IP=0 sans cohésion lorsqu'ils sont saturés). Leur faiblesse fait leur force. La « liberté de mouvement » engendre une incapacité à la stabilité d'une cavité érodée. Ces sols, tant qu'ils sont soumis à des contraintes de compression, ne peuvent pas être sujets à l'érosion de conduit. Il n'existe qu'une situation, redoutable, où ils sont soudainement soumis à l'érosion de conduit : le claquage hydraulique. Sinon, ils sont sujets aux 3 autres mécanismes. Les essais de laboratoire montrent qu'une vitesse de Darcy de l'ordre du centimètre par seconde suffit à entraîner une particule de silt ou de sable fin.
- **Les matériaux cohérents** plastiques a contrario sont sujets à l'érosion de conduit et pratiquement pas sensibles sur site aux trois autres mécanismes. La vitesse de l'eau à travers le conduit doit souvent dépasser 1 mètre par seconde pour arracher un floc d'argile à la structure.
- **Les matériaux intermédiaires**, les lœss, les limons peu plastiques et les argiles dispersives sont les plus exposés. Ils sont sensibles à tous les mécanismes. Leur cohésion, provenant de la succion héritée de leur état initial non saturé, s'effondre brutalement à la saturation et l'érosion peut d'autant plus facilement s'exercer sur ces particules de petite dimension que la force moyenne d'arrachement équivaut à environ 10 % de leur poids. Moyennée sur la surface exposée à l'écoulement, cela représente une contrainte de cisaillement inférieure à 1 Pa. La vitesse d'entraînement peut être plus faible que 1 cm/s.

2.2 CARACTERISATION DE LA RUPTURE PAR EROSION DE CONDUIT

2.2.1 Définition de l'érosion de conduit

Deux conditions sont nécessaires pour qu'il y ait érosion de conduit (Deroo L. & Fry J.J. 2013 [X007]) :

La première condition est l'initiation qui nécessite la présence d'un « conduit », qui peut être :

- un vide le long d'un ouvrage traversant la digue suite à une mauvaise mise en place, ou un compactage déficient,
- une fissure traversante suite à des tassements différentiels, des fuites de conduite, ou un retrait par dessiccation,
- un terrier d'animaux fouisseurs,
- un réseau racinaire traversant qui s'est décomposé.

L'érosion de conduit ne peut pas développer elle-même son propre conduit, il faut un défaut pré-existant. Le défaut initial n'est pas forcément traversant, mais peut devenir traversant au-delà d'une charge amont qui peut fissurer le bouchon aval.

La deuxième condition est la progression : le conduit doit se « tenir ».

- dans un remblai, les matériaux doivent être dotés d'une cohésion, argileuse (argiles, limons) ou capillaire (sables fins pollués, alluvions limoneuses),
- le long d'un ouvrage traversant rigide, à la base de l'ouvrage par couverture des vides ou report de charge.

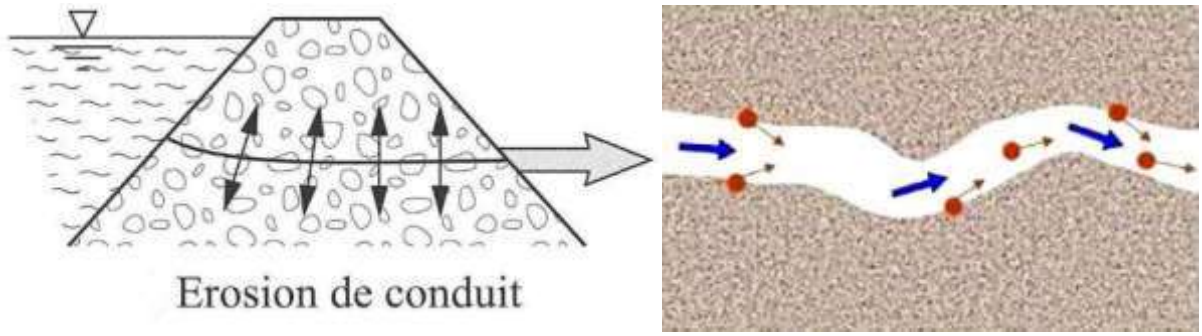


Figure 3. Illustration de l'érosion de conduit (Bonelli & Al 2012 [X006])

L'érosion de conduit est provoquée par des agents différents à court terme et à long terme. A la première mise en eau pour un barrage ou en crue pour les digues peu sollicitées, les principales causes d'initiation sont :

- L'absence ou la déficience de compactage autour des conduites circulaires ou au bord des ouvrages traversants,
- La déficience ou l'absence du compactage laissant des vides importants entre les mottes d'argile au sein du remblai,
- Le décollement du remblai le long des protections rigides par retrait du remblai ou tassement,
- La présence de matériaux dispersifs,

L'inventaire des causes d'érosion de conduit à long terme confirme que l'érosion interne a de multiples raisons d'être initiée à long terme :

- Les fissures qui apparaissent en crête suite aux tassements importants du remblai,
- Les fissures de cisaillement dans le noyau provoquées par le tassement important des recharges,
- Les fissures, qui apparaissent dans le remblai suite au tassement différentiel de la fondation aux contours discontinus,
- Les fissures de cisaillement après séisme,
- Les fuites de conduite occasionnées par la corrosion, les tassements différentiels de la conduite ou le séisme,
- Les trous d'animaux,
- Les trous de racines mortes dans les digues argileuses,
- Le retrait par dessiccation de la crête des remblais en argile lors de saison sèche (moins de 250 mm de pluie sur 6 mois).

2.2.2 Hole Erosion Test

L'érosion de conduit est reproduite par l'essai d'érosion de trou (ou HET : Hole Erosion Test) développé par Robin Fell. Ce type d'essai consiste à faire circuler un écoulement dans un trou préformé dans l'échantillon. Il mesure deux paramètres fondamentaux :

- La résistance à l'érosion τ_c (Pa) : contrainte critique du sol, qui caractérise la contrainte seuil à partir de laquelle, il y a érosion,
- La cinétique d'érosion, C_e (s/m) : coefficient d'érosion du sol, qui caractérise la vitesse d'élargissement (en masse) du trou.

L'illustration suivante montre l'appareillage du Hole Erosion Test (HET) développé par Wan et Fell (2002).

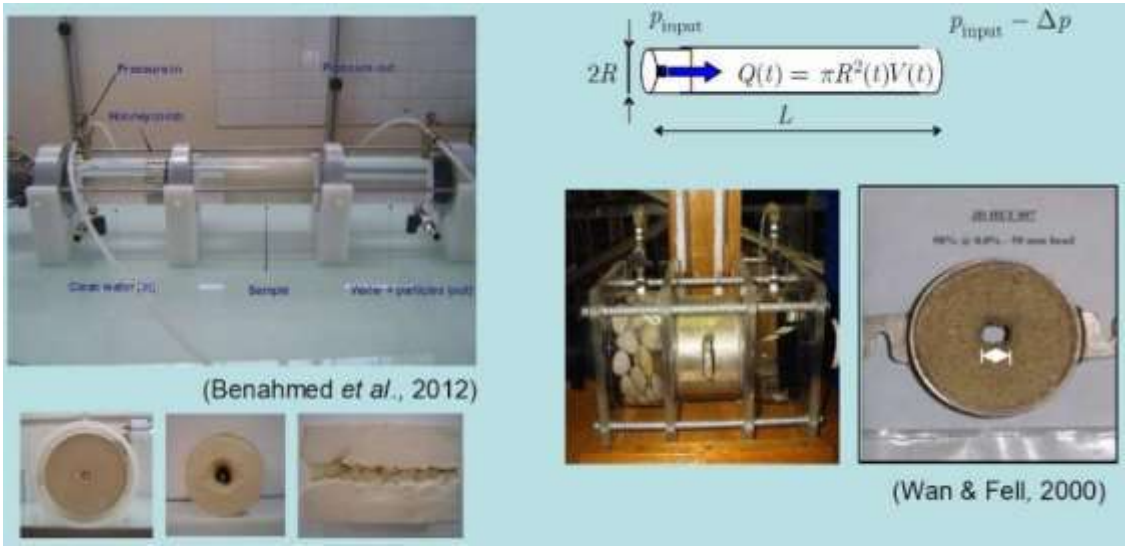


Figure 4. Appareillage Hole Erosion Test (Bonelli 2012 [X009])

L'équation empirique d'érosion est établie sous la forme :

$$\dot{\varepsilon} = \begin{cases} 0 \quad si \ \tau \leq \tau_c \\ \mathrm{Ce} * (\tau - \tau_c) \quad si \ \tau > \tau_c \end{cases}$$

Avec :

$\dot{\varepsilon}$: taux d'érosion ou bien débit de perte de masse par unité de surface (kg/s/m²)
τ : contrainte de cisaillement du fluide sur le sol (Pa)
τ_c : contrainte de cisaillement critique (Pa)
Ce : coefficient d'érosion (kg/s/m²/ Pa ou s/m)

Le coefficient d'érosion est d'autant plus grand, que la résistance est petite. Sa plage de variation est si grande, qu'il est parfois remplacé par l'indice de résistance à l'érosion de conduit : $I_e = - \mathrm{Log}_{10}(C_e)$.

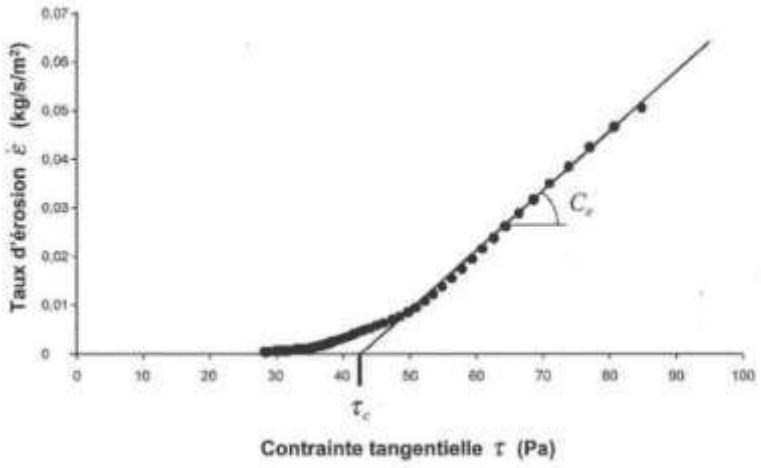


Figure 5. Relation entre la vitesse d'érosion et contrainte obtenue sur un essai HET à débit imposé et modélisation par une loi de seuil à deux paramètres (Bonelli & Al. 2012 [X006])

Robin Fell a proposé la classification suivante en 6 groupes :

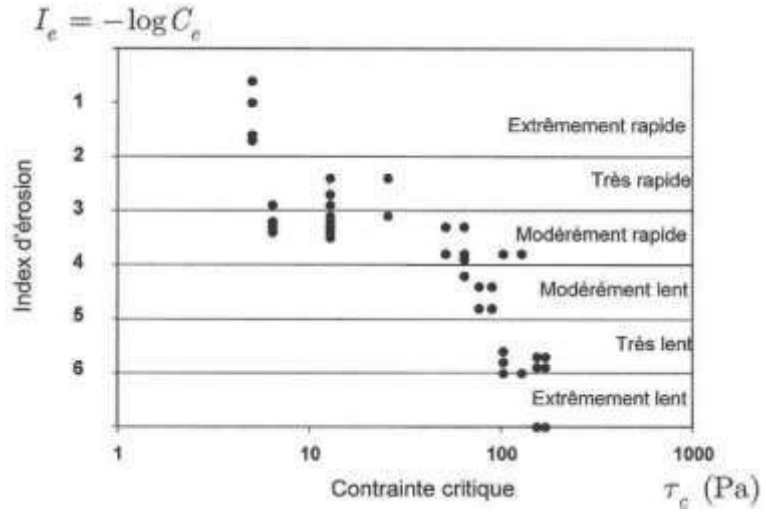


Figure 6. Classes d'érodabilité de Wan and Fell

2.2.3 Modèle utilisé et hypothèses retenues pour la caractérisation du mode de rupture par érosion de conduit

Le modèle utilisé pour la détermination de l'érosion de conduit est le modèle développé par S. Bonelli, R Fell et N. Benahmed 2013 [X005].

Les différents paramètres et hypothèses du modèle sont :

- τ : contrainte de cisaillement exercée par l'écoulement de l'eau dans le conduit (N/m²) ($\tau = P_0$ *au moment de l'initiation)*
- τ_c : contrainte critique du sol donnée par le Hole Erosion Test (N/m²)
- C_e : coefficient d'érosion du sol donné par le Hole Erosion Test (s/m)
- I_e : indice de résistance à l'érosion $I_e = -\log(C_{e)}$
- L : longueur du conduit (m)
- d : diamètre du conduit (m)
- R : rayon du conduit (m)
- R_0 : rayon initial du conduit (m)
- R_d : rayon du conduit lors de la détection par les gardes digues (m)
- R_u : rayon du conduit lors de l'effondrement du toit (m)
- ΔH_w : différence entre le niveau du fleuve et le niveau du point de sortie du conduit (m)
- g : accélération due à la gravité = 9,81 m/s²
- i : gradient hydraulique moyen entre l'entrée et la sortie du conduit (m)
- ΔP : perte de charge linéaire dans le conduit (m)
- ΔPs : perte de charge singulière dans le conduit (m)
- ΔP_T : perte de charge totale entre l'entrée et la sortie du conduit (m)
- α : rapport de la perte de charge linéaire sur la perte de charge totale ($\alpha = \Delta P/\Delta P_T$)
- ρ_w : masse volumique de l'eau (ρ_w = 1000 kg/m^3)
- ρ_d : masse volumique du sol sec ($\rho_d \approx$ 1600 kg/m^3)
- ρ_{soil} : masse volumique du sol ($\rho_{soil} \approx$ 2600 kg/m^3)
- k : coefficient total de perte de charge singulière ($k = k_{in} + k_{out}$)
- k_{in} : coefficient de perte de charge singulière (rétrécissement) à l'entrée du conduit (on retient k_{in} = 0,5)
- k_{out} : coefficient de perte de charge singulière (élargissement) à la sortie du conduit (k_{out} = 0, si sortie à l'air libre (hypothèse conservatrice))
- f : coefficient de frottement dépendant du nombre de Reynolds (on retient f = 0,005)
- V : vitesse d'écoulement dans le conduit (m/s)
- β : coefficient de perte de charge cinétique
- t_{cr} : temps caractéristique d'érosion dans le conduit (s)
- Δt_u : temps entre la détection par les gardes digues et l'effondrement du toit du conduit (s)

La contrainte τ exercée par l'eau dans un conduit est donnée par l'équation d'un écoulement dans une conduite de section circulaire :

$$(\boldsymbol{frottement}) \quad 2\pi RL\tau = \pi R^2 \Delta P \quad (\boldsymbol{pression})$$

$$\tau = \frac{R}{2L}\Delta P$$

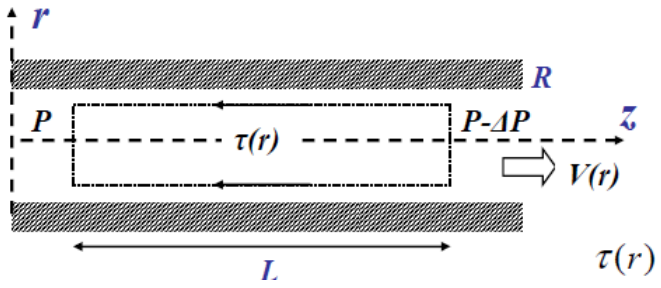


Figure 7. Ecoulement en conduite cylindrique de section circulaire

Les pertes de charges linéaires dans le conduit ΔP s'écrivent :

$$\Delta P = \Delta P_T - \Delta P_s \qquad \text{avec} \quad \Delta P_s = \frac{1}{2} k \rho_w V^2$$

Pour un écoulement turbulent, la contrainte de cisaillement τ s'écrit :

$$\tau = \rho_w f V^2$$

ΔP s'écrit alors:

$$\Delta P = \Delta P_T - \frac{1}{2} k \rho_w V^2 = \Delta P_T - \frac{1}{2} k \frac{\tau}{f} = \Delta P_T - \frac{kR}{4Lf} \Delta P$$

d'où : $\Delta P = \alpha \Delta P_T$ avec $\alpha = (1 + \frac{kR}{4Lf})^{-1}$

Les pertes de charges totales ΔP_T sont égales à :

$$\Delta P_T = \rho_w g * (\Delta H_w - R)$$

Finalement la contrainte τ exercée par l'eau dans un conduit est donnée par les équations suivantes :

$$\tau = \rho_w f V^2 = \frac{R \alpha \Delta P_T}{2L} = \frac{R \alpha \rho_w g (\Delta H_w - R)}{2L} = \frac{1}{2} . R . \alpha . \rho_w . g . i \quad (\text{équation } 1)$$

avec :

$$i = \frac{\Delta H_w - R}{L}$$

$$\Delta P_T = \rho_w g (\Delta H_w - R)$$

$$\alpha = (1 + \frac{kR}{4Lf})^{-1}$$

L'érosion de conduit apparaît si $\tau > \tau_c$. L'évolution du rayon du conduit durant le processus d'érosion à perte de charge totale constante suit une loi exponentielle en fonction du temps (Bonelli et Brivois, 2008) :

$$R(t) = R_0[\frac{\tau_c}{\tau} + \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau}\right) \exp\left(\frac{t}{t_{cr}}\right)$$

Le temps caractéristique t_{cr} d'érosion dans le conduit s'écrit (Bonelli S. & Al. 2013 [X005]):

$$t_{cr} = \frac{2\rho_d L}{\beta C_e \alpha \Delta P_T}$$

Avec β coefficient de perte de charge cinétique défini par la formule suivante :

$$\beta = (1 + \alpha C_e \mathrm{V} \rho_{soil}/\rho_d)^{-1}$$

Les deux figures ci-après illustrent l'évolution du rayon du conduit en fonction du temps.

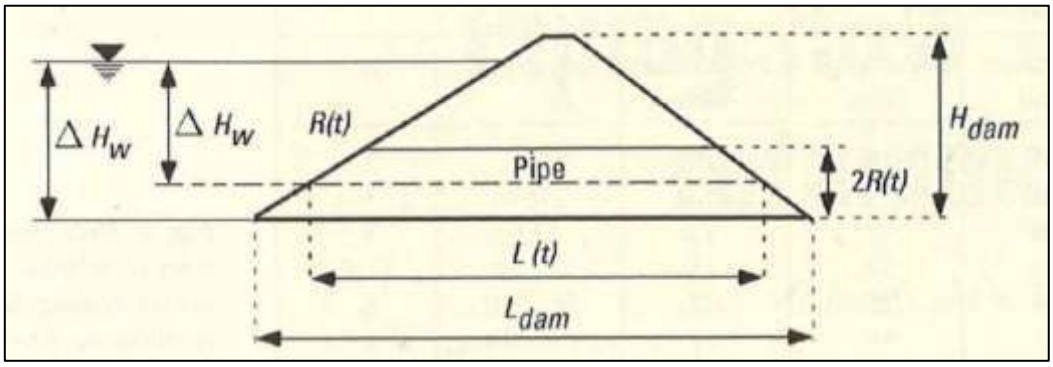


Figure 8. Erosion de conduit dans un ouvrage hydraulique (Bonelli et Benahmed 2011 [X008])

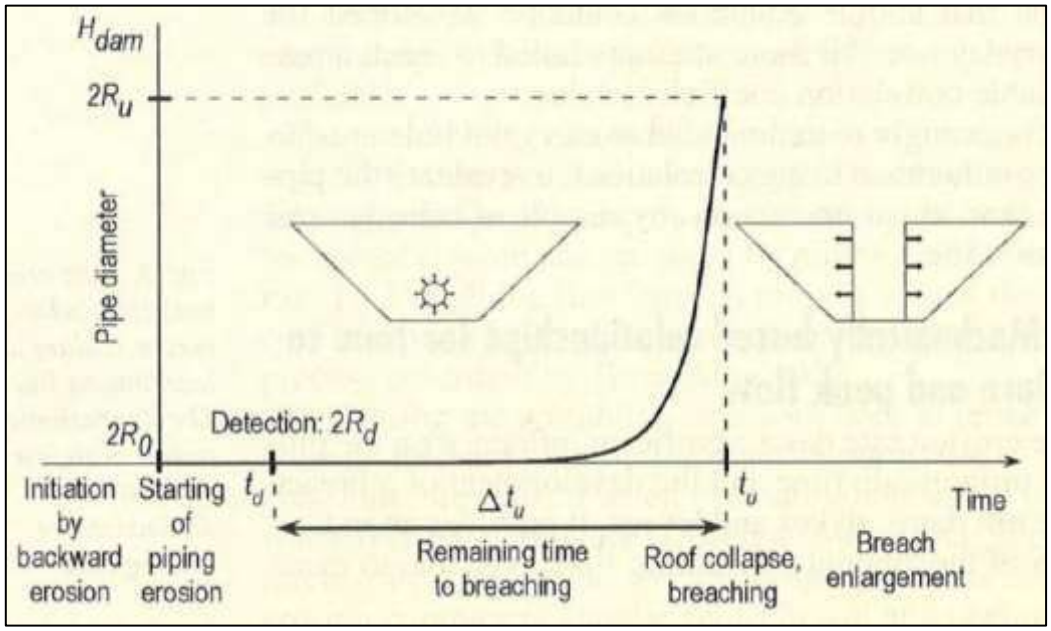


Figure 9. Différentes phases d'érosion de conduit (initiation, détection et rupture du toit) (Bonelli et Benahmed 2011 [X008])

Le modèle développé par Bonelli et Al. a été testé en grandeur nature lors du projet de recherche Impact. La figure ci-dessous illustre les différentes phases de l'initiation de l'érosion de conduit jusqu'à la formation de la brèche lors de ce test en grandeur nature.

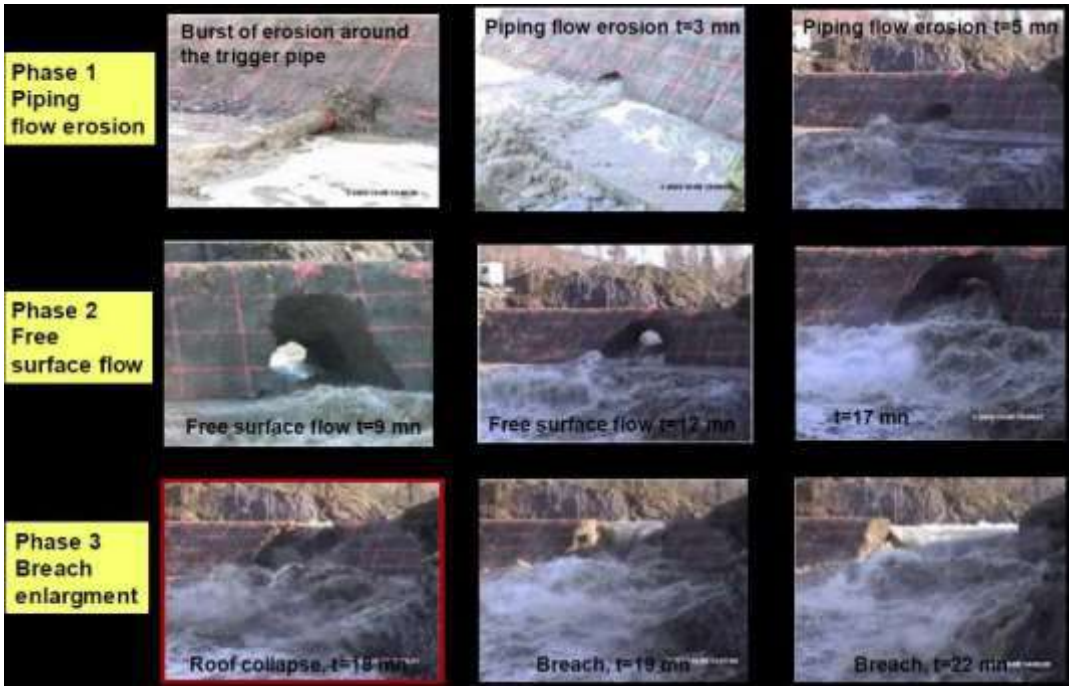


Figure 10. (exposé S. Bonelli - 6ème International Conference of Scour and Erosion – Paris 2012 [X009])

La figure ci-dessous montre également l'incidence de la prise en compte de l'écoulement en surface libre sur la durée de formation de la brèche entre l'initiation de l'érosion de conduit et l'effondrement du toit.

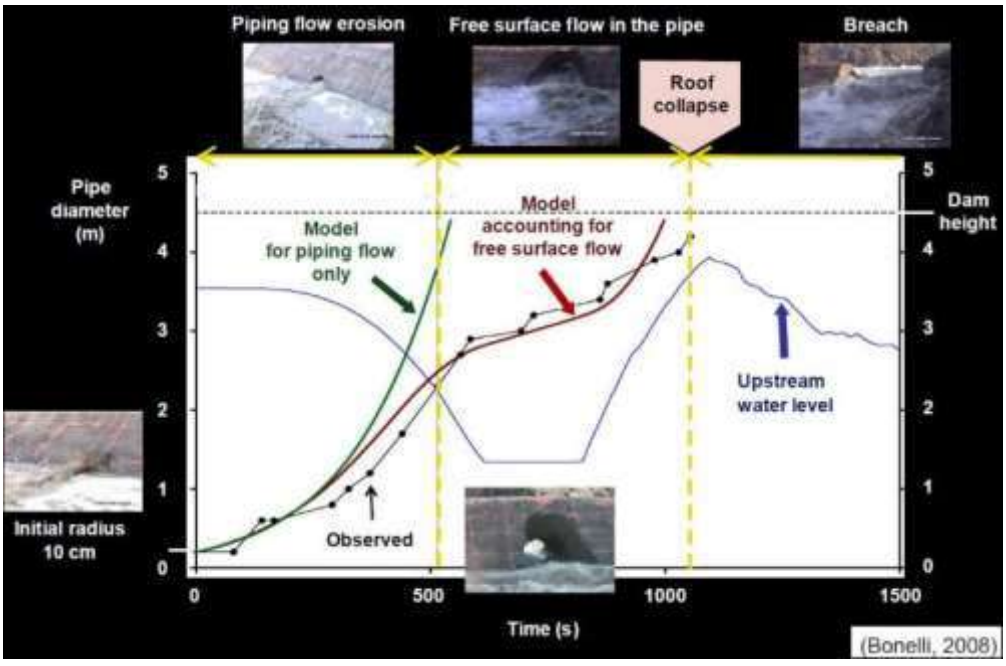


Figure 11. (exposé S. Bonelli - 6ème International Conference of Scour and Erosion – Paris 2012 [X009])

En retenant les hypothèses suivantes lors du processus d'élargissement du conduit :

- niveau du fleuve constant (hypothèse adaptée compte tenu de la discrétisation du modèle en 9 crues),
- rapport α de perte de charge linéaire sur perte de charge totale constant entre la détection et la rupture (hypothèse conservatrice),
- $\tau_c/\tau = 0$ durant la phase d'élargissement du conduit, compte tenu des incertitudes relatives aux différents paramètres, du peu d'études de cas documentées et du fait que la contrainte de cisaillement augmente de façon continue et que ce paramètre a surtout un rôle dans l'analyse de la phase d'initiation (Bonelli & Al. 2013 [X005]).

le temps de rupture Δ_{tu} (en s) entre le moment où l'érosion de conduit est détectée par les gardes digues et l'effondrement du toit du conduit peut être estimé par l'équation simplifiée suivante :

$$\Delta t_u \approx \frac{2\rho_d L}{C_e \propto \rho_w g(H_w - R)} Ln\left(\frac{R_u}{R_d}\right) = \frac{2\rho_d}{C_e \propto \rho_w g i} Ln\left(\frac{R_u}{R_d}\right) \ (équation\ 2)$$

Le débit Q dans le conduit est donné par l'équation suivante:

$$Q = \pi R^{2,5} \sqrt{\frac{\propto . g . i}{2f}}$$

La sensibilité du coefficient de perte de charge linéaire α et du coefficient de perte de charge cinétique β est analysé pour différents diamètres d de conduit.
Pour l'analyse de sensibilité du coefficient β, on considère une vitesse de l'eau maximale dans le conduit de 5 m/s, et un indice de résistance minimale de 2,5, ce qui correspond à un coefficient d'érosion C_e de 3,2 10^{-3} s/m,

Pour l'analyse de sensibilité du coefficient α, on retient une longueur L de 14 m, qui correspond à la valeur médiane calculée sur les digues du SYMADREM, un coefficient de frottement dépendant du nombre de Reynolds f=0,005 et un coefficient de perte de charges singulières k=0,5.

Le tableau ci-après donne les valeurs calculées de α et β pour différents diamètres de conduit.
Le coefficient α est sensible aux variations du diamètre du conduit. En revanche, le coefficient β est peu sensible à ces variations.

Pour la suite de l'étude, on retient $\beta = 1$ et α = 1 pour d ≤ 5 cm, α = 0,9 pour d = 15 cm et α = 0,8 pour d = 30 cm.

Tableau 2. Coefficients α et β en fonction du diamètre du conduit d

Diamètre d (en cm)	Type de conduit	α	β
1	le long d'un ouvrage traversant fissures dans le remblai ancienne racine morte ou rhizome de cannes	0,99	0,98
2		0,98	0,98
3		0,97	0,98
5	petit animaux fouisseurs (taupe, mulot)	0,96	0,98
15	lapins / ragondins	0,88	0,98
30	blaireaux / nid de guêpes	0,79	0,98

La figure ci-dessous illustre la contrainte de cisaillement exercée dans un conduit de diamètre d en fonction du gradient hydraulique :

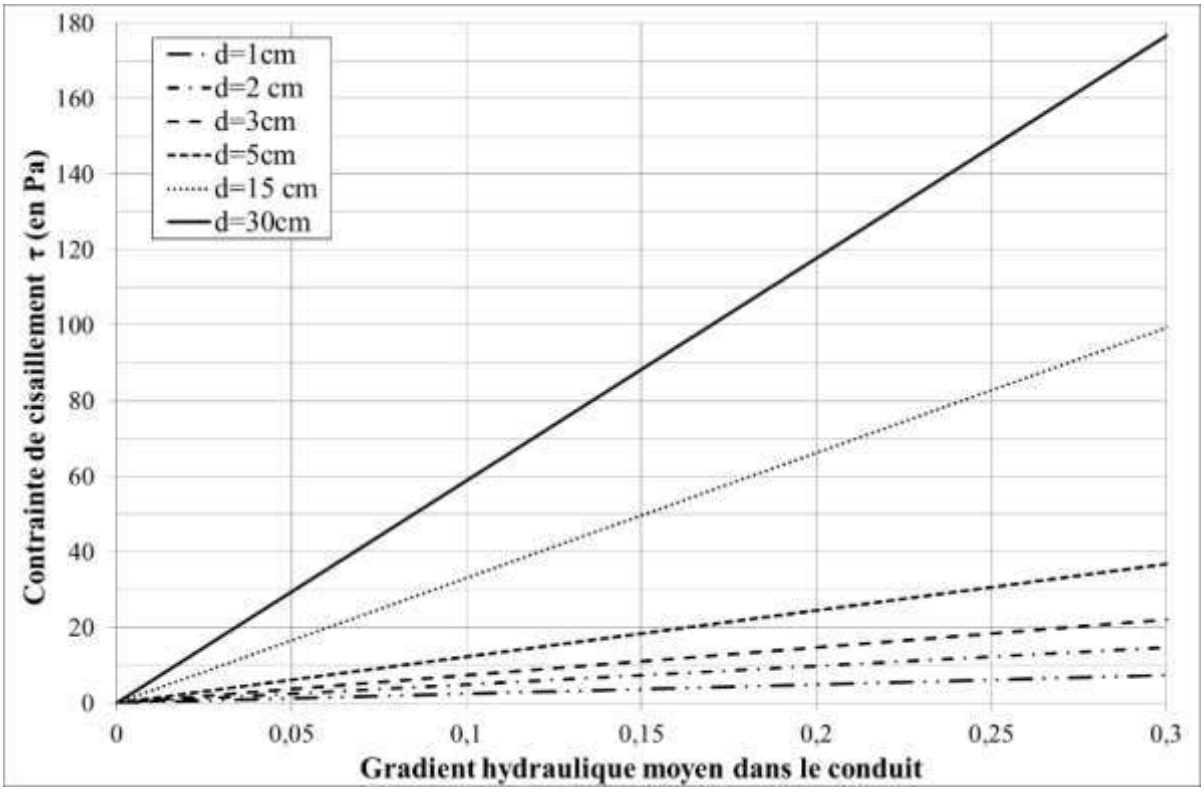


Figure 12. Contrainte de cisaillement dans un conduit de diamètre d en fonction du gradient hydraulique

2.2.4 Analyse des essais HET et distribution des contraintes critiques et indices de résistance à l'érosion

19 essais HET ont été réalisés sur les digues du Rhône et du Petit Rhône. Ces essais ont été comparés avec les essais d'identification menés sur ces échantillons ou sur des échantillons proches. Les résultats des essais sont reportés dans le tableau en page suivante. Il est à noter que tous ces essais ont été réalisés dans des remblais compactés manuellement (digue du XIX^{ème} siècle).

Il en ressort les tendances suivantes :

- Les contraintes de cisaillement critique τ_c sont comprises entre 0 et 262 Pa, avec 1 valeur égale à 0 ; 3 valeurs proches de 10 Pa et une valeur médiane de 55 Pa ;
- Les indices de résistance à l'érosion I_e sont compris entre 2,7 et 5,2 avec une valeur médiane de 3,7 ;
- Les variations au sein d'un même sondage peuvent être importantes. Ainsi pour le sondage 5EDSC3, l'échantillon pris entre 2 et 3 m donne un indice de résistance à l'érosion I_e compris entre 3,2 et 3,9 et l'échantillon pris entre 3,50 et 4,00 m donne un indice de résistance à l'érosion Ie compris entre 4,2 et 4,4, soit entre 0,5 et 1 point d'écart. Pour le sondage SC23-EI3, l'échantillon pris entre 2,30 et 2,60 m donne un indice de résistance à l'érosion I_e de 5,2 et l'échantillon pris entre 4,50 et 5,00 m donne un indice de résistance à l'érosion de 2,9.
- La plage de variation donnée par IRSTEA pour un même essai peut être importante (variation de 3,2 à 3,9 Cf. supra),
- Aucune corrélation entre teneur en fines (< 80µm) et sensibilité à l'érosion n'est observée. En revanche, on observe une différence de tendance entre les matériaux A1 et A2 suivant la classification GTR :
    - Pour les matériaux A1, les contraintes de cisaillement critique τc sont comprises entre 0 et 164 Pa, avec une valeur médiane légèrement supérieure à 30 Pa. Les indices de résistance à l'érosion I_e sont compris entre 2,7 et 5,2 avec une valeur médiane de 3,1 ;
    - Pour les matériaux A2, les contraintes de cisaillement critique τc sont comprises entre 54 et 262 Pa, avec une valeur médiane de 115 Pa. Les indices de résistance à l'érosion I_e sont compris entre 3,7 et 5,2 avec une valeur médiane de 4,2 ;

La figure ci-dessous représente l'indice de résistance à l'érosion en fonction de la contrainte critique. Pour des contraintes critiques supérieures à 100 Pa, la relation entre les deux paramètres peut être approchée par une loi linéaire de type :

$$I_e = 2{,}9 + 0{,}01.\tau_c$$

En deçà de 100 Pa, aucune corrélation entre la contrainte critique et l'indice de résistance à l'érosion ne se dégage.

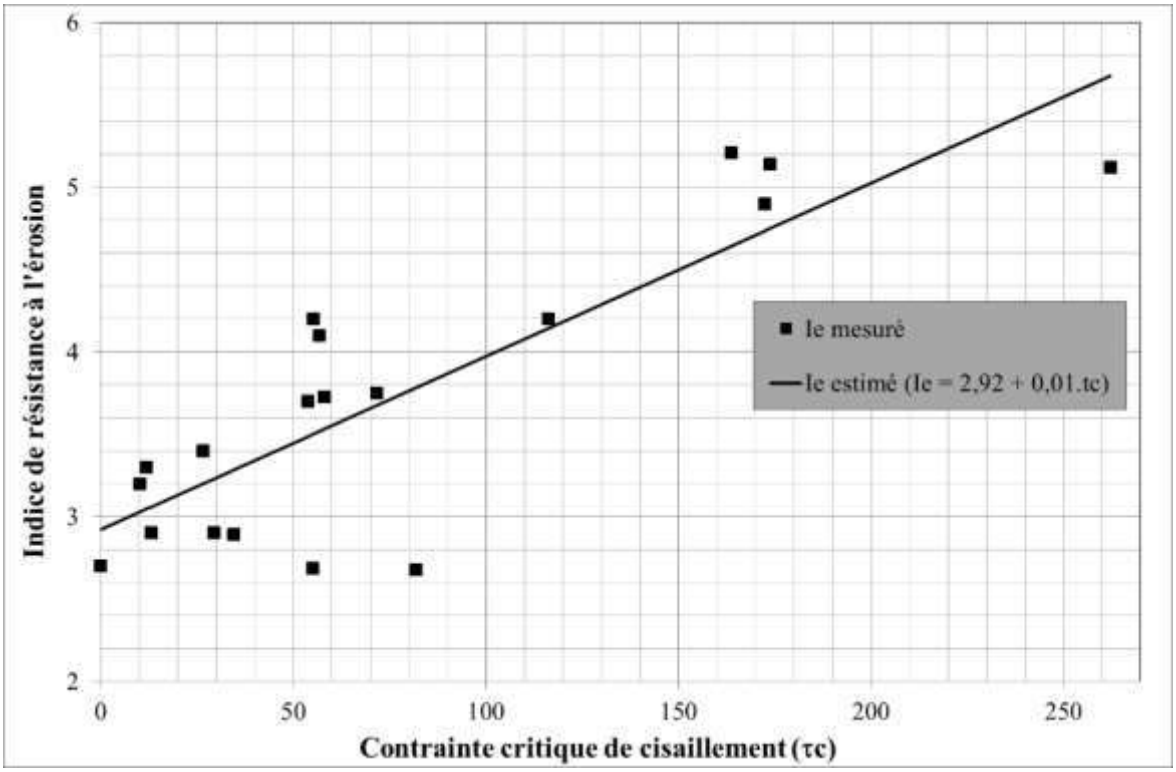


Figure 13. Indice de résistance à l'érosion en fonction de la contrainte critique de cisaillement

Echantillons retenus pour les essais HET réalisés par IRSTEA					Contrainte critique τc		Indice d'érosion de Fell Ie		Echantillons Intacts retenus pour les identifications et commentaires si faciès géologique différent des EI utilisés pour les HET		Id. GTR	à 80µm	à 2µm	VBS	IP
libellé	PR Digues	Etat	Profondeur	commentaires	(Pa)		(-)		localisation	faciès géologique					
SC3-EI3	PRD-283,4	Remanié	2,00-2,40 m	Remanié car présence de fissures	116,2		4,2		EI 1,7-2,0	identique	A2	95,6			15
SCB7-1-EI3	PRD - 281,1	Remanié	3,40-4,40 m	Remanié car destructuration et adhérence aux parois du tube en PVC	56,75		4,1		EI 2,7-3,4	différent	A1	98,9		1,86	
SCB7-1-EI4		Remanié	4,70-5,10 m		57,95		3,73		EI 2,7-3,4	différent	A1	98,9		1,86	
SC14-EI5	RD-277,7	Remanié	4,00-4,70 m	bonne cohésion mais remanié	71,59		3,75		EI 4,7-5	identique	A2	89,4			18
SC14-EI6		Remanié	5,10-5,30 m	très bon état	173,89		5,14		EI 4,7-5	identique	A2	89,4			18
SC14-EI6		Intact	5,30-5,60 m		262,15		5,12		EI 4,7-5	identique	A2	89,4			18
SC23-EI3	RD-273,35	Intact	2,30-2,60 m	Intact malgré présence de fissures et Etat sec	163,61		5,21		EI 2,0-3,0	égal	A1	93,4		1,86	
SC23-EI5		Remanié	4,50-5,00 m	détérioré	34,55		2,89		EI 3,0-4,0	identique	A1	98,9			11
3 ED SC5	PRD 308,6	Intact	1,20-2,20 m		29,4	77,9	2,9	3,3	EI 3,0-3,2	identique	A1	89	23	1,24	
3 ED SC10	PRD 302,25	Remanié	0,60-1,60 m	déstructuré et sec	0		2,7		EI 1,6-2,0	identique	A1	96,3	26	1,33	
5 ED SC2	PRD 317,8	Intact	2,00-3,00 m		26,6	28,1	3,4	3,5	EI 1,0-1,7	différent	A1	90,8	20	1,72	
5 ED SC2		Intact	4,00-4,40 m		11,8	81,4	3,3	4	EI 4,1-4,5	égal	A1	72,8	13	1,57	
5 ED SC3	PRD 319,75	Intact	2,00-3,00 m		10,1	48,7	3,2	3,9	EI 2,55-2,8	égal	A1	88,4	12	1,25	
5 ED SC3		Intact	3,50-4,00 m		55,2	67,1	4,2	4,4	EI 4,6-5,0	différent	A2	98,9	39		23
SC101		Remanié	1,25-1,5 m		54,9		2,69				A1	98,8	20	2,49	
SC101		Remanié	4,5- 5 m		81,8		2,68				A1	59,3	6	1,04	
2EDSC4		Intact	2 - 3 m		13		2,9				A1	94,7	24	1,74	
2EDSC5		Intact	2- 3m		53,7		3,7				A2	94,6	36		14
4EDSC114		Intact	3,5- 5 m		172,4		4,9				A2				

Tableau 3. Essais HET réalisés dans les digues du SYMADREM (digues non confortées)

Les fréquences de non dépassement respectivement des contraintes critiques τ_c et des indices de résistance à l'érosion I_e sont déterminées dans un premier temps par la formule de Hazen :

$$f = \frac{r - 0.5}{n}$$

r est le rang de la série de données classée par valeurs croissantes, n est la taille de l'échantillon.

Ces fréquences sont calculées en distinguant le mélange global des matériaux A1+A2 suivant la GTR2000 constituant les digues et les matériaux A2 que l'on retrouve dans les masques étanches de certaines digues confortées récemment.

Compte tenu du faible échantillon d'essais HET et pour pallier un écrêtement éventuel des courbes de distribution, des courbes théoriques en escaliers sont représentées pour déterminer les valeurs à 1%, 5 %, 25 %, 50 %, 75 %, 95 % et 99 %.

Un ajustement est réalisé sur la base de ces valeurs pour déterminer la fréquence de non dépassement des contraintes critiques et des indices de résistance à l'érosion suivant une fonction de répartition de type puissance ou de type Gumbel.

Les deux figures ci-dessous illustrent respectivement les fréquences de non dépassement des contraintes critiques et des indices de résistance à l'érosion.

Nous avons également ajouté les matériaux d'emprunts de la digue à créer entre Tarascon et Arles issus de la lône à créer entre Tarascon et Arles et de l'atterrissement à supprimer au droit de l'usine Fibre Excellence.

Le SYMADREM a profité d'une réparation de digue maritime suite à une tempête pour tester en grandeur nature la résistance à moyen terme à l'érosion de conduit des matériaux d'emprunts destinés à la création de la digue. C'est ainsi que le remblai de sol limoneux (type A1 dans la classification GTR) mis en œuvre par compactage pour la réparation a fait l'objet d'un suivi spécifique : à différents temps après la mise en place du sol (3, 7, 28, 94 et 360 jours), des échantillons intacts de 2 m de profondeur ont été prélevés par carottage sur une zone d'environ 5 m de longueur et 1,5 m de largeur. Un tronçon de chacune de ces carottes, localisé entre 1,0 et 1,4 m de profondeur, a été découpé et a fait l'objet d'un HET. Le reste du sol a été utilisé pour des essais d'identifications. Les identifications ont montré une très bonne homogénéité des différents échantillons, tous classés A1 dans la classification GTR, avec des granulométries similaires (passant à 80 µm entre 79 et 84 %, et passant à 2 µm entre 17 et 25 %), une plasticité proche (Indice de plasticité entre 7 et 12, VBS entre 1,37 et 1,52) et un Optimum Proctor Normal semblable (teneur en eau entre 18 et 21 %, densité sèche entre 1,63 et 1,67). L'état de densité et la teneur en eau des échantillons sont demeurés comparables, avec une teneur en eau de +3,0 à +5,3 % par rapport à l'Optimum et une densité correspondant à entre 88 et 97 % de la densité de l'Optimum Proctor. Aucune évolution significative des caractéristiques du remblai avec le temps n'a pas donc été mise en évidence par les essais d'identification.

Les résultats des essais d'érosion de conduits ont montré une augmentation peu significative de la résistance à l'érosion par rapport aux incertitudes de l'essai de J+3 à J+94. Celle-ci devient en revanche significative à J+360, avec une contrainte critique multipliée par 7 (50 et 55 Pa à respectivement J+3 et J+7, contre 350 Pa à J+360) et un indice d'érosion ayant

augmenté d'environ une unité (2,84 et 2,50 à respectivement J+3 et J+7, contre 3,42 à J+360). Le sol est ainsi passé d'une vitesse d'érosion « Très rapide » jusqu'à J≤28 selon la classification de Fell à une vitesse d'érosion « Modérément rapide » (Figure et tableau ci-après).

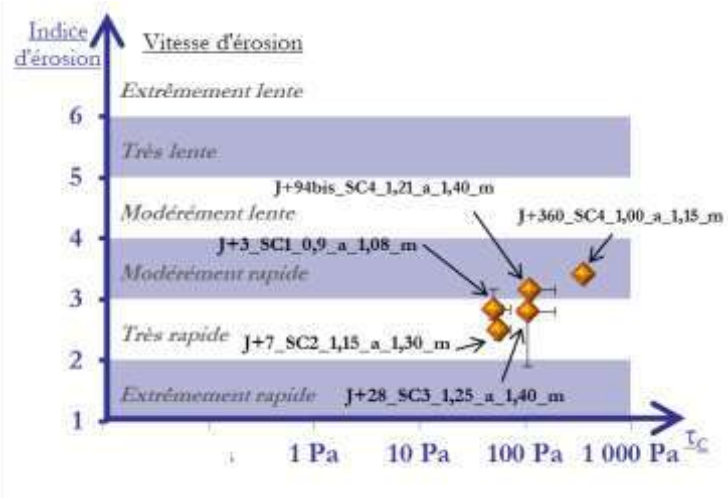


Figure 14. Augmentation de la résistance à l'érosion avec le temps mis en exergue sur la digue de l'Amarée

Tableau 4. Résultats des essais sur la digue de l'Amarée [G207]

	SC1_0,9_a_1,08_m J+3	SC2_1,15_a_1,30_m J+7	SC3_1,25_a_1,40_m J+28	SC4_1,10_a_1,21_m J+94	SC4_1,21_a_1,40_m J+94 bis	SC5_1,00_a_1,15_m J+360
Résultats						
Contrainte critique τ_c	50 Pa	55 Pa	105 Pa	200 Pa	110 Pa	350 Pa
$\tau_{c\ min}$	62 Pa	60 Pa	84 Pa	198 Pa	111 Pa	338 Pa
$\tau_{c\ max}$	72 Pa	71 Pa	189 Pa	253 Pa	120 Pa	432 Pa
Indice d'érosion Ie	2,84	2,50	2,80	3,63	3,15	3,42
Ie min	2,66	2,33	1,89	3,51	3,11	3,25
Ie max	3,18	2,74	3,06	3,78	3,39	3,51
Coefficient d'érosion de Hanson k_d	0,90 cm-3xN-1s-1	2,20 cm-3xN-1s-1	1,00 cm-3xN-1s-1	0,15 cm-3xN-1s-1	0,45 cm-3xN-1s-1	0,25 cm-3xN-1s-1
Coefficient d'érosion de Fell Ce	1,4E-03 s/m	3,2E-03 s/m	1,6E-03 s/m	2,3E-04 s/m	7,0E-04 s/m	3,8E-04 s/m
Remarques	Conduit asymétrique		Incertitude sur le coefficient d'érosion (dispersion des modélisations en début d'essai)	Présence d'un gravier dans le conduit		

En appliquant des valeurs sécuritaires d'accroissement de la résistance à l'érosion de conduit des matériaux destinés à la construction de la digue Tarascon-Arles, on retrouve des répartitions de valeurs très proches de celles des matériaux globaux (A1+A2) étudiés sur l'ensemble du delta, comme le montre les deux graphiques suivants :

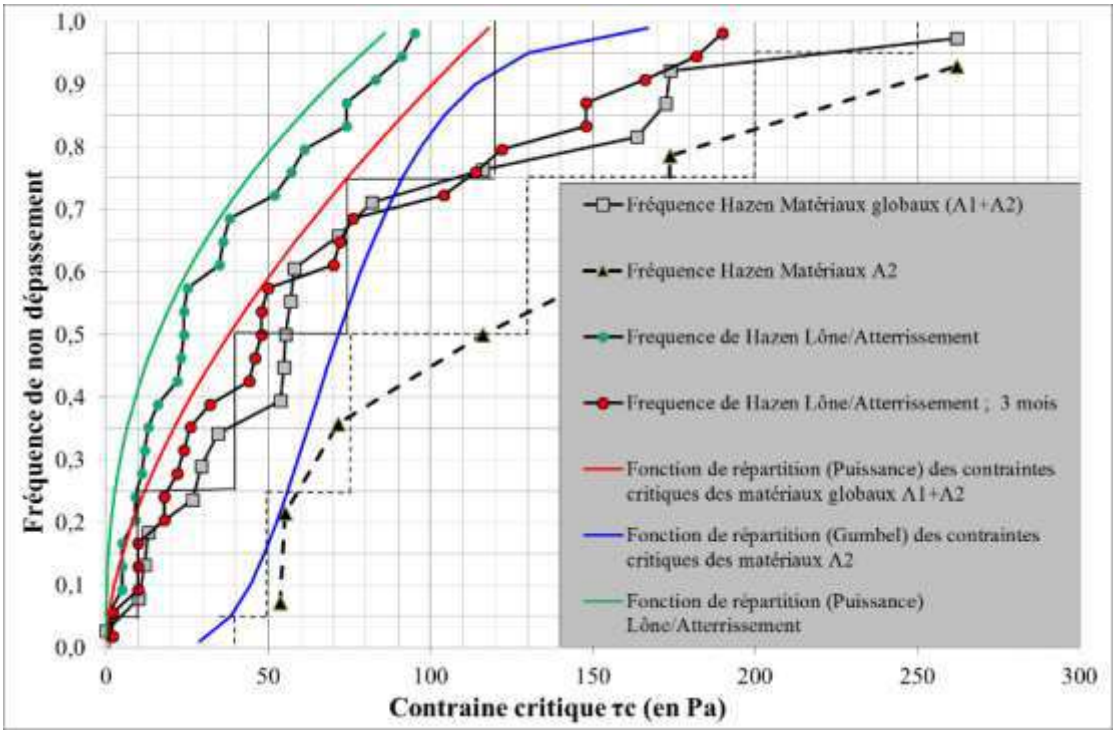


Figure 15. Fréquence de non dépassement des contraintes critiques pour les matériaux mélangés (A1+A2) et matériaux A2

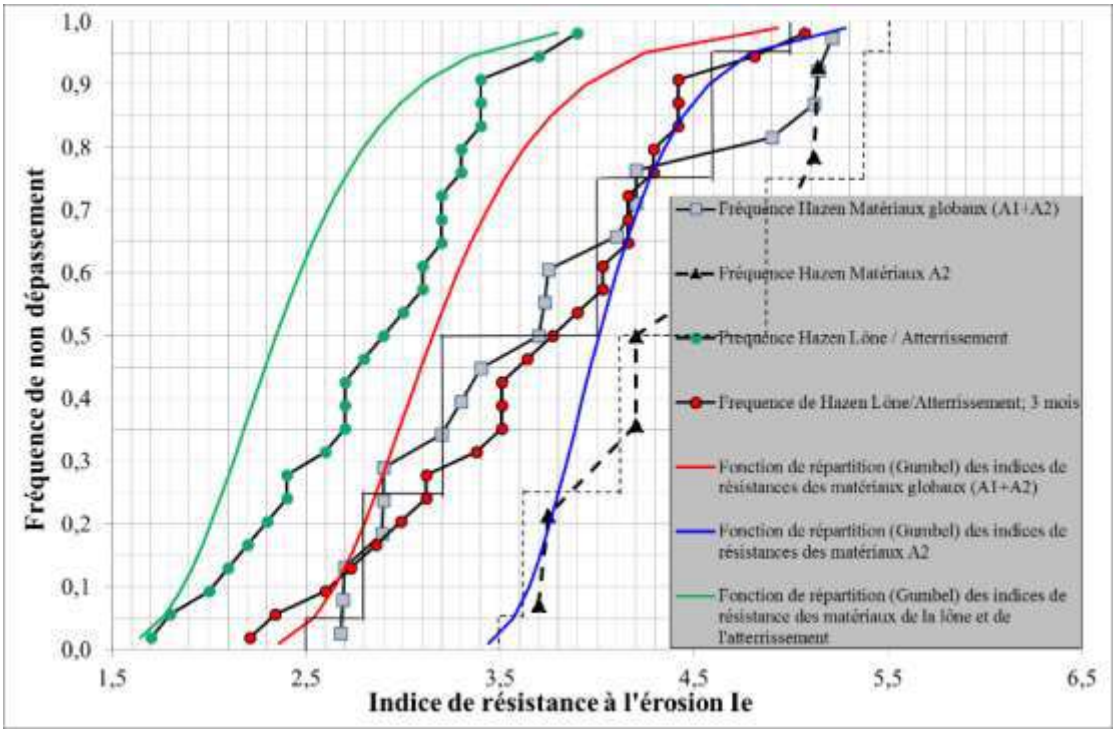


Figure 16. Fréquence de non dépassement des indices de résistance à l'érosion pour les matériaux mélangés (A1+A2) et matériaux A2

Pour les contraintes critiques des matériaux mélangés (A1+A2), la fréquence de non dépassement peut être exprimée par la loi de puissance suivante :

$$P_{non\ dépassement} = \left(\frac{\tau_c - \tau_{minimum}}{\tau_{maximum} - \tau_{minimum}}\right)^{0,6} = \left(\frac{\tau_c}{120}\right)^{0,6}$$

Pour les contraintes critiques des matériaux A2, la fréquence de non dépassement peut être exprimée par la loi de Gumbel suivante :

$$P_{non\ dépassement} = \exp\left(-exp\left(-\left(\frac{\tau_c - 63.3}{22.5}\right)\right)\right)$$

Pour les indices de résistance des matériaux mélangés (A1+A2), la fréquence de non dépassement peut être exprimée par la loi de Gumbel suivante :

$$P_{non\ dépassement} = \exp\left(-exp\left(-\left(\frac{I_e - 3.0}{0.42}\right)\right)\right)$$

Pour les indices de résistance des matériaux A2, la fréquence de non dépassement peut être exprimée par la loi de Gumbel suivante :

$$P_{non\ dépassement} = \exp\left(-exp\left(-\left(\frac{I_e - 3.9}{0.30}\right)\right)\right)$$

Les valeurs (arrondies) à 1 %, 5 %, 10 %, 25 %, 50 %, 90 %, et 99 % du couple $(\tau_c\ ; I_e)$ données par ces lois de distribution pour les matériaux mélangés (A1+A2) et les matériaux de type A2 sont reportées dans le tableau suivant :

Tableau 5. Probabilités de non dépassement des paramètres d'érosion pour les matériaux A2 et mélanges A1+A2

Type de matériaux	**Mélange A1 + A2**		**Matériaux type A2**	
Couple (τ_c ; Ie)	**τ_c en Pa**	**Indice de résistance à l'érosion I_e**	**τ_c en Pa**	**Indice de résistance à l'érosion I_e**
Valeur à 1 %	≈ 0	2.4	29	3.4
Valeur caractéristique à 5 %	≈ 1	2.5	39	3.6
Valeur à 10 %	≈ 3	2.6	45	3.6
Valeur à 25 %	12	2.9	56	3.8
Valeur médiane à 50%	38	3.2	72	4.0
Valeur à 90 %	101	3.9	114	4.6
Valeur à 99 %	118	4.9	167	5.3

2.2.5 *Détermination de la probabilité d'initiation de l'érosion de conduit en fonction du gradient hydraulique*

L'érosion de conduit étant initiée pour $\tau > \tau_c$, la probabilité d'initiation en fonction du gradient hydraulique dans le conduit peut être estimée à partir des équations précédentes comme suit. En effet si on prend le cas de matériaux globaux (Cf. figure 14), on a une probabilité de 50 % de ne pas avoir de contraintes critiques supérieures à 40 Pa. Du coup, quand nous avons dans un conduit une contrainte de cisaillement de 40 Pa, nous avons une probabilité de 50 % que l'érosion de conduit soit initiée (Cf. figure 16).

Pour les matériaux mélangés (A1+A2) :

$$P_{initiation} = Min\left[\left(\frac{\frac{1}{2}.R.\alpha.\rho_w.g.i}{120}\right)^{0,6} ; 1\right]$$

Pour les matériaux A2 :

$$P_{initiation} = \exp\left(-exp\left(-\left(\frac{\frac{1}{2}.R.\alpha.\rho_w.g.i - 63.3}{22.5}\right)\right)\right)$$

Ces deux lois de probabilités sont bornées à 0,001 dès que i > 0.
La figure ci-après illustre la probabilité d'initiation d'érosion de conduit en fonction du gradient hydraulique dans différents types de conduit pour les deux matériaux considérés (A1+A2 ou A2).

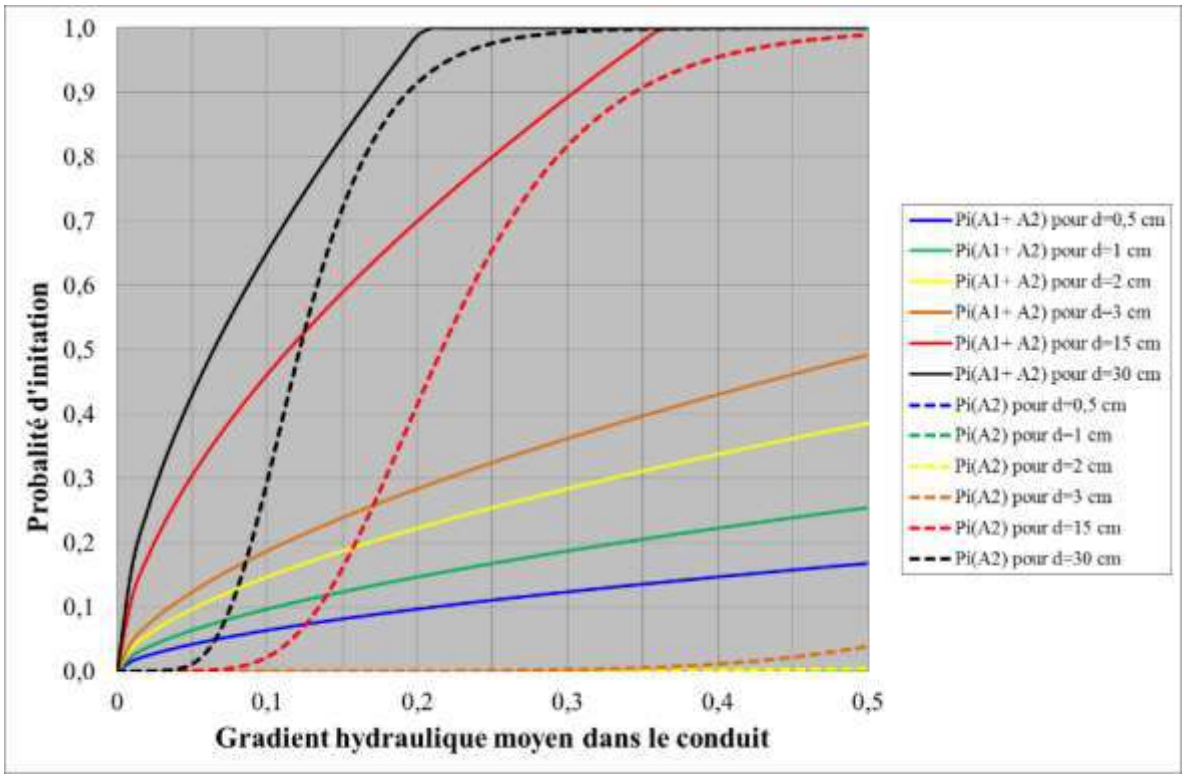


Figure 17. Probabilité d'initiation de l'érosion de conduit en fonction de la nature des matériaux et du gradient hydraulique dans le conduit.

Les gradients hydrauliques correspondant aux probabilités d'initiation respectivement de 1%, 5 %, 10% et 50 % pour les deux types de matériaux sont donnés dans le tableau ci-dessous. Seuls figurent les gradients hydrauliques susceptibles d'être rencontrés dans les digues du Symadrem, soit des gradients inférieurs à 0,5.

Tableau 6. Gradients critiques et probabilité d'initiation de l'érosion de conduit

Diamètre d (cm) du conduit	**Mélange de matériaux A1+ A2**				**Matériaux type A2**			
	P_i=0.01	P_i=0.05	P_i=0.1	P_i=0.5	P_i=0.01	P_i=0.05	P_i=0.1	P_i=0.5
	$\tau_c \approx 0$	$\tau_c \approx 1$	$\tau_c = 3$	$\tau_c = 38$	$\tau_c = 29$	$\tau_c = 39$	$\tau_c = 45$	$\tau_c = 72$
0.5	< 0.01	0.01	0.2	> 0.5	> 0.5			
1		0.03	0.1					
2		0.02	0.05					
3		0.01	0.035	0.3	0.39	> 0.5		
15		< 0.01	< 0.01	0.11	0.09	0.12	0.13	0.22
30				0.06	0.05	0.07	0.08	0.12

Dans les matériaux A2, la probabilité d'initiation est quasiment nulle à très faible pour des conduits de diamètres inférieurs ou égaux à 5 cm. La valeur caractéristique de 5 % est atteinte pour des conduits de 5 cm pour des gradients de 0,31.

Dans le mélange de matériaux A1+A2 la valeur caractéristique de 5 % est atteinte pour un conduit de diamètre 1 cm pour un gradient de 0,03, ce qui est très faible.

Pour un terrier de blaireau (Φ = 30 cm), la probabilité d'initiation augmente très rapidement même pour des gradients très faibles, voire quasiment nuls. Elle atteint pour les matériaux mélangés (A1+A2) la valeur caractéristique de 5 % pour un gradient de 0,002 ! L'initiation est quasiment certaine (Pi = 0,5) pour des gradients de 0,06. Ces résultats confirment le retour d'expérience décrit dans l'étude accidentologique.
Dans des matériaux de type A2, la probabilité d'initiation de 5 % est atteinte pour des gradients faibles (i = 0,07) et est quasiment certaine pour des gradients de 0,12.

Pour des terriers de lapins (Φ = 15 cm), les gradients critiques sont environ 2 fois supérieurs à ceux des terriers de blaireaux. Les conclusions restent identiques.

2.2.6 Détermination du débit et rayon de détection

On considère que le conduit peut être détecté visuellement par les gardes digues ou les équipes de surveillance pour un débit d'environ 1 à 2 l/s.

Le débit Q dans le conduit s'écrit :

$$Q = \pi R^{2,5} \sqrt{\frac{\propto . g . i}{2f}}$$

Avec $i = (\Delta H_w - R)/L$: gradient hydraulique moyen dans le conduit

Le tableau ci-dessous donne les débits dans le conduit au moment de l'initiation de l'érosion de conduit

Tableau 7. Débits dans le conduit à l'initiation

Diamètre d (cm) du conduit	**Mélange de matériaux A1+ A2**				**Matériaux type A2**			
	P_i=0.01	P_i=0.05	P_i=0.1	P_i=0.5	P_i=0.01	P_i=0.05	P_i=0.1	P_i=0.5
	$\tau_c \approx 0$	$\tau_c \approx 1$	τ_c= 3	τ_c= 38	τ_c= 29	τ_c= 39	τ_c= 45	τ_c= 72
0.5	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1
1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
2	0,0	0,1	0,2	0,9	0,8	0,9	0,9	1,2
3	0,1	0,3	0,5	1,9	1,7	2,0	2,1	2,7
15	1,9	7,1	12,7	48,6	42,5	49,1	52,7	66,8
30	7,5	28,5	50,8	194,2	170,0	196,3	210,9	267,3

On constate que pour les conduits de diamètre 0,5 à 3 cm, la probabilité que l'érosion de conduit soit déjà initiée au moment de sa détection par les gardes digues ou équipes de surveillance est forte.

Pour les conduits de diamètre 15 à 30 cm, deux cas sont à envisager, soit le conduit est traversant, soit on est en présence d'un ancien conduit partiellement colmaté, qui va déboucher côté terre après claquage hydraulique du bouchon de colmatage.

Dans le premier cas, la détection du terrier doit intervenir avant la mise en charge de ce dernier soit dans les phases de pré-alerte ou alerte 1 (Cf. Chapitre n°9).

Pour les conduits de diamètre 15 à 30 cm qui ont été colmatés partiellement, on peut considérer que la probabilité d'initiation de l'érosion au moment du claquage du bouchon est certaine.

Le tableau ci-dessous donne les débits dans le conduit en fonction du diamètre du conduit et du gradient hydraulique dans le conduit.

Tableau 8. Débits dans le conduit en fonction du gradient hydraulique et diamètre du conduit

Diamètre du conduit (en cm)	Gradient i dans le conduit								
	0,01	**0,03**	**0,05**	**0,07**	**0,1**	**0,15**	**0,2**	**0,25**	**0,3**
0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5
3	0,3	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,2	1,4	1,5
4	0,6	1,0	1,2	1,5	1,8	2,2	2,5	2,8	3,0
5	1,0	1,7	2,2	2,6	3,1	3,8	4,3	4,9	5,3

Pour le calcul du temps de rupture, compte tenu des gradients hydrauliques considérés, on retient un rayon de détection Rd = 2 cm pour les conduits de diamètre inférieur à 4 cm et pour les conduits supérieurs, on considère que le rayon de détection est égal au rayon du conduit.

2.2.7 Détermination du temps de rupture

On estime le temps de rupture pour les différents types de conduit en fonction du gradient hydraulique.

$$\Delta t_u \approx \frac{2\rho_d}{C_e \propto \rho_w\, g\, i} Ln\left(\frac{R_u}{R_d}\right)$$

Pour la détermination de R_u, le retour d'expériences des crues de 1993 à 2003 nous montre que des effondrements de toit se sont produits pour des diamètres de conduits compris entre 1,5 et 2 m, ce qui nous amène à retenir la valeur caractéristique suivante R_u = 0,75 m pour les matériaux mélangés (A1+A2) et 1 m pour les matériaux A2. Ces valeurs sont légèrement en deçà des valeurs calculées dans l'étude menée par EDF dans le cadre du programme de recherche ERINOH [X010].

Les indices de résistance à l'érosion sont liés avec les contraintes critiques. Comme indiqué plus haut, les deux paramètres sont bien corrélés pour des contraintes critiques supérieures à 100 Pa. En revanche en deçà de cette valeur seuil, la corrélation n'est pas évidente. Par prudence, on retient pour le mélange de matériaux A1/A2 une valeur caractéristique Ie = 2,5 et pour les matériaux A2, Ie = 3,6 correspondant aux fréquences respectives de non dépassement à 5 % pour les deux types de matériaux.

L'évolution du temps de rupture de la détection à l'effondrement du toit en fonction du gradient hydraulique figure ci-après. Pour les matériaux mélangés (A1+A2), figure également la courbe du temps de rupture pour un conduit de diamètre 30 cm avec un indice de résistance Ie=2,9, valeur correspondant à une fréquence de non dépassement de 25 %.

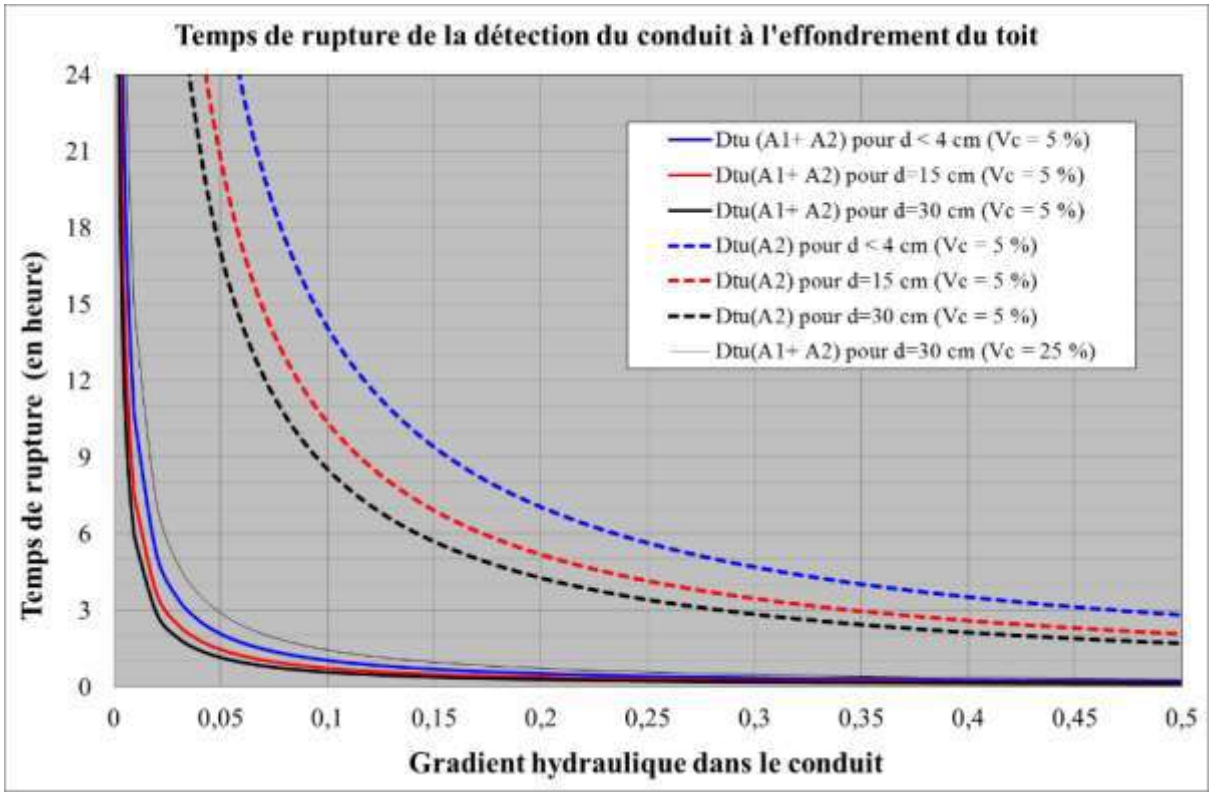


Figure 18. Temps de rupture en fonction du diamètre du conduit, de la nature des matériaux et du gradient hydraulique dans le conduit

Tableau 9. Temps de rupture pour les matériaux mélangés (A1+A2) en fonction du diamètre du conduit et du gradient hydraulique dans le conduit

	Δtu (en h) pour les matériaux A1+A2		
	D < 4 cm	**D = 15 cm**	**D = 30 cm**
0,01	10 h	7 h	6 h
0,02	5 h	4 h	3 h
0,03	3 h	2 h	1 h
0,04	3 h	2 h	1 h
0,05	2 h	1 h	1 h

Tableau 10. Temps de rupture pour les matériaux de type A2 en fonction du diamètre du conduit et du gradient hydraulique dans le conduit

i	**Δtu (en h) pour les matériaux A2**		
	D < 4 cm	**D = 15 cm**	**D = 30 cm**
0,05	28 h	21 h	17 h
0,10	14 h	10 h	9 h
0,15	9 h	7 h	6 h
0,20	7 h	5 h	4 h
0,30	5 h	3 h	3 h

Pour les matériaux mélangés (A1+A2), on constate que pour des gradients de 1/20, le temps de rupture est inférieur à 3 heures, même pour des petits conduits ce qui impose pour envisager une intervention d'urgence, une détection extrêmement précoce, que l'on peut qualifier de chanceuse et aléatoire dépendante essentiellement de l'indice de résistance du matériau comme le montre l'évolution du temps de rupture avec un indice supérieur égal à I_e = 2,9 (valeur à 25 %).

La capacité d'intervention dans cette situation est suspendue à la résistance réelle du matériau érodé.

Pour les matériaux A2, ce temps de rupture est beaucoup plus long (multiplié par 10 à gradient constant) et reste supérieur à 3 heures même avec des terriers de blaireaux de 30 cm pour des gradients inférieurs à 0,30.

Pour la suite de l'étude on retiendra les formules suivantes pour l'évaluation du temps de rupture (en heures) :

Pour les matériaux mélangés (A1+A2) et des conduits de $\Phi < 4$ cm ($\alpha = 1$)

$$\Delta t_u = \frac{0{,}10}{i}$$

Pour les matériaux mélangés (A1+A2) et des conduits de $\Phi = 15$ cm ($\alpha = 0{,}9$)

$$\Delta t_u = \frac{0{,}07}{i}$$

Pour les matériaux mélangés (A1+A2) et des conduits de $\Phi = 30$ cm ($\alpha = 0{,}8$)

$$\Delta t_u = \frac{0{,}06}{i}$$

Pour les matériaux A2 et des conduits de $\Phi < 4$ cm ($\alpha = 1$)

$$\Delta t_u = \frac{1{,}41}{i}$$

Pour les matériaux A2 et des conduits de $\Phi = 15$ cm ($\alpha = 0{,}9$)

$$\Delta t_u = \frac{1{,}04}{i}$$

Pour les matériaux A2 et des conduits de $\Phi = 30$ cm ($\alpha = 0{,}8$)

$$\Delta t_u = \frac{0{,}86}{i}$$

2.2.8 Retour d'expériences liées à l'exploitation et l'étude accidentologique

Différents types de conduits peuvent être créés.

Les terriers de blaireaux ont un diamètre d'environ 30 cm. Ils sont en général localisés en pied de talus ou à mi- talus. Ils sont facilement détectables par la présence d'un monticule en sortie de terrier. Le volume de ce dernier peut être de l'ordre d'un ou plusieurs m^3, ce qui rend probable à très probable le caractère traversant de ce type de terrier.

Photo 1. Terrier de blaireau et monticule de terre extrait du terrier en pied de digue

Photo 2. Terriers de blaireaux lors de travaux de purge

Le second type de conduit observé sur les digues du SYMADREM sont les trous de guèpes, dont le diamètre est également d'environ 30 cm. Ces trous peuvent faire 1 mètre de profondeur mais ne sont en aucun cas traversant. Ils peuvent néanmoins détériorer le fonction étanchéité de la digue et permettre une alimentation directe d'une couche de sable ou de grave sous l'étanchéité de la digue.

Photo 3. Trous de guêpes

D'autres trous sont également possibles mais très rarement rencontrés sur les digues du SYMADREM, il s'agit des trous de ragondins (Φ = 20 cm). Les ragondins sont fréquents à proximité des zones humides ou des cours d'eau, mais absents des digues du SYMADREM à l'exception des tronçons où l'eau est présente en permanence en pied de digue (ex. Mas du Juge en rive droite du Petit Rhône). Sur les tronçons de digue à proximité du fleuve, les trous créés par les ragondins vont concerner plutôt la berge que la digue elle-même.

Les trous de lapins (Φ = 15 cm) ont été à une certaine époque observés dans les digues du SYMADREM, mais ne sont aujourd'hui plus présents compte tenu de la myxomatose.

Les taupes (Φ = 5 cm) font des petites galeries en surface dans la terre non compactée, ce type de galeries pourrait poser des problèmes en crête de digue, en cas de communication des galeries qui pourraient engendrer un conduit traversant quelques décimètres sous la crête. Cette hypothèse demeure néanmoins très peu probable compte tenu du fait que quasiment toutes les digues sont désormais carrossables. Sur les tronçons non carrossables jusqu'à peu, le passage des engins d'entretien a eu pour effet de rendre compacte la couche de sol en surface ce qui fait qu'aucun trou de taupes n'a été observé en surface. Leur présence est observée uniquement sur les talus.

A l'instar des taupes, les mulots (Φ = 2 cm) ne font pas de trous en profondeur et ne creusent pas dans la terre compactée.

La présence de vides au contact canalisations traversantes/remblai est possible. L'étude accidentologique a montré que la brèche autour des canalisations traversantes de la Galante et de Casebrune en 1993 n'avait été possible qu'en présence d'un conduit de 3 cm de diamètre et d'une contrainte critique faible (5-10 Pa – valeur mesurée dans ce secteur).

La présence de fissures traversantes (Φ = 1 cm) est également possible dans les digues qui ont été construites au XIX^{ème} siècle et qui n'ont pas fait l'objet de travaux de confortement depuis.

La présence d'anciennes racines (Φ = 1 à 3 cm) mortes peut être également le siège d'infiltrations et d'érosion de conduit. La probabilité d'avoir des anciennes racines mortes potentiellement traversantes doit être considérée dans les secteurs ayant fait par le passé d'opérations de déboisage sans dessouchage des racines.

Certaines infiltrations sont observables en périodes de crues. Sont-elles dues à la perméabilité des sols (sable) ou sont-elles dues à des infiltrations d'eau le long de fissures provoquées par le vieillissement du remblai ; le long d'anciennes racines, voire de transitions insuffisamment traitées (réparations d'urgence).

Photo 4. Résurgences d'infiltrations en amont de la Galante PRG 299,6-299,7 - crue de janvier 2014 (6500 m^3/s)

Compte tenu du retour d'expériences, les conduits traversants pris en compte dans l'analyse de risques sont :

- les terriers de blaireaux partiellement colmatés,
- les vides le long des ouvrages ou transitions traversant la digue,
- les fissures liées au vieillissement de l'ouvrage (cycle chargement/absence de crue),
- les anciennes racines mortes suite à des opérations de déboisage non suivies de dessouchage.

Les vides le long de transitions entre la digue et des brèches traitées en urgence sont traités avec l'érosion de contact.

2.3 RUPTURE PAR EROSION REGRESSIVE

2.3.1 Définition et description

L'érosion régressive est le phénomène d'arrachement des particules de sol une à une, sous l'effet de la pression du fluide qui percole à travers le remblai. Ce processus apparaît d'abord à l'aval de l'ouvrage pour se propager ensuite vers l'amont.

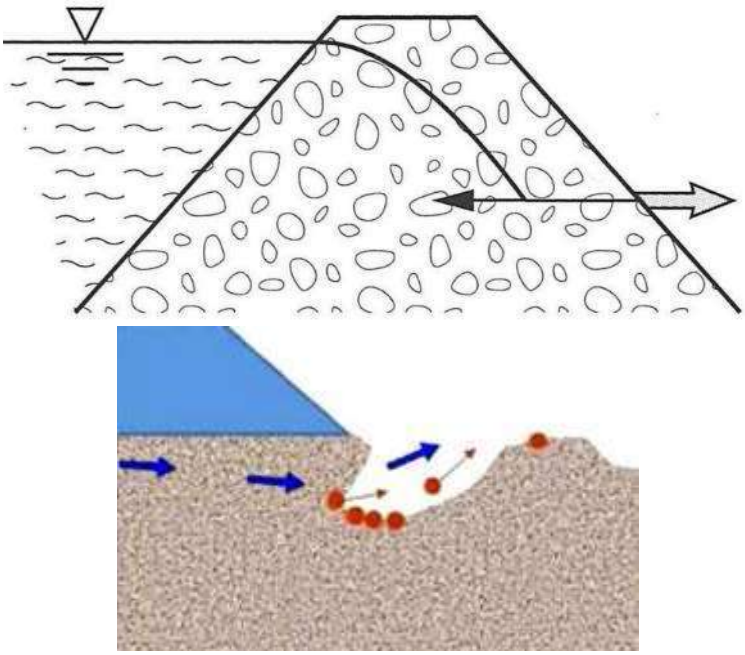


Figure 19. Erosion regressive (Bonelli and Al. 2012 [X006])

On distingue deux types d'érosion régressive (CIGB 2015 [X001])

Le premier type concerne l'érosion générale des particules de la surface de suintement, par exemple en pied aval de digue. Le seuil d'érosion est accessible par le calcul de stabilité de peau sous les forces de gravité (le poids) et d'écoulement (le gradient hydraulique)

Le second type est l'érosion régressive locale, qui s'initie sous une paroi cohérente en de fins chenaux d'une hauteur maximale d'une douzaine de grains, dans une couche de sable. Ce phénomène est repéré en pied aval de digue par la présence d'un tumulus de sable au milieu duquel coule une résurgence qui transporte des fines.

La rupture est possible si trois conditions sont réunies :

- Le claquage hydraulique de la couche d'argile,
- Le conduit ne s'effondre pas : il faut un toit cohésif,
- L'écoulement a suffisamment d'énergie (vitesse le long de son parcours de l'ordre de 1 cm/s) pour à la fois éroder des particules à l'amont du conduit (ces conduits sont beaucoup plus petits que pour l'érosion de conduit) et les transporter jusqu'à l'exutoire aval. L'énergie requise est exprimée en termes de gradient moyen.

Ce phénomène de tumulus a été observé sur l'Aggly lors de la crue, pourtant brève de 2013. Il n'a jamais été recensé dans le Delta du Rhône, bien qu'il soit fréquent dans les deltas. En revanche, l'observation de suintements ou de résurgences en pied aval des digues du Rhône est courante.

Dans les digues du Pays Bas, du Mississippi aux USA et les digues du Yangtze et du Nenjiang en Chine, l'érosion régressive a provoqué la boulance des sables et la rupture des digues en période de crue après une longue période d'érosion et d'absence de surveillance.

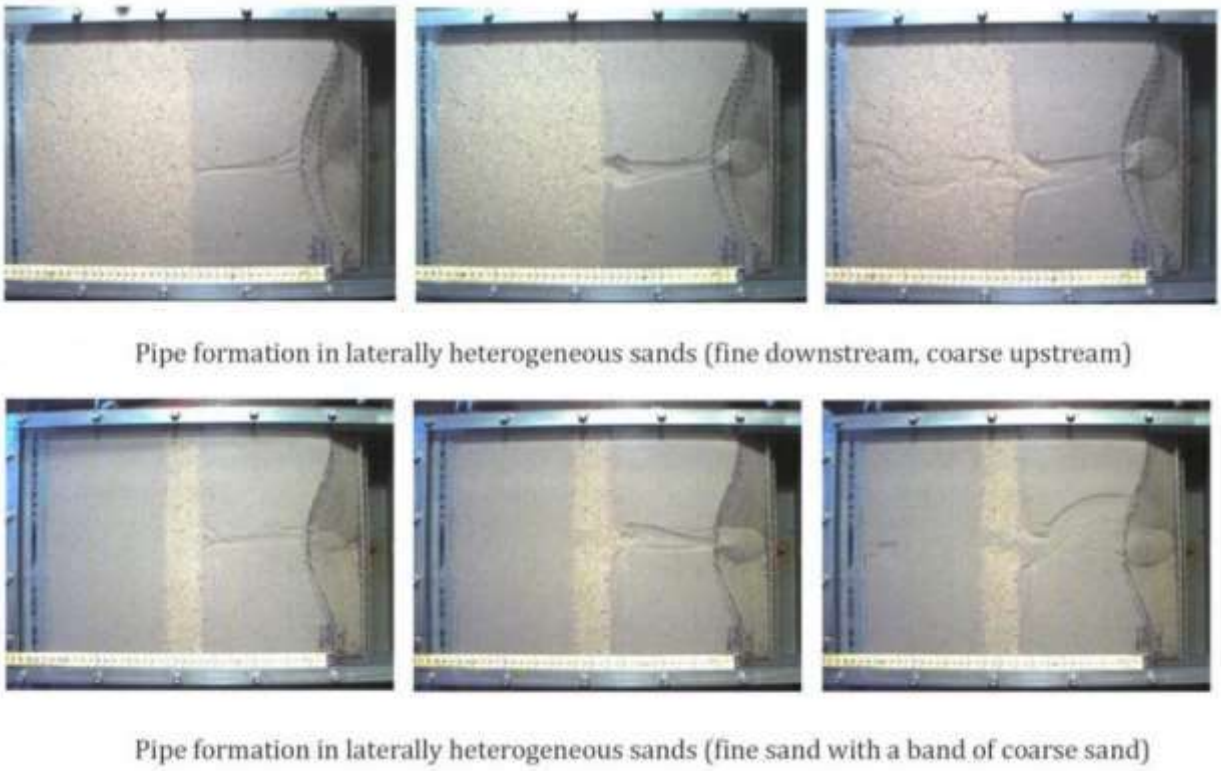


Figure 20. Erosion régressive dans des couches de sable fin et grossier (Van Beek 2015 [X014])

Photo 5. tumulus observés en aval des digues de l'Aggly 2013 (© SAFEGE)

Les différentes phases d'une rupture de digue en argile sur une fondation sableuse par érosion régressive sont décrites dans la figure suivante (d'après Sellmeijer & Al. 2011 [X011]) :

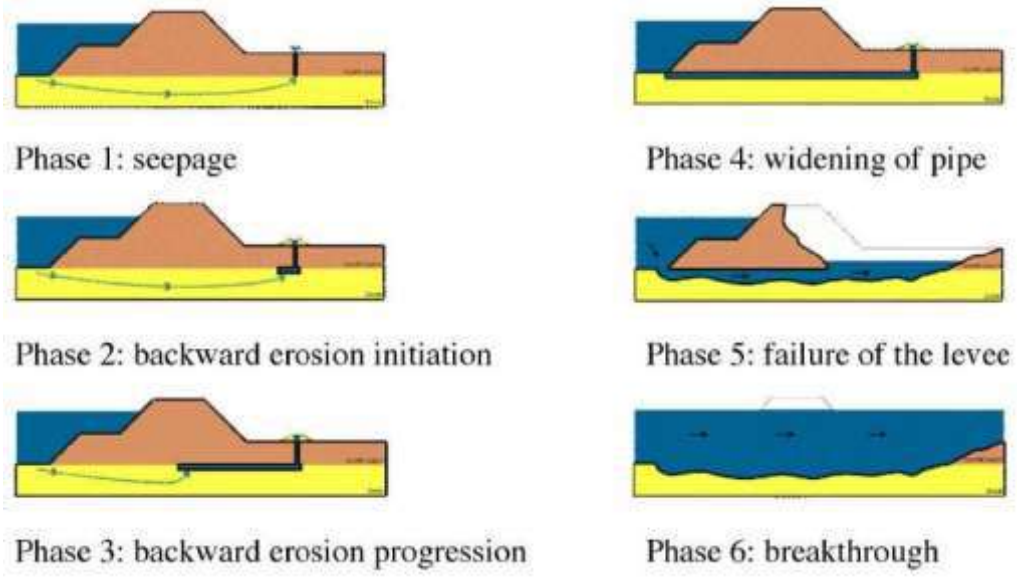


Figure 21. Processus de rupture de la digue par érosion régressive (CIGB 2015 d'après Sellmeijer 2011)

Ces différentes phases sont :

1. Infiltration et claquage de la couche d'argile,
2. Initiation de l'érosion régressive, départ des particules vers l'aval,
3. Progression de l'érosion régressive de l'aval vers l'amont,
4. Création de conduits reliés au plan d'eau en amont et l'élargissement des conduits,
5. Rupture de la digue (brèche),
6. Elargissement de la brèche.

Infiltration et claquage de la couche d'argile (phase 1) :

C'est la première phase du processus de rupture, commandée par la différence de charge hydraulique le long de la structure. Le débit à travers la couche du sable peut être estimé à partir de la formule de Darcy. L'initiation du phénomène nécessite l'existence d'un chemin de fuite préférentiel dans le sol avec un exutoire à l'aval. Dans certains cas l'exutoire aval existe naturellement, comme par exemple lorsqu'on note l'absence d'une couche de couverture cohésive à l'aval de la structure (Cf. cas (a) ci-dessous), ou lorsqu'il existe un fossé dans une mince couche de sol cohésive (Cf. cas (c) ci-dessous). Dans d'autres cas, l'exutoire est créé quand les sous pressions au-dessous de la couche de couverture dépassent le poids de cette dernière et provoquent le claquage hydraulique de cette dernière (Cf. cas (b) ci-dessous).

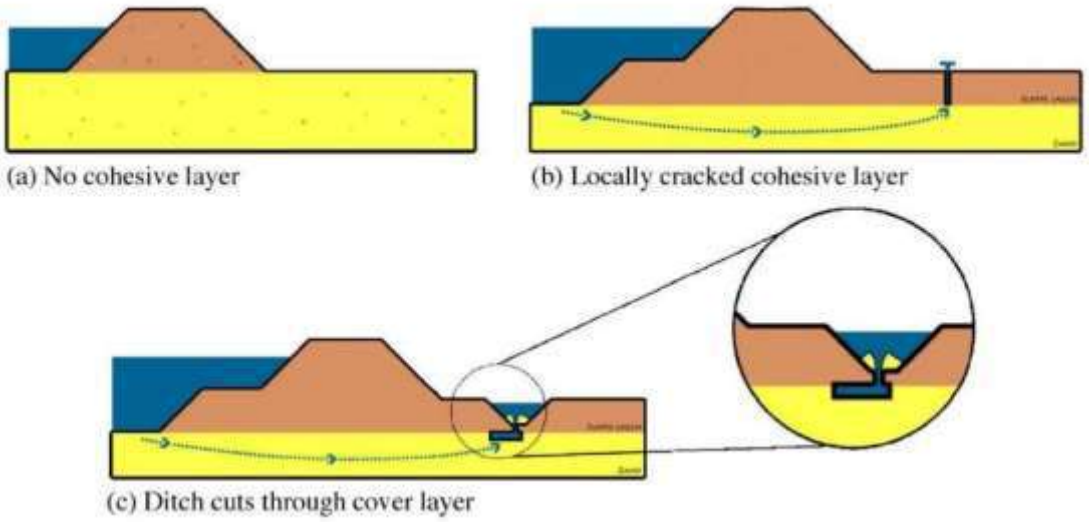


Figure 22. Différents types de digues et exutoires existants

Dans certaines zones, la fuite est observée par la présence de zones humides à l'aval des structures. Les deux figures ci-dessous illustrent respectivement des infiltrations observées lors d'une crue triennale en janvier 2014 en rive gauche du Petit Rhône et en janvier 1994 au droit du Mas Laborde en rive droite du Petit Rhône.

Photo 6. Infiltrations digue du Petit Rhône rive gauche (janv. 2014)

Photo 7. Traitement des infiltrations sous la digue du Petit Rhône rive droite (© Y. Cavallini)

Erosion régressive : initiation et progression (phases 2 et 3)

L'initiation de l'érosion régressive nécessite la fluidisation du sable proche de l'exutoire. La fluidisation apparait lorsque les sous pressions dans le sable dépassent les contraintes effectives, le sable se comporte alors comme un fluide.
La vitesse de sortie dépend du type de l'exutoire. La vitesse de sortie à travers une fissure dans une couche de sol cohésive (cas (a) ci-dessus) est supérieure aux vitesses de sortie à l'aval de la structure où il n y a pas une couche de couverture (cas (b) ci-dessus).

Elargissement (phase 4) :

Le débit dans le conduit augmente au fur et à mesure que le conduit progresse dans le corps du remblai et connecte l'amont à l'aval. La montée du débit provoque l'érosion d'une grande quantité de sables situés à l'entrée immédiate du conduit.
Vu les dimensions du conduit formé (épaisseur limitée (quelque millimètres) et profondeur faible (quelques centimètres)) plusieurs conduits apparaissent. Malgré l'apparition d'autres conduits, la capacité du transport reste limitée et les matériaux érodés bloquent une partie de la sortie du conduit. Le sable bloqué dans les conduits est par la suite déplacé durant un nouveau processus d'érosion régressive. De cette façon, le conduit élargi devient progressivement long, et se déplace vers l'aval de la digue.
Lorsque le conduit s'élargit de l'amont vers l'aval de la digue, le sable se déplace et le débit augmente considérablement.

Rupture et brèche (phase 5 et 6) :

La rupture est observée qu'une fois le processus d'élargissement fini. La digue se déforme et rompt.

L'initiation de l'érosion régressive peut être évaluée par plusieurs méthodes décrites dans le bulletin n°164 de la CIGB. On retiendra les méthodes développées respectivement par deux néerlandais :

- Méthode de Sellmeijer [X011],
- Méthode d'Hoffmans [X012].

2.3.2 Présentation du modèle de Sellmeijer

Sellmeijer a développé un modèle mathématique basé sur des résultats expérimentaux réalisés en 1980. Ce modèle a été raffiné par Van Beek et al (2010) et Sellmeijer et al 2011. Le modèle est exprimé par les équations suivantes :

$$\frac{H_C}{L} = \frac{1}{c} = F_R\, F_S\, F_G$$

$$F_R = \eta\, \frac{\gamma'_p}{\gamma_w}\, \tan\vartheta\, \left(\frac{RD}{RD_m}\right)^{0.35} \left(\frac{U}{U_m}\right)^{0.13} \left(\frac{KAS}{KAS_m}\right)^{-0.02}$$

$$F_S = \frac{d_{70}}{\sqrt[3]{\kappa L}} \left(\frac{d_{70m}}{d_{70}}\right)^{0.6}$$

$$F_G = 0.91 \left(\frac{D}{L}\right)^{\frac{0.28}{\left(\frac{D}{L}\right)^{2.8}-1}+0.04}$$

avec :

H	: La charge hydraulique le long de la structure (m)
L	: longueur des infiltrations sous la base argileuse (m)
H_C/L	: gradient critique
D	: épaisseur de la couche de sable (m)
c	: coefficient d'érosion
F_R	: Facteur de résistance
F_S	: Facteur d'échelle
F_G	: Facteur de forme géométrique
RD	: densité relative (%)
U	: coefficient d'uniformité ($C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$)
KAS	: forme de particule, angularité (%)
d_{70}	: diamètre pour lequel 70% des grains passent (m)
γ_p '	: Poids volumique du sol déjaugé 16.5 (kN/m^3)
γ_w	: Poids volumique de l'eau (kN/ m^3)
η	: constante de Whites (0.25)
ϑ	: angle du frottement interne du sable (°)
κ	: perméabilité intrinsèque (m^2) $\kappa = \frac{\upsilon}{g} * k$ Avec υ : viscosité cinématique ; g : gravité ; k : perméabilité hydraulique

On retient : $\upsilon = 1{,}3.10^{-6}$ m²/s (à 10°C) et g =9.81 m/s²

Le domaine d'application des équations de Sellmeijer est le suivant :

Tableau 11. Domaine d'application du modèle de Sellmeijer et al (2011)

Paramètre	Minimum	Maximum	Moyenne
RD	50%	100%	72.5%
U	1.3	2.6	1.81
KAS	35%	70%	49.8%
d_{70}	150 µm	430 µm	208 µm

Des tests sur les différents paramètres du modèle permettent de déterminer la sensibilité des différents facteurs de résistance, de forme et d'échelle. Les résultats figurent ci-après.

La première figure illustre les valeurs de facteur de résistance en fonction de l'angle de frottement interne pour les bornes inférieures et supérieures des domaines d'application respectivement des coefficients d'angularité (KAS), d'uniformité (U) et de densité relative. La formule de Sellmeijer est peu sensible au coefficient d'angularité. En revanche, le facteur de résistance augmente avec la densité relative et dans une moindre mesure avec le coefficient d'uniformité et l'angle de frottement interne.

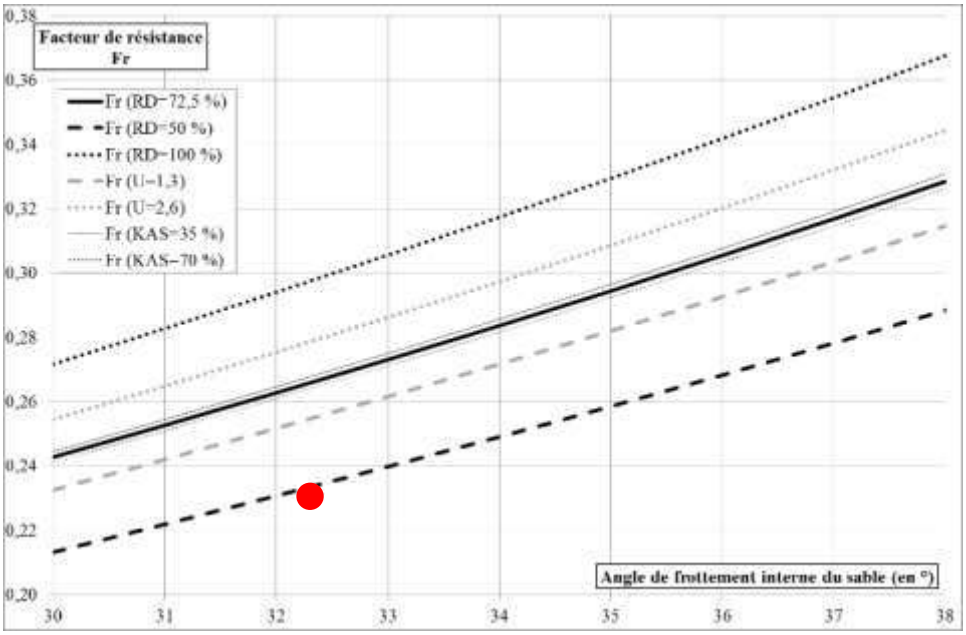


Figure 23. Analyse de sensibilité du facteur de résistance

La figure ci-dessous illustre le facteur d'échelle en fonction de la longueur L. Il est peu sensible à la longueur L au-delà de 15 m. En revanche, il est sensible au d_{70} (environ 50 %) et très sensible à la perméabilité des matériaux ; une variation d'un log de la perméabilité peut induire une variation du simple au double de ce coefficient.

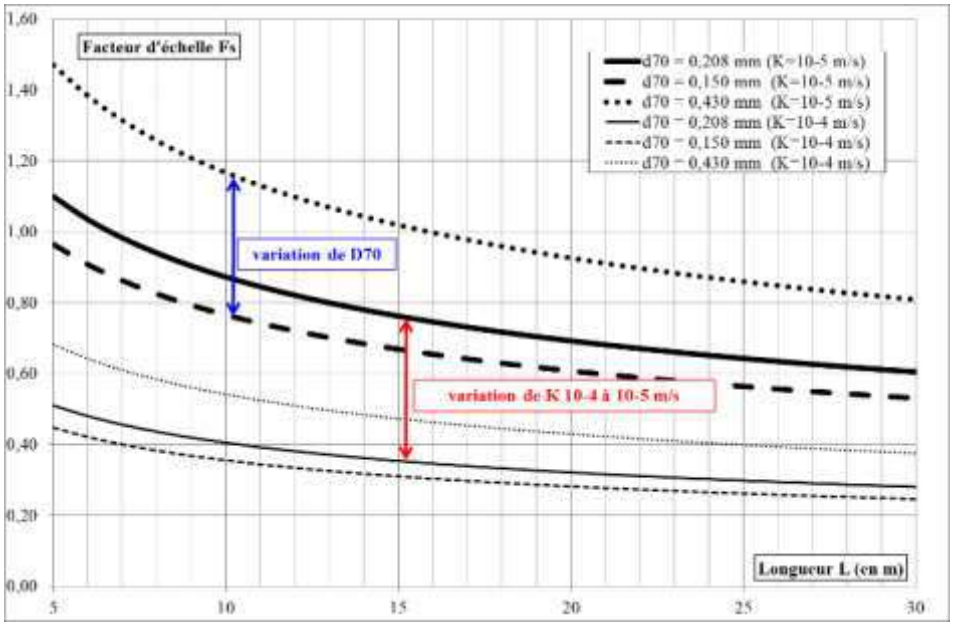


Figure 24. Analyse de sensibilité du facteur d'échelle

La figure ci-dessous illustre les variations du facteur de forme géométrique en fonction de la longueur d'infiltration pour différentes épaisseurs de sable. On observe que ce facteur diminue fortement avec l'épaisseur D et augmente avec la longueur de cheminement L.

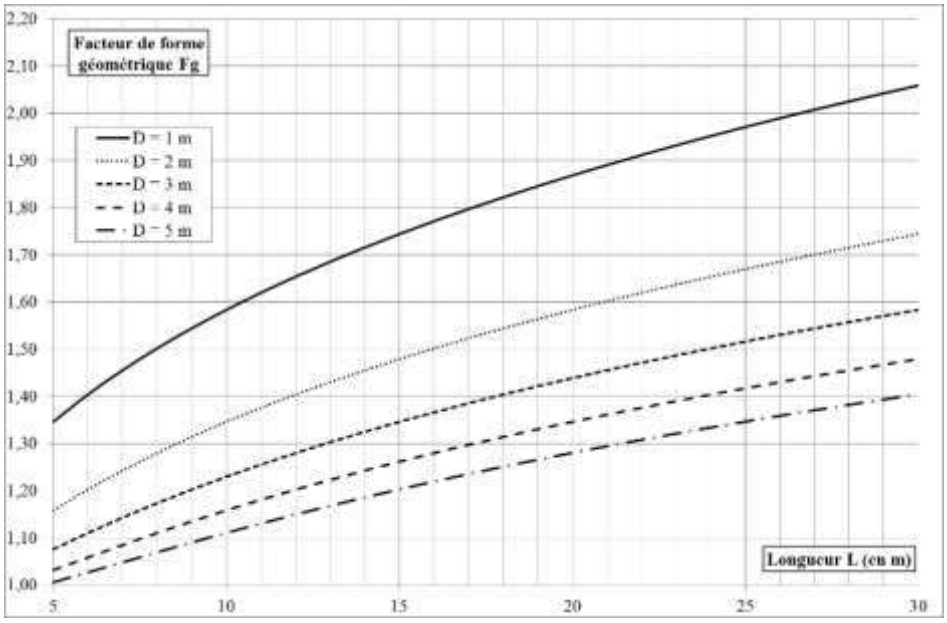


Figure 25. Analyse de sensibilité du facteur de forme géométrique

Les paramètres et les hypothèses définis par Sellmeijer et al (2011) sont:

- η=0.25 ; ϑ =37° ; γ_p' =16.5 kN/m^3 ;

Pour l'analyse de risques, on retient, les valeurs caractéristiques suivantes :

- Angle de frottement interne ϑ =32°
- Densité relative : 50 %

2.3.3 Présentation du modèle d'Hoffmans

L'approche d'Hoffmans est basée sur la perméabilité hydraulique (k), les diamètres des particules d_{50}; d_{15} ; la longueur critique du conduit $l_{z,c}$, et le coefficient α_H. Les deux derniers paramètres sont déterminés par les équations suivantes :

$$\frac{(H_1 - H_2)_c}{L} = \underbrace{\frac{\sqrt{g}(\psi_{lam,c}\Delta d_{15})^{3/2}}{\nu\sqrt{\alpha_{Re,l}}}}_{\text{Gradient critique de Shields}} + \underbrace{(1 - \frac{l_c}{L})\frac{d_{50}\nu}{l_{Re}kD}}_{\text{Gradient critique de Darcy}}$$

Avec :

$$\frac{l_c}{L} = \exp\left(-\left(\frac{\alpha_f D}{L}\right)^2 \frac{\sqrt{g}\left(\psi_{lam,c}\Delta d_{15}\right)^{\frac{3}{2}}}{\nu\sqrt{\alpha_{Re,l}}}\right)$$

Le tableau suivant présente les paramètres des équations d'Hoffmans et leurs ordres de grandeur :

Tableau 12. Paramètres des équations d'Hoffmans

Symbole	Ordre de grandeur	Commentaire
d_{15}	0.08 mm<d_{15}<0.32 mm	d_{15} diamètre pour lequel 15 % des particules passent
d_{50}	0.13 mm<d_{50}<0.75 mm	Diamètre moyen des particules
D	0.1 m<D<50 m	Epaisseur de la couche du sable
$D_* = d_{50} * \left(\frac{\Delta g}{\nu^2}\right)^{1/3}$	4 < D_*< 16	Diamètre adimensionnel des particules
g	g=9.81 m/s²	Accélération de gravité
$(H_1 - H_2)c/L$	0< $(H_1 - H_2)/L$ <1	Gradient hydraulique critique
H_1	De 1 à 10 m	Hauteur d'eau en amont de la digue
H_2	Pris égale à 0m	Hauteur d'eau dans la digue ou à la surface du sol
k	10^{-5}m/s < k <10^{-3}m/s	perméabilité hydraulique
l_c	0 <l_c/L<1	rapport de la longueur critique du conduit sur la longueur d'infiltration
l_{Re}	l_{Re}=18.210^{-6} m	Echelle de longueur géométrique
L	0.3 m<L<200 m	Longueur d'infiltration
α_f	$\alpha_f = 5$	Coefficient géométrique des écoulements
$\alpha_{Re,f}$	$\alpha_{Re,f}$= 6.8	Coefficient géométrique du conduit
$\Delta = \rho_s/\rho$-1	$\Delta = 1.65$ $(sable)$	Densité déjaugée d'un grain
ν	$10^{-6}m^2/s < \nu$<1.4 10^{-6}m²/s	Viscosité cinématique
$\psi_{lam,c}$= $0.2(D_*)^{-0.3}$	0.08 < $\psi_{lam,c}$< 0.16	Nombre de Shields critique

On notera qu'avec υ compris entre 1,0.10^{-6} et 1,4.10^{-6} m²/s, la valeur minimale du d_{50} pour obtenir D*>4 est comprise entre 0,16 et 0,20 mm et non 0,13 mm comme spécifié dans la formule d'Hoffmans.

La figure ci-dessous extraite de [X012] donne l'évolution du gradient critique en fonction respectivement du diamètre des particules pour un rapport D/L constant et en fonction du rapport D/L pour un diamètre médian de particule constant.

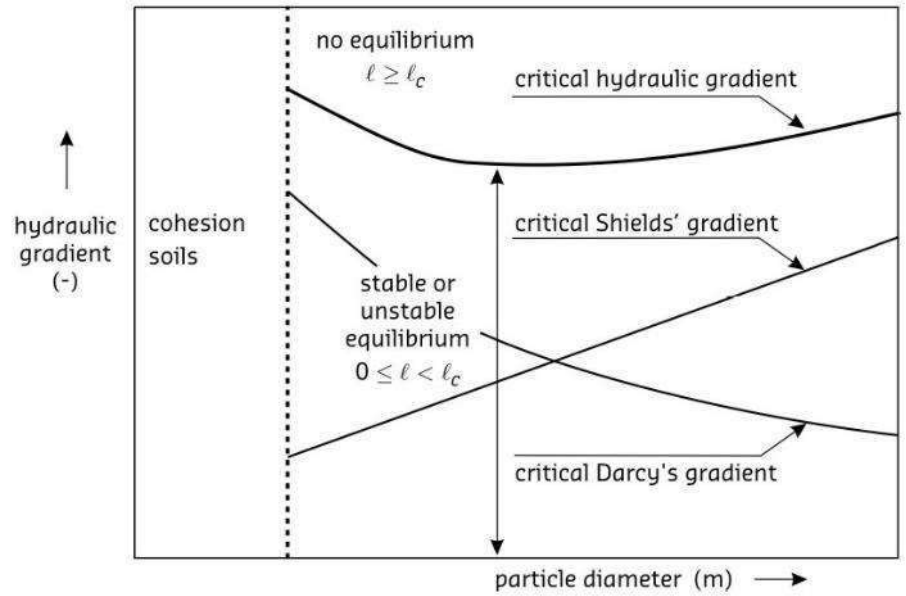


Figure 26. Gradient critique en fonction du diamètre des particules pour un rapport D/L constant

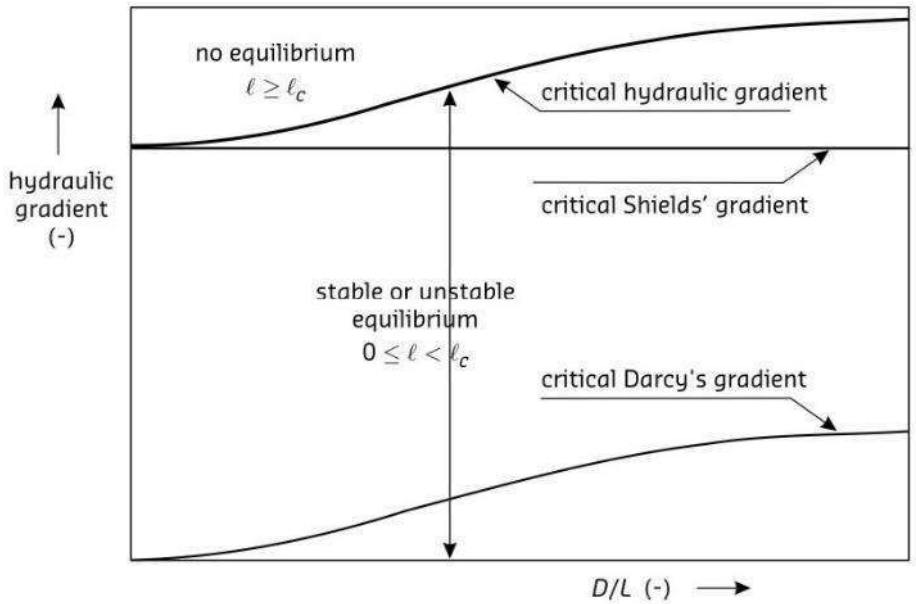


Figure 27. Gradient critique en fonction du rapport D/L pour un diamètre constant de particules

Quand les particules sont fines, la perméabilité du sol décroit et contribue à l'augmentation du gradient critique de Darcy qui devient plus important que le gradient critique de Shields. Pour les sables grossiers, le gradient critique de Shields est dominant. En effet, si pour ces sables grossiers, la perméabilité augmente, la force nécessaire au transport de ces mêmes matériaux devient également plus importante, ce qui a pour conséquence d'accroitre la résistance à l'érosion.

C'est la somme de ces deux gradients qui donne le gradient critique d'érosion régressive.

2.3.4 Hypothèse retenue pour la perméabilité des matériaux

La perméabilité des sables est un paramètre sensible du calcul de gradient critique d'érosion régressive et par ailleurs très difficile à apprécier. Elle est en effet fortement dépendante du taux de fines présentes dans le sable et des conditions de saturation de ce dernier.

La perméabilité des sables peut être évaluée en utilisant la formule de *Hazen* que l'on peut écrire :

$$k = C * {d_{10}}^2 \text{ (avec } d_{10} \text{ en cm)}$$

Cette formule est valable pour les sables propres avec un coefficient d'uniformité (Cu) inférieur à 5 et un d_{10} compris entre 0,1 et 3 mm. L'ILH [X015] propose de l'utiliser jusqu'à des Cu de 20. Avec un coefficient majorateur ou minorateur variant sur 6 plages de mesure de 0,6 (Cu > 10) à 1,1 (Cu < 2).

Les essais in situ de type Nasberg ou Lefranc permettent de mesurer la perméabilité des sols en place, mais sont fortement tributaires des conditions de saturation des sols environnants.

En définitif c'est l'essai de pompage (coûteux) qui permet d'apprécier au mieux la perméabilité des sols en place.

Un essai de pompage a été réalisé durant les travaux de confortement de la digue du Grand Rhône au Sud d'Arles, dans les sables D1 (d_{10} = 0,092 mm et d_{15} = 0,152 mm) de la fondation superficielle (< 5 mètres). Il a été complété par un essai Lefranc et une analyse granulométrique (sable n°28).

Photo 8. Travaux au Sud d'Arles – essai de pompage réalisé en 2015

Les résultats obtenus sont les suivants :

- Essai de pompage : $1{,}73.10^{-5}$ m/s
- Essai Lefranc : $1{,}36.10^{-6}$ m/s
- Hazen : $7{,}6.\ 10^{-5}$ m/s (d_{10} = 0,092 mm en dehors légèrement du domaine d'application)

La formule de Hazen donne une valeur de perméabilité environ 5 fois supérieure au résultat de l'essai de pompage. L'essai Lefranc donne, quant à lui, une valeur de perméabilité 10 inférieure à celle de l'essai de Pompage. Cette différence peut s'expliquer par le fait que les fines contenues dans le sable viennent se coller sur la paroi du sondage et limitent de ce fait les l'extraction de l'eau

Compte tenu de ce retour d'expérience, nous avons retenu pour la suite de l'étude, les hypothèses de perméabilité suivantes :

- $d_{10} > 0,1$ mm – calcul suivant la formule de Hazen
- $0,06$ mm $< d_{10} < 0,10$ mm – $K = 2.10^{-5}$ m/s (jugement à dire d'expert)
- $d_{10} < 0,06$ mm - $K = 1.10^{-5}$ m/s (jugement à dire d'expert)

2.3.5 Analyse des sables présents dans le Delta

Plusieurs campagnes d'investigations géophysiques et géotechniques ont été réalisées dans le cadre du Plan Rhône de 2008 à 2014. Ces campagnes ont consisté principalement en la réalisation de CPTu et de sondages carottés avec prélèvement d'échantillons intacts pour réalisation d'essais en laboratoire.

Dans le cadre de l'étude, nous avons recensé l'ensemble des sables potentiellement exposées à l'érosion régressive. Il s'agit de sables fins à moyens de classe B5, D1 ou B1 suivant la classification GTR 2000. 47 échantillons de sable ont été analysés. Tous les sables ont un $d_{35} > 0,08$ mm et un d_{50} compris entre 0,1 mm et 0,42 mm.

Pour l'analyse, nous avons distingué les sables provenant du Petit Rhône (a priori plus fins) de ceux issus du Rhône et du Grand Rhône.

Le niveau de prélèvement a également été pris en compte en distinguant :

- la digue
- la fondation superficielle ($D < 5$ m)
- la fondation profonde ($D > 5$ m)

Les autres paramètres pris en compte ont été :

- La proximité d'un paléo-chenal
- La corrélation avec la classification de Robertson (1986) pour les CPT et CPTu

Les résultats sont présentés dans le tableau et la figure ci-après. Trois classes de sable ont été retenues :

1) les sables S1 respectant les domaines d'application de Sellmeijer et de Hoffmans (en rouge sur la figure 27) ;
2) les sables S2 respectant le domaine d'application de Hoffmans (en bleu) ;
3) les sables S3 ne respectant pas les domaines d'application des deux modèles (en vert) ;

Tableau 13. Principales caractéristiques des sables suivant la classification proposée

	S1 : Sellmeijer et Hoffmans – 7 échantillons + 2 proches du domaine d'application (≈ 20 %)			**S2 : Hoffmans 30 échantillons (≈ 64 %)**			**S3 : aucun des deux modèles 16 échantillons (≈ 34 %)**		
	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.	Mean
d_{10} (mm)	0.10	0.20	0.15	0.02	0.27	0.10	0.006	0.028	0.015
d_{15} (mm)	0.14	0.25	0.20	0.08	0.29	0.15	0.013	0.080	0.040
d_{50} (mm)	0.28	0.36	0.34	0.21	0.42	0.30	0.102	0.342	0.180
d_{70} (mm)	0.33	0.42	0.37	0.29	0.52	0.36	0.138	0.545	0.245
U	1.9	3	2.3	1.7	15.8	4.65	1.0	10.0	2.8
K (m/s)	1.10^{-4}	$3.9.10^{-4}$	$2.5.10^{-4}$	1.10^{-5}	$7.8.10^{-4}$	$1.2.10^{-4}$	$< 1.\ 10^{-5}$		
Robertson 1986	Classe 5 : 50 % Classe 6 : 50 %			Classe 5 : 40 % Classe 6 : 60 %			Classe 3 : 5 % Classe 5 : 50 % Classe 6 : 45 %		
Paléochenal	100 % des échantillons provient de paléochenaux			90 % des échantillons provient de paléochenaux			70 % des échantillons provient de paléochenaux		
Niveau de prélèvement	Digue : 10 % Fondation superficielle : 50 % Fondation profonde : 40 %			Digue : 10 % Fondation superficielle : 45 % Fondation profonde : 45 %			Digue : 5 % Fondation superficielle : 55 % Fondation profonde : 40 %		

On note que 2 échantillons n'entrent pas dans cette classification :

L'échantillon n°22 (couleur noir), qui est un sable très fin respectant le domaine d'application de Sellmeijer mais ne respectant pas le domaine d'application d'Hoffmans. Ces caractéristiques sont les suivantes :

- d_{10} = 0,08 mm
- d_{15} = 0,09 mm
- d_{50} = 0,14 mm
- d_{70} = 0,17 mm

L'échantillon 32 (couleur noir pointillé), qui est un sable grossier respectant le domaine d'application de Hoffmans mais ne respectant pas le domaine d'application de Sellmeijer sur le d_{70}. Ces caractéristiques sont les suivantes :

- d_{10} = 0,27 mm
- d_{15} = 0,29 mm
- d_{50} = 0,42 mm
- d_{70} = 0,52 mm

Les gros sables de la classe S2 se différencient des gros sables de la classe S1 par des d_{15} et d_{10} plus petits, mais des d_{50} et d_{70} équivalents.

Les sables de la classe S3 sont plus fins que les précédents. Ils contiennent un pourcentage de fines (80 µm) supérieurs à 15 %, qui leur confère une certaine cohésion et une faible perméabilité. En définitifs ces sables sont plus exposés à l'érosion de conduit qu'à l'érosion régressive.

Les 3 classes de sable S1, S2 et S3 relèvent pour moitié de la classe 6 et pour l'autre moitié de la classe 5 suivant la classification de Robertson de 1986. Un seul échantillon de sable relève de la classe 3 de Robertson.
On notera que la classe 5 de Robertson couvre une large gamme de matériaux (limons sableux, sables limoneux, sables fins et gros sables), qui n'est pas représentative des sables testés par Sellmeijer et Hoffmans. Ce qui n'est pas le cas de la classe 6 qui contient des sables fins et grossiers, identiques à ceux des Pays-Bas et très rarement des limons.

On observe également que :

- 100 % des sables respectant le domaine d'application de la formule de Sellmeijer sont localisés au droit ou à proximité de paléochenaux,
- 90 % des sables respectant le domaine d'application de la formule de Hoffmans sont localisés au droit ou à proximité de paléochenaux,
- 70 % des sables ne respectant aucun des deux domaines ont été localisés au droit ou à proximité de paléochenaux. Parmi ces derniers plus de 50 % des échantillons proviennent des sondages carottés contenant des sables respectant le domaine d'application de Hoffmans (classe S2).

Les sables analysées proviennent dans 10 % des cas du remblai de la digue et dans 90 % des cas de la fondation des ouvrages. Sur ces 90 %, environ la moitié est située dans la fondation superficielle et l'autre moitié dans la fondation profonde. Tous les sables localisés dans la digue sont situés au droit de paléochenaux.

Le croisement des granulométries des sables avec le fuseau granulométrique des sables utilisés avec succès pour la réalisation de dispositif filtrant et non sujet à érosion (source bulletin n°164 de la CIGB) nous permet de constater qu'aucun des sables rencontrés dans le Delta ne rentre dans le fuseau et que les sables des classes S2 et S3 ont trop de fines pour être utilisé comme filtres sans traitement adapté.
Pour la suite de l'étude, on retient la grille suivante pour la détermination de la probabilité de localisation d'une couche de sable potentiellement sujette à érosion régressive.

Tableau 14. Probabilité de localisation d'une couche de sable sujette à érosion régressive

Présence	**Probabilité localisation couche de sable**	**Qualification verbale**
Digue et fondation investiguées - aucun des éléments ci-dessous	0.01	Très peu probable
Digue et fondation non investiguées en dehors des paléo-chenaux - aucun des éléments ci-dessous	0.1	peu probable
Sol de classe 5 suivant la classification de Robertson (1986)	0.1	peu probable
Alternance de sol de classe 5 et 6 suivant Robertson (1986)	0.5	Neutre
présence d'un perré maçonnée sur la carte de 1876 attestant d'infiltrations ou désordres passés	0.5	Neutre
Sol de classe 6 suivant la classification de Robertson (1986)	0.9	probable
présence d'un paléo- chenal à proximité	0.9	probable
Sable observée durant des travaux ou infiltrations observées en périodes de crues	0.99	Très probable

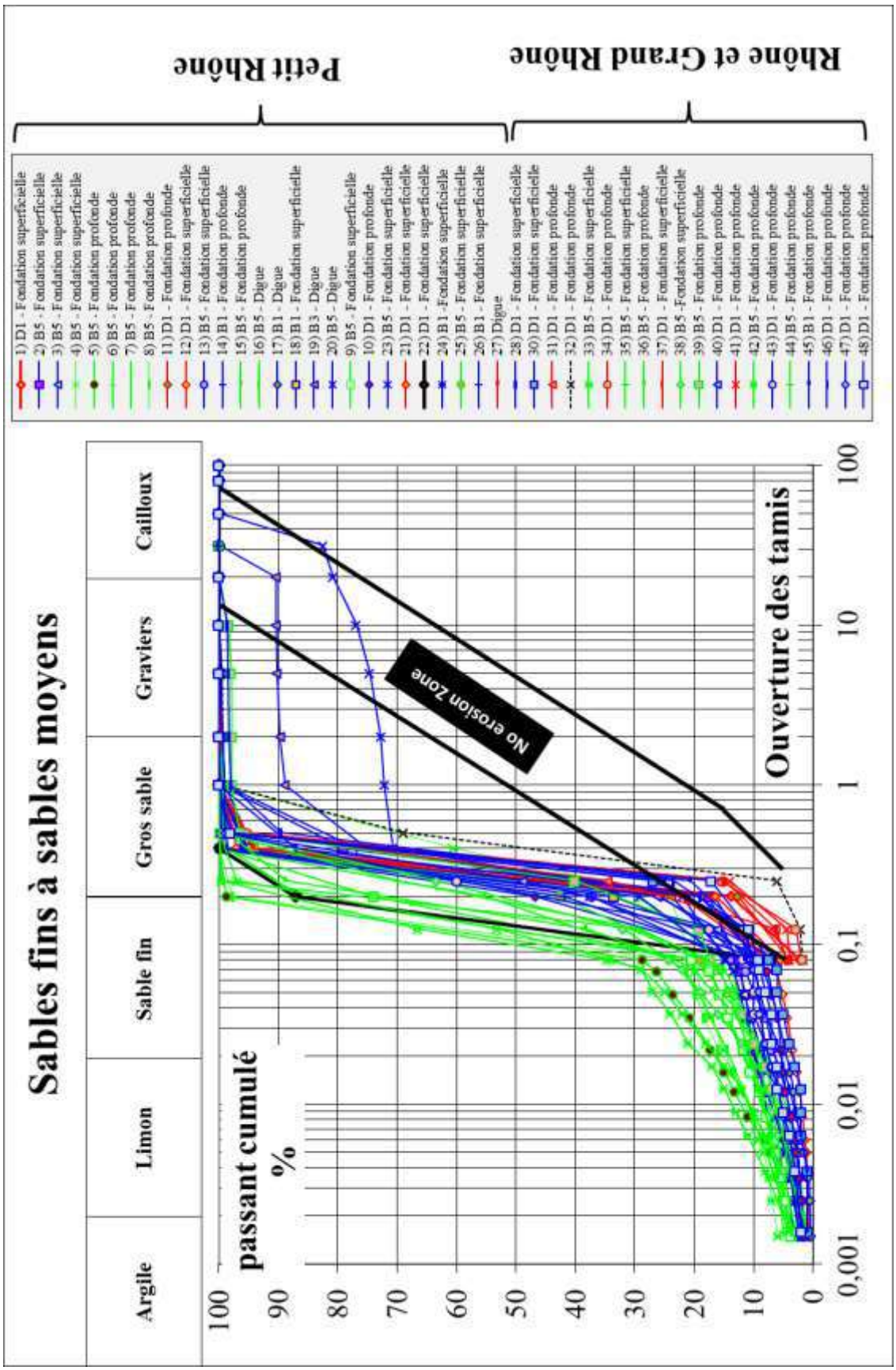


Figure 28. Analyse granulométrique de la famille des sables fins à moyen (source données Fugro Géotechnique et Ginger CEBTP)

2.3.6 Comparaison des modèles de Sellmeijer et Hoffmans

Les méthodes de Sellmeijer et de Hoffmans ont été comparées entre elles. Cette comparaison a fait l'objet d'une publication internationale avec présentation orale [X030].
Dans un premier temps, cette comparaison a porté sur deux sables correspondant approximativement aux bornes inférieures et supérieures des sables de classe S1 (Cf. caractéristiques dans le tableau ci-dessous) et dans un second temps sur l'ensemble des sables de la classe S1.

Tableau 15. caractéristiques des sables ayant servi à la comparaison des méthodes de Sellmeijer et de Hoffmans

	Sable n°12	**Sable n°34**
D_{10}	0,107 mm	0,196 mm
D_{15}	0,148 mm	0,246 mm
D_{50}	0,276 mm	0,358 mm
D_{60}	0,302 mm	0,390 mm
D_{70}	0,329 mm	0,421 mm
K	$1{,}1.10^{-4}$ m/s	$3{,}8.\ 10^{-4}$ m/s
Cu	2,8	2

La figure ci-dessous illustre pour les sables n°12 et n°34 l'évolution des gradients critiques de Hoffmans et Sellmeijer en fonction du rapport D/L pour des longueurs de cheminement respectivement de 20 m (digue en contact avec le fleuve) et de 80 m (digue légèrement éloignée du fleuve).

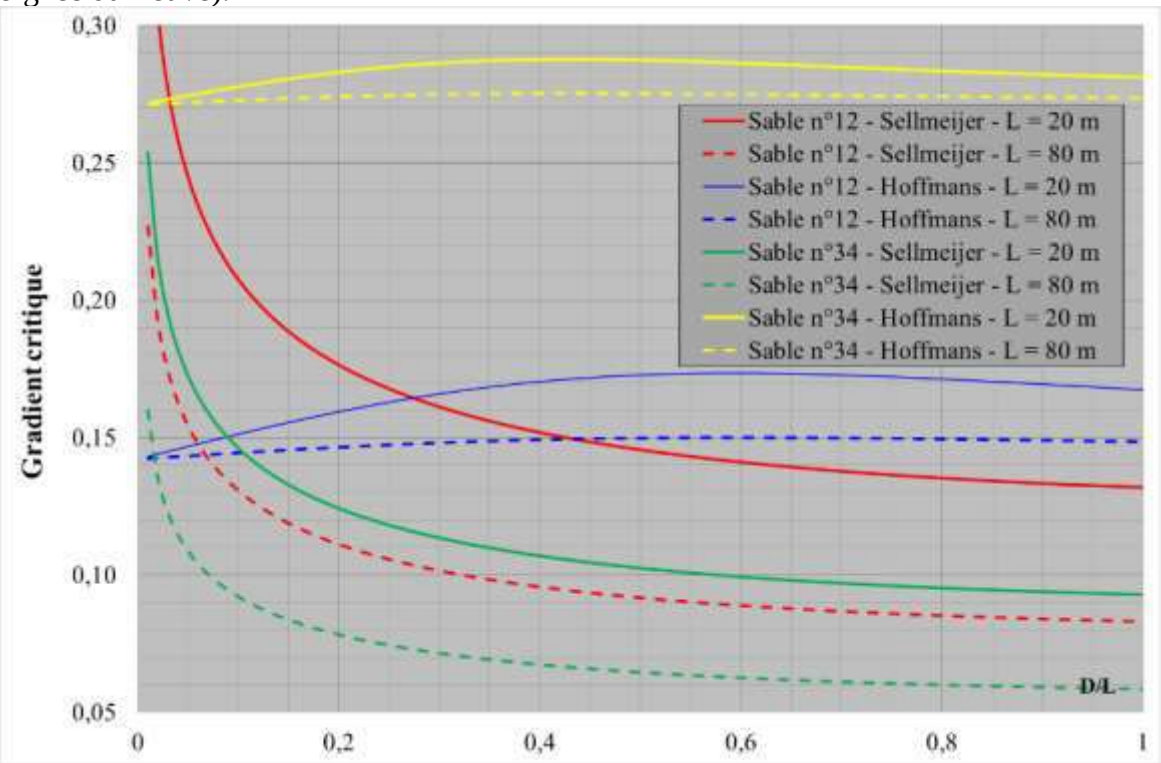


Figure 29. Comparaison des méthodes de Sellmeijer et Hoffmans sur deux sables

La figure ci-dessous illustre pour les 7 sables de la classe 1 les gradients critiques de Sellmeijer (en pointillé) et de Hoffmans (trait continu) calculés avec des épaisseurs variant de 1 à 8 m pour une longueur de cheminement constante de 20 mètres et pour une épaisseur constante de 5 m avec des longueurs de cheminement respectivement de 20 et 80 mètres.

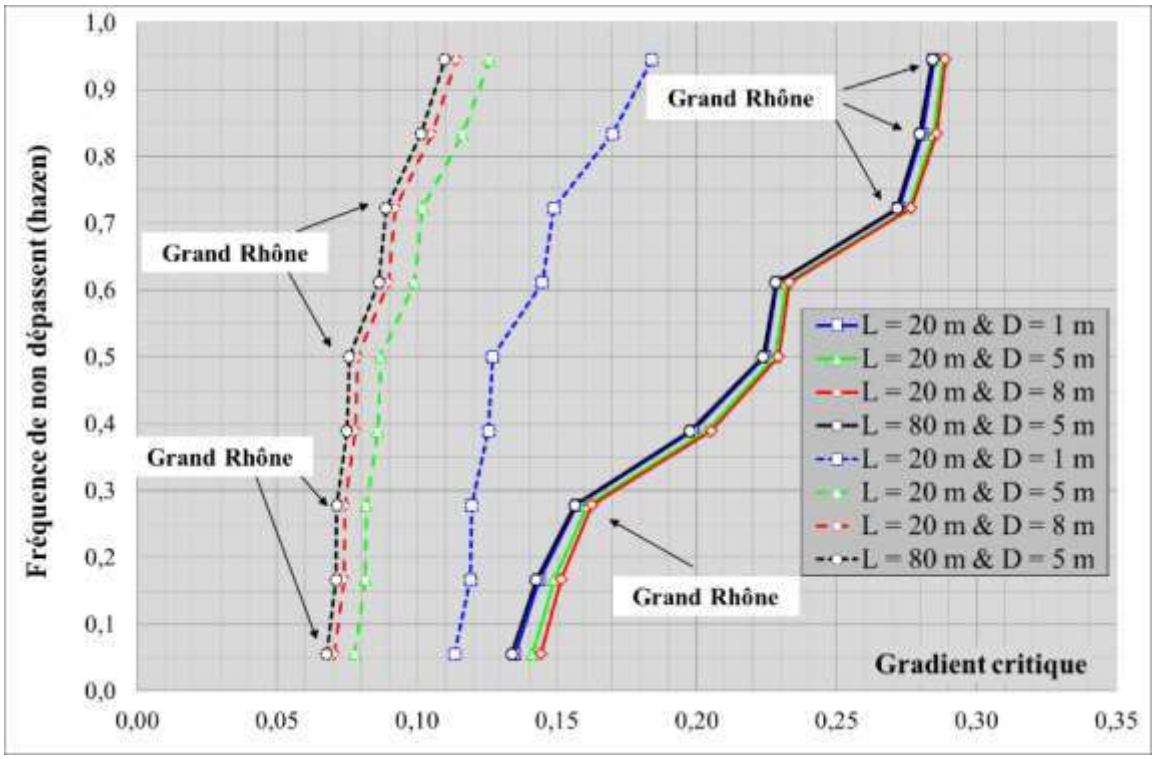


Figure 30. Fréquence de non dépassement (Hazen) des sables de classe 1 suivant Sellmeijer et Hoffmans dans différentes configurations géométriques

Ces deux figures permettent de constater l'écart important entre les deux méthodes.

Le modèle de Sellmeijer est très sensible à l'effet d'échelle et plus particulièrement à l'épaisseur de la couche de sable. Plus cette dernière est fine et plus le gradient critique est élevé pour une longueur de cheminement identique. La sensibilité à la longueur de cheminement est moins élevée, ce qui s'explique par les variations opposées des facteurs d'échelle et géométrique en fonction de la variable L.
Le modèle de Sellmeijer est également très sensible à la perméabilité. Plus le sable est fin plus sa perméabilité est faible et plus le gradient critique est élevé.

A l'inverse, le modèle de Hoffmans est très sensible à la granulométrie des sables et plus particulièrement au passant à 15 %. Il est par ailleurs moins sensible à la perméabilité. Plus le sable est grossier et plus son gradient critique est élevé. L'effet d'échelle est peu sensible pour les sables grossiers de la classe S1, mais nous verrons plus loin que cet effet d'échelle est loin d'être neutre pour les sables fins avec des perméabilités faibles (inférieure ou égale à 2.10^{-5} m/s).

Si l'on s'intéresse aux gradients critiques des sables du Grand Rhône et de ceux du Petit Rhône, on observe qu'avec la méthode de Hoffmans, les sables plus grossiers du Grand Rhône ont des gradients critiques plus élevés, ce qui corrobore ce qui vient d'être dit.

Avec la méthode de Sellmeijer, la corrélation entre la distribution des gradients critiques et la localisation des sables n'est plus possible. C'est le facteur d'échelle qui prédétermine en priorité la valeur du gradient critique et tout particulièrement l'épaisseur de la couche de sable.

La figure ci-dessous illustre pour les sables de la classe S2 et de classe S1 les variations de gradients critiques suivant la formule de Hoffmans en fonction du rapport D/L pour une longueur de cheminement de 20 mètres.

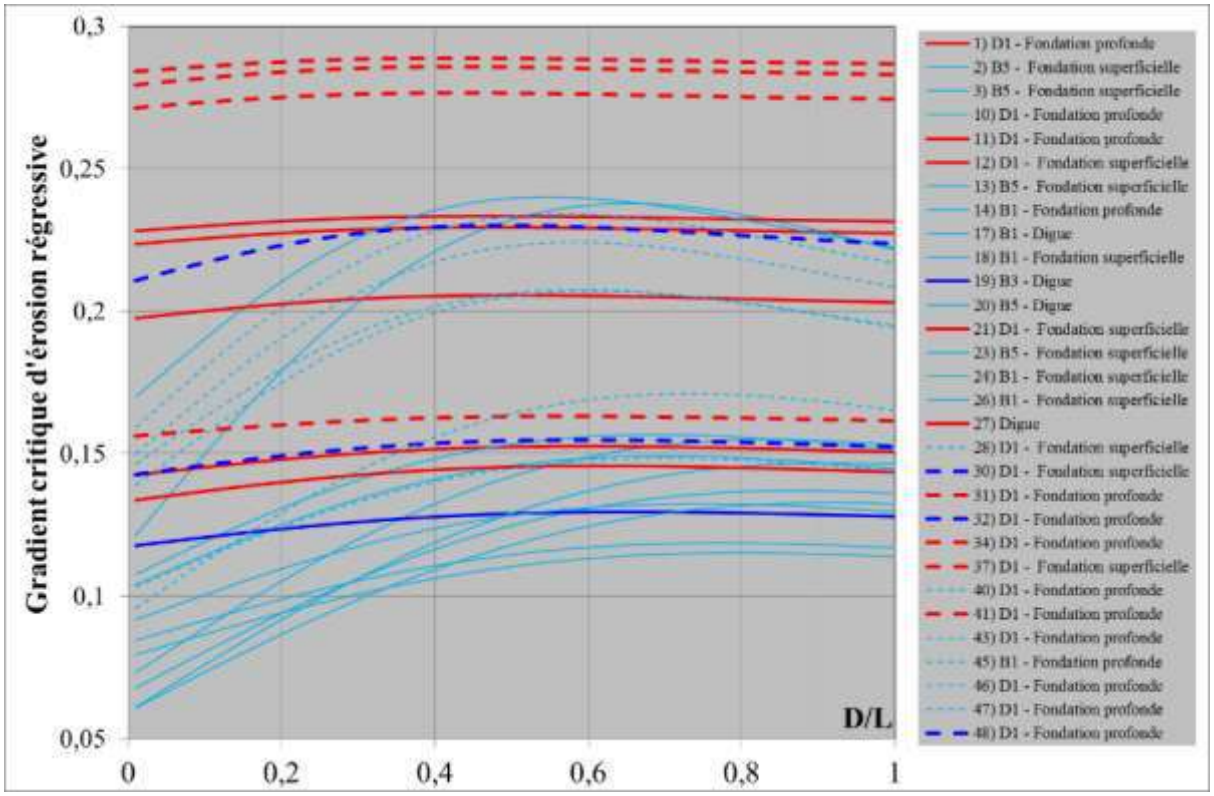


Figure 31. Evolution du gradient critique de Hoffmans en fonction du rapport D/L pour L=20 m

Les sables plus grossiers de la classe S1 sont en rouge. Les sables de classe S2 ne figurant pas dans la classe S1 sont indiqués en bleu.

Les sables avec un d_{10} > 0,1 mm sont représentés par un trait épais et les sables avec un d_{10} <0,1 mm par un trait fin.

Les traits en pointillés correspondent à des sables du Grand Rhône et les traits continus à des sables du Petit Rhône. Comme indiqué ci-avant l'effet d'échelle est quasiment inexistant pour les sables avec une perméabilité élevée mais est loin d'être neutre pour des perméabilités faibles (inférieure à 2.10^{-5} m/s). On notera que pour ces derniers l'évolution du gradient critique en fonction du rapport D/L suit un comportement inverse à celui décrit par Sellmeijer mais pour des gammes de sables n'entrant pas le domaine d'application de Sellmeijer.

Ce comportement s'explique par le rôle joué par le deuxième composant du gradient critique de Hoffmans : le gradient critique de Darcy.

La figure ci-après illustre l'évolution du gradient critique de Darcy en fonction du D_{10}. Plus le D_{10} est important, plus la perméabilité augmente et plus le gradient hydraulique de Darcy diminue. Il devient très faible pour des perméabilités supérieures à 2.10^{-5} m/s. On note que les oscillations de la figure sont en partie dues au fait que la perméabilité est prise constante malgré que le d_{10} change.

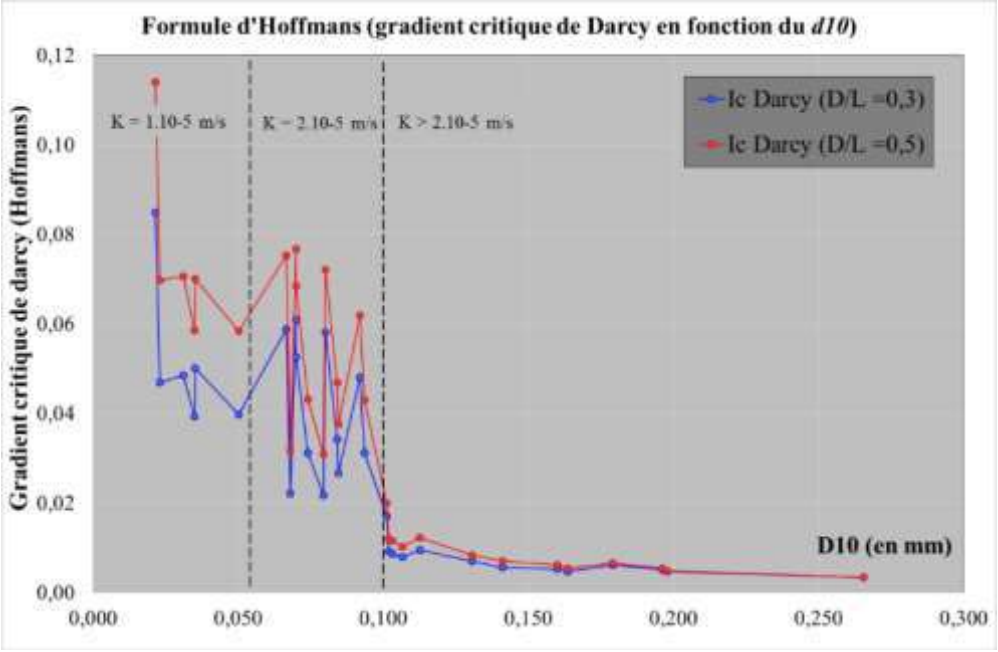


Figure 32. Gradient critique de Darcy en fonction du d_{10} caractérisant la perméabilité

La figure ci-dessous illustre le gradient hydraulique de Darcy en fonction du d_{15}. On voit une légère diminution de ce gradient en fonction du d_{15} mais sans corrélation nette.

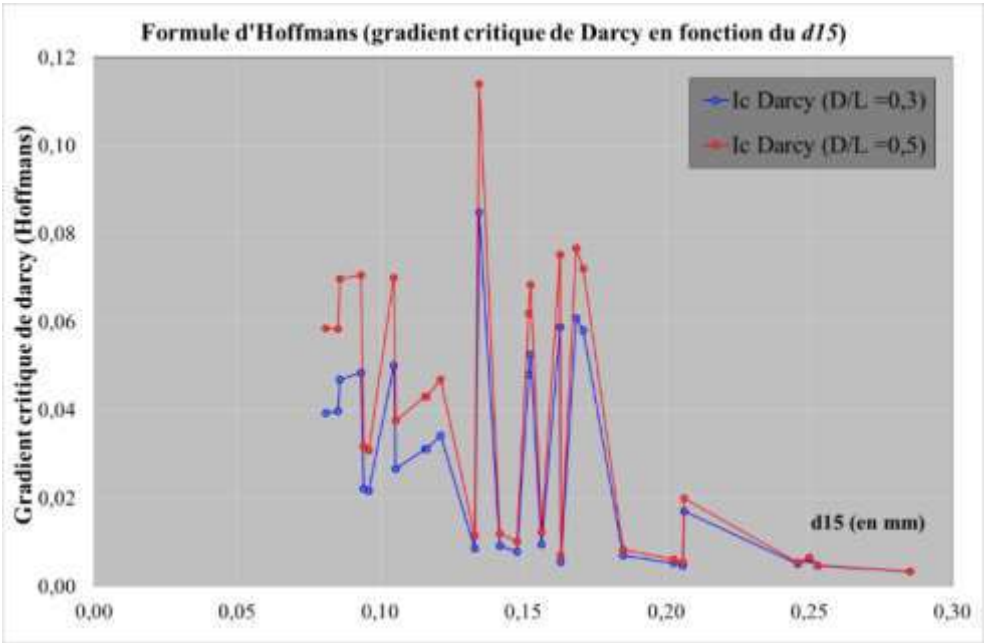


Figure 33. Gradient critique de Darcy en fonction du d_{15}

De la même façon la figure ci-dessous illustre le gradient hydraulique de Darcy en fonction du d_{50}. Aucune corrélation ne se dégage nettement.

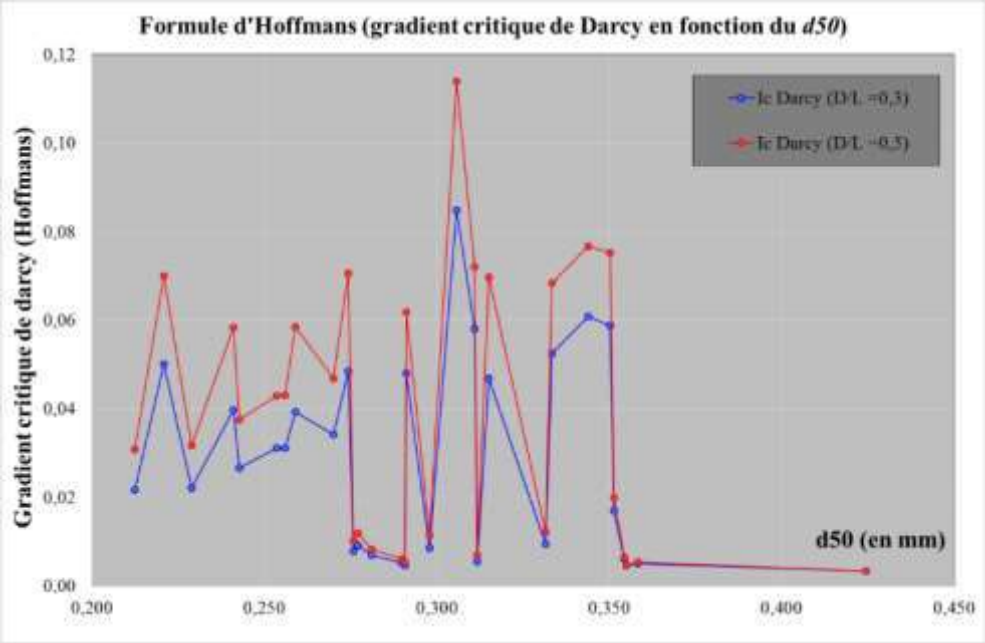


Figure 34. Gradient critique de Darcy en fonction du d_{50}

La figure ci-dessous illustre l'évolution des gradients hydrauliques respectivement de Schields (1er composant) et globaux en fonction du d_{15}.

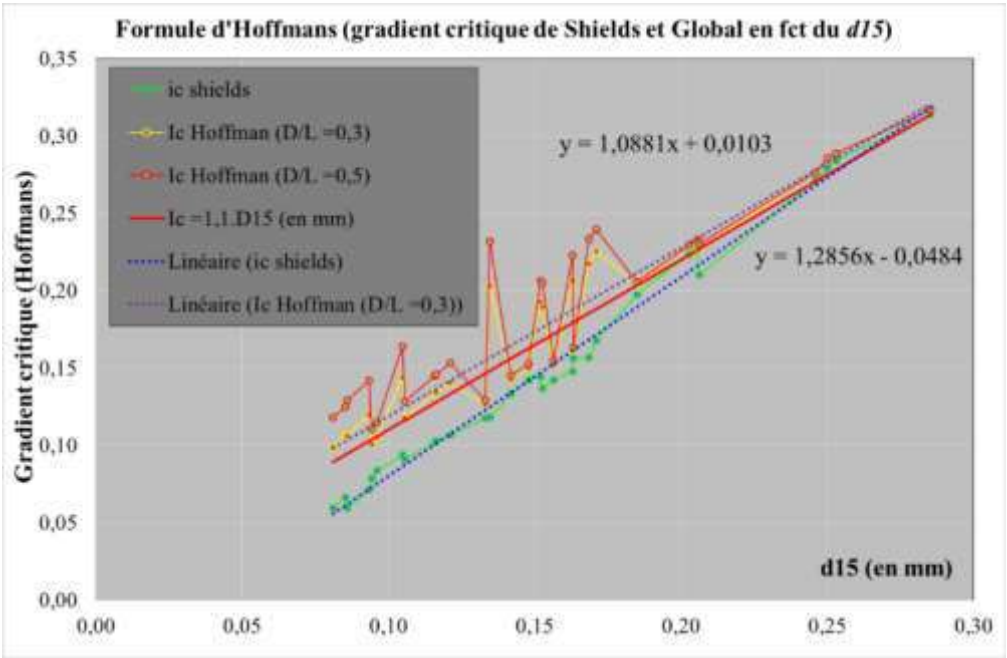


Figure 35. Gradient critique de Shields en fonction du d_{15}

On voit la très bonne corrélation entre le gradient hydraulique de Shields et le d_{15} et la moins bonne corrélation mais néanmoins intéressante entre le gradient global et le d_{15}, qui nous

permet d'obtenir une formule très simple de calcul de gradient hydraulique critique en fonction du d_{15} applicable au sable du Rhône.

$$Ic = 1{,}1 d_{15}$$

Valable pour d_{15} compris entre 0,08 et 0,32 mm.

2.3.7 Conclusion sur la comparaison des modèles de Sellmeijer et de Hoffmans

La méthode de Sellmeijer a été calée sur des mesures à petite, moyenne et grande échelle contrairement à la méthode de Hoffmans qui a été calée uniquement en laboratoire. Elle s'est focalisée avant tout sur le gradient d'initiation quand Hoffmans a privilégié la progression.

Elle est adaptée aux faciès géologiques et géométriques homogènes. Dans la configuration du Delta du Rhône, où l'on peut trouver des sables avec des taux de fines très variables (et donc de perméabilité) au sein d'une même couche et des variations importantes d'épaisseur de sable comme cela est souvent constaté lors des travaux menés sur les digues, la formule de Sellmeijer semble difficilement applicable. Par ailleurs, le domaine d'application de cette dernière concerne 20 % des sables fins à moyens rencontrés dans le Delta, alors que plus de 60 % de ces sables entrent dans le domaine d'application de la formule de Hoffmans.

2.3.8 Variabilité spatiale des gradients critiques au sein d'un même paléo-chenal.

Le cas d'un paléo-chenal comportant des sables en fondation profonde, fondation superficielle et dans le corps de digue a été examiné. 8 échantillons de sable ont été prélevés sur un linéaire de 500 mètres environ. 6 d'entre eux entrent dans le domaine d'application de Hoffmans et 1 dans celui de Sellmeijer. Les caractéristiques de ces sables et les gradients critiques de Hoffmans figurent dans le tableau ci-dessous. Ils ont été calculés pour un rapport D/L = 0,5 en retenant les hypothèses de perméabilité décrites précédemment.

Tableau 16. Variation des gradients critiques de Hoffmans au sein d'un paléo-chenal

	Sable n°17	**Sable n°18**	**Sable n°19**	**Sable n°24**	**Sable n°26**	**Sable n°27**
D_{10} (en mm)	0,084	0,094	0,103	0,085	0,068	0,102
D_{15} (en mm)	0,121	0,116	0,133	0,106	0,094	0,142
D_{50} (en mm)	0,270	0,253	0,298	0,243	0,229	0,277
D_{60} (en mm)	0,299	0,286	0,339	0,277	0,264	0,305
D_{70} (en mm)	0,327	0,318	0,380	0,311	0,299	0,333
k (10^{-5} m/s)	2	2	9,6	2	2	9,3
I_c Shields	0,11	0,10	0,12	0,09	0,08	0,13
I_c Darcy	0,03	0,03	0,01	0,03	0,02	0,01
I_c Hoffmans	0,14	0,13	0,13	0,12	0,10	0,14

On constate que pour cette gamme de perméabilité (2.10^{-5} à $9{,}6.10^{-5}$ m/s), les gradients critiques de Darcy sont très faibles et représentent environ 20 % des gradients critiques de

Shields. La variation de la perméabilité supposée des sables a peu d'influence sur l'estimation des gradients critiques (< 10 %).

En revanche, on constate une variation spatiale non négligeable des gradients critiques au sein du paléo-chenal. Un écart de 45 % est constaté entre les bornes inférieures (0,11) et supérieures (0,15) des gradients critiques.

2.3.9 Détermination de la probabilité d'initiation de l'érosion régressive suivant les modèles de Hoffmans et de Sellmeijer

Compte tenu de :

- l'incertitude très importante de l'épaisseur de la couche de sable réellement exposée à l'érosion régressive (le taux de fines pouvant donner une cohésion rendant peu probable cette érosion régressive),
- l'incertitude des gradients critiques au sein d'une même couche de sable ou au sein d'un paléo-chenal.

Il est proposé de recourir à une analyse probabiliste du risque d'initiation de l'érosion régressive.

Comme cela a été vu précédemment, les sables grossiers avec une perméabilité supérieure à 2.10^{-5} m/s ont des gradients critiques de Darcy très faibles et sont donc peu sensibles à l'effet d'échelle. Les sables avec une perméabilité inférieure à 2.10^{-5} m/s ont des gradients critiques de Darcy qui augmentent avec le rapport D/L.

Pour l'analyse probabiliste, une approche très prudente pourrait nous orienter pour le calcul des gradients critiques de Hoffmans, à retenir les valeurs correspondantes à un rapport D/L de 0,05. Néanmoins comme on l'a vu, plus de 90 % des sables, objet de l'analyse sont localisés en fondation au droit de paléo-chenaux. Et naturellement ce sont les digues proches du fleuve qui seront le plus exposées au risque d'érosion régressive. En conséquence, nous retenons pour la suite des calculs un rapport D/L de 0,25 qui correspond à la situation caractéristique d'une épaisseur de sable de 5 mètres et une longueur de cheminement de 20 mètres en fondation.

La fréquence empirique de non dépassement f pour chaque rang r a été calculée à l'aide de la formule de Hazen :

$$f = \frac{r - 0.5}{n}$$

r est le rang de la série de données classée par valeurs croissantes, n est la taille de l'échantillon.

Les gradients critiques ont été calculés suivant les formules de Hoffmans et de Sellmeijer. Pour les calculs de gradients critiques suivant Hoffmans, une distinction a été faite entre les sables du Petit Rhône et les sables du Grand Rhône pour les raisons évoquées plus haut. Cette distinction n'a pas été faite pour les calculs de gradients suivant Sellmeijer, d'une part car on

ne distingue pas de tendance suivant les bras du Rhône et d'autre part compte tenu de la faiblesse de l'échantillon.

Compte tenu du faible nombre de prélèvements de l'échantillon et pour pallier un écrêtement éventuel des courbes de distribution, des courbes théoriques en escaliers sont représentées pour déterminer les valeurs à 1%, 5 %, 25 %, 50 %, 75 % et 95 et 99 %.

Un ajustement suivant une Fonction de Gumbel est ensuite réalisé sur la partie basse de la courbe (fréquence de 1 à 50 %) qui correspond à des valeurs de probabilité, dont l'importance est grande dans l'analyse de risques.

La figure ci-après présente la distribution de ces gradients critiques suivant la fréquence de Hazen et l'ajustement suivant la loi de Gumbel.

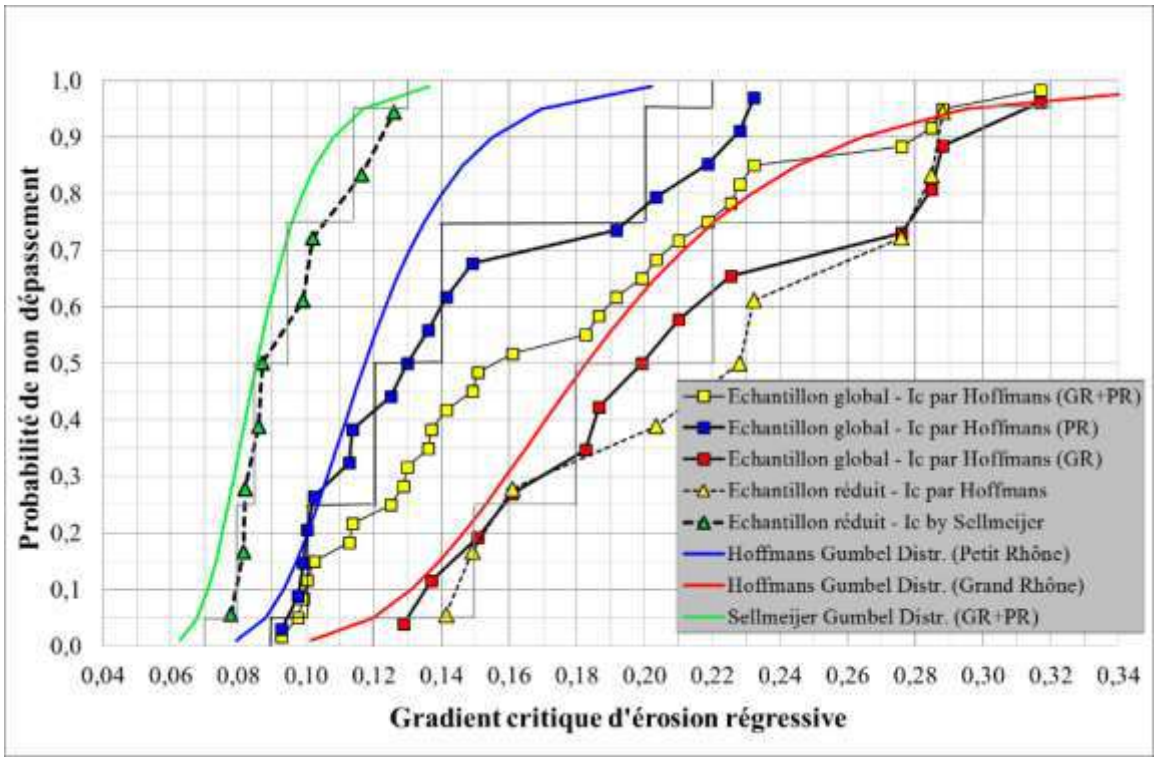


Figure 36. Probabilité de non dépassement des gradients critiques d'érosion régressive

La fréquence de non dépassement des gradients critiques ou la probabilité d'initiation d'érosion régressive peut s'exprimer suivant les fonctions de répartition suivantes :

$$P_{initiation\ Sellmeijer\ Delta\ du\ Rhône} = \exp\left(-exp\left(-\left(\frac{i-0{,}081}{0{,}012}\right)\right)\right)$$

$$P_{initiation\ Hoffmans\ Petit\ Rhône} = \exp\left(-\exp\left(-\left(\frac{i-0{,}110}{0{,}020}\right)\right)\right)$$

$$P_{initiation\ Hoffmans\ Grand\ Rhône} = \exp\left(-exp\left(-\left(\frac{i-0{,}167}{0{,}043}\right)\right)\right)$$

Avec i : gradient hydraulique en fondation. Le tableau suivant donne quelques valeurs de probabilité d'initiation issues des lois précédentes

Tableau 17. Gradients critiques et probabilité d'initiation

	Probabilité d'initiation						
	1 %	**5 %**	**25 %**	**50 %**	**75 %**	**95 %**	**99 %**
Sellmeijer	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.12	0.14
Hoffmans (Petit Rhône)	0.08	0.09	0.10	0.12	0.13	0.17	0.20
Hoffmans (Grand Rhône)	0.10	0.12	0.15	0.18	0.22	0.29	0.32

Ces lois de probabilités sont bornées à 0,001 dès que i > 0.

2.4 RUPTURE PAR EROSION DE CONTACT

2.4.1 Description du mécanisme d'érosion de contact

L'érosion de contact survient lorsqu'un sol grossier comme le gravier est en contact avec un sol fin et qu'un écoulement parallèle à la surface de contact dans le sol grossier érode le sol fin.
Les particules de la couche de sol fin peuvent être arrachées par l'écoulement d'eau et transportées à travers les vides de la couche de sol grossier parallèle à l'interface.

Ce phénomène nécessite deux conditions (CIGB 2015 [X001]) :

- d'abord, la condition géométrique, qui implique que la couche grossière doit être une transition géométrique ouverte sur l'autre couche, c'est-à-dire qu'elle a des vides suffisamment importants pour que les particules fines puissent passer à travers.
- la condition hydraulique, qui implique que les vitesses d'écoulement soient suffisantes pour détacher et transporter les particules.

Les figures ci-dessous illustrent ce type d'érosion

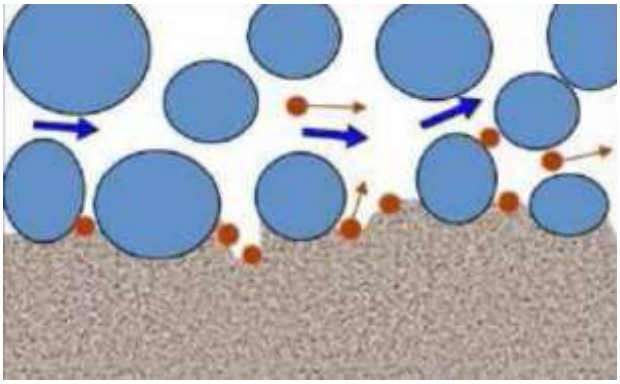


Figure 37. Erosion de contact (source Bonelli S. ICSE 2012 [X009])

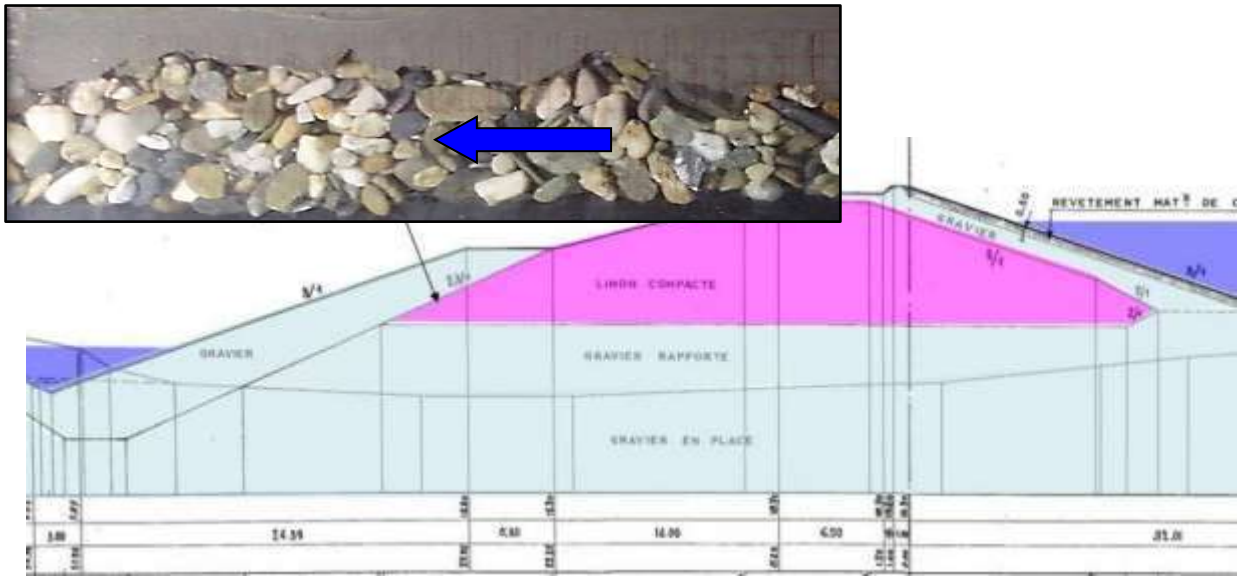


Figure 38. L'érosion de contact dans les digues (Béguin R. 2011 [X016])

Une vingtaine de cas de fuites associées à un fontis ou un affaissement ont été rapportés (CFGB, 1997) sur les digues zonées du Rhône (digues CNR), composées d'un noyau de silt argileux et de recharges graveleuses.

Sur les digues du Symadrem, l'érosion de contact est très peu probable structurellement compte tenu de la profondeur des graves.

Le risque est néanmoins existant au droit des transitions des brèches de 1993 et 1994 remblayées avec des matériaux pulvérulents et au contact du laitier utilisé en couche de roulement.
En déc. 2003, une amorce de renard hydraulique s'est produite à la jonction entre la brèche de Figarès réparée et l'ancien remblai. Il est très vraisemblable que le renard ait été initié par érosion de contact entre la digue d'origine en limons et la réparation de 1993 en gros enrochements très perméables [A2003-03].

Photo 9. Crue déc. 2003 – Amorce de renard au droit de l'ancienne brèche de Figarès

2.4.2 Caractérisation de l'érosion de contact

Le seuil d'érosion de contact mis en évidence par R.BEGUIN 2011 [X016] peut être résumé d'une manière pratique : tant que la vitesse de Darcy dans l'ouvrage ou sa fondation ne dépasse pas 1 cm/s, l'érosion de contact n'est pas activée. Cette valeur minimale de 1 cm/s correspond, pour des sables de 0,2 mm (sables rencontrés dans le Delta du Rhône), à l'initiation à court terme de l'érosion de contact, mais pas de l'érosion très lente qui finit par être non négligeable à très long terme. En présence de sols nettement plus fins, la vitesse critique augmente avec la cohésion et en présence de sols plus grossiers, la vitesse critique augmente avec le diamètre.

La figure ci-dessous représente la vitesse critique de Darcy de l'érosion de contact d'un sol fin sous un sol grossier en fonction du diamètre effectif des sols.

R. Béguin a réalisé 6 essais d'un remblai de silt sur du gravier. Les résultats sont également représentés dans la figure ci-après. Les valeurs des vitesses critiques sont plus dispersées que celles de la configuration gravier sur silt, mais elles sont du même ordre de grandeur. Cela montre que même dans la configuration silt sur gravier, où l'on pourrait s'attendre à une

initiation de l'érosion lorsque les particules de silt « tombent » dans le gravier, l'initiation de l'érosion est fonction du transport des particules et pas seulement de l'arrachement (CIGB 2015 d'après Béguin R. 2011). L'arrachement est sélectif : il laisse les plus grosses particules constituer un filtre ou un pavage qui diminue dans le temps l'érosion. Le transport des particules, s'il n'est pas permanent et complet peut laisser les particules se déposer et colmater la grave, ce qui arrête l'érosion.

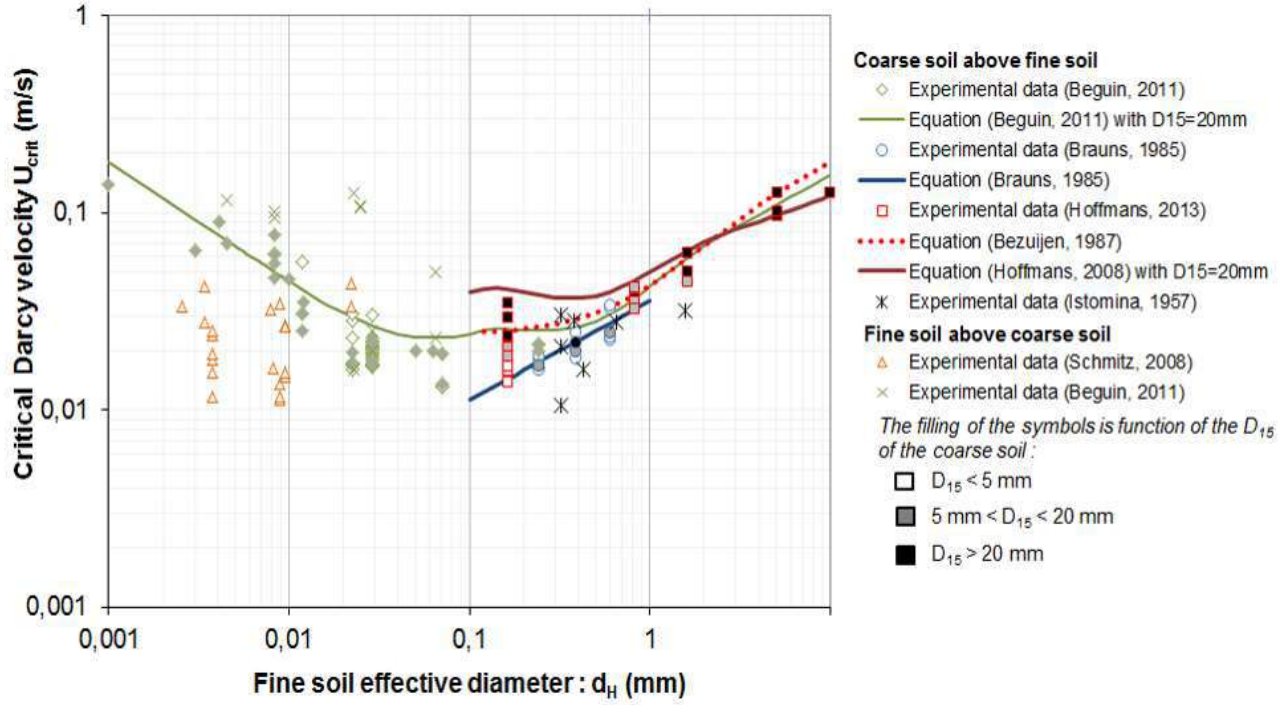


Figure 39. Vitesse critique de Darcy de l'érosion de contact d'un sol fin sous un sol grossier (Béguin R. 2011 [X016])

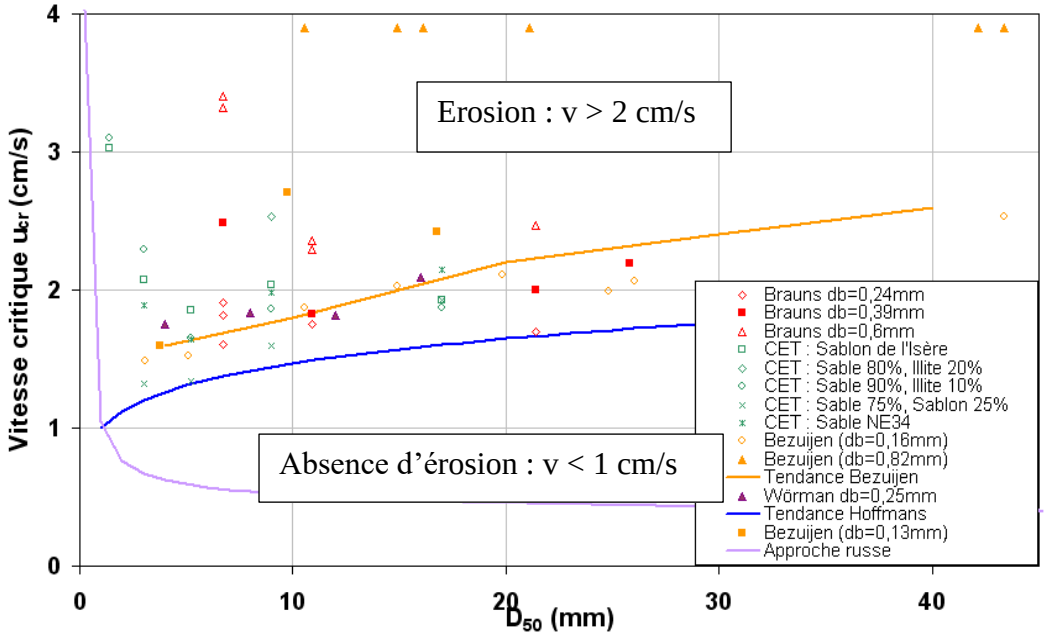


Figure 40. Vitesse critique de l'érosion de contact (Béguin R. 2011 [X016])

La vitesse de Darcy est donnée par la formule suivante :

$$v = k.i$$

Avec :

v : vitesse de Darcy en m/s
k : perméabilité du sol grossier (m/s)
i : gradient hydraulique

En considérant des gradients hydrauliques maxi de 0,5, il faut une perméabilité des sols de 2.10^{-2} m/s pour avoir un risque d'érosion de contact. Cette perméabilité des sols n'a jamais été observée dans les sables du Rhône. En revanche, elle est possible comme indiqué plus haut au niveau des transitions des anciennes brèches colmatées en urgence avec du gravier, des cailloux ou des enrochements.

Les travaux de Remy Beguin nous permettent de conclure qu'en dessous d'une vitesse de Darcy de 1 cm/s la probabilité d'érosion de contact est très peu probable mais qu'au-delà de 2 cm/s, elle devient probable.

On peut définir à dire d'expert les probabilités d'initiation suivantes d'érosion de contact en fonction de la vitesse de Darcy :

Tableau 18. Probabilité d'érosion de contact en fonction de la vitesse de Darcy

Vitesse de Darcy	Probabilité initiation érosion de contact	Qualification verbale
1 cm/s	0.01	Très peu probable
1,5 cm/s	0.5	Neutre
2 cm/s	0.9	probable

Ces probabilités sont ajustées suivant une fonction de Gumbel :

$$P_{initiation\ érosion\ de\ contact} = \exp\left(-exp\left(-\left(\frac{k.i - 1{,}404}{0{,}265}\right)\right)\right)$$

Avec :

k : perméabilité du gravier (cm/s)
i: gradient le long du cheminement

Le retour d'expérience de Figarès nous montre qu'une érosion de contact a été initiée pour un gradient i = 0,3, ce qui donne une perméabilité de 2 cm/s / 0,3 = $6{,}7.10^{-2}$ m/s.

Cette gamme de perméabilité est observée dans des graviers moyens, des cailloux ou des enrochements.

Pour la suite des calculs on retiendra une perméabilité de 6,7 cm/s, soit une probabilité d'initiation d'érosion de contact égale à :

$$P_{initiation\ érosion\ de\ contact} = \exp\left(-exp\left(-\left(\frac{6{,}7.\,i - 1{,}404}{0{,}265}\right)\right)\right)$$

Avec une borne inférieure à 0,001 dès que i > 0.
La figure suivante illustre la probabilité d'érosion de contact en fonction du gradient critique.

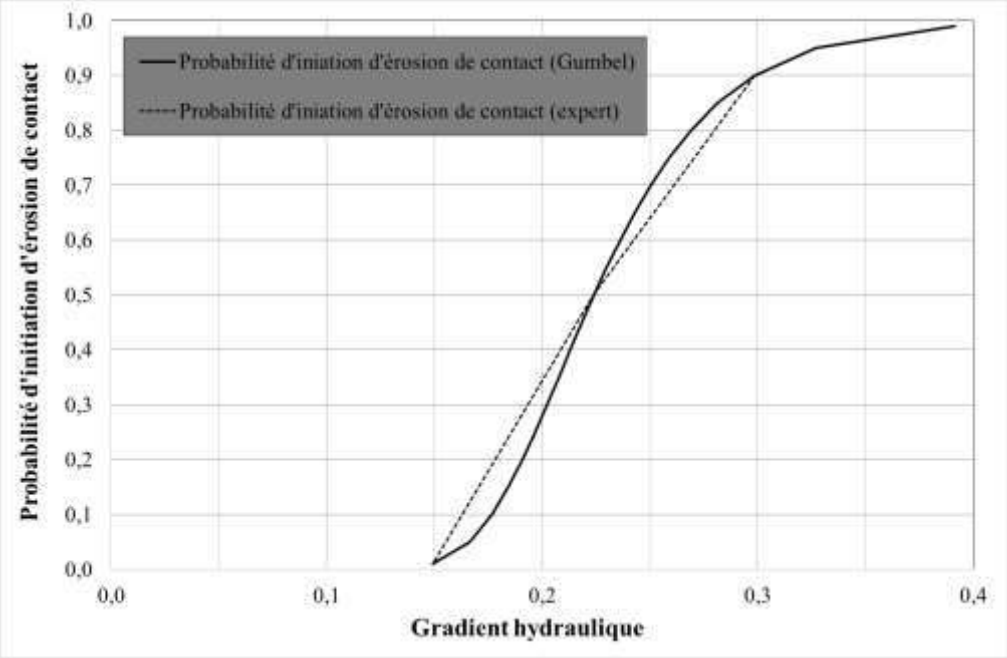


Figure 41. Probabilité d'érosion de contact en fonction du gradient critique (perméabilité de $6{,}7.10^{-2}$ m/s)

Pour les raisons indiqués ci-avant, la présence de graviers dans la digue ne peut être due qu'à une origine anthropique. Dans les secteurs où aucune brèche historique n'est recensée ou dans les secteurs de brèches, où des réparations définitives ont été menées, il est quasiment impossible de trouver des couches de graviers dans la digue. Au droit des brèches historiques du XIX^{ème}, cette probabilité est très faible, compte tenu du fait que les travaux de réparations ont été exécutés soit en contournant la brèche par la réalisation d'un fer à cheval en amont ou en aval de la digue, soit en reconstruisant la digue en place avec des matériaux d'emprunts locaux. On note également qu'aucune couche de laitier n'est présente dans les digues de la rive gauche.
Pour toutes ces raisons, nous retiendrons les probabilités de localisation suivante.

Tableau 19. Probabilité de localisation d'une couche de gravier perméable

Présence	Probabilité de localisation de gravier dans la digue	Qualification verbale
Pas d'anciennes brèches connues ou brèche reprise de façon définitive	0.001	Quasiment impossible
Brèches historiques du XIX^{ème} siècle	0.01	Très peu probable
Brèches de 1993, 1994 et 2002 Réparées en urgence et non reprises depuis	0.9	probable

2.5 RUPTURE PAR SUFFUSION INTERNE

2.5.1 Description du mécanisme de suffusion interne

La suffusion interne correspond à l'entraînement des particules fines libres de se mouvoir à travers les vides des particules grossières d'un sol à granulométrie discontinue.

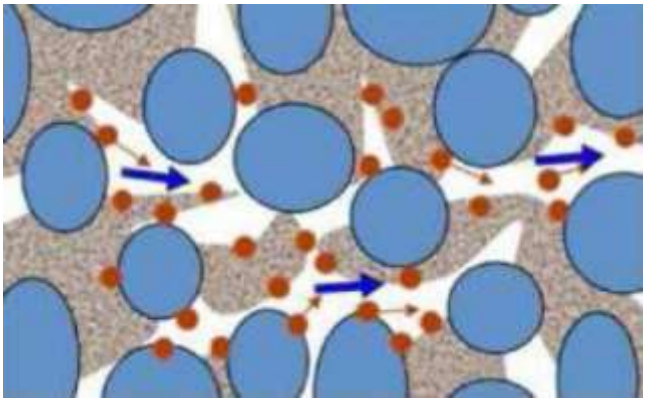


Figure 42. Suffusion interne (source Bonelli S. [X009])

Trois critères doivent être satisfaits (CIGB 2015 [X001]) pour initier la suffusion : un critère géométrique, un critère sur les contraintes et un critère hydraulique :

- critère 1 : la taille des particules du sol fin doit être plus petite que la taille des constrictions entre les particules grossières formant le squelette granulaire ou la matrice du sol.
- critère 2 : la quantité des particules du sol fin doit être plus petite que celle nécessaire pour remplir les pores entre les particules grossières formant le squelette. Dans le cas inverse, où l'on a plus de sol fin que ce qui est nécessaire pour remplir les pores, les particules grossières « flottent » dans la matrice de sol fin au lieu de former le squelette du sol.
- critère 3 : la vitesse d'écoulement à travers les vides du squelette doit imposer une contrainte suffisamment élevée pour vaincre le poids des particules fines et les contraintes qu'elles supportent pour les transporter à travers les constrictions des particules du sol grossier.

Plusieurs travaux ont été réalisés pour déterminer les critères géométriques permettant de caractériser les risques d'initiation de suffusion interne. On citera les travaux de Kenney et Lau (1985,1986), ceux de Burenkova (1993), Wan et Fell (2004,2007) décrits dans CIGB 2015 [X001] et Bonelli & Al. 2013 [X005].

On retiendra que d'après Wan et Fell, la condition est vérifiée pour les alluvions composées de plus de 65 % de graviers supérieurs à 5 mm (voire moins) avec moins de 35 % de sable 0/0,5 mm, soit dans les graves sableuses et les graves limoneuses ou limono-sableuses.

La figure ci-dessous illustre quelques graves sujettes à suffusion interne.

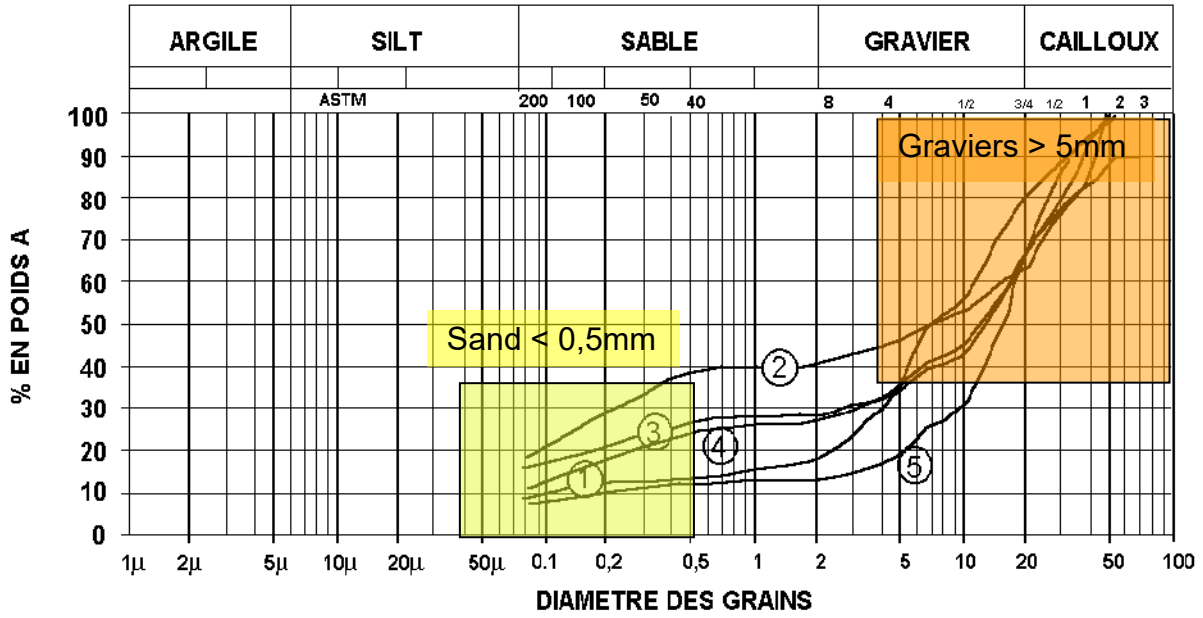


Figure 43. Conditions de suffusion interne d'après FRY J.J. 2013 comité technique remblai CIGB 2013 [X002]

La figure suivante illustre des courbes granulométriques de graves sables et instables (source Hans Rönnqvist, Peter Viklander [X017]) d'après WAN vis-à-vis de la suffusion interne.

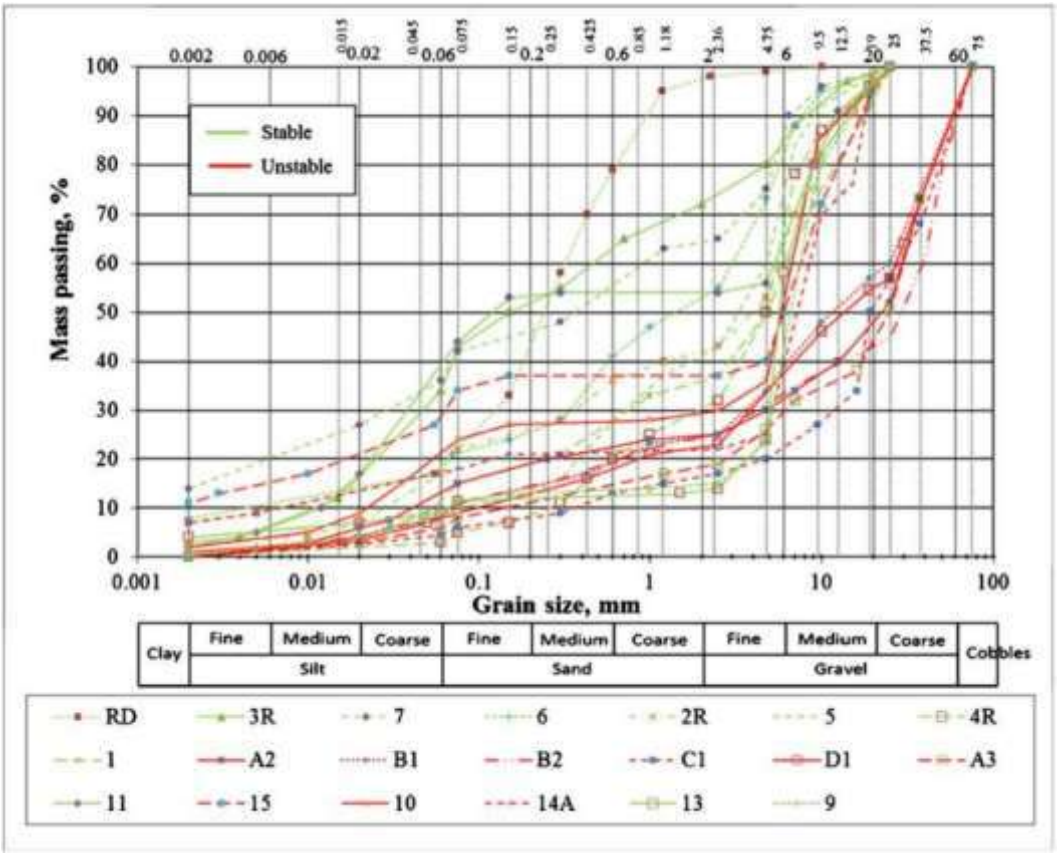


Figure 44. Graves testées par Wan et Fell et UNSV [X017]

2.5.2 Caractérisation du risque de suffusion interne

Dans le Delta du Rhône, ces graves se retrouvent en fondation profonde sur le Rhône entre Beaucaire et Arles et plus rarement sur le Grand Rhône dans les remontées du substratum graveleux. Elles se trouvent systématiquent dans les couches de chaussées en crête de digue. Elles peuvent également se trouver dans le corps de digue au droit des brèches colmatées en urgence suite aux crues de 1993, 1994, 2002 et 2003 et non reprises depuis. Elles peuvent également provenir d'anciennes couches de chaussées, qui n'auraient pas été purgées suite aux travaux de rehaussement général des digues après les crues de 1840 et 1856. Cette présence déjà observée par le passé est néanmoins très peu probable actuellement.

La figure suivante illustre quelques graves localisées lors des investigations géotechniques menées dans le cadre du Plan Rhône. A l'exception de l'échantillon intitulé « sable gris + galets », qui comporte plus de 55 % de sable et moins de 40 % de graviers, toutes ces graves apparaissent plus ou moins instables suivant les critères de Wan et Fell évoqués précedemment.

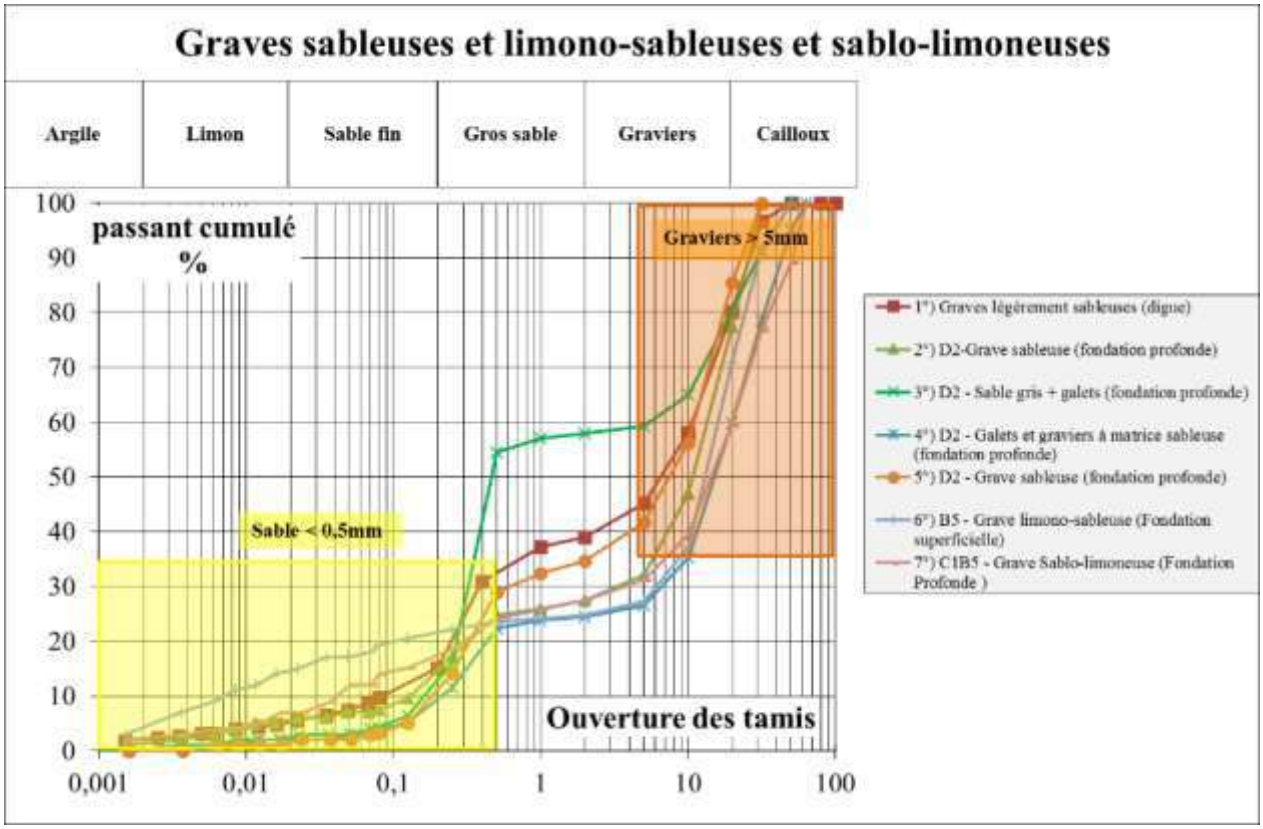


Figure 45. Graves observées dans le Delta du Rhône (source FUGRO Géotechnique + GINGER CEBTP)

Wan et Fell (2004c, 2007) ont trouvé que la méthode de Burenkova (1993) donnait une bonne évaluation de l'instabilité granulométrique des sols testés (CIGB 2015 [X001]). Cependant sur l'ensemble des données, la méthode ne donnait pas de limite franche entre les sols instables et les sols stables. Ils ont utilisé une régression statistique pour définir des lignes d'égale probabilité d'instabilité granulométrique qui sont représentées dans les deux figures suivantes respectivement pour les mélanges grave-sable-silt-argile et les sols grave-sable :

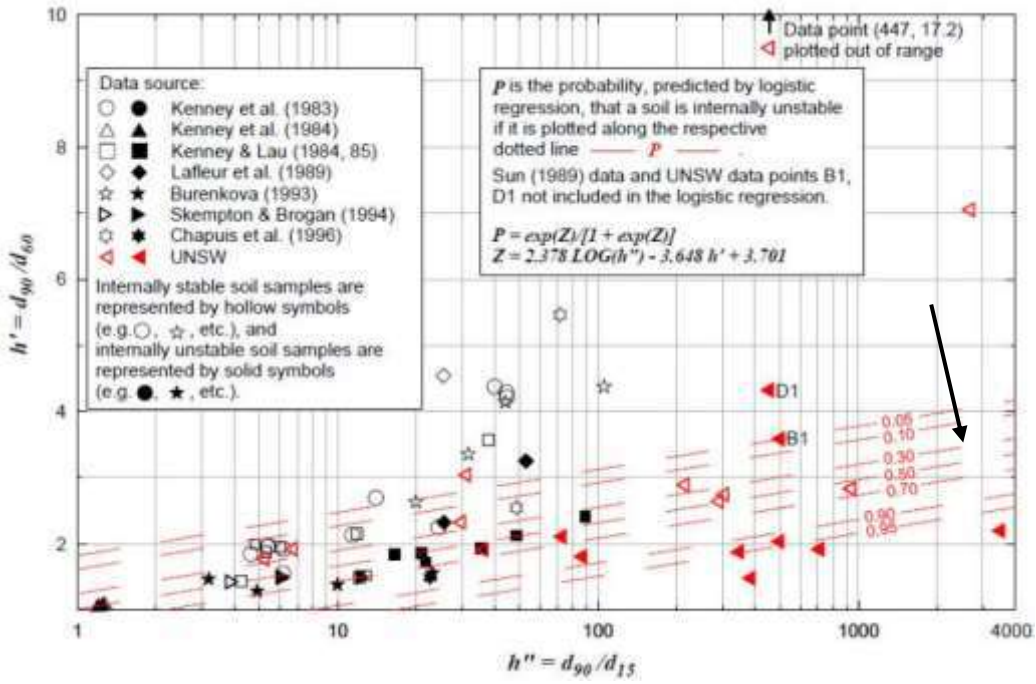


Figure 46. Sol n °1 : Isovaleurs de la probabilité d'instabilité granulométrique pour les mélanges de grave sable silt et grave sable silt argile avec des IP < 13 et un passant à 2µm < 10 % (source CIGB 2015 [X001])

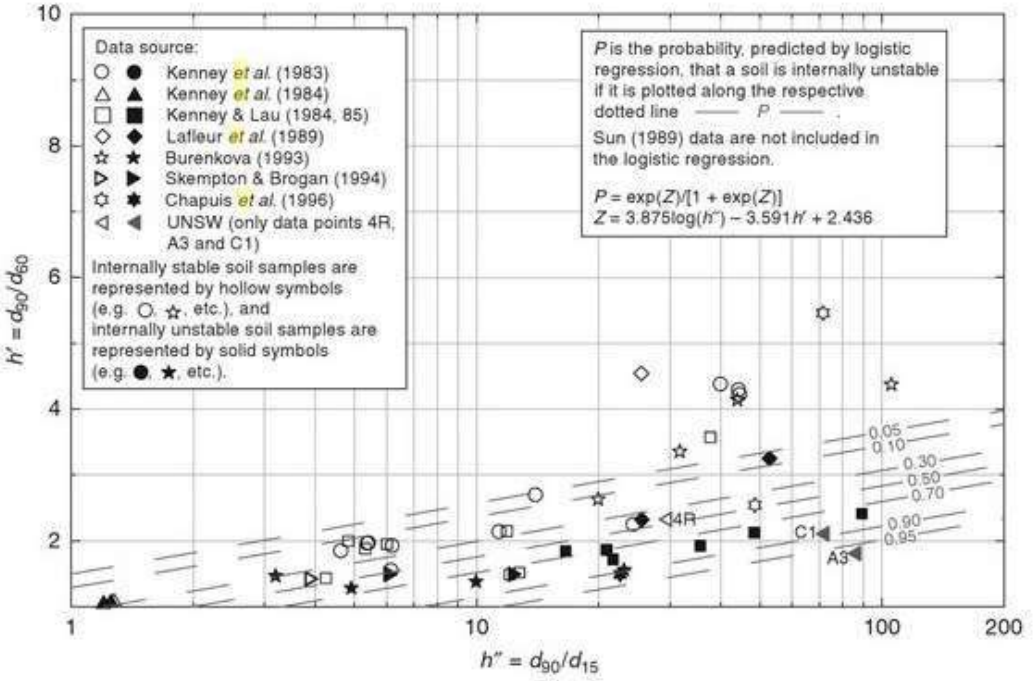


Figure 47. Sol n°2 : Isovaleurs de la probabilité d'instabilité granulométrique pour les sols grave-sable avec un passant à 75 µm < 10 % (CIGB 2015 [X001])

Pour les 7 graves observées lors des campagnes d'investigations géotechniques, les probabilités que ces sols soient instables ont été calculées. Les résultats figurent dans le tableau ci-après :

Tableau 20. Probabilité d'instabilité des graves observées dans le delta du Rhône

Paramètre	**Caractéristiques des graves**						
	N°1	**N°2**	**N°3**	**N°4**	**N°5**	**N°6**	**N°7**
Localisation	digue	Fond. prof	Fond. prof	Fond. prof	Fond. prof	Fond. sup.	Fond. prof
Type	sableuse	sableuse	sableuse	sableuse	sableuse	Limono-sableuse	Sablo-limoneuse
D15	0.197 mm	0.214 mm	0.235 mm	0.331 mm	0.264 mm	0.022 mm	0.121 mm
D60	10.9 mm	14.3 mm	5.7 mm	20.1 mm	11.3 mm	16.8 mm	20.2 mm
D90	26.9 mm	26.4 mm	30.1 mm	44.3 mm	23.6 mm	30.7 mm	51.1 mm
Type de sol (Wan&Fell)	2	2	2	2	2	1	1
Z	1.82	3.90	- 8.41	2.74	2.50	4.50	0.72
Probabilité	0.86	0.98	0.00	0.94	0.92	0.99	0.67

On constate que toutes les graves, à l'exception d'un échantillon, sont instables granulométriquement.

Le deuxième critère est le critère hydraulique basé sur le gradient critique. Wan et Fell (2004c, 2007) ont trouvé que les sols à instabilité granulométrique sont érodés lorsqu'ils sont soumis à un gradient ascendant inférieur ou égal à 0,8 et certains lorsqu'ils sont soumis à des gradients inférieurs à 0,3. La tendance générale montre que les sols à porosité plus forte commencent à être érodés sous les gradients hydrauliques plus faibles. Lâches, les sols à forte porosité commencent à être érodés à des gradients inférieurs à 0,3. Les sols avec des fines plastiques nécessitent des gradients plus élevés pour être érodés. Les sols à granulométrie discontinue ont tendance à être érodés à des gradients plus faibles que les sols à granulométrie continue possédant la même proportion de fines.

Marot et Al (2012) ont montré qu'à l'instar de l'érosion régressive les caractéristiques de la suffusion dépendent de la longueur du cheminement hydraulique. En augmentant la longueur de l'échantillon par 2, la valeur du gradient critique de suffusion peut être multipliée par un facteur de 0,6. La CIGB recommande en l'absence d'une méthode générale certaines précautions dans la détermination du gradient critique.

2.5.3 Prise en compte du risque de suffusion interne dans la présente étude

Le risque de suffusion interne doit être pris en compte :

- dans les graves profondes du Rhône,
- dans les couches de chaussées en crête de digue,
- dans le corps de digues non confortées depuis le XIX^{ème} siècle,

Dans les couches de grave en crête de digue :

Ces graves peuvent être mises en charge juste avant débordement. Par ailleurs leur compacité est élevée ce qui laisse penser que le gradient critique est supérieur à 0,3. Pour une digue confortée, dont la largeur est de 4,5 m et pour une digue du XIX^{ème} siècle étroite en crête (2,5 m) rendue carrossable, le gradient est respectivement de 0,07 et 0,12 pour une épaisseur de 0,3 m, ce qui nous permet de conclure en l'absence de risque.

Dans les graves en fondation profonde :

L'initiation de suffusion interne nécessite le claquage hydraulique de la couche de surface. Compte tenu de la profondeur de ces dernières, le risque est écarté.

Dans les graves éventuellement englobées dans le corps des digues du XIX^{ème} siècle :

Avant le rehaussement des chaussées de Camargue après la crue de 1840, ces dernières étaient utilisées souvent comme voies de circulation. Lors de leur rehaussement, la couche de chaussée, faite de grave ou d'empierrements, présente en surface n'a pas fait systématiquement l'objet de travaux de purge et a été confinée à l'intérieur de l'ouvrage. Cette présence a pu notamment être constatée lors du démontage de la digue entre Beaucaire et Fourques.
Dès lors, le risque de mise en charge existe pour les crues supérieures à la crue décennale qui correspond à la cote de calage des digues avant leur rehaussement généralisée après 1840. Ce risque doit être pris en compte dans la présente analyse.

Photo 10. Couche de graviers/grave englobés dans la digue de Beaucaire-Fourques

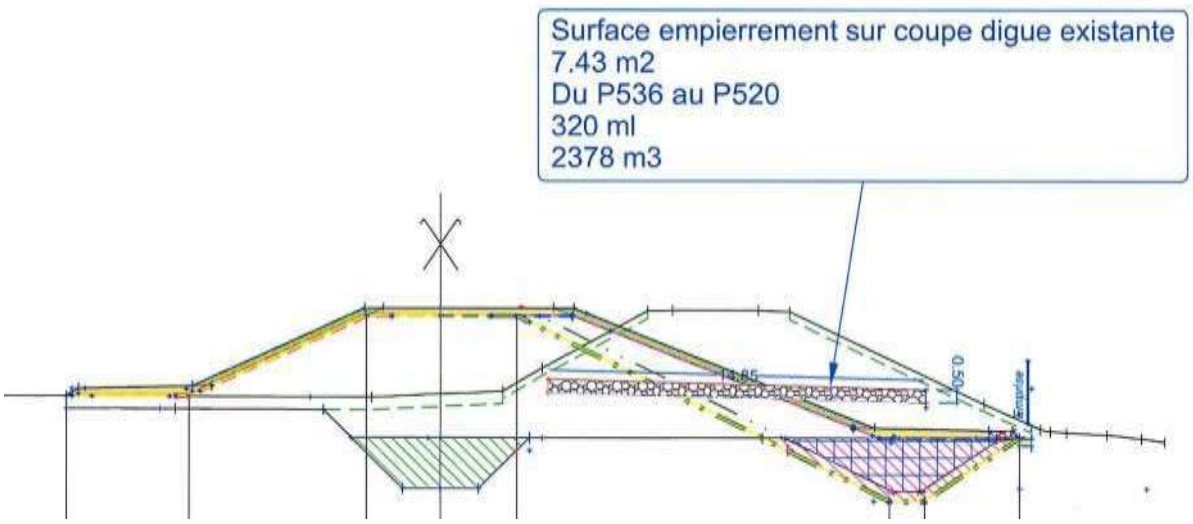


Figure 48. Renforcement Beaucaire-Fourques – plans d'exécution Valérian 2017

2.5.4 Choix des probabilités de localisation et d'initiation pour caractériser le risque de suffusion interne

Compte tenu des éléments précités, on retient pour la suite de l'étude, les probabilités de localisation suivantes :

Tableau 21. Probabilité de localisation d'une couche de grave englobée dans la digue

Présence	Probabilité localisation	Qualification verbale
Digues confortées	0.001	Quasiment impossible
Digue du XIX^{ème} siècle non confortée ayant fait l'objet de reconnaissances géotechniques sans détection de couche de grave dans le corps de digue	0.01	Très peu probable
Digue du XIX^{ème} siècle non confortée n'ayant pas fait l'objet de reconnaissances géotechniques	0,1	Peu probable
Digue du XIX^{ème} siècle non confortée ayant fait l'objet de reconnaissances géotechniques avec détection de couche de grave dans le corps de digue	0.9	probable

Ces probabilités sont justifiées par le fait que pour les digues confortées la présence d'un masque étanche en amont et/ou d'une recharge en aval rend la mise en charge d'une éventuelle couche de grave quasiment impossible. Dans les digues du XIX^{ème} siècle, même si de telles couches ont pu être observées, leur présence reste néanmoins peu probable. Cette présence devient très peu probable quand des reconnaissances géotechniques ont été réalisées sans détecter la présence de grave. A contrario la détection de grave lors de reconnaissances géotechniques rend probable la présence de telles couches de grave mais sans certitude que ces dernières soient traversantes.

A partir des résultats des travaux de recherche menés sur la suffusion interne, on définit à dire d'expert les probabilités d'initiation suivante (Cf. tableau ci-dessous).

Tableau 22. Probabilité de suffusion interne en fonction du gradient hydraulique

Gradient hydraulique	Probabilité initiation suffusion	Qualification verbale
0,1	0.001	Quasiment impossible
0,15	0.01	Très peu probable
0,2	0.1	peu probable
0,3	0.9	probable

Ces probabilités sont ajustées suivant une fonction de Gumbel avec une borne inférieure à 0,001 pour i > 0.

$$P_{initiation\ suffusion\ interne} = \exp\left(-exp\left(-\left(\frac{i-0{,}218}{0{,}037}\right)\right)\right)$$

Avec :

i : gradient moyen dans la grave

La figure suivante illustre la probabilité d'initiation de la suffusion interne en fonction du gradient.

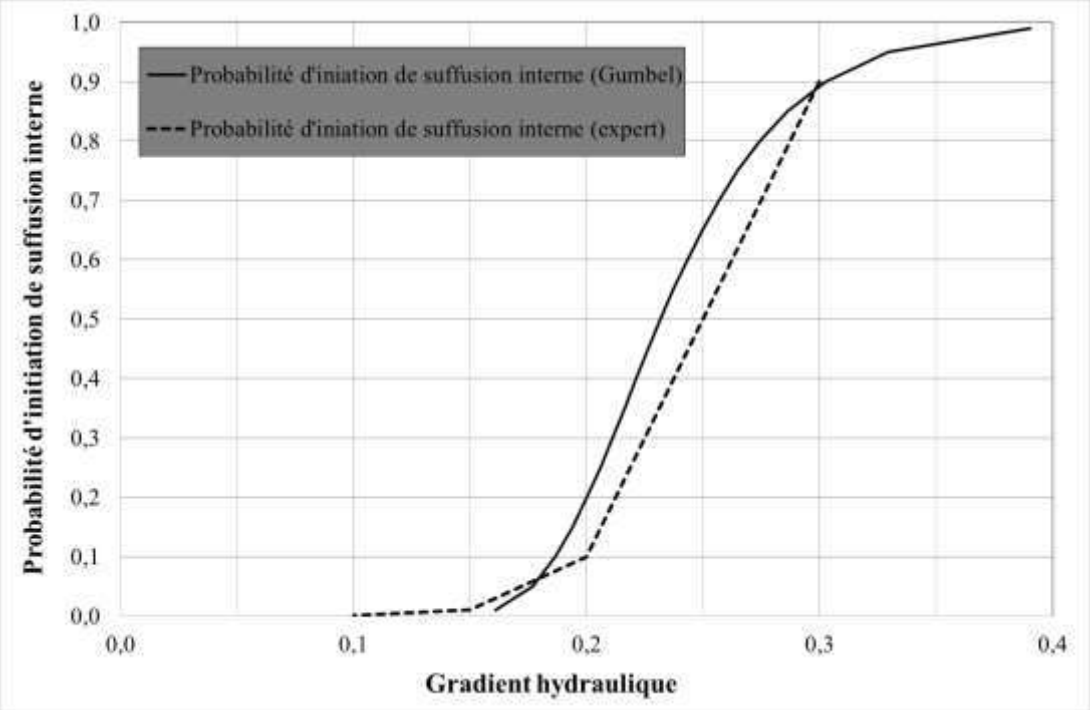


Figure 49. Probabilité d'initiation de la suffusion interne dans une couche de grave

2.6 SYNTHESE SUR L'INITIATION D'EROSION INTERNE

La figure ci-dessous synthétise pour les différents types d'érosion interne, les probabilités d'initiation en fonction du gradient hydraulique.

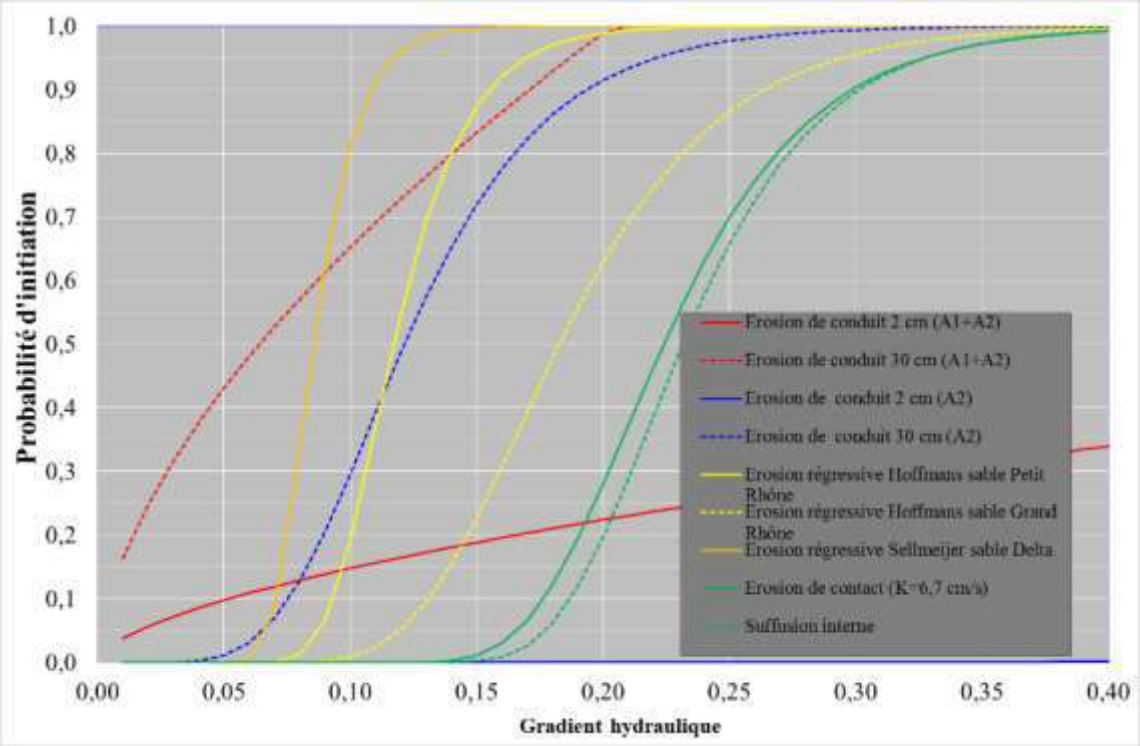


Figure 50. Probabilité d'initiation en fonction du gradient hydraulique pour différents types d'érosion interne

Sans surprise le principal danger concerne l'érosion de conduit dans un terrier de blaireau dans un mélange de matériaux A1+A2 suivant la GTR 2000, qui présente une probabilité d'initiation supérieure à 10 % pour un gradient hydraulique de 1/100 et de 1/20 pour des conduits de diamètre 2 cm.

Pour des gradients compris entre 1/20 et 1/10, la probabilité d'initiation de 10 % est dépassée pour les sables suivant Sellmeijer et les sables fins du Petit Rhône suivant Hoffmans. Elle est également dépassée pour des terriers de blaireaux dans des matériaux A2.

Pour des gradients compris entre 1/10 et 1/6, la probabilité d'initiation de 10 % est dépassée pour les sables grossiers du Grand Rhône suivant Hoffmans.

Pour des gradients compris entre 1/6 et 1/5 la probabilité d'initiation de 10 % est dépassée pour l'érosion de contact et la suffusion interne dans les graves du Rhône.

On note que pour les petits conduits de 2 cm dans des matériaux A2, la probabilité d'initiation reste quasiment nulle pour des gradients inférieurs à 0,4.

Les probabilités d'érosion de contact dans des couches de graviers et de suffusion dans des couches de grave suivent des comportements similaires.

2.7 CARACTERISATION DE LA FILTRATION

2.7.1 Description générale du mécanisme

Après l'initiation du processus d'érosion interne par l'un des quatre mécanismes décrits dans les chapitres précédents, l'érosion peut continuer et devenir ainsi une menace pour la digue. L'érosion peut être interrompue par la filtration exercée par un matériau du remblai ou de sa fondation à l'aval du point où elle s'est initiée. La filtration se produit quand la taille des constrictions du sol, traversé par l'écoulement transportant les particules érodées, retient les particules érodées, arrêtant ainsi la continuation de l'érosion. Les filtres sont plus perméables et plus grossiers que la matrice du sol filtré, appelée « sol de base ». L'écoulement ne contenant plus de particules érodées est drainé à l'aval.

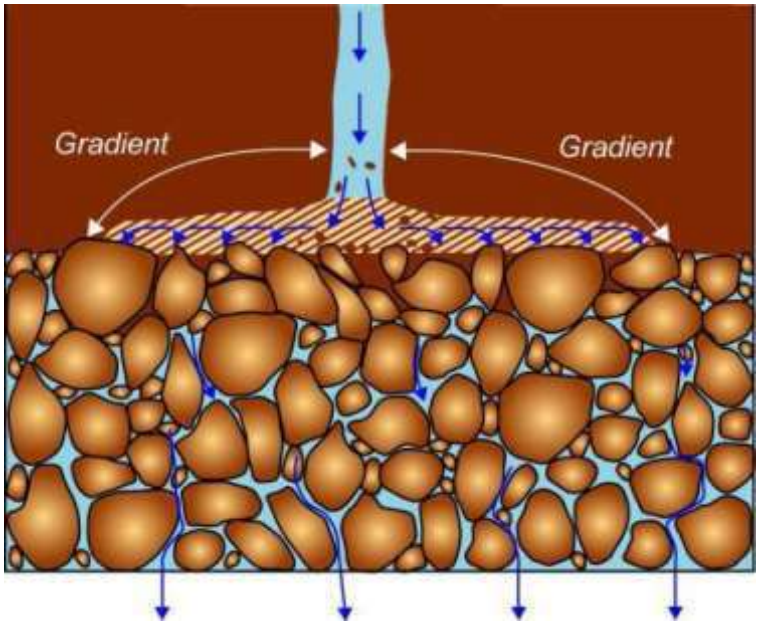


Figure 51. Filtration (source USBR 2012 [X004])

2.7.2 Fonctions du filtre

Les cinq fonctions, qui régissent la capacité du filtre à arrêter l'érosion interne, sont (CIGB 2015 [X001] :

1. Rétention : le filtre stoppe le transport (l'érosion) des particules du sol de base protégé.
2. Auto filtration ou stabilité : le filtre possède une stabilité interne et ses particules fines ne sont pas sujettes à l'érosion à l'intérieur du filtre, il ne devra pas maintenir une fissure ouverte par le processus de cimentation ou par la présence de fines plastiques.
3. Non cohésion : le filtre est pulvérulent et comble toute fissure.
4. Drainage : le filtre est suffisamment perméable pour transporter l'eau s'écoulant à travers le sol de base vers les couches drainantes ou le pied du barrage.
5. Résistance : le filtre transfère les contraintes à l'intérieur du barrage sans être écrasé et donc sans devenir plus fin.

A ces fonctions s'ajoutent le risque de soulèvement du filtre en cas d'insuffisance de drainage (dissipation des sous-pressions) et de poids sur le filtre (risque de claquage) (Fry 2016 [X019] et Fry 2016 [031]).
Les critères de rétention de la CIGB qui sont repris de Sherard et Dunnigan (1989) sont les suivants pour les nouveaux projets :

Tableau 23. Critères de rétention de Sherard et Dunnigan

Sol de base (< 4,75 mm)		**Filtre**
c% > 85 %	Silts fins et argiles	$D_{15} < 9.d_{85}$
40 % < c% < 85 %	Sables, silts et argiles	$D_{15} < 0,7$ mm
15 % < c% < 40 %	Sables limoneux et argileux et graviers	$D_{15} < \left[0,7 + \frac{40-c\%}{25}(4d_{85} - 0,7)\right]$
c% < 15 %	Sables, gravier	$D_{15} < 4\ d_{85}$

- c% pourcentage de fines passant à 75 µm
- D_{15} (filtre) : diamètre pour lequel 15 % de la masse du filtre passent
- d_{85} (sol) : diamètre pour lequel 85 % de la masse du sol de base passent

Le critère de rétention peut être assuré par un géotextile filtrant.

Les conditions de non ségrégation sont $C_u = d_{60}/d_{10}$ compris entre 3 (filtre grossier) et 6 (filtre sable).

La condition de perméabilité est assurée pour $D_{15} > 0,1$ mm.

La perméabilité du filtre est donnée par la formule de Vaughan et Sherard :

$$k = 0.35(D_{15})^2 \text{ avec k (en cm/s) et } D_{15} \text{ (en mm)}$$

La condition d'absence de cohésion du filtre est assurée pour $D_5 > 75$ µm.

Le bulletin n°164 de la CIGB [X001] donne des probabilités de maintien de fissure ouverte pour les filtres (sable) contenant un excès de fines. Ces dernières ont été développées à partir d'essais en laboratoire effectués par Park (2005) et des études de cas de Foster (1999, Foster et Fell (1999).

Tableau 24. Probabilité de maintien de fissure ouverte pour les filtres contenant un excès de fines

Plasticité des fines	Contenu de fines % passant 75 µm	Probabilité de maintien d'une fissure ouverte	
		compacté	Non compacté
Non plastiques (et non cimentables)	5 %	0.001	0.0002
	7 %	0.005	0.001
	12 %	0.05	0.01
	15 %	0.1	0.02
	> 30 %	0.5	0.1
Plastiques (ou sujettes à la cimentation)	5 %	0.05	0.02
	7 %	0.1	0.05
	12 %	0.5	0.3
	≥ 15 %	0.9	0.7

Le maintien d'une fissure ouverte dans un filtre empêche la filtration des matériaux. Les probabilités précitées sont donc liées à la probabilité de non filtration des matériaux de remblais.

Compte tenu de ce retour d'expérience validé par le comité technique des remblais de la Commission Internationale des Grands Barrages, on retiendra à dire d'expert, les probabilités de non filtration suivantes :

Tableau 25. Probabilité de non filtration

Filtre	Probabilité associée
Absent	1
Présent mais caractéristiques non connues	0.1
Présent et caractéristiques connues	0.01

2.8 CARACTERISATION DE LA PROGRESSION DE L'EROSION INTERNE

La figure suivante extraite de l'étude accidentologique illustre pour les 22 brèches et départs de brèches observés dans le Delta depuis 1993, le rapport Revanche (R) sur Hauteur de digue mesurée depuis le côté terre (Hav).

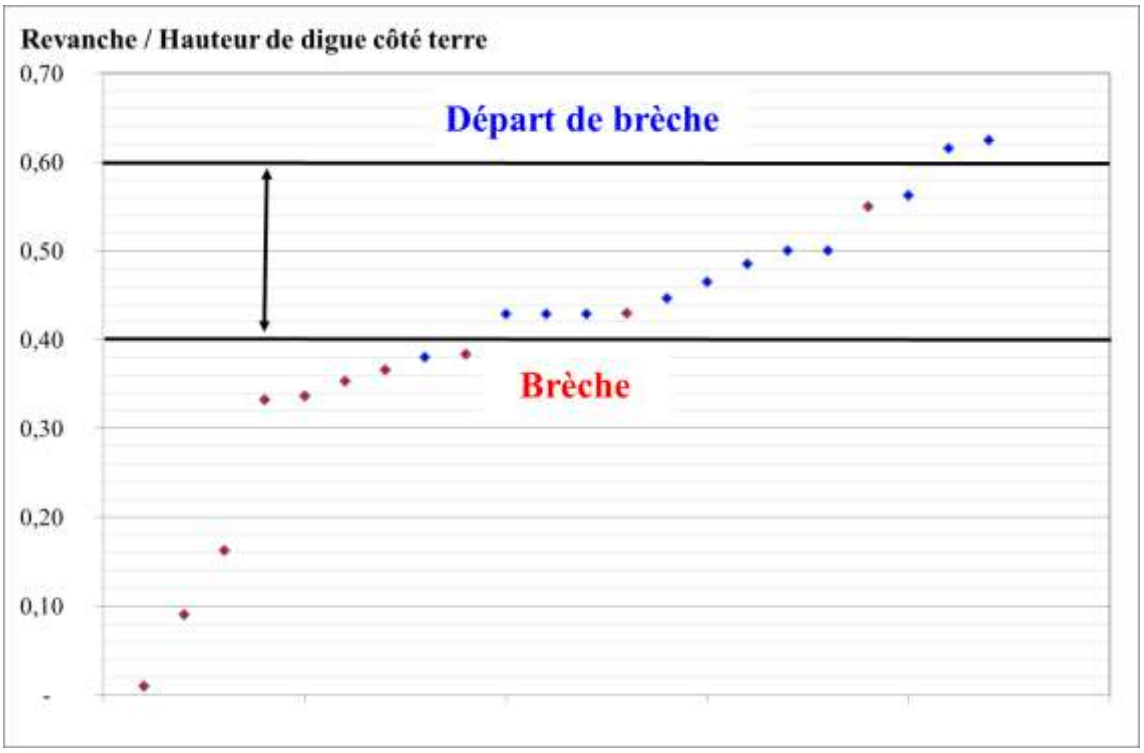


Figure 52. Corrélation entre le rapport « revanche sur hauteur de digue mesurée côté terre » et progression du phénomène de formation de la brèche

On constate que lorsque ce rapport est supérieur à 0,45/0,5, à une exception près (brèche de ventabren de nov. 2016), le mécanisme de formation de brèche n'est pas allé jusqu'à sa phase terminale. A contrario, lorsque ce rapport était inférieur, le mécanisme de formation de la brèche est allé quasiment systématiquement jusqu'à sa fin.

Cette observation nous amène à penser que l'effondrement du toit (qui précède la brèche) a pu interrompre le processus de formation de la brèche. L'interruption ou la non progression n'a pu se faire que lorsque l'épaisseur du toit (≅ revanche) était supérieure au diamètre du conduit (Cf. figure ci-dessous). Le REX accidentologique laisse penser que ce seuil se situe entre 0,4 et 0,6 fois la hauteur de la digue mesurée depuis l'aval.

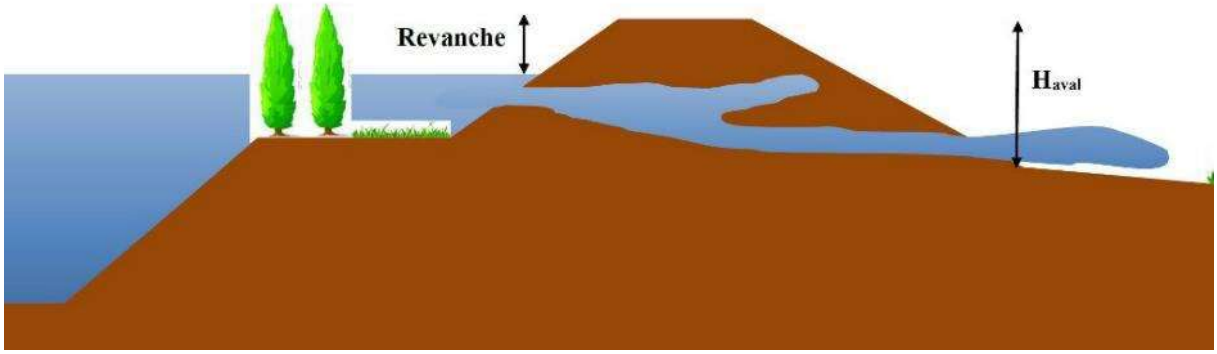


Figure 53. Progression, revanche et hauteur de digue mesurée depuis l'aval

Compte tenu de ce retour d'expérience, on retient les probabilités subjectives suivantes :

Tableau 26. Probabilité de progression

Revanche/Hauteur de digue mesurée depuis le côté zone protégée (R/H)	Probabilité associée
0,3	0,99
0,4	0,9
0,45	0,65
0,5	0,5
0,6	0,1

Que l'on cale dans un second temps avec la fonction de répartition ci-dessous. Compte tenu des incertitudes liées à ce phénomène, on retiendra la loi de probabilité suivante avec une borne inférieure à 0,1.

$$P_{progression} = MAX\left(\exp\left(-exp\left(-\left(8{,}14 - 15{,}36.\frac{R}{Haval}\right)\right); 0{,}1\right)\right)$$

Haval est le max entre la hauteur de digue mesurée depuis l'aval, soit directement en pied de digue, soit mesuré à 20 m de la digue ; le deuxième cas étant dans la majeure partie des cas retenu.

La figure ci-dessous illustre l'évolution de la probabilité de progression en fonction du rapport revanche sur hauteur de digue mesurée depuis le côté zone protégée.

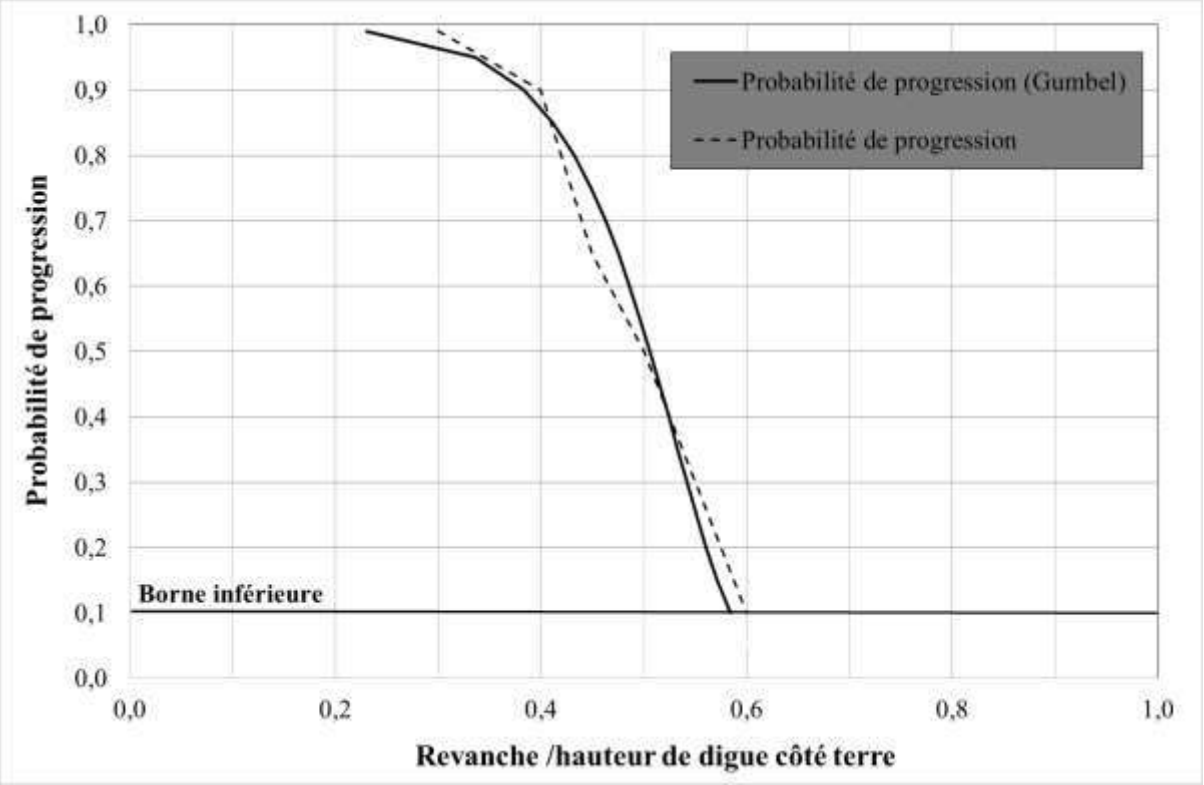


Figure 54. Probabilité de progression en fonction du rapport revanche sur hauteur de digue côté protégée

3 CARACTERISATION DE LA RUPTURE PAR CLAQUAGE ET SOULEVEMENT DU PIED AVAL

3.1 RUPTURE PAR SOULEVEMENT DU PIED DE TALUS COTE TERRE

3.1.1 Méthodologie

La modélisation du claquage hydraulique d'une couche d'argile surplombant une couche de sable a été développée par l'USACE en 1993 et repris dans the International Levee Handbook [X015]. En effet aux Etats-Unis, les digues du Mississipi sont construites dans des plaines alluviales dont la couverture superficielle déposée lors des crues est constituée d'argiles ou de limons, qui confinent les dépôts sableux. Ces couches sableuses sont des aquifères généralement anisotropes où la forte perméabilité et l'écoulement horizontal peuvent provoquer le claquage et le soulèvement hydrauliques de la couverture argileuse. Si aucun claquage hydraulique n'a été observé dans le Delta du Rhône lors de crues de 1993 à 2003, il a été observé dans le sud de la France lors de la crue de l'Aggly de 2013.

Photo 11. tumulus observés en aval des digues de l'Aggly 2013 (© SAFEGE)

La condition de claquage et de soulèvement hydrauliques est une condition sur l'équilibre d'une colonne d'argile soumise à la force de pression hydraulique exercée par l'eau dans la couche de sable située en dessous. Les hypothèses simplificatrices du modèle sont :

- Un écoulement vertical dans la couche d'argile,
- Un écoulement horizontal dans la couche de sable,
- L'imperméabilité des matériaux de la digue,
- Des écoulements laminaires et en régime permanent,
- Des couches de sables et d'argiles horizontales, et d'épaisseur constante

Le critère du claquage hydraulique et soulèvement s'écrit :

$$\boldsymbol{F = Z_{bd} * \frac{\gamma'(L_1 + L_2 + L_3)}{h * \gamma_w * L_3}}$$

Avec :

$$\boldsymbol{L_1} = \sqrt{\frac{k_f \; d \; Z_{bu}}{k_{bu}}}$$

Où : k_f est la perméabilité horizontale de la couche de l'aquifère sableuse (m/s)
k_{bu} est la perméabilité verticale de la couverture limoneuse amont (m/s)
Z_{bu} est l'épaisseur de la couverture limoneuse amont (m)
d est l'épaisseur de la couche de sable

$\boldsymbol{L_2}$ est la largeur de la digue (m)

$\boldsymbol{L_0}$ correspond à la largeur du ségonnal (Si $L_1 > L_0$ alors $L_1 = L_0$

$$\boldsymbol{L_3} = \sqrt{\frac{k_f Z_{bd} d}{k_{bd}}}$$

Où : k_{bd} est la perméabilité verticale de la couverture limoneuse en aval (m/s)
Z_{bd} est l'épaisseur de la couverture limoneuse en aval

On considère : $Z_{bd} = Z_{bu} = Z$ (m)

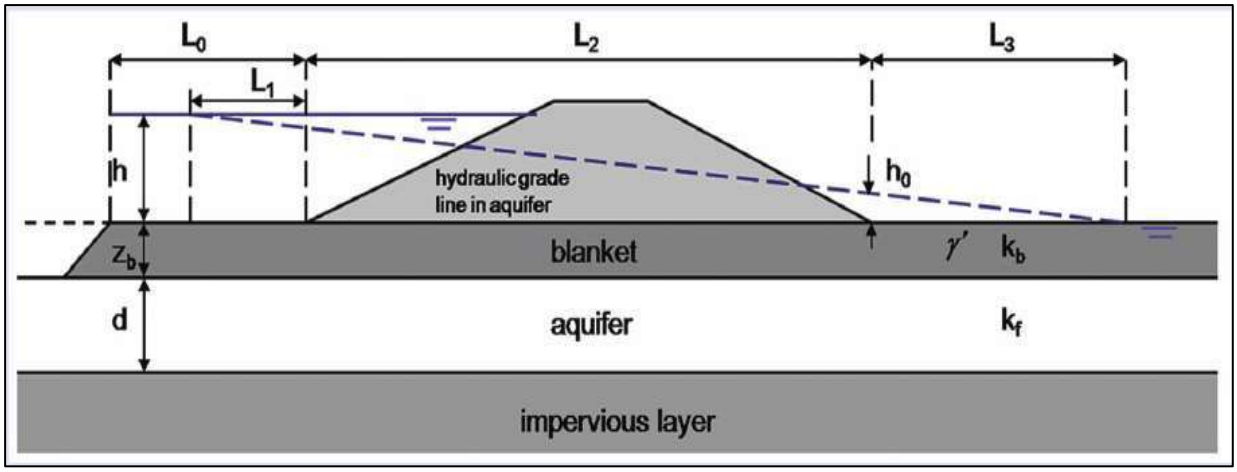


Figure 55. Schéma présentant la disposition et les paramètres utilisés par USACE (ILH [X015])

Si F < 1, le soulèvement hydraulique est certain. On estime que les conditions de sécurité vis-à-vis du soulèvement hydrauliques sont assurées pour F > 1,3.

3.1.2 Sensibilité des différents paramètres sur le calcul du facteur de sécurité

On procède par une analyse de la sensibilité des paramètres hydrauliques et géométriques suivants :

- rapport de perméabilité entre la couche de sable et sa couverture limoneuse,

- épaisseur de la couverture limoneuse,
- épaisseur de la couche de sable sous sa couverture limoneuse eu perméable.

L'analyse de sensibilité est menée à chaque fois pour une digue sans ségonnal (L_0 = 5 m) et une digue éloignée du fleuve (L_0 = 65 m). La largeur retenue pour la base de la digue est L_2 = 15 m

Sensibilité de la largeur du ségonnal et du rapport de perméabilité :

La figure ci-dessous illustre pour une couche de limon Z_{bd} = 2 m et Z_{bu} = 3 m, l'évolution du facteur de sécurité F en fonction de la hauteur de charge hydraulique h pour une digue sans ségonnal (L_0 = 5 m) et une digue avec ségonnal (L_0 = 65 m) pour des rapports de perméabilité entre la couche de sable et sa couverture limoneuse respectivement de 100 et 1000.

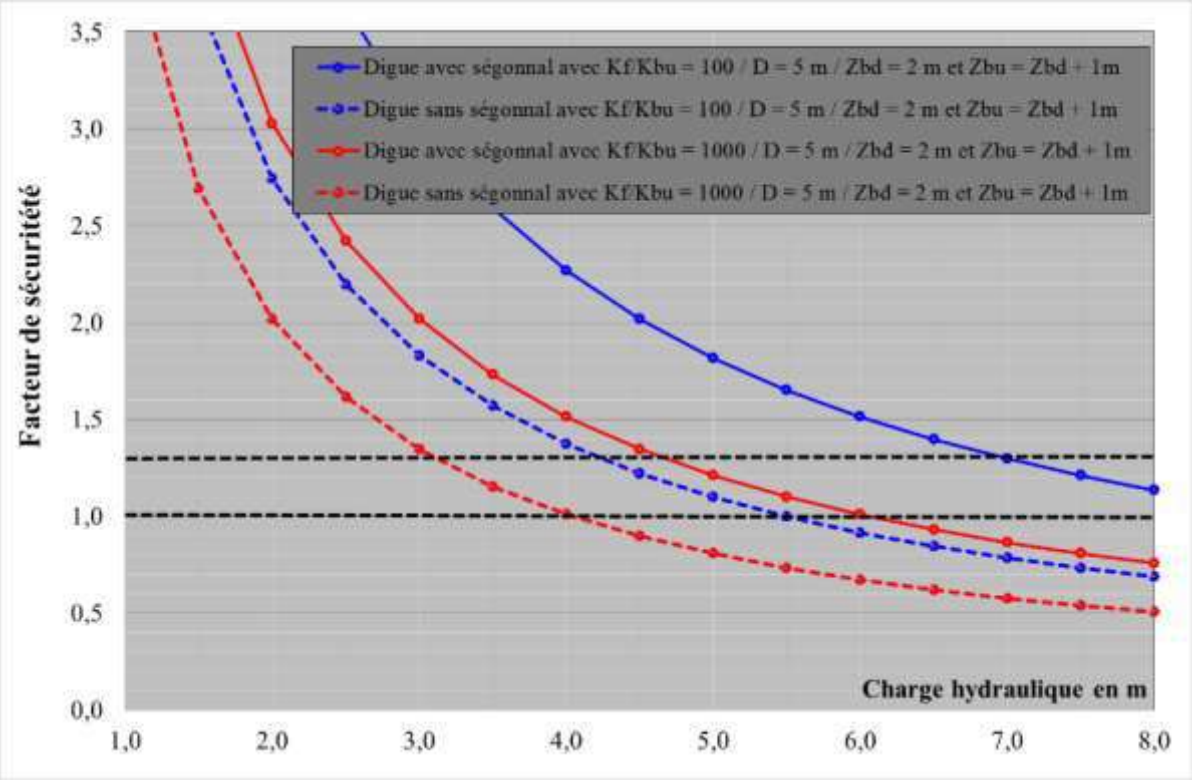


Figure 56. Facteur de sécurité F en fonction de la largeur du ségonnal et rapport de perméabilité

On constate que la sensibilité de ces deux paramètres est très importante. Avec un rapport k_f/k_{bu} = 100, le facteur de sécurité F = 1,3 est assuré pour une charge hydraulique de 7 m pour une digue éloignée du fleuve. La charge hydraulique chute à 4,25 m pour une digue à proximité du fleuve.

Pour une digue à proximité du fleuve, le facteur de sécurité F = 1,3, satisfait pour une charge hydraulique de 4,25 m avec un rapport de perméabilité k_f/k_{bu} = 100 n'est assuré, avec un rapport de perméabilité de 1000, que pour une charge hydraulique de 3 m.

Sensibilité du facteur de sécurité à la largeur du ségonnal et à l'épaisseur de la couverture limoneuse :

La figure ci-dessous illustre pour un rapport k_f/k_{bu} = 100 et une épaisseur de sable de 5 m, l'évolution du facteur de sécurité *F* en fonction de la hauteur de charge hydraulique *h* pour une digue sans ségonnal (L_0 = 5 m) et une digue avec ségonnal (L_0 = 65 m) pour des épaisseurs de limons côté aval de 1 m et 2 m et côté amont de 2 et 3 mètres.

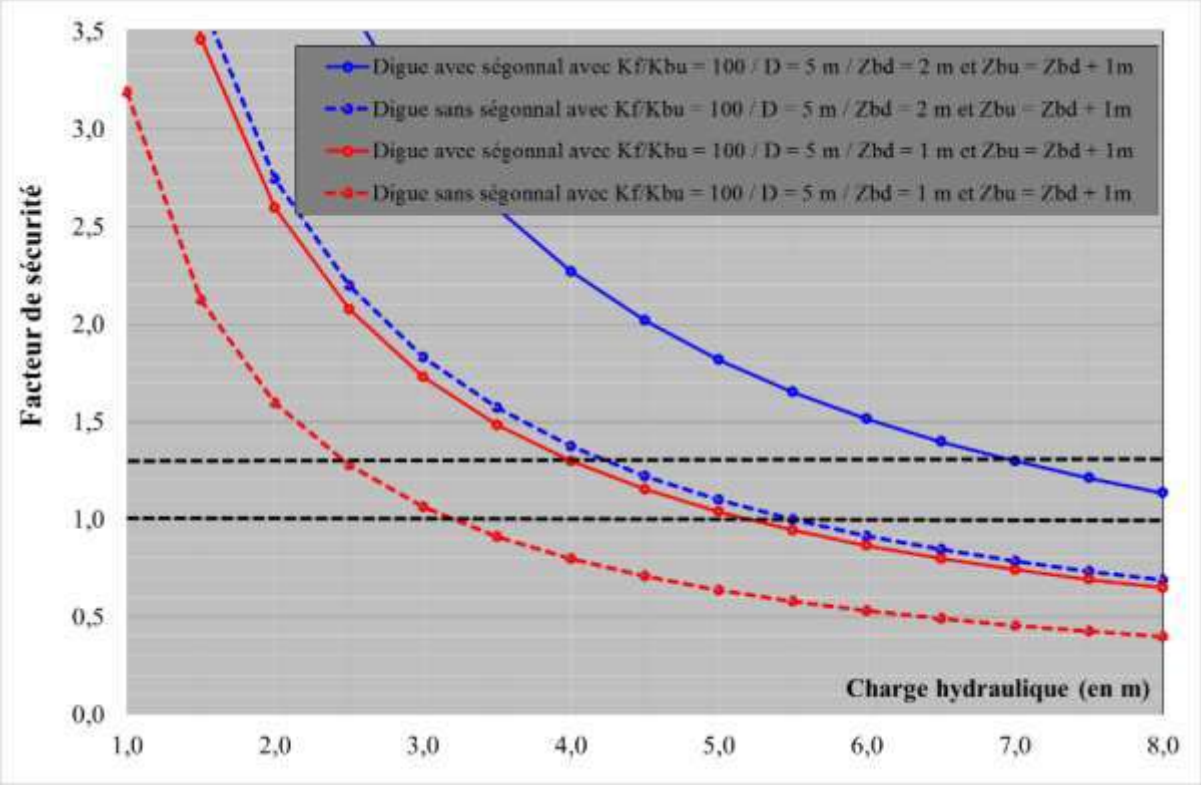


Figure 57. Facteur de sécurité F en fonction de la largeur du ségonnal et l'épaisseur de limon

On constate que la sensibilité du paramètre Z_{bd} est également très importante. Avec Z_{bd} = 2 m, le facteur de sécurité F = 1,3 est assuré pour une charge hydraulique de 7 m pour une digue éloignée du fleuve. La charge hydraulique chute à 4 m pour Z_{bd} = 1 m.

Pour une digue à proximité du fleuve, la charge hydraulique permettant d'assurer un facteur de sécurité F = 1,3 est de 4,25 m pour Z_{bd} = 2 m. Elle passe à 2,5 m pour Z_{bd} = 1 m.

Sensibilité du facteur de sécurité à la largeur du ségonnal et à l'épaisseur de la couche de sable sous la couverture de limon :

La figure ci-dessous illustre pour un rapport k_f/k_{bu} = 100 et une épaisseur de limon Z_{bd} = 1 m et Z_{bu} = 2 m, l'évolution du facteur de sécurité *F* en fonction de la hauteur de charge hydraulique *h* pour une digue sans ségonnal (L_0 = 5 m) et une digue avec ségonnal (L_0 = 65 m) pour des épaisseurs de sable respectivement de 5 m et 0,5 m.

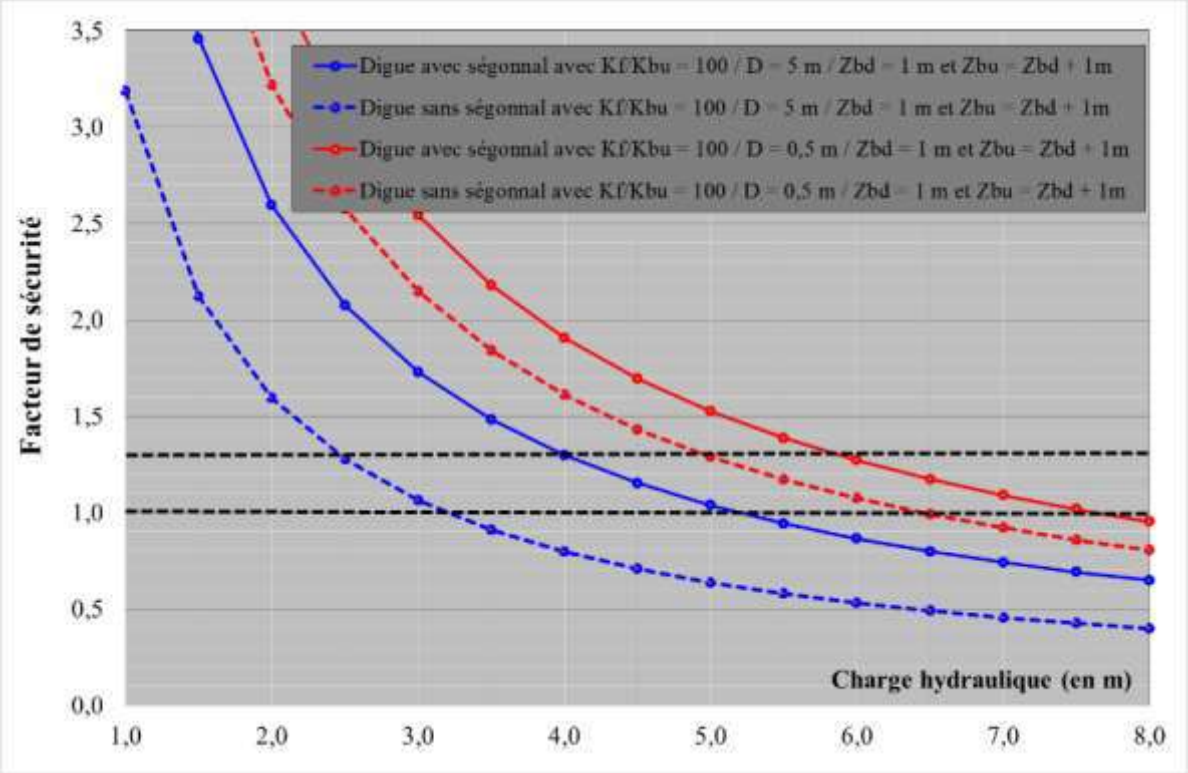


Figure 58. Facteur de sécurité F en fonction de la largeur du ségonnal et l'épaisseur de sable

On constate que la sensibilité du facteur de sécurité à l'épaisseur de sable *D* est également importante. Avec *D* = 5 m, le facteur de sécurité F = 1,3 est assuré pour une charge hydraulique de 4 m pour une digue éloignée du fleuve et pour une digue à proximité du fleuve, une charge hydraulique de 2,5 m.

Cette même charge hydraulique passe à 5 et quasiment 6 mètres pour une épaisseur de sable de 0,5 m.

3.1.3 Retour d'expérience des crues historiques et choix des paramètres

On a vu précédemment que le facteur de sécurité est sensible à l'ensemble des paramètres. Le paramètre qui est sans doute le plus incertain est le rapport de perméabilité entre la couche de limon en surface et la couche de sable en fondation.

Disposant de reconnaissances géotechniques suffisantes en rive du Rhône et du Petit Rhône, nous avons procédé à un calage du modèle de soulèvement hydraulique sur cette rive du fleuve par rapport à la crue de décembre 2003. Bien que 25 km des 50 km du système comportent des couches de sable plus ou moins érodables en fondation (sols 6 et 5 suivant la classification de Robertson), seuls 6 km ont été identifiés comme critiques car cumulant des probabilités notables (P> 0,1) de soulèvement hydraulique. En retenant une hypothèse d'un rapport de perméabilité de 1000 entre les couches de limons et de sable, le facteur F < 1,2 sur 4,2 km dès les premières mises en charge et inférieur à 1 pour la crue de 2003, ce qui ne colle pas avec les observations passées. Avec un rapport de 100 entre ces perméabilités, on observe des facteurs de sécurité légèrement supérieurs à 1 pour la crue de décembre 2003. Ce ratio de 100 corrobore également l'analyse du contexte géotechnique et plus particulièrement la

distribution des perméabilités du limon (plus ou moins argileux) et du sable qui sont séparés de 2 logs (Cf. Chapitre n°5.0).
On retient donc pour la suite de l'étude un rapport de perméabilité de 100 entre les couches de limon et de sable.

3.1.4 Détermination de la loi de probabilité de soulèvement hydraulique

La probabilité de soulèvement hydraulique est évaluée en fonction de la grille suivante :

Tableau 27. Probabilité de soulèvement hydraulique en fonction du facteur de sécurité

Facteur F USACE (1993)	**Probabilité claquage**	**Qualification verbale**
0.9	0.99	Très probable
1	0.9	probable
1.1	0.5	Neutre
1.2	0.1	peu probable
1.3	0.01	Très peu probable
1.4	0.001	Quasiment impossible

Ces probabilités sont ajustées suivant une fonction de Gumbel en calant les paramètres sur les probabilités comprises entre 0,01 et 0,5. Compte tenu de la sensibilité des paramètres, la probabilité de soulèvement hydraulique retenue dans les calculs est égale à :

$$P_{soulèvement\ hydraulique} = MAX\left(\exp\left(-\exp\left(\left(\frac{F-1{,}131}{0{,}103}\right)\right)\right); 0{,}001\right)$$

Avec *F* : facteur de sécurité au soulèvement hydraulique de l'USACE

La figure suivante illustre la probabilité de soulèvement hydraulique en fonction du facteur de sécurité *F*.

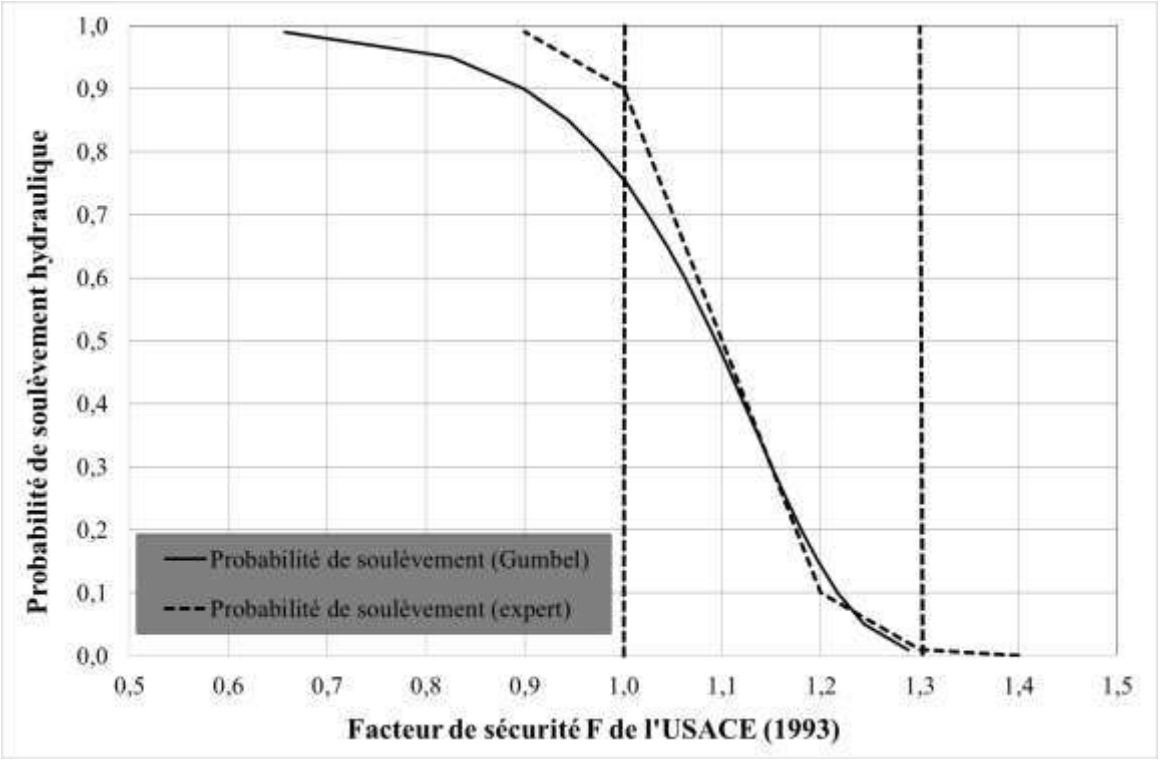


Figure 59. Probabilité de soulèvement hydraulique en fonction du facteur de sécurité de l'USACE (1993)

3.2 RUPTURE PAR CLAQUAGE HYDRAULIQUE D'UN CONDUIT PARTIELLEMENT COLMATE

Certains conduits non détectables lors des Visites Techniques Approfondies existent dans les digues. Ils ne sont pas traversants mais peuvent le devenir lors de la mise en charge de la digue par claquage hydraulique. Ces conduits concernent :

- les terriers de blaireaux ou de lapins colmatés partiellement (technique pratiquée par le passé),
- les réseaux de racines mortes suite à l'abattage d'arbres présents sur les talus de digue sans dessouchage des racines,
- la présence de vides localisés aux transitions de brèches colmatés en urgence avec des matériaux de remblais perméables,
- Les transitions liées aux réparations de trous de blaireau.

La figure suivante illustre le scénario de claquage hydraulique au droit d'un ancien terrier de blaireau partiellement colmaté :

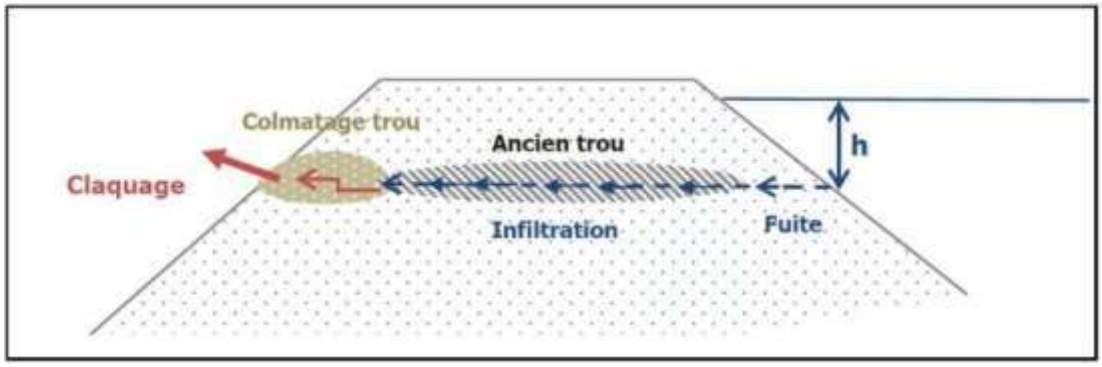


Figure 60. Schéma explicatif du scénario claquage d'un trou partiellement colmaté

Le claquage hydraulique a fait l'objet de travaux de recherche dans le cadre du programme ERINOH (FRY & Al. 2015 [X019]). Une condition d'apparition est mise en évidence pour les écoulements plans. Cette condition est sécuritaire pour le claquage de bouchon de conduit sous un écoulement concentré. Elle est utilisée ci-dessous en appliquant un coefficient de correction issu des travaux ERINOH et d'un cas de brèche figurant dans l'étude accidentologique.

Les différentes forces appliquées sur le bouchon de colmatage d'un terrier partiellement colmaté sont le poids du bouchon et la poussée hydraulique, les frottements latéraux du bouchon étant négligés par sécurité. Le bouchon considéré est le plus court chemin entre le conduit et le parement de la digue. Ces forces sont représentées dans la figure suivante.

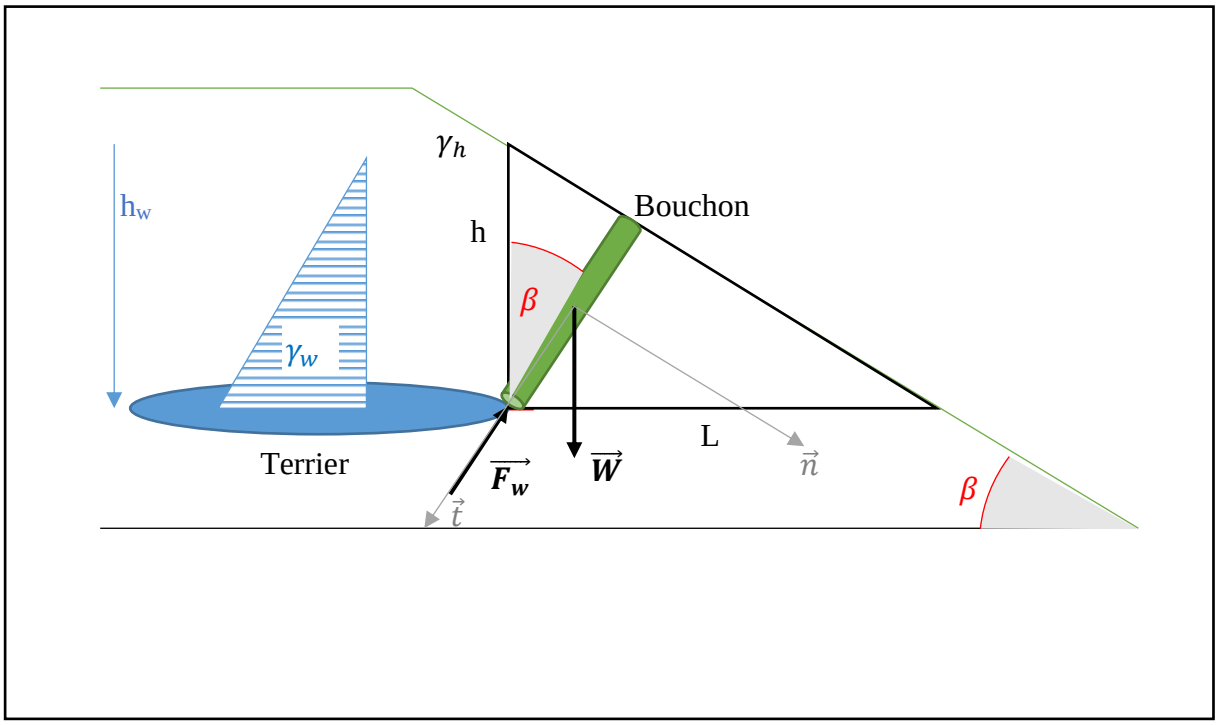


Figure 61. Forces appliquées sur le bouchon

Sur le schéma ci-dessus :

- h_w est la hauteur d'eau au niveau du terrier
- γ_w est le poids volumique de l'eau
- $\overrightarrow{F_w}$ est la force exercée par l'eau sur le bouchon
- γ_h est le poids volumique de la digue et donc du bouchon
- $\vec{W}$ est le poids du bouchon
- h est la profondeur verticale du terrier
- L est la profondeur horizontale du terrier
- β est l'inverse du fruit du parement aval
- $\vec{t}$ est le vecteur directeur du repère local du bouchon, tangent à celui-ci
- $\vec{n}$ est le vecteur directeur du repère local du bouchon, perpendiculaire à celui-ci

La longueur minimale du bouchon, depuis le terrier, est égale à $h.\cos\beta$

Le poids du bouchon est défini selon : $W = \gamma_h . h . cos\beta . S$; orienté vers le sol.

La force de l'eau sur le bouchon est définie selon : $F_w = \iint_S \gamma_w . h_w . dS$. La variation de h_w étant négligeable sur la surface du bouchon, $F_w = \gamma_w . h_w . S$; orienté perpendiculairement au bouchon.

Les autres forces, en particulier de frottement, sont négligées.

En projetant sur l'axe du bouchon ($\vec{t}$), l'équilibre des forces sur le bouchon donne :

$$W . cos\beta + F_w = 0$$

$$(\gamma_h . h . cos\beta . S\ ) . cos\beta - \gamma_w . h_w . S = 0$$
$$\gamma_h h cos\beta^2 - \gamma_w h_w = 0$$

Avec : $h = Ltan\beta$

D'où :

$$\gamma_h L tan\beta cos\beta^2 - \gamma_w h_w = 0$$

Le claquage hydraulique a lieu si :

$$\boldsymbol{\gamma_w * h_w > \gamma_h * L * cos(\beta) sin(\beta)}$$

Or: $\boldsymbol{cos(\beta) sin(\beta) = sin(2\beta)/2}$

On définit alors le facteur *F(2D)* de sécurité par :

$$\boldsymbol{F(2D) = \frac{\gamma_h L * sin\ (2\beta)}{2\gamma_w * h_w}}$$

Il y a claquage si $F < 1$

Comme indiqué en introduction, cette formule donne des bons résultats pour les écoulements plans mais est très sécuritaire pour le claquage de bouchon de conduit sous un écoulement concentré. Un coefficient de calage 3D/2D de 1,3 est donc appliqué dans le cas d'écoulement concentré (scénario de brèche n°1). Cette valeur est définie de manière prudente par rapport aux retours d'expérience respectifs des travaux ERINOH et de l'étude accidentologique (Chapitre n°6).

$$\boldsymbol{F(3D) = 1,3 \frac{\gamma_h L * sin\ (2\beta)}{2\gamma_w * h_w}}$$

La figure ci-après donne l'évolution du facteur de sécurité pour un écoulement 2D et 3D en fonction de l'épaisseur L du bouchon de colmatage et du fruit du talus de la digue.

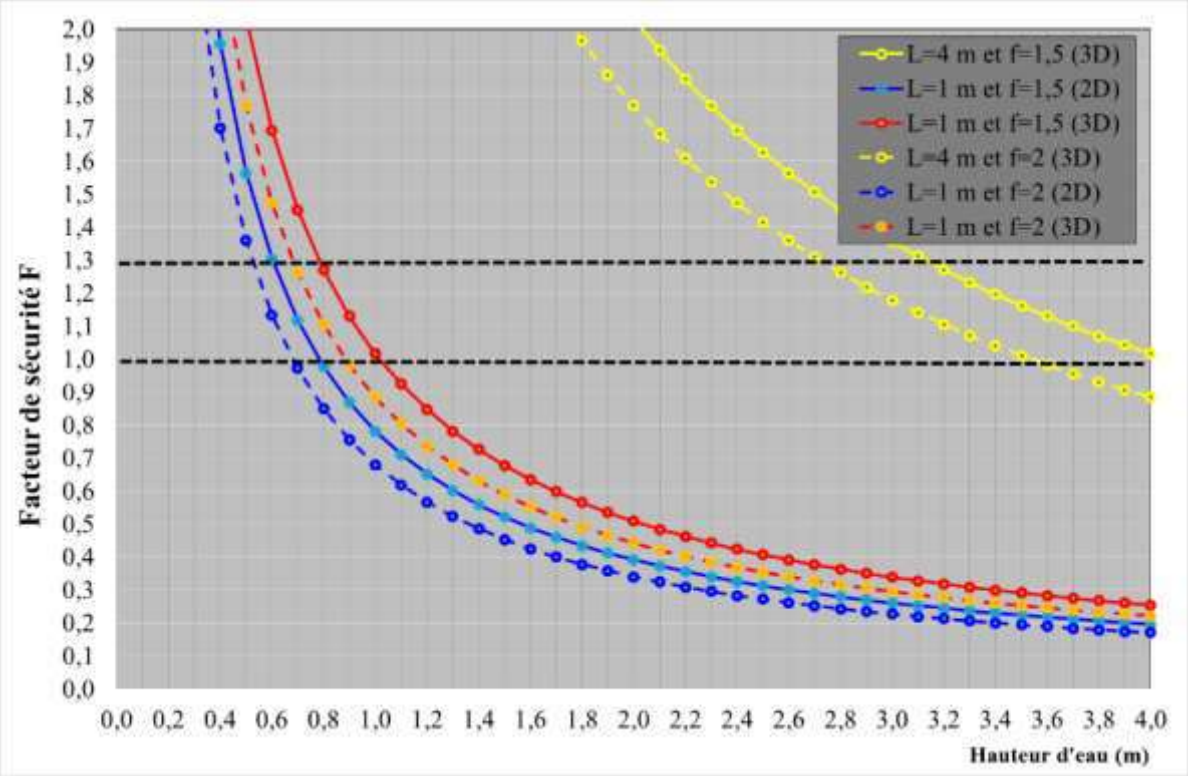


Figure 62. Facteur de sécurité *F* en fonction de la hauteur d'eau *h*

A l'instar du soulèvement hydraulique d'une couverture limoneuse sur une couche de sable, on retient la grille de probabilité suivante :

Tableau 28. Probabilité de claquage hydraulique en fonction du facteur de sécurité

Facteur F	Probabilité de claquage	Qualification verbale
0.9	0.99	Très probable
1	0.9	probable
1.1	0.5	Neutre
1.2	0.1	peu probable
1.3	0.01	Très peu probable
1.4	0.001	Quasiment impossible

Ces probabilités sont ajustées suivant une fonction de Gumbel en calant les paramètres sur les probabilités comprises entre 0,01 et 0,5. Compte tenu de la sensibilité des paramètres, la probabilité de claquage retenue dans les calculs est égale à :

$$P_{claquage} = MAX\left(\exp\left(-\exp\left(\left(\frac{F-1{,}131}{0{,}103}\right)\right)\right); 0{,}001\right)$$

Avec *F* : facteur de sécurité

Le tableau ci-après donne pour une digue avec un fruit de 2, l'évolution du facteur de sécurité et la probabilité de claquage en fonction de la hauteur de charge hydraulique pour des bouchons respectivement de 1 m qui concerne des digues non confortées depuis le XIX^{ème} siècle, qui peuvent avoir des terriers non colmatés en leur sein et de 4 m qui concerne des digues, qui ont fait l'objet d'un engraissement sans purge de terriers. Pour les nouvelles digues, on retient une probabilité quasiment impossible de claquage quelle que soit la hauteur de charge, soit 0.001.

Tableau 29. Probabilité de claquage hydraulique en fonction de la hauteur de charge

hauteur d'eau (en m)	Bouchon de 1 m		Bouchon de 4 m	
	Facteur F	Probabilité claquage	Facteur F	Probabilité claquage
0,5	1,77	0,001	7,07	-
0,6	1,47	0,001	5,89	-
0,7	1,26	0,03	5,05	-
0,8	1,11	0,46	4,42	-
0,9	0,98	0,79	3,93	-
1	0,88	0,91	3,54	-
1,5	0,59	0,99	2,36	-
2	0,44	1,00	1,77	0,001
2,5	0,35	1,00	1,41	0,001
3	0,29	1,00	1,18	0,20

4 CARACTERISATION DES RUPTURES PAR EROSION EXTERNE

4.1 RUPTURE PAR SURVERSE

4.1.1 Description du phénomène

Le mécanisme de rupture par déversement est une érosion commençant en pied aval de digue, où la vitesse d'écoulement est maximale, provoquant une échancrure régressant vers la crête de digue et se transformant en brèche, quand le phénomène dure suffisamment longtemps. La figure ci-dessous adaptée de Cemagref 2001 [X023] illustre les différentes phases depuis l'initiation jusqu'à la formation de la brèche.

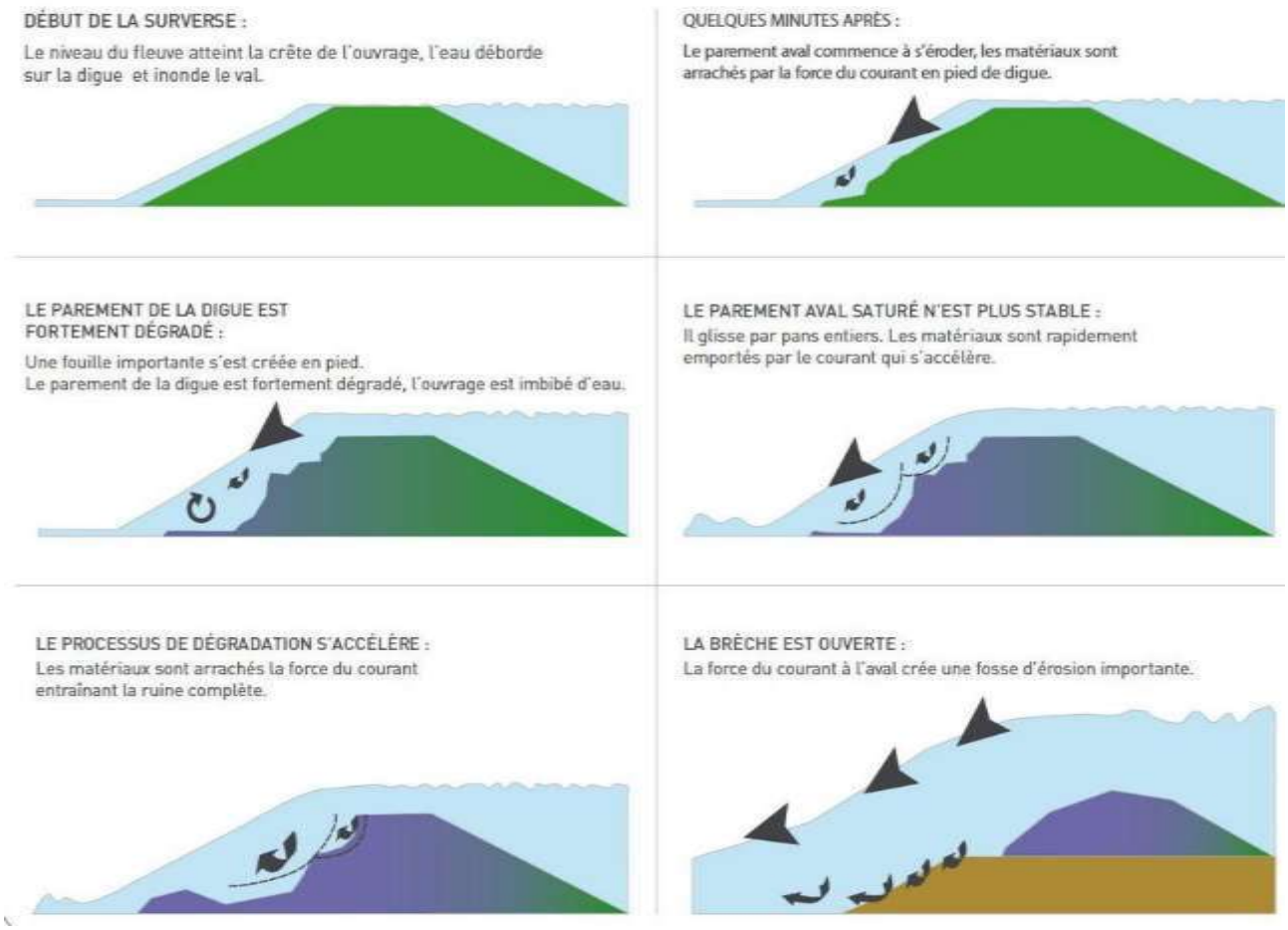


Figure 63. Erosion par surverse (Cemagref 2001 [X023])

Courivaud J.R. 2014 [X022] décrit les 3 phases du processus de rupture par surverse :

Phase 1 : initiation de la brèche. Cette phase débute lorsque l'érosion externe par surverse s'initie sur le parement aval de l'ouvrage. Elle s'achève lorsque l'érosion atteint l'arête amont de la crête de l'ouvrage. Durant cette phase d'initiation, l'ouvrage continue à retenir le volume d'eau du réservoir amont ou du bief. Sa capacité de rétention n'a donc pas encore été entamée. Cette érosion externe se produit lorsque la contrainte de cisaillement exercée par l'écoulement sur le sol du parement aval est supérieure à la contrainte critique d'érosion de ce matériau. Cette érosion se développe progressivement est formant des marches successives

sur le parement aval (cf. figure (a)). Au niveau de chaque marche, se forme une chute verticale qui va engendrer, par érosion, un approfondissement de la base de la chute. En se développant, ce phénomène conduit à la formation d'un nombre plus réduit de chutes d'une hauteur plus importante (cf. figure (b)), jusqu'à atteindre une seule chute, au niveau de l'arête amont de la crête, dont la hauteur est celle du remblai (cf. figure (c)), voire une hauteur plus importante, si la fondation est également érodée.

Phase 2 : formation de la brèche. Cette phase débute lorsque l'érosion a atteint l'arête amont de la crête (fin de la phase d'initiation, cf. Figure (c)) et s'achève lorsque l'érosion a atteint le pied de talus amont. Le remblai est alors complètement effacé sur une certaine longueur. La vidange incontrôlée du volume d'eau retenu à l'amont débute dès le début de cette phase (Cf.figure (d)).

Phase 3 : développement latéral de la brèche. Lorsque l'approfondissement de la brèche est stoppé par l'atteinte d'un horizon inérodable, le développement de la brèche peut se poursuivre par un élargissement latéral. Cette troisième phase débute lorsqu'une section de remblai est complètement effacée (fin de la phase 2 – figure (e)) et s'achève lorsque l'érosion s'arrête complètement (cf. figure (f)). Les conditions qui conduisent à un arrêt de l'érosion externe par surverse sont : l'atteinte d'un niveau d'eau équivalent entre l'amont et l'aval de la brèche ; la baisse du niveau d'eau à l'amont de l'ouvrage et donc également dans la brèche, conduisant à un écoulement qui ne peut plus éroder les parois latérales de la brèche.

Figure 64. Erosion par surverse (Courivaud 2014 [X022] d'après Hanson 2004)

4.1.2 Caractérisation du risque de rupture par surverse

La probabilité d'ouverture d'une brèche par surverse est fonction des paramètres suivants :

- La lame d'eau déversante et la durée de déversement (sollicitation),
- La constitution de la digue et la résistance du parement aval au déversement (résistance).

On procède par une analyse globale. Chaque paramètre cité précédemment est évalué dans les paragraphes qui suivent.

4.1.2.1 Constitution de la digue

Le programme de sécurisation distingue deux types de digue :

- Les digues dénommées « digue résistante à la surverse » qui disposent d'une fonction « évacuation des crues » et sont affichées comme telles vis-à-vis des pouvoirs publics. Elles sont conçues pour assurer un déversement sans rupture jusqu'au niveau de sûreté.
- Les digues dénommées « digue non renforcée au déversement ». Ces digues ne disposent pas de fonction affichée d'« évacuation des crues ». Elles sont calées (ou il est prévu de les caler) 50 cm au-dessus du niveau atteint par la crue exceptionnelle. Bien qu'elles ne soient pas conçues pour être résistantes à la surverse, ces ouvrages peuvent avoir des composants qui vont agir sur le processus d'érosion par surverse. A contrario, on peut avoir des digues pouvant avoir un niveau de vulnérabilité tel qu'on ne puisse pas garantir leur tenue à la surverse dès l'atteinte de la crête par le fleuve, du fait notamment des franchissements de l'ouvrage par des vagues. Ce fut notamment le cas de la digue de Claire Farine en 2003 (Cf. Chapitre n°6).

Dans les digues non renforcées au déversement, on peut distinguer, par ordre décroissant de vulnérabilité au risque de rupture par surverse, les types d'ouvrage suivants :

- Les digues du XIX^{ème} siècle non renforcées au déversement n'ayant pas fait l'objet de travaux de confortement depuis leur origine. Ces digues ont été compactées manuellement ou par dames de 12 à 15 kg. Le retour d'expérience (Brèche Claire Farine) a montré que ces ouvrages pouvaient être ruinés par surverse dès l'atteinte du niveau de submersion, du fait du franchissement de l'ouvrage par des vagues ;
- Les digues non renforcées au déversement ayant fait l'objet de travaux de confortement. Ces digues ne sont pas conçues pour être résistantes à la surverse. Dès l'amorce de surverse, le processus d'érosion va débuter suivant les phases décrites dans Courivaud J.R. 2014 [X022] ;
- Les rideaux de palplanches. Ces ouvrages permettent de supporter le déversement. En revanche, la fosse d'affouillement qui va se créer en pied aval plus ou moins rapidement en fonction de la nature des sols ou de la cinétique de remplissage du casier aval, peut entraîner la diminution de butée aval et le renversement du rideau ;
- Les digues avec des enrochements sur le parement aval (digue de la montagnette). Ces enrochements qui peuvent avoir une fonction « stabilité » vont, en fonction du diamètre des enrochements, freiner voire empêcher l'érosion du parement aval ;

- Les digues ou les quais disposant de perrés maçonnés ou bétonnés (en bon ou mauvais état) sur leur parement aval mais ne disposant pas de protections particulières (en dehors des enrobés ou bicouches des chaussées) permettant une bonne dissipation de l'énergie des eaux déversées ;
- Les remblais de la CNR situés sur le côté amont des ouvrages et qui vont même en cas de surverse empêcher que l'érosion régressive se poursuive jusqu'au lit mineur du fleuve.

La figure ci-après illustre les différents types d'ouvrages rencontrés dans le Delta du Rhône vis-à-vis du risque de rupture par surverse.

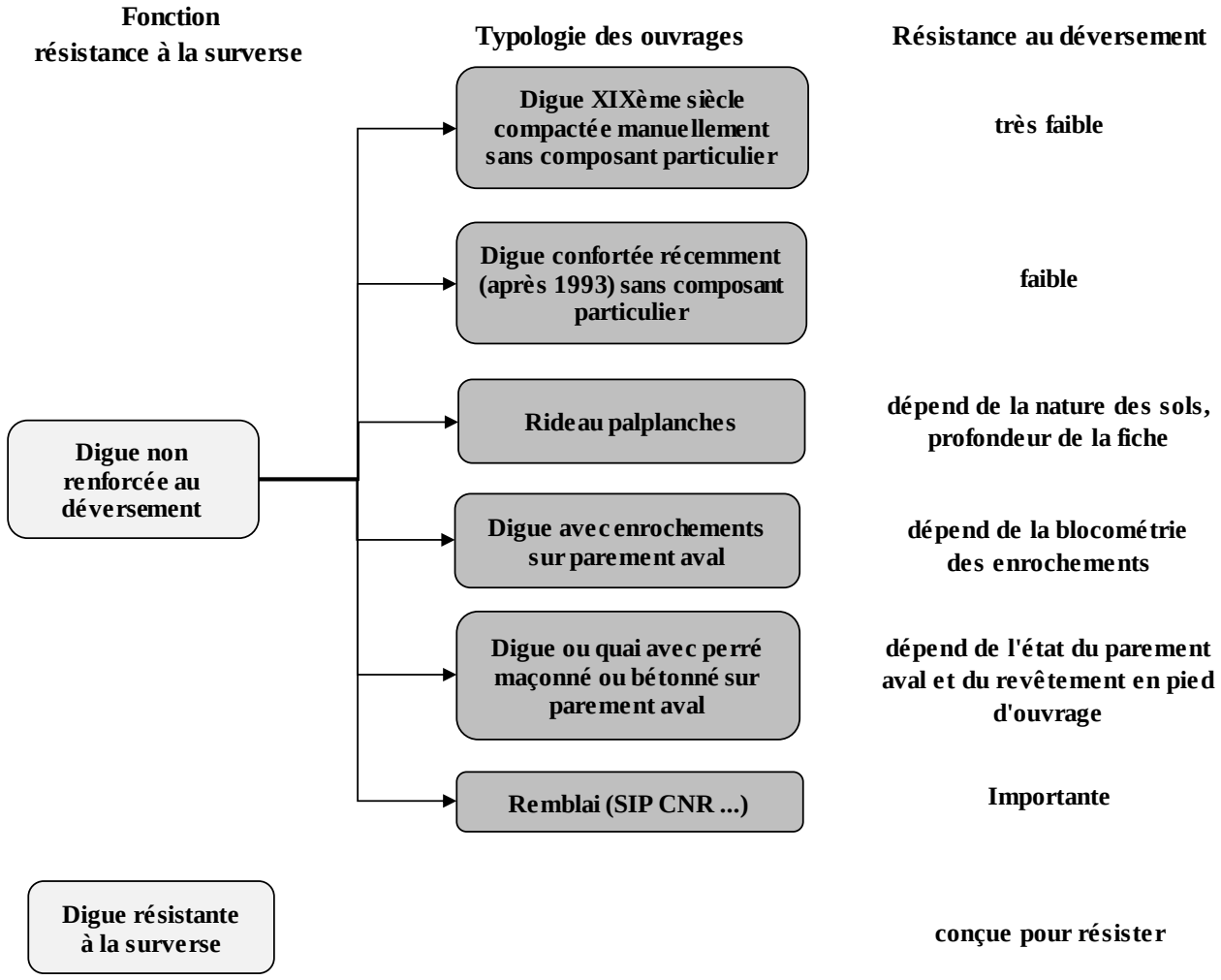


Figure 65. Fonctions et typologie des ouvrages vis-à-vis du risque de rupture par surverse

4.1.2.2 Résistance au déversement en fonction de la constitution du parement aval

Les abaques suivants, extraits de l'ILH 2012 [X015] permettent d'apprécier la résistance de la digue au déversement en fonction de la vitesse et de la durée du déversement :

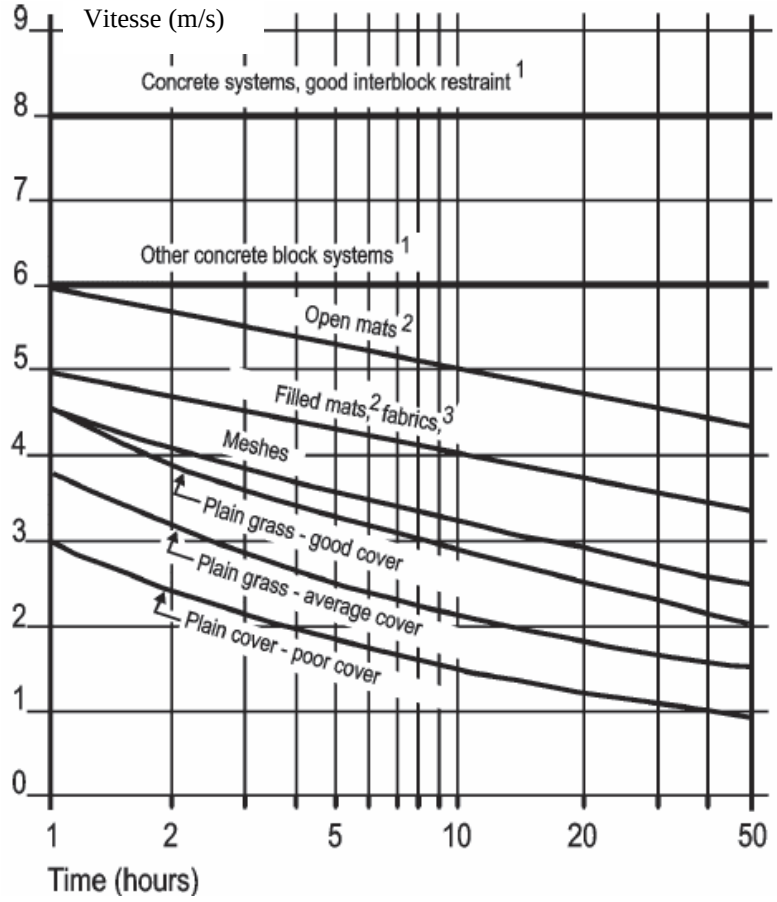


Figure 66. vitesses moyennes à ne pas dépasser sur différentes couvertures de digue pour conserver la résistance au déversement (source The International Levee Handbook 2012 d'après CIRIA [X015]

Les abaques de CIRIA et Degoutte et Al. 2012 [X024] recommandent pour les enrochements bétonnés une vitesse maximale de 8 m/s et une charge maximum de 1 m.

Les mêmes abaques donnent pour une durée de 15 heures de déversement pour un parement moyennement végétalisé une vitesse maximale de 2 m/s.

Pour les enrochements libres avec une densité de blocs $\gamma s/\gamma w = 2,6$, la formule d'Isbach donne le diamètre moyen médian d des blocs en mètres en fonction de la vitesse moyenne U (en m/s).

$d = 0,022\ U^2$ ou $d = 0,044\ U^2$ pour des conditions d'écoulement turbulent (bassin de dissipation…) (Degoutte G. & Al. 2012].

D'autres formules (Knauss et Pinto) décrites dans le rock manual [X026] permettent également d'estimer le diamètre des enrochements nécessaires en fonction de divers paramètres. Ces formules donnent des valeurs comparables à Isbach sans turbulence.

La figure ci-dessous donne pour une vitesse donnée et un talus de fruit 2, la blocométrie minimale (sans turbulence) et maximale (avec turbulence) donnée suivant la formule d'ISBACH.

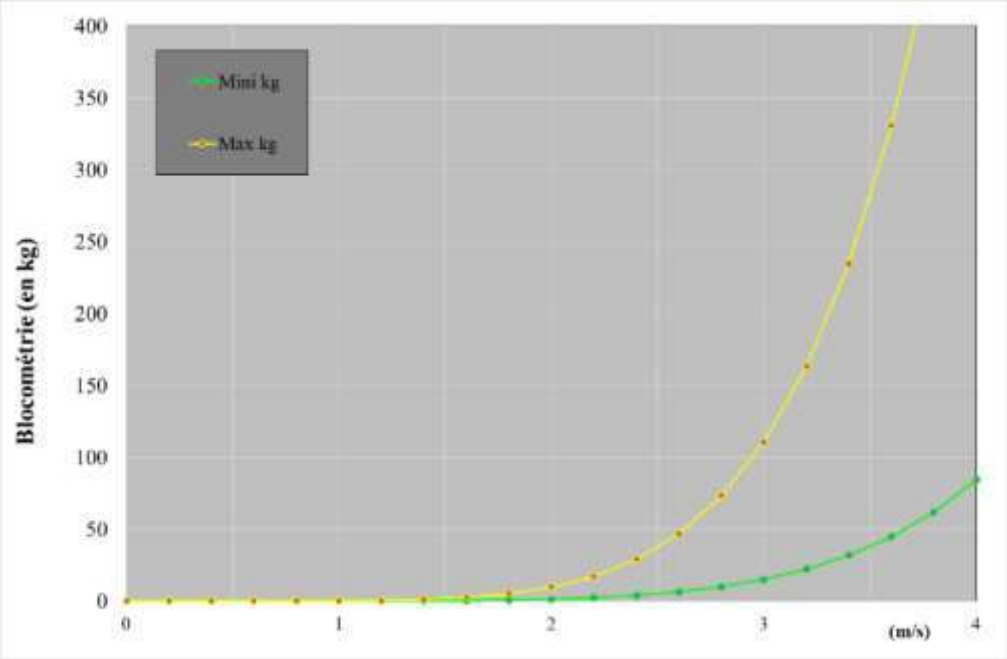


Figure 67. Blocométrie des enrochements libres calculée suivant la formule d'Isbach

Toutes ces valeurs qu'elles soient issues d'abaques ou de formules sont des valeurs de dimensionnement. Elles correspondent donc à des probabilités très faibles de rupture (P ≤ 0,01).

4.1.2.3 Durée de déversement

La durée caractéristique de surverse dans le cas des crues du Rhône est d'environ 1 journée, ainsi le paramètre temps n'est pas une variable paramétrée dans l'analyse.

4.1.2.4 Lame d'eau déversante

Les vitesses en pied de digue peuvent être calculées suivant la formule de Manning Strickler

$$V = K\, R^{2/3}\sqrt{i}$$

L'hypothèse est conservatrice puisqu'elle suppose que le régime permanent est établi en pied aval.

Avec :

K : coefficient de Strickler
i : la pente du talus aval
R : le rayon hydraulique par simplification on prend R ≈ y (hauteur d'eau en pied de digue)

La hauteur d'eau en pied de digue y est calculée par l'équation de conservation du débit :

$$y = \left(\frac{\mu h^{\frac{3}{2}} \sqrt{2g}}{K\sqrt{I}} \right)^{3/5}$$

La vitesse v (m/s) en pied de talus peut être sommairement estimée par l'équation suivante :

$$V = \left(K.\sqrt{i}\right)^{\frac{3}{5}} \left(\mu.\sqrt{2g}.h^{\frac{3}{2}}\right)^{\frac{2}{5}}$$

Avec :

μ : Coefficient du déversement (on retient 0,27 compte tenu du fait que le déversement est perpendiculaire à l'écoulement dans le lit endigué (CNR [K100])
h : lame d'eau déversante (en m)

On retient les hypothèses suivantes

Tableau 30. Paramètres considérés dans les calculs des vitesses

Typologie du parement aval	K (strickler)	I (m/m)
Digue résistante à la surverse (fruit = 2,5) Enrochements bétonnés	40	0.4
Digue en terre (fruit = 2) – parement végétal	30	0.5
Digue en terre (fruit = 2,5) – parement végétal	30	0.4
Digue avec enrochements libres	30	0.4
Digue/quai avec perré maçonné bon état	60	1
Digue/quai avec perré maçonné en mauvais état	50	1

L'évolution de la vitesse maximale en pied de digue pour différentes lames d'eau déversantes et conception de digue figurent ci-dessous :

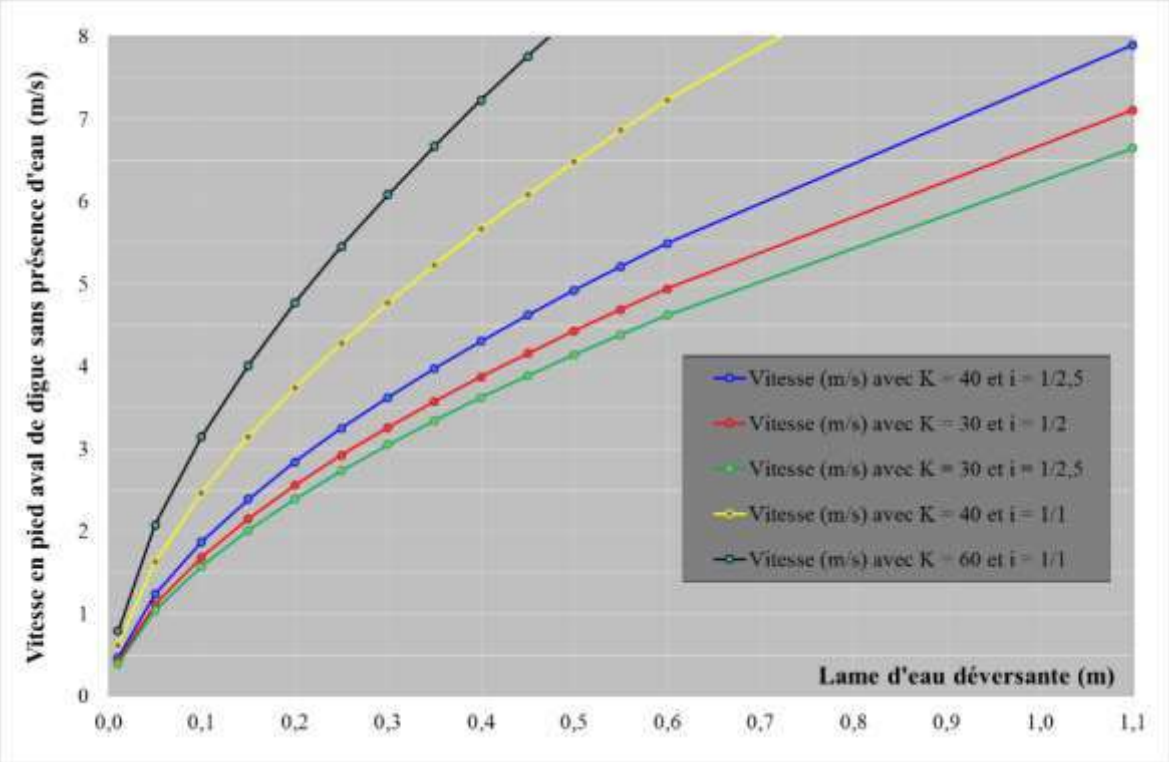


Figure 68. Vitesse en pied de digue en fonction de la lame d'eau déversante

4.1.3 Détermination de la probabilité de rupture par la surverse

Sur les digues résistantes à la surverse pour lesquelles la fonction « évacuation des crues » est assurée par un parement aval en enrochements 100/400 kg liés au béton se prolongeant en pied aval de l'ouvrage sur 5 mètres et complété d'une poutre en béton en crête de digue, la lame d'eau correspondante à la crue de sûreté est d'environ 30 cm sur Beaucaire-Arles. Pour la crue de danger de système, la lame d'eau déversante est comprise entre 40 et 50 cm, compte tenu du plafonnement de la ligne d'eau lié à l'écrêtement des déversements.

Sur le Petit Rhône, la lame d'eau pour la crue de sûreté est supérieure. Elle est de 60 cm. En revanche pour la crue de danger de système, elle évolue peu (moins de 10 cm) compte tenu également de l'importance des déversements entre Beaucaire et Arles.

Pour l'ensemble des digues résistantes à la surverse envisagées dans le programme de sécurisation, la vitesse en pied de digue (en supposant l'absence de matelas d'eau) est inférieure à 6 m/s sur le Petit Rhône et 4 m/s sur le Rhône, ce qui est très inférieur à la vitesse limite de 8 m/s ; on le rappelle valeur dimensionnante.

Compte tenu de ces éléments, on retient à dire d'expert, pour les digues résistantes à la surverse, les valeurs sécuritaires suivantes :

- Hdéversant = 0.3 m (vitesse ≅ 3,5 m/s << 8 m/s) ; Probabilité de brèche = 0,001 ;
- Hdéversant = 0.7 m (vitesse ≅ 6 m/s < 8 m/s) ; Probabilité de brèche = 0,01 ;
- Hdéversant = 1.1 m (vitesse ≅ 8 m/s) ; Probabilité de brèche = 0,1.

Pour les digues non renforcées au déversement, une valeur de 50 cm pour la revanche a été déterminée dans le cadre de l'étude de calage et retenue dans le programme de sécurisation. Elle tient en compte de trois types d'incertitudes indépendantes :

- Incertitudes liées à la modélisation, dont la précision absolue est estimée à 20 cm,
- Incertitudes liées aux caractéristiques hydrologiques et hydrauliques du système, dans une fourchette de 30 cm restants,
- Incertitudes liées à l'effet des vagues pouvant être estimées à 35 cm.

Pour les digues en terre non renforcées au déversement et sans composant particulier permettant de ralentir l'érosion, la vitesse limite de 2 m/s est atteinte pour une lame d'eau d'environ 10 cm.

Compte tenu de ces éléments et notamment des incertitudes liées à la modélisation (20 cm), aux déferlements des vagues pouvant éroder la crête aval et au retour d'expérience de la brèche de claire farine (brèche par surverse), on retient pour les digues en terre du XIX^{ème} siècle damées manuellement, les valeurs à dire d'experts suivantes :

- Revanche de 100 cm - probabilité de brèche = 0,001 ;
- Revanche de 50 cm - probabilité de brèche = 0,01 ;
- Revanche de 30 cm - probabilité de brèche = 0,1 ;
- Revanche de 10 cm - probabilité de brèche = 0,5 ;
- Absence de revanche - probabilité de brèche = 0,9.

Pour les digues en terre récemment confortée, on retient les valeurs (sécuritaires) suivantes :

- Revanche de 50 cm - probabilité de brèche = 0,001 ;
- Revanche de 30 cm - probabilité de brèche = 0,01 ;
- Revanche de 20 cm - probabilité de brèche = 0,1 ;
- Absence de revanche - probabilité de brèche = 0,5 ;
- Lame d'eau déversante de 10 cm ; probabilité de brèche = 0,9.

Pour une digue avec des blocs 10/100 kg sur le parement aval, la vitesse retenue pour le dimensionnement des blocs est de 3 m/s (h = 25 cm). On retient pour ce type de digue les valeurs sécuritaires suivantes :

- Hdéversant = 0 m ; Probabilité de brèche = 0,001 (incertitudes vagues et modèle) ;
- Hdéversant = 0.2 m (vitesse ≅ 2,5 m/s < 3 m/s) ; Probabilité de brèche = 0,01 ;
- Hdéversant = 0.3 m (vitesse < 3,5 m/s) ; Probabilité de brèche = 0,1.

Pour une digue avec du matériau de carrière type 0/200 mm (soit 4/30 kg) sur le parement aval, la vitesse retenue pour le dimensionnement des blocs est de 2,5 m/s (h=20 cm). On retient pour ce type de digue les valeurs sécuritaires suivantes :

- Hdéversant = 0 m ; Probabilité de brèche = 0,01 (incertitudes vagues et modèle) ;
- Hdéversant = 0.1 m (vitesse ≅ 2 m/s < 2,5 m :s) ; Probabilité de brèche = 0,1 ;
- Hdéversant = 0.2 m (vitesse ≅ 2,5 m/s) ; Probabilité de brèche = 0,5.

Pour un rideau de palplanches (Fibre Excellence), on retient des valeurs (sécuritaires) identiques.

Pour une digue ou un quai maçonné avec un parement aval en bon état (K=60 et i=1) et une chaussée en enrobés ou en bicouche en pied aval, on estime que la vitesse limite est de 5 m/s, qui est atteinte pour une lame d'eau déversante de 20 cm.
Pour une digue ou un quai maçonné avec un parement aval en mauvais état (K=40 et i=1) et une chaussée en enrobés ou en bicouche en pied, on estime que la vitesse limite est de 3,5 m/s, qui est atteinte pour une lame d'eau déversante légèrement inférieure à 20 cm.
On retient pour ce type de digue les valeurs sécuritaires suivantes :

- Hdéversant = 0 m ; Probabilité de brèche = 0,001 ;
- Hdéversant = 0.2 m (vitesse 5 m/s (parement lisse) et 3,5 m/s (parement rugueux) ; Probabilité de brèche = 0,1.

Pour un remblai comme les remblais de la CNR, on retient les valeurs sécuritaires suivantes :

- Hdéversant = 0.3 m ; Probabilité de brèche = 0,001 ;
- Hdéversant = 0.5 m ; Probabilité de brèche = 0,01 ;
- Hdéversant = 0.7 m ; Probabilité de brèche = 0,1 ;
- Hdéversant = 1.1 m ; Probabilité de brèche = 0,5.

Le tableau ci-après reprend et complète les probabilités de brèche par surverse précitées, déterminées à dire d'experts. Ces probabilités intègrent également l'érosion liée au déferlement des vagues, les incertitudes du modèle hydraulique et les incertitudes hydrauliques et hydrologiques.

Tableau 31. Probabilité de brèche par surverse en fonction de la lame d'eau déversante H et type de couverture du parement aval

Lame déversante H (m)	Digue résistante à la surverse	Typologie du parement aval digue non renforcée au déversement						
		en terre XIX^{ème}	en terre confortée	Rideau de palplanches	Matériaux carrière	Blocs 10/100 kg	Perré quai	Remblai (SIP)
H = - 1 m		0.001						
H = - 0.50 m		0.01	0.001					
H = - 0.30 m		0.1	0.01					
H = - 0.20 m			0.1					
H = - 0.10 m		0.5		0.001	0.001			
H = 0 m		0.9	0.5	0.01	0.01	0.001	0.001	
H = 0.1 m			0.9	0.1	0.1		0.01	
H = 0.2 m				0.5	0.5	0.01	0.1	
H = 0.3 m	0.001			0.9	0.9	0.1	0.5	0.001
H = 0.4 m						0.5	0.9	
H = 0.5 m						0.9		0.01
H = 0.7 m	0.01							0.1
H = 1.1 m	0.1							0.5
H=1.5 m	0.5							

Ces probabilités sont ajustées par typologie d'ouvrage suivant une fonction de Gumbel en calant les paramètres sur les probabilités comprises entre 0.01 et 0.5 sans pouvoir être inférieures à 10^{-6}.

$$P_{rupture\ par\ surverse\ (résistant\ à\ la\ surverse)} = MAX\left(10^{-6}; \exp\left(-\exp\left(-\left(\frac{H-1{,}4}{0{,}5}\right)\right)\right)\right)$$

$$P_{rupture\ par\ surverse\ (digue\ en\ terre\ damée\ manuellement)} = MAX\left(10^{-6}; \exp\left(-exp\left(-\left(\frac{H+0{,}163}{0{,}206}\right)\right)\right)\right)$$

$$P_{rupture\ par\ surverse\ (digue\ en\ terre\ confortée\ récemment)} = MAX\left(10^{-6}; \exp\left(-exp\left(-\left(\frac{H+0{,}034}{0{,}150}\right)\right)\right)\right)$$

$$P_{rupture\ par\ surverse\ (digue\ avec\ matériaux\ de\ carrière\ sur\ talus\ aval\ ou\ palplanches)} = MAX\left(10^{-6}; \exp\left(-exp\left(-\left(\frac{H-0{,}169}{0{,}103}\right)\right)\right)\right)$$

$$P_{rupture\ par\ surverse\ (digue\ avec\ blocs\frac{10}{100}kg\ sur\ talus\ aval)} = MAX\left(10^{-6}; \exp\left(-exp\left(-\left(\frac{H-0{,}369}{0{,}103}\right)\right)\right)\right)$$

$$P_{rupture\ par\ surverse\ (perré\ maçonné)} = MAX\left(10^{-6}; \exp\left(-exp\left(-\left(\frac{H-0{,}269}{0{,}103}\right)\right)\right)\right)$$

$$P_{rupture\ par\ surverse\ (remblai)} = MAX\left(10^{-6}; \exp\left(-exp\left(-\left(\frac{H-0{,}982}{0{,}338}\right)\right)\right)\right)$$

Avec *H* : lame d'eau déversante (en m) ; les valeurs négatives correspondent à la valeur de la revanche par rapport à la crête d'ouvrage.

La figure ci-après illustre les probabilités de rupture par surverse associées à chaque type d'ouvrage au regard de la fonction « évacuation des crues »

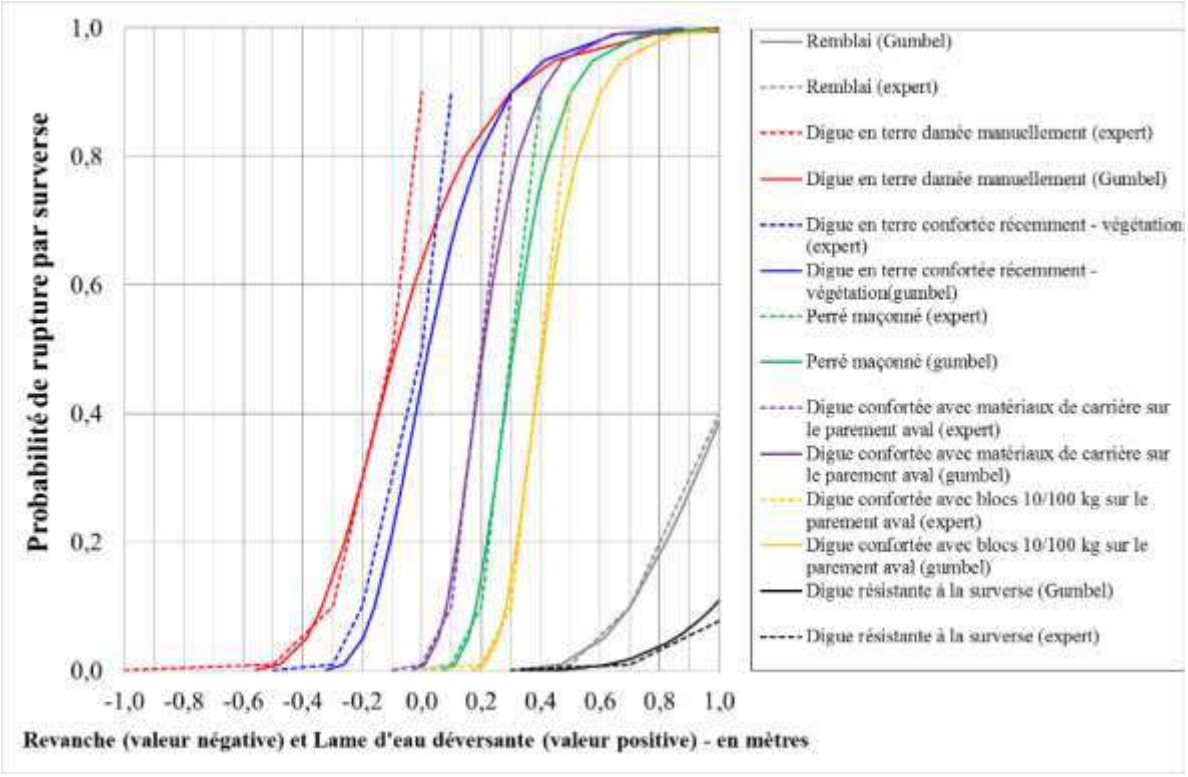


Figure 69. Probabilités de rupture par surverse associées à chaque type d'ouvrage

4.2 RUPTURE PAR AFFOUILLEMENT DU PIED AMONT

4.2.1 Description du phénomène

L'affouillement correspond à l'érosion externe du pied de berge, puis à l'érosion externe du corps de digue si celle-ci est proche de la berge. C'est la vitesse importante de l'eau (aggravée éventuellement par la fragilité des berges, l'absence de protection ou d'ancrage des berges) qui provoque l'érosion en pied. Il en résulte un raidissement de la pente locale qui, associé à l'affaiblissement des caractéristiques mécaniques (du fait de la saturation des matériaux), entraine alors des glissements favorisant à leur tour les perturbations hydrauliques (tourbillons) et les érosions.
Par glissements successifs du talus côté fleuve de la digue et/ou de la berge, le mécanisme peut entraîner l'ouverture d'une brèche dans le corps de digue. La figure ci-dessous adaptée de Cemagref 2001 [X 023] illustre les différentes phases de dégradation de l'ouvrage

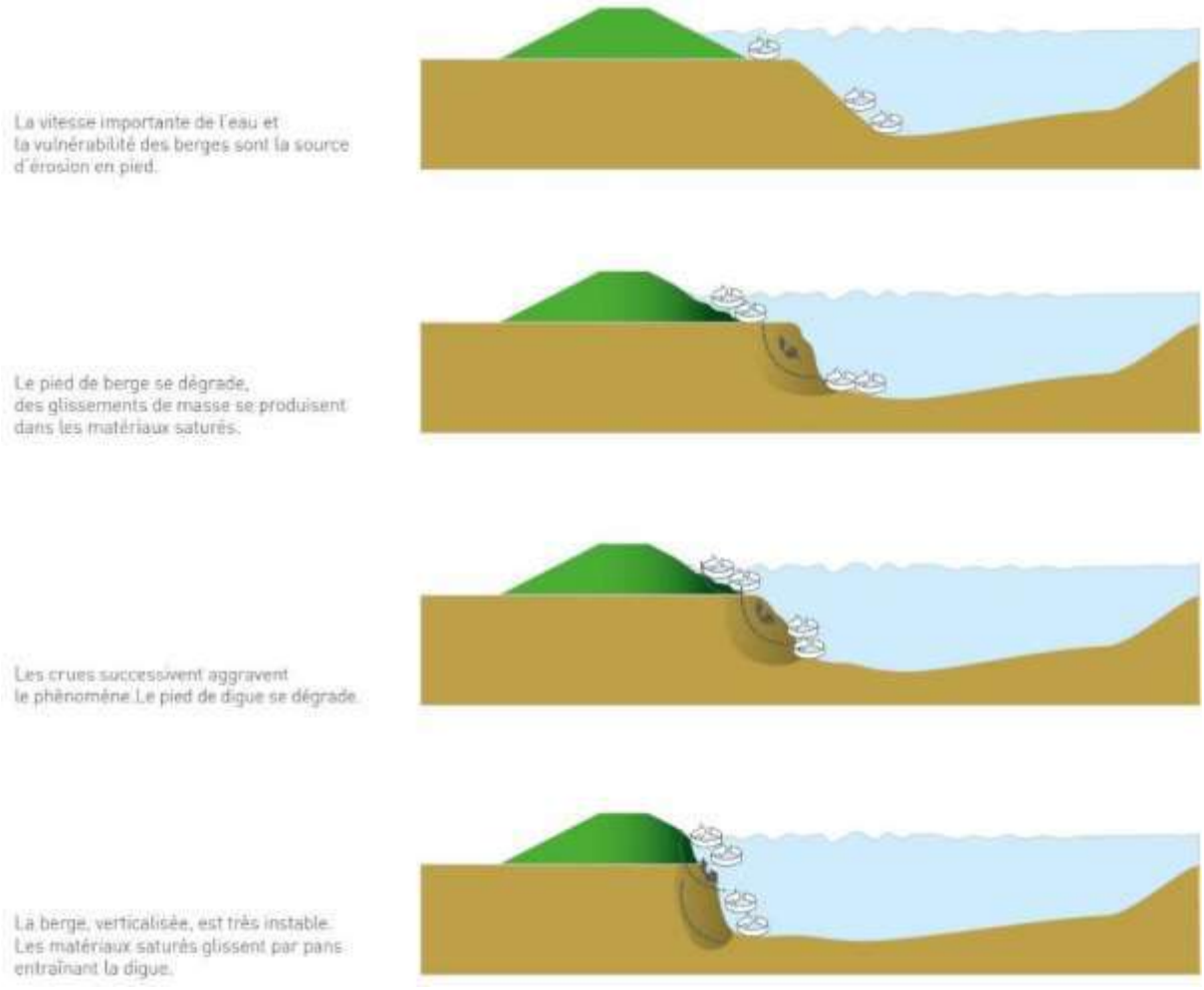


Figure 70. Le mécanisme d'affouillement (Cemagref 2001 [X023])

4.2.2 Paramètres déterminant le risque d'affouillement externe

Les facteurs de sensibilité au mécanisme d'affouillement sont des trois ordres (Cemagref 2001 [X023]) :

- La vitesse moyenne de l'eau le long du talus de digue, qui est liée à la distance de la digue par rapport au lit mineur ou de la berge. De ce point de vue, les digues en bord immédiat du lit mineur (et surplombant directement la berge) sont particulièrement exposées, ainsi que les digues situées dans des zones de rétrécissement du lit majeur ;
- Les perturbations hydrauliques locales pouvant entraîner des courants et tourbillons avec des vitesses locales plus élevées que la vitesse moyenne du tronçon. Ainsi des arbres, des piles ou toute construction sur le talus coté fleuve des digues sont la source de telles discontinuités hydrauliques. Il en va de même pour des courbes prononcées dans l'axe de la digue ;
- La nature et l'état de la protection du talus de la digue côté fleuve : un perré en bon état est réputé pouvoir résister à une vitesse moyenne de 4m/s, alors qu'un talus simplement enherbé ne supportera pas des vitesses dépassant 1.5 m/s. Le changement de nature de la protection (passage d'une zone de perré à une zone enherbée) constitue aussi un fort facteur de fragilité.

Ces facteurs aggravant ou diminuant le risque d'affouillement externe sont illustrés ci-dessous :

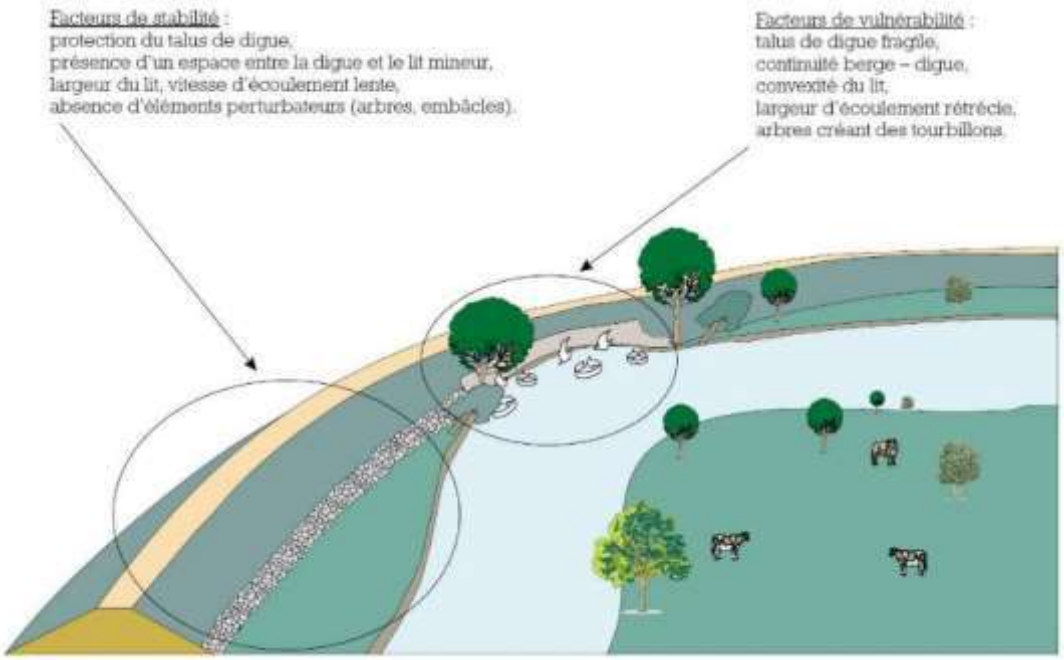


Figure 71. Facteurs aggravant et diminuant le risque d'affouillement externe (Cemagref 2001 [X023])

Ce type d'affouillement est observé assez fréquemment le long des berges pour des petites crues.

Figure 72. Affouillement externe au droit du Mas Marignan (2011) et en aval du Pont de Saint Gilles (2016)

4.2.3 Caractérisation du mécanisme d'affouillement

L'initiation du mécanisme de dégradation des berges supportant les digues est estimée à partir de la force tractrice ou force d'arrachement s'exerçant sur le fond du lit. Elle s'exprime pour les cours d'eau de largeur importante suivant l'équation ci-dessous (Degoutte 2012 [X028]) :

$$\tau = \gamma_w.h.i.$$

Avec :

τ : force tractrice (N/m² ou Pa)

γ_w : poids unitaires de l'eau (9,8 kN/m^3)

i : pente hydraulique d'écoulement

h : hauteur d'eau en m au droit de la berge (niveau d'eau – bathymétrie de pied de berge)

La force tractrice est plus grande dans la courbe externe d'un méandre que dans la courbe interne. Il est donc appliqué dans les extrados un coefficient multiplicateur de 1,7 (Lachat. 1992 [X027])

Pour le calcul de la force tractrice s'exerçant sur les berges, un coefficient pondérateur applicable aux matériaux pulvérulents devrait être appliqué. Compte tenu du caractère cohérent des matériaux constituant la berge et par sécurité, il n'est pas appliqué dans la suite de l'évaluation.

Les tableaux ci-dessous indiquent les pentes hydrauliques d'écoulement le long du Rhône, du Petit Rhône et du Grand Rhône suivant les PR digues et l'occurrence des crues.

Tableau 32. Pente hydraulique le long du Rhône et Petit Rhône

PK Rhône/ Petit Rhône	scénario 7 200 Q = 7 200 m3/s T = 5 ans		scénario 8 500 Q = 8 500 m3/s T = 10 ans		scénario 9 500 Q = 9 500 m3/s T = 25/30 ans		scénario 10500 Q = 10 500 m3/s T = 50 ans		scénario 2003 sans brèche Q = 11 500 m3/s T = 100 ans		scénario 1856 sans brèche Q = 12 500 m3/s T = 250 ans		scénario exceptionnel Q = 14 160 m3/s T = 1000 ans	
	Cote (m NGF)	Pente hydraulique (m/km)	Cote (m NGF)	Pente hydraulique (m/km)	Cote (m NGF)	Pente hydraulique (m/km)	Cote (m NGF)	Pente hydraulique (m/km)	Cote (m NGF)	Pente hydraulique (m/km)	Cote (m NGF)	Pente hydraulique (m/km)	Cote (m NGF)	Pente hydraulique (m/km)
272	8,30	0,28	9,20	0,27	9,63	0,25	10,00	0,24	10,59	0,23	10,91	0,22	11,09	0,22
277,3	6,80	0,32	7,78	0,38	8,31	0,35	8,73	0,34	9,39	0,34	9,73	0,34	9,90	0,34
279	6,25	0,08	7,13	0,07	7,73	0,10	8,15	0,13	8,81	0,17	9,15	0,19	9,32	0,21
281	6,10	0,06	6,98	0,07	7,45	0,08	7,80	0,07	8,37	0,08	8,62	0,09	8,77	0,09
288	5,65	0,08	6,49	0,09	6,91	0,09	7,28	0,10	7,80	0,12	8,00	0,12	8,14	0,13
294,5	5,15	0,10	5,92	0,10	6,31	0,11	6,64	0,12	7,04	0,16	7,19	0,20	7,29	0,21
297	4,90	0,08	5,67	0,09	6,04	0,10	6,34	0,11	6,65	0,12	6,70	0,12	6,75	0,13
305,5	4,20	0,13	4,88	0,16	5,17	0,17	5,42	0,18	5,61	0,20	5,64	0,20	5,65	0,20
308,5	3,80	0,08	4,41	0,09	4,67	0,10	4,87	0,11	5,02	0,11	5,04	0,12	5,05	0,12
314,5	3,35	0,18	3,87	0,27	4,07	0,31	4,23	0,34	4,34	0,32	4,35	0,32	4,36	0,33
316,5	3,00	0,13	3,33	0,16	3,45	0,16	3,55	0,17	3,70	0,19	3,70	0,19	3,70	0,19
321	2,40	0,15	2,60	0,15	2,75	0,11	2,80	0,10	2,85	0,12	2,85	0,12	2,85	0,12
323	2,10	0,13	2,30	0,18	2,53	0,24	2,60	0,28	2,62	0,24	2,62	0,24	2,62	0,24
325	1,85	0,10	1,95	0,12	2,05	0,13	2,05	0,13	2,15	0,13	2,15	0,12	2,15	0,11
330	1,35	0,11	1,35	0,08	1,40	0,07	1,42	0,07	1,50	0,08	1,55	0,04	1,60	0,01
337	0,60		0,80		0,94		0,94		0,94		1,30		1,50	

Tableau 33. Pente hydraulique le long du Grand Rhône

PK Grand Rhône	scénario 7 200 Q = 7 200 m3/s T = 5 ans		scénario 8 500 Q = 8 500 m3/s T = 10 ans		scénario 9 500 Q = 9 500 m3/s T = 25/30 ans		scénario 10500 Q = 10 500 m3/s T = 50 ans		scénario 2003 sans brèche Q = 11 500 m3/s T = 100 ans		scénario 1856 sans brèche Q = 12 500 m3/s T = 250 ans		scénario exceptionnel Q = 14 160 m3/s T = 1000 ans	
	Cote (m NGF)	Pente hydraulique (m/km)	Cote (m NGF)	Pente hydraulique (m/km)	Cote (m NGF)	Pente hydraulique (m/km)	Cote (m NGF)	Cote (m NGF)	Pente hydraulique (m/km)	Cote (m NGF)	Pente hydraulique (m/km)	Cote (m NGF)	Pente hydraulique (m/km)	Cote (m NGF)
281,5	5,75	0,47	6,65	0,57	7,10	0,63	7,50	0,67	8,10	0,73	8,35	0,73	8,50	0,77
283	5,05	0,05	5,80	0,02	6,15	0,00	6,50	0,00	7,00	0,00	7,25	0,00	7,35	0,00
285	4,95	0,10	5,75	0,11	6,15	0,11	6,50	0,11	7,00	0,11	7,25	0,11	7,35	0,11
288,5	4,6	0,17	5,35	0,23	5,75	0,27	6,10	0,27	6,60	0,30	6,85	0,33	6,95	0,33
290	4,35	0,07	5,00	0,05	5,35	0,07	5,70	0,08	6,15	0,08	6,35	0,05	6,45	0,05
292	4,2	0,19	4,90	0,20	5,20	0,20	5,55	0,21	6,00	0,21	6,25	0,23	6,35	0,23
295,5	3,55	0,09	4,2	0,10	4,5	0,12	4,8	0,11	5,25	0,13	5,45	0,13	5,55	0,13
303,5	2,85	0,04	3,4	0,06	3,55	0,06	3,9	0,07	4,25	0,07	4,4	0,07	4,5	0,07
308,5	2,65	0,07	3,1	0,09	3,25	0,10	3,55	0,10	3,9	0,11	4,05	0,12	4,15	0,13
315	2,2	0,25	2,5	0,30	2,6	0,20	2,9	0,20	3,18	0,28	3,3	0,25	3,3	0,25
316	1,95	0,05	2,2	0,05	2,4	0,08	2,7	0,07	2,9	0,07	3,05	0,08	3,05	0,07
319	1,8	0,11	2,05	0,15	2,15	0,14	2,5	0,15	2,7	0,18	2,8	0,18	2,85	0,18
323	1,38		1,45		1,6		1,9		2		2,1		2,15	

La pente hydraulique d'écoulement varie, suivant les tronçons et l'intensité des crues, dans la gamme 8 à 38 cm/km pour le Rhône ; dans la gamme 1 à 35 cm/km pour le Petit Rhône et dans la gamme 0 à 33 cm/km pour le Grand Rhône en aval du centre ville ; en traversée d'Arles, la pente hydraulique du Grand Rhône atteint 77 cm/km.

La figure ci-dessous indique les forces tractrices s'exerçant sur le fond du lit et sur les berges en fonction de la pente hydraulique et de la hauteur d'eau. Elles vont de quelques Pa à une centaine de Pa.

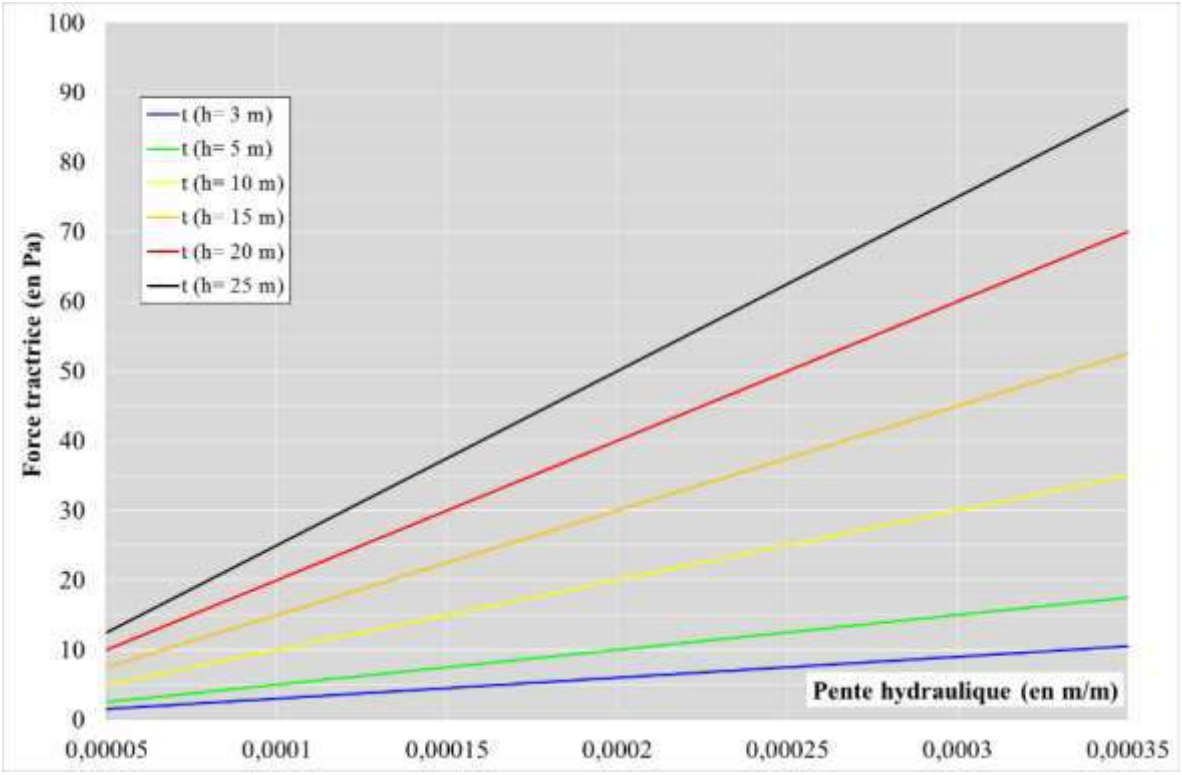


Figure 73. Force tractrice sur un cours d'eau rectiligne

Pour des digues éloignées du fleuve, où la hauteur à prendre en compte est la différence entre le niveau du fleuve et le terrain naturel du ségonnal, on constate que la contrainte est toujours inférieure à 20 Pa quelle que soit la pente hydraulique.

Une campagne d'essais JET permettant de mesurer la résistance des matériaux à l'érosion externe a été réalisée sur les digues du Petit Rhône. La figure ci-dessous illustre les résultats de cette campagne à la fois en termes de contrainte critique et de cinétique d'érosion.

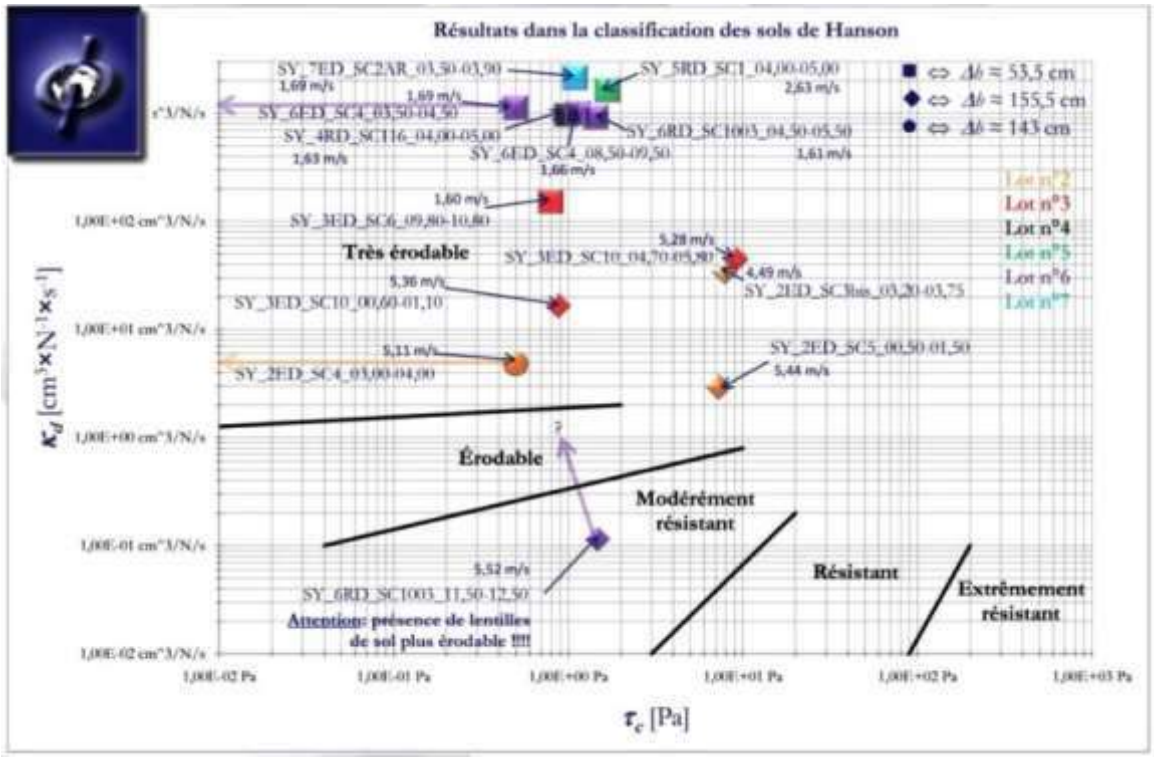


Figure 74. Résultats des essais JET effectués sur les digues du Petit Rhône

Les contraintes critiques de la majeure partie des matériaux testés sont de l'ordre de 1 Pa, voire inférieures à 1 Pa avec un maximum de 10 Pa. Ces valeurs sont très faibles et signifient que sur un matériau nu sans revêtement, l'érosion externe peut être initiée même avec de faibles pentes d'écoulement et/ou faibles hauteurs d'eau.

La cinétique d'érosion, caractérisée quant à elle par le K_d est comprise entre 3 et 2000 $cm^3/N/s$, soit entre 0,0108 et 7,2 $m^3/N/h$.

La résistance à l'érosion, constatée lors du REX des crues de 1993 à 2003, s'explique donc pas d'autres facteurs qui sont :

- La présence de la végétation,
- La présence de protection en enrochements libres ou perrés datant du siècle dernier figurant sur la carte historique des ponts et chaussées de 1876 et parfois visibles en période d'étiage,
- La présence de panneaux de fond (sur le Petit Rhône de la diffluence jusqu'à l'écluse de Saint-Gilles).

Lachat 1992 [X027] donne dans son guide sur les protections en génie végétal quelques valeurs de résistance reproduites ci-dessous :

Tableau 34. Force tractrice critique en fct du revêtement (source LACHAT [X027])

Type de protection	Force tractrice critique (Pa)
Herbacées (bien adaptées)	50
Herbacées, graminées (bien adaptées)	80
Saules (jeunes)	100
Saules	140
Fascines en branches de saules	250
Couche de branches de saules	300
Enrochements et végétaux	350

Compte tenu du fait que les protections en enrochements libres réalisées au XIX^{ème} siècle ne comportent pas de sabot en pied et de la tendance depuis les aménagements du XIX^{ème} siècle à l'enfoncement du lit, on considère que ces protections jouent un rôle moindre par rapport aux protections en enrochements libres réalisées récemment avec un sabot en pied. On note également que ces forces tractrices critiques sont des valeurs de dimensionnement. On estime donc qu'elles correspondent à des probabilités très faibles de rupture. On retient les probabilités d'initiation suivantes suivant la nature des revêtements :

Tableau 35. Probabilité d'affouillement externe en fonction du revêtement et de la force tractrice

Revêtement des berges	Force tractrice critique (Pa)	Force tractrice sur la berge (Pa)	Probabilité d'affouillement externe	Qualification verbale
Herbacées	50	40	0,001	Quasiment impossible
		50	0,01	Très faible
		60	0,1	Faible
		70	0,5	neutre
Arbres	150	120	0,001	Quasiment impossible
		150	0,01	Très faible
		180	0,1	Faible
		210	0,5	neutre
Panneaux de fonds	200	160	0,001	Quasiment impossible
		200	0,01	Très faible
		240	0,1	Faible
		280	0,5	neutre
Enrochements anciens	350	200	0,001	Quasiment impossible
		250	0,01	Très faible
		300	0,1	Faible
		350	0,5	neutre
Enrochements avec sabot	350	280	0,001	Quasiment impossible
		350	0,01	Très faible
		420	0,1	Faible
		490	0,5	neutre
Fondations rocheuses ou palplanches			0,001	Quasiment impossible

Ces probabilités sont ajustées par typologie de protection de berges suivant une fonction de Gumbel en calant les paramètres sur les probabilités comprises entre 0.001 et 0.5. Ces probabilités sont bornées à 10^{-6}.

$$P_{affouillement\ (herbacés)} = MAX\left(\exp\left(-\exp\left(-\left(\frac{\tau-67}{12{,}5}\right)\right)\right); 10^{-6}\right)$$

$$P_{affouillement\ (arbres)} = MAX\left(\exp\left(-\exp\left(-\left(\frac{\tau-202}{37{,}4}\right)\right)\right); 10^{-6}\right)$$

$$P_{affouillement\ (panneaux\ de\ fonds)} = MAX\left(\exp\left(-\exp\left(-\left(\frac{\tau-269}{50}\right)\right)\right); 10^{-6}\right)$$

$$P_{affouillement\ (enrochements\ anciens)} = MAX\left(\exp\left(-\exp\left(-\left(\frac{\tau-336}{62{,}4}\right)\right)\right); 10^{-6}\right)$$

$$P_{affouillement\ (enrochements\ avec\ sabot)} = MAX\left(\exp\left(-\exp\left(-\left(\frac{\tau - 471}{87{,}4}\right)\right)\right); 10^{-6}\right)$$

Avec τ : contraintes de cisaillement sur la berge

La figure ci-après illustre les probabilités d'affouillement de berge par type de protection.

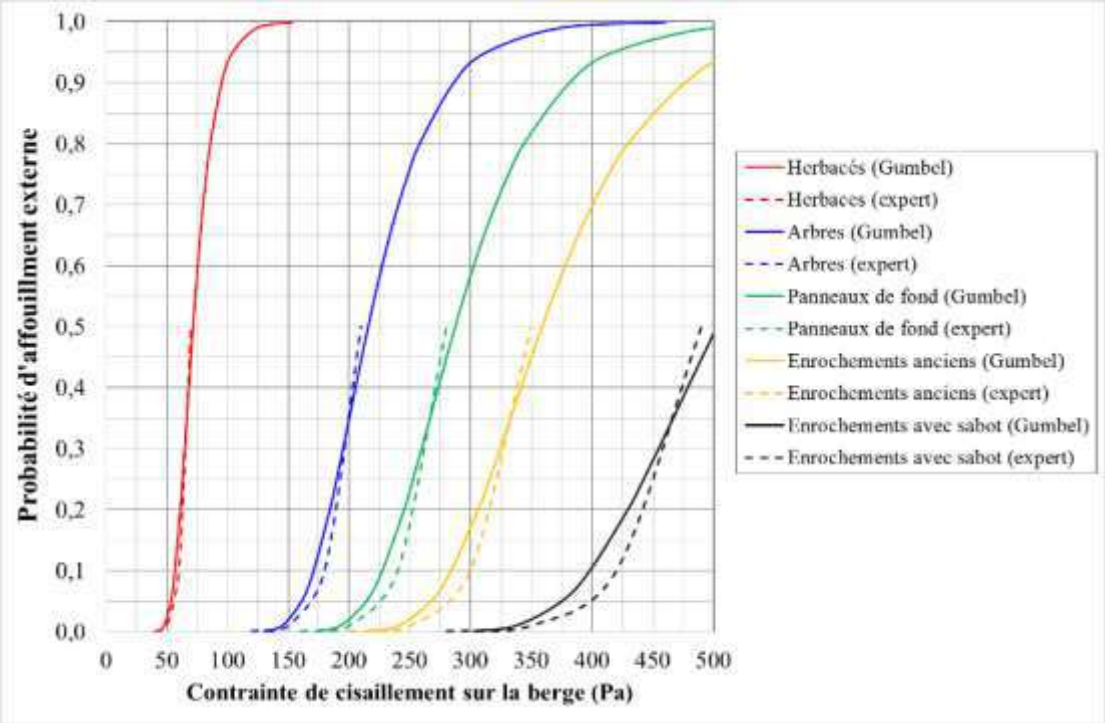


Figure 75. Probabilités d'affouillement externe par type de protection de berges

4.2.4 Caractérisation de la vitesse d'érosion

A l'instar de la vitesse d'élargissement de brèche, la vitesse d'érosion de la berge peut s'exprimer par l'équation suivante :

$$\frac{dW}{dt} = k_d.(\tau - \tau_c)$$

Avec :

W : largeur de digue ou de ségonnal érodé (en m)
k_d : cinétique d'érosion de Hanson en $cm^3/N/s$
τ : contrainte de cisaillement sur la berge (Pa ou N/m^2)

Comme indiqué plus haut, les contraintes maximales, pouvant s'exercer sur la berge, vont dépendre de la bathymétrie en pied de berge et du niveau de crue, de la position de la berge par rapport au courant (extrado, ligne droite) de la pente d'écoulement.

En retenant une pente d'écoulement de 0,00035 m/m et une hauteur d'eau de 20 mètres applicable à la berge, on obtient une contrainte sur la berge de 70 Pa en ligne droite et 120 Pa

en extrados. Avec ces contraintes, l'affouillement est possible uniquement sur des berges nues et revêtues d'herbes en ligne droite et sur des berges protégées par des arbres dans les coudes. En supposant une cinétique d'érosion de 16 $cm^3/N/s$ qui est la cinétique d'érosion estimée pendant l'élargissement de la brèche de Claire Farine, on estime sur un talus enherbé d'une digue la vitesse d'érosion à environ 1 m/h en ligne droite et 4 m/h en extrados.

En supposant que la détection va être possible dès l'atteinte du pied de digue et que cette dernière tienne jusqu'à la moitié du talus, on estime une durée très pessimiste entre la détection et la brèche de 10 heures en ligne droite et de 3 heures en extrados.

4.3 RUPTURE PAR BATILLAGE

On considère les vagues liées au vent, aux entrées maritimes et à la navigation. Les différents modes de rupture provoqués par le batillage sont illustrés dans la figure ci-après.

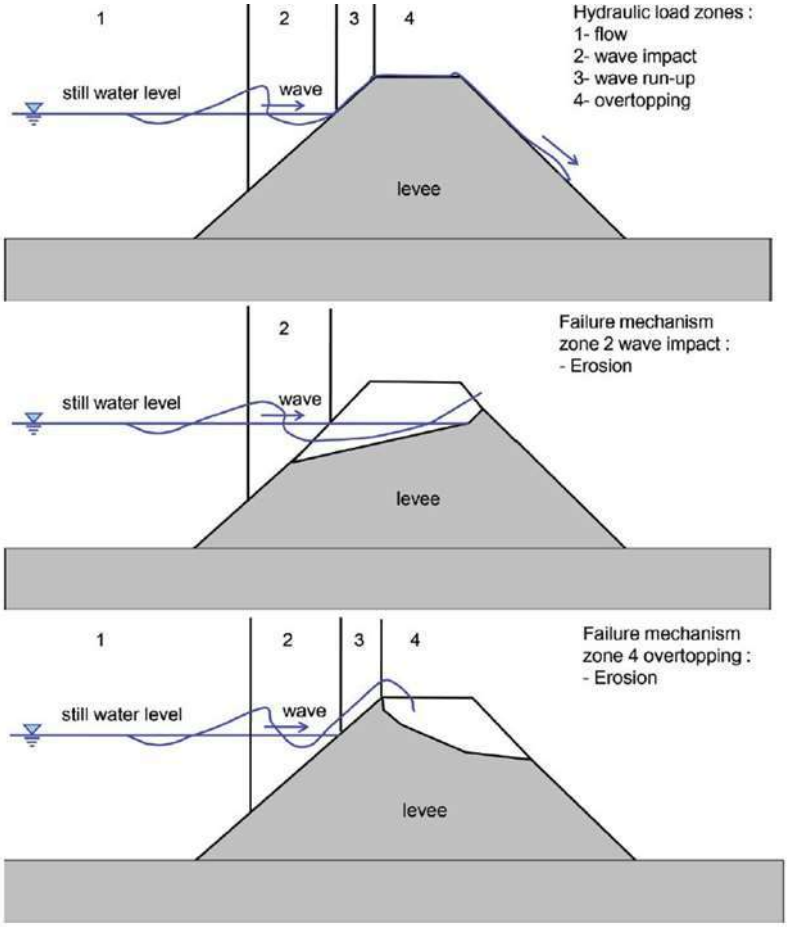


Figure 76. Différents modes de rupture liés au batillage (source ILH [X015])

La résistance d'une digue avec un parement végétalisé en fonction de la hauteur spécifique des vagues peut être évaluée par les abaques suivants. Ces derniers considèrent des parements végétalisés avec un enherbement serré (closed sod) et un enherbement plus espacé avec des surfaces de terre importantes (open sod).

En rive gauche du Rhône, les digues où de longs Fetch peuvent se développer sont exposées au vent d'Ouest et Sud-Ouest. Au regard des données historiques récentes ou anciennes, la probabilité d'avoir un vent important d'Ouest ou Sud-Ouest concomitamment avec la pointe de crue est très faible. On peut considérer le risque d'érosion, liée aux vagues, très faible et le risque de déferlement inférieur au 35 cm pris en compte dans la revanche de 50 cm.

La digue de la Montagnette exposée au vent du Nord pourrait présenter un risque d'exposition aux vagues important. Cependant la haie d'arbres disposée au nord de la digue joue un rôle de protection en dissipant les vagues potentiellement déferlantes.

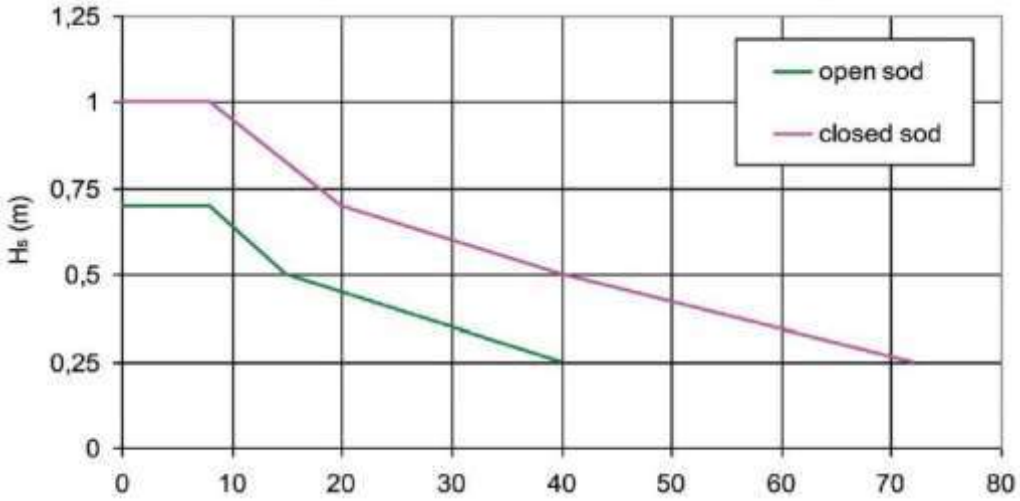


Figure 77. Résistance du parement d'une digue végétalisée en fonction de la hauteur spécifique des vagues et de la végétalisation des talus (Source ILH [X015] d'après CIRIA)

La probabilité de brèche par batillage des ouvrages de la rive gauche est jugée trop faible et n'est donc pas quantifiée.

5 CARACTERISATION DES RUPTURES PAR GLISSEMENT

5.1 DESCRIPTION DU PHENOMENE

Le glissement en masse intervient par rupture circulaire quand la digue et sa fondation sont en limon homogène saturé en eau et que les pentes des talus sont trop raides. En crue, le risque de glissement est sur le talus côté terre (la stabilité du talus côté fleuve étant assurée par le poids de l'eau.) La figure ci-dessous illustre ce mode de rupture.

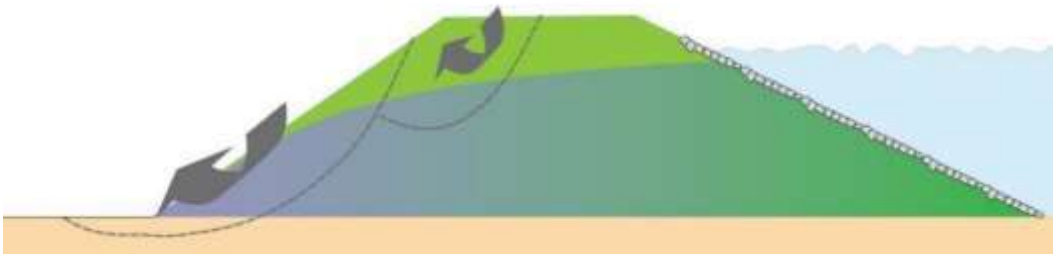


Figure 78. Glissement du talus aval en crue (d'après CEMAGREF [X023])

En décrue, le risque de glissement est sur le talus côté fleuve (le talus côté fleuve a été imbibé d'eau et le poids de l'eau n'est plus là pour assurer la stabilité du talus)

La figure ci-dessous illustre ce mode de rupture.

Figure 79. Glissement du talus amont en décrue (d'après CEMAGREF [X023])

Il est à noter que l'étude accidentologique n'a pas identifié de brèche causée par glissement circulaire.

5.2 METHODE DE DE CARACTERISATION DU CFBR

La justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai a fait l'objet de recommandations du Comité Français des Barrages et Réservoirs [X020]. Les paragraphes ci-dessous sont extraits de ces recommandations.

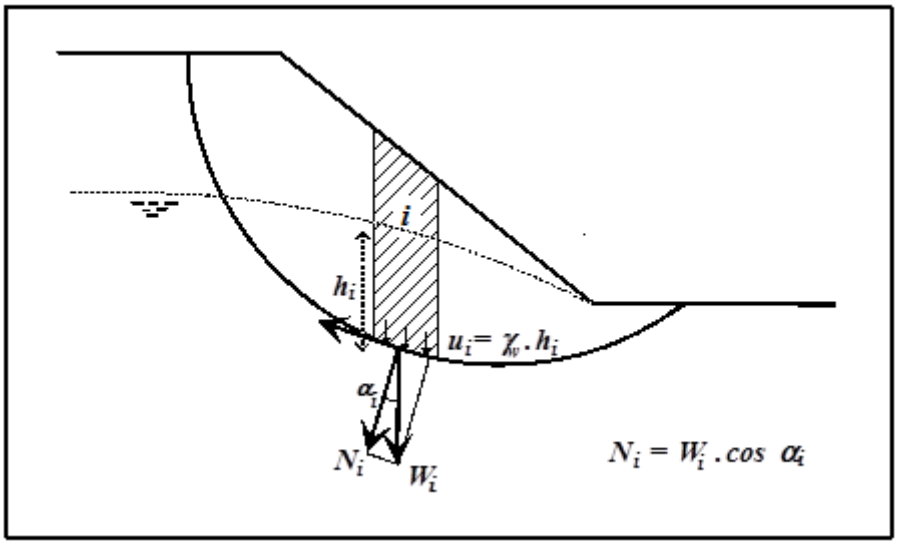


Figure 80. Principe de calcul de stabilité dans le cas d'une surface circulaire

Pour l'évaluation de la stabilité au grand glissement, le cas le plus fréquent est le suivant (Figure ci-dessus) :

- un modèle de calcul à l'équilibre limite est bâti, qui postule une surface de glissement potentielle, traversant le remblai et, le cas échéant, la fondation ;
- on calcule les contraintes effectives le long de cette surface ;
- on compare la contrainte de cisaillement, calculée le long de la surface étudiée, à la résistance au cisaillement des matériaux par différents modèles d'état-limite ; cette résistance est généralement exprimée par un modèle de Mohr-Coulomb, dans lequel on utilise pour c' et φ' les résistances de pic si, et seulement si, les preuves de compactage existent et que la déformabilité de la fondation est moindre que celle du remblai (sinon, prendre les résistances résiduelles post-rupture) ;
- la sécurité du calcul réside dans les trois points ci-dessous :
  - ✓ c' et φ' sont choisis avec prudence ;
  - ✓ les valeurs de calculs de c' et φ' sont les valeurs caractéristiques, divisées par des coefficients partiels ;
  - ✓ on applique ensuite un coefficient de modèle.

La condition d'état-limite s'écrit sous la forme d'une inéquation dans laquelle sont comparés, d'une part, un rapport des forces résistantes (ou de leur moment) sur les forces motrices (ou de leur moment), d'autre part, le coefficient de modèle. L'expression mathématique de la condition d'état-limite dépend du modèle d'état-limite adopté ; elle fait intervenir les valeurs caractéristiques des propriétés de résistance pondérées par leur coefficient partiel et les

valeurs représentatives des actions correspondant à la situation de projet examinée. À titre d'exemple, avec la méthode de Fellenius et pour un calcul en contraintes effectives, la condition d'état-limite s'écrit :

$$\frac{\sum_i \left[\frac{c'}{\gamma_{mc'}} \cdot \frac{b}{\cos\alpha_i} + \left(\frac{W_i}{\gamma_{mw}} \cos\alpha_i - u_i \frac{b}{\cos\alpha_i} \right) \frac{\tan\varphi'}{\gamma_{m\tan\varphi'}} \right]}{\sum_i W_i \sin\alpha_i} > \gamma_d$$

avec b largeur des tranches, W_i poids de la tranche i, α_i angle de la normale à la base de la tranche i avec la verticale, u_i pression interstitielle à la base de la tranche i.

Pour les digues de protection, les calculs sont à mener dans les cas figurant dans le tableau ci-après (à adapter à chaque cas particulier) :

Tableau 36. Cas de calculs à mener (recommandations CFBR [X020])

Situation	Talus amont	Talus aval
normale		X
Transitoire	X	X
Rare de crue	X (décrue)	X (cote de protection)
Exceptionnelle de crue		X (cote de sûreté)
Extrême de crue	X (décrue)	X (cote de danger)
Extrême sismique	X	X

Les coefficients partiels et de modèle sont les suivants :

Tableau 37. Coefficients partiels et de modèle pour l'ELU de stabilité d'ensemble (recommandations CFBR [X020])

Situations	Coefficient partiel γ_m sur c' et tan φ'	Coefficient partiel γ_m sur le poids volumique	Coefficient de modèle γ_d
normale d'exploitation	1,25	1	1,2
rare de crue	1,2	1	1,2
transitoire ou rare	1,1	1	1,2
exceptionnelle de crue (PHE)	1,1	1	1,2
extrême de crue	1	1	1,1
extrême sismique	1	1	1,1

5.3 PROBABILITE DE RUPTURE PAR GLISSEMENT

Les recommandations du CFBR n'associent pas de probabilité au coefficient de modèle. En revanche, elles traitent de la probabilité des situations.

Ces recommandations stipulent que les situations de projet sont classées en plusieurs catégories différenciées par l'intervalle de temps pendant lequel les distributions de toutes les données (actions, résistances) sont considérées comme constantes :

- les situations normales d'exploitation. Elles se réfèrent aux conditions de d'exploitation normale de l'ouvrage ;
- les situations transitoires. Ce sont les situations de projet de courte durée au regard de la durée de vie de l'ouvrage dont la survenue est quasiment certaine pendant la vie de l'ouvrage (fin de construction, maintenance) ;
- les situations rares. Elles se réfèrent à des conditions temporaires de fonctionnement ou à des configurations particulières. Leurs probabilités d'occurrence sont assez élevées sur la durée de vie de l'ouvrage ;
- les situations extrêmes. Elles se réfèrent à des conditions extrêmes applicables à l'ouvrage ou à des probabilités d'occurrence faibles sur la durée de vie de l'ouvrage.
- les situations de crues, qu'il est apparu nécessaire d'introduire de façon spécifique, vu leur importance s'agissant d'ouvrages hydrauliques. Ces situations comprennent elles-mêmes trois sous-catégories :
  - ✓ les situations rares de crue (dédiées à la justification des barrages écrêteurs de crue et des digues fluviales),
  - ✓ les situations exceptionnelles de crue (correspondant à l'atteinte de la cote des Plus Hautes Eaux – PHE),
  - ✓ les situations extrêmes de crue (au-delà de laquelle l'intégrité de l'ouvrage ne serait plus assurée – cote de danger).

Compte tenu de ce que la valeur γ_m sur le poids volumique de l'eau est égale à 1 et que les coefficients partiels γ_m sur c' et tan φ' sont égaux, on peut déduire qu'en définitif la stabilité est assurée quand le facteur de sécurité globale F tel que défini ci-dessous, calculé avec les valeurs caractéristiques c' et φ' non divisées par des coefficients partiels est supérieur à $\gamma_m.\gamma_d$, soit

$$F = \frac{\sum_i \left[c' \cdot \frac{b}{\cos\alpha_i} + \left(Wi.\cos\alpha_i - u_i \frac{b}{\cos\alpha_i} \right) \tan\varphi \right]}{\sum_i W_i \sin\alpha_i} > \gamma_m.\gamma_d$$

Si on considère que l'acceptabilité du risque pour les digues de protection correspond à une probabilité annuelle de rupture comprise entre 10^{-5} et 10^{-4}, on peut en déduire les coupures suivantes avec pour chaque coupure un produit de la probabilité d'occurrence par la probabilité conditionnelle de rupture aux alentours de 10^{-5}, ce qui donne dans le contexte hydrologique du Delta du Rhône, le découpage suivant :

Tableau 38. Probabilité de rupture suivant l'occurrence de situations de crues envisagées dans CFBR 2015 [X023]

Situation	T (an)	T_1 (an)	T_2 (an)	Prob. occurrence	Prob. conditionnelle de rupture	Prob. de rupture/ coupure	γ_m	γ_d	$\gamma_m.\gamma_d$
Normale	1		10	0.9	10^{-5}	9.10^{-6}	1.25	1.20	1.50
Rare	50	10	100	0.09	10^{-4}	9.10^{-6}	1.20	1.20	1.44
Excep.	500	100	1000	0.009	10^{-3}	9.10^{-6}	1.10	1.20	1.32
Extrême	2000	1000		0.001	10^{-2}	1.10^{-5}	1.00	1.10	1.10
Total				**1**		**$3.7.10^{-5}$**			

La probabilité de rupture par glissement circulaire est évaluée en fonction du facteur de sécurité global non diminué des coefficients partiels par la grille suivante :

Tableau 39. Probabilité de rupture par glissement en masse en fonction du facteur de sécurité global

Facteur F (anciennement Facteur global)	Probabilité de rupture
0.8	0.9
0.9	0.5
1	0.1
1.1	0.01
1.32	0.001
1.44	0.0001
1.5	0.00001

Ces probabilités sont ajustées suivant une fonction de Gumbel en calant les paramètres pour des facteurs de sécurité F compris entre 1.5 et 1.1 d'une part, et 1.1 et 0.8 d'autre part.

$$P_{glissement\ (F>1,1)} = \exp\left(-exp\left(\left(\frac{F-0{,}441}{0{,}442}\right)\right)\right)$$

$$P_{glissement\ (F<1,1)} = \exp\left(-exp\left(\left(\frac{F-0{,}966}{0{,}09}\right)\right)\right)$$

Les probabilités de brèche par glissement du talus aval et du talus amont sont respectivement bornées à 10^{-6} et 10^{-5}.

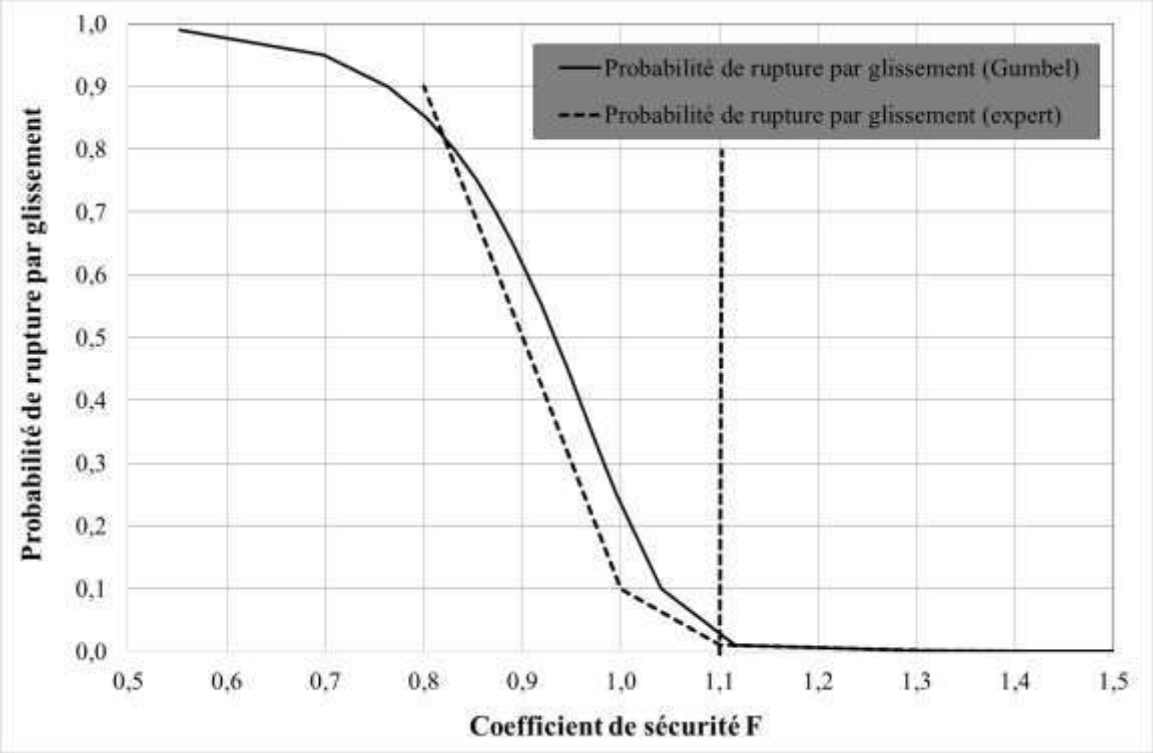


Figure 81. Probabilité de rupture par glissement en fonction du facteur de sécurité global

5.4 CALCUL DES FACTEURS DE SECURITE

Pour l'analyse de risques, on distingue 3 groupes d'ouvrages :

- Les digues récemment confortées ou à conforter très prochainement pour lesquelles des calculs de stabilité ont été menés suivant les recommandations CFBR (version provisoire de 2010 ou définitive de 2015). Il s'agit de :
    - La digue du petit Rhône, intégrée aux travaux PR1
    - La digue de Salin de Giraud

  Ces ouvrages présentent des conceptions équivalentes (étanchéité amont + clé d'étanchéité, filtration et drainage du remblai et de la fondation)
- Les digues de 1er rang récemment confortées pour lesquelles les études de projet ont été menées antérieurement à l'élaboration de ces recommandations. Il s'agit de :
    - La digue au niveau d'Albaron
    - La digue au niveau de Sénebier
    - La digue du Grand Rhône amont (des papeteries à Grand Passon)

  Ces ouvrages présentent des conceptions équivalentes (masque étanche en matériaux A2+clé d'étanchéité, drain horizontal en pied aval, absence de filtration et drainage du remblai).
- Les digues du XIXème siècle qui n'ont fait l'objet d'aucun confortement depuis leur création.

Les 2 premiers groupes concernent des travaux récemment réalisés. Les ouvrages présentent des géométries homogènes.

Pour le 1er groupe, il a été procédé à l'analyse des calculs réalisés par les bureaux d'étude. La probabilité de brèche par glissement est calculée suivant la formule précitée. L'analyse figure au chapitre 8.

Pour le 2ème groupe, les corps de digue ont été réalisés avec des matériaux étanches (matériaux A2 ou rideau de palplanches), les maîtres d'œuvre ont estimé que le talus aval ne pouvait pas être inhibé et que le risque de brèche par glissement du talus aval était négligeable. Une probabilité à dire d'expert a été déterminée.

Pour le 3ème groupe, les corps de digue et la géométrie des ouvrages sont par définition hétérogènes. Pour ces ouvrages, des modélisations géo-mécaniques ont été réalisées sur les logiciels SEEP et GEOSLOPE de manière à pouvoir construire des abaques et estimer directement pour chaque profil et chaque scénario de crue le facteur de sécurité en crue du talus aval et en décrue du talus amont:

5.5 STABILITE DES DIGUES D'ORIGINE A L'AIDE DU LOGICIEL SEEP/GEOSLOPE

5.5.1 Paramètres d'entrée

Afin de déterminer la résistance des digues vis-à-vis de la stabilité, des abaques ont été réalisés.

Dans ces derniers, différents paramètres ont été pris en compte :

- Le fruit, avec des valeurs étudiées de 1 ; 1.5 ; 2 et 2.5,
- La crue, avec 6 niveaux différents,
- La nature de la fondation, avec ou sans couche sableuse,
- Le niveau de la nappe, soit au niveau du pied aval soit 2m plus bas.

Le profil utilisé a été choisi de façon pessimiste : digue de 6 m de hauteur coté terre et 5 m coté fleuve avec une largeur de ségonnal très faible, de 5m. L'ensemble du secteur a au minimum fait l'objet de travaux de carrossabilité et a donc une largeur en crête de 3 mètres ; c'est cette valeur qui a été utilisée.

Grâce aux mesures topographiques, les fruits minimums en rive gauche ont pu être déterminés ; ils sont de l'ordre de 1.5 à l'amont comme à l'aval (excepté au niveau des protections maçonnées, mais celles-ci ne rentrent pas dans la présente analyse). Il n'y a pas de soucis de stabilité avec des fruits de plus de 2.5, ce qui justifie la plage de valeurs sélectionnée.

Les niveaux de crues utilisés sont répartis entre le niveau du pied de digue coté fleuve (1m par rapport au côté terre) et le niveau de la crête de digue (6m par rapport au côté terre). Chacune de ces crues a été considérée avec un gradient de crue de 5cm/h, un pic de crue de 2 jours et un gradient de décrue de 25 cm/h. L'hypothèse de gradient de crue est plus lente que les gradients observés et le pic plus long que ceux observés pour les crues historiques (Cf. Chapitre n°4) ; la digue est donc plus saturée dans la modélisation que dans la réalité, ce qui est sécuritaire. De même une décrue plus rapide que les décrues observées lors des crues historiques (Cf. Chapitre n°4) est modélisée ce qui va à nouveau dans le sens de la sécurité.

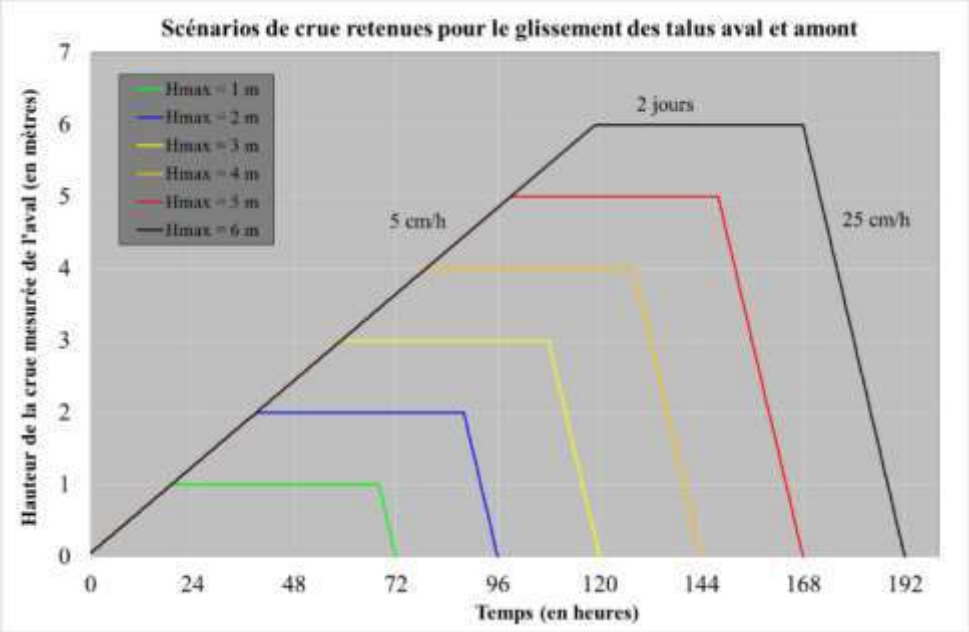


Figure 82. Scénarios de crues pris en compte pour l'évaluation de la stabilité

Suite à l'analyse géotechnique menée sur l'ensemble de la rive gauche, des caractéristiques moyennes du limon ont été choisies pour le corps de digue et pour la fondation avec éventuellement une couche de sable en fondation (5m d'épaisseur, située à 1m sous le pied aval). La configuration A comprend la couche de sable, contrairement à la configuration B.

Tableau 40. Digue d'origine - propriétés mécaniques et hydrauliques

	Limon + argile	**Sable**
C' (kPa)	2	0
φ' (°)	27	33
γ_{humide} (kN/m^3)	19.5	19.5
k_v (m/s)	1.10^{-7}	1.10^{-5}
k_h (m/s)	1.10^{-6}	1.10^{-4}
Porosité n (%)	40	35
α (m^{-1})	1.9	14.5
α (kPa)	52.6	6.9
n (Van Genuchten)	1.3	2.7

Le niveau de la nappe a été placé soit au niveau du pied aval, suite à une montée lente du niveau du Rhône : la fondation est saturée, ou 2 mètres plus bas, ce qui correspond plus à une crue rapide : seule la fondation profonde est saturée au début. Un pas de temps de 1h a été utilisé, pour chaque configuration, les facteurs de sécurité minimum de chaque pas de temps ont été comparés et le plus bas a été sélectionné, c'est celui qui apparait dans les graphiques suivants.

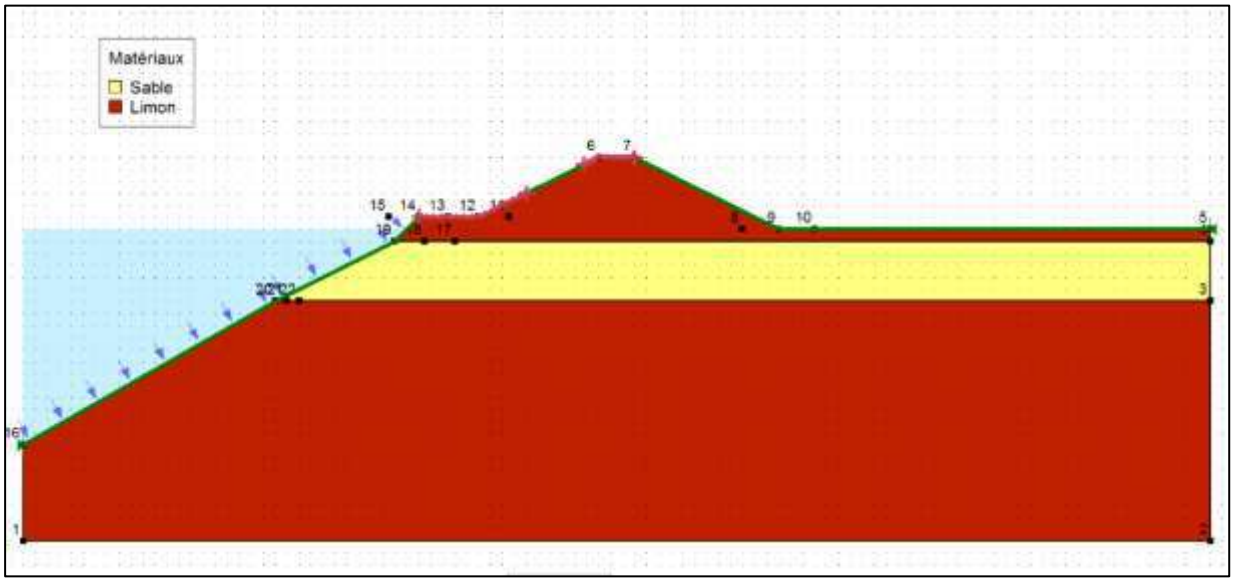


Figure 83. Exemple de modèle : configuration A avec des pentes à 2/1

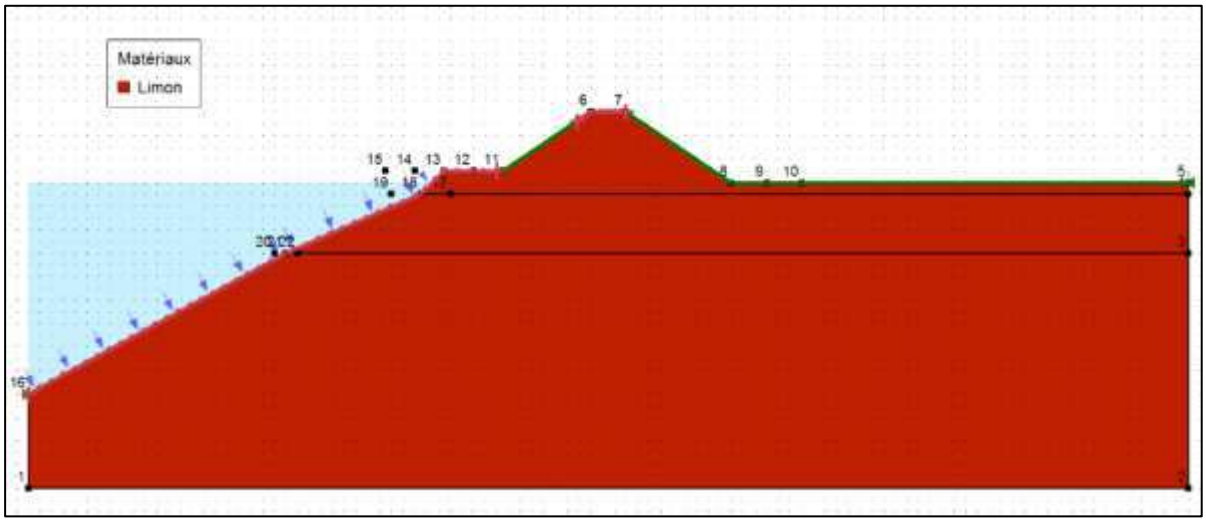


Figure 84. Exemple de modèle : configuration B avec des pentes à 1.5/1

5.5.2 Choix du facteur de sécurité

De manière générale, le facteur de sécurité du talus amont est minimal lors de la décrue alors que celui du talus aval est minimal à la fin du pic de crue.

En crue, les cercles de glissement atteignant la crête aval présentent des facteurs de sécurité inférieurs aux cercles de glissement atteignant la crête amont. Les premiers peuvent engendrer une rupture de la digue sans pour autant provoquer de brèche. Alors que les seconds en atteignant le lit du fleuve peuvent engendrer des entrées d'eau et provoquer la formation d'une brèche. Le scénario de brèche par glissement du talus aval en crue étant caractérisé par la seule probabilité d'initiation du glissement, on s'intéressera uniquement aux cercles de glissement atteignant la crête opposée au glissement pour la caractérisation de scénario de brèche. Pour les brèches par glissement du talus amont en décrue, on conservera la même approche.

Les quatre figures suivantes illustre la comparaison des facteurs de sécurité relatifs aux cercles de glissement atteignant la crête du talus impacté par le glissement (rupture sans brèche) et ceux atteignant la crête opposée au talus impacté par le glissement (rupture avec brèche) pour les 4 situations suivantes :

- Glissement du talus aval en crue pour la configuration A (sable perméable en fondation),
- Glissement du talus amont en décrue pour la configuration A (sable perméable en fondation),
- Glissement du talus aval en crue pour la configuration B (limon peu perméable en fondation),
- Glissement du talus amont en crue pour la configuration B (limon perméable en fondation).

Globalement les variations du facteur de sécurité sont comprises entre 0,05 et 0,2.

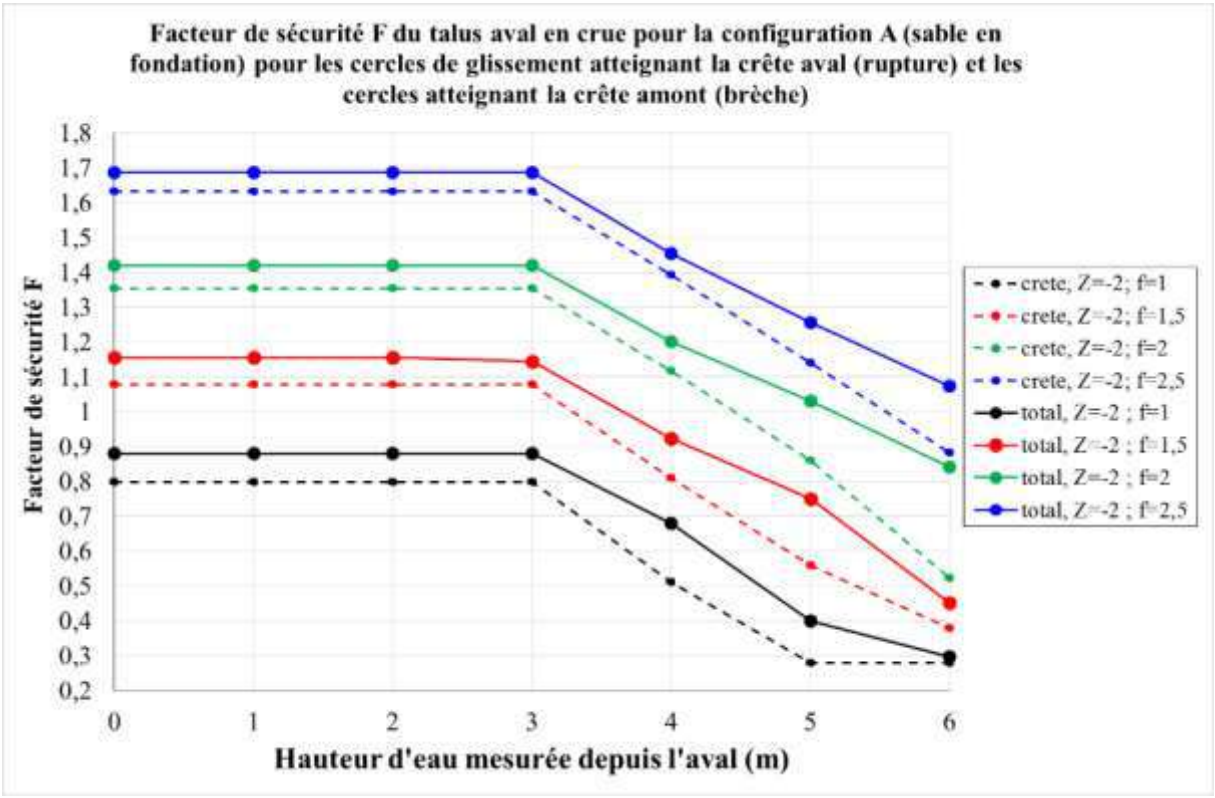


Figure 85. Facteur de sécurité du talus aval en crue – configuration A (sable)

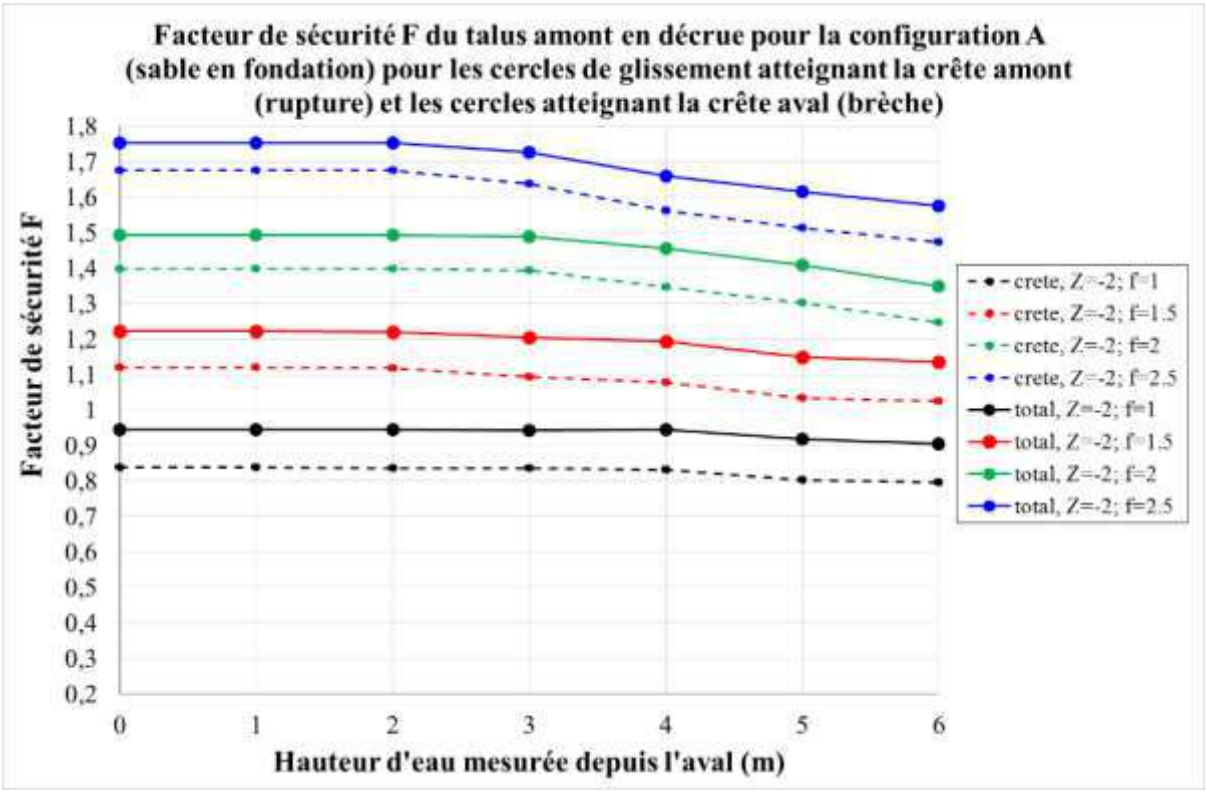


Figure 86. Facteur de sécurité du talus amont en décrue – configuration A (sable)

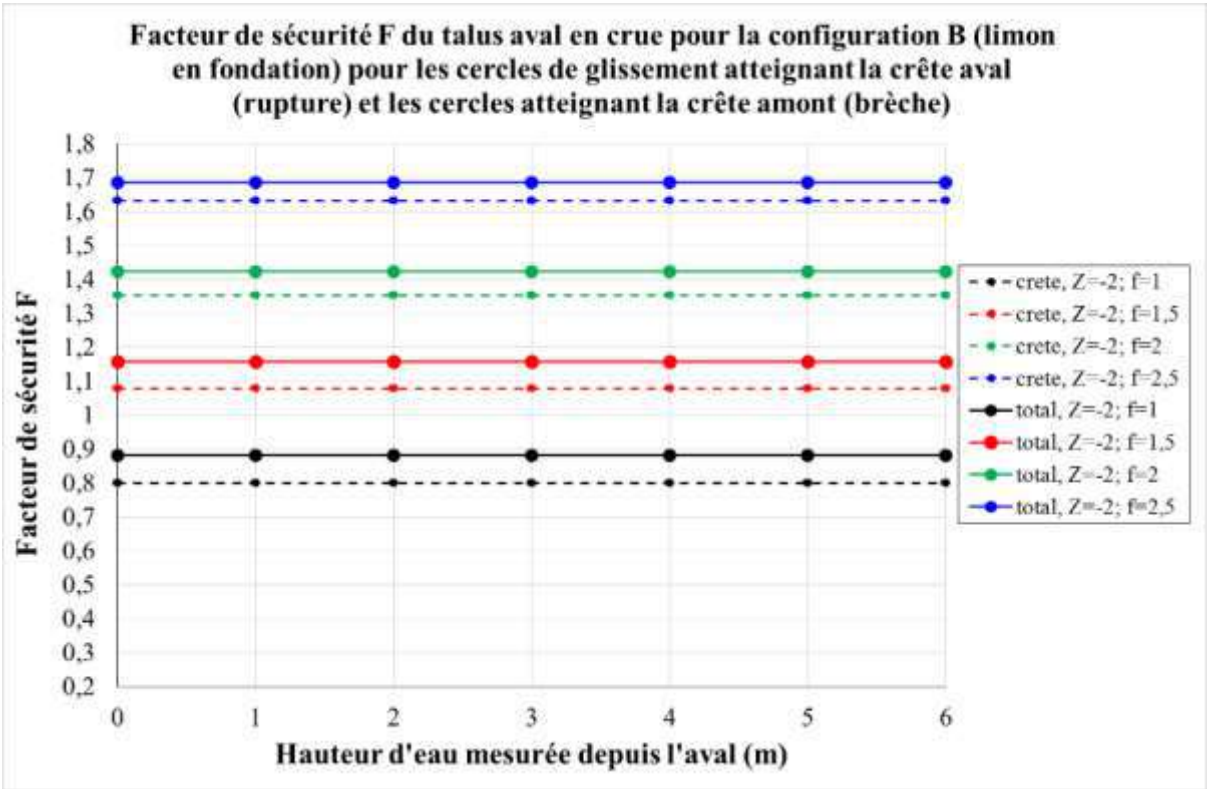


Figure 87. Facteur de sécurité du talus aval en crue – configuration B (limon)

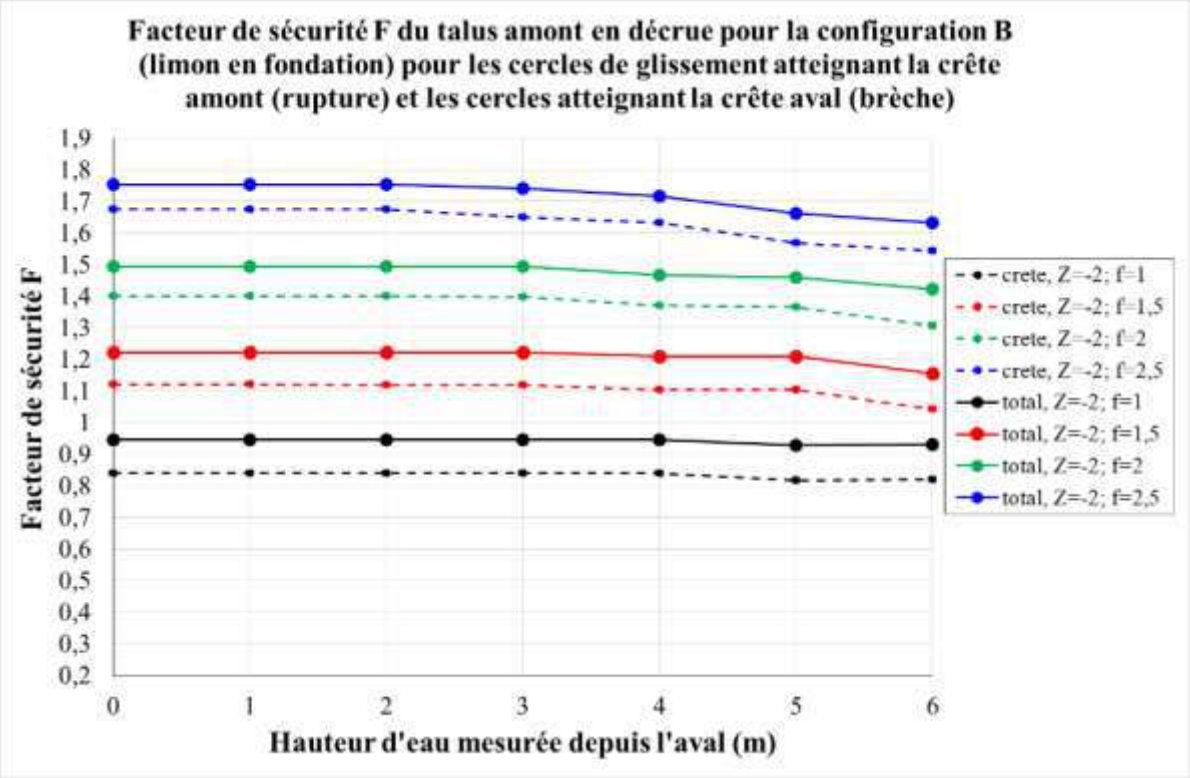


Figure 88. Facteur de sécurité du talus amont en décrue – configuration B (limon)

5.5.3 Stabilité du talus aval pour la configuration A avec couche de sable

La figure ci-dessous illustre, dans la configuration géotechnique d'une couche de sable en fondation, les facteurs de sécurité vis-à-vis du glissement du talus aval en crue pour différents fruits de talus et différentes hauteurs de crue pour deux situations de nappe (Z=0 m et Z=-2 m).

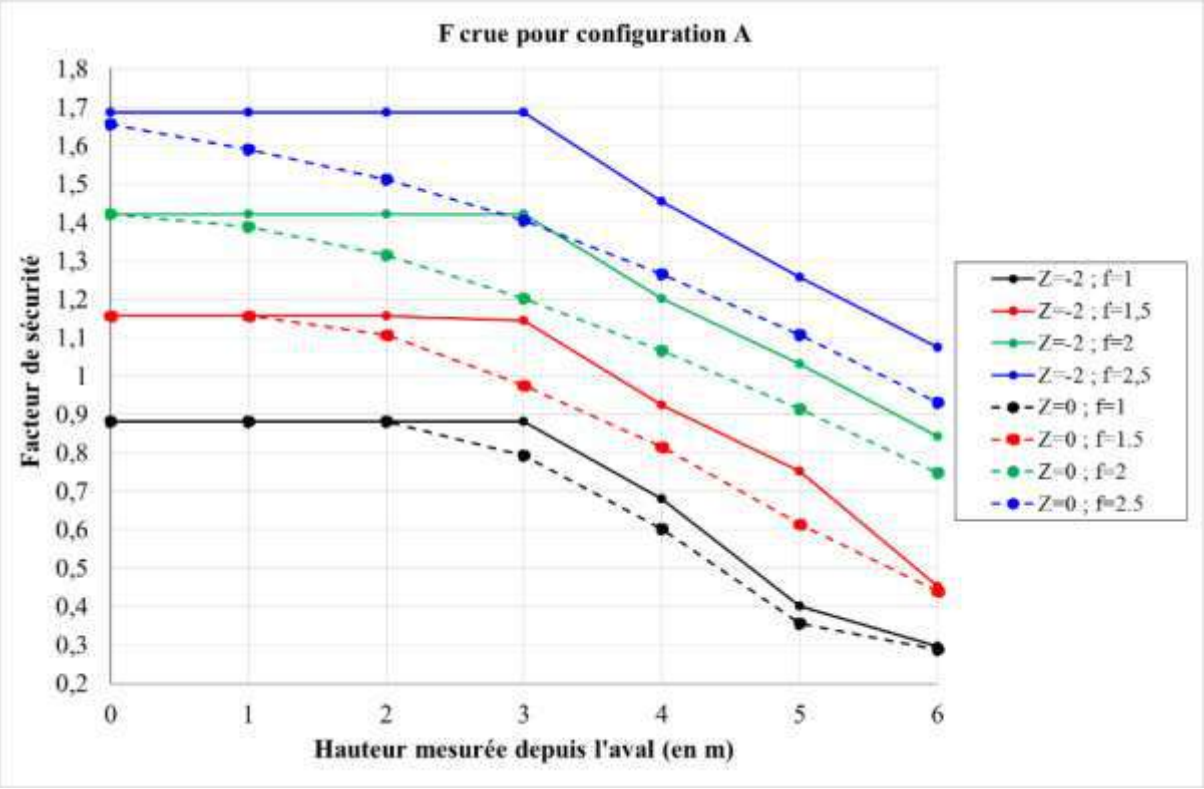


Figure 89. Variation du facteur de sécurité lors de la crue pour la configuration A

Un fruit de 1 ne permet pas la stabilité de la digue hors d'eau et a fortiori en crue.
Aucun fruit ne permet de garantir la stabilité pour une crue au niveau de la crête lorsqu'une couche de sable épaisse est présente en fondation superficielle. D'autres composants (drainage) sont nécessaires pour assurer la stabilité.

Avoir une nappe haute diminue fortement la stabilité ; cette variation est plus importante et apparait dès les faibles crues pour des fruits importants. Même si ces derniers apportent bien sûr une meilleure stabilité.

Tableau 41. Fruit minimum garantissant le facteur de sécurité recherché

	Crue					
	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m
F = 1 Z = 0	1,5	1,5	2	2,5		
F = 1 Z = -2	1,5	1,5	1,5	2	2	2,5
F = 1,3 Z = 0	2	2,5	2,5			
F = 1,3 Z = -2	2	2	2	2,5		

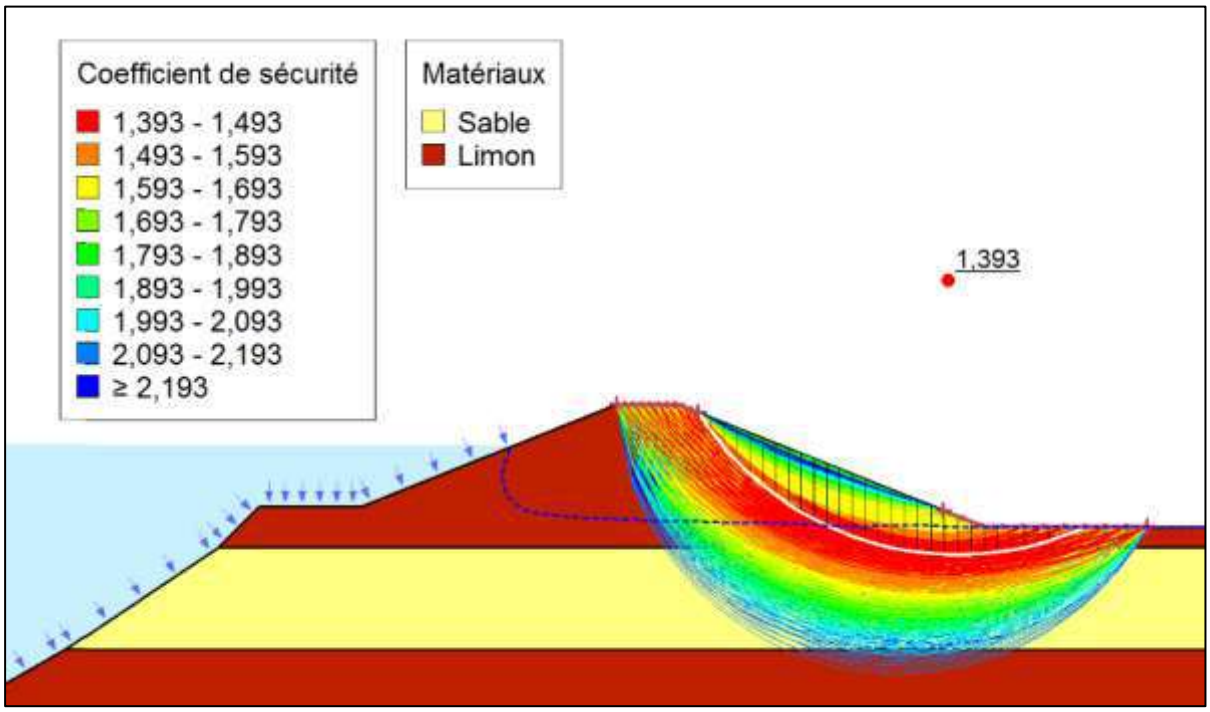


Figure 90. Exemple de rendu : configuration A ; Z=-2 ; fruit à 2.5/1 ; crue 4m

On note la redondance des vérifications entre ces résultats (chute du facteur de stabilité pour des hauteurs supérieures à 3 mètres) et le facteur de sécurité de l'USACE (1993) sur le soulèvement hydraulique aval (Cf. §.3.1.2.) qui est de 1 pour une charge de 3 mètres dans les mêmes conditions. Le soulèvement hydraulique du pied aval entraîne l'instabilité du pied de digue.

A l'instar du soulèvement hydraulique du pied aval, le facteur de sécurité perd 0.5 point pour une charge de 5 mètres mesurée depuis l'aval.

5.5.4 Stabilité du talus aval pour la configuration sans couche de sable

Le graphique ci-après représente la variation du facteur de sécurité, en crue et sans couche de sable en fondation, en fonction de la hauteur de crue pour les différents fruits et niveaux de nappe.

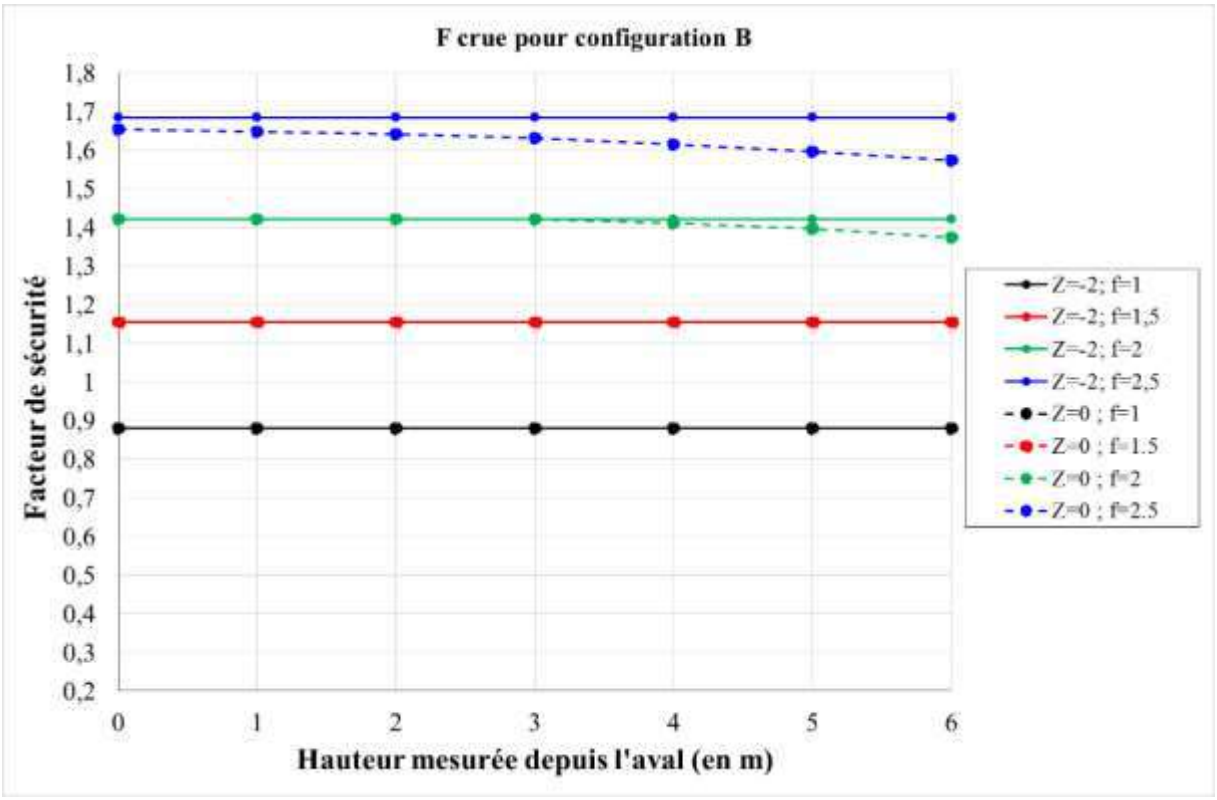


Figure 91. Variation du facteur de sécurité lors de la crue pour la configuration B

Pour la configuration de fondation entièrement en limon, la variation du facteur de sécurité due au niveau de la nappe est quasi nul et sans influence sur la stabilité. Un fruit de 1 ne permet pas la stabilité. A partir d'un fruit de 1.5, le facteur de sécurité est supérieur à 1, et un fruit supérieur à 2 assure un facteur de sécurité de plus de 1.3.

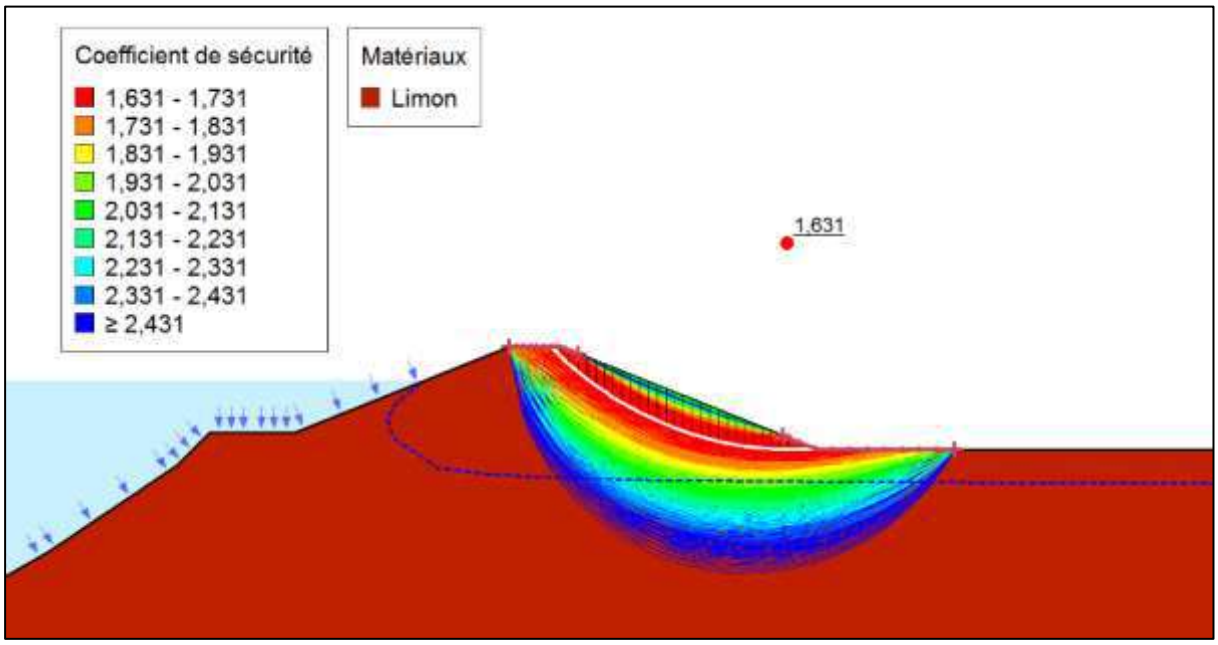


Figure 92. Exemple de rendu : configuration B ; Z=-2 ; fruit à 2.5/1 ; crue 4m

3.1.1. Stabilité du talus amont pour la configuration A avec couche de sable

Le graphique ci-après représente la variation du facteur de sécurité, en décrue et avec une couche de sable en fondation, en fonction de la hauteur de crue pour les différents fruits et niveaux de nappe.

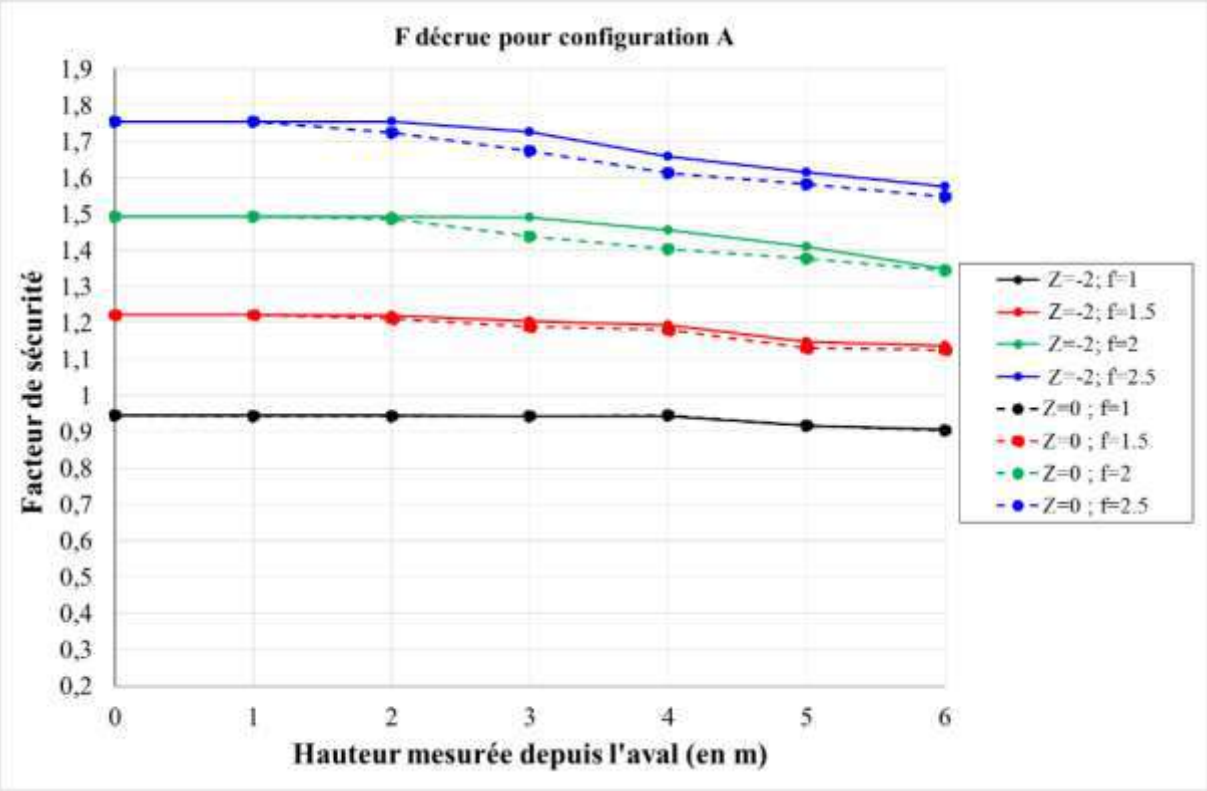


Figure 93. Variation du facteur de sécurité lors de la décrue pour la configuration A

Pour le parement amont, le niveau initial de la nappe a une influence faible ; un niveau haut fragilise légèrement en cas de forte crue.

Un fruit de 1.5 permet d'avoir un facteur de sécurité supérieur à 1, très proche de 1 pour les fortes crues. Un fruit de 2 est suffisant pour avoir un facteur de 1.3 jusqu'à une crue de 6 m.

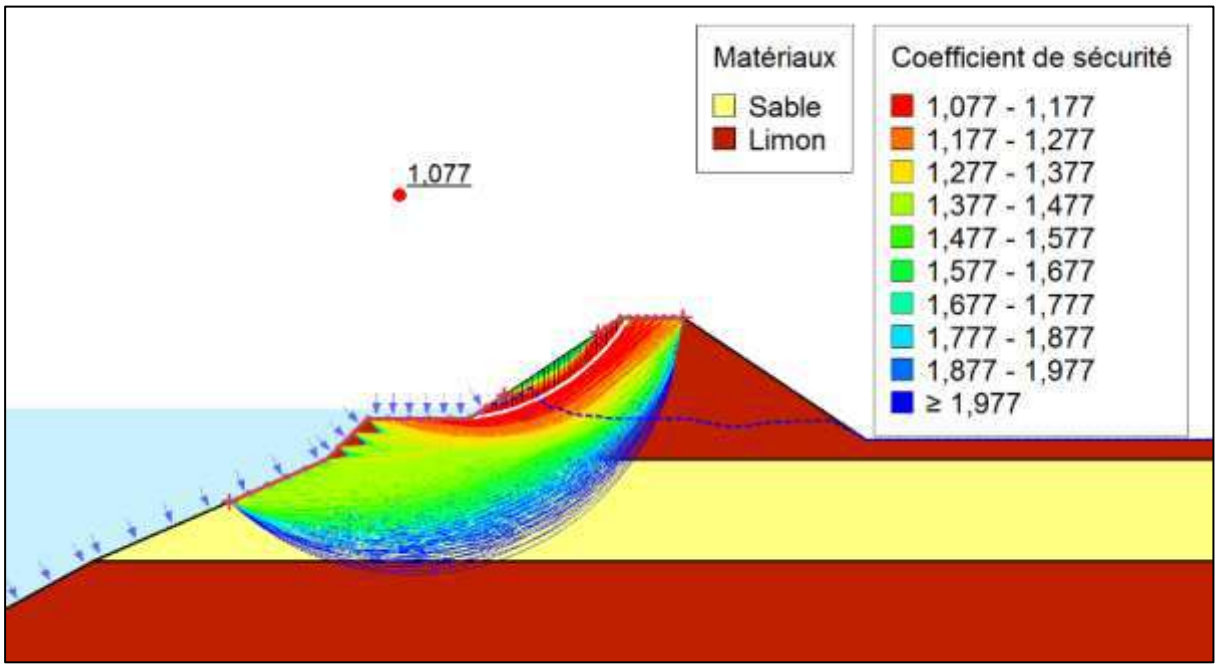


Figure 94. Exemple de rendu : configuration A ; Z=0 ; fruit à 1.5/1 ; crue 3m

3.1.1. Stabilité du talus amont pour la configuration B sans couche de sable

Le graphique ci-après représente la variation du facteur de sécurité, en décrue et sans couche de sable en fondation, en fonction de la hauteur de crue pour les différents fruits et niveaux de nappe.

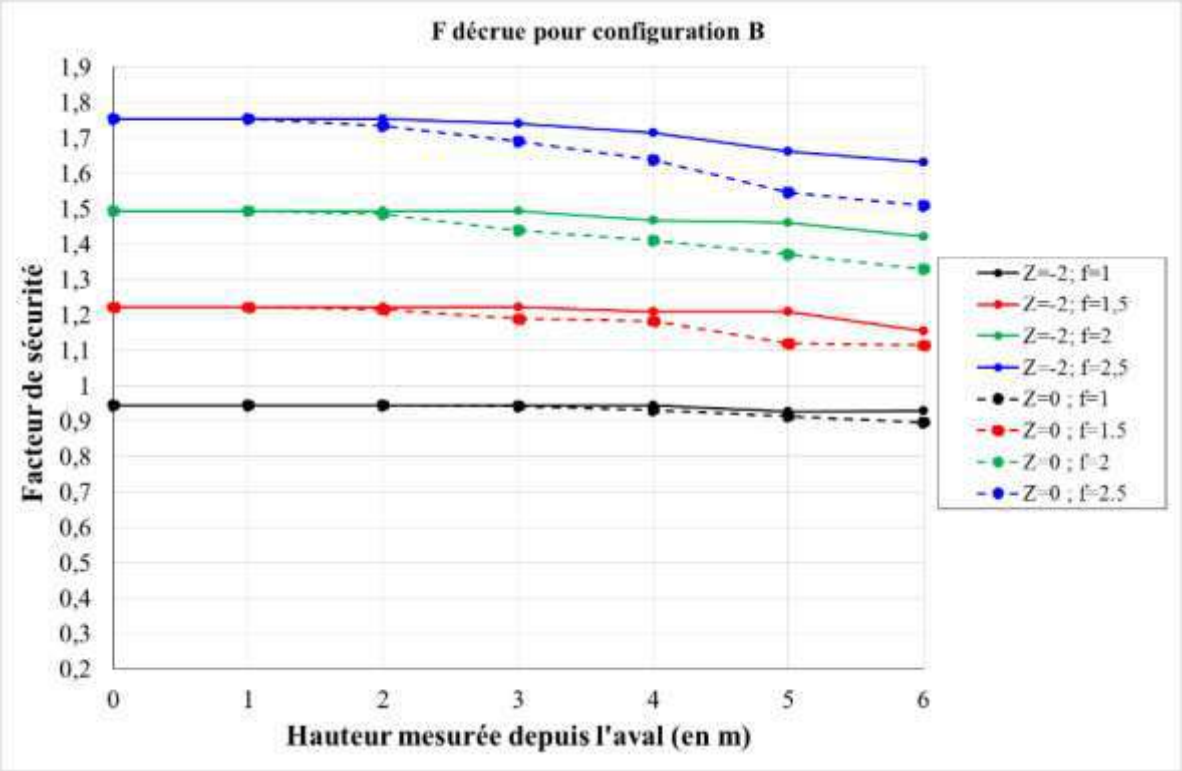


Figure 95. Variation du facteur de sécurité lors de la décrue pour la configuration B

L'absence de couche de sable joue très peu sur la stabilité du parement amont à la décrue, il y a néanmoins un gain plus important lorsque la nappe est basse, le facteur de stabilité de 1.3 est alors atteint quel que soit la crue pour un fruit de 2.

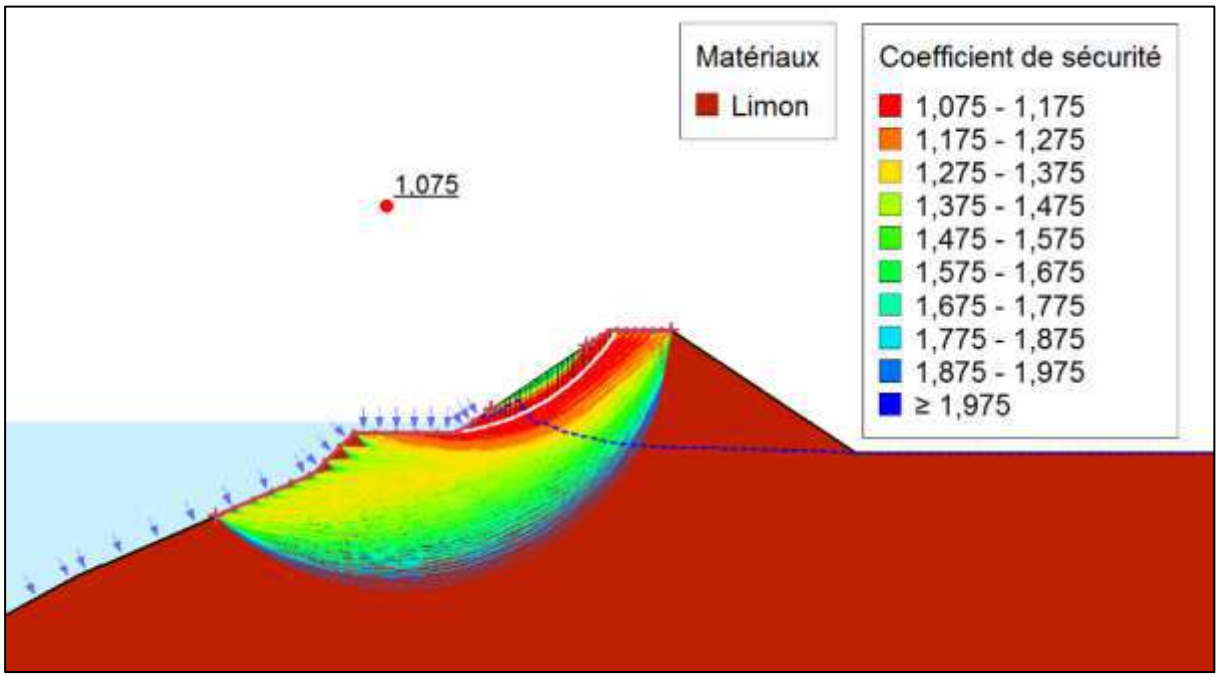


Figure 96. Exemple de rendu : configuration B ; Z=0 ; fruit à 1.5/1 ; crue 3m

5.5.5 Cohérence avec les observations lors de la crue de 2003

Lors de la crue de décembre 2003, aucun glissement n'a été observé à l'exception du glissement de peau en aval de Prends-té-Garde (Grand Rhône rive Gauche) avec la présence de sable en fondation et dans le corps de digue (épaisseur de 0.5 m). Le facteur de sécurité était en conséquence supérieur ou égal à 1.

La crue est survenue en fin d'année, période de nappe basse (pas d'irrigation), et est montée aux 2/3 de la digue soit environ 4 m dans notre modèle.

Les fruits limites sont d'environ 1.5 sur les deux parements.

La modélisation donne des facteurs en crue de 0.81 pour la configuration A et 1.078 pour la configuration B. En décrue le facteur de sécurité est supérieur avec 1.079 pour la configuration A et 1.102 pour la configuration B.

Selon ces résultats les zones sableuses auraient dû rompre par le talus aval, ce qui n'a pas été le cas ; une modélisation un peu plus précise de la crue a alors été réalisée grâce au limnigramme relevé au niveau de Boisviel (GRG 307) :

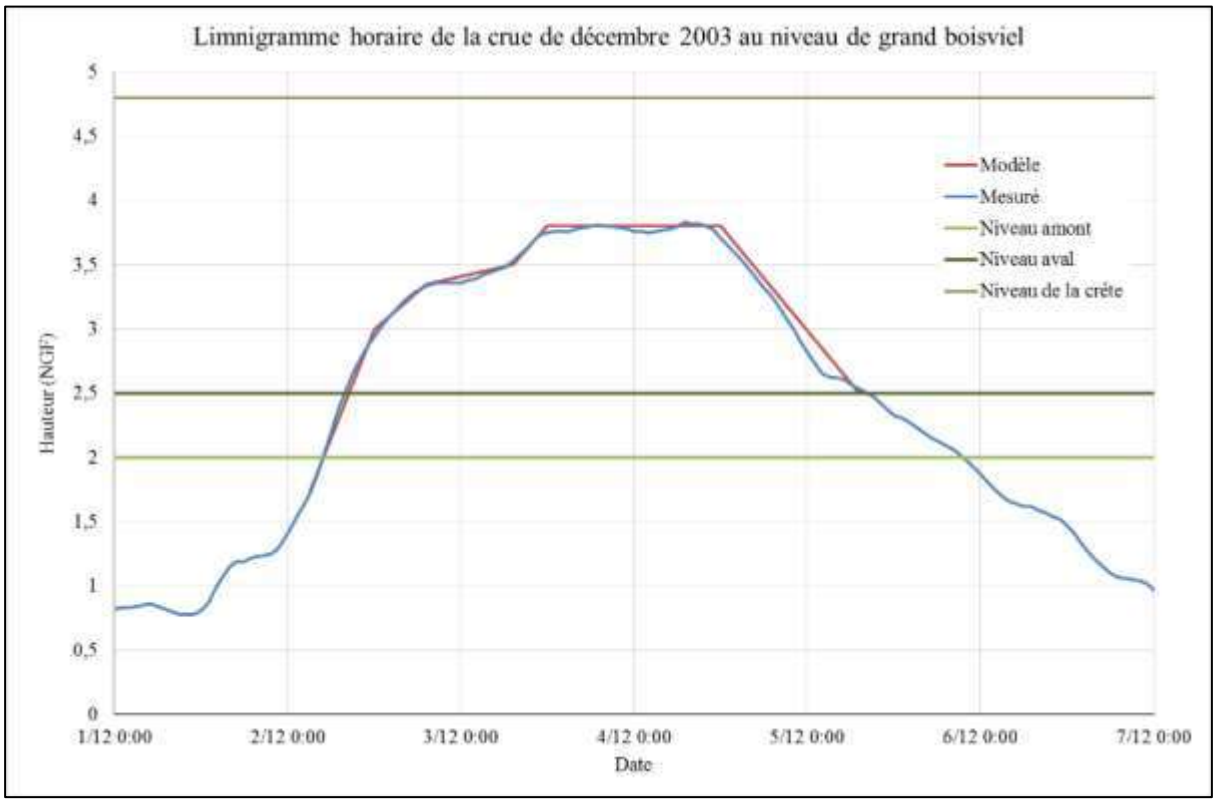


Figure 97. Limnigramme de la crue de 2003 au niveau du GRG307

La digue dans ce secteur n'ayant pas la dimension modélisée, les pentes ont été conservées mais les variations de hauteur ont été multipliées par 2.6 (digue modélisée de 6 m et non de 2.3 m). Le pic a donc été modélisé à 3.4 m au-dessus du niveau aval (limnigramme mesuré : 1.3m).

Les facteurs de sécurité minimum obtenus pour cette modélisation de la crue de 2003 sont de 1.093 à l'amont et 1.078 à l'aval (saturation non atteinte).

La durée du pic de crue a ensuite été augmentée de façon à voir la variation ; dans les conditions de la crue de 2003 il faut 1.2 jours de pic de crue pour que la saturation ait un impact sur le facteur de sécurité du parement aval et un pic de 1.6 jours pour que ce facteur de sécurité descende à 1.

5.6 FORMULATION SIMPLIFIEE DU FACTEUR DE SECURITE

Compte tenu des résultats précédents, on retient pour l'appréciation de la stabilité du talus aval en crue, la formulation suivante :

Configuration A avec couche de sable en fondation

$$F = 0.3715 + 0.518.f - 0.23.\ Max(0;\ H_{av} - 3)$$

Configuration B sans couche de sable en fondation

$$F = 0.3715 + 0.518.f$$

et pour l'appréciation de la stabilité du talus amont à la décrue, la formulation suivante :

Configuration A avec couche de sable en fondation

$$F = 0.54.f+0.409 – (0.014.f + 0.01).\ Max(0;\ H_{am} - 1)$$

Configuration B sans couche de sable en fondation

$$F = 0.54.f+0.409 – (0.02.f - 0.01).\ Max(0;\ H_{am} - 1)$$

Avec :

F : facteur de sécurité de stabilité
H_{av} : Hauteur de la crue mesurée depuis le terrain naturel aval (pied de digue)
H_{am} : Hauteur de la crue mesurée depuis le terrain naturel amont (pied de digue)
f : fruit du talus aval (en crue) ou talus amont (en décrue).

6 AUTRES MECANISMES

6.1 MODES DE RUPTURE PEU COMMUN POUVANT AFFECTER LES DIGUES

Lors du 2ème colloque national sur les digues de protection contre les crues, Fry & Courivaud [X036] ont dressé une liste des modes de rupture peu communs pouvant affecter les digues. Une brève synthèse de l'article est faite avec les réponses apportées par le SYMADREM.

Ces modes de rupture sont :

- Fissuration,
- Liquéfaction,
- Exsolution.

6.1.1 Fissuration

On peut rencontrer des fissures sur tous les éléments superficiels d'une digue, que ce soit sur les blocs naturels ou artificiel des carapaces ou des bermes, mais aussi sur les massifs en béton ou en maçonnerie constituant le couronnement, surtout sur les digues mixtes.

Les types de fissuration qu'on peut rencontrer sont cités ci-dessous :

6.1.1.1 Rupture suite à une fissuration de dessiccation en crête :

Les fissures rencontrées sont en général dues à un manque de résistance des matériaux utilisés par rapport aux contraintes auxquelles ils sont soumis. L'évolution des fissures peut entrainer la rupture de blocs, particulièrement des blocs aux formes élancées. La carapace dont la résistance a ainsi été diminuée ne peut plus résister aux infiltrations d'eau.

Le processus de rupture est présenté dans la figure suivante :

Fissurations potentielles au niveau de la crête et le coursier

Ecoulement à travers les surfaces fissurées

Soulèvement des blocs

Formation de brèche

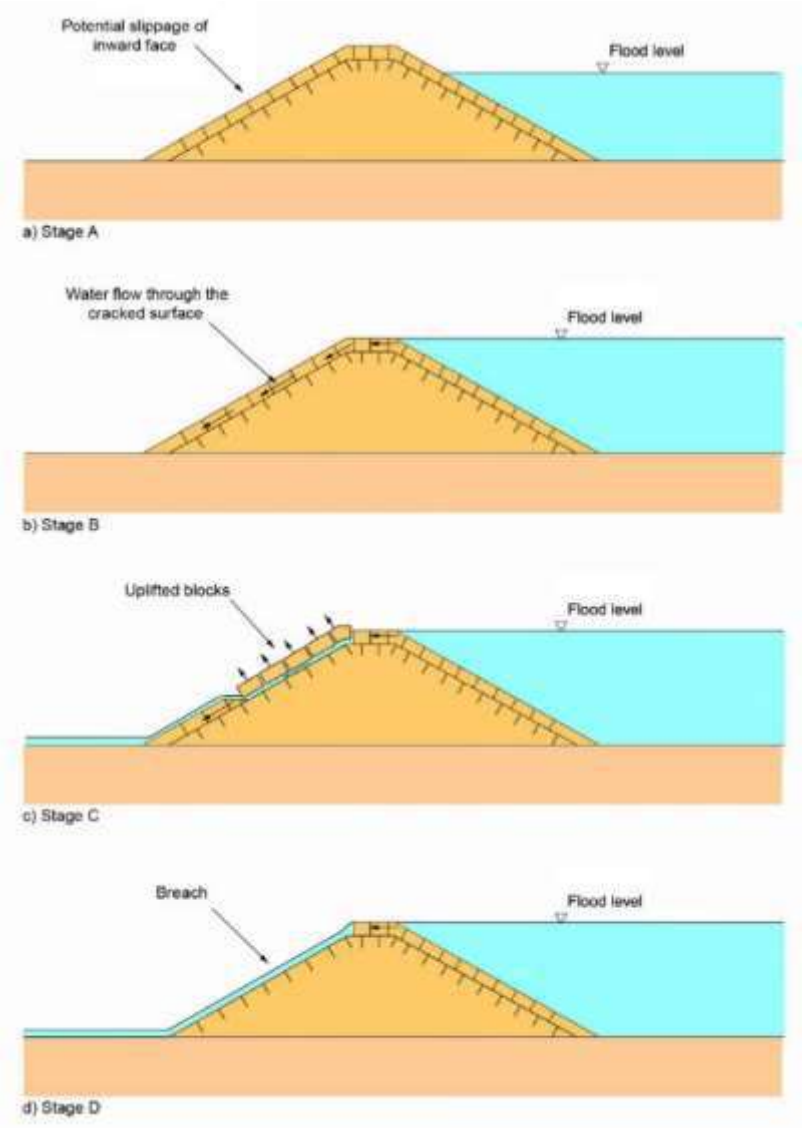


Figure 98. processus de rupture suite à une fissuration de dessiccation en crête-Extrait : Colloque CFBR IRSTEA Digues –J-J Fry [X036] d'après [X037]

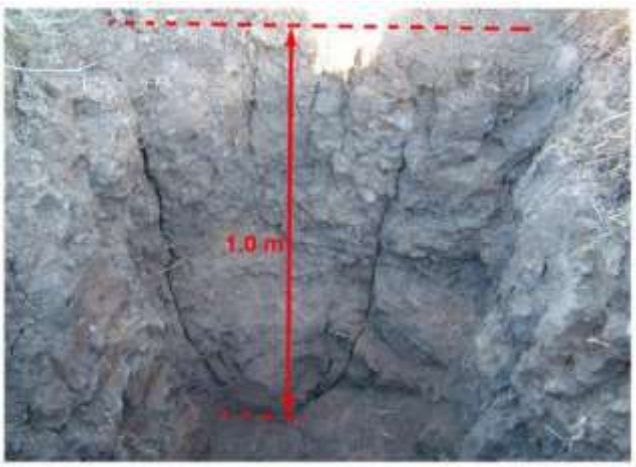


Photo 12. Fissure de dessiccation dans une digue (Zielinski & Al. 2008 [X037])

Un scénario de brèche correspondant à une érosion de conduit dans une fissure traversante a été pris en compte dans la présente analyse de risques.

6.1.1.2 Rupture après fissuration de retrait le long d'une palplanche

Ce mode de rupture est celui qui a vraisemblablement causé les brèches des digues de la Nouvelle Orléans en 2005 lors de la tempête Katrina. Suite à la canicule qui a précédé la tempête, des fissures de retrait sont apparues le long d'une palplanche et ont provoqué la rupture de la digue après le passage de la tempête.

Les étapes de rupture sont décrites comme suit :

- Retrait avec fissuration pendant la canicule
- Augmentation du niveau du canal en crue, infiltration d'eau et claquage dans la fissure
- Augmentation des sous pressions en fondation
- Glissement brusque

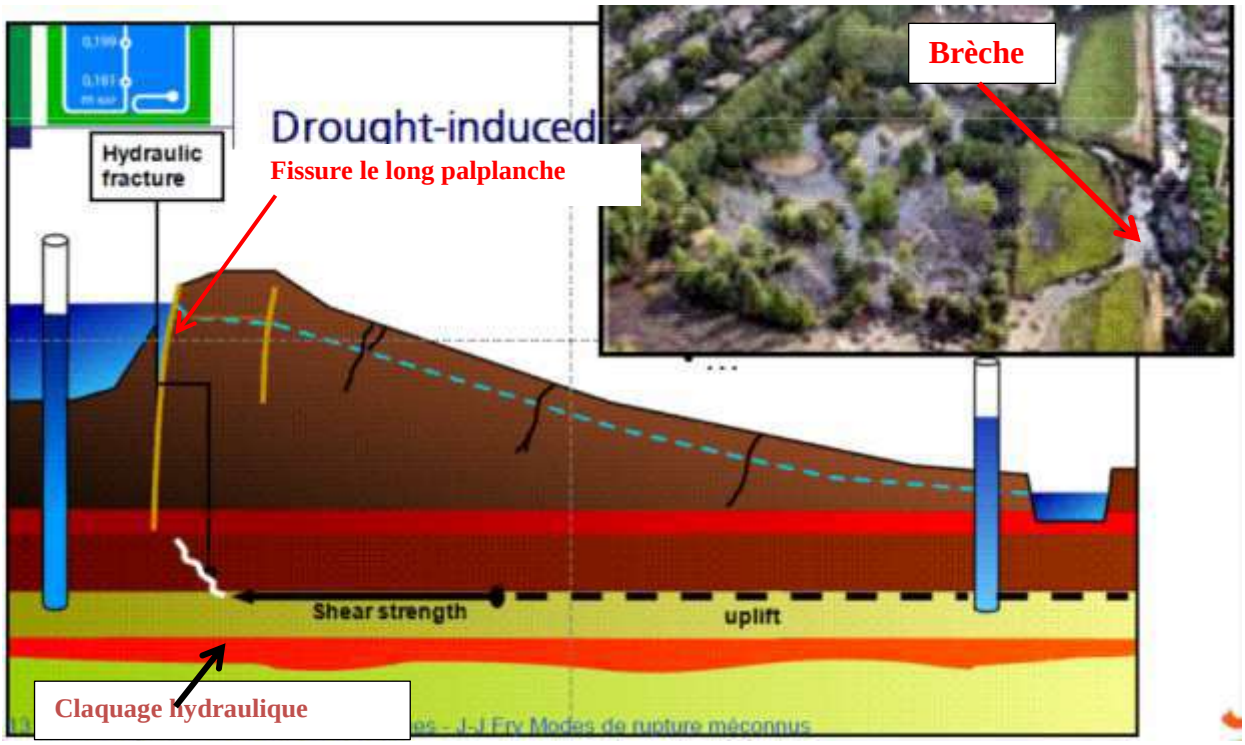


Figure 99. Rupture après fissuration de retrait le long d'une palplanche : Extrait : Colloque CFBR IRSTEA Digues –J-J Fry

Ce scénario intéresse en rive gauche du Rhône, le rideau de palplanches au droit de l'usine Fibre Excellence. Il a été pris en compte par un dimensionnement et un fichage approprié du rideau.

En Camargue Insulaire et rive droite, ce scénario n'intéresse, aucun tronçon. En effet dans les zones possédant des palplanches, elles sont situées en pied coté fleuve à un niveau proche de celui de l'étiage, la fissuration est donc peu probable.

6.1.1.3 Décollement d'une palplanche par déformabilité

Les étapes de rupture de la digue suit au décollement d'une palplanche, est défini comme suit :

- Compressibilité de la digue : compressibilité des sols de fondation
- Rotation de la palplanche
- Fissuration
- Sous pression
- Cisaillement de la fondation
- Rupture de la digue

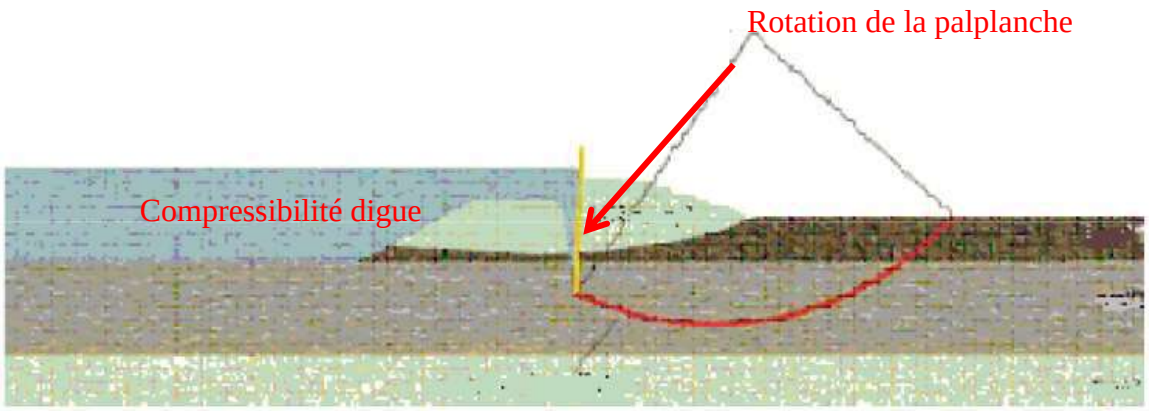


Figure 100. compressibilité de la digue et rotation de la palplanche-Extrait : Colloque CFBR IRSTEA Digues –J-J Fry

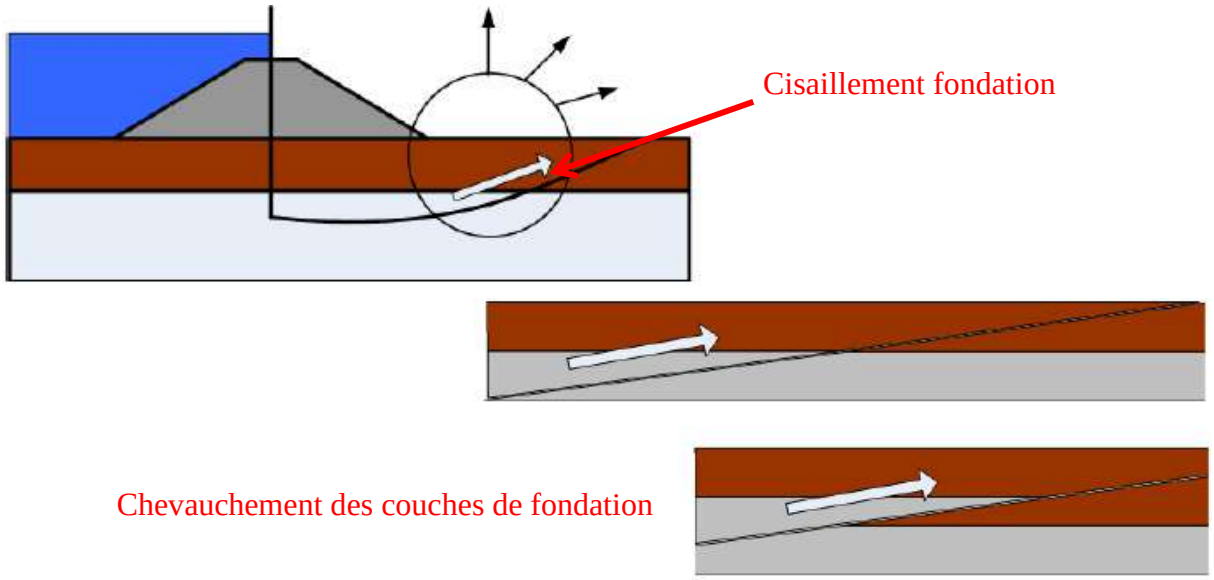


Figure 101. Cisaillement de la fondation - Extrait : Colloque CFBR IRSTEA Digues –J-J Fry

La photographie suivante présente une vue en plan de la rupture de la digue au Nouvelle Orléans 17th Avenue suite à l'Ouragan Catherina en 2004 :

Photo 13. Rupture de la digue à Nouvelle Orléans Ouragan - Catherina 2004 - Extrait : Colloque CFBR IRSTEA Digues –J-J Fry

Ce scénario intéresse en rive gauche du Rhône, le rideau de palplanches au droit de l'usine Fibre Excellence. Il a été pris en compte par un dimensionnement et un fichage approprié du rideau

Ce scénario n'intéresse en Camargue Insulaire, aucun tronçon. La seule zone possédant des palplanches en cœur de digue est le tronçon 4 de la digue d'Albaron or sur cette zone la digue est de très faible hauteur, le TN étant localement élevé.

6.1.1.4 Fissuration d'une recharge par claquage hydraulique

Ce mécanisme de rupture correspond à la formation d'une fissuration dans la recharge aval par claquage hydraulique. La figure suivante présente un test Erinoh réalisé dans le laboratoire de CNR :

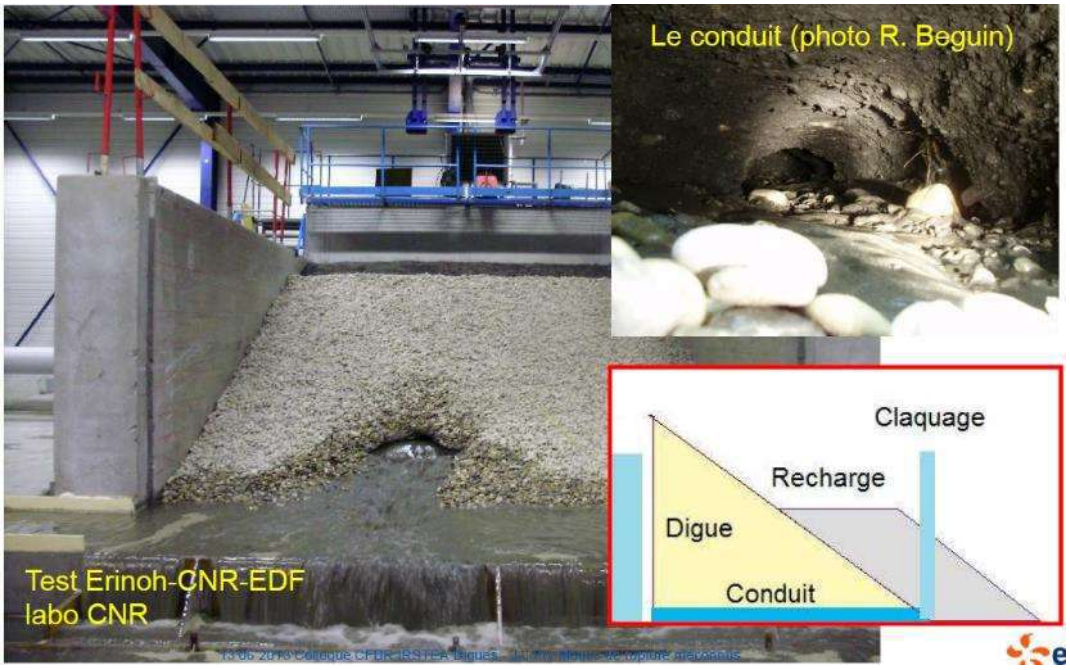


Photo 14. Test Erinoh - Extrait : Colloque CFBR IRSTEA Digues –J-J Fry

Ce scénario intéresse l'ensemble des digues du SYMADREM. Il a été pris en compte et estimé dans les différents scénarios de brèche.

Il existe également d'autres modes de rupture par fissuration liés à la vidange rapide comme :

- Effet de la fissuration pendant les vidanges rapides répétées
- Effet des cycles de vidanges rapides sur l'érosion régressive et le glissement

6.1.2 Instabilité par liquéfaction

Le phénomène de liquéfaction concerne certaines formations géologiques, définies par :

- Leur nature : sables, limons, vases
- Leur cohésion : formations peu compactes
- Leur degré de saturation en eau : la formation doit être saturée en eau,
- Leur granulométrie : granulométrie uniforme, comprise entre 0.05 et 1.5 mm

La liquéfaction se produit particulièrement pendant les séismes sous de brèves sollicitations. Elle est donc effective lorsque les pressions interstitielles avoisinent la pression de confinement, diminuant ainsi (jusqu'à annuler) les contraintes effectives du matériau. Il est donc pour cela nécessaire que le matériau considéré soit saturé. De plus, il apparait que la granulométrie du matériau considéré a une certaine importance, les sols susceptibles de liquéfier sous chargement cyclique étant sableux ou silteux.

Etat initial

Etat à liquéfaction

A l'échelle microscopique, le phénomène peut être représenté comme sur la figure suivante :

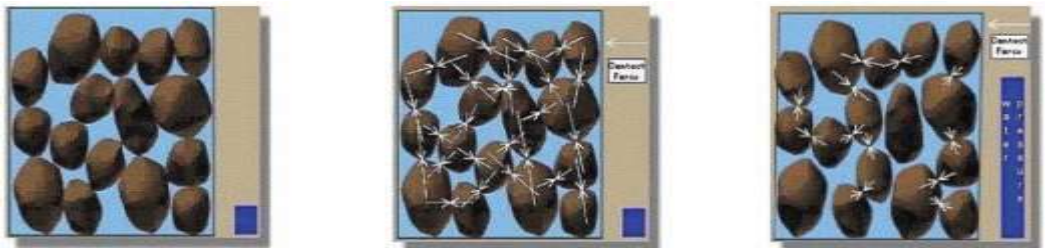


Figure 102. Phénomène de liquéfaction à l'échelle microscopique

D'après les retours d'expérience les ruptures de digues essentiellement liées à des phénomènes de liquéfaction sont rencontrées au Japon et à la Nouvelle Zélande. La présence d'anciens bras de rivière est souvent suspectée (paléo-chenaux).

La figure suivante présente les étapes de rupture par liquéfaction de la digue sur la rivière Tokashi suite à un séisme en 1993 de magnitude 7.8 et d'une accélération maximale a_{max} de 0.4 g.

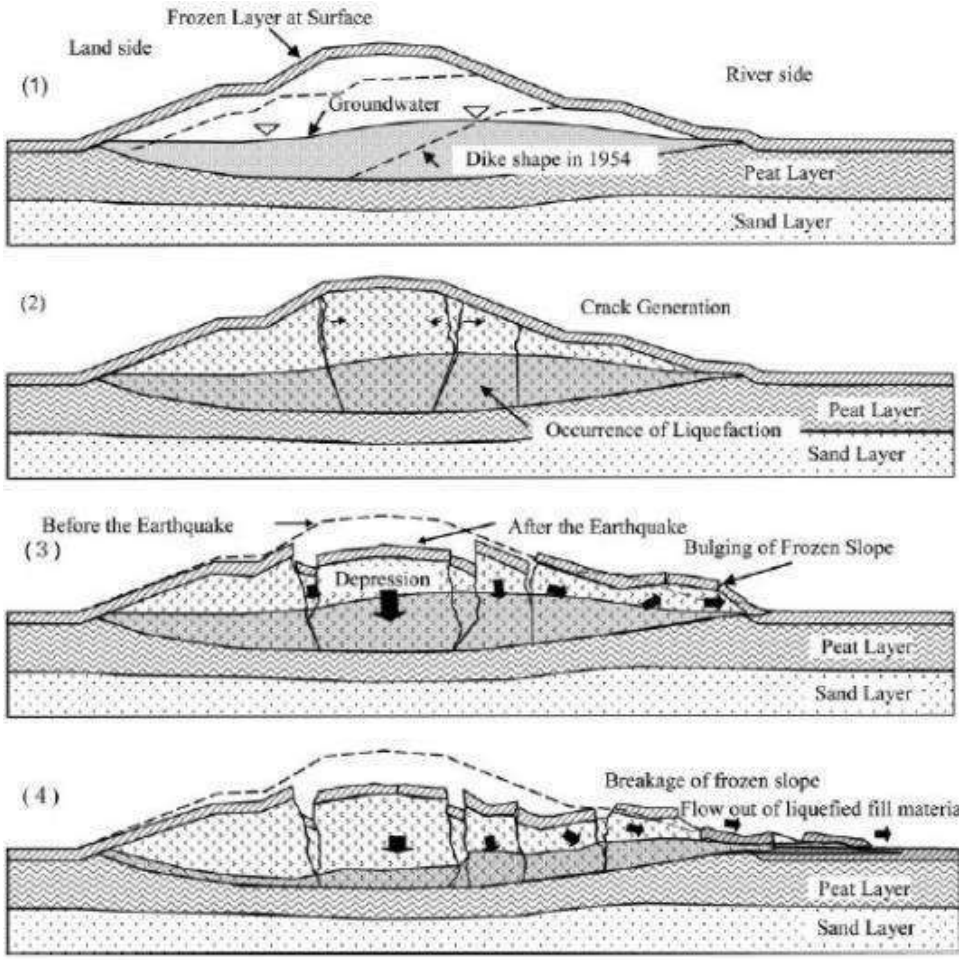


Figure 103. Liquéfaction de la digue sur la rivière Tokashi - 1993

La liquéfaction sous sollicitation sismique en basse vallée du Rhône et plus particulièrement entre Beaucaire et Fourques a fait l'objet de travaux de recherche par IRSTEA (Bambara & Al. 2013 [X035]).

Suivant cette communication, l'aléa sismique en basse vallée du Rhône n'est pas négligeable. IRSTEA a retenu deux approches. L'approche déterministe et l'approche probabiliste. Dans le cas étudié, l'approche déterministe apparaît nettement plus pénalisante que l'approche probabiliste appliquée avec un aléa de période de retour 475 ans [X035].

Suivant le lieu de l'épicentre et l'intensité du séisme, l'organisation mise en place par le SYMADREM prévoit soit une visite de surveillance, soit une visite technique approfondie.
Le dernier grand séisme dans la région a été celui de Lambesc en 1908, suivi d'une crue importante en 1910.
La probabilité d'avoir un séisme pouvant causer des désordres sur un ouvrage, suivi d'une crue potentiellement dommageable est inférieure au seuil d'acceptabilité du risque. En conséquence, il n'est pas nécessaire d'estimer plus précisément ce seuil pour les ouvrages anciens.
Pour les ouvrages neufs, la stabilité des ouvrages est vérifiée suivant les recommandations CFBR [X020].

6.1.3 Exsolution ou libération de gaz

L'ex-solution est le phénomène de formation de bulles de gaz dans un liquide parvenu à saturation. La limite de saturation d'un gaz dans un liquide dépend de deux facteurs qui sont la quantité totale de gaz et la pression du liquide (c'est à-dire la profondeur dans le cas d'une rivière) :

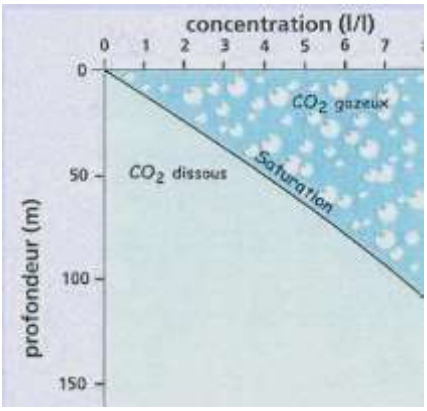


Figure 104. Limite de saturation et de dégazage du CO2

Une étude en laboratoire a été réalisée qui correspond à la libération d'air occlus suite à un tassement différentiel du sable saturé (J-J-Fry) :

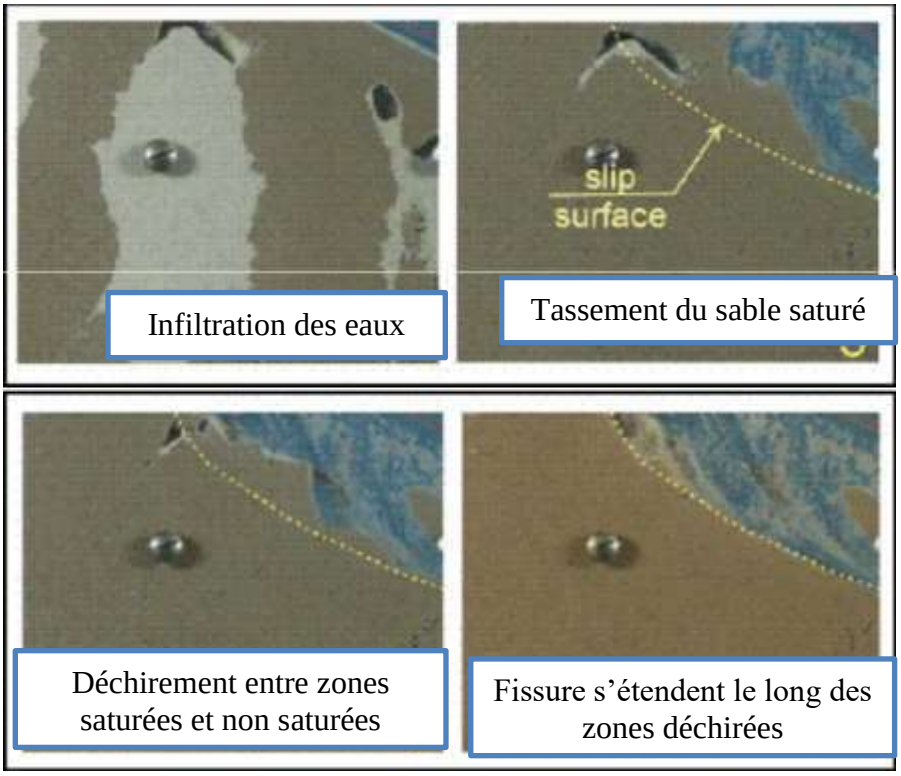


Figure 105. Tassement différentiel et libération d'air occlus-Extrait : Colloque CFBR IRSTEA Digues –J-J Fry

Ce type de désordre n'a pas à ce jour été pris en compte dans les digues du SYMADREM.

6.2 MECANISMES DE RUPTURE AFFECTANT LES OUVRAGES POIDS ET RIDEAUX DE PALPLANCHES

En rive gauche, ces mécanismes concernent les ouvrages suivants

- Le parapet de la digue de la Montagnette
- Les quais de Tarascon (mur + parapet)
- Les murs du Château Royal de Provence
- Le rideau de palplanches au droit de l'usine Fibre Excellence
- Les quais d'Arles (mur + parapet)
- Le muret au droit du remblai dit de l'IRPA
- l'écluse d'Arles gérée par VNF,
- l'écluse du Canal du Rhône à Fos gérée par la CNR,

Ces mécanismes ont été évalués dans les études de projet menés par les maîtres d'œuvre des travaux.

En Camargue Insulaire, ces mécanismes concernent les ouvrages suivants

- Les quais d'Arles (mur + parapet)

Ces mécanismes ont été évalués dans les études de projet menés par les maîtres d'œuvre des travaux.

7 CARACTERISATION DE LA SURVEILLANCE, DETECTION ET INTERVENTION EN PERIODES DE CRUES

7.1.1 Surveillance et détection

Les modalités de surveillance et d'interventions en périodes de crues pour chaque groupe d'ouvrages ont été décrites dans le Chapitre n°9 de l'Etude de Dangers. La figure suivante représente la répartition des groupes d'ouvrages sous gestion SYMADREM dans le Delta:

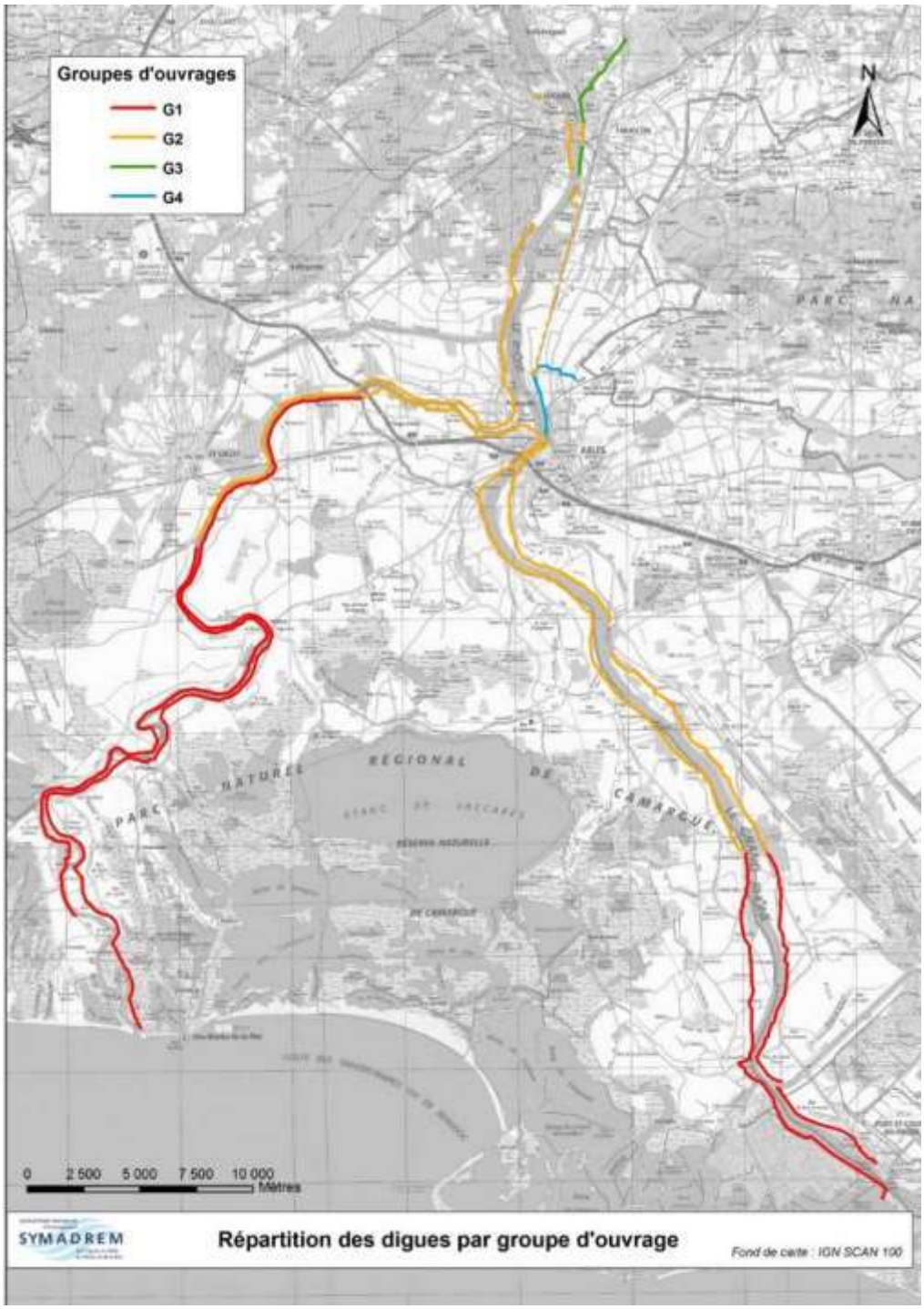


Figure 106. Répartition des groupes d'ouvrages

Les seuils d'états d'alerte en fonction des groupes d'ouvrages et des débits en tête de Delta sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau 42. Seuils d'états d'alerte

<table>
<tr><th>Débit (m³/s)
Beaucaire/Tarascon</th><th>Etat d'alerte
Groupe G1</th><th>Etat d'alerte
Groupe G2</th><th>Etat d'alerte
Groupe G3</th><th>Etat d'alerte
Groupe G4</th></tr>
<tr><td>4 200</td><td>Pré alerte</td><td>Pré alerte</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="3">Pré-alerte
Alerte1</td></tr>
<tr><td>5 500</td><td>Alerte 1</td><td rowspan="2">Alerte 1</td></tr>
<tr><td>6 750</td><td rowspan="2">Alerte 2</td></tr>
<tr><td>7 500</td><td rowspan="2">Alerte 2</td><td>Pré Alerte</td><td>Alerte 2-3</td></tr>
<tr><td>8 400</td><td rowspan="6">Alerte 3</td><td>Alerte 1</td><td></td></tr>
<tr><td>9 000</td><td rowspan="5">Alerte 3</td><td>Alerte 2</td><td></td></tr>
<tr><td>10 500</td><td rowspan="4">Alerte 3</td><td>Pré-alerte</td></tr>
<tr><td>11 500</td><td>Alerte 1</td></tr>
<tr><td>12 000</td><td>Alerte 2</td></tr>
<tr><td>12 500</td><td>Alerte 3</td></tr>
<tr><td>Niveau de sûreté
(entre 8500 et 14 160)</td><td>Alerte 4</td><td>Alerte 4</td><td>Alerte 4</td><td>Alerte 4</td></tr>
</table>

La surveillance des ouvrages, en fonction de l'évolution de la crue, est assurée suivant trois types d'organisation (Cf. Chapitre n°9):

Tableau 43. Types d'organisation selon les seuils d'états d'alerte

Seuils d'états d'alerte	**Type d'organisation**
Pré alerte et Alerte 1	Surveillance (renforcée) des points fragiles par les gardes digues
Alerte 2 et Alerte 3	Surveillance linéaire par les équipes de surveillance communales encadrées par les gardes digues Diurne en alerte 2 et 24/24 en alerte 3
Alerte 4	Surveillance (renforcée) des points fragiles par les gardes digues + Hélicoptère éventuel (Etat-Major Inter-Zones)

La probabilité de non détection d'un désordre en période de crues dépend de deux paramètres :

- le délai entre la détection du désordre et la formation de la brèche,
- le mode de surveillance mis en place qui dépend des seuils d'alerte (fréquence de passage des équipes de surveillance).

Le seuil d'alerte 4 correspond à l'atteinte du niveau de sûreté. Il a été défini lors de l'établissement du diagnostic initial exigé par la réglementation dans l'attente d'une meilleure définition lors de la revue de sûreté des ouvrages (décret 2007) ou lors des études de dangers système (décret 2015).

En-dessous de ce seuil, la surveillance est assurée par les équipes communales qui cheminent à pied, en crête et en pied de digue et par les gardes digues qui les supervisent en véhicules.

Au-delà du seuil d'alerte, la surveillance est limitée aux seuls gardes-digues, qui circulent en véhicules et éventuellement par hélicoptère(s) mis à disposition par l'Etat-Major Inter-Zones.

La figure ci-dessous illustre les niveaux de sûreté sommaires retenus à ce jour.

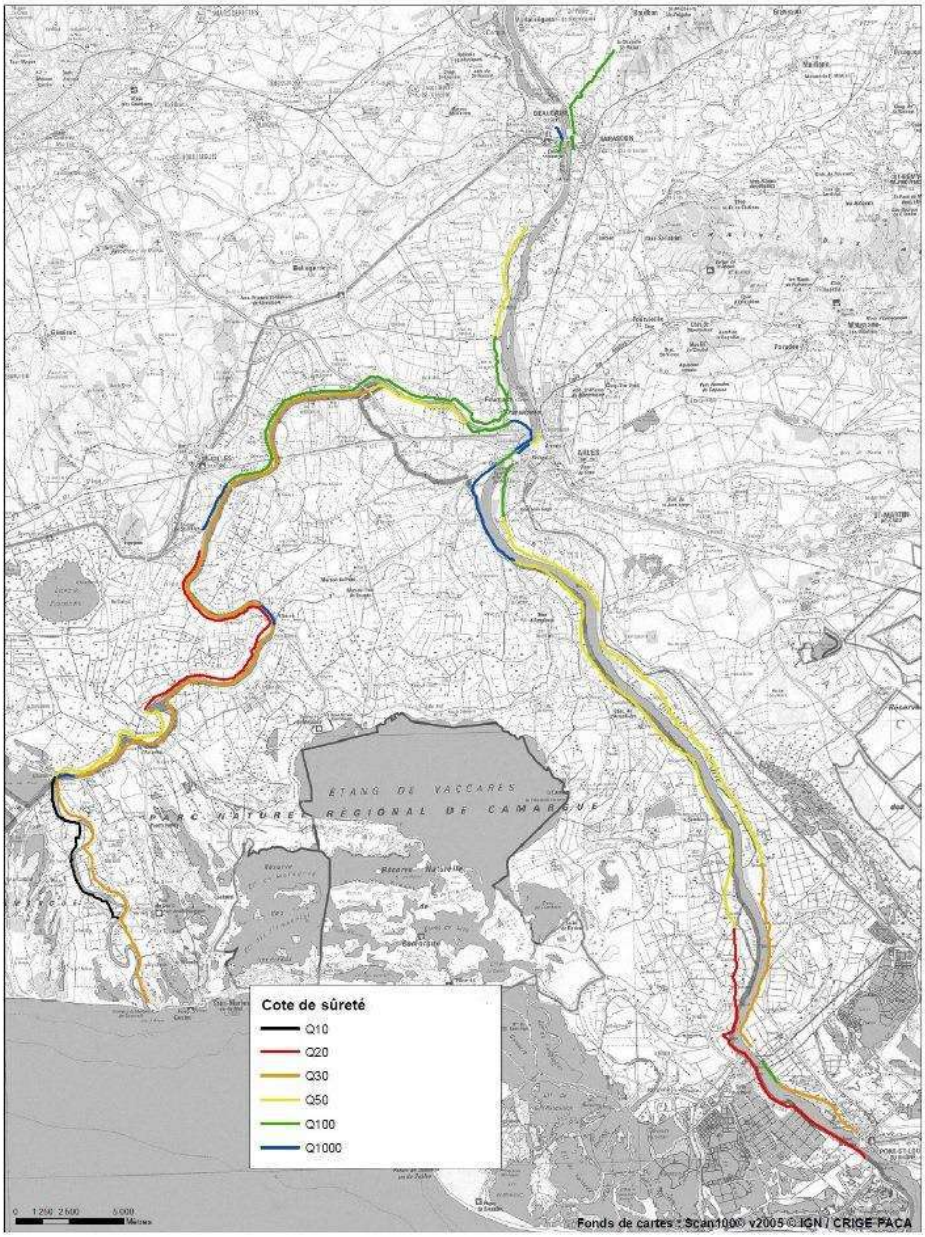


Figure 107. Niveaux de sûreté sommaire retenus provisoirement pour la définition de l'état d'alerte 4

La durée entre deux passages à un même endroit de la digue dépend de la longueur du secteur de surveillance, de la durée de vacations des équipes, qui n'est pas la même suivant les communes.

On estime que cette durée (pas de surveillance) est de :

- 6 heures en pré-alerte et alerte 1 (surveillance gardes-digues).
- 6 heures en alerte 2 (surveillance de jour - équipes communales et gardes-digues),
- 3 heures en alerte 3 (surveillance 24h/24 - équipes communales et gardes-digues),
- 6 heures en alerte 4 (équipes communales évacuées ; surveillance gardes-digues).

La probabilité de non détection depuis la possibilité de visualisation du désordre jusqu'à la formation de la brèche est estimée par la formule suivante :

$$P_{non\ détection} = \mathrm{MAX}\left(0{,}1; \left(1 - \frac{\Delta t_u}{P_s}\right)\right)$$

Avec :

P_s : pas de surveillance (3 heures en alerte 3 et 6 heures pour les autres niveaux d'alerte)

Δt_u : temps entre la détection du désordre et la formation de la brèche

7.1.2 Intervention d'urgence

La technique d'intervention par scénario de brèche est décrite en Chapitre n°9. A partir de la détection par les équipes de surveillance ou par les gardes-digues, le temps d'intervention va dépendre de plusieurs paramètres :

- La carrossabilité en crête
- La largeur de la crête
- La proximité d'accès
- La présence d'une piste en pied aval et le cas échéant la carrossabilité ou non de cette piste

Compte tenu du retour d'expérience du SYMADREM sur ce type d'intervention, le temps d'intervention (transport + traitement du désordre ou départ de brèche) retenu pour l'analyse de risque est de :

- 3 heures pour les digues carrossables,
- 24 heures pour les digues non carrossables.

Il est à noter que depuis janvier 2016, toutes les digues du SYMADREM sont carrossables à l'exception des digues du Petit Rhône en aval du PRD 326 et du PRG 330 au PRG 336.

La probabilité de non intervention avant formation de la brèche est estimée par la formule suivante :

$$P_{non\ intervention} = \mathrm{MIN}\left(1; \frac{\Delta t_i}{\Delta t_u}\right)$$

Avec :

Δt_i : temps d'intervention

Δt_u : temps entre la détection du désordre et la formation de la brèche

8 SCENARIOS DE BRECHE

8.1 SCENARIO DE BRECHE N°1 : CLAQUAGE HYDRAULIQUE D'UN ANCIEN TERRIER DE BLAIREAU PARTIELLEMENT COLMATE ET EROSION DE CONDUIT

8.1.1 Description du scénario

Ce scénario de brèche a été observé par le passé, notamment lors des crues de 1993 et 1994.

Les terriers de blaireaux sont facilement visibles depuis un simple examen visuel en crête de digue même à bord d'un véhicule. Ils peuvent être observés sur les talus amont comme aval. Ils sont détectés par les gardes digues lors des visites de surveillance (2 visites par mois), lors des visites techniques approfondies (1 par an) ainsi que pendant la pré-alerte et l'alerte 1.
Ils sont donc traités dans le cadre du marché de travaux d'entretien avant même la mise en charge des digues (Cf. Chapitre n°9). La probabilité de localisation d'un terrier de blaireau détectable par examen visuel lors de la mise en charge des digues est donc très faible.

Si aujourd'hui, ces terriers sont traités par ouverture complète de la digue, purge intégrale des terriers et remblaiement de la digue par fines couches compactées, il n'en a pas toujours été de même. En effet, pendant de longues années, ces terriers ont été soit comblés partiellement par colmatage manuel du trou (avec une dame). Ce cas est surtout valable pour les digues du XIX^{ème} siècle qui n'ont pas fait l'objet d'intervention depuis leur création il y a plus de 150 ans.

L'apparition d'un ancien terrier partiellement colmaté, par claquage hydraulique suivie d'une érosion de conduit a été observée en 2002 et 2003. Ce scénario de brèche doit être donc considéré. La figure ci-dessous en illustre la représentation.

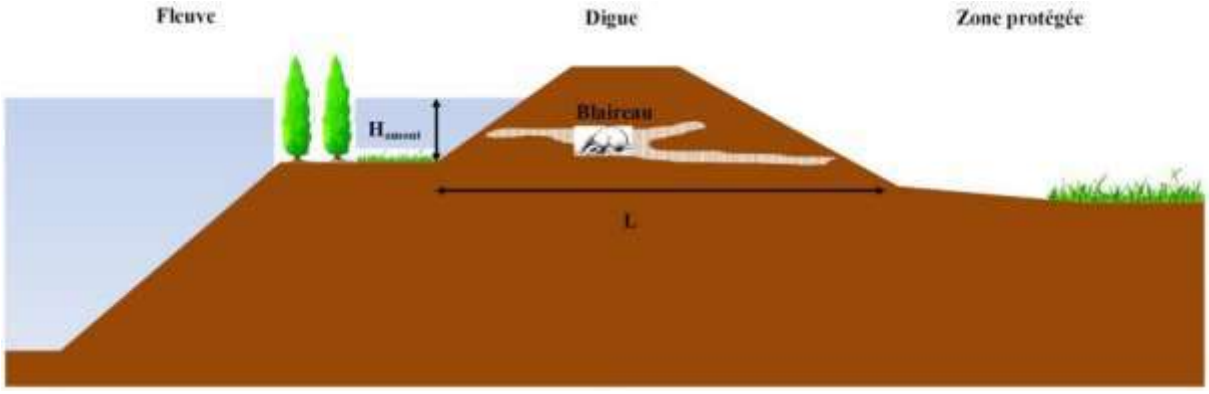


Figure 108. Scénario de brèche n°1 : claquage hydraulique d'un terrier partiellement colmaté et érosion de conduit

Les différentes étapes du scénario de brèche peuvent être représentées suivant l'arbre d'événements suivant :

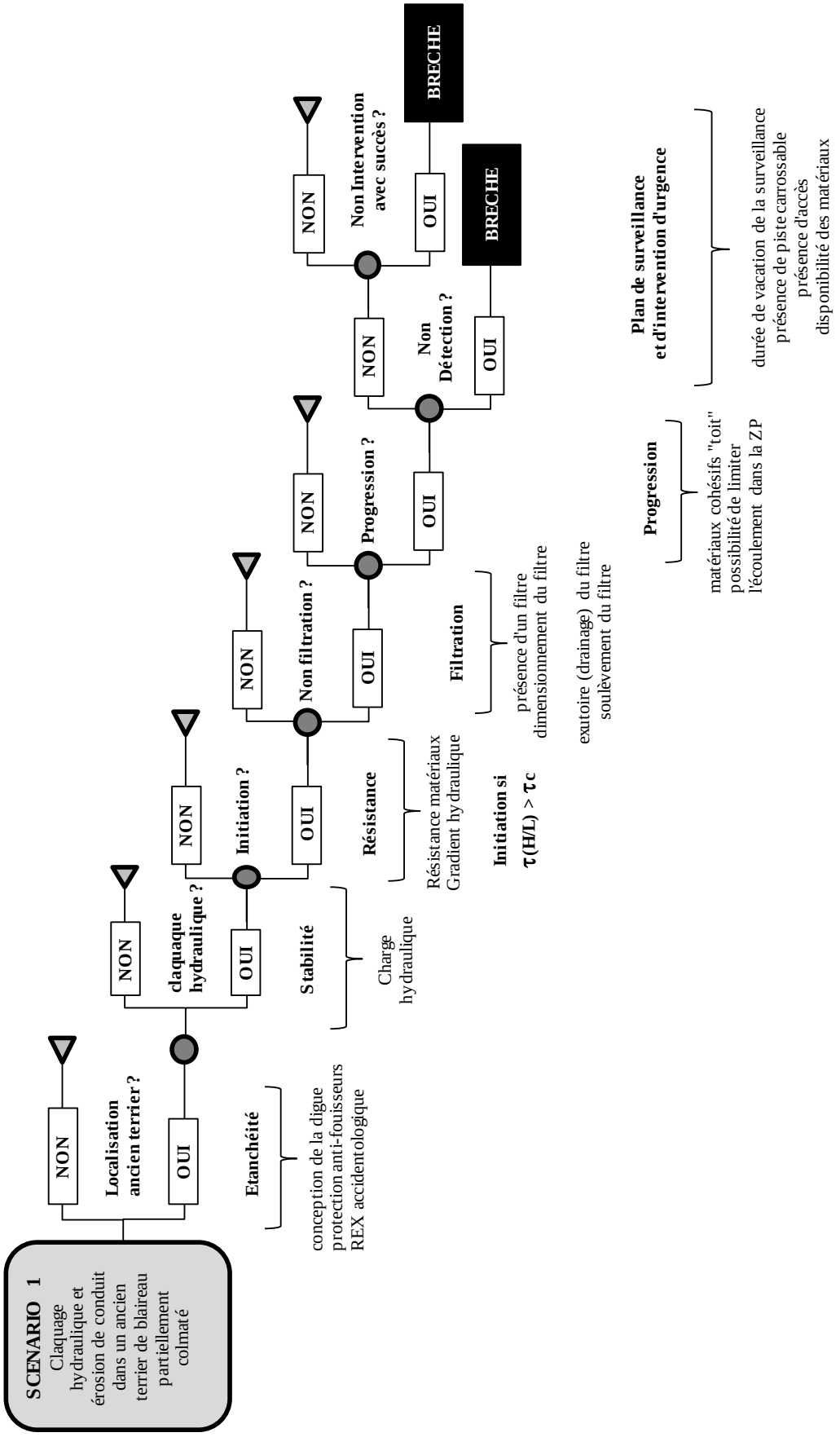


Figure 109. Arbre d'événements du scénario de brèche n°1

Le scénario de brèche s'écrit sous la forme suivante :

$$P(brèche) = P_{localisation} \cdot P_{claquage} \cdot P_{initiation} \cdot P_{non\ filtration} \cdot P_{progression} \cdot [P_{non\ détection} + (1 - P_{non\ détection}) \cdot P_{non\ intervention}]$$

Avec :

$P_{localisation}$:	Probabilité de localisation d'un ancien terrier potentiellement traversant après mise en charge de la digue,
$P_{claquage}$:	Probabilité de claquage hydraulique du bouchon de colmatage,
$P_{initiation}$:	Probabilité d'initiation d'érosion de conduit dans le terrier,
$P_{non\ filtration}$:	Probabilité que les particules entraînées par l'érosion ne soient pas bloquées et cheminent jusqu'à un exutoire non filtré,
$P_{progression}$:	Probabilité que le processus se poursuive sans stabilisation et déclenche un autre phénomène (tassement, instabilité, affaissement) ou s'accélère,
$P_{non\ détection}$:	Probabilité de non détection du désordre par les gardes-digues ou par les équipes de surveillance lors de la crue,
$P_{non\ intervention}$:	Probabilité de non intervention en cas de détection du désordre.

8.1.2 Probabilité de localisation

Suivant l'analyse fonctionnelle réalisée sur les différents types de conception de digue et plus particulièrement des fonctions Etanchéité, Résistance et Protection, on considère les cas suivants :

1. Les digues ayant fait récemment l'objet de travaux de confortement consistant en la mise en œuvre d'un masque étanche côté fleuve en matériau A2 et d'un engraissement côté terre avec la pose de grillages anti-fouisseurs sur les deux talus,
2. Les digues ayant fait récemment l'objet de travaux de confortement consistant en la mise en œuvre d'un masque étanche côté fleuve en matériaux A1+A2 et d'un engraissement côté terre avec la pose de grillages anti-fouisseurs sur les deux talus,
3. Les digues ayant fait récemment l'objet de travaux de confortement consistant à démonter l'ancienne digue et en construire une nouvelle avec des matériaux A1+A2 avec la pose de grillages anti-fouisseurs sur les deux talus,
4. Les digues ayant fait récemment l'objet de travaux de confortement consistant à démonter l'ancienne digue et en construire une nouvelle avec des matériaux A1+A2 sans la pose de grillages anti-fouisseurs sur les deux talus,
5. Les digues ayant fait récemment l'objet de travaux de confortement consistant en la mise en œuvre d'un engraissement côté fleuve sans connaissance précise du matériau et sans la pose de grillages anti-fouisseurs sur les deux talus,
6. Les digues avec un remblai CNR très large adossé à l'ouvrage de protection,
7. Les digues avec un perré bétonné ou maçonné figurant sur la carte des ponts et chaussées de 1876 mais non visibles (état incertain),
8. Les digues avec un perré bétonné ou maçonné en bon ou très bon état,
9. Les rideaux de palplanches

10. Les digues du XIX^{ème} siècle damées manuellement n'ayant fait l'objet d'aucuns travaux de confortement ou d'un engraissement aval sans intervention sur l'amont avec un retour d'expérience accidentologique négatif en matière de terriers de blaireaux (présence avérée d'anciens terriers),
11. Les digues du XIX^{ème} siècle damées manuellement n'ayant fait l'objet d'aucuns travaux de confortement ou d'un engraissement aval sans intervention sur l'amont avec un retour d'expérience accidentologique neutre en matière de terriers de blaireaux.

On retient les probabilités de localisation suivante

Tableau 44. Probabilité de localisation d'un ancien terrier de blaireau

Type de conception	Probabilité de localisation d'un ancien terrier
1 - Masque A2 côté amont + engraissement côté aval avec grillage	0,01
2 – Masque A1+A2 côté amont + engraissement côté aval avec grillage	0,01
3 – Nouvelle digue A1+A2 avec grillage	0,001
4 – Nouvelle digue A1+A2 sans grillage	0,01
5 – Engraissement amont sans intervention côté aval et sans grillage	0,05
6 – Digue adossée à un remblai CNR	0,001
7 – Digue XIXème siècle avec perré(s) dans un état incertain	0,1
8 – Digue confortée avec perré(s) rénové(s) en bon état	0,001
9 – Rideau de palplanches	0,001
10 – Digue XIX^{ème} siècle avec ou sans engraissement aval avec REX neutre	0,1
11 – Digue XIX^{ème} siècle ou sans engraissement aval avec REX négatif	0,5

8.1.3 Probabilité de claquage hydraulique d'un ancien terrier

La probabilité de claquage hydraulique est liée à la fonction Stabilité. Pour l'analyse de risque, on considère :

- une épaisseur du bouchon respectivement de 1 m pour les digues d'origine et de 4 m pour les digues ayant fait l'objet notamment d'un engraissement lors de travaux de confortement
- le terrier est calé à la cote du ségonnal ;
- la hauteur d'eau est calculée par rapport à la cote du ségonnal avant le claquage hydraulique (pied de digue amont). En l'absence de ségonnal, la hauteur d'eau est calculée à partir de la cote du pied de digue aval (zone protégée).

On définit alors le facteur *F* de sécurité pour chaque profil géométrique et chaque crue suivant la formule définie au §. 3.2.

Tableau 45. Probabilité de claquage hydraulique en fonction du facteur de sécurité

Facteur F	Probabilité de claquage	Qualification verbale
0,9	0,99	Très probable
1	0,9	probable
1,1	0,5	Neutre
1,2	0,1	peu probable
1,3	0,01	Très peu probable
1,4	0,001	Quasiment impossible

La probabilité de claquage hydraulique est déterminée par la fonction de répartition suivante :

$$P_{claquage} = MAX\left[\exp\left(-\exp\left(\left(\frac{F-1{,}131}{0{,}103}\right)\right)\right); 0{,}001\right]$$

Avec *F* : facteur de sécurité

Pour les nouvelles digues, on retient une probabilité de claquage de 0.001 (très peu probable)

8.1.4 Probabilité d'initiation de l'érosion de conduit

La probabilité d'initiation est liée à la fonction Résistance du corps de digue. Elle est estimée pour chaque profil et chaque crue, en fonction du gradient hydraulique dans le conduit *i (i > 0)*, à partir des équations suivantes :

Pour les matériaux mélangés (A1+A2) :

$$P_{initiation} = MAX[Min[(4{,}905.i)^{0{,}6}; 1]\,; 0{,}001]$$

Pour les matériaux A2 :

$$P_{initiation} = MAX\left[\exp\left(-\exp\left(-(26{,}16.i - 2{,}81)\right)\right); 0{,}001\right]$$

La figure ci-dessous illustre pour les deux types de matériaux, l'évolution de la probabilité d'initiation en fonction du gradient hydraulique dans le conduit.

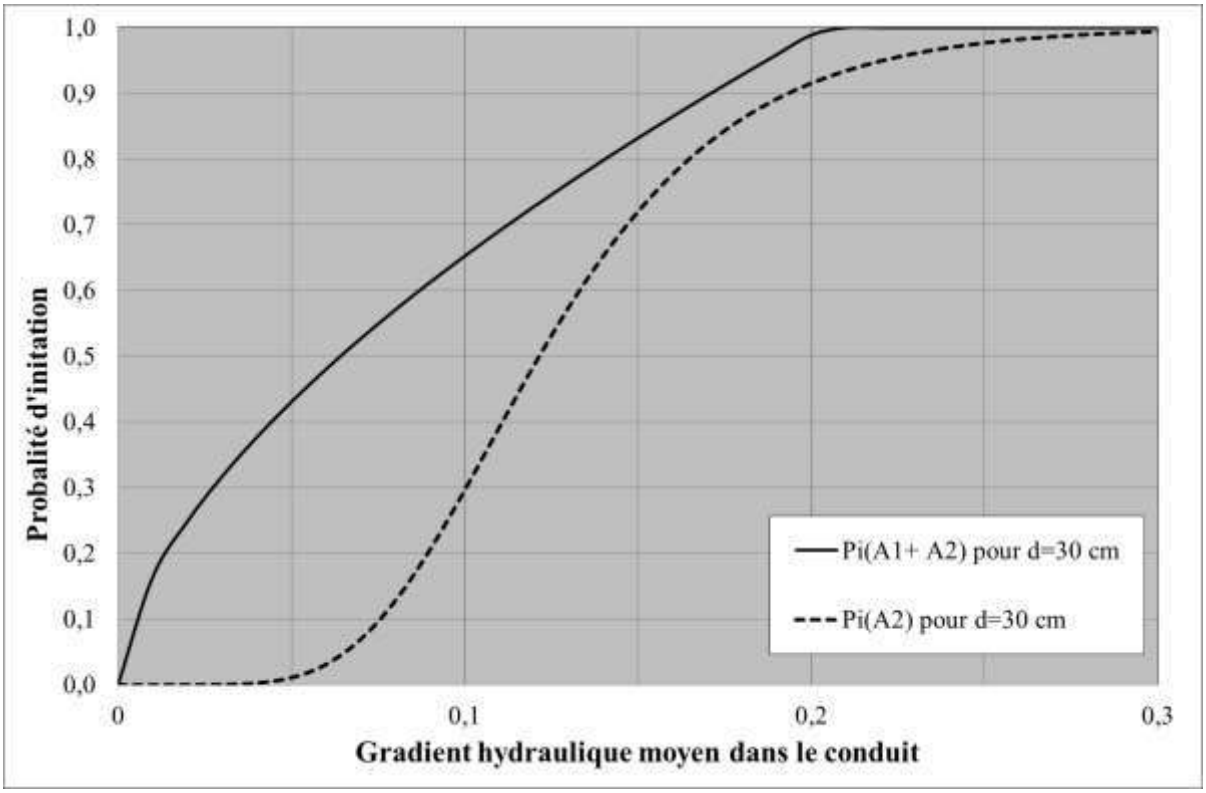


Figure 110. Probabilité d'initiation en fonction du gradient hydraulique et type de sols

8.1.5 Probabilité de non filtration

La probabilité de non filtration est liée aux fonctions Filtration, Drainage, Stabilité et Protection. Les valeurs retenues sont celles définies au chapitre 2.7.

8.1.6 Probabilité de progression

La probabilité de progression est estimée par la formule définie au chapitre 2.8.

8.1.7 Probabilité de non détection

La probabilité de non détection est liée à la fonction Sécurité. La figure ci-après donne les temps de rupture d'une digue pour les deux types de matériaux en fonction du gradient hydraulique dans le conduit.

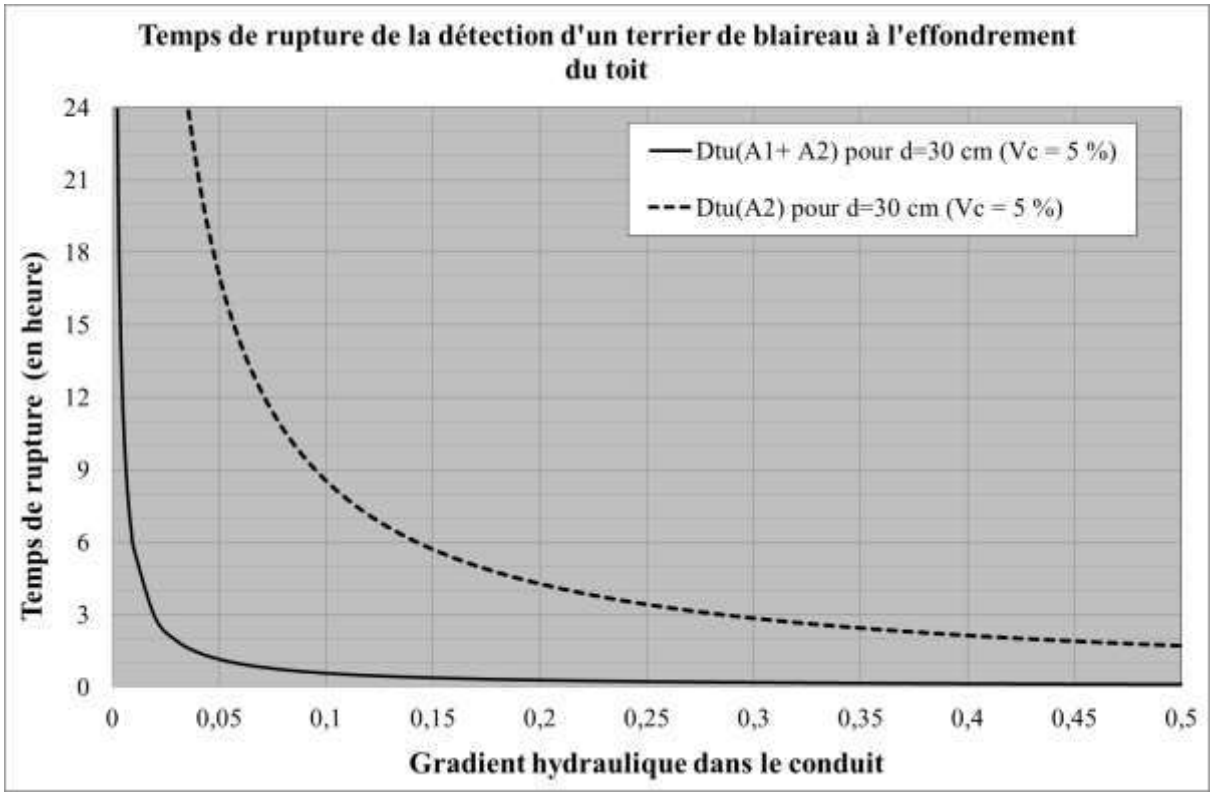


Figure 111. Temps de rupture de la détection d'un terrier de blaireau à l'effondrement du toit

La probabilité de non détection, depuis la possibilité d'observation du désordre jusqu'à la formation de la brèche, est déterminée par les formules suivantes (Cf. chapitres 2.1. et 7.) :

Pour les matériaux mélangés (A1+A2) :

$$P_{non\ détection} = \mathrm{MAX}\left(0{,}1; \left(1 - \frac{0{,}06}{P_s . i}\right)\right)$$

et pour les matériaux A2 :

$$P_{non\ détection} = \mathrm{MAX}\left(0{,}1; \left(1 - \frac{0{,}86}{P_s . i}\right)\right)$$

Avec :

i : gradient hydraulique dans le conduit
P_s : pas de surveillance en heures (3 h en alerte 3 et 6 h pour les autres niveaux d'alerte)

8.1.8 Probabilité de non intervention

La probabilité de non intervention, depuis la détection du désordre jusqu'à la formation de la brèche est déterminée par les formules suivantes (Cf. chapitres 2.1. et 7.) :

pour les matériaux mélangés (A1+A2) :

$$P_{non\ intervention} = \text{MIN}\left(1; \frac{\Delta t_i . i}{0{,}06}\right)$$

et pour les matériaux A2 :

$$P_{non\ intervention} = \text{MIN}\left(1; \frac{\Delta t_i . i}{0{,}86}\right)$$

Avec :

i : gradient hydraulique dans le conduit

Δt_i : temps d'intervention (3h pour les digues carrossables et 24 h pour les digues non carrossables)

La figure ci-après illustre pour le scénario de brèche n°1 : l'évolution de :

- la probabilité de non détection en fonction de la nature du matériau érodé, du pas de surveillance et du gradient dans le conduit ;
- la probabilité de non intervention en fonction de la nature du matériau érodé, du temps d'intervention et du gradient dans le conduit.

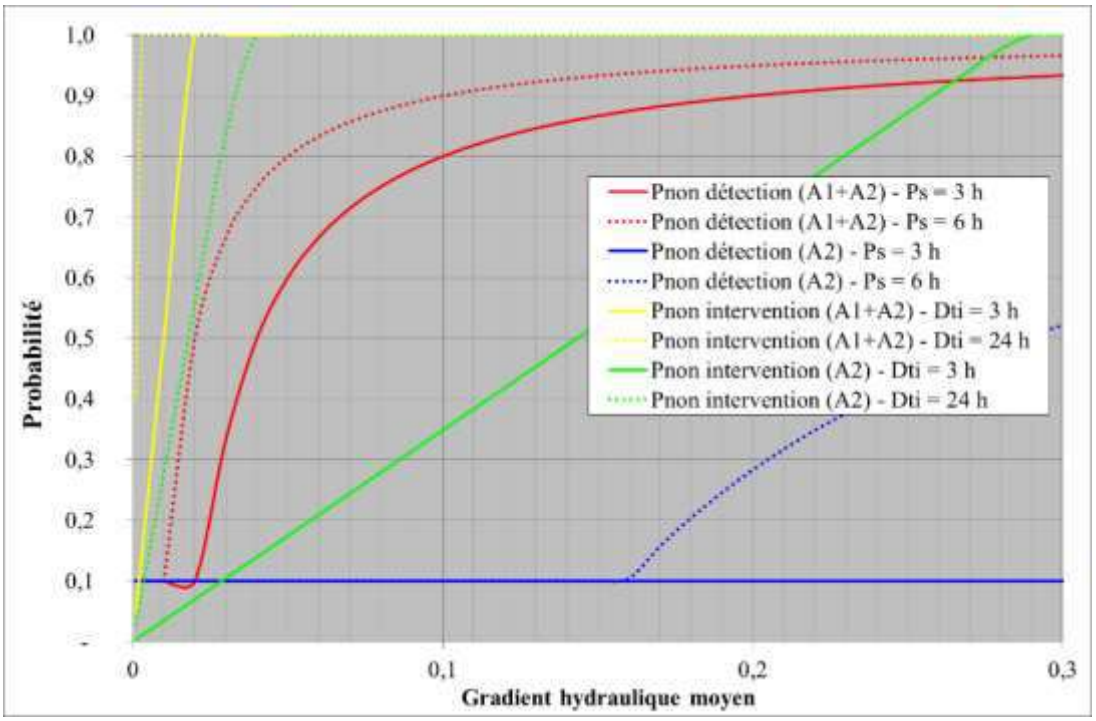


Figure 112. Scénario de brèche n°1 : probabilités de non détection et non intervention

8.2 SCENARIO DE BRECHE N°2 : EROSION DE CONDUIT DANS UN VIDE LE LONG D'UN OUVRAGE HYDRAULIQUE OU D'UNE TRANSITION TRAVERSANT

8.2.1 Description du scénario

Le scénario de brèche n°2 est celui d'une érosion de conduit le long d'un ouvrage ou d'une transition traversant la digue. Ce scénario de brèche a été observé par le passé, notamment lors de la crue d'octobre 1993. L'origine du vide traversant la digue peut être notamment le suivant :

- Défaut de compactage autour d'un ouvrage
- Défaut d'étanchéité externe de l'ouvrage traversant pouvant être lié au vieillissement de l'ouvrage, son manque d'entretien ou un tassement différentiel

Le vide peut être également l'aboutissement d'un processus d'érosion régressive si la conduite a été enrobée dans un sable fin érodable ou d'un processus d'érosion de contact si la conduite a été posée dans un matériau très perméable. Ces scénarios sont possibles mais néanmoins moins probables que celui lié à la présence d'un vide entre l'ouvrage traversant et le remblai.

Plusieurs scénarios d'érosion de conduit peuvent être envisagés :

- Erosion le long de la conduite depuis le fleuve (scénario 2.1)
- Erosion le long de la conduite depuis la base de la digue (scénario 2.2.)

La figure ci-dessous illustre la représentation du scénario de brèche envisagé.

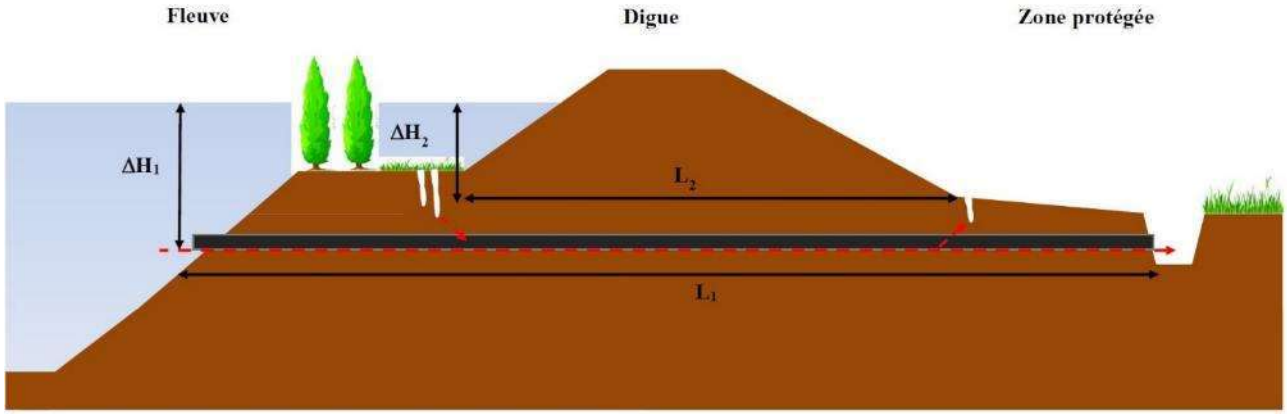


Figure 113. Scénario de brèche n°2 : érosion de conduit le long d'un ouvrage traversant la digue

Les différentes étapes du scénario de brèche peuvent être représentées suivant l'arbre d'événements suivant :

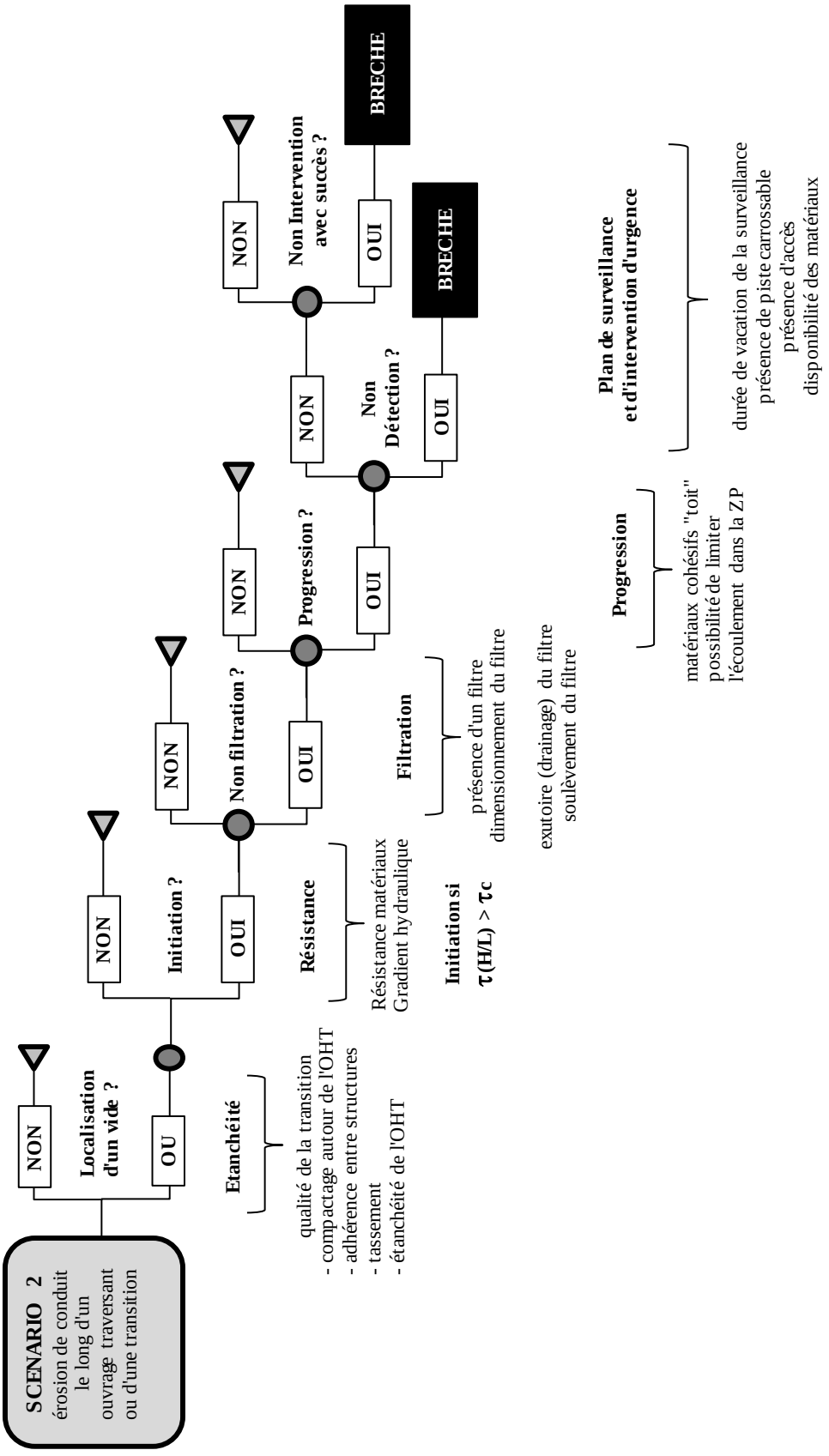


Figure 114. Arbre d'événements du scénario de brèche n°2

Le scénario de brèche s'écrit sous la forme suivante :

$$P(brèche) = P_{localisation} \cdot P_{initiation} \cdot P_{non\ filtration} \cdot P_{progression} \cdot [P_{non\ détection} + (1 - P_{non\ détection}) \cdot P_{non\ intervention}]$$

Avec :

$P_{localisation}$:	Probabilité de localisation d'un vide le long d'un ouvrage traversant la digue,
$P_{initiation}$:	Probabilité d'initiation d'érosion de conduit dans ce vide traversant,
$P_{non\ filtration}$:	Probabilité que les particules entraînées par l'érosion ne soient pas bloquées et cheminent jusqu'à un exutoire non filtré,
$P_{progression}$:	Probabilité que le processus se poursuive sans stabilisation et déclenche un autre phénomène (tassement, instabilité, affaissement) ou s'accélère,
$P_{non\ détection}$:	Probabilité de non détection du désordre par les gardes-digues ou par les équipes de surveillance lors de la crue,
$P_{non\ intervention}$:	Probabilité de non intervention en cas de détection du désordre.

8.2.2 Probabilité de localisation

La probabilité de localisation d'un vide le long de l'ouvrage traversant ou d'une transition va dépendre de la qualité de la fonction Etanchéité et plus particulièrement de la bonne ou mauvaise adhérence de la structure rigide (ouvrage traversant) ou souple (autre remblai) avec le remblai de la digue. Les différents paramètres intervenant dans cette appréciation vont être :

- L'ouvrage est-il englobé dans du béton coulé pleine fouille ou dans une structure en béton repiqué après décoffrage ou dans une structure béton coffré avec un coffrage de type « Nerlat » ?
- Dans le cas d'un ouvrage béton ou d'une structure béton englobant une canalisation coffrée classiquement, la géométrie des parements (fruit < 10) a-t-elle permis un compactage et une adhérence de bonne qualité ?
- Dans le cas d'un ouvrage traversant un écran d'étanchéité de type palplanches, paroi moulée, l'interface entre la canalisation et l'écran a-t-elle été traitée (ouvrage béton, injection…) ?
- La présence de perré englobant le réseau traversant ou d'écran anti-renards permet également de limiter le débit à travers un vide traversant, à condition que la construction et le compactage aient été soignés et que ses structures soient en bon état.
- Dans le cas d'une transition entre deux remblais (digue et route par exemple), la réalisation de redans correctement dimensionnés et réalisés ou d'écrans tels que cités précédemment.
- L'étanchéité de l'ouvrage hydraulique (état du revêtement).

Dans le cas d'une structure béton ne traversant pas intégralement la digue, la possibilité de tassement différentiel à l'interface ouvrage/remblai est également prise en compte.

En fonction des résultats de l'analyse fonctionnelle des ouvrages traversants et des transitions, on retient les probabilités de localisation suivante :

Tableau 46. Probabilité de localisation d'un vide le long d'un ouvrage traversant ou d'une transition

Typologie de la transition	Probabilité de localisation d'un vide traversant
1°) Structure rigide réalisée sur l'ensemble de la traversée avec les composants suivants : - béton coulé pleine fouille, - coffrage de type NERLAT, - repiquage des parements béton après décoffrage, - géométrie des parements permettant un bon compactage (f < 10)	0,01
2°) Structure rigide non réalisée sur l'ensemble de la traversée (possibilité de tassement différentiel) avec les composants suivants : - béton coulé pleine fouille, - coffrage de type NERLAT, - repiquage des parements béton après décoffrage, - géométrie des parements permettant un bon compactage (f < 10)	0,03
3°) réseau traversant la digue sans les composants précités (béton pleine fouille, Nerlat, bonne géométrie des parements, repiquage béton) avec : - compactage autour de l'ouvrage probablement satisfaisant - étanchéité externe de l'ouvrage probablement satisfaisante	0,1
4°) réseau traversant la digue sans les composants précités (béton pleine fouille, Nerlat, bonne géométrie des parements, repiquage béton) avec : - compactage autour de l'ouvrage incertain ou douteux - étanchéité externe de l'ouvrage probablement satisfaisante	0,9
5°) réseau traversant la digue sans les composants précités (béton pleine fouille, Nerlat, bonne géométrie des parements, repiquage béton) avec : - compactage autour de l'ouvrage probablement satisfaisant - étanchéité externe de l'ouvrage incertaine ou douteux	0,9
6°) réseau traversant la digue sans les composants précités (béton pleine fouille, Nerlat, bonne géométrie des parements, repiquage béton) avec : - compactage autour de l'ouvrage incertain ou douteux - étanchéité externe de l'ouvrage incertaine ou douteux	0,99
7°) Réseau traversant un écran d'étanchéité (palplanches, paroi moulée, béton, perré) Présence d'injections/béton ou autre étanchéité autour de la fenêtre réalisée dans l'écran	0,01
8°) Réseau traversant un écran d'étanchéité (palplanches, paroi moulée, béton, perré) Traitement absent ou incertain de la fenêtre réalisée dans l'écran	0,1
9°) Transition entre deux remblais satisfaisante Présence de redans, ou d'écran correctement dimensionné	0,01
10°) Transition entre deux remblais incertaine	0,1

11 °) Présence de perrés ou murs de retour sur les talus amont/aval ou écran anti-renards correctement dimensionnés le long de l'ouvrage traversant	0,03
12 °) Présence de perrés ou murs de retour sur les talus amont/aval ou écran anti-renards (dimensionnement incertain) le long de l'ouvrage traversant	0,1
13°) Réseau en profondeur (fonçage présumé ou certain) (électricité, fibre et télécom)	0,001
14°) Canalisation en profondeur (fonçage présumé ou certain) (eau, gaz, hydrocarbure)	0,01

On note que la présence de perrés, murs ou écrans anti-renard vient également déterminer la probabilité d'initiation en allongeant le cheminement potentiel de l'eau dans le vide.
En cas de typologie de transitions multiples, la probabilité retenue est la valeur minimum des probabilités.

8.2.3 Probabilité d'initiation de l'érosion de conduit

La probabilité d'initiation va dépendre de la nature du matériau traversé (fonction Résistance) et du diamètre pressenti du conduit éventuel lui-même dépendant de la qualité de la transition. Les valeurs retenues sont les suivantes.

Tableau 47. Diamètre de conduit en fonction de la transition

Typologie de la transition	**Diamètre max du conduit (cm)**
1°) Structure rigide réalisée sur l'ensemble de la traversée avec les composants suivants : - béton coulé pleine fouille, - coffrage de type NERLAT, - repiquage des parements béton après décoffrage, - géométrie des parements permettant un bon compactage (f < 10)	0,5
2°) Structure rigide non réalisée sur l'ensemble de la traversée (possibilité de tassement différentiel) avec les composants suivants : - béton coulé pleine fouille, - coffrage de type NERLAT, - repiquage des parements béton après décoffrage, - géométrie des parements permettant un bon compactage (f < 10)	2
3°) réseau traversant la digue sans les composants précités (béton pleine fouille, Nerlat, bonne géométrie des parements, repiquage béton) avec : - compactage autour de l'ouvrage probablement satisfaisant - étanchéité externe de l'ouvrage probablement satisfaisante	1
4°) réseau traversant la digue sans les composants précités (béton pleine fouille, Nerlat, bonne géométrie des parements, repiquage béton) avec : - compactage autour de l'ouvrage incertain ou douteux - étanchéité externe de l'ouvrage probablement satisfaisante	2
5°) réseau traversant la digue sans les composants précités (béton pleine fouille, Nerlat, bonne géométrie des parements, repiquage béton) avec : - compactage autour de l'ouvrage probablement satisfaisant	2

- étanchéité externe de l'ouvrage incertaine ou douteux	
6°) réseau traversant la digue sans les composants précités (béton pleine fouille, Nerlat, bonne géométrie des parements, repiquage béton) avec : - compactage autour de l'ouvrage incertain ou douteux - étanchéité externe de l'ouvrage incertaine ou douteux	3
7°) Réseau traversant un écran d'étanchéité Présence d'injections/béton ou autre étanchéité autour de la fenêtre réalisée dans l'écran	0,5
8°) Réseau traversant un écran d'étanchéité Traitement absent ou incertain de la fenêtre réalisée dans l'écran	2
9°) Transition entre deux remblais satisfaisante Présence de redans, ou d'écran correctement dimensionné	0,5
10°) Transition entre deux remblais incertaine	2
11 °) Présence de perrés ou murs de retour sur les talus amont/aval ou écran anti-renards correctement dimensionnés le long de l'ouvrage traversant	1
12 °) Présence de perrés ou murs de retour sur les talus amont/aval ou écran anti-renards (dimensionnement incertain) le long de l'ouvrage traversant	1
13°) Réseau en profondeur (fonçage présumé ou certain) (électricité, fibre et télécom)	1
14°) Canalisation en profondeur (fonçage présumé ou certain) (eau, gaz, hydrocarbure)	1

La probabilité d'initiation est déterminée pour chaque ouvrage et chaque transition suivant la typologie de transition retenue et chaque crue à partir des équations suivantes définies au chapitre 2.2 :

Pour des matériaux traversés mélangés (A1+A2) :

$$P_{initiation} = MAX[Min[(0{,}102.i)^{0,6}; 1]; 0{,}001]$$ pour un conduit de 5 mm

$$P_{initiation} = MAX[Min[(0{,}204.i)^{0,6}; 1]; 0{,}001]$$ pour un conduit de 1 cm

$$P_{initiation} = MAX[Min[(0{,}409.i)^{0,6}; 1]; 0{,}001]$$ pour un conduit de 2 cm

$$P_{initiation} = MAX[Min[(0{,}613.i)^{0,6}; 1]; 0{,}001]$$ pour un conduit de 3 cm

Pour des matériaux traversés de type A2 :

$$P_{initiation} = MAX\left[\exp\left(-exp\left(-(0{,}545.i - 2{,}81)\right)\right); 0{,}001\right]$$ pour un conduit de 5 mm

$$P_{initiation} = MAX\left[\exp\left(-exp\left(-(1{,}09.i - 2{,}81)\right)\right); 0{,}001\right]$$ pour un conduit de 1 cm

$$P_{initiation} = MAX\left[\exp\left(-exp\left(-(2{,}18.i - 2{,}81)\right)\right); 0{,}001\right]$$ pour un conduit de 2 cm

$$P_{initiation} = MAX\left[\exp\left(-exp\left(-(3{,}27.i - 2{,}81)\right)\right); 0{,}001\right]$$ pour un conduit de 3 cm

avec i : gradient hydraulique dans le conduit (i > 0).

La figure ci-dessous illustre pour les deux types de matériau traversé et diamètre de conduit considéré l'évolution de la probabilité d'initiation en fonction du gradient hydraulique dans le conduit.

On constate que la probabilité d'initiation va essentiellement dépendre de la nature du matériau traversé. Dans un mélange de matériaux A1 + A2 suivant la GTR 2000, la probabilité d'initiation devient importante (P > 0,1) même avec un conduit de 1 cm et un gradient faible (i ≅ 0,1). A contrario dans un matériau résistant à l'érosion, la probabilité d'initiation restera faible même pour des gradients très élevés et des conduits importants.

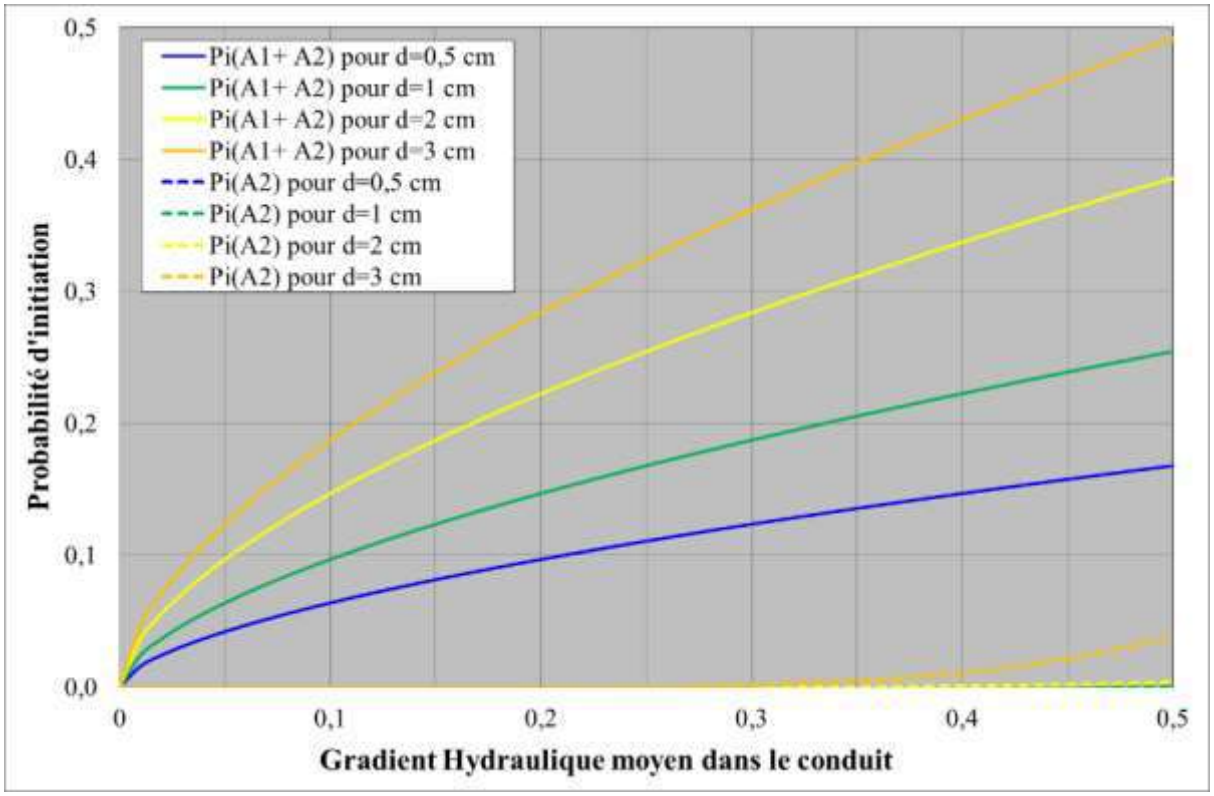


Figure 115. Probabilité d'initiation dans des conduits de diamètre 1 à 3 cm en fonction du gradient hydraulique et type de sols

8.2.4 Probabilité de non filtration

La probabilité de non filtration est liée aux fonctions Filtration, Drainage, Stabilité et Protection. Les valeurs retenues sont celles définies au chapitre 2.7.

8.2.5 Probabilité de progression

La probabilité de progression est estimée par la formule définie au chapitre 2.8.

8.2.6 Probabilité de non détection

La figure ci-après donne les temps de rupture d'une digue pour les deux types de matériaux en fonction du gradient hydraulique dans le conduit.

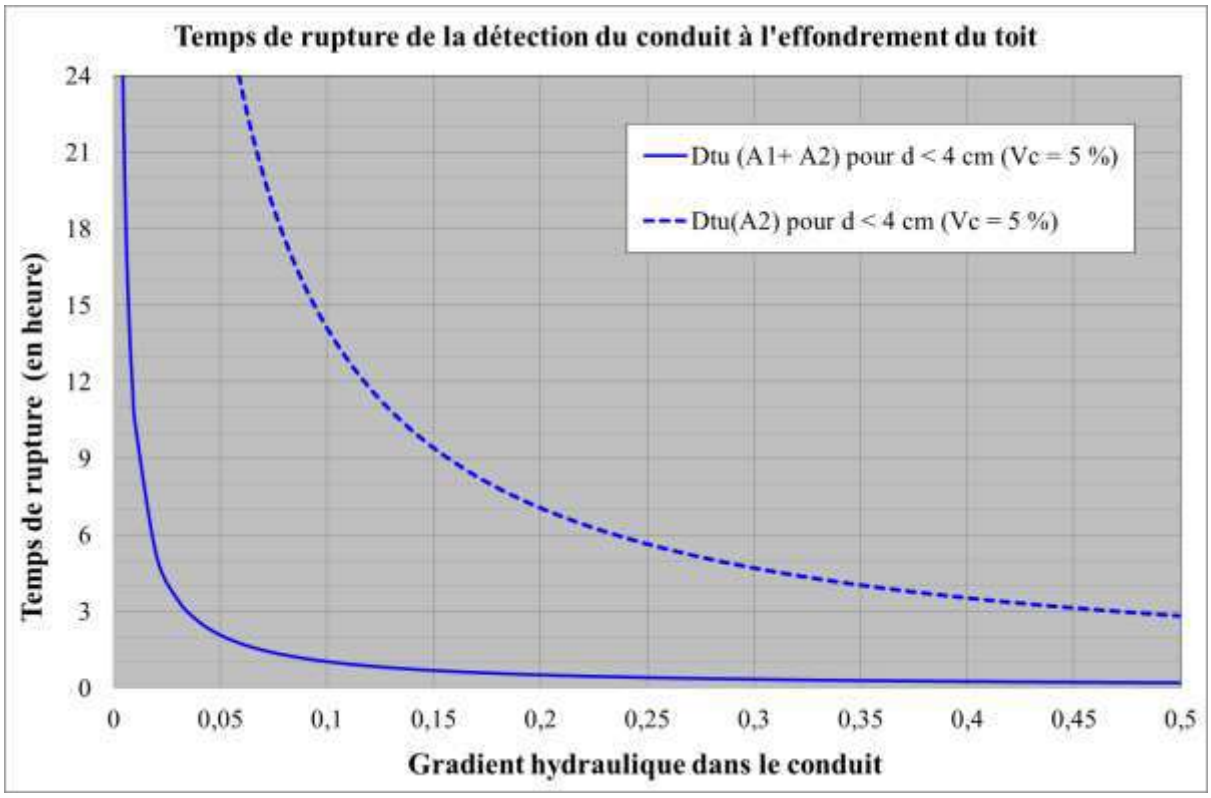


Figure 116. Temps de rupture de la détection d'un conduit de diamètre inférieur à 4 cm à l'effondrement du toit

La probabilité de non détection, depuis la possibilité d'observation du désordre jusqu'à la formation de la brèche, est déterminée par les formules suivantes (Cf. chapitres 2.1. et 7.) :

Pour les matériaux mélangés (A1+A2) :

$$P_{non\ détection} = \mathrm{MAX}\left(0{,}1; \left(1 - \frac{0{,}10}{P_s . i}\right)\right)$$

et pour les matériaux A2 :

$$P_{non\ détection} = \mathrm{MAX}\left(0{,}1; \left(1 - \frac{1{,}41}{P_s . i}\right)\right)$$

Avec :

i : gradient hydraulique dans le conduit
P_s : pas de surveillance en heures (3 h en alerte 3 et 6 h pour les autres niveaux d'alerte)

8.2.7 Probabilité de non intervention

La probabilité de non intervention, depuis la détection du désordre jusqu'à la formation de la brèche est déterminée par les formules suivantes (Cf. chapitres 2.2. et 7.) :

pour les matériaux mélangés (A1+A2) :

$$P_{non\ intervention} = \text{MIN}\left(1; \frac{\Delta t_i . i}{0{,}10}\right)$$

et pour les matériaux A2 :

$$P_{non\ intervention} = \text{MIN}\left(1; \frac{\Delta t_i . i}{1{,}41}\right)$$

Avec :

i : gradient hydraulique dans le conduit

Δt_i : temps d'intervention en heures (3 h pour les digues carrossables et 24 h pour les digues non carrossables)

La figure ci-après illustre pour le scénario de brèche n°2 : l'évolution de :

- la probabilité de non détection en fonction de la nature du matériau érodé, du pas de surveillance et du gradient dans le conduit ;
- la probabilité de non intervention en fonction de la nature du matériau érodé, du temps d'intervention et du gradient dans le conduit.

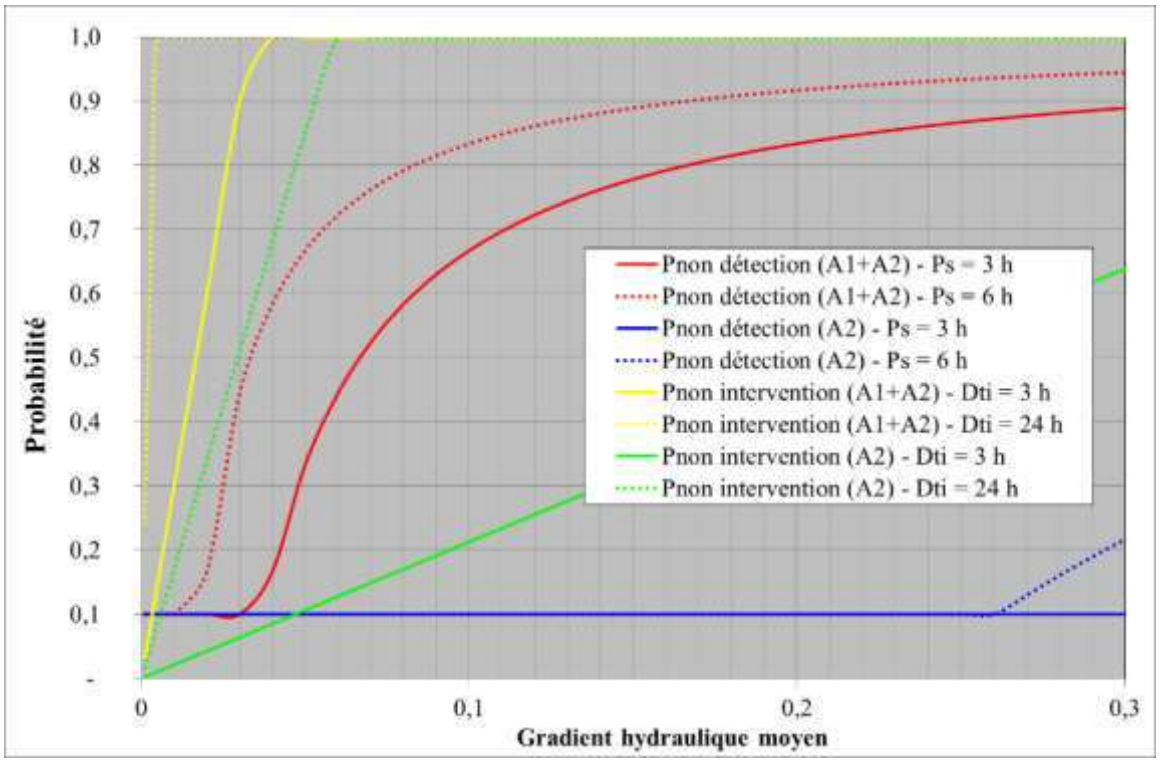


Figure 117. Scénario de brèche n°2 : probabilités de non détection et non intervention

8.3 SCENARIO DE BRECHE N°3 : EROSION DE CONDUIT DANS UNE ANCIENNE RACINE MORTE

8.3.1 Description du scénario

Le scénario de brèche n°3 est celui d'une érosion de conduit dans une ancienne racine d'un arbre mort ou abattu sans purge intégral du système racinaire impliquant le démontage et la reconstruction de la digue.

L'étude accidentologique n'a pas révélé de brèche liée à ce scénario. Des infiltrations d'eaux claires pouvant provenir de racines mortes d'après les gardes digues ont été observées en 2002 et 2003 à divers endroits du Delta sans pouvoir avoir de certitude sur l'origine exacte. C'est pour ces raisons que ce scénario de brèches est pris en compte

La figure ci-dessous illustre la représentation du scénario de brèche envisagé.

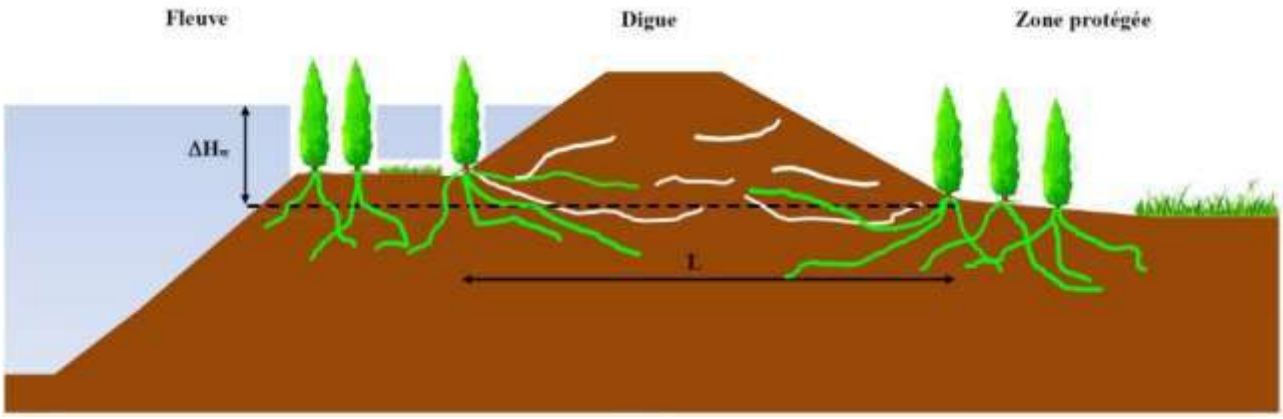


Figure 118. Scénario de brèche n°3 : érosion de conduit le long d'une racine morte

Les différentes étapes du scénario de brèche peuvent être représentées suivant l'arbre d'événements suivant :

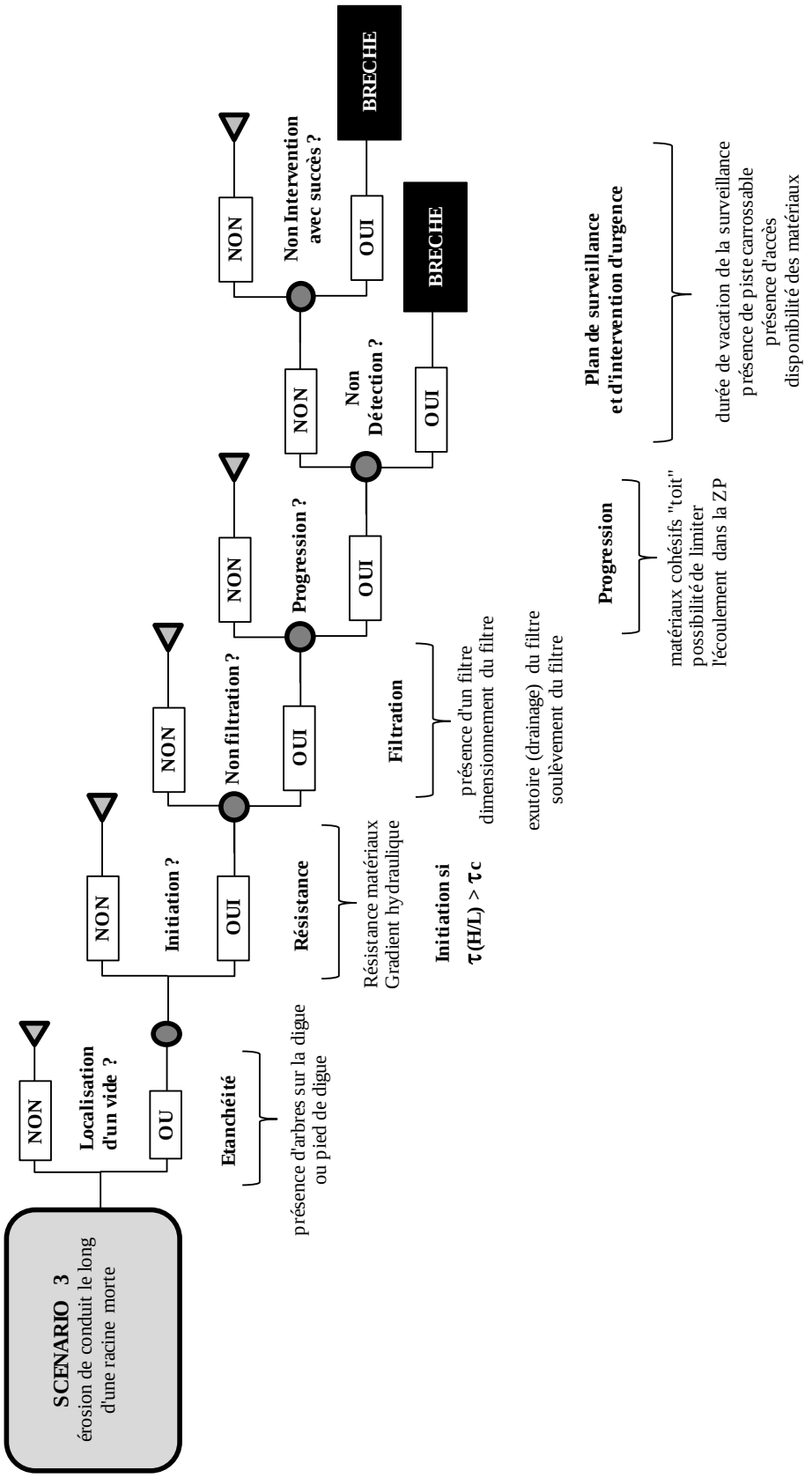


Figure 119. Arbre d'événements du scénario de brèche n°3

Le scénario de brèche s'écrit sous la forme suivante :

$$P(brèche) = P_{localisation} \cdot P_{initiation} \cdot P_{non\ filtration} \cdot P_{progression} \cdot [P_{non\ détection} + (1 - P_{non\ détection}) \cdot P_{non\ intervention}]$$

Avec :

$P_{localisation}$:	Probabilité de localisation d'une racine morte traversant la digue,
$P_{initiation}$:	Probabilité d'initiation d'érosion de conduit dans ce conduit traversant,
$P_{non\ filtration}$:	Probabilité que les particules entraînées par l'érosion ne soient pas bloquées et cheminent jusqu'à un exutoire non filtré,
$P_{progression}$:	Probabilité que le processus se poursuive sans stabilisation et déclenche un autre phénomène (tassement, instabilité, affaissement) ou s'accélère,
$P_{non\ détection}$:	Probabilité de non détection du désordre par les gardes-digues ou par les équipes de surveillance lors de la crue,
$P_{non\ intervention}$:	Probabilité de non intervention en cas de détection du désordre.

8.3.2 Probabilité de localisation

La probabilité de localisation d'un conduit traversant provoqué par la présence d'une racine morte est liée à la fonction Environnement. Elle va dépendre des réponses aux questions suivantes :

- la digue est-elle d'origine ou a-t-elle été confortée récemment ?
- des arbres sont-ils présents sur les talus, ou en pied de talus ?
- le cas échéant sont-ils présents sur les deux côtés de la digue ou sur un seul côté.

Pour les digues d'origine, on notera que l'absence d'arbres sur les talus ne signifie pas pour autant qu'il n'y en ait pas eu par le passé et que ces derniers aient fait l'objet d'abattage sans dessouchage du système racinaire.
On retient les probabilités de localisation suivante

Tableau 48. Probabilité de localisation d'un conduit traversant liée à une racine morte

Situation rencontrée	Probabilité de localisation d'une racine morte traversante
Digue récemment confortée (étanchéité restaurée par remblai compacté, perré, rideau….)	0,001
Digue du XIX^{ème} siècle sans arbre sur ou en pied de talus	0,01
Digue du XIX^{ème} siècle avec présence d'arbres en pied de talus (un côté)	0,1
Digue du XIX^{ème} siècle avec présence d'arbres en pieds de talus (deux côtés)	0,5
Digue du XIX^{ème} siècle avec présence d'arbres sur un talus	0,9
Digue du XIX^{ème} siècle avec présence d'arbres sur les deux talus	0,99

8.3.3 Probabilité d'initiation de l'érosion de conduit

Compte tenu du fait que c'est le diamètre aval qui contrôle l'écoulement, on retient un conduit de diamètre 1 cm, ce qui demeure une hypothèse conservatrice. La probabilité d'initiation va donc dépendre uniquement de la nature du matériau traversé. Elle est déterminée à l'aide des formules utilisées pour le scénario de brèche n°2 avec un conduit de 1 cm.

Les conclusions sont identiques à celles du scénario précédent. Dans un mélange de matériaux A1 + A2 suivant la GTR 2000, la probabilité d'initiation devient importante ($P > 0,1$) pour des gradients faibles ($i \cong 0,1$). A contrario dans un matériau résistant à l'érosion, la probabilité d'initiation reste faible même pour des gradients très élevés.

8.3.4 Probabilité de non filtration

La probabilité de non filtration est liée aux fonctions Filtration, Drainage, Stabilité et Protection. Les valeurs retenues sont celles définies au chapitre 2.7.

8.3.5 Probabilité de progression

La probabilité de progression est estimée par la formule définie au chapitre 2.8.

8.3.6 Probabilité de non détection

Les probabilités de non détection respectivement pour le mélange de matériaux A1+A2 et de matériaux A2 sont déterminées avec les mêmes formules que celles utilisées pour le scénario de brèche n°2.

8.3.7 Probabilité de non intervention

Les probabilités de non interventions respectivement pour le mélange de matériaux A1+A2 et de matériaux A2 sont déterminées avec les mêmes formules que celles utilisées pour le scénario de brèche n°2.

8.4 SCENARIO DE BRECHE N°4 : EROSION DE CONDUIT DANS UNE FISSURE TRAVERSANTE

8.4.1 Description du scénario

Le scénario de brèche n°4 est celui d'une érosion de conduit dans une fissure traversante.

L'étude accidentologique n'a pas révélé de brèche liée à ce scénario. Cependant, les infiltrations observées sur certains tronçons de digue et les reconnaissances géotechniques menées sur ces mêmes secteurs nous amènent à penser que ces infiltrations pourraient être liées à des circulations d'eau le long de fissures traversantes. L'origine de ces fissures peut être liée au vieillissement des remblais ou à la dessiccation mais également être liée à la présence de transitions au droit d'anciens terriers de fouisseurs purgés même intégralement. C'est pour ces raisons que ce scénario de brèches est pris en compte dans l'analyse de risques.

La figure ci-dessous illustre la représentation du scénario de brèche envisagé.

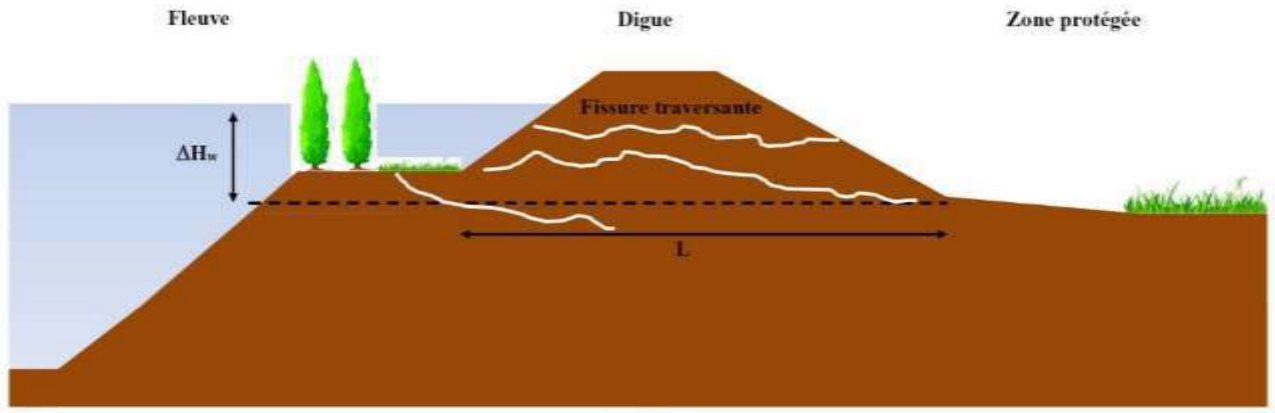


Figure 120. Scénario de brèche n°4 : érosion de conduit le long d'une fissure traversante

Les différentes étapes du scénario de brèche peuvent être représentées suivant l'arbre d'événements suivant :

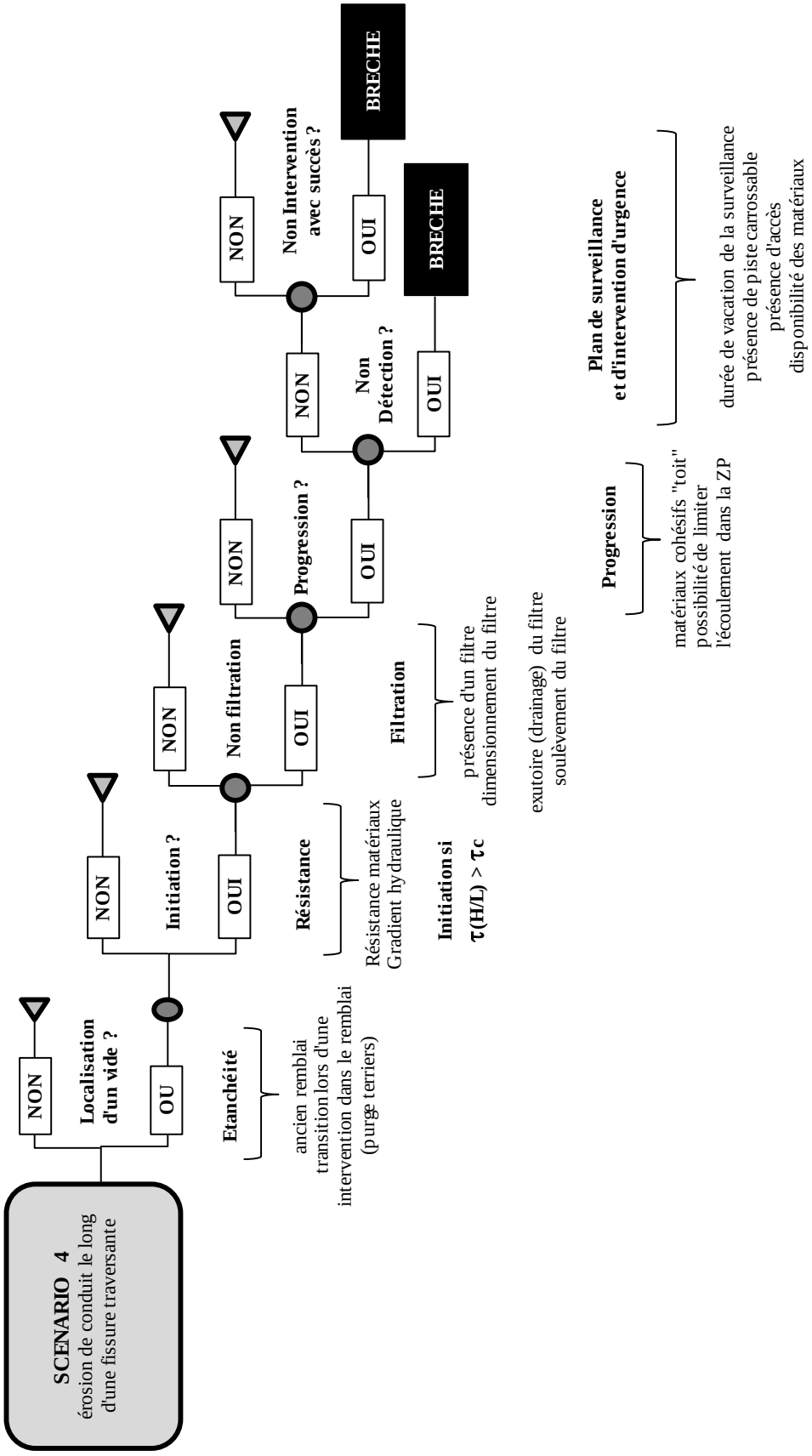


Figure 121. Arbre d'événements du scénario de brèche n°4

Le scénario de brèche s'écrit sous la forme suivante :

$$P(brèche) = P_{localisation} \cdot P_{non\ filtration} \cdot P_{progression} \cdot [P_{non\ détection} + (1 - P_{non\ détection}) \cdot P_{non\ intervention}]$$

Avec :

$P_{localisation}$:	Probabilité de localisation d'une fissure traversant la digue,
$P_{initiation}$:	Probabilité d'initiation d'érosion de conduit dans ce conduit traversant,
$P_{non\ filtration}$:	Probabilité que les particules entraînées par l'érosion ne soient pas bloquées et cheminent jusqu'à un exutoire non filtré,
$P_{progression}$:	Probabilité que le processus se poursuive sans stabilisation et déclenche un autre phénomène (tassement, instabilité, affaissement) ou s'accélère,
$P_{non\ détection}$:	Probabilité de non détection du désordre par les gardes-digues ou par les équipes de surveillance lors de la crue,
$P_{non\ intervention}$:	Probabilité de non intervention en cas de détection du désordre.

8.4.2 Probabilité de localisation

La probabilité de localisation d'une fissure traversante est liée à la fonction Etanchéité de l'ouvrage. Elle est déterminée suivant la grille d'appréciation suivante :

Tableau 49. Probabilité de localisation d'un conduit traversant lié à une racine morte

Situation rencontrée	Probabilité de localisation d'une fissure traversante
Digue reconstruite intégralement récemment (post 1993) Digue avec rideau de palplanches central Digue avec perré rénové	0,001
Digue du XIX^{ème} siècle ayant fait l'objet d'un engraissement par l'amont ou par l'aval	0,01
Digue du XIX^{ème} siècle sans observation d'infiltrations et de terriers de blaireaux ou lapins par le passé	0,1
Digue du XIX^{ème} siècle avec observation d'infiltrations ou de terriers de blaireaux ou lapins par le passé	0,5

8.4.3 Probabilité d'initiation de l'érosion de conduit

Compte tenu du fait que c'est le diamètre aval qui contrôle l'écoulement, on retient un diamètre de conduit de 5 mm, ce qui constitue une hypothèse conservatrice. La probabilité d'initiation va donc dépendre uniquement de la nature du matériau traversé. Elle est déterminée à l'aide des formules utilisées pour le scénario de brèche n°2 avec un conduit de 0,5 cm.

A l'instar des deux scénarios précédents, la probabilité d'initiation va essentiellement dépendre de la nature du matériau traversé. Dans un mélange de matériaux A1 + A2 suivant la

GTR 2000, elle devient importante (P > 0,1) pour un gradient de 0,2. A contrario dans un matériau résistant à l'érosion, la probabilité d'initiation reste faible même pour des gradients très élevés.

8.4.4 Probabilité de non filtration

La probabilité de non filtration est liée aux fonctions Filtration, Drainage, Stabilité et Protection. Les valeurs retenues sont celles définies au chapitre 2.7.

8.4.5 Probabilité de progression

La probabilité de progression est estimée par la formule définie au chapitre 2.8.

8.4.6 Probabilité de non détection

Les probabilités de non détection respectivement pour le mélange de matériaux A1+A2 et de matériaux A2 sont déterminées avec les mêmes formules que celles utilisées pour le scénario de brèche n°2.

8.4.7 Probabilité de non intervention

La loi de détermination du temps de rupture depuis la détection du désordre jusqu'à l'effondrement du toit est identique à celle du scénario de brèche n°2.

Les probabilités de non interventions respectivement pour le mélange de matériaux A1+A2 et de matériaux A2 sont déterminées avec les mêmes formules que celles utilisées pour le scénario de brèche n°2.

8.5 SCENARIO DE BRECHE N°5 : CLAQUAGE HYDRAULIQUE D'UNE COUCHE DE SOL COHESIF SURPLOMBANT UNE COUCHE DE SABLE ET EROSION REGRESSIVE DE LA COUCHE DE SABLE

8.5.1 Description du scénario n°5

Le scénario de brèche n°5 correspond au claquage hydraulique d'une couche de sols cohésifs (limons, argiles) surplombant une couche de sable plus perméable suivi d'une érosion régressive de la couche de sable. Ce type de phénomène se traduit le plus souvent par l'observation de tumulus en aval de la digue, comme ce fût le cas en 2013 lors de la crue de l'Aggly (Cf. chapitre 2.2.). Il n'a jamais été recensé dans le Delta du Rhône, bien qu'il soit fréquent dans les deltas.
En revanche, l'observation de résurgences en pied aval des digues du Rhône est courante. Des fontis ont également été observés par le passé en aval des digues, ce qui laisse penser que ce scénario est possible et doit être envisagé.

La figure ci-dessous illustre la représentation du scénario de brèche envisagé.

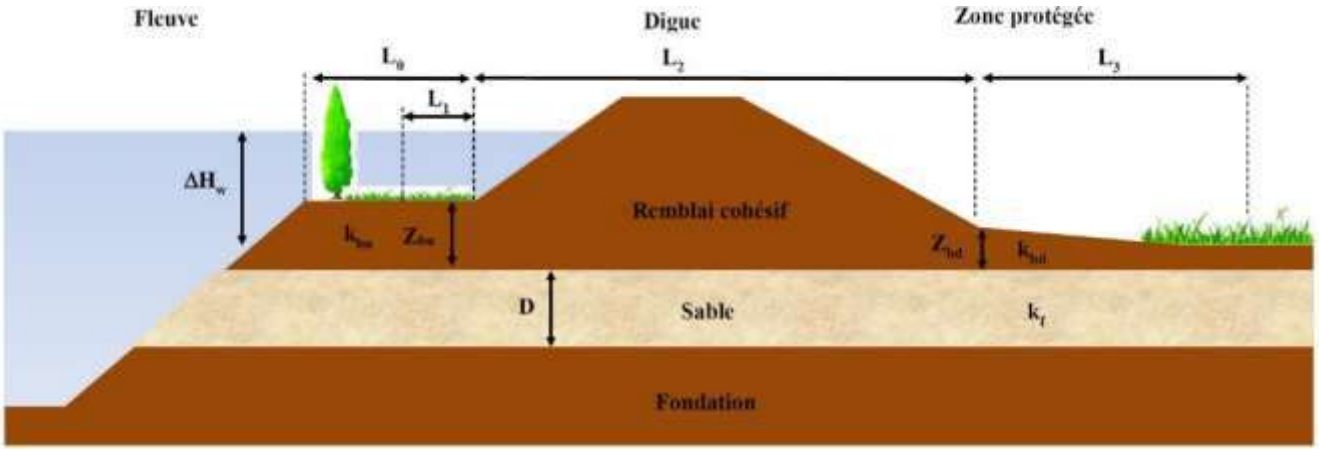


Figure 122. Scénario de brèche n°5 : claquage hydraulique du limon cohésif et érosion régressive de la couche de sable

Les paramètres à considérer sont les suivants. Ils sont décrits au chapitre 2.2 et 3.1 :

- D : épaisseur de la couche de sable ;
- Z_{bd} : épaisseur de la couche de limon à l'aval ;
- Z_{bu} : épaisseur de la couche de limon en amont ;
- k_f : perméabilité horizontale de la couche de sable ;
- k_b : perméabilité verticale de la couche de sol cohésif.

Les différentes étapes du scénario de brèche peuvent être représentées suivant l'arbre d'événements suivant :

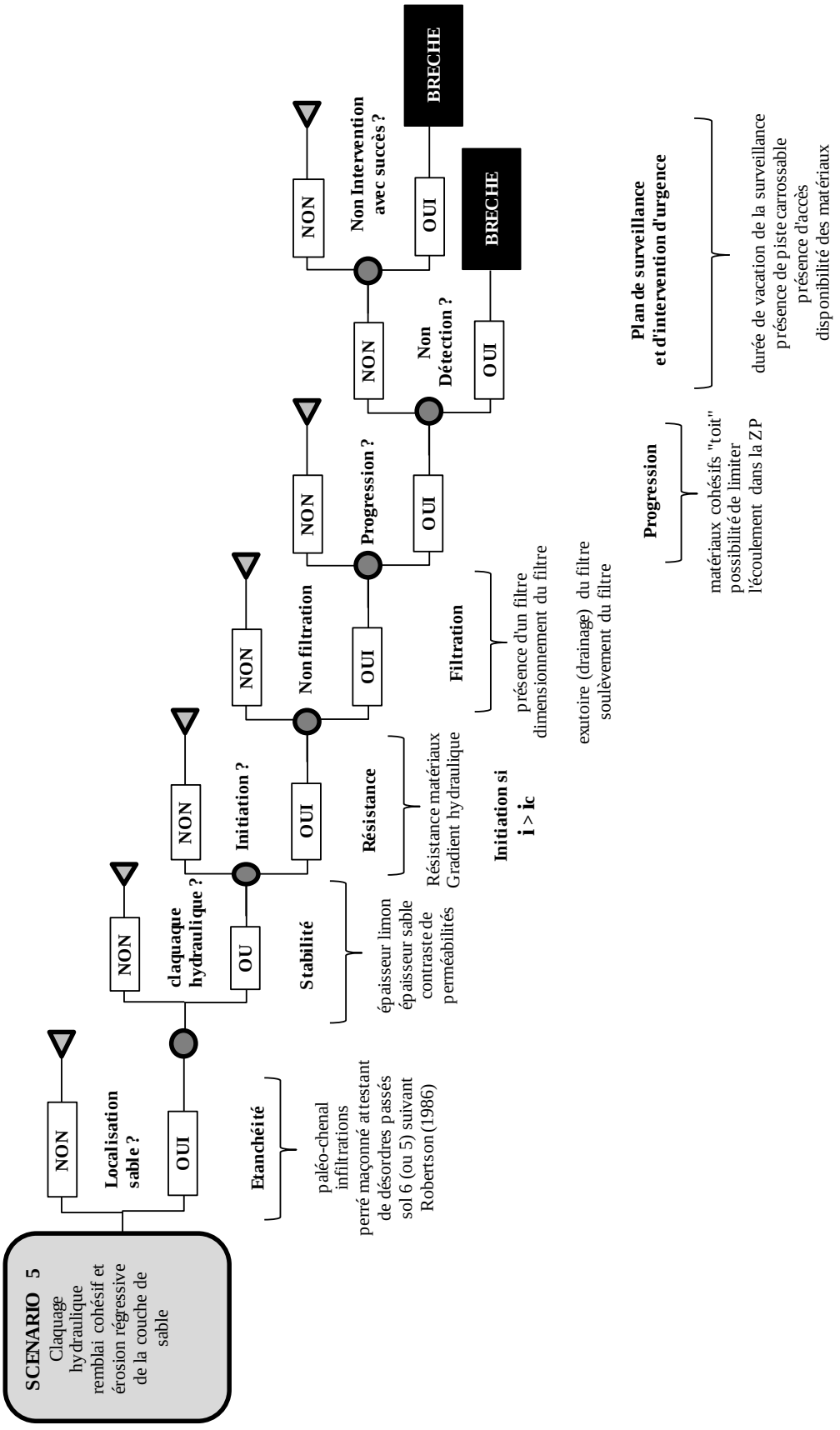


Figure 123. Arbre d'événements du scénario de brèche n°5

Le scénario de brèche s'écrit comme suit:

$$P(brèche) = P_{localisation} \cdot P_{claquage} \cdot P_{initiation} \cdot P_{non\ filtration} \cdot P_{progression} \cdot [P_{non\ détection} + (1 - P_{non\ détection}) \cdot P_{non\ intervention}]$$

Avec :

$P_{localisation}$: Probabilité de localisation d'une couche de sable en fondation,

$P_{claquage}$: Probabilité de claquage de la couche de sol cohésif surplombant la couche de sable plus perméable,

$P_{initiation}$: Probabilité d'initiation d'érosion régressive de la couche de sable,

$P_{non\ filtration}$: Probabilité que les particules entraînées par l'érosion ne soient pas bloquées et cheminent jusqu'à un exutoire non filtré,

$P_{progression}$: Probabilité que le processus se poursuive sans stabilisation et déclenche un autre phénomène (tassement, instabilité, affaissement) ou s'accélère,

$P_{non\ détection}$: Probabilité de non détection du désordre par les gardes-digues ou par les équipes de surveillance lors de la crue,

$P_{non\ intervention}$: Probabilité de non intervention en cas de détection du désordre.

8.5.2 Probabilité de localisation

Cette probabilité de localisation permet de statuer sur la fonction Etanchéité de la fondation de la digue. Compte tenu de l'analyse menée au chapitre 2.2, on retient la grille suivante pour la détermination de la probabilité de localisation d'une couche de sable potentiellement sujette à érosion régressive.

Tableau 50. Probabilité de localisation d'une couche de sable exposée à érosion régressive

Présence	Probabilité localisation couche de sable
Digue et fondation investiguées - aucun des éléments ci-dessous	0,01
Digue et fondation non investiguées en dehors des paléo-chenaux - aucun des éléments ci-dessous	0,1
Sol de classe 5 suivant la classification de Robertson (1986)	0,1
Alternance de sol de classe 5 et 6 suivant Robertson (1986)	0,5
présence d'un perré maçonnée sur la carte de 1876 attestant d'infiltrations ou désordres passés	0,5
Sol de classe 6 suivant la classification de Robertson (1986)	0,9
présence d'un paléo- chenal à proximité	0,9
Sable observée durant des travaux ou infiltrations observées en périodes de crues	0,99

En cas de présence de deux éléments cités ci-dessus, la probabilité retenue est le maximum des probabilités.

La figure en page suivante présente le tracé des paléo-chenaux connus dans le Delta superposés avec la base de données topographiques de l'IGN. La précision du modèle

numérique de terrain permet de localiser les anciens bourrelets alluviaux et vérifier ainsi le tracé des paléo-chenaux connus et localiser des zones probables de divagation du Rhône.

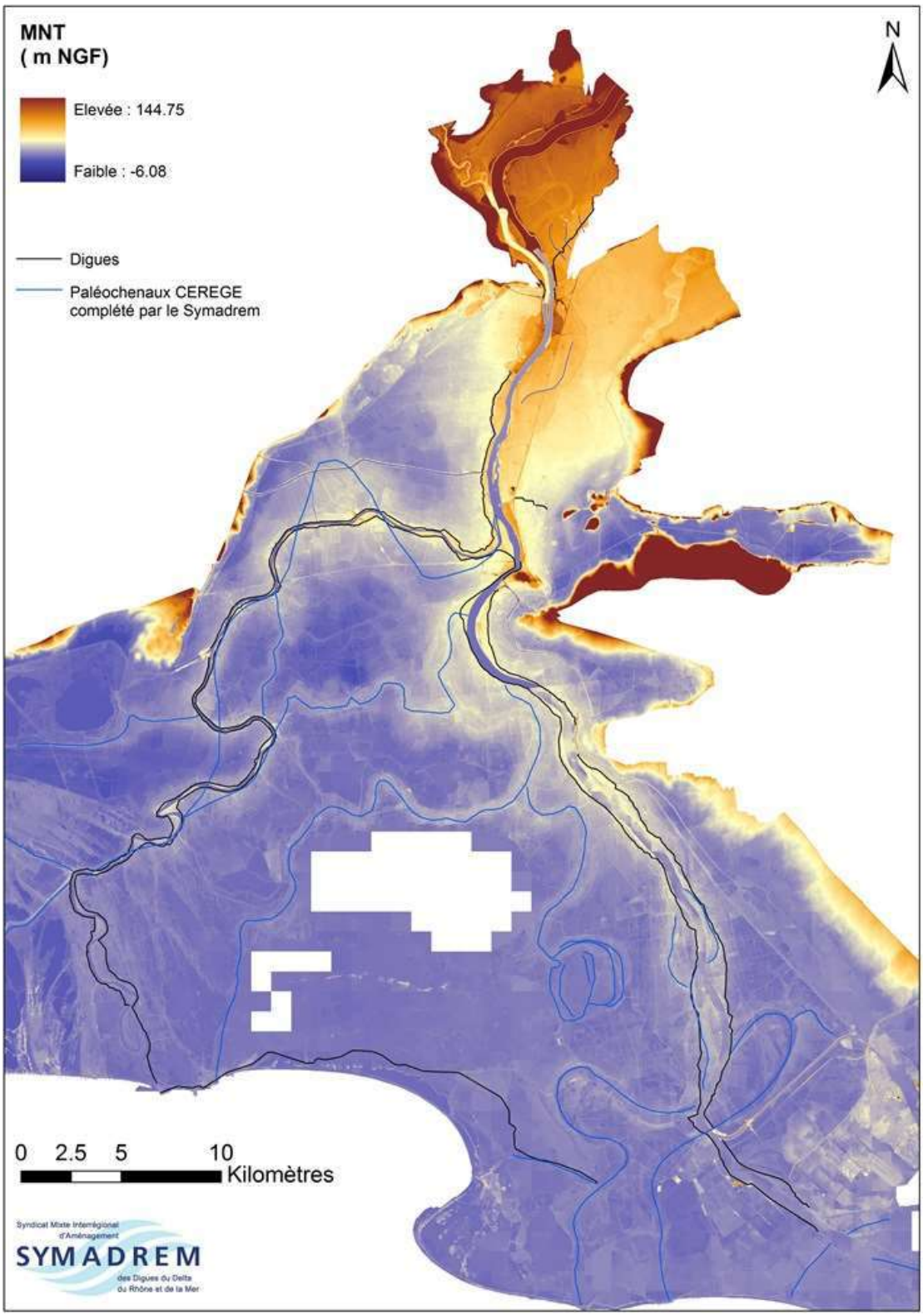


Figure 124. localisation des paléo-chenaux dans le Delta

L'analyse des reconnaissances géotechniques est menée, à partir des reconnaissances géotechniques référencées et synthétisées en Chapitre n°5.0, sur les logs de sondages carottés ou sur les résultats des CPT suivant la classification de Robertson (1986). La figure ci-dessous permet d'illustrer cette analyse.

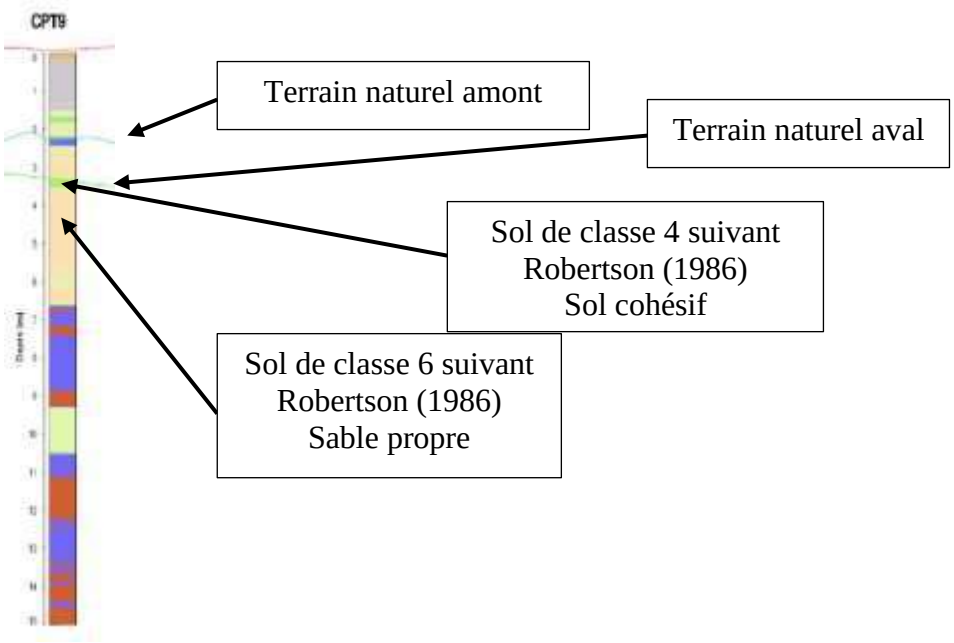


Figure 125. Illustration de l'interprétation géotechnique des CPT

La visualisation des cartes de 1876 permet également de localiser la présence de perrés maçonnés anciens. Ces perrés anciens attestent de brèches ou d'incidents anciens (érosion interne ou infiltrations excessives). La figure ci-dessous illustre l'analyse faite sur ces plans. Les digues perreyées sont localisées par la dénomination IRP (en vert ci-dessous).

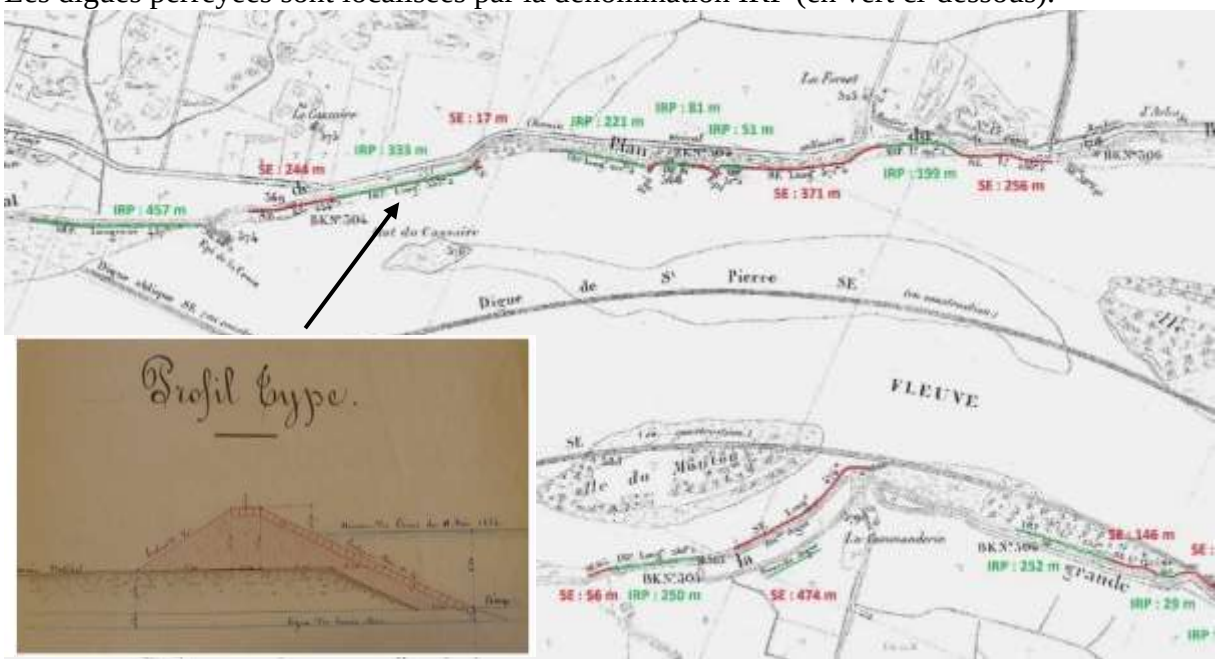


Figure 126. Illustration de l'analyse historique des plans anciens

La carte ci-dessous est une synthèse cartographique de ces digues perreyées à l'échelle du Delta du Rhône.

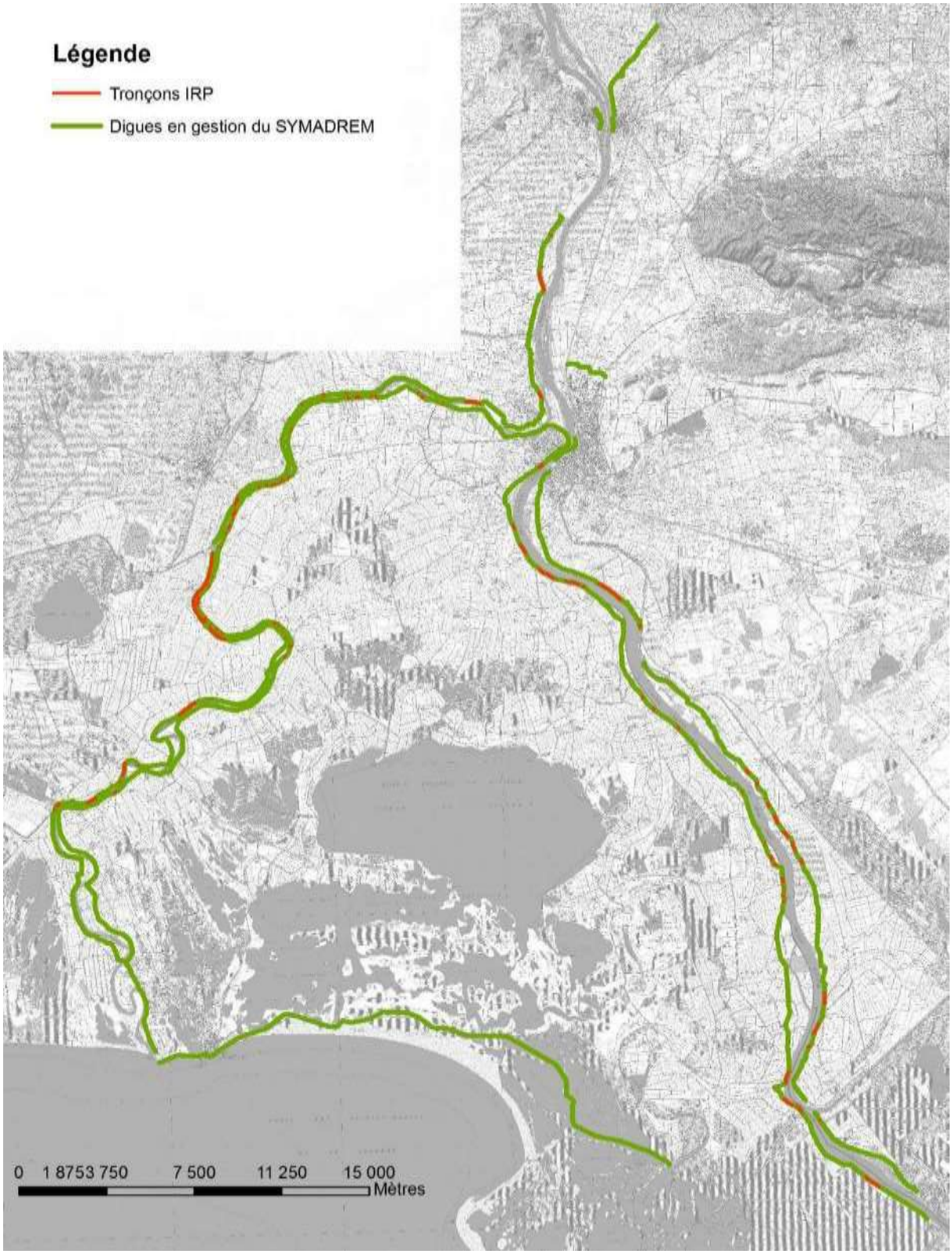


Figure 127. Delta du Rhône – Cartographie des digues perreyées (en rouge)

Les observations faites également lors des chantiers permettent d'attester de façon certaine la présence de sable

8.5.3 Probabilité du claquage hydraulique

Suivant l'analyse réalisée au chapitre 3.1, la probabilité de claquage hydraulique en aval de la digue est donnée par la formule suivante :

$$P_{claquage} = MAX\left[\exp\left(-\exp\left(\left(\frac{F-1{,}131}{0{,}103}\right)\right)\right); 0{,}001\right]$$

Avec *F* : facteur de sécurité au soulèvement de l'USACE

Les épaisseurs des couches respectivement de sable et du toit cohésif sont estimées à partir des reconnaissances géotechniques. En cas d'absence de données géotechniques, on retient une épaisseur de sable D égale à 5 mètres et une épaisseur Z_{bd} du toit cohésif en aval de la digue égale à 1 mètre. L'épaisseur Z_{bu} en amont de la digue étant déduite par la différence d'altimétrie entre le ségonnal et la zone protégée.

8.5.4 Probabilité d'initiation de l'érosion régressive

Mallet & Fry (2016) [X031] ont comparé les modèles de Sellmeijer et de Hoffmans et pointé une différence importante de la valeur du gradient critique ; cependant ils ont montré la faible influence du choix de l'un ou l'autre de ces modèles dans la détermination de la probabilité annuelle de brèche par érosion régressive.

Par sécurité et compte tenu de la validation du modèle de Sellmeijer à grande échelle, la loi de probabilité déterminée suivant le modèle de Sellmeijer est retenue.

$$P_{initiation\ Sellmeijer\ Delta\ du\ Rhône} = MAX\left[\exp\left(-\exp\left(-\left(\frac{i-0{,}081}{0{,}012}\right)\right)\right); 0{,}001\right]$$

Avec *i* : gradient hydraulique en fondation (i > 0)

8.5.5 Probabilité de non filtration

La probabilité de non filtration est liée aux fonctions Filtration, Drainage, Stabilité et Protection. Les valeurs retenues sont celles définies au chapitre 2.7.

8.5.6 Probabilité de progression

La probabilité de progression est estimée par la formule définie au chapitre 2.8.

8.5.7 Probabilité de non détection

La probabilité de non détection d'infiltration de particules fines en aval de la digue en période de crues va dépendre de deux paramètres :

- la cinétique du conduit millimétrique, qui dépend de la vitesse de sortie,
- le mode de surveillance mis en place.

Le retour d'expérience du test IJkdijk décrit dans *Deroo & Fry 2016* [X034] et des brèches par érosion régressive observées sur les digues du Mississipi et du Yangtse montre que les tumulus de sable sont visibles plusieurs jours avant la rupture et a minima un jour avant la rupture, cela nous amène à retenir une durée de 24 heures entre la détection par les équipes de surveillance et la formation de la brèche.

Suivant la formulation définie dans le chapitre 7, on estime la probabilité de non détection à 0,1 quel que soit le seuil d'alerte.

8.5.8 Probabilité de non intervention

Suivant la formulation définie dans le chapitre 7, on estime la probabilité de non intervention à 1/8 pour les digues carrossables et 1 pour les digues non carrossables.

8.6 SCENARIO DE BRECHE N°6 : EROSION DE CONTACT LE LONG D'UNE COUCHE DE GRAVIERS

8.6.1 Description du scénario n°6

L'étude accidentologique n'a pas révélée de brèche par érosion de contact. Néanmoins, elle a révélé une amorce de renard hydraulique à la jonction entre la brèche de Figarès et la digue d'origine. Il est très vraisemblable que cet incident ait été initié par érosion de contact entre la digue d'origine en limons et la réparation de 1993 en gros enrochements très perméables. Ce scénario de brèche a donc été retenu dans l'analyse de risques.

La figure ci-dessous illustre la représentation du scénario de brèche envisagé.

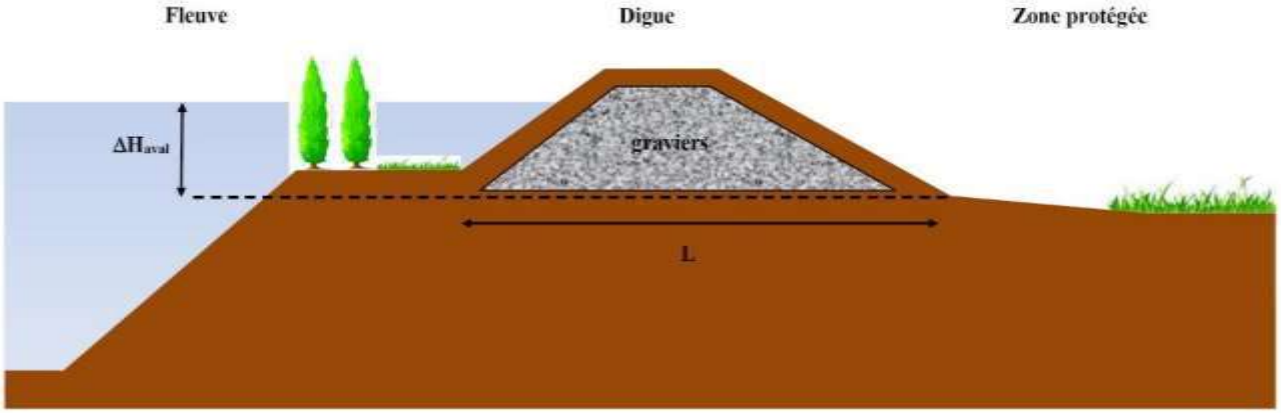


Figure 128. Scénario de brèche n°6 :

Les différentes étapes du scénario de brèche peuvent être représentées suivant l'arbre d'événements suivant :

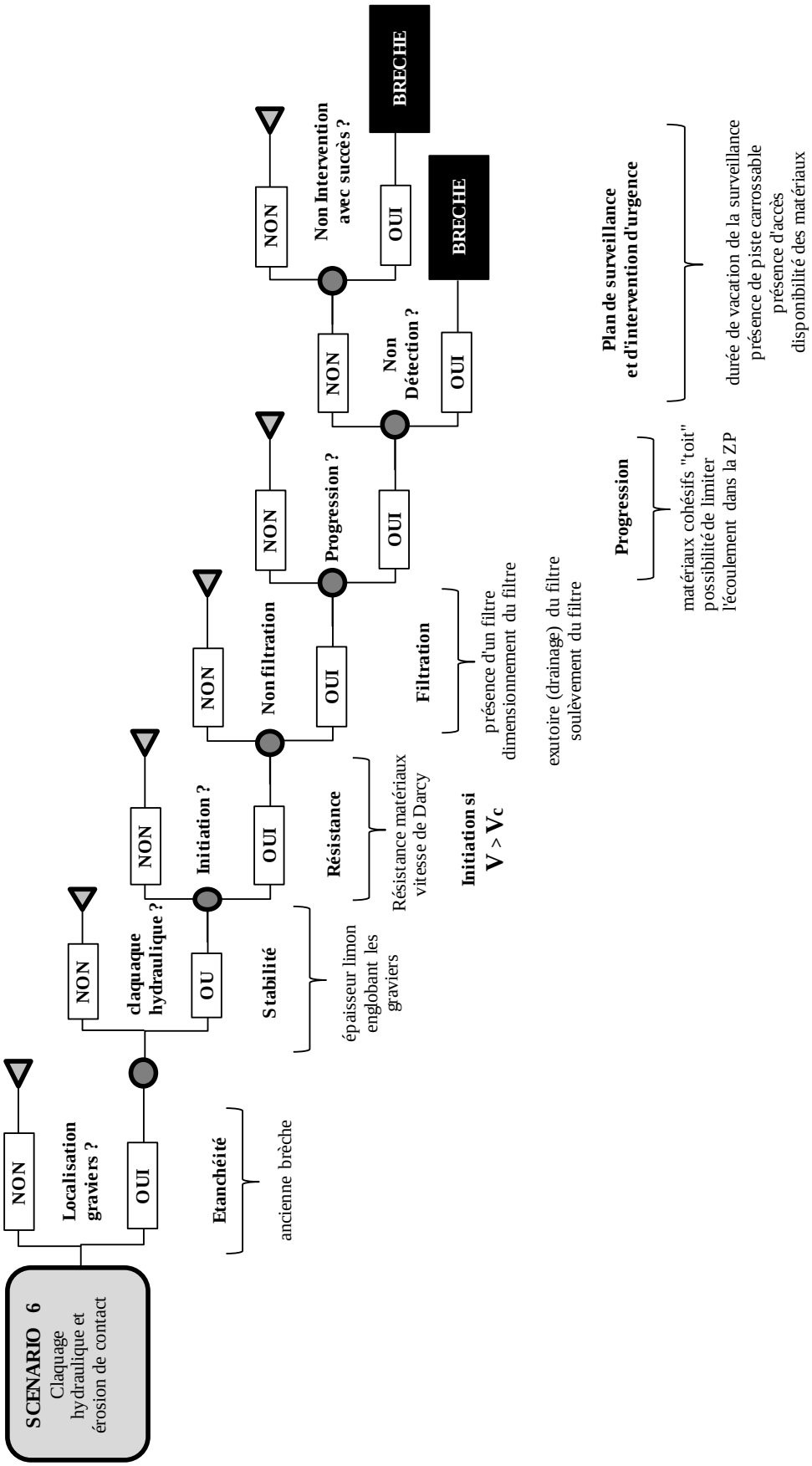


Figure 129. Arbre d'événements du scénario de brèche n°6

Le scénario de brèche s'écrit comme suit:

$$P(brèche) = P_{localisation} \cdot P_{claquage} \cdot P_{initiation} \cdot P_{non\ filtration} \cdot P_{progression} \cdot (P_{non\ détection} + (1 - P_{non\ détection}) \cdot P_{non\ intervention})$$

Avec :

$P_{localisation}$: Probabilité de localisation d'une couche de graviers dans la digue susceptible d'être mise en charge,

$P_{claquage}$: Probabilité de claquage de la couche de limon englobant la couche de graviers,

$P_{initiation}$: Probabilité d'initiation d'érosion de contact le long de l'interface graviers/limon,

$P_{non\ filtration}$: Probabilité que les particules entraînées par l'érosion ne soient pas bloquées et cheminent jusqu'à un exutoire non filtré,

$P_{progression}$: Probabilité que le processus se poursuive sans stabilisation et déclenche un autre phénomène (tassement, instabilité, affaissement) ou s'accélère,

$P_{non\ détection}$: Probabilité de non détection du désordre par les gardes-digues ou par les équipes de surveillance lors de la crue,

$P_{non\ intervention}$: Probabilité de non intervention en cas de détection du désordre.

8.6.2 Probabilité de localisation

La détermination de la probabilité de localisation est liée à la fonction Etanchéité et plus particulièrement au REX accidentologique. On retient la grille suivante.

Tableau 51. Probabilité de localisation d'une couche de gravier perméable

Presence	Probabilité de localisation de gravier dans la digue
Pas d'anciennes brèches connues ou brèche reprise de façon définitive (perré, masque amont, rideau palplanches, nouvelle digue)	0,001
brèches historiques du XIX^{ème} siècle	0,01
Brèches de 1993, 1994 et 2002 Réparées en urgence et non reprises depuis	0,9

8.6.3 Probabilité du claquage hydraulique

Pour l'analyse de risque, on considère :

- une épaisseur de 1 m recouvrant ces graviers si la digue n'a pas fait l'objet de confortement depuis la réparation ;
- une épaisseur de 4 m recouvrant ces graviers si la digue a fait l'objet de travaux d'engraissement depuis la réparation ;

- la charge est appliquée par rapport à la cote du ségonnal.

On définit alors le facteur *F* de sécurité pour chaque profil géométrique et chaque crue suivant la formule définie au §. 3.2.

La probabilité de claquage est donnée par la formule suivante :

$$P_{claquage} = MAX\left[\exp\left(-\exp\left(\left(\frac{F-1{,}131}{0{,}103}\right)\right)\right); 0{,}001\right]$$

Avec *F* : facteur de sécurité

Pour les nouvelles digues, il est retenu une probabilité de claquage de 0.001 (très peu probable).

8.6.4 Probabilité d'initiation de l'érosion de contact

Suivant l'analyse développée au chapitre 2.4, la probabilité d'initiation de l'érosion de contact est donnée pour chaque profil et chaque crue par la formulation suivante :

$$P_{initiation\ érosion\ de\ contact} = MAX\left[\exp\left(-\exp\left(-\left(\frac{6{,}7.i-1{,}404}{0{,}265}\right)\right)\right); 0{,}001\right]$$

Avec i: gradient hydraulique appliqué à la base de la digue (i > 0)

8.6.5 Probabilité de non filtration

La probabilité de non filtration est liée aux fonctions Filtration, Drainage, Stabilité et Protection. Les valeurs retenues sont celles définies au chapitre 2.7.

8.6.6 Probabilité de progression

La probabilité de progression est estimée par la formule définie au chapitre 2.8.

8.6.7 Probabilité de non détection

La probabilité de non détection va dépendre de deux paramètres :

- la cinétique de l'érosion de contact,
- le mode de surveillance mis en place.

L'érosion de contact a été étudiée de manière approfondie par la CNR. Les différentes études réalisées sur les digues CNR et analysées dans le cadre du programme ERINOH [X034] nous amène à retenir une durée de 48 heures entre la détection par les équipes de surveillance et la rupture d'ouvrage.

Suivant la formulation définie dans le chapitre 7, on estime la probabilité de non détection à 0,1 quel que soit le seuil d'alerte.

8.6.8 Probabilité de non intervention

Suivant la formulation définie dans le chapitre 7, on estime la probabilité de non intervention à 0,0675, arrondie à 0,1 pour les digues carrossables et de 0,5 pour les digues non carrossables.

8.7 SCENARIO DE BRECHE N°7 : SUFFUSION DANS UNE COUCHE DE GRAVE

8.7.1 Description du scénario n°7

Dans le Delta du Rhône, les graves se retrouvent en fondation profonde sur le Rhône entre Beaucaire et Arles et plus rarement sur le Grand Rhône dans les remontées du substratum graveleux (Cf. Chapitre n°4). Elles se trouvent systématiquent en crête de digue comme couches de chaussées. Elles peuvent également se trouver dans le corps de digue au droit des brèches colmatées en urgence suite aux crues de 1993, 1994, 2002 et 2003 et non reprises depuis. Elles peuvent également provenir d'anciennes couches de chaussées, qui n'auraient pas été purgées suite aux travaux de rehaussement général des digues après les crues de 1840 et 1856. Cette présence observée par le passé nous amène à considérer le scénario de brèche par suffusion interne d'une couche de grave englobée dans la digue après claquage de la couche de limon englobant cette dernière.

La figure ci-dessous illustre la représentation du scénario de brèche envisagé.

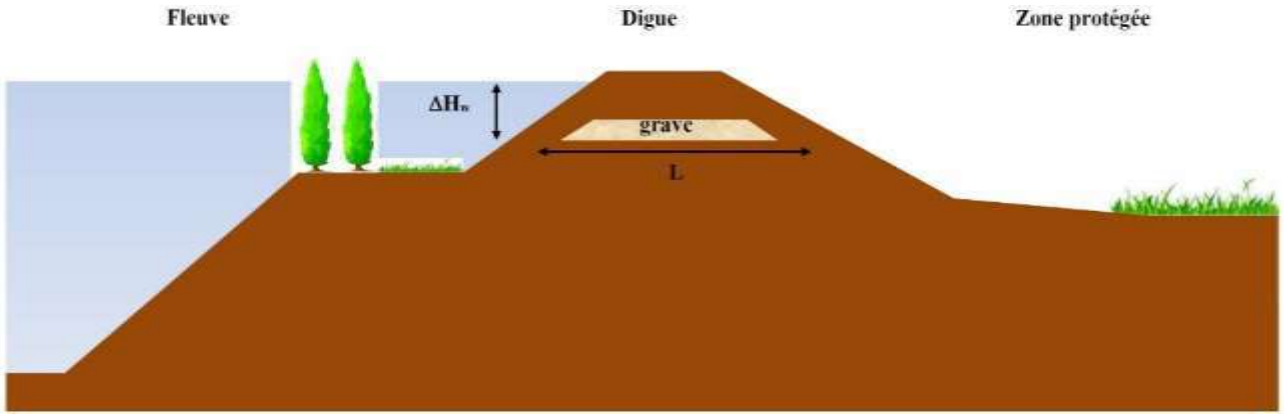


Figure 130. Scénario de brèche n°7 :

Les différentes étapes du scénario de brèche peuvent être représentées suivant l'arbre d'événements suivant :

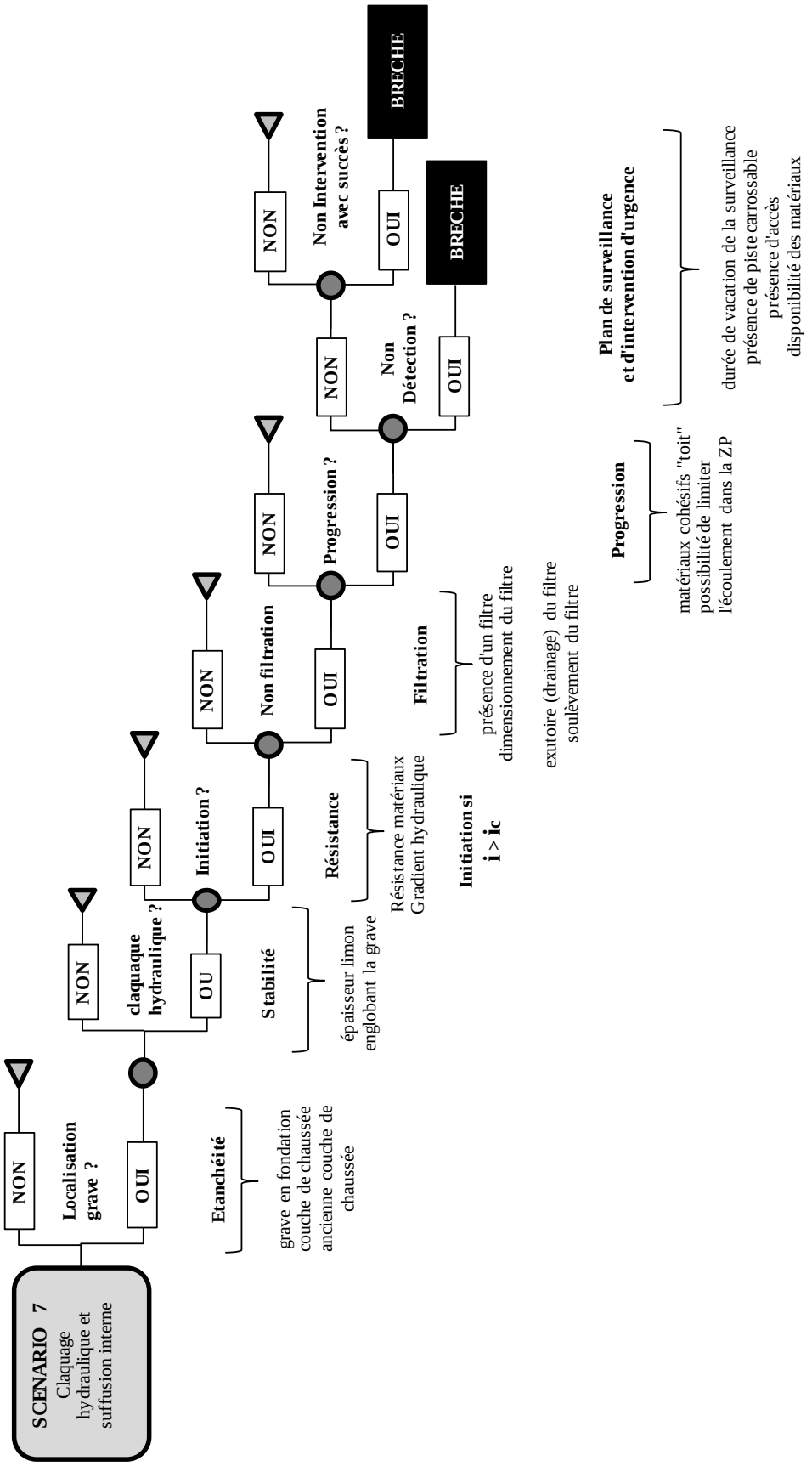


Figure 131. Arbre d'événements du scénario de brèche n°7

Le scénario de brèche s'écrit comme suit:

$$P(brèche) = P_{localisation} \cdot P_{claquage} \cdot P_{initiation} \cdot P_{non\ filtration} \cdot P_{progression} \cdot (P_{non\ détection} + (1 - P_{non\ détection}) \cdot P_{non\ intervention})$$

Avec :

$P_{localisation}$: Probabilité de localisation d'une couche de grave dans la digue,

$P_{claquage}$: Probabilité de claquage de la couche de limon englobant la couche de grave

$P_{initiation}$: Probabilité d'initiation de suffusion interne de la couche de grave,

$P_{non\ filtration}$: Probabilité que les particules entraînées par l'érosion ne soient pas bloquées et cheminent jusqu'à un exutoire non filtré,

$P_{progression}$: Probabilité que le processus se poursuive sans stabilisation et déclenche un autre phénomène (tassement, instabilité, affaissement) ou s'accélère,

$P_{non\ détection}$: Probabilité de non détection du désordre par les gardes-digues ou par les équipes de surveillance lors de la crue,

$P_{non\ intervention}$: Probabilité de non intervention en cas de détection du désordre.

8.7.2 Probabilité de localisation

On retient la grille suivante pour la détermination de la probabilité de localisation d'une couche de grave englobée dans la digue.

Tableau 52. Probabilité de localisation d'une couche de grave

Presence	Probabilité localisation
Digues confortées avec rétablissement de l'étanchéité (masque amont, perré, rideau…) ou nouvelle digue	0,001
Digue du XIX^{ème} siècle non confortée ayant fait l'objet de reconnaissances géotechniques sans détection de couche de grave dans le corps de digue	0,01
Digue du XIX^{ème} siècle non confortée n'ayant pas fait l'objet de reconnaissances géotechniques	0,1
Digue du XIX^{ème} siècle non confortée ayant fait l'objet de reconnaissances géotechniques avec détection de couche de grave dans le corps de digue	0,9

8.7.3 Probabilité du claquage hydraulique

Pour l'analyse de risque, on considère :

- une épaisseur de 1 m recouvrant la grave éventuelle, si la digue n'a pas fait l'objet de confortement depuis le XIX^{ème} siècle ;

- une épaisseur de 4 m recouvrant la grave éventuelle, si la digue a fait l'objet de travaux d'engraissement ;
- la charge est appliquée par rapport à la cote du ségonnal.

On définit alors le facteur *F* de sécurité pour chaque profil géométrique et chaque crue suivant la formule définie au §. 3.2.

La probabilité de claquage est donnée par la formule suivante :

$$P_{claquage} = MAX\left[\exp\left(-\exp\left(\left(\frac{F-1{,}131}{0{,}103}\right)\right)\right); 0{,}001\right]$$

Avec *F* : facteur de sécurité

Pour les nouvelles digues, il est retenu une probabilité de claquage de 0.001.

8.7.4 Probabilité d'initiation de suffusion interne

Suivant l'analyse développée au chapitre 2.5., la probabilité d'initiation de suffusion interne est donnée pour chaque profil et chaque crue par la formulation suivante :

$$P_{initiation\ suffusion\ interne} = MAX\left[\exp\left(-\exp\left(-\left(\frac{i-0{,}218}{0{,}037}\right)\right)\right); 0{,}001\right]$$

Avec : i : gradient moyen dans la grave.

Compte tenu de l'analyse géotechnique et du retour d'expérience passé, il est retenu un calage hypothétique de la couche de grave égal à la cote atteinte par la crue décennale du Rhône ; la longueur de cheminement hydraulique étant déduite de cette cote.

8.7.5 Probabilité de non filtration

La probabilité de non filtration est liée aux fonctions Filtration, Drainage, Stabilité et Protection. Les valeurs retenues sont celles définies au chapitre 2.7.

8.7.6 Probabilité de progression

La probabilité de progression est estimée par la formule définie au chapitre 2.8.

8.7.7 Probabilité de non détection

La probabilité de non détection va dépendre de deux paramètres :

- la cinétique de suffusion interne,

- le mode de surveillance mis en place.

Suivant la formulation définie dans le chapitre 7, on estime la probabilité de non détection à 0,1 quel que soit le seuil d'alerte.

8.7.8 Probabilité de non intervention

Suivant la formulation définie dans le chapitre 7, on estime la probabilité de non intervention à 0,0675, arrondie à 0,1 pour les digues carrossables et de 0,5 pour les digues non carrossables.

8.8 SCENARIO DE BRECHE N°8 : SURVERSE

8.8.1 Description du scénario n°8

Ce scénario correspond au dépassement par le fleuve du niveau de crête. La figure ci-dessous illustre la représentation du scénario de brèche envisagé.

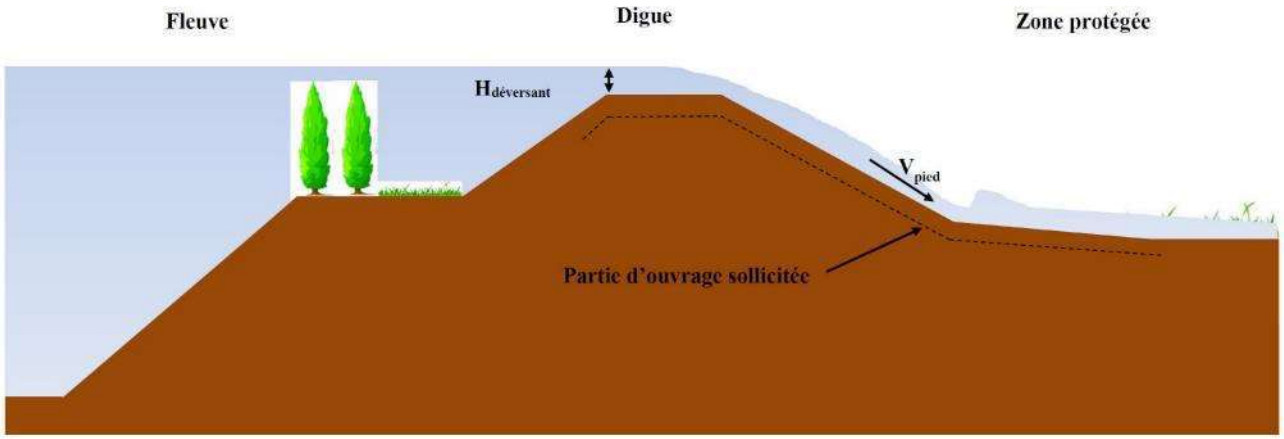


Figure 132. Scénario de brèche n°8 :

8.8.2 Probabilité de brèche

A l'exception des points bas, qui sont aujourd'hui quasiment inexistants et considérant que toute intervention pourrait reporter le risque de rupture en amont, en aval ou sur la rive opposée, la probabilité d'ouverture d'une brèche pour une crue donnée est évaluée par la formule suivante :

$$P(brèche) = P_{initiation\ surverse}$$

Suivant l'analyse décrite dans le chapitre 4.1, la probabilité de rupture par surverse est déterminée en fonction de la typologie des ouvrages par la formulation suivante

$$P_{rupture\ par\ surverse\ (résistant\ à\ la\ surverse)} = MAX\left(10^{-6}; \exp\left(-\exp\left(-\left(\frac{H-1{,}4}{0{,}5}\right)\right)\right)\right)$$

$$P_{rupture\ par\ surverse\ (digue\ en\ terre\ damée\ manuellement)} = MAX\left(10^{-6}; \exp\left(-exp\left(-\left(\frac{H+0{,}163}{0{,}206}\right)\right)\right)\right)$$

$$P_{rupture\ par\ surverse\ (digue\ en\ terre\ confortée\ récemment)} = MAX\left(10^{-6}; \exp\left(-exp\left(-\left(\frac{H+0{,}034}{0{,}150}\right)\right)\right)\right)$$

$$P_{rupture\ par\ surverse\ (digue\ avec\ matériaux\ de\ carrière\ sur\ talus\ aval\ ou\ palplanches)} = MAX\left(10^{-6}; \exp\left(-exp\left(-\left(\frac{H-0{,}169}{0{,}103}\right)\right)\right)\right)$$

$$P_{rupture\ par\ surverse\ (digue\ avec\ blocs\ 10/100\ kg\ sur\ talus\ aval)} = MAX\left(10^{-6}; \exp\left(-exp\left(-\left(\frac{H-0{,}369}{0{,}103}\right)\right)\right)\right)$$

$$P_{rupture\ par\ surverse\ (perré\ maçonné)} = MAX\left(10^{-6}; \exp\left(-exp\left(-\left(\frac{H-0{,}269}{0{,}103}\right)\right)\right)\right)$$

$$P_{rupture\ par\ surverse\ (remblai)} = MAX\left(10^{-6}; \exp\left(-exp\left(-\left(\frac{H-0{,}982}{0{,}338}\right)\right)\right)\right)$$

Avec H : lame d'eau déversante (en m) – les valeurs négatives correspondent à la valeur de la revanche par rapport à la crête d'ouvrage.

8.9 SCENARIO DE BRECHE N°9 : AFFOUILLEMENT EXTERNE

8.9.1 Description du scénario n°9

Aucune brèche par affouillement externe n'a à ce jour été recensée dans le Delta du Rhône. En revanche de nombreux désordres impliquant ce type de mécanisme ont été observés même pour des petites crues.

La figure ci-dessous illustre la représentation du scénario de brèche envisagé.

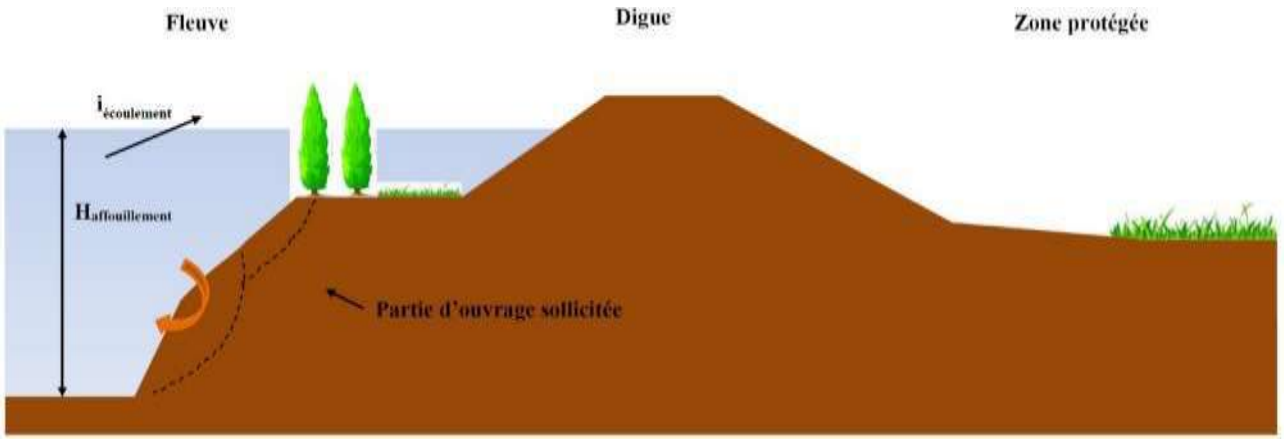


Figure 133. Scénario de brèche n°9 : Affouillement externe de la berge entraînant la digue

Les différentes étapes du scénario de brèche peuvent être représentées suivant l'arbre d'événements suivant :

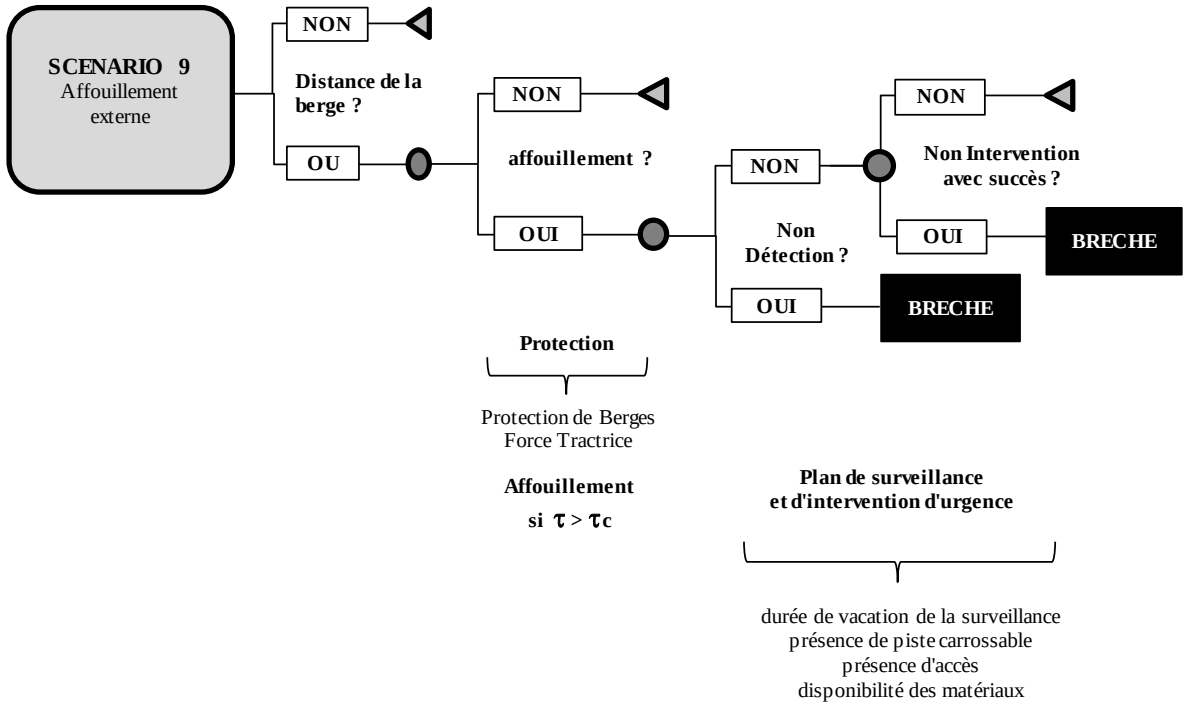


Figure 134. Arbre d'événements du scénario de brèche n°9

Le scénario de brèche s'écrit comme suit:

$$P(brèche) = P_{localisation} \cdot P_{affouillement} \cdot [P_{non\ détection} + (1 - P_{non\ détection}) \cdot P_{non\ intervention}]$$

Avec :

$P_{localisation}$: Probabilité de localisation d'un affouillement de berge pouvant affecter la digue,

$P_{affouillement}$: Probabilité d'affouillement de berge,

$P_{non\ détection}$: Probabilité de non détection du désordre par les gardes-digues ou par les équipes de surveillance lors de la crue,

$P_{non\ intervention}$: Probabilité de non intervention en cas de détection du désordre.

8.9.2 Probabilité de localisation

L'étude morphodynamique et le retour d'expérience des crues passées nous amènent à déterminer la probabilité de localisation d'un affouillement de berge pouvant affecter la digue suivant la grille suivante :

Tableau 53. Probabilité de localisation d'un affouillement de berges pouvant affecter la digue

Largeur du ségonnal (m)	Probabilité de localisation	Qualification verbale
0 m	0,9	probable
5 m	0,5	neutre
10 m	0,1	Peu probable
15 m	0,01	très peu probable
20 m	0,001	quasiment impossible

Ces probabilités sont ajustées suivant une fonction de Gumbel en calant les paramètres sur les probabilités comprises entre 0.001 et 0.5. Une borne inférieure à 10^{-6} (qui correspond à une largeur de ségonnal de 25 m) est fixée, ce qui donne la formule suivante :

$$P_{localisation} = MAX\left(10^{-6}; \exp\left(-exp\left(\left(\frac{L - 6.374}{6.240}\right)\right)\right)\right)$$

Avec L : Largeur du ségonnal (en m)

8.9.3 Probabilité d'affouillement

Suivant l'analyse du chapitre 4.2., les probabilités d'affouillement externe sont les suivantes

$$P_{affouillement\ (herbacés)} = MAX\left[\exp\left(-\exp\left(-\left(\frac{\tau - 67}{12,5}\right)\right)\right); 10^{-6}\right]$$

$$P_{affouillement\ (arbres)} = \max\left[exp\left(-exp\left(-\left(\frac{\tau-202}{37,4}\right)\right)\right); 10^{-6}\right]$$

$$P_{affouillement\ (panneaux\ de\ fonds)} = \max\left[exp\left(-exp\left(-\left(\frac{\tau-269}{50}\right)\right)\right); 10^{-6}\right]$$

$$P_{affouillement\ (enrochements\ anciens)} = \max\left[exp\left(-exp\left(-\left(\frac{\tau-336}{62,4}\right)\right)\right); 10^{-6}\right]$$

$$P_{affouillement\ (enrochements\ avec\ sabot)} = \max\left[exp\left(-exp\left(-\left(\frac{\tau-471}{87,4}\right)\right)\right); 10^{-6}\right]$$

Pour les fondations rocheuses, il est retenu une probabilité de 0,001.

Avec τ contrainte de cisaillement sur la berge définie comme suit :

$$\tau = m\ \gamma_w.h.i.$$

Avec :

- τ : force tractrice (N/m² ou Pa)
- γ_w : poids unitaires de l'eau (9 800 N/m^3)
- i : pente hydraulique d'écoulement
- h : hauteur d'eau en m au droit de la berge (niveau d'eau – bathymétrie de pied de berge)
- m : 1 en intrados et ligne droite et 1,7 en extrado

8.9.4 Probabilité de non détection

La probabilité de non détection va dépendre de deux paramètres :

- la cinétique d'affouillement,
- le mode de surveillance mis en place.

Suivant la formulation définie au chapitre 7 et en retenant une durée très pessimiste entre la détection de l'affouillement et la brèche de 10 heures en ligne droite et de 3 heures en extrados, on estime la probabilité de non détection à 0,1 quel que soit le seuil d'alerte en ligne droite et dans les coudes respectivement 0,1 en alerte 3 et 0,5 pour les autres niveaux d'alerte.

8.9.5 Probabilité de non intervention

Suivant la formulation définie au chapitre 7, la probabilité de non intervention est de 1 pour les digues non carrossables. Pour les digues carrossables, elle est de 0,3 dans les lignes droites et de 1 dans les extrados.

8.10 SCENARIO DE BRECHE N°10 : GLISSEMENT DU TALUS AVAL

8.10.1 Description du scénario de brèche n°10

Ce scénario correspond au glissement du talus aval de digue en crue. La figure ci-dessous illustre la représentation du scénario de brèche envisagé.

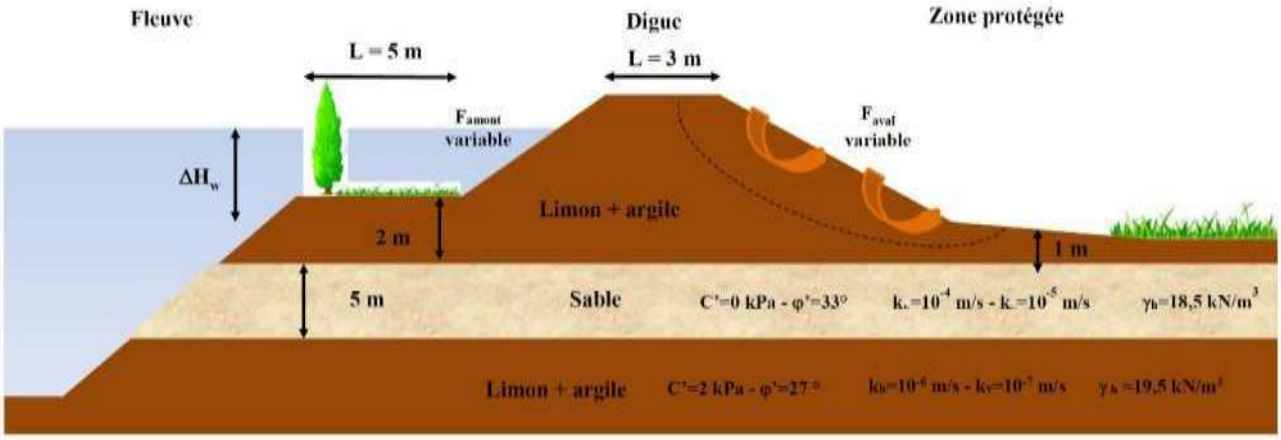


Figure 135. Illustration du scénario de brèche n°10

S'agissant par définition d'un mouvement de masse, on considère que le glissement du talus aval est instantané. La détection et les interventions d'urgence ne sont donc pas prises en compte dans la détermination de la probabilité de brèche.

8.10.2 Détermination de la probabilité de brèche

Pour la détermination des probabilités de brèche, conformément à l'analyse réalisée au chapitre 5, on applique de manière indifférenciée entre digues d'origine et digues confortées, les formules suivantes en fonction des facteurs de sécurité globaux :

$$P_{brèche\ par\ glissement\ (F<1{,}1)} = MAX\left(\exp\left(-\exp\left(\left(\frac{F-0{,}966}{0{,}09}\right)\right)\right); 10^{-6}\right)$$

$$P_{brèche\ par\ glissement\ (F>1{,}1)} = MAX\left(\exp\left(-\exp\left(\left(\frac{F-0{,}441}{0{,}442}\right)\right)\right);\ 10^{-6}\right)$$

8.11 SCENARIO DE BRECHE N°11 : GLISSEMENT DU TALUS AMONT

8.11.1 Description du scénario de brèche n°11

Ce scénario correspond au glissement du talus amont de digue en crue. La figure ci-dessous illustre la représentation du scénario de brèche envisagé. La stabilité de la berge n'est pas abordée dans ce scénario ; étant traité dans la problématique d'affouillement externe (Cf. scénario n°9).

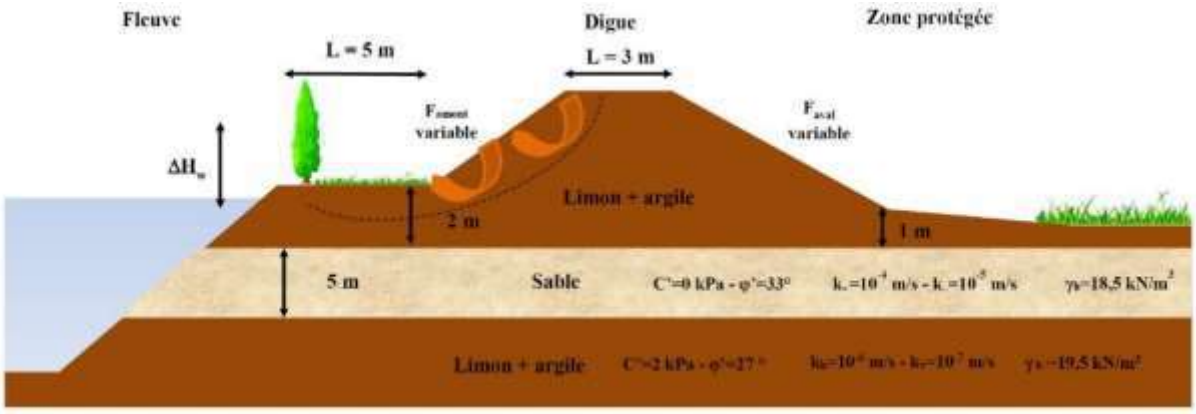


Figure 136. Illustration du scénario de brèche n°11

Contrairement au glissement du talus aval, on considère que la détection et les interventions sont possibles.

Les différentes étapes du scénario de brèche sont représentés dans l'arbre d'événements suivant :

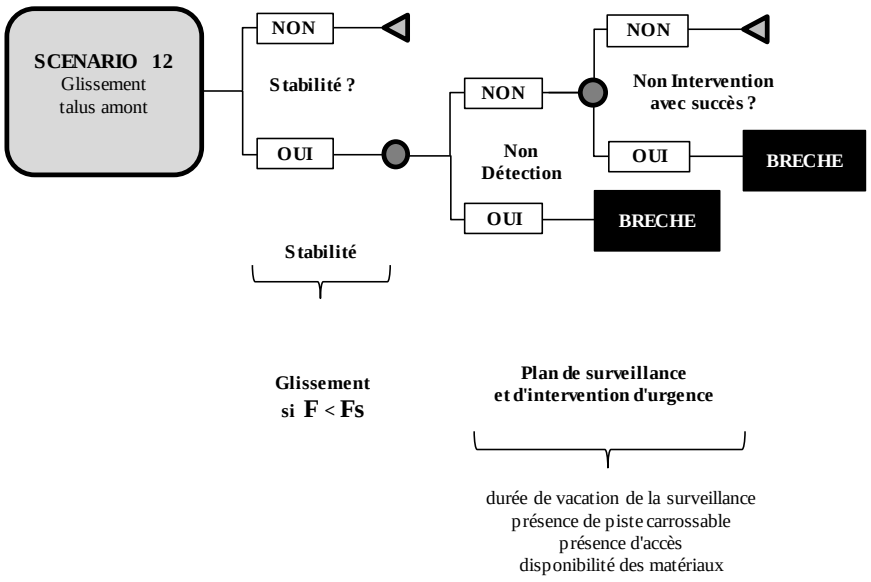


Figure 137. Scénario de brèche n°11 – arbre d'événements

8.11.2 Détermination de la probabilité de glissement du talus amont

Pour la détermination des probabilités de brèche, conformément à l'analyse réalisée au chapitre 5, on applique de manière indifférenciée entre digues d'origine et digues confortées, les formules suivantes en fonction des facteurs de sécurité globaux :

$$P_{brèche\ par\ glissement\ (F>1{,}1)} = MAX\left(\exp\left(-\exp\left(\left(\frac{F-0{,}441}{0{,}442}\right)\right)\right); 10^{-5}\right)$$

$$P_{brèche\ par\ glissement\ (F<1{,}1)} = MAX\left(\exp\left(-\exp\left(\left(\frac{F-0{,}966}{0{,}09}\right)\right)\right); 10^{-5}\right)$$

Les différents calculs montrent que pour un ouvrage conforté avec une perméabilité faible à très faible, la stabilité de talus amont est assurée avec des facteurs de sécurité confortables. Les calculs montrent parfois des glissements de peau en pied de talus ; ces glissements n'affectant néanmoins pas la stabilité de l'ouvrage.

8.11.3 Probabilité de non détection

La probabilité de non détection va dépendre de deux paramètres :

- de la cinétique de décrue,
- du mode de surveillance mis en place.

On estime la probabilité de non détection à

$$P_{non\ détection} = \mathrm{MAX}\left(0{,}1; \left(1 - \frac{\Delta t_u}{P_s}\right)\right)$$

Avec :

P_s : pas de surveillance en heures (3 h en alerte 3 et 6 heures pour les autres niveaux d'alerte)
Δt_u : temps entre la détection de l'amorce de glissement du talus amont et le glissement

En prenant l'hypothèse d'une décrue rapide (25 cm/h), on retient un Δtu = 6 heures, soit une probabilité de non détection égal à 0,1 quel que soit le niveau du seuil d'alerte.

8.11.4 Probabilité de non intervention

On estime la probabilité de non intervention à:

$$P_{non\ intervention} = \mathrm{MIN}\left(1; \frac{\Delta t_i}{\Delta t_u}\right)$$

Avec :

Δt_i : temps d'intervention en h (Δt_i = 3 heures pour les digues carrossables et Δt_i = 24 heures pour les digues non carrossables)
Δt_u : temps entre la détection de l'amorce de glissement du talus amont et le glissement

Ce qui donne une probabilité de non intervention de 0,5 pour les digues carrossables et de 1 pour les digues non carrossables.

8.12 SCENARIO DE BRECHE 12 : STABILITE MECANIQUE HORS GLISSEMENT

Ce scénario de brèche regroupe l'ensemble des ruptures et déformation mécaniques en dehors du glissement, du claquage hydraulique et du soulèvement hydraulique du pied aval. Il ne concerne pas les ruptures des murs parapets et des batardeaux qui sont traitées dans le scénario 13.

Il concerne pour les remblais et ouvrages poids :

- Le tassement (déformation),
- Le défaut de portance (rupture),

Il concerne pour les ouvrages poids en béton ou maçonnerie :

- Glissement du mur sur sa base;
- Renversement du mur ;
- Poinçonnement du sol sous la base du mur;
- Rupture combinée dans le sol et la structure ;
- Instabilité d'ensemble ;
- Mouvements excessifs ;
- Rupture d'un élément de structure ou des liaisons entre ces éléments (liaison portes/mur..) ;
- Fissuration par traction du parement amont.

Il concerne pour les rideaux de palplanches :

- la stabilité de l'écran vis-à-vis d'une rupture par défaut de butée (stabilité externe) ;
- la résistance de la structure de l'écran (stabilité interne) ;
- la portance de l'écran (stabilité externe) ;
- la stabilité des tirants d'ancrage (stabilité interne) ;
- l'absence d'interaction entre l'écran et un ancrage (stabilité externe) ;
- la stabilité du fond du lit (stabilité hydraulique) ;
- la stabilité d'ensemble de l'écran (stabilité globale).

En rive gauche, les ouvrages concernés par ce scénario sont :

- La digue de la Montagnette – mur de soutènement en gabions,
- Les murs des quais de Tarascon,
- Les murs du Château Royal de Provence,
- Le rideau de palplanches au droit de l'usine Fibre Excellence,
- Les murs des quais d'Arles,
- Le muret au droit du remblai dit de l'IRPA,
- l'écluse d'Arles gérée par VNF,
- l'écluse du Canal du Rhône à Fos gérée par la CNR,

En Camargue Insulaire, les ouvrages concernés par ce scénario sont :

- Les murs des quais d'Arles,

8.12.1 Défaut de portance et Tassement

Le tassement et le défaut de portance concernent plus des déformations que des ruptures même s'ils peuvent jouer un rôle dans des scénarios de brèche.

Les états-limites de déformation pour un ouvrage hydraulique en remblai correspondent essentiellement à des critères de fonctionnalité (l'état-limite de service de tassement). Il est essentiel de préserver l'intégrité des organes vitaux des ouvrages hydrauliques en remblai que sont l'étanchéité (noyau argileux, masque amont, écran interne), le système de drainage (drain vertical ou incliné, tapis drainant) et les conduites et galeries traversantes.

L'objectif est donc de se prémunir de déformations excessives du remblai ou de sa fondation pouvant entraîner :

- une diminution de la revanche et donc un risque de brèche par surverse ;
- une modification du réseau d'écoulement interne (par exemple par cisaillement du
- système de drainage suite à des tassements différentiels) et donc un risque de rupture par glissement ;
- une ouverture de fissures dans l'organe d'étanchéité (par exemple par fracturation hydraulique pour une digue en remblai et donc un risque de brèche par érosion de conduit ;
- une fissuration ou une rupture des conduites ou galeries passant dans le remblai ou la fondation.

Des déformations excessives sont également susceptibles d'entraîner un mécanisme de rupture de l'ouvrage en remblai, correspondent à des critères de résistance de la fondation (c'est l'état-limite ultime de défaut de portance),

Ces deux modes de déformation (tassement) et de rupture (défaut de portance) ont été pris en compte dans la phase chantier de création ou engraissement d'une digue.

La notion de portance (ou de capacité portante) de la fondation fait référence à un critère de résistance au cisaillement de la fondation pour des ruptures par poinçonnement. Ce sont des ruptures du sol de fondation caractérisées par le fait que le remblai s'affaisse en subissant des tractions. La rupture du sol de fondation est générale puisqu'elle intéresse la totalité de la largeur d'assise du remblai. Le schéma de rupture du sol de fondation est analogue à celui qui se produit sous une fondation superficielle et peut donc être étudié comme tel.

Le cas le plus défavorable est de manière générale la fin de construction (court terme). La vérification de la stabilité au poinçonnement se fait en supposant le remblai construit instantanément, sans dissipation de pressions interstitielles dans le sol de fondation. Seuls les ouvrages neufs ou les projets de surélévation d'ouvrages anciens sont concernés.

Le tassement se fait en deux, voire trois phase. La première est la consolidation primaire (durée de 5 à 10 ans) mais dont une grande partie intervient en phase de chantier et la secondaire qui ne représente un fluage de quelques centimètres.

8.12.2 Stabilité des ouvrages poids comportant éventuellement un rideau de palplanches en pied

8.12.2.1 Rive gauche du Rhône

Au droit de la digue de la Montagnette, BRLi a vérifié dans le cadre du projet [D002] :

- la stabilité au glissement, au renversement et la stabilité générale du mur de soutènement en gabions sur le talus aval (hauteur variable de 1 à 3 m) ;

La probabilité de brèche en cas d'instabilité du mur de soutènement a été prise en compte dans le cadre du scénario n°11.

Au droit du château, BRLi a vérifié dans le cadre du projet [D002] :

- la stabilité (ELS et ELU) au glissement et au renversement de l'ouvrage de renforcement de la poterne du Rhône ;
- Le dimensionnement des profilés et de la tôle (ELS et ELU) de l'ouvrage de renforcement de la poterne du Rhône ;

Dans le cadre de l'étude de dangers initiale [E206], BRLi a réalisé une analyse de risques des murs du château amont et aval et du château, les conclusions sont reprises ci-dessous :

- *Il n'y a pas d'indications de phénomènes inquiétant quant à la stabilité des murs pour les évènements historiques connus ;*
- *La stabilité générale des murs n'est pas jugée problématique compte tenu de la comparaison de la charge hydraulique amont avec la géométrie et l'état général correct constaté pour les murs.*

Ces murs sont fondés au rocher, d'où une fondation de meilleure qualité que pour les tronçons de quais.
La plus faible largeur des murs (et donc une réduction du poids résistant) se traduit par la réduction de la surface sur laquelle les sous-pressions s'appliquent en fondation (d'où une réduction en parallèle des efforts déstabilisateurs).
Le niveau d'aléa de rupture Mécanique pour ces deux tronçons est donc établi comme Très Faible pour l'ensemble des crues de projet.
Sur le tronçon 16, à savoir la base du château proprement dit, la poterne du Rhône constitue le seul point singulier nécessitant de s'interroger sur la résistance mécanique de ce tronçon.

Une probabilité annuelle de brèche de 10^{-6} a été déterminée à dire d'experts pour les murs du château et pour les quais de Tarascon.

8.12.2.2 Quais du Rhône en traversée d'Arles

Au droit du raccordement entre le quai du 8 mai 1975 et du quai Marx Dormoy, ISL a vérifié dans le cadre du projet [D406] : la capacité portante des pieux.

Au droit du quai Marx Dormoy, ISL a vérifié dans le cadre du projet [D406] :

La stabilité du talus côté fleuve, côté terre en étiage, en crue et à la décrue. Un calcul préliminaire de l'état initial a permis de caler les paramètres géotechniques et hydrauliques. Les calculs suivants ont été réalisés :

- G + Q (ELS) pour calculer les déplacements ;
- 1,35G + 1,5Q (ELU) pour justifier la résistance interne mécanique des structures de quai ;
- G + Q (STAB) pour justifier la stabilité d'ensemble du sol et de la structure (palplanches, tirants et lierne) ;

La stabilité des palplanches, la vérification des tirants (barres) et du scellement des tirants ainsi que de la lierne a été opérée.

Au droit du quai de la roquette, ISL a vérifié dans le cadre du projet [D402] :

La stabilité d'ensemble de l'ouvrage en termes de contrainte et de déplacement. Les calculs suivants ont notamment été réalisés sur les palplanches, tirants, ouvrage en globalité :

- Justification des résistances internes aux ELU
- Justification de la stabilité d'ensemble (fiche du rideau amont et du rideau aval)

Dans le cadre du projet de reprise du quai de Saint Pierre Amont [D1401], il a été montré par ISL que la stabilité de l'ouvrage après réalisation des travaux de confortement est nettement supérieure à celle de l'ouvrage initial, cette dernière étant attestée.

Au droit du quai de Saint Pierre aval et du quai de Trinquetaille, ISL a vérifié dans le cadre du projet [D1402] :

- La stabilité au glissement du quai bas, à l'étiage, en crue et en décrue
- La stabilité au grand glissement (=de l'ensemble du quai), à l'étiage, en crue et en décrue
- La stabilité du quai supérieur, à l'étiage et en décrue
- La stabilité au glissement et au renversement du mur poids

Au droit du quai de la Gare maritime, ISL a vérifié dans le cadre des projets sur les quais bas puis les quais hauts [D1405 et D1407] :

- La stabilité du mur vis-à-vis du renversement et du soulèvement,
- La stabilité du quai, dans les conditions fondamentales et de crue.

Au droit du quai de la Gabelle, ISL a vérifié dans le cadre des projets [D1403] :

- La stabilité au glissement du quai bas, à l'étiage, en crue et en décrue,
- La stabilité au grand glissement (=de l'ensemble du quai), à l'étiage, en crue et en décrue,
- La stabilité au glissement au renversement et au cisaillement du mur poids

Une probabilité annuelle de brèche de 10^{-6} a été déterminée à dire d'experts pour les quais d'Arles

8.12.2.3 Camargue Insulaire

Dans le secteur d'Albaron, la stabilité du confortement avec le système M3S a fait l'objet d'une note de calcul [T305]. La justification du dimensionnement a pris en compte le glissement, le poinçonnement, et la stabilité globale : les facteurs de sécurité globaux sont bien supérieurs à 1 après application de coefficients de sécurité à la fois sur les actions et les paramètres du sol. Les calculs sont menés sans mise en charge car un drain est présent entre le soutènement et le talus en terre.
Le système est exactement le même que celui mis en place pour la zone confortée de Petite Montlong [T408].
Une probabilité de 10^{-5} est retenue quelle que soit la crue étudiée.

8.12.3 Stabilité du rideau de palplanche de l'usine Fibre Excellence (rive gauche)

Au droit du rideau de l'usine Fibre Excellence, SAFEGE a vérifié dans le cadre du projet [D202] les états limites suivants :

- ELU de rupture structurelle de l'écran (rupture interne)
- ELU de défaut de butée (rupture externe)
- ELS de déplacement
- ELU de rupture de l'ancrage (pour les ouvrages ancrés)

Les probabilités retenues de brèche après travaux dans le rideau de palplanches dimensionnés pour résister à la crue exceptionnelle sont les suivantes :

Tableau 54. Probabilités conditionnelles de brèche dans le rideau Fibre Excellence

Crue	Probabilité annuelle d'occurrence	Probabilité conditionnelle
6 000	0,5	0
7 200	0,372	10^{-8}
8 500	0,064	10^{-7}
9 500	0,032	10^{-6}
10 500	0,016	10^{-5}
11 500	0,008	10^{-4}
12 500	0,006	10^{-3}
14 160	0,002	10^{-2}

8.12.4 Stabilité des portes des écluses VNF (Arles) et CNR (Barcarin)

BRLi a dimensionné pour le compte de VNF la rehausse des portes de l'écluse d'Arles, aujourd'hui terminée. Dans le cadre du projet [D502], les calculs justifiant la tenue de l'ouvrage pour la crue exceptionnelle ont été menés.

Une probabilité annuelle de brèche de 10^{-6} a été déterminée à dire d'experts pour les portes de l'écluse d'Arles.

CNR a réalisé une étude de dangers de l'écluse de Barcarin et des digues d'embouquement [R305]. Le scénario de rupture de la porte amont a été analysé. La probabilité annuelle de ce scénario a été estimée à 10^{-4} par la CNR.

8.13 SCENARIO DE BRECHE 13 : STABILITE MECANIQUE DES PARAPETS ET BATARDEAUX

Les ouvrages concernés par ce scénario sont : les parapets respectivement de la digue de la montagnette, des quais de Tarascon, des quais d'Arles et du remblai de l'IRPA en rive gauche du Rhône et des quais d'Arles en Camargue insulaire.

Au droit de la digue de la Montagnette, BRLi a vérifié dans le cadre du projet [D002] :

- la stabilité (ELS et ELU) au glissement, au renversement et la stabilité du sol de fondation du parapet en crête de digue (2 cas) ;

Le dimensionnement des batardeaux (et de leur massif) de la digue de la Montagnette a été réalisé dans le cadre des études d'exécution du marché de travaux réalisé en 2015 et qui a fait l'objet d'un dossier des ouvrages exécutés [T109].

Au droit du quai de Tarascon, BRLi a vérifié dans le cadre du projet [D002] :

- la stabilité (ELS et ELU) au glissement et au renversement du parapet du quai (par rangées de pierre) ;

Au droit des quais d'Arles, ISL a vérifié dans le cadre du projet la stabilité des parapets pour la crue exceptionnelle majorée d'une revanche de 50 cm [D403]. Deux hypothèses de distribution des sous-pressions ont été prises en compte. Les critères de stabilité vérifiés sont :

- La capacité des maçonneries à résister aux efforts de cisaillement,
- La fissuration et le renversement du parapet,
- Le poinçonnement de la fondation.

Dans le cadre de l'étude de dangers des quais réalisée par ISL pour la demande d'autorisation des travaux [E602] et mise à jour après travaux [E607], la rupture d'un batardeau des quais d'Arles a été analysée. Les commentaires extraits de l'étude de dangers sont repris en partie ci-dessous :

Tous les batardeaux susceptibles d'être mis en eau pour la crue millénale [exceptionnelle] *ont été obturés ou modernisés et confortés. Ils ont tous fait l'objet de notes de calculs permettant de s'assurer que les efforts étaient bien repris sur les dalles en béton sur lesquelles repose chaque batardeau.*
Les batardeaux ne sont pas exposés aux chocs : ils sont parallèles à l'axe du cours d'eau ou orientés vers l'aval (Porte des Curatiers, batardeau situé en amont du quai de la Gabelle ...).
Il est donc peu probable qu'ils rompent s'ils sont correctement montés. A ce titre, compte tenu du nombre de batardeaux et du nombre d'agents assurant le montage et en l'absence de document permettant de s'assurer de la bonne formation des agents, d'essais réguliers de montage ou du contrôle par un tiers du montage, le risque de défaut de montage ne peut être écarté.
Pour prévenir un défaut de montage, il est recommandé de mandater l'intervention d'un contrôle extérieur après montage de l'ensemble des batardeaux, ou, à minima des batardeaux les plus sensibles (hauteur supérieure à 1,5 mètre.). Un contrôle interne est également envisageable sous réserve qu'il soit formalisé et réalisé par des personnels dont les compétences devront en préalable être attestées.…

La rupture d'un batardeau ne peut être considérée comme improbable du fait du risque de malveillance ou de défaut de montage ..... Des mesures de réduction du risque sont proposées. Avec mise en place des mesures de réduction du risque, la rupture d'un batardeau est jugée improbable.

Depuis, Les mesures de réduction du risque ont été mises en place par la commune d'Arles et figurent dans le Plan Communal de Sauvegarde. Les disfonctionnement observés lors des premières crues après travaux, notamment ceux relatifs au fait que les batardeaux n'étaient pas démontés tout de suite après crue et étaient de ce fait exposés à des risque de malveillance, ont été corrigés.
Une convention tripartite pour une gestion coordonnée des quais du Rhône en traversée d'Arles est en cours de signature et reprend les consignes à respecter. On peut donc considérer que les mesures sont effectives. Ces consignes concernent également le parapet de l'IRPA.
Les probabilités de rupture d'un batardeau ont été fixés par ISL dans le cadre de [E607] à :

- débit = 10 500 m^3/s – Probabilité < 10^{-4} ;
- débit = 11 500 m^3/s – 10^{-4} < Probabilité < 10^{-3} ;
- débit = 14 160 m^3/s – 10^{-3} < Probabilité < 10^{-2} ;

Dans le cadre de la présente étude de dangers, compte tenu des vérifications et analyses faites les différents maîtres d'œuvre et pour tenir compte d'une probabilité augmentant avec l'intensité de la crue, on retient la formule suivante pour estimer le scénario d'entrée d'eau par rupture du parapet ou rupture d'un batardeau englobé dans un parapet. Cette formule donne une probabilité conditionnelle de 1 % pour une crue atteignant le plein bord du parapet ou du batardeau.

$$P = \left(0{,}1.\frac{h}{H}\right)^2$$

Où h est la hauteur d'eau par rapport à la base du parapet et H la hauteur de ce dernier.

Le tableau ci-dessous donne un exemple de calcul pour le batardeau de la porte des Curatiers, qui est le batardeau le plus exposé en termes de fréquence et de charge d'eau. La formule précitée donne une probabilité annuelle de rupture d'environ 10^{-4}.

Tableau 55. Probabilité annuelle de rupture du batardeau T1 – Porte des Curatiers

Crue	Probabilité annuelle d'occurrence	Charge d'eau	Probabilité conditionnelle	Probabilité annuelle
6 000	0,5	0	0E+00	0E+00
7 200	0,372	0	0E+00	0E+00
8 500	0,064	0,2	6E-05	4E-06
9 500	0,032	0,6	5E-04	1E-05
10 500	0,016	1,0	1E-03	2E-05
11 500	0,008	1,5	3E-03	2E-05
12 500	0,006	1,7	4E-03	2E-05
14 160	0,002	1,9	4E-03	9E-06
Probabilité annuelle de rupture				9E-05

Pour les batardeaux il est également pris en compte une probabilité de mauvaise mise en place et de défaillance qui est de 5% par batardeau. En cas de défaillance, la probabilité de non intervention est de 1% ; les batardeaux étant mis en place bien avant leur mise en charge.

Probabilité défaillance d'au moins un batardeau

= 1- Probabilité de bonne mise en place de tous les batardeaux ou d'intervention

$= 1 - \prod_1^n Probabilité\ de\ bonne\ mise\ en\ place\ ou\ d'intervention$

$= 1 - \prod_1^n (1 - Probabilité\ défaillance * Probabilité\ de\ non\ d'intervention)$

$= 1 - \prod_1^n (1 - 0.05 * 0.01)$

$= 1 - (1 - 0.05 * 0.01)^n$

Les différentes étapes du scénario de brèche sont représentés dans l'arbre d'événements suivant :

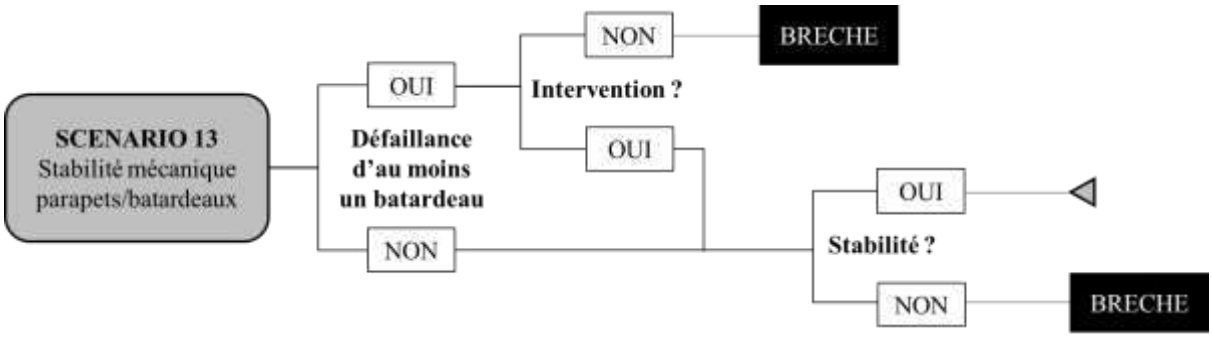


Figure 138. Scénario de brèche n°13 – arbre d'événements

La probabilité finale est alors :

$$P = (1 - (1 - 0{,}05 * 0{,}01)^n) + (1 - 0{,}05 * 0{,}01)^n . \left(0{,}1 . \frac{h}{H}\right)^2$$

où n est le nombre de batardeaux sur le tronçon

Remarque pour n=0 (pas de batardeau englobé dans le parapet) :

$(1 - (1 - 0{,}05 * 0{,}01)^n) = 0\ et\ (1 - 0{,}05 * 0{,}01)^n = 1$, soit $P = \left(0{,}1 . \frac{h}{H}\right)^2$

8.14 SCENARIO A : DEFAILLANCE D'UN OHT

Ce scénario correspond à libération d'eau dans la zone protégée par défaillance d'un ouvrage hydraulique traversant. Il est illustré ci-dessous

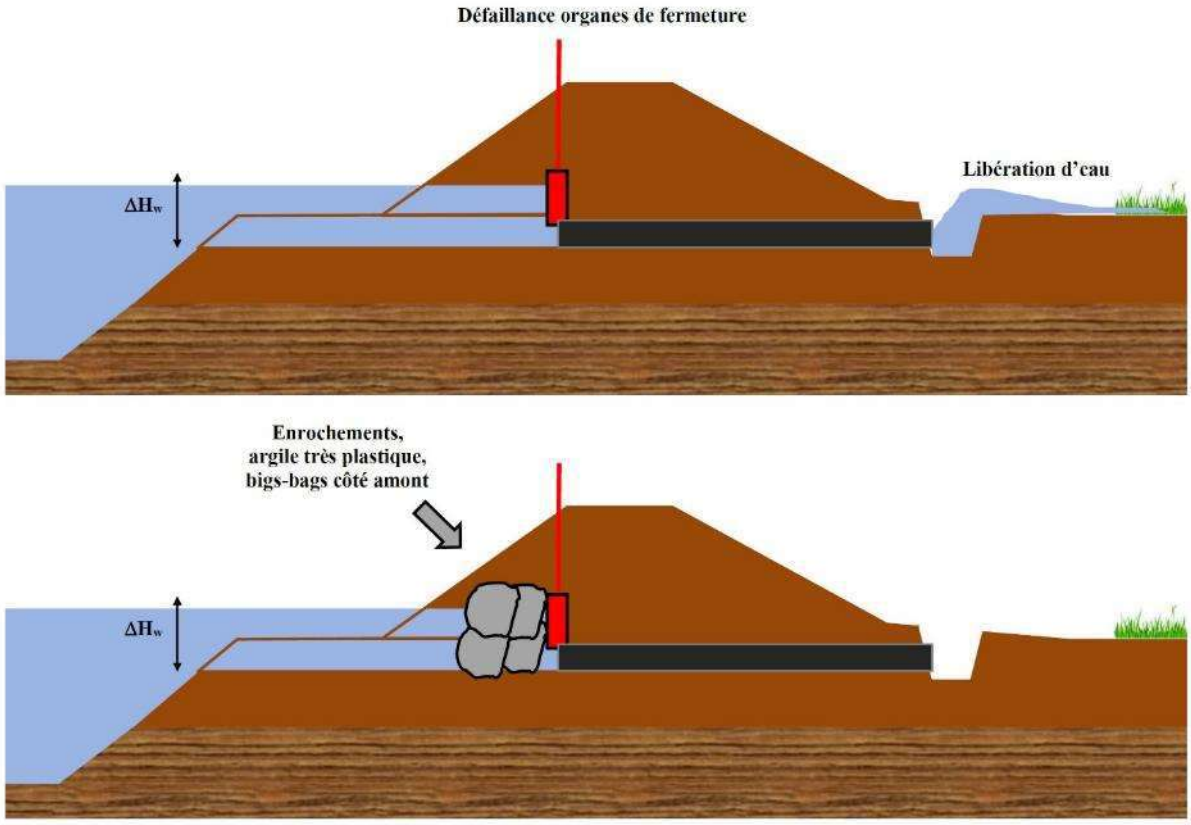


Figure 139. Défaillance d'un OHT

La défaillance peut porter sur l'absence de fermeture des vannes ou des martelières ou sur la rupture des organes de fermeture.

En Novembre 2002, 5 désordres ont concerné des ouvrages hydrauliques traversants :

- 2 désordres liés à des vannes fuyardes,
- 2 désordres liés à des colmatages de conduites hors service, qui ont cédé sous la pression de l'eau ou se sont effondrés suite à des écoulements,
- 1 désordre lié à une érosion de conduit le long d'un ouvrage hors service.

Ces 5 désordres ont fait l'objet d'intervention d'urgence consistant à mettre soit de l'argile côté fleuve ou des big-bags au droit des ouvertures. Elles ont toutes permise de stopper le processus d'inondation (scénario A) ou de brèche (scénario 2). Depuis, sur ces 5 ouvrages, 3 ont été supprimés et les 2 autres ont été confortés.

En décembre 2003, 14 désordres ont concerné des ouvrages hydrauliques traversants :

- 9 désordres, dont 3 ayant fait l'objet d'interventions d'urgence ont concerné des fuites des organes de fermeture (scénario A).

- 5 désordres, dont 4 ayant fait l'objet d'interventions d'urgence concernent des écoulements le long des conduites (scénario 2).

Sur les 9 défaillances de type A, 4 ouvrages ont été purgés.

Lors des crues de 2002 et 2003, il existait 377 ouvrages hydrauliques traversants dans le périmètre du SYMADREM. Depuis 51 ouvrages hors service ont été supprimés.

En 2002 et 2003, on peut considérer que respectivement 4 et 9 ouvrages sur 377 ont subi une défaillance, soit 1,5 % en 2002 et 3,4 % en 2003. Toutes les interventions ont été couronnées de succès.

Compte tenu des deux campagnes de purge des ouvrages hydrauliques traversants réalisées en 2010 et 2015, on peut considérer aujourd'hui que la probabilité de défaillance d'un ouvrage traversant en crue est de 1 % pour les ouvrages anciens, de 0,1 % pour les ouvrages rénovés avec une vanne et 0,01 % pour les ouvrages rénovés avec deux organes de fermeture.

Compte tenu du succès rencontré pour colmater les ouvrages défaillants et du fait que les libérations d'eau avant intervention sont « absorbées » par les canaux situés en aval, on considérera que ce scénario est acceptable dans l'état actuel ($P \approx 10^{-3}$) et dans l'état projet ($P << 10^{-3}$), sauf situation très particulière.

8.15 SCENARIO DE BRECHE B : REMBLAI FERROVIAIRE – EROSION DE CONTACT DE LA COUCHE DE GRAVIERS EN CRETE

Ce scénario est spécifique au remblai ferroviaire dans l'état initial. Il est illustré ci-dessous

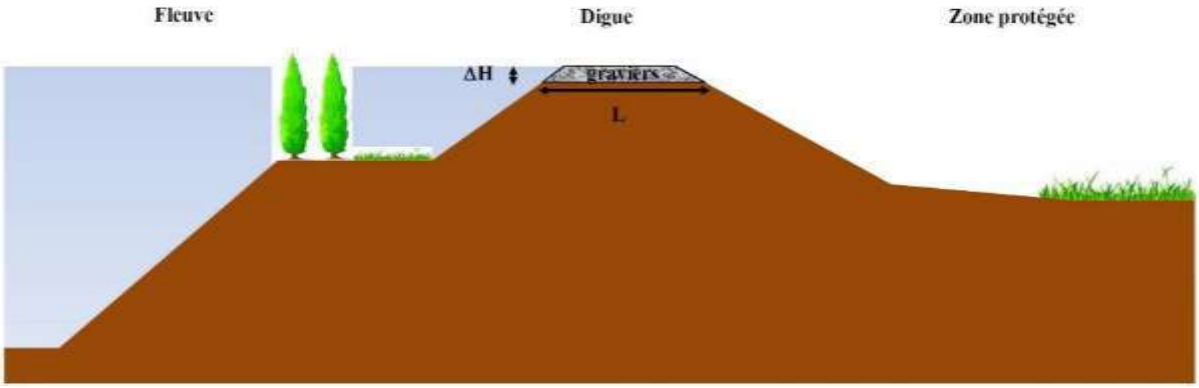


Figure 140. Scénario de brèche par érosion de contact en crête de digue

Le profil en long ci-dessous extrait de l'étude de calage [K100] montre le profil en long de la base (en pointillé) et du sommet (en trait continu) de la couche de graviers ainsi que les lignes d'eau de la crue 11500 (en vert), de la crue 12500 (en violet), de la crue 14160 (en rouge).

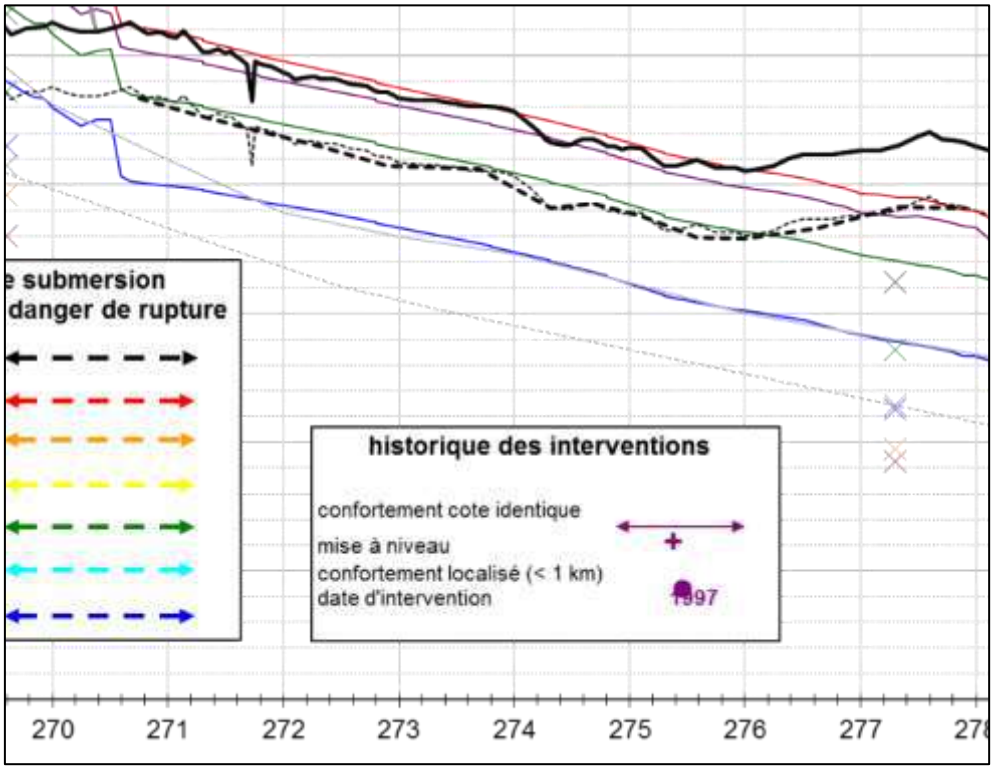


Figure 141. Profil en long au droit du remblai ferroviaire

En prenant une base de largeur 8 m. les gradients en crue dans la couche de graviers sont les suivants :

Tableau 56. Gradient maxi dans la couche de graviers

Crue	Charge (en m)	Gradient
11 500	0.20	0.025
12 500	0.60	0.075
14 160	0.80	0.1

La probabilité d'initiation suivant les formules définies dans le chapitre 2.4. donne une probabilité d'initiation d'environ 0. Ce scénario est écarté.

8.16 SCENARIO C : BRECHE DANS LE REMBLAI FERROVIAIRE RENDU TRANSPARENT HYDRAULIQUEMENT

Le remblai ferroviaire après travaux sera rendu transparent hydrauliquement. Néanmoins, il subsistera une perte de charge entre l'amont et l'aval et donc des risques potentiels.

Par rapport aux 13 scénarios de brèche, on écarte l'affouillement externe qui est traité par des protections au droit des ouvrages de transparence (Cf. projet SNCFréseau), le glissement des talus peut être également écarté compte tenu du faible temps de mise en eau qui ne permet pas une saturation du remblai. Les seuls risques subsistant sont ceux relatifs à l'érosion interne (scénarios n°1 à n°7) et la surverse (scénario n°8).

Pour le calcul du différentiel de charges, 10 limnigrammes ont été extraits du modèle d'EGISeau. Ils sont localisés ci-dessous.

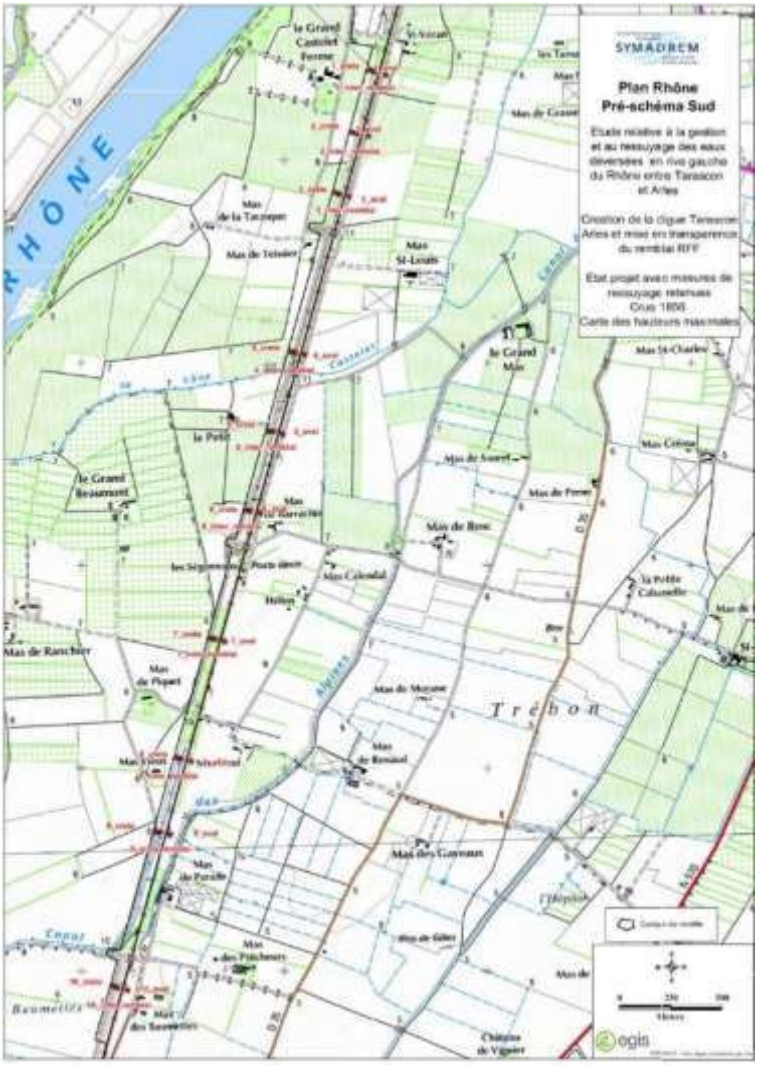


Figure 142. Limnigrammes inter-remblais et aval du remblai ferroviaire

Les limnigrammes inter-remblais et en aval du remblais sont représentés pour la crue exceptionnelles respectivement dans les deux figures ci-jointes.

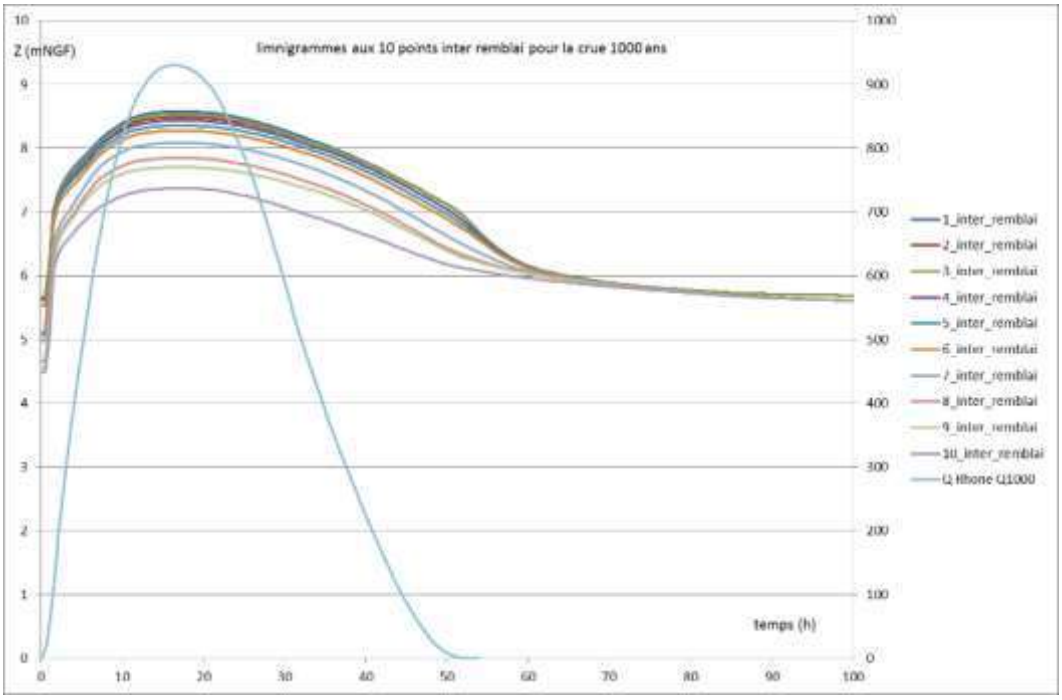


Figure 143. Etat projet - Déversement crue exceptionnelle – limnigrammes inter-remblais

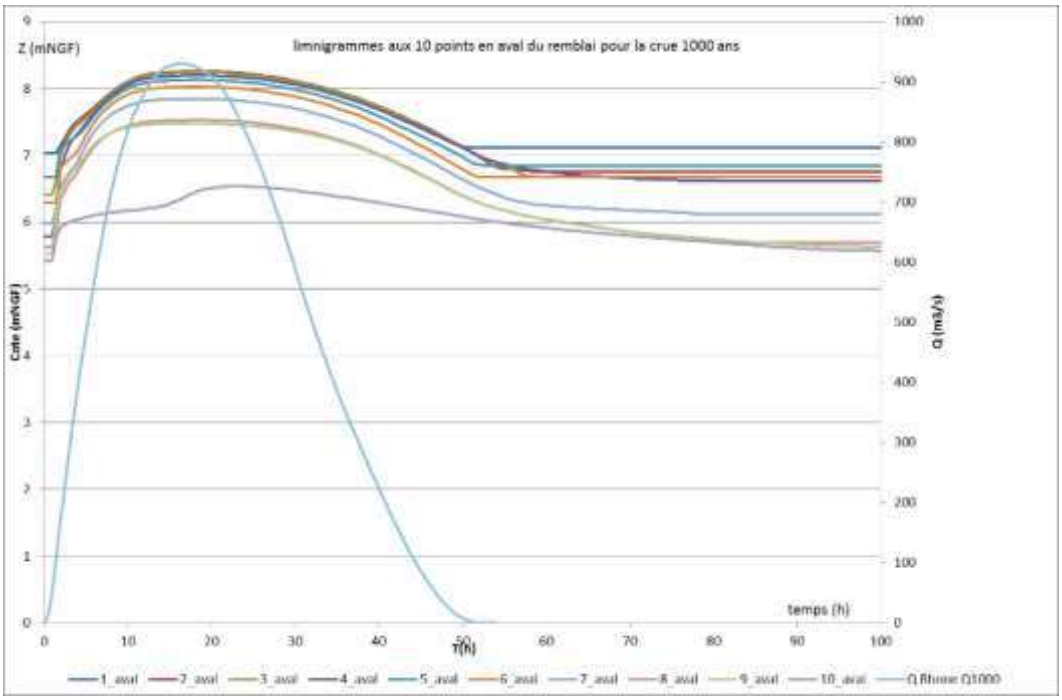


Figure 144. Etat projet - Déversement crue exceptionnelle – limnigrammes aval remblai ferroviaire

Le différentiel maxi de charges pour la crue 12500 est 60 cm et pour la crue 14160 de 1,10 m. Le scénario de brèche C a fait l'objet d'une évaluation de la probabilité annuelle de brèche détaillé en rubrique 8b de l'étude de dangers de la rive gauche. Les conséquences d'une brèche sont évaluées en rubrique n°8c de la même étude de dangers.

Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT FLUVIAL CAMARGUE INSULAIRE

DOCUMENT B

CHAPITRE N°7.2 : DIAGNOSTIC APPROFONDI

DES ELEMENTS CONSTITUTIFS DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT ET TENUE DES OUVRAGES (RESULTATS DE LA CARACTERISATION DES RISQUES EN TERMES DE PROBABILITE D'OCCURRENCE)

SOMMAIRE

1 Méthodologie de l'étude de dangers 4
1.1 Modèle Source / Transfert / Cible 4
1.2 Niveaux de protection, de sûreté et de danger - définitions 6
1.3 Limites de l'étude de dangers 10
1.4 Acceptabilité du risque ou criticité des scenarios d'inondation 13
1.5 Différentes étapes de l'analyse de risques incrémentaux 23
1.6 Modes de rupture - généralités 24
1.7 modes de rupture considérés 28
1.8 Barrières de sécurité, Fonctions, sous-fonctions et composants d'une digue en terre 31
1.9 Investigations, études et diagnostic approfondi 40
1.10 Choix d'une démarche probabiliste et courbe de fragilité 41
1.11 Scénarios d'accidents ou de brèches étudiés 45
1.12 Arbre d'événements d'un scénario de brèche 47
1.13 Modèle géométrique 49
1.14 Détermination de la probabilité annuelle de brèche 51
2 Méthodologie de calcul 56
2.1 Introduction 56
2.2 Les données géométriques 56
2.3 Les niveaux de crue 57
2.4 Les retour d'expérience 58
2.5 Les caractéristiques de site 58
2.6 Cote de sureté 59
2.7 Les données intermédiaires 60
2.8 Les calculs de probabilité 60
3 Résultats 66
3.1 Analyse et résumé 66
3.2 Présentation de la mise en forme 90
3.3 Digue du Défluent (D1) 95
3.4 Quais d'Arles (GRD1) 103
3.5 Papèteries Etienne (GRD2) 112
3.6 Digue D'Emmaüs-Passerons (GRD3) 120
3.7 Digue de Passerons-Montlong (GRD4) 128
3.8 Digue de Montlong (GRD5) 136
3.9 Digue de Montlong à Beaujeu (GRD6) 144

3.10 Digue de Beaujeu à l'Armelière (GRD7) 152
3.11 Digue de l'Armelière à la Commanderie (GRD8) 160
3.12 Digue de la Commanderie à Bois Verdun (GRD9) 168
3.13 Digue de Bois Verdun à Chartrouse (GRD10) 176
3.14 Digue de Chartrouse à la Louisiane (GRD11) 184
3.15 Digue de la Louisiane à l'Esquineau (GRD12) 192
3.16 Digue de l'Esquineau à la Palissade (GRD13) 201
3.17 Digue de Trinquetaille (PRG1) 209
3.18 Digue de Cazeneuve à Augéry (PRG2) 217
3.19 Digue du Bois de Beaumont (PRG3) 226
3.20 Digue de Beaumont à Cavalès (PRG4) 234
3.21 Digue de Cavalès à St Gilles (PRG5) 242
3.22 Digue de Saint-Gilles à Figarès (PRG6) 250
3.23 Digue de Figarès (PRG7) 258
3.24 Digue de la Galante à Albaron (PRG8) 266
3.25 Digue d'Albaron (PRG9) 274
3.26 Digue d'Albaron à Eymini (PRG10) 282
3.27 Digue d'Eymini à Sénebier (PRG11) 290
3.28 Digue de Sénebier (PRG12) 299
3.29 Digue de Sylvéréal au Mas d'Icard (PRG13) 307
3.30 Digue du Mas d'Icard au bac (PRG14) 316
3.31 Digue de l'aval du bac du Sauvage (PRG15) 324
3.32 Digue de Port Dromar (PRG16) 332
3.33 Digue du Port de l'Amarée (PRG17) 340
3.34 Digue de l'Amarée (PRG18) 348
3.35 Digue de l'Embouchure (PRG19) 356

1 METHODOLOGIE DE L'ETUDE DE DANGERS

1.1 MODELE SOURCE / TRANSFERT / CIBLE

L'étude de dangers ou analyse de risques est construite sur la base du modèle source/transfert/cible, traduction de Source/Pathway/Receptor. Ce modèle est celui qui a été utilisé le programme européen FloodProb (http://www.floodprobe.eu/) et l'International Levee Handbook (http://www.leveehandbook.net/).

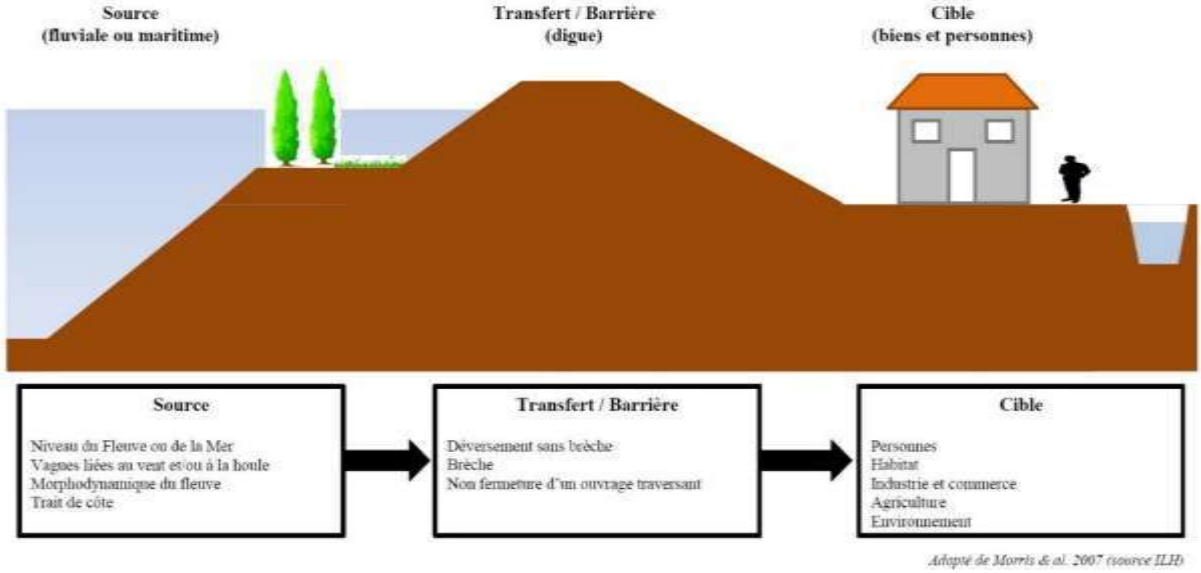


Figure 1. Modèle Source Transfert Cible (d'après Morris & *al*. Source ILH [X015])

La source est l'élément qui va permettre de générer une action (on peut également utiliser les termes de chargement ou sollicitation) sur l'ouvrage de protection. Elle peut être :

- Le niveau du fleuve ou de la Mer,
- Les vagues liées au vent et/ou la Houle,
- La tendance géomorphologique du fleuve à éroder les berges ou mobilité du trait de côte.

La cible va être l'ensemble des enjeux localisés dans la zone protégée par le système d'endiguement : les personnes, l'habitat, les industries et commerces, les exploitations agricoles mais également les enjeux environnementaux ou patrimoniaux.

Le transfert va caractériser le type de franchissement de la barrière que constitue la digue. A l'instar des choix retenus par l'USBR et l'USACE [X004], 4 types de franchissement ou scénarios d'inondation sont pris en compte.

- cas n°1 : Brèche avant surverse dans la digue par un des modes de rupture décrits plus loin à l'exception de la surverse,
- cas n°2 : Défaillance d'un ouvrage hydraulique traversant (non obturation ou rupture des organes de fermeture) entraînant la libération d'eau dans la zone protégée,
- cas n°3 : surverse sans brèche (digue résistant à la surverse) sur la digue quand le niveau de l'eau est supérieur à la crête de l'ouvrage,
- cas n°4 : Brèche après surverse sur la digue.

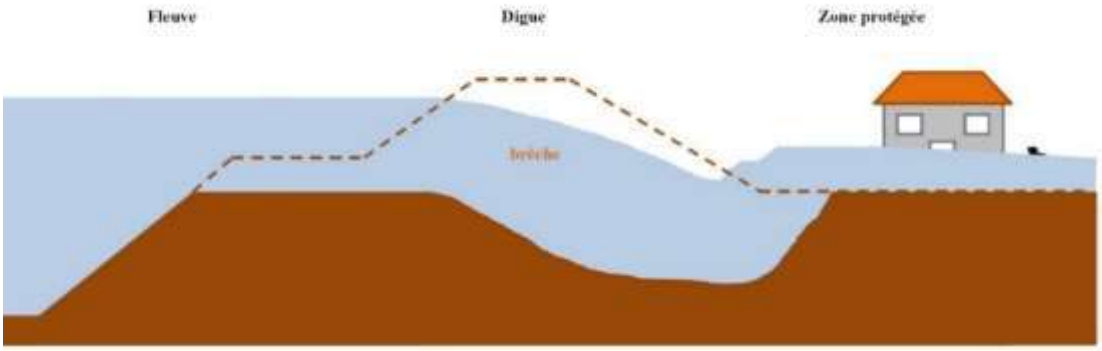


Figure 2. Cas n°1 : Brèche avant surverse

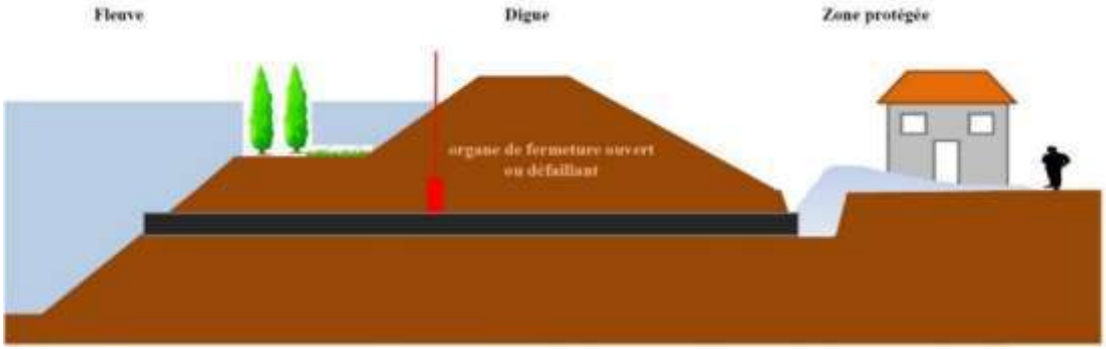


Figure 3. Cas n°2 : Défaillance d'un ouvrage hydraulique traversant

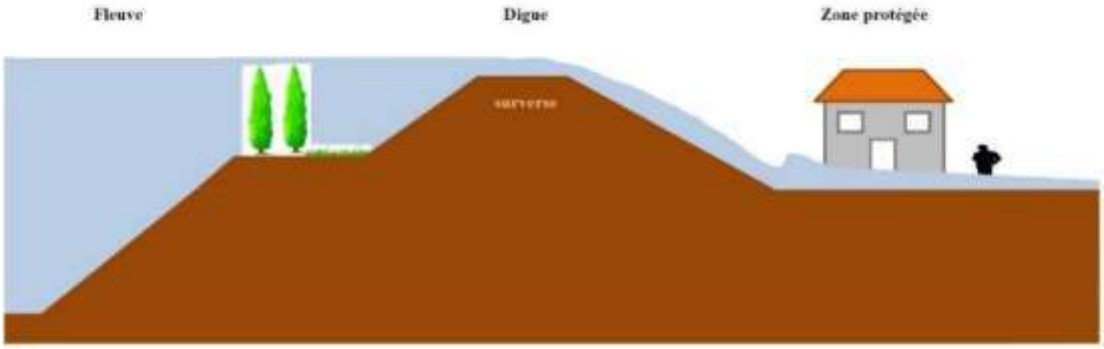


Figure 4. Cas n°3 : Surverse sans brèche

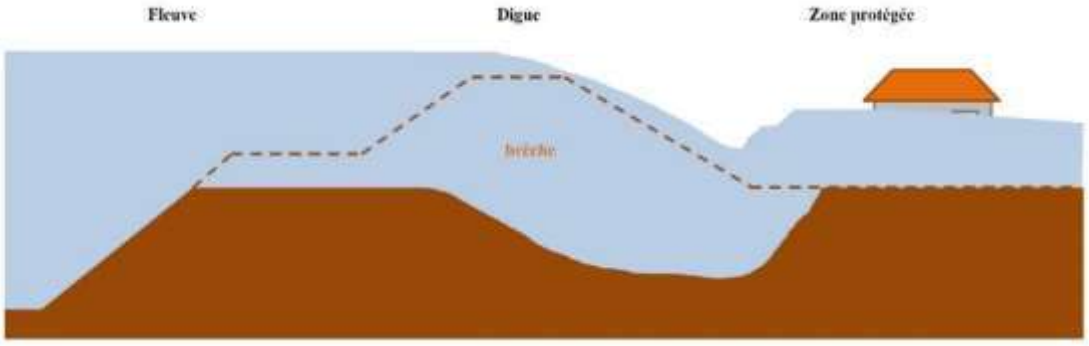


Figure 5. Cas n°4 : Brèche après surverse

Les barrières de sécurité ou fonctions qui vont s'opposer au transfert de la source vers la cible sont de plusieurs types. Il y a les barrières passives. Ce sont l'étanchéité, la résistance à l'érosion interne ou externe, la protection, la filtration, le drainage…. et les barrières actives : la surveillance mise en place et les interventions d'urgence qui vont permettre de retarder l'instant fatidique, où les entrées d'eau deviendront inévitables.

1.2 NIVEAUX DE PROTECTION, DE SURETE ET DE DANGER - DEFINITIONS

Avant de présenter il convient de définir les notions de niveaux de protection, de sûreté et de danger, essentielles à la compréhension de la suite de l'étude.

Le niveau de protection d'une zone exposée au risque d'inondation ou de submersion marine assuré par un système d'endiguement est défini réglementairement dans l'article R.214-119-1 du Code de l'Environnement. Cette définition est la suivante :

Le niveau de protection d'une zone exposée au risque d'inondation ou de submersion marine assuré par un système d'endiguement au sens de l'article R. 562-13 ou par un aménagement hydraulique au sens de l'article R. 562-18 est déterminé par la hauteur maximale que peut atteindre l'eau sans que cette zone soit inondée en raison du débordement, du contournement ou de la rupture des ouvrages de protection quand l'inondation provient directement du cours d'eau ou de la mer. Lorsque la taille et les caractéristiques de la zone exposée le justifient, plusieurs niveaux de protection peuvent être déterminés, chacun étant associé à une partie délimitée de la zone protégée. «Le niveau de protection d'un système d'endiguement ou d'un aménagement hydraulique est apprécié au regard soit d'un débit du cours d'eau en crue considéré ou d'une cote de niveau atteinte par celui-ci, soit d'un niveau marin pour le risque de submersion marine.

Les notions de niveaux de sûreté et sécurité ne sont pas définies réglementairement. Mallet, Degoutte & Royet 2013 [X038] ont proposé qui sont rappelées ci-après :

Niveau de protection d'une digue avec déversoir

Si la digue est équipée d'un déversoir de sécurité ou d'un tronçon de digue résistant à la surverse, le niveau de protection de la digue est le niveau de la crête de cet ouvrage déversant. Ceci en supposant bien sûr que la digue résiste jusque-là. C'est le niveau au-delà duquel la zone n'est plus protégée par la digue. Les lieux initialement protégés par la digue sont peu à peu inondés par les eaux provenant du déversoir (en supposant qu'ils n'aient pas été inondés précédemment par un autre processus tel que remontée de nappe, ruissellement ou remous aval).

Niveau de sûreté d'une digue

C'est le niveau pour lequel la digue conserve une certaine marge de sécurité pour les différents mécanismes de rupture. Elle doit donc :

- disposer d'une certaine revanche par rapport à la ligne d'eau de la crue de danger ;
- assurer la stabilité mécanique du corps de digue avec des coefficients de sécurité correspondant aux situations exceptionnelles [X020] ;
- présenter une sécurité vis-à-vis des mécanismes d'érosion interne ;

- assurer le fonctionnement sans endommagement du déversoir s'il existe et de ses composants.

Dans un système d'endiguement sans déversoir ou sans digue résistante à la surverse, les niveaux de protection et de sûreté de la digue sont confondus. L'inondation de la zone protégée ne peut se faire par brèche dans les digues. Cette situation est inconfortable car le niveau de protection n'est pas visualisable et rien ne permet d'alerter de son dépassement.

La probabilité de brèche associée au niveau de sûreté est fixée à 5% par l'arrêté du 7 avril 2017. Par le passé cette probabilité variait dans la bibliographie entre 1 et 15 %. *Mallet & al. 2013 [X038]* recommandait une probabilité minimale de 1 % pour les digues nouvelles ou les confortements. Si cet objectif peut être facilement atteint pour des ouvrages neufs par définition bien connus. Il peut dans le cas d'ouvrages anciens aboutir à fixer le niveau de sûreté au pied de digue ; avec 5% le niveau est en général très bas pour les ouvrages anciens.

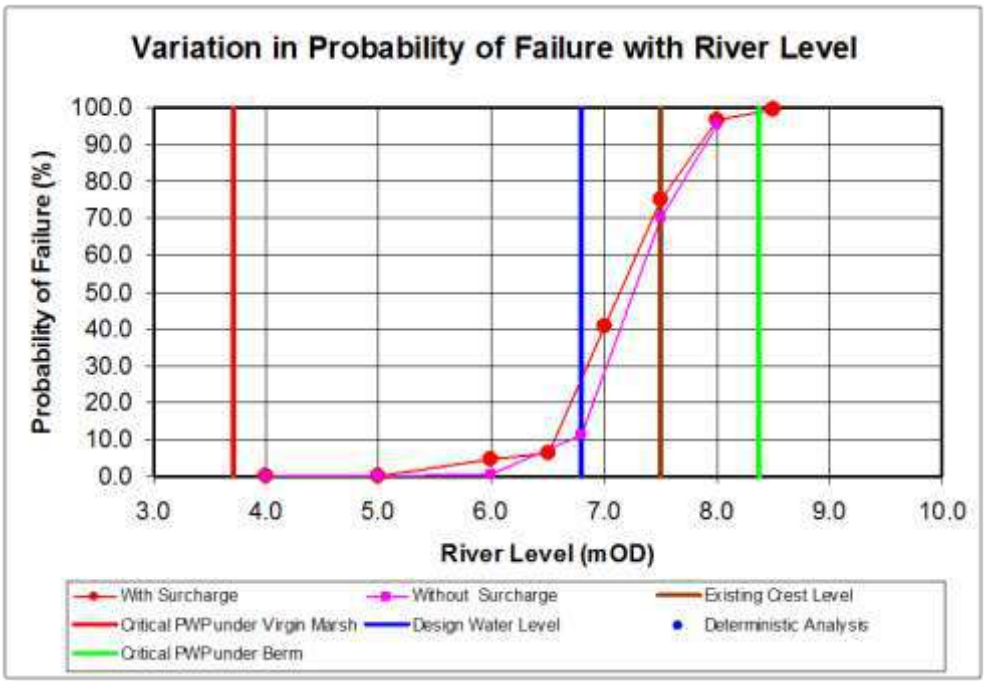


Figure 6. COURBE DE FRAGILITE – ILH DRESDEN WORKSHOP – MAI 2011 – PRESENTATION DE J. SIMM.

Niveau de danger d'une digue avec déversoir

Dans un système sécurisé, le niveau de danger correspond à la crue qui affleure le sommet de la digue en terre. Dans un système ancien non sécurisé, le niveau de danger peut bien entendu être situé sous la crête de la digue (cas observé sur les digues de Camargue lors de la crue de décembre 2003). Si le profil en long de la digue comporte des irrégularités, c'est la crue qui affleure au moins un des points bas. La probabilité de brèche associée au niveau de danger est de l'ordre de 50 %.

Cas des systèmes d'endiguement sécurisé sans digue résistante à la surverse

On entend par système sécurisé, un système construit suivant les règles de l'art actuelles et par un système non sécurisé un système non conforme aux règles de l'art actuelles mais qui a été très bien pu être construit suivant les règles de l'art en vigueur au moment de sa construction.

C'est le cas des digues d'origine du Delta du Rhône, dont la conception a été assurée par les ingénieurs des ponts et chaussées.

Dans les systèmes d'endiguement sécurisé avec digue résistante à la surverse, on a :

Niveau de protection de la digue < Niveau de sûreté de la digue < Niveau de danger de la digue

Dans les systèmes d'endiguement sécurisé sans digue résistante à la surverse, on a :

Niveau de protection de la digue = Niveau de sûreté de la digue < Niveau de danger de la digue

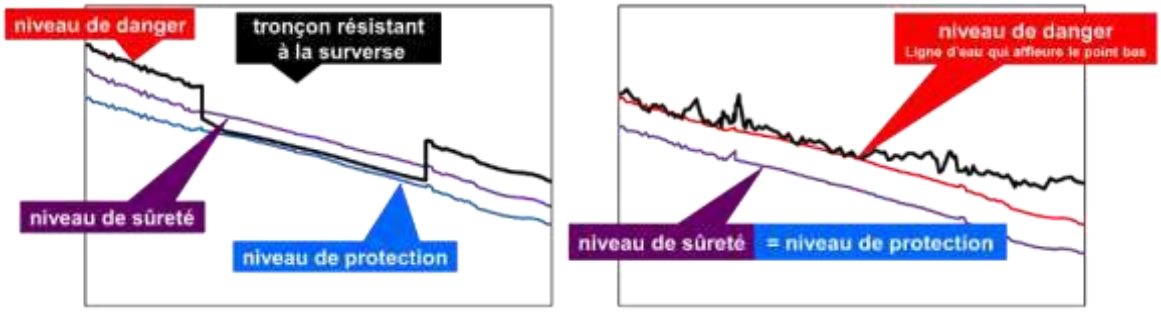


Figure 7. Cas d'un système d'endiguement sécurisé avec et sans digue résistante à la surverse

Dans le cas d'un système d'endiguement non sécurisé le niveau de sûreté peut être situé en dessous du niveau des déversoirs qui n'est alors qu'un niveau de protection apparent. Il est toujours confondu avec le niveau de protection

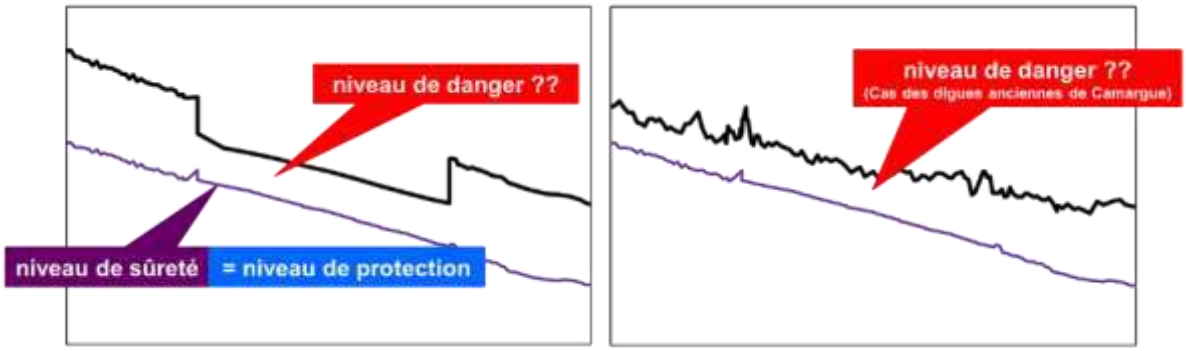


Figure 8. Cas d'un système d'endiguement non sécurisé avec et sans digue résistante à la surverse

Niveau de protection des personnes

On peut considérer que le niveau de protection d'une personne résidant dans une zone protégée correspond à sa situation à « pieds secs » ; tant que sa résidence ou ses voiries ne sont pas inondées, son niveau de protection n'est pas atteint. Elle peut se considérer protégée.

Niveau de sécurité des personnes

Le niveau de sécurité des personnes peut être défini comme le niveau à partir duquel une personne résidant dans une zone protégée se trouve en situation de danger. Les différentes recommandations en matière d'élaboration de plans de prévention du risque inondation (PPRI) donnent certains critères permettant d'apprécier l'aléa en zone inondable. Le seuil de déplacement d'une personne en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse des écoulements

(Cf. figure ci-après) semble être un critère pertinent permettant de définir le niveau de sécurité des personnes tout en restant cohérent avec la doctrine de l'État en matière de PPRI.

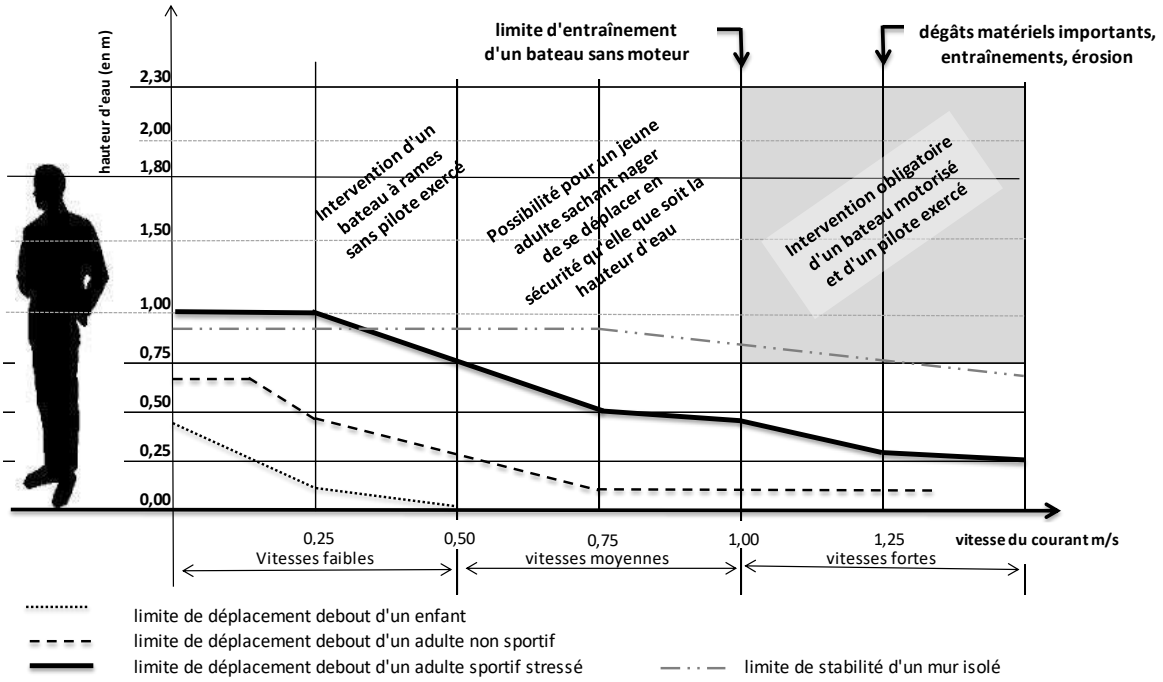


Figure 9. Seuil de déplacement des personnes en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse des écoulements (©CETE Méditerranée et guide sur les PPR [X041]

D'autres grilles d'aléa (Cf. tableaux ci- dessous) extraites de [X041] pour les crues rapides et crues lentes peuvent permettre d'apprécier le niveau de sûreté des personnes ; l'atteinte du niveau de sécurité des personnes correspondant au passage en aléa fort.

Tableau 1. Aléa pour une crue rapide en fonction de la hauteur et de la vitesse [X041]

Grille à deux paramètres Zones de confluences		Vitesse d'écoulement		
		Faible (< 0.2 m/s) (stockage)	Moyenne (écoulement)	Forte (> 0.5 m/s) (grand écoulement)
Hauteur de submersion	H < 0.50 m	Modéré	Modéré	Fort
	0.50 m < H < 1 m	Fort	Fort	Fort
	H > 1 m	Fort	Fort	Fort

Tableau 2. Aléa pour une crue lente en fonction de la hauteur et de la vitesse [X041]

Grille à deux paramètres (règle générale)		Vitesse d'écoulement		
		Faible (< 0.2 m/s) (stockage)	Moyenne (écoulement)	Forte (> 0.5 m/s) (grand écoulement)
Hauteur de submersion	H < 0.50 m	Modéré	Modéré	Fort
	0.50 m < H < 1 m	Modéré	Modéré	Fort
	H > 1 m	Fort	Fort	Fort

1.3 LIMITES DE L'ETUDE DE DANGERS

Considérons une digue, avec ou sans déversoir, et sa zone protégée.

Cas d'une digue où niveau de la crue < niveau de protection de la digue

Soit une crue dont le niveau est inférieur au niveau de la protection de la digue. Qu'il y ait ou non un déversoir, on considère que la crue est contenue dans le lit endigué et qu'aucune entrée d'eau n'est possible.

Dans la zone protégée, certains secteurs peuvent cependant être inondés, soit par remontée de nappe, soit par débordements d'autres cours d'eau soit par accumulation du ruissellement pluvial.

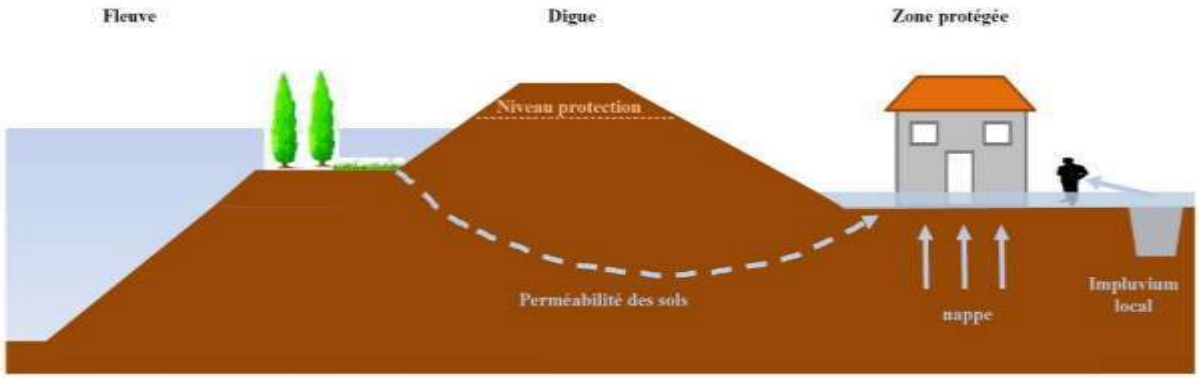


Figure 10. Zone protégée inondée et niveau de protection du système d'endiguement non atteint

Cette situation fut vécue par une partie des habitants du Cailar (Gard) en septembre 2005, lors de la crue centennale du Vistre (photo de gauche). La digue protégeant la commune assurait pleinement sa fonction, quand certains quartiers étaient inondés par ruissellement sous plusieurs décimètres d'eau (photo de droite).

Photo 1. Système d'endiguement du Vistre lors de la crue centennale de 2005 (côté cours d'eau à gauche et côté zone protégée à droite) (©ISL)

Mais d'autres secteurs peuvent être hors d'eau. C'est pourquoi suivant l'endroit où l'on se situe dans la zone protégée, on peut avoir les situations suivantes :

niveau de protection des personnes < ou > niveau de protection de la digue

Cas d'une digue avec déversoir où niveau de crue > niveau de protection de la digue mais < niveau de sûreté de la digue :

Si la digue possède un déversoir, et si elle est en bon état, la cote de sûreté de la digue est supérieure à la cote de protection. Suivant la surface de la zone protégée, la dynamique de la crue et la topographie de la plaine, le déversoir, tout en fonctionnant normalement, peut mettre en danger des personnes qui n'auraient pas été mises en sécurité. A contrario, d'autres secteurs de la zone protégée peuvent être hors d'eau. On peut donc avoir :

niveau de protection des personnes < ou > niveau de protection de la digue

niveau de sécurité des personnes ≤ niveau de sûreté de la digue

Cas d'une digue où niveau de la crue > niveau de sûreté de la digue

On rappelle que pour une digue sans déversoir, les niveaux de protection et de sûreté de la digue sont confondus. Lorsque le niveau de la crue dépasse le niveau de sûreté de la digue, la revanche entre la cote de danger et la cote de sûreté est consommée, ainsi que les marges de sécurité pour la stabilité de la digue. On est au-delà de la crue de projet ou de dimensionnement ; la probabilité d'avoir des brèches augmente sensiblement (Cf. figure ci-avant) et doit être prise en considération pour estimer les niveaux de protection et de sécurité des personnes. Les personnes sont menacées au moment même où la sûreté de la digue n'est plus assurée et l'on a donc :

niveau de sécurité des personnes = niveau de sûreté de la digue

Dans le cas particulier des grandes zones protégées comme la Camargue, suivant l'hydrogramme de brèches, les personnes résidant en extrémité de zone protégée peuvent être hors de danger pendant un temps assez long (2 à 3 jours en Camargue Gardoise en décembre 2003), ce qui permet de les mettre en sécurité après formation de la brèche, mais ce cas est peu courant et doit être appliqué avec précaution.

Bilan

On voit donc que sûreté de l'ouvrage et sécurité des personnes sont deux notions indissociables mais à ne surtout pas confondre :

- un ouvrage peut provoquer des victimes sans rompre ;
- à contrario, un ouvrage peut rompre sans victimes.

Les personnes peuvent être menacées par :

- la rupture de l'ouvrage (typiquement une brèche dans une digue en terre suite à érosion interne ou surverse) ; une onde de crue se libère alors brutalement ;
- un dysfonctionnement de l'ouvrage ou lié à lui (par exemple déversoir mobile s'effaçant brusquement) ;
- un dépassement de l'ouvrage qui reste intègre : c'est alors l'eau par-dessus la digue qui provoque des dégâts : l'ouvrage n'en est pas responsable, mais un phénomène naturel ;
- des aléas extérieurs à la crue (remontée de nappe, ruissellement pluvial, débordement d'autres cours d'eau traversant la zone protégée).

On constate que le niveau de sécurité des personnes est le même que celui de sûreté de l'ouvrage dans le cas fréquent des digues non résistantes à la surverse et sans déversoir. Sinon, il est inférieur ou égal. Finalement, on a toujours :

niveau de sécurité des personnes ≤ niveau de sûreté de la digue

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques des trois niveaux à considérer pour les ouvrages de protection, que le système ait ou non un déversoir, qu'il soit ou non sécurisé.
La notion de système sécurisé doit se comprendre comme un système construit suivant les règles de l'art actuel. En effet, le parc français des digues de protection est essentiellement ancien. Les digues les plus anciennes n'ont pas été compactées ou l'ont été avec des dames d'une quinzaine de kg seulement sans prise en compte le plus souvent de la teneur en eau optimale qui n'a été connue qu'après les travaux de Ralph Proctor (1933). Dès lors tout système ancien est par définition non sécurisé. Ajoutons que le cas « avec déversoir et non sécurisé » ne devrait pas concerner un déversoir récemment intégré dans une digue préexistante car sa mise en sécurité est un préalable évident.

Tableau 3. Niveaux d'un ouvrage pour un système d'endiguement sécurisé ou non et comportant ou non un tronçon résistant à la surverse

Type de système	Niveau de protection	Niveau de sûreté	Niveau de danger
Avec déversoir et sécurisé	= cote déversoir	> cote déversoir < crête de l'ouvrage	= cote crête de l'ouvrage
Avec déversoir et non sécurisé	< cote déversoir	= niveau de protection	
Sans déversoir et sécurisé	= niveau de sûreté	= niveau de protection	= cote crête de l'ouvrage
Sans déversoir et non sécurisé	= niveau de sûreté	= niveau de protection	< cote crête de l'ouvrage

1.4 ACCEPTABILITE DU RISQUE OU CRITICITE DES SCENARIOS D'INONDATION

1.4.1 Risques liés à la défaillance et au fonctionnement normal du système d'endiguement

Par rapport aux quatre scénarios d'inondation pris en compte (Cf. 6.1.), trois scénarios sont liés au risque incrémental induit par la présence même de la digue. Ils pourraient être qualifiés de risques « technologiques » bien qu'ils ne soient pas dans les habitudes de les qualifier ainsi. Le scénario « surverse sans brèche sur la digue » correspond au risque lié à l'inondation qui serait causée en l'absence de digue. Il s'agit typiquement d'un risque naturel.

C'est la prise en compte de ces 4 scénarios d'inondation et le risque associé à chacun d'eux qui va permettre de déterminer et quantifier le risque résiduel d'inondation auquel la population est exposée. Cette typologie est illustrée ci-dessous

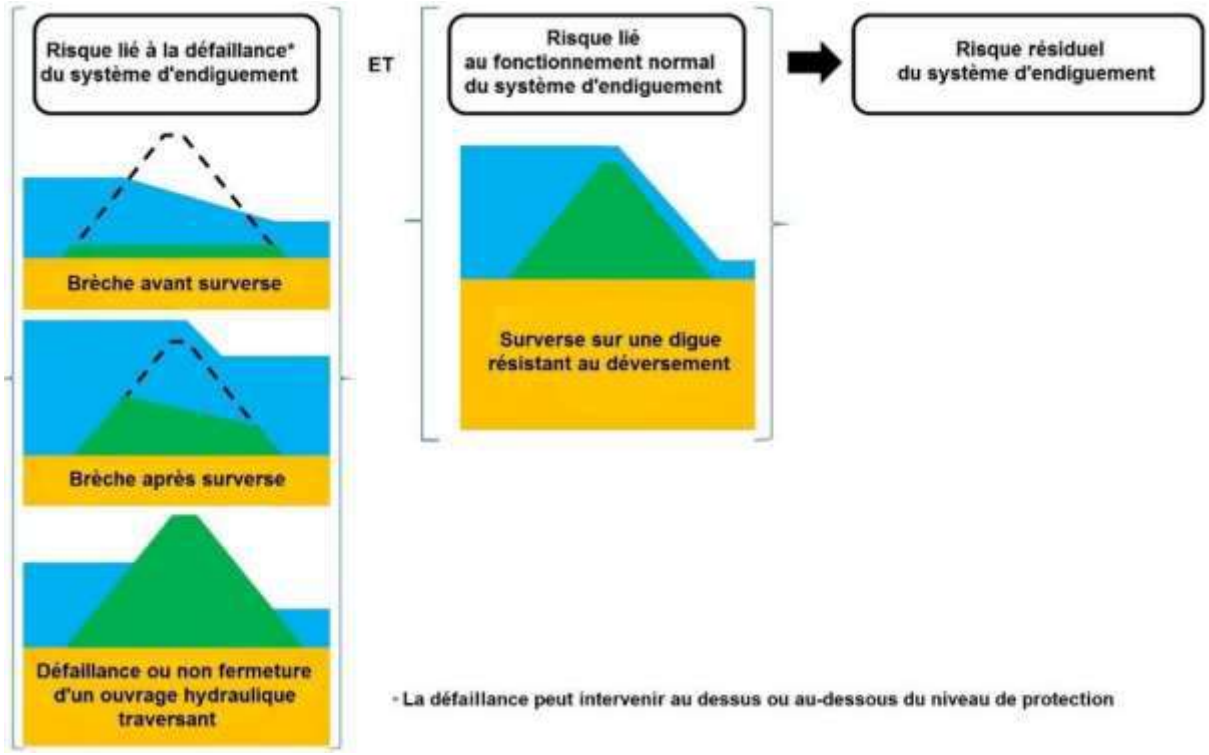


Figure 11. Typologie des risques liés au système d'endiguement et risque résiduel (d'après USBR [X004])

Le risque lié à chacun des scénarios peut être déterminé sous la forme suivante

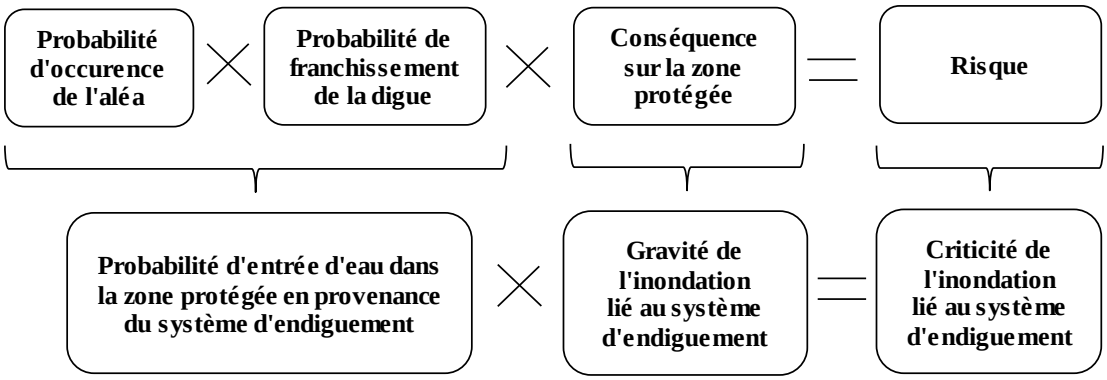


Figure 12. Définition du risque

Ou sous la forme suivante

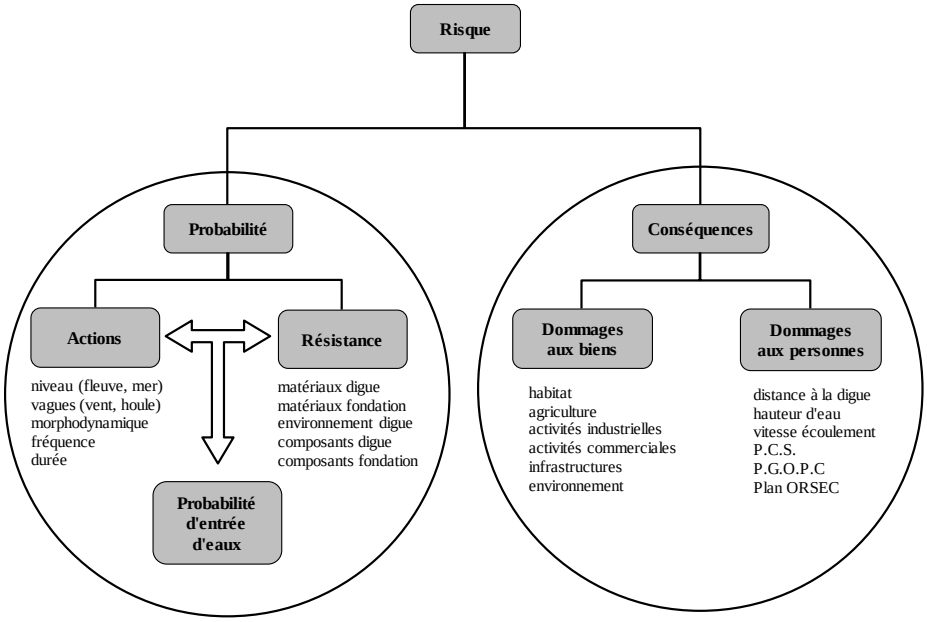


Figure 13. Risque (d'après ILH [X015])

1.4.2 Risque individuel et risque collectif

Pour l'appréciation du risque, deux notions sont considérées (USBR [X004]) :

- le risque individuel,
- le risque sociétal ou collectif.

Le risque individuel est un terme qui est associé à la personne la plus exposée qui est placée en relation fixe avec un danger, comme une digue. Le risque individuel est la somme des risques de tous les modes de défaillance potentiels associés aux dangers qui affectent cette personne.

Le risque sociétal porte sur la notion que lorsque les conséquences s'accroissent, la société s'attend en général à ce que la probabilité de ces conséquences décroit.

Dans les pays occidentaux et plus particulièrement les pays anglo-saxons qui ont été précurseur dans les analyses de risques, on retient pour le risque individuel lié à la défaillance d'un barrage ou d'une digue la probabilité annuelle de 1/10 000 ou 10^{-4}.

Il est important de placer le seuil de probabilité de défaillance annualisée (ou risque individuel) de 1 sur 10 000 dans le contexte de la probabilité de mortalité de fond à des individus de toutes causes. L'objectif de 1/10 000 pour le risque individuel est de maintenir les dangers posés par les barrages ou les digues à un niveau inférieur aux niveaux auxquels l'individu est déjà exposé.

La figure ci-dessous illustre pour les années 2002 à 2004 la probabilité annuelle de décès en France en fonction de l'âge et du sexe. On constate que le seuil de 1/10000 correspond à la probabilité annuelle de décès la plus faible rencontrée dans l'ensemble de la population française (les femmes/filles de 5 à 15 ans)

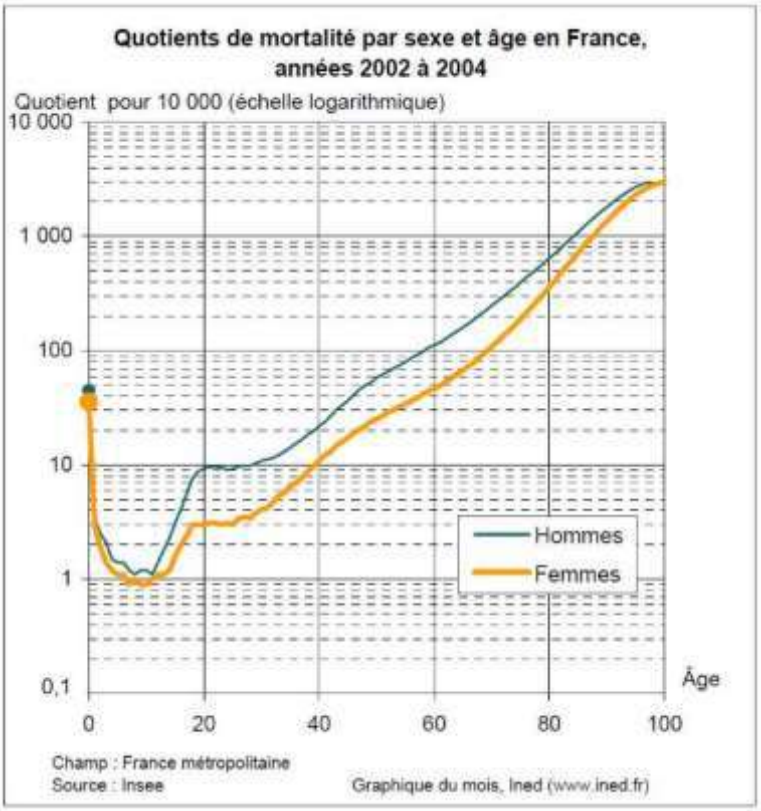


Figure 14. Probabilité annuelle de décès en France par tranche d'âge et par sexe (source Ined)

Pour l'appréciation de ceux notions de risque, on considère 3 seuils :

- Le seuil d'inacceptabilité
- Le seuil de tolérance
- Le seuil d'acceptabilité

Quand la probabilité d'occurrence du danger est supérieure au seuil d'inacceptabilité, des mesures doivent être prises qu'elles qu'en soient le prix.

Dans la gamme de probabilités comprises entre ce dernier seuil et le seuil d'acceptabilité, on parle de seuil de tolérance. La population et la société sont préparées pour faire face au risque et pour l'accepter.

Quand la probabilité d'occurrence du danger est inférieure au seuil d'acceptabilité, on considère le risque comme insignifiant. Aucune mesure supplémentaire n'est requise pour diminuer ce risque.

La figure ci-dessous illustre ce principe.

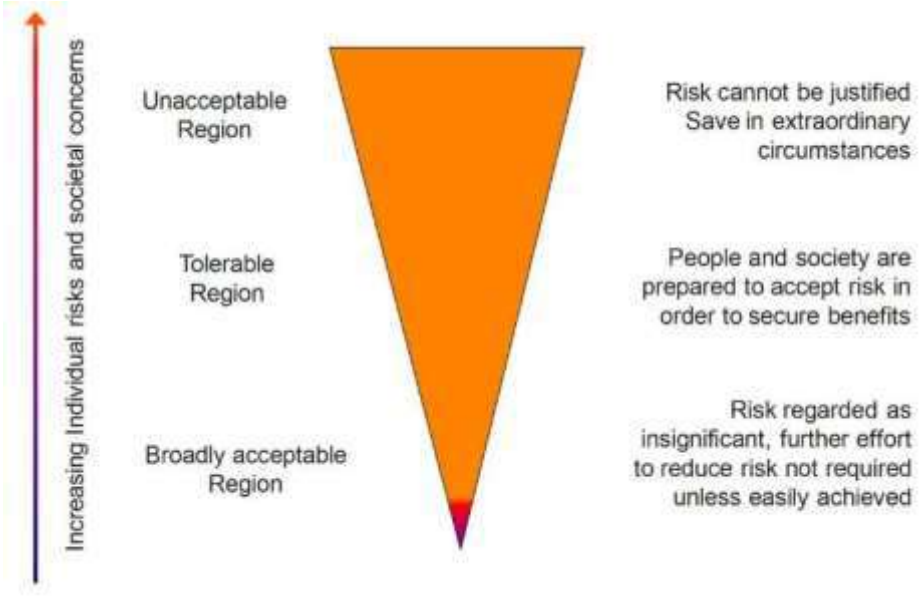


Figure 15. Notions de risques acceptables, tolérés et d'inacceptables (Leguen 2008 d'après USBR [X004]

Conceptuellement, les lignes directrices sur le risque sociétal / perte de vie annualisée sont des seuils utilisés pour refléter la notion selon laquelle la société est de plus en plus peu disposée à des événements à forte conséquence. Par exemple, chaque jour, plus de 100 personnes peuvent mourir sur les routes de France en raison d'accidents de la route. La plupart des gens n'entendront rien de tout cela. Si un avion de ligne tombe en panne et plus de 100 personnes périssent dans ce seul événement, ce sera des nouvelles nationales et internationales. Pour refléter ce concept, à mesure que les conséquences augmentent pour un seul événement, la probabilité de l'événement doit diminuer. Ceci peut être illustré sur le diagramme f-N ou F-N par une ligne en pente négative.

Pour l'appréciation de l'acceptabilité des risques de défaillance on peut utiliser le graphique ci-dessous dit graphique « ALARP » As Low As Reasonably Practicable.

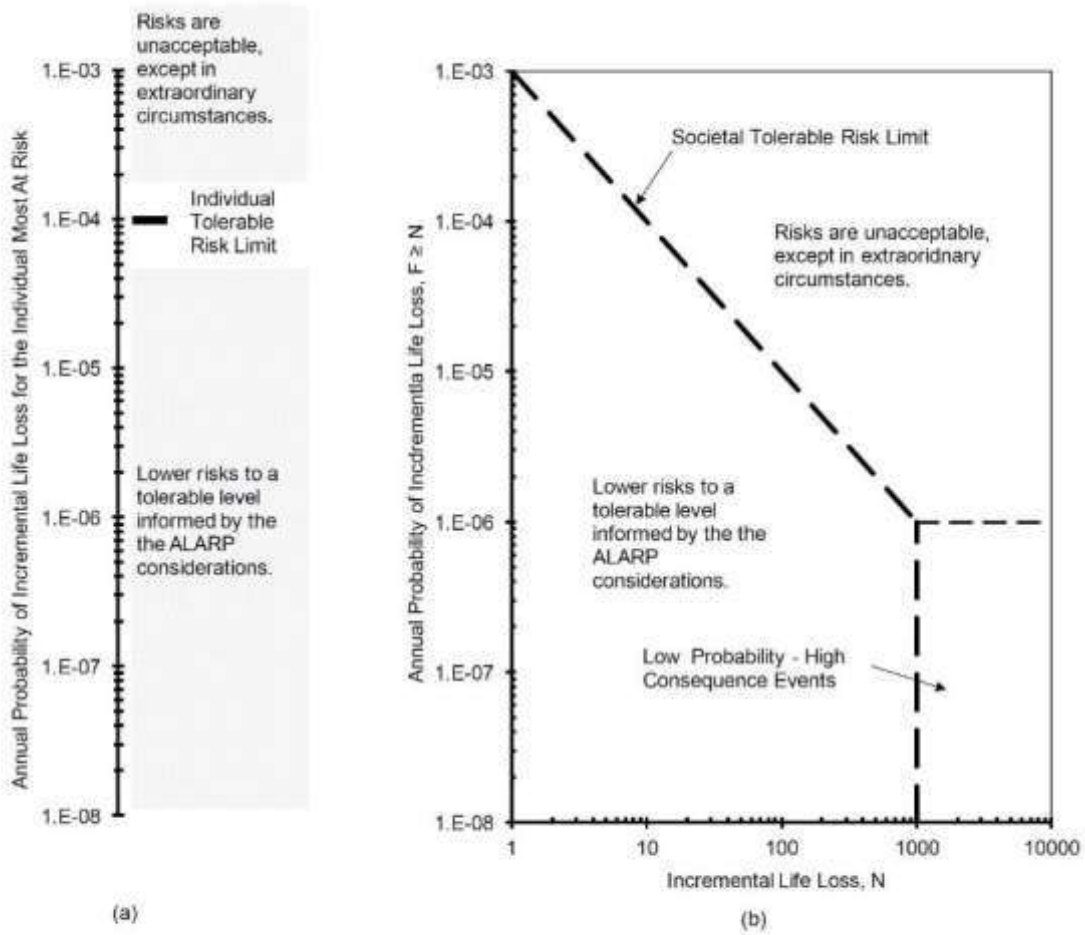


Figure 8. USACE Risk Guidelines for Existing Dams [10]
a – Individual Guideline for Incremental Risk
b – Societal Guideline for Incremental Risk

Figure 16. Recommandations de l'USACE pour l'acceptabilité du risque de défaillance lié aux barrages (USBR [X004])

1.4.3 Gravité des scénarios d'inondation

Pour la distinction entre la notion de victime et de sinistré, on retient les définitions de Vinet & Al. 2011 [X046] à savoir :

- Victime : personnes décédées lors de l'inondation
- Sinistré : personnes touchées par l'inondation à des degrés divers, mais sans décès

On peut considérer qu'une personne résidant dans la zone protégée est mise en danger pour des vitesses supérieures à 0,5 m/s et/ou pour des hauteurs d'eau supérieures à 1 mètre (Cf. plus haut niveau de sécurité des personnes).

Les différentes modélisations ont montré que les vitesses pouvaient être supérieures à 0,5 m/s dans la zone d'influence de la brèche. Au–delà, cette vitesse était inférieure. En ce qui concerne,

la hauteur de 1 mètre, elle dépend principalement du volume de déversement lui-même directement lié à l'hydrogramme de la crue plus qu'au débit de la brèche. La définition du seuil de mise en danger par rapport à une hauteur d'eau est donc fortement sensible à la durée de crue.

Dans un état de fonctionnement avec brèche, compte tenu des volumes de déversements qui peuvent être considérables, on peut considérer que toute personne impactée par les inondations du Rhône peut un moment se retrouver en danger.

Dans un état de fonctionnement sans brèche, les entrées d'eaux sont sensiblement limitées et la propagation de la crue plus lente, un nombre important de personnes peut être inondé et subir des dommages matériels sans pour autant se retrouver dans une situation de danger.

Dans le cas du Rhône, compte tenu de l'importance de la zone protégée, un autre paramètre apparaît comme primordial ; c'est la distance par rapport aux ouvrages de protection.

On distinguera le nombre de personnes résidant dans la zone des 3 heures considérés comme directement en danger en cas de brèches et le nombre de personnes résidant au-delà de ce seuil.

Ce temps de 3 heures est considéré comme étant le temps nécessaire à la mise en sécurité des personnes par les personnes responsables (préfet, maire…). Il devrait être validé par le préfet, le maire, les services de secours, les services de sécurité civile et l'état-major inter-zones.

Tableau 4. Classe de gravité des scénarios d'inondation retenus

Classe de gravité		**Nombre de personnes susceptibles d'être mises en danger* par des risques incrémentaux**		**Nombre de personnes susceptibles d'être mises en danger* par des risque de surverse sans brèche**	**Dommages matériels**
		dans la zone des 3 heures	Au-delà de la zone des 3 heures		
0	Incident				Moins de 0,3 M€
1	Accident		Inférieur à 10		Entre 0,3 et 3 M€
2	Accident grave	Inférieur à 10	Entre 10 et 100		Entre 3 M€ et 30 M€
3	Accident très grave	Entre 10 et 100	Entre 100 et 1 000	Inférieur à 10	Entre 30 M€ et 300 M€
4	Catastrophe	Entre 100 et 1 000	Entre 1 000 et 10 000	Entre 10 et 100	Entre 300 M€ et 3 G€
5	Catastrophe majeure	Supérieur à 1 000	Supérieur à 10 000	Entre 100 et 1 000	3 G€ et plus

* Hauteur > 1 m et/ou Vitesse > 0,5 m/s

Si on se réfère aux inondations d'Arles de 2003 ;

- Le nombre de sinistrés a été légèrement inférieur à 10 000 personnes (8000 personnes).

- Le nombre de sinistrés en situation de danger (h > 1 m) dans la zone des 3 heures a été estimé entre 10 et 100 personnes.
- Le nombre sinistrés en situation de danger (h > 1 m) au-delà la zone des 3 heures a été entre 1 000 et 10 000 personnes ;
- Le nombre de victimes a été de 0.

La classe de gravité serait pour cet événement suivant la classification proposée de 4.

On constate l'écart très sensible entre le nombre de sinistrés en situation de danger à proximité de la digue et le nombre de victimes. Cette situation fut celle observée également en mai 1856.

1.4.4 Estimation des victimes potentielles

Vinet et Al. 2011 [X046] ont étudié le profil des victimes et les circonstances de décès lors de la tempête Xynthia, qui fortement touché la côte atlantique en février 2010 et les inondations torentielles du Var en juin 2010. Les principaux enseignements de leur étude sont les suivantes :

- La tempête Xynthia et la submersion marine associée ont entraîné le décès de 47 personnes, dont 41 décès liés à la submersion marine,
- Sur les 41 décès précités, 29 concernent la seule commune de la Faute-Sur-Mer et 12 la Charente-Maritime,
- 28 des 29 victimes de la Faute-Sur-Mer se concentrent sur un espace de 30 hectares appelé « la cuvette de la mort » ; en Charente-Maritime, les 12 victimes sont dispersées dans six communes,
- Pour l'inondation du Var, 26 victimes réparties sur 7 communes ont été recensées,

Sur l'âge et le sexe des victimes :

- Pour les deux événements, globalement l'âge des victimes est élevé. Plus de deux tiers (68 %) des victimes ont plus de 60 ans. Pour l'événement Xynthia, cette proportion s'élève à 75 %. L'âge médian est de 74 ans, ce qui est élevé compte tenu de l'âge médian de la population des communes sinistrés (52 ans) et de l'âge médian des français, qui est de 38 ans.
- A la Faute-Sur-Mer, les personnes âgées de plus de 74 ans ne forment que 15,8 % de la population, mais la moitié des décès ;
- Aucune conclusion péremptoire n'est donné sur le sexe des victimes (15 hommes et 11 femmes). La surreprésentation masculine peut s'expliquer par une prise de risque plus importante de ces derniers et des décès liés à la mobilité (déplacement de véhicules)

Par ailleurs, l'article rappelle que les études sur la mortalité consécutive aux submersions marines de 1953 en Angleterre montrent :

- Une surreprésentation des très jeunes enfants (ne sachant pas nager),
- Une sous-représentation des jeunes adultes,
- Une surreprésentation des personnes âgées de 60 ans et plus.

Sur l'origine géographique des personnes :

- 27 des 41 victimes étaient des résidents permanents,
- Pour la commune de la Faute-Sur-Mer (29 victimes sur les 41) 20 des 29 personnes décédées étaient dans leur résidence principale ;
- En Charente, 7 des 12 décédées étaient des résidents permanents,
- La faible conscience du risque n'est donc pas l'apanage des populations allochtones. Des études vont même jusqu'à montrer que malgré une meilleure conscience du risque, les populations locales respectent moins les consignes de sécurité et s'exposent de ce fait de manière plus importante.

Sur les liens entre décès et type de bâti :

- 32 des 41 personnes décédées en Charente-Maritime et Vendée ont pério dans des maisons de plain-pied (sans étage ou sans pièce refuge)
- Pour le Var, 13 des 26 décès ont eu lieu à domicile dont 7 au rez-de-chaussée (dans des maisons de plain-pied ou des appartements dans des immeubles avec étage
- La présence d'une habitation à étage n'est pas un gage de sécurité en cas d'inondation ; encore faut-il que les occupants dorment à l'étage, ce qui est loin d'être le cas. Sur les 6 personnes décédées dans des maisons à étages ou avec pièce refuge, au moins 4 d'entre elles, âgées de plus de 75 ans ont été retrouvées au rez-de-chaussée.

Sur le rôle des ruptures de digue :

- La distance entre le lieu de décès et la digue est en moyenne de 158 m.
- Toutes les victimes sont décédées à moins de 400 m de la digue qui a failli

Relations entre décès et hauteur d'eau :

- Les décès débutent à 1,1 m d'eau,
- Plus la moitié des personnes sont décédées dans moins de 1,8 m d'eau,

En conclusion, on retiendra les 5 facteurs de vulnérabilité majeurs sont :

- L'âge des personnes : les personnes les plus vulnérables sont les jeunes enfants et les personnes âgées,
- Le type de bâti : les maisons de plain-pied sans zone refuge et sans possibilité d'évacuation par le toit,
- La fermeture ou l'obturation des logements : évacuation autonome ou assistée plus difficile,
- La proximité des digues (seuil à 400 m dans le cas de Xynthia) : en augmentant la rapidité de la hausse du niveau d'eau, elles réduisent le temps de réaction des personnes,
- La hauteur d'eau : le décès débutent à 1,1 m et 50 % des décès ont été causés dans moins de 1,8 m d'eau ;

1.4.5 Détermination des seuils d'acceptabilité pour les risques incrémentaux

Le retour d'expérience dans le Delta du Rhône, l'étude accidentologique (Cf. rubrique n°7) montre que chaque inondation du Rhône provoquée par brèche cause entre 0 et 5 victimes, donc la probabilité annuelle de brèche tolérable se situerait entre 10^{-3} et 2.10^{-4} suivant les standards internationaux utilisés.

Au final, pour la détermination des seuils d'acceptabilité, on considére que

- La formation de brèches dans les digues du Rhône ou des ruptures des écluses d'Arles et de Barcarin causerait un maximum de 10 victimes ;
- La défaillance des organes de fermeture des ouvrages hydrauliques traversants ne causerait pas de victimes compte tenu du fait qu'une grosse partie du volume d'eau libérée serait « absorbée » par les canaux situés en aval de l'ouvrage hydraulique ;
- La formation de brèche dans les digues du Vigueirat ne causerait pas de victimes, compte tenu de la faible hauteur des ouvrages

Ce qui donne les seuils d'acceptabilité suivants :

- 10^{-4} pour la probabilité annuelle de brèche dans les digues du Rhône et dans les portes des écluses d'Arles et de Barcarin ;
- 10^{-3} pour la probabilité annuelle de défaillance des organes de fermeture des ouvrages hydrauliques traversants ;
- 10^{-3} pour les digues du Vigueirat, dont le fonctionnement est assimilé à des digues de canaux ;

1.4.6 Acceptabilité du risque lié au fonctionnement normal d'un système d'endiguement

La notion d'acceptabilité évoquée au chapitre précédent concerne des risques incrémentaux liés à la défaillance de barrage ou système d'endiguement. Pour l'appréciation du risque lié au fonctionnement normal des ouvrages, d'autres critères doivent être utilisés.

Le Décret no 2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques a introduit pour ce type de risque des seuils d'acceptabilité dépendant de la population protégée.

En effet, l'article R. 214-119-3 du Code de l'environnement stipule « Lorsqu'une demande d'autorisation au titre des articles L. 214-3 et R. 214-1 d'un système d'endiguement est déposée postérieurement au 1er janvier 2020 pour une zone qui ne bénéficiait avant cette date d'aucune protection contre les inondations et submersions, la sécurité des personnes contre des venues d'eau provenant directement du cours d'eau ou de la mer y est assurée lorsque la probabilité d'occurrence annuelle d'une telle crue ou submersion est inférieure à 1/200 si le système d'endiguement relève de la classe A, à 1/100 s'il relève de la classe B ou à 1/50 s'il relève de la classe C. La justification de la capacité du système d'endiguement à satisfaire à cette exigence est apportée par l'étude de dangers ».

La classe A concerne les systèmes d'endiguement avec une population protégée > 30 000 personnes, la classe B une population protégée comprise entre 3 000 et 30 000 personnes et la classe C une population comprise entre 30 et 3 000 personnes.

Cette prescription liée aux nouveaux systèmes d'endiguement qui seraient créés après 2020 permet de définir l'acceptabilité du risque d'inondation lié au fonctionnement normal d'un système d'endiguement suivant l'abaque suivant.

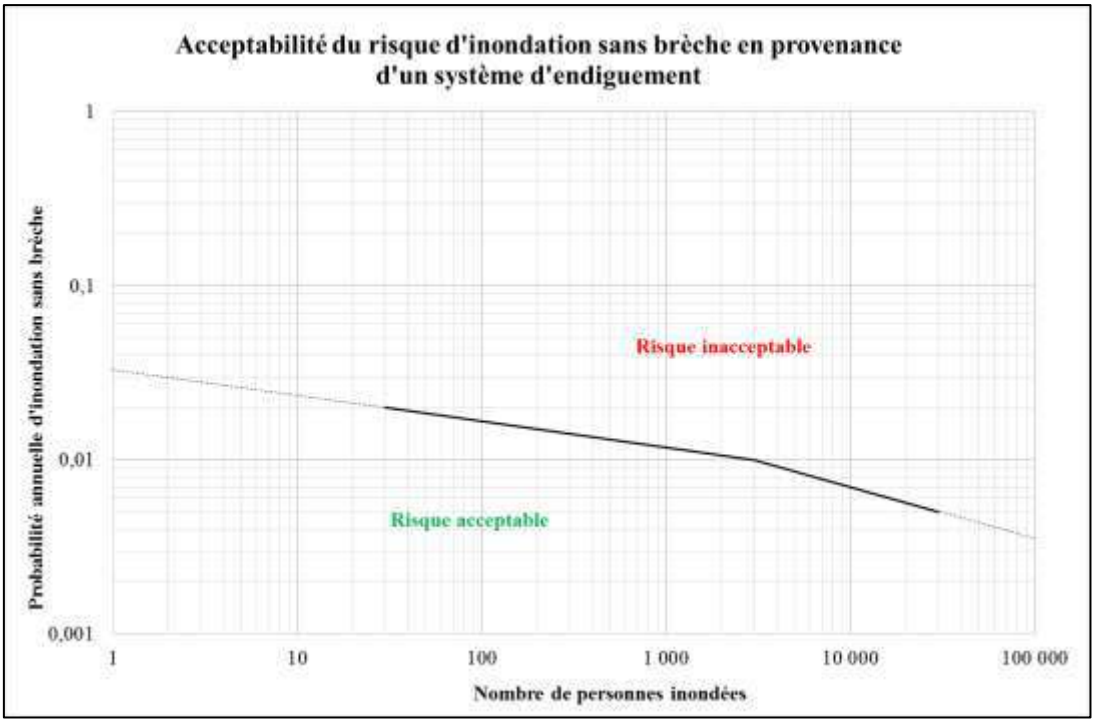


Figure 17. Acceptabilité du risque d'inondation sans brèche par interprétation du décret digues

1.5 DIFFERENTES ETAPES DE L'ANALYSE DE RISQUES INCREMENTAUX

La méthodologie est basée sur les étapes suivantes :

1) Détermination et caractérisation des modes ou états-limites de ruptures susceptibles d'être à l'origine d'une brèche dans la digue ;
2) Détermination des barrières de sécurité ou fonctions, sous-fonctions et composants permettant d'agir sur ces modes de rupture ;
3) Réalisation d'investigations, études et reconnaissances (diagnostic approfondi) pour permettre de déterminer les actions et leur occurrence et de caractériser les différentes fonctions et modes de rupture ;
4) Détermination de lois de probabilité ou courbes de fragilité par état-limite de rupture
5) Détermination, à partir des résultats d'études et de l'étude accidentologique de scénarios de brèche impliquant un ou plusieurs modes de rupture et construction d'arbres de défaillance ;
6) Détermination pour chaque scénario de brèche de lois de probabilité ;
7) Détermination pour chaque profil géométrique (espacé de 125 mètres environ) et chaque scénario de brèche (12 scénarios pris en compte) de la probabilité conditionnelle de brèche pour une crue donnée (sur un panel de 9 crues);
8) Détermination de la probabilité annuelle de brèche par profil géométrique et analyse par tronçon homogène
9) Identification des potentiels de dangers (brèche, surverse et défaillance ouvrage traversant)
10) Modélisation de scénarios d'inondation dans la zone protégée ;
11) Estimation de la gravité et criticité des scénarios ;
12) Détermination des niveaux de protection ;
13) Détermination des mesures de réduction du risque.

La méthodologie retenue d'une part pour la caractérisation des différents modes de rupture affectant les digues et d'autre part pour la détermination de la probabilité de formation d'une brèche pour une crue donnée s'est inspirée de nombreuses références nationales et internationales pour la plupart récentes. La liste complète figure au chapitre suivant, mais on citera tout particulièrement :

Sur l'érosion interne, principale cause de brèches dans les digues du SYMADREM,

- le bulletin n°164 de la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB) sur l'érosion interne écrit principalement par Jean-Jacques Fry (vol.1 - 2015) et Rodney Bridle (vol.2 - 2016) -
- le guide sur l'ingénierie du programme ERINOH (vol.3) écrit par Luc Deroo et Jean-Jacques Fry (provisoire 2016).
- l'ouvrage "Erosion in Geo-mechanics Applied to Dams and Levees", coordonné par Stéphane Bonelli – 2013.

Sur la géo-mécanique :

- les recommandations du Comité Français des Barrages et Réservoirs pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai coordonnées par Paul Royet et Laurent Peyras – 2015.

Sur l'érosion externe par surverse et par affouillement du pied amont :

- le guide sur les déversoirs sur les digues fluviales coordonné par Gérard Degoutte - 2012
- le guide sur les protections des berges de cours d'eau en techniques végétales rédigé par Bernard Lachat - 1192
- l'ouvrage « Diagnostic, aménagement et gestion des rivières – hydraulique et morphologie fluviales appliquées » écrit par Gérard Degoutte – 2013.

Sur la démarche probabiliste et la construction d'arbres d'événements ainsi que sur la méthodologie générale :

- les travaux de l'United States Bureau of Reclamation (USBR) présentés en 2012 et intitulés « best practices and risk methodology »
- l'International Levee Handbook (ILH) paru en 2012
- l'ouvrage « Surveillance, Entretien et Diagnostic des Digues de protection contre les inondations – guide à l'usage des propriétaires et des gestionnaires » rédigé par Patrice Mériaux, Paul Royet et Cyril Folton – 2004.

Le claquage hydraulique a également été pris en compte dans les différents scénarios de brèche. L'importance de ce mécanisme, encore trop peu mentionné dans les publications courantes, a été soulignée dans plusieurs articles de J.J. Fry. Sa prise en compte dans les arbres d'événements liés aux brèches permet d'expliquer certains accidents passés (Cf. rubrique n°7). A contrario, son absence laisse non élucidés de nombreux incidents et accidents passés.

La méthodologie mise en place par le SYMADREM a fait l'objet de deux publications internationales présentées à l'oral lors des symposiums de la Commission Internationale des Grands Barrages à Bali en 2014 et Johannesbourg en 2016.
Elle a également fait l'objet d'une présentation orale lors de l'atelier sur le transfert de connaissance en matière d'érosion interne du comité E de la CIGB sur les remblais.

1.6 MODES DE RUPTURE - GENERALITES

La fonction principale d'une digue est de retenir l'eau. Tout mouvement engendrant une incapacité du remblai à contenir la crue provoque une brèche. En conséquence, la brèche est la perte de cette fonction principale. Il importe de distinguer la notion de brèche de la notion de rupture. L'évènement redouté des ouvrages hydrauliques est la brèche. La brèche est obtenue à la fin d'un processus impliquant des mécanismes de dégradation et de ruptures. Un mécanisme de rupture n'engendre pas systématiquement la brèche. Il importe donc de remplacer le terme rupture, au sens de la CIGB, par celui de brèche. La rupture est avant tout une perte momentanée d'équilibre d'un matériau ou d'un composant. Le mot rupture est d'un usage trop général, qui fait craindre un danger imminent à tort.

Deux types de forces peuvent initier une rupture au sens de la mécanique :

- les contraintes inter-granulaires ou effectives,
- les forces hydrauliques (hydrostatiques et hydrodynamiques).

En conséquence, La brèche d'une digue est initiée par un des deux modes de rupture précédents, provoquant deux types de mouvement différent :

- Un glissement, qui sépare les grains par des forces tangentielles trop élevées, le long d'une surface de discontinuité.
- Un arrachement local et progressif des grains, suscité par des forces hydrodynamiques, appelé érosion.

1.6.1 Le cisaillement

La perte d'équilibre par cisaillement déclenche trois mécanismes de rupture :

- le glissement provoqué par un cisaillement en compression et,
- le poinçonnement provoqué par du cisaillement et de la traction.
- La boulance provoquée par la traction.

Terzaghi rappelle que les particules de sol dans une nappe en équilibre sont soumises à deux types de forces : les forces inter-granulaires exercées par les grains voisins et les forces hydrostatiques. Ainsi, le principe de Terzaghi, écrit que la résultante des forces appliquées sur toute surface élémentaire, comprenant au minimum une dizaine de grains, est équilibrée par la somme du :

- vecteur de contrainte effective intégrant l'ensemble des forces inter-granulaires, transmises par les particules de sol et de,
- la pression interstitielle, moyenne des forces hydrostatiques.

Le principe de Terzaghi est la clef de la rupture mécanique. Lorsque le vecteur de contrainte effective dépasse l'inclinaison, du cône de frottement sur la surface chargée, l'équilibre est rompu, il y a mouvement de cisaillement, la surface où sont appliquées les contraintes devient une surface de glissement. La généralisation de cet état engendre le glissement du remblai. Il s'agit de la perte de stabilité mécanique par cisaillement. Il n'y a pas lieu de différencier la rupture par cisaillement statique et sismique, tant que les cycles provoqués par les trains d'onde sismiques ne génèrent pas de forte montée de la pression interstitielle.

Dans le cas extrême où la force appliquée devient parallèle à la section étudiée, un effort de traction peut s'ajouter au cisaillement. Si la cohésion est rompue, le mouvement de cisaillement est accompagné d'une fissuration. Cet état apparaît, lorsqu'un remblai en terre compacté est construit sur une fondation molle : les déformations de la fondation imposent à la base du remblai des tractions qui engendrent des fissures. Lorsqu'une zone de traction s'interpose le long de la surface de rupture au milieu des zones de cisaillement, la rupture ne peut plus être calculée par la méthode traditionnelle (des tranches) de stabilité. Pour cette raison ce mécanisme de rupture doit être distingué du cas général. Ce mécanisme est ici identifié comme perte de stabilité mécanique par **poinçonnement**.

Un autre cas de glissement avec traction est généré lorsque la poussée de l'eau annule le poids des terres sus-jacentes. La sous-pression annule la contrainte effective horizontale et verticale, claque le terrain et développe une fissuration verticale et un cisaillement vers le haut. Finalement, le sol peut perdre sa consistance, sous l'effet de l'eau qui le fissure en de nombreux endroits. Ce mode de rupture est appelé **boulance** en statique et liquéfaction en dynamique. Un problème de boulance est en général détecté par les méthodes traditionnelles de stabilité, à la condition que la sous-pression ait été bien estimée ou mesurée.

1.6.2 L'érosion

Le principe de Terzaghi permet de traiter l'équilibre des forces macroscopiques au niveau d'une surface. En revanche, il ne permet pas de d'écrire l'équilibre d'un volume élémentaire réduit au seul grain. L'équilibre d'un grain nécessite la connaissance des forces physico-chimiques d'une part et hydrodynamique d'autre part. Les grains les plus fins, et ceux qui sont à la périphérie du sol, sont très sensibles aux forces hydrauliques, hydrostatiques et hydrodynamiques. La pression moyenne de l'eau ne suffit plus à décrire l'équilibre. L'intégrale des variations de pression suscitées par le frottement de l'eau sur le grain, c'est-à-dire par les fluctuations turbulentes de l'écoulement, peuvent être du même ordre de grandeur que le poids déjaugé ou que la cohésion effective. Si la vitesse de l'écoulement augmente, le grain perd son l'équilibre, il commence à rouler, puis il avance par petits sauts, ensuite par vagues successives, pour finir emporté par le courant. Ce mode de rupture est l'**érosion**.

L'application des forces hydrodynamiques engendre deux mécanismes de rupture :

- Si l'écoulement est souterrain, on parlera d'érosion **interne**.
- Si l'écoulement est à la surface de l'ouvrage, on parlera d'érosion **externe**.

Les conditions aux limites et les propriétés des écoulements souterrains sont très éloignées de ceux à surface libre. Pour cette raison et dans l'état actuel de nos connaissances, il convient de distinguer les deux.

L'érosion interne est initiée par quatre types de conditions aux limites. Ces quatre types d'initiation sont à distinguer, car ils ont des cinétiques très différentes.

- L'érosion de conduit : érosion des lèvres d'un trou ou d'une fissure. Ce premier type d'érosion est responsable de la grande majorité des brèches par érosion interne
- L'érosion régressive : érosion de l'extrémité amont d'un trou qui se développe dans une couche de sable sous une surface rigide ou cohérente et qui régresse de l'aval vers l'amont sous l'érosion provoquée par le gradient hydraulique maximal en fond de trou. Ce second type est souvent déclenché et activé par les crues. En conséquence, il peut mettre des années ou des dizaines d'années pour déboucher sur une brèche. Après avoir atteint la moitié de la longueur d'infiltration, le trou s'agrandit à vitesse exponentielle et provoque la brèche en quelques heures. Ce deuxième type d'érosion est fréquent dans les digues de delta.
- L'érosion de contact : érosion d'un sol fin, à son contact avec un sol grossier, sous les fortes vitesses transitant dans le sol grossier. Fréquent dans les fondations alluviales, ce type d'érosion emporte le limon à travers les graves au contact des alluvions fines et

grossières. Le symptôme est l'apparition de fontis ou fondrières sur l'ouvrage. La cinétique est lente à très lente.

- La suffusion : érosion des particules fines sous l'effet des infiltrations à travers les pores et les constrictions des particules grossières. Ce type d'érosion existe dans les sols instables, c'est-à-dire les sols n'étant pas auto-filtrants : sols ségrégés et alluvions grossières. La cinétique est en général lente à très lente. Mais si la fraction érodée est conséquente, elle pourrait provoquer des ruptures par liquéfaction statique, comme le rapportent plusieurs ruptures en Pologne.

Le développement de l'érosion interne se continue en trois étapes :

- Filtration : présence de la condition géométrique de transport, absence de colmatage,
- Progression : présence des conditions mécanique de la tenue d'une cavité et condition hydraulique de transport,
- Brèche : par renard ou par instabilité locale régressive (déchaussement) ou diffuse (liquéfaction).

L'érosion externe est initiée par deux types de conditions aux limites. Ces deux types ont des fréquences d'occurrence bien différentes :

- La surverse : l'eau passe au-dessus de la crête du remblai ou des bajoyers de l'évacuateur. L'érosion est liée à l'énergie cinétique de l'eau. L'énergie dépensée est proportionnelle à la lame déversante et au temps de déversement. Aussi, la surverse érode d'abord le pied, phase d'initiation, puis remonte vers la crête, phase de formation de brèche.
- L'affouillement : l'eau coule au pied de l'ouvrage (pied amont pour les digues) ou pied aval après passage de l'évacuateur. L'érosion est aussi liée à l'énergie cinétique et notamment la partie turbulente de l'énergie, qui dépend de l'entraînement de l'air, de la moyenne et de l'écart-type de la vitesse.

1.6.3 Les chargements

Les modes de rupture sollicités par divers chargements aboutissent aux mécanismes de rupture précédents. Ces chargements, pris en compte par le dimensionnement, sont :

- La gravité
- La retenue (crue, vent, seiches, marnage, vidange)
- Le séisme
- Et, à un bien moindre niveau, le trafic (normal et surtout exceptionnel en cours ce travaux).

Si d'autres chargements ne sont pas pris en compte explicitement par le dimensionnement (gel, vandalisme,…) ils doivent l'être par la conception ou le diagnostic. Ces chargements secondaires sont rappelés dans le chapitre suivant.

1.7 MODES DE RUPTURE CONSIDERES

Les différents modes de rupture considérés dans la présente étude de dangers sont ceux figurant dans CFBR 2015 [X020], qui traite des modes de rupture « mécaniques » et du bulletin n°164 de la CIGB [X001], qui traite des 4 modes de rupture par érosion interne non traités dans les recommandations du CFBR. Sont également pris en compte les modes de rupture par érosion externe que sont la surverse et l'affouillement par érosion de pied ainsi que ceux décrits par Fry & Courivaud 2013 [X021].

Ces modes de rupture sont :

- la stabilité d'ensemble (glissement) ;
- le soulèvement hydraulique du pied de digue aval ;
- le claquage hydraulique,
- le défaut de portance (poinçonnement de la fondation)
- l'affouillement du pied de digue côté amont ;
- l'affouillement du talus amont par batillage ;
- la surverse ;
- l'érosion de contact ;
- la suffusion interne ;
- l'érosion régressive (y compris la boulance) ;
- l'érosion de conduit ;
- la liquéfaction sous sollicitation sismique.

Le tassement qui correspond à un mode de déformation suivant CFBR 2015 [X020] est également pris en compte.

Ils peuvent être regroupés sous la forme figurant en page suivante.

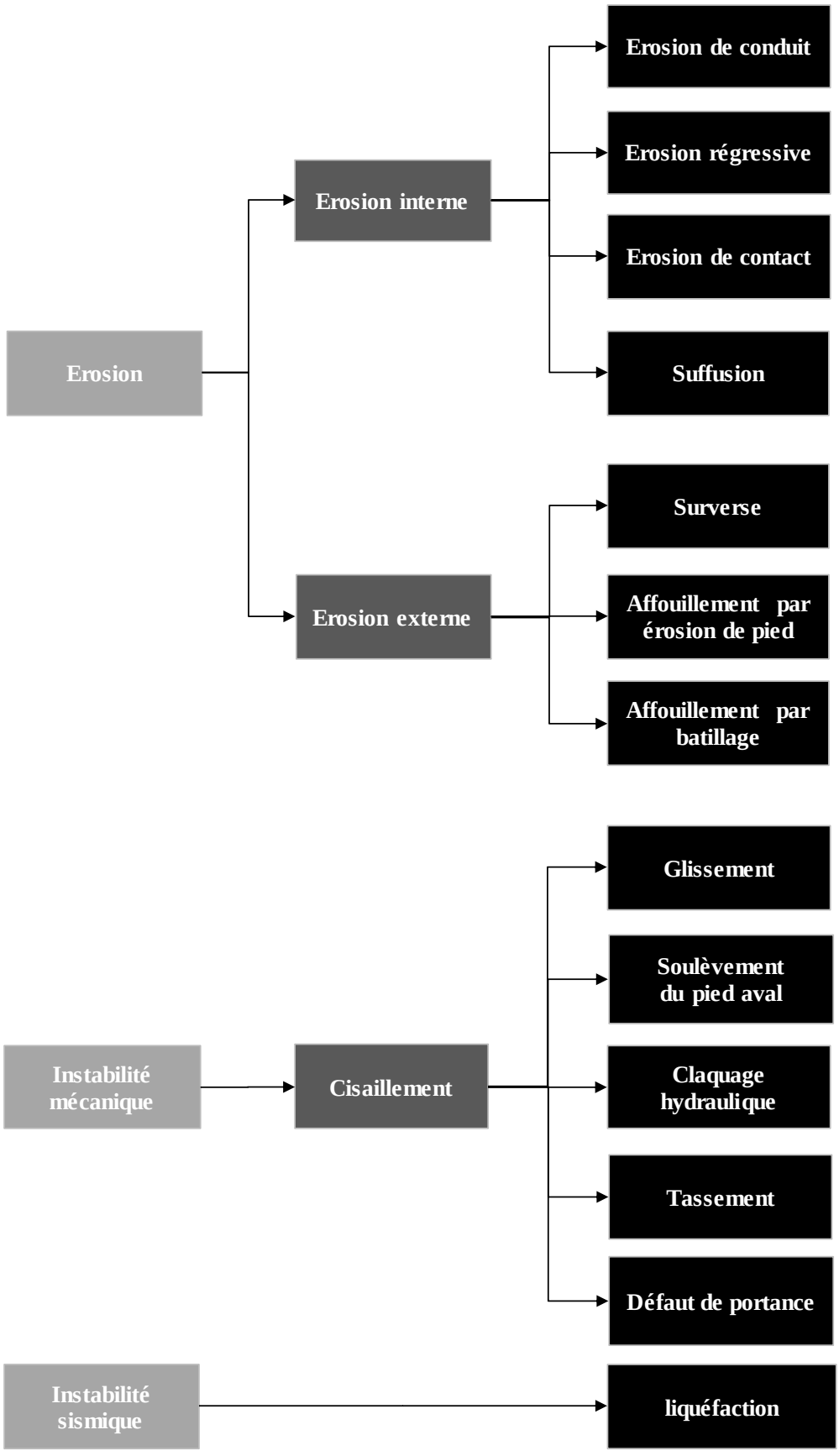


Figure 18. Etats limites de rupture étudiés dans l'étude de dangers

A ces modes de rupture s'ajoutent les suivants qui concernent spécifiquement les ouvrages poids en béton, en maçonnerie ou en gabions :

- Glissement du mur sur sa base;
- Renversement du mur ;
- Poinçonnement du sol sous la base du mur;
- Rupture combinée dans le sol et la structure ;
- Instabilité d'ensemble ;
- Mouvements excessifs ;
- Rupture d'un élément de structure ou des liaisons entre ces éléments (liaison portes/mur..) ;
- Fissuration par traction du parement amont.

Et ceux concernant spécifiquement les rideaux de palplanches :

- la stabilité de l'écran vis-à-vis d'une rupture par défaut de butée (stabilité externe) ;
- la résistance de la structure de l'écran (stabilité interne) ;
- la portance de l'écran (stabilité externe) ;
- la stabilité des tirants d'ancrage (stabilité interne) ;
- l'absence d'interaction entre l'écran et un ancrage (stabilité externe) ;
- la stabilité du fond du lit (stabilité hydraulique) ;
- la stabilité d'ensemble de l'écran (stabilité globale).

La justification de l'écran vis-à-vis des états-limites de service consiste à vérifier :

- que les efforts supportés par l'écran restent admissibles pour la structure de l'écran (pour éviter par exemple une fissuration inacceptable, ou des problèmes de corrosion) ;
- et le cas échéant, que l'effort supporté par un tirant reste admissible pour sa structure et pour éviter un fluage important de l'ancrage ;
- que la modification des efforts (pressions interstitielles, poussée) provoquée par le déplacement de l'écran ne remet pas en cause sa tenue et résistance à l'érosion interne.

Le déplacement de l'écran de soutènement est principalement lié :

- à sa réalisation (battage de palplanches, forage et injections des tirants, etc.) ;
- à ses déformations propres sous l'effet des sollicitations qui lui sont appliquées, donc à sa raideur et à celle de ses appuis ;
- aux déformations d'ensemble du massif, notamment dans le cas d'ancrages multiples;
- à l'effet d'un rabattement, ou de la modification des niveaux d'eau (par exemple due à l'effet barrage d'un écran) ;
- au caractère gonflant ou évolutif des sols.

Pour la vérification du rideau de palplanches vis-à-vis de l'ensemble de ces états-limites, il convient de tenir compte de l'influence des affouillements sur l'évolution du fond du lit (érosion des matériaux en pied de berges et diminution de la butée de pied).

Pour ces deux dernières catégories d'ouvrages (ouvrages poids et rideau de palplanches) qui concernent :

- Le soutènement en gabions de la digue de la Montagnette
- Le parapet de la digue de la Montagnette
- Les quais de Tarascon (mur + parapet)
- Les murs du Château Royal de Provence
- Le rideau de palplanches au droit de l'usine Fibre Excellence
- Les quais d'Arles (mur + parapet)
- Le mur parapet au droit du remblai dit de l'IRPA

L'approche calculatoire s'est limitée au phénomène commun aux ouvrages en remblais (érosion interne et externe). Pour les états limites spécifiques précités, il est fait référence aux études de projet réalisées par les maîtres d'œuvre qui ont traité ces problématiques et nous avons retenu une probabilité annuelle de brèche dont l'acceptabilité a été vérifiée.

Deux ouvrages sont également situés dans le système d'endiguement :

- l'écluse d'Arles gérée par VNF (en cours),
- l'écluse du Canal du Rhône à Fos gérée par la CNR,

Deux études de dangers ont été réalisées par ces organismes. Elles sont citées en référence

1.8 BARRIERES DE SECURITE, FONCTIONS, SOUS-FONCTIONS ET COMPOSANTS D'UNE DIGUE EN TERRE

9 fonctions ou barrières de sécurité sont prises en compte dans la présente analyse. 8 barrières sont passives, ce sont :

- La fonction **étanchéité** est l'aptitude à retenir l'eau et à éviter les infiltrations et fuites. Par exemple, un masque en limons compactés A1 et/ou A2 suivant la GTR, un perré maçonné, un rideau de palplanches et l'enrobage d'une conduite traversant le remblai sont des composants associés à cette fonction.
- La fonction résistance est l'aptitude en cas d'infiltrations ou de fuites à résister à l'érosion interne. C'est principalement la nature du remblai de la digue et de sa fondation et la qualité de compactage au moment de son édification qui va permettre de caractériser l'efficacité de cette fonction.
- La fonction **filtration** est l'aptitude à protéger l'étanchéité de son vieillissement et des accidents en retenant les particules emportées par l'eau.
- La fonction **drainage** est l'aptitude à limiter les fuites accidentelles et à évacuer ses fuites sans monter en pression (drains).
- La fonction **stabilité** est l'aptitude à assurer l'équilibre de l'ouvrage. Par exemple, les recharges amont et aval contribuent massivement à cette fonction, mais elles ne sont pas les seules.

- La fonction **protection** est l'aptitude à protéger la surface du remblai des effets de l'environnement : agents atmosphériques et humains (rip-rap, butées de pied). Par exemple, elle doit empêcher les animaux fouisseurs de creuser des galeries dans les talus et le soleil de dessécher les matériaux au point de fissurer la crête du remblai. Elle doit également éviter l'érosion liée au batillage ou à la vitesse du courant.
- La fonction **évacuation** est l'aptitude à évacuer les crues et rejeter l'eau excédentaire à l'endroit prévu (barrage). Dans le delta du Rhône, elle caractérise l'aptitude à résister à la surverse. Elle concerne les digues résistantes à la surverse mais par seulement, certains ouvrages, même si ça n'est pas leur fonction principale, peuvent résister, de par leur conception, à la surverse. C'est le cas des quais, rideau de palplanches.
- **Fonction Environnement :** choix de solutions durables minimisant l'impact environnemental et le coût global pour la société et assurant l'intégration sociale des riverains (tourisme, développement de nouvelles activités). Elle caractérise également les facteurs d'agression de la digue (présence d'arbres sur les talus).

1 barrière est active. C'est la :

- **Fonction Sécurité**. Elle regroupe les conclusions de l'étude de dangers et la définition du plan de surveillance et des moyens d'accès pour intervention. Ainsi elle doit permettre d'accéder dans les meilleurs délais en tous points des digues en toute période et par tout temps pour assurer un entretien régulier, une surveillance et une capacité d'intervention en temps de crue.

1.8.1 Fonction Etanchéité

La fonction Etanchéité est découpée en trois sous-fonctions :

- L'étanchéité de la digue
- L'étanchéité de la fondation
- Le retour d'expériences des crues passées et des visites de surveillance concernant l'état de cette étanchéité

Les composants rencontrés sur les digues associés à cette fonction figurent ci-dessous :

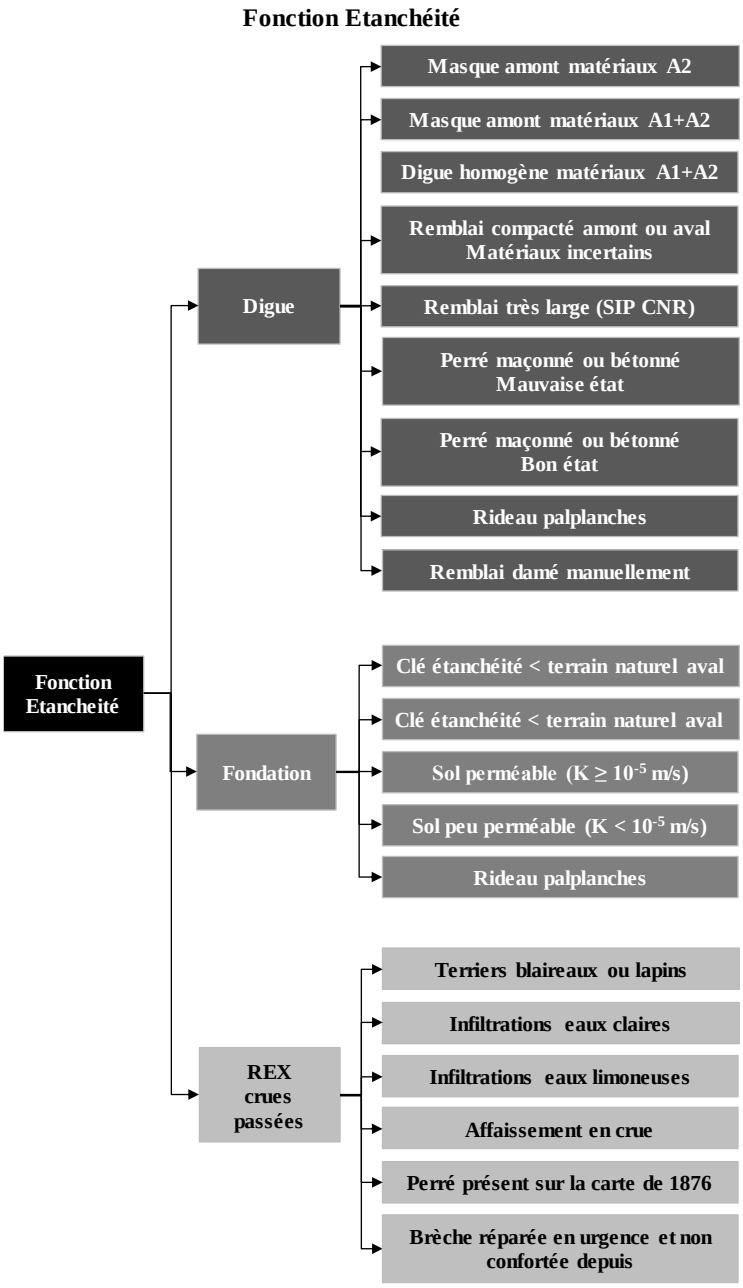


Figure 19. composants associés à la Fonction Etanchéité

1.8.2 Fonction Résistance

La fonction Résistance à l'érosion est découpée en 2 sous-fonctions. Les composants associés à ces sous-fonctions sont les suivants :

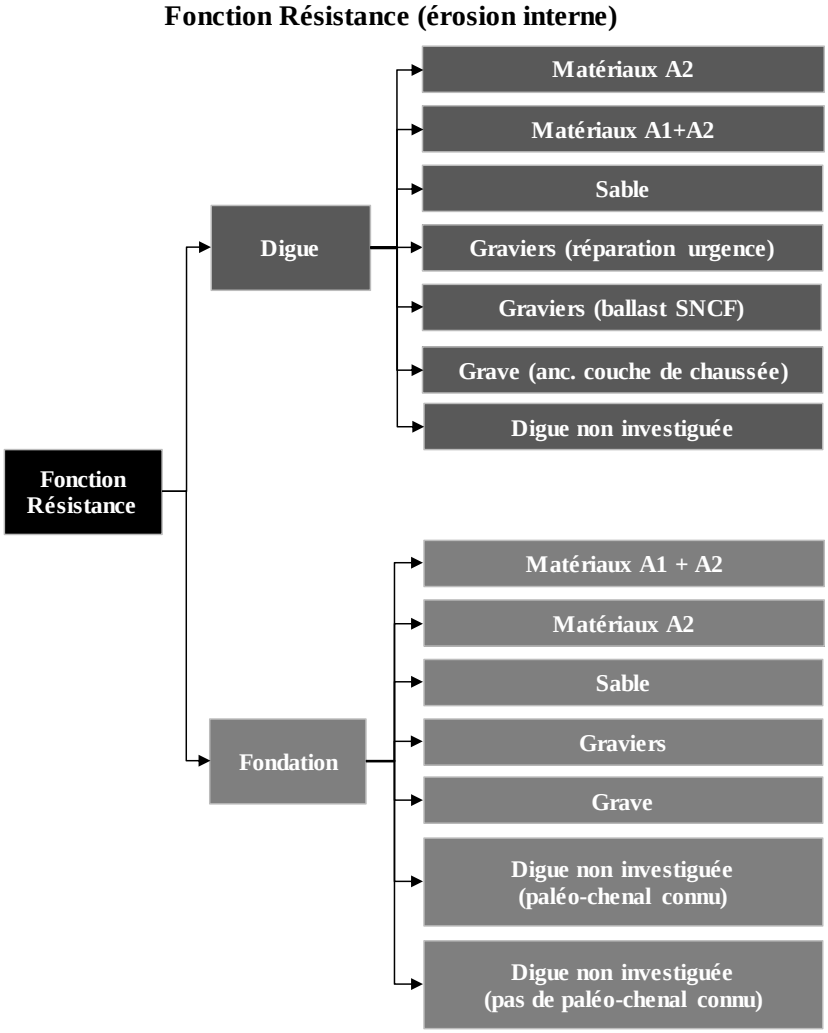


Figure 20. composants associés à la Fonction Résistance

1.8.3 Fonction Filtration

La fonction Filtration est découpée en 3 sous-fonctions. Les composants associés à ces sous-fonctions sont les suivants :

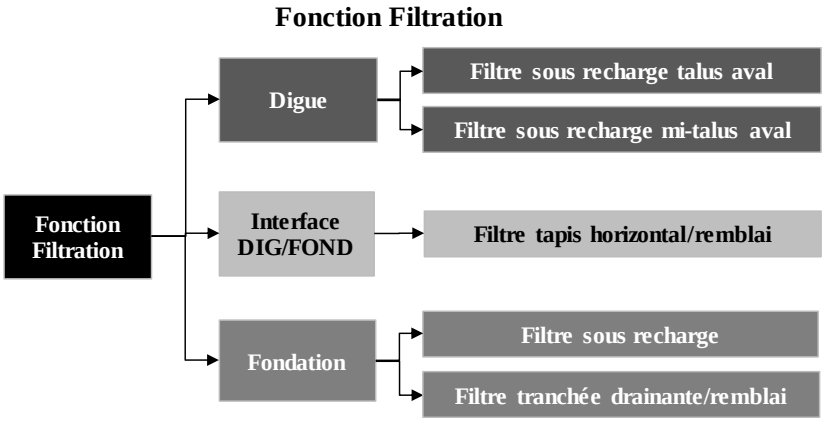


Figure 21. composants associés à la Fonction Filtration

1.8.4 Fonction Drainage

La fonction Drainage directement associée à la fonction Filtration est découpée en 3 sous-fonctions. Les composants associés à ces sous-fonctions sont les suivants :

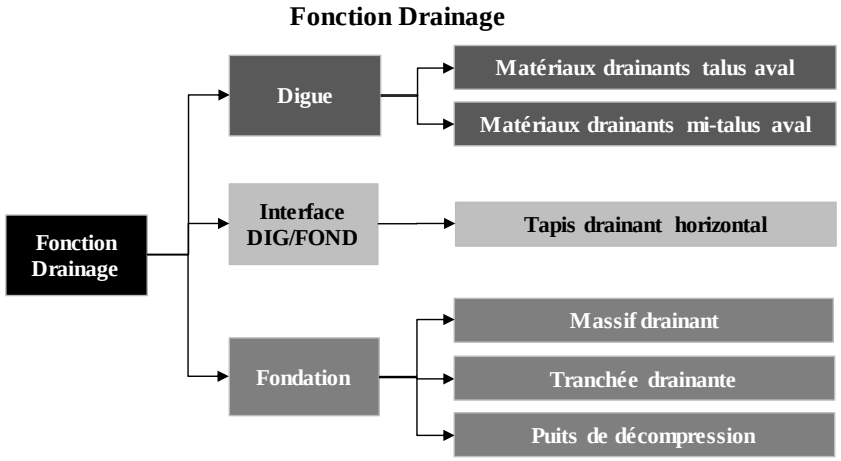


Figure 22. composants associés à la Fonction Drainage

1.8.5 Fonction Stabilité

La fonction Stabilité est découpée en 3 sous-fonctions :

- Sous-fonction relative à la digue
- Sous-fonction relative à la fondation
- Sous-fonction relative à la berge

Les composants associés à ces sous-fonctions sont les suivants :

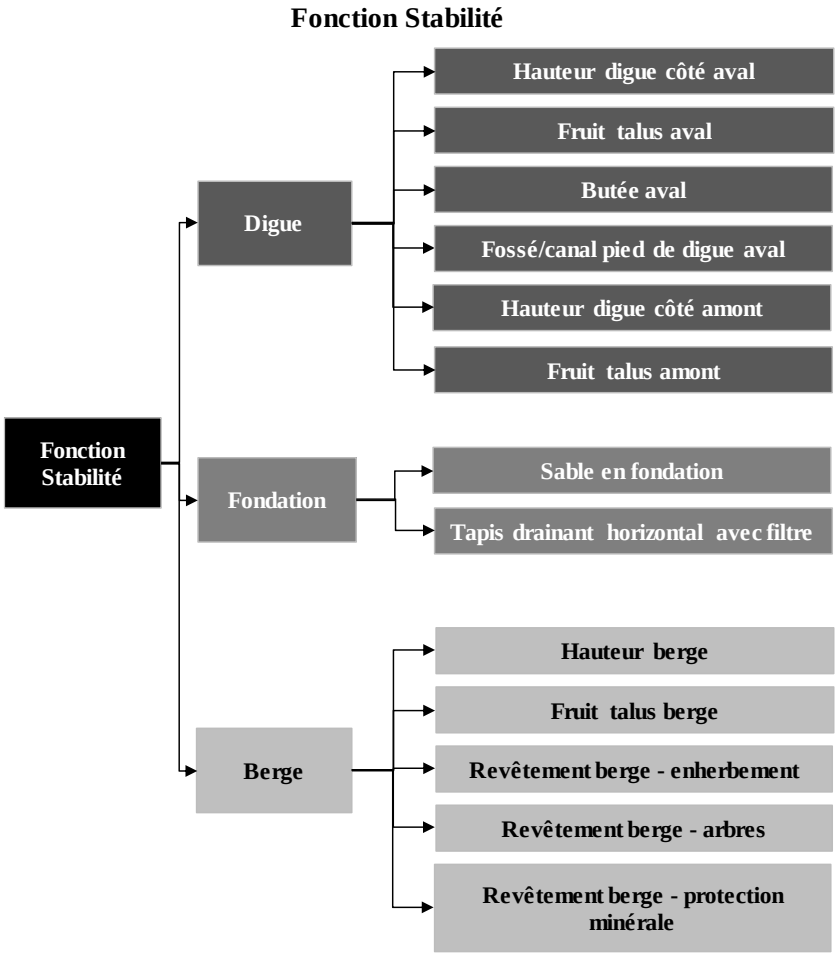


Figure 23. composants associés à la Fonction Stabilité

1.8.6 Fonction Protection

La fonction Protection est découpée en 4 sous-fonctions (3 pour la digue et 1 pour la berge). Les composants associés à ces sous-fonctions sont les suivants :

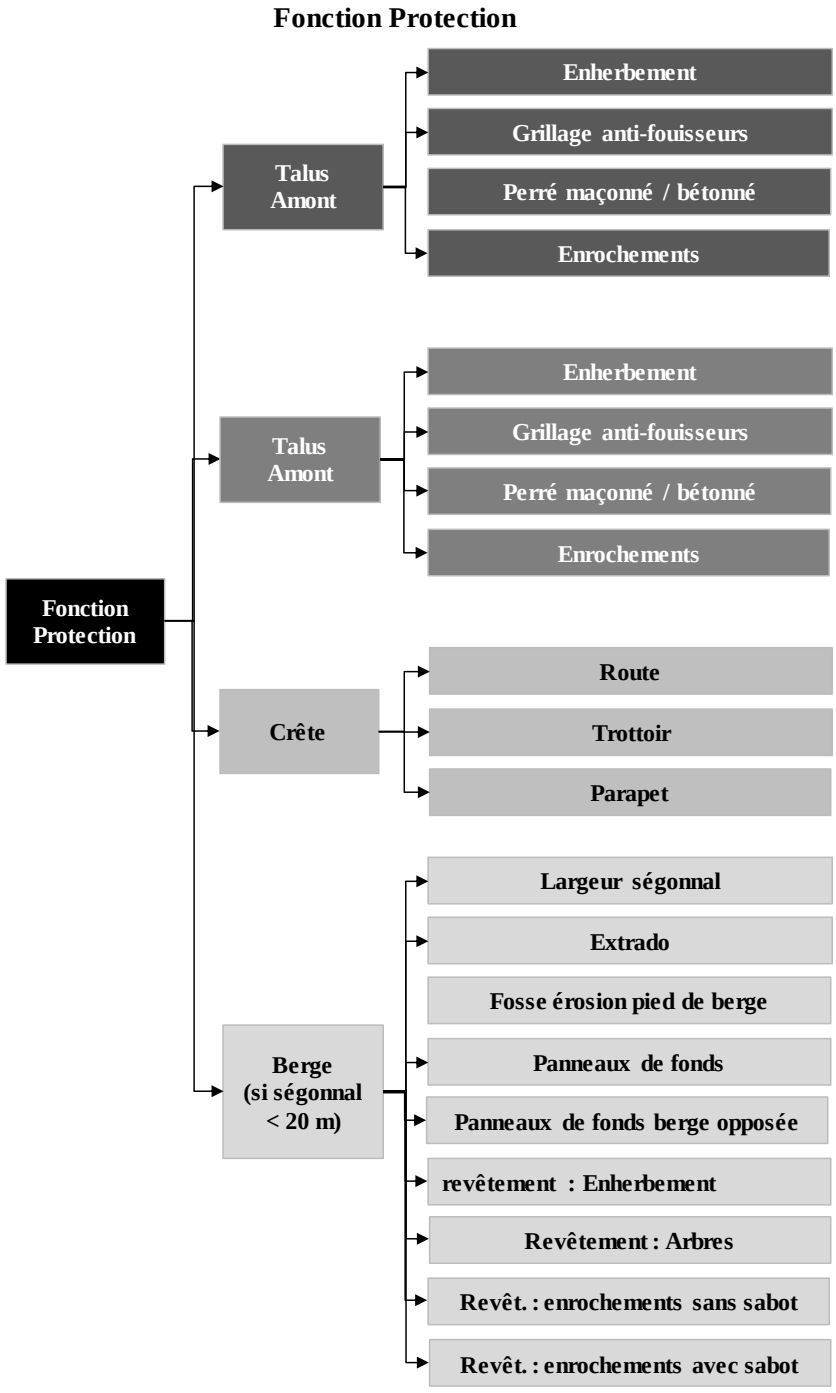


Figure 24. composants associés à la Fonction Protection

1.8.7 Fonction Evacuation

La fonction Evacuation est découpée en 4 sous-fonctions. Les composants associés à ces sous-fonctions sont les suivants :

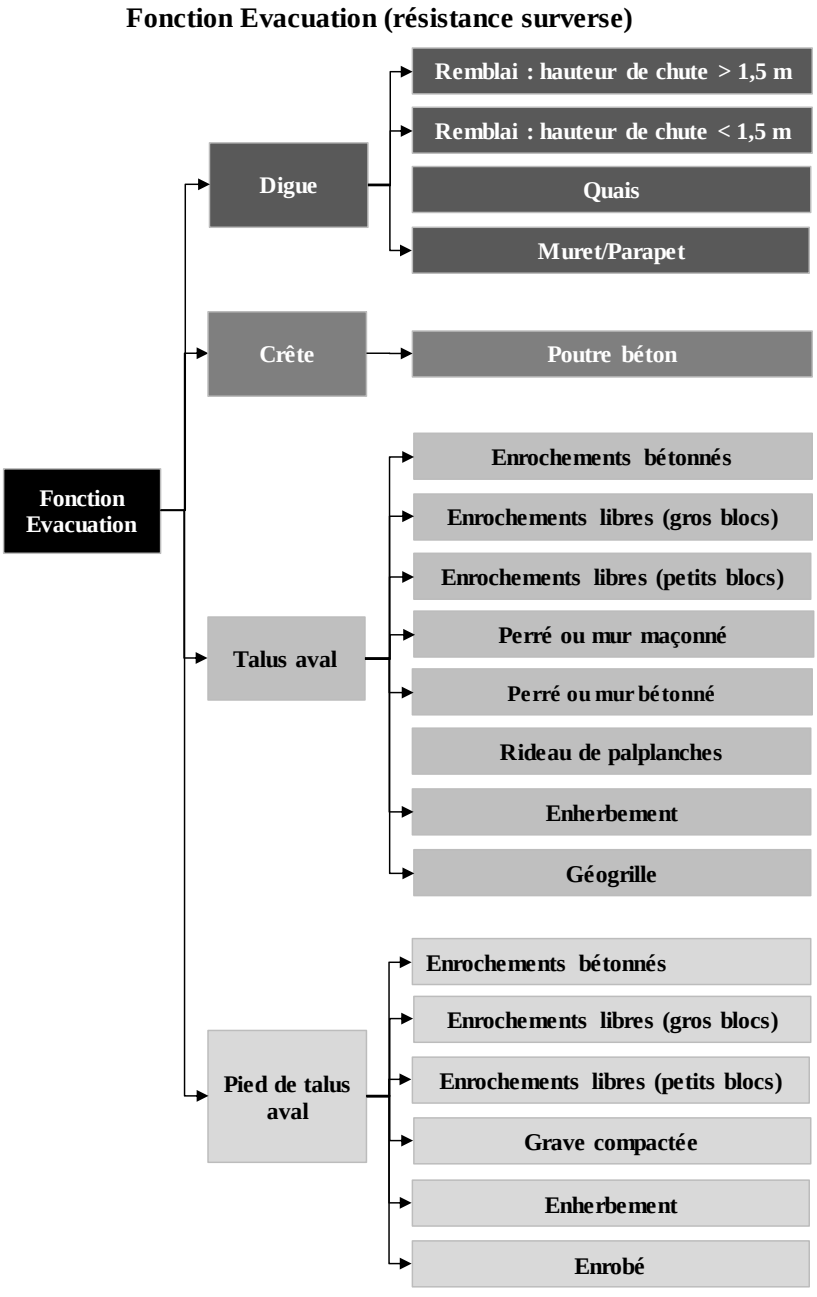


Figure 25. composants associés à la Fonction Evacuation

1.8.8 Fonction Environnement

La fonction Environnement est découpée en 2 sous-fonctions. Les composants associés à ces sous-fonctions sont les suivants :

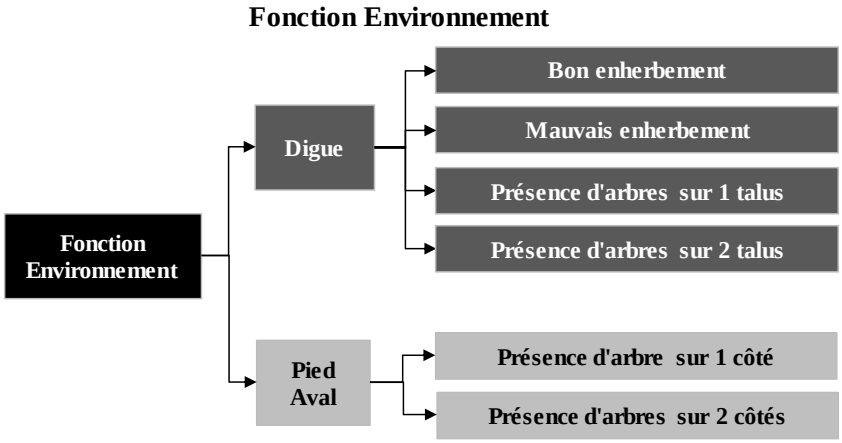


Figure 26. composants associés à la Fonction Environnement

1.8.9 Fonction Sécurité

La fonction Sécurité est découpée en 4 sous-fonctions. Les composants associés à ces sous-fonctions sont les suivants :

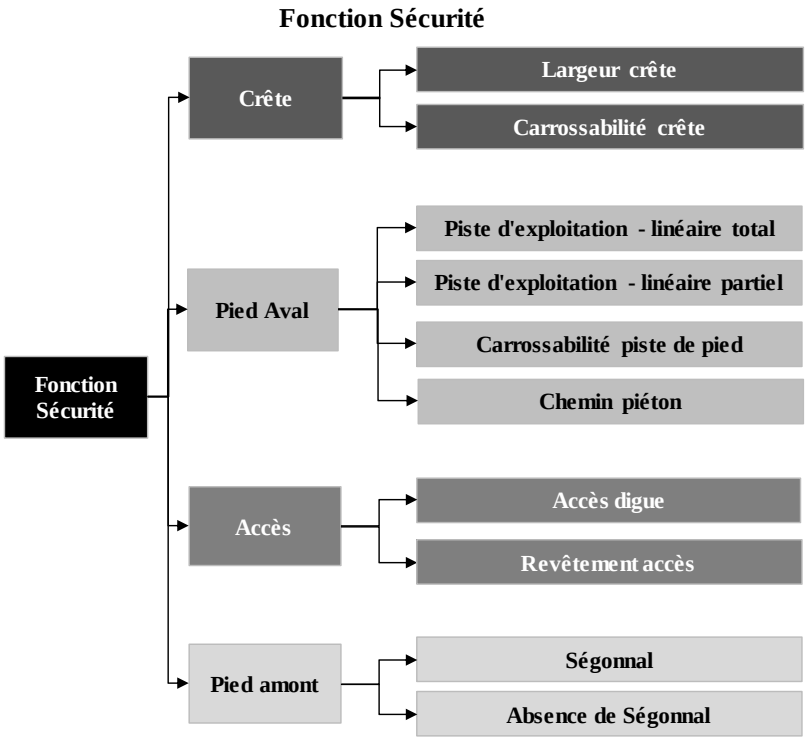


Figure 27. composants associés à la Fonction Sécurité

1.9 INVESTIGATIONS, ETUDES ET DIAGNOSTIC APPROFONDI

Les investigations réalisées dans le cadre du diagnostic approfondi ont été les suivantes. Elles sont soit présentées dans le cadre la présente, soit référencées dans le chapitre 7 de la présente rubrique.

1. Relevé topographique du lit endigué et de la zone protégée (Cf. réf.),
2. Relevé bathymétrique (Cf. réf.),
3. Etude hydrologique (Cf. rubrique 6),
4. Etude hydraulique du lit endigué (Cf. réf. et rubrique 6).
5. Etude hydraulique de la zone protégée (Cf. réf.),
6. Etude morpho-dynamique (Cf. réf. et rubrique 6)
7. Examen visuel des berges par voie nautique (Cf. réf. et rubrique 6)
8. Etude du vent (Cf. et rubrique 6)
9. Réalisation annuelle des Visites Techniques Approfondies depuis 2008 (Cf. réf. et rubrique 7)
10. Reconnaissances géotechniques (Cf. réf. et rubrique 3)
11. Etude historique (archives, dossiers des ouvrages exécutés et études antérieures)
12. Etude accidentologique (Cf. réf. et rubrique 7)
13. Diagnostic approfondi des ouvrages traversants y compris le fonctionnement des organes de fermeture (Cf. réf. et rubrique 3)
14. Déclarations de travaux auprès des opérateurs de réseaux (Cf. réf. et rubrique 3)

.

1.10 CHOIX D'UNE DEMARCHE PROBABILISTE ET COURBE DE FRAGILITE

Le choix d'une méthode probabiliste est motivé la facilité d'identification et de mise en œuvre du caractère probabiliste de l'aléa crue, du fait des nombreuses observations et études hydrologiques sur le Rhône.

Le choix d'une méthode probabiliste est renforcé par la grande hétérogénéité des faciès géotechniques rencontrés dans le Delta, à la fois au cœur des ouvrages due aux différentes étapes de construction des digues et à la superposition de couches de différentes natures les unes sur les autres (effet mille feuilles) mais également dans leur fondation compte tenu des multiples changements de tracés que le Rhône a connu dans son histoire.

Cette forte hétérogénéité est observée parfois au sein d'un même sondage où on peut observer des fortes variations de résistance à l'érosion de conduit entre des échantillons espacés d'un mètre à peine, mais également au sein de paléo-chenaux, où des sables de granulométrie différentes (et donc des gradients critiques d'érosion régressive) peuvent être observés.

Cette hétérogénéité rend très difficile, voire illusoire le caractère déterministe d'un facteur de sécurité.

Pour ces deux raisons, l'approche probabiliste a été privilégiée.

Deux types de probabilités sont utilisés pour l'analyse de risques :

- Des probabilités expérimentales ou fréquentielles.
- Des probabilités subjectives.

$$probabilité\ fréquencielle = \frac{nombre\ de\ fois\ que\ le\ résultat\ attendu\ est\ réalisé}{nombre\ de\ fois\ que\ l'expérience\ a\ été\ réalisé}$$

La probabilité fréquentielle constitue une bonne estimation de la probabilité théorique d'un événement lorsque l'expérience aléatoire a été effectuée un grand nombre de fois.

La probabilité subjective repose sur le jugement ou la perception d'une personne ayant certains renseignements sur une expérience aléatoire. La probabilité est subjective car elle fait appel au jugement et correspond à une évaluation personnelle basée à la fois sur des connaissances et des opinions. On évalue une probabilité subjective dans le cas où il est impossible de calculer une probabilité théorique ou d'estimer une probabilité fréquentielle.

L'utilisation de probabilités fréquentielles est systématique en hydrologie. Dans le cadre de l'analyse de risques, des probabilités fréquentielles ou des fonctions de répartition ont été déterminées à partir des données issues des études géotechniques ou du REX accidentologique pour apprécier au mieux le risque. Quand cela n'était pas possible, nous avons eu recours à l'utilisation de probabilités subjectives. Pour la détermination de ces dernières, nous avons retenu les valeurs proposées par Vick 2002 et adaptées par l'United States Bureau of Reclamation (USBR) [X004].

L'USBR a adopté un système de qualification verbale pour la plupart des estimations de probabilité subjective. Ce système est basé principalement sur des expériences rapportées par

Reagan et al (1989). Ces expériences montrent que, dans des limites raisonnables, les gens sont assez bien calibrés pour des probabilités connues, à condition d'utiliser des mots que la plupart des gens adopteraient pour leur propre cas et à condition que les probabilités soient plus grandes que 0,01. Vick (2002) a résumé ces résultats et a proposé une convention verbale de transformation numérique, indiqué dans le tableau ci-dessous. Les résultats des expériences réalisées par Reagan et al figurent à côté de ces valeurs.

Une des principales conclusions des expériences est que la capacité des gens à quantifier des probabilités ne se prolonge pas très loin à chaque extrémité de l'échelle de probabilité, même si des mots comme "presque impossible "ou "presque certain" sont utilisés. Cela est probablement dû au fait que l'expérience de la plupart des gens ne leur permet pas de conceptualiser des probabilités pour des valeurs extrêmes, et nous ne disposons donc pas des mots qui décrivent adéquatement ces valeurs extrêmes.

Tableau 5. Qualification verbale et probabilité conditionnelle associée par Vick 2002

Qualification verbale de l'événement	Probabilité suggérée Vick (2002)	Gamme de probabilités (Reagan & Al (1989)
Pratiquement impossible en raison de conditions physiques connues ou des procédés qui peuvent être décrits et qualifiés avec une entière confiance	0.01	0-0.05
Très improbable Bien que la possibilité ne puisse être écartée	0.1	0.02-0.15
Neutre Avec aucune raison de croire qu'un résultat est plus ou moins probable que l'autre	0.5	0.45-0.55
Très probable Mais sans être complètement certain	0.9	0.75-0.90
Pratiquement certain en raison de conditions physiques connues ou des procédés qui peuvent être décrits et qualifiés avec une entière confiance	0.99	0.9-0.995

Malgré la démonstration des limites humaines faite par Vick, l'USBR a pris la décision d'ajouter un ordre de grandeur à l'extrémité supérieure et inférieure de l'échelle (en l'occurrence 0.001 et 0.999). Cependant, il a été reconnu que ces chiffres devaient être rarement utilisés, et seulement dans des situations où les conditions sont perçues comme plus improbables que les gammes habituellement utilisées. L'USBR recommande quand cela est possible de décomposer un événement estimé à 0.001 en plusieurs événements situés dans des gammes plus familières.

A l'instar de l'USBR et compte tenu de l'importance du nombre d'incidents et d'accidents analysés dans l'étude accidentologique permettant de justifier le choix de probabilité subjective inférieure à 0.01, nous avons retenu la grille de probabilités suivante

Tableau 6. Qualification verbale et probabilité conditionnelle associée retenues dans l'étude de dangers

Qualification verbale de l'événement	Probabilité conditionnelle pour un événement donné
Quasiment impossible	0.001
Très peu probable	0.01
Peu probable	0.1
Neutre	0.5
Probable	0.9
Très probable	0.99
Quasiment certain	1

Pour la détermination des courbes de fragilité liées aux différents modes de rupture, la méthodologie a été la suivante.

Des paramètres géotechniques et/ou hydrauliques caractérisant la résistance d'une barrière de sécurité ont été déterminés. Il peut s'agir d'une contrainte critique dans le cas de l'érosion de conduit, d'un gradient critique dans le cas de l'érosion régressive, d'une vitesse pour la surverse.

Pour chaque paramètre déterminant, la fréquence de non dépassement a été déterminée dans un premier temps par la formule de Hazen :

$$f = \frac{r - 0.5}{n}$$

r est le rang de la série de données classée par valeurs croissantes, n est la taille de l'échantillon.

Compte tenu le plus souvent du faible échantillon de données et pour pallier un écrêtement éventuel des courbes de distribution, des courbes théoriques en escaliers ont été représentées pour déterminer les valeurs à 1%, 5 %, 25 %, 50 %, 75 %, 95 % et 99 %.

Un ajustement a ensuite été réalisé sur la base de ces valeurs pour déterminer la fréquence de non dépassement du paramètre déterminant suivant une fonction de répartition de type puissance ou de type Gumbel.

Les deux figures ci-dessous illustrent respectivement les fréquences de non dépassement des contraintes critiques des matériaux A1+A2 et A2 suivant la classification GTR2000 et les courbes de fragilité établies pour la probabilité d'initiation d'érosion de conduit en fonction du diamètre du conduit, de la nature des matériaux et du gradient moyen dans le conduit. Le détail figure en rubrique n°8

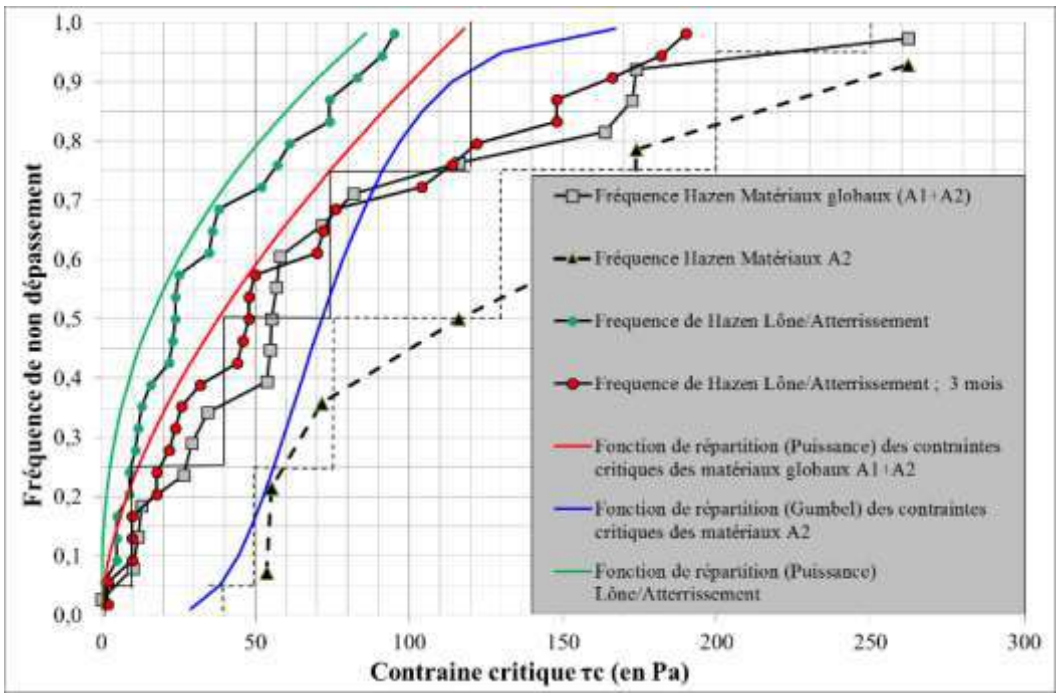


Figure 28. Fréquence de non dépassement des contraintes critiques pour les matériaux A1+A2 et matériaux A2

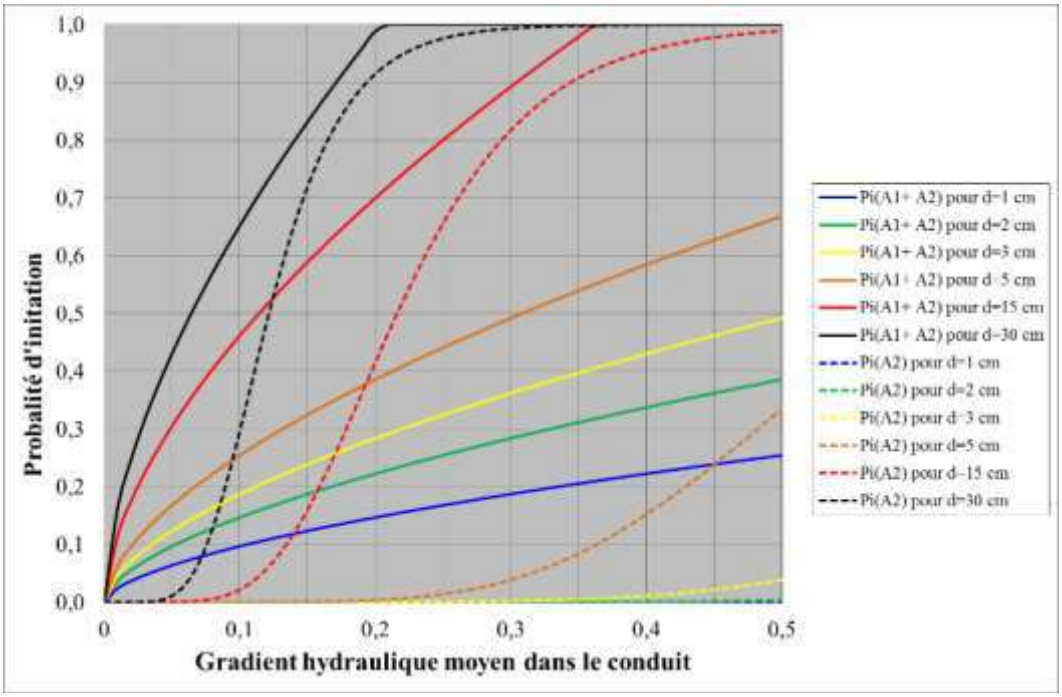


Figure 29. Probabilité d'initiation de l'érosion de conduit en fonction de la nature des matériaux, du diamètre du conduit et du gradient hydraulique dans le conduit.

1.11 SCENARIOS D'ACCIDENTS OU DE BRECHES ETUDIES

Le tableau ci-après donne les scénarios de brèches retenus et évalués dans l'étude de dangers. Ces scénarios ont été définis à partir de l'étude accidentologique et de la caractérisation des modes de rupture décrite ci-après.

Tableau 7. Identification des différents scénarios de brèches

N° scénario	Modes de rupture	Libellé du scénario de brèche
1	Claquage hydraulique + Erosion de conduit	Claquage hydraulique d'un terrier de blaireau partiellement colmaté et érosion de conduit
2	Erosion de conduit	Erosion de conduit dans un vide le long d'un ouvrage hydraulique traversant
3	Erosion de conduit	Erosion de conduit dans une racine d'arbre mort
4	Erosion de conduit	Erosion de conduit dans une fissure traversante
5	Soulèvement hydraulique + Erosion régressive	Claquage hydraulique d'une couche de sol cohésive surplombant une couche de sable et érosion régressive de cette dernière
6	Claquage hydraulique + Erosion de contact	Claquage hydraulique du masque étanche et érosion de contact le long d'une couche de graviers
7	Claquage hydraulique + Suffusion interne	Claquage hydraulique du masque étanche et suffusion de couche de grave englobée dans la digue
8	Surverse	Surverse sur la digue
9	Affouillement de pied	Affouillement en pied amont de la digue
10	Glissement	Glissement du talus aval en crue
11	Glissement	Glissement du talus amont en crue
12	Mécanique	Stabilité mécanique des ouvrages hors glissement, claquage hydraulique et soulèvement du pied aval
13	Mécanique	Stabilité des parapets et batardeaux

Deux scénarios ont également été analysés et écartés du fait de leur très faible probabilité : la brèche par liquéfaction sous sollicitation sismique du fait de la très faible occurrence de la concomitance d'une crue et d'un séisme et la brèche par érosion liée au batillage intégrée dans le scénario de surverse et d'affouillement de pied.

La stabilité des digues sous sollicitation sismique a vérifiée pour les ouvrages confortés ou à conforter dans le cadre du Plan Rhône suivant les recommandations du CFBR [X020] et du groupe de travail mis en place sous l'égide du Ministère de l'Ecologie [X044].

Un scénario spécifique aux ouvrages hydrauliques traversant la digue a également été pris en compte :

- Scénario A : la défaillance des organes de fermeture des ouvrages hydrauliques traversants (le scénario 2 traitant de l'érosion de conduit dans un vide le long d'un ouvrage hydraulique ou d'une transition traversant la digue).

1.12 ARBRE D'EVENEMENTS D'UN SCENARIO DE BRECHE

Conformément aux recommandations de la CIGB 2015 [X001], l'arbre d'événements d'un scénario de brèche impliquant un état-limite d'érosion interne peut être décomposé de la façon suivante :

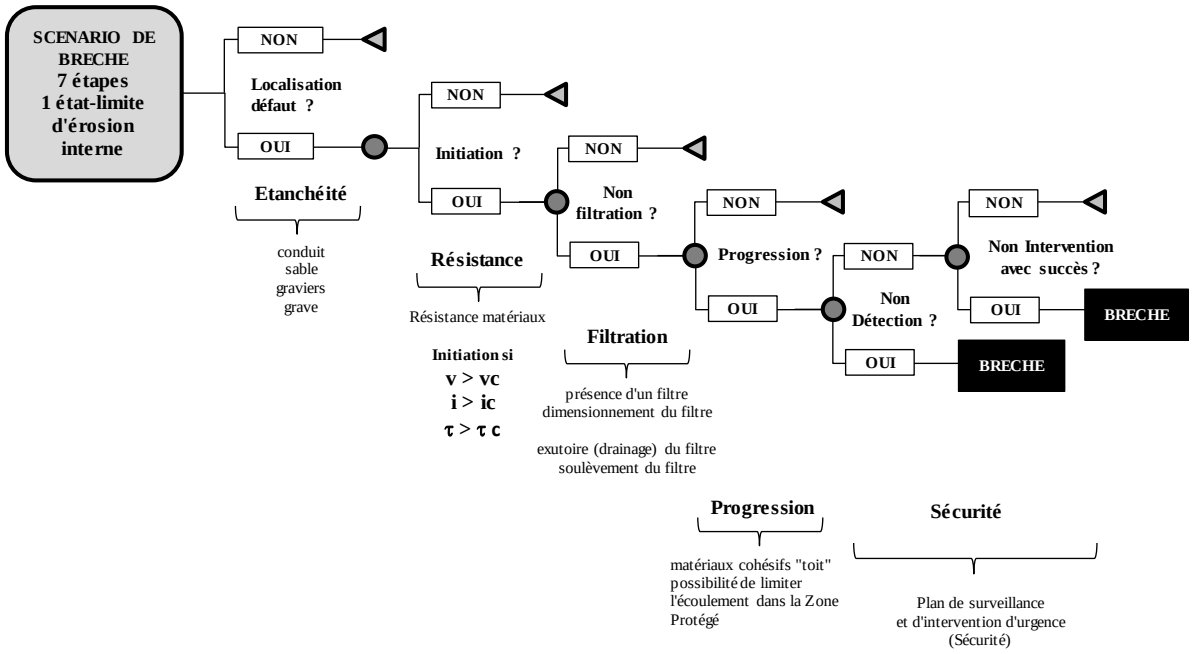


Figure 30. Arbre d'événements d'un scénario de brèche impliquant un processus d'érosion interne

En supposant que toutes ces étapes sont indépendantes les unes des autres, la probabilité conditionnelle d'ouverture d'une brèche pour une crue donnée est alors donnée par la formule suivante (Deroo & Fry 2016 [X007]) :

$$P(brèche) = P_{localisation} \cdot P_{initiation} \cdot P_{non\ filtration} \cdot P_{progression} \cdot [P_{non\ détection} + (1 - P_{non\ détection}) \cdot P_{non\ intervention}]$$

Avec :

$P_{localisation}$: Probabilité de localisation d'un conduit traversant pour l'érosion de conduit, d'une couche de sable érodable traversante pour l'érosion régressive, d'une couche de graviers pour l'érosion de contact ou de grave pour la suffusion interne,

$P_{initiation}$: Probabilité d'initiation de l'état-limite de rupture considéré (érosion conduit, érosion régressive, érosion de contact, suffusion interne), la sollicitation dans le conduit ou la couche érodable est supérieure à la résistance du matériau,

$P_{non\ filtration}$: Probabilité que les particules entraînées par l'érosion ne soient pas bloquées et cheminent jusqu'à un exutoire non filtré,

$P_{progression}$: Probabilité que le processus se poursuive sans stabilisation et déclenche un autre phénomène pathologique (tassement, instabilité, claquage) ou s'accélère jusqu'à l'effondrement du toit au-dessus du conduit,

$P_{non\ détection}$: Probabilité de non détection du désordre par les gardes digues ou les équipes de surveillance lors de la crue,

$P_{non\ intervention}$: Probabilité de non intervention suite à la détection d'un désordre,

Pour chaque scénario impliquant un état-limite de rupture mécanique (phénomène par définition plus soudain : glissement, soulèvement, claquage, liquéfaction), on évalue la probabilité conditionnelle d'ouverture d'une brèche pour une crue donnée par la formule suivante :

$$P(brèche) = P_{initiation\ mécanique}$$

Pour la surverse, à l'exception des points bas, qui sont aujourd'hui quasiment inexistants et considérant que toute intervention pourrait reporter le risque de rupture en amont, en aval ou sur la rive opposée, la probabilité d'ouverture d'une brèche pour une crue donnée est évaluée par la formule suivante :

$$P(brèche) = P_{initiation\ surverse}$$

Pour un scénario de brèche impliquant un état-limite de rupture mécanique (ex. claquage hydraulique) et un état limite d'érosion interne (ex. érosion régressive), on évalue la probabilité d'ouverture d'une brèche pour une crue donnée par la formule suivante :

$$P(brèche) = P_{localisation} \cdot P_{initiation\ claquage} \cdot P_{initiation\ érosion\ régressive} \cdot P_{non\ filtration} \cdot P_{progression} \cdot [P_{non\ détection} + (1 - P_{non\ détection}) \cdot P_{non\ intervention}]$$

Pour l'ensemble des scénarios de brèches et crues considérées, les probabilités conditionnelles sont calculées pour chaque profil géométrique.

Des classes de probabilité sont retenues. Elles sont les suivantes. La qualification verbale est celle définie supra.

Tableau 8. Classes de probabilité conditionnelle de brèche retenues pour l'étude de dangers

Probabilité conditionnelle	Qualification verbale	Couleur de la classe
10^{-1} à 1	peu probable à quasiment certain	
10^{-2} à 10^{-1}	Très peu probable à peu probable	
10^{-3} à 10^{-2}	Quasiment impossible à très peu probable	
10^{-4} à 10^{-3}	Quasiment impossible	
10^{-5} à 10^{-4}		
10^{-6} à 10^{-5}		

1.13 MODELE GEOMETRIQUE

Pour la construction du modèle géométrique, les données suivantes ont été collectées à partir des sources suivantes (Cf. références au chapitre 7 de la rubrique 2) :

- Modèle numérique de terrain réalisé par Fugro Géoid en 2007,
- Plan topographique de la digue et de son environnement réalisé par Fugro Géoid en 2007,
- Orthophotographie de la digue et de son environnement réalisé par Fugro Géoid en 2007,
- Plans des Ponts et Chaussées de 1876,
- Bathymétrie CNR,
- Bathymétrie VNF.

La précision des données figure avec les références.

Pour certains tronçons de digue très éloignés du fleuve, les données de l'environnement de l'ouvrage côté fleuve ont été collectées à partir de la base de données topographiques Plan Rhône réalisée par l'IGN ou à partir des orthophotographies IGN.

On retient également par convention la dénomination suivante :

- talus côté fleuve = talus amont,
- talus côté zone protégée = talus aval.

L'ouvrage de protection est défini dans la présente analyse de risques par le remblai auquel s'ajoutent les bandes de 4,5 mètres situées de part et d'autre de la digue (même si le SYMADREM n'en est pas propriétaires).

L'environnement de l'ouvrage couvre, quant à lui, les emprises situées de part d'autre de la digue à une distance comprise entre 4,5 mètres et 20 mètres.

Les berges en enrochements du fleuve sont donc considérées comme faisant partie de l'ouvrage ou de son environnement suivant la distance de la digue au fleuve.

Les données décrites ci-après ont été collectées tous 1/8 de PR, ce qui représente un espacement moyen de 125 m entre les profils (supérieur en extrados et inférieur en intrados).

Côté fleuve :

- largeur du ségonnal (m),
- revêtement de la berge,
- pour les ségonnaux de largeur inférieure à 20 mètres, bathymétrie en pied de berge.

Dans l'environnement de l'ouvrage côté fleuve et côté zone protégée :

- cote du terrain naturel à 20 m du pied de digue (m NGF) à l'exception des zones où la largeur du ségonnal est inférieure à 20 mètres ;

- l'occupation du sol (terres agricoles, caisse d'emprunt, zone urbanisée, arbres, …) ;
- présence d'ouvrages particuliers (fossé, route, bâti).

Dans l'ouvrage :

- cotes de la crête de digue et des pieds de digue amont et aval (m NGF),
- fruit (inverse de la pente) des talus amont et aval,
- largeur et revêtement de la crête de digue (carrossable, circulable, non circulable)
- revêtement des talus de digue,
- présence probable d'un perré masqué sous la végétation d'après les informations figurant sur la carte des ponts et chaussées de 1876,
- présence d'une bande de 4,5 m en pieds de digue amont et aval et le cas échéant le revêtement de cette bande (carrossable, circulable, non circulable),
- en cas d'absence d'une bande de 4,5 m en pieds de digue, l'état d'occupation de la « piste » de pied (arbres, agriculture, caisse d'emprunt, fossé, canal…).

Une piste est considérée comme carrossable quand elle est revêtue de matériaux insensibles à l'eau et permet la circulation de véhicules par temps secs et par temps de pluie. Elle est considérée comme circulable, quand elle n'est pas revêtue mais que sa largeur permet la circulation de véhicules par temps secs. Elle n'est pas circulable quand elle ne répond à aucun des deux critères précédents.

La figure ci-dessous illustre les principales données collectées

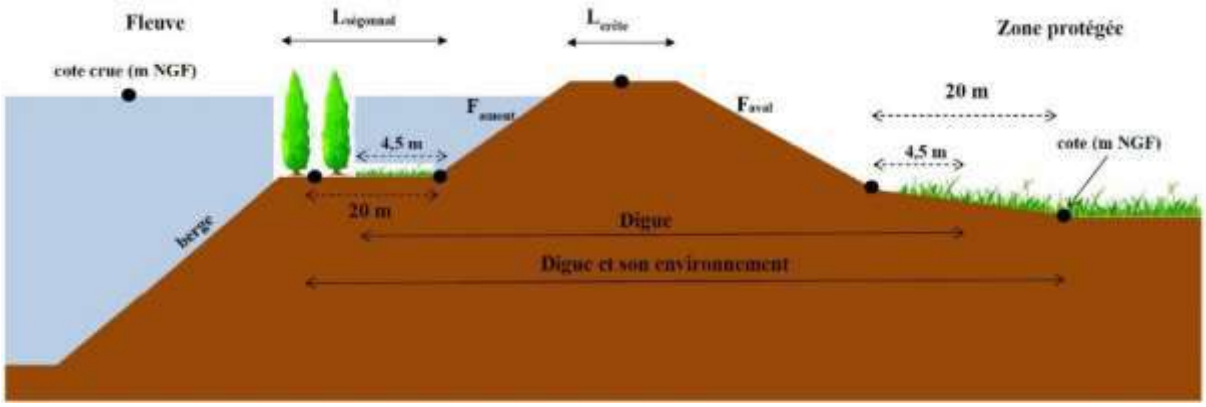


Figure 31. Modèle géométrique

1.14 DETERMINATION DE LA PROBABILITE ANNUELLE DE BRECHE

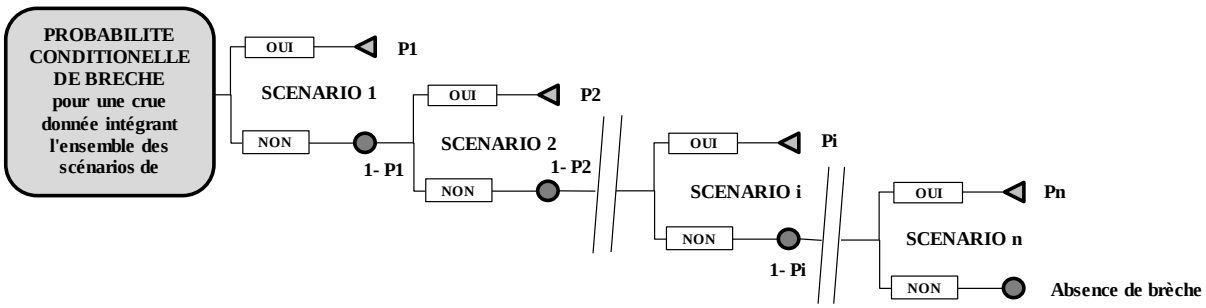
1.14.1 Etapes

La probabilité annuelle de brèche d'un tronçon de digue est calculée suivant les étapes suivantes :

- Choix de scénarios de crue et détermination de la probabilité d'occurrence des crues considérées (Cf. 6.11.);
- Détermination pour chaque scénario de brèche d'un arbre d'événements et de courbes de fragilité associées (Cf. 6.12.)
- Détermination pour chaque crue considérée d'une probabilité de rupture globale intégrant les différents scénarios de brèches (Cf. ci-après) ;
- Intégration des données pour l'ensemble des crues et détermination de la probabilité annuelle de rupture (Cf. ci-après).

1.14.2 Probabilité de brèche pour une crue donnée

En considérant les scénarios de brèches retenus indépendants les uns des autres, la probabilité de formation d'une brèche P_c pour une crue donnée peut s'écrire sous la forme suivante :



Et finalement s'écrire de la façon suivante (formule de Morgan) :

$$P_c = 1 - \prod_{1}^{n} (1 - P_i)$$

Où :

P_i est la probabilité de brèche pour le scénario de brèche i (i variant de 1 à n)
n est le nombre de scénarios envisagés

1.14.3 Probabilité d'occurrence des crues

Pour l'analyse de risques, 9 scénarios de crues sont pris en compte. Le débit de pointe à la station de Beaucaire/Tarascon, la période de retour T de chacune des crues et l'hypothèse retenue de niveau marin des différents scénarios figurent dans le tableau ci-dessous. Ils sont détaillés en rubrique n°6.

Tableau 9. Débits de pointe des crues considérés et périodes de retour associées

Scénario	Evénement type ou événement proche	Débit de pointe à la station de Beaucaire/Tarascon (m^3/s)	Niveau marin (m NGF)	Période de retour T de la crue (années)
6000		6 000		
7 500	Nov. 2014	7 500	Nov. 2014	4
8 500	17 nov. 2002	8 500	0,9 m NGF	10
9 500	26 nov. 2002	9 500	Nov. 2002	25
10 500	janv. 1994 majoré	10 500	Janv. 1994	50
11 500	Déc. 2003 sans brèche	11 500	Déc. 2003	100
12 500	Mai 1856 sans brèche et actuel	12 500	Déc. 2003 majoré de 30 cm	200
14000	Exceptionnelle	14 160	1,5 m NGF	800
17000	Supérieure à la crue de danger système	17 000	1,5 m NGF	≅ 8000 ou Borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 % de la crue millénale majorée de 8 %

Pour chaque scénario de crue considéré, on attribue une probabilité d'occurrence, par coupure sur l'ensemble des périodes de retour. La coupure utilisée est donnée ci-dessous. La probabilité d'occurrence correspondant à une coupure entre T_1 et T_2 est égale à $p = \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}$

La probabilité d'occurrence pour l'intervalle T < 2 ans est égale à $1 - \frac{1}{2} = 0{,}5$ et pour T > 500 ans est égale $\frac{1}{500} = 0{,}002$

Pour chaque scénario de crue de période T, les périodes T_1 et T_2 encadrant la coupure correspondent à des variations de débits d'environ ± 5 %.

Tableau 10. Probabilités d'occurrence par intervalle de crue retenues en amont des digues résistantes à la surverse

Débit de pointe Q (m^3/s)	T (ans)	T_1 (ans)	T_2 (ans)	Probabilité d'occurrence
6 000			2	0,5
7 500	4	2	7,8	0,372
8 500	10	7,8	15,6	0,064
9 500	20	15,6	31,3	0,032
10 500	45	31,3	62,5	0,016
11 500	100	62,5	125	0,008
12 500	200	125	500	0,006
14 160	800	500	2000	0,0015
17 000	≅ 8000	2000		0,0005

Pour la crue de 17 000 m^3/s (situation extrême), les digues millénales, en amont des digues résistantes à la surverse, subissent une surverse (scénarios d'inondation EF09 et EF10 en rubrique 8c). Bien que ces digues ne comportent pas de fonction « évacuation », leur conception et les mesures structurelles de réduction du risque proposées en rubrique n°9, leur permettent de supporter une petite lame d'eau déversante. Une probabilité conditionnelle de rupture de 0,1 a été retenue pour ce scénario.

Tableau 11. Probabilités d'occurrence par intervalle de crue retenues en aval des digues résistantes à la surverse

Débit de pointe Q (m^3/s)	T (ans)	T_1 (ans)	T_2 (ans)	Probabilité d'occurrence
6 000			2	0,5
7 500	4	2	7,8	0,372
8 500	10	7,8	15,6	0,064
9 500	20	15,6	31,3	0,032
10 500	45	31,3	62,5	0,016
11 500	100	62,5	125	0,008
12 500	200	125	500	0,006
14 160	800	500		0,002

La somme des probabilités d'occurrence est égale à 1, ce qui permet de couvrir l'ensemble de l'espace temporel.

1.14.4 Probabilité annuelle de brèche

La probabilité annuelle de brèche P s'écrit de la façon suivante pour les digues résistantes à la surverse :

$$P = 0{,}5.P_{6000} + 0{,}372.P_{7\,500} + 0{,}064.P_{8\,500} + 0{,}032.P_{9\,500} + 0{,}016.P_{10\,500} + 0{,}008.P_{11\,500} + 0{,}006.P_{12\,500} + 0{,}0015.P_{14\,160} + 0{,}0005.P_{17000}$$

Où P_c est la probabilité de rupture globale pour une crue de débit de pointe à la station de Beaucaire/Tarascon de « c » m^3/s.

Pour la suite de l'analyse de risques, on considère que la probabilité de brèche pour le scénario 6000 est nulle.

Le mode de calcul par arbres d'événements et probabilités conditionnelles par étapes de l'arbre d'événement peut conduire à des probabilités très faibles, c'est pourquoi le résultat final des calculs a été comparé avec les deux grilles suivantes extraites respectivement du guide de lecture des EDD Barrages et du projet de guide ERINOH sur l'ingénierie ainsi qu'avec le REX accidentologique.

Classe de probabilité / Type d'appréciation	E	D	C	B	A
qualitative[1] (les définitions entre guillemets ne sont valables que si le nombre d'installations et le retour d'expérience sont suffisants)[2]	« événement possible mais extrêmement peu probable » : *n'est pas impossible au vu des connaissances actuelles, mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années installations.*	« événement très improbable » : *s'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité.*	« événement improbable » : *un événement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité.*	« événement probable » : *s'est produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie de l'installation.*	« événement courant » : *s'est produit sur le site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie de l'installations, malgré d'éventuelles mesures correctives.*
semi-quantitative	**Cette échelle est intermédiaire entre les échelles qualitative et quantitative, et permet de tenir compte des mesures de maîtrise des risques mises en place, conformément à l'article 4 du présent arrêté**				
Quantitative (par unité et par an)		10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}

(1) Ces définitions sont conventionnelles et servent d'ordre de grandeur de la probabilité moyenne d'occurrence observable sur un grand nombre d'installations × années. Elles sont inappropriées pour qualifier des événements très rares dans des installations peu nombreuses ou faisant l'objet de modifications techniques ou organisationnelles. En outre, elles ne préjugent pas l'attribution d'une classe de probabilité pour un événement dans une installation particulière, qui découle de l'analyse de risque et peut être différent de l'ordre de grandeur moyen, pour tenir compte du contexte particulier ou de l'historique des installations ou de leur mode de gestion.

(2) Un retour d'expérience mesuré en nombre d'années × installations est dit suffisant s'il est statistiquement représentatif de la fréquence du phénomène (et pas seulement des événements ayant réellement conduit à des dommages) étudié dans le contexte de l'installation considérée, à condition que cette dernière soit semblable aux installations composant l'échantillon sur lequel ont été observées les données de retour d'expérience. Si le retour d'expérience est limité, les détails figurant en italique ne sont en général pas représentatifs de la probabilité réelle. L'évaluation de la probabilité doit être effectuée par d'autres moyens (études, expertises, essais) que le seul examen du retour d'expérience.

Figure 32. Grille figurant dans le guide de lecture des études de dangers des barrages

A l'échelle de la vie des ouvrages (durée standard de 100 ans). Ces probabilités deviennent les suivantes

Tableau 12. Probabilité annuelle de brèche, probabilité de brèche sur la durée de vie des ouvrages et qualification verbale

Appréciation de la fiabilité de la barrière ou de l'occurrence d'un événement	Classe de fiabilité	Probabilité annuelle (Grille 1)	Probabilité d'un événement pendant la vie de l'ouvrage
	F	$P < 10^{-6}$	$P < 10^{-4}$
Mise en défaut ou événement possible mais extrêmement peu probable	E	$P < 10^{-5}$	P < 1/1000
Mise en défaut ou événement très improbable	D	$P < 10^{-4}$	P < 1/100
Mise en défaut ou événement improbable	C	P < 1/1000	P < 1/10
Mise en défaut ou événement probable	B	P < 1/100	P < 0,6
Mise en défaut ou événement courant	A	1/100 ≤ P	P ≥ 0,6

2 METHODOLOGIE DE CALCUL

2.1 INTRODUCTION

Le système d'endiguement fluvial de la Camargue Insulaire est constitué des digues allant du PRG281 au PRG 337 et du GRD 281 au GRD 324.5.
Ce linéaire a été redécoupé en secteurs de 125 m en moyenne, ce qui équivaut à deux secteurs entre chaque borne repère en crête de digue. Sur ces derniers a été mené un calcul de probabilité de brèche vis-à-vis des scénarii retenus aux chapitres 6 et 7.1.
La source des données est présentée ci-après ; les calculs menés sont ceux explicités au chapitre 7.1.

2.2 LES DONNEES GEOMETRIQUES

		Aval: coté terre				Crête		Amont: coté fleuve			
Rive	PR	Fruit du talus aval	*hauteur aval*	*Côte pied de digue aval*	largeur talus aval	*Côte crete*	largeur crete	Largeur du talus amont	*Côte pied de digue amont*	*hauteur amont*	Fruit du talus amont
PRG	282,25	5,39	*1,00*	*7,86*	5,09	*8,86*	6,29	7,04	*7,02*	*1,84*	3,66
PRG	282,375	2,18	*4,01*	*4,88*	8,17	*8,89*	6,82	8,60	*5,72*	*3,17*	2,72
PRG	282,5	1,90	*1,28*	*7,75*	2,30	*9,03*	6,41	4,73	*8,43*	*0,60*	8,29
PRG	282,625	3,04	*0,58*	*7,82*	3,24	*8,40*	2,06	6,11	*5,53*	*2,87*	1,96
PRG	282,75	2,12	*2,93*	*6,13*	5,76	*9,06*	2,38	9,98	*4,64*	*4,42*	2,32
PRG	282,875	2,12	*2,75*	*6,30*	5,59	*9,05*	2,31	7,41	*6,79*	*2,26*	3,50
PRG	283	2,30	*1,60*	*7,02*	3,85	*8,62*	2,83	2,36	*7,78*	*0,84*	2,27
PRG	283,125	2,16	*5,35*	*3,75*	11,19	*9,10*	5,11	3,49	*7,61*	*1,49*	2,54
PRG	283,25	1,98	*4,68*	*4,15*	8,83	*8,84*	5,64	2,38	*7,46*	*1,38*	2,20
PRG	283,375	2,06	*4,45*	*4,36*	8,97	*8,81*	4,50	4,34	*6,71*	*2,10*	2,16
PRG	283,5	2,14	*4,22*	*4,53*	8,42	*8,75*	4,35	4,07	*6,67*	*2,08*	2,04
PRG	283,625	2,08	*4,09*	*4,58*	8,03	*8,67*	5,30	4,03	*6,80*	*1,87*	2,25
PRG	283,75	1,98	*4,04*	*4,60*	7,72	*8,64*	4,69	4,11	*6,81*	*1,83*	2,34
PRG	283,875	1,91	*3,89*	*4,85*	7,34	*8,74*	4,65	3,86	*6,94*	*1,80*	2,26
PRG	284	1,97	*3,96*	*4,73*	7,68	*8,69*	5,45	2,31	*8,11*	*0,58*	5,90

Figure 1 : Extrait du tableur de calcul : Données géométriques

2.2.1 Campagne Flimap 2007

En 2007, Fugro Géoid a utilisé le procédé Flimap pour réaliser des levés topographiques en continu des digues fluviales du SYMADREM par technique laser héliportée. Ils ont également réalisé des plans topographiques à l'échelle 1/500ème, des profils en long et en travers, des modèles numérique de terrain et d'élévation et des photos géo-référencées et ortho-rectifiées.

Les coordonnées et les altitudes des pieds de digue, des points à 20 m des pieds et de la crête ont ensuite étaient extraites tous les 0.125 PR.

Pour les tronçons ayant subi des travaux depuis 2007, les différentes sources citées ci-après ont été utilisées.

2.2.2 Les données projet

Pour les travaux récents, ce sont les DOE qui ont été réutilisés.
C'est le cas au niveau des papeteries Etienne, avec les travaux de reconstruction de la digue.
C'est également le cas pour les cotes de crêtes après les travaux de carrossabilité de 2010 et 2016.

2.2.3 BDT Rhône

L'état de la digue du Tiki a été décrit, d'un point de vue topographique, via les données de la BDT Rhône (Base de Données Topographiques le long du Rhône), qui ont été obtenues par LIDAR aéroporté. Les limites de la digue (crête et pieds) ont été estimées à partir de ces données.

2.2.4 La bathymétrie

Différentes campagnes de relevés bathymétriques ont été réalisées sur le secteur du Symadrem ; les données utilisées sont celles issues de la campagne la plus récente, celle de 2010 de la CNR sur le grand Rhône et celle 2013 et 2015 réalisé par VNF sur le petit Rhône. Un levé a été réalisé tous les 50 à 500 m suivant les secteurs, et les données ont été extrapolées si nécessaire.

2.3 LES NIVEAUX DE CRUE

		Les niveaux et hauteurs																				
		Niveau de crue							Hauteur d'eau / TN Aval (en vert: pas de pression en pied)							Hauteur d'eau / TN Amont (en vert: pas d'eau en pied)						
Rive	PR	7200	8500	9500	10500	11500	12500	14160	7200	8500	9500	10500	11500	12500	14160	7200	8500	9500	10500	11500	12500	14160
PRG	282,75	5,99	6,87	7,31	7,66	8,21	8,46	8,59	0,00	0,74	1,17	1,53	2,08	2,32	2,46	1,35	2,23	2,66	3,02	3,57	3,82	3,95
PRG	282,875	5,99	6,87	7,30	7,66	8,21	8,45	8,58	0,00	0,57	1,00	1,36	1,91	2,15	2,28	0,00	0,08	0,51	0,87	1,42	1,66	1,79
PRG	283	5,99	6,86	7,30	7,65	8,20	8,45	8,58	0,00	0,00	0,28	0,64	1,18	1,43	1,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42	0,67	0,80
PRG	283,125	5,98	6,86	7,29	7,65	8,20	8,44	8,57	2,23	3,11	3,54	3,90	4,45	4,69	4,83	0,00	0,00	0,00	0,04	0,59	0,83	0,96
PRG	283,25	5,98	6,85	7,29	7,65	8,19	8,44	8,57	1,82	2,70	3,13	3,49	4,04	4,28	4,41	0,00	0,00	0,00	0,19	0,74	0,98	1,11
PRG	283,375	5,97	6,85	7,28	7,64	8,19	8,43	8,56	1,61	2,48	2,92	3,28	3,83	4,07	4,20	0,00	0,14	0,57	0,93	1,48	1,72	1,85
PRG	283,5	5,96	6,84	7,28	7,64	8,18	8,43	8,56	1,44	2,31	2,75	3,11	3,65	3,90	4,03	0,00	0,17	0,61	0,96	1,51	1,75	1,89
PRG	283,625	5,96	6,83	7,27	7,63	8,18	8,42	8,55	1,38	2,26	2,70	3,05	3,60	3,84	3,97	0,00	0,04	0,47	0,83	1,38	1,62	1,75
PRG	283,75	5,95	6,83	7,26	7,62	8,17	8,41	8,54	1,35	2,23	2,67	3,02	3,57	3,81	3,94	0,00	0,02	0,45	0,81	1,36	1,60	1,73
PRG	283,875	5,95	6,82	7,26	7,61	8,16	8,40	8,53	1,10	1,97	2,41	2,76	3,31	3,55	3,68	0,00	0,00	0,31	0,67	1,22	1,46	1,59
PRG	284	5,94	6,81	7,25	7,61	8,15	8,39	8,52	1,21	2,08	2,52	2,87	3,42	3,66	3,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,28	0,41
PRG	284,125	5,92	6,79	7,23	7,59	8,13	8,37	8,50	0,90	1,77	2,21	2,57	3,11	3,35	3,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,57	0,70
PRG	284,25	5,91	6,78	7,22	7,57	8,11	8,35	8,48	1,59	2,46	2,90	3,25	3,80	4,03	4,16	0,17	1,04	1,48	1,83	2,37	2,61	2,74
PRG	284,375	5,89	6,76	7,20	7,56	8,09	8,33	8,46	0,65	1,52	1,96	2,31	2,85	3,09	3,22	0,00	0,42	0,85	1,21	1,75	1,99	2,11
PRG	284,5	5,88	6,74	7,18	7,54	8,08	8,31	8,44	0,22	1,08	1,52	1,88	2,41	2,65	2,78	0,03	0,89	1,33	1,69	2,22	2,46	2,59
PRG	284,625	5,86	6,73	7,17	7,52	8,06	8,29	8,42	0,52	1,38	1,82	2,18	2,71	2,95	3,08	0,00	0,86	1,30	1,65	2,19	2,42	2,55
PRG	284,75	5,85	6,71	7,15	7,51	8,04	8,28	8,40	1,55	2,42	2,86	3,21	3,75	3,98	4,11	0,42	1,29	1,73	2,08	2,62	2,85	2,98

Figure 2 : Extrait du tableur de calcul : Données hydrauliques

Les données sont issues de l'étude de calage réalisée en 2007. L'ensemble du delta a été modélisé (un modèle par bras du Rhône) et les coefficients du modèle ont été calés avec le retour d'expérience de la crue de 2003.

Pour les petites crues, de 7 500 et 8 500 m^3/s, les données sont issues de l'étude de calage réalisée en 2007 [K103] ; modélisation état initial. Pour ces dernières le modèle est un écoulement en régime permanent, ce qui surestime les niveaux par rapport à un hydrogramme de crue ; le calcul est donc sécuritaire.

Pour les crues supérieures ou égales à 9 500 m^3/s, les lignes d'eaux correspondent également à l'état initial de l'étude de calage mais avec insertion d'hydrogrammes de crue. Pour la mise à jour future de l'étude au moment du dépôt des dossiers d'autorisation relatifs aux opérations du Plan Rhône, les états suivant issus de la même étude seront utilisés :

- EP 16 (autorisation relative aux travaux du Petit Rhône),
- EP 19 (autorisation relative aux travaux de Salin de Giraud).

2.4 LES RETOUR D'EXPERIENCE

												informations	
Rive	PR	Type conception	Présence racines	Présence fissures	Type OHT	Sables fondation	Historique brèche	Grave suffusive	Matériaux A2	Type perré	Parement aval	type revêtement berge	Config. Stabilité
FRG	282,5	5	3	2	0	2	1	1	NON	1	3	1	A
FRG	282,625	5	3	2	0	2	1	1	NON	1	3	2	A
FRG	282,75	5	4	2	0	2	1	1	NON	1	3	2	A
FRG	282,875	5	4	2	0	2	1	1	NON	1	3	2	A
FRG	283	5	3	2	0	2	1	1	NON	1	3	2	A
FRG	283,125	10	3	3	0	2	1	2	NON	1	3	1	A
FRG	283,25	10	3	3	0	2	1	2	NON	1	3	1	A
FRG	283,375	10	3	3	0	2	1	2	NON	1	3	1	A
FRG	283,5	10	3	3	0	2	1	2	NON	1	3	2	A
FRG	283,625	10	3	3	0	3	1	4	NON	1	3	1	A
FRG	283,75	11	3	4	0	3	1	2	NON	1	3	2	A
FRG	283,875	11	3	4	0	2	1	2	NON	1	3	1	A
FRG	284	11	3	4	0	2	1	2	NON	1	3	1	A
FRG	284,125	11	3	4	6	2	1	2	NON	1	3	1	A
FRG	284,25	11	2	4	0	2	1	2	NON	1	3	1	A
FRG	284,375	11	2	4	0	2	2	2	NON	1	3	1	A
FRG	284,5	11	2	4	12	2	2	2	NON	1	3	1	A
FRG	284,625	11	2	4	0	2	2	2	NON	1	3	1	A

Figure 3 : Extrait du tableur de calcul : Caractéristiques de site et retours d'expérience

Les différents désordres rapportés dans les ouvrages historiques, lors des Visites de Surveillance Programmées des Gardes Digue, lors des Visites Techniques Approfondies ou à la suite d'une crue ont été rassemblées et cartographiées (Cf. Chapitre 10, cartes relatives au chapitre 6).
Ce sont ces cartes qui ont été utilisées pour renseigner l'historique de brèche, les zones, où ont été observés des terriers de fouisseurs ou des infiltrations et les zones où ont été créés des perrés au XIXème siècle.
La carrossabilité des digues en crête et en pied a été rapportée par les gardes digues qui utilisent au quotidien ces accès.

2.5 LES CARACTERISTIQUES DE SITE

2.5.1 Les racines

Les photos aériennes issues de la campagne Flimap ont été utilisées pour localiser les zones avec des arbres sur les parements et en pied.

2.5.2 Les fissures

Les cartes précitées de retour d'expérience ont été utilisées pour localiser les zones de d'infiltration et de terriers. Les DOE ont permis de savoir si des engraissements avaient été effectués.

2.5.3 Les ouvrages et réseaux traversants

L'ensemble des ouvrages hydrauliques traversants sont connus des services du Symadrem et ils ont fait l'objet d'un diagnostic approfondi en 2015.
Pour les réseaux situés sur des zones de travaux récents des vues en plan avec la localisation des réseaux, et les éventuels travaux de dévoiement réalisés, été disponibles. Pour les autres secteurs des DT ont été lancées et analysée ce qui a permis de localiser les réseaux.
Les données issues de ces trois sources ont été compilées et cartographiées (Cf. Chapitre 5 et Chapitre 10).

2.5.4 Le type de conception

La connaissance des travaux réalisés au cours des dernières années soit par la connaissance des agents soit par les DOE pour les travaux plus récents ont permis de donner quelques caractéristiques tels que :

- Présence d'un grillage anti-fouisseur
- Présence d'un masque amont en matériaux A2
- Présence d'un filtre
- Présence d'un système de drainage
- Nature parement aval et son engraissement éventuel
- Calculs de stabilité pour les structures maçonnées

2.5.5 Les données géotechniques

Différentes campagnes géotechniques ont été menées, en général avant des travaux importants. Les secteurs les mieux investigués sont donc la digue entre les papeteries et Grand Passons ainsi que différents linéaires en PRG.
Les données issues de ces campagnes ont été assemblées afin de tracer un profil en long. Cela a permis de repérer la profondeur et l'épaisseur des sables en fondation ainsi que les couches de graves dans la digue.
Pour les zones non investiguées des valeurs sécuritaires de 1 m de profondeur et 5 m d'épaisseur ont été retenues ; seule la partie aval du Petit Rhône est encore concernée (PRG 326-PRG337).

2.5.6 Revêtement de berge

Lorsque le ségonnal était faible, la nature de la berge a pu être renseignée suite aux inspections des berges réalisées en bateau lors de la période d'étiage d'été 2015.

2.6 COTE DE SURETE

Les calculs de probabilité de non détection des désordres et de non intervention dépendent de la présence d'agents sur les digues et donc du niveau d'alerte du PGOPC. A la mise en eau de la digue (alerte 2) la surveillance démarre ; à partir du moment où la cote de sureté est atteinte (alerte 4) la surveillance pédestre est arrêtée.
Le groupe d'alerte de l'ouvrage a été déterminé lors de la mise en place du PGOPC ; une cote sommaire de sureté des ouvrages a été établie au moment de l'élaboration du diagnostic initial en 2010. Dans le cadre de la présente étude, c'est cette cote qui a été dans un premiers temps retenue pour les calculs de probabilité. Ces cotes ont ensuite a été modifiées suite à la détermination des niveaux de protection, pour le calcul final 1 itération a suffi.

2.7 LES DONNEES INTERMEDIAIRES

2.7.1 Hauteurs d'eau et revanche

Les données géométriques de base, à savoir les coordonnées X,Y,Z des points formant le contour de la digue, ont permis de déterminer les pentes de talus. En compilant cela avec les données hydrauliques, la hauteur d'eau présente en pied amont, la hauteur d'eau par rapport à l'aval ou la revanche par rapport à la crête ont été déterminées.

2.7.2 Pente hydraulique

La pente hydraulique a été calculée à chaque fois qu'il y avait un changement de pente visuel sur le profil en long. Ainsi 10 pentes ont été calculées sur le Petit Rhône et 15 sur le Grand Rhône.

2.7.3 Gradients hydrauliques

Afin de calculer le gradient hydraulique au niveau des différentes irrégularités potentielles, les données géométriques ont été exploitées pour calculer la largeur de la digue et ainsi la longueur du chemin hydraulique ; les données hydrauliques ont ensuite permis de calculer les gradients.

2.8 LES CALCULS DE PROBABILITE

2.8.1 Les résultats recherchés

Les calculs ont été menés séparément pour les différents scenarii de brèche et pour chacune des crues étudiées.
Les résultats sont ensuite calculés en probabilité annuelle pour chaque scénario d'un côté et en probabilité de brèche pour une crue donnée d'un autre côté.
Enfin il a été procédé au calcul de la probabilité annuelle globale.

Figure 4 : Extrait du tableur de calcul : Probabilités de brèche par scénario pour une crue de 14 160m^3/s

		Probabilité de brèche par crue							
Rive	PR	7200	8500	9500	10500	11500	12500	14160	Probabilité annuelle de brèche
GRD	301,375	7,50E-06	7,50E-06	7,50E-06	7,50E-06	7,50E-06	7,51E-06	7,51E-06	3,75E-06
GRD	301,5	7,53E-06	7,53E-06	7,53E-06	7,54E-06	7,57E-06	8,06E-02	8,65E-02	6,60E-04
GRD	301,625	1,80E-04	1,80E-04	1,80E-04	3,85E-03	5,88E-02	7,31E-02	7,90E-02	1,21E-03
GRD	301,75	1,40E-05	1,40E-05	1,40E-05	1,40E-05	1,40E-05	3,43E-05	4,15E-05	7,16E-06
GRD	301,875	3,96E-03	3,96E-03	3,96E-03	3,96E-03	1,12E-02	3,11E-02	3,83E-02	2,27E-03
GRD	302	8,97E-05	8,98E-05	8,98E-05	8,98E-05	8,98E-05	9,08E-05	1,22E-04	4,49E-05
GRD	302,125	4,55E-04	4,55E-04	4,55E-04	4,55E-04	4,55E-04	8,18E-04	3,76E-03	2,36E-04
GRD	302,25	4,51E-04	4,51E-04	4,51E-04	4,51E-04	5,01E-04	4,36E-03	1,06E-02	2,70E-04
GRD	302,375	7,50E-06	7,52E-06	7,52E-06	7,52E-06	2,61E-02	8,69E-02	1,81E-01	1,09E-03
GRD	302,5	8,09E-04	8,09E-04	8,09E-04	8,09E-04	1,22E-03	4,58E-03	1,03E-02	4,49E-04
GRD	302,625	1,68E-05	1,68E-05	1,68E-05	1,68E-05	6,53E-05	1,23E-03	2,59E-03	2,12E-05
GRD	302,75	5,15E-05	5,15E-05	5,15E-05	5,15E-05	4,58E-04	1,19E-02	2,53E-02	1,51E-04
GRD	302,875	4,20E-05	4,20E-05	4,20E-05	7,42E-05	2,28E-03	5,13E-03	6,21E-03	8,23E-05
GRD	303	1,41E-03	1,41E-03	1,41E-03	1,45E-03	2,20E-03	2,28E-02	3,48E-02	9,09E-04
GRD	303,125	4,96E-04	4,96E-04	4,96E-04	4,96E-04	5,22E-04	1,27E-03	3,18E-03	2,58E-04
GRD	303,25	8,71E-05	8,71E-05	8,71E-05	8,72E-05	2,30E-04	9,51E-04	3,21E-03	5,61E-05

Figure 5 : Extrait du tableur de calcul : Probabilités de brèche par scenarii de crues et probabilité annuelle de brèche (tous scenarii considérés)

2.8.2 *Probabilité de brèche avant prise en compte du dispositif de surveillance et d'intervention (PGOPC)*

		7200					
Rive	PR	P localisation	P claquage	P initiation	P non filtration	P progression	P rupture mécanique
		fonction du type de conception; tableau 1	exp(-exp((P-1,121)/0,102)) ou valeur du tableau 9 Bornée à 0,001 (sauf si pas d'eau à l'amont)	A2 -> EXP(-EXP(-(1/2,78*alpha*rho eau*g*-63,3)/22,5)) Autre -> (1/240^6*alpha*rho eau*g^6)^0,6 Borné à 10-8	Fonction du filtre; tableau 8	EXP(-EXP(1,6,14-15,36*revanche/hauteur talus aval)) Borné à 0,1	∏ Proba mécanique
GRD	317	1,00E-01	0,00E+00	4,64E-01	1,00E+00	1,00E-01	0,00E+00
GRD	317,125	1,00E-01	9,88E-01	5,09E-01	1,00E+00	1,00E-01	5,03E-03
GRD	317,25	1,00E-01	0,00E+00	5,75E-01	1,00E+00	1,46E-01	0,00E+00
GRD	317,375	1,00E-01	0,00E+00	6,35E-01	1,00E+00	4,64E-01	0,00E+00
GRD	317,5	1,00E-01	9,88E-01	5,11E-01	1,00E+00	1,00E-01	5,11E-03
GRD	317,625	1,00E-01	1,00E+00	7,50E-01	1,00E+00	7,81E-01	5,86E-02
GRD	317,75	1,00E-01	9,93E-01	6,13E-01	1,00E+00	1,00E-01	6,08E-03
GRD	317,875	1,00E-01	9,99E-01	8,81E-01	1,00E+00	3,56E-01	3,79E-02
GRD	318	1,00E-01	0,00E+00	0,00E+00	1,00E+00	1,00E-01	0,00E+00
GRD	318,125	1,00E-01	9,74E-01	5,82E-01	1,00E+00	8,06E-01	4,57E-02
GRD	318,25	1,00E-01	9,99E-01	5,99E-01	1,00E+00	2,42E-01	1,45E-02
GRD	318,375	1,00E-01	9,93E-01	5,10E-01	1,00E+00	1,55E-01	7,73E-03
GRD	318,5	1,00E-01	9,98E-01	5,67E-01	1,00E+00	2,39E-01	1,35E-02
GRD	318,625	1,00E-01	4,23E-03	4,37E-01	1,00E+00	1,00E-01	1,85E-05
GRD	318,75	1,00E-01	0,00E+00	0,00E+00	1,00E+00	1,00E-01	0,00E+00

Figure 6 : Extrait du tableur de calcul : Calcul probabilités de rupture mécaniques vis-à-vis de l'érosion d'un terrier lors d'une crue de 7 500m3/s

Les calculs de probabilité menés sont ceux décrits dans le chapitre n°7.1.
On retrouve donc les probabilités de localisation, claquage, initiation, non filtration et progression qui mènent à la probabilité de brèche sans prise en compte du dispositif de surveillance et d'intervention.
Le linéaire considéré n'est pas uniquement constitué de digues en terres, des ouvrages maçonnés font partis du système d'endiguement. Pour ces derniers des probabilités de perte de stabilité de l'ouvrage et/ou du parapet ont été considérées.

La capacité d'intervention du Symadrem en cas de début de désordre permet de faire baisser la probabilité de brèche. Ainsi la probabilité de rupture présentée par scénario et par crue prend en compte les probabilités de non détection et de non intervention.

Rive	PR	P rupture mécanique	Temps de rupture	P non detection	P non intervention	Prob rupture
		∏ Proba mécaniques	A2 -> 0,86/i Autre -> 0,06/i	1-T rupture/Pas de surveillance (fonction du groupe d'alerte)	Carrossable: 3/T rupture Non Carrossable: 24/T rupture	Proba mécaniques* (P non detection + P detection * P non intervention)
PRG	281,25	7,18E-04	4,69E-01	8,44E-01	1,00E+00	7,18E-04
PRG	281,375	7,84E-04	4,24E-01	8,59E-01	1,00E+00	7,84E-04
PRG	281,5	4,18E-03	3,72E-01	8,76E-01	1,00E+00	4,18E-03
PRG	281,625	4,37E-03	3,62E-01	8,79E-01	1,00E+00	4,37E-03
PRG	281,75	3,97E-03	4,04E-01	8,65E-01	1,00E+00	3,97E-03
PRG	281,875	4,32E-03	3,65E-01	8,78E-01	1,00E+00	4,32E-03
PRG	282	4,42E-03	3,50E-01	8,83E-01	1,00E+00	4,42E-03
PRG	282,125	4,28E-03	3,64E-01	8,79E-01	1,00E+00	4,28E-03
PRG	282,25	0,00E+00	#DIV/0!	1,00E+00	1,00E+00	0,00E+00

Figure 7 : Extrait du tableur de calcul : Calcul probabilités de rupture vis-à-vis de l'érosion d'un terrier lors d'une crue de 10 500 m^3/s

2.8.3 Interprétation

Une fois les calculs réalisés, les probabilités conditionnelles sont appréciées selon la qualification verbale de Vick :

Tableau 13. Qualification verbale et probabilité conditionnelle associée retenues dans l'étude de dangers

Qualification verbale de l'événement	Probabilité conditionnelle maximale pour un événement donné
Quasiment impossible	0.001
Très peu probable	0.01
Peu probable	0.1
Neutre	0.5
Probable	0.9
Très probable	0.99
Quasiment certain	1

Pour les probabilités annuelles, la grille de lecture, basée sur le guide de lecture des études de danger des barrages, est la suivante :

Tableau 14. Probabilité annuelle de brèche, probabilité de brèche sur la durée de vie des ouvrages et qualification verbale

Appréciation de la fiabilité de la barrière ou de l'occurrence d'un événement	Probabilité annuelle	Classe
Evénement possible mais extrêmement peu probable	$P < 10^{-5}$	E
Evénement très improbable	$P < 10^{-4}$	D
Evénement improbable	$P < 1/1000$	C
Evénement probable	$P < 1/100$	B
Evénement courant	$1/100 \leq P$	A

2.8.4 Prise en compte des scenarii

Vis-à-vis du type d'ouvrage rencontré, tous les scenarii ne sont pas toujours exploités ; les tableaux ci-après indiquent les scenarii pris en compte pour chacun des tronçons.

Tableau 15. Scénarios retenus par tronçon homogène le long du Grand Rhône Rive Droite (GRD)

	Défluent	Quais	Papeteries	Emmaus	Passeron-Monlong	Monlong	Montlong-Beaujeu	Beaujeu-l'Armelière	L'Armelière-la Commanderie	La Commanderie-Bois Verdun	Bois Verdun-Chartrouse	Chartrouse-La Louisiane	La Louisiane-L'Esquineau	L'Esquineau-Palissade
1 Terrier	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2 OHT	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3 Racine	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4 Fissure	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
5 Régressive	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
6 Contact	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7 Suffusion	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
8 Surverse	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
9 Affouillement	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
10 Glissement Aval	X		X	X	X	x	X	X	X	X	X	X	X	X
11 Glissement Amont	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
12 Stabilité		X			X	X								
13 Stabilité muret		X												

Tableau 16. Scénarios retenus par tronçon homogène le long du Petit Rhône Rive Gauche (PRG)

	Trinquetaille	Cazeneuve-Augéry	Beaumont	Beaumont-Cavalès	Cavalès - St Gilles	St-Gilles - Figarès	Emplacement deversoir (Figarès)	La Galante - Albaron	Albaron	Albaron-Eymini	Eymini-Sénebier	Sénebier	Sénebier-Icard	Mas d'Icard - Bac	Aval Bac du Sauvage	Port Dromar	Port l'Amarée	L'Amarée	Embouchure
1 Terrier	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2 OHT	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3 Racine	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4 Fissure	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
5 Régressive	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
6 Contact	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7 Suffusion	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
8 Surverse	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
9 Affouillement	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
10 Glissement Av	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
11 Glissement Am	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
12 Stabilité									x										
13 Stabilité muret																			

3 RESULTATS

3.1 ANALYSE ET RESUME

Les résultats ont permis de déterminer les crues de sureté (probabilité de brèche inférieure ou égale à 5%) et de danger (probabilité de brèche inférieure ou égale à 50%) pour chaque secteur de 125 m, ces derniers sont représentés sur les pages suivantes. Sur ces graphiques ont également été insérés le niveau de submersion (atteinte du niveau de la crête) et le niveau de sureté sommaire estimé lors du diagnostic initial de 2010. Les calculs ayants été menés par palier de crue ; un point à 10 500 m^3/s signifie que la condition (probabilité faible ou non-submersion) était remplie pour 10 500 m^3/s mais pas pour 11 500 m^3/s ; un point à 7 000 m^3/s signifie que la condition n'était pas remplie pour 7 500 m^3/s (1^{er} palier).
Pour les ouvrages anciens, la crue de danger a été ramenée à 11 500 m^3/s si le calcul donnait un résultat supérieur, du fait de la sensibilité des modèles de calculs ; pour les ouvrages dimensionnés pour résister à une crue millénale, cette modification n'a pas été faite.

Les tronçons **D 1** a pour crue de sureté, la crue de **14 160 m^3/s**.
La crue de danger, compte tenu du plafonnement des lignes d'eau lié à l'écrêtement des crues entre Beaucaire-Arles (déversement sur de grands linéaires) est sensiblement supérieur et présentent une occurrence très faible (Probabilité annuelle d'occurrence ≅ $1/10\,000^{ème}$).

Les tronçons **GRD 1 à GRD 5** ont pour crue de sureté, la crue de **14 160 m^3/s**.
Pour les mêmes raisons que celles invoquées ci-dessus, la crue de danger est sensiblement supérieur à la crue exceptionnelle et présentent une occurrence très faible.

Pour le tronçon **GRD 6**, la crue de sureté est entre **8 500 m^3/s** et 10 500 m^3/s.
La crue de danger est supérieure à 11 500 m^3/s sur la quasi intégralité du tronçon mais il y a 2 résultats inférieurs, à **10 500 m^3/s**.

Sur le tronçon **GRD 7** la crue de sureté est de **10 500 m^3/s**.
Pour la crue de danger, seul le PR 297.5 n'affiche pas 14 160 m^3/s mais 12 500 m^3/s ; la forte sensibilité du modèle nous amène à retenir une crue de danger de **11 500 m^3/s** pour ce tronçon.

Le tronçon **GRD 8** à une crue de sureté de **10 500 m^3/s**.
La crue de danger calculée est de 14 160 m^3/s sur l'intégralité du tronçon ; néanmoins étant donnée la forte sensibilité du modèle, nous retenons une crue de danger à **11 500 m^3/s** pour ce tronçon.

Le tronçon **GRD 9** à une crue de sureté de **9 500 m^3/s**.
Pour la crue de danger, elle est de 14 160 m^3/s sur la majeure partie du tronçon et de 12 500 m^3/s localement ; comme pour les tronçons précédents nous retenons une crue de danger de **11 500 m^3/s**.

Sur le tronçon **GRD 10**, la crue de sureté est égale à **9 500 m^3/s**.
La crue de danger est supérieure ou égale à **11 500 m^3/s** sur l'ensemble du tronçon.

Pour le tronçon **GRD 11**, l'ensemble des secteurs donnent une crue de sureté de **9 500 m^3/s**.
La crue de danger est supérieure ou égale à **11 500 m^3/s** sur l'ensemble du tronçon.

Sur le tronçon **GRD 12**, le niveau de sureté varie fortement d'un secteur à l'autre, entre **7 500 m^3/s** et 14 160 m^3/s.

La crue de danger, pour la rupture, est supérieure ou égale à 10 500 m^3/s sur l'ensemble du tronçon ; en revanche il peut y avoir des surverses qui apparaissent localement entre 9 500 m^3/s et 10 500 m^3/s, le niveau de danger retenu est alors de **9 500 m^3/s**.

Sur le tronçon **GRD 13**, le niveau de sureté varie entre **8 500 m^3/s** et 11 500 m^3/s.
La crue de danger est de 14 160 m^3/s sur l'ensemble du tronçon ; néanmoins étant donnée la forte sensibilité du modèle, nous retenons une crue de danger à **11 500 m^3/s** pour ce tronçon.

Le tableau en page suivante synthétise les résultats pour chaque tronçon homogène en rive droite du Grand Rhône.

Tableau 17. GRD - crues de sûreté (scénario 1 chapitre 8) et de danger (scénario 3 chapitre 8)

N°	Libellé	Linéaire (m)	PR Digue		Crue			Analyse sensibilité	
			GRD début	GRD fin	Sûreté[(1)] (m^3/s)	Danger[(2)] (m^3/s)	Alerte 4[(3)] (m^3/s)	Sureté 10%[(4)] (m3/s)	Danger 25%[(5)] (m3/s)
D1	Défluent	1 136	281.1	281.8	14 160	>> 14 160	14 160	14 160	14 160
GRD1	Quais	1 716	281.8	283.5	14 160	>> 14 160	14 160	14 160	14 160
GRD2	Papeteries Etienne	790	283.5	284.15	14 160	>> 14 160	14 160	14 160	14 160
GRD3	Emmaus	1 441	284.15	285.25	14 160	>> 14 160	14 160	14 160	14 160
GRD4	Passeron-Monlong	3 240	285.25	288	14 160	>> 14 160	14 160	14 160	14 160
GRD5	Monlong	1 037	288	288.9	14 160	>> 14 160	14 160	14 160	14 160
GRD6	Montlong-Beaujeu	6 311	288.9	295.15	8 500	10 500	9 500	8 500	9 500
GRD7	Beaujeu-l'Armelière	3 142	295.15	298.2	10 500	~~12 500~~ 11 500	10 500	10 500	10 500
GRD8	L'Armelière-la Commanderie	7 561	298.2	305.5	10 500	~~14 160~~ 11 500	11 500	10 500	11 500
GRD9	La Commanderie-Bois Verdun	4 042	305.5	309.25	9 500	~~12 500~~ 11 500	10 500	9 500	10 500
GRD10	Bois Verdun-Chartrouse	1 897	309.25	311.8	9 500	11 500	9 500	9 500	9 500
GRD11	Chartrouse-La Louisiane	1 247	311.8	313.1	9 500	11 500	9 500	9 500	9 500
GRD12	La Louisiane-L'Esquineau	7 957	313.1	319.4	7 500	~~10 500~~ 9 500	9 500	7 500	7 500
GRD13	L'Esquineau-Palissade	4 368	319.4	323.3	7 500	~~14160~~ 11 500	9 500	9 500	11 500

[(1)]*Probabilité conditionnelle maximale de brèche de 5 %*
[(2)]*Probabilité conditionnelle maximale de brèche de 50 %*
[(3)] *Probabilité conditionnelle moyenne de brèche de 5 %*
[(4)] *Probabilité conditionnelle maximale de brèche de 10 %*
[(5)]*Probabilité conditionnelle maximale de brèche de 25 %*

Le tronçon **PRG 1** a comme crue de sureté la crue de 10 500 m^3/s sur la majeur partie du secteur, mais atteint localement **9 500 m^3/s** ; c'est la probabilité de brèche par glissement du talus aval qui présente un risque majeur, la digue étant très raide (fruit<1.7) mais très large dans cette zone (>10 m en crête) c'est pour une crue longue que la digue pourrait se mettre en charge et présenter un risque ; la crue de 9 500 m3/s est néanmoins retenue comme crue de sureté du fait des forts enjeux présents à l'aval.
De même, la crue de danger retenue est de **10 500 m^3/s**.

Sur le tronçon **PRG 2,** la majeure partie des secteurs a pour crue de sureté **7 500 m^3/s**, les valeurs sont très variables : jusqu'à 12 500 m^3/s.
Pour la crue de danger, il est retenu un débit de **9 500 m^3/s**.

Le tronçon **PRG 3** a pour crue de sureté la crue de **14 160 m^3/s**.
La crue de danger, compte tenu du plafonnement des lignes d'eau lié à l'écrêtement des crues entre Beaucaire-Arles (déversement sur de grands linéaires) est sensiblement supérieur et présentent une occurrence très faible (Probabilité annuelle d'occurrence ≅ 1/10 000ème).

Sur les tronçons **PRG 4 à PRG 8** la majeure partie des secteurs ont pour crue de sureté **7 500m^3/s**, les valeurs sont très variables : jusqu'à 14 160 m^3/s.
La crue de danger retenue est celle de **8 500 m^3/s** pour ces tronçons.

Le tronçon **PRG 9** a pour crue de sureté la crue de **14 160 m^3/s**.
Pour les mêmes raisons que celles invoquées pour PRG 3, la crue de danger est sensiblement supérieure à la crue exceptionnelle et présentent une occurrence très faible.

Sur le tronçon **PRG 10**, la majeure partie des secteurs a pour crue de sureté **7 500 m^3/s**, les valeurs sont très variables : jusqu'à 14 160 m^3/s.
Le niveau de danger est fixé à **9 500 m^3/s**.

Sur le tronçon **PRG 11**, la majeure partie des secteurs a pour crue de sureté **7 500 m^3/s**, les valeurs sont très variables : jusqu'à 14 160 m^3/s.
Le niveau de danger est fixé à **11 500 m^3/s**.

Le tronçon **PRG 12** a pour crue de sureté la crue de **14 160 m^3/s**.
Pour les mêmes raisons que celles invoquées ci-dessus, la crue de danger est sensiblement supérieure à la crue exceptionnelle et présentent une occurrence très faible.

Sur le tronçon **PRG 13,** les valeurs sont très variables : la crue de sureté vaut parfois 14 160 m^3/s et peut être de **7 500 m^3/s**.
La crue de danger calculée est de 14 160 m^3/s sur l'ensemble du tronçon ; étant donnée la sensibilité du modèle, il est retenu une crue de danger de **11 500 m^3/s.**

Sur le tronçon **PRG 14,** la crue de sureté calculée est supérieure à 14 160 m^3/s sur une grande partie du secteur mais localement de **7 500 m^3/s**.
La crue de danger calculée est de 14 160 m^3/s sur l'ensemble du tronçon ; étant donnée la sensibilité du modèle, il est retenu une crue de danger de **11 500 m^3/s**.

Les tronçons **PRG 15 à PRG 19**, les plus à l'aval, sont sortis du système d'endiguement et considérés comme des remblais en lit mineur. En effet les ouvrages sont inaccessibles au personnel

du SYMADREM, non connu des agents et présentent des points bas nombreux : ils n'ont plus de rôle à leur mise en charge.
Le niveau de sureté a néanmoins été calculé et est élevé (supérieur à 10 500 m^3/s) mais les résultats montrent des probabilités de brèches importantes à partir de la mise en eau ; or les niveaux dans cette zone sont fortement impactés par le niveau marin et pourraient être élevés même pour un faible débit de crue ; ce qui nous amène à abaisser le niveau de sureté à **8 500 m^3/s**.
De la même façon, la crue de danger est fixée à **12 500 m^3/s**.
Sur l'extrait de profil en long ci-dessous il apparait que les niveaux convergent jusqu'au PK 325 environ, ils sont alors contrôlés principalement par les débits en amont, et divergent à l'aval du PK330 environ ; étant alors principalement contrôlés par la condition marine aval :

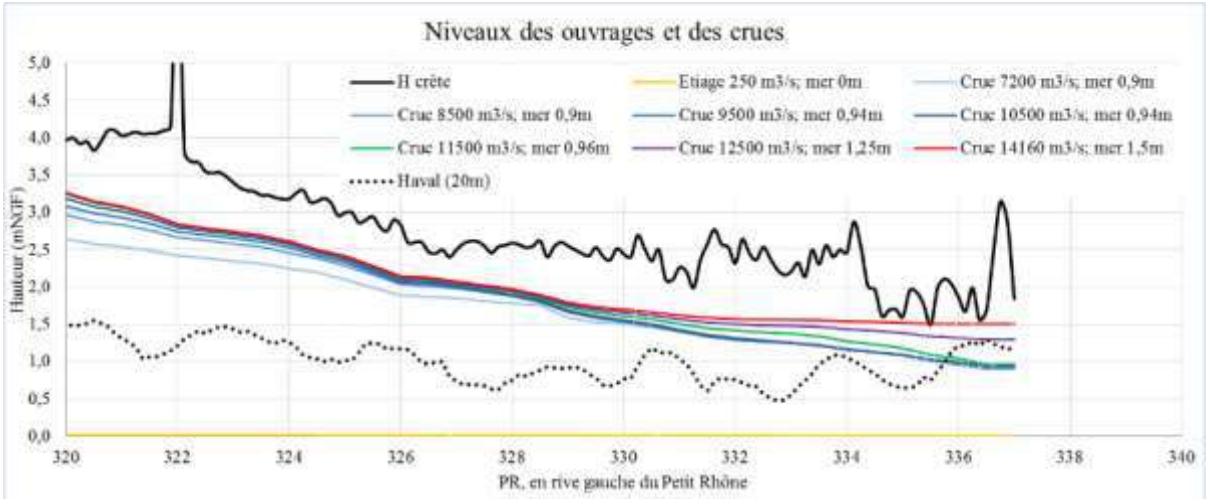


Figure 8 : Profil en long des crues ; zoom sur la partie aval

Le tableau ci-après synthétise les résultats pour chaque tronçon homogène

Tableau 18. PRG - crues de sûreté (scénario 1 chapitre 8) et de danger (scénario 3 chapitre 8)

N°	Libellé	Linéaire (m)	PR Digue		Crue			Analyse sensibilité	
			PRG début	PRG Fin	Sûreté[(1)] (m^3/s)	Danger[(2)] (m^3/s)	Alerte 4[(3)] (m^3/s)	Sureté 10%[(4)] (m3/s)	Danger 25%[(5)] (m3/s)
PRG 1	Trinquetaille	1 576	281.1	282.5	9 500	10 500	9 500	9 500	9 500
PRG 2	Cazeneuve-Augéry	5 268	282.5	287.4	7 500	9 500	7 500	7 500	7 500
PRG 3	Beaumont –A54	724	287.4	288.5	14 160	14 160	14 160	14 160	14 160
PRG 4	A54 - Cavalès	6 601	288.5	294.5	7 500	8 500	7 500	7 500	7 500
PRG 5	Cavalès - St Gilles	2 858	294.5	297.2	7 500	8 500	7 500	7 500	7 500
PRG 6	St-Gilles - Figarès	923	297.2	298.2	7 500	8 500	7 500	7 500	7 500
PRG 7	future digue résistante à la surverse (Figarès)	1 760	298.2	299.8	7 500	8 500	7 500	7 500	7 500
PRG 8	La Galante - Albaron	6 698	299.8	306.55	7 500	8 500	7 500	7 500	7 500
PRG 9	Albaron	1 181	306.55	307.7	14 160	14 160	14 160	14 160	14 160
PRG 10	Albaron-Eymini	5 546	307.7	313	7 500	9 500	7 500	7 500	7 500
PRG 11	Eymini-Sénebier	7 808	313	320.75	7 500	11 500	7 500	7 500	7 500
PRG 12	Sénebier	1 057	320.75	322	14 160	14 160	14 160	14 160	14 160
PRG 13	Sénebier-Icard	6 872	322	329.5	7 500	~~*14 160*~~ *11 500*	7 500	7 500	7 500
PRG 14	Mas d'Icard - Bac	1 606	329.5	330.5	7 500	~~*14 160*~~ *11 500*	11 500	7 500	11 500
PRG 15	Aval Bac du Sauvage	1 158	330.5	332.1	~~*11 500*~~ *8 500*	~~*14 160*~~ *12 500*		~~*12 500*~~ *10 500*	~~*14 160*~~ *11 500*
PRG 16	Port Dromar	1 227	332.1	334.55	~~*10 500*~~ *8 500*	~~*14 160*~~ *12 500*		~~*11 500*~~ *10 500*	~~*14 160*~~ *11 500*
PRG 17	Port l'Amarée	1 358	334.55	336	~~*10 500*~~ *8 500*	*12 500*		*10 500*	*11 500*
PRG 18	L'Amarée	504	336	336.5	~~*11 500*~~ *8 500*	*12 500*		~~*11 500*~~ *10 500*	*11 500*
PRG 19	Embouchure	491	336.5	337	~~*12 500*~~ *8 500*	~~*14 160*~~ *12 500*		~~*14 160*~~ *10 500*	~~*14 160*~~ *11 500*

[(1)]*Probabilité conditionnelle maximale de brèche de 5 %*
[(2)]*Probabilité conditionnelle maximale de brèche de 50 %*
[(3)] *Probabilité conditionnelle moyenne de brèche de 5 %*
[(4)] *Probabilité conditionnelle maximale de brèche de 10 %*
[(5)]*Probabilité conditionnelle maximale de brèche de 25 %*

Les graphiques ci-après représentent les crues de sûreté et de danger calculées le long des deux rives puis les probabilités annuelles et conditionnelles de brèche, également le long des deux rives.

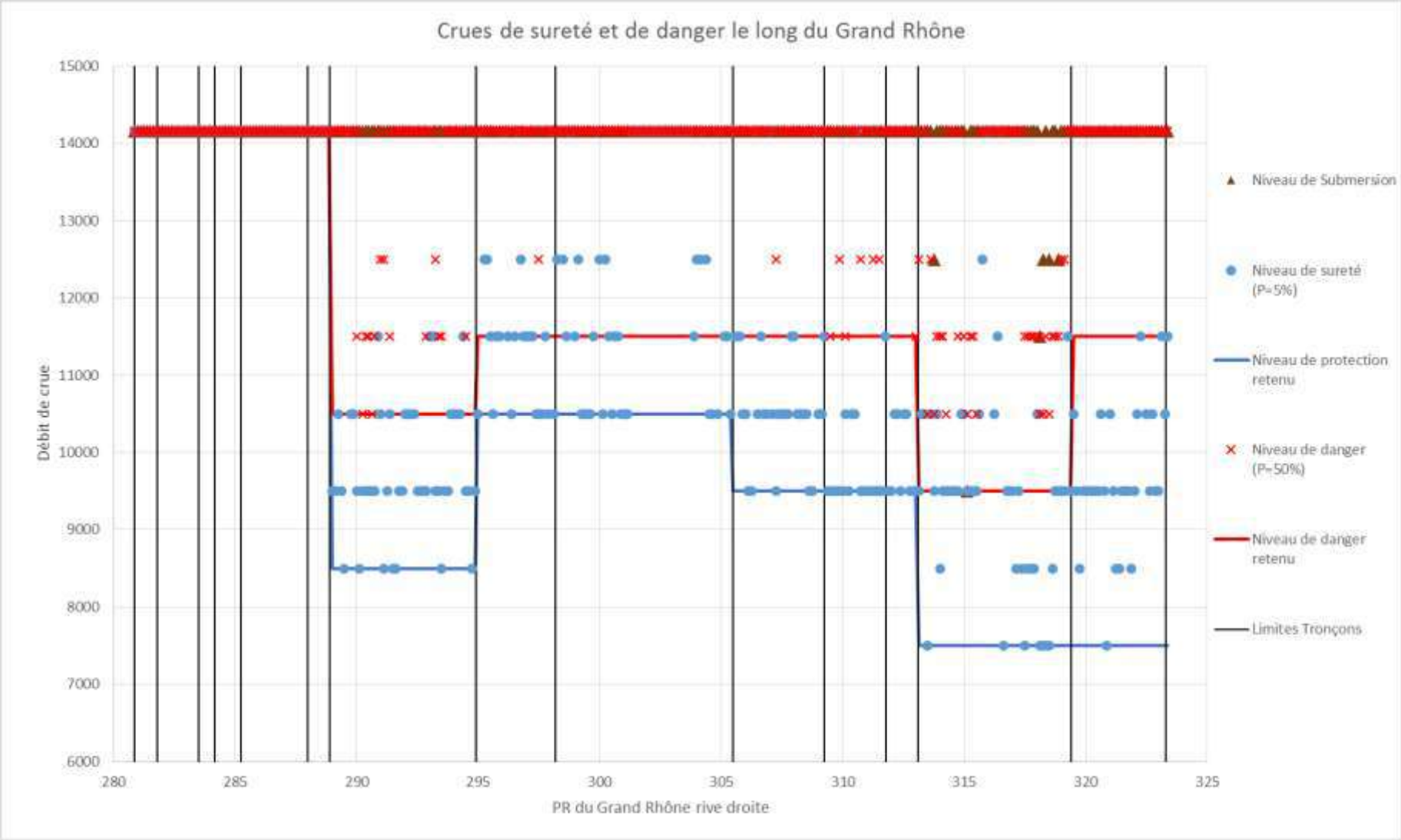


Figure 9 : Calcul des crues de sûreté et de danger le long du Grand Rhône en rive droite

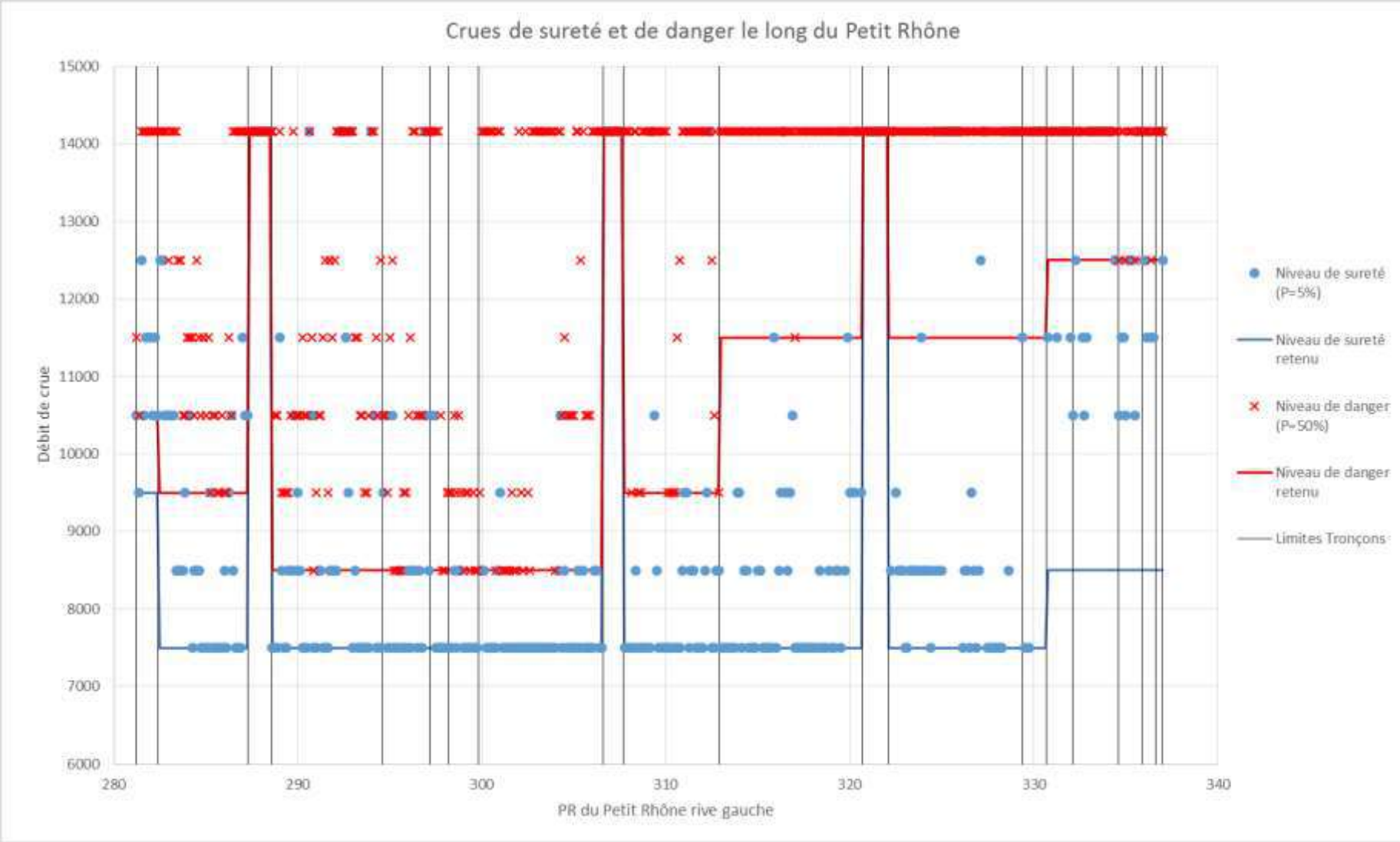


Figure 10 : Calcul des crues de sûreté et de danger le long du Petit Rhône en rive gauche

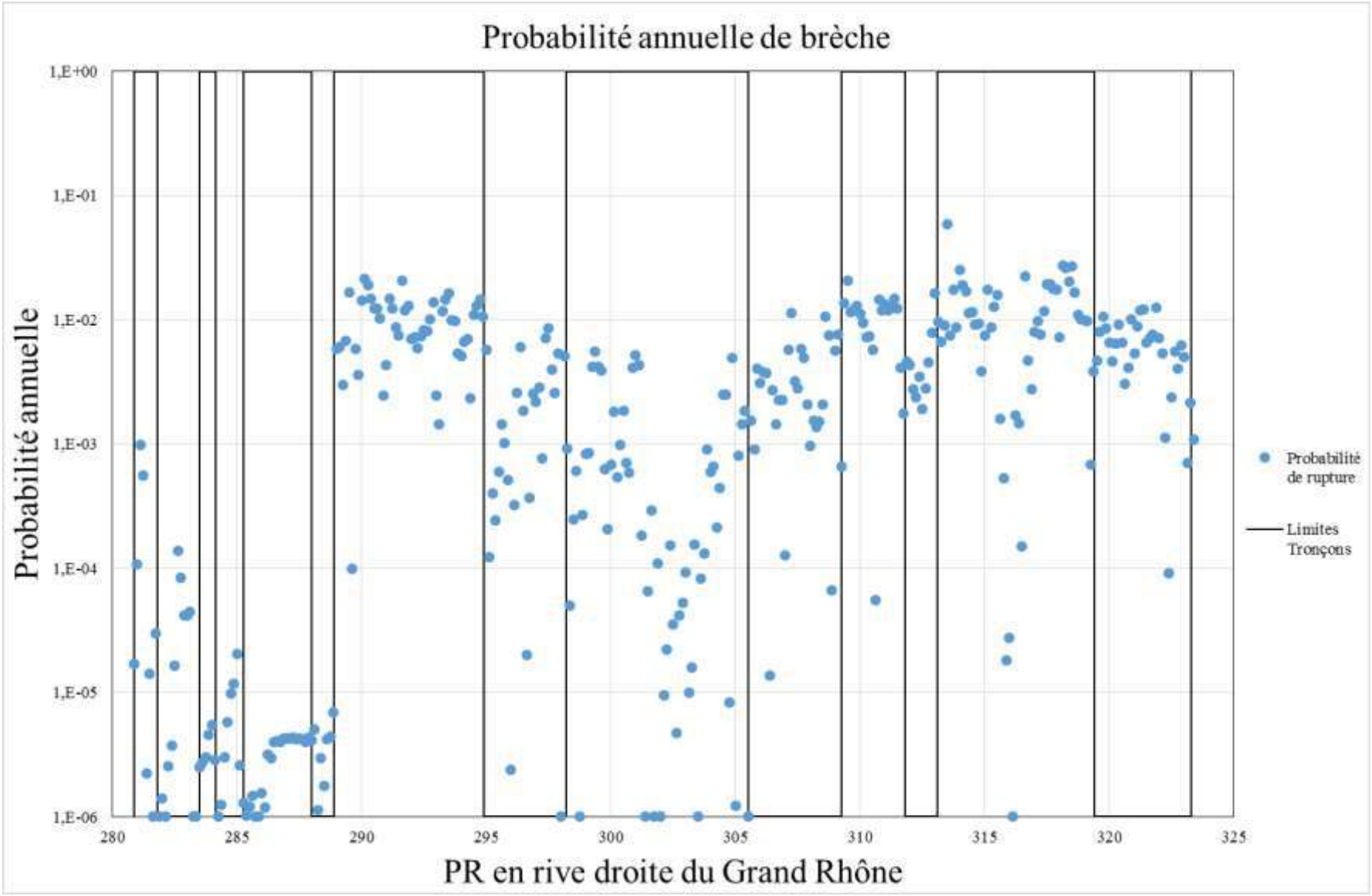


Figure 11 : Calcul des probabilités annuelles de brèche le long du Grand Rhône en rive droite

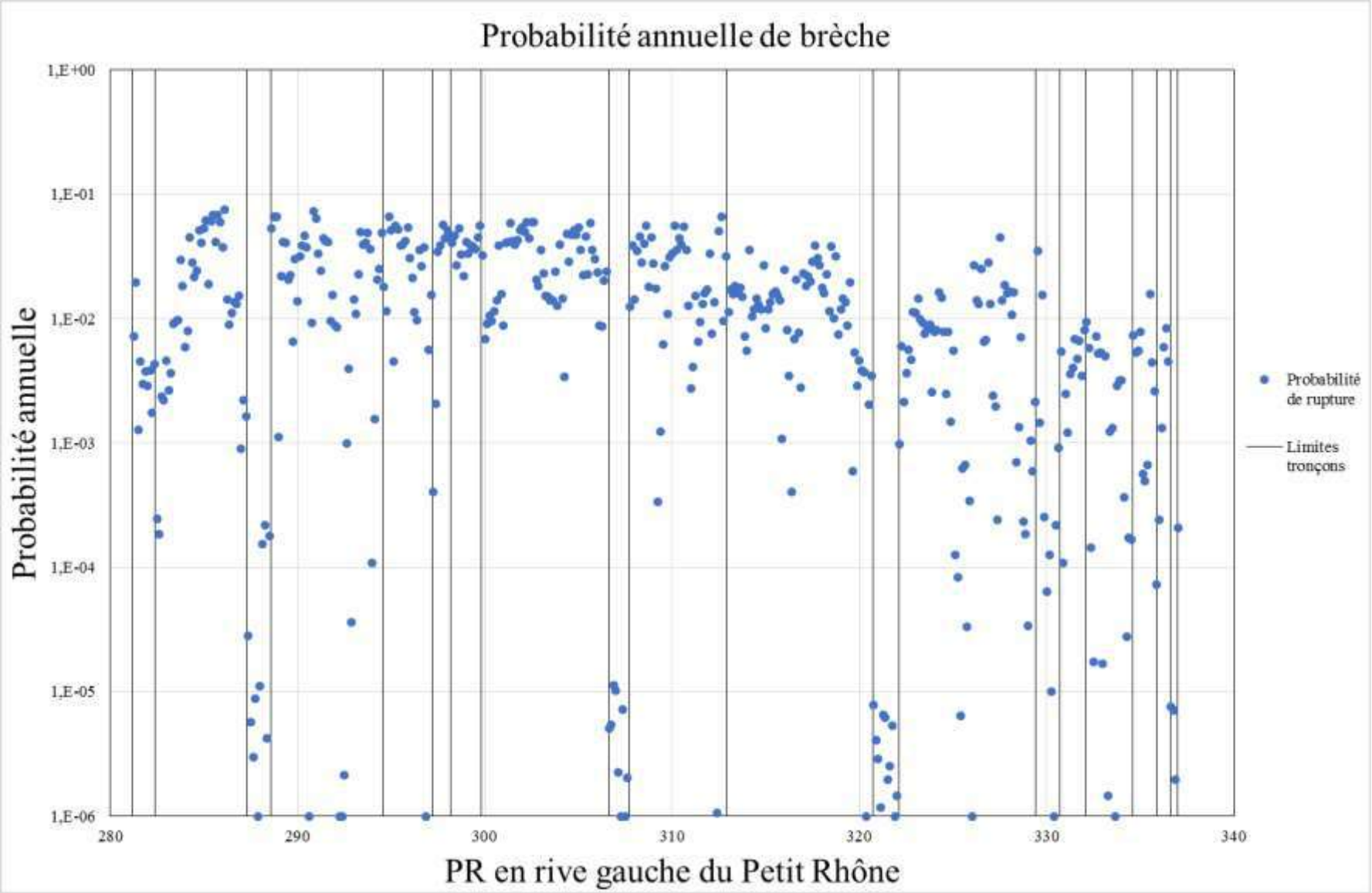


Figure 12 : Calcul des probabilités annuelles de brèche le long du Petit Rhône en rive gauche

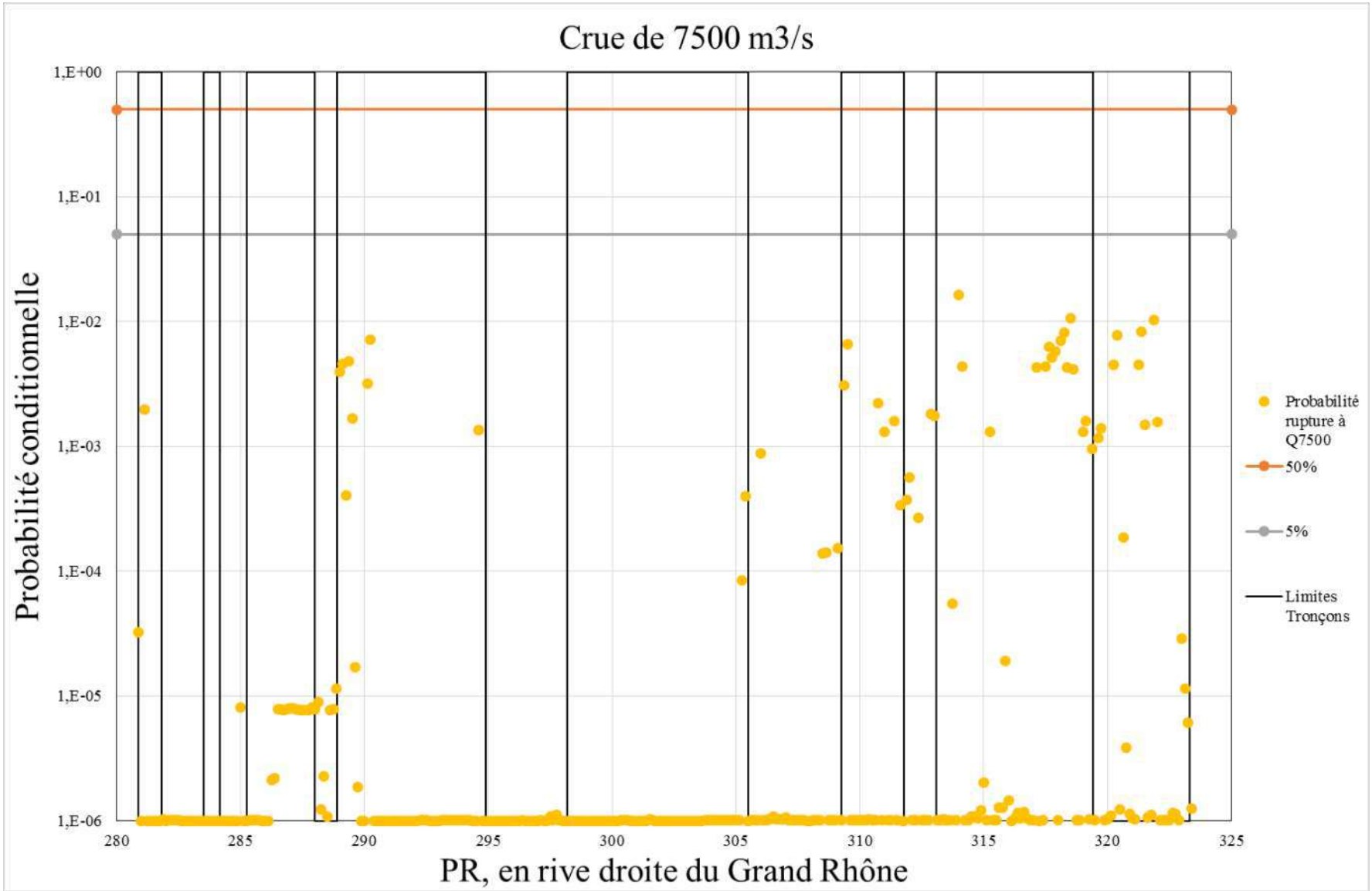


Figure 13 : Calcul des probabilités conditionnelles de brèche pour une crue de 7 500 m^3/s le long du Grand Rhône en rive droite

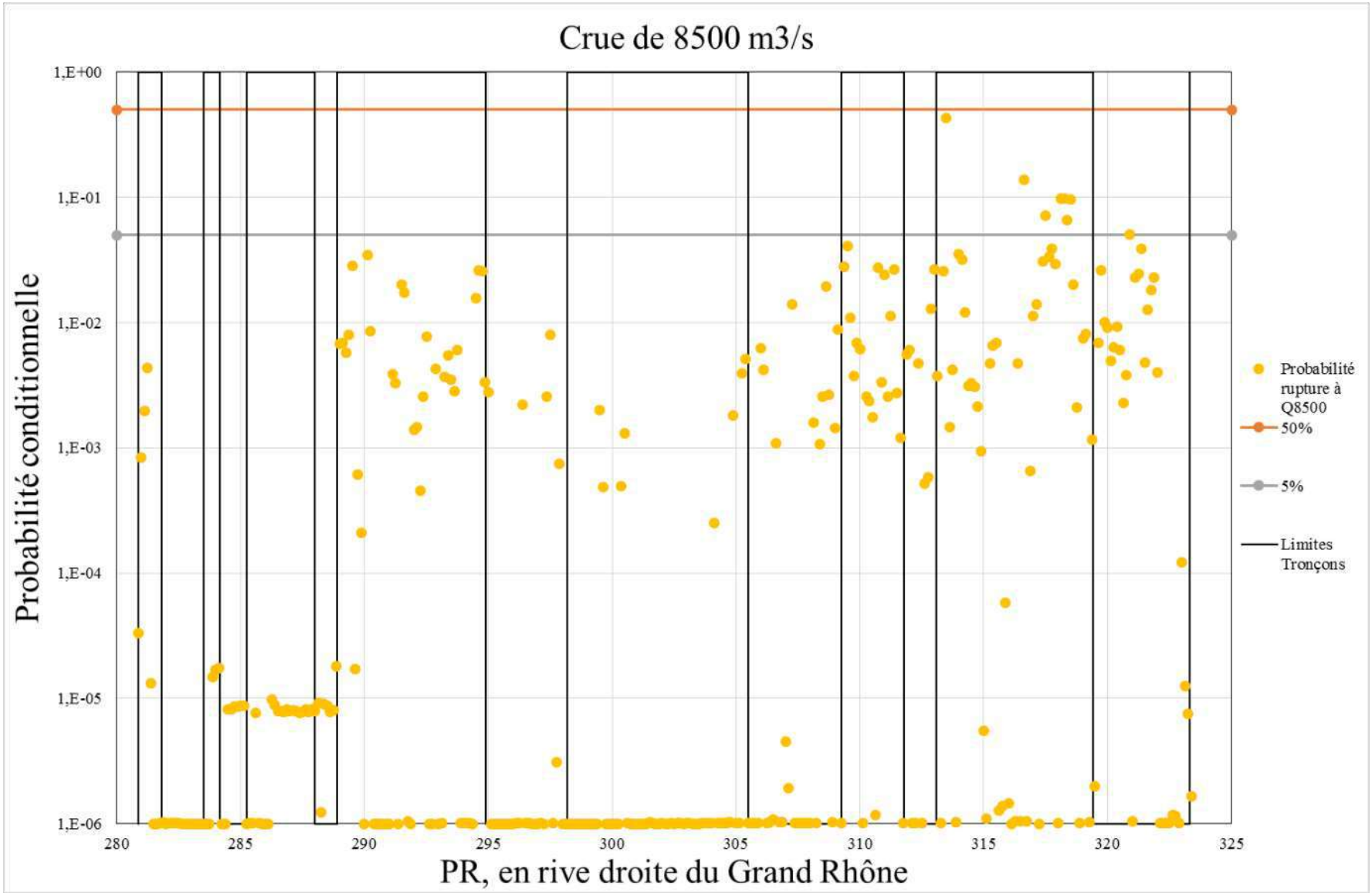


Figure 14 : Calcul des probabilités conditionnelles de brèche pour une crue de 8 500 m^3/s le long du Grand Rhône en rive droite

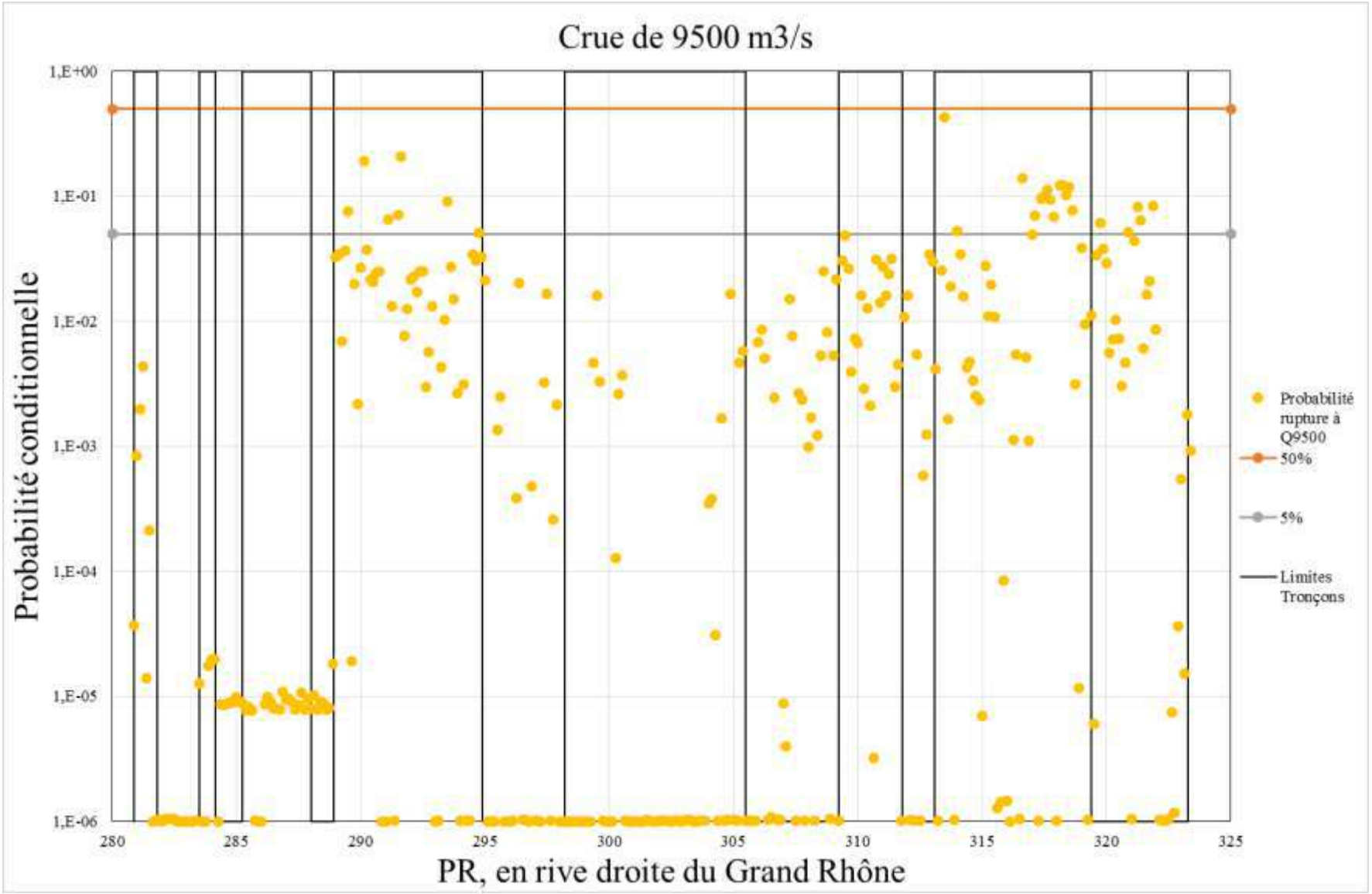


Figure 15 : Calcul des probabilités conditionnelles de brèche pour une crue de 9 500 m^3/s le long du Grand Rhône en rive droite

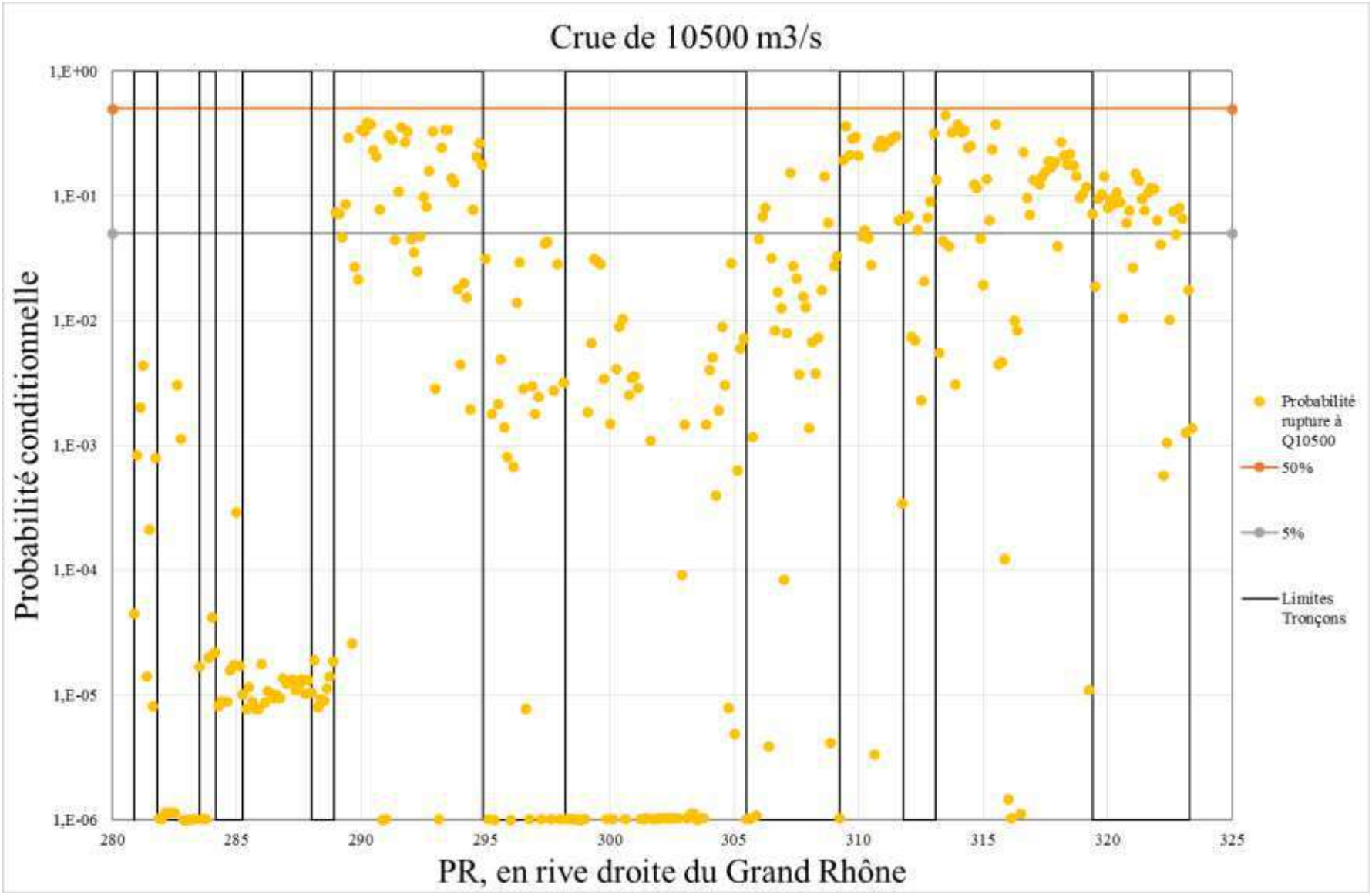


Figure 16 : Calcul des probabilités conditionnelles de brèche pour une crue de 10 500 m^3/s le long du Grand Rhône en rive droite

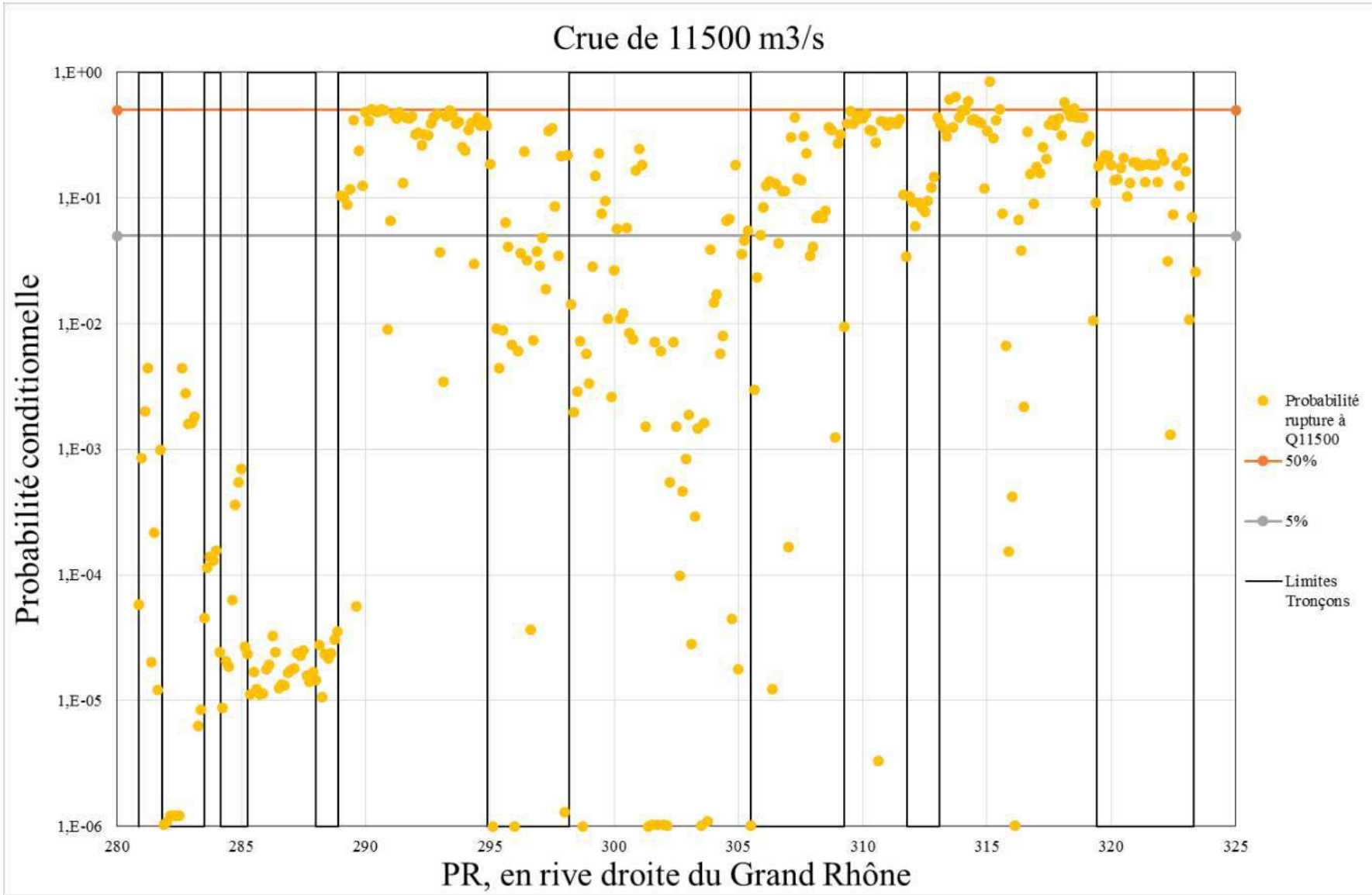


Figure 17 : Calcul des probabilités conditionnelles de brèche pour une crue de 11 500 m^3/s le long du Grand Rhône en rive droite

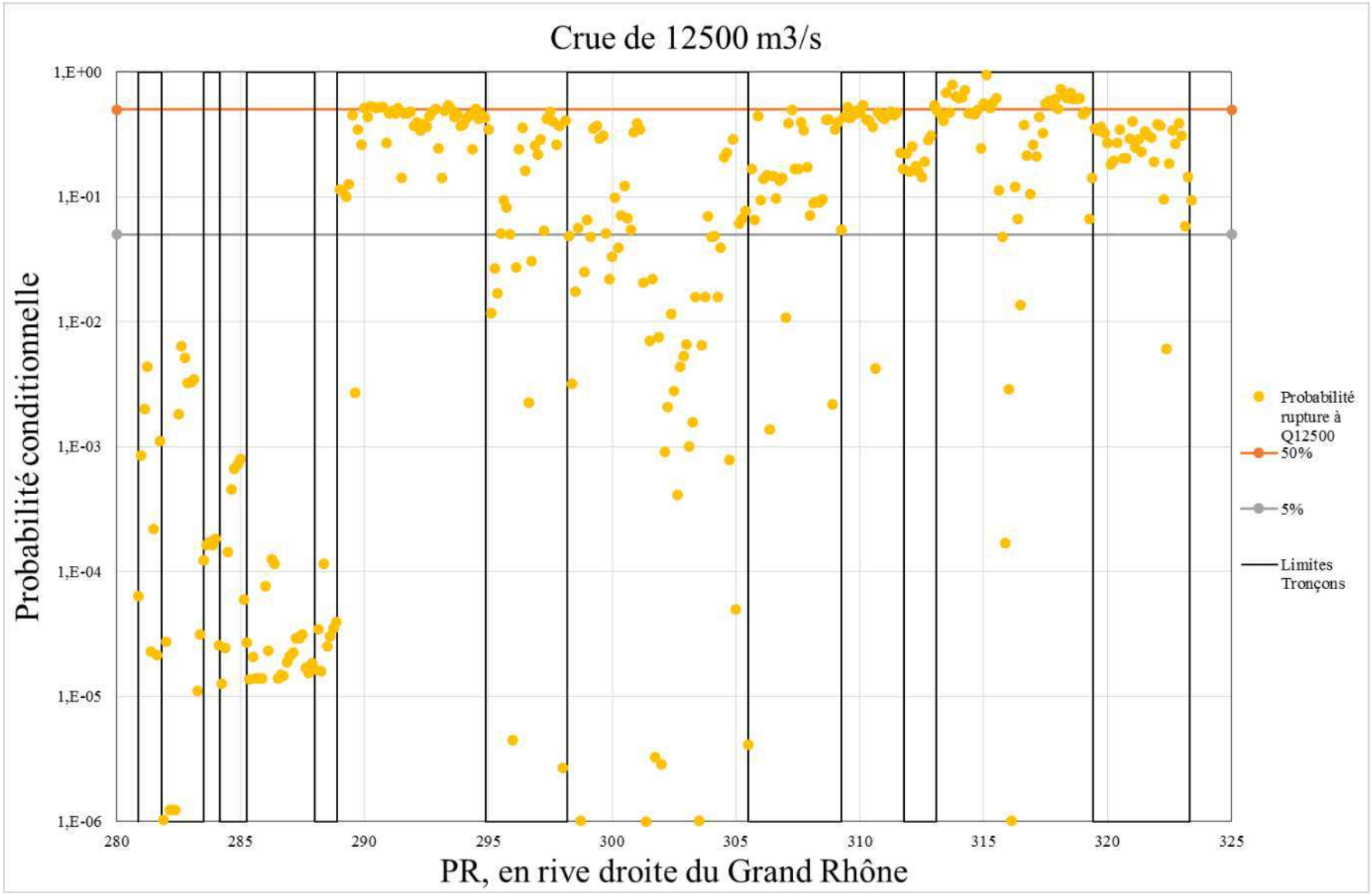


Figure 18 : Calcul des probabilités conditionnelles de brèche pour une crue de 12 500 m^3/s le long du Grand Rhône en rive droite

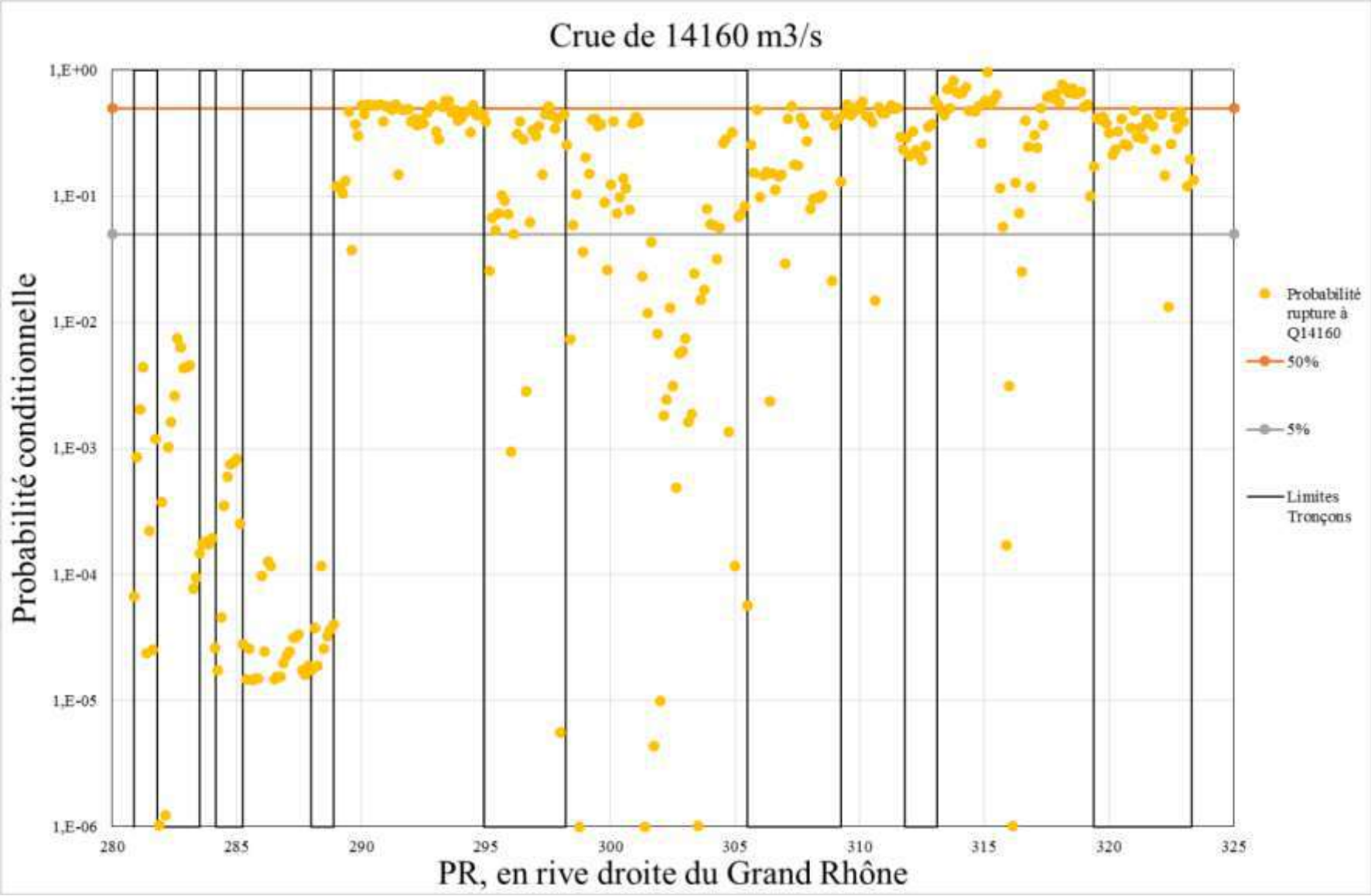


Figure 19 : Calcul des probabilités conditionnelles de brèche pour une crue de 14 160 m^3/s le long du Grand Rhône en rive droite

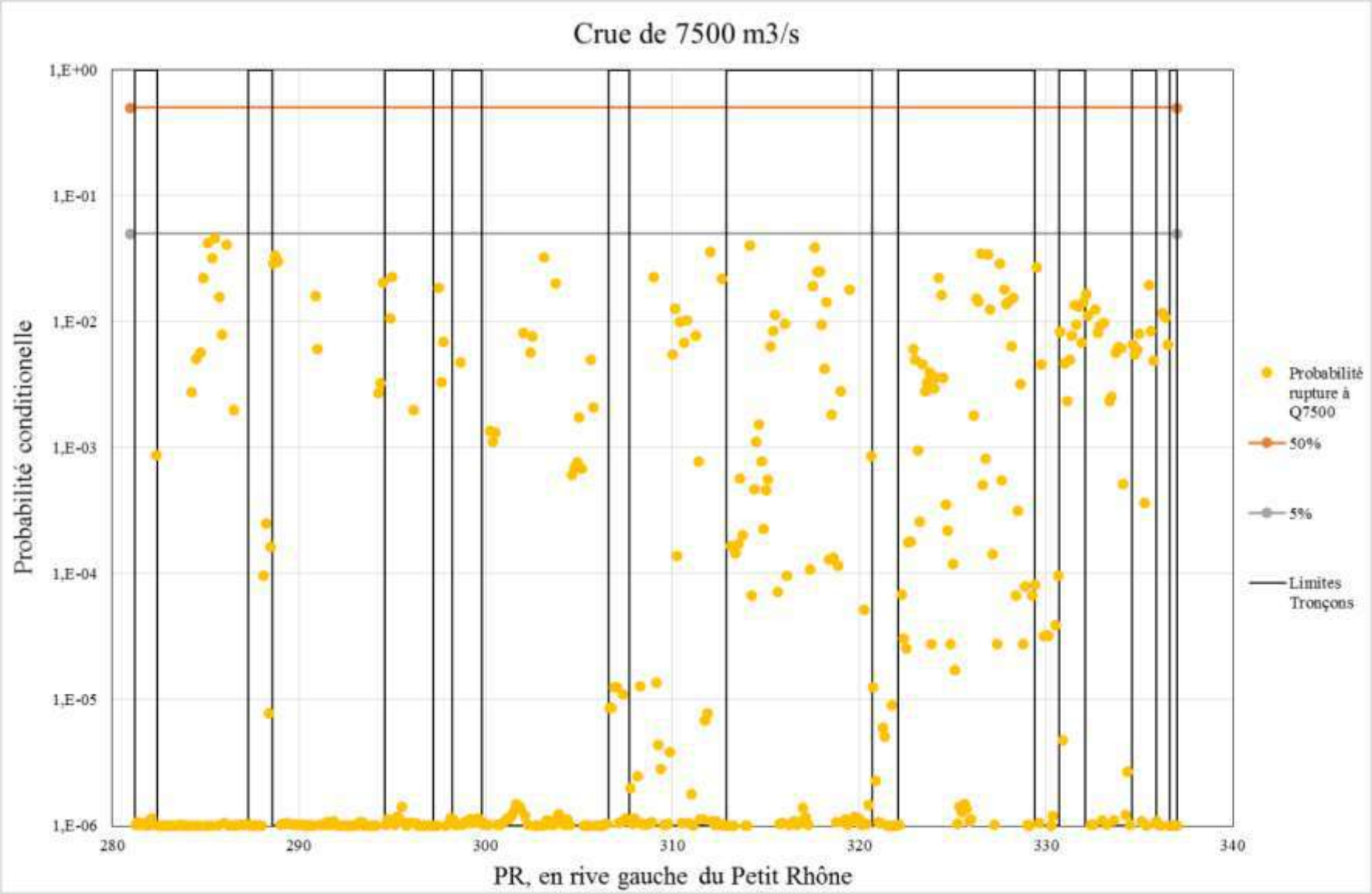


Figure 20 : Calcul des probabilités conditionnelles de brèche pour une crue de 7 500 m^3/s le long du Petit Rhône en rive gauche

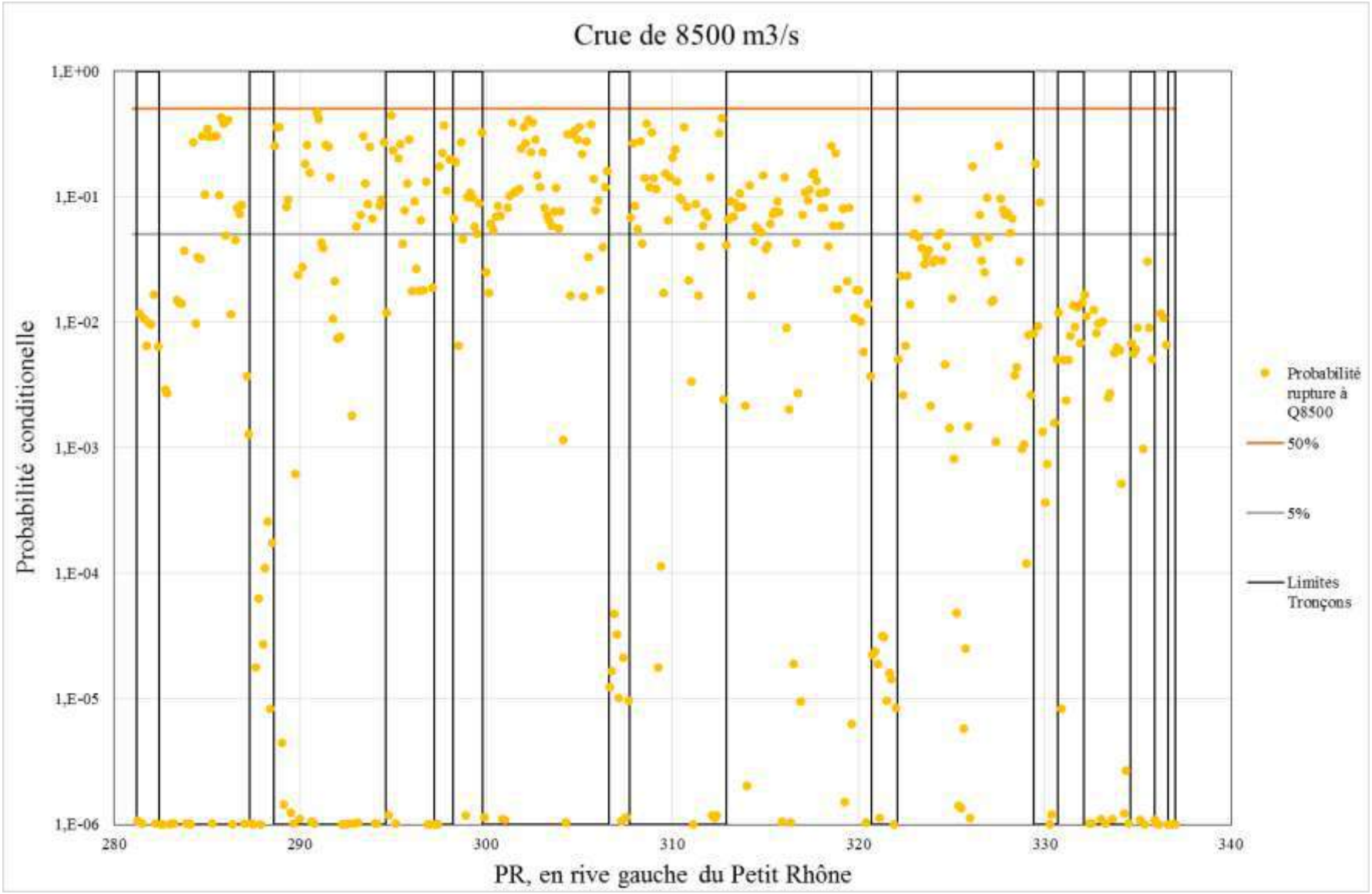


Figure 21 : Calcul des probabilités conditionnelles de brèche pour une crue de 8 500 m^3/s le long du Petit Rhône en rive gauche

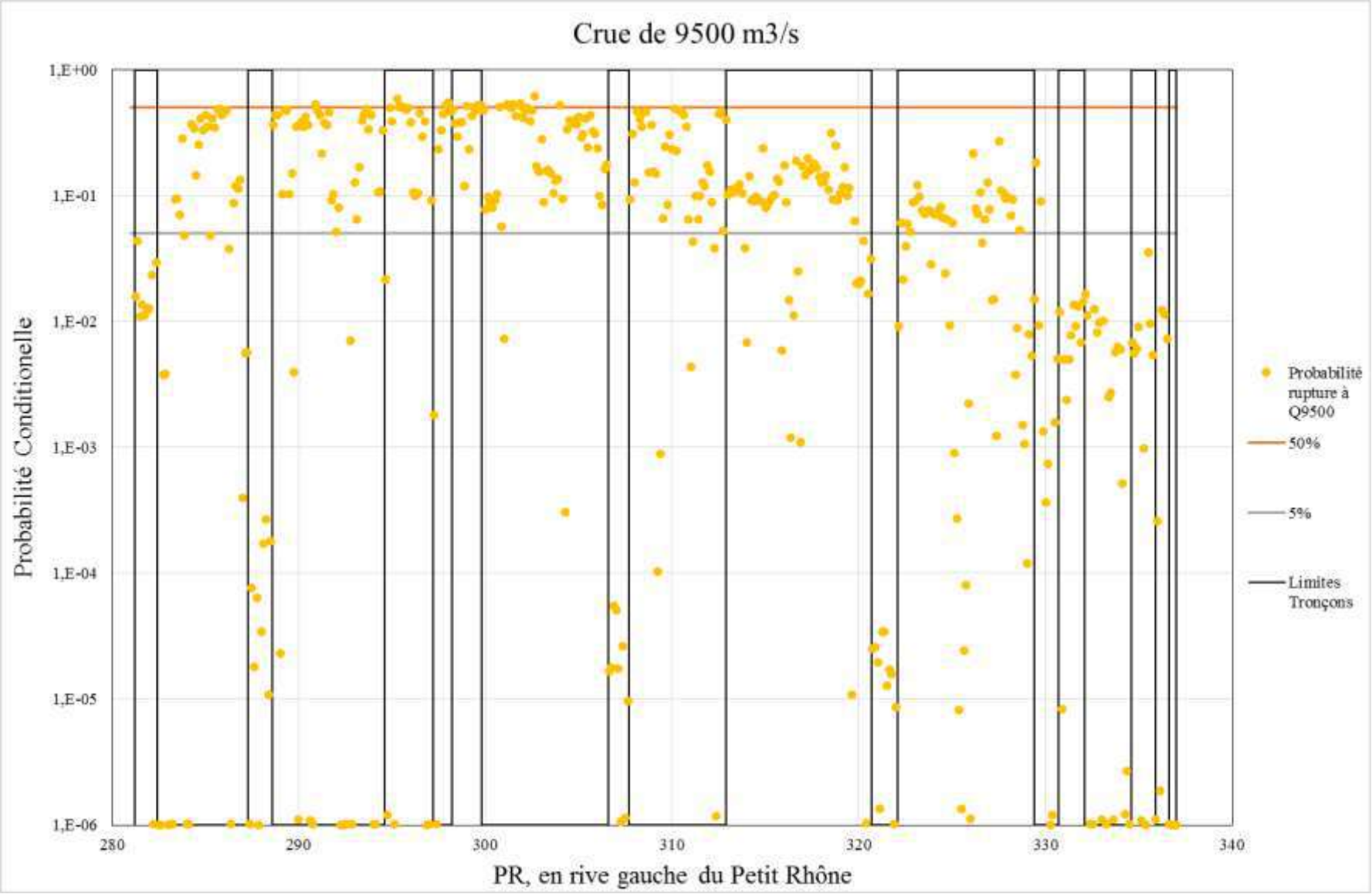


Figure 22 : Calcul des probabilités conditionnelles de brèche pour une crue de 9 500 m^3/s le long du Petit Rhône en rive gauche

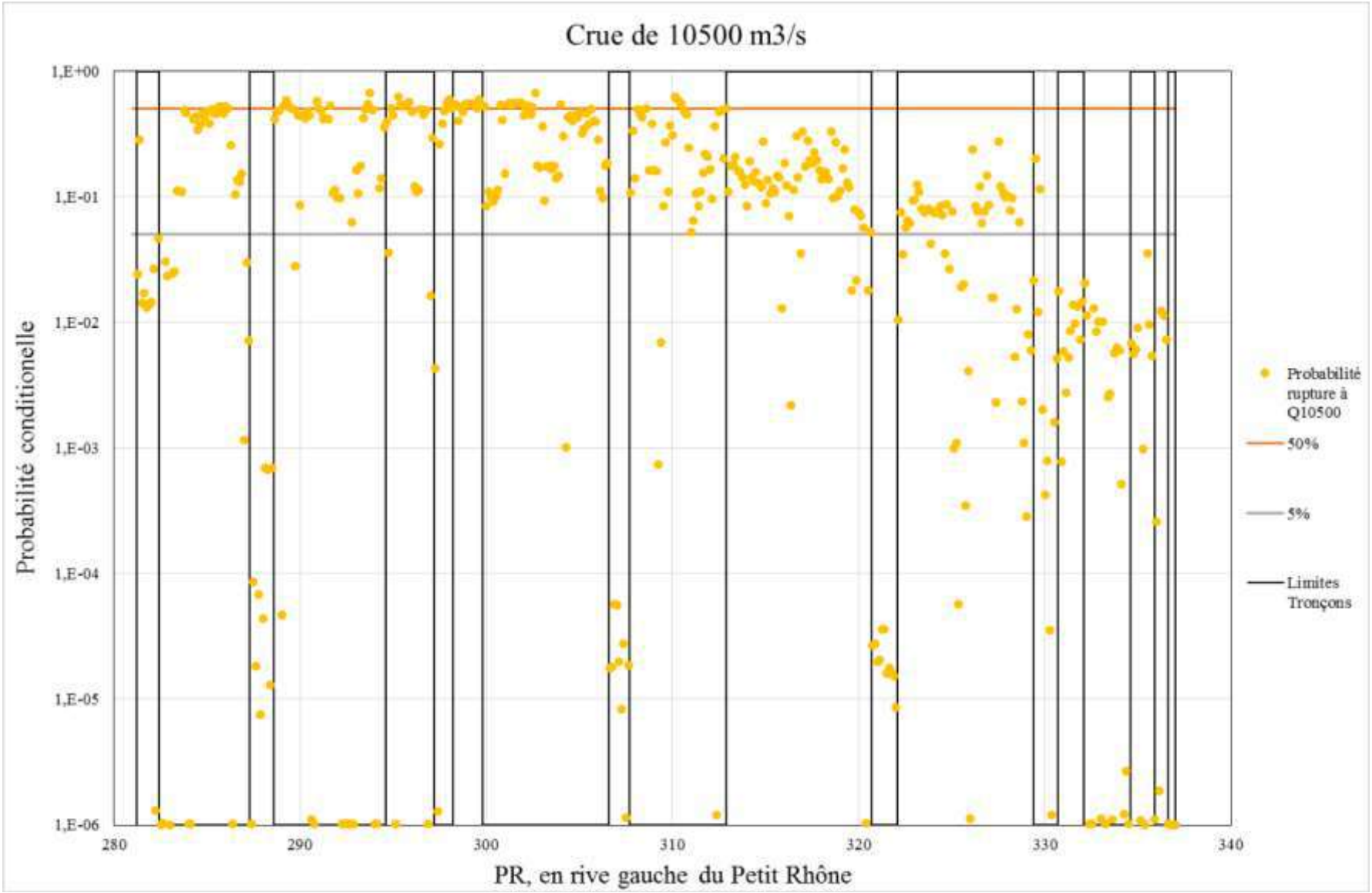


Figure 23 : Calcul des probabilités conditionnelles de brèche pour une crue de 10 500 m^3/s le long du Petit Rhône en rive gauche

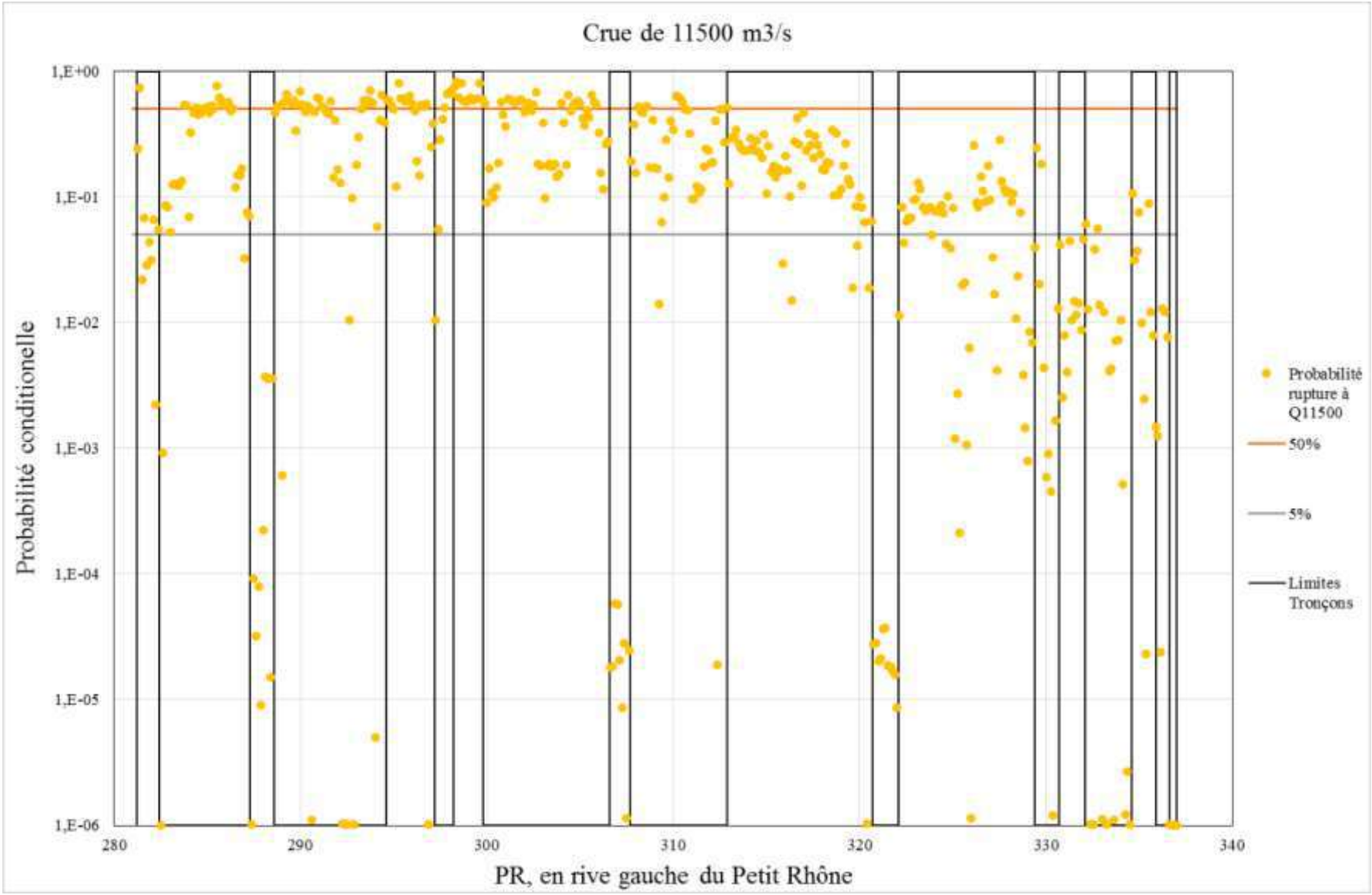


Figure 24 : Calcul des probabilités conditionnelles de brèche pour une crue de 11 500 m^3/s le long du Petit Rhône en rive gauche

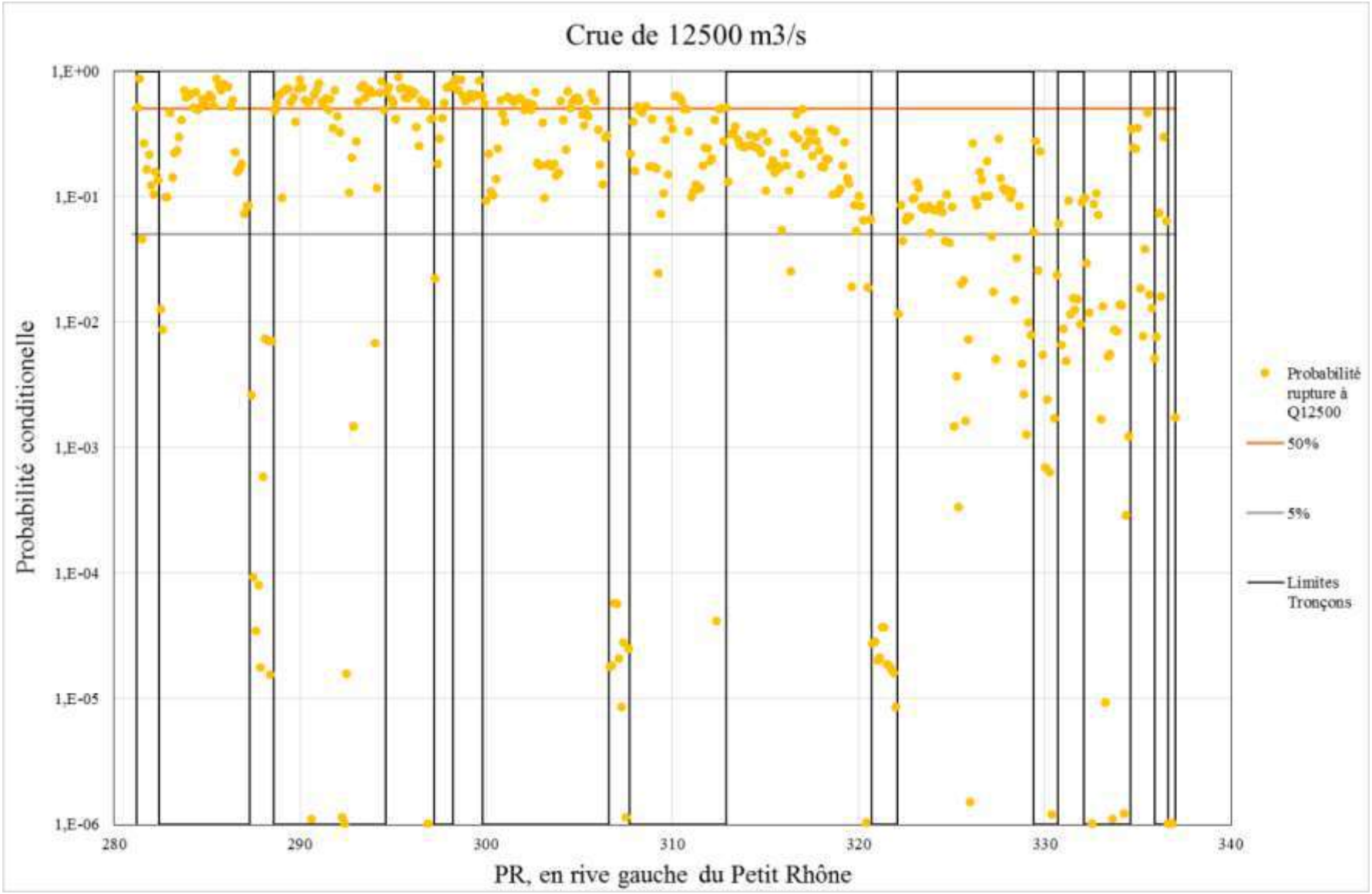


Figure 25 : Calcul des probabilités conditionnelles de brèche pour une crue de 12 500 m^3/s le long du Petit Rhône en rive gauche

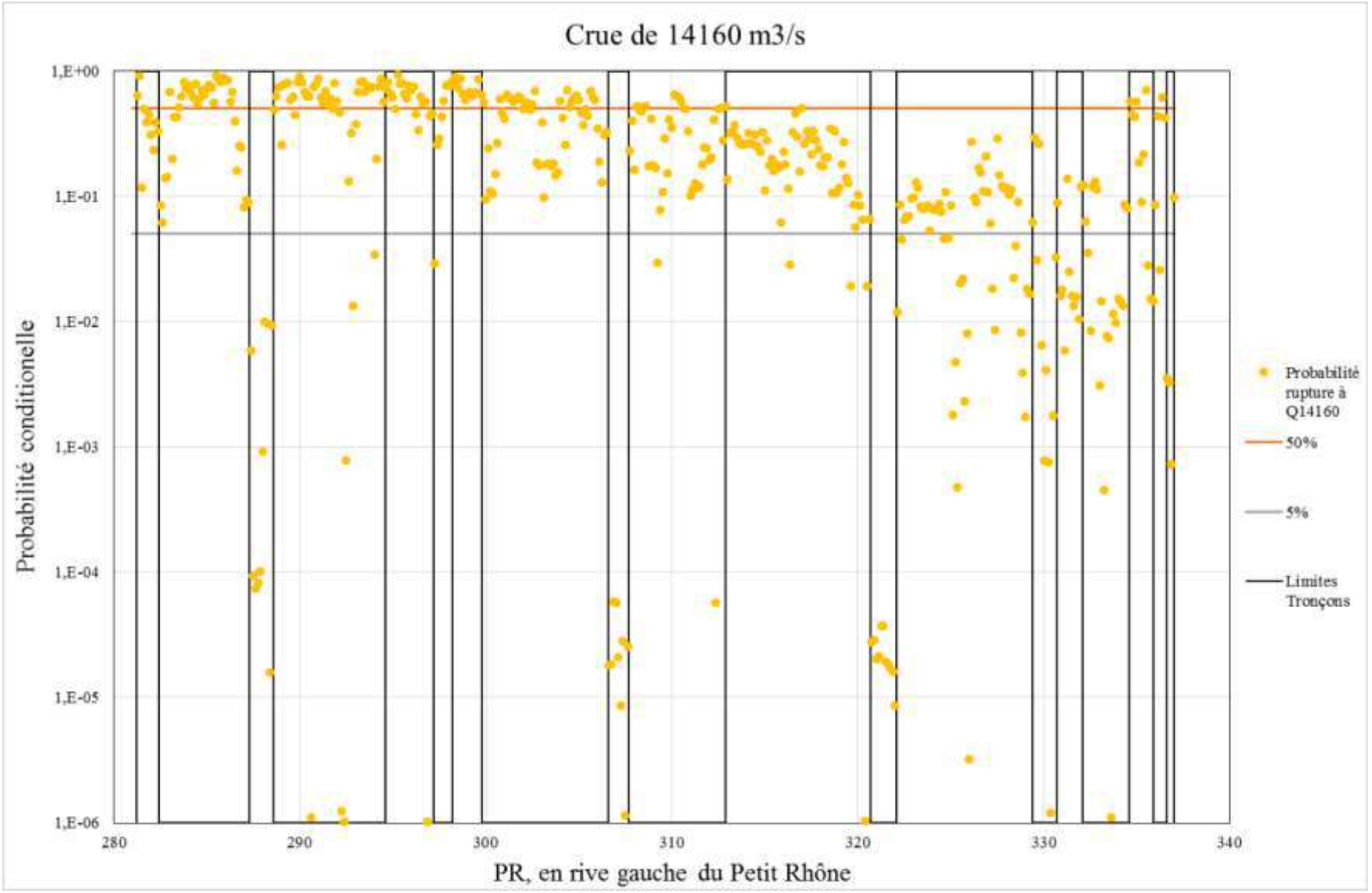


Figure 26 : Calcul des probabilités conditionnelles de brèche pour une crue de 14 160 m^3/s le long du Petit Rhône en rive gauche

Pour information, les graphiques ci-dessous indiquent les crues correspondant à des probabilités intermédiaires entre la crue de sûreté et de danger, en l'occurrence 10 et 25 %.

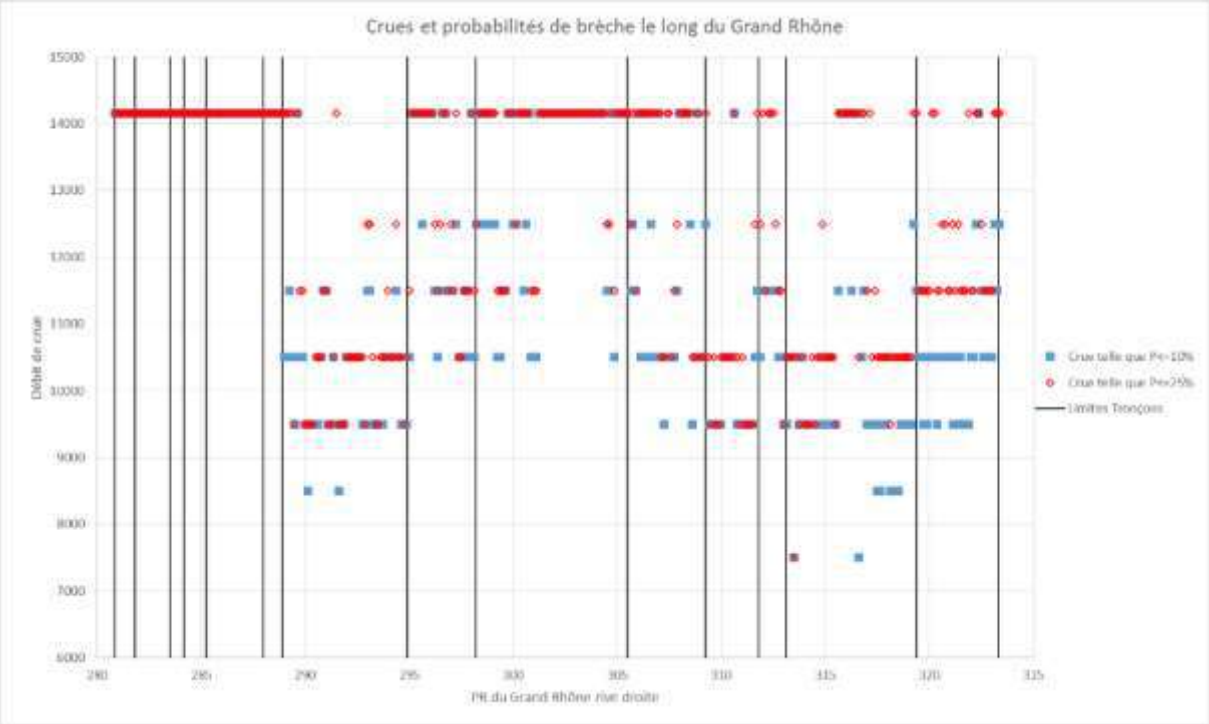


Figure 27 : Calcul des crues de probabilité conditionnelle de brèche de 10% et 25% le long du Grand Rhône en rive droite

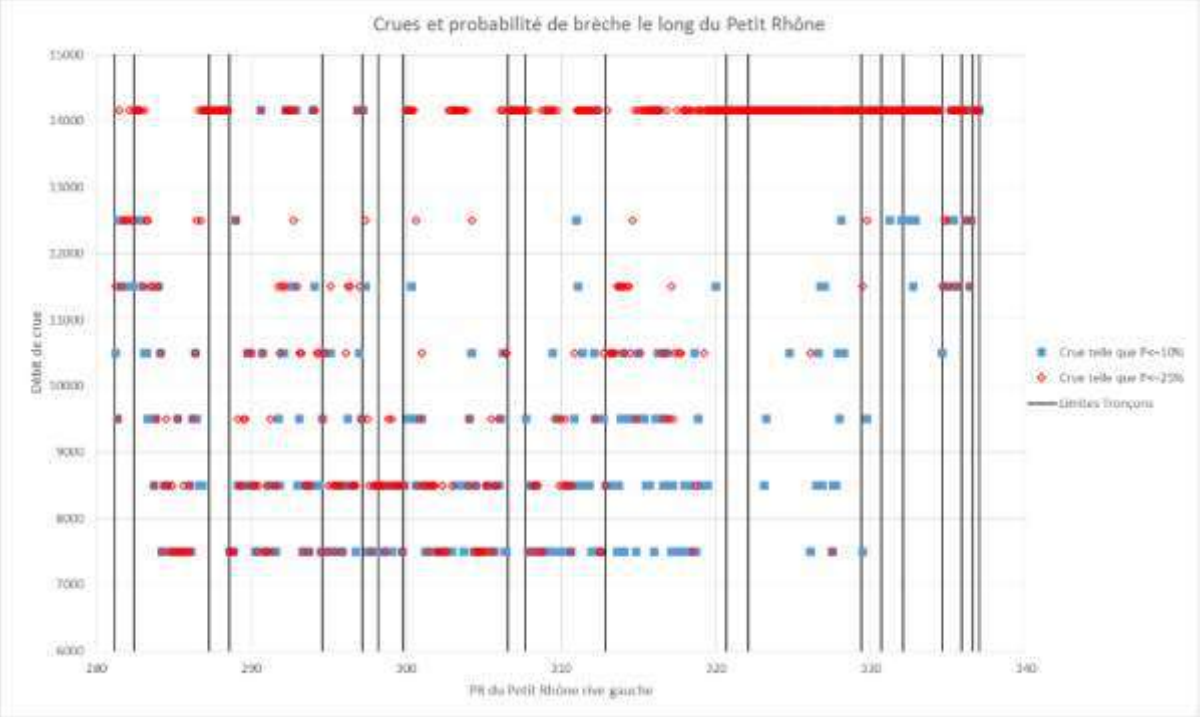


Figure 28 : Calcul des crues de probabilité conditionnelle de brèche de 10% et 25% le long du Petit Rhône en rive gauche

3.2 PRESENTATION DE LA MISE EN FORME

Après avoir été menés tous les 0.125PR, les résultats de calculs ont été regroupés par tronçon et sont présentés ci-dessous.
Les données de géométrie reprennent les principales informations en donnant les valeurs extrêmes, la moyenne et l'écart type.
Les données hydrauliques rappellent les niveaux d'eaux et les revanches associées ainsi que les gradients hydrauliques utilisés pour les calculs.
Lorsqu'il y en a, les informations concernant les batardeaux, et plus généralement les ouvertures, sont rassemblées dans le tableau batardeaux.
Les données de l'analyse fonctionnelle donnent les informations qui ont été saisies pour effectuer les calculs. Ce sont parfois des indices, les tableaux ci-dessous permettent de faire le lien entre indice et information. L'information concernant la carrossabilité est donnée en introduction avec le linéaire du tronçon.
Enfin sont donnés les résultats de calcul, à savoir les probabilités conditionnelles de chaque scénario, les probabilités conditionnelles globales et la probabilité maximale annuelle de brèche.
Une analyse des résultats est apportée. Et des graphiques permettent d'avoir une vision de la variation le long du tronçon.

Scénario de brèche 1 : claquage et érosion de conduit – terrier de blaireau partiellement colmaté

Tableau 19. Correspondance des indices pour le type de conception

Type de conception	Ind
Masque A2 côté amont + engraissement côté aval avec grillage	1
Masque A1+A2 côté amont + engraissement côté aval avec grillage	2
Nouvelle digue A1+A2 avec grillage	3
Nouvelle digue A1+A2 sans grillage	4
Engraissement amont sans grillage sans intervention coté aval	5
Digue adossée à un remblai CNR	6
Digue XIXème siècle avec perré(s) dans un état incertain	7
Digue confortée avec perré(s) rénové(s) en bon état	8
Rideau de palplanches	9
Digue XIX^{ème} siècle ou engraissement aval uniquement avec REX neutre	10
Digue XIX^{ème} siècle ou engraissement aval uniquement avec REX négatif	11

Type de perré :

Tableau 20. Correspondance des indices pour le perré

Ouvrages	Ind
Digue ancienne	1
Nouvelle digue	2

Bouchon : Si le talus a été rengraissé, la longueur du bouchon à faire claquer passe de 1 à 4 m.

Matériaux : présence ou non de matériaux A2 dans le talus coté fleuve.

Filtration :

Tableau 21. Correspondance des indices pour l'état du filtre

Etat du filtre	Ind
Absent	1
Présent mais caractéristiques non connues ou légèrement en deçà des règles de l'art	2
Présent et correctement dimensionné (satisfaction de l'ensemble des fonctions requises)	3

Scénario de brèche 2 : érosion de conduit vide entre le remblai et l'ouvrage traversant

Tableau 22. Correspondance des indices pour la transition des ouvrages traversants

Typologie de la transition	Ind
1°) Structure rigide réalisée sur l'ensemble de la traversée avec les composants suivants : - béton coulé pleine fouille, - coffrage de type NERLAT, - repiquage des parements béton après décoffrage, - géométrie des parements permettant un bon compactage (f < 10)	1
2°) Structure rigide non réalisée sur l'ensemble de la traversée (possibilité de tassement différentiel) avec les composants suivants : - béton coulé pleine fouille, - coffrage de type NERLAT, - repiquage des parements béton après décoffrage, - géométrie des parements permettant un bon compactage (f < 10)	2
3°) Réseau traversant la digue sans les composants précités (béton pleine fouille, Nerlat, bonne géométrie des parements, repiquage béton) avec : - compactage autour de l'ouvrage probablement satisfaisant - étanchéité externe de l'ouvrage probablement satisfaisante	3
4°) Réseau traversant la digue sans les composants précités (béton pleine fouille, Nerlat, bonne géométrie des parements, repiquage béton) avec : - compactage autour de l'ouvrage incertain ou douteux - étanchéité externe de l'ouvrage probablement satisfaisante	4
5°) Réseau traversant la digue sans les composants précités (béton pleine fouille, Nerlat, bonne géométrie des parements, repiquage béton) avec : - compactage autour de l'ouvrage probablement satisfaisant - étanchéité externe de l'ouvrage incertaine ou douteux	5
6°) Réseau traversant la digue sans les composants précités (béton pleine fouille, Nerlat, bonne géométrie des parements, repiquage béton) avec : - compactage autour de l'ouvrage incertain ou douteux - étanchéité externe de l'ouvrage incertaine ou douteux	6
7°) Réseau traversant un écran d'étanchéité (palplanches, paroi moulée, béton, perré) Présence d'injections/béton ou autre étanchéité autour de la fenêtre réalisée dans l'écran	7
8°) Réseau traversant un écran d'étanchéité (palplanches, paroi moulée, béton, perré) Traitement absent ou incertain de la fenêtre réalisée dans l'écran	8

9°) Transition entre deux remblais satisfaisante Présence de redans, ou d'écran correctement dimensionné	9
10°) Transition entre deux remblais incertaine	10
11°) Présence de perrés ou murs de retour sur les talus amont/aval ou écran anti-renards correctement dimensionnés le long de l'ouvrage traversant	11
12°) Présence de perrés ou murs de retour sur les talus amont/aval ou écran anti-renards (dimensionnement incertain) le long de l'ouvrage traversant	12
13°) Réseau en profondeur, fonçage présumé ou certain (Electricité/Fibre/Telecom)	13
14°) Canalisation en profondeur, fonçage présumé ou certain (Eau/Gaz/Hydrocarbure)	14

Pour les matériaux et la filtration, ce sont les mêmes données que pour le scénario 1.

Scénario de brèche 3 : érosion de conduit – racine morte

Tableau 23. Correspondance des indices pour l'érosion le long d'une racine

Situation rencontrée	Ind
Digue récemment confortée (étanchéité restaurée par remblai compacté, perré, rideau….)	1
Digue du XIXème siècle sans arbre sur ou en pied de talus	2
Digue du XIXème siècle avec présence d'arbres en pied de talus (un côté)	3
Digue du XIXème siècle avec présence d'arbres en pied de talus (deux côtés)	4
Digue du XIXème siècle avec présence d'arbres sur un talus	5
Digue du XIXème siècle avec présence d'arbres sur les deux talus	6

Pour les matériaux et la filtration, ce sont les mêmes données que pour le scénario 1.

Scénario de brèche 4 : érosion de conduit – fissure

Tableau 24. Correspondance des indices pour l'érosion dans une fissure

Situation rencontrée	Ind
Digue reconstruite intégralement récemment (post 1993) Digue avec rideau de palplanches central Digue avec perré rénové	1
Digue du XIX^{ème} siècle ayant fait l'objet d'un engraissement par l'amont ou par l'aval	2
Digue du XIX^{ème} siècle sans observation d'infiltrations et de terriers de blaireaux ou lapins par le passé	3
Digue du XIX^{ème} siècle avec observation d'infiltrations ou de terriers de blaireaux ou lapins par le passé	4

Pour les matériaux et la filtration, ce sont les mêmes données que pour le scénario 1.

Scénario de brèche 5 : soulèvement pied aval et érosion régressive – couche de sable

Tableau 25. Correspondance des indices pour la présence de sable

Présence	Ind
Digue et fondation investiguées; Aucun élément si dessous	1
Sol de classe 5 suivant la classification de Robertson (1986) ou digue et fondation non investiguées	2
Alternance de sol de classe 5 et 6 suivant Robertson (1986) Et/ou présence d'un perré maçonnée sur la carte de 1876	3
Sol de classe 6 suivant la classification de Robertson (1986) Et/ou présence d'un paléochenal à proximité	4
Sable observée durant des travaux ou infiltrations observées en périodes de crues	5

Le claquage de la couche supérieure est déterminé par la profondeur et l'épaisseur de la couche sableuse.

Pour la filtration, ce sont les mêmes données que pour le scénario 1.

Scénario de brèche 6 : claquage et érosion de contact – couche de graviers

Tableau 26. Correspondance des indices pour l'érosion de contact

Présence	Ind
Pas d'anciennes brèches connues ou brèche reprise de façon définitive (perré, masque amont, rideau palplanches)	1
Autres brèches historiques	2
Brèches de 1993, 1994 et 2002 Réparées en urgence et non reprises depuis	3

Le claquage est déterminé de la même façon que pour le scénario 1 : en fonction de la géométrie de la digue et de l'épaisseur du bouchon.

Pour la filtration, ce sont les mêmes données que pour le scénario 1.

Scénario de brèche 7 : claquage et suffusion interne – couche de grave

Tableau 27. Correspondance des indices pour la suffusion

Présence	Ind
1- Digues confortées avec rétablissement de l'étanchéité (masque amont, perré, rideau…)	1
2- Digue du XIX^{ème} siècle non confortée ayant fait l'objet de reconnaissances géotechniques sans détection de couche de grave dans le corps de digue	2
3- Digue du XIX^{ème} siècle non confortée n'ayant pas fait l'objet de reconnaissances géotechniques	3
4- Digue du XIX^{ème} siècle non confortée ayant fait l'objet de reconnaissances géotechniques avec détection de couche de grave dans le corps de digue	4

Le claquage est déterminé de la même façon que pour le scénario 1 : en fonction de la géométrie de la digue et de l'épaisseur du bouchon.

Pour la filtration, ce sont les mêmes données que pour le scénario 1.

Scénario de brèche 8 : érosion par surverse

Tableau 28. Correspondance des indices pour le type de parement aval

Nature parement aval	Ind
résistant à la surverse	1
remblai	2
terre damée	3
terre confortée récemment	4
matériaux carrière	5
blocs 10/100kg	6
blocs perré maçonné	7
Palplanche	8

Scénario de brèche 9 : Affouillement de berge

Ce sont les données au niveau des zones de faible ségonnal (et donc risque plus important) qui sont renseignées.

Tableau 29. Correspondance des indices pour la nature de la berge

Nature berge	Ind
herbacés	1
arbres	2
panneaux de fond	3
enrochements anciens	4
enrochements avec sabot	5
Fondation rocheuse ou palplanche	6

3.3 DIGUE DU DEFLUENT (D1)

Le tronçon Défluent mesure 900 m, il comprend les PR 0.125 compris entre PRG 281 et GRD 281.75; la digue a été confortée en 2001. Des travaux de carrossabilité avaient été réalisés en 1994.

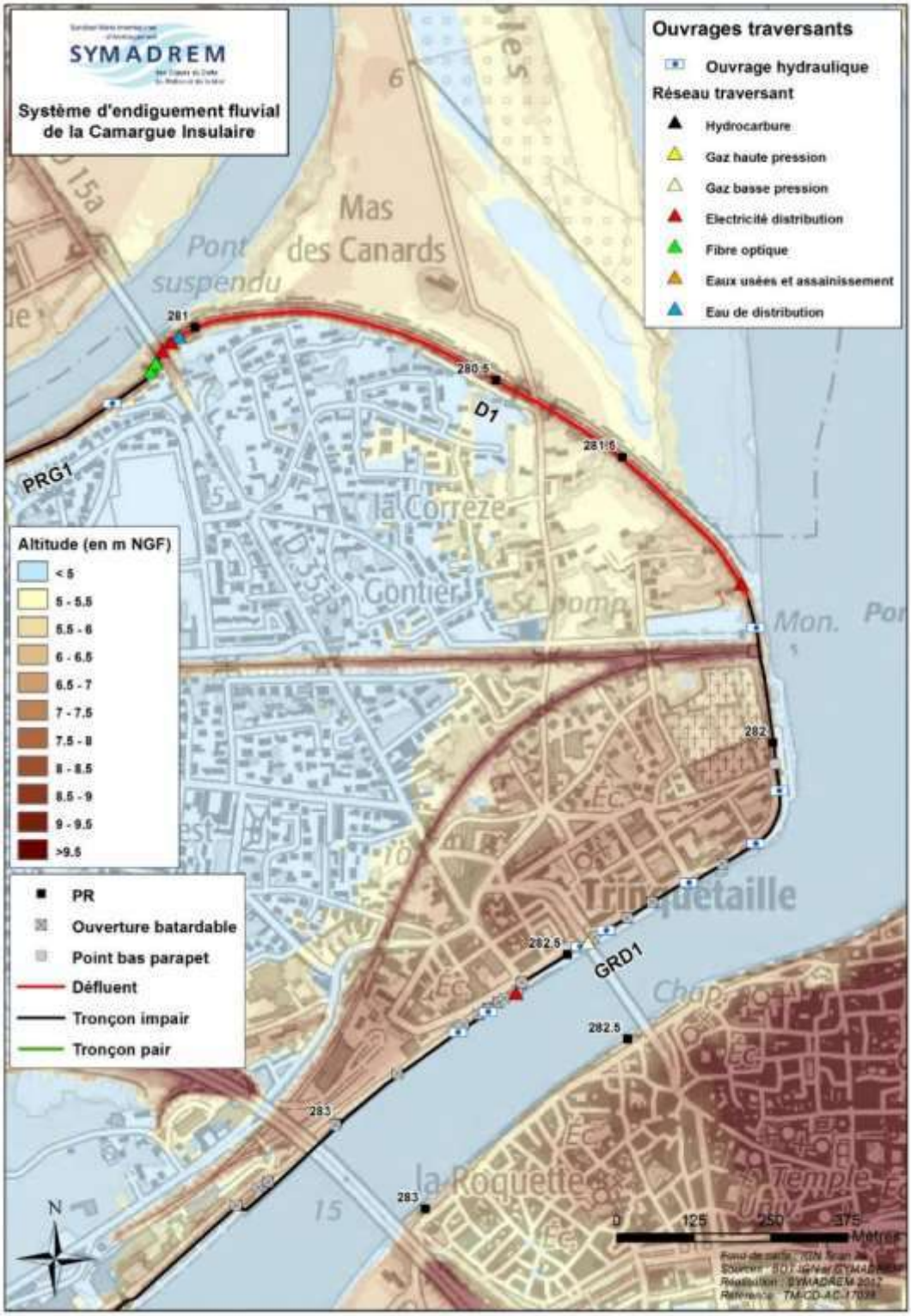


Figure 33. Plan de situation de la digue du défluent

Tableau 30. Synthèse de géométrie, tronçon Défluent

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	9,8	9,4	9,6	0,1
Cote de pied de digue aval	m NGF	7,3	5,7	6,3	0,6
Cote à 20m du pdav	m NGF	6,8	4,4	5,5	1,0
Cote de pied de digue amont	m NGF	6,1	3,1	5,3	1,0
Cote à 20m du pdam	m NGF	6,1	1,0	4,8	1,7
Hauteur de digue coté aval	m	4,0	2,3	3,3	0,7
Hauteur de digue côté amont	m	6,5	3,6	4,4	1,0
Fruit aval	L/V	2,6	1,6	2,0	0,4
Fruit amont	L/V	3,1	1,6	2,2	0,4
Largeur du ségonnal	m	426	25	204	134

Le ségonnal est très important, excepté aux extrémités. Coté Grand Rhône il devient quasi nul, la bathymétrie dans cette zone est de -8 m NGF mais la berge est protégée par des enrochements.

Tableau 31. Données hydrauliques, tronçon Défluent

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	6,1	5,7	3,7	3,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9
8 500	7,0	6,6	2,7	2,9	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
9 500	7,4	7,0	2,3	2,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,6
10 500	7,8	7,4	2,0	2,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
11 500	8,3	8,0	1,4	1,5	0,1	0,1	0,0	0,0	0,4
12 500	8,6	8,3	1,1	1,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,3
14 160	8,7	8,4	1,0	1,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,3

Caractéristiques du tronçon Défluent vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue confortée avec les perrés rénovés. Concernant le claquage hydraulique, la digue est confortée. La résistance à l'érosion est réalisée par un masque en matériaux A2. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative au masque A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il n'y a pas de réseau ou d'ouvrage connu sur ce tronçon.

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit – racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue sans arbre sur ou en pied de talus. La résistance est réalisée par un masque en matériaux A2. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative au masque A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit – fissure
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue ayant été confortée en 2000/2001. La résistance à l'érosion est assurée par un masque en matériaux A2. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative au masque A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable propre en fondation. La couche de sable, dont le toit est à 5 m de profondeur par rapport au terrain naturel aval, mesure 5 m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il y a eu une brèche ancienne (en mai 1856) reprise après crue avec perré et en 2000/2001 avec un masque A2. Concernant le claquage hydraulique, la digue est donc confortée. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : 0,001
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue a été confortée deux fois (avec un perré après 1856 et avec masque en matériaux A2 en 2000/2001). Concernant le claquage hydraulique, la digue est confortée. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : 0,001
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 25 m, aux deux extrémités, et la pente hydraulique est de 10 cm/km, du Petit Rhône vers le Grand Rhône ; la berge est recouverte d'herbacés.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge herbacée

Tableau 32. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Défluent

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-11	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	2E-11	2E-11	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**1E-06**
10 500	6E-11	0E+00	4E-07	4E-08	2E-09	2E-11	8E-11	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			**8E-06**
11 500	7E-10	0E+00	1E-06	1E-07	2E-09	1E-10	6E-10	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			**1E-05**
12 500	3E-08	0E+00	3E-06	3E-07	7E-09	1E-10	5E-09	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			**2E-05**
14 160	7E-08	0E+00	7E-06	7E-07	1E-08	1E-10	7E-09	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			**2E-05**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	9E-12	0E+00	9E-08	9E-09	3E-09	2E-10	0E+00	1E-06	1E-12	2E-04	2E-06			**3E-04**
8 500	5E-10	0E+00	5E-07	5E-08	4E-09	1E-09	0E+00	1E-06	1E-12	9E-04	5E-06			**9E-04**
9 500	3E-09	0E+00	7E-07	7E-08	4E-09	2E-09	3E-11	1E-06	1E-12	9E-04	6E-06			**9E-04**
10 500	3E-08	0E+00	3E-06	3E-07	2E-08	2E-09	3E-10	1E-06	1E-12	9E-04	1E-04			**1E-03**
11 500	2E-07	0E+00	6E-06	6E-07	3E-08	3E-09	4E-09	1E-06	1E-12	9E-04	1E-04			**1E-03**
12 500	3E-07	0E+00	8E-06	8E-07	4E-08	1E-08	9E-09	1E-06	1E-12	9E-04	2E-04			**1E-03**
14 160	4E-07	0E+00	9E-06	9E-07	4E-08	2E-08	1E-08	1E-06	1E-12	9E-04	2E-04			**1E-03**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	4E-11	0E+00	4E-07	4E-08	2E-08	2E-09	0E+00	1E-06	1E-12	2E-03	1E-05			**2E-03**
8 500	2E-09	0E+00	1E-06	1E-07	2E-08	1E-08	0E+00	1E-06	1E-12	4E-03	1E-05			**4E-03**
9 500	7E-09	0E+00	1E-06	1E-07	2E-08	1E-08	5E-11	1E-06	1E-12	4E-03	2E-05			**4E-03**
10 500	1E-07	0E+00	5E-06	5E-07	8E-08	1E-08	6E-10	1E-06	1E-12	4E-03	8E-04			**4E-03**
11 500	4E-07	0E+00	9E-06	9E-07	2E-07	2E-08	7E-09	1E-06	1E-12	4E-03	1E-03			**4E-03**
12 500	5E-07	0E+00	1E-05	1E-06	2E-07	5E-08	1E-08	1E-06	1E-12	4E-03	1E-03			**4E-03**
14 160	6E-07	0E+00	1E-05	1E-06	2E-07	1E-07	3E-08	1E-06	1E-12	4E-03	1E-03			**4E-03**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**1E-03**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**2E-04**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au GRD 281,250. Elle est de 1.10^{-3}, ce qui correspond à un événement probable (classe B) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.

L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 14 160 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue, dont le débit serait très sensiblement supérieur à 14 160 m^3/s, compte tenu du plafonnement des lignes d'eau lié aux déversements entre Beaucaire et Arles pour des crues supérieures à 11 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 5.10^{-4}, ce qui correspond à un événement improbable (classe C) ;
- un risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 14 160 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 14 160 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 14 160 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 % des probabilités maximales

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 14 160 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le principal risque résiduel est la stabilité des talus, situé entre PRG 280,5 et PRG 280.75 pour le talus coté zone protégée et localisé au niveau du GRD 281.75 pour le talus coté fleuve. .

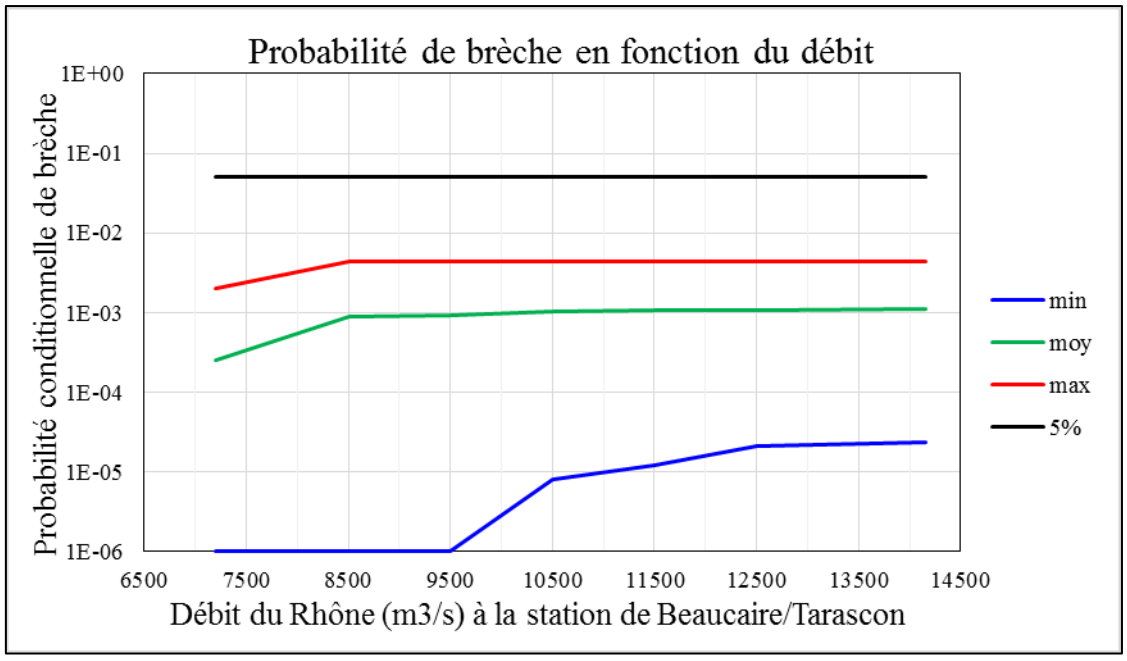


Figure 29 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Défluent

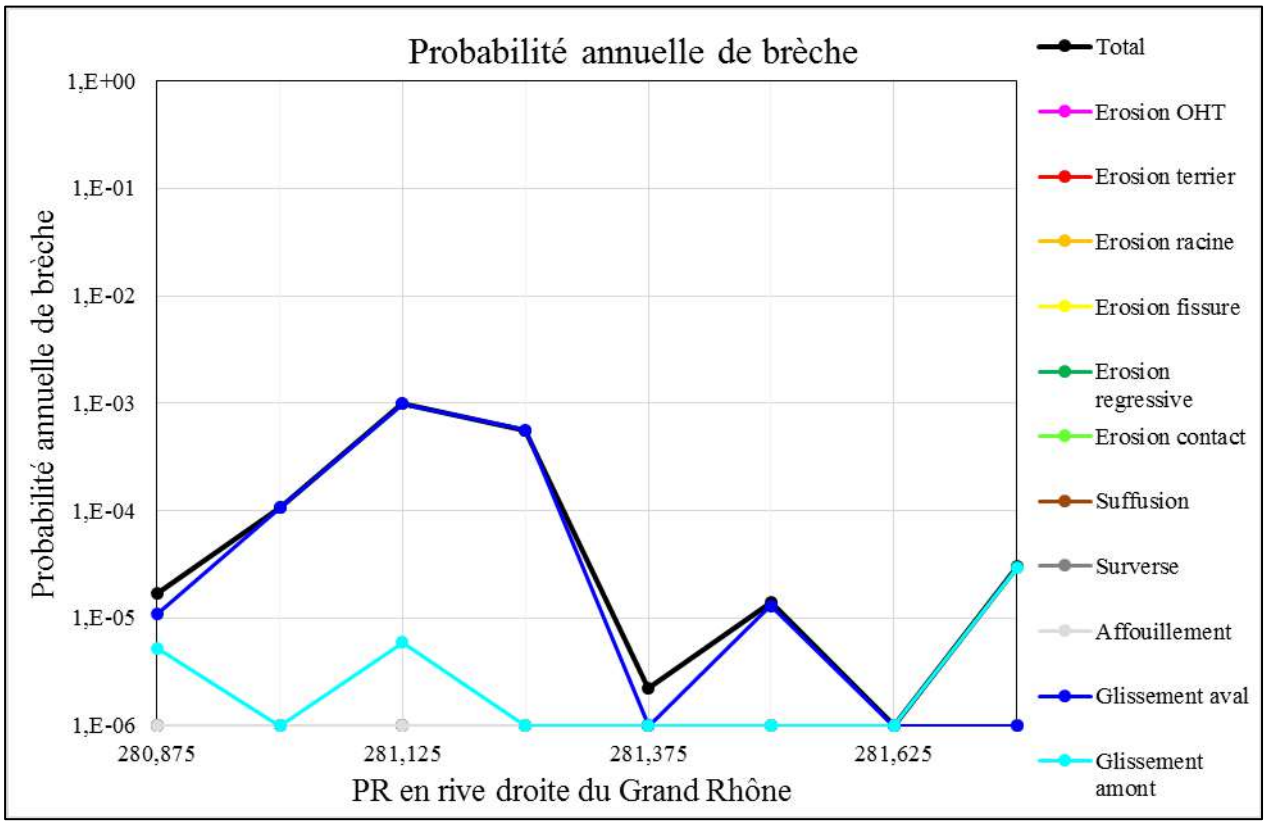


Figure 30 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Défluent

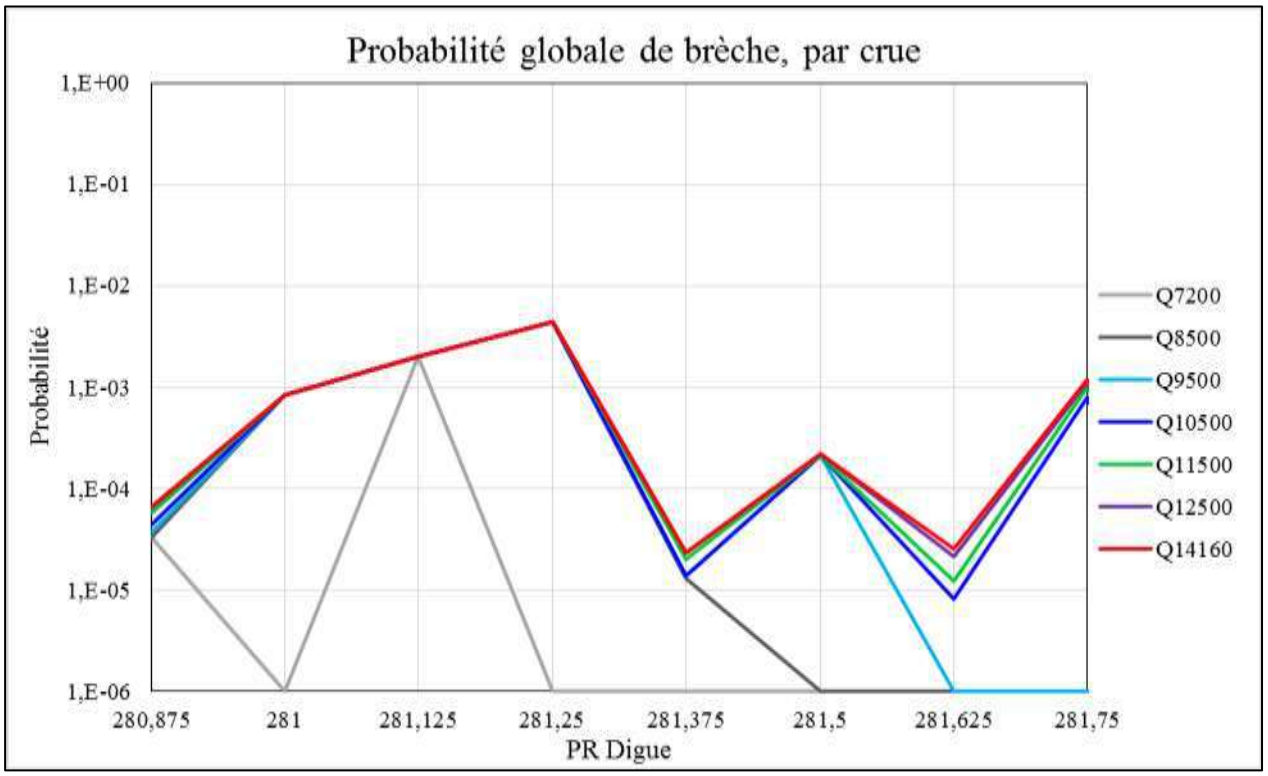


Figure 31 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Défluent

3.4 QUAIS D'ARLES (GRD1)

Le tronçon des Quais d'Arles mesure 1.6 km, il comprend les PR0.125 compris entre GRD 281.875 et 283.375; il est intégralement carrossable, une route longeant coté ville.

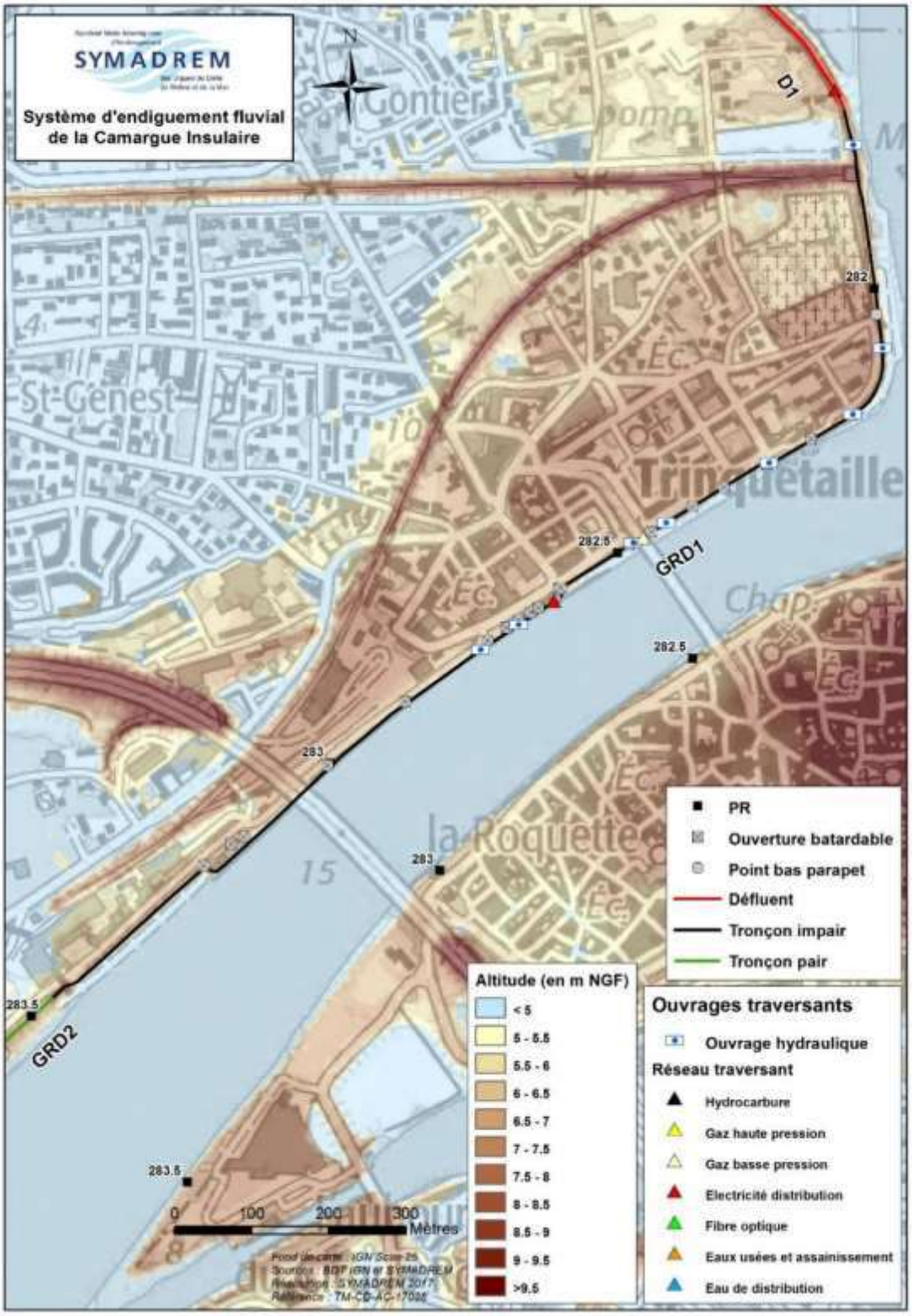


Figure 34. Plan de situation des quais d'Arles

Tableau 33. Synthèse de géométrie, tronçon Quais d'Arles

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	9,6	7,8	8,4	0,6
Cote de pied de digue aval	m NGF	8,5	6,5	7,3	0,7
Cote à 20m du pdav	m NGF	8,1	5,6	6,9	0,8
Cote de pied de digue amont	m NGF	7,4	4,2	5,6	1,2
Cote à 20m du pdam	m NGF	4,4	0,5	0,9	1,1
Hauteur de digue coté aval	m	1,6	0,7	1,2	0,3
Hauteur de digue côté amont	m	4,9	1,3	2,8	1,4
Fruit aval	L/V	4,8	0,0	0,8	1,6
Fruit amont	L/V	2,4	0,0	0,8	0,7
Largeur du ségonnal	m	30	5	11	7

Il n'y a pas de ségonnal, les quais maçonnés sont prolongés en fondation par des palplanches ; la bathymétrie atteint -17mNGF.

Tableau 34. Données hydrauliques, tronçon Quais d'Arles

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	5,7	5,0	2,8	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
8 500	6,5	5,8	2,0	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
9 500	7,0	6,1	1,6	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
10 500	7,4	6,5	1,3	1,7	0,3	0,0	0,0	0,0	0,9
11 500	8,0	7,0	0,8	1,1	2,8	0,3	0,0	0,0	0,7
12 500	8,2	7,2	0,6	0,9	3,9	0,4	0,0	0,0	0,6
14 160	8,4	7,3	0,5	0,8	4,5	0,5	0,0	0,0	0,5

Tableau 35. Caractéristiques des batardeaux, tronçon Quais d'Arles

Caractéristiques				Hauteur de charge (m)						
PR	Id	Cote du fil d'eau	Hauteur	7 500	8 500	9 500	10 500	11 500	12 500	14 160
282,02	S7-B1	9,1	0	0	0	0	0	0	0	0
282,18	T10	7,59	1,3	0	0	0	0	0	0,15	0,29
282,23	T9	7,56	1,3	0	0	0	0	0	0,12	0,25
282,29	T1	5,91	2,7	0	0,10	0,57	0,91	1,44	1,69	1,82
282,35	T8	7,32	1,3	0	0	0	0	0	0,20	0,33
282,4	T7	7,23	1,3	0	0	0	0	0	0,23	0,36
282,45	T6	6,96	1,3	0	0	0	0	0,19	0,43	0,56
282,48	T5	7,1	1,12	0	0	0	0	0,02	0,25	0,38
282,59	T2	6,59	1,5	0	0	0	0,04	0,53	0,77	0,89
282,59	T3	6,59	1,5	0	0	0	0,04	0,53	0,77	0,89
282,61	GM1	6,5	1,7	0	0	0	0,12	0,62	0,85	0,98
282,64	GM2	6,5	1,7	0	0	0	0,12	0,62	0,85	0,98
282,65	GM3	6,5	1,7	0	0	0	0,12	0,61	0,85	0,98
282,66	GM4	6,5	1,7	0	0	0	0,12	0,61	0,85	0,98
282,68	GM5	6,5	1,7	0	0	0	0,12	0,61	0,85	0,97
282,72	S3B3	6,5	1,7	0	0	0	0,11	0,61	0,85	0,97
282,86	GM6	6,5	1,7	0	0	0	0,10	0,60	0,84	0,96
283,01	GM7	7	1	0	0	0	0	0,09	0,33	0,45
283,12	GM8	7	1	0	0	0	0	0,04	0,28	0,41
283,15	S1B2	7,06	1,2	0	0	0	0	0	0,21	0,33
283,21	T4	6,9	1,28	0	0	0	0	0,11	0,34	0,47

Pour une crue de 14 160 m^3/s, la revanche minimale est de 55 cm, sur le batardeau GM7.

Caractéristiques du tronçon Quais d'Arles vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
Les quais sont maçonnés, ce qui rend quasiment impossible la création de terrier.

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il y a plusieurs ouvrages hydrauliques sur ce tronçon, celui qui présente la transition la plus à risque comprend une structure rigide réalisée sur l'ensemble de la traversée. La résistance à l'érosion est améliorée par la présence du perré. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01
- Probabilité d'initiation : loi relative au masque A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit – racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage a récemment été conforté ; des arbres sont parfois encore présents coté ville mais l'étanchéité coté fleuve a été reprise. La résistance à l'érosion est améliorée par la présence du perré. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative au masque A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit – fissure
Sur ce tronçon, l'ouvrage a récemment été repris. La résistance à l'érosion est améliorée par la présence du perré. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative au masque A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive
L'érosion régressive potentielle est stoppée par les palplanches.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact
La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il n'y a pas de brèches connues, mais il est probable que les remblais sous le quai soit de nature graveleuse. Concernant le claquage hydraulique, le perré a été repris. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : 0,001
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne
L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue a été confortée. Concernant le claquage hydraulique, le perré a été repris. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : 0,001
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse
En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est constitué d'un perré maçonné en bon état.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement avec blocs/perré maçonné

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 5m et la pente hydraulique est de 77 cm/km au maximum ; la berge est protégée par des palplanches.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une fondation rocheuse ou palplanche

Tableau 36. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Quais d'Arles

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	**1E-06**
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	**1E-06**
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-11	2E-11	1E-06	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	**1E-06**
12 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-11	3E-11	1E-06	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	**1E-06**
14 160	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-11	5E-11	1E-06	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	**1E-06**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	5E-09	0E+00	1E-06	2E-09	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	5E-09	0E+00	1E-06	2E-09	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	6E-09	9E-09	1E-06	2E-09	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	**1E-06**
10 500	0E+00	2E-06	4E-07	2E-07	0E+00	6E-09	7E-08	1E-06	2E-09	0E+00	0E+00	0E+00	3E-04	**3E-04**
11 500	0E+00	8E-06	4E-06	2E-06	2E-10	7E-09	1E-07	1E-06	2E-09	0E+00	0E+00	0E+00	9E-04	**9E-04**
12 500	0E+00	8E-05	6E-05	1E-05	2E-10	1E-08	4E-07	1E-06	2E-09	0E+00	0E+00	0E+00	2E-03	**2E-03**
14 160	0E+00	1E-04	2E-04	2E-05	2E-10	2E-08	6E-07	1E-06	2E-09	0E+00	0E+00	0E+00	2E-03	**3E-03**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	0E+00	1E-06	3E-08	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	0E+00	1E-06	3E-08	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	3E-08	1E-06	3E-08	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	**1E-06**
10 500	0E+00	3E-05	4E-06	3E-06	0E+00	2E-08	2E-07	1E-06	3E-08	0E+00	0E+00	0E+00	3E-03	**3E-03**
11 500	0E+00	7E-05	1E-05	7E-06	2E-09	2E-08	2E-07	1E-06	3E-08	0E+00	0E+00	0E+00	4E-03	**4E-03**
12 500	0E+00	7E-04	5E-04	7E-05	2E-09	4E-08	2E-06	1E-06	3E-08	0E+00	0E+00	0E+00	6E-03	**6E-03**
14 160	0E+00	8E-04	7E-04	8E-05	2E-09	1E-07	2E-06	1E-06	3E-08	0E+00	0E+00	0E+00	7E-03	**7E-03**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**1E-04**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**3E-05**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au GRD 282,625. Elle est de 1.10^{-4}, ce qui correspond à un événement improbable (classe C, limite classe C/D) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.).

L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 14 160 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue, dont le débit serait très

sensiblement supérieur à 14 160 m^3/s, compte tenu du plafonnement des lignes d'eau lié aux déversements entre Beaucaire et Arles pour des crues supérieures à 11 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 3.10^{-5}, ce qui correspond à un événement très improbable (classe D) ;
- un risque acceptable
- une crue de sûreté de 14 160 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 14 160 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 14 160 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 % des probabilités maximales

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 14 160 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Jusqu'à une crue de 9 500 m^3/s, la formation de brèche est quasiment impossible. A partir de 10 500 m^3/s cela devient très peu probable.

Le principal risque est l'instabilité du muret et en particulier au niveau des batardeaux, le risque est localisé autour du GRD 282.625 où 6 batardeaux sont présents, ce qui induit une probabilité de mauvaise mise en œuvre plus importante, mais qui demeure acceptable.

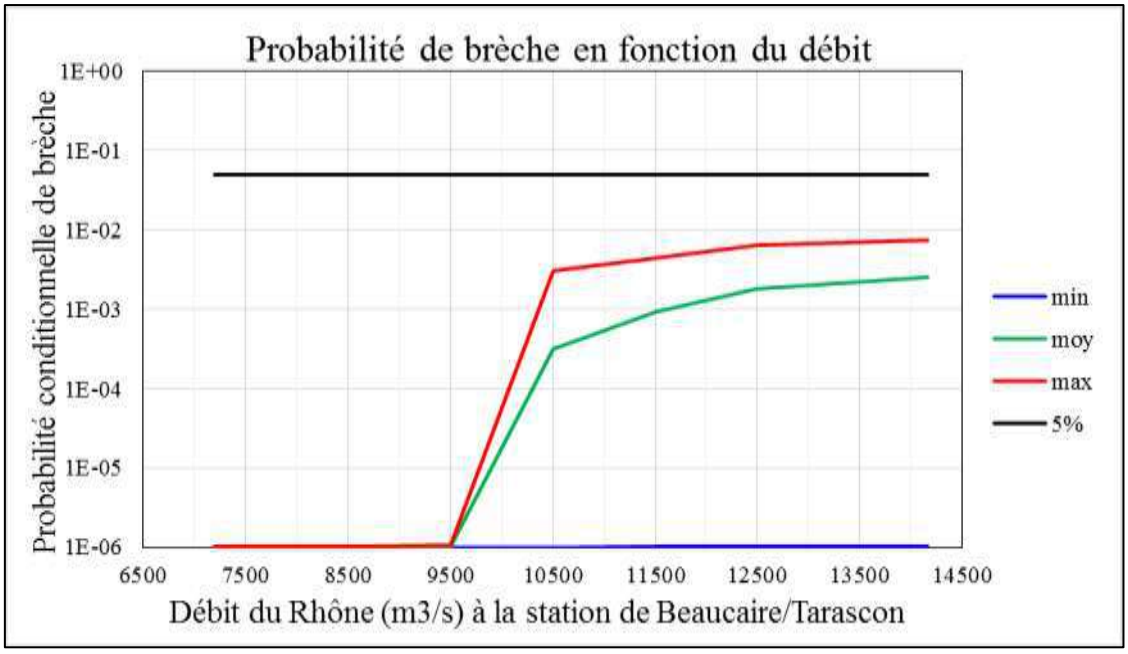


Figure 32 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Quais d'Arles

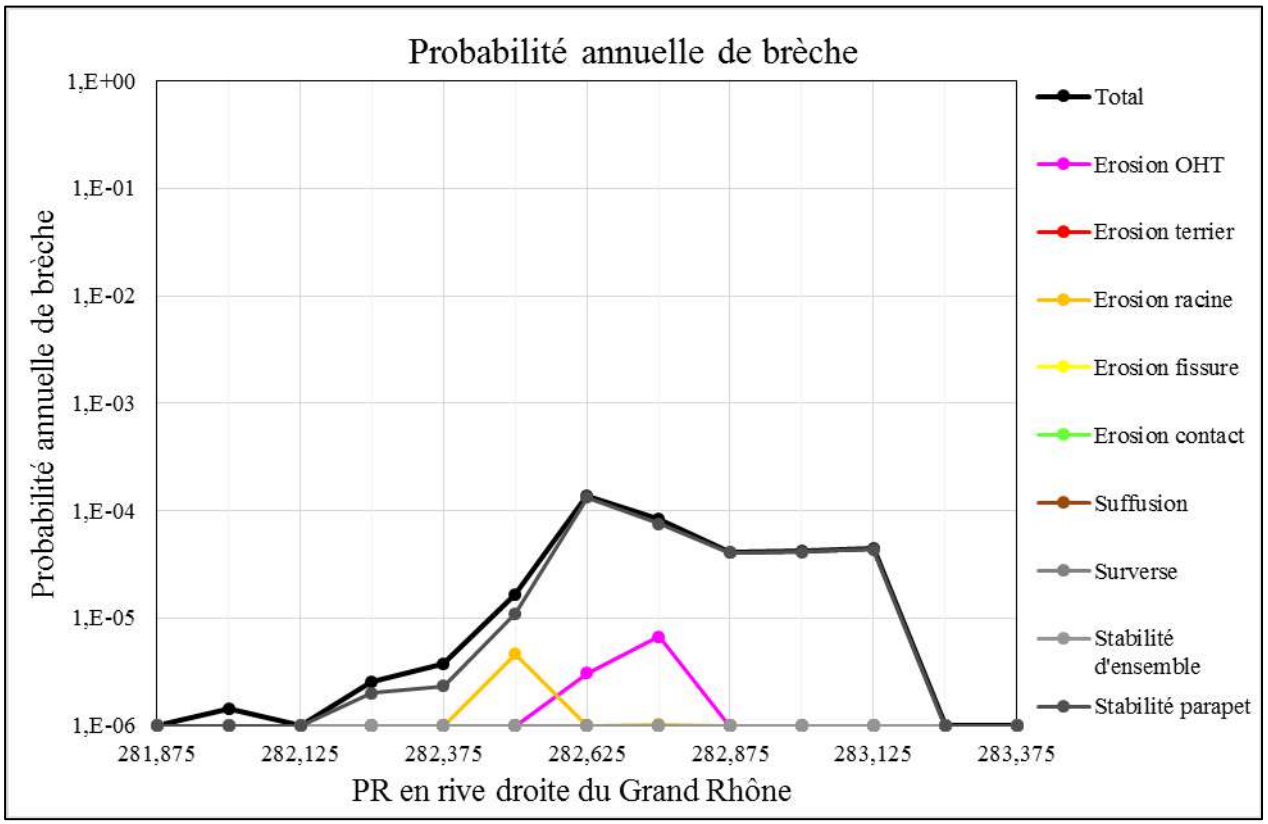


Figure 33 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Quais d'Arles

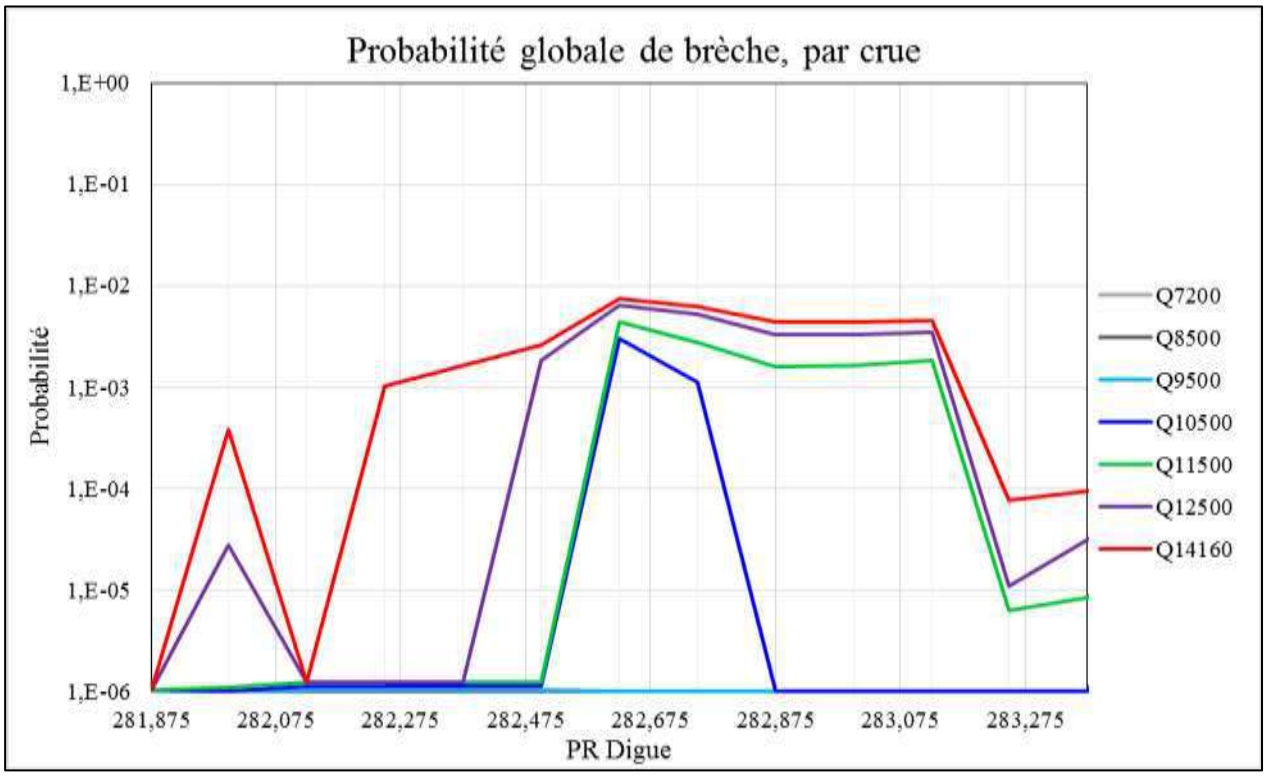


Figure 34 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Quais d'Arles

3.5 PAPETERIES ETIENNE (GRD2)

Le tronçon des papèteries mesure 800 m, il comprend les PR0.125 compris entre GRD 283.5 et 284.125; la digue a été intégralement démontée et reconstruite en 2013/2014 et est à présent carrossable.

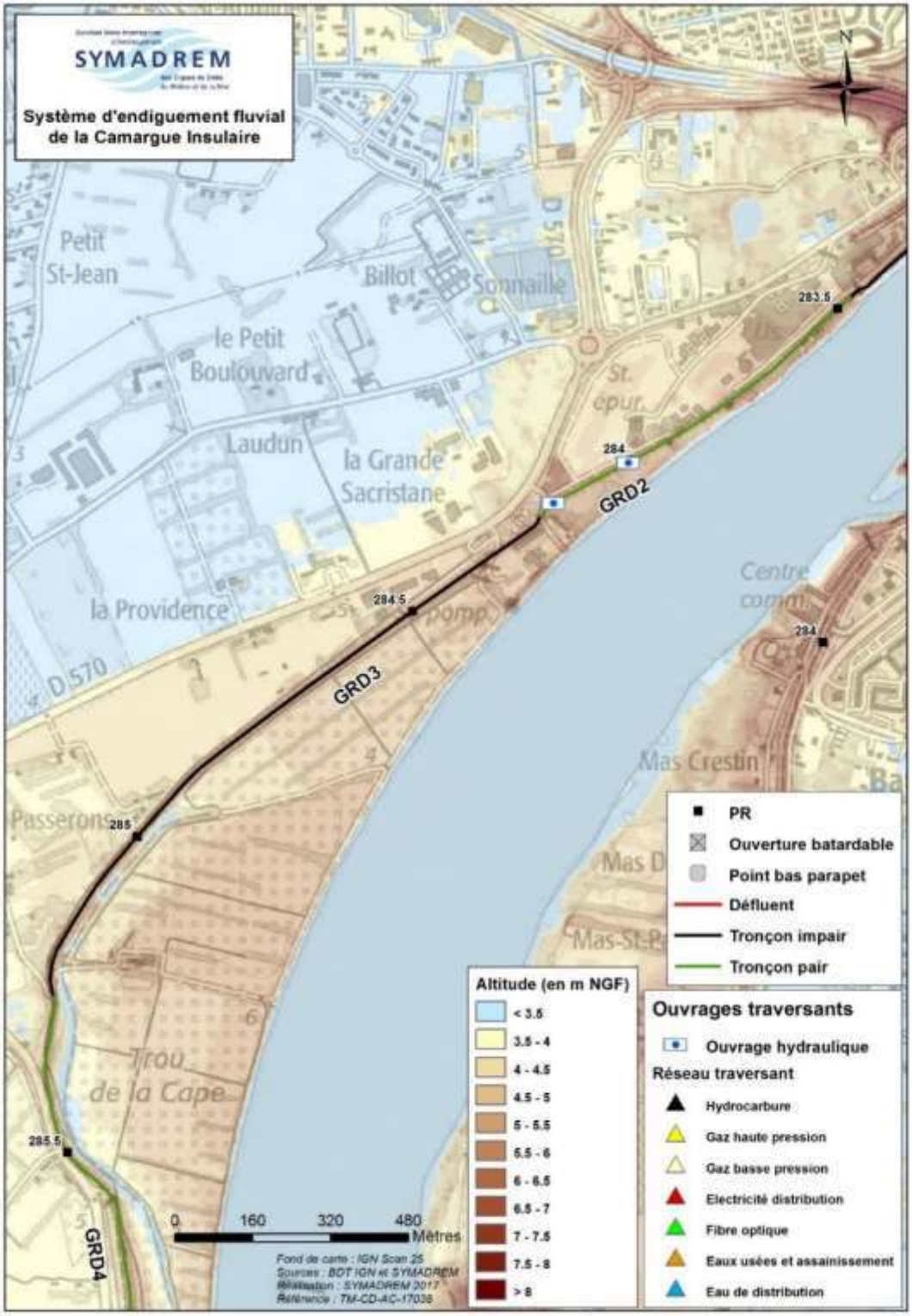


Figure 35. Plan de situation des Papèteries Etienne

Tableau 37. Synthèse de géométrie, tronçon des papèteries

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	8,3	8,3	8,3	0,0
Cote de pied de digue aval	m NGF	5,8	4,9	5,2	0,3
Cote à 20m du pdav	m NGF	7,2	4,1	5,2	1,0
Cote de pied de digue amont	m NGF	6,6	5,6	6,0	0,4
Cote à 20m du pdam	m NGF	5,9	4,5	5,3	0,4
Hauteur de digue coté aval	m	3,5	2,5	3,1	0,3
Hauteur de digue côté amont	m	2,7	1,7	2,3	0,4
Fruit aval	L/V	2,5	2,1	2,3	0,2
Fruit amont	L/V	2,3	2,0	2,2	0,1
Largeur du ségonnal	m	82	29	43	21

Ce tronçon est éloigné du Rhône.

Tableau 38. Données hydrauliques, tronçon des papèteries

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	5,0	5,0	3,3	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
8 500	5,7	5,7	2,6	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9
9 500	6,1	6,1	2,2	2,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,8
10 500	6,4	6,5	1,8	1,8	0,1	0,1	0,0	0,0	0,7
11 500	7,0	7,0	1,3	1,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
12 500	7,2	7,3	1,0	1,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
14 160	7,3	7,4	0,9	0,9	0,1	0,1	0,0	0,0	0,4

Caractéristiques du tronçon des papèteries vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une nouvelle digue en matériaux mixtes, avec grillage anti-fouisseurs. Concernant le claquage hydraulique, la digue est neuve. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il y a plusieurs ouvrages hydrauliques sur ce tronçon, celui qui présente la transition la plus à risque comprend une structure rigide réalisée sur l'ensemble de la traversée. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il y a un filtre sableux correctement dimensionné à l'aval des ouvrages traversants.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : jusqu'à 0,01
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 0,01
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit – racine
Il s'agit d'une nouvelle digue. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit – fissure
L'ouvrage est une nouvelle digue. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive
L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable de classe 5 en fondation. Cette couche, dont le toit est à 1 m de profondeur, mesure 5 m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact
La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon la digue il y a eu un départ de brèche en 1856 mais elle a entièrement été démontée et reconstruite. Concernant le claquage hydraulique, la digue est neuve. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : 0,001
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne
L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue a été démontée et reconstruite. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : 0,001
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse
En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre, conforté récemment.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre, confortée récemment

Scénario de brèche 9 : Affouillement
La largeur minimum du ségonnal est de 30 m et la pente hydraulique est nulle pour les fortes crues et faible pour les plus petites : 5cm/km ; la berge est recouverte d'herbacés.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge herbacée

Tableau 39. Résultats des calculs de probabilité, tronçon des papèteries

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			1E-06
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			1E-06
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			1E-06
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			1E-06
11 500	7E-08	0E+00	1E-05	6E-06	0E+00	2E-11	2E-10	1E-06	4E-13	1E-06	6E-06			2E-05
12 500	7E-08	0E+00	1E-05	7E-06	2E-09	2E-11	5E-10	1E-06	4E-13	1E-06	6E-06			3E-05
14 160	7E-08	0E+00	1E-05	7E-06	2E-09	2E-11	8E-10	1E-06	4E-13	1E-06	6E-06			3E-05

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	7E-10	0E+00	0E+00	1E-06	6E-13	0E+00	0E+00			1E-06
8 500	2E-08	1E-07	3E-06	2E-06	2E-09	8E-12	0E+00	1E-06	6E-13	5E-07	3E-06			9E-06
9 500	3E-08	2E-07	4E-06	3E-06	2E-09	1E-11	1E-11	1E-06	6E-13	7E-07	4E-06			1E-05
10 500	5E-08	3E-07	7E-06	4E-06	2E-09	1E-11	6E-11	1E-06	6E-13	7E-07	4E-06			2E-05
11 500	4E-07	1E-06	6E-05	4E-05	1E-08	9E-11	1E-09	1E-06	6E-13	1E-06	6E-06			1E-04
12 500	5E-07	1E-06	8E-05	5E-05	2E-08	1E-10	3E-09	1E-06	6E-13	1E-06	6E-06			1E-04
14 160	6E-07	1E-06	8E-05	6E-05	2E-08	1E-10	4E-09	1E-06	6E-13	1E-06	6E-06			1E-04

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			1E-06
8 500	4E-08	4E-07	6E-06	4E-06	2E-09	2E-11	0E+00	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			2E-05
9 500	5E-08	5E-07	7E-06	5E-06	2E-09	2E-11	2E-11	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			2E-05
10 500	1E-07	1E-06	2E-05	1E-05	5E-09	4E-11	2E-10	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			4E-05
11 500	6E-07	6E-06	9E-05	6E-05	2E-08	1E-10	3E-09	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			2E-04
12 500	7E-07	7E-06	1E-04	7E-05	2E-08	2E-10	7E-09	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			2E-04
14 160	7E-07	7E-06	1E-04	7E-05	2E-08	2E-10	9E-09	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			2E-04

Probabilité annuelle maximale de brèche:	6E-06
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	4E-06

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe à l'aval. Elle est de 6.10^{-6}, ce qui correspond à un événement très possible mais très peu probable (classe E) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque acceptable ($< 10^{-4}$) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4).
L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 14 160 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue, dont le débit serait très sensiblement supérieur à 14 160 m^3/s, compte tenu du plafonnement des lignes d'eau lié aux déversements entre Beaucaire et Arles pour des crues supérieures à 10 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 4.10^{-6}, ce qui correspond à un événement possible mais extrêmement peu probable (classe E) ;
- un risque acceptable (< 10^{-4}) au regard des enjeux ;
- une crue de sûreté de 14 160 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 14 160 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 14 160 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 % des probabilités maximales

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 14 160 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le risque résiduel de brèche est l'érosion interne.

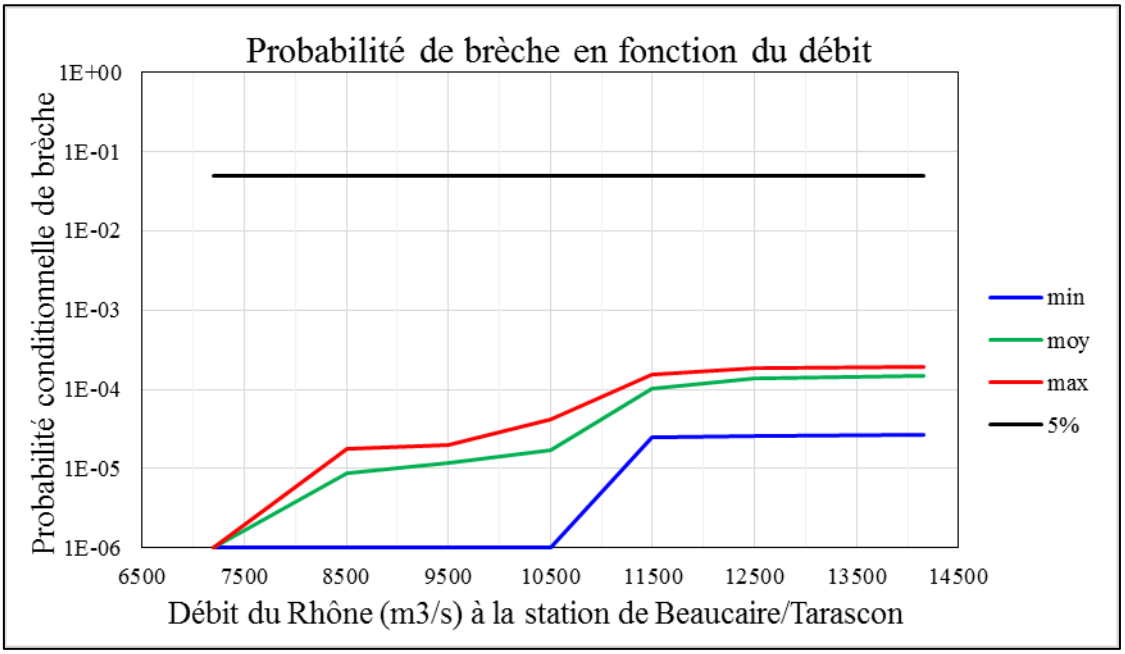


Figure 35 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon des papèteries

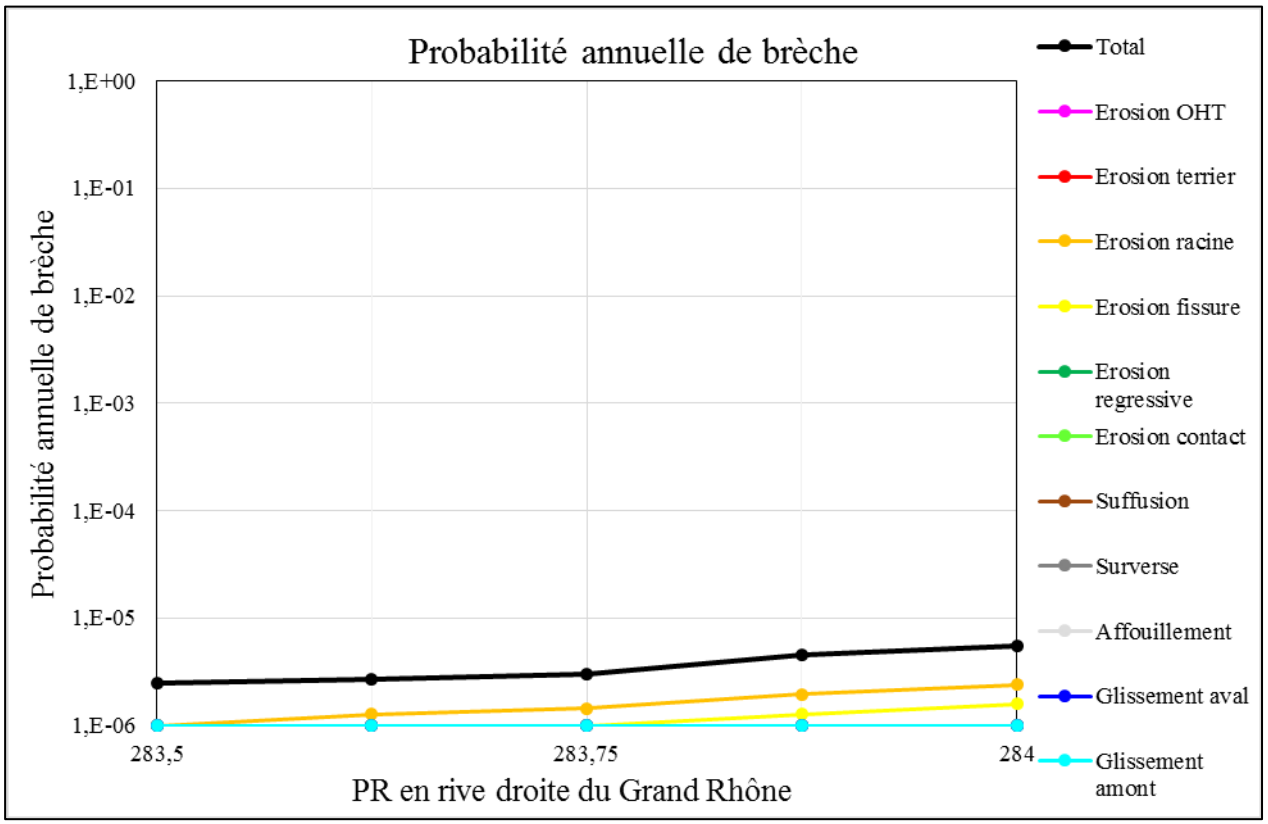


Figure 36 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon des papèteries

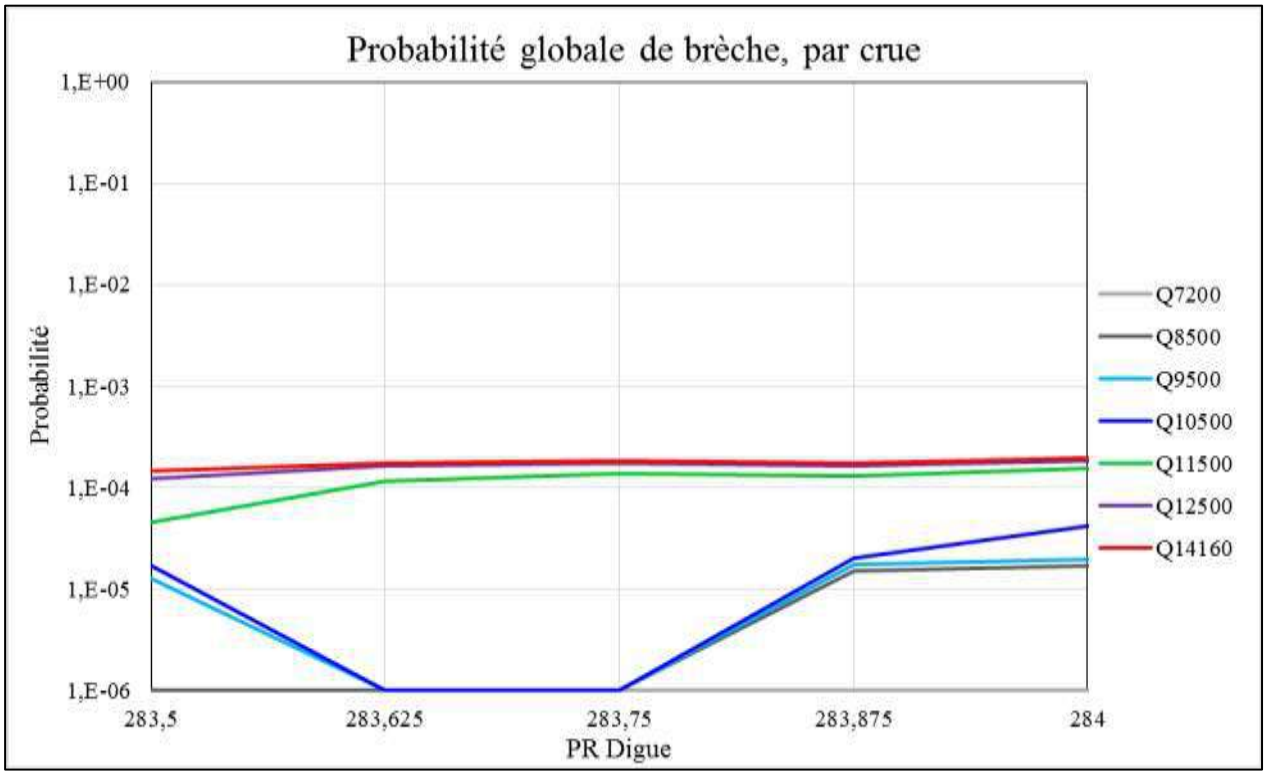


Figure 37 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon des papèteries

3.6 DIGUE D'EMMAÜS-PASSERONS (GRD3)

Le tronçon Emmaüs-Passerons mesure 1.5 km, il comprend les PR0.125 compris entre GRD 284.25 et 285.25; ce tronçon, conforté en 1998, est intégralement carrossable.

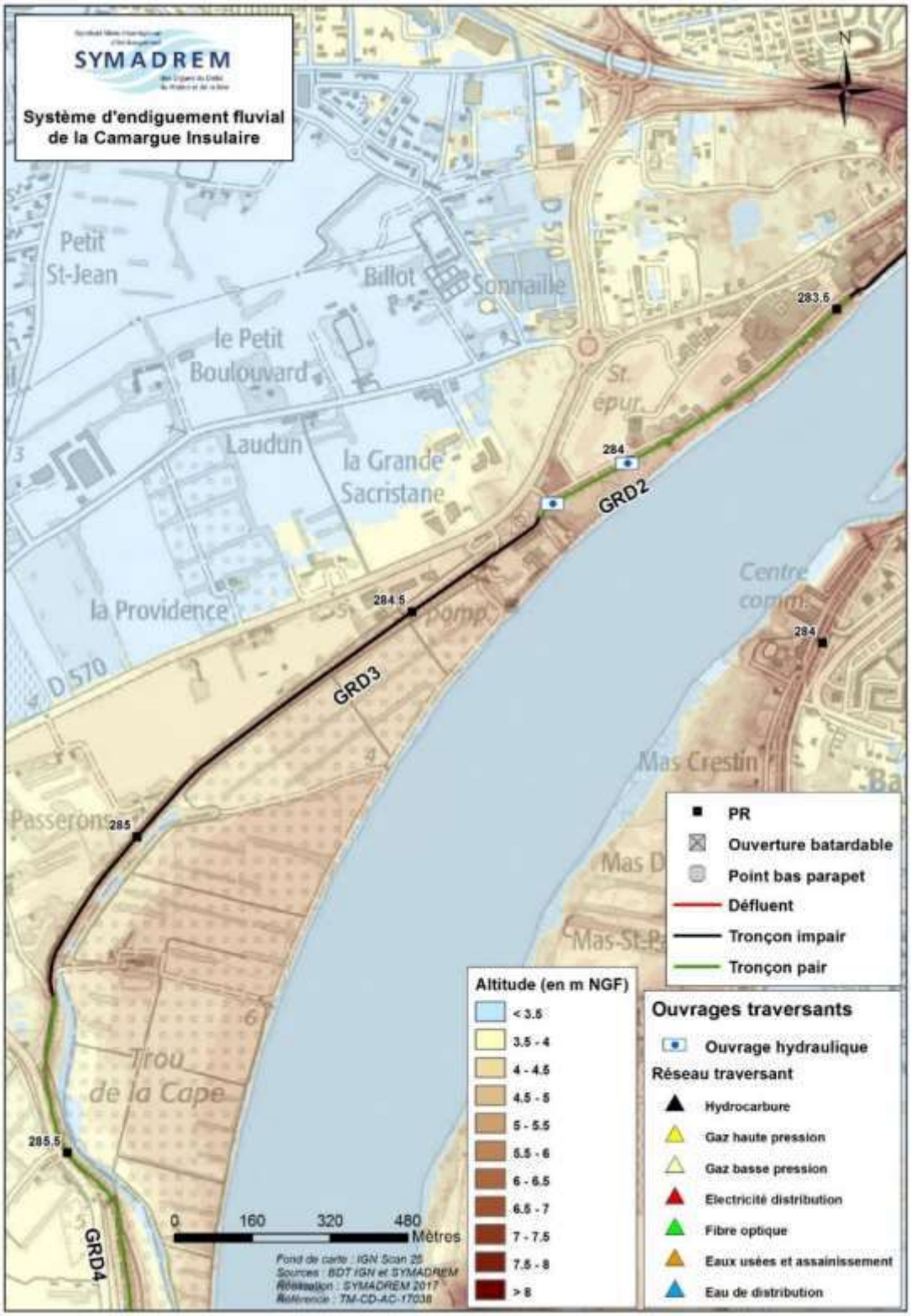


Figure 36. Plan de situation de la digue d'Emmaüs-Passerons

Tableau 40. Synthèse de géométrie, tronçon Emmaüs-Passerons

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	8,5	8,2	8,3	0,1
Cote de pied de digue aval	m NGF	6,2	4,6	5,1	0,5
Cote à 20m du pdav	m NGF	5,1	3,7	4,5	0,4
Cote de pied de digue amont	m NGF	6,1	4,6	5,4	0,5
Cote à 20m du pdam	m NGF	5,4	2,1	4,2	1,4
Hauteur de digue coté aval	m	3,8	2,4	3,3	0,4
Hauteur de digue côté amont	m	3,6	2,3	2,9	0,4
Fruit aval	L/V	2,2	1,8	2,0	0,1
Fruit amont	L/V	2,2	1,9	2,1	0,1
Largeur du ségonnal	m	454	101	280	133

Ce tronçon est situé à plus de 100m du lit mineur du Rhône.

Tableau 41. Données hydrauliques, tronçon Emmaüs-Passerons

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	5,0	4,9	3,2	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9
8 500	5,7	5,7	2,4	2,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
9 500	6,1	6,1	2,0	2,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,6
10 500	6,5	6,5	1,7	1,9	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
11 500	7,0	7,0	1,1	1,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,4
12 500	7,2	7,2	0,9	1,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,3
14 160	7,3	7,3	0,8	1,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,3

Caractéristiques du tronçon Emmaüs-Passerons vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a un masque en matériaux mixtes côté amont et un engraissement côté aval, avec grillage. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne mais il y a eu une recharge aval, le bouchon considéré est alors de 4m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 4 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 0,1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il n'y a pas de réseau ou d'ouvrage connu sur ce tronçon.

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit – racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue récemment confortée. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 0,1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit – fissure
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue récemment confortée. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 0,1

- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable de classe 5 en fondation et localement du sable propre. La couche de sable, dont le toit est à 3 m de profondeur, mesure 5 m d'épaisseur. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 0,1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il n'y a pas de brèches connues. Concernant le claquage hydraulique, la digue est confortée. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : 0,001
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 0,1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue a été confortée. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne mais il y a eu une recharge aval, le bouchon considéré est alors de 4m. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 4 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 0,1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre, conforté récemment.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre, conforté récemment.

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 100 m et la pente hydraulique est de 0 à 11 cm/km ; la berge est recouverte d'herbacés.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge herbacée

Tableau 42. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Emmaüs-Passerons

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			1E-06
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-10	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			1E-06
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-10	2E-12	2E-12	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			1E-06
10 500	3E-08	0E+00	4E-07	3E-07	2E-10	2E-12	4E-12	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			8E-06
11 500	5E-08	0E+00	7E-07	5E-07	2E-10	2E-12	5E-11	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			9E-06
12 500	2E-07	0E+00	3E-06	2E-06	8E-10	6E-12	3E-10	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			1E-05
14 160	4E-07	0E+00	6E-06	4E-06	1E-09	1E-11	6E-10	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			2E-05

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	3E-09	0E+00	4E-08	2E-08	9E-10	2E-13	0E+00	1E-06	1E-12	1E-07	6E-07			2E-06
8 500	3E-08	0E+00	4E-07	3E-07	1E-09	1E-12	0E+00	1E-06	1E-12	7E-07	4E-06			6E-06
9 500	1E-07	0E+00	7E-07	4E-07	1E-09	2E-12	2E-12	1E-06	1E-12	9E-07	5E-06			8E-06
10 500	3E-05	0E+00	3E-06	2E-06	4E-09	5E-12	4E-11	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			4E-05
11 500	2E-04	0E+00	8E-06	5E-06	9E-09	2E-10	4E-10	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			2E-04
12 500	3E-04	0E+00	1E-05	7E-06	9E-09	3E-09	1E-09	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			3E-04
14 160	4E-04	0E+00	1E-05	7E-06	9E-09	1E-08	1E-09	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			4E-04

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	2E-08	0E+00	3E-07	2E-07	2E-09	2E-12	0E+00	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			8E-06
8 500	5E-08	0E+00	8E-07	5E-07	2E-09	2E-12	0E+00	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			9E-06
9 500	6E-07	0E+00	1E-06	7E-07	2E-09	2E-12	4E-12	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			1E-05
10 500	3E-04	0E+00	6E-06	4E-06	1E-08	1E-11	1E-10	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			3E-04
11 500	7E-04	0E+00	1E-05	7E-06	2E-08	2E-09	8E-10	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			7E-04
12 500	8E-04	0E+00	1E-05	8E-06	2E-08	3E-08	2E-09	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			8E-04
14 160	8E-04	0E+00	1E-05	9E-06	2E-08	8E-08	2E-09	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06			8E-04

Probabilité annuelle maximale de brèche:	2E-05
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	6E-06

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au GRD 285. Elle est de 2.10^{-5}, ce qui correspond à un événement très improbable (classe D) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque acceptable ($< 10^{-4}$) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4).
L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 14 160 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue, dont le débit serait très sensiblement supérieur à 14 160 m^3/s, compte tenu du plafonnement des lignes d'eau lié aux déversements entre Beaucaire et Arles pour des crues supérieures à 11 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 6.10^{-6}, ce qui correspond à un événement possible mais extrêmement peu probable (classe E) ;
- un risque acceptable (< 10^{-4}) au regard des enjeux ;
- une crue de sûreté de 14 160 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 14 160 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 14 160 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 % des probabilités maximales

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 14 160 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le risque résiduel est l'érosion de conduit, au niveau d'un terrier.

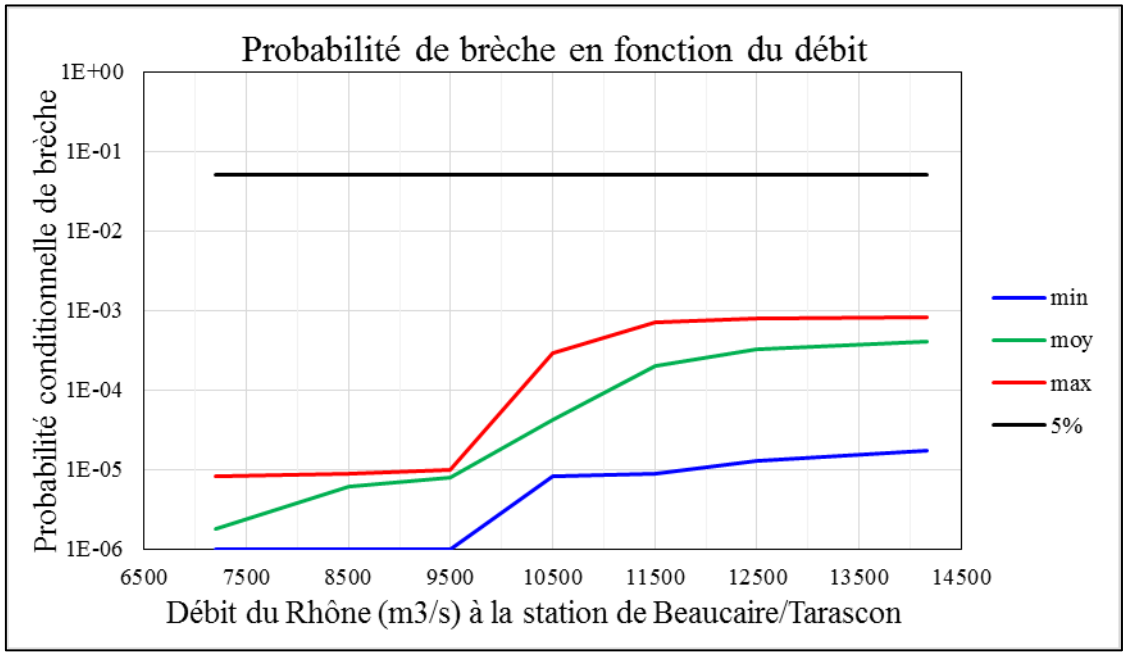


Figure 38 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Emmaüs-Passerons

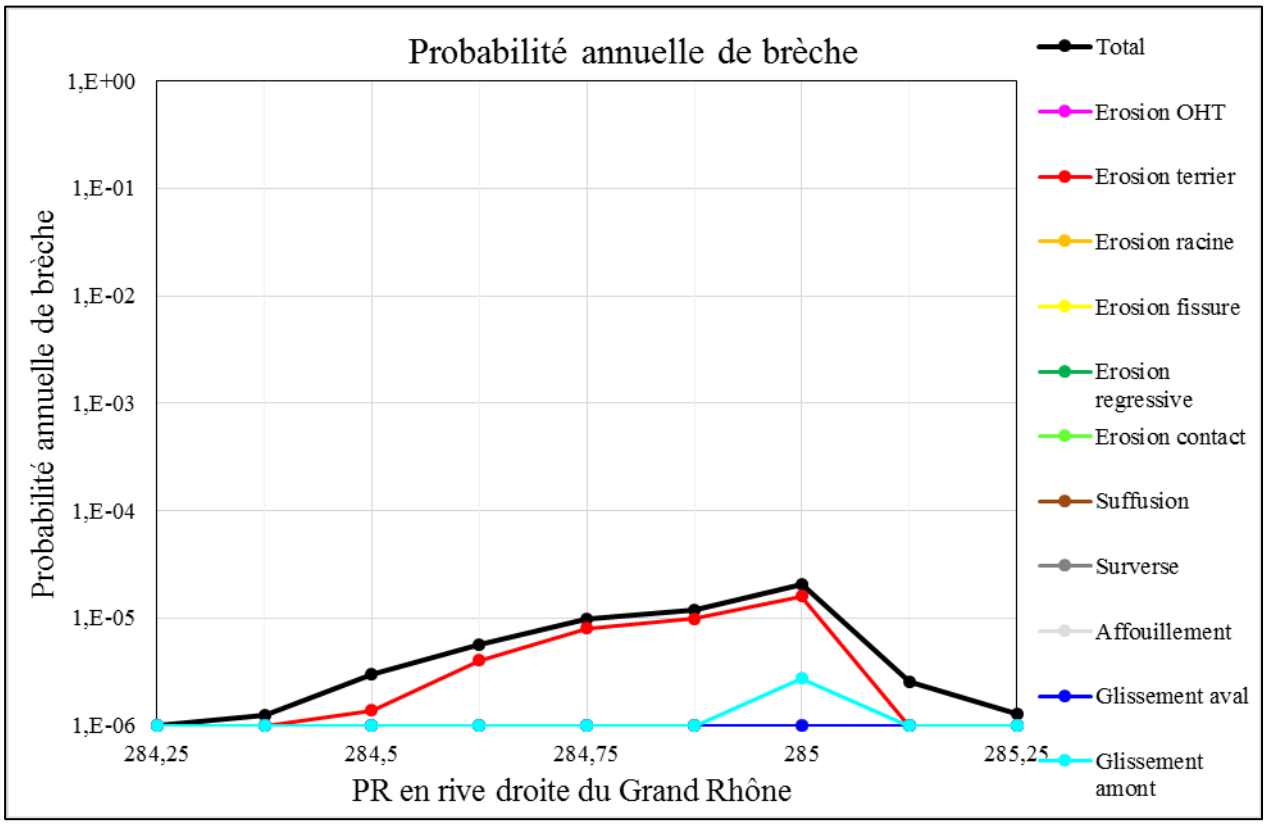


Figure 39 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Emmaüs-Passerons

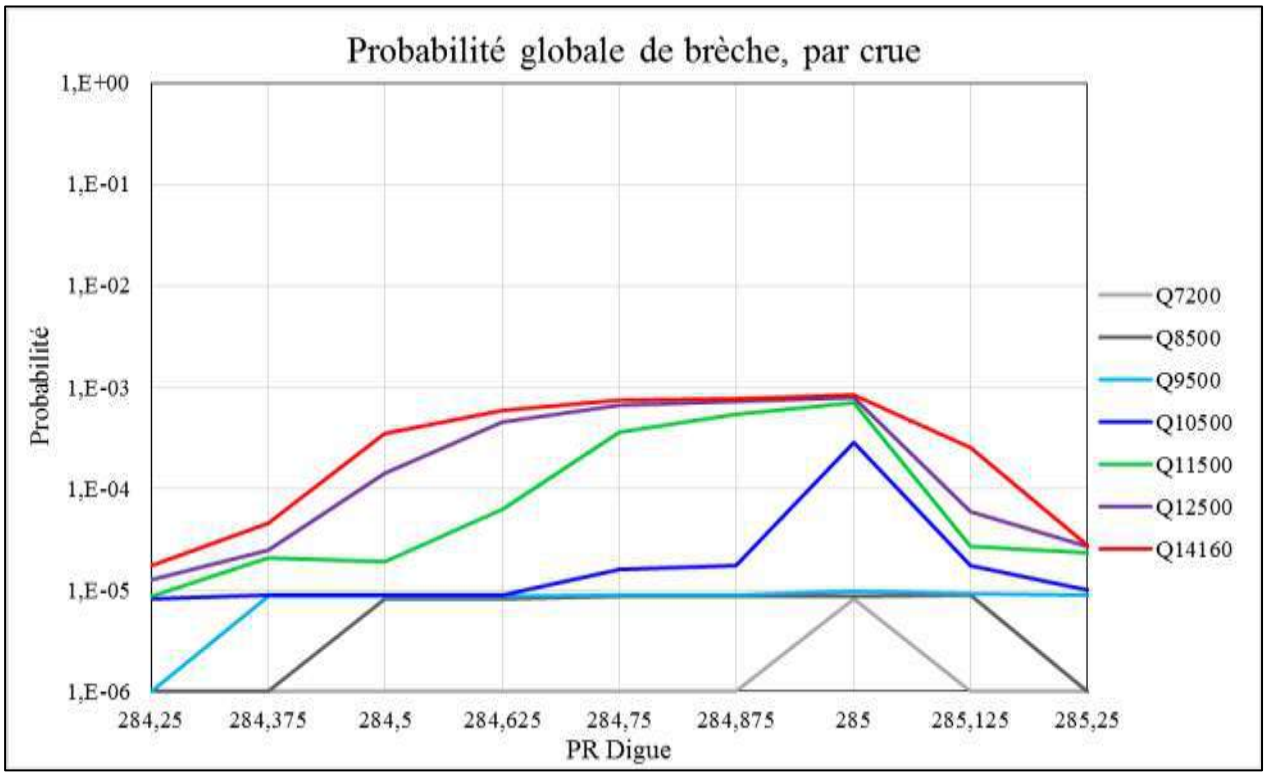


Figure 40 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Emmaüs-Passerons

3.7 DIGUE DE PASSERONS-MONTLONG (GRD4)

Le tronçon Passerons-Montlong mesure 3.3 km, il comprend les PR0.125 compris entre GRD 285.375 et 288; conforté en 2004, il est intégralement carrossable.

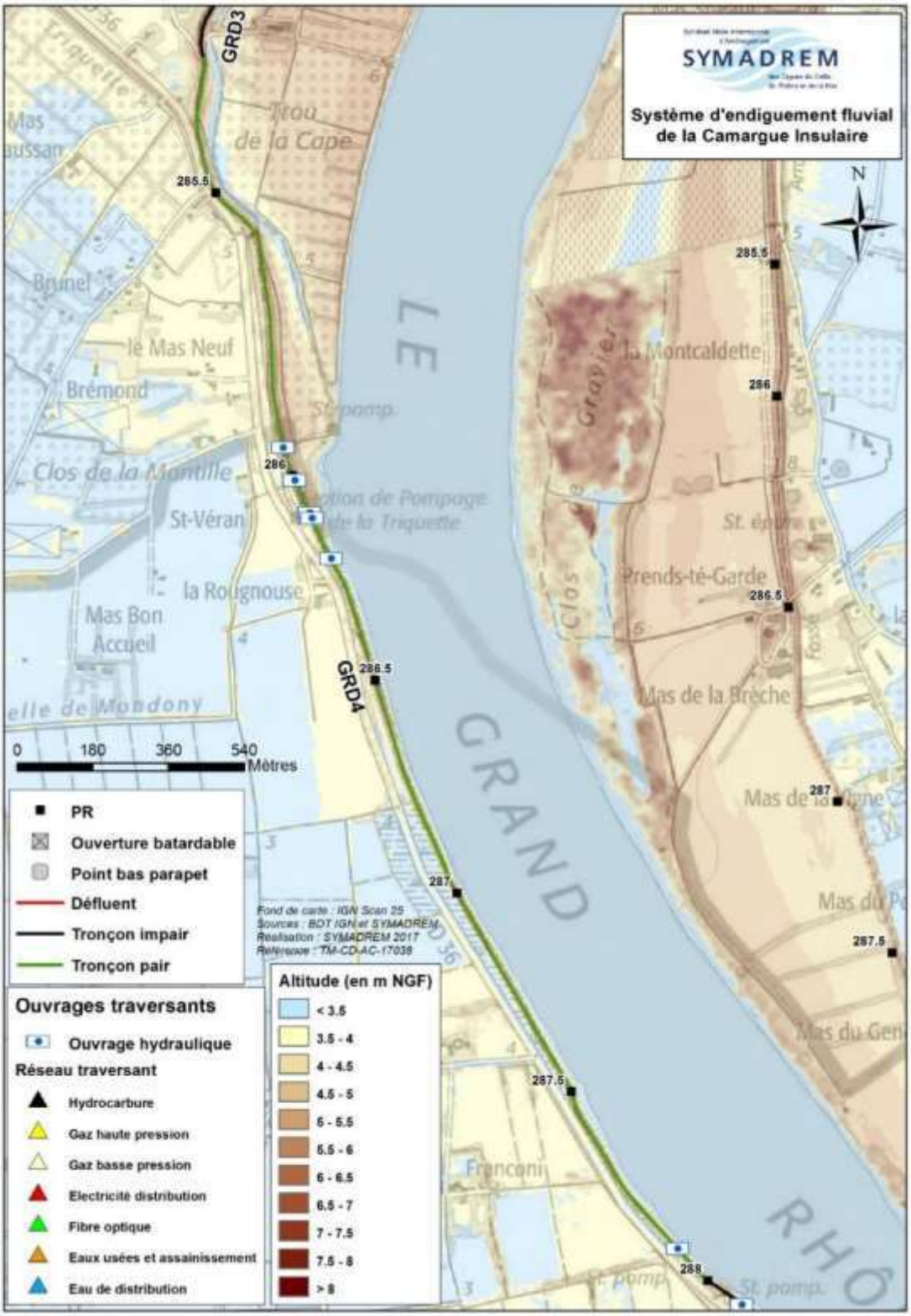


Figure 37. Plan de situation de Passerons à Grande Montlong

Tableau 43. Synthèse de géométrie, tronçon Passerons-Montlong

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	8,5	7,7	8,0	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	6,1	3,7	4,6	0,6
Cote à 20m du pdav	m NGF	4,5	2,6	3,9	0,5
Cote de pied de digue amont	m NGF	6,2	2,6	4,1	1,3
Cote à 20m du pdam	m NGF	5,2	0,7	1,9	1,8
Hauteur de digue coté aval	m	4,6	2,1	3,4	0,6
Hauteur de digue côté amont	m	5,4	2,0	3,9	1,1
Fruit aval	L/V	2,5	1,7	2,0	0,2
Fruit amont	L/V	4,0	1,8	2,1	0,4
Largeur du ségonnal	m	420	6	72	116

Ce tronçon se rapproche du Rhône vers le GRD 286, sa bathymétrie peut atteindre -13 m NGF dans la zone de faible ségonnal.

Tableau 44. Données hydrauliques, tronçon Passerons-Montlong

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	4,9	4,6	3,0	3,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,9
8 500	5,7	5,4	2,2	2,4	0,1	0,0	0,1	0,0	0,7
9 500	6,1	5,8	1,9	2,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,6
10 500	6,4	6,1	1,5	1,7	0,1	0,1	0,1	0,0	0,5
11 500	7,0	6,7	1,0	1,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,4
12 500	7,2	6,9	0,7	0,9	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3
14 160	7,4	7,1	0,6	0,7	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2

Caractéristiques du tronçon Passerons-Montlong vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur

La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a un masque en matériaux A2 côté amont et un engraissement côté aval, avec grillage. Concernant le claquage hydraulique, la digue est confortée. La résistance est réalisée par un masque en matériaux A2. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01
- Probabilité de claquage hydraulique : 0,01
- Probabilité d'initiation : loi relative au masque A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant

Il y a plusieurs ouvrages hydrauliques sur ce tronçon, celui qui présente la transition la plus à risque comprend un mur en retour au dimensionnement incertain. La résistance est réalisée par un masque en matériaux A2. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité d'initiation : loi relative au masque A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit – racine

Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue récemment confortée. La résistance est réalisée par un masque en matériaux A2. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative au masque A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit – fissure

Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue récemment confortée. La résistance est réalisée par un masque en matériaux A2. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative au masque A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable de classe 5 en fondation. La couche de sable, dont le toit est à 2 m de profondeur, mesure 1 m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon les départs de brèches, apparus en 1856, ont été entièrement repris. Concernant le claquage hydraulique, la digue est confortée. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : 0,001
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne
L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue a été confortée. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : 0,001
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse
En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre, conforté récemment.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre, conforté récemment

Scénario de brèche 9 : Affouillement
La largeur minimum du ségonnal est de 6m et la pente hydraulique est de 10-11 cm/km suivant le type de crue ; la berge est protégée par des palplanches plus enrochements dans les zones de faible ségonnal.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge avec enrochement

Tableau 45. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Passerons-Montlong

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-10	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00	0E+00		**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-10	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00	0E+00		**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-10	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00	0E+00		**1E-06**
10 500	1E-09	0E+00	1E-07	1E-07	2E-10	2E-11	2E-11	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06	0E+00		**8E-06**
11 500	5E-08	0E+00	1E-07	1E-07	2E-10	2E-11	4E-10	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06	0E+00		**1E-05**
12 500	1E-06	0E+00	7E-07	7E-07	1E-09	1E-10	2E-09	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06	0E+00		**1E-05**
14 160	2E-06	0E+00	9E-07	9E-07	2E-09	1E-10	3E-09	1E-06	1E-12	1E-06	6E-06	0E+00		**1E-05**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	1E-09	0E+00	5E-08	5E-08	4E-09	1E-11	0E+00	1E-06	1E-07	6E-07	3E-06	9E-08		**5E-06**
8 500	4E-08	5E-08	8E-08	8E-08	4E-09	8E-11	0E+00	1E-06	1E-07	7E-07	4E-06	9E-08		**6E-06**
9 500	4E-07	9E-08	2E-07	2E-07	8E-09	3E-10	8E-11	1E-06	1E-07	9E-07	5E-06	9E-08		**8E-06**
10 500	2E-06	6E-07	5E-07	5E-07	2E-07	3E-09	1E-09	1E-06	1E-07	1E-06	6E-06	9E-08		**1E-05**
11 500	4E-06	1E-06	9E-07	9E-07	2E-06	2E-08	1E-08	1E-06	1E-07	1E-06	6E-06	9E-07		**2E-05**
12 500	6E-06	4E-06	1E-06	1E-06	3E-06	3E-08	2E-08	1E-06	1E-07	1E-06	6E-06	9E-06		**3E-05**
14 160	6E-06	5E-06	1E-06	1E-06	3E-06	3E-08	3E-08	1E-06	1E-07	1E-06	6E-06	9E-06		**3E-05**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	8E-09	0E+00	1E-07	1E-07	2E-08	2E-11	0E+00	1E-06	4E-07	1E-06	6E-06	1E-06		**8E-06**
8 500	3E-07	1E-06	2E-07	2E-07	2E-08	8E-10	0E+00	1E-06	4E-07	1E-06	6E-06	1E-06		**1E-05**
9 500	2E-06	1E-06	7E-07	7E-07	7E-08	3E-09	3E-10	1E-06	4E-07	1E-06	6E-06	1E-06		**1E-05**
10 500	4E-06	1E-05	9E-07	9E-07	2E-06	2E-08	3E-09	1E-06	4E-07	1E-06	6E-06	1E-06		**2E-05**
11 500	8E-06	1E-05	1E-06	1E-06	1E-05	1E-07	2E-08	1E-06	4E-07	1E-06	6E-06	1E-05		**3E-05**
12 500	9E-06	7E-05	1E-06	1E-06	2E-05	1E-07	4E-08	1E-06	4E-07	1E-06	6E-06	1E-04		**1E-04**
14 160	9E-06	9E-05	1E-06	1E-06	2E-05	1E-07	5E-08	1E-06	4E-07	1E-06	6E-06	1E-04		**1E-04**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**4E-06**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**3E-06**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au niveau d'un ouvrage traversant vers le GRD 286. Elle est de 4.10^{-6}, ce qui correspond à un événement possible mais extrêmement peu probable (classe E) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque acceptable (< 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4).

L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 14 160 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue, dont le débit serait très sensiblement supérieur à 14 160 m^3/s, compte tenu du plafonnement des lignes d'eau lié aux déversements entre Beaucaire et Arles pour des crues supérieures à 11 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 3.10^{-6}, ce qui correspond également à un événement possible mais extrêmement peu probable (classe E) ;
- un risque acceptable ($< 10^{-4}$) au regard des enjeux ;
- une crue de sûreté de 14 160 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 14 160 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 14 160 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 % des probabilités maximales

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 14 160 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le risque résiduel est l'érosion le long d'un ouvrage traversant au GRD 286 et la stabilité du mur de soutènement, au droit du GRD 286.25.

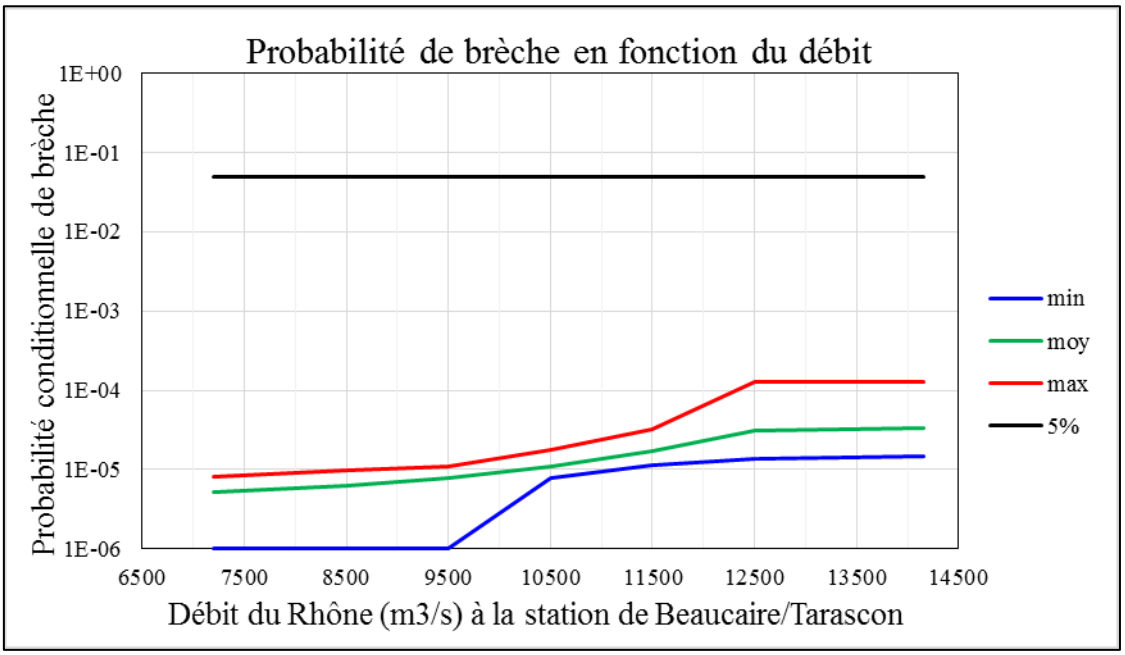


Figure 41 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Passerons-Montlong

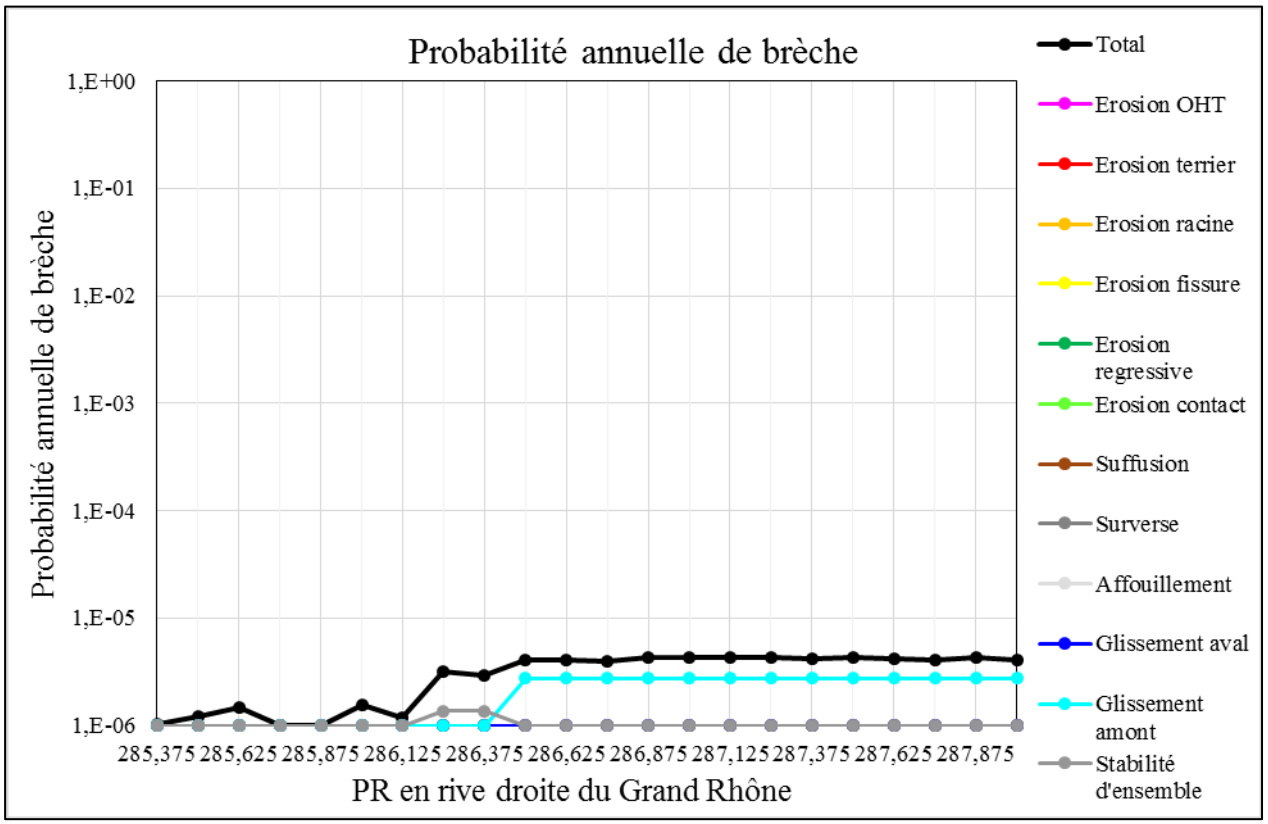


Figure 42 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Passerons-Montlong

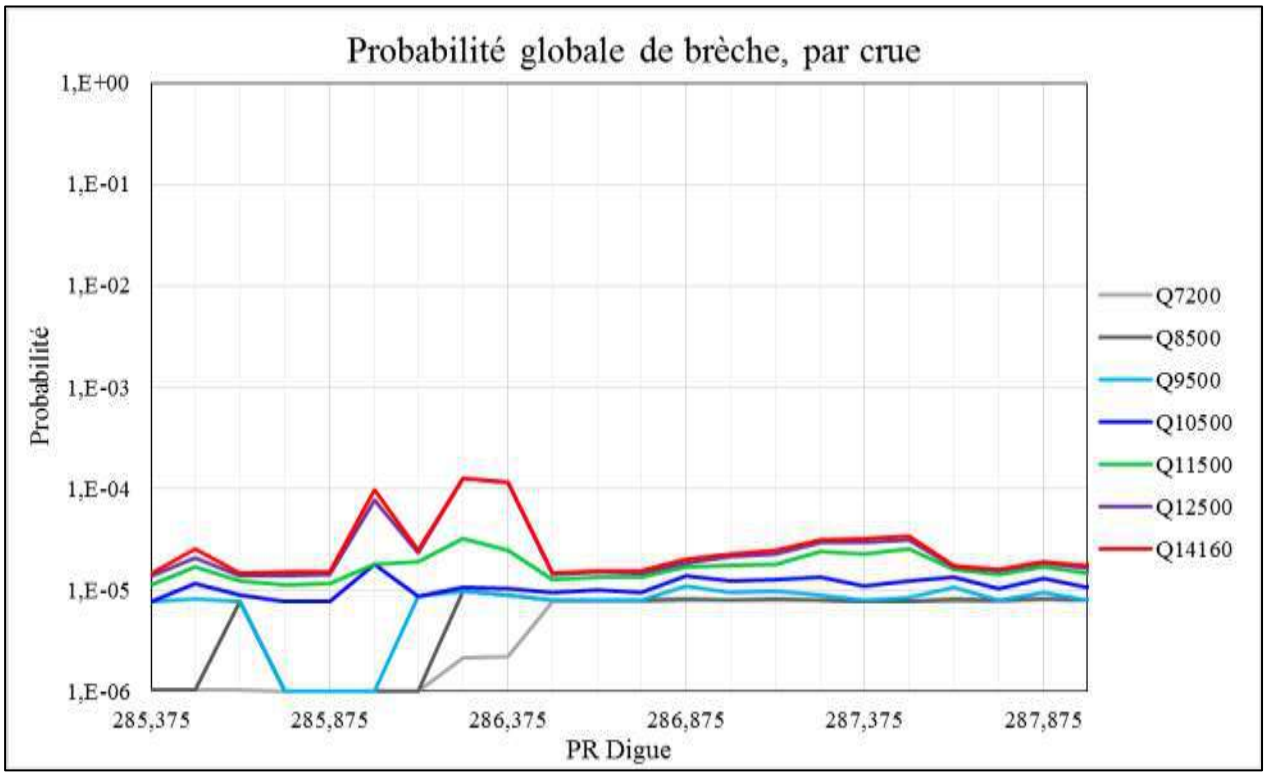


Figure 43 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Passerons-Montlong

3.8 DIGUE DE MONTLONG (GRD5)

Le tronçon Montlong mesure 1km, il comprend les PR0.125 compris entre GRD 288.125 et 288.875 ; conforté en 2006, il est intégralement carrossable.

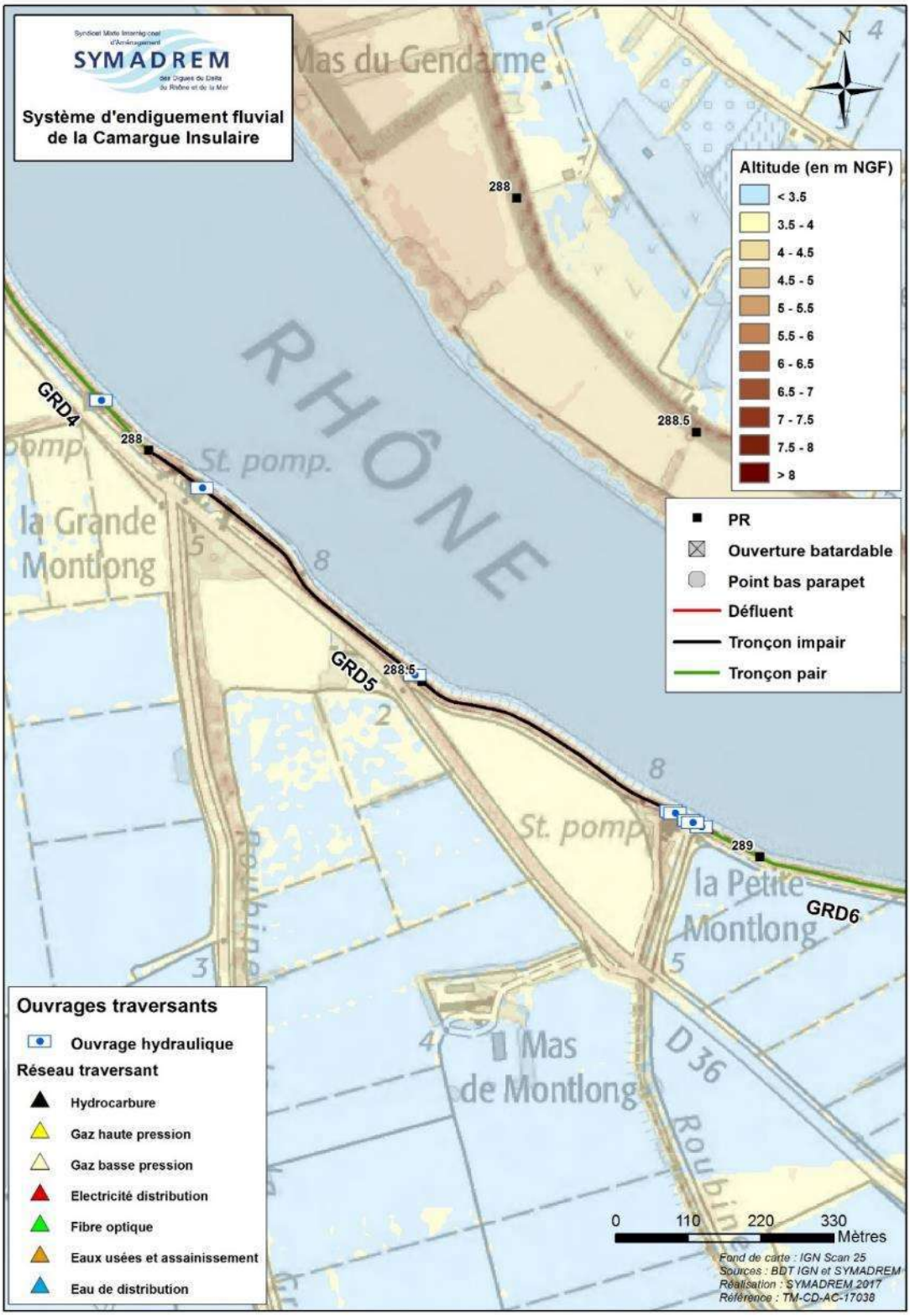


Figure 38. Plan de situation de Grande à Petite Montlong

Tableau 46. Synthèse de géométrie, tronçon Montlong

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	7,7	7,5	7,6	0,1
Cote de pied de digue aval	m NGF	5,5	4,3	4,7	0,4
Cote à 20m du pdav	m NGF	5,2	3,2	4,2	0,6
Cote de pied de digue amont	m NGF	3,0	2,4	2,6	0,2
Cote à 20m du pdam	m NGF	1,6	0,6	0,9	0,3
Hauteur de digue coté aval	m	3,4	2,2	2,9	0,4
Hauteur de digue côté amont	m	5,2	4,6	5,0	0,2
Fruit aval	L/V	2,1	0,8	1,7	0,4
Fruit amont	L/V	2,3	2,1	2,2	0,1
Largeur du ségonnal	m	14	5	9	3

Ce tronçon est le long du Rhône sur toute sa longueur, sa bathymétrie est de -10 m NGF.

Tableau 47. Données hydrauliques, tronçon Montlong

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	4,6	4,5	3,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9
8 500	5,4	5,2	2,2	2,3	0,0	0,0	0,1	0,0	0,7
9 500	5,8	5,6	1,8	1,9	0,1	0,0	0,1	0,0	0,5
10 500	6,1	6,0	1,5	1,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4
11 500	6,6	6,5	1,0	1,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3
12 500	6,9	6,7	0,7	0,8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
14 160	7,0	6,8	0,6	0,7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2

Caractéristiques du tronçon Montlong vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a un masque en matériaux A2 côté amont et un engraissement côté aval, avec grillage. Concernant le claquage hydraulique, la digue est confortée. La résistance à l'érosion est réalisée par un masque en matériaux A2. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative au masque A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il y a plusieurs ouvrages hydrauliques sur ce tronçon, celui qui présente la transition la plus à risque comprend un réseau traversant un écran d'étanchéité. La résistance à l'érosion est réalisée par un masque en matériaux A2. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01
- Probabilité d'initiation : loi relative au masque A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit – racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue récemment confortée. La résistance à l'érosion est réalisée par un masque en matériaux A2. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative au masque A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit – fissure

Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue récemment confortée. La résistance à l'érosion est réalisée par un masque en matériaux A2. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative au masque A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable de classe 5 en fondation. La couche de sable, dont le toit est à 1m de profondeur, mesure 1m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il n'y a pas de brèches connues. Concernant le claquage hydraulique, la digue est confortée. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : 0,001
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue a été confortée. Concernant le claquage hydraulique, la digue est confortée. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative au masque A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre, conforté récemment.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre, confortée récemment

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 6m et la pente hydraulique est de 10 cm/km à l'amont et entre 17 et 33 cm/kmà l'aval ; la berge est protégée par des palplanches plus enrochements dans les zones de faible ségonnal.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge avec enrochement

Tableau 48. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Montlong

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-11	0E+00	1E-06	4E-08	0E+00	0E+00	0E+00		**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-10	8E-11	0E+00	1E-06	4E-08	0E+00	0E+00	0E+00		**1E-06**
9 500	1E-09	0E+00	7E-08	7E-08	2E-10	8E-10	5E-11	1E-06	4E-08	0E+00	6E-06	0E+00		**8E-06**
10 500	1E-08	0E+00	1E-07	1E-07	2E-10	3E-09	3E-10	1E-06	4E-08	0E+00	6E-06	0E+00		**8E-06**
11 500	1E-06	0E+00	7E-07	7E-07	2E-09	6E-08	2E-08	1E-06	4E-08	0E+00	6E-06	0E+00		**1E-05**
12 500	4E-06	0E+00	9E-07	9E-07	2E-09	9E-08	3E-08	1E-06	4E-08	0E+00	6E-06	0E+00		**2E-05**
14 160	5E-06	0E+00	1E-06	1E-06	2E-09	1E-07	4E-08	1E-06	4E-08	0E+00	6E-06	0E+00		**2E-05**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	3E-10	1E-07	2E-08	2E-08	2E-09	1E-09	0E+00	1E-06	3E-07	4E-07	2E-06	2E-06		**6E-06**
8 500	9E-09	4E-07	9E-08	9E-08	2E-09	3E-09	0E+00	1E-06	3E-07	7E-07	5E-06	2E-06		**9E-06**
9 500	8E-08	5E-07	1E-07	1E-07	2E-08	5E-09	7E-11	1E-06	3E-07	9E-07	6E-06	2E-06		**1E-05**
10 500	8E-07	1E-06	3E-07	3E-07	7E-07	2E-08	1E-09	1E-06	3E-07	9E-07	6E-06	2E-06		**1E-05**
11 500	4E-06	4E-06	9E-07	9E-07	4E-06	9E-08	2E-08	1E-06	3E-07	9E-07	6E-06	3E-06		**2E-05**
12 500	6E-06	4E-06	1E-06	1E-06	6E-06	1E-07	4E-08	1E-06	3E-07	9E-07	6E-06	2E-05		**4E-05**
14 160	7E-06	4E-06	1E-06	1E-06	7E-06	1E-07	5E-08	1E-06	3E-07	9E-07	6E-06	2E-05		**4E-05**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	9E-10	8E-07	8E-08	8E-08	2E-09	7E-09	0E+00	1E-06	5E-07	1E-06	6E-06	1E-05		**1E-05**
8 500	3E-08	1E-06	1E-07	1E-07	4E-09	1E-08	0E+00	1E-06	5E-07	1E-06	6E-06	1E-05		**2E-05**
9 500	2E-07	2E-06	2E-07	2E-07	7E-08	1E-08	1E-10	1E-06	5E-07	1E-06	6E-06	1E-05		**2E-05**
10 500	2E-06	7E-06	7E-07	7E-07	4E-06	3E-08	3E-09	1E-06	5E-07	1E-06	6E-06	1E-05		**2E-05**
11 500	7E-06	1E-05	1E-06	1E-06	2E-05	1E-07	3E-08	1E-06	5E-07	1E-06	6E-06	1E-05		**4E-05**
12 500	9E-06	1E-05	1E-06	1E-06	2E-05	2E-07	6E-08	1E-06	5E-07	1E-06	6E-06	1E-04		**1E-04**
14 160	9E-06	1E-05	1E-06	1E-06	2E-05	2E-07	7E-08	1E-06	5E-07	1E-06	6E-06	1E-04		**1E-04**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**7E-06**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**4E-06**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe à l'extrémité aval, vers le GRD 288.875. Elle est de 7.10^{-6}, ce qui correspond à un événement possible mais extrêmement peu probable (classe E) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque acceptable (< 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4).

L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 14 160 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue, dont le débit serait très sensiblement supérieur à 14 160 m^3/s, compte tenu du plafonnement des lignes d'eau lié aux déversements entre Beaucaire et Arles pour des crues supérieures à 11 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 4.10^{-6}, ce qui correspond également à un événement possible mais extrêmement peu probable (classe E) ;
- un risque acceptable ($< 10^{-4}$) au regard des enjeux ;
- une crue de sûreté de 14 160 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 14 160 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 14 160 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 % des probabilités maximales

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 14 160 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le risque résiduel est l'instabilité du mur de soutènement coté zone protégée, au droit du GRD 288.375 et du GRD 288.875.

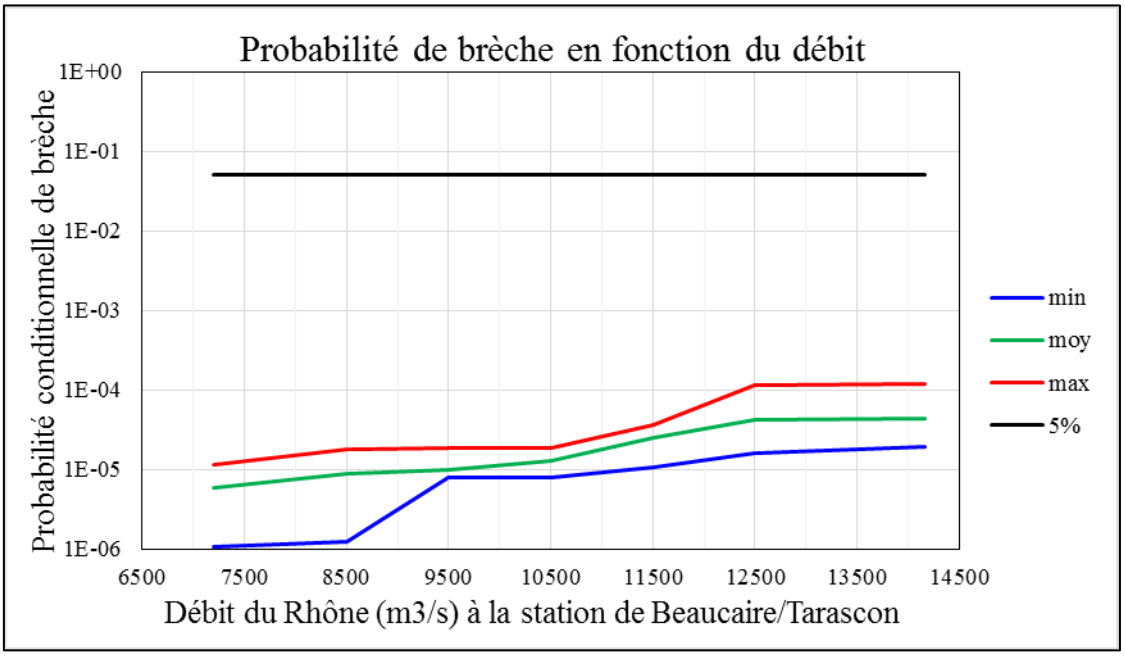


Figure 44 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Montlong

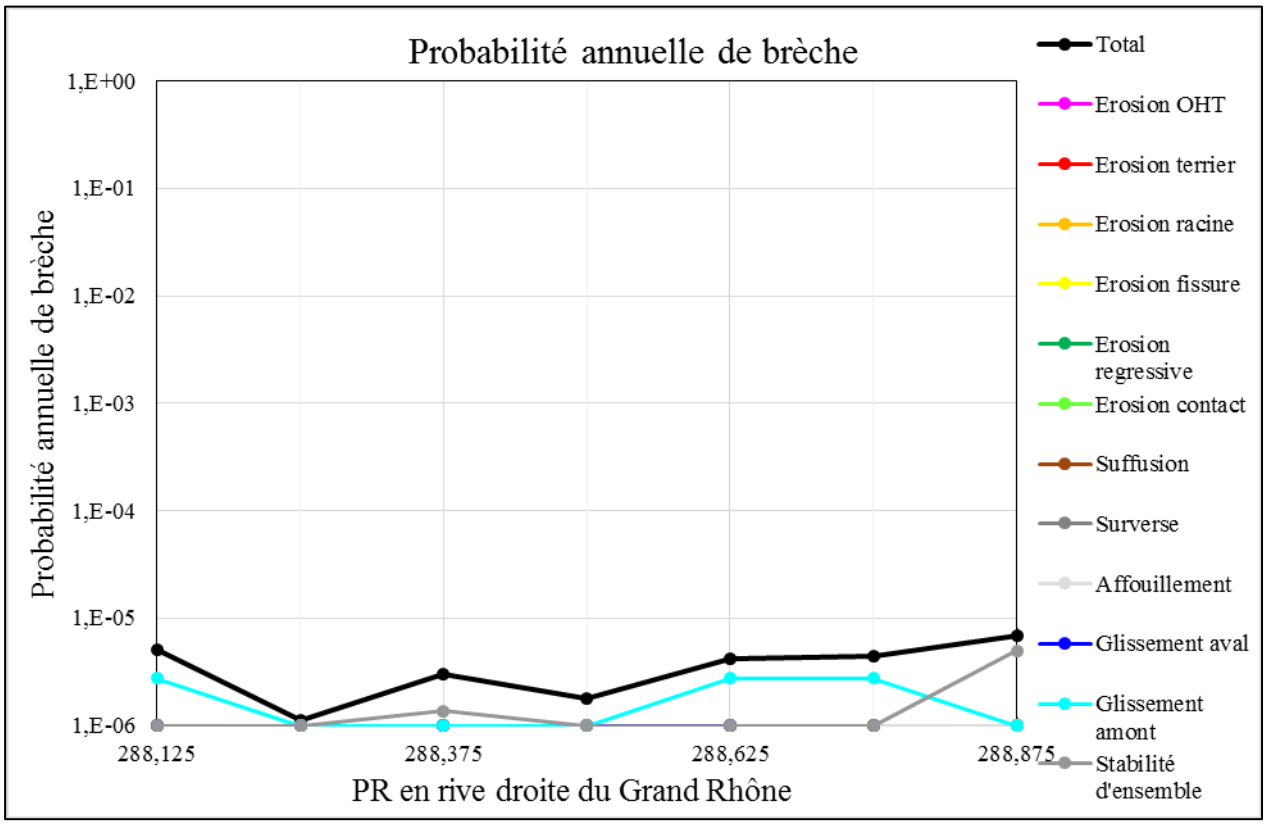


Figure 45 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Montlong

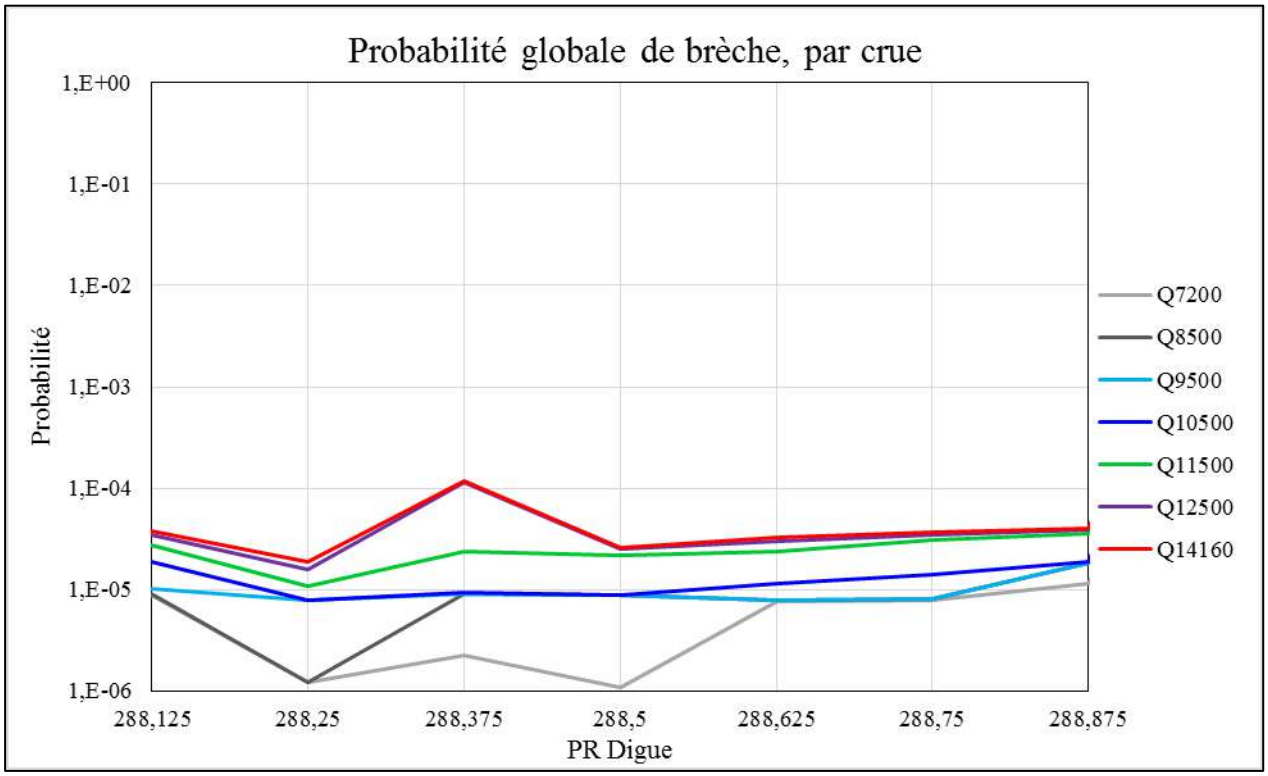


Figure 46 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Montlong

3.9 DIGUE DE MONTLONG A BEAUJEU (GRD6)

Le tronçon Montlong - Beaujeu mesure 6 km, il comprend les PR0.125 compris entre GRD 289 et 294.875; la digue n'a pas fait l'objet de travaux de confortement depuis son rehaussement au XIX^{ème} siècle. Des travaux de carrossabilité ont été réalisés en 2010.

Figure 39. Plan de situation de Montlong à la Louisiane 1 : Montlong-Beaujeu

Tableau 49. Synthèse de géométrie, tronçon Montlong - Beaujeu

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	7,6	6,4	6,9	0,3
Cote de pied de digue aval	m NGF	6,6	3,1	4,0	0,7
Cote à 20m du pdav	m NGF	4,8	2,3	3,4	0,5
Cote de pied de digue amont	m NGF	6,1	0,7	4,2	1,3
Cote à 20m du pdam	m NGF	5,1	0,6	3,6	1,4
Hauteur de digue coté aval	m	3,8	0,5	2,9	0,7
Hauteur de digue côté amont	m	6,7	0,3	2,7	1,5
Fruit aval	L/V	9,7	1,6	2,5	1,3
Fruit amont	L/V	4,9	1,7	2,3	0,6
Largeur du ségonnal	m	324	1	140	101

Ce tronçon est très proche du Rhône sur sa partie amont, où bathymétrie est est globalement de -10 m NGF et peut atteindre -15 m NGF.

Tableau 50. Données hydrauliques, tronçon Montlong - Beaujeu

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	4,5	3,6	2,1	2,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,8
8 500	5,2	4,3	1,4	2,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,6
9 500	5,6	4,6	1,1	1,8	0,1	0,1	0,1	0,0	0,5
10 500	5,9	4,9	0,8	1,5	0,2	0,1	0,1	0,0	0,4
11 500	6,4	5,4	0,3	1,0	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3
12 500	6,7	5,6	0,1	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2
14 160	6,8	5,7	0,0	0,7	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2

Caractéristiques du tronçon Montlong - Beaujeu vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue du XIX^{ème} siècle avec un REX négatif ou neutre suivant les secteurs. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1 m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il y a plusieurs ouvrages hydrauliques sur ce tronçon, celui qui présente la transition la plus à risque comprend un réseau au compactage et à l'étanchéité incertains. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,99
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit – racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIX^{ème} siècle avec présence d'arbres en pied de talus (localement des deux côtés). La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1 ; localement 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit – fissure

Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIX^{ème} siècle avec observation d'infiltrations et de terriers de blaireaux par le passé. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable de qualité variable en fondation. La couche de sable considérée, dont le toit est à 1 m de profondeur, mesure 5 m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il y a eu deux départs de brèches, en 1993 et 2002, qui ont été réparés en urgence seulement. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9

- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue n'a pas été investiguée. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 1m et la pente hydraulique est de 5 à 33 cm/km ; la berge est recouverte d'arbres.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge arborée

Analyse post-premiers résultats, GRD 291,5 :

Le risque de terrier est présent à l'amont et à l'aval et avait par sécurité été prolongé mais il n'y a pas de terriers recensés dans ce secteur; en prenant en compte un REX neutre, ce qui est le cas, la probabilité globale de rupture passe de 7 à 3% pour la crue décennale.

Tableau 51. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Montlong - Beaujeu

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-10	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-10	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-10	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	7E-10	2E-11	2E-09	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**6E-05**
12 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	8E-08	2E-05	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**3E-03**
14 160	1E-05	0E+00	7E-05	2E-04	2E-09	1E-07	2E-05	1E-06	4E-13	1E-06	6E-06			**4E-02**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	2E-04	1E-04	7E-05	1E-04	4E-09	7E-07	0E+00	1E-06	9E-08	5E-06	1E-06			**6E-04**
8 500	3E-03	3E-04	4E-04	1E-03	5E-09	1E-06	0E+00	1E-06	9E-08	1E-04	2E-05			**5E-03**
9 500	2E-02	4E-04	2E-03	6E-03	3E-08	5E-06	8E-08	1E-06	9E-08	1E-04	3E-05			**3E-02**
10 500	1E-01	7E-04	4E-03	2E-02	2E-07	1E-05	1E-04	1E-06	9E-08	2E-04	3E-05			**1E-01**
11 500	3E-01	3E-03	8E-03	3E-02	1E-06	3E-05	9E-04	1E-06	1E-07	2E-04	4E-05			**3E-01**
12 500	4E-01	4E-03	1E-02	4E-02	2E-06	6E-05	2E-03	1E-03	1E-06	2E-04	5E-05			**4E-01**
14 160	4E-01	4E-03	1E-02	4E-02	3E-06	1E-04	2E-03	9E-03	1E-06	2E-04	5E-05			**4E-01**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	4E-03	7E-03	1E-03	2E-03	1E-08	2E-05	0E+00	1E-06	7E-07	1E-04	1E-05			**7E-03**
8 500	3E-02	9E-03	3E-03	6E-03	5E-08	2E-05	0E+00	1E-06	7E-07	3E-03	5E-04			**3E-02**
9 500	2E-01	9E-03	8E-03	2E-02	5E-07	6E-05	2E-06	1E-06	7E-07	3E-03	5E-04			**2E-01**
10 500	4E-01	2E-02	3E-02	4E-02	4E-06	1E-04	1E-03	1E-06	7E-07	3E-03	5E-04			**4E-01**
11 500	5E-01	1E-01	4E-02	5E-02	1E-05	1E-04	8E-03	5E-06	1E-06	3E-03	6E-04			**5E-01**
12 500	5E-01	2E-01	5E-02	5E-02	2E-05	1E-03	1E-02	2E-02	5E-05	3E-03	7E-04			**5E-01**
14 160	5E-01	2E-01	5E-02	5E-02	3E-05	3E-03	1E-02	1E-01	5E-05	3E-03	7E-04			**6E-01**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**2E-02**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**1E-02**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au GRD 290.125. Elle est de 2.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.
L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 8 500 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 10 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 1.10^{-2}, ce qui correspond à un événement probable (classe B) ;
- un risque inacceptable ($> 10^{-4}$) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 9 500 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 8 500 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 10 500 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5, légèrement revu, et 50 % des probabilités maximales

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 9 500 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le principal risque est l'érosion de conduit sous ses différentes formes et en particulier dans un terrier de fouisseur. Elle situé sur l'ensemble du secteur.

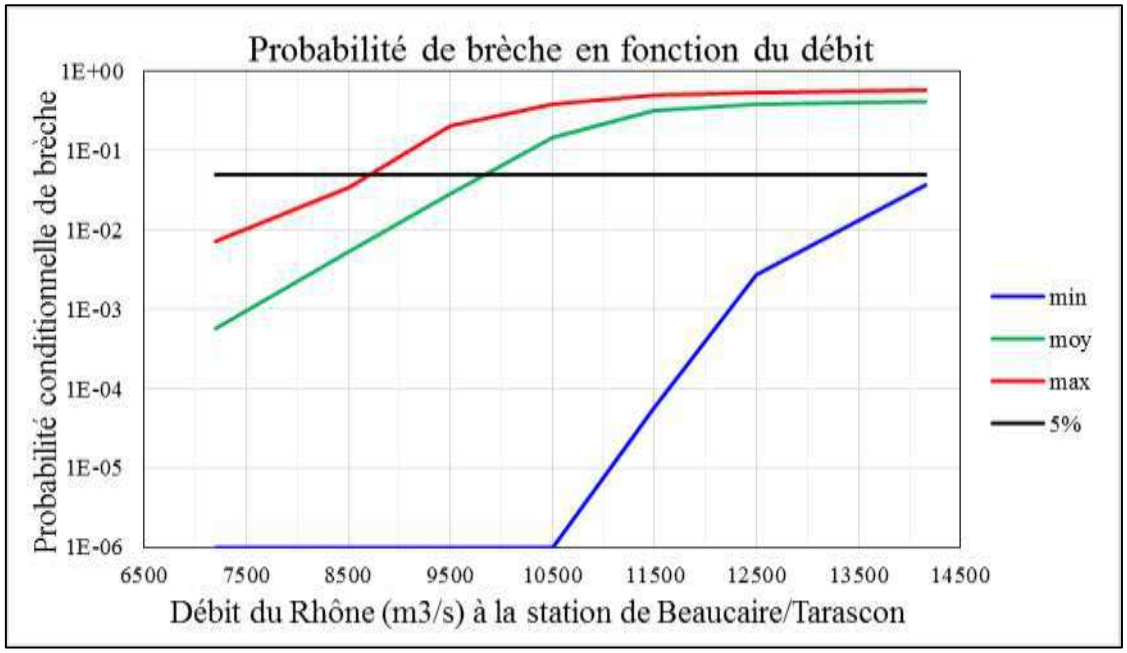


Figure 47 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Montlong - Beaujeu

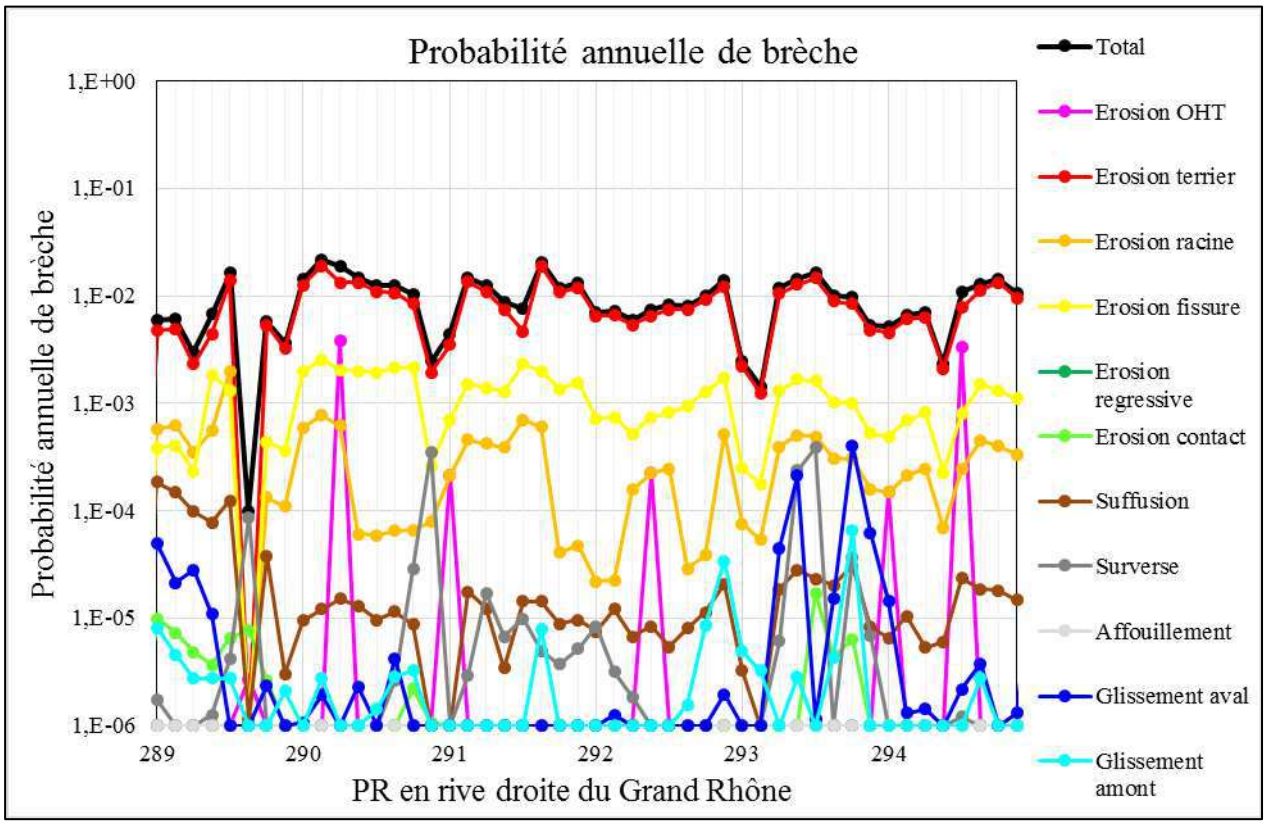


Figure 48 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Montlong - Beaujeu

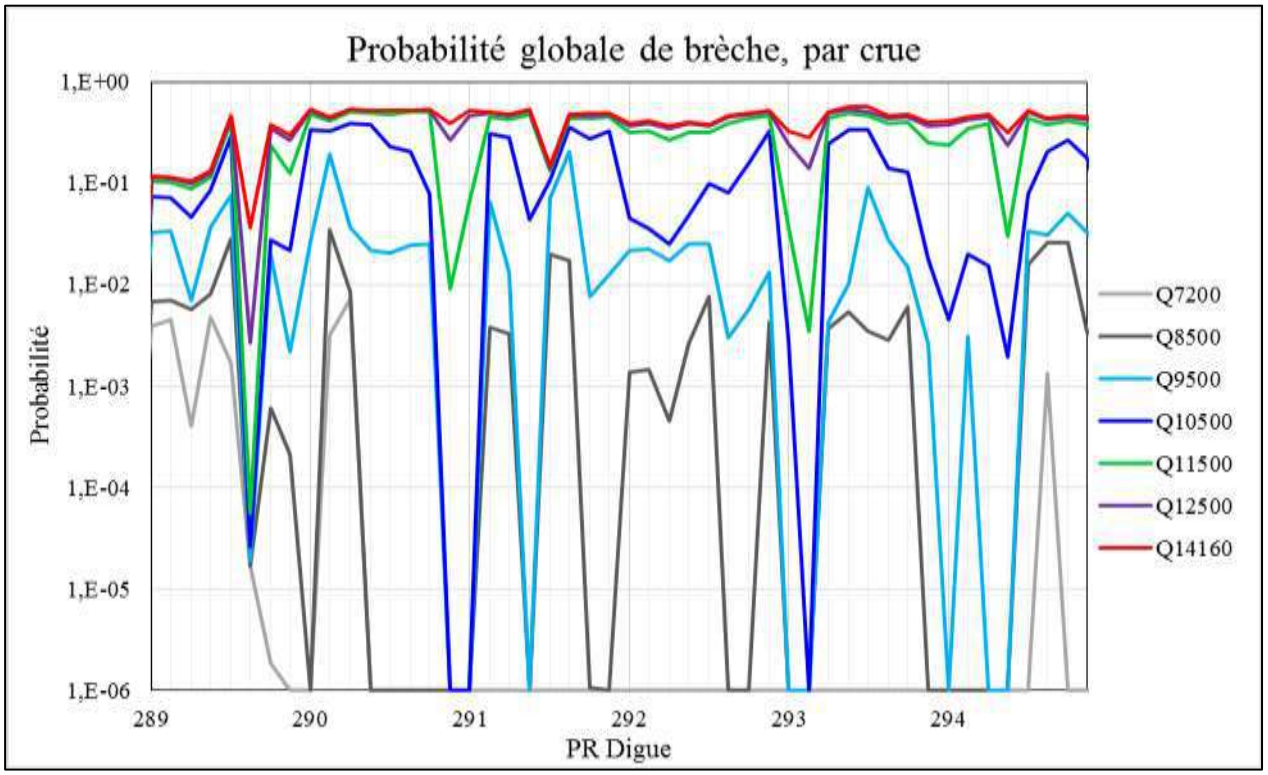


Figure 49 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Montlong - Beaujeu

3.10 DIGUE DE BEAUJEU A L'ARMELIERE (GRD7)

Le tronçon Beaujeu – l'Armelière mesure 3.4 km, il comprend les PR0.125 compris entre GRD 295 et 298.125; la digue n'a pas fait l'objet de travaux de confortement depuis son rehaussement au XIX^{ème} siècle. Des travaux de carrossabilité ont été réalisés en 2010.

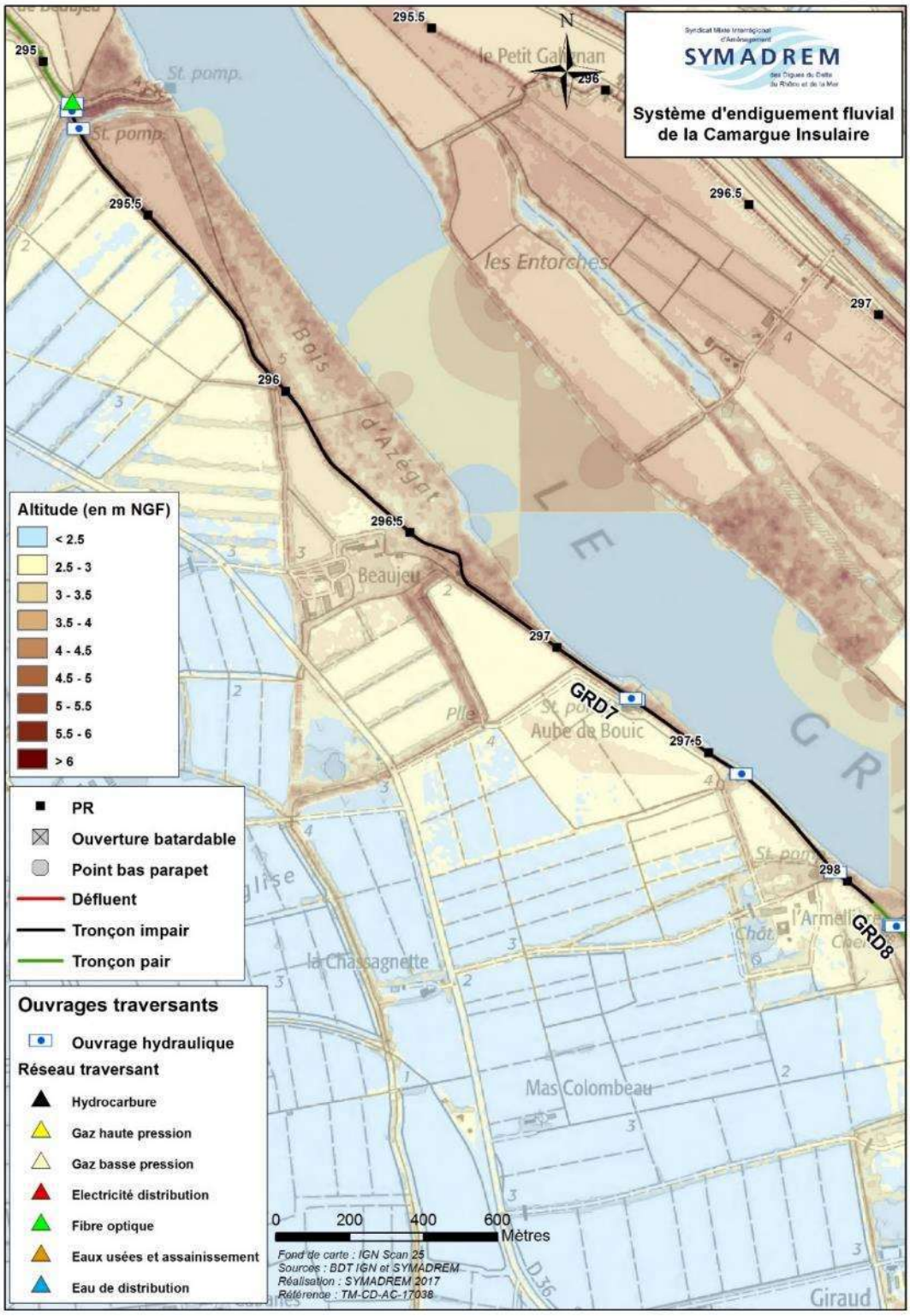


Figure 40. Plan de situation de Montlong à la Louisiane 2 : Beaujeu-l'Armelière

Tableau 52. Synthèse de géométrie, tronçon Beaujeu – l'Armelière

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	6,8	6,1	6,4	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	5,5	3,6	4,3	0,5
Cote à 20m du pdav	m NGF	4,2	2,4	2,9	0,4
Cote de pied de digue amont	m NGF	5,7	2,4	4,2	0,8
Cote à 20m du pdam	m NGF	4,5	0,5	2,9	1,4
Hauteur de digue coté aval	m	2,8	0,7	2,1	0,5
Hauteur de digue côté amont	m	3,9	0,8	2,2	0,8
Fruit aval	L/V	7,1	1,7	2,6	1,1
Fruit amont	L/V	10,2	1,6	2,6	1,7
Largeur du ségonnal	m	254	8	124	94

Ce tronçon est loin du Rhône à l'amont et se rapproche au niveau du GRD 297, où la bathymétrie est faible : -1m NGF mais elle atteint ensuite -10 m NGF vers le GRD 297.5.

Tableau 53. Données hydrauliques, tronçon Beaujeu – l'Armelière

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	3,6	3,4	2,6	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
8 500	4,3	4,0	2,0	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7
9 500	4,6	4,3	1,7	2,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,6
10 500	4,9	4,6	1,4	1,7	0,1	0,0	0,1	0,0	0,5
11 500	5,4	5,0	0,9	1,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,4
12 500	5,6	5,2	0,7	1,0	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3
14 160	5,7	5,3	0,6	0,9	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3

Caractéristiques du tronçon Beaujeu – l'Armelière vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue du XIX^{ème} siècle avec un REX négatif. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il y a plusieurs ouvrages hydrauliques sur ce tronçon, celui qui présente la transition la plus à risque comprend un réseau au compactage et à l'étanchéité incertains. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,99
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit – racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIX^{ème} siècle avec présence d'arbres en pied de talus (des deux côtés). La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit – fissure

Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIX^{ème} siècle avec observation d'infiltrations et de terriers de blaireaux par le passé. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable de classe 5 en fondation. La couche de sable, dont le toit est à 3 m de profondeur, mesure 1 m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il y a eu un départ de brèche en 2003 qui a été réparé en urgence seulement. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1 m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m

- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue n'a pas été investiguée. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1 m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 8m et la pente hydraulique est de 9 à 13 cm/km suivant l'intensité de la crue ; la berge est recouverte d'arbres.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge arborée

Tableau 54. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Beaujeu – l'Armelière

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-10	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-10	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-10	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
12 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-10	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**3E-06**
14 160	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-10	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**6E-06**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-09	1E-09	0E+00	1E-06	9E-09	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	2E-06	2E-04	2E-04	2E-04	1E-09	8E-08	0E+00	1E-06	9E-09	1E-05	4E-05			**6E-04**
9 500	1E-03	3E-04	3E-04	4E-04	1E-09	6E-07	1E-09	1E-06	9E-09	8E-05	9E-05			**3E-03**
10 500	6E-03	4E-04	8E-04	1E-03	1E-09	1E-06	5E-06	1E-06	9E-09	9E-05	1E-04			**8E-03**
11 500	6E-02	4E-03	5E-03	7E-03	7E-08	4E-06	2E-04	1E-06	9E-09	1E-04	1E-04			**8E-02**
12 500	2E-01	7E-03	1E-02	1E-02	3E-07	8E-05	7E-04	1E-06	9E-09	1E-04	1E-04			**2E-01**
14 160	2E-01	1E-02	1E-02	2E-02	5E-07	2E-04	1E-03	3E-05	9E-09	1E-04	1E-04			**2E-01**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	2E-08	0E+00	1E-06	1E-07	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	2E-05	5E-03	2E-03	2E-03	2E-09	2E-06	0E+00	1E-06	1E-07	3E-04	1E-03			**8E-03**
9 500	2E-02	8E-03	3E-03	2E-03	2E-09	1E-05	3E-09	1E-06	1E-07	1E-03	1E-03			**2E-02**
10 500	4E-02	1E-02	4E-03	4E-03	4E-09	1E-05	2E-05	1E-06	1E-07	1E-03	1E-03			**4E-02**
11 500	3E-01	1E-01	3E-02	3E-02	1E-06	8E-05	1E-03	1E-06	1E-07	1E-03	1E-03			**4E-01**
12 500	4E-01	1E-01	4E-02	4E-02	5E-06	2E-03	3E-03	4E-06	1E-07	1E-03	1E-03			**5E-01**
14 160	4E-01	2E-01	5E-02	4E-02	7E-06	5E-03	4E-03	7E-04	1E-07	1E-03	1E-03			**5E-01**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**9E-03**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**2E-03**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au GRD 297,50. Elle est de 9.10^{-3}, ce qui correspond à un événement probable (classe B) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.

L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 10 500 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 11 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 5.10^{-3}, ce qui correspond à un événement probable (classe B) ;
- un risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en œuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 10 500 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 10 500 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 11 500 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 % des probabilités maximales

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 10 500 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le principal risque est l'érosion de conduit, situé sur l'ensemble du linéaire.

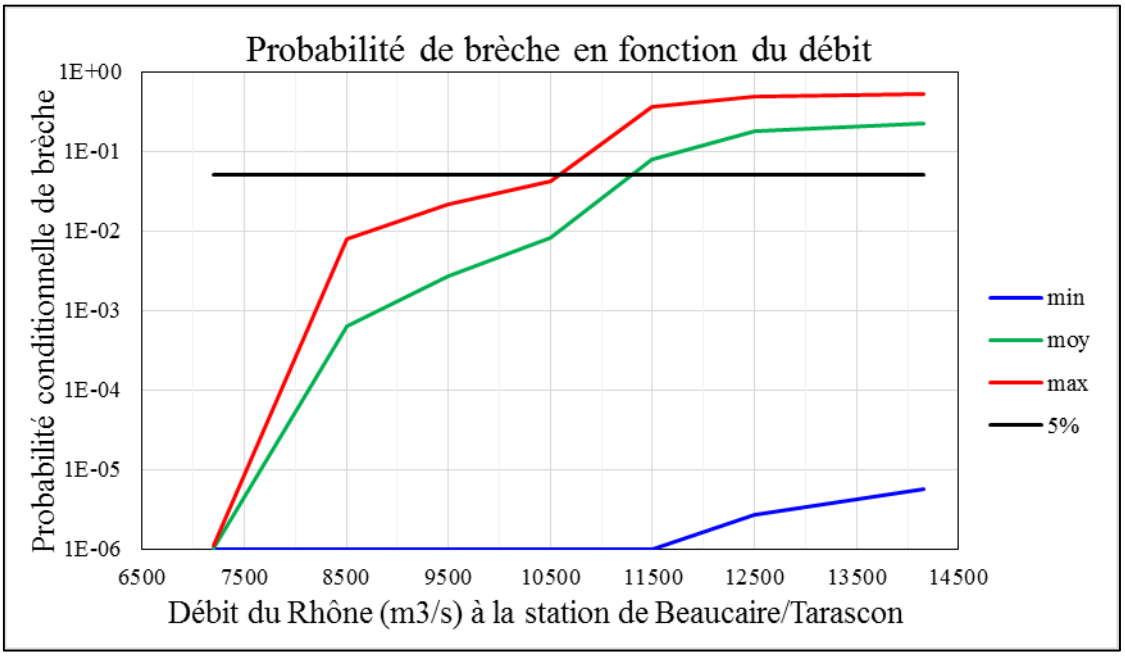


Figure 50 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Beaujeu – l'Armelière

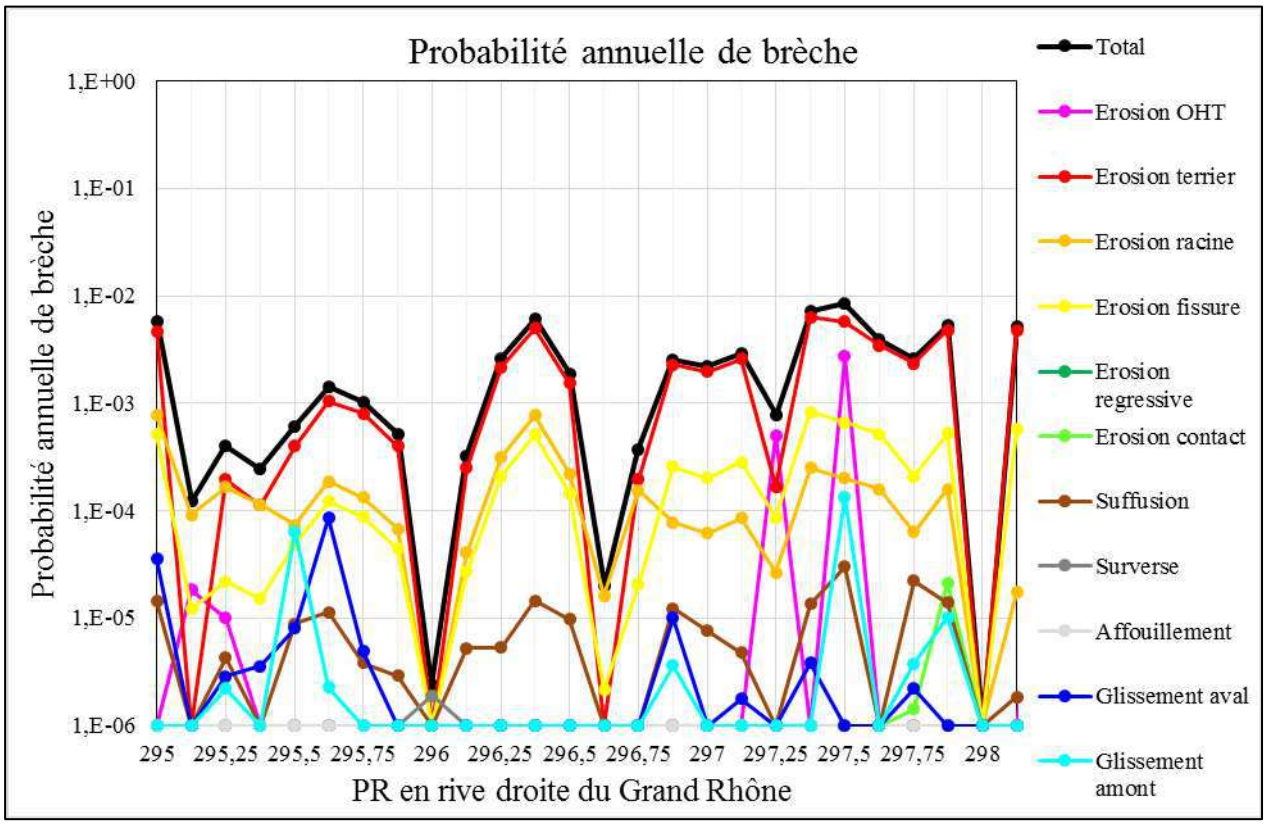


Figure 51 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Beaujeu – l'Armelière

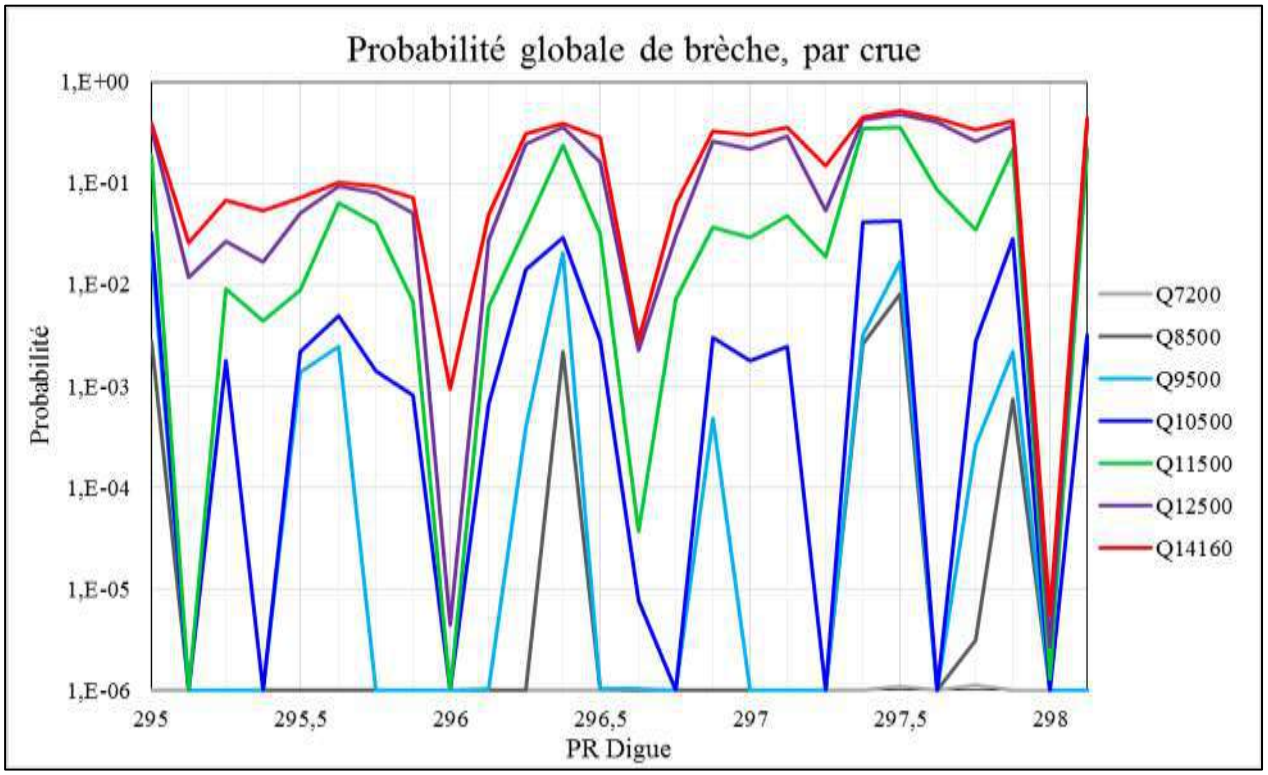


Figure 52 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Beaujeu – l'Armelière

3.11 DIGUE DE L'ARMELIERE A LA COMMANDERIE (GRD8)

Le tronçon L'Armelière - La Commanderie mesure 7.3 km, il comprend les PR0.125 compris entre GRD 298.25 et 305.375 ; la digue n'a pas fait l'objet de travaux de confortement depuis son rehaussement au XIX^{ème} siècle. Des travaux de carrossabilité ont été réalisés en 2010.

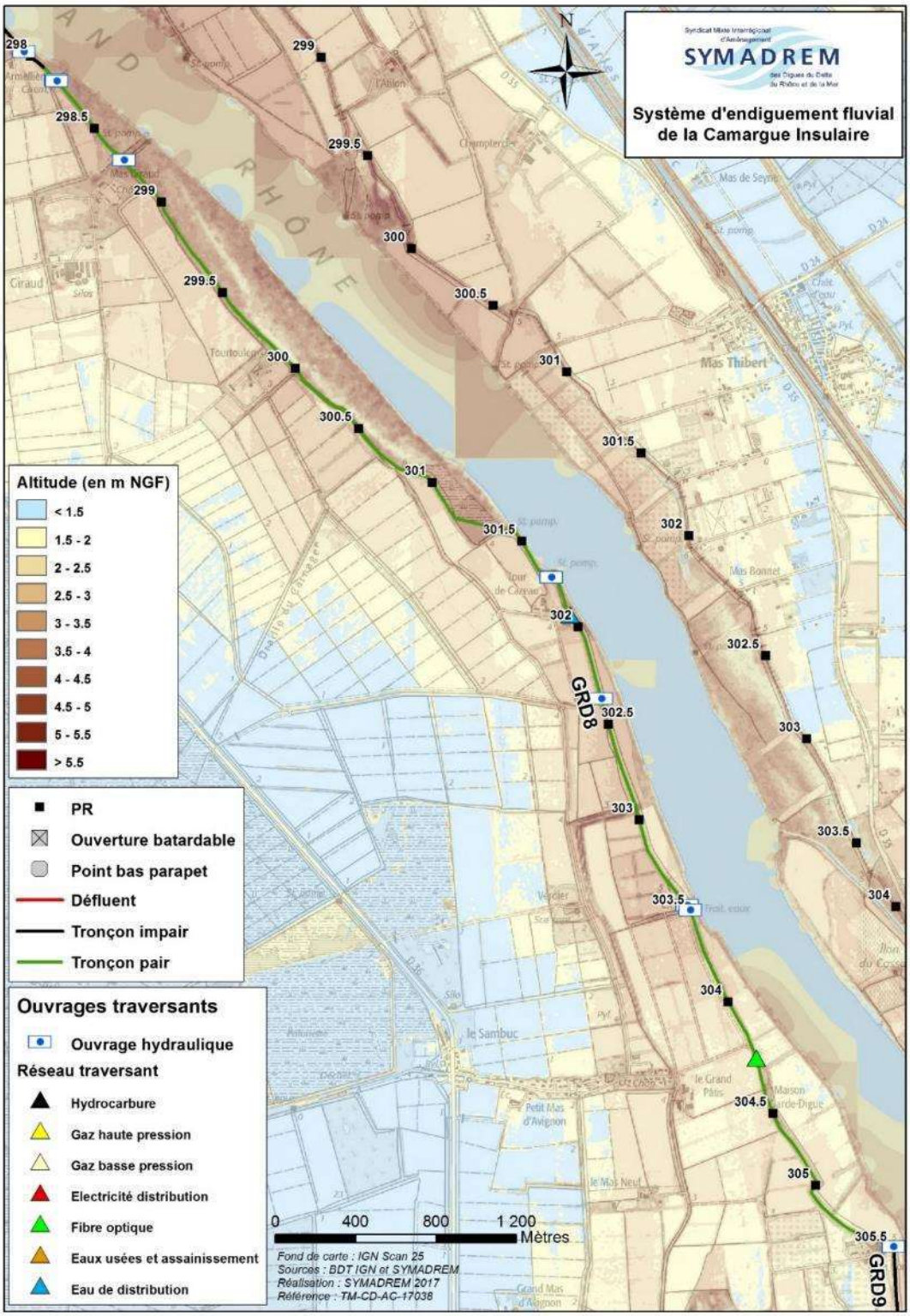


Figure 41. Plan de situation de Montlong à la Louisiane 3 : L'Armelière-La Commanderie

Tableau 55. Synthèse de géométrie, tronçon L'Armelière - La Commanderie

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	6,4	5,5	5,9	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	5,6	2,6	3,9	0,6
Cote à 20m du pdav	m NGF	4,9	2,2	3,1	0,6
Cote de pied de digue amont	m NGF	5,1	2,5	3,9	0,6
Cote à 20m du pdam	m NGF	4,6	0,5	3,0	0,8
Hauteur de digue coté aval	m	3,0	0,8	2,0	0,5
Hauteur de digue côté amont	m	3,3	0,9	2,0	0,5
Fruit aval	L/V	5,5	1,6	2,4	0,6
Fruit amont	L/V	5,2	1,6	2,3	0,6
Largeur du ségonnal	m	327	12	163	82

Ce tronçon est ponctuellement proche du Rhône, au niveau du GRD 301.5, où la bathymétrie est d'environ -6.5 m NGF.

Tableau 56. Données hydrauliques, tronçon L'Armelière - La Commanderie

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	3,4	2,8	2,5	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9
8 500	4,0	3,3	2,0	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
9 500	4,2	3,4	1,8	2,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,8
10 500	4,6	3,8	1,5	1,8	0,1	0,0	0,1	0,0	0,7
11 500	5,0	4,1	1,0	1,4	0,1	0,1	0,1	0,0	0,5
12 500	5,2	4,3	0,9	1,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,4
14 160	5,3	4,4	0,8	1,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,4

Caractéristiques du tronçon L'Armelière - La Commanderie vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue du XIX^{ème} siècle avec un REX négatif. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il y a plusieurs ouvrages hydrauliques sur ce tronçon, celui qui présente la transition la plus à risque comprend un réseau au compactage et à l'étanchéité incertains. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,99
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit – racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIX^{ème} siècle avec présence d'arbres en pied de talus (deux côtés sur la partie amont). La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5 (à l'amont)
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1

- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit – fissure

Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIX^{ème} siècle avec observation d'infiltrations et de terriers de blaireaux par le passé. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent que localement il y a du sable propre en fondation. La couche de sable, dont le toit est à 1 m de profondeur, mesure 2 m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il y a eu un départ de brèche en 1872. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1 m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01

- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue n'a pas été investiguée. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 12m et la pente hydraulique est de 9 à 13 cm/km sur la partie amont et de 4 à 7 cm/km sur la partie aval ; la berge est recouverte d'arbres.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge arborée

Tableau 57. Résultats des calculs de probabilité, tronçon L'Armelière - La Commanderie

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
12 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	4E-10	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
14 160	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	3E-08	0E+00	4E-06	3E-06	5E-09	6E-12	0E+00	1E-06	7E-10	1E-06	2E-07			**9E-06**
8 500	1E-04	0E+00	6E-05	8E-05	7E-09	5E-09	0E+00	1E-06	7E-10	3E-06	8E-07			**3E-04**
9 500	6E-04	0E+00	2E-04	2E-04	8E-09	6E-09	7E-10	1E-06	7E-10	4E-06	1E-06			**1E-03**
10 500	2E-03	0E+00	6E-04	7E-04	1E-08	1E-08	1E-06	1E-06	7E-10	2E-05	4E-05			**4E-03**
11 500	3E-02	3E-04	3E-03	4E-03	1E-07	1E-07	5E-05	1E-06	7E-10	9E-05	9E-05			**3E-02**
12 500	6E-02	4E-04	8E-03	9E-03	7E-07	3E-07	2E-04	1E-06	7E-10	1E-04	9E-05			**8E-02**
14 160	9E-02	2E-03	1E-02	1E-02	1E-06	5E-07	4E-04	1E-06	7E-10	1E-04	9E-05			**1E-01**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	1E-06	0E+00	2E-04	1E-04	2E-08	2E-10	0E+00	1E-06	3E-08	4E-05	6E-06			**4E-04**
8 500	4E-03	0E+00	1E-03	2E-03	2E-08	1E-07	0E+00	1E-06	3E-08	9E-05	6E-06			**5E-03**
9 500	1E-02	0E+00	3E-03	2E-03	2E-08	2E-07	2E-09	1E-06	3E-08	9E-05	2E-05			**2E-02**
10 500	3E-02	0E+00	4E-03	3E-03	9E-08	2E-07	7E-06	1E-06	3E-08	6E-04	8E-04			**3E-02**
11 500	2E-01	1E-02	3E-02	2E-02	5E-06	3E-06	4E-04	1E-06	3E-08	3E-03	1E-03			**2E-01**
12 500	4E-01	2E-02	5E-02	4E-02	2E-05	6E-06	1E-03	1E-06	3E-08	3E-03	1E-03			**4E-01**
14 160	4E-01	9E-02	6E-02	4E-02	3E-05	8E-06	1E-03	1E-06	3E-08	3E-03	1E-03			**4E-01**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**6E-03**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**1E-03**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au GRD 301. Elle est de 6.10^{-3}, ce qui correspond à un événement probable (classe B) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.

L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 10 500 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 14 160 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 1.10^{-3}, ce qui correspond à un événement improbable (classe B) ;
- un risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 11 500 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 10 500 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 11 500 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 % des probabilités maximales ; la crue de danger a été revue à la baisse de par la forte sensibilité du modèle.

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 11 500 m^3/s qui correspond à la crue de danger retenue et au niveau de sureté moyen.

Le principal risque est l'érosion de conduit, principalement dans un terrier ou un ouvrage traversant. Ce risque est situé au sur tout le tronçon mais en particulier autour du GRD 301.

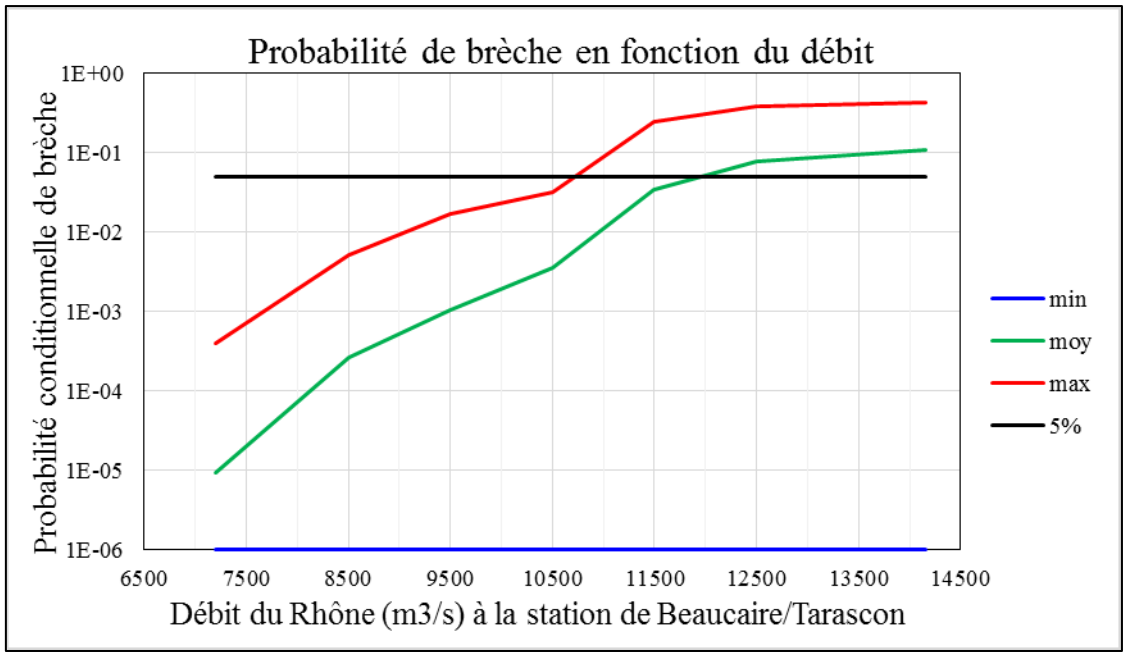


Figure 53 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon L'Armelière - La Commanderie

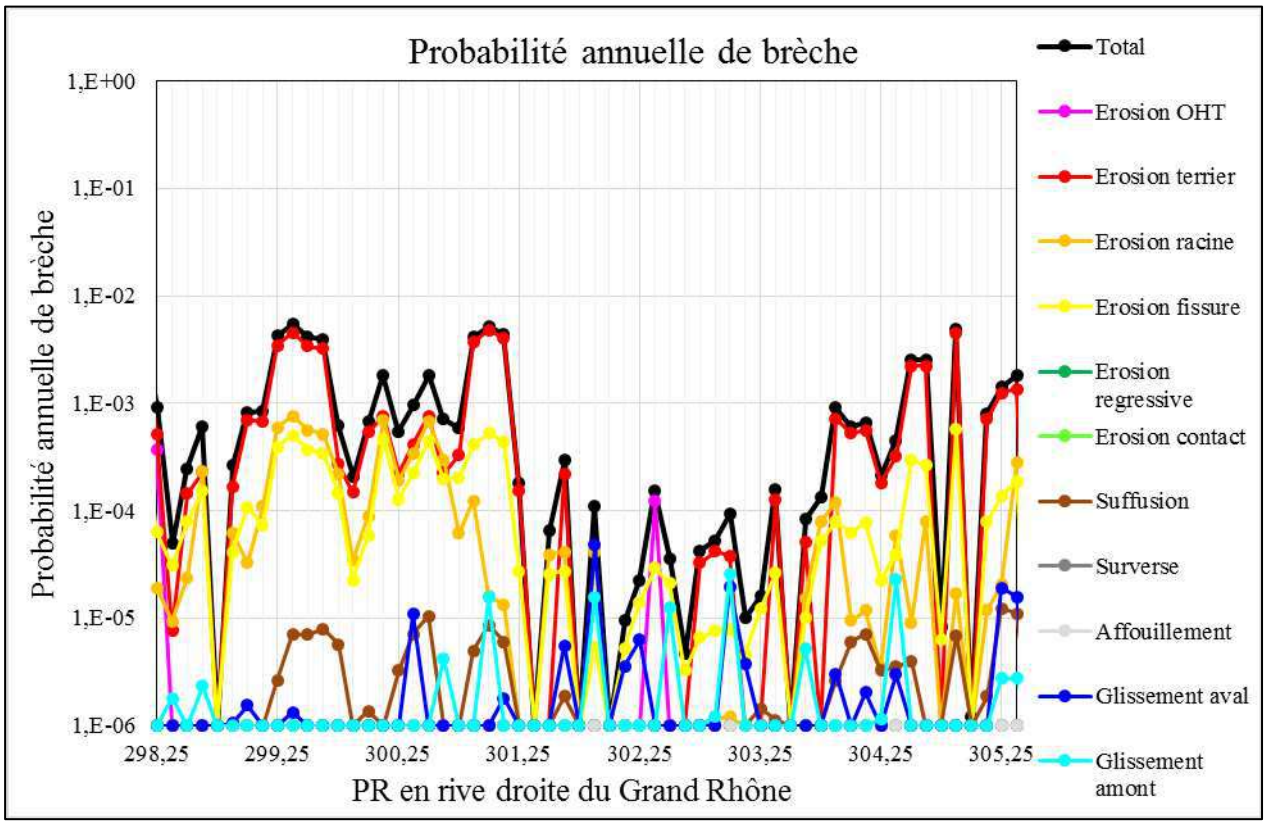


Figure 54 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon L'Armelière - La Commanderie

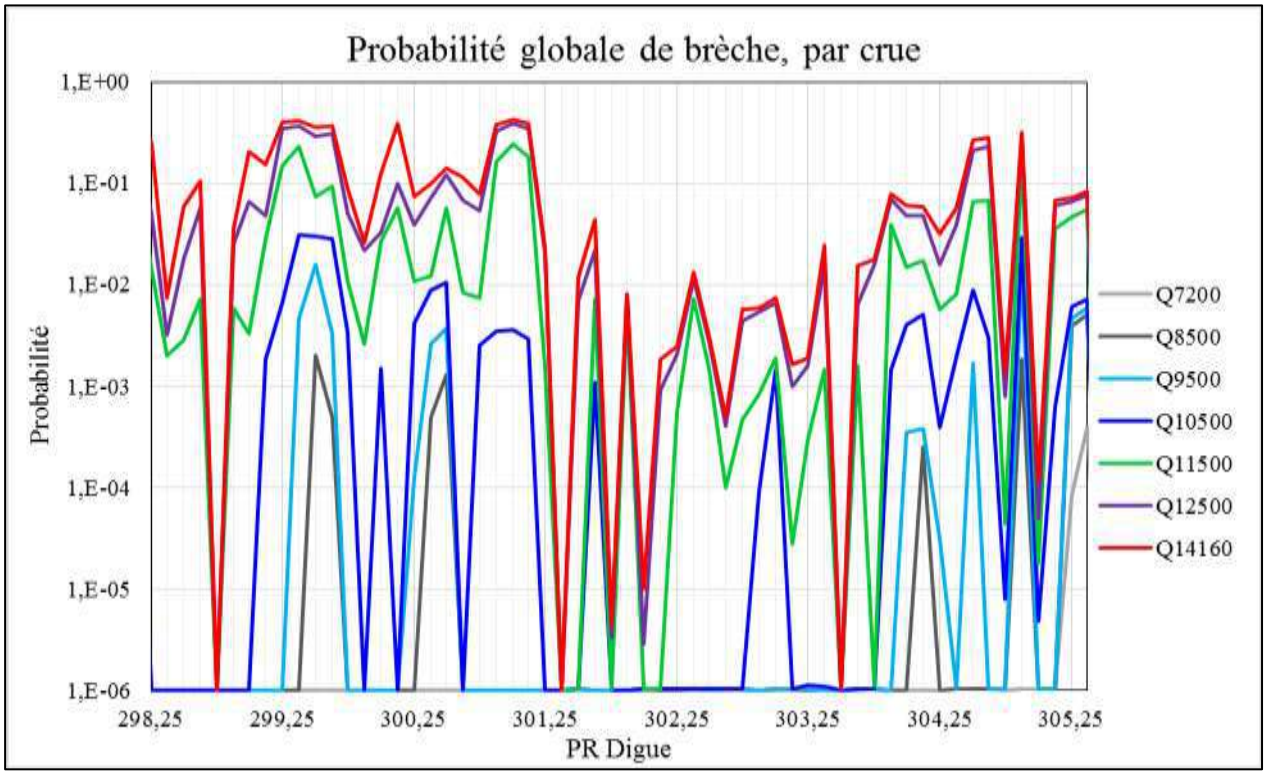


Figure 55 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon L'Armelière - La Commanderie

3.12 DIGUE DE LA COMMANDERIE A BOIS VERDUN (GRD9)

Le tronçon La Commanderie – Bois Verdun mesure 4 km, il comprend les PR0.125 compris entre GRD 305.5 et 309.125 ; la digue n'a pas fait l'objet de travaux de confortement depuis son rehaussement au XIX^{ème} siècle. Des travaux de carrossabilité ont été réalisés en 2010.

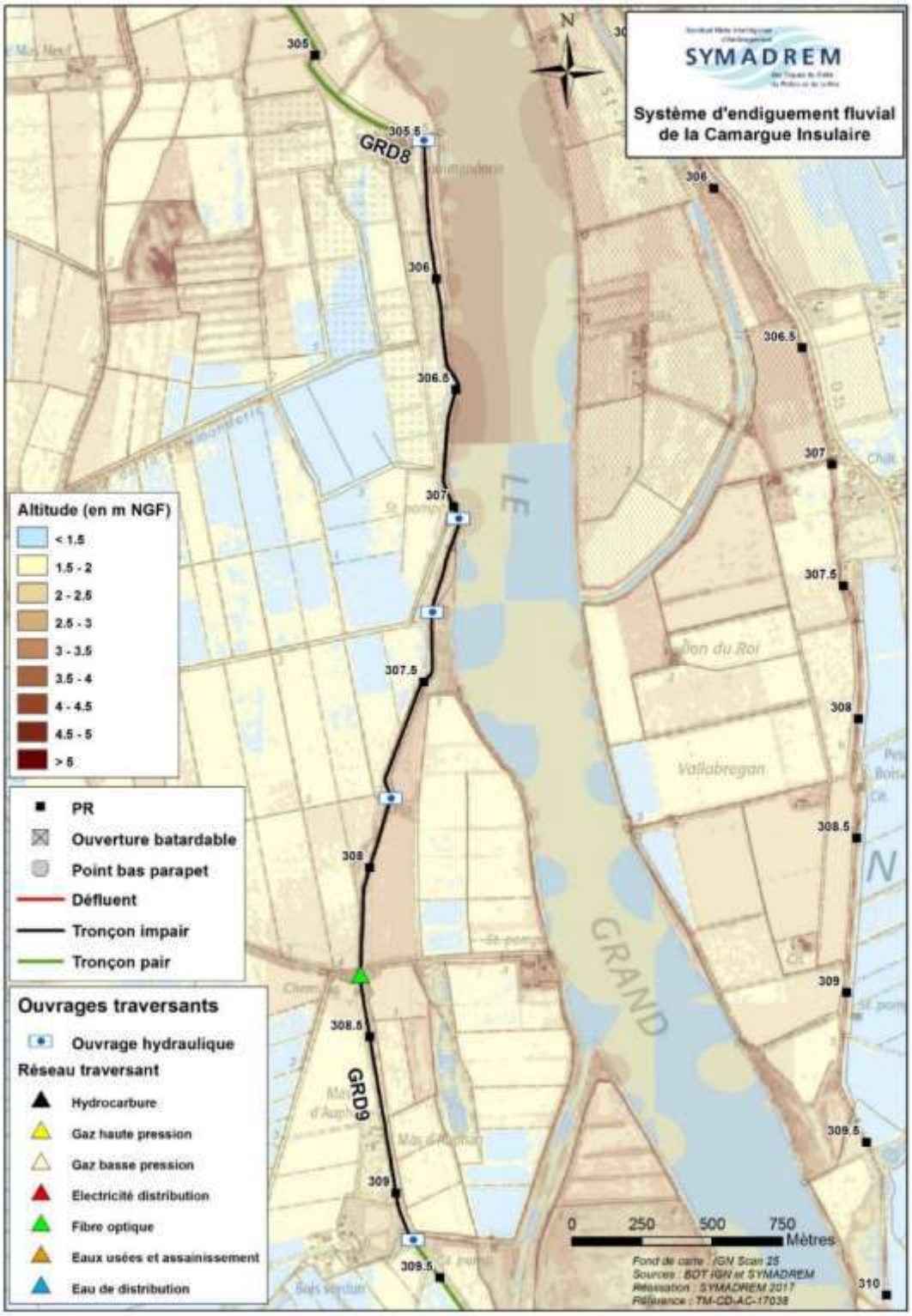


Figure 42. Plan de situation de Montlong à la Louisiane 4 : La Commanderie-Bois Verdun

Tableau 58. Synthèse de géométrie, tronçon La Commanderie – Bois Verdun

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	5,5	4,6	5,0	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	4,3	2,2	2,7	0,6
Cote à 20m du pdav	m NGF	3,2	1,0	2,2	0,4
Cote de pied de digue amont	m NGF	4,4	2,2	3,2	0,5
Cote à 20m du pdam	m NGF	3,2	0,5	2,2	0,9
Hauteur de digue coté aval	m	3,0	0,9	2,3	0,6
Hauteur de digue côté amont	m	2,5	0,8	1,9	0,3
Fruit aval	L/V	6,9	1,7	2,5	1,1
Fruit amont	L/V	2,9	1,6	2,2	0,4
Largeur du ségonnal	m	712	10	260	271

Ce tronçon est proche du Rhône sur 1km, après le GRD 306.25, dans cette zone la bathymétrie varie entre -3 et -6 m NGF.

Tableau 59. Données hydrauliques, tronçon La Commanderie – Bois Verdun

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	2,8	2,6	2,0	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
8 500	3,3	3,0	1,5	1,9	0,1	0,0	0,1	0,0	0,7
9 500	3,4	3,1	1,4	1,7	0,1	0,1	0,1	0,0	0,6
10 500	3,8	3,5	1,0	1,4	0,1	0,1	0,1	0,0	0,5
11 500	4,1	3,8	0,7	1,0	0,2	0,1	0,1	0,0	0,4
12 500	4,3	4,0	0,6	0,9	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3
14 160	4,3	4,0	0,5	0,8	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3

Caractéristiques du tronçon La Commanderie – Bois Verdun vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue du XIXème siècle avec un REX négatif. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il y a plusieurs ouvrages hydrauliques sur ce tronçon, celui qui présente la transition la plus à risque comprend un réseau au compactage incertain mais une étanchéité satisfaisante. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit – racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec présence d'arbres en pied de talus (localement des deux côtés). La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5 localement
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1

- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit – fissure

Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec observation d'infiltrations ou de terriers de blaireaux ou lapins par le passé. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable propre en fondation. La couche de sable, dont le toit est à 1m de profondeur, mesure 1m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il n'y a pas de brèches connues. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m

- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue n'a pas été investiguée. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 10m et la pente hydraulique est de 4 à 7 cm/km ; la berge est recouverte d'arbres.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge arborée

Tableau 60. Résultats des calculs de probabilité, tronçon La Commanderie – Bois Verdun

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
12 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**4E-06**
14 160	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**6E-05**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	2E-07	0E+00	2E-05	2E-05	2E-08	4E-12	0E+00	1E-06	4E-09	5E-06	6E-06			**4E-05**
8 500	1E-03	4E-04	3E-04	4E-04	2E-07	3E-09	0E+00	1E-06	4E-09	4E-05	1E-05			**2E-03**
9 500	2E-03	4E-04	7E-04	7E-04	4E-07	3E-09	1E-09	1E-06	4E-09	7E-05	2E-05			**4E-03**
10 500	2E-02	2E-03	6E-03	3E-03	4E-06	1E-08	4E-07	1E-06	4E-09	2E-04	5E-05			**3E-02**
11 500	1E-01	5E-03	2E-02	1E-02	1E-05	3E-07	3E-04	1E-06	4E-09	2E-04	6E-05			**1E-01**
12 500	2E-01	7E-03	2E-02	2E-02	4E-04	1E-06	8E-04	2E-04	4E-09	2E-04	6E-05			**2E-01**
14 160	2E-01	8E-03	2E-02	2E-02	1E-03	2E-06	1E-03	1E-03	4E-09	2E-04	6E-05			**2E-01**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	3E-06	0E+00	5E-04	3E-04	2E-08	2E-11	0E+00	1E-06	7E-08	1E-04	9E-05			**9E-04**
8 500	2E-02	1E-02	4E-03	3E-03	3E-06	2E-08	0E+00	1E-06	7E-08	4E-04	9E-05			**2E-02**
9 500	2E-02	1E-02	4E-03	3E-03	8E-06	2E-08	2E-09	1E-06	7E-08	5E-04	9E-05			**2E-02**
10 500	1E-01	6E-02	4E-02	1E-02	8E-05	9E-08	5E-06	1E-06	7E-08	1E-03	8E-04			**2E-01**
11 500	3E-01	1E-01	6E-02	4E-02	2E-04	6E-06	1E-03	1E-06	7E-08	1E-03	8E-04			**4E-01**
12 500	4E-01	2E-01	6E-02	4E-02	1E-02	2E-05	3E-03	3E-03	7E-08	1E-03	8E-04			**5E-01**
14 160	5E-01	2E-01	6E-02	5E-02	3E-02	3E-05	4E-03	2E-02	7E-08	1E-03	8E-04			**5E-01**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**1E-02**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**3E-03**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au GRD 308,125. Elle est de 1.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.
L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 9 500 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 14 160 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 5.10^{-3}, ce qui correspond à un événement probable (classe B) ;
- un risque inacceptable ($> 10^{-4}$) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 10 500 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 9 500 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 11 500 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 % des probabilités maximales ; la crue de danger a été revue à la baisse de par la forte sensibilité du modèle (crue de probabilité de bèche de 25% : 9 500 m^3/s).

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 10 500 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le principal risque est l'érosion de conduit et en particulier dans un terrier de fouisseur, il est présent sur l'ensemble du linéaire et en particulier au niveau des GRD 307.25 et 308.625.

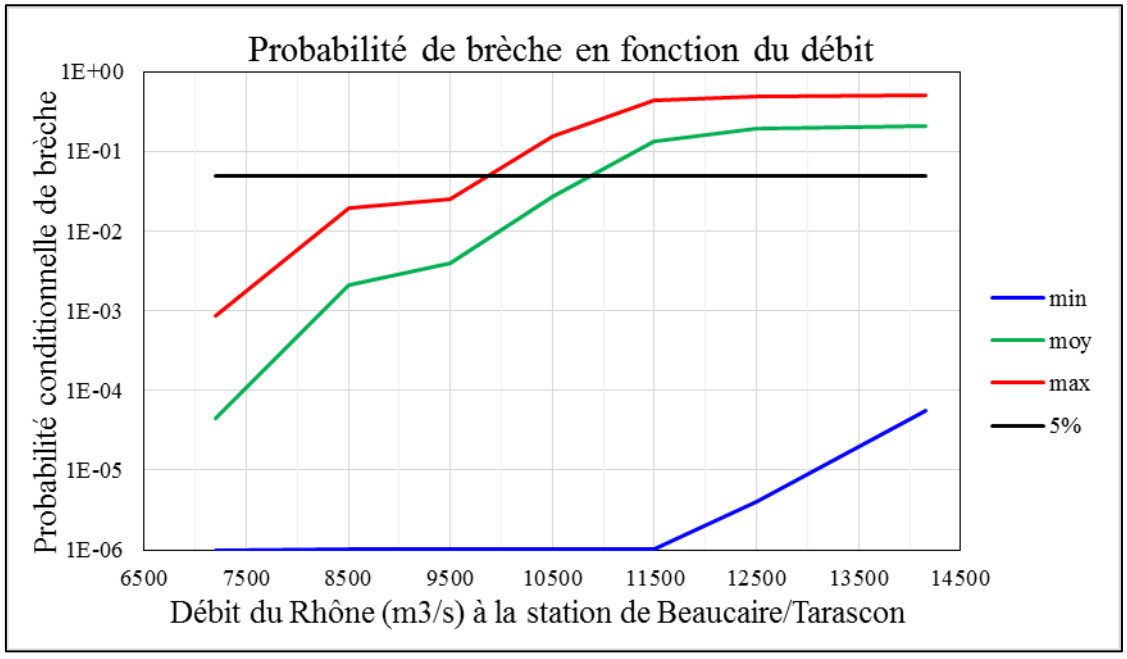


Figure 56 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon La Commanderie – Bois Verdun

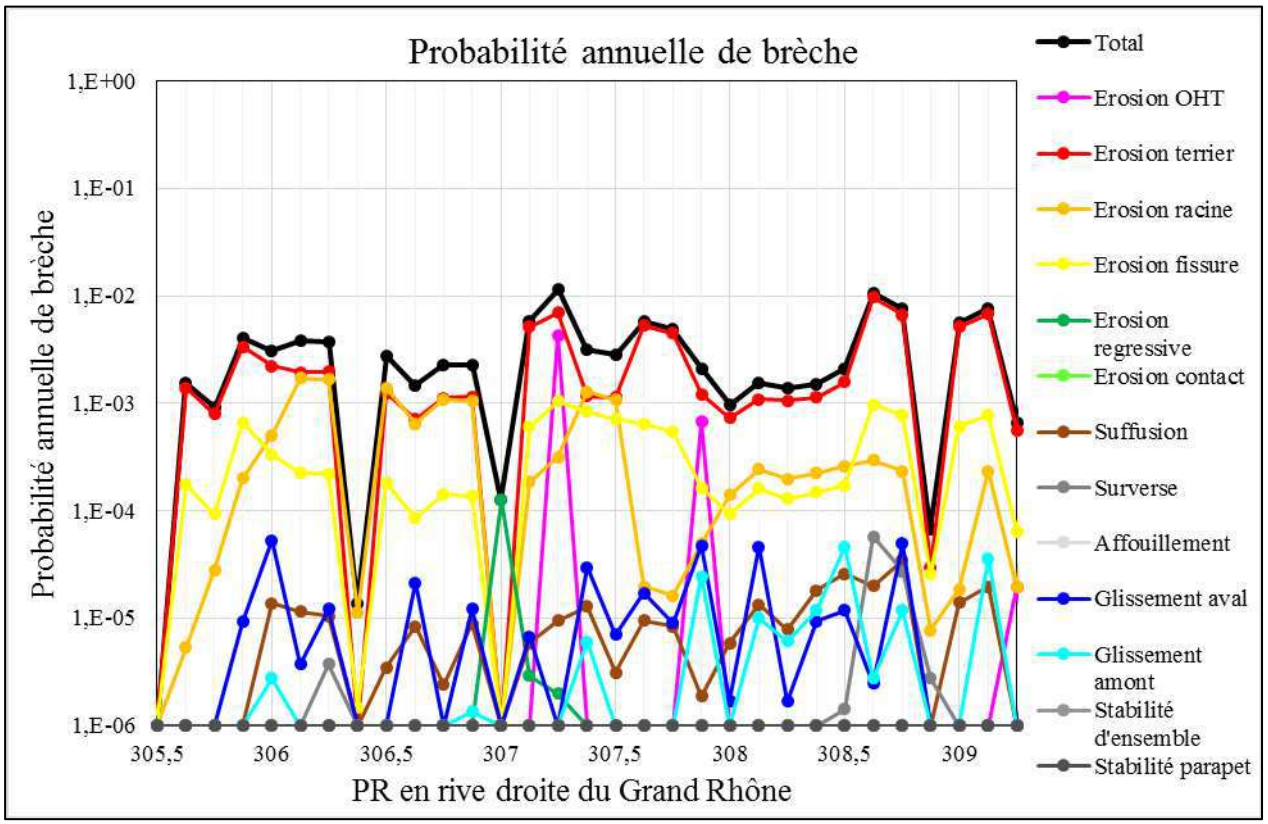


Figure 57 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon La Commanderie – Bois Verdun

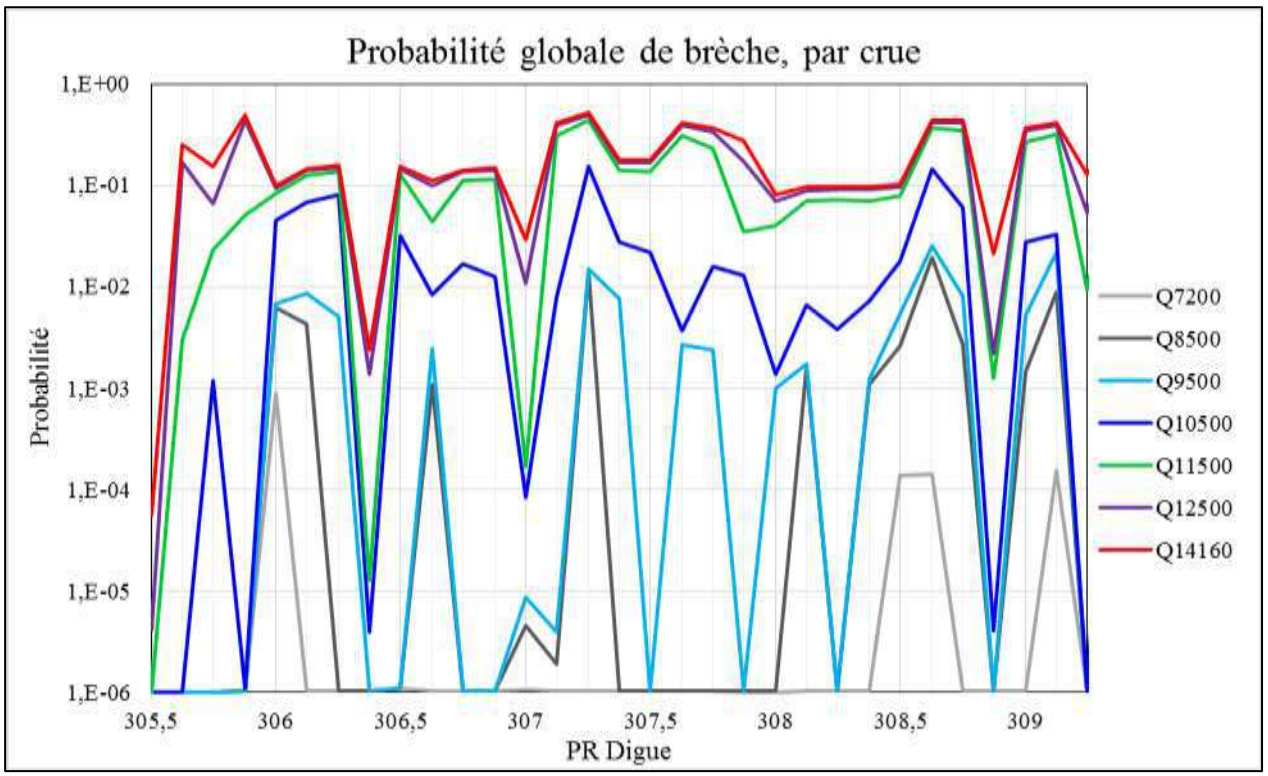


Figure 58 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon La Commanderie – Bois Verdun

3.13 DIGUE DE BOIS VERDUN A CHARTROUSE (GRD10)

Le tronçon Bois Verdun - Chartrouse mesure 2 km, il comprend les PR0.125 compris entre GRD 309.25 et 311.75 ; la digue n'a pas fait l'objet de travaux de confortement depuis son rehaussement au XIX^{ème} siècle. Des travaux de carrossabilité ont été réalisés en 2010.

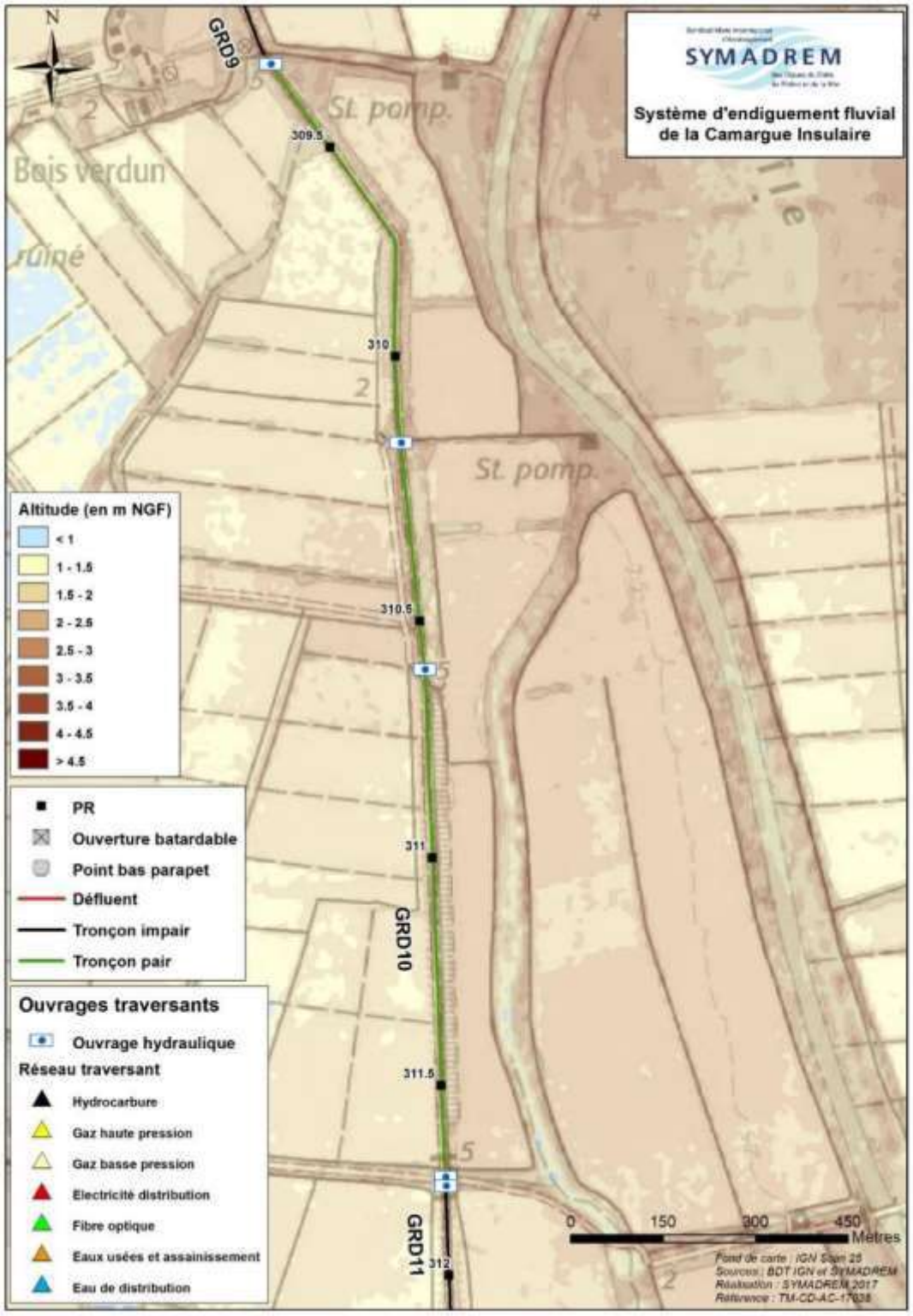


Figure 43. Plan de situation de Montlong à la Louisiane 5 : Bois Verdun-Chartrouse

Tableau 61. Synthèse de géométrie, tronçon Bois Verdun - Chartrouse

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	4,8	4,0	4,4	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	3,8	1,8	2,4	0,5
Cote à 20m du pdav	m NGF	2,6	1,5	2,0	0,3
Cote de pied de digue amont	m NGF	3,6	2,2	2,6	0,3
Cote à 20m du pdam	m NGF	2,9	1,6	2,4	0,3
Hauteur de digue coté aval	m	2,8	0,6	2,0	0,5
Hauteur de digue côté amont	m	2,3	0,9	1,7	0,3
Fruit aval	L/V	23,1	1,9	3,4	4,5
Fruit amont	L/V	5,7	1,8	2,6	1,0
Largeur du ségonnal	m	628	152	402	160

Ce tronçon est loin du Rhône.

Tableau 62. Données hydrauliques, tronçon Bois Verdun - Chartrouse

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	2,6	2,4	1,6	1,9	0,1	0,0	0,0	0,0	0,8
8 500	3,0	2,8	1,2	1,5	0,1	0,1	0,1	0,0	0,6
9 500	3,1	2,9	1,1	1,4	0,1	0,1	0,1	0,0	0,6
10 500	3,5	3,3	0,8	1,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,4
11 500	3,8	3,6	0,5	0,7	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3
12 500	4,0	3,7	0,3	0,6	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2
14 160	4,0	3,8	0,3	0,5	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2

Caractéristiques du tronçon Bois-Verdun-Chartrouse vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue du XIXème siècle avec un REX négatif. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il y a plusieurs ouvrages hydrauliques sur ce tronçon, celui qui présente la transition la plus à risque comprend un réseau au compactage incertain mais une étanchéité satisfaisante. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit – racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec présence d'arbres en pied de talus (deux côtés). La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit – fissure

Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec observation d'infiltrations et de terriers de blaireaux par le passé. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable propre en fondation. La couche de sable, dont le toit est à 1m de profondeur, mesure 5m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il y a eu des départs de brèches en 1856. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m

- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue n'a pas été investiguée. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 150m et la pente hydraulique est entre 7 et 13 cm/km ; la berge est recouverte d'herbacés.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge herbacée

Tableau 63. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Bois Verdun - Chartrouse

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	2E-11	2E-09	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**3E-06**
12 500	5E-06	0E+00	1E-04	4E-04	2E-08	1E-10	2E-08	1E-06	4E-13	1E-06	6E-06			**4E-03**
14 160	1E-05	0E+00	2E-04	7E-04	2E-08	4E-08	2E-06	1E-06	4E-13	1E-06	6E-06			**1E-02**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	4E-06	0E+00	3E-04	4E-04	2E-08	1E-11	0E+00	1E-06	4E-13	1E-05	3E-06			**7E-04**
8 500	7E-03	0E+00	1E-03	2E-03	3E-08	9E-09	0E+00	1E-06	4E-13	2E-05	9E-06			**1E-02**
9 500	1E-02	5E-04	1E-03	2E-03	6E-08	1E-08	1E-07	1E-06	4E-13	2E-05	1E-05			**1E-02**
10 500	2E-01	1E-03	9E-03	2E-02	8E-07	1E-07	2E-07	1E-06	4E-13	2E-05	2E-05			**2E-01**
11 500	3E-01	7E-03	2E-02	3E-02	7E-06	3E-07	6E-04	2E-03	4E-13	2E-05	2E-05			**3E-01**
12 500	3E-01	8E-03	2E-02	3E-02	1E-05	6E-07	1E-03	3E-02	4E-13	2E-05	2E-05			**4E-01**
14 160	3E-01	9E-03	2E-02	3E-02	1E-05	1E-06	1E-03	5E-02	4E-13	2E-05	2E-05			**4E-01**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	3E-05	0E+00	4E-03	2E-03	2E-08	2E-10	0E+00	1E-06	4E-13	3E-04	4E-05			**7E-03**
8 500	3E-02	0E+00	5E-03	3E-03	2E-07	2E-07	0E+00	1E-06	4E-13	3E-04	4E-05			**4E-02**
9 500	4E-02	1E-02	6E-03	4E-03	1E-06	2E-07	2E-06	1E-06	4E-13	3E-04	1E-04			**4,9E-02**
10 500	3E-01	3E-02	5E-02	3E-02	2E-05	2E-07	2E-06	1E-06	4E-13	3E-04	1E-04			**4E-01**
11 500	4E-01	1E-01	6E-02	4E-02	1E-04	1E-06	1E-03	2E-02	4E-13	3E-04	1E-04			**5E-01**
12 500	5E-01	2E-01	7E-02	5E-02	2E-04	7E-06	3E-03	1E-01	4E-13	3E-04	1E-04			**5E-01**
14 160	5E-01	2E-01	7E-02	5E-02	2E-04	2E-05	3E-03	2E-01	4E-13	3E-04	1E-04			**6E-01**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**2E-02**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**1E-02**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au GRD 309,50. Elle est de 2.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.

L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 9 500 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 10 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 1.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) ;
- un risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 9 500 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 9 500 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 10 500 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5%, revu, et 50 % des probabilités maximales.

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 9 500 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le principal risque est l'érosion de conduit, en particulier dans un terrier ; il est situé sur tout le linéaire mais est plus important entre GRD 309.5 et 310.

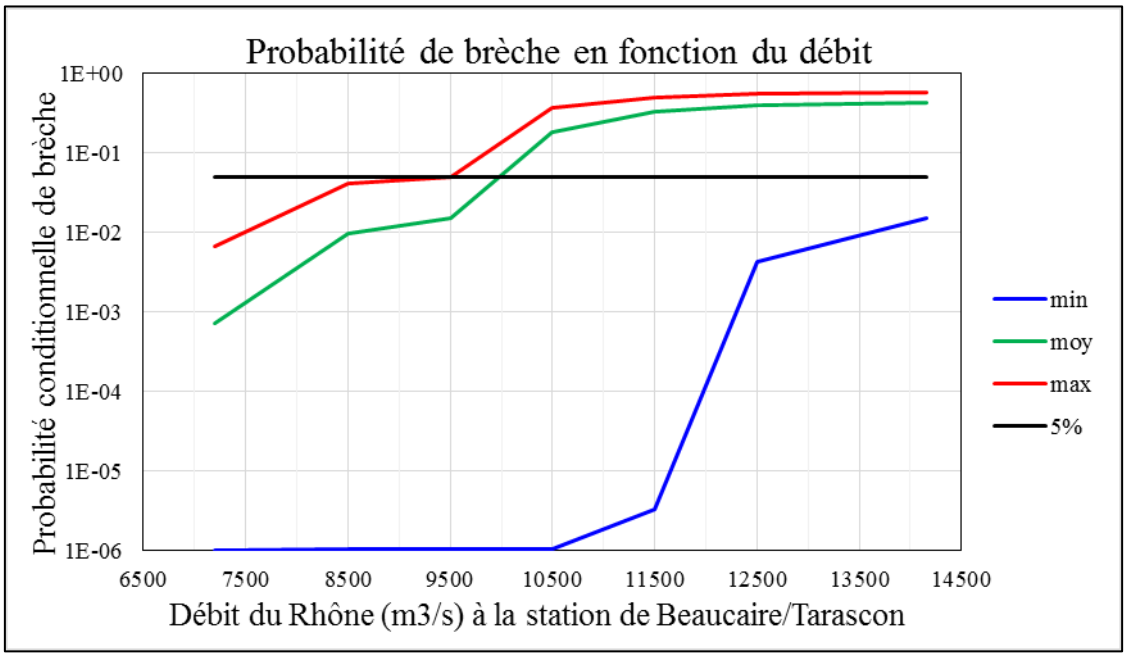


Figure 59 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Bois Verdun - Chartrouse

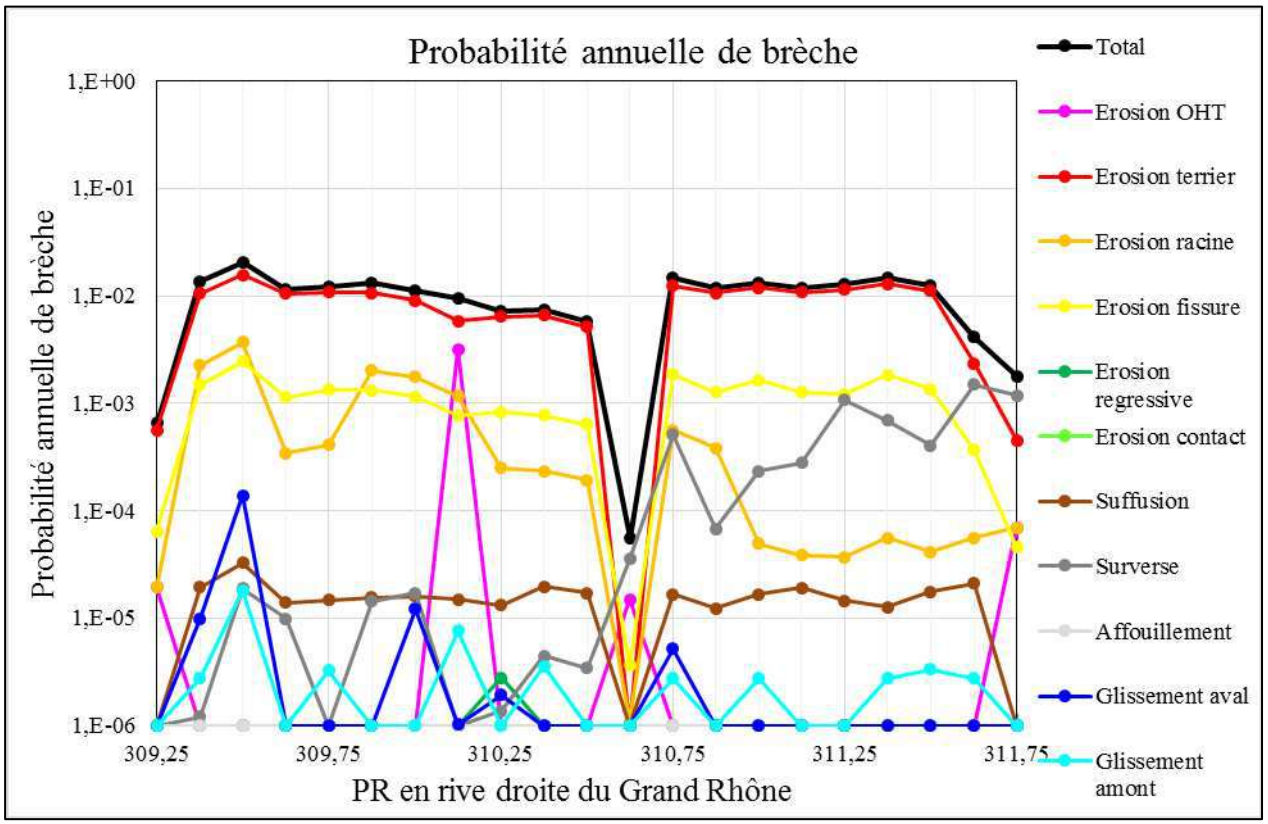


Figure 60 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Bois Verdun - Chartrouse

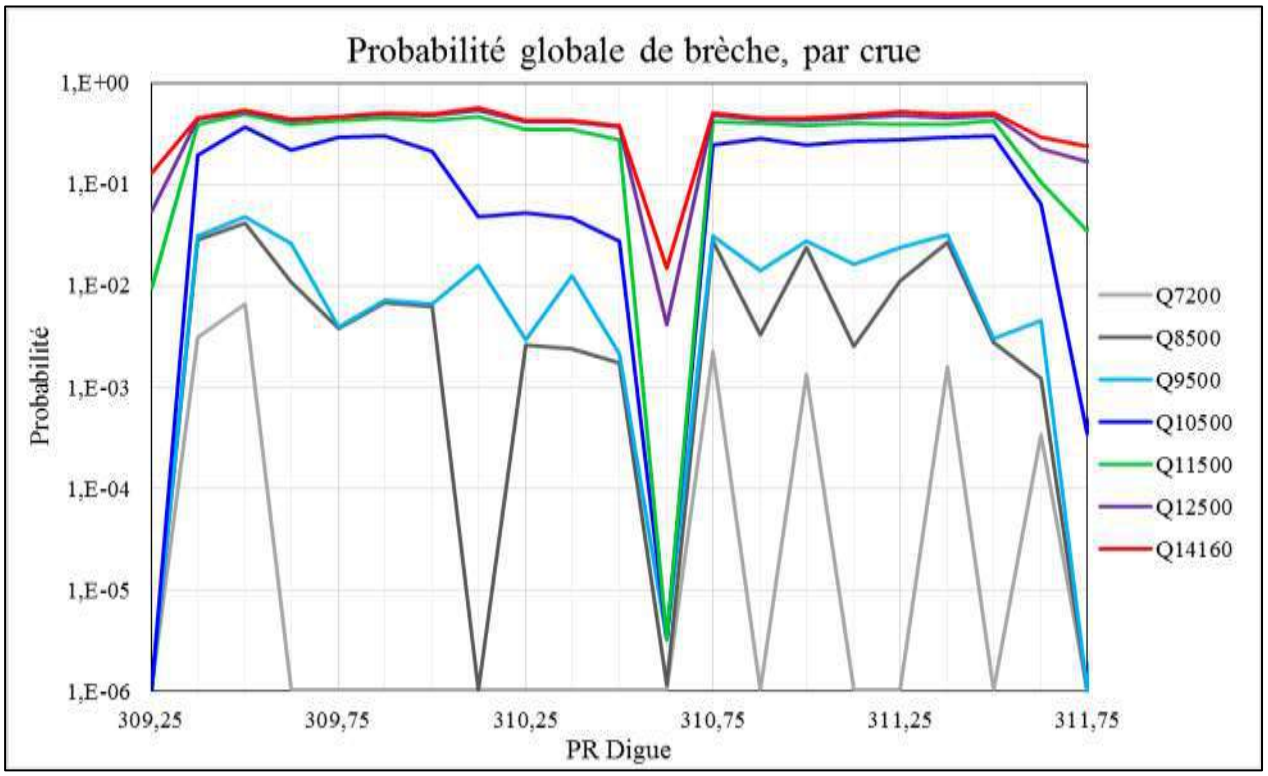


Figure 61 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Bois Verdun - Chartrouse

3.14 DIGUE DE CHARTROUSE A LA LOUISIANE (GRD11)

Le tronçon Chartrouse - la Louisiane mesure 1.2 km, il comprend les PR0.125 compris entre GRD 311.875 et 313 ; la digue n'a pas fait l'objet de travaux de confortement depuis son rehaussement au XIX^{ème} siècle. Des travaux de carrossabilité ont été réalisés en 2010.

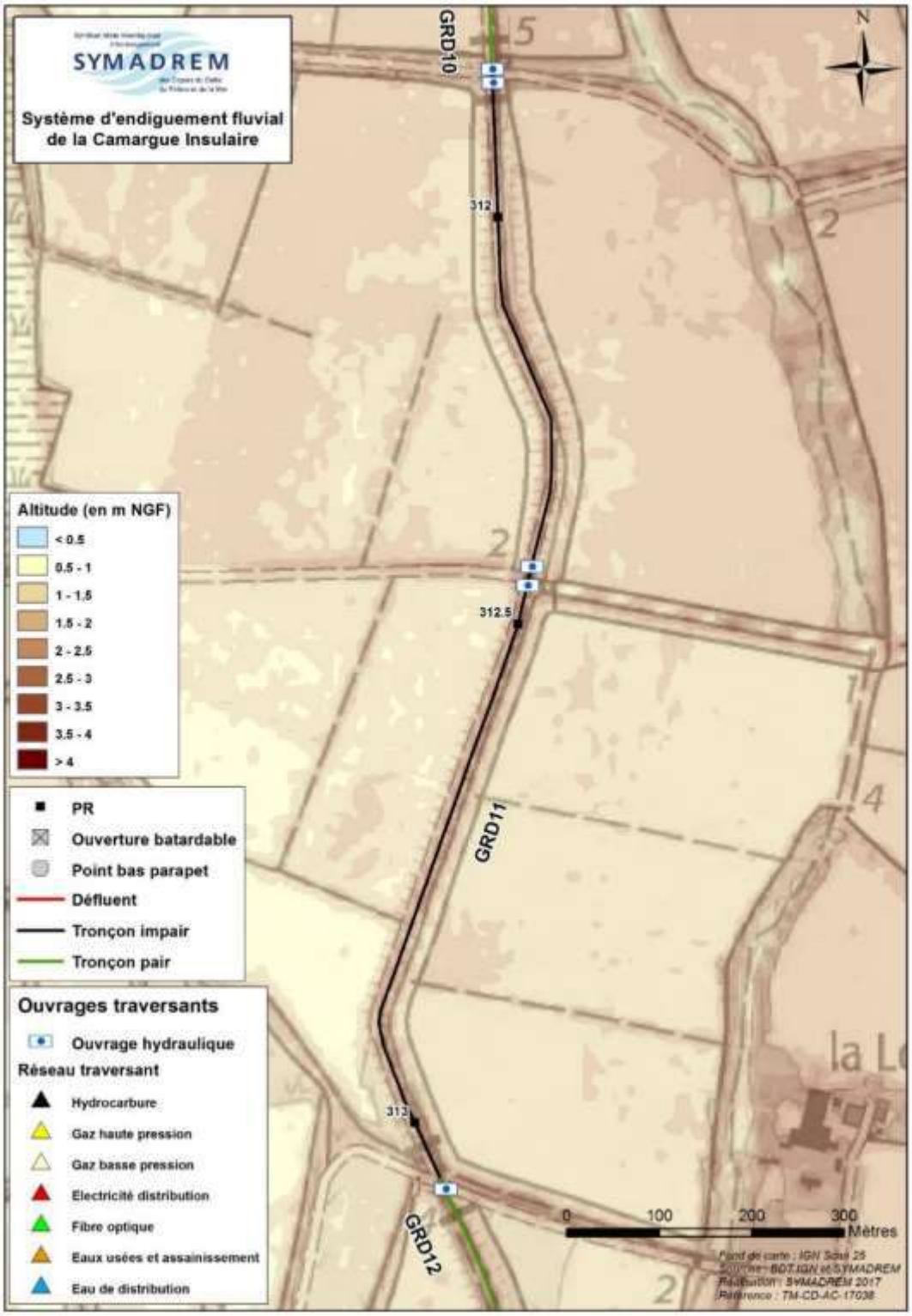


Figure 44. Plan de situation de Montlong à la Louisiane 6 : Chartrouse-La Louisiane

Tableau 64. Synthèse de géométrie, tronçon Chartrouse - la Louisiane

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	4,1	3,9	4,0	0,1
Cote de pied de digue aval	m NGF	2,5	1,8	2,1	0,2
Cote à 20m du pdav	m NGF	1,9	1,3	1,6	0,2
Cote de pied de digue amont	m NGF	3,2	1,8	2,4	0,5
Cote à 20m du pdam	m NGF	2,2	1,9	2,1	0,1
Hauteur de digue coté aval	m	2,1	1,6	1,9	0,2
Hauteur de digue côté amont	m	2,3	0,8	1,6	0,5
Fruit aval	L/V	3,4	2,3	2,8	0,3
Fruit amont	L/V	3,8	1,8	2,5	0,6
Largeur du ségonnal	m	896	649	782	96

Ce tronçon est loin du Rhône.

Tableau 65. Données hydrauliques, tronçon Chartrouse - la Louisiane

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	2,4	2,3	1,5	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7
8 500	2,8	2,7	1,1	1,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
9 500	2,9	2,8	1,0	1,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
10 500	3,3	3,1	0,7	0,8	0,1	0,1	0,0	0,0	0,3
11 500	3,6	3,4	0,4	0,5	0,2	0,1	0,0	0,0	0,2
12 500	3,7	3,5	0,3	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1
14 160	3,8	3,6	0,2	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1

Caractéristiques du tronçon Chartrouse - la Louisiane vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue du XIXème siècle avec un REX neutre. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
L'ouvrage hydraulique sur ce tronçon comprend une structure rigide réalisée sur une partie de la traversée. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,03
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit – racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec présence d'arbres en pied de talus (localement des deux côtés). La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5 localement
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit – fissure

Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle sans observation d'infiltrations ou de terriers par le passé. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable propre en fondation. La couche de sable, dont le toit est à 3m de profondeur, mesure 5m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il y a eu des brèches anciennes (1856). Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m

- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue n'a pas été investiguée. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 650m et la pente hydraulique est entre 7 et 13 cm/km ; la berge est recouverte d'herbacés.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge herbacée

Analyse post-premiers résultats, GRD 312,875 :

2 amorces de terriers ont été repérées en 2008 et 2009, situés 100 et 200m à l'aval. En dehors de cela cette zone n'est pas historiquement une zone de terriers et lui attribuer un REX négatif parait exagéré ; en considèrent un REX neutre, la probabilité liée aux terriers passe de 11,6 à 2,3% et la probabilité globale devient de 3.5%.

Tableau 66. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Chartrouse - la Louisiane

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
10 500	2E-05	0E+00	3E-04	2E-03	4E-08	1E-10	2E-08	1E-06	4E-13	1E-06	6E-06			**2E-03**
11 500	3E-02	0E+00	1E-03	7E-03	1E-07	2E-10	7E-08	3E-03	4E-13	1E-06	6E-06			**6E-02**
12 500	7E-02	0E+00	1E-03	7E-03	1E-07	9E-08	1E-04	6E-02	4E-13	1E-06	6E-06			**1E-01**
14 160	8E-02	0E+00	1E-03	7E-03	1E-07	1E-07	2E-04	1E-01	4E-13	1E-06	6E-06			**2E-01**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	3E-06	1E-05	6E-05	4E-04	1E-08	7E-09	0E+00	1E-06	4E-13	5E-07	2E-05			**5E-04**
8 500	5E-03	3E-05	1E-04	9E-04	2E-08	4E-08	0E+00	1E-06	4E-13	8E-07	2E-05			**6E-03**
9 500	8E-03	3E-05	2E-04	2E-03	3E-08	4E-08	3E-09	1E-06	4E-13	8E-07	2E-05			**1E-02**
10 500	6E-02	3E-04	2E-03	1E-02	1E-07	3E-07	2E-05	1E-06	4E-13	1E-06	3E-05			**7E-02**
11 500	1E-01	5E-04	2E-03	1E-02	1E-07	2E-06	6E-04	2E-02	4E-13	1E-06	3E-05			**1E-01**
12 500	1E-01	5E-04	2E-03	1E-02	1E-07	7E-06	1E-03	1E-01	4E-13	1E-06	4E-05			**2E-01**
14 160	1E-01	5E-04	2E-03	1E-02	1E-07	1E-05	1E-03	2E-01	4E-13	1E-06	4E-05			**3E-01**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	1E-05	1E-04	4E-04	2E-03	2E-08	5E-08	0E+00	1E-06	4E-13	1E-06	1E-04			**2E-03**
8 500	2E-02	3E-04	7E-04	4E-03	3E-08	2E-07	0E+00	1E-06	4E-13	2E-06	1E-04			**3E-02**
9 500	3E-02	3E-04	8E-04	1E-02	8E-08	2E-07	9E-09	1E-06	4E-13	2E-06	2E-04			**3E-02**
10 500	3E-01	3E-03	9E-03	3E-02	2E-07	1E-06	7E-05	1E-06	4E-13	2E-06	2E-04			**3E-01**
11 500	4E-01	5E-03	1E-02	4E-02	2E-07	6E-06	1E-03	4E-02	4E-13	2E-06	2E-04			**4E-01**
12 500	4E-01	5E-03	1E-02	4E-02	2E-07	3E-05	3E-03	2E-01	4E-13	2E-06	3E-04			**5,4E-01**
14 160	4E-01	5E-03	1E-02	4E-02	2E-07	5E-05	3E-03	3E-01	4E-13	2E-06	3E-04			**6E-01**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**2E-02**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**5E-03**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au GRD 281,250. Elle est de 2.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.

L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 9 500 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 11 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 5.10^{-3}, ce qui correspond à un événement probable (classe B) ;
- un risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 9 500 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 9 500 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 10 500 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent environ aux seuils à 5 et 50 % des probabilités maximales.

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 9 500 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le principal risque est l'érosion de conduit, en particulier au niveau d'un terrier ; le risque majeur est localisé au GRD 312.75 et 313.

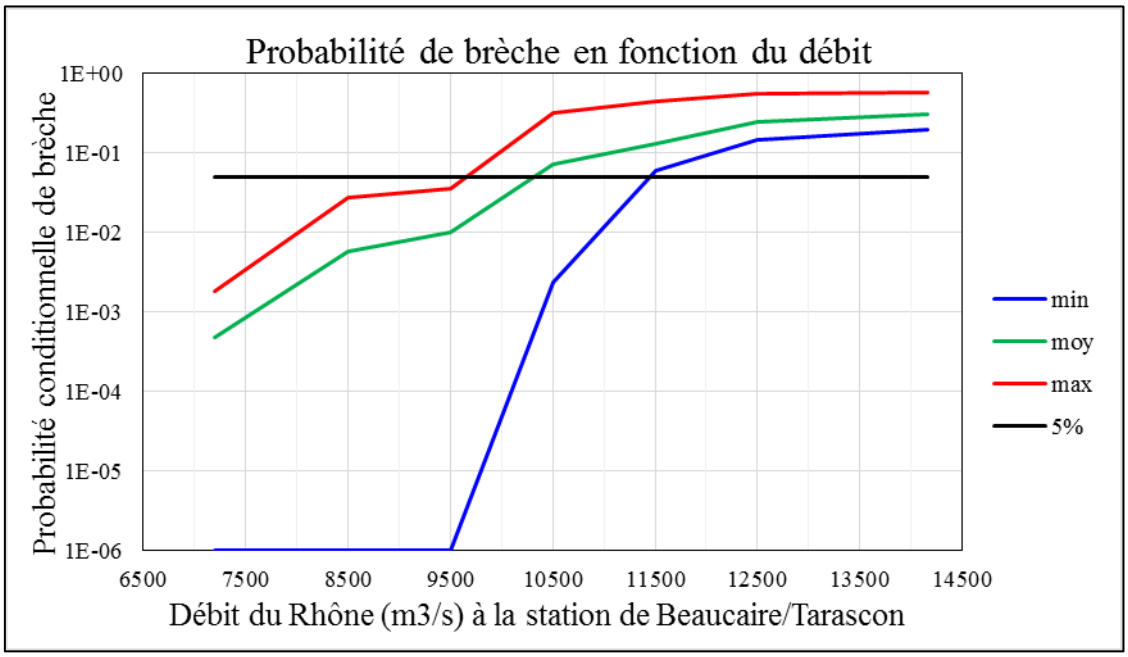


Figure 62 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Chartrouse - la Louisiane

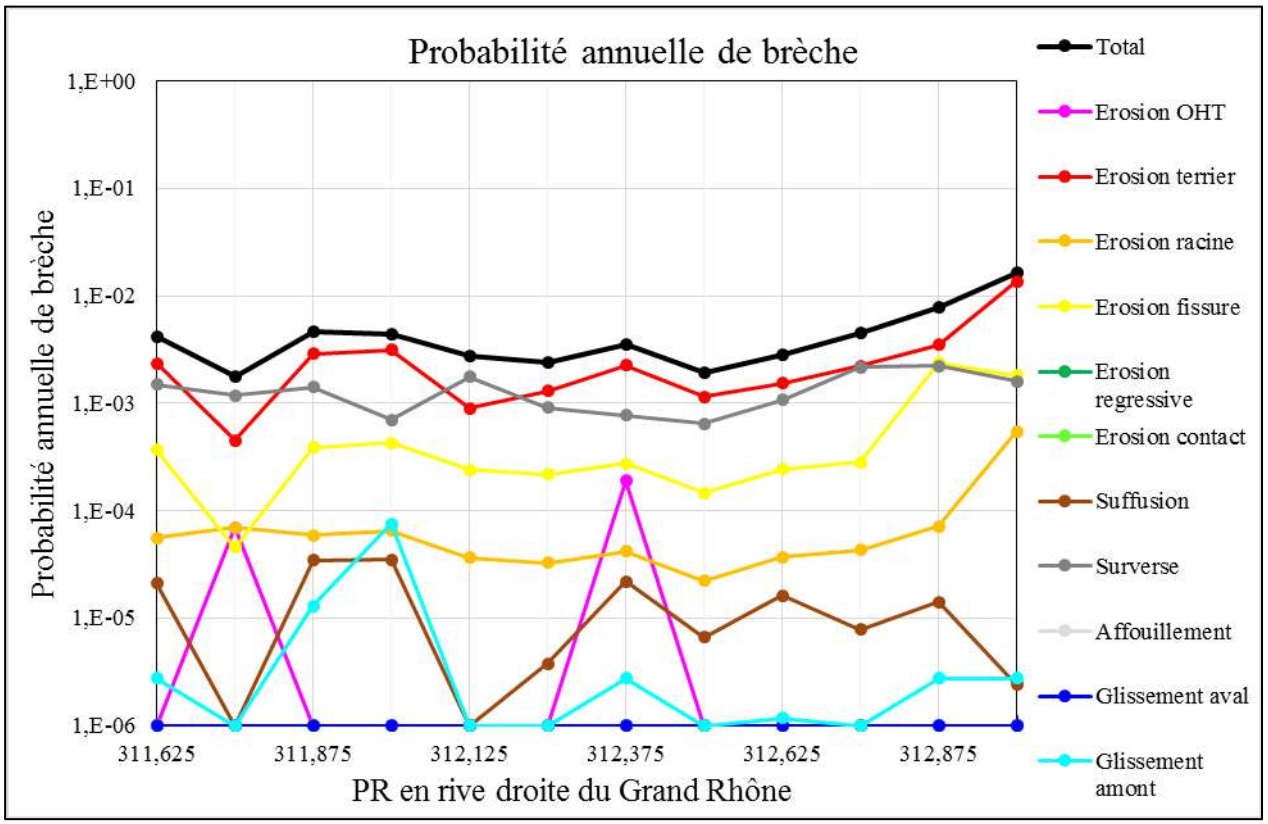


Figure 63 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Chartrouse - la Louisiane

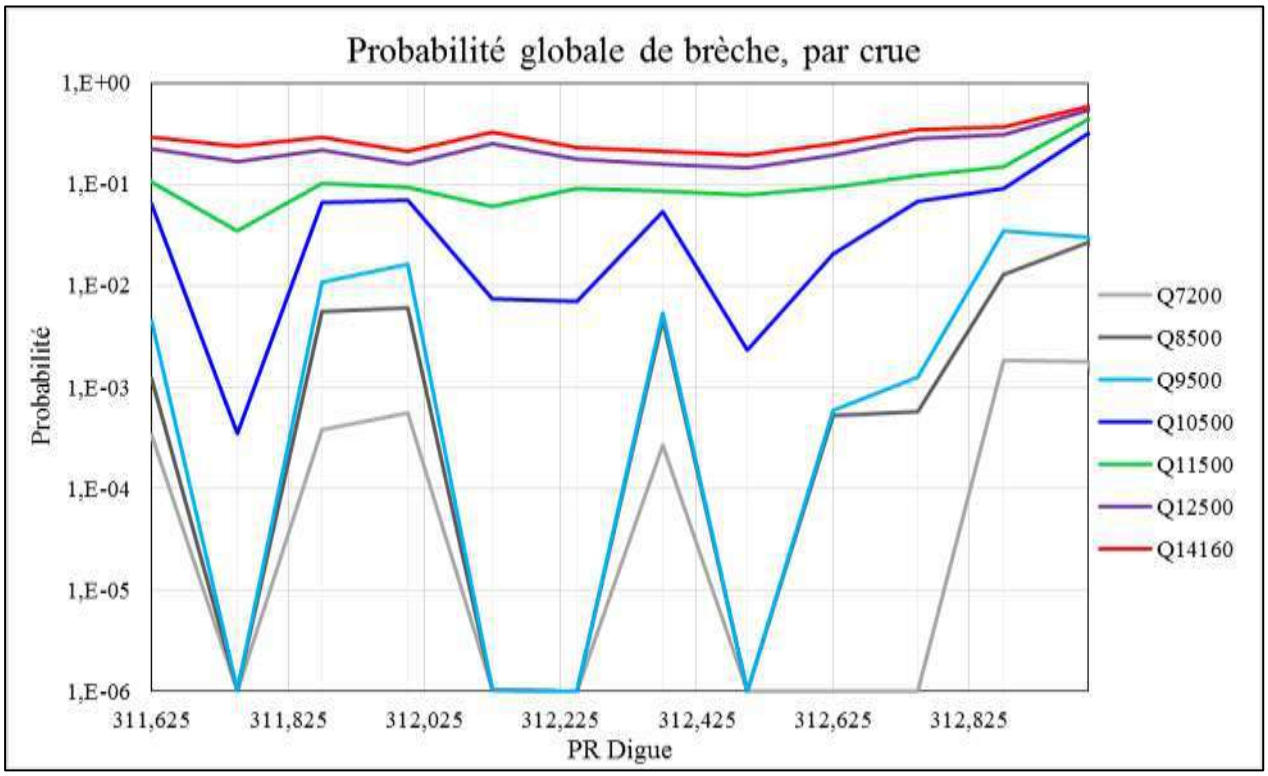


Figure 64 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Chartrouse - la Louisiane

3.15 DIGUE DE LA LOUISIANE A L'ESQUINEAU (GRD12)

Le tronçon Louisiane - Esquineau mesure 7.5 km, il comprend les PR0.125 compris entre GRD 313.125 et 319.375 ; la digue n'a pas fait l'objet de travaux de confortement depuis son rehaussement au XIX^{ème} siècle. Des travaux de carrossabilité ont été réalisés en 2016.

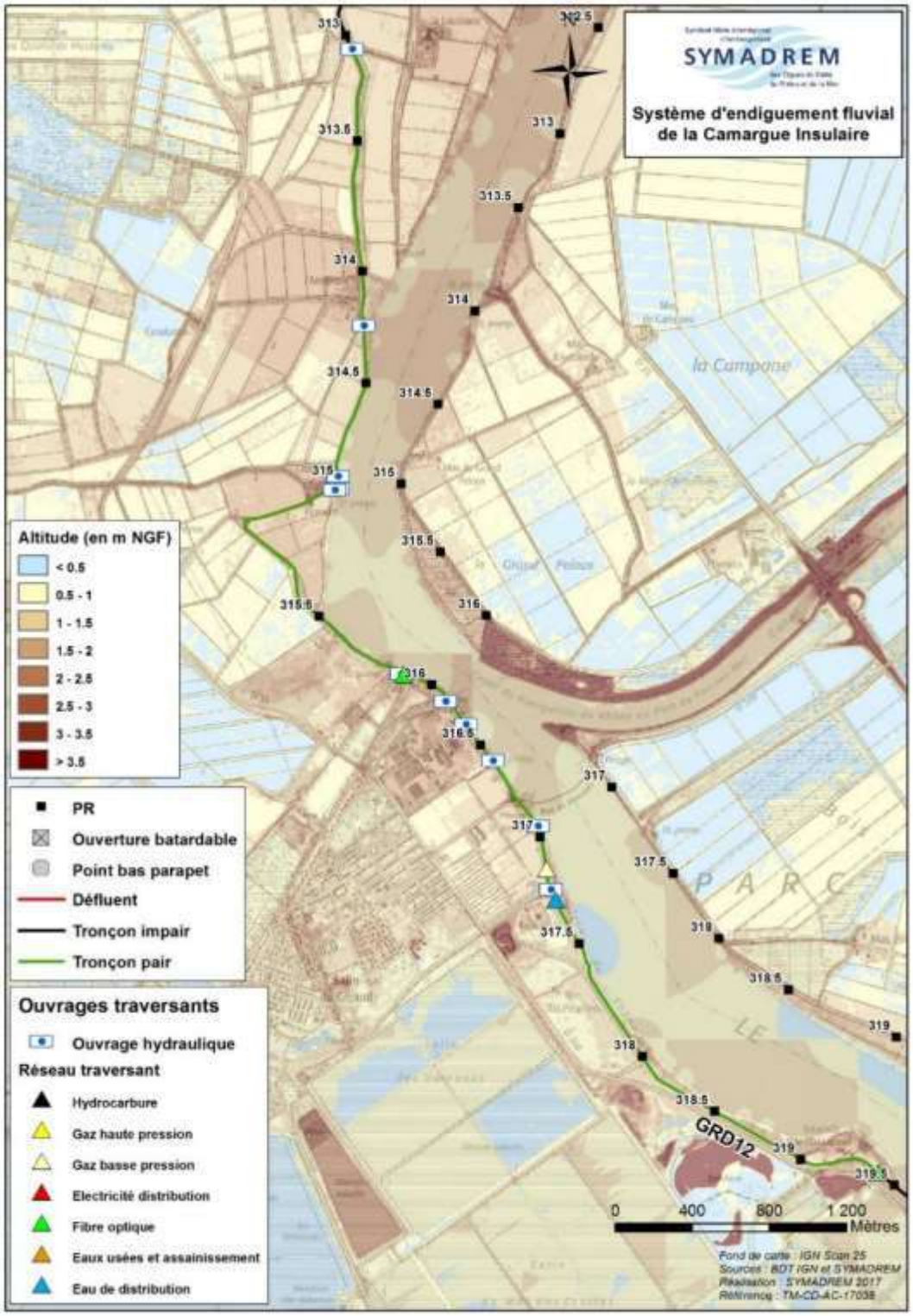


Figure 45. Plan de situation de la Louisiane à l'Embouchure 1 : La Louisiane-l'Esquineau

Tableau 67. Synthèse de géométrie, tronçon Louisiane - Esquineau

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	4,2	2,9	3,4	0,4
Cote de pied de digue aval	m NGF	3,3	0,4	1,9	0,7
Cote à 20m du pdav	m NGF	3,2	0,5	1,5	0,5
Cote de pied de digue amont	m NGF	3,9	0,3	1,9	0,6
Cote à 20m du pdam	m NGF	3,7	0,3	1,2	0,8
Hauteur de digue coté aval	m	2,6	0,0	1,5	0,5
Hauteur de digue côté amont	m	3,8	0,3	1,5	0,6
Fruit aval	L/V	100,0	1,1	5,1	14,0
Fruit amont	L/V	6,8	1,1	2,7	1,0
Largeur du ségonnal	m	703	2	113	175

Ce tronçon peut être proche du Rhône, dans les zones de faible ségonnal la bathymétrie est variable et peu atteindre : -22 m NGF, au GRD 316.

Tableau 68. Données hydrauliques, tronçon Louisiane - Esquineau

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	2,3	1,7	0,7	1,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,9
8 500	2,7	1,9	0,3	1,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,7
9 500	2,8	2,1	0,3	1,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,7
10 500	3,1	2,4	-0,1	0,7	0,2	0,1	0,0	0,0	0,5
11 500	3,4	2,6	-0,3	0,4	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3
12 500	3,6	2,7	-0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2
14 160	3,6	2,7	-0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2

Caractéristiques du tronçon Louisiane - Esquineau vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue du XIXème siècle avec un REX négatif. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il y a plusieurs ouvrages hydrauliques sur ce tronçon, celui qui présente la transition la plus à risque comprend un réseau au compactage et à l'étanchéité incertains. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,99
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit – racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec présence d'arbres en pied de talus (deux côtés). La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit – fissure

Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec observation d'infiltrations et de terriers de blaireaux par le passé. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable propre en fondation. La couche de sable, dont le toit est à 1m de profondeur, mesure 5m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il y a eu un départ de brèche en 1856 et un en 1993, qui a réparé en urgence seulement. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m

- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue a été investigué sans présence de grave. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée ; excepté au point bas (route de chamone) où il est goudronné.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée (et aux matériaux de carrière localement)

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 2m et la pente hydraulique est de 7 à 13 cm/km sur la partie amont, entre 20 et 30 cm/km autour du GRD 315.5 et de 5 à 8 cm/km à l'aval ; la berge est protégée par des enrochements anciens.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge avec enrochements anciens

Analyse post-premiers résultats, GRD 313,5 ; 316,625 ; 317,25 :

L'ouvrage n'est pas mis en charge avant une crue decennale, voir cinquantenale pour le GRD 317.25.

Le talus analysé, avec une pente respectivement de 1,12/1 ; 1,09/1 et 1,28/1, serait instable avec des matériaux de mauvaise qualité ; ce qui explique le résultat du premier calcul. Ce dernier est mené avec des matériaux moyens car la composition n'est pas connue pour chaque tranche de 125m ; mais il tient hors charge depuis 200 ans, la qualité semble donc suffisante.

Tableau 69. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Louisiane - Esquineau

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
12 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
14 160	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	3E-04	0E+00	1E-03	2E-04	1E-08	6E-07	0E+00	1E-06	6E-08	2E-05	2E-06			**2E-03**
8 500	7E-03	4E-04	7E-03	1E-03	3E-08	1E-06	0E+00	1E-06	6E-08	9E-03	3E-03			**3E-02**
9 500	1E-02	5E-04	1E-02	2E-03	4E-08	2E-06	2E-08	2E-06	6E-08	9E-03	3E-03			**4E-02**
10 500	8E-02	4E-03	2E-02	8E-03	8E-08	1E-05	1E-06	2E-02	6E-08	1E-02	3E-03			**1E-01**
11 500	1E-01	8E-03	3E-02	1E-02	1E-07	2E-05	7E-05	1E-01	6E-08	1E-02	3E-03			**3E-01**
12 500	2E-01	9E-03	3E-02	1E-02	1E-07	4E-05	1E-04	3E-01	6E-08	1E-02	3E-03			**4E-01**
14 160	2E-01	1E-02	3E-02	1E-02	1E-07	4E-05	2E-04	3E-01	6E-08	1E-02	3E-03			**5E-01**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	1E-02	0E+00	9E-03	2E-03	4E-08	2E-05	0E+00	1E-06	6E-07	5E-04	1E-05			**2E-02**
8 500	5E-02	1E-02	4E-02	6E-03	2E-07	6E-05	0E+00	1E-06	6E-07	4E-01	1E-01			**4E-01**
9 500	7E-02	1E-02	5E-02	7E-03	2E-07	8E-05	8E-07	5E-05	6E-07	4E-01	1E-01			**4E-01**
10 500	3E-01	1E-01	7E-02	3E-02	2E-07	1E-04	1E-05	1E-01	6E-07	4E-01	1E-01			**4E-01**
11 500	4E-01	2E-01	7E-02	4E-02	2E-07	1E-04	2E-04	8E-01	6E-07	4E-01	2E-01			**8E-01**
12 500	4E-01	2E-01	8E-02	4E-02	2E-07	5E-04	4E-04	9E-01	6E-07	4E-01	2E-01			**1E+00**
14 160	4E-01	2E-01	8E-02	4E-02	2E-07	6E-04	4E-04	1E+00	6E-07	4E-01	2E-01			**1E+00**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**6E-02**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**1E-02**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au GRD 313.5. Elle est de 6.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.
L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 7 500 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 10 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 2.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) ;
- un risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 9 500 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 7 500 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 10 500 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 % des probabilités maximales.

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 9 500 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Différents phénomènes sont à fort risque, variant sur le linéaire.

Ce tronçon sera prochainement repris dans le cadre des travaux à Salin de Giraud.

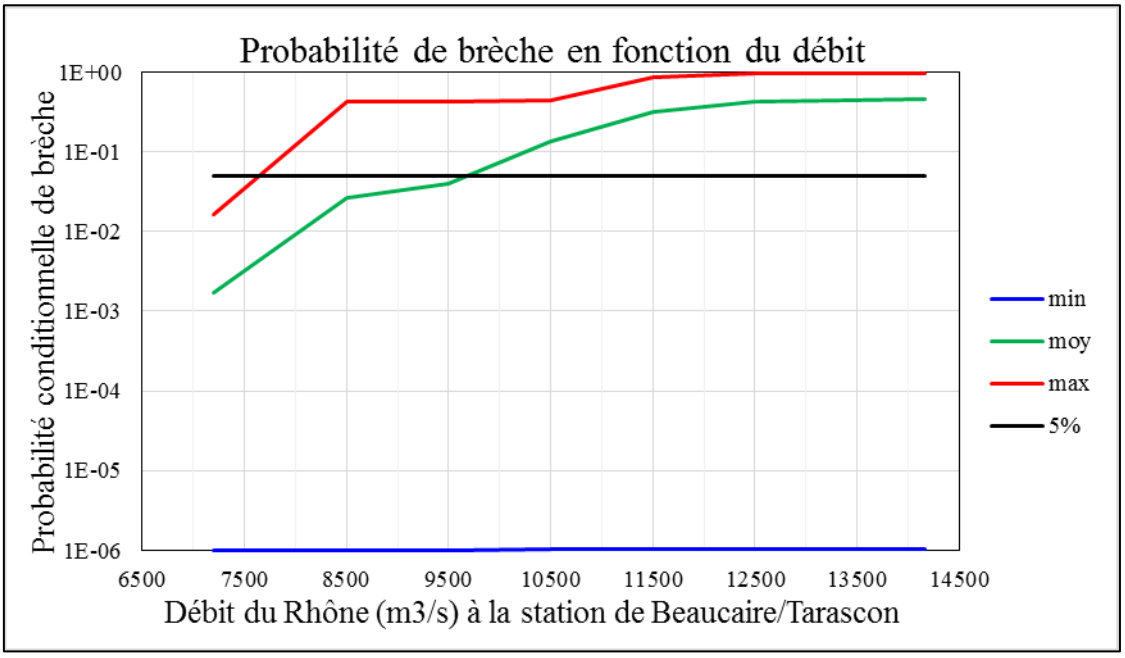


Figure 65 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Louisiane - Esquineau

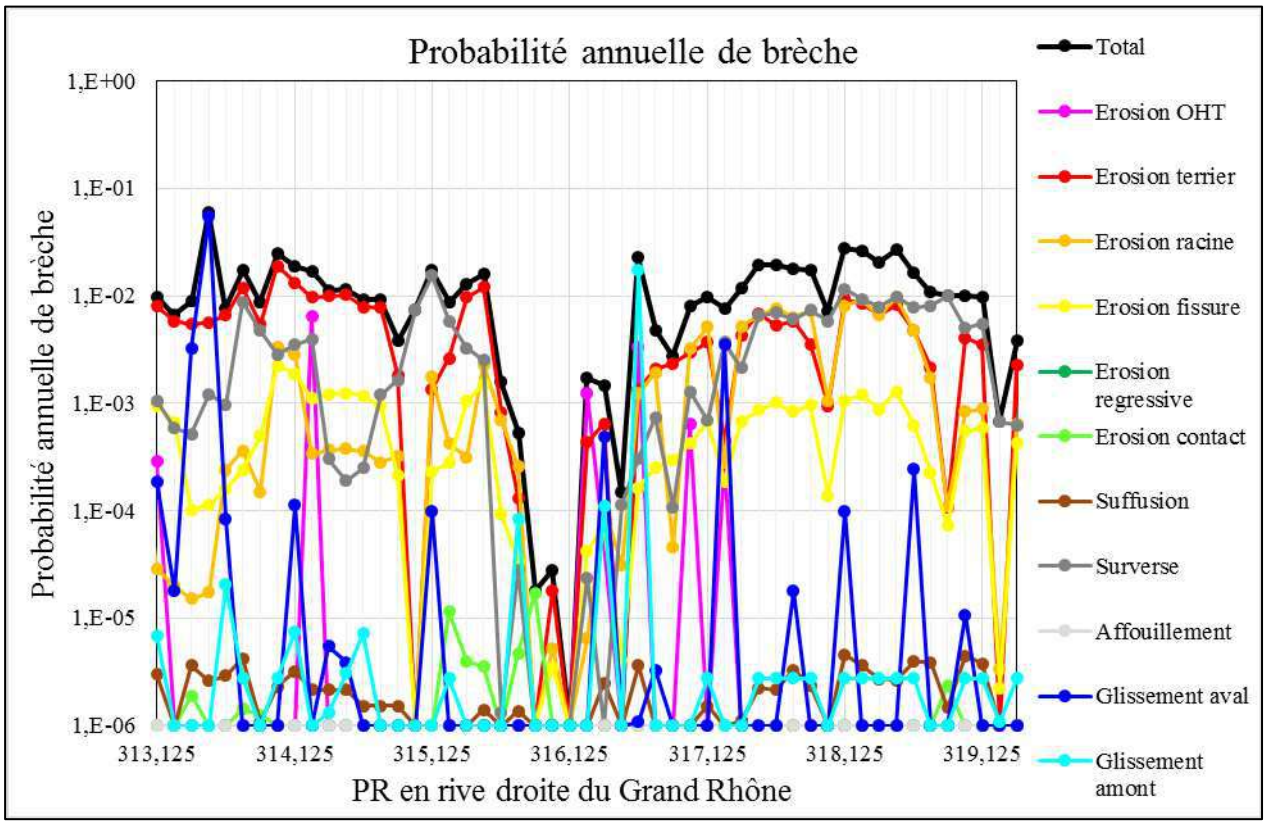


Figure 66 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Louisiane - Esquineau

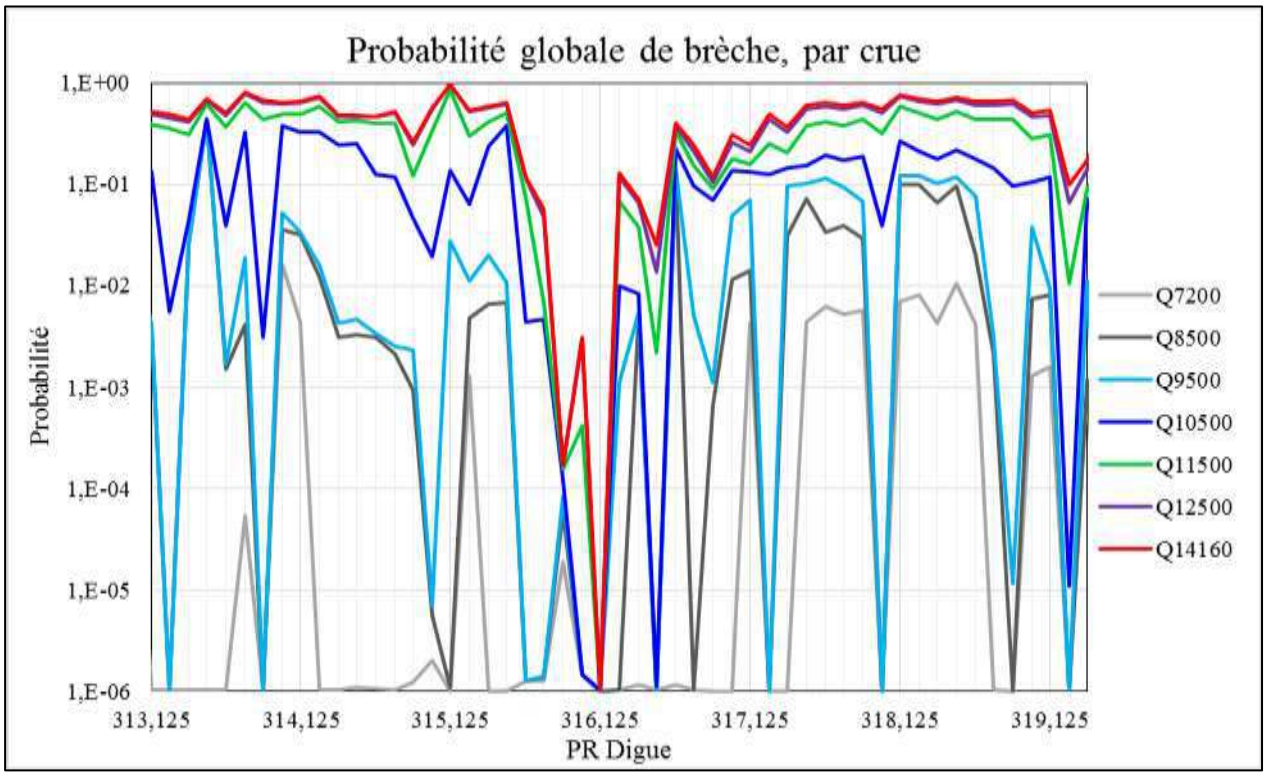


Figure 67 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Louisiane - Esquineau

3.16 DIGUE DE L'ESQUINEAU A LA PALISSADE (GRD13)

Le tronçon Esquineau - Palissade mesure 4 km, il comprend les PR0.125 compris entre GRD 319.5 et 323.375; la digue n'a pas fait l'objet de travaux de confortement depuis son rehaussement au XIX^{ème} siècle. Des travaux de carrossabilité ont été réalisés en 2016.

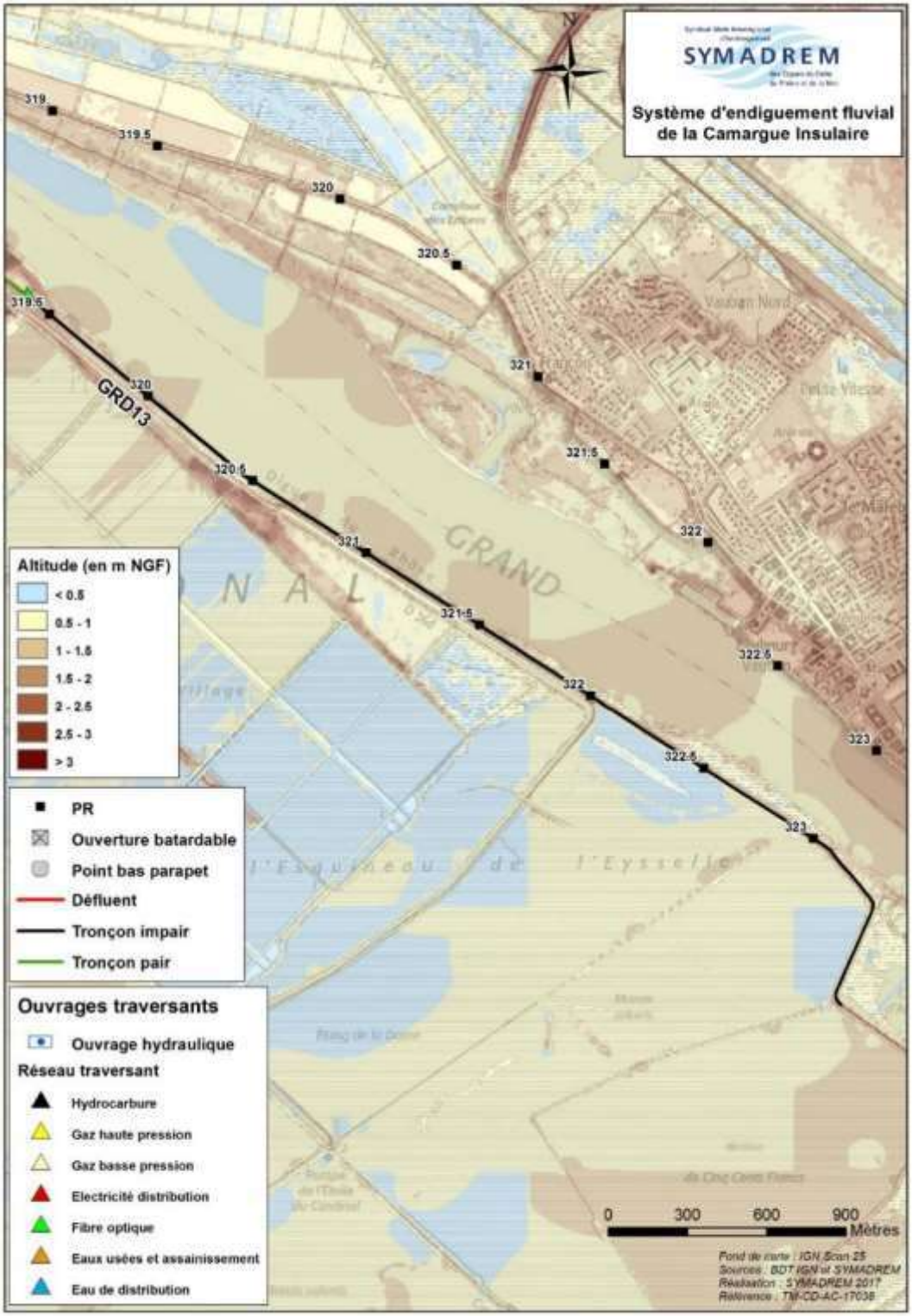


Figure 46. Plan de situation de la Louisiane à l'Embouchure 1 : l'Esquineau-L'Embouchure

Tableau 70. Synthèse de géométrie, tronçon Esquineau - Palissade

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	3,1	2,3	2,7	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	2,4	0,0	1,2	0,6
Cote à 20m du pdav	m NGF	2,0	0,2	0,9	0,5
Cote de pied de digue amont	m NGF	2,3	0,2	1,3	0,6
Cote à 20m du pdam	m NGF	2,0	-0,2	0,6	0,6
Hauteur de digue coté aval	m	2,6	0,4	1,5	0,6
Hauteur de digue côté amont	m	2,6	0,2	1,4	0,7
Fruit aval	L/V	10,4	1,7	2,8	1,6
Fruit amont	L/V	5,7	1,2	2,4	0,9
Largeur du ségonnal	m	100	2	36	30

Ce tronçon est parfois proche du Rhône, dans ces zones la bathymétrie varie entre -7 et -13 m NGF.

Tableau 71. Données hydrauliques, tronçon Esquineau - Palissade

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	1,7	1,4	0,9	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,6
8 500	1,9	1,4	0,8	1,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,5
9 500	2,1	1,6	0,6	0,8	0,2	0,1	0,0	0,0	0,5
10 500	2,4	1,9	0,4	0,5	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3
11 500	2,5	2,0	0,3	0,4	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2
12 500	2,6	2,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2
14 160	2,7	2,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1

Caractéristiques du tronçon Esquineau - Palissade vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue du XIXème siècle avec un REX neutre. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il n'y a pas de réseau ou d'ouvrage connu sur ce tronçon.

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit – racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec présence d'arbres en pied de talus (un côté). La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit – fissure
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle sans observation d'infiltrations et de terriers de blaireaux ou lapins par le passé. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1

- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable propre en fondation. La couche de sable, dont le toit est à 1m de profondeur, mesure 5m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il n'y a pas de brèches connues. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue a été investigué sans présence de grave. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ;

il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse
En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement
La largeur minimum du ségonnal est de 2m et la pente hydraulique est de 11 à 18 cm/km ; la berge est recouverte d'arbres.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge arborée

Analyse post-premiers résultats, GRD 320,875:
L'ouvrage n'est pas mis en charge avant la crue decennale. Comme pour GRD 12, le talus de 1,18/1 serait instable avec des matériaux de mauvaise qualité mais il tient hors charge, la qualité semble donc suffisante.

De plus un perré et des petits enrochements anciens sont présents, leur qualité n'est pas connue et n'a pas été retenue dans les calculs mais ils apportent néanmoins une aide structurelle.

Tableau 72. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Esquineau - Palissade

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**6E-04**
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	0E+00	0E+00	2E-05	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-03**
12 500	2E-05	0E+00	8E-04	8E-04	5E-08	5E-11	2E-09	1E-03	4E-13	1E-06	6E-06			**6E-03**
14 160	4E-05	0E+00	9E-04	2E-03	1E-07	9E-11	2E-09	4E-03	4E-13	1E-06	6E-06			**1E-02**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	2E-04	0E+00	5E-04	2E-04	3E-08	6E-07	0E+00	1E-06	4E-08	8E-06	3E-04			**1E-03**
8 500	2E-03	0E+00	3E-03	1E-03	5E-08	1E-06	0E+00	1E-06	4E-08	6E-05	2E-03			**9E-03**
9 500	8E-03	0E+00	7E-03	2E-03	7E-08	2E-06	9E-10	2E-06	4E-08	1E-04	2E-03			**2E-02**
10 500	3E-02	0E+00	2E-02	4E-03	1E-07	1E-05	1E-06	1E-02	4E-08	1E-04	2E-03			**7E-02**
11 500	5E-02	0E+00	3E-02	6E-03	2E-07	3E-05	1E-04	7E-02	4E-08	1E-04	2E-03			**1E-01**
12 500	6E-02	0E+00	3E-02	7E-03	2E-06	4E-05	3E-04	2E-01	4E-08	1E-04	3E-03			**3E-01**
14 160	6E-02	0E+00	3E-02	8E-03	5E-06	4E-05	3E-04	2E-01	4E-08	1E-04	3E-03			**3E-01**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	6E-03	0E+00	6E-03	4E-03	1E-07	1E-05	0E+00	1E-06	2E-07	2E-04	6E-03			**1E-02**
8 500	3E-02	0E+00	2E-02	7E-03	2E-07	1E-05	0E+00	1E-06	2E-07	1E-03	5E-02			**5E-02**
9 500	7E-02	0E+00	4E-02	8E-03	2E-07	1E-05	3E-09	4E-05	2E-07	1E-03	5E-02			**8E-02**
10 500	9E-02	0E+00	6E-02	1E-02	2E-07	8E-05	1E-05	8E-02	2E-07	1E-03	5E-02			**2E-01**
11 500	1E-01	0E+00	7E-02	1E-02	4E-07	1E-04	4E-04	2E-01	2E-07	1E-03	5E-02			**2E-01**
12 500	1E-01	0E+00	7E-02	1E-02	5E-05	1E-04	7E-04	4E-01	2E-07	1E-03	6E-02			**4E-01**
14 160	1E-01	0E+00	8E-02	1E-02	2E-04	2E-04	9E-04	5E-01	2E-07	1E-03	6E-02			**5E-01**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**1E-02**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**6E-03**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au GRD 320.875. Elle est de 1.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.

L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 7 500 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 14 160 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 6.10^{-3}, ce qui correspond à un événement probable (classe B) ;
- un risque inacceptable ($> 10^{-4}$) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 9 500 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 8 500 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 11 500 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 % des probabilités maximales ; la crue de danger a été revue à la baisse de par la forte sensibilité du modèle (crue de probabilité de bèche de 25% : 11 500 m^3/s sur quasiment tout le secteur).

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 9 500 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le principal risque est l'érosion de conduit et, pour une crue supérieure à la centennale, la surverse, les deux sont présents sur l'ensemble du linéaire. Au GRD 320.875 c'est le glissement de talus coté fleuve qui est le plus à risque.

Ce tronçon sera prochainement repris dans le cadre des travaux à Salin de Giraud.

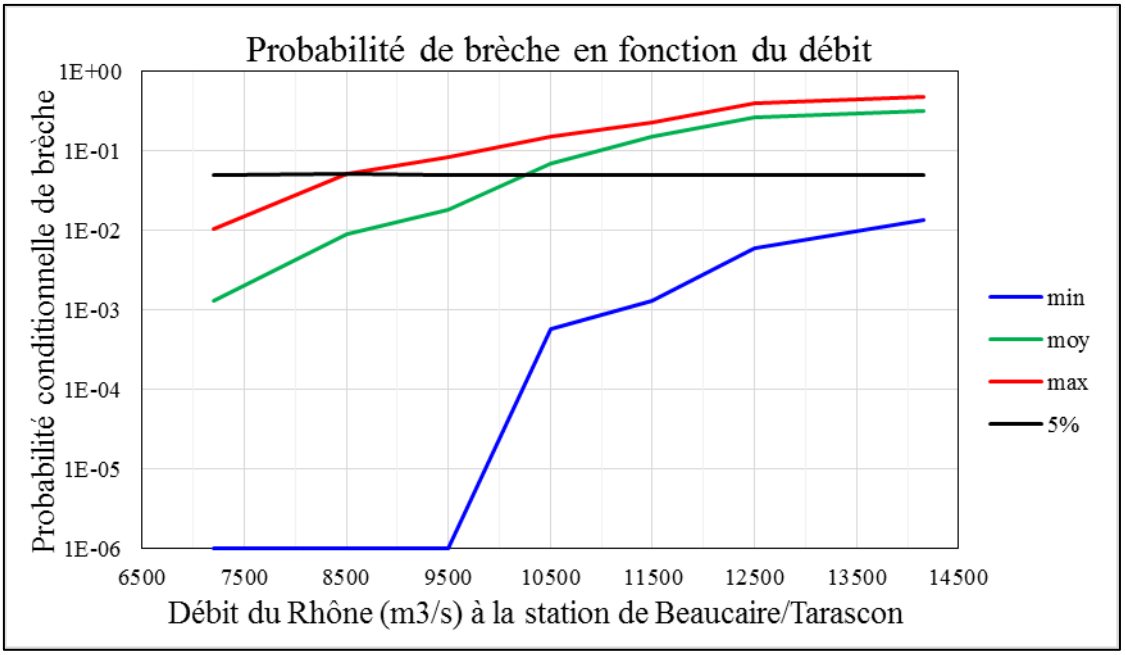


Figure 68 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Esquineau - Palissade

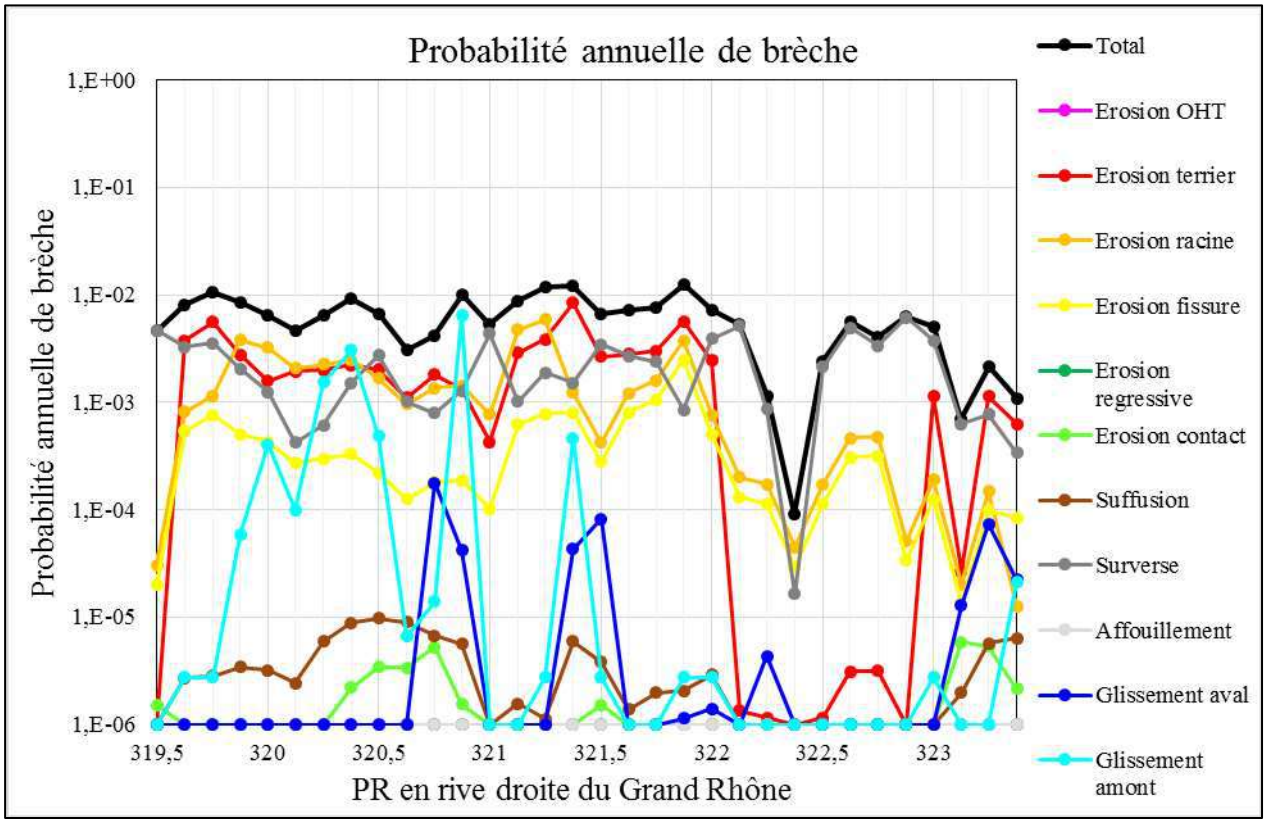


Figure 69 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Esquineau - Palissade

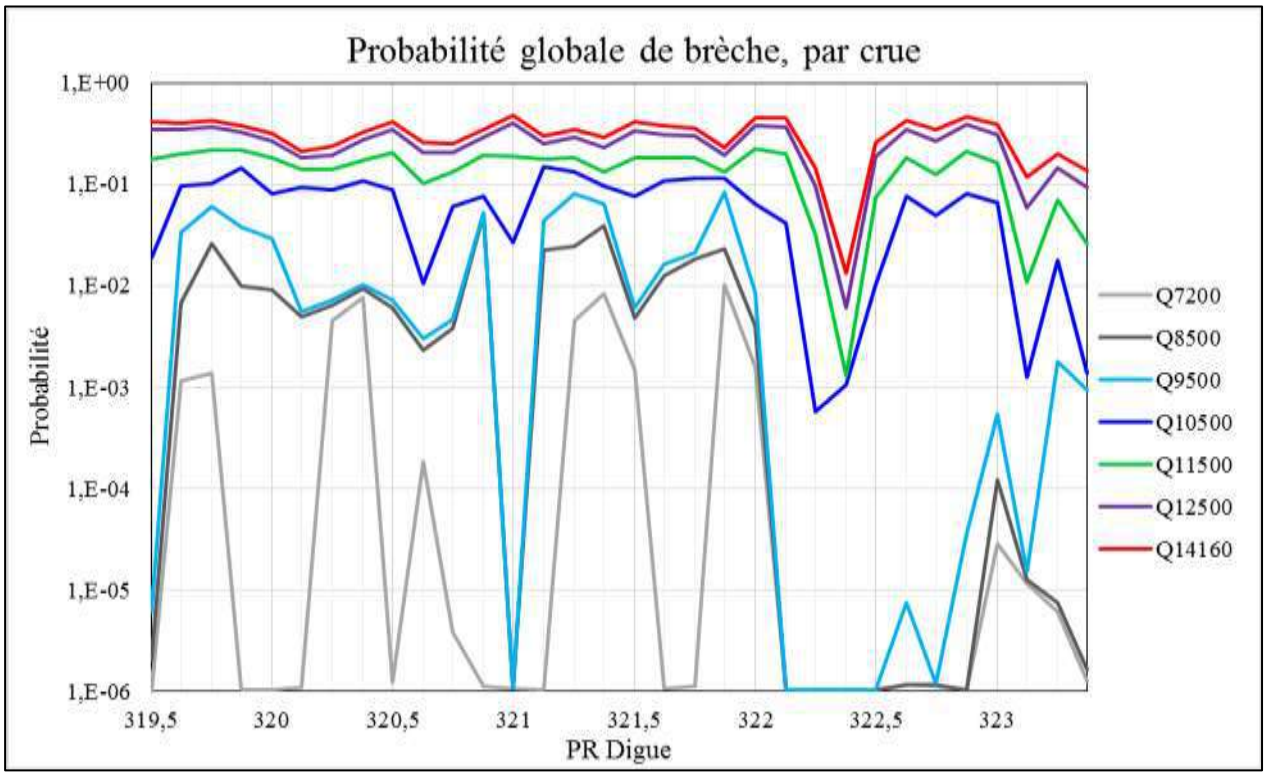


Figure 70 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Esquineau - Palissade

3.17 DIGUE DE TRINQUETAILLE (PRG1)

Le tronçon Trinquetaille mesure 1.2 km, il comprend les PR0.125 compris entre PRG 281.25 et 282.375 ; la digue a été confortée en 1994 et 1997. Des travaux de carrossabilité avaient été réalisés en 1994.

Figure 47. Plan de situation du défluent à Albaron 1 : Trinquetaille

Tableau 73. Synthèse de géométrie, tronçon Trinquetaille

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	9,4	8,9	9,0	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	7,9	3,9	4,7	1,2
Cote à 20m du pdav	m NGF	4,8	2,5	4,2	0,7
Cote de pied de digue amont	m NGF	7,3	5,7	6,6	0,5
Cote à 20m du pdam	m NGF	6,6	1,0	2,2	2,1
Hauteur de digue coté aval	m	5,3	1,0	4,4	1,3
Hauteur de digue côté amont	m	3,2	1,8	2,4	0,4
Fruit aval	L/V	5,4	1,6	2,3	1,1
Fruit amont	L/V	3,7	2,0	2,5	0,5
Largeur du ségonnal	m	87	11	24	23

Ce tronçon est globalement proche du Rhône, sa bathymétrie est autour de -5 m NGF et atteint localement -9 m NGF au PRG 282.125.

Tableau 74. Données hydrauliques, tronçon Trinquetaille

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	6,1	6,0	2,8	3,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,6
8 500	7,0	6,9	1,9	2,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,4
9 500	7,4	7,3	1,5	1,7	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3
10 500	7,8	7,7	1,1	1,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3
11 500	8,3	8,2	0,6	0,8	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2
12 500	8,6	8,5	0,3	0,5	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
14 160	8,7	8,6	0,2	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1

Caractéristiques du tronçon Trinquetaille vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue engraissée à l'aval, sans grillage. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne mais il y a eu une recharge aval, on considère alors un bouchon de 4m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 4 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il y a plusieurs ouvrages hydrauliques sur ce tronçon, celui qui présente la transition la plus à risque comprend un réseau au compactage et à l'étanchéité satisfaisants. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit – racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue avec présence d'arbres en pied de talus (un côté). La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit – fissure
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue ayant fait l'objet d'un engraissement par l'amont et par l'aval. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive
L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable de qualité variable en fondation. La couche de sable, dont le toit est à 3m de profondeur, mesure 1m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact
La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il y a eu un départ de brèche ancien (1856). Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne mais il y a eu une recharge aval, on considère alors un bouchon de 4m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1

- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue a été confortée. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne mais il y a eu une recharge aval, on considère alors un bouchon de 4m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 11m et la pente hydraulique est inférieure à 10 cm/km (entre 6 et 9 suivant la crue) ; la berge est recouverte d'arbres.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge arborée

Tableau 75. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Trinquetaille

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	2E-11	2E-11	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	2E-11	2E-11	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
11 500	1E-06	0E+00	2E-03	3E-05	2E-08	2E-10	8E-10	1E-06	4E-13	1E-06	6E-06			**2E-03**
12 500	2E-05	0E+00	1E-02	3E-04	2E-08	2E-10	2E-09	1E-06	4E-13	1E-06	6E-06			**5E-02**
14 160	2E-05	0E+00	1E-02	4E-04	2E-08	2E-10	2E-09	2E-04	4E-13	1E-06	6E-06			**1E-01**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	2E-07	2E-05	6E-05	4E-06	8E-09	2E-12	0E+00	1E-06	4E-08	2E-06	6E-07			**9E-05**
8 500	2E-05	9E-04	5E-03	3E-04	1E-06	4E-10	0E+00	1E-06	4E-08	6E-04	6E-06			**7E-03**
9 500	2E-03	2E-03	9E-03	6E-04	4E-06	5E-10	2E-10	1E-06	4E-08	4E-03	7E-06			**2E-02**
10 500	3E-03	2E-03	1E-02	7E-04	7E-06	6E-10	7E-10	1E-06	4E-08	3E-02	8E-06			**4.5E-02**
11 500	2E-02	2E-03	1E-02	8E-04	1E-05	1E-08	8E-09	9E-05	4E-08	1E-01	1E-05			**1E-01**
12 500	3E-02	2E-03	2E-02	9E-04	2E-05	1E-07	9E-08	6E-02	4E-08	2E-01	1E-05			**3E-01**
14 160	3E-02	3E-03	2E-02	9E-04	2E-05	6E-07	1E-07	2E-01	4E-08	2E-01	1E-05			**4E-01**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	2E-06	2E-04	6E-04	4E-05	2E-08	2E-11	0E+00	1E-06	1E-07	2E-05	6E-06			**9E-04**
8 500	3E-05	8E-03	1E-02	6E-04	1E-05	1E-09	0E+00	1E-06	1E-07	5E-03	2E-05			**2E-02**
9 500	2E-02	1E-02	1E-02	8E-04	4E-05	1E-09	3E-10	1E-06	1E-07	3E-02	2E-05			**4E-02**
10 500	3E-02	1E-02	1E-02	9E-04	7E-05	2E-09	1E-09	1E-06	1E-07	3E-01	3E-05			**3E-01**
11 500	4E-02	1E-02	1E-02	1E-03	9E-05	1E-07	4E-08	5E-04	1E-07	7E-01	4E-05			**7E-01**
12 500	5E-02	1E-02	3E-02	1E-03	1E-04	5E-07	8E-07	2E-01	1E-07	9E-01	6E-05			**9E-01**
14 160	5E-02	2E-02	3E-02	1E-03	1E-04	4E-06	1E-06	4E-01	1E-07	9E-01	6E-05			**9E-01**

Probabilité annuelle maximale de brèche: **2E-02**

Probabilité annuelle moyenne de brèche: **5E-03**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au PRG 281,375. Elle est de 2.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.

L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 9 500 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 10 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 5.10^{-3}, ce qui correspond à un événement probable (classe B) ;
- un risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 10 500 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 10 500 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 14 160 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 % des probabilités maximales

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 10 500 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le principal risque semble être un glissement du talus coté terre, situé en amont du PRG 281.5 ; en réalité la digue est très large (>10 m) et un glissement entrainant une rupture totale est peu probable. En revanche pour les fortes crues (Q>11 500 m3/s) la surverse est un risque majeur.

Ce tronçon sera prochainement repris dans le cadre des travaux sur le petit Rhône.

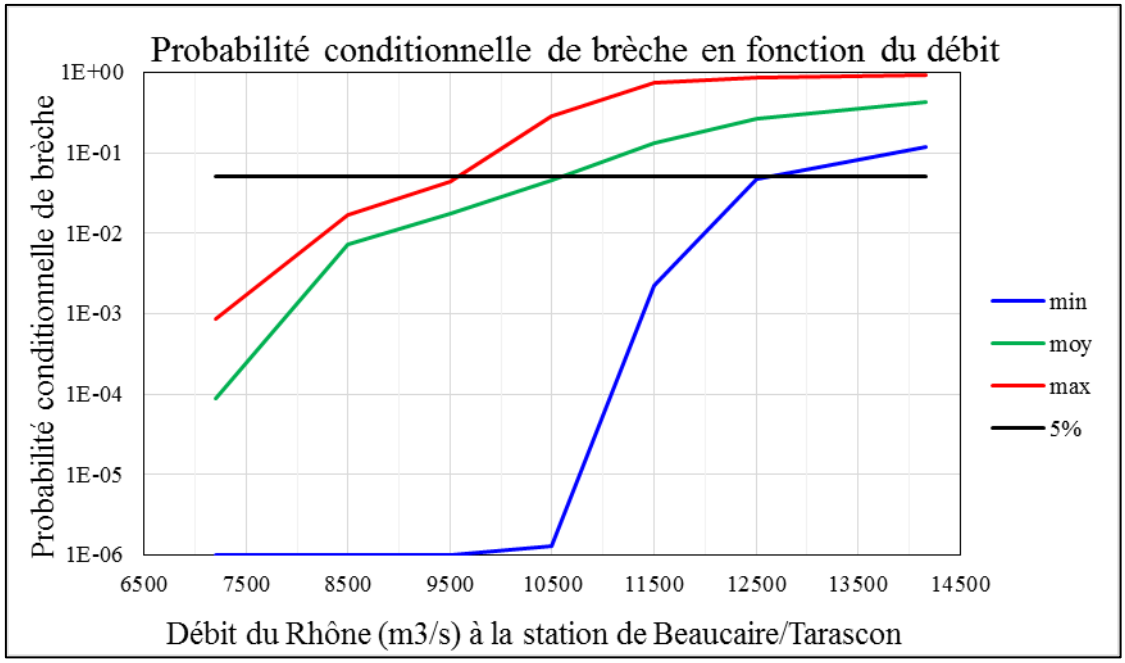


Figure 71 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Trinquetaille

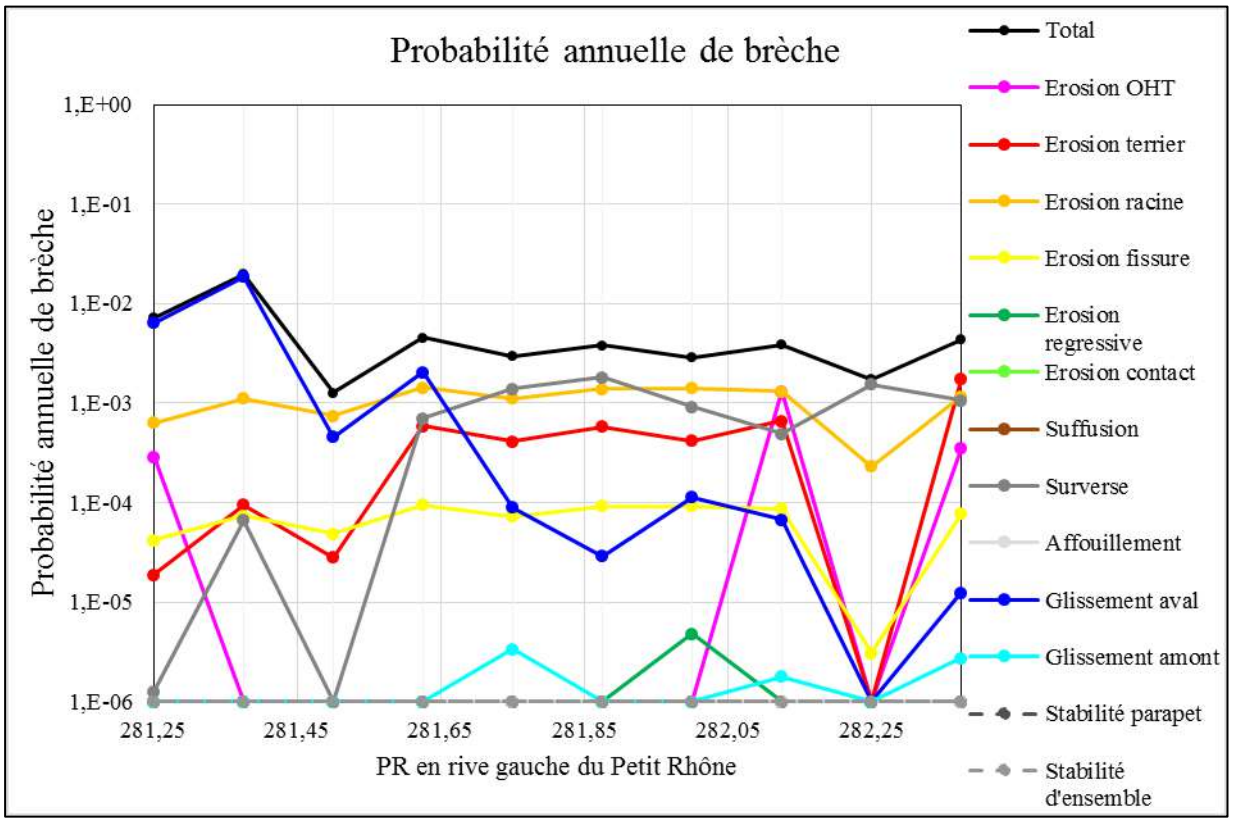


Figure 72 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Trinquetaille

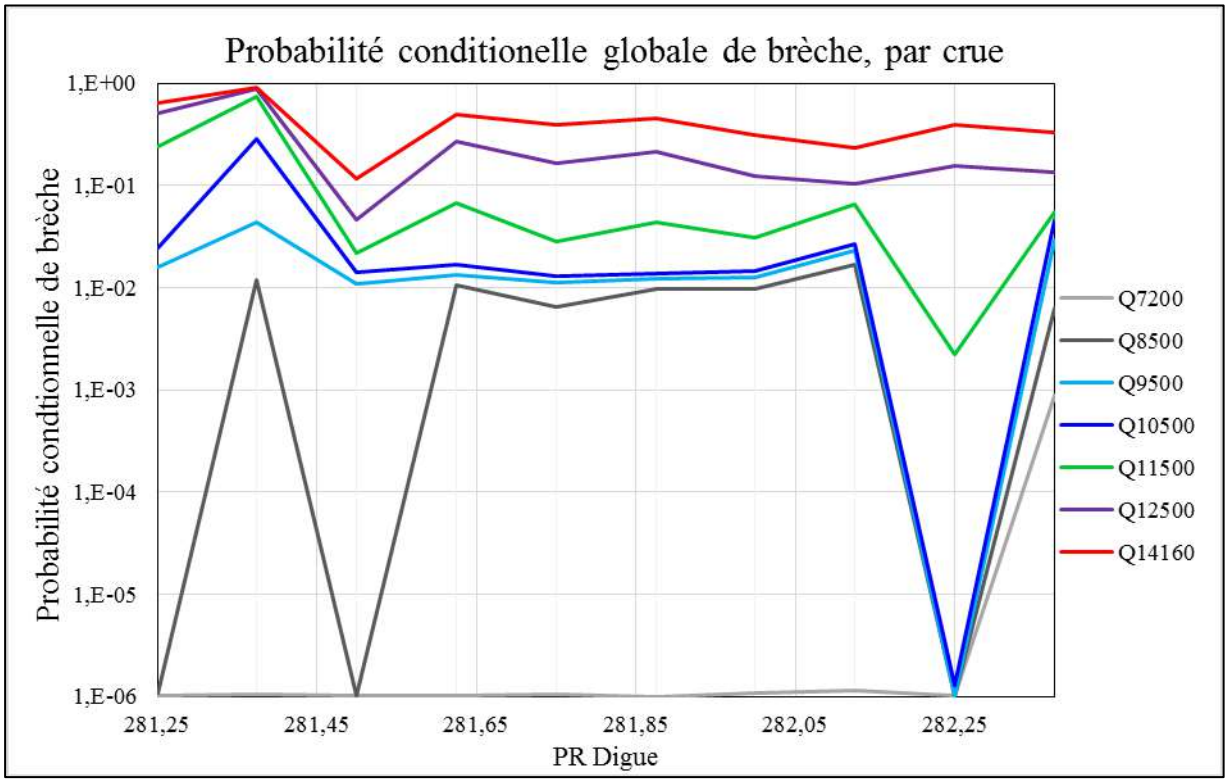


Figure 73 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Trinquetaille

3.18 DIGUE DE CAZENEUVE A AUGERY (PRG2)

Le tronçon Cazeneuve-Augéry mesure 5.2 km, il comprend les PR0.125 compris entre PRG 282.5 et 287.25 ; la digue n'a pas fait l'objet de travaux de confortement depuis son rehaussement au XIX^{ème} siècle. Des travaux de carrossabilité ont été réalisés en 1994.

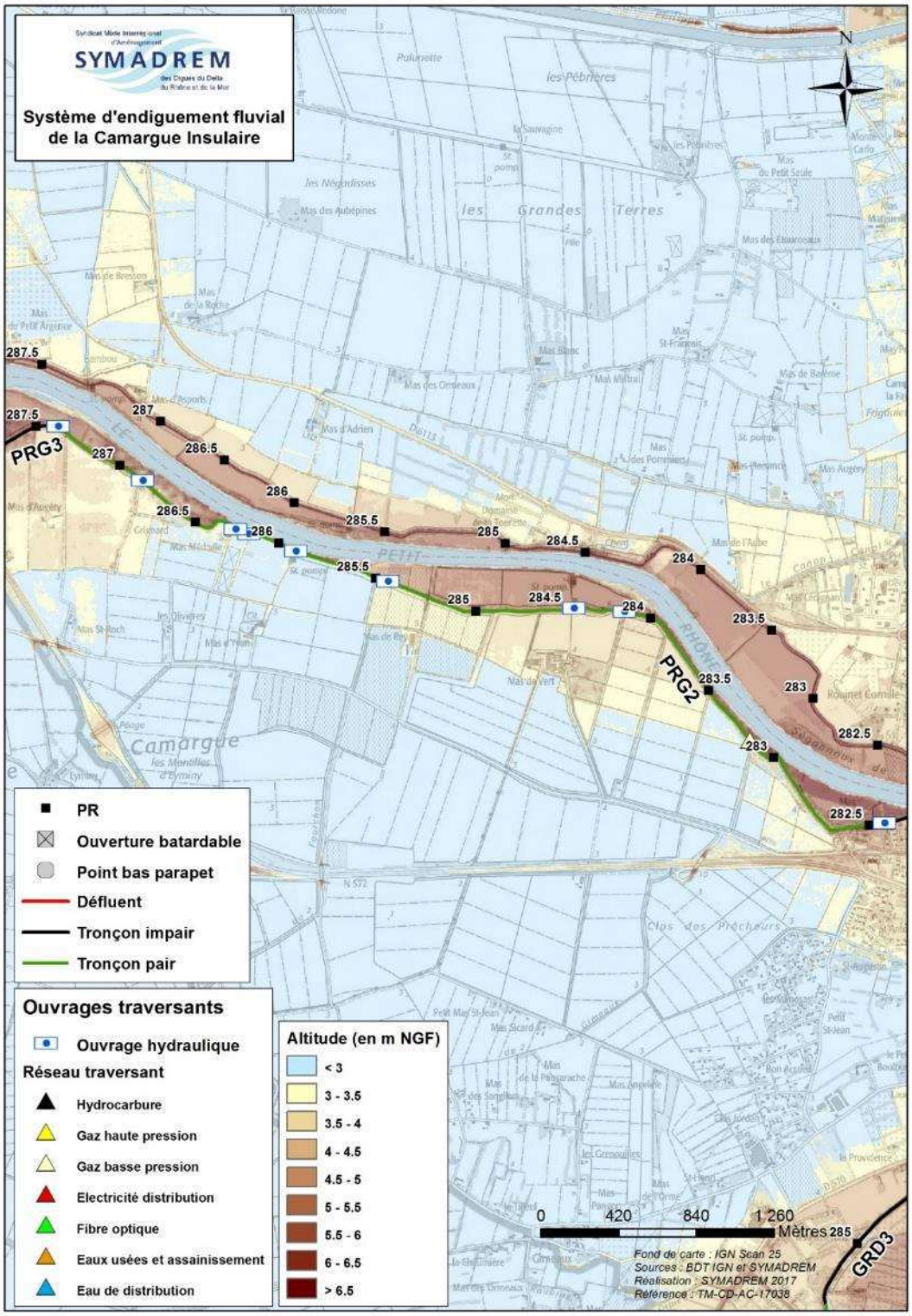


Figure 48. Plan de situation du défluent à Albaron 2 : Cazeneuve-Augéry

Tableau 76. Synthèse de géométrie, tronçon Cazeneuve-Augéry

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	9,1	8,3	8,7	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	7,8	3,2	4,9	1,2
Cote à 20m du pdav	m NGF	5,4	2,7	3,7	0,6
Cote de pied de digue amont	m NGF	8,4	1,4	6,2	1,2
Cote à 20m du pdam	m NGF	7,7	1,0	5,0	1,6
Hauteur de digue coté aval	m	5,5	1,2	3,8	1,1
Hauteur de digue côté amont	m	6,9	0,6	2,5	1,2
Fruit aval	L/V	3,4	1,3	2,1	0,3
Fruit amont	L/V	8,3	1,6	2,5	1,4
Largeur du ségonnal	m	242	2	104	73

Ce tronçon se rapproche du Rhône, au droit du PRG 283 où la bathymétrie est de -8m NGF et sur un peu moins d'1 km entre PRG 285.5 et 286.5 où la bathymétrie est de l'ordre de -5 m NGF.

Tableau 77. Données hydrauliques, tronçon Cazeneuve-Augéry

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	6,0	5,7	2,5	2,9	0,1	0,1	0,0	0,0	0,7
8 500	6,9	6,6	1,7	2,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,6
9 500	7,3	7,0	1,3	1,6	0,2	0,1	0,0	0,0	0,5
10 500	7,7	7,3	0,9	1,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,4
11 500	8,2	7,9	0,4	0,7	0,2	0,2	0,1	0,0	0,2
12 500	8,5	8,1	0,1	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0	0,1
14 160	8,7	8,3	0,0	0,2	0,3	0,2	0,1	0,0	0,1

Caractéristiques du tronçon Cazeneuve-Augéry vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue du XIXème siècle avec un REX négatif. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 4 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il y a plusieurs ouvrages hydrauliques sur ce tronçon, celui qui présente la transition la plus à risque comprend un réseau au compactage et à l'étanchéité incertains. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,99
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit - racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec présence d'arbres en pied de talus (un côté). La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit - fissure

Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec observation d'infiltrations et de terriers de blaireaux par le passé. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable de classe 5 en fondation. La couche de sable, dont le toit est à 10m de profondeur, mesure 5m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il y a eu des brèches anciennes (1 en 1856 et 2 supposées). Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m

- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue a été investigué et de la grave a été repérée localement. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9 (localement)
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 2m et la pente hydraulique est comprise entre 6 et 9 cm/km ; la berge est recouverte d'arbres.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge arborée

Analyse post-premiers résultats, PRG 285.125 ; 285.5 ; 285.875 :

Ce secteur a été visité par des lapins jusque dans les années 1980, puis la myxomatose a arrêté le phénomène: il n'y a plus de terriers nouveaux depuis.

Le secteur a subit des crues importantes depuis, avec des signes de faiblesse (infiltrations) pour des crues moyennes (9 500 m^3/s) qui ont fait l'objet de traitement palliatif: bouchon d'argile coté fleuve lors des crues (de l'ordre de 2/3 m^2) et localement masque drainant aval.

La probabilité de localisation d'un terrier traversant est donc légèrement surestimée mais surtout les terriers de lapins sont plus étroits que ceux retenus pour la modélisation (diamètre 30cm, pour les terriers de blaireaux qui sont majoritaires sur la Camargue). Avec un diamètre de 15 cm, la probabilité d'initiation est diminuée :

$P_{initiation} = Min\left[\left(\frac{\frac{1}{2}.R.\alpha.\rho_w.g.i}{120}\right)^{0,6} ; 1\right]$ (Voir chapitre 7.1), en modifiant le diamètre ce sont R et α qui sont corrigés, respectivement de 0,3 à 0,15 et de 0,8 à 0,9 ; la probabilité d'initiation est ainsi divisée par 1,41 pour des matériaux mistes et par 1,94 pour des matériaux A2.

Le fait que l'ouvrage ait été sollicité à minima 36 fois depuis 1841 (analyse des débits maximum annuels) indique que les matériaux sont certainement de meilleure qualité que ceux modélisés. En considérant un comportement similaire à celui des matériaux A2 modélisés (sécuritaire pour ce type de matériaux).

Tableau 78. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Cazeneuve-Augéry

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
12 500	2E-05	0E+00	1E-03	3E-04	2E-08	1E-10	2E-10	1E-06	4E-13	1E-06	6E-06			**9E-03**
14 160	3E-05	0E+00	1E-03	4E-04	2E-08	2E-10	2E-10	1E-04	4E-13	1E-06	6E-06			**6E-02**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	4E-03	6E-04	2E-04	8E-04	5E-09	1E-08	0E+00	1E-06	7E-09	2E-04	3E-05			**6E-03**
8 500	8E-02	7E-03	4E-03	1E-02	2E-08	7E-07	0E+00	1E-06	7E-09	3E-04	7E-05			**1E-01**
9 500	2E-01	8E-03	6E-03	2E-02	3E-08	2E-06	1E-08	1E-06	7E-09	7E-04	1E-04			**2E-01**
10 500	2E-01	1E-02	8E-03	2E-02	3E-08	3E-06	3E-05	1E-06	7E-09	5E-03	1E-04			**2E-01**
11 500	3E-01	2E-02	1E-02	3E-02	4E-08	8E-06	2E-04	6E-03	7E-09	3E-02	2E-04			**3E-01**
12 500	3E-01	2E-02	1E-02	3E-02	4E-08	2E-05	3E-04	1E-01	7E-09	6E-02	2E-04			**4E-01**
14 160	3E-01	2E-02	1E-02	3E-02	4E-08	3E-05	4E-04	3E-01	7E-09	8E-02	2E-04			**5E-01**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	5E-02	1E-02	4E-03	1E-02	2E-08	3E-07	0E+00	1E-06	2E-07	4E-03	6E-04			**4.6E-02**
8 500	4E-01	1E-01	1E-02	4E-02	1E-07	2E-05	0E+00	1E-06	2E-07	4E-03	8E-04			**4E-01**
9 500	5E-01	2E-01	1E-02	5E-02	2E-07	5E-05	2E-07	1E-06	2E-07	1E-02	1E-03			**5E-01**
10 500	5E-01	2E-01	3E-02	5E-02	2E-07	7E-05	8E-04	1E-06	2E-07	2E-01	1E-03			**5E-01**
11 500	5E-01	3E-01	5E-02	5E-02	2E-07	1E-04	4E-03	6E-02	2E-07	6E-01	1E-03			**8E-01**
12 500	5E-01	3E-01	6E-02	6E-02	2E-07	1E-04	8E-03	5E-01	2E-07	8E-01	2E-03			**9E-01**
14 160	5E-01	3E-01	6E-02	6E-02	2E-07	2E-04	1E-02	7E-01	2E-07	8E-01	2E-03			**9E-01**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**8E-02**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**2E-02**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au PRG 281,250. Elle est de 8.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.

L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 7 500 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 8 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 3.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) ;
- un risque inacceptable ($> 10^{-4}$) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 8 500 m^3/s,
- une crue de danger de 12 500 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 7 500 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 8 500 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 %, revu, des probabilités maximales.

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 8 500 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le principal risque est l'érosion interne dans un terrier, il est situé sur l'intégralité du linéaire. Le risque de surverse est localisé au PRG 282.625 et celui de glissement de talus au PRG 286.375.
Ce tronçon sera prochainement repris dans le cadre des travaux sur le Petit Rhône.

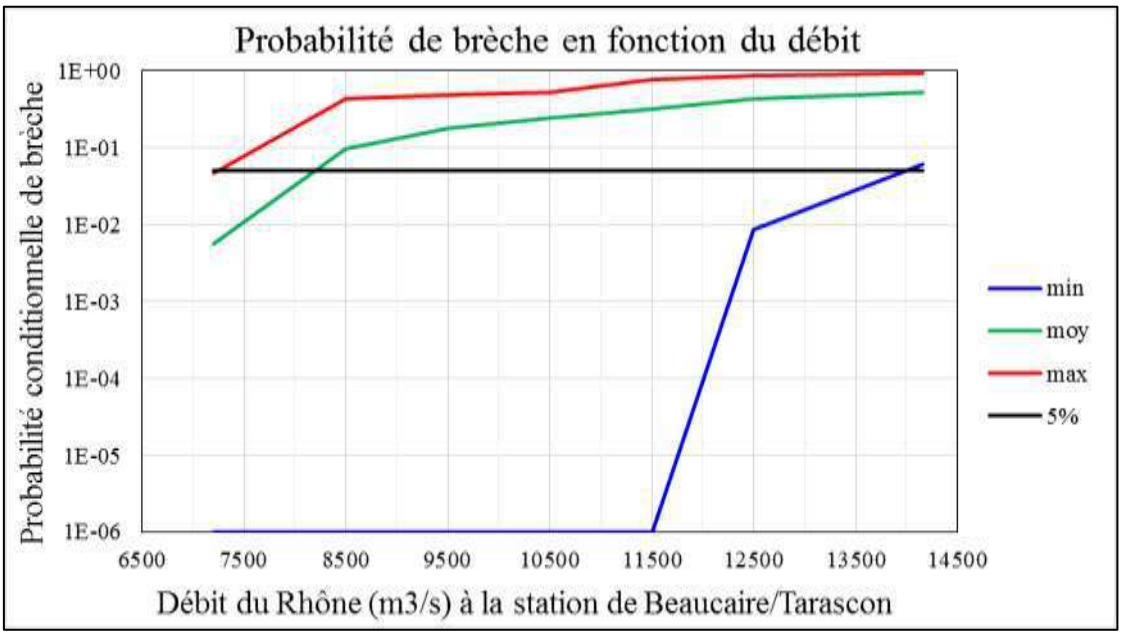


Figure 74 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Cazeneuve-Augéry

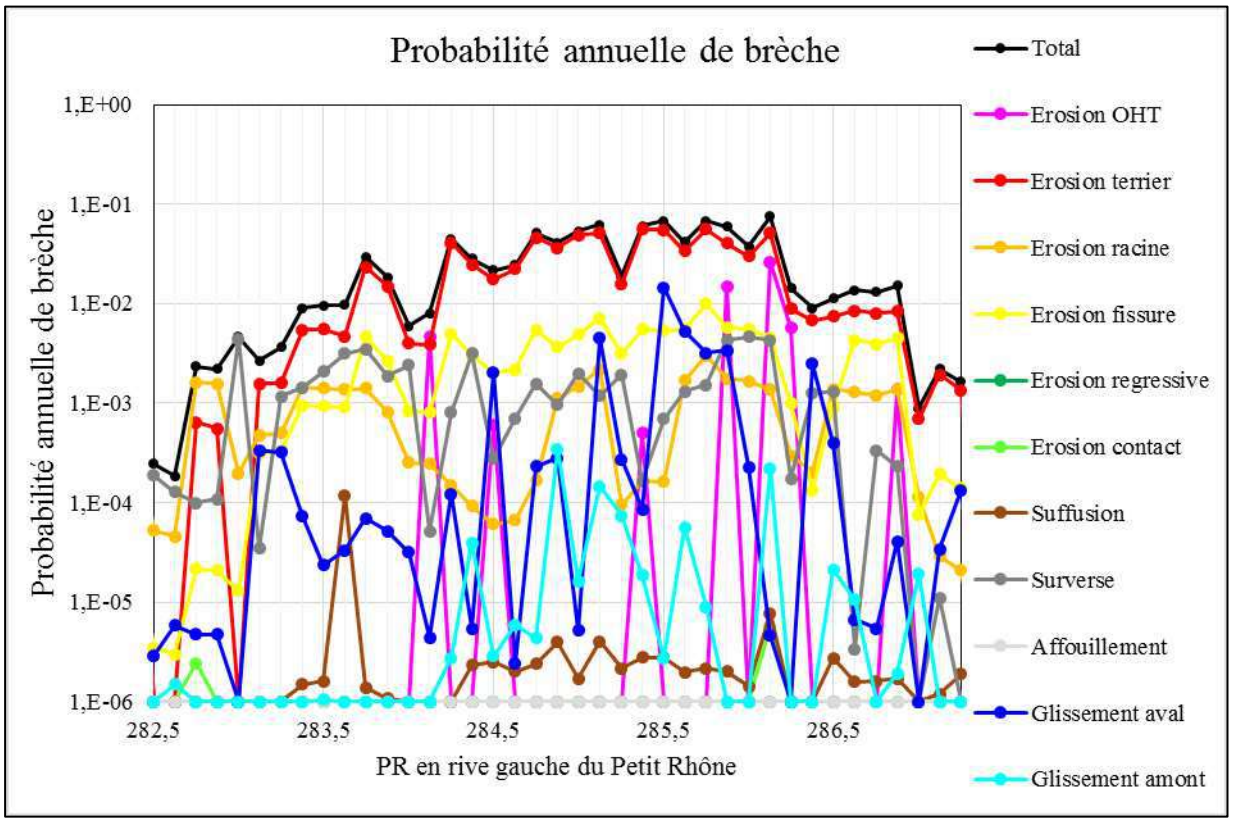


Figure 75 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Cazeneuve-Augéry

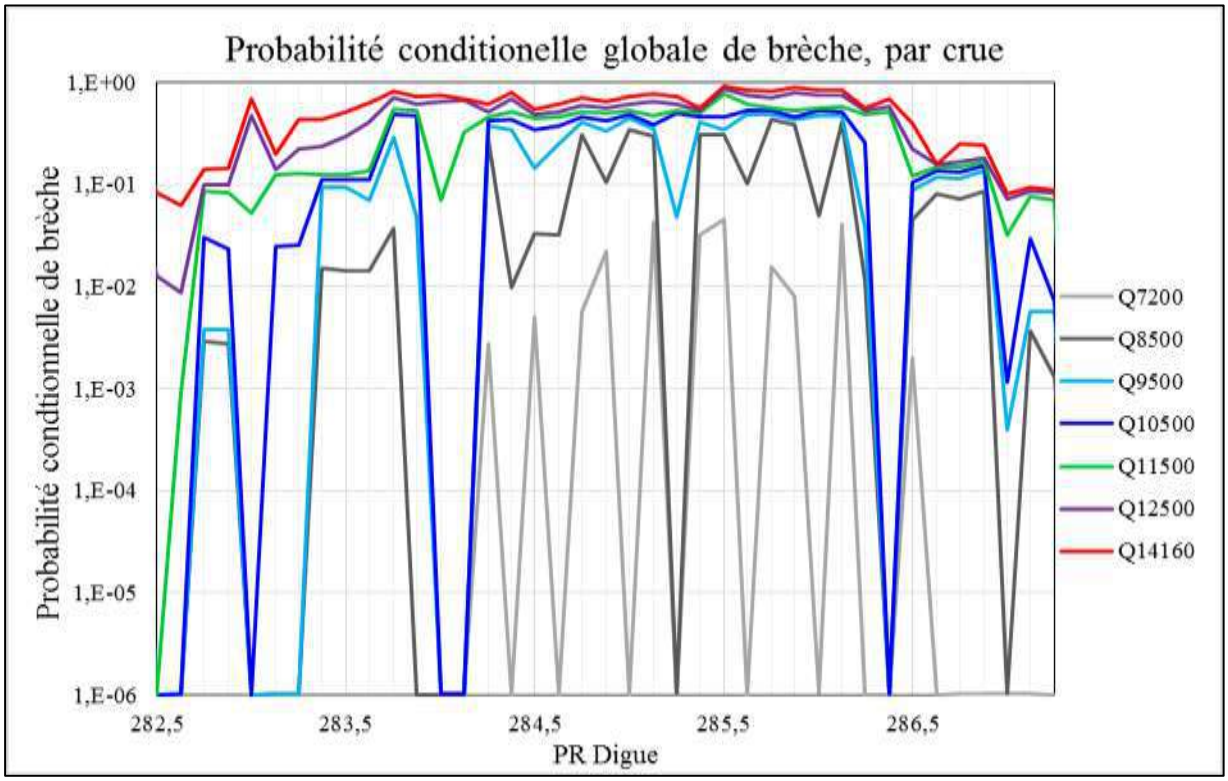


Figure 76 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Cazeneuve-Augéry

3.19 DIGUE DU BOIS DE BEAUMONT (PRG3)

Le tronçon Bois de Beaumont mesure 900 m, il comprend les PR0.125 compris entre PRG 287.375 et 288.5 ; la digue a été reprise en 1998 ; le tronçon est alors intégralement carrossable mais il y a une interruption en crête avec l'autoroute, il y a alors une piste en pied coté zone protégée.

Figure 49. Plan de situation du défluent à Albaron 3 : Bois de Beaumont

Tableau 79. Synthèse de géométrie, tronçon Bois de Beaumont

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	10,0	8,5	8,8	0,5
Cote de pied de digue aval	m NGF	7,4	3,8	5,2	1,5
Cote à 20m du pdav	m NGF	6,6	3,6	4,3	1,0
Cote de pied de digue amont	m NGF	8,0	5,1	6,1	0,9
Cote à 20m du pdam	m NGF	7,3	5,2	5,8	0,7
Hauteur de digue coté aval	m	6,2	1,3	3,6	1,6
Hauteur de digue côté amont	m	4,9	0,9	2,7	1,0
Fruit aval	L/V	4,5	1,8	2,5	1,0
Fruit amont	L/V	2,7	2,0	2,3	0,2
Largeur du ségonnal	m	378	127	284	83

Ce tronçon est loin du Rhône.

Tableau 80. Données hydrauliques, tronçon Bois de Beaumont

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	5,7	5,5	2,9	3,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
8 500	6,5	6,4	2,0	2,3	0,1	0,1	0,1	0,0	0,5
9 500	7,0	6,8	1,6	1,8	0,1	0,1	0,1	0,0	0,4
10 500	7,3	7,2	1,3	1,5	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3
11 500	7,8	7,7	0,8	1,0	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2
12 500	8,1	7,9	0,5	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2
14 160	8,2	8,0	0,4	0,7	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1

Caractéristiques du tronçon Bois de Beaumont vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a un masque en matériaux mixtes côté amont et un engraissement côté aval, avec grillage. Concernant le claquage hydraulique, la digue est confortée. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1et la filtration par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01
- Probabilité de claquage hydraulique : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 0,1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
L'ouvrage hydraulique sur ce tronçon comprend un réseau au compactage et à l'étanchéité satisfaisants. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 0,1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit - racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue récemment confortée. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 0,1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit - fissure
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue récemment confortée. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive
L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable de qualité variable en fondation. La couche de sable, dont le toit est à 4m de profondeur, mesure 1m d'épaisseur. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 0,1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact
La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon une brèche en 1994 qui a été entièrement reprise. Concernant le claquage hydraulique, la digue est confortée. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : 0,001
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 0,1

- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue a été investigué sans présence de grave. Concernant le claquage hydraulique, la digue est neuve et le perré est donc en bon état ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 0,1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre, conforté récemment.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre, conforté récemment.

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 120m et la pente hydraulique est de 6 à 13 cm/km ; la berge est recouverte d'herbacés.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge herbacée

Tableau 81. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Bois de Beaumont

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
12 500	3E-07	0E+00	5E-06	3E-06	1E-08	1E-11	2E-10	1E-06	4E-13	1E-06	6E-06			**2E-05**
14 160	3E-07	0E+00	5E-06	3E-06	1E-08	2E-11	2E-10	1E-06	4E-13	1E-06	6E-06			**2E-05**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	2E-08	0E+00	3E-07	2E-07	2E-09	6E-13	0E+00	1E-06	4E-13	5E-05	2E-06			**5E-05**
8 500	2E-07	0E+00	3E-06	2E-06	5E-09	5E-12	0E+00	1E-06	4E-13	6E-05	4E-06			**7E-05**
9 500	3E-07	0E+00	5E-06	3E-06	9E-08	7E-12	1E-10	1E-06	4E-13	7E-05	5E-06			**8E-05**
10 500	4E-07	0E+00	6E-06	4E-06	5E-07	9E-12	6E-10	1E-06	4E-13	2E-04	5E-06			**2E-04**
11 500	6E-07	0E+00	9E-06	6E-06	1E-06	1E-11	3E-09	1E-06	4E-13	1E-03	6E-06			**1E-03**
12 500	9E-07	3E-04	1E-05	8E-06	2E-06	3E-11	6E-09	1E-06	4E-13	2E-03	7E-06			**3E-03**
14 160	1E-06	6E-04	2E-05	1E-05	2E-06	5E-11	8E-09	1E-05	4E-13	3E-03	7E-06			**4E-03**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	6E-08	0E+00	9E-07	6E-07	1E-08	2E-12	0E+00	1E-06	4E-13	2E-04	6E-06			**2E-04**
8 500	6E-07	0E+00	8E-06	6E-06	1E-08	1E-11	0E+00	1E-06	4E-13	2E-04	6E-06			**3E-04**
9 500	7E-07	0E+00	1E-05	7E-06	4E-07	1E-11	3E-10	1E-06	4E-13	2E-04	7E-06			**3E-04**
10 500	8E-07	0E+00	1E-05	8E-06	2E-06	2E-11	1E-09	1E-06	4E-13	7E-04	1E-05			**7E-04**
11 500	9E-07	0E+00	1E-05	9E-06	5E-06	2E-11	6E-09	1E-06	4E-13	4E-03	2E-05			**4E-03**
12 500	2E-06	3E-03	3E-05	2E-05	7E-06	7E-11	1E-08	1E-06	4E-13	7E-03	2E-05			**7E-03**
14 160	4E-06	6E-03	6E-05	4E-05	7E-06	1E-10	1E-08	8E-05	4E-13	1E-02	2E-05			**1E-02**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**2E-04**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**6E-05**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au PRG 288,250. Elle est de 2.10^{-4}, ce qui correspond à un événement improbable (classe C) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.

L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 14 160 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de14 160 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 6.10^{-5}, ce qui correspond à un événement très improbable (classe D) ;
- un risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 14 160 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 14 160 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 14 160 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 % des probabilités maximales.

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 14 160 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le risque résiduel est l'instabilité du parement aval.

Ce tronçon sera prochainement repris dans le cadre des travaux sur le petit Rhône.

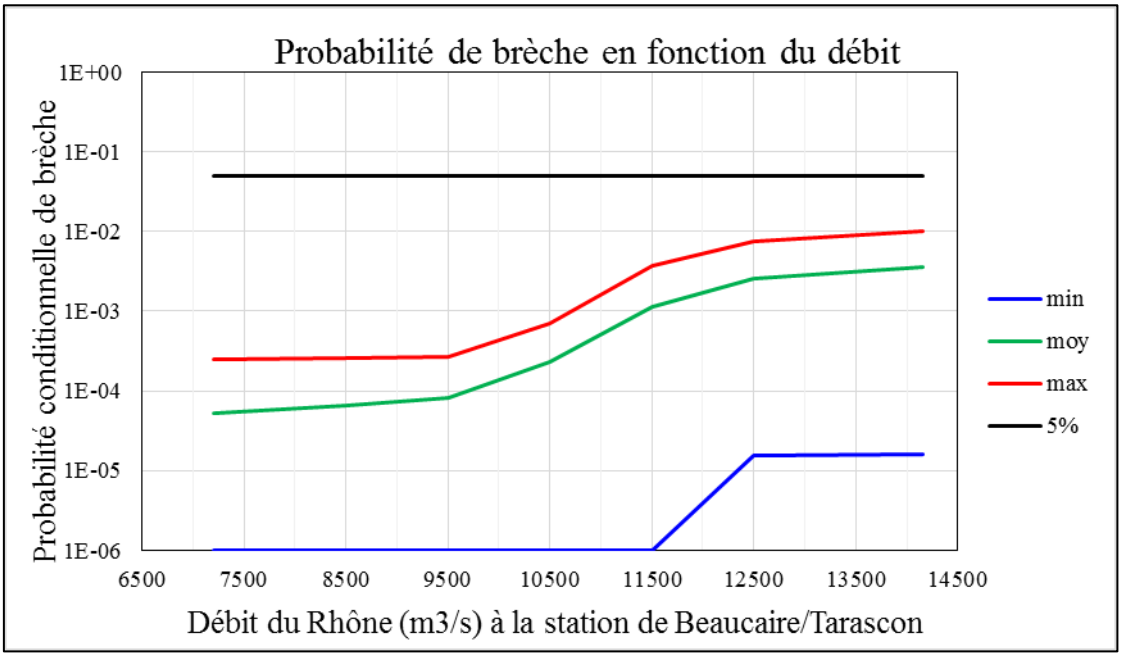


Figure 77 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Bois de Beaumont

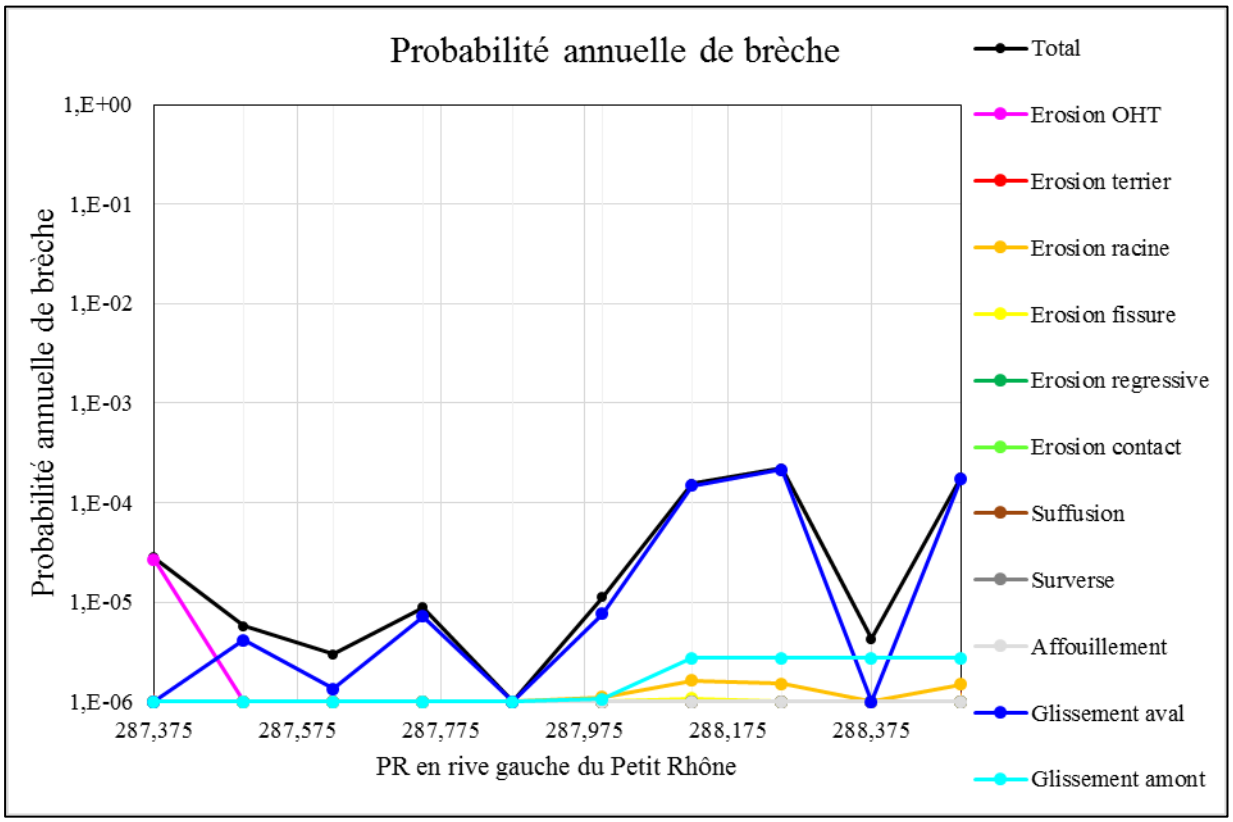


Figure 78 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Bois de Beaumont

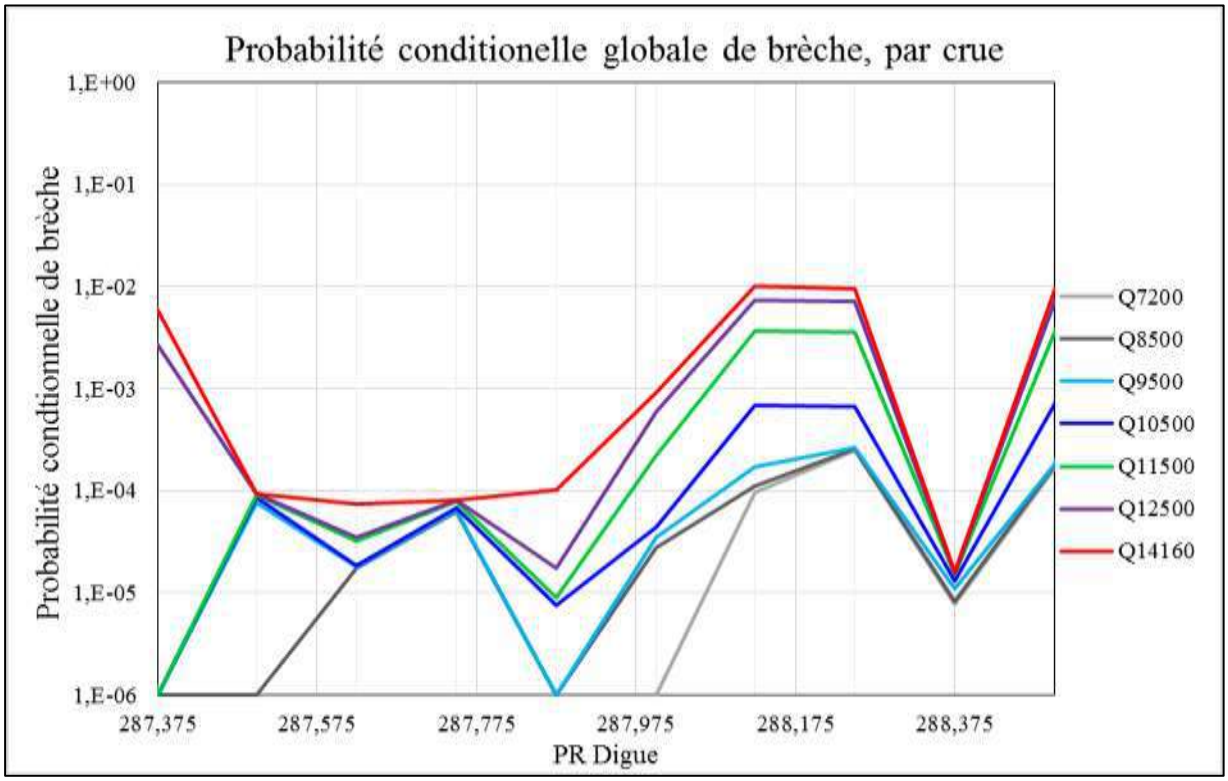


Figure 79 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Bois de Beaumont

3.20 DIGUE DE BEAUMONT A CAVALES (PRG4)

Le tronçon Beaumont-Cavalès mesure 6.4 km, il comprend les PR0.125 compris entre PRG 288.625et 294.5 ; la digue n'a pas fait l'objet de travaux de confortement depuis son rehaussement au XIX^{ème} siècle. Des travaux de carrossabilité ont été réalisés en 1994.

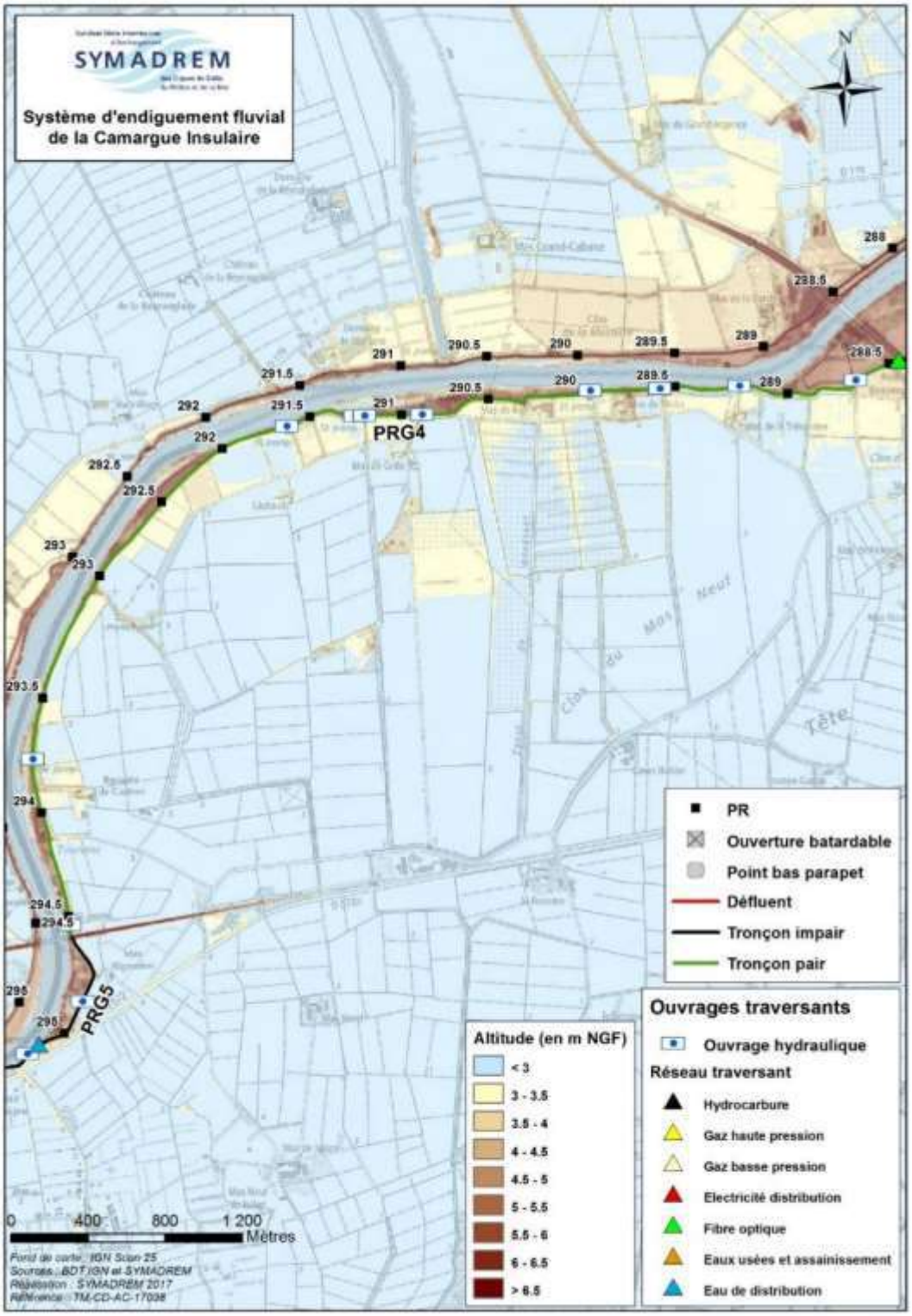


Figure 50. Plan de situation du défluent à Albaron 4 : Beaumont-Cavalès

Tableau 82. Synthèse de géométrie, tronçon Beaumont-Cavalès

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	8,6	7,1	7,9	0,4
Cote de pied de digue aval	m NGF	6,3	3,3	4,2	0,6
Cote à 20m du pdav	m NGF	5,2	2,6	3,3	0,4
Cote de pied de digue amont	m NGF	8,6	4,9	6,1	1,0
Cote à 20m du pdam	m NGF	8,5	0,9	4,4	2,4
Hauteur de digue coté aval	m	4,8	2,0	3,7	0,6
Hauteur de digue côté amont	m	3,7	0,0	1,8	0,9
Fruit aval	L/V	3,4	1,8	2,2	0,4
Fruit amont	L/V	136,1	1,4	7,8	21,7
Largeur du ségonnal	m	251	10	60	52

Ce tronçon est loin du Rhône.

Tableau 83. Données hydrauliques, tronçon Beaumont-Cavalès

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	5,5	5,1	1,9	2,6	0,1	0,1	0,1	0,0	0,7
8 500	6,4	5,9	1,1	1,7	0,2	0,1	0,1	0,0	0,5
9 500	6,8	6,3	0,8	1,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,4
10 500	7,2	6,6	0,4	1,0	0,2	0,2	0,1	0,0	0,3
11 500	7,7	7,0	0,0	0,5	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
12 500	7,9	7,2	-0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1
14 160	8,0	7,3	-0,2	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1

Caractéristiques du tronçon Beaumont-Cavalès vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue du XIXème siècle avec un REX négatif. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il y a plusieurs ouvrages hydrauliques sur ce tronçon, celui qui présente la transition la plus à risque comprend un réseau au compactage et à l'étanchéité incertains. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,99
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit - racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec présence d'arbres en pied de talus (deux côtés). La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit - fissure
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec observation d'infiltrations ou de terriers de blaireaux par le passé. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive
L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable de qualité variable en fondation. La couche de sable, dont le toit est à 4m de profondeur, mesure 1m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact
La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il y a une brèche ancienne supposée et il y a eu deux départs de brèches en 1993 qui ont été réparés en urgence seulement. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m

- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue a été investigué sans présence de grave. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 10m et la pente hydraulique est de 8 à 13 cm/km ; la berge est recouverte d'arbres.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge arborée

Analyse post-premiers résultats, PRG 293.375 :

Comme pour les secteurs en amont, sur PRG2, les fouisseurs présents sur ce territoire ont été des lapins ; le diamètre a ainsi été modifié de 30 à 15 cm.

Tableau 84. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Beaumont-Cavalès

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
12 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
14 160	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	2E-03	7E-04	2E-04	3E-04	9E-09	5E-10	0E+00	1E-06	7E-09	6E-05	3E-05			**3E-03**
8 500	7E-02	2E-02	1E-02	1E-02	1E-06	4E-06	0E+00	1E-06	7E-09	1E-04	1E-04			**1E-01**
9 500	2E-01	3E-02	2E-02	2E-02	4E-06	9E-06	2E-08	1E-06	7E-09	2E-04	2E-04			**2E-01**
10 500	2E-01	3E-02	3E-02	2E-02	7E-06	1E-05	9E-06	6E-04	7E-09	3E-04	2E-04			**3E-01**
11 500	3E-01	4E-02	3E-02	3E-02	1E-05	2E-05	5E-05	7E-02	7E-09	2E-03	2E-04			**4E-01**
12 500	3E-01	4E-02	3E-02	3E-02	1E-05	2E-05	8E-05	2E-01	7E-09	4E-03	2E-04			**4.98-01**
14 160	3E-01	4E-02	3E-02	3E-02	1E-05	2E-05	1E-04	3E-01	7E-09	7E-03	2E-04			**6E-01**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	3E-02	2E-02	3E-03	3E-03	3E-08	1E-08	0E+00	1E-06	6E-08	8E-04	8E-04			**3E-02**
8 500	4E-01	2E-01	6E-02	4E-02	3E-05	1E-04	0E+00	1E-06	6E-08	8E-04	2E-03			**4,7E-01**
9 500	5E-01	3E-01	7E-02	4E-02	6E-05	1E-04	6E-07	1E-06	6E-08	2E-03	2E-03			**5E-01**
10 500	5E-01	3E-01	8E-02	5E-02	8E-05	1E-04	2E-05	3E-02	6E-08	4E-03	2E-03			**7E-01**
11 500	5E-01	3E-01	8E-02	5E-02	9E-05	1E-04	1E-04	6E-01	6E-08	3E-02	3E-03			**7E-01**
12 500	5E-01	3E-01	9E-02	6E-02	1E-04	1E-04	2E-04	8E-01	6E-08	1E-01	3E-03			**9E-01**
14 160	5E-01	3E-01	9E-02	6E-02	1E-04	2E-04	3E-04	9E-01	6E-08	2E-01	3E-03			**9E-01**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**7E-02**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**3E-02**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au PRG 290,875. Elle est de 7.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe B) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.
L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 7 500 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 8 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 5.10^{-4}, ce qui correspond à un événement improbable (classe C) ;
- un risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 7 500 m^3/s,
- une crue de danger de 12 500 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 7 500 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 8 500 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 %, revu, des probabilités maximales.

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 7 500 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le principal risque est l'érosion interne, en particulier dans un terrier, situé sur la quasi-totalité du tronçon.

Ce tronçon sera prochainement repris dans le cadre des travaux sur le Petit Rhône.

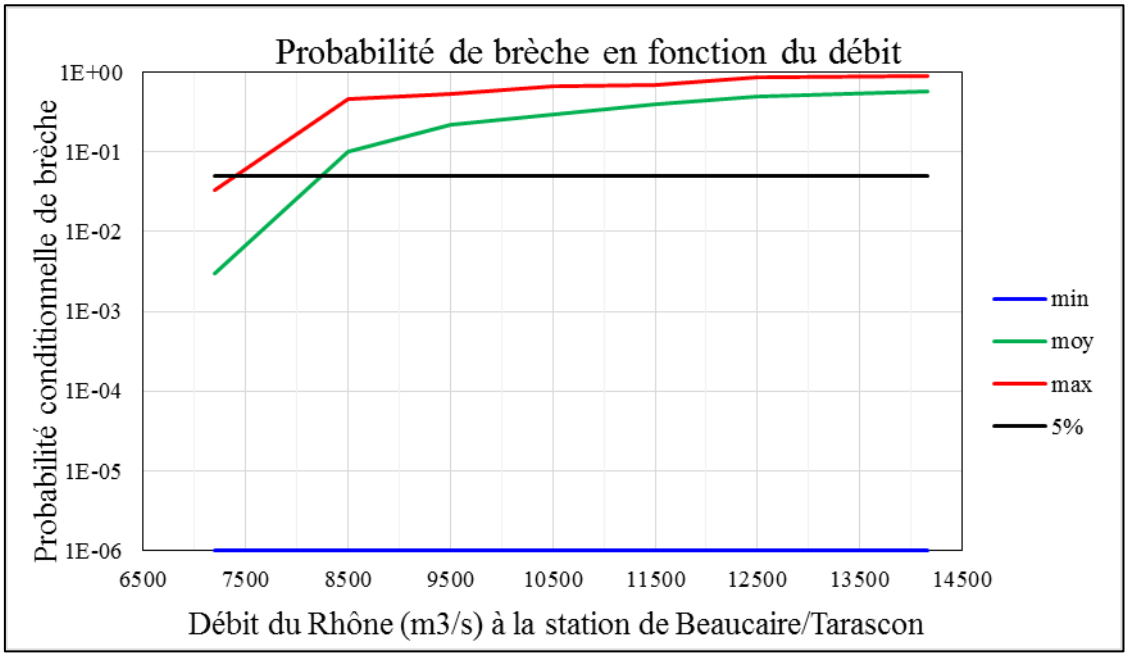


Figure 80 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Beaumont-Cavalès

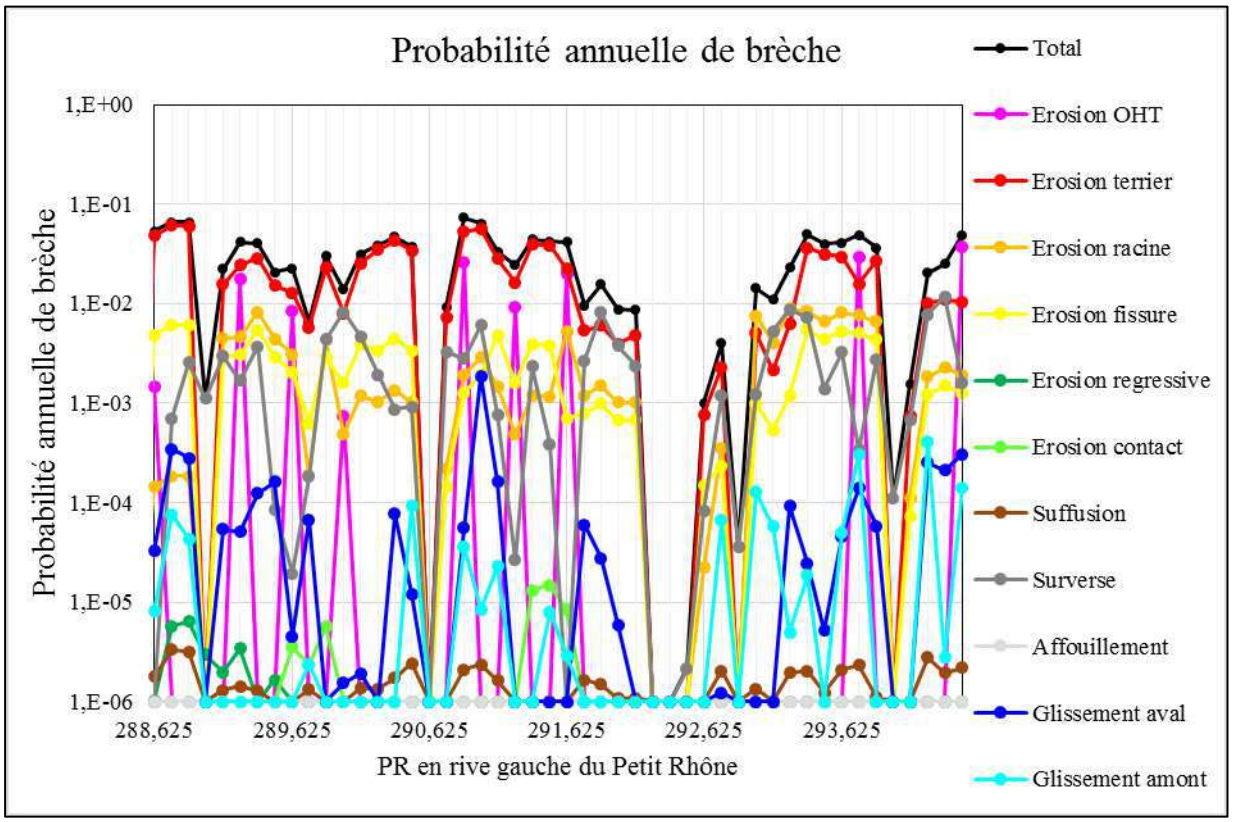


Figure 81 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Beaumont-Cavalès

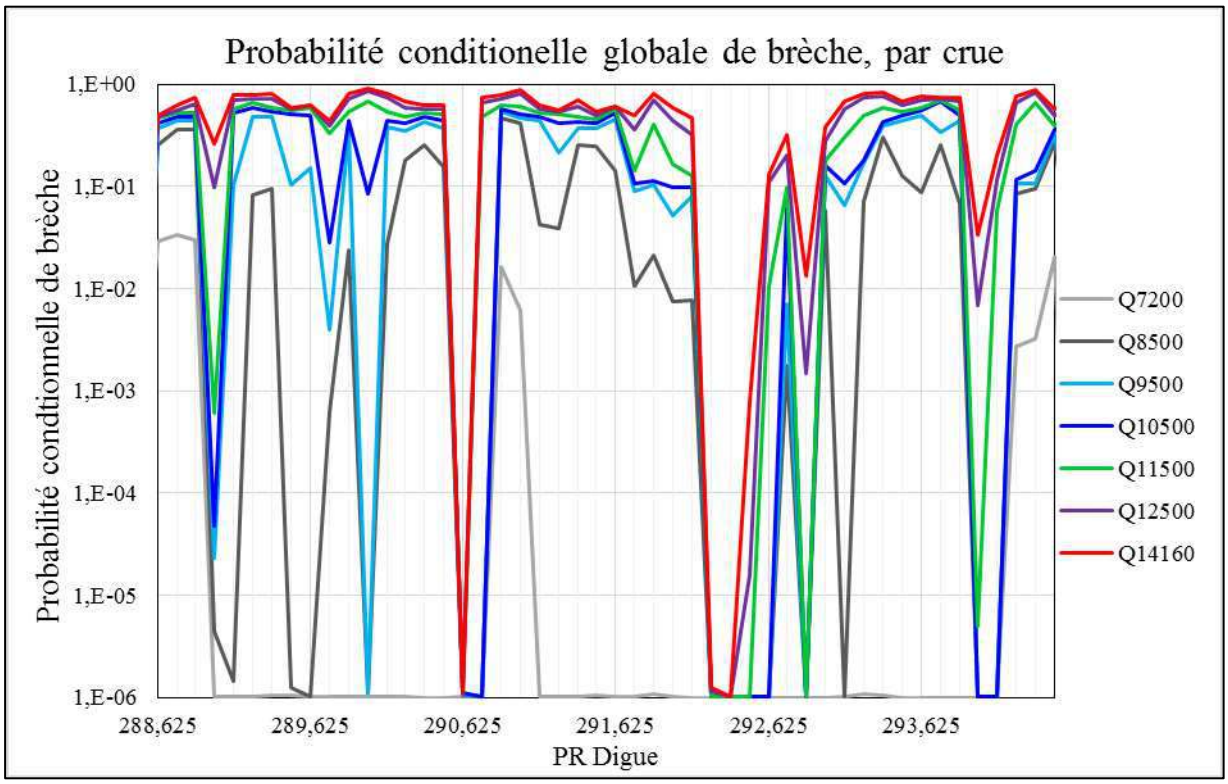


Figure 82 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Beaumont-Cavalès

3.21 DIGUE DE CAVALES A ST GILLES (PRG5)

Le tronçon Cavalès-St Gilles mesure 2.8 km, il comprend les PR0.125 compris entre PRG 294.625 et 297.125 ; la digue n'a pas fait l'objet de travaux de confortement depuis son rehaussement au XIX^{ème} siècle. Des travaux de carrossabilité ont été réalisés en 1994.

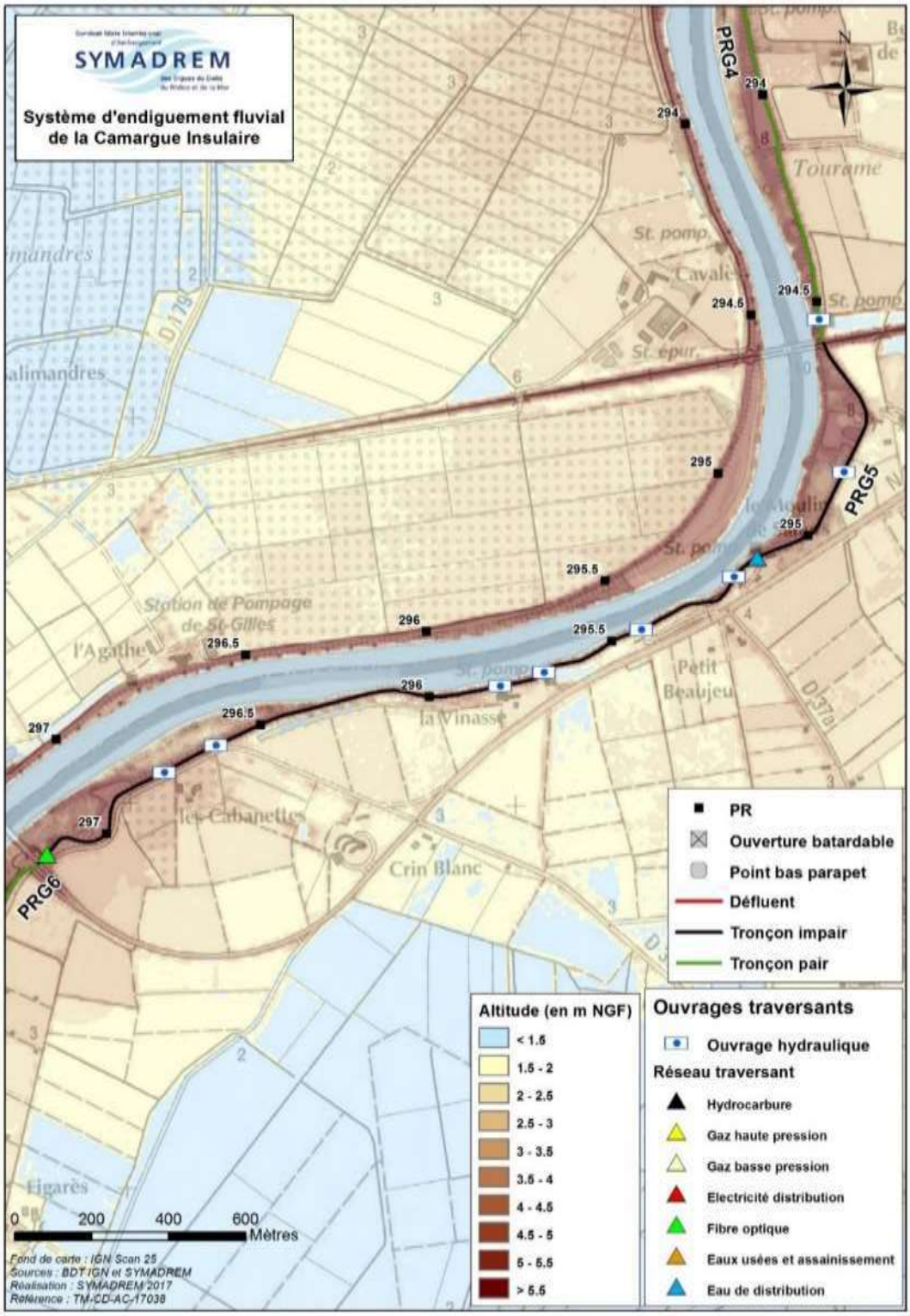


Figure 51. Plan de situation du défluent à Albaron 5 : Cavalès-St Gilles

Tableau 85. Synthèse de géométrie, tronçon Cavalès-St Gilles

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	9,2	6,9	7,4	0,5
Cote de pied de digue aval	m NGF	6,3	2,3	3,7	0,9
Cote à 20m du pdav	m NGF	4,9	0,9	2,6	0,9
Cote de pied de digue amont	m NGF	7,1	4,6	5,5	0,7
Cote à 20m du pdam	m NGF	7,0	0,7	3,2	2,3
Hauteur de digue coté aval	m	5,8	1,2	3,7	1,0
Hauteur de digue côté amont	m	3,3	0,6	1,9	0,7
Fruit aval	L/V	4,8	1,5	2,2	0,7
Fruit amont	L/V	6,3	1,5	2,5	1,3
Largeur du ségonnal	m	133	6	48	41

Ce tronçon est proche du Rhône sur sa partie amont, jusqu'au PRG 296.5 ; dans cette zone la bathymétrie est très variable, entre -3 et -12 m NGF.

Tableau 86. Données hydrauliques, tronçon Cavalès-St Gilles

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	5,1	4,9	1,9	2,4	0,2	0,1	0,0	0,0	0,7
8 500	5,9	5,7	1,2	1,7	0,2	0,1	0,1	0,0	0,5
9 500	6,3	6,0	0,8	1,3	0,2	0,2	0,1	0,0	0,4
10 500	6,6	6,3	0,5	1,0	0,2	0,2	0,1	0,0	0,3
11 500	7,0	6,6	0,1	0,6	0,3	0,2	0,1	0,0	0,2
12 500	7,2	6,8	0,0	0,5	0,3	0,2	0,1	0,0	0,1
14 160	7,3	6,8	-0,1	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0	0,1

Caractéristiques du tronçon Cavalès-St Gilles vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue du XIXème siècle avec un REX négatif. Concernant le claquage hydraulique, la digue est neuve et le perré est donc en bon état ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il y a plusieurs ouvrages hydrauliques sur ce tronçon, celui qui présente la transition la plus à risque comprend un réseau au compactage et à l'étanchéité incertains. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,99
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit - racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec présence d'arbres en pied de talus (un côté). La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit - fissure
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle sans observation d'infiltrations et de terriers par le passé. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive
L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable propre en fondation. La couche de sable, dont le toit est à 10m de profondeur, mesure 5m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact
La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il y a eu des brèches anciennes (1856). Concernant le claquage hydraulique, la digue est neuve et le perré est donc en bon état ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m

- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue a été investigué sans présence de grave. Concernant le claquage hydraulique, la digue est neuve et le perré est donc en bon état ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 6m et la pente hydraulique est de 10 à 21 cm/km ; la berge est recouverte d'arbres.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge arborée

Analyse post-premiers résultats, PRG 294.875:

Le calcul au droit de l'ouvrage traversant a été repris avec sa géométrie et non celle de la digue.

Tableau 87. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Cavalès-St Gilles

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	6E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
12 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
14 160	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	9E-04	0E+00	5E-04	2E-04	2E-08	4E-10	0E+00	1E-06	4E-08	2E-05	4E-05			**2E-03**
8 500	6E-02	2E-02	1E-02	6E-03	4E-08	1E-07	0E+00	1E-06	4E-08	7E-04	2E-04			**1E-01**
9 500	2E-01	4E-02	2E-02	9E-03	5E-08	2E-07	2E-09	1E-06	4E-08	1E-03	2E-04			**3E-01**
10 500	3E-01	5E-02	2E-02	1E-02	6E-08	5E-07	9E-06	4E-04	4E-08	4E-03	2E-04			**3E-01**
11 500	4E-01	6E-02	2E-02	1E-02	9E-08	7E-06	4E-05	6E-02	4E-08	4E-02	3E-04			**4,7E-01**
12 500	4E-01	6E-02	2E-02	1E-02	1E-07	2E-05	7E-05	2E-01	4E-08	7E-02	3E-04			**6E-01**
14 160	4E-01	6E-02	2E-02	1E-02	1E-07	2E-05	8E-05	2E-01	4E-08	8E-02	3E-04			**6E-01**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	2E-02	0E+00	6E-03	4E-03	1E-07	8E-09	0E+00	1E-06	4E-07	2E-04	7E-04			**2E-02**
8 500	4E-01	2E-01	7E-02	3E-02	2E-07	1E-06	0E+00	1E-06	4E-07	6E-03	2E-03			**4E-01**
9 500	5E-01	2E-01	7E-02	4E-02	2E-07	2E-06	4E-09	1E-06	4E-07	7E-03	2E-03			**6E-01**
10 500	5E-01	2E-01	8E-02	5E-02	2E-07	3E-06	2E-05	8E-03	4E-07	4E-02	2E-03			**6E-01**
11 500	5E-01	3E-01	8E-02	5E-02	5E-07	8E-05	1E-04	4E-01	4E-07	3E-01	3E-03			**8E-01**
12 500	5E-01	3E-01	9E-02	5E-02	8E-07	2E-04	2E-04	6E-01	4E-07	4E-01	3E-03			**9E-01**
14 160	5E-01	3E-01	9E-02	5E-02	1E-06	2E-04	2E-04	7E-01	4E-07	5E-01	3E-03			**9E-01**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**7E-02**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**3E-02**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au PRG 294.875. Elle est de 7.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.
L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 7 500 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 8 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 3.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) ;
- un risque inacceptable ($> 10^{-4}$) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 7 500 m^3/s,
- une crue de danger de 11 500 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 7 500 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 8 500 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 %, revu, des probabilités maximales.

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 7 500 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le principal risque est l'érosion de conduit, principalement au droit d'un terrier ou d'un ouvrage traversant. Il est situé sur l'intégralité du tronçon.

Ce tronçon sera prochainement repris dans le cadre des travaux sur le petit Rhône.

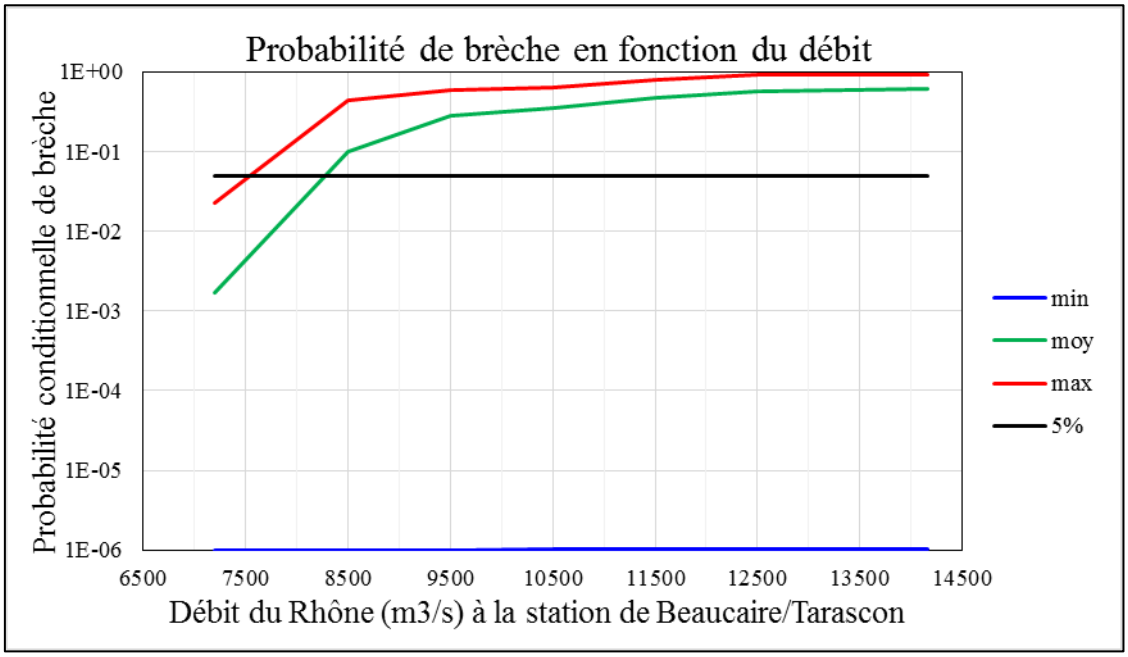


Figure 83 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Cavalès-St Gilles

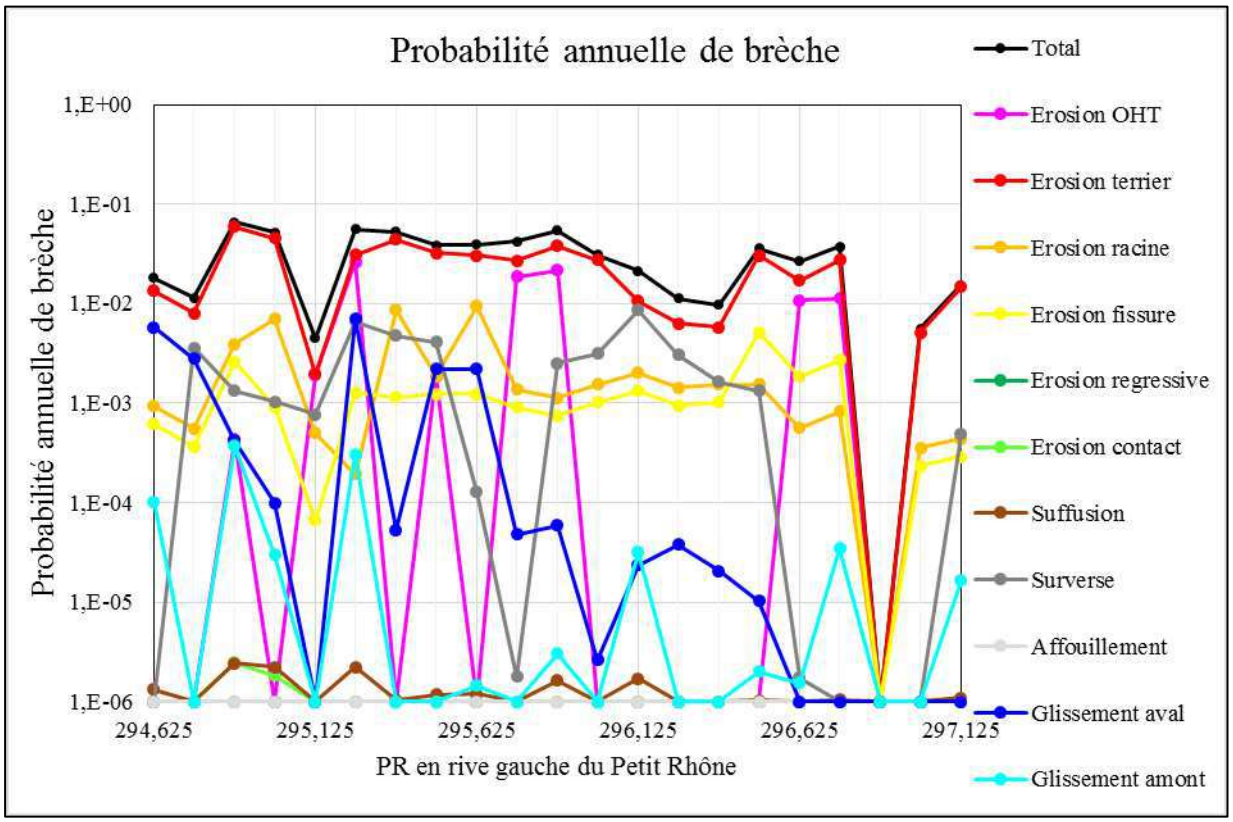


Figure 84 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Cavalès-St Gilles

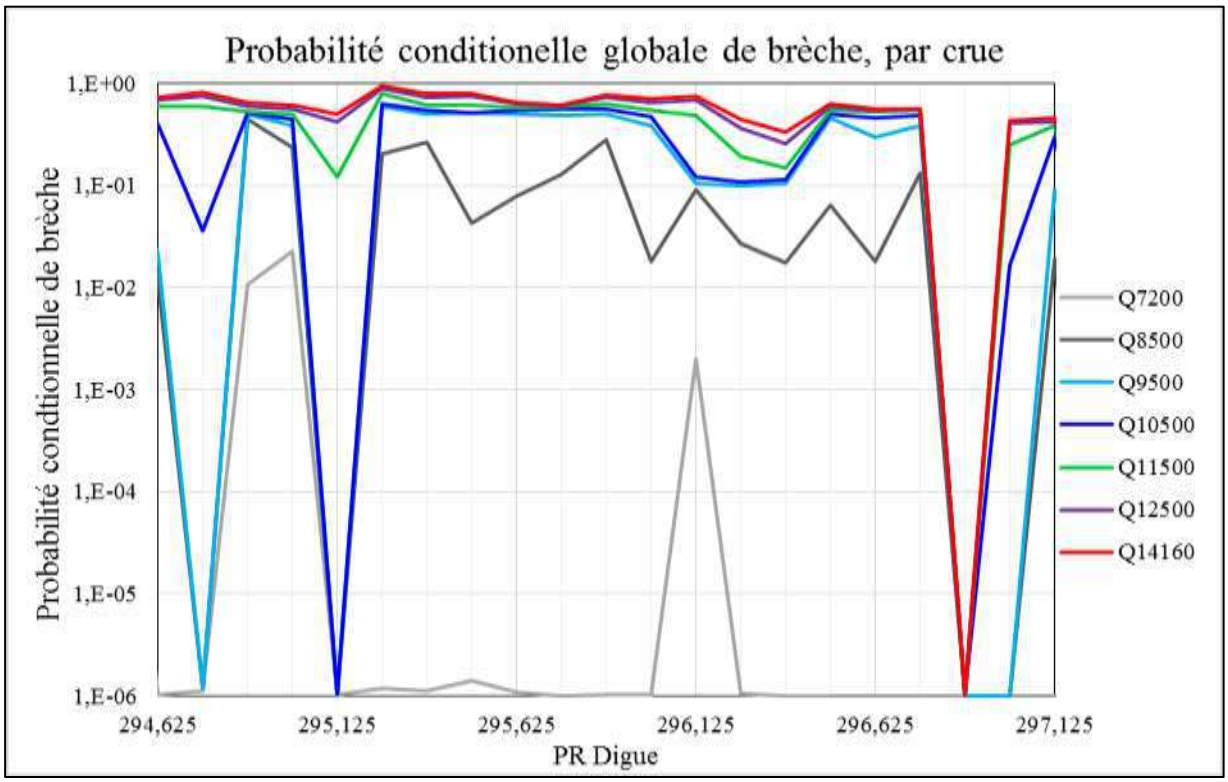


Figure 85 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Cavalès-St Gilles

3.22 DIGUE DE SAINT-GILLES A FIGARES (PRG6)

Le tronçon St Gilles-Figarès mesure 1 km, il comprend les PR0.125 compris entre PRG 297.25 et 298.125 ; la digue n'a pas fait l'objet de travaux de confortement depuis son rehaussement au XIX^{ème} siècle. Des travaux de carrossabilité ont été réalisés en 1994.

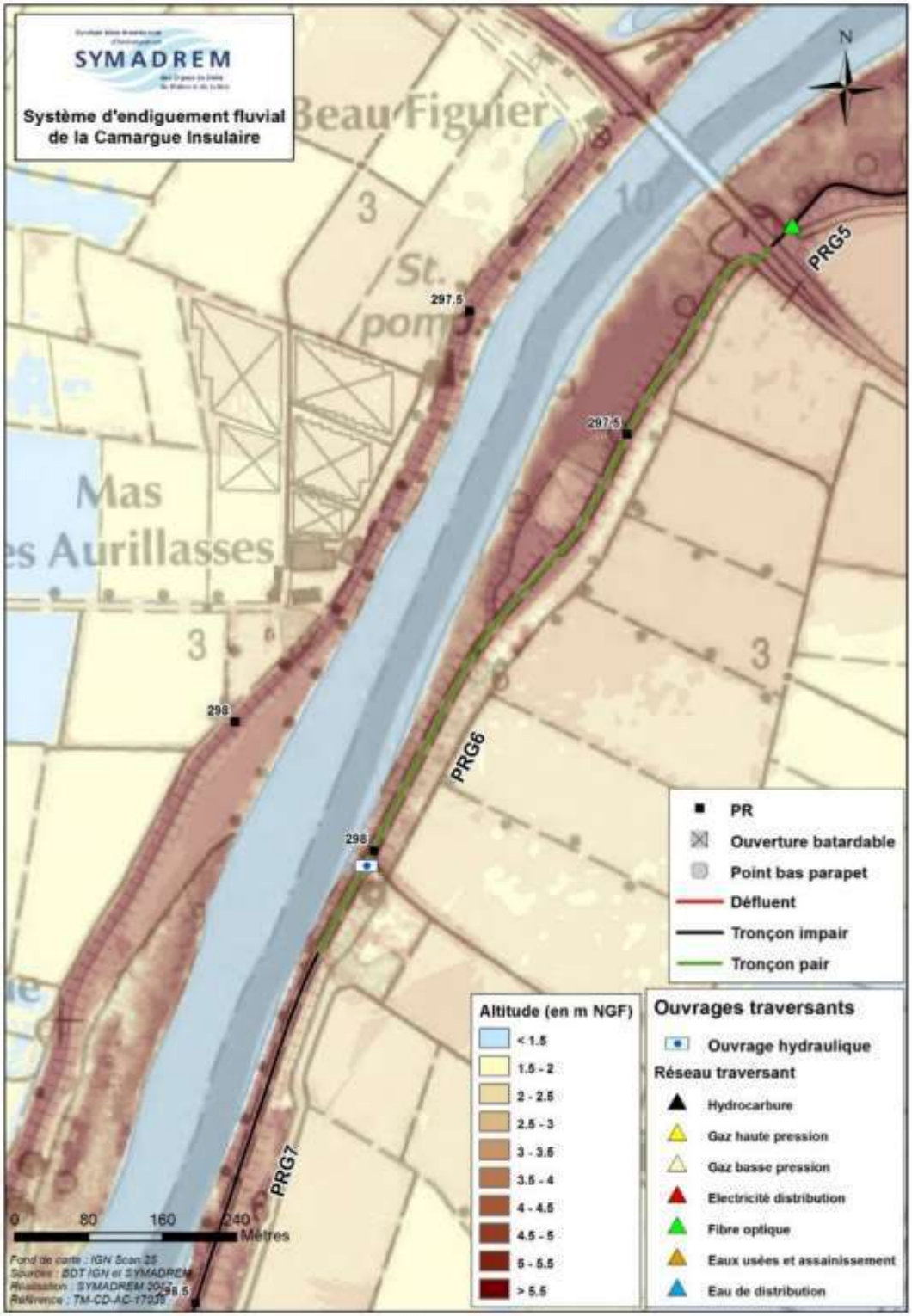


Figure 52. Plan de situation du défluent à Albaron 6 : St Gilles-Figarès

Tableau 88. Synthèse de géométrie, tronçon St Gilles-Figarès

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	9,2	6,7	7,3	0,8
Cote de pied de digue aval	m NGF	4,8	3,1	3,7	0,7
Cote à 20m du pdav	m NGF	4,0	1,9	2,9	0,6
Cote de pied de digue amont	m NGF	6,8	4,0	5,1	0,9
Cote à 20m du pdam	m NGF	6,4	0,7	3,0	2,3
Hauteur de digue coté aval	m	4,6	2,4	3,7	0,7
Hauteur de digue côté amont	m	3,4	0,2	2,2	1,1
Fruit aval	L/V	2,2	1,9	2,0	0,1
Fruit amont	L/V	12,3	1,8	3,6	3,6
Largeur du ségonnal	m	87	10	48	32

Ce tronçon est proche du Rhône sur sa partie aval où la bathymétrie est de -4 m NGF.

Tableau 89. Données hydrauliques, tronçon St Gilles-Figarès

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	4,9	4,8	1,9	2,5	0,1	0,1	0,0	0,0	0,7
8 500	5,6	5,5	1,2	1,8	0,2	0,1	0,0	0,0	0,5
9 500	6,0	5,9	0,8	1,4	0,2	0,1	0,0	0,0	0,4
10 500	6,3	6,2	0,5	1,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3
11 500	6,6	6,5	0,2	0,8	0,2	0,2	0,1	0,0	0,2
12 500	6,7	6,6	0,1	0,7	0,2	0,2	0,1	0,0	0,2
14 160	6,8	6,6	0,1	0,6	0,2	0,2	0,1	0,0	0,2

Caractéristiques du tronçon St Gilles-Figarès vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue du XIXème siècle avec un REX négatif. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
L'ouvrage hydraulique sur ce tronçon comprend un réseau au compactage incertain mais une étanchéité satisfaisante. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit - racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec présence d'arbres en pied de talus (deux côtés). La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit - fissure

Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec observation d'infiltration par le passé. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable de classe 5 en fondation. La couche de sable, dont le toit est à 6m de profondeur, mesure 3m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il n'y a pas de brèches connues. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m

- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue a été investigué sans présence de grave. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 10m et la pente hydraulique est de 8 à 13 cm/km ; la berge est recouverte d'arbres.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge arborée

Tableau 90. Résultats des calculs de probabilité, tronçon St Gilles-Figarès

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-02**
12 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	4E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**2E-02**
14 160	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	6E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**3E-02**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	2E-03	0E+00	7E-04	9E-04	1E-08	2E-09	0E+00	1E-06	1E-08	2E-05	2E-06			**4E-03**
8 500	1E-01	2E-02	2E-02	2E-02	5E-08	4E-08	0E+00	1E-06	1E-08	8E-05	3E-05			**2E-01**
9 500	3E-01	2E-02	3E-02	2E-02	6E-08	1E-07	2E-09	1E-06	1E-08	1E-04	4E-05			**3E-01**
10 500	3E-01	2E-02	3E-02	3E-02	6E-08	1E-07	6E-06	1E-03	1E-08	1E-04	4E-05			**3E-01**
11 500	3E-01	2E-02	3E-02	3E-02	6E-08	1E-07	3E-05	1E-01	1E-08	4E-04	5E-05			**4E-01**
12 500	3E-01	3E-02	3E-02	3E-02	6E-08	3E-07	4E-05	2E-01	1E-08	5E-04	5E-05			**4,6E-01**
14 160	3E-01	3E-02	3E-02	3E-02	7E-08	4E-07	4E-05	2E-01	1E-08	6E-04	5E-05			**4,9E-01**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	2E-02	0E+00	4E-03	3E-03	7E-08	2E-08	0E+00	1E-06	6E-08	7E-05	6E-06			**2E-02**
8 500	3E-01	1E-01	6E-02	4E-02	2E-07	1E-07	0E+00	1E-06	6E-08	4E-04	1E-04			**4E-01**
9 500	5E-01	2E-01	7E-02	5E-02	2E-07	2E-07	4E-09	1E-06	6E-08	4E-04	1E-04			**5,5E-01**
10 500	5E-01	2E-01	7E-02	5E-02	2E-07	2E-07	1E-05	6E-03	6E-08	6E-04	1E-04			**6E-01**
11 500	5E-01	2E-01	8E-02	5E-02	2E-07	3E-07	6E-05	3E-01	6E-08	2E-03	2E-04			**7E-01**
12 500	5E-01	2E-01	8E-02	5E-02	2E-07	1E-06	8E-05	5E-01	6E-08	2E-03	2E-04			**8E-01**
14 160	5E-01	2E-01	8E-02	5E-02	3E-07	2E-06	9E-05	5E-01	6E-08	3E-03	2E-04			**8E-01**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**6E-02**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**3E-02**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au PRG 297,75. Elle est de 6.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.
L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 7 500 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 8 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 3.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) ;
- un risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 7 500 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 7 500 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 8 500 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 % des probabilités maximales

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 7 500 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le principal risque est l'érosion de conduit, principalement au droit d'un terrier ou d'un ouvrage traversant. Il est situé sur l'intégralité du tronçon.

Ce tronçon sera prochainement repris dans le cadre des travaux sur le petit Rhône.

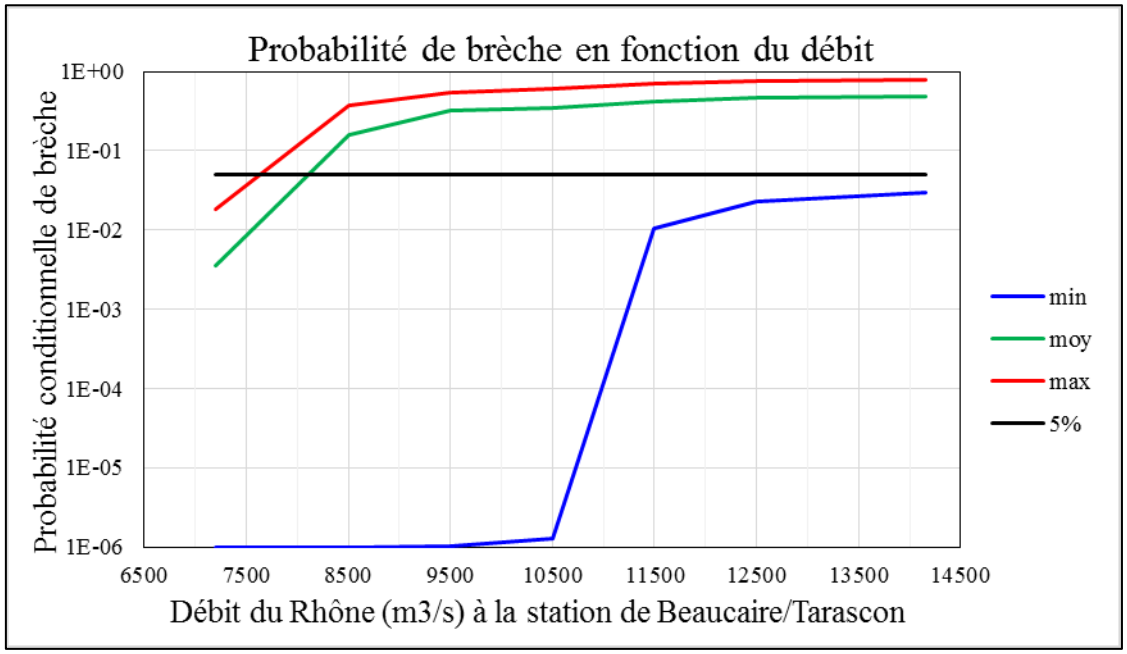


Figure 86 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon St Gilles-Figarès

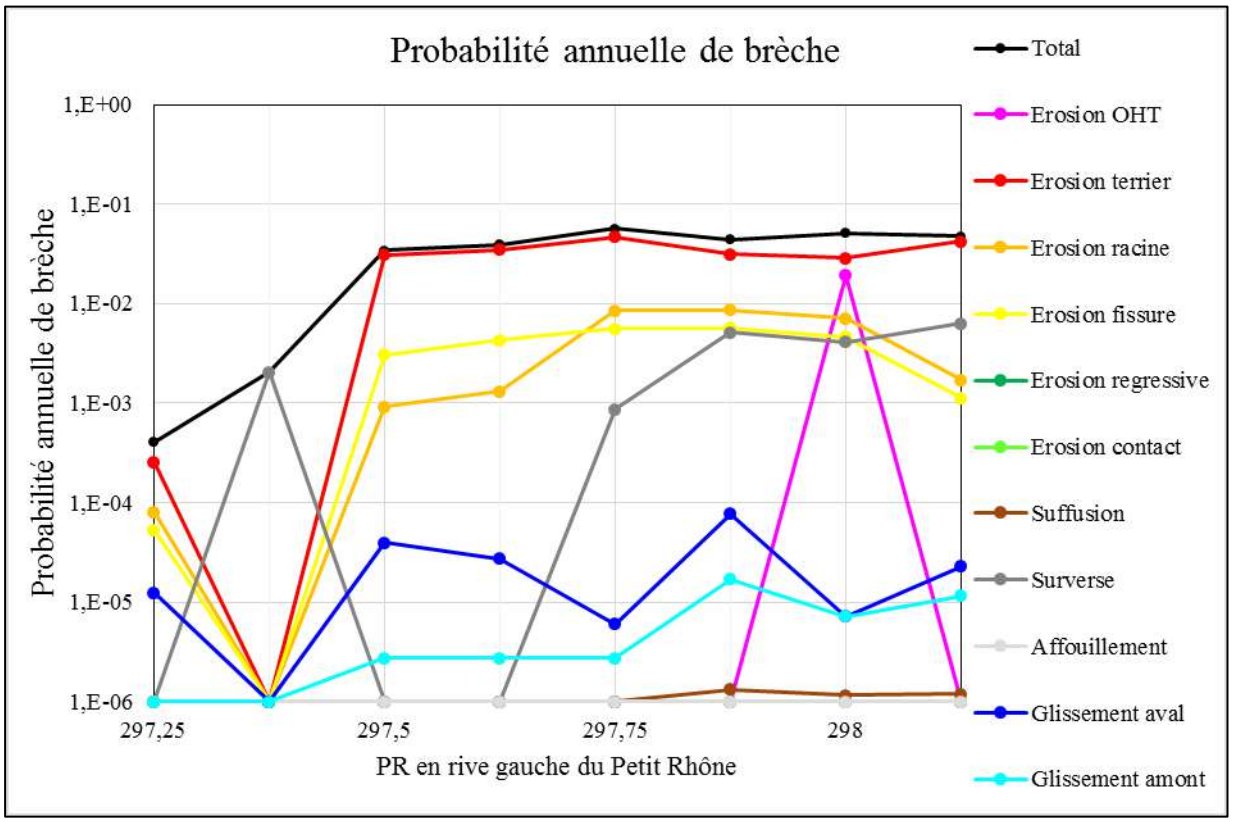


Figure 87 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon St Gilles-Figarès

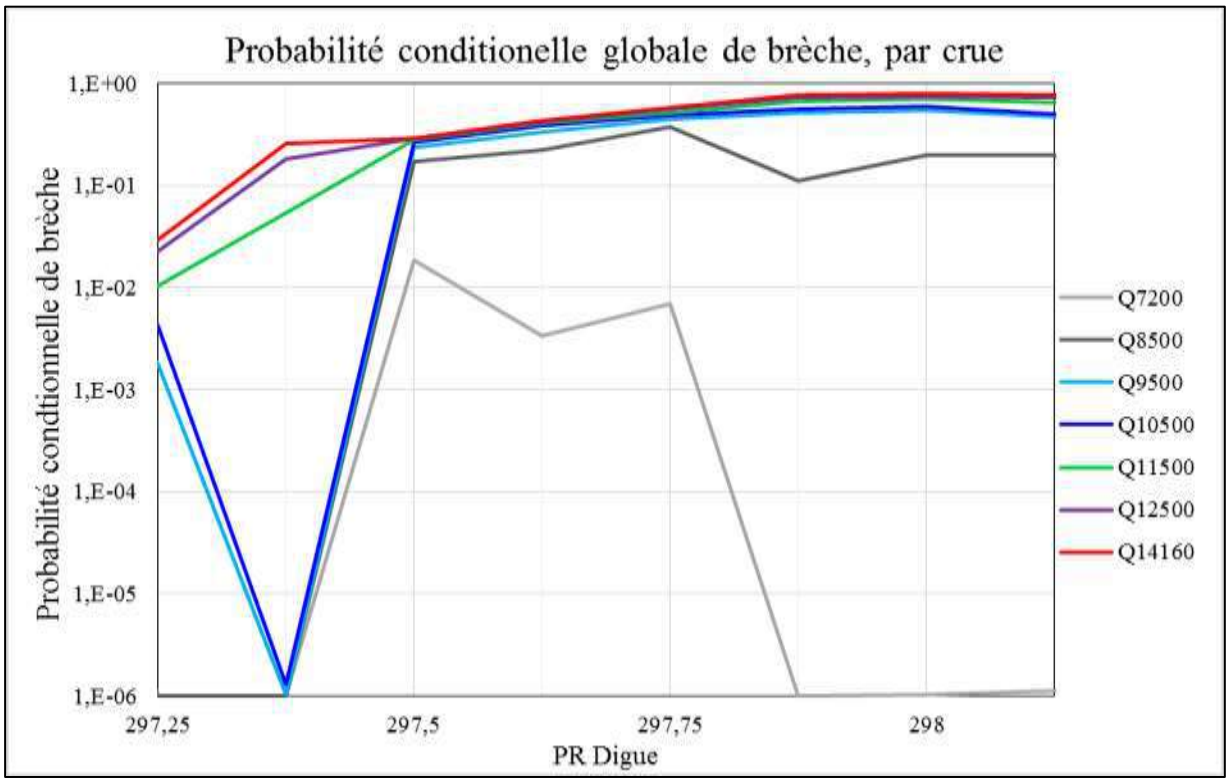


Figure 88 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon St Gilles-Figarès

3.23 DIGUE DE FIGARES (PRG7)

Le tronçon Figarès mesure 1.7 km, il comprend les PR0.125 compris entre PRG 298.25 et 299.75 ; la digue n'a pas fait l'objet de travaux de confortement depuis son rehaussement au XIX^{ème} siècle. Des travaux de carrossabilité ont été réalisés en 1994.

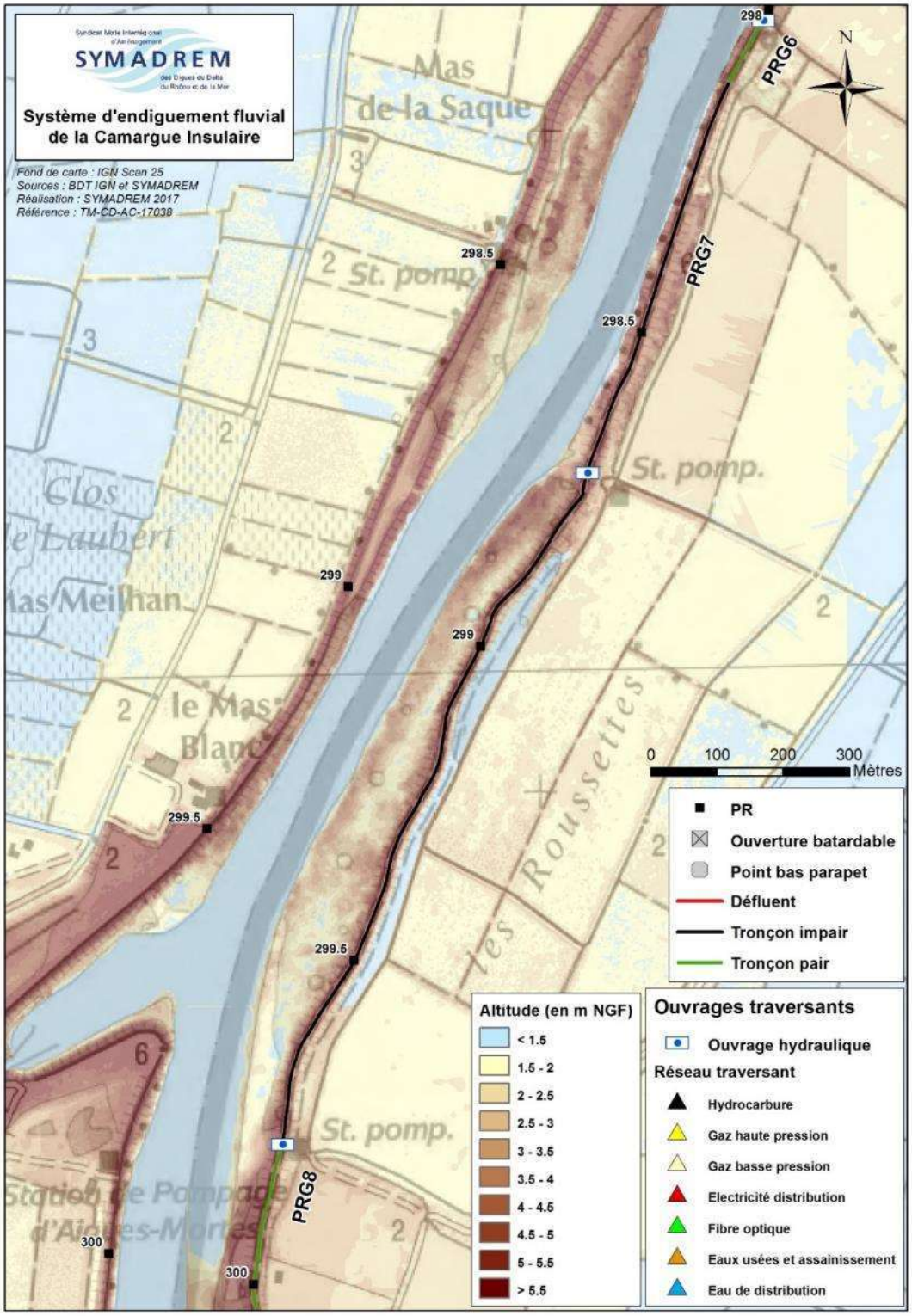


Figure 53. Plan de situation du défluent à Albaron 7 : Figarès

Tableau 91. Synthèse de géométrie, tronçon Figarès

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	6,9	6,3	6,6	0,1
Cote de pied de digue aval	m NGF	4,7	2,5	3,2	0,8
Cote à 20m du pdav	m NGF	4,4	2,0	2,9	0,8
Cote de pied de digue amont	m NGF	5,5	4,7	5,1	0,2
Cote à 20m du pdam	m NGF	3,3	0,7	1,9	0,8
Hauteur de digue coté aval	m	4,2	1,9	3,4	0,9
Hauteur de digue côté amont	m	1,7	1,3	1,5	0,1
Fruit aval	L/V	2,3	1,8	2,0	0,1
Fruit amont	L/V	5,0	1,8	2,6	0,9
Largeur du ségonnal	m	119	13	64	38

Ce tronçon est proche du Rhône sur sa partie amont où la bathymétrie est d'environ -4 m NGF.

Tableau 92. Données hydrauliques, tronçon Figarès

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	4,8	4,6	1,7	1,9	0,1	0,1	0,0	0,0	0,6
8 500	5,5	5,4	0,9	1,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,4
9 500	5,9	5,7	0,6	0,8	0,2	0,2	0,1	0,0	0,3
10 500	6,2	6,0	0,3	0,5	0,2	0,2	0,1	0,0	0,2
11 500	6,5	6,3	0,0	0,2	0,2	0,2	0,1	0,0	0,1
12 500	6,5	6,4	-0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,0	0,1
14 160	6,6	6,4	-0,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0

Caractéristiques du tronçon Figarès vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue du XIXème siècle avec un REX négatif. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il y a plusieurs ouvrages hydrauliques sur ce tronçon, celui qui présente la transition la plus à risque comprend un réseau au compactage et à l'étanchéité incertains. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,99
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit - racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec présence d'arbres en pied de talus (deux côtés). La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit - fissure

Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec observation d'infiltrations par le passé. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable propre en fondation. La couche de sable, dont le toit est à 5m de profondeur, mesure 2m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il y a eu deux brèches en 1993 qui ont été réparées en urgence seulement. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m

- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue a été investigué sans présence de grave. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 13m et la pente hydraulique est de 8 à 13 cm/km ; la berge est recouverte d'arbres.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge arborée

Tableau 93. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Figarès

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	5E-04	0E+00	9E-03	7E-03	2E-07	1E-10	2E-09	1E-06	4E-13	5E-06	6E-06			**1E-01**
10 500	3E-01	0E+00	1E-02	8E-03	2E-07	1E-07	2E-08	1E-06	4E-13	5E-06	6E-06			**4E-01**
11 500	4E-01	0E+00	1E-02	8E-03	2E-07	2E-07	1E-05	7E-03	4E-13	5E-06	6E-06			**6E-01**
12 500	4E-01	0E+00	1E-02	9E-03	2E-07	2E-07	2E-05	3E-02	4E-13	5E-06	6E-06			**6E-01**
14 160	4E-01	0E+00	1E-02	9E-03	2E-07	2E-07	2E-05	5E-02	4E-13	5E-06	6E-06			**6E-01**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	1E-06	0E+00	2E-04	1E-04	7E-08	1E-09	0E+00	1E-06	2E-09	4E-07	4E-07			**4E-04**
8 500	6E-02	3E-03	2E-02	3E-02	2E-07	8E-06	0E+00	1E-06	2E-09	3E-04	2E-05			**1E-01**
9 500	3E-01	9E-03	4E-02	4E-02	4E-07	1E-05	3E-09	1E-04	2E-09	5E-04	2E-05			**4E-01**
10 500	5E-01	1E-02	4E-02	4E-02	1E-06	2E-05	6E-06	4E-02	2E-09	1E-03	2E-05			**5,3E-01**
11 500	5E-01	1E-02	5E-02	4E-02	3E-06	3E-05	3E-05	3E-01	2E-09	2E-03	2E-05			**7E-01**
12 500	5E-01	1E-02	5E-02	4E-02	4E-06	3E-05	4E-05	4E-01	2E-09	3E-03	2E-05			**7E-01**
14 160	5E-01	1E-02	5E-02	4E-02	4E-06	3E-05	4E-05	4E-01	2E-09	3E-03	2E-05			**7E-01**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	2E-05	0E+00	3E-03	2E-03	1E-07	1E-08	0E+00	1E-06	2E-08	5E-06	6E-06			**5E-03**
8 500	3E-01	4E-02	7E-02	5E-02	2E-07	1E-04	0E+00	1E-06	2E-08	1E-03	8E-05			**3E-01**
9 500	5E-01	1E-01	7E-02	5E-02	3E-06	1E-04	3E-09	1E-03	2E-08	1E-03	8E-05			**5,3E-01**
10 500	5E-01	1E-01	8E-02	5E-02	1E-05	1E-04	1E-05	2E-01	2E-08	3E-03	8E-05			**6E-01**
11 500	5E-01	2E-01	8E-02	5E-02	4E-05	1E-04	5E-05	7E-01	2E-08	7E-03	8E-05			**8E-01**
12 500	5E-01	2E-01	8E-02	6E-02	5E-05	1E-04	7E-05	8E-01	2E-08	9E-03	8E-05			**9E-01**
14 160	5E-01	2E-01	8E-02	6E-02	5E-05	1E-04	8E-05	8E-01	2E-08	1E-02	8E-05			**9E-01**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**6E-02**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**4E-02**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au PRG 298,625. Elle est de 6.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.
L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 7 500 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 8 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 4.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) ;
- un risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 7 500 m^3/s,
- une crue de danger de 9 500 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 7 500m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 8 500 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 % des probabilités maximales

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 7 500 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le principal risque est l'érosion interne en particulier au niveau d'un terrier et à partir d'un débit de 11 500m3/s c'est l'érosion par surverse. Ces risques sont présents sur tout le linéaire.

Ce tronçon sera prochainement repris dans le cadre des travaux sur le petit Rhône, ce sera le tronçon résistant à la surverse.

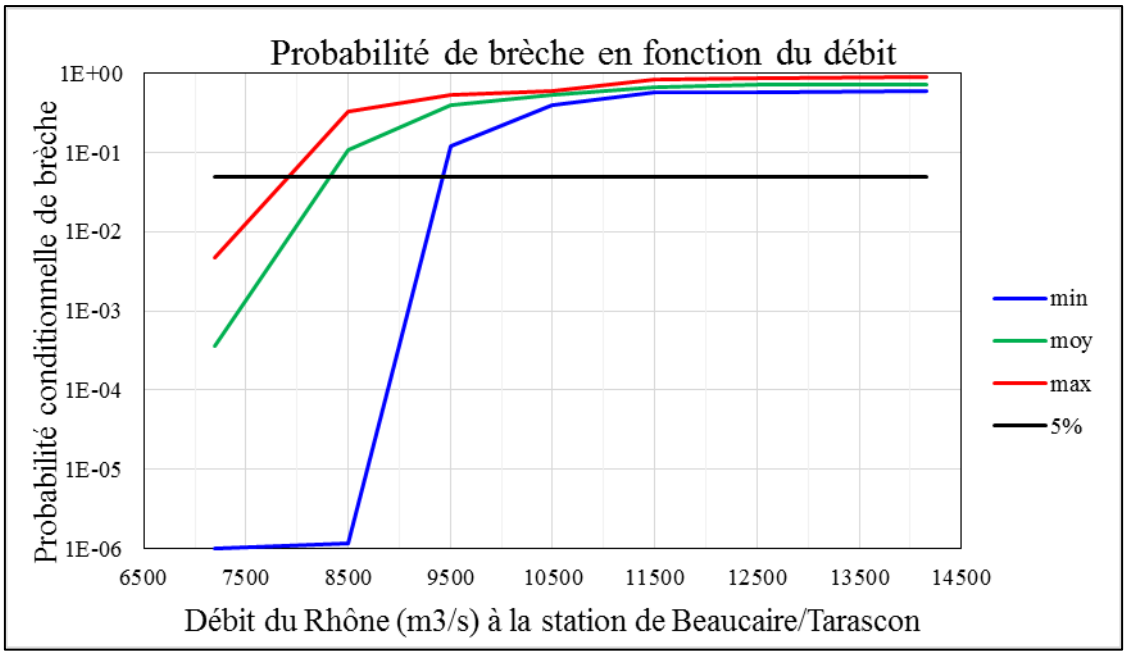


Figure 89 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Figarès

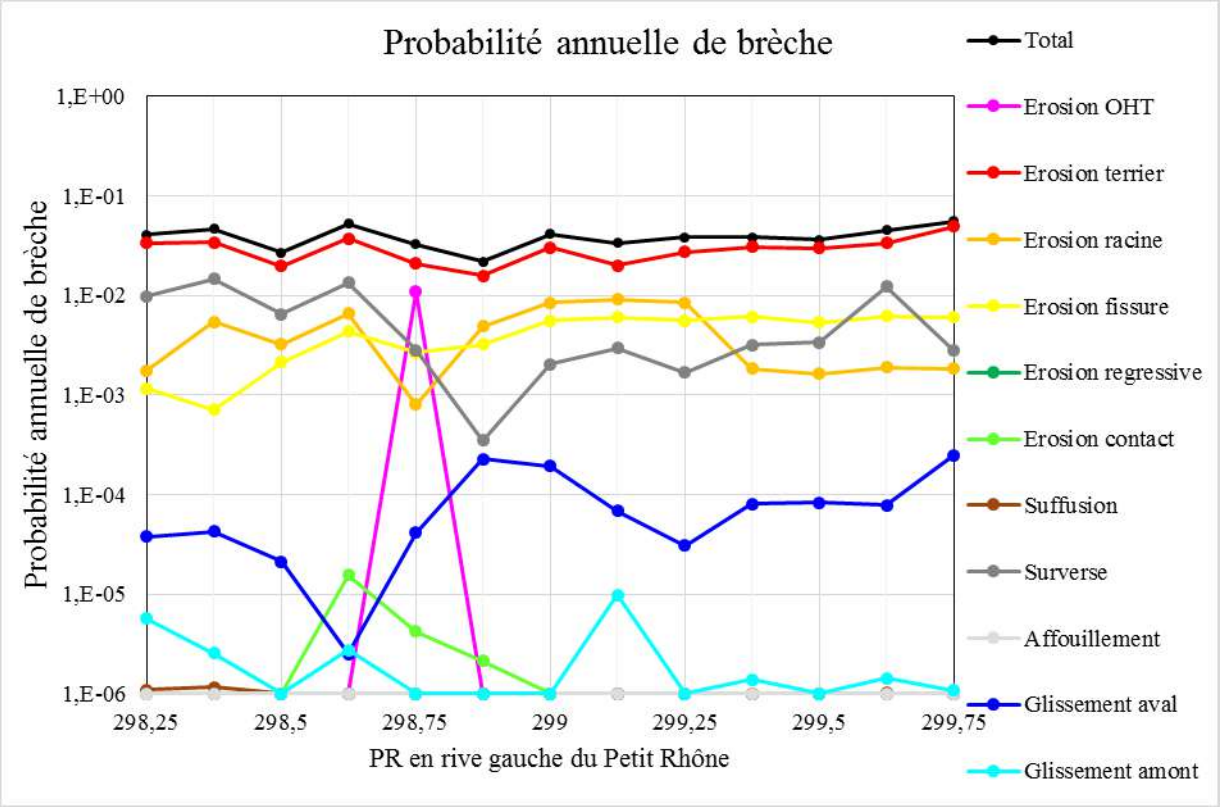


Figure 90 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Figarès

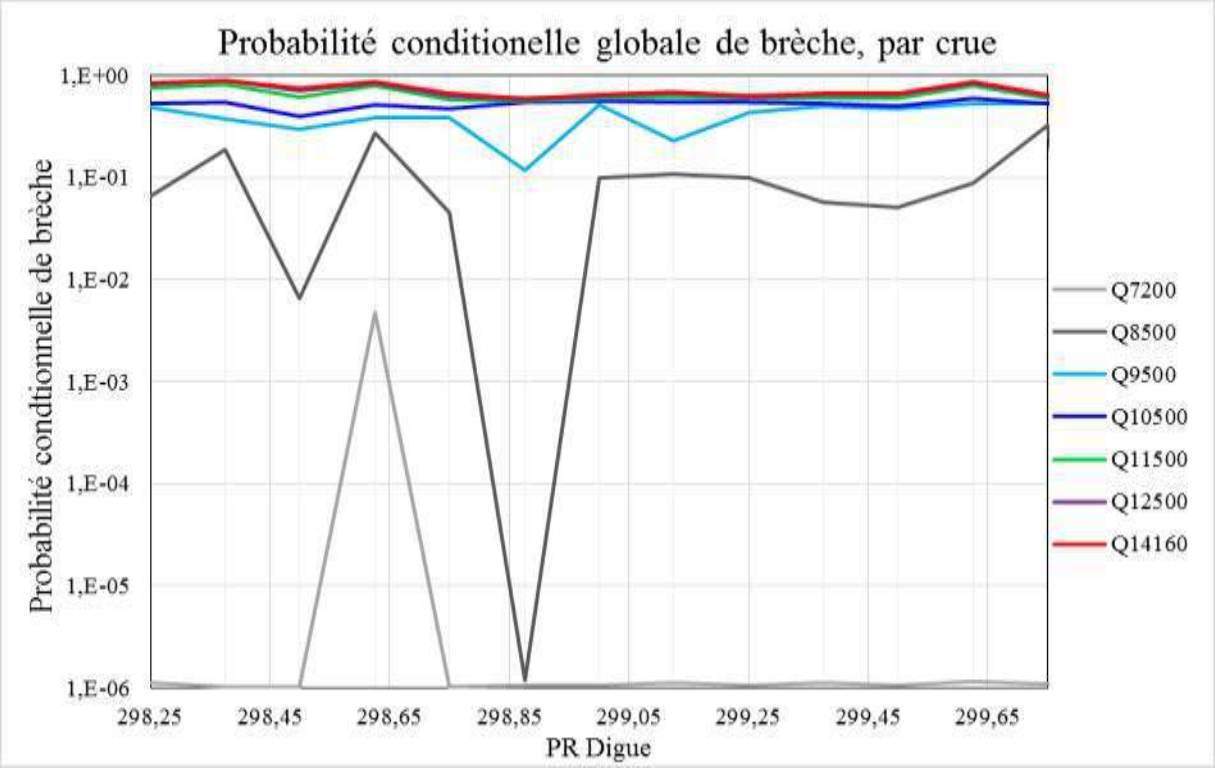


Figure 91 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Figarès

3.24 DIGUE DE LA GALANTE A ALBARON (PRG8)

Le tronçon La Galante-Albaron mesure 6.7 km, il comprend les PR0.125 compris entre PRG 299.875 et 306.5 ; la digue n'a pas fait l'objet de travaux de confortement depuis son rehaussement au XIX^{ème} siècle. Des travaux de carrossabilité ont été réalisés en 1994.

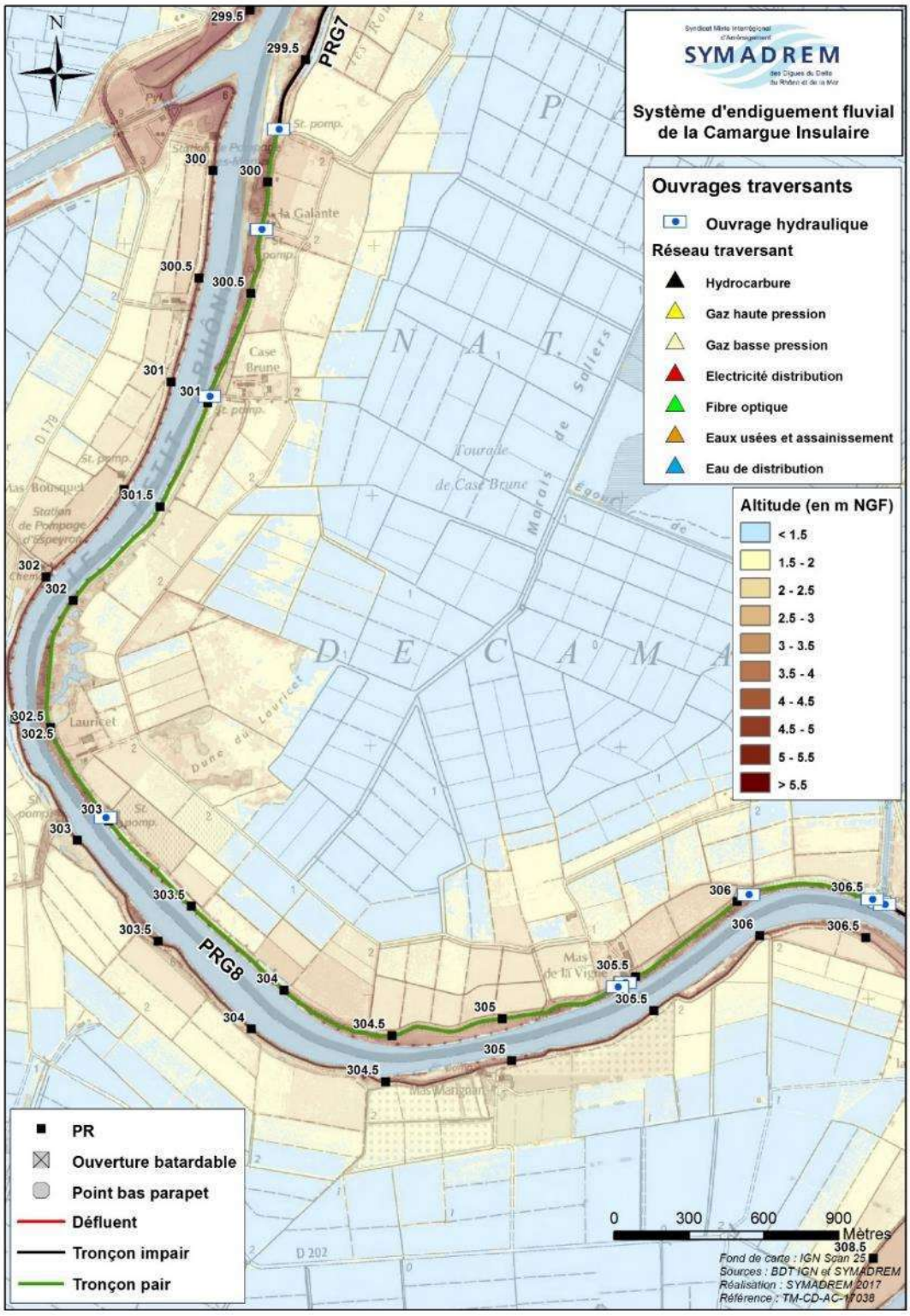


Figure 54. Plan de situation du défluent à Albaron 8 : La Galante-Albaron

Tableau 94. Synthèse de géométrie, tronçon La Galante-Albaron

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	7,2	5,7	6,4	0,3
Cote de pied de digue aval	m NGF	5,3	1,9	3,0	0,7
Cote à 20m du pdav	m NGF	3,3	0,9	2,3	0,6
Cote de pied de digue amont	m NGF	5,5	3,8	4,6	0,4
Cote à 20m du pdam	m NGF	5,3	0,5	2,2	1,8
Hauteur de digue coté aval	m	4,6	1,0	3,3	0,9
Hauteur de digue côté amont	m	2,7	1,2	1,8	0,3
Fruit aval	L/V	4,2	1,5	2,1	0,4
Fruit amont	L/V	10,2	1,6	2,6	1,6
Largeur du ségonnal	m	76	2	24	16

Ce tronçon est à une distance variable du Rhône, lorsqu'il est proche la bathymétrie est aux alentours de -4m NGF, excepté au PRG 300.875 où le fleuve descend à -9 m NGF.

Tableau 95. Données hydrauliques, tronçon La Galante-Albaron

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	4,6	4,1	1,6	2,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,5
8 500	5,4	4,7	0,9	1,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3
9 500	5,7	5,0	0,6	1,0	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2
10 500	6,0	5,2	0,3	0,7	0,2	0,2	0,1	0,0	0,2
11 500	6,3	5,4	0,1	0,5	0,3	0,2	0,1	0,0	0,1
12 500	6,3	5,4	0,1	0,5	0,3	0,2	0,1	0,0	0,1
14 160	6,4	5,5	0,1	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0	0,1

Caractéristiques du tronçon La Galante-Albaron vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue du XIXème siècle avec un REX négatif. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il y a plusieurs ouvrages hydrauliques sur ce tronçon, celui qui présente la transition la plus à risque comprend un réseau au compactage et à l'étanchéité incertains. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,99
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit - racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec présence d'arbres en pied de talus (deux côtés). La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit - fissure

Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec observation de terriers de blaireaux par le passé. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable de qualité variable en fondation. La couche de sable, dont le toit est à 5m de profondeur, mesure 5m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il y a eu des brèches en 1840 et 1843 ainsi qu'en 1993 et 1994 ; ces dernières ont été réparées en urgence seulement. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m

- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue a été investigué et de la grave a été repérée. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 2m et la pente hydraulique est de 8 à 13 cm/km ; la berge est recouverte d'arbres.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge arborée

Analyse post-premiers résultats, PRG 303.125:

La probabilité de localisation de racine a été reprise car contrairement a ce qui avait été noté d'après l'orthophoto, il n'y a pas d'arbre en pied, il y a des pistes.

Tableau 96. Résultats des calculs de probabilité, tronçon La Galante-Albaron

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-10	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-10	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	5E-06	0E+00	1E-04	9E-05	1E-09	1E-10	2E-10	1E-06	4E-13	1E-06	6E-06			**3E-04**
10 500	2E-05	0E+00	5E-04	3E-04	2E-09	2E-08	2E-09	1E-06	4E-13	1E-06	6E-06			**1E-03**
11 500	6E-02	0E+00	1E-03	3E-03	2E-09	1E-07	1E-06	1E-06	4E-13	1E-06	6E-06			**9E-02**
12 500	6E-02	0E+00	1E-03	4E-03	2E-09	1E-07	2E-06	1E-06	4E-13	1E-06	6E-06			**9E-02**
14 160	6E-02	0E+00	1E-03	4E-03	2E-09	1E-07	2E-06	1E-06	4E-13	1E-06	6E-06			**1E-01**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	5E-04	1E-06	7E-04	4E-04	2E-08	8E-10	0E+00	1E-06	7E-08	6E-05	2E-05			**2E-03**
8 500	1E-01	9E-03	3E-02	1E-02	5E-08	5E-06	0E+00	1E-06	7E-08	5E-04	5E-05			**1E-01**
9 500	2E-01	2E-02	4E-02	2E-02	6E-08	2E-05	1E-08	1E-05	7E-08	6E-04	5E-05			**3E-01**
10 500	3E-01	2E-02	5E-02	2E-02	6E-08	2E-05	9E-06	6E-03	7E-08	7E-04	6E-05			**3E-01**
11 500	3E-01	2E-02	5E-02	2E-02	8E-08	3E-05	5E-05	6E-02	7E-08	1E-03	6E-05			**4E-01**
12 500	3E-01	2E-02	5E-02	2E-02	9E-08	3E-05	5E-05	8E-02	7E-08	1E-03	6E-05			**4E-01**
14 160	3E-01	2E-02	5E-02	2E-02	9E-08	3E-05	6E-05	9E-02	7E-08	1E-03	6E-05			**4E-01**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	3E-02	8E-05	2E-02	4E-03	1E-07	1E-08	0E+00	1E-06	6E-07	1E-03	5E-04			**3E-02**
8 500	4E-01	2E-01	7E-02	5E-02	2E-07	1E-04	0E+00	1E-06	6E-07	6E-03	6E-04			**4E-01**
9 500	5E-01	3E-01	8E-02	5E-02	2E-07	1E-04	2E-07	6E-04	6E-07	6E-03	6E-04			**6E-01**
10 500	5E-01	3E-01	8E-02	5E-02	2E-07	1E-04	2E-04	1E-01	6E-07	6E-03	7E-04			**7E-01**
11 500	5E-01	3E-01	9E-02	6E-02	8E-07	1E-04	5E-04	4E-01	6E-07	9E-03	8E-04			**7E-01**
12 500	5E-01	3E-01	9E-02	6E-02	1E-06	2E-04	6E-04	5E-01	6E-07	1E-02	8E-04			**7E-01**
14 160	5E-01	3E-01	9E-02	6E-02	1E-06	2E-04	6E-04	5E-01	6E-07	1E-02	8E-04			**7E-01**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**6E-02**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**3E-02**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au PRG 302,5. Elle est de 6.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.

L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 7 500 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 8 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 3.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) ;
- un risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 7 500 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 7 500 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 8 500 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 % des probabilités maximales ;

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 7 500 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Ce tronçon qui a déjà subi de nombreuses brèches est particulièrement sensible à l'érosion interne sur la majeure partie de son linéaire.

Ce tronçon sera prochainement repris dans le cadre des travaux sur le petit Rhône.

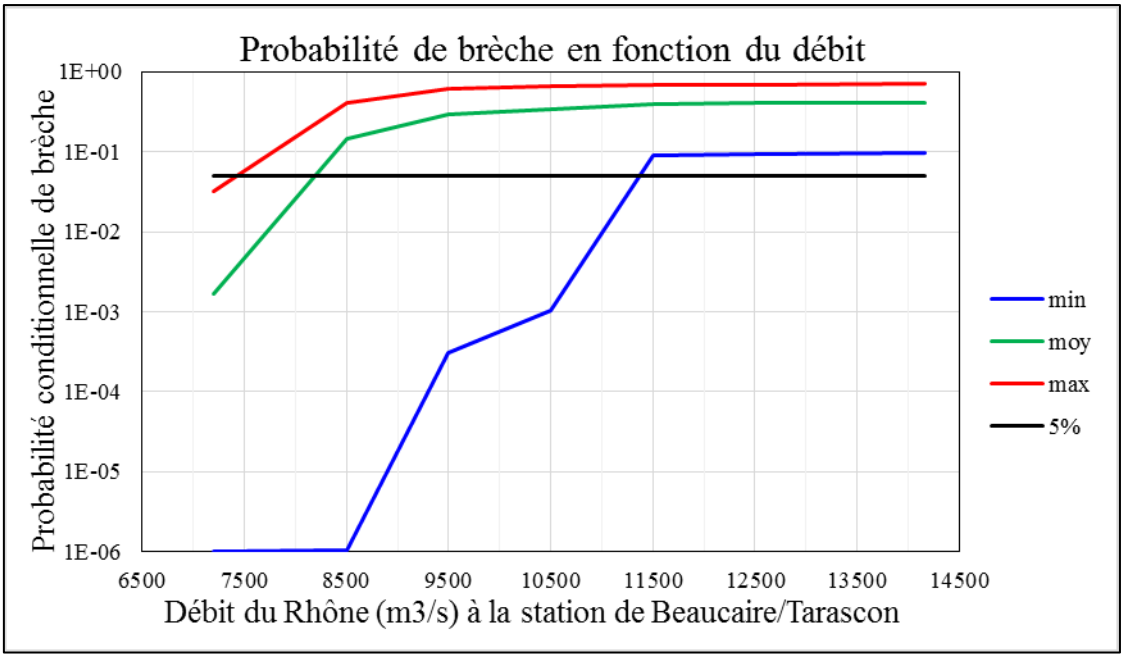


Figure 92 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon La Galante-Albaron

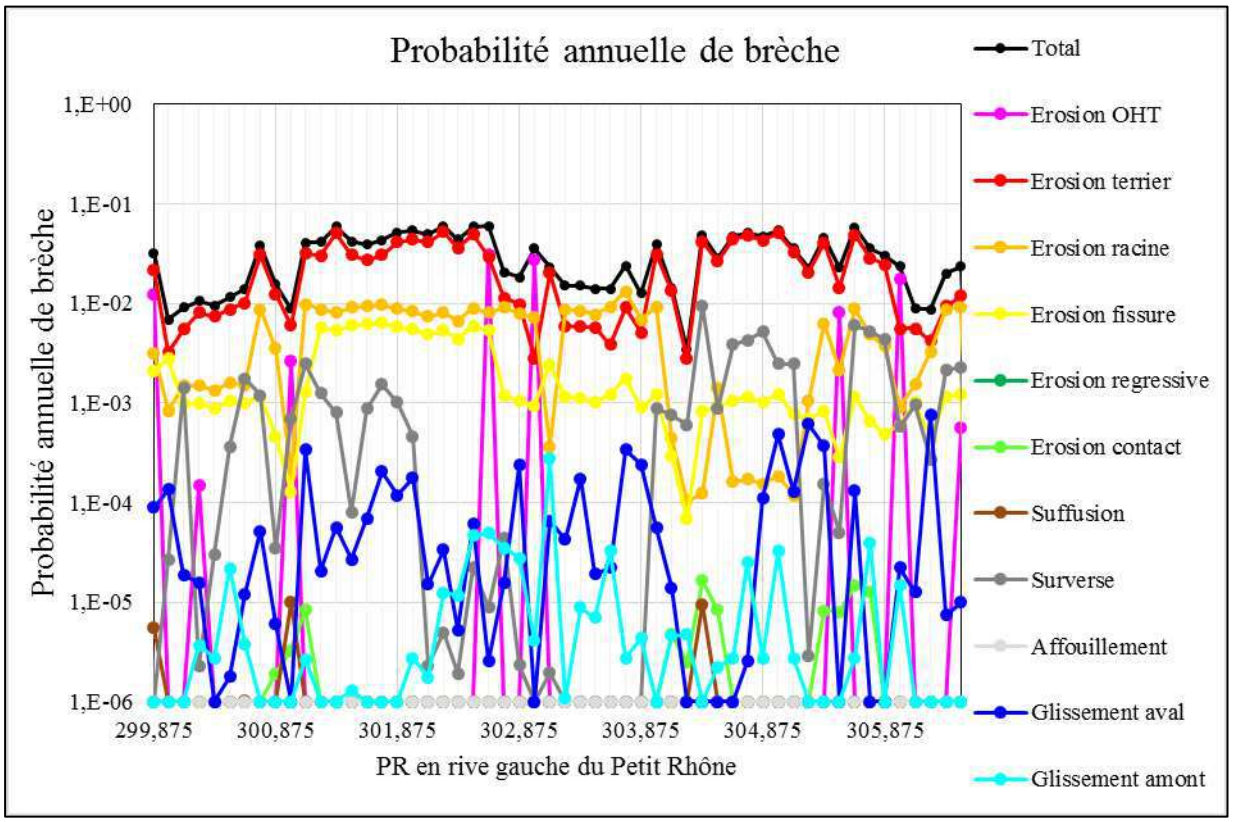


Figure 93 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon La Galante-Albaron

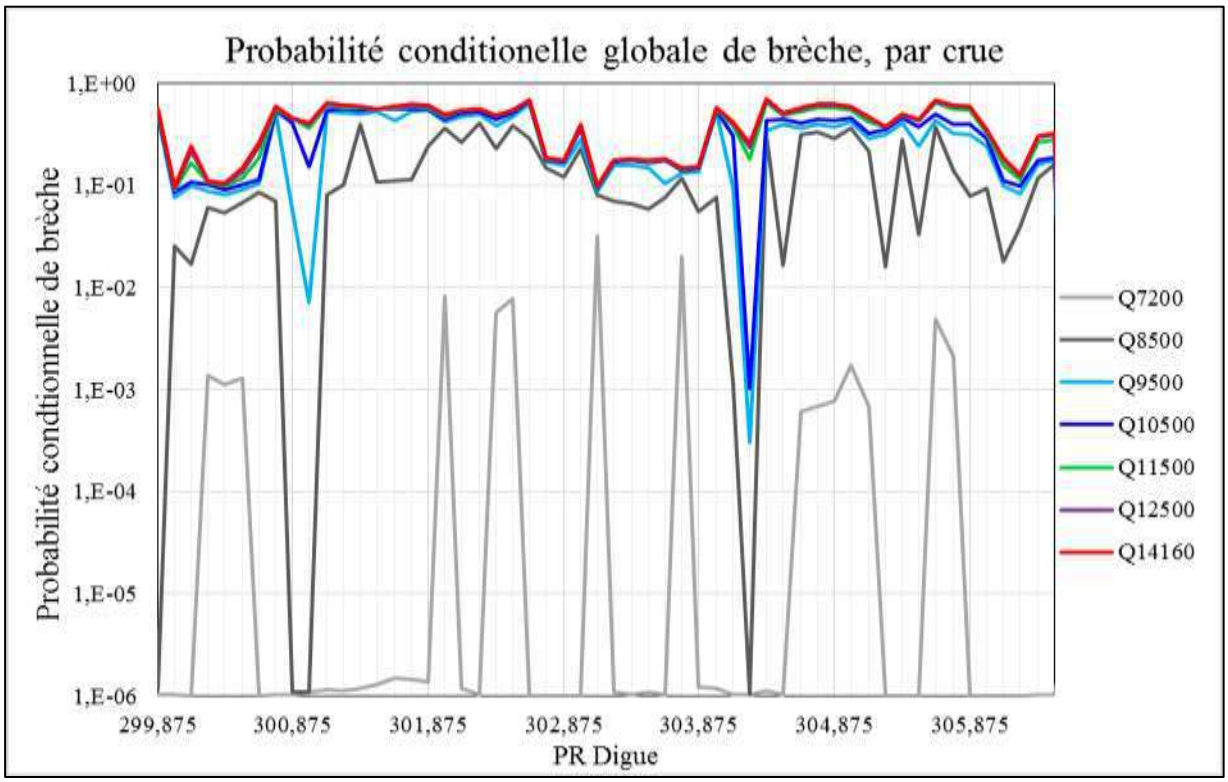


Figure 94 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon La Galante-Albaron

3.25 DIGUE D'ALBARON (PRG9)

Le tronçon Albaron mesure 1.2 km, il comprend les PR0.125 compris entre PRG 306.625 et 307.625 ; la digue a été confortée en 2005 ; des travaux de carrossabilité avaient été réalisés en 1994.

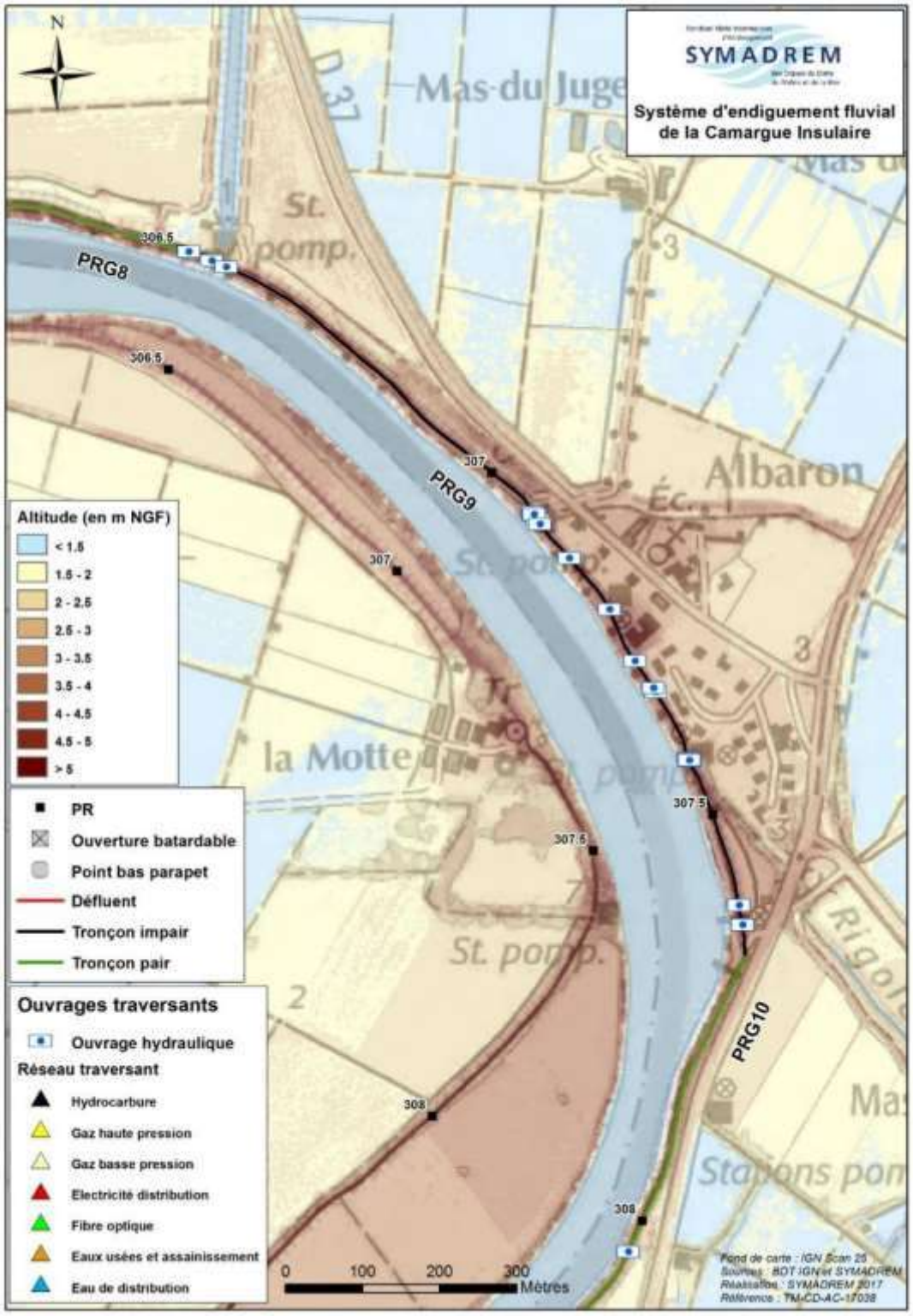


Figure 55. Plan de situation de la digue d'Albaron

Tableau 97. Synthèse de géométrie, tronçon Albaron

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	6,1	6,0	6,1	0,0
Cote de pied de digue aval	m NGF	5,5	2,7	3,7	0,9
Cote à 20m du pdav	m NGF	4,6	2,2	3,1	0,8
Cote de pied de digue amont	m NGF	5,1	3,6	4,0	0,5
Cote à 20m du pdam	m NGF	0,5	0,5	0,5	0,0
Hauteur de digue coté aval	m	3,3	0,6	2,3	0,9
Hauteur de digue côté amont	m	2,5	1,1	2,1	0,5
Fruit aval	L/V	67,5	1,8	9,6	21,7
Fruit amont	L/V	3,9	2,2	2,7	0,5
Largeur du ségonnal	m	13	10	12	1

Ce tronçon est le long du Rhône; sa bathymétrie atteint -8 m NGF en amont.

Tableau 98. Données hydrauliques, tronçon Albaron

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	4,1	4,0	1,9	2,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
8 500	4,7	4,6	1,3	1,4	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
9 500	5,0	4,9	1,0	1,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,4
10 500	5,2	5,1	0,8	0,9	0,1	0,1	0,1	0,0	0,3
11 500	5,4	5,2	0,6	0,8	0,1	0,1	0,1	0,0	0,3
12 500	5,4	5,2	0,6	0,7	0,1	0,1	0,1	0,0	0,3
14 160	5,4	5,3	0,6	0,7	0,1	0,1	0,1	0,0	0,3

Caractéristiques du tronçon Albaron vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a un masque A2 côté amont et un engraissement côté aval, avec grillage. Concernant le claquage hydraulique, la digue est confortée. La résistance à l'érosion est réalisée par un masque en matériaux A2. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01
- Probabilité de claquage hydraulique : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative au masque A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 0,1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il y a plusieurs ouvrages hydrauliques sur ce tronçon, celui qui présente la transition la plus à risque comprend un réseau au compactage et à l'étanchéité satisfaisants. La résistance à l'érosion est réalisée par un masque en matériaux A2. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité d'initiation : loi relative au masque A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 0,1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit - racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue confortée. La résistance à l'érosion est réalisée par un masque en matériaux A2. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative au masque A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 0,1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit - fissure

Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue récemment confortée. La résistance à l'érosion est réalisée par un masque en matériaux A2. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative au masque A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 0,1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable propre en fondation. La couche de sable, dont le toit est à 3m de profondeur, mesure 1m d'épaisseur. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 0,1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il n'y a pas de brèches connues. Concernant le claquage hydraulique, la digue est confortée. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : 0,001
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 0,1

- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue a été confortée. Concernant le claquage hydraulique, la digue est confortée. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : 0,001
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 0,1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre, conforté récemment.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre, conforté récemment

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 10m et la pente hydraulique est de 13 à 20 cm/km ; la berge est recouverte d'arbres.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge arborée

Tableau 99. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Albaron

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	5E-08	0E+00	0E+00	0E+00		**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-10	0E+00	0E+00	1E-06	5E-08	0E+00	0E+00	0E+00		**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-10	0E+00	0E+00	1E-06	5E-08	0E+00	0E+00	0E+00		**1E-06**
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-10	2E-12	2E-12	1E-06	5E-08	0E+00	0E+00	0E+00		**1E-06**
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-10	2E-12	2E-12	1E-06	5E-08	0E+00	0E+00	0E+00		**1E-06**
12 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-10	2E-12	2E-12	1E-06	5E-08	0E+00	0E+00	0E+00		**1E-06**
14 160	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-10	2E-12	2E-12	1E-06	5E-08	0E+00	0E+00	0E+00		**1E-06**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	1E-09	0E+00	1E-06	4E-09	7E-10	2E-12	0E+00	1E-06	1E-07	4E-07	2E-06	1E-06		**6E-06**
8 500	7E-08	2E-07	9E-06	4E-08	1E-09	7E-12	0E+00	1E-06	1E-07	8E-07	4E-06	1E-06		**2E-05**
9 500	2E-07	4E-07	1E-05	6E-08	2E-09	1E-11	1E-11	1E-06	1E-07	8E-07	4E-06	1E-06		**2E-05**
10 500	3E-07	9E-07	2E-05	7E-08	4E-09	2E-11	5E-11	1E-06	1E-07	9E-07	5E-06	1E-06		**2E-05**
11 500	3E-07	1E-06	2E-05	8E-08	4E-09	3E-11	1E-10	1E-06	1E-07	9E-07	5E-06	1E-06		**3E-05**
12 500	4E-07	1E-06	2E-05	8E-08	4E-09	3E-11	1E-10	1E-06	1E-07	9E-07	5E-06	1E-06		**3E-05**
14 160	4E-07	1E-06	2E-05	8E-08	5E-09	3E-11	1E-10	1E-06	1E-07	9E-07	5E-06	1E-06		**3E-05**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	6E-09	0E+00	5E-06	1E-08	2E-09	2E-11	0E+00	1E-06	2E-07	1E-06	6E-06	1E-05		**1E-05**
8 500	3E-07	1E-06	4E-05	9E-08	7E-09	2E-11	0E+00	1E-06	2E-07	1E-06	6E-06	1E-05		**5E-05**
9 500	4E-07	2E-06	5E-05	1E-07	2E-08	2E-11	2E-11	1E-06	2E-07	1E-06	6E-06	1E-05		**6E-05**
10 500	5E-07	5E-06	5E-05	1E-07	2E-08	8E-11	7E-11	1E-06	2E-07	1E-06	6E-06	1E-05		**6E-05**
11 500	6E-07	8E-06	5E-05	1E-07	2E-08	1E-10	2E-10	1E-06	2E-07	1E-06	6E-06	1E-05		**6E-05**
12 500	6E-07	9E-06	5E-05	1E-07	2E-08	1E-10	2E-10	1E-06	2E-07	1E-06	6E-06	1E-05		**6E-05**
14 160	6E-07	9E-06	5E-05	1E-07	2E-08	1E-10	2E-10	1E-06	2E-07	1E-06	6E-06	1E-05		**6E-05**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**1E-05**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**5E-06**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au PRG 306.875. Elle est de 1.10^{-5}, ce qui correspond à un événement très improbable (classe D) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque acceptable ($< 10^{-4}$) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4).
L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 14 160 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue, dont le débit serait très sensiblement supérieur à 14 160 m^3/s, compte tenu du plafonnement des lignes d'eau lié aux déversements entre Beaucaire et Arles pour des crues supérieures à 11 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 5.10^{-6}, ce qui correspond à un événement possible mais extrêmement peu probable (classe E) ;
- un risque acceptable (< 10^{-4}) au regard des enjeux ;
- une crue de sûreté de 14 160 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 14 160 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 14 160 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 % des probabilités maximales

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 14 160 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

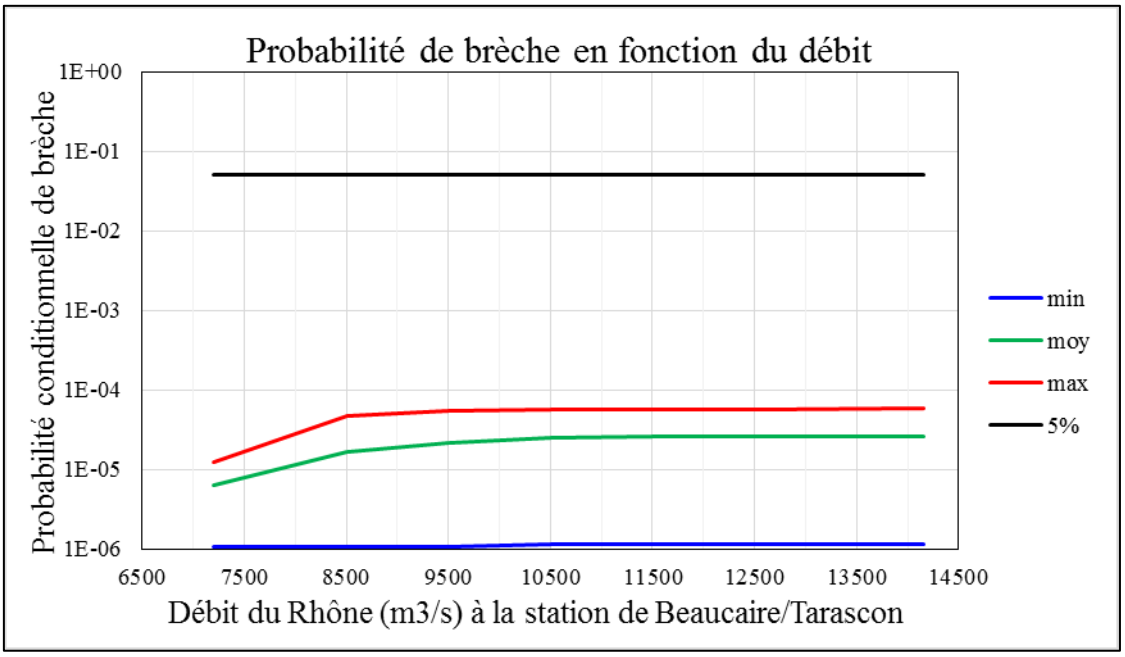


Figure 95 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Albaron

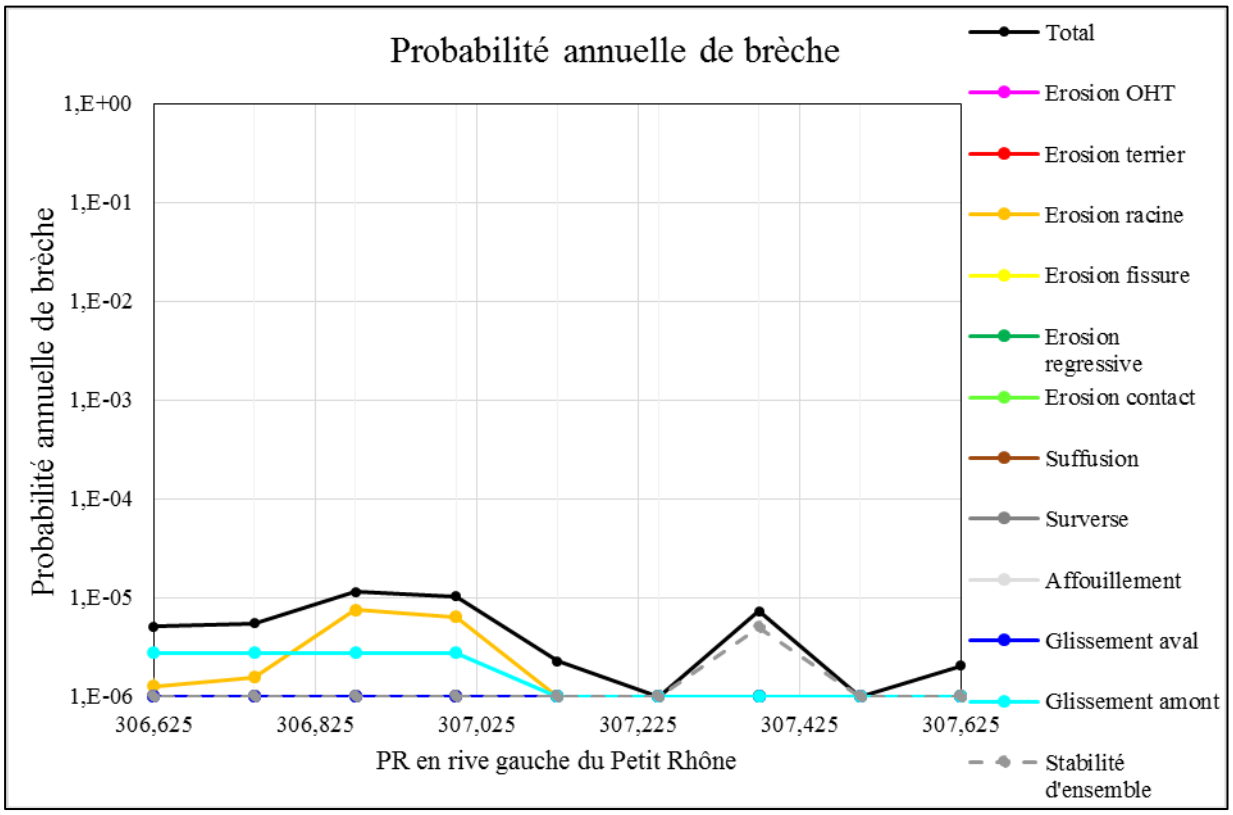


Figure 96 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Albaron

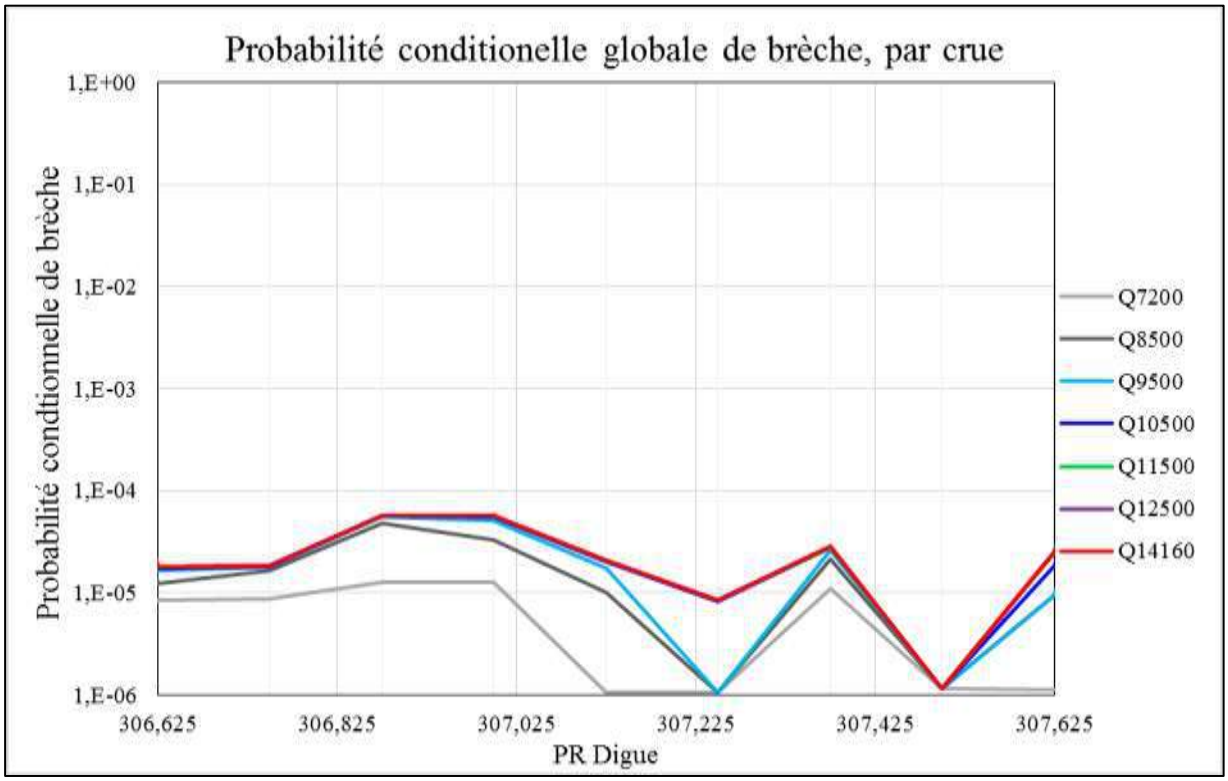


Figure 97 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Albaron

3.26 DIGUE D'ALBARON A EYMINI (PRG10)

Le tronçon Albaron-Eymini mesure 5.5 km, il comprend les PR0.125 compris entre PRG 307.75 et 312.875 ; la digue n'a pas fait l'objet de travaux de confortement depuis son rehaussement au XIX^{ème} siècle. Des travaux de carrossabilité ont été réalisés en 2010.

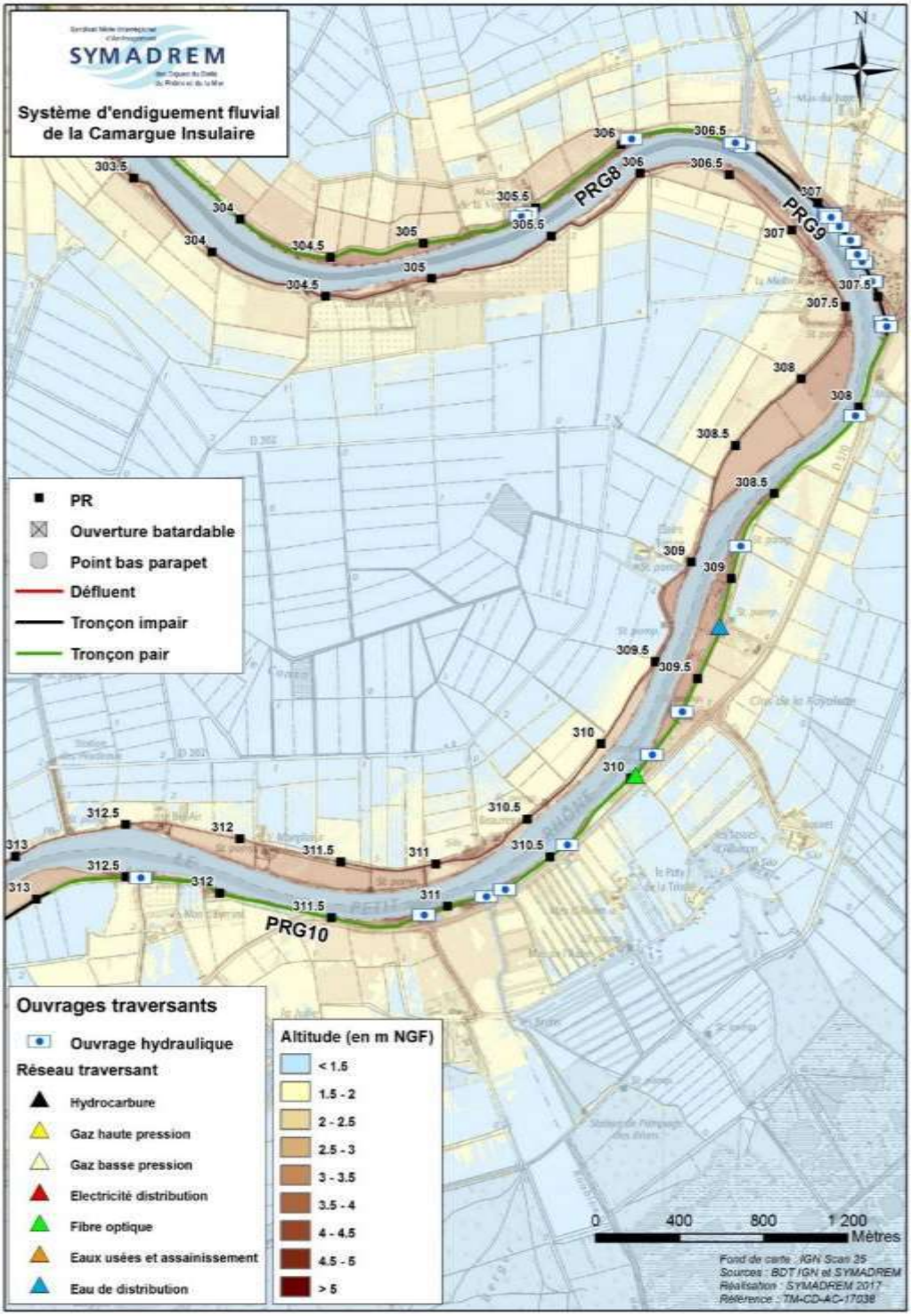


Figure 56. Plan de situation de la digue d'Albaron au Mas d'Icard 1 : Albaron-Eymini

Tableau 100. Synthèse de géométrie, tronçon Albaron-Eymini

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	5,7	5,0	5,3	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	4,6	1,6	2,7	0,7
Cote à 20m du pdav	m NGF	3,4	1,0	2,1	0,5
Cote de pied de digue amont	m NGF	5,0	2,9	3,9	0,3
Cote à 20m du pdam	m NGF	4,3	0,4	2,0	1,4
Hauteur de digue coté aval	m	3,6	0,9	2,6	0,7
Hauteur de digue côté amont	m	2,2	0,2	1,5	0,3
Fruit aval	L/V	3,9	1,9	2,4	0,4
Fruit amont	L/V	14,9	1,8	2,8	2,0
Largeur du ségonnal	m	108	7	32	29

Ce tronçon est proche du Rhône en deux zones ; une première à l'amont jusqu'au PRG 308.7 où la bathymétrie varie entre -3 et -10 m NGF ; et une seconde entre les PRG 310 et 312 où la bathymétrie varie entre -3 et -10 m NGF.

Tableau 101. Données hydrauliques, tronçon Albaron-Eymini

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	3,9	3,5	1,5	1,6	0,2	0,1	0,1	0,1	0,5
8 500	4,6	4,0	0,9	1,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3
9 500	4,8	4,2	0,7	0,8	0,2	0,1	0,2	0,1	0,3
10 500	5,0	4,4	0,5	0,7	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2
11 500	5,2	4,5	0,3	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2
12 500	5,2	4,5	0,3	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2
14 160	5,2	4,5	0,3	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2

Caractéristiques du tronçon Albaron-Eymini vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue du XIXème siècle avec un REX négatif. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il y a plusieurs ouvrages hydrauliques sur ce tronçon, celui qui présente la transition la plus à risque comprend un réseau au compactage et à l'étanchéité incertains. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,99
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit - racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec présence d'arbres en pied de talus (deux côtés). La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit - fissure

Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec observation d'infiltrations et de terriers de blaireaux par le passé. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable propre en fondation. La couche de sable, dont le toit est à 1m de profondeur, mesure 1m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il y a eu des brèches anciennes (1856). Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m

- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue n'a pas été investiguée. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 7m et la pente hydraulique est de 8 à 20 cm/km ; la berge est recouverte d'arbres.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge arborée

Analyse post-premiers résultats, PRG 294.875:

Le calcul au droit de l'ouvrage traversant a été repris avec sa géométrie et non celle de la digue.

Tableau 102. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Albaron-Eymini

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**2E-05**
12 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**4E-05**
14 160	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**6E-05**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	2E-04	4E-04	1E-03	8E-04	4E-04	3E-10	0E+00	1E-06	3E-08	2E-06	1E-06			**3E-03**
8 500	6E-02	2E-02	2E-02	1E-02	8E-03	5E-08	0E+00	1E-06	3E-08	3E-05	9E-06			**1E-01**
9 500	2E-01	3E-02	3E-02	2E-02	1E-02	1E-07	2E-08	1E-06	3E-08	3E-05	9E-06			**2E-01**
10 500	2E-01	3E-02	3E-02	2E-02	2E-02	2E-07	6E-07	5E-04	3E-08	3E-05	9E-06			**3E-01**
11 500	2E-01	3E-02	4E-02	2E-02	2E-02	4E-07	5E-05	1E-02	3E-08	3E-05	1E-05			**3E-01**
12 500	2E-01	3E-02	4E-02	2E-02	2E-02	5E-07	7E-05	1E-02	3E-08	3E-05	1E-05			**3E-01**
14 160	2E-01	3E-02	4E-02	2E-02	2E-02	6E-07	8E-05	2E-02	3E-08	3E-05	1E-05			**3E-01**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	6E-03	1E-02	3E-02	2E-02	1E-02	1E-08	0E+00	1E-06	1E-07	7E-05	2E-05			**4E-02**
8 500	4E-01	2E-01	7E-02	4E-02	2E-01	7E-07	0E+00	1E-06	1E-07	4E-04	2E-04			**4E-01**
9 500	4E-01	2E-01	8E-02	5E-02	2E-01	1E-06	3E-08	2E-06	1E-07	4E-04	2E-04			**4.95E-01**
10 500	5E-01	3E-01	8E-02	5E-02	2E-01	2E-06	2E-05	6E-03	1E-07	4E-04	2E-04			**6E-01**
11 500	5E-01	3E-01	8E-02	5E-02	2E-01	7E-06	1E-04	9E-02	1E-07	4E-04	2E-04			**6E-01**
12 500	5E-01	3E-01	9E-02	5E-02	2E-01	9E-06	2E-04	1E-01	1E-07	4E-04	2E-04			**6E-01**
14 160	5E-01	3E-01	9E-02	5E-02	2E-01	1E-05	2E-04	1E-01	1E-07	4E-04	2E-04			**6E-01**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**7E-02**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**3E-02**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au PRG 312.625. Elle est de 7.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.
L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 7 500 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 9 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 3.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) ;
- un risque inacceptable ($> 10^{-4}$) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 7 500 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 7 500 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 9 500 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 % des probabilités maximales.

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 7 500 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Les risques majeurs sont l'érosion de conduit sur l'ensemble du linéaire et l'érosion régressive, principalement située au niveau du PRG 310.

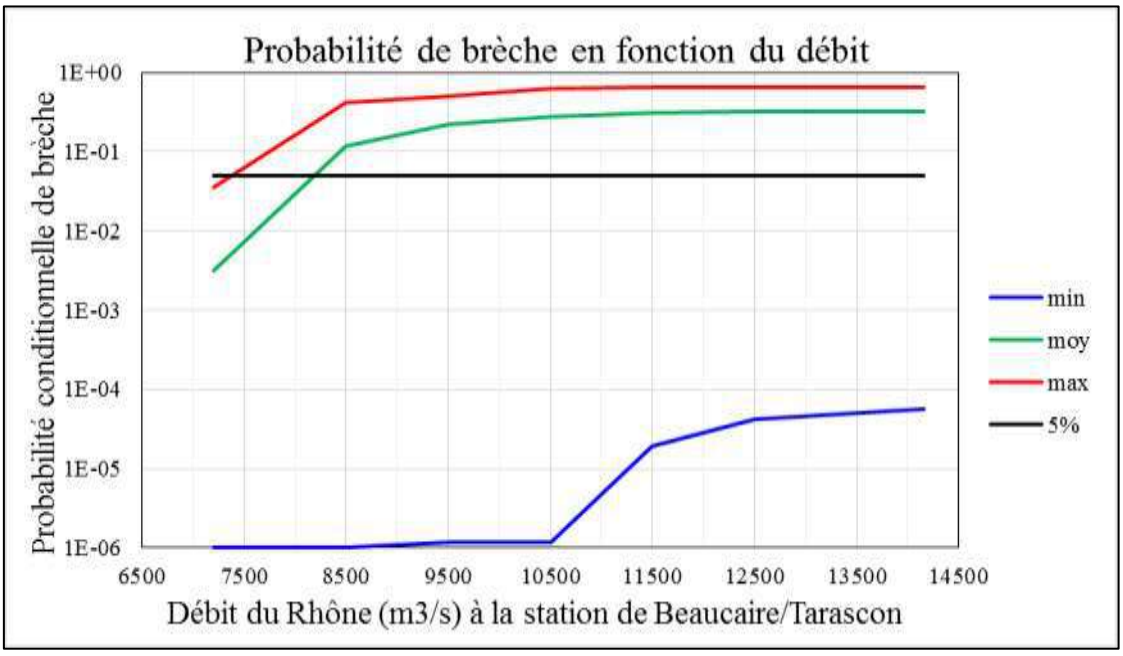


Figure 98 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Albaron-Eymini

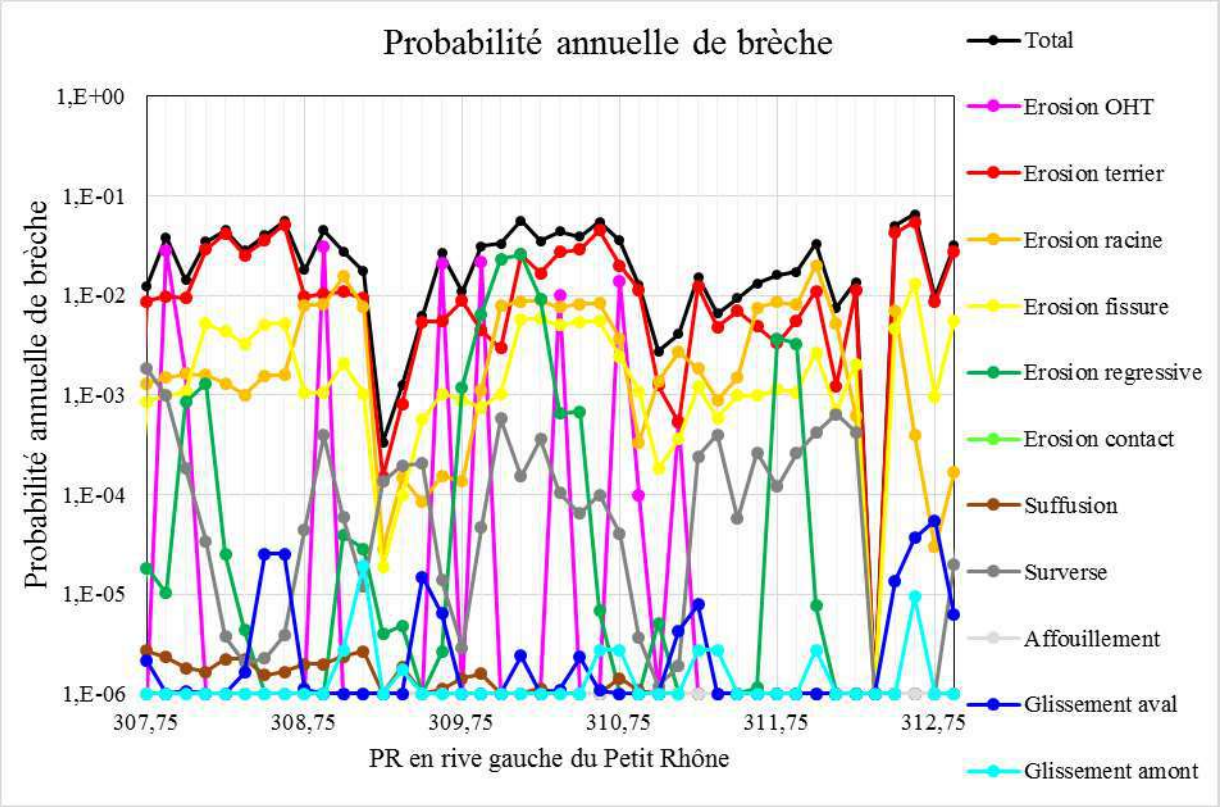


Figure 99 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Albaron-Eymini

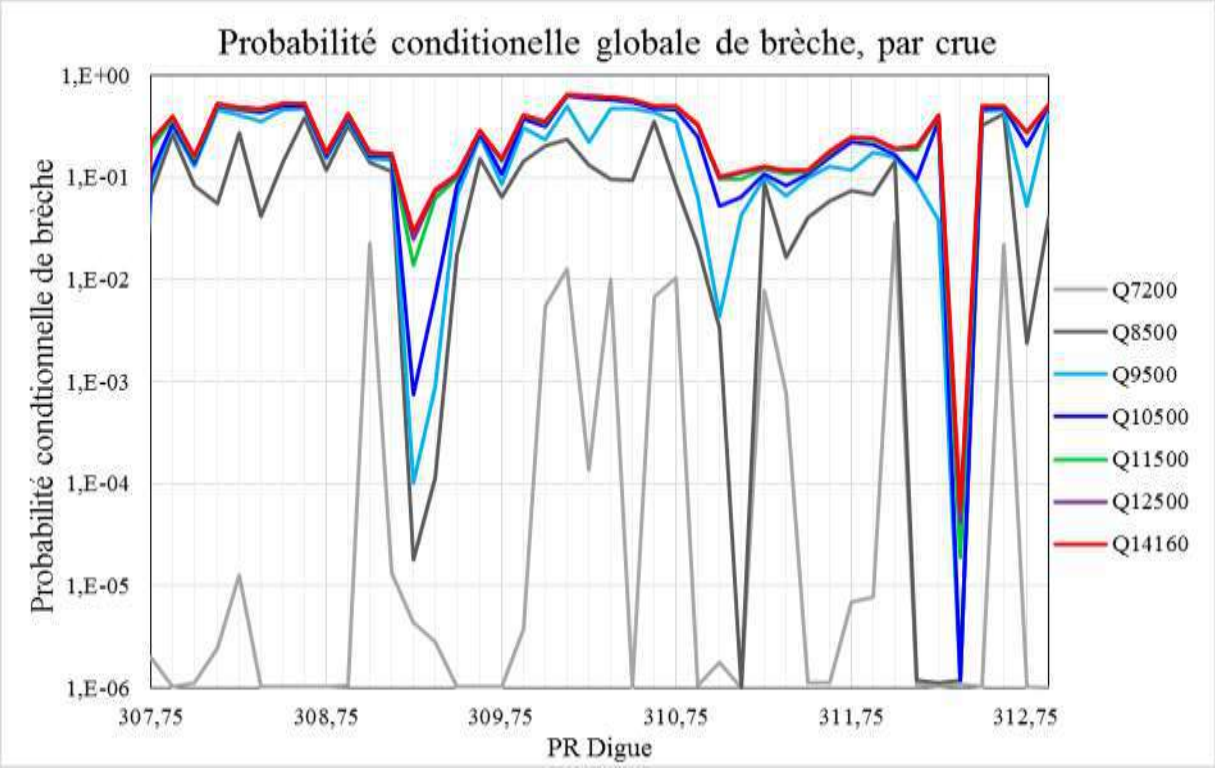


Figure 100 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Albaron-Eymini

3.27 DIGUE D'EYMINI A SENEBIER (PRG11)

Le tronçon Eymini-Sénebier mesure 7.7 km, il comprend les PR0.125 compris entre PRG 313 et 320.623 ; la digue n'a pas fait l'objet de travaux de confortement depuis son rehaussement au XIX^{ème} siècle. Des travaux de carrossabilité ont été réalisés en 2010.

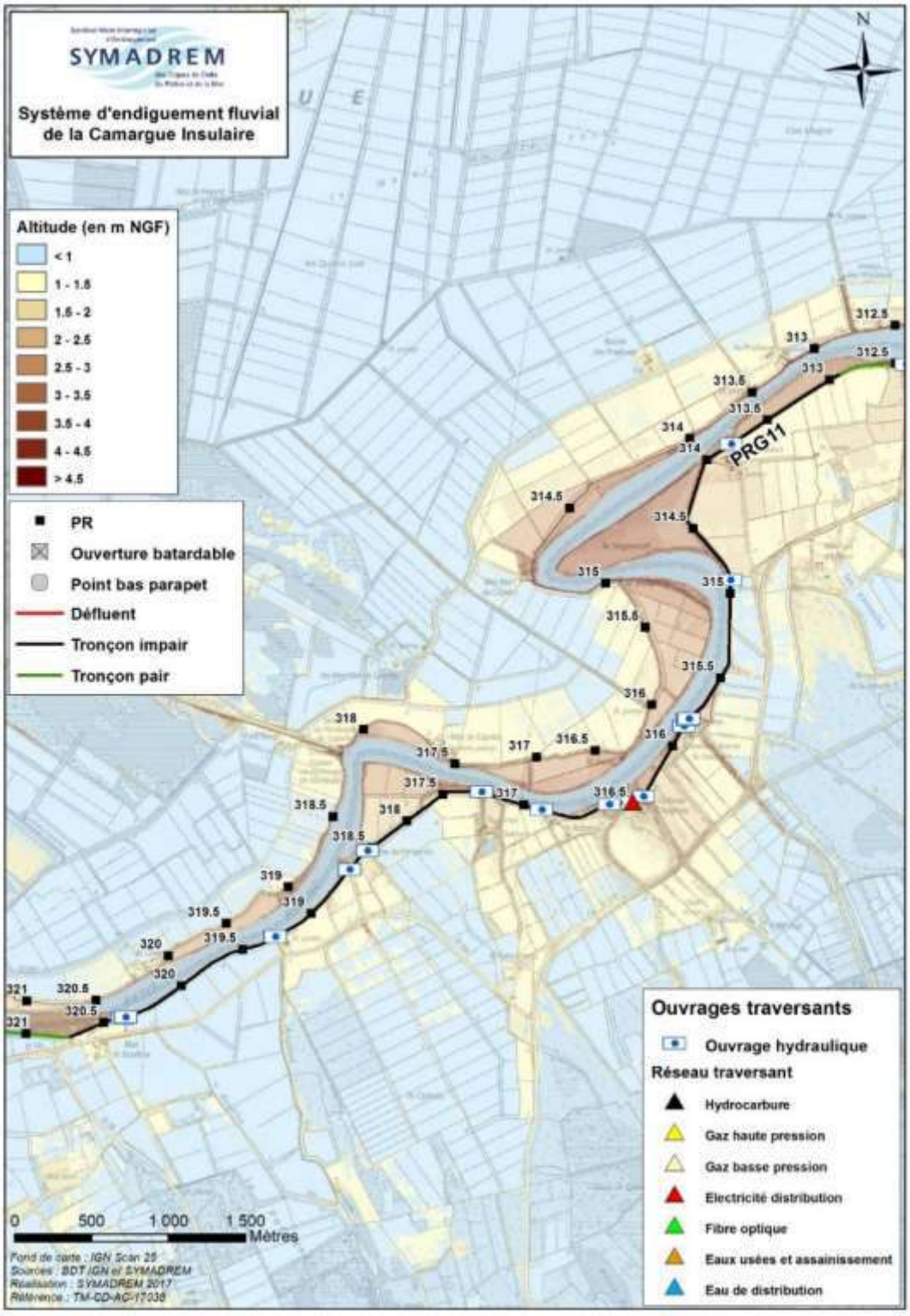


Figure 57. Plan de situation de la digue d'Albaron au Mas d'Icard 2 : Eymini-Sénebier

Tableau 103. Synthèse de géométrie, tronçon Eymini-Sénebier

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	4,9	3,8	4,3	0,3
Cote de pied de digue aval	m NGF	4,1	1,1	2,1	0,7
Cote à 20m du pdav	m NGF	2,7	0,8	1,5	0,4
Cote de pied de digue amont	m NGF	3,7	1,2	2,6	0,6
Cote à 20m du pdam	m NGF	3,1	0,3	1,8	1,1
Hauteur de digue coté aval	m	3,2	0,5	2,2	0,7
Hauteur de digue côté amont	m	2,8	0,3	1,6	0,6
Fruit aval	L/V	4,6	1,2	2,6	0,5
Fruit amont	L/V	7,9	2,0	2,8	0,9
Largeur du ségonnal	m	295	5	70	67

Ce tronçon est parfois proche du Rhône, dans ces zones, la bathymétrie peut atteindre -12 m NGF.

Tableau 104. Données hydrauliques, tronçon Eymini-Sénebier

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	3,5	2,4	1,0	1,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,5
8 500	4,0	2,7	0,7	0,9	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3
9 500	4,2	2,8	0,5	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3
10 500	4,3	2,9	0,3	0,6	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2
11 500	4,5	2,9	0,2	0,6	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2
12 500	4,5	2,9	0,2	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2
14 160	4,5	2,9	0,2	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2

Caractéristiques du tronçon Eymini-Sénebier vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue du XIXème siècle avec un REX négatif. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il y a plusieurs ouvrages hydrauliques sur ce tronçon, celui qui présente la transition la plus à risque comprend un réseau au compactage et à l'étanchéité incertains. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,99
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit - racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec présence d'arbres en pied de talus (deux côtés). La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit - fissure

Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec observation d'infiltrations et de terriers de blaireaux par le passé. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable propre en fondation. La couche de sable, dont le toit est à 1m de profondeur, mesure 0,5m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il n'y a pas de brèches connues. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m

- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue n'a pas été investiguée. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 5m et la pente hydraulique est variable le long du secteur et suivant les crues de 8 à 34 cm/km ; la berge est recouverte d'arbres.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge arborée

Analyse post-premiers résultats :

Sur ce secteur, de nombreux secteur faisaient apparaitre une probabilité supérieure à 5% pour la crue de 7 500 m3/s ; ce sont les suivants :
314.125 ; 315.5 ; 316 ; 317.5 ; 317.625 ; 317.75 ; 317.875 ; 318 ; 318.25 ; 318.5 ; 319 ; 319.5
L'analyse du retour d'expérience lié aux terriers a été approfondie sur cette zone, 6 désordres ont été repérés ces 20 dernières années et sont répartis sur l'ensemble de PRG11, il avait alors

été retenu une REX négatif sur la majeure partie du linéaire. Les 2 désordres datant d'avant 2008 (situés au PRG 314 et PRG 316.25) sont un fontis et un terrier de lapin ayant mené à une exfiltration d'eau peu boueuse lors de la forte crue de 2002 et ayant fait l'objet d'une intervention (argile et laitier sur le talus aval). Les quatre autres désordres ont été repérés hors crue, ce sont plus des amorces que des terriers car aucun ne fait plus de 50 cm de profondeur. La probabilité de localisation d'un terrier traversant semble alors exagérée et est ramenée à celle liée à un REX neutre (10% au lieu de 50%).

En ayant ajusté ce paramètre, il restait 9 calculs menant à des probabilités globales de rupture supérieures à 5% (comprises entre 5 et 13 %).
Le fait que l'ouvrage ait été sollicité à minima 36 fois depuis 1841 (analyse des débits maximum annuels) indique que les matériaux sont certainement de meilleure qualité que ceux modélisés. Il est alors considéré un comportement similaire à celui des matériaux A2 modélisés (sécuritaire pour ce type de matériaux) pour les petites crues, pour lesquels nous avons un retour d'expérience.

Tableau 105. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Eymini-Sénebier

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-10	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-10	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
12 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
14 160	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	4E-03	7E-06	6E-05	5E-05	9E-07	2E-08	0E+00	1E-06	2E-08	2E-05	3E-06			**4E-03**
8 500	3E-02	1E-02	2E-02	1E-02	2E-05	3E-07	0E+00	7E-06	2E-08	3E-05	5E-06			**6E-02**
9 500	5E-02	2E-02	2E-02	1E-02	2E-05	8E-07	2E-08	2E-03	2E-08	3E-05	6E-06			**1E-01**
10 500	6E-02	2E-02	2E-02	1E-02	4E-05	2E-06	1E-07	3E-02	2E-08	3E-05	6E-06			**1E-01**
11 500	7E-02	2E-02	2E-02	1E-02	2E-04	5E-06	2E-05	8E-02	2E-08	3E-05	6E-06			**2E-01**
12 500	7E-02	2E-02	3E-02	2E-02	2E-04	5E-06	3E-05	9E-02	2E-08	3E-05	6E-06			**2E-01**
14 160	7E-02	2E-02	3E-02	2E-02	2E-04	5E-06	4E-05	9E-02	2E-08	3E-05	6E-06			**2E-01**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	4E-02	3E-04	4E-04	4E-04	2E-05	1E-07	0E+00	1E-06	2E-07	8E-04	1E-05			**4E-02**
8 500	8E-02	2E-01	6E-02	4E-02	2E-04	8E-06	0E+00	3E-04	2E-07	8E-04	2E-05			**3E-01**
9 500	1E-01	2E-01	7E-02	4E-02	2E-04	1E-05	9E-08	4E-02	2E-07	8E-04	2E-05			**3E-01**
10 500	1E-01	2E-01	7E-02	5E-02	1E-03	5E-05	2E-06	2E-01	2E-07	8E-04	2E-05			**3E-01**
11 500	1E-01	3E-01	7E-02	5E-02	8E-03	1E-04	1E-04	4E-01	2E-07	8E-04	3E-05			**4,7E-01**
12 500	1E-01	3E-01	7E-02	5E-02	1E-02	1E-04	3E-04	4E-01	2E-07	8E-04	3E-05			**5,01E-01**
14 160	1E-01	3E-01	7E-02	5E-02	1E-02	1E-04	3E-04	4E-01	2E-07	8E-04	3E-05			**5E-01**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**4E-02**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**1E-02**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au PRG 317.625. Elle est de 4.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.
L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 7 500 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 11 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 1.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) ;
- un risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 7 500 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 7 500 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 11 500 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 %, des probabilités maximales.

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 7 500 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le principal risque est l'érosion de conduit, en particulier d'un terrier, situé sur la quasi-intégralité du tronçon.

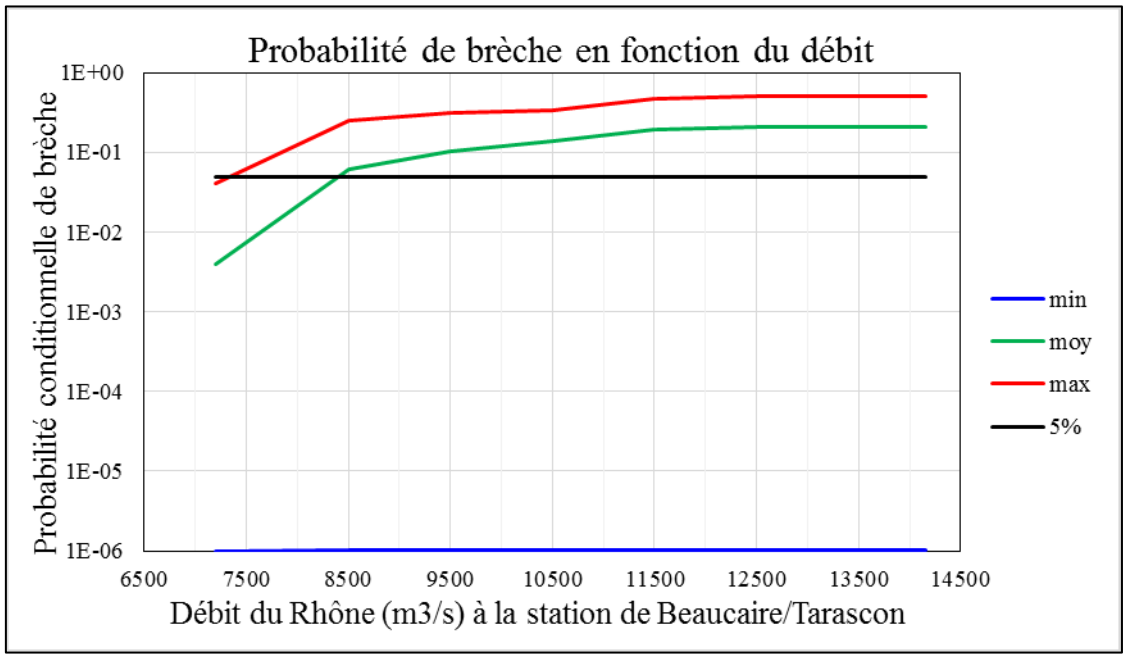


Figure 101 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Eymini-Sénebier

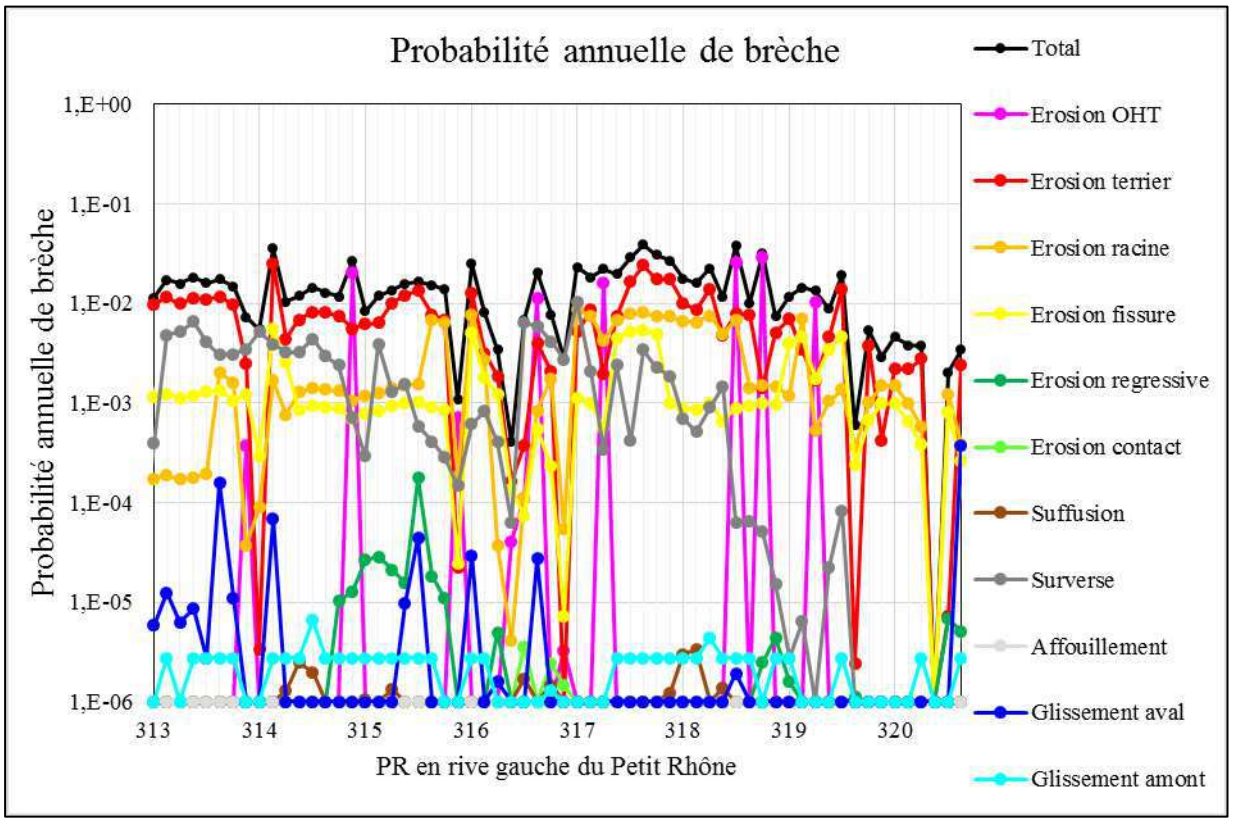


Figure 102 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Eymini-Sénebier

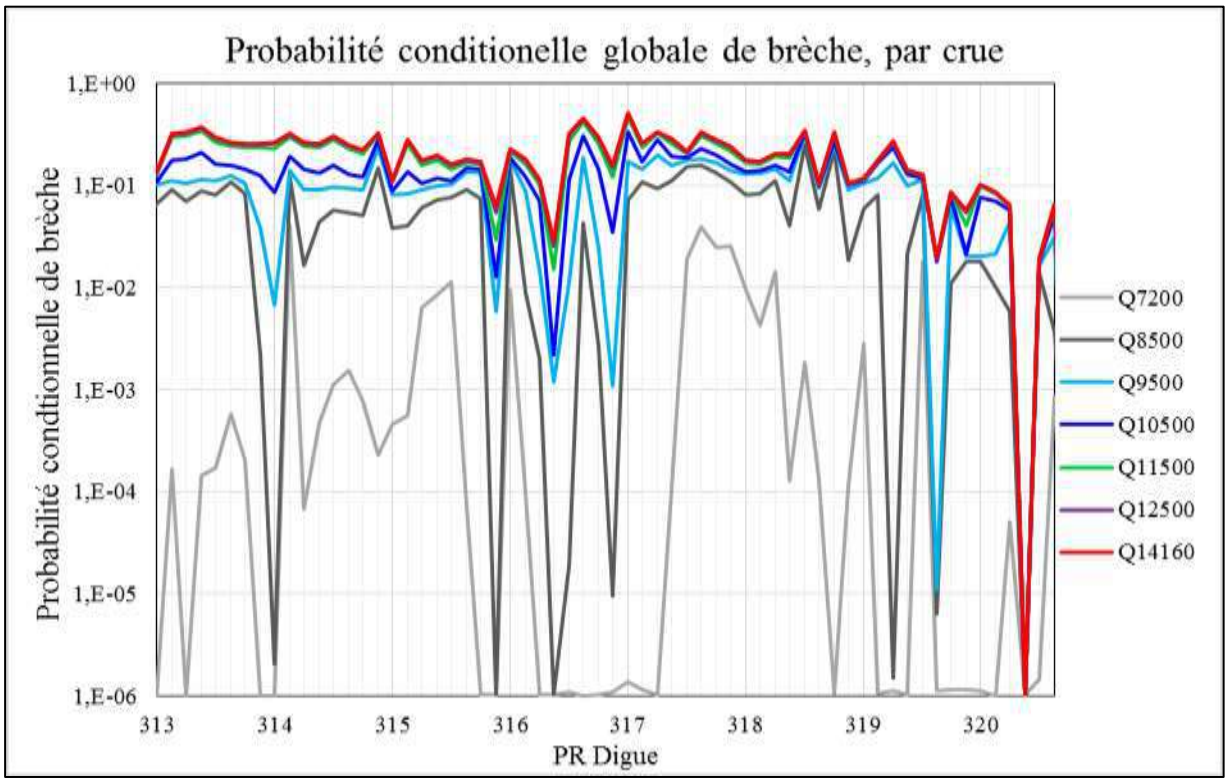


Figure 103 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Eymini-Sénebier

3.28 DIGUE DE SENEBIER (PRG12)

Le tronçon Sénebier mesure 1.2 km, il comprend les PR0.125 compris entre PRG 320.75 et 322 ; la digue a été confortée en 1998. Des travaux de carrossabilité ont été réalisés en 2010.

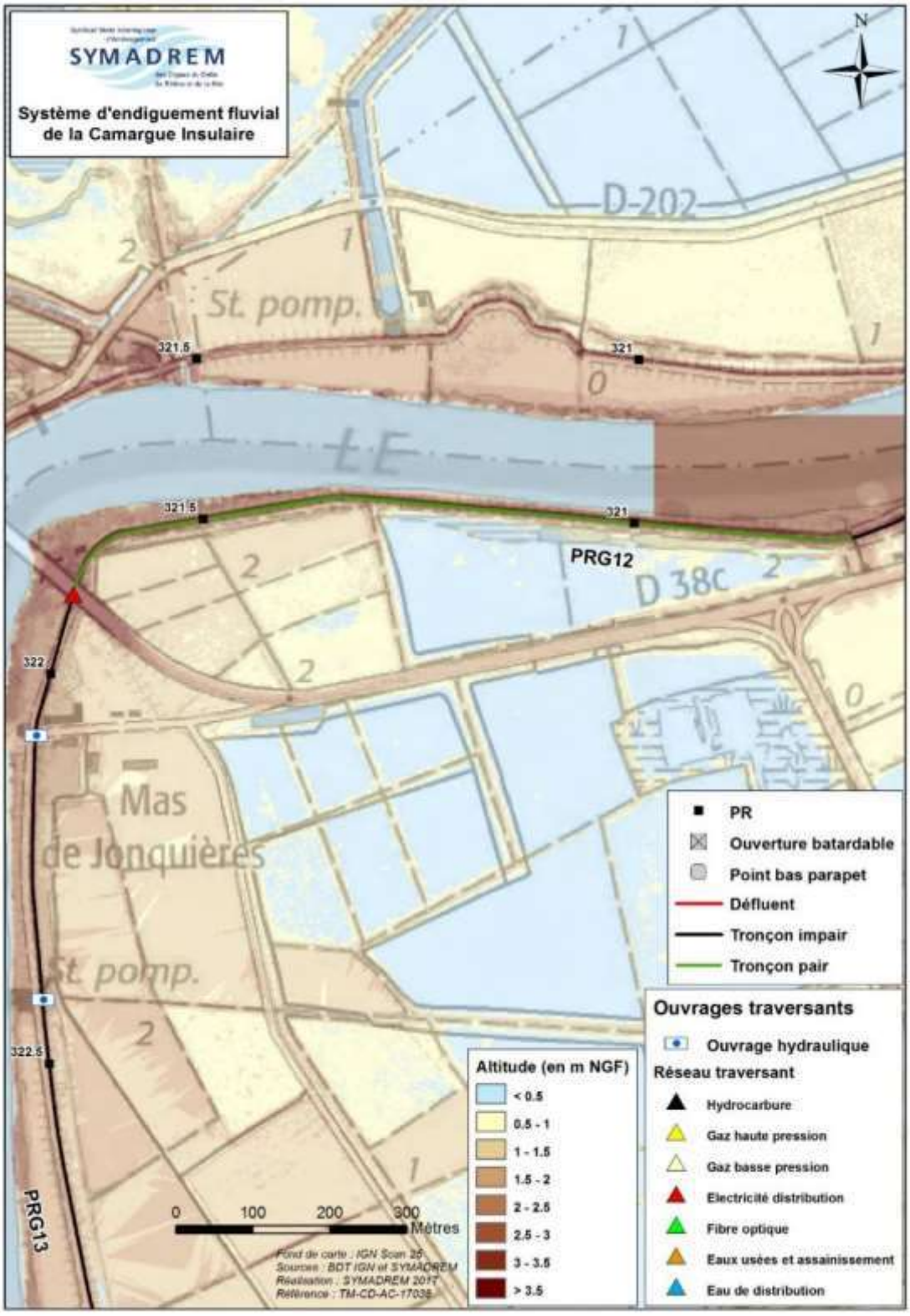


Figure 58. Plan de situation de la digue d'Albaron au Mas d'Icard 3 : Sénebier

Tableau 106. Synthèse de géométrie, tronçon Sénebier

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	10,0	4,0	4,6	1,8
Cote de pied de digue aval	m NGF	1,9	0,8	1,1	0,3
Cote à 20m du pdav	m NGF	1,8	0,8	1,1	0,3
Cote de pied de digue amont	m NGF	3,0	2,2	2,7	0,2
Cote à 20m du pdam	m NGF	2,6	0,3	1,5	1,1
Hauteur de digue coté aval	m	8,1	2,8	3,5	1,5
Hauteur de digue côté amont	m	7,4	1,1	2,0	1,8
Fruit aval	L/V	2,5	2,1	2,2	0,1
Fruit amont	L/V	2,8	2,2	2,5	0,2
Largeur du ségonnal	m	47	10	23	13

Ce tronçon est proche du Rhône, la bathymétrie est d'environ -5 m NGF.

Tableau 107. Données hydrauliques, tronçon Sénebier

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	2,4	2,2	1,7	2,3	0,1	0,1	0,1	0,0	0,6
8 500	2,6	2,4	1,4	2,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5
9 500	2,8	2,7	1,3	1,9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5
10 500	2,9	2,7	1,2	1,9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5
11 500	2,9	2,7	1,2	1,8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5
12 500	2,9	2,7	1,2	1,8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5
14 160	2,9	2,7	1,2	1,8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4

Caractéristiques du tronçon Sénebier vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a un masque A2 côté amont et un engraissement côté aval, avec grillage ; l'état du grillage est incertain du fait de la salinité du milieu, une probabilité de 0.05 au lieu de 0.01 a alors été utilisée pour la localisation de terrier. Concernant le claquage hydraulique, la digue est confortée. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A2. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01
- Probabilité de claquage hydraulique : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 0,1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il n'y a pas de réseau ou d'ouvrage connu sur ce tronçon.

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit - racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue confortée. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A2. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative au masque A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 0,1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit - fissure
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue récemment confortée. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A2. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité d'initiation : loi relative au masque A2 suivant GTR

- Probabilité de non filtration : 0,1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable propre en fondation. La couche de sable, dont le toit est à 2m de profondeur, mesure 5m d'épaisseur. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 0,1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il n'y a pas de brèche connue. Concernant le claquage hydraulique, la digue est confortée. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : 0,001
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 0,1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue a été confortée. Concernant le claquage hydraulique, la digue est confortée état ; on considère alors un bouchon de 4m. La filtration est réalisée par un filtre aux caractéristiques non connues.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : 0,001
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 0,1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 10m et la pente hydraulique est de 10 à 15 cm/km ; la berge est recouverte d'arbres.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge arborée

Tableau 108. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Sénebier

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
10 500	5E-08	0E+00	1E-06	1E-08	2E-09	2E-12	2E-12	1E-06	4E-13	1E-06	6E-06			**9E-06**
11 500	6E-08	0E+00	1E-06	1E-08	2E-09	2E-12	2E-12	1E-06	4E-13	1E-06	6E-06			**9E-06**
12 500	7E-08	0E+00	1E-06	1E-08	2E-09	2E-12	2E-12	1E-06	4E-13	1E-06	6E-06			**9E-06**
14 160	7E-08	0E+00	1E-06	1E-08	2E-09	2E-12	2E-12	1E-06	4E-13	1E-06	6E-06			**9E-06**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	4E-08	0E+00	5E-07	5E-09	1E-06	8E-13	0E+00	1E-06	2E-08	2E-07	1E-06			**4E-06**
8 500	1E-06	0E+00	5E-06	5E-08	3E-06	8E-12	0E+00	1E-06	2E-08	8E-07	5E-06			**2E-05**
9 500	1E-06	0E+00	6E-06	6E-08	4E-06	9E-12	1E-11	1E-06	2E-08	8E-07	5E-06			**2E-05**
10 500	2E-06	0E+00	8E-06	8E-08	5E-06	1E-11	2E-11	1E-06	2E-08	1E-06	6E-06			**2E-05**
11 500	2E-06	0E+00	8E-06	8E-08	5E-06	1E-11	2E-11	1E-06	2E-08	1E-06	6E-06			**2E-05**
12 500	2E-06	0E+00	8E-06	8E-08	5E-06	1E-11	2E-11	1E-06	2E-08	1E-06	6E-06			**2E-05**
14 160	2E-06	0E+00	8E-06	8E-08	5E-06	1E-11	2E-11	1E-06	2E-08	1E-06	6E-06			**2E-05**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	4E-07	0E+00	4E-06	4E-08	5E-06	6E-12	0E+00	1E-06	6E-08	1E-06	6E-06			**1E-05**
8 500	2E-06	0E+00	9E-06	9E-08	1E-05	1E-11	0E+00	1E-06	6E-08	1E-06	6E-06			**3E-05**
9 500	3E-06	0E+00	9E-06	9E-08	2E-05	1E-11	2E-11	1E-06	6E-08	1E-06	6E-06			**3E-05**
10 500	3E-06	0E+00	1E-05	1E-07	2E-05	1E-11	2E-11	1E-06	6E-08	1E-06	6E-06			**4E-05**
11 500	3E-06	0E+00	1E-05	1E-07	2E-05	2E-11	2E-11	1E-06	6E-08	1E-06	6E-06			**4E-05**
12 500	3E-06	0E+00	1E-05	1E-07	2E-05	2E-11	2E-11	1E-06	6E-08	1E-06	6E-06			**4E-05**
14 160	3E-06	0E+00	1E-05	1E-07	2E-05	2E-11	3E-11	1E-06	6E-08	1E-06	6E-06			**4E-05**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**8E-06**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**4E-06**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au PRG 321,25. Elle est de 8.10^{-6}, ce qui correspond à un événement possible mais extrêmement peu probable (classe E) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque acceptable (< 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4).
L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 14 160 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue, dont le débit serait très sensiblement supérieur à 14 160 m^3/s, compte tenu du plafonnement des lignes d'eau lié aux déversements entre Beaucaire et Arles pour des crues supérieures à 11 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 4.10^{-6}, ce qui correspond à un événement possible mais extrêmement peu probable (classe E) ;
- un risque acceptable (< 10^{-4}) au regard des enjeux ;
- une crue de sûreté de 14 160 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 14 160 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 14 160 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 % des probabilités maximales

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 14 160 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le risque résiduel le plus important est une érosion régressive, situé autour du 321.3.

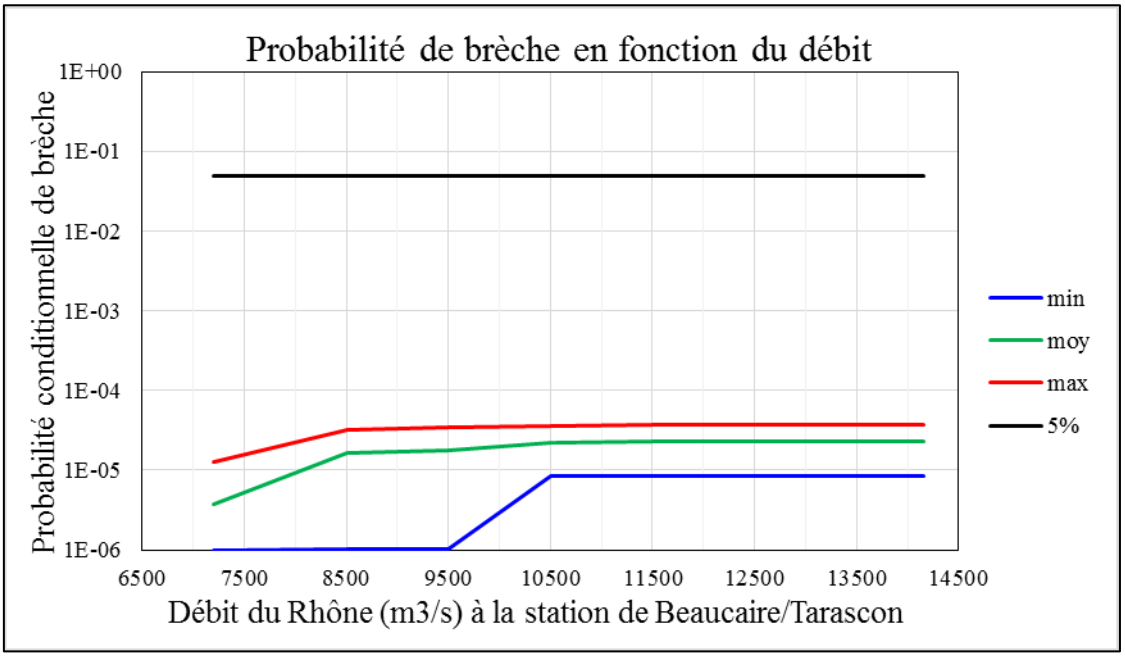


Figure 104 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Sénebier

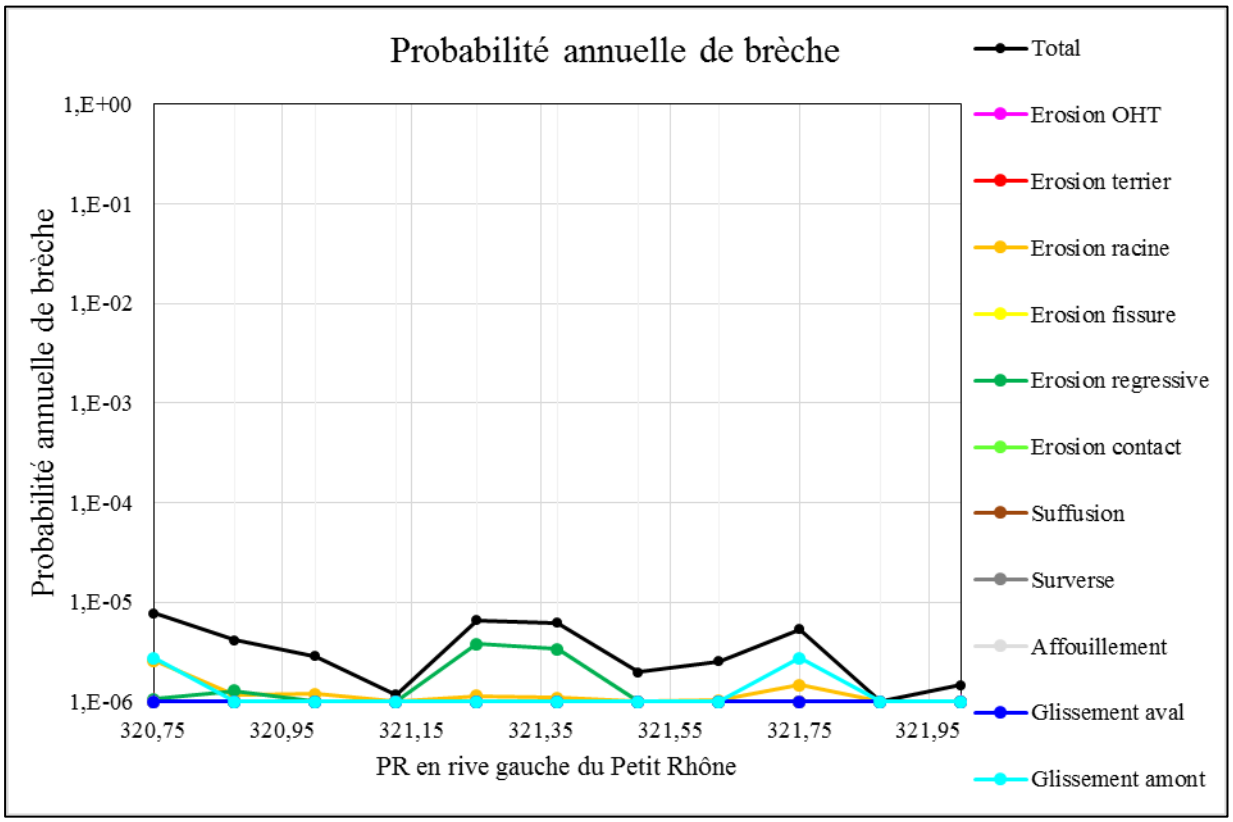


Figure 105 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Sénebier

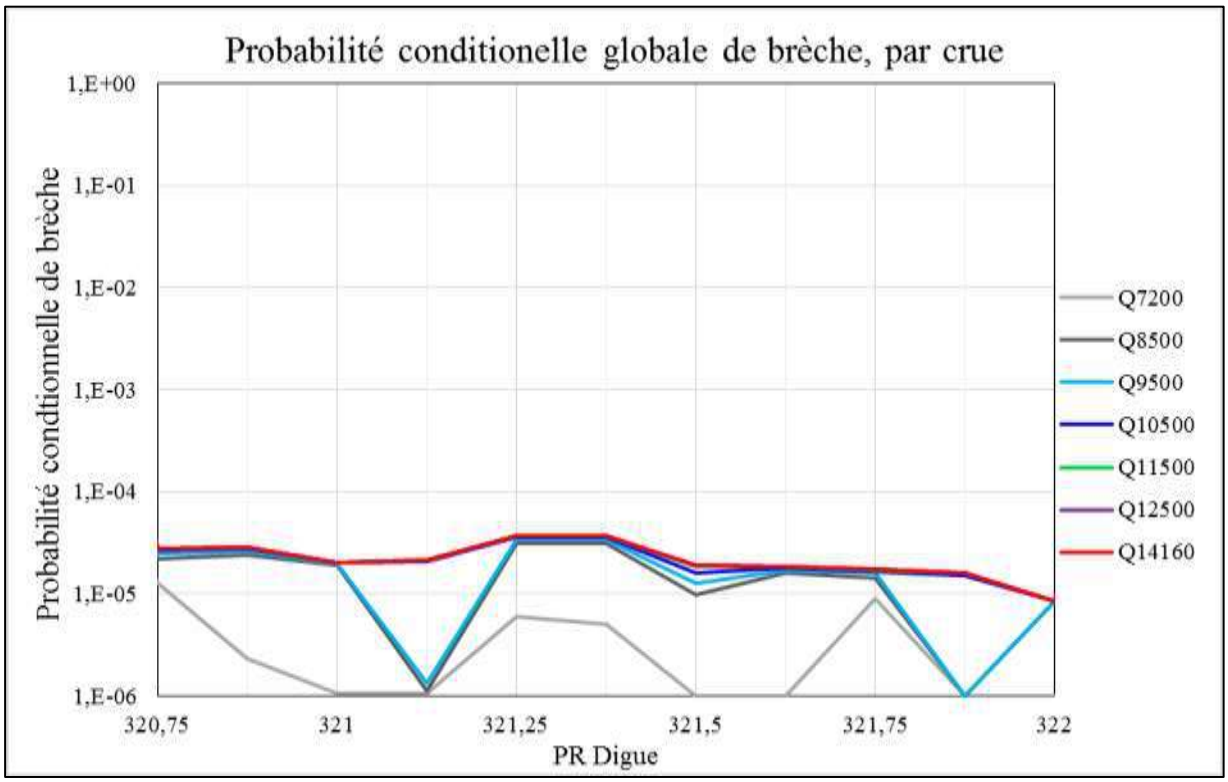


Figure 106 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Sénebier

3.29 DIGUE DE SYLVEREAL AU MAS D'ICARD (PRG13)

Le tronçon Sylvéréal-Icard mesure 6.8 km, il comprend les PR0.125 compris entre PRG 322.125 et329.375 ; la digue n'a pas fait l'objet de travaux de confortement depuis son rehaussement au XIX^{ème} siècle. Des travaux de carrossabilité ont été réalisés en 2010.

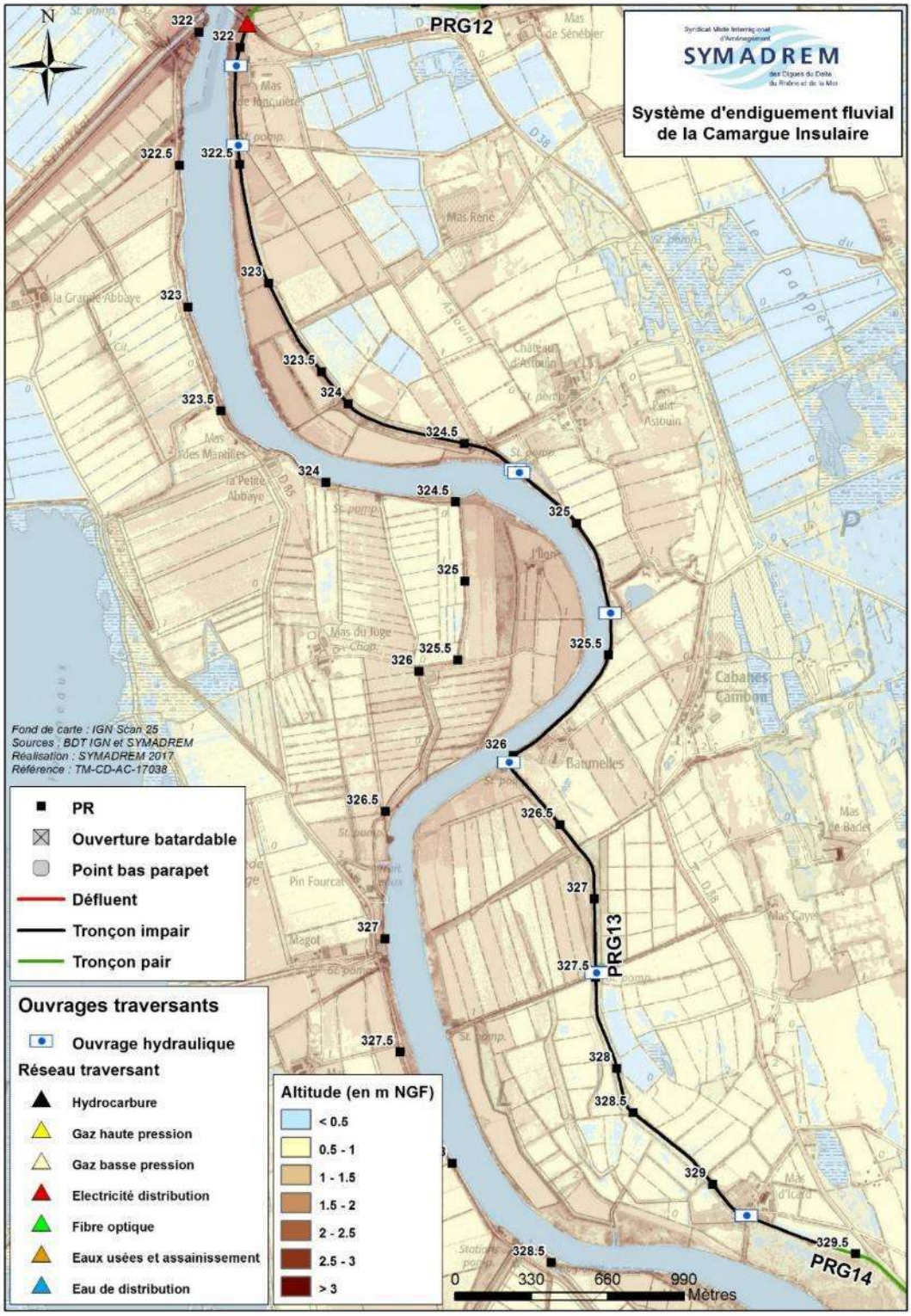


Figure 59. Plan de situation de la digue d'Albaron au Mas d'Icard 4 : Sénebier-Mas d'Icard

Tableau 109. Synthèse de géométrie, tronçon Sylvéréal-Icard

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	3,8	2,4	2,9	0,4
Cote de pied de digue aval	m NGF	2,5	0,7	1,3	0,4
Cote à 20m du pdav	m NGF	1,9	-0,1	1,0	0,4
Cote de pied de digue amont	m NGF	2,5	0,3	1,5	0,6
Cote à 20m du pdam	m NGF	2,4	0,1	1,2	0,6
Hauteur de digue coté aval	m	2,4	0,5	1,6	0,3
Hauteur de digue côté amont	m	2,2	0,4	1,4	0,5
Fruit aval	L/V	5,7	1,8	2,7	0,7
Fruit amont	L/V	8,2	1,9	2,9	1,0
Largeur du ségonnal	m	750	6	281	252

Ce tronçon est proche du Rhône sur un peu moins de 2 km, entre les PRG 324.7 et 326, dans ce secteur la bathymétrie peut atteindre -15 m NGF.

Tableau 110. Données hydrauliques, tronçon Sylvéréal-Icard

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	2,2	1,4	0,7	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,6
8 500	2,4	1,4	0,7	1,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,5
9 500	2,6	1,5	0,5	0,9	0,2	0,1	0,0	0,0	0,5
10 500	2,7	1,5	0,5	0,8	0,2	0,1	0,0	0,0	0,4
11 500	2,7	1,6	0,4	0,8	0,2	0,1	0,0	0,0	0,4
12 500	2,7	1,6	0,4	0,8	0,2	0,1	0,0	0,0	0,4
14 160	2,7	1,7	0,4	0,8	0,2	0,1	0,0	0,0	0,4

Caractéristiques du tronçon Sylvéréal-Icard vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue du XIXème siècle avec un REX neutre. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il y a plusieurs ouvrages hydrauliques sur ce tronçon, celui qui présente la transition la plus à risque comprend un réseau au compactage et à l'étanchéité incertains. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,99
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit - racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec présence d'arbres en pied de talus (deux côtés). La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1

- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit - fissure

Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec de rares observations d'infiltrations et de terriers de blaireaux par le passé. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5 localement
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent du sable propre en profondeur. La couche de sable, dont le toit est à 2m de profondeur, mesure 5m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il y a une brèche ancienne supposée et un départ de brèche avéré (1846). Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01

- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue n'a pas été investiguée. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 6m et la pente hydraulique est de 10 à 24 cm/km ; la berge est recouverte d'arbres.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge arborée

Analyse post-premiers résultats :

Sur ce secteur, de nombreux secteur faisaient apparaitre une probabilité supérieure à 5% pour la crue de 7 500 m3/s ; ce sont les suivants :

322.875 ; 323 ; 324.25 ; 324.375 ; 326.25 ; 326.5 ; 326.875 ; 327.5 ; 327.75 ; 327.875 ; 328 ; 328.25
Dans l'intégralité des cas c'est le risque d'érosion interne dans un conduit qui est le facteur principal.
Comme pour le secteur précédent, les terriers recensés ne sont jamais traversants, ainsi la probabilité de localisation d'un conduit existant est revue à 10% au lieu de 50% (équivalent à un REX neutre).
De la même manière ce paramètre n'est pas le seul à l'origine des résultats de calculs amplifiés. En ayant appliqué la modification, il reste la majeur partie des calculs au-dessus de 5%.

L'analyse des sondages CPT réalisés dans ce secteur (entre PRG 324 et PRG 326) indiquent une base de digue argileuse sur 1m et au-dessus des matériaux plus hétérogènes. Pour une petite crue ce sont les matériaux argileux qui sont sollicités.

Tableau 111. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Sylvéréal-Icard

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
12 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**2E-06**
14 160	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E-09	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**3E-06**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	5E-03	2E-05	6E-05	4E-05	3E-08	2E-07	0E+00	4E-05	2E-08	2E-05	6E-06			**5E-03**
8 500	1E-02	6E-03	9E-03	5E-03	6E-08	8E-07	0E+00	1E-03	2E-08	3E-05	7E-06			**3E-02**
9 500	3E-02	7E-03	1E-02	6E-03	7E-08	9E-07	9E-09	2E-03	2E-08	3E-05	7E-06			**6E-02**
10 500	4E-02	7E-03	1E-02	7E-03	7E-08	1E-06	1E-08	3E-03	2E-08	3E-05	7E-06			**6E-02**
11 500	4E-02	8E-03	1E-02	7E-03	8E-08	1E-06	1E-08	5E-03	2E-08	3E-05	7E-06			**7E-02**
12 500	4E-02	8E-03	1E-02	7E-03	8E-08	2E-06	2E-08	7E-03	2E-08	3E-05	7E-06			**7E-02**
14 160	4E-02	8E-03	1E-02	8E-03	8E-08	2E-06	2E-08	8E-03	2E-08	3E-05	7E-06			**8E-02**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	3E-02	8E-04	4E-04	2E-04	2E-07	4E-06	0E+00	2E-03	4E-07	6E-04	7E-05			**3E-02**
8 500	5E-02	2E-01	5E-02	3E-02	2E-07	2E-05	0E+00	4E-02	4E-07	6E-04	7E-05			**3E-01**
9 500	8E-02	2E-01	5E-02	4E-02	2E-07	2E-05	2E-08	4E-02	4E-07	6E-04	7E-05			**3E-01**
10 500	8E-02	2E-01	5E-02	4E-02	2E-07	3E-05	2E-08	6E-02	4E-07	6E-04	7E-05			**3E-01**
11 500	8E-02	2E-01	6E-02	4E-02	2E-07	3E-05	3E-08	9E-02	4E-07	6E-04	7E-05			**3E-01**
12 500	8E-02	2E-01	6E-02	4E-02	2E-07	4E-05	3E-08	1E-01	4E-07	6E-04	7E-05			**3E-01**
14 160	8E-02	2E-01	6E-02	4E-02	2E-07	4E-05	4E-08	1E-01	4E-07	6E-04	7E-05			**3E-01**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**4E-02**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**8E-03**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au PRG 327.5. Elle est de 4.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.
L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 7 500 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 14 160 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 2.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) ;
- un risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 8 500 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 7 500 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 11 500 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 %, des probabilités maximales. Du fait de la forte sensibilité du modèle, la crue de danger retenue est celle de 11 500 m^3/s.

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 8 500 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le principal risque est l'érosion de conduit, en particulier dans un terrier ou le long d'un ouvrage traversant. Ce dernier est présent sur l'ensemble du linéaire.

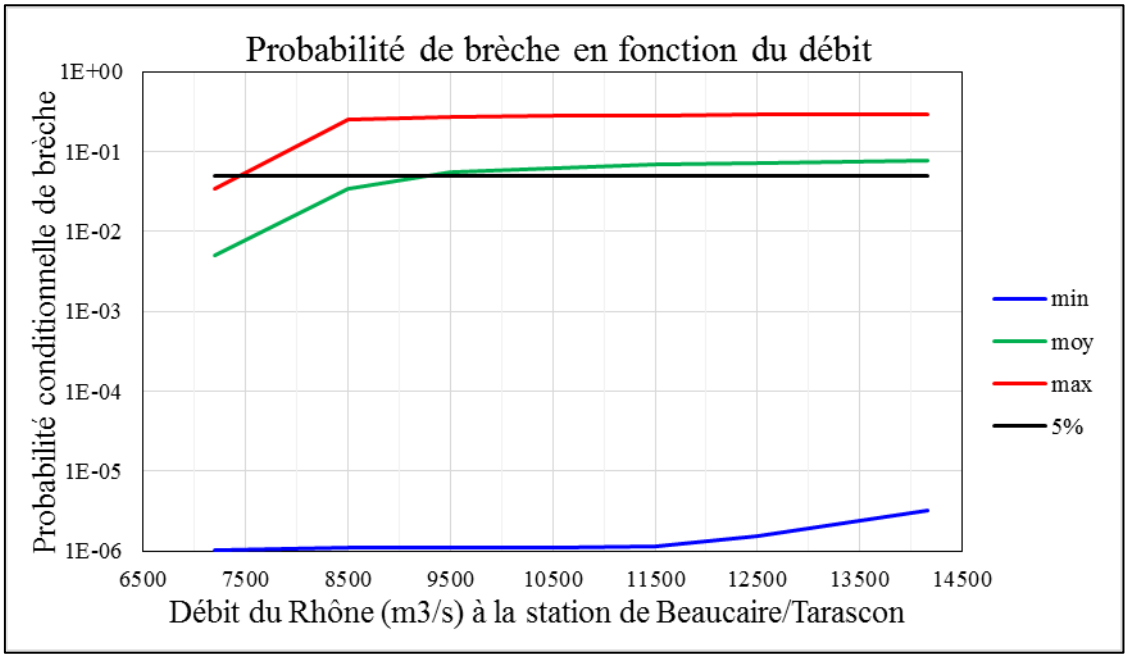


Figure 107 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Sylvéréal-Icard

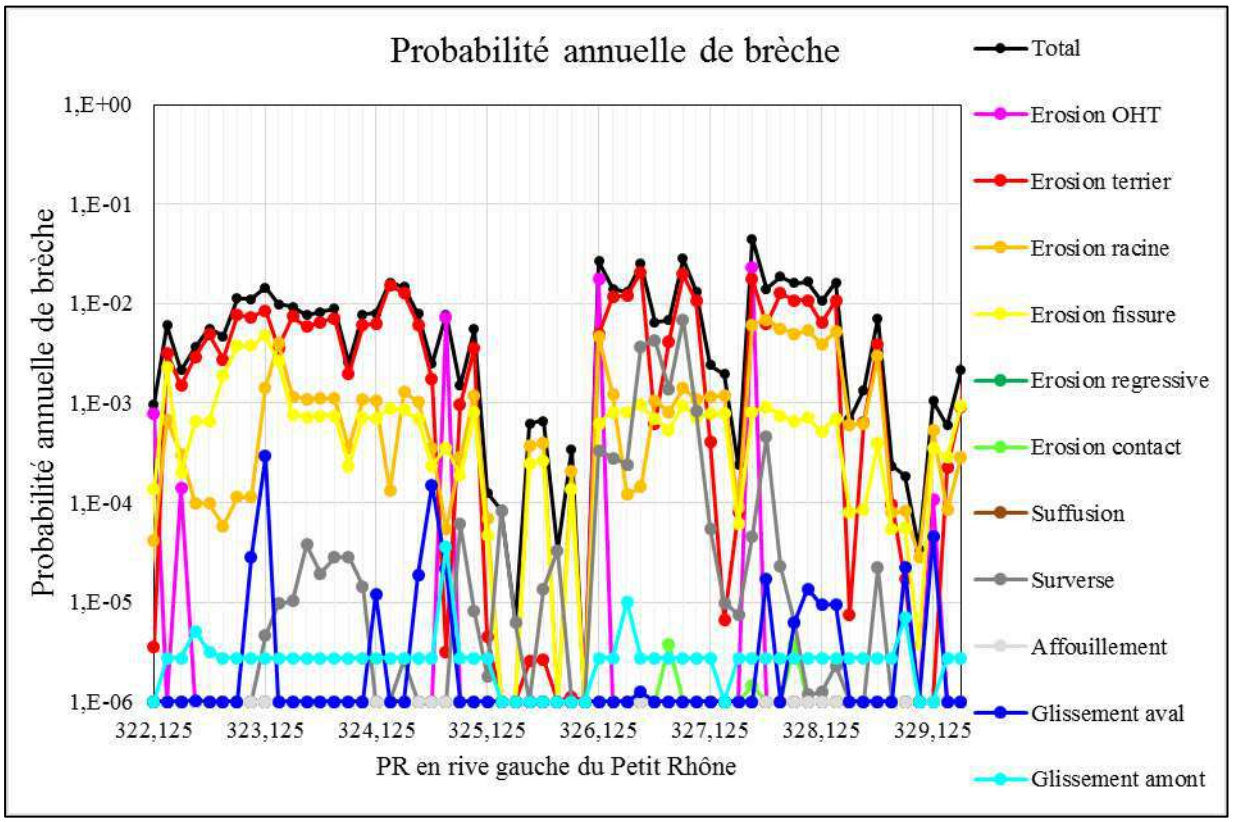


Figure 108 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Sylvéréal-Icard

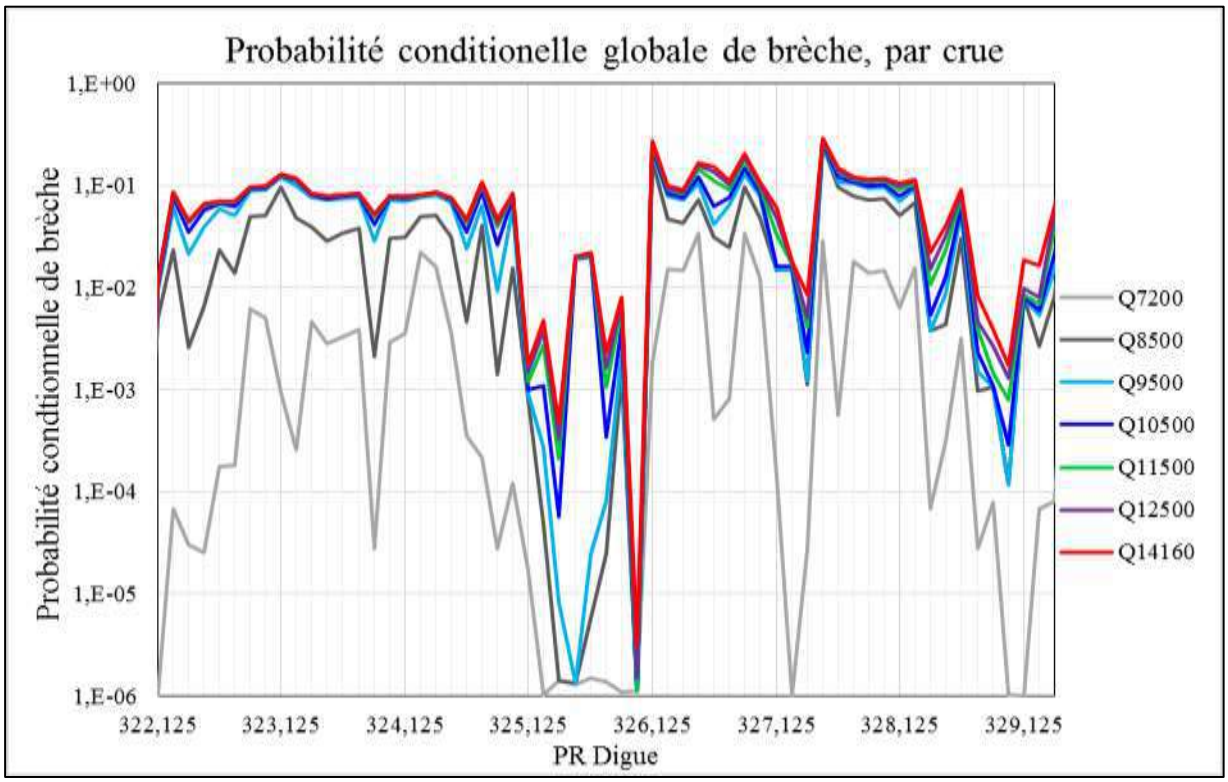


Figure 109 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Sylvéréal-Icard

3.30 DIGUE DU MAS D'ICARD AU BAC (PRG14)

Le tronçon Icard-bac mesure 1.5 km, il comprend les PR0.125 compris entre PRG 329.5 et 330.625 ; la digue n'a pas fait l'objet de travaux de confortement depuis son rehaussement au XIX^{ème} siècle. Le tronçon n'est pas carrossable ; la proximité de la route, non pris en compte dans les calculs, rend l'accès et donc l'intervention assez simple.

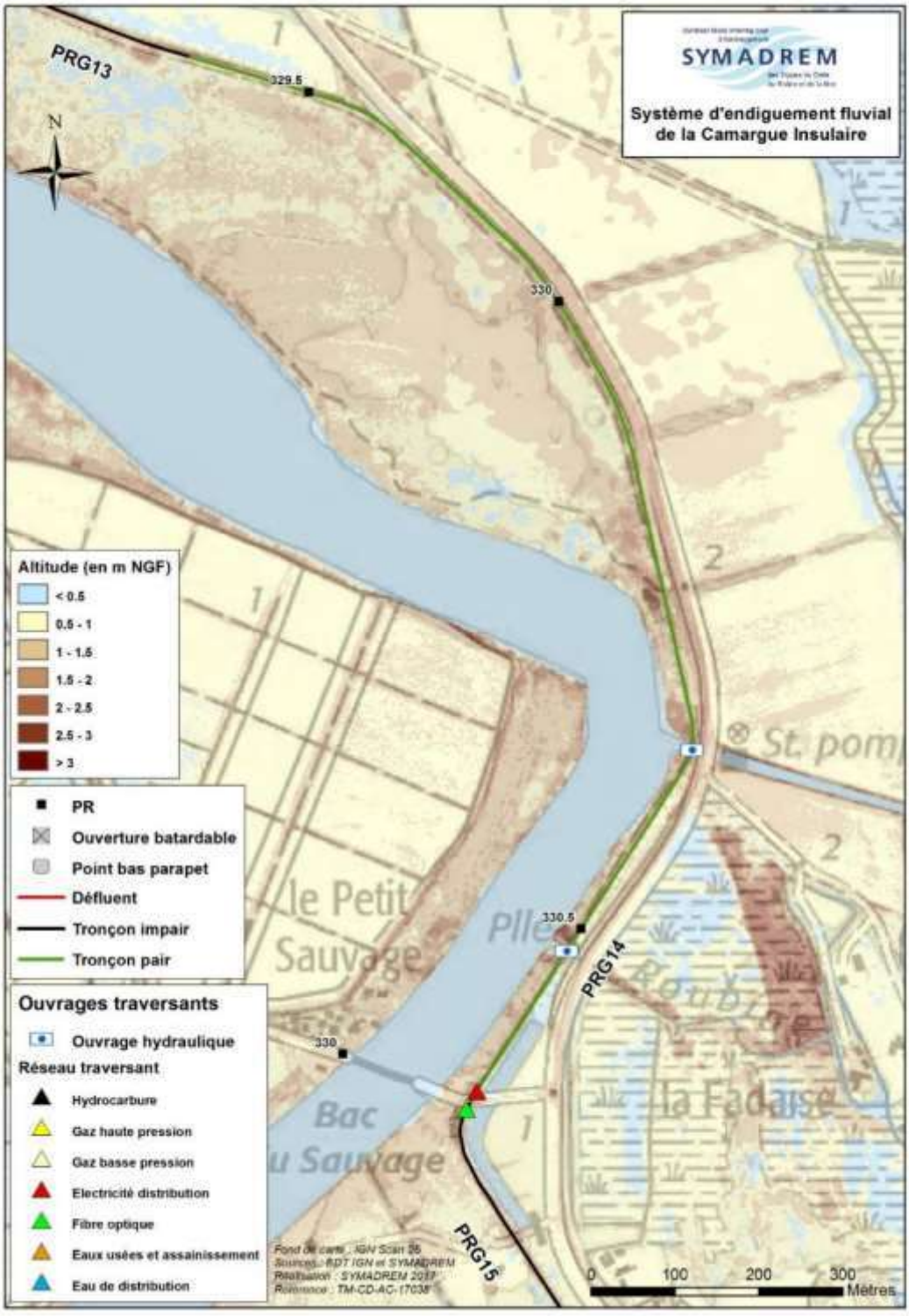


Figure 60. Plan de situation de la digue du mas d'Icard au Tiki 1 : Mas d'Icard-Bac du Sauvage

Tableau 112. Synthèse de géométrie, tronçon Icard-bac

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	2,7	2,3	2,5	0,1
Cote de pied de digue aval	m NGF	1,5	0,6	1,0	0,3
Cote à 20m du pdav	m NGF	1,9	-0,1	1,0	0,6
Cote de pied de digue amont	m NGF	1,7	0,6	1,2	0,3
Cote à 20m du pdam	m NGF	1,3	0,1	0,7	0,5
Hauteur de digue coté aval	m	1,9	1,0	1,5	0,3
Hauteur de digue côté amont	m	1,8	0,8	1,2	0,3
Fruit aval	L/V	3,1	2,2	2,6	0,4
Fruit amont	L/V	4,9	2,0	2,8	0,9
Largeur du ségonnal	m	302	9	165	132

Ce tronçon se rapproche du Rhône en allant vers l'aval, la bathymétrie sur la partie avec un faible ségonnal atteint -16 m NGF.

Tableau 113. Données hydrauliques, tronçon Icard-bac

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	1,4	1,3	1,0	1,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
8 500	1,4	1,3	1,0	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
9 500	1,5	1,3	0,9	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
10 500	1,5	1,4	0,9	1,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
11 500	1,6	1,4	0,8	1,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,6
12 500	1,6	1,5	0,8	0,9	0,1	0,1	0,0	0,0	0,6
14 160	1,7	1,6	0,7	0,9	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5

Caractéristiques du tronçon Icard-bac vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue du XIXème siècle avec un REX neutre. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il y a plusieurs ouvrages hydrauliques sur ce tronçon, celui qui présente la transition la plus à risque comprend un mur en retour correctement dimensionné. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,03
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit - racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec présence d'arbres en pied de talus (un côté). La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit - fissure

Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle sans observation d'infiltrations ou de terriers par le passé. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques indiquent qu'il y a du sable de qualité variable en fondation. La couche de sable, dont le toit est à 1m de profondeur, mesure 5m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,5
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il n'y a pas de brèches connues. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m

- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue a été investigué sans présence de grave. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,01
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 9m et la pente hydraulique est de 1 à 13 cm/km ; la berge est protégée par des enrochements avec sabot lorsque la berge est proche.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge avec des enrochements

Tableau 114. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Icard-bac

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**1E-06**
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**1E-06**
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**1E-06**
12 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**1E-06**
14 160	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**1E-06**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	3E-03	3E-07	1E-05	3E-05	6E-08	9E-08	0E+00	1E-06	2E-08	3E-06	7E-06			**3E-03**
8 500	2E-02	3E-05	2E-03	3E-03	8E-08	2E-07	0E+00	1E-06	2E-08	4E-06	8E-06			**3E-02**
9 500	2E-02	3E-05	2E-03	3E-03	8E-08	2E-07	0E+00	1E-06	2E-08	4E-06	8E-06			**3E-02**
10 500	3E-02	3E-05	2E-03	4E-03	9E-08	2E-07	2E-09	1E-06	2E-08	5E-06	1E-05			**3E-02**
11 500	4E-02	7E-05	3E-03	6E-03	1E-07	4E-07	3E-09	1E-06	2E-08	5E-06	1E-05			**4,7E-02**
12 500	5E-02	1E-04	4E-03	7E-03	1E-07	6E-07	4E-09	1E-06	2E-08	5E-06	1E-05			**6E-02**
14 160	5E-02	2E-04	5E-03	8E-03	2E-07	9E-07	6E-09	4E-06	2E-08	5E-06	1E-05			**6E-02**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	3E-02	3E-06	5E-05	2E-04	2E-07	6E-07	0E+00	1E-06	2E-07	2E-05	1E-05			**3E-02**
8 500	2E-01	3E-04	5E-03	2E-02	3E-07	1E-06	0E+00	1E-06	2E-07	2E-05	1E-05			**2E-01**
9 500	2E-01	3E-04	5E-03	2E-02	3E-07	1E-06	0E+00	1E-06	2E-07	2E-05	1E-05			**2E-01**
10 500	2E-01	3E-04	5E-03	2E-02	3E-07	1E-06	6E-09	1E-06	2E-07	2E-05	2E-05			**2E-01**
11 500	2E-01	7E-04	1E-02	2E-02	4E-07	3E-06	7E-09	1E-06	2E-07	2E-05	2E-05			**2E-01**
12 500	3E-01	1E-03	2E-02	2E-02	4E-07	5E-06	9E-09	5E-06	2E-07	2E-05	2E-05			**3E-01**
14 160	3E-01	2E-03	3E-02	3E-02	4E-07	8E-06	2E-08	3E-05	2E-07	2E-05	2E-05			**3E-01**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**4E-02**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**5E-03**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au PRG 329,5. Elle est de 4.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.
L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 7 500 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 14 160 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 5.10^{-3}, ce qui correspond à un événement probable (classe B) ;
- un risque inacceptable ($> 10^{-4}$) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 11 500 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 7 500 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 11 500 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3, qui correspondent respectivement aux seuils à 5 et 50 %, revu, des probabilités maximales. Du fait de la forte sensibilité du modèle, la crue de danger retenue est celle de 11 500 m^3/s.

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 11 500 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le principal risque est l'érosion de conduit dans un terrier, il est situé en amont du PRG 330 et en aval du PRG 330.5.

Ce tronçon sera prochainement repris dans le cadre des travaux sur le petit Rhône.

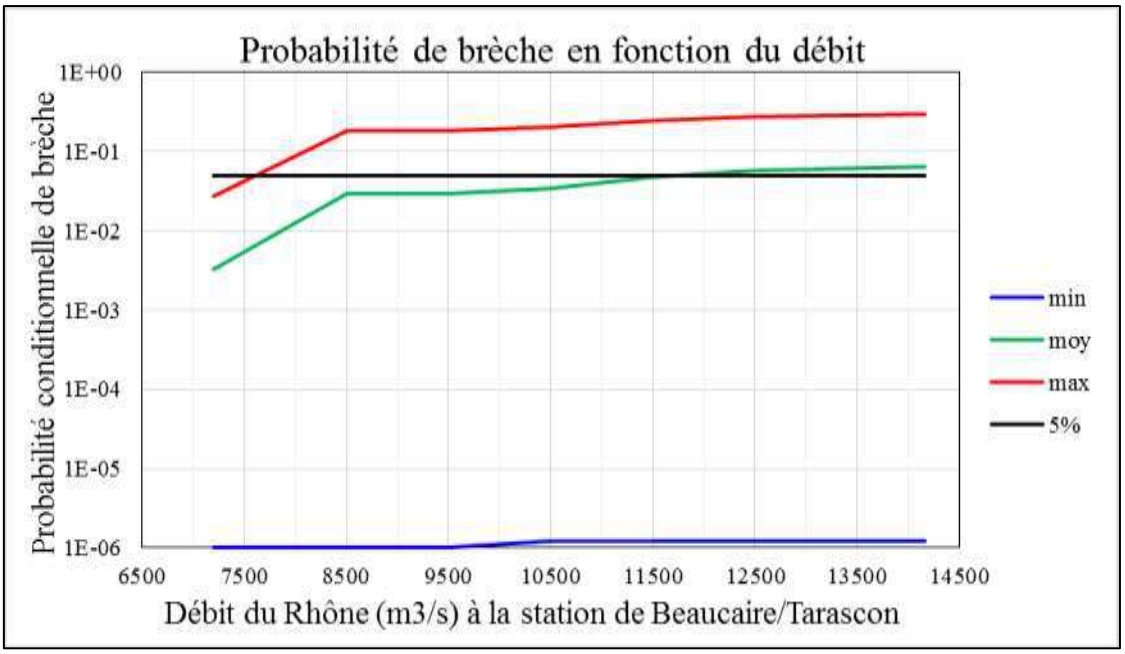


Figure 110 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Icard-bac

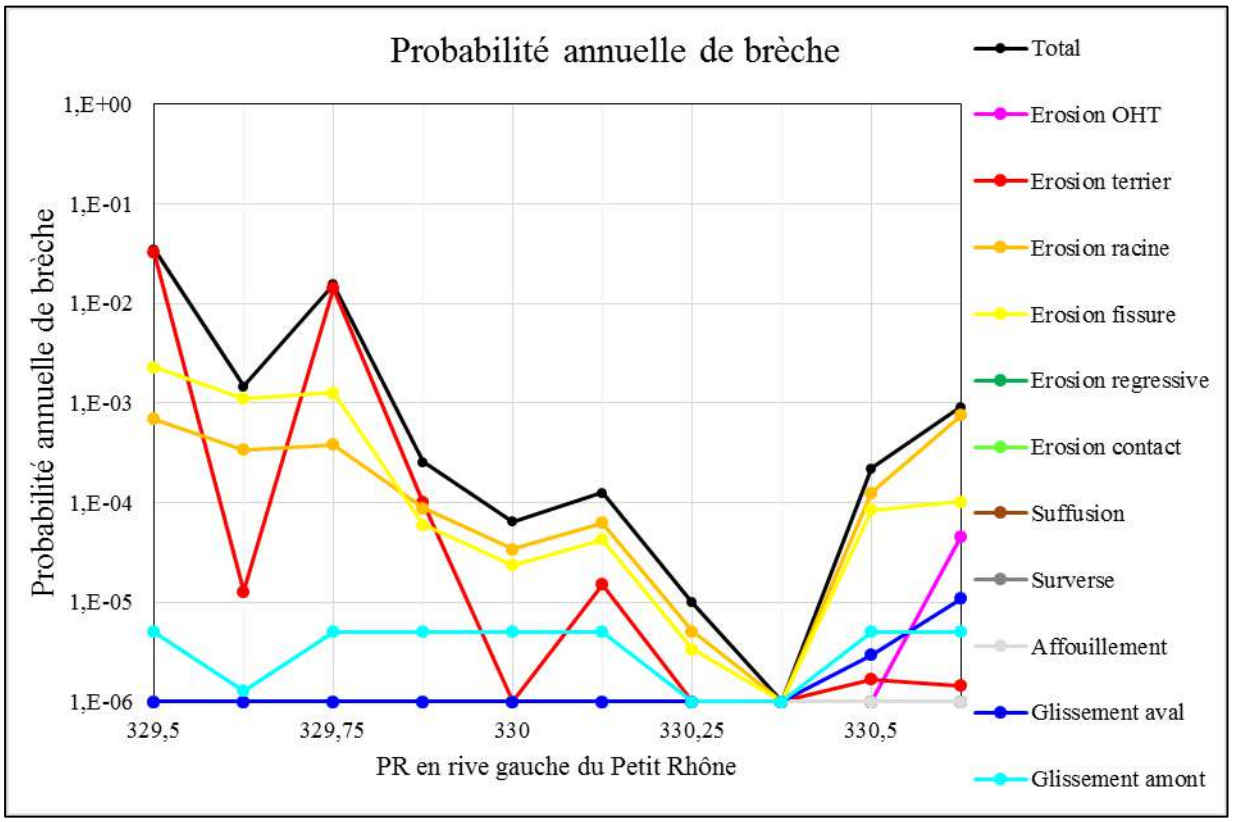


Figure 111 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Icard-bac

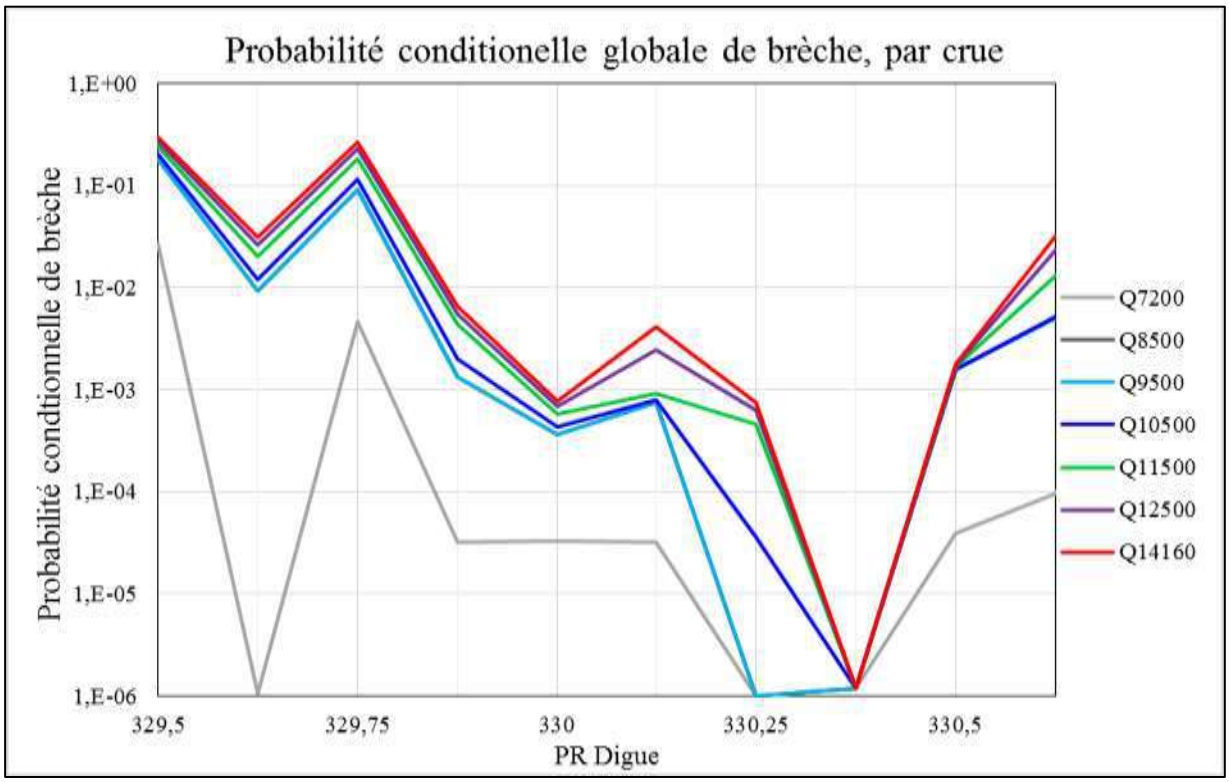


Figure 112 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Icard-bac

3.31 REMBLAI : DE L'AVAL DU BAC DU SAUVAGE (PRG15)

Le tronçon Aval du bac mesure 1.2 km, il comprend les PR0.125 compris entre PRG 330.75 et 332 ; la digue n'a pas fait l'objet de travaux de confortement depuis son rehaussement au XIX^{ème} siècle. Le tronçon n'est pas carrossable.

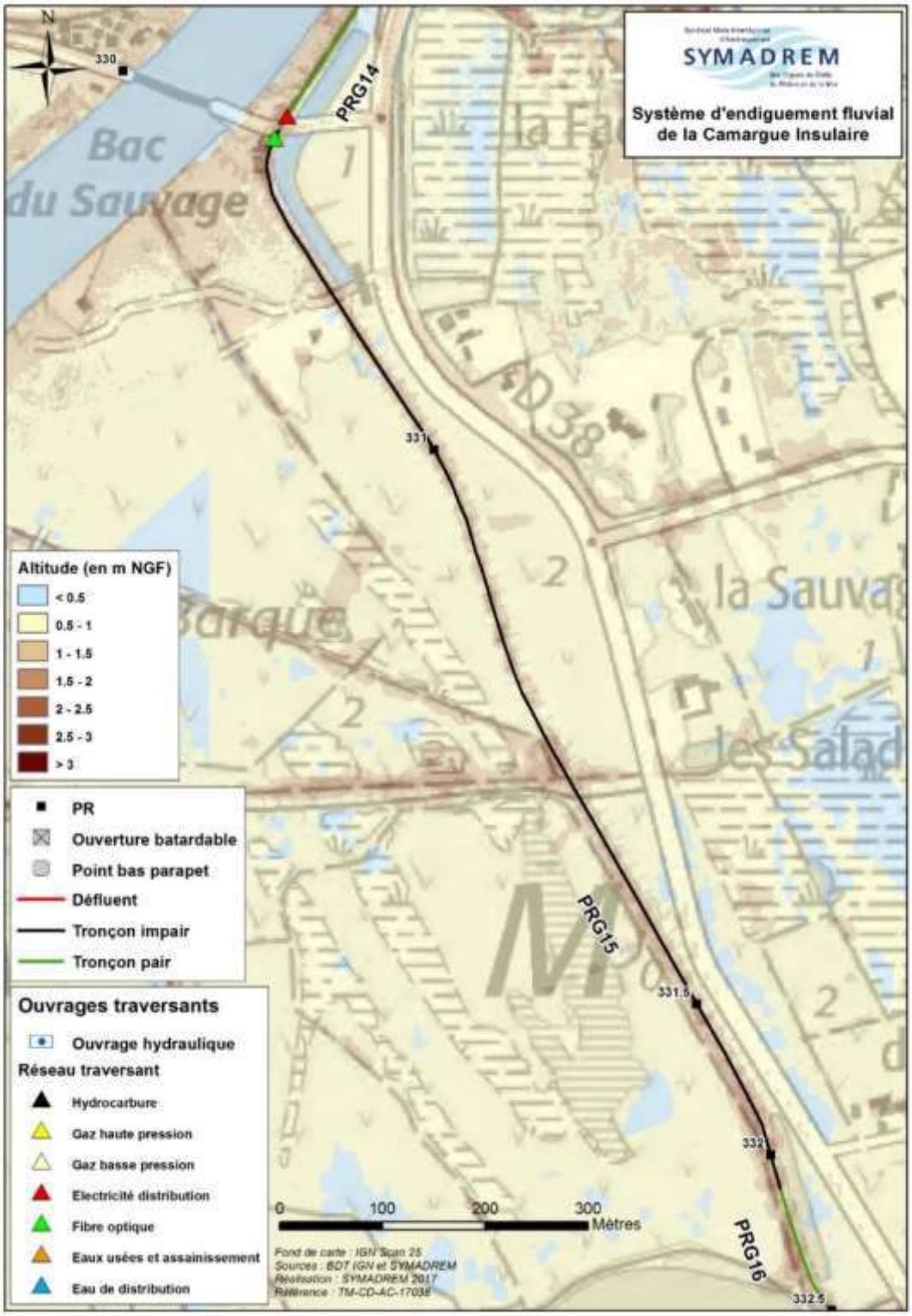


Figure 61. Plan de situation de la digue du mas d'Icard au Tiki 2 : Aval du bac du Sauvage

Tableau 115. Synthèse de géométrie, tronçon Aval du bac

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	2,8	2,0	2,3	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	1,4	0,3	0,9	0,3
Cote à 20m du pdav	m NGF	0,9	0,5	0,7	0,1
Cote de pied de digue amont	m NGF	1,3	0,2	0,6	0,4
Cote à 20m du pdam	m NGF	0,7	0,4	0,5	0,1
Hauteur de digue coté aval	m	2,1	0,7	1,4	0,5
Hauteur de digue côté amont	m	2,5	0,7	1,8	0,6
Fruit aval	L/V	8,5	2,1	3,8	2,2
Fruit amont	L/V	8,7	1,9	3,5	2,0
Largeur du ségonnal	m	525	71	274	150

Ce tronçon est loin du Rhône.

Tableau 116. Données hydrauliques, tronçon Aval du bac

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	1,2	1,1	0,8	1,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
8 500	1,3	1,2	0,8	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
9 500	1,3	1,2	0,7	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,6
10 500	1,3	1,3	0,7	1,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,6
11 500	1,4	1,4	0,6	0,9	0,1	0,0	0,0	0,0	0,5
12 500	1,5	1,5	0,5	0,9	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
14 160	1,6	1,6	0,4	0,8	0,1	0,1	0,0	0,0	0,4

Caractéristiques du tronçon Aval du bac vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue du XIXème siècle avec un REX neutre. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il n'y a pas de réseau ou d'ouvrage connu sur ce tronçon.

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit - racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec présence d'arbres sur les deux talus. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,99
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit - fissure
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle sans observation d'infiltrations et de terriers de blaireaux ou lapins par le passé. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques sont inexistantes sur ce tronçon. La couche de sable considérée, dont le toit est à 1m de profondeur, mesure 5m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il n'y a pas de brèches connues. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue n'a pas été investiguée. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 70m et la pente hydraulique est de 1 à 11 cm/km ; la berge est recouverte d'herbacés.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge herbacée

Tableau 117. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Aval du bac

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	1E-10	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**5E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	1E-10	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**8E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	1E-10	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**8E-06**
10 500	6E-07	0E+00	7E-04	5E-05	1E-08	1E-10	1E-09	1E-06	1E-12	1E-06	1E-05			**8E-04**
11 500	2E-06	0E+00	2E-03	1E-04	1E-08	5E-10	1E-09	1E-06	1E-12	1E-06	1E-05			**3E-03**
12 500	2E-06	0E+00	2E-03	2E-04	1E-08	8E-10	1E-09	1E-06	1E-12	1E-06	1E-05			**5E-03**
14 160	4E-06	0E+00	3E-03	2E-04	1E-08	9E-10	5E-09	1E-06	1E-12	1E-06	1E-05			**6E-03**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	2E-03	0E+00	5E-03	3E-04	1E-08	8E-08	2E-09	1E-05	1E-12	4E-06	2E-05			**8E-03**
8 500	2E-03	0E+00	5E-03	4E-04	1E-08	8E-08	0E+00	1E-05	1E-12	4E-06	2E-05			**8E-03**
9 500	2E-03	0E+00	5E-03	4E-04	1E-08	8E-08	0E+00	1E-05	1E-12	4E-06	2E-05			**8E-03**
10 500	3E-03	0E+00	6E-03	4E-04	1E-08	8E-08	5E-09	3E-05	1E-12	4E-06	2E-05			**9E-03**
11 500	5E-03	0E+00	1E-02	8E-04	2E-08	1E-07	9E-09	5E-04	1E-12	4E-06	2E-05			**2E-02**
12 500	9E-03	0E+00	2E-02	1E-03	3E-08	3E-07	4E-08	3E-03	1E-12	4E-06	2E-05			**3E-02**
14 160	1E-02	0E+00	2E-02	2E-03	3E-08	5E-07	4E-07	7E-03	1E-12	4E-06	2E-05			**4E-02**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	6E-03	0E+00	8E-03	6E-04	1E-08	1E-07	1E-08	1E-04	1E-12	3E-05	1E-04			**1E-02**
8 500	6E-03	0E+00	1E-02	8E-04	2E-08	1E-07	0E+00	1E-04	1E-12	3E-05	1E-04			**1E-02**
9 500	6E-03	0E+00	1E-02	8E-04	2E-08	1E-07	0E+00	1E-04	1E-12	3E-05	1E-04			**1E-02**
10 500	6E-03	0E+00	2E-02	1E-03	3E-08	1E-07	1E-08	3E-04	1E-12	3E-05	1E-04			**2E-02**
11 500	2E-02	0E+00	4E-02	3E-03	6E-08	3E-07	4E-08	4E-03	1E-12	3E-05	1E-04			**4,6E-02**
12 500	4E-02	0E+00	5E-02	4E-03	8E-08	1E-06	3E-07	2E-02	1E-12	3E-05	1E-04			**9E-02**
14 160	5E-02	0E+00	7E-02	5E-03	9E-08	3E-06	2E-06	5E-02	1E-12	3E-05	1E-04			**1E-01**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**8E-03**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**4E-03**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au PRG 332. Elle est de 8.10^{-3}, ce qui correspond à un événement probable (classe B) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.
L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 11 500 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 14 160 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 4.10^{-3}, ce qui correspond à un événement probable (classe B) ;
- un risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 14 160 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour ce tronçon comme pour ceux plus à l'aval, il apparait un risque à partir du moment où la digue est en eau ; or les niveaux dans cette zone sont plus dépendants du niveau marin que du débit de crue ; ainsi les crues de sureté et de danger ont été recalées.
Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 8 500 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 12 500 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3.

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 12 500 m^3/s qui correspond à la crue de danger retenue.

Le principal risque est l'érosion de conduit, en particulier au niveau de racines mortes, il est situé sur tout le tronçon.

Ce tronçon sera prochainement repris dans le cadre des travaux sur le petit Rhône.

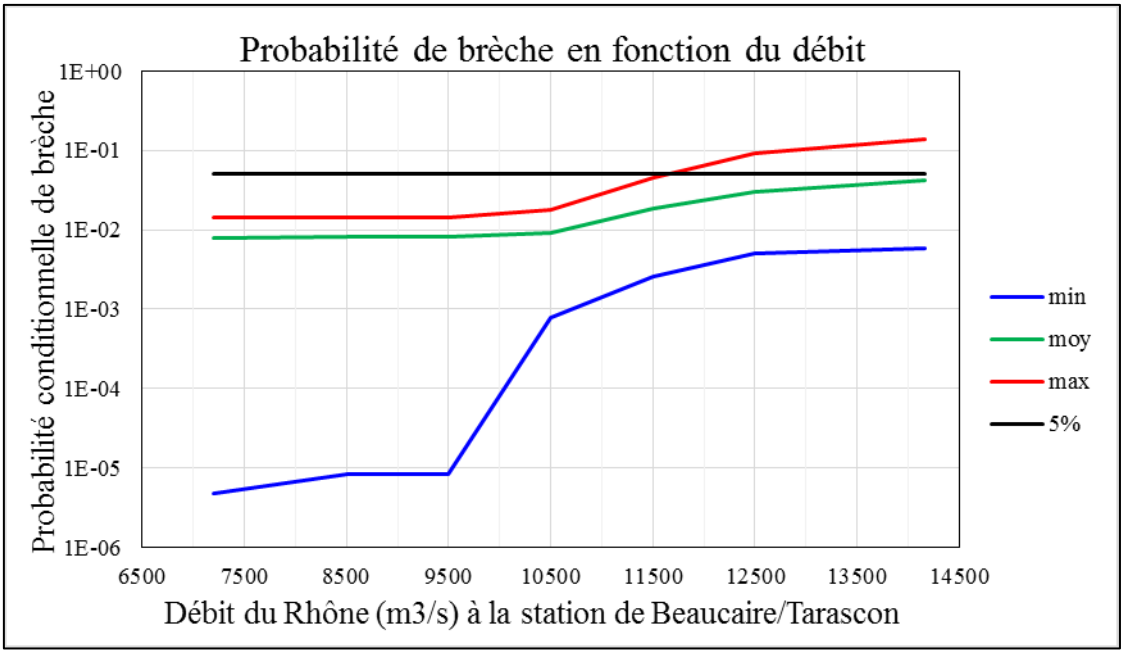


Figure 113 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Aval du bac

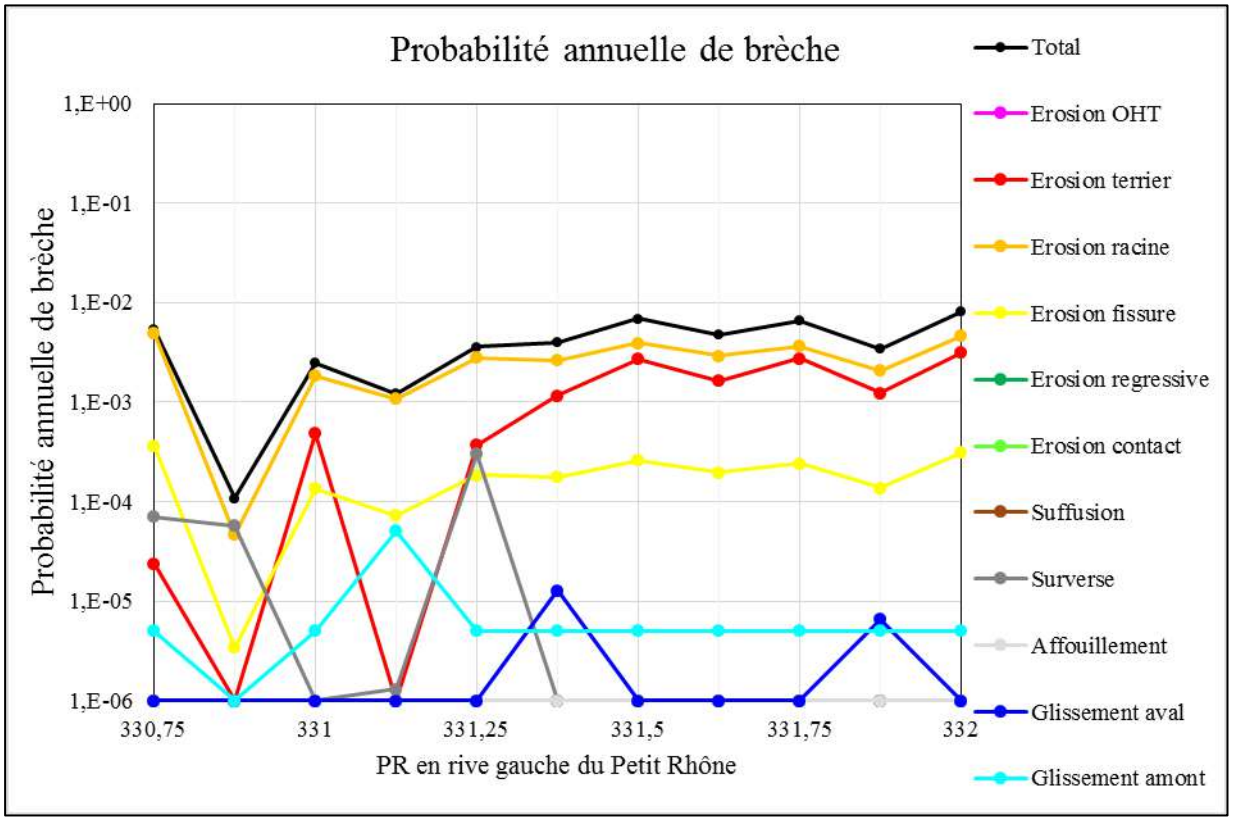


Figure 114 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Aval du bac

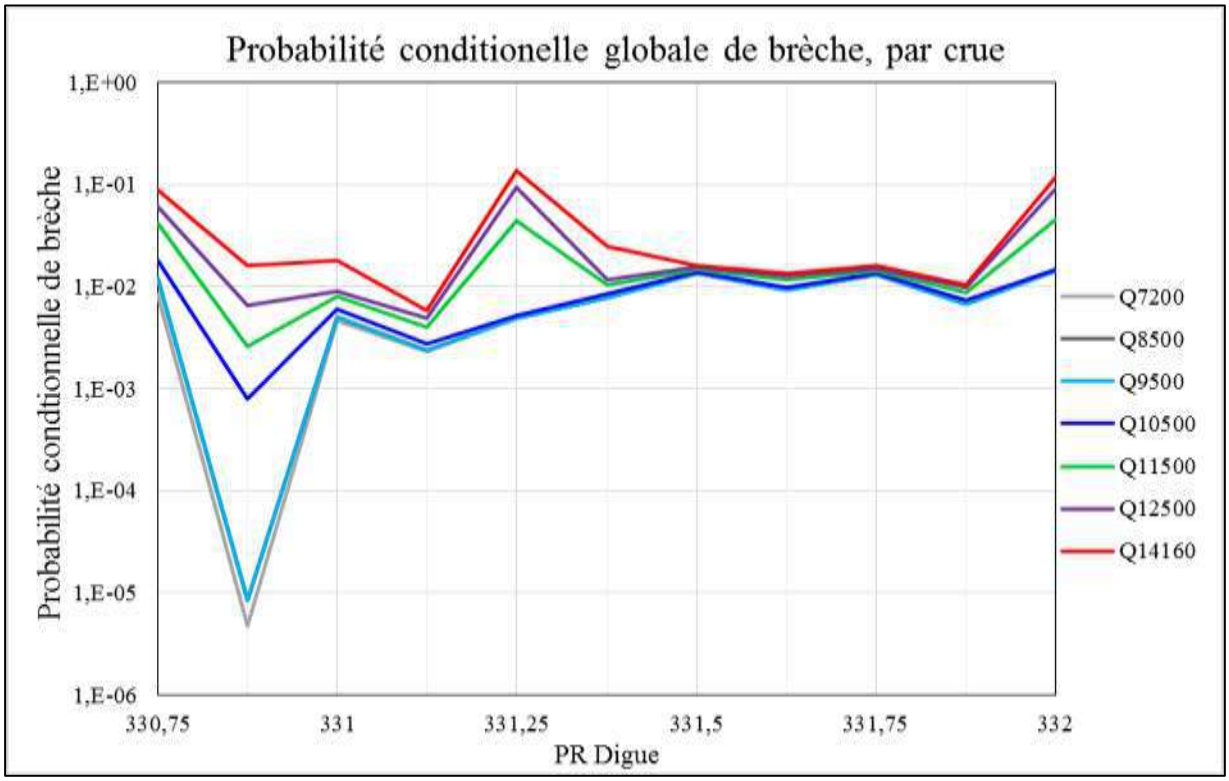


Figure 115 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Aval du bac

3.32 REMBLAI : PORT DROMAR (PRG16)

Le tronçon Port Dromar mesure 1.2 km, il comprend les PR0.125 compris entre PRG 332.125 et 334.5 ; la digue n'a pas fait l'objet de travaux de confortement depuis son rehaussement au XIX^{ème} siècle. Le tronçon n'est pas carrossable mais accessible par la route qui est à moins de 20 m en moyenne.

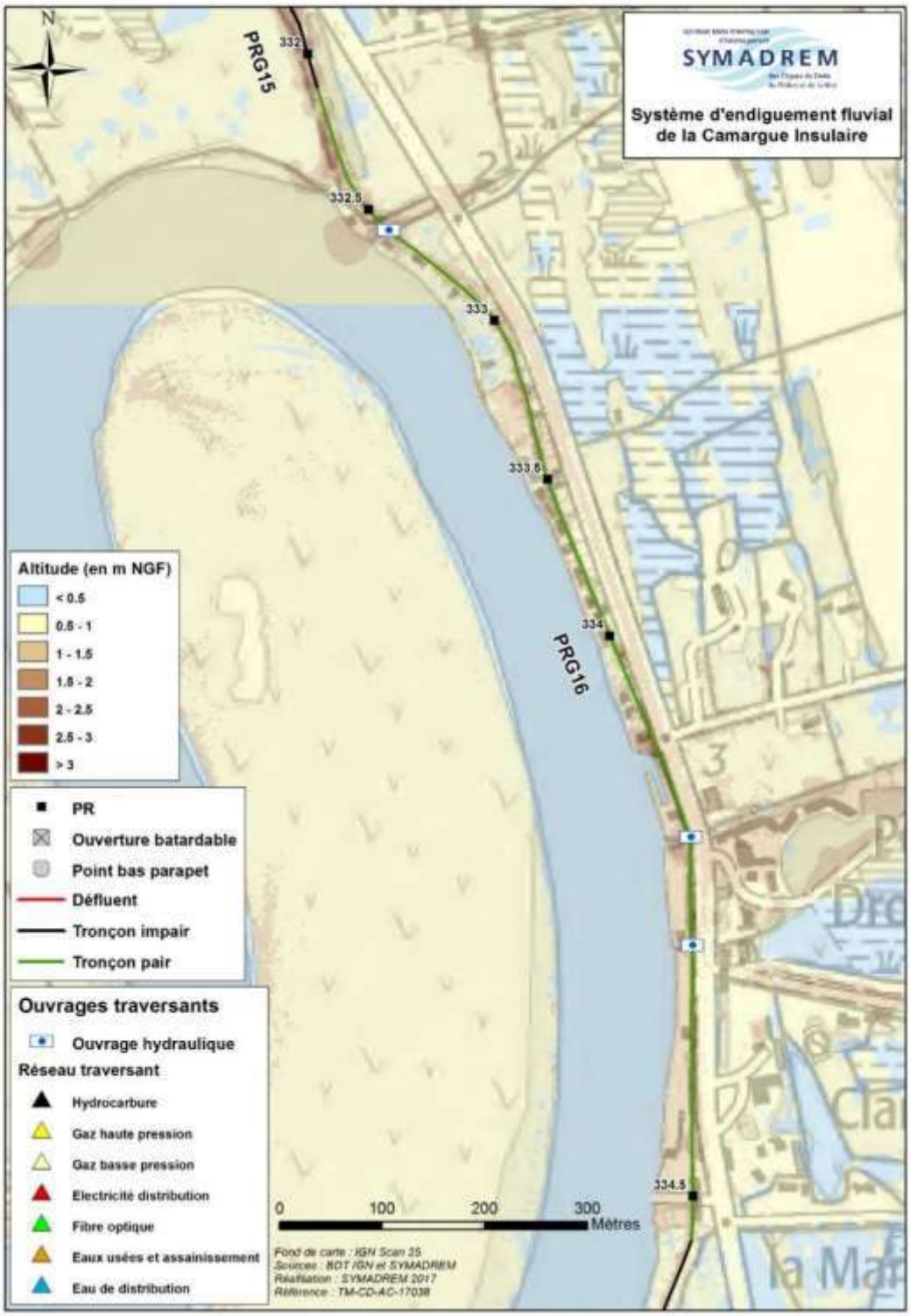


Figure 62. Plan de situation de la digue du mas d'Icard au Tiki 3 : Port Dromar

Tableau 118. Synthèse de géométrie, tronçon Port Dromar

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	2,9	2,0	2,4	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	1,5	0,0	0,9	0,3
Cote à 20m du pdav	m NGF	1,2	0,1	0,8	0,3
Cote de pied de digue amont	m NGF	2,1	0,4	1,1	0,4
Cote à 20m du pdam	m NGF	1,1	0,2	0,6	0,3
Hauteur de digue coté aval	m	2,6	0,7	1,5	0,4
Hauteur de digue côté amont	m	2,3	0,1	1,3	0,5
Fruit aval	L/V	17,0	1,5	4,0	3,4
Fruit amont	L/V	49,9	1,6	5,2	10,6
Largeur du ségonnal	m	90	4	26	19

Ce tronçon est proche du Rhône sur la quasi-totalité de son tracé, la bathymétrie y est variable entre -8 et-13 m NGF.

Tableau 119. Données hydrauliques, tronçon Port Dromar

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	1,1	0,9	1,1	1,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,9
8 500	1,1	0,9	1,0	1,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,8
9 500	1,2	1,0	0,9	1,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,8
10 500	1,2	1,0	0,9	1,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,8
11 500	1,4	1,1	0,9	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
12 500	1,5	1,3	0,6	1,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,6
14 160	1,6	1,5	0,5	0,8	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5

Caractéristiques du tronçon Port Dromar vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue du XIXème siècle avec un REX neutre. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il y a plusieurs ouvrages hydrauliques sur ce tronçon, celui qui présente la transition la plus à risque comprend un mur en retour au dimensionnement incertain. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit - racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec présence d'arbres sur les deux talus. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,99
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit - fissure

Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle sans observation d'infiltrations ou de terriers par le passé. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques sont inexistantes sur ce tronçon mais il n'y a pas de signe de défaillance. La couche de sable considérée, dont le toit est à 1m de profondeur, mesure 5m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il n'y a pas de brèches connues. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m

- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue n'a pas été investiguée. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 4m et la pente hydraulique est de 1 à 11 cm/km; la berge est protégée par des quais mis en œuvre par les riverains pour protéger leurs terres.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge avec palplanches

Tableau 120. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Port Dromar

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**1E-06**
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**1E-06**
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**1E-06**
12 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**1E-06**
14 160	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**1E-06**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	1E-03	4E-05	3E-03	2E-04	1E-08	2E-08	2E-09	1E-06	3E-05	2E-05	1E-04			**5E-03**
8 500	1E-03	4E-05	3E-03	2E-04	1E-08	2E-08	0E+00	1E-06	3E-05	2E-05	1E-04			**5E-03**
9 500	1E-03	4E-05	3E-03	2E-04	1E-08	2E-08	0E+00	1E-06	3E-05	2E-05	1E-04			**5E-03**
10 500	1E-03	4E-05	3E-03	2E-04	1E-08	2E-08	4E-09	1E-06	3E-05	2E-05	1E-04			**5E-03**
11 500	4E-03	1E-04	7E-03	5E-04	1E-08	7E-08	1E-08	1E-06	3E-05	2E-05	1E-04			**1E-02**
12 500	8E-03	2E-04	1E-02	1E-03	2E-08	1E-07	5E-07	8E-05	3E-05	5E-04	1E-04			**2E-02**
14 160	1E-02	4E-04	3E-02	2E-03	3E-08	2E-07	7E-07	2E-03	3E-05	5E-04	1E-04			**4E-02**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	6E-03	8E-04	1E-02	6E-04	1E-08	1E-07	1E-08	1E-06	5E-04	5E-04	2E-03			**2E-02**
8 500	6E-03	8E-04	1E-02	6E-04	1E-08	1E-07	0E+00	1E-06	5E-04	5E-04	2E-03			**2E-02**
9 500	6E-03	8E-04	1E-02	6E-04	1E-08	1E-07	0E+00	1E-06	5E-04	5E-04	2E-03			**2E-02**
10 500	8E-03	8E-04	1E-02	8E-04	1E-08	1E-07	1E-08	1E-06	5E-04	5E-04	2E-03			**2E-02**
11 500	2E-02	2E-03	4E-02	2E-03	4E-08	4E-07	6E-08	1E-06	5E-04	5E-04	2E-03			**6E-02**
12 500	4E-02	5E-03	6E-02	4E-03	7E-08	7E-07	9E-06	1E-03	5E-04	9E-03	2E-03			**1E-01**
14 160	5E-02	7E-03	8E-02	5E-03	9E-08	8E-07	1E-05	2E-02	5E-04	9E-03	2E-03			**1E-01**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**9E-03**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**3E-03**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au PRG 332.125. Elle est de 9.10^{-3}, ce qui correspond à un événement probable (classe B) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.

L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 10 500 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 14 160 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 3.10^{-3}, ce qui correspond à un événement probable (classe B) ;
- un risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 14 160 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour ce tronçon comme pour ceux plus à l'aval, il apparait un risque à partir du moment où la digue est en eau ; or les niveaux dans cette zone sont plus dépendants du niveau marin que du débit de crue ; ainsi les crues de sureté et de danger ont été recalées.
Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 8 500 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 12 500 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3.

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 12 500 m^3/s qui correspond à la crue de danger retenue.

Le principal risque est l'érosion de conduit, en particulier au niveau d'une racine, il est situé sur la majeure partie du linéaire.

Ce tronçon sera prochainement repris dans le cadre des travaux sur le petit Rhône.

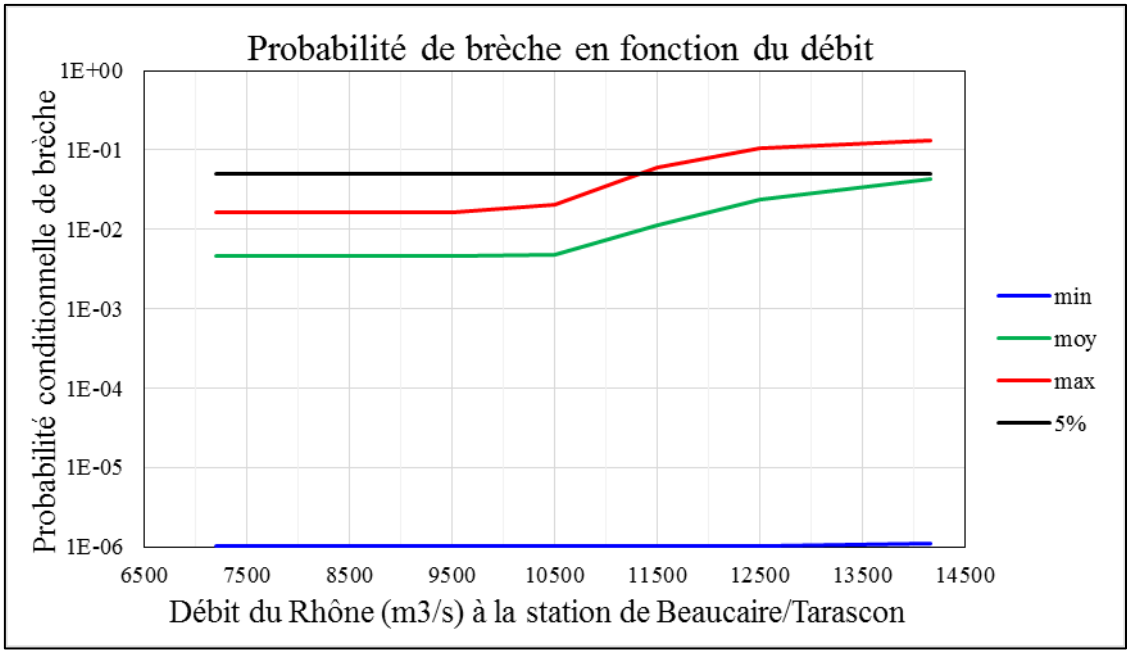


Figure 116 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Port Dromar

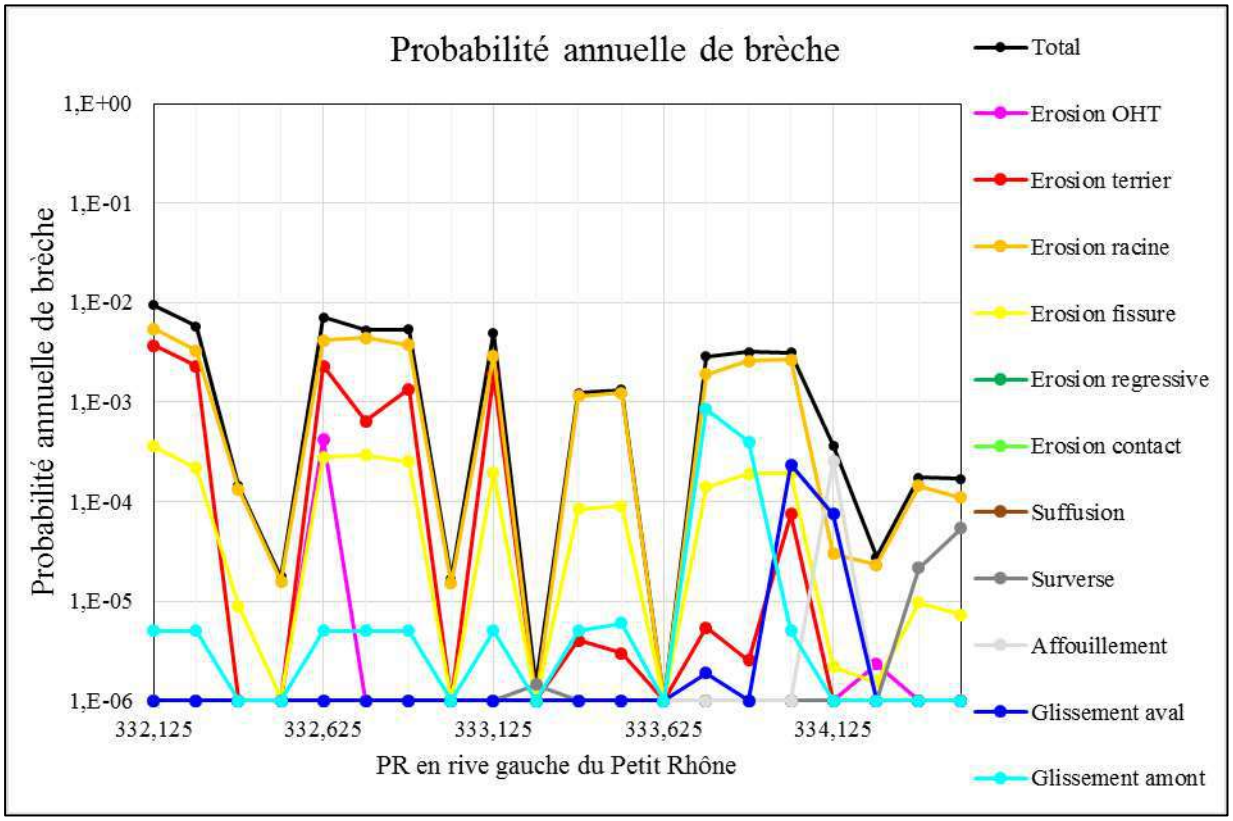


Figure 117 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Port Dromar

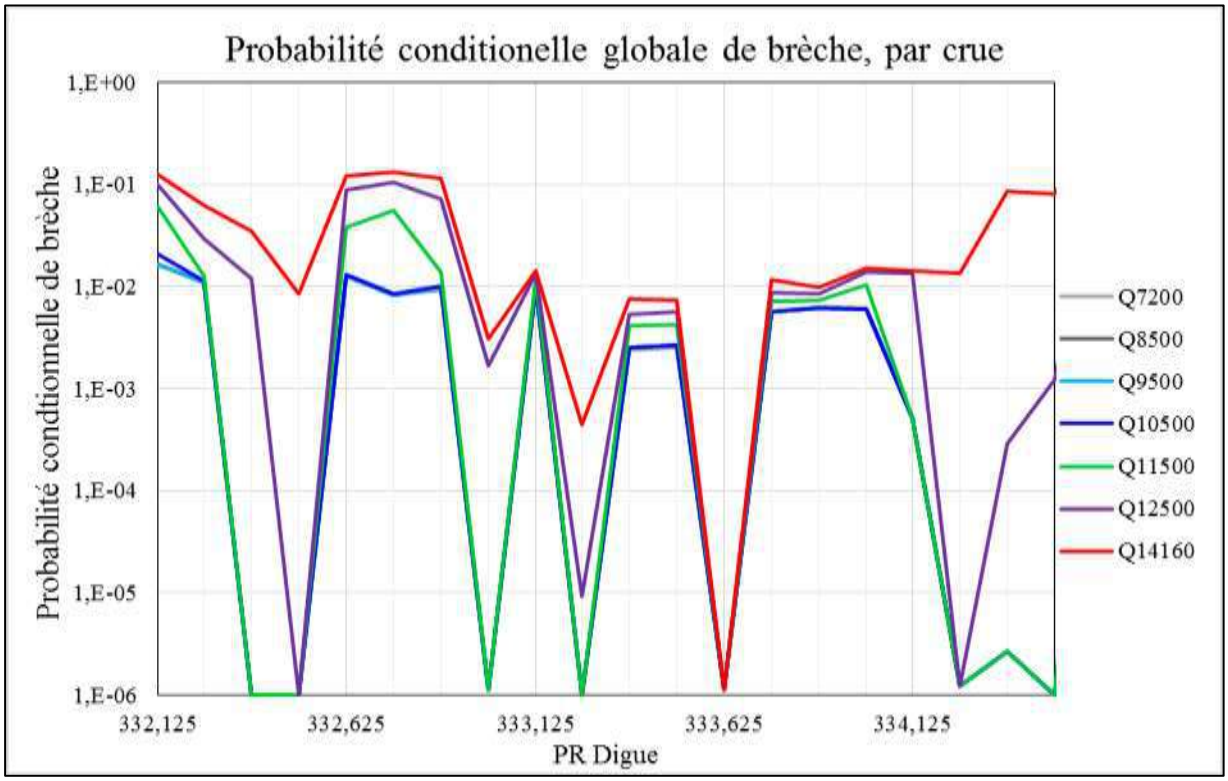


Figure 118 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Port Dromar

3.33 REMBLAI : PORT DE L'AMAREE (PRG17)

Le tronçon Port de l'Amarée mesure 1.3 km, il comprend les PR0.125 compris entre PRG 334.625 et 335.875 ; la digue n'a pas fait l'objet de travaux de confortement depuis son rehaussement au XIX^{ème} siècle. Le tronçon n'est pas carrossable.

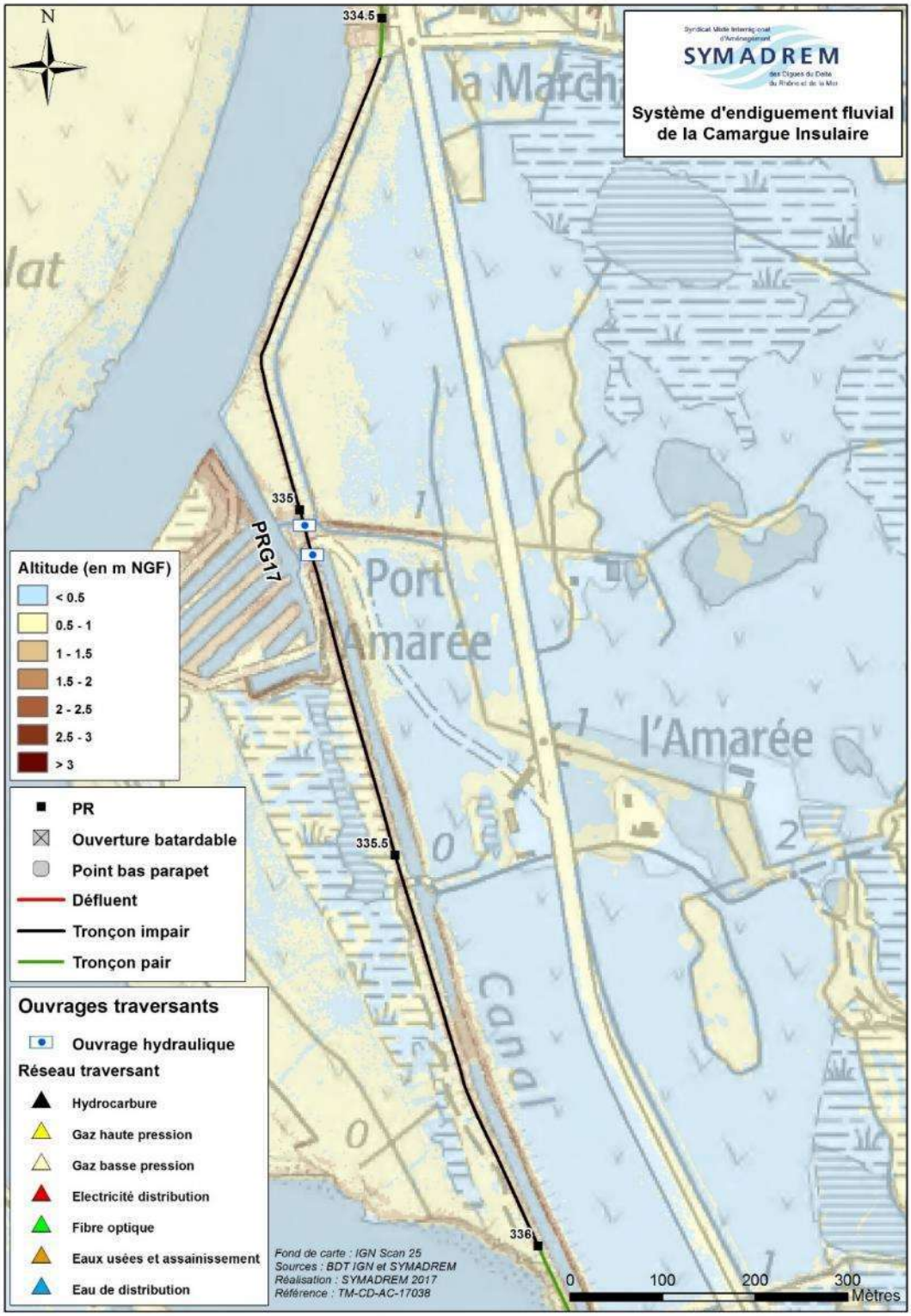


Figure 63. Plan de situation de la digue du mas d'Icard au Tiki 4 : Port de l'Amarée

Tableau 121. Synthèse de géométrie, tronçon Port de l'Amarée

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	2,1	1,5	1,8	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	1,1	0,5	0,8	0,2
Cote à 20m du pdav	m NGF	1,7	0,4	1,0	0,5
Cote de pied de digue amont	m NGF	1,1	0,2	0,8	0,3
Cote à 20m du pdam	m NGF	0,7	0,2	0,4	0,2
Hauteur de digue coté aval	m	1,5	0,6	1,0	0,3
Hauteur de digue côté amont	m	1,8	0,5	1,0	0,5
Fruit aval	L/V	6,4	2,3	3,9	1,1
Fruit amont	L/V	6,8	1,6	3,6	1,5
Largeur du ségonnal	m	26	12	19	6

Ce tronçon est proche du Rhône à l'amont où la bathymétrie est autour de -10 m NGF ; il est ensuite proche de l'accès au port et d'une lône dont la bathymétrie est bien plus importante, autour de 0 m NGF.

Tableau 122. Données hydrauliques, tronçon Port de l'Amarée

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	0,8	0,7	0,7	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9
8 500	0,9	0,9	0,6	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
9 500	1,0	0,9	0,6	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
10 500	1,0	0,9	0,6	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
11 500	1,1	1,0	0,5	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7
12 500	1,3	1,3	0,2	0,5	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
14 160	1,5	1,5	0,0	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,3

Caractéristiques du tronçon Port de l'Amarée vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue du XIXème siècle avec un REX neutre. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il y a plusieurs ouvrages hydrauliques sur ce tronçon, celui qui présente la transition la plus à risque comprend un réseau au compactage et à l'étanchéité incertains. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,99
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit - racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec présence d'arbres sur un talus. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit - fissure

Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle sans observation d'infiltrations ou de terriers par le passé. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques sont inexistantes sur ce tronçon. La couche de sable considérée, dont le toit est à 1m de profondeur, mesure 5m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il n'y a pas de brèches connues. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m

- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue n'a pas été investiguée. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 12m et la pente hydraulique est de 1 à 11 cm/km; la berge est recouverte d'arbres.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge arborée

Tableau 123. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Port de l'Amarée

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**1E-06**
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**1E-06**
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-10	1E-08	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			**2E-05**
12 500	3E-06	0E+00	4E-03	3E-04	0E+00	1E-10	2E-08	1E-06	1E-12	1E-06	1E-05			**5E-03**
14 160	4E-03	0E+00	6E-03	4E-04	0E+00	1E-07	5E-05	2E-04	1E-12	1E-06	1E-05			**1E-02**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	4E-05	0E+00	3E-03	2E-04	1E-08	3E-08	0E+00	2E-03	2E-08	1E-06	2E-04			**5E-03**
8 500	8E-05	0E+00	4E-03	3E-04	1E-08	3E-08	0E+00	2E-03	2E-08	1E-06	2E-04			**7E-03**
9 500	1E-04	0E+00	4E-03	3E-04	1E-08	3E-08	6E-09	2E-03	2E-08	1E-06	2E-04			**7E-03**
10 500	1E-04	0E+00	4E-03	3E-04	1E-08	3E-08	6E-09	2E-03	2E-08	1E-06	2E-04			**7E-03**
11 500	2E-03	6E-04	2E-02	1E-03	3E-08	4E-08	3E-08	1E-02	2E-08	1E-06	2E-04			**3E-02**
12 500	2E-02	1E-03	4E-02	3E-03	5E-08	4E-07	6E-05	1E-01	2E-08	1E-06	2E-04			**2E-01**
14 160	3E-02	9E-03	5E-02	3E-03	6E-08	6E-07	1E-03	2E-01	2E-08	1E-06	2E-04			**3E-01**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	4E-04	0E+00	1E-02	8E-04	6E-08	1E-07	0E+00	7E-03	9E-08	5E-06	2E-03			**2E-02**
8 500	8E-04	0E+00	2E-02	1E-03	6E-08	1E-07	0E+00	1E-02	9E-08	5E-06	2E-03			**3E-02**
9 500	1E-03	0E+00	2E-02	1E-03	6E-08	1E-07	4E-08	1E-02	9E-08	5E-06	2E-03			**4E-02**
10 500	1E-03	0E+00	2E-02	1E-03	6E-08	1E-07	4E-08	1E-02	9E-08	5E-06	2E-03			**4E-02**
11 500	2E-02	7E-03	6E-02	4E-03	9E-08	1E-07	9E-08	5E-02	9E-08	5E-06	2E-03			**1E-01**
12 500	6E-02	1E-02	8E-02	6E-03	1E-07	1E-06	4E-04	4E-01	9E-08	5E-06	2E-03			**4,7E-01**
14 160	7E-02	1E-01	1E-01	6E-03	1E-07	1E-06	3E-03	7E-01	9E-08	5E-06	2E-03			**7E-01**

Probabilité annuelle maximale de brèche: **2E-02**

Probabilité annuelle moyenne de brèche: **5E-03**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au GRD 281,250. Elle est de 2.10^{-2}, ce qui correspond à un événement courant (classe A) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable ($> 10^{-4}$) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.

L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 10 500 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 12 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 5.10^{-3}, ce qui correspond à un événement probable (classe B) ;
- un risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 11 500 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour ce tronçon comme pour ceux plus à l'aval, il apparait un risque à partir du moment où la digue est en eau ; or les niveaux dans cette zone sont plus dépendants du niveau marin que du débit de crue ; ainsi les crues de sureté et de danger ont été recalées.
Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 8 500 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 12 500 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3.

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 11 500 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le principal risque est un glissement pour les crues faibles, une érosion de conduit pour une crue moyenne et l'érosion par surverse pour les plus fortes crues. Ces risques sont situés sur l'ensemble du tracé, sauf le glissement qui est localisé au niveau du PRG 335.625.

Ce tronçon sera prochainement repris dans le cadre des travaux sur le petit Rhône.

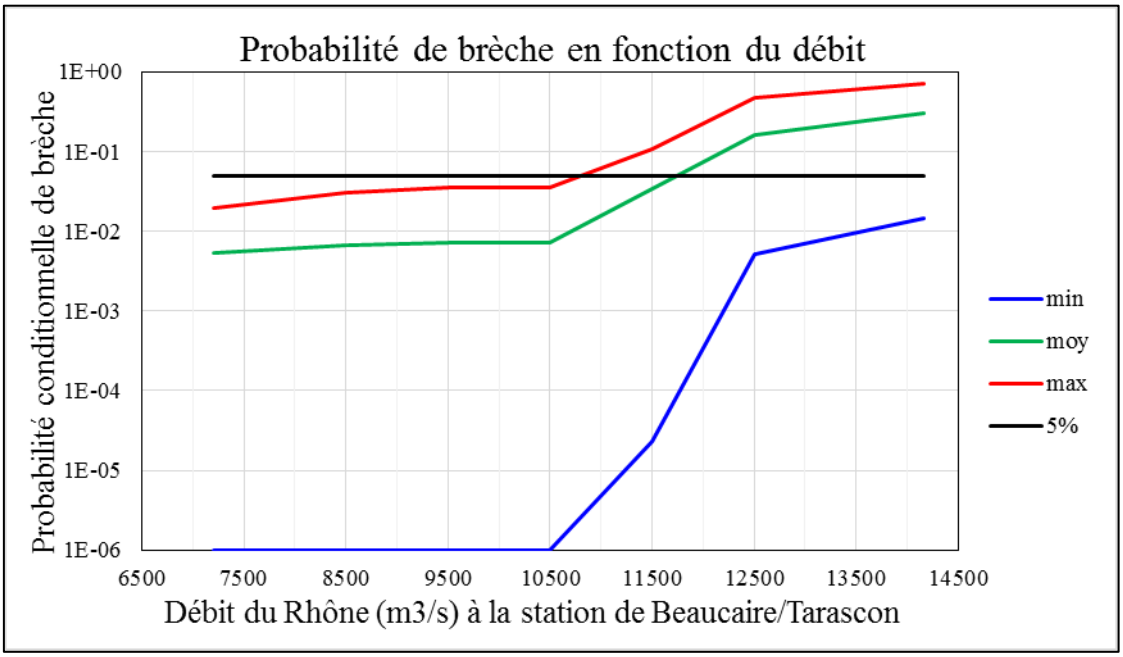


Figure 119 : Probabilité de brèche en fct du débit pour le tronçon Port de l'Amarée

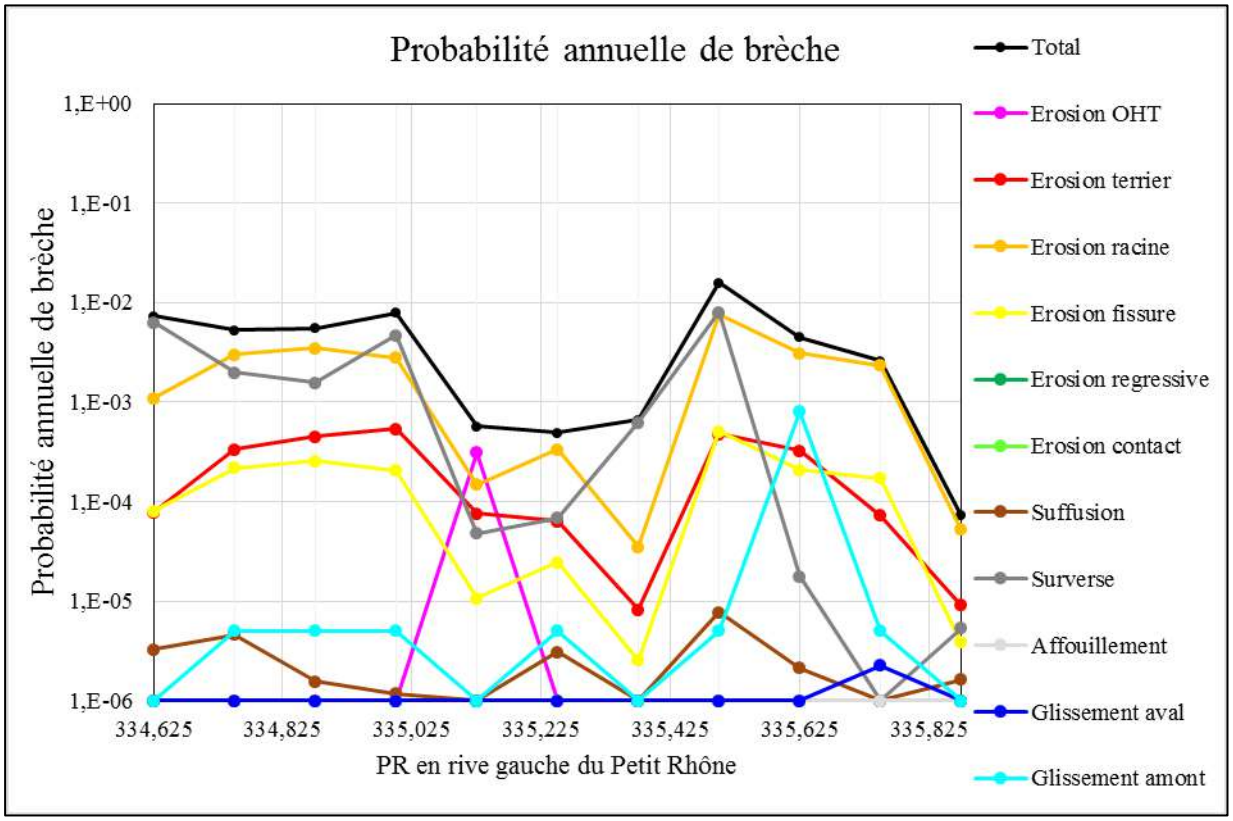


Figure 120 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Port de l'Amarée

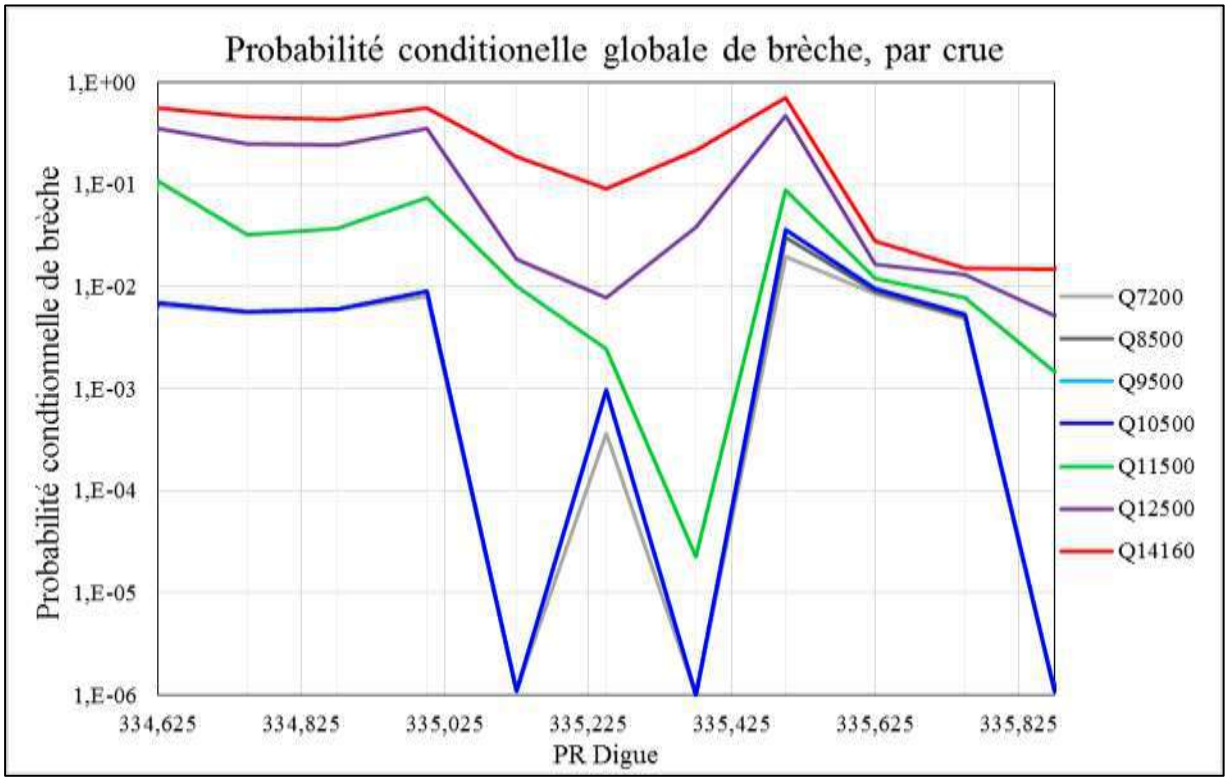


Figure 121 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Port de l'Amarée

3.34 REMBLAI : L'AMAREE (PRG18)

Le tronçon Amarée mesure 600 m, il comprend les PR0.125 compris entre PRG 336 et 336.5; le tronçon a subit différents programmes de réparations ; il est intégralement carrossable, mais accessible facilement par l'aval uniquement.

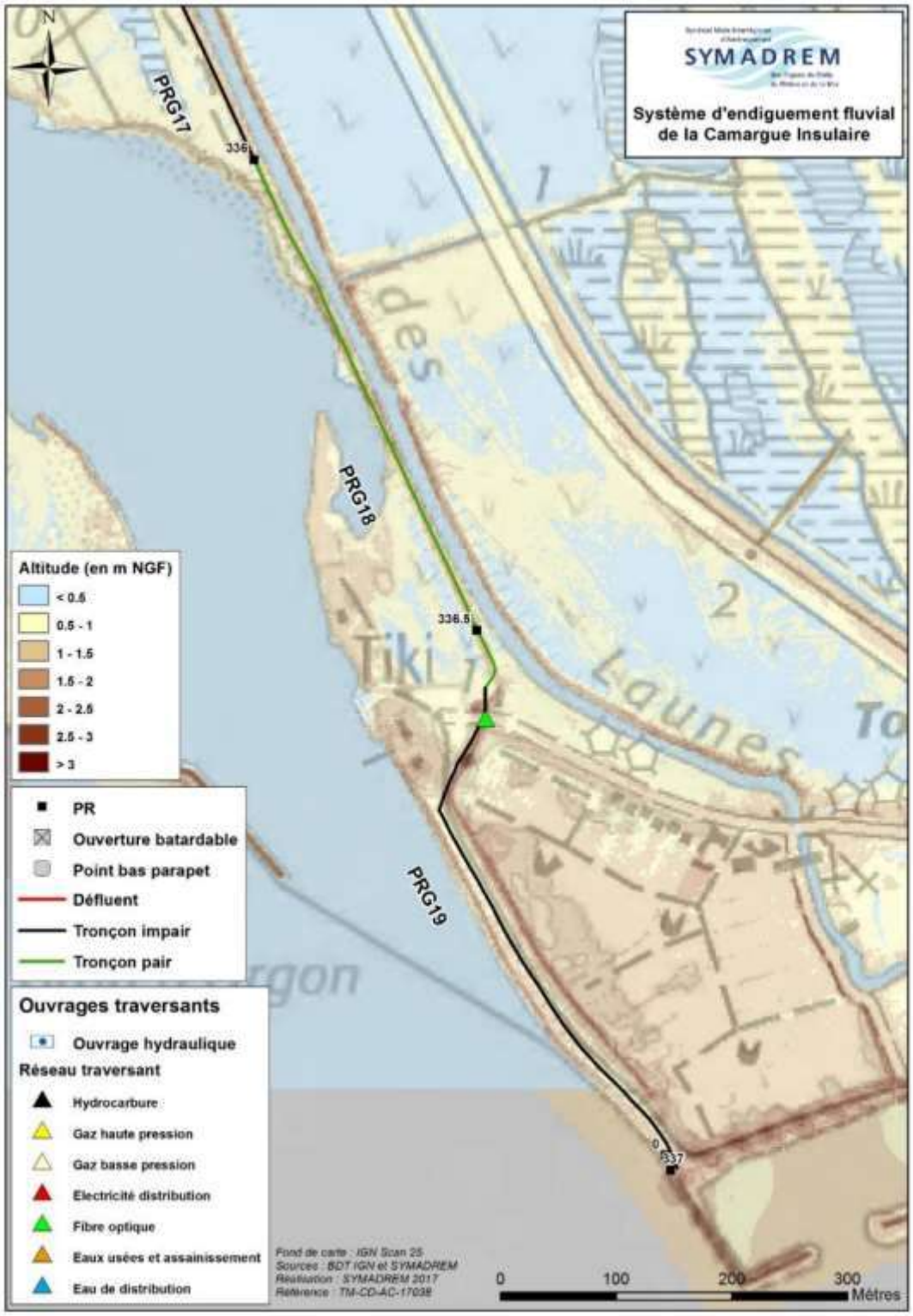


Figure 64. Plan de situation de la digue du mas d'Icard au Tiki 5 : l'Amarée

Tableau 124. Synthèse de géométrie, tronçon Amarée

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	2,0	1,6	1,8	0,2
Cote de pied de digue aval	m NGF	1,0	-0,1	0,4	0,4
Cote à 20m du pdav	m NGF	1,6	0,8	1,2	0,3
Cote de pied de digue amont	m NGF	1,3	0,1	0,5	0,5
Cote à 20m du pdam	m NGF	0,8	0,2	0,6	0,2
Hauteur de digue coté aval	m	1,7	0,9	1,3	0,4
Hauteur de digue côté amont	m	1,7	0,3	1,2	0,6
Fruit aval	L/V	15,9	1,6	4,8	6,2
Fruit amont	L/V	5,1	1,9	3,5	1,4
Largeur du ségonnal	m	102	0	40	39

Ce tronçon est contre le Rhône sur une partie du tracé où la bathymétrie est de l'ordre de -1 m NGF.

Tableau 125. Données hydrauliques, tronçon Amarée

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	0,7	0,7	0,9	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,8
8 500	0,9	0,8	0,7	0,9	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
9 500	0,9	0,9	0,6	0,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
10 500	0,9	0,9	0,6	0,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7
11 500	1,0	1,0	0,6	0,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,6
12 500	1,3	1,3	0,3	0,5	0,1	0,1	0,0	0,0	0,4
14 160	1,5	1,5	0,1	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,2

Caractéristiques du tronçon Amarée vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue du XIXème siècle avec un REX neutre. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il n'y a pas de réseau ou d'ouvrage connu sur ce tronçon.

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit - racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec présence d'arbres sur un talus. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,9
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit - fissure
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle sans observation d'infiltrations ou de terriers par le passé. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques sont inexistantes sur ce tronçon. La couche de sable considérée, dont le toit est à 1m de profondeur, mesure 5m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il n'y a pas de brèches connues. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue n'a pas été investiguée. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 0m et la pente hydraulique est de 1 à 11 cm/km; la berge est protégée par des enrochements avec sabot dans la zone où il n'y a pas de ségonnal.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge avec enrochements et sabot

Tableau 126. Résultats des calculs de probabilité, tronçon Amarée

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**1E-06**
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**2E-06**
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**2E-06**
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**2E-05**
12 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	4E-06	4E-13	0E+00	0E+00			**8E-03**
14 160	9E-05	0E+00	7E-03	5E-04	0E+00	2E-10	2E-08	8E-03	4E-13	1E-06	6E-06			**3E-02**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	2E-03	0E+00	3E-03	2E-04	4E-10	6E-09	0E+00	8E-06	1E-07	7E-04	1E-05			**6E-03**
8 500	2E-03	0E+00	3E-03	2E-04	4E-10	6E-09	0E+00	9E-06	1E-07	7E-04	1E-05			**6E-03**
9 500	2E-03	0E+00	3E-03	2E-04	9E-10	7E-09	2E-09	3E-05	1E-07	7E-04	2E-05			**6E-03**
10 500	2E-03	0E+00	3E-03	2E-04	9E-10	7E-09	2E-09	3E-05	1E-07	7E-04	2E-05			**6E-03**
11 500	2E-03	0E+00	3E-03	2E-04	9E-10	8E-09	2E-09	1E-04	1E-07	7E-04	2E-05			**7E-03**
12 500	1E-02	0E+00	2E-02	1E-03	8E-09	2E-07	1E-06	7E-02	1E-07	7E-04	2E-05			**9E-02**
14 160	3E-02	0E+00	6E-02	4E-03	1E-08	9E-07	1E-04	3E-01	1E-07	7E-04	2E-05			**3E-01**

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	4E-03	0E+00	6E-03	4E-04	2E-09	2E-08	0E+00	3E-05	7E-07	3E-03	6E-05			**1E-02**
8 500	4E-03	0E+00	6E-03	4E-04	2E-09	2E-08	0E+00	4E-05	7E-07	3E-03	6E-05			**1E-02**
9 500	5E-03	0E+00	6E-03	4E-04	2E-09	2E-08	2E-09	2E-04	7E-07	3E-03	6E-05			**1E-02**
10 500	5E-03	0E+00	6E-03	4E-04	2E-09	2E-08	2E-09	2E-04	7E-07	3E-03	6E-05			**1E-02**
11 500	5E-03	0E+00	6E-03	5E-04	2E-09	2E-08	2E-09	6E-04	7E-07	3E-03	6E-05			**1E-02**
12 500	5E-02	0E+00	7E-02	5E-03	2E-08	9E-07	7E-06	2E-01	7E-07	3E-03	6E-05			**3E-01**
14 160	7E-02	0E+00	1E-01	9E-03	2E-08	4E-06	3E-04	6E-01	7E-07	3E-03	7E-05			**6E-01**

Probabilité annuelle maximale de brèche:	**8E-03**
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	**4E-03**

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au PRG 336.375. Elle est de 8.10^{-3}, ce qui correspond à un événement probable (classe B) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.

L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 11 500 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 12 500 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 4.10^{-3}, ce qui correspond à un événement probable (classe B) ;
- un risque inacceptable ($> 10^{-4}$) au regard des enjeux ;
- la nécessité de mettre en oeuvre des mesures de réduction du risque, qui seront présentés au chapitre 9bis ;
- une crue de sûreté de 11 500 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour ce tronçon comme pour ceux plus à l'aval, il apparait un risque à partir du moment où la digue est en eau ; or les niveaux dans cette zone sont plus dépendants du niveau marin que du débit de crue ; ainsi les crues de sureté et de danger ont été recalées.
Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 8 500 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 12 500 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3.

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 11 500 m^3/s qui correspond au seuil de 5 % de la probabilité conditionnelle moyenne.

Le principal risque est l'érosion de conduit, en particulier du à une racine morte, situé sur tout le tracé ; la stabilité du talus aval est un risque localisé au PRG 336.25. Pour les plus fortes crues, le risque de surverse est prépondérant.

Ce tronçon sera prochainement repris dans le cadre des travaux sur le petit Rhône.

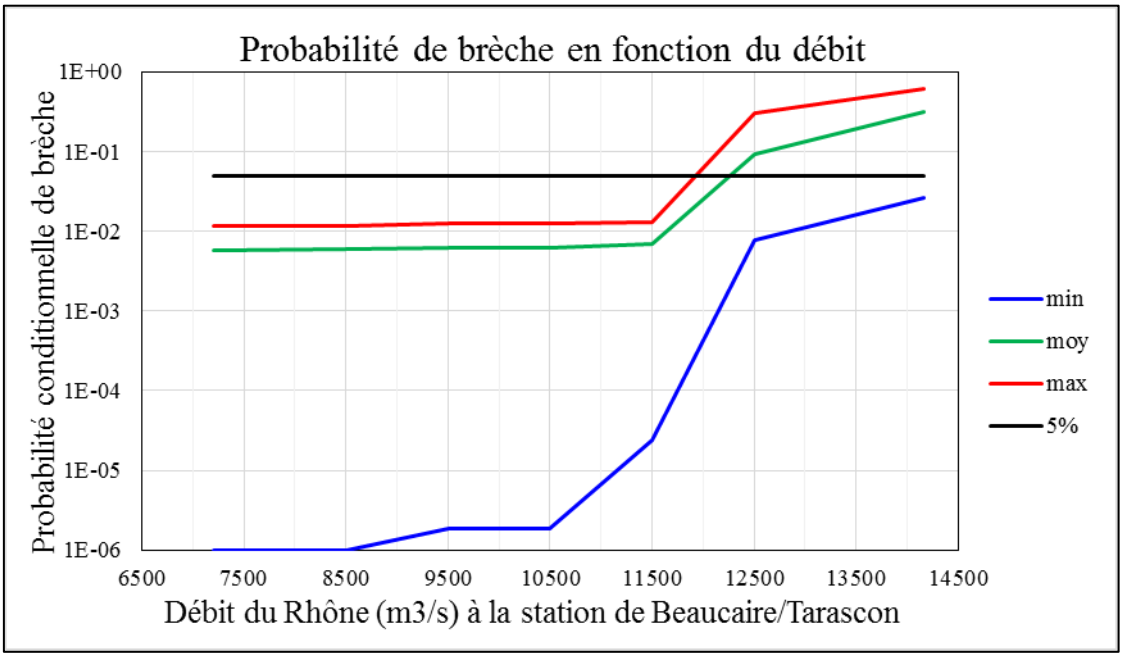


Figure 122 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon Amarée

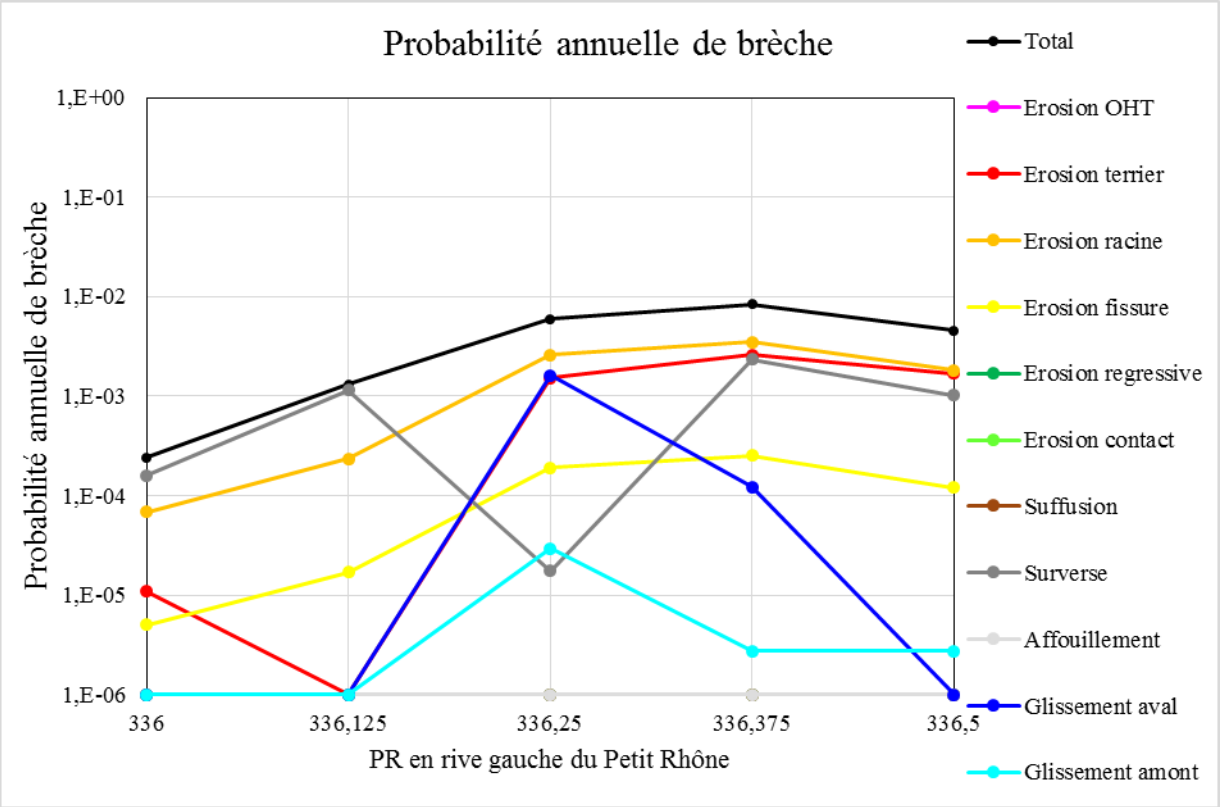


Figure 123 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon Amarée

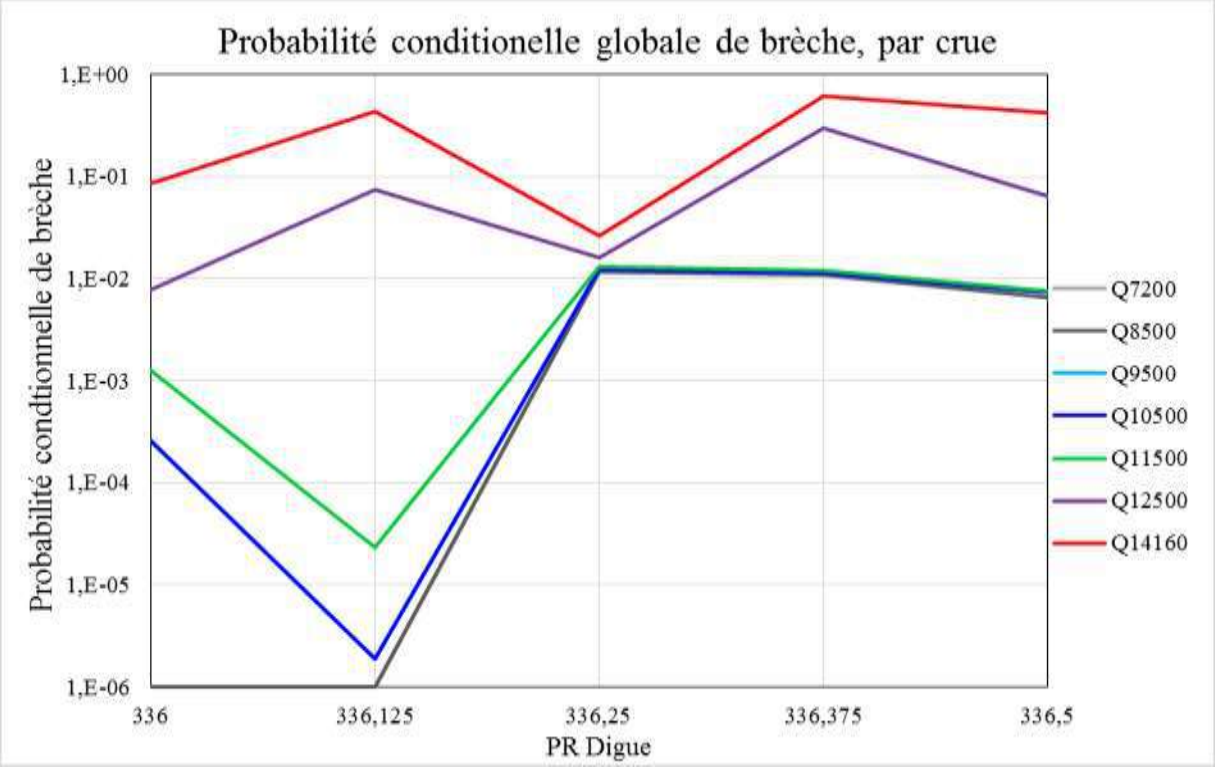


Figure 124 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon Amarée

3.35 REMBLAI : L'EMBOUCHURE (PRG19)

Le tronçon de l'embouchure mesure 500 m, il comprend les PR0.125 compris entre PRG 336.625 et 337 ; il n'est pas carrossable mais accessible en pied aval tout le long via le camping.

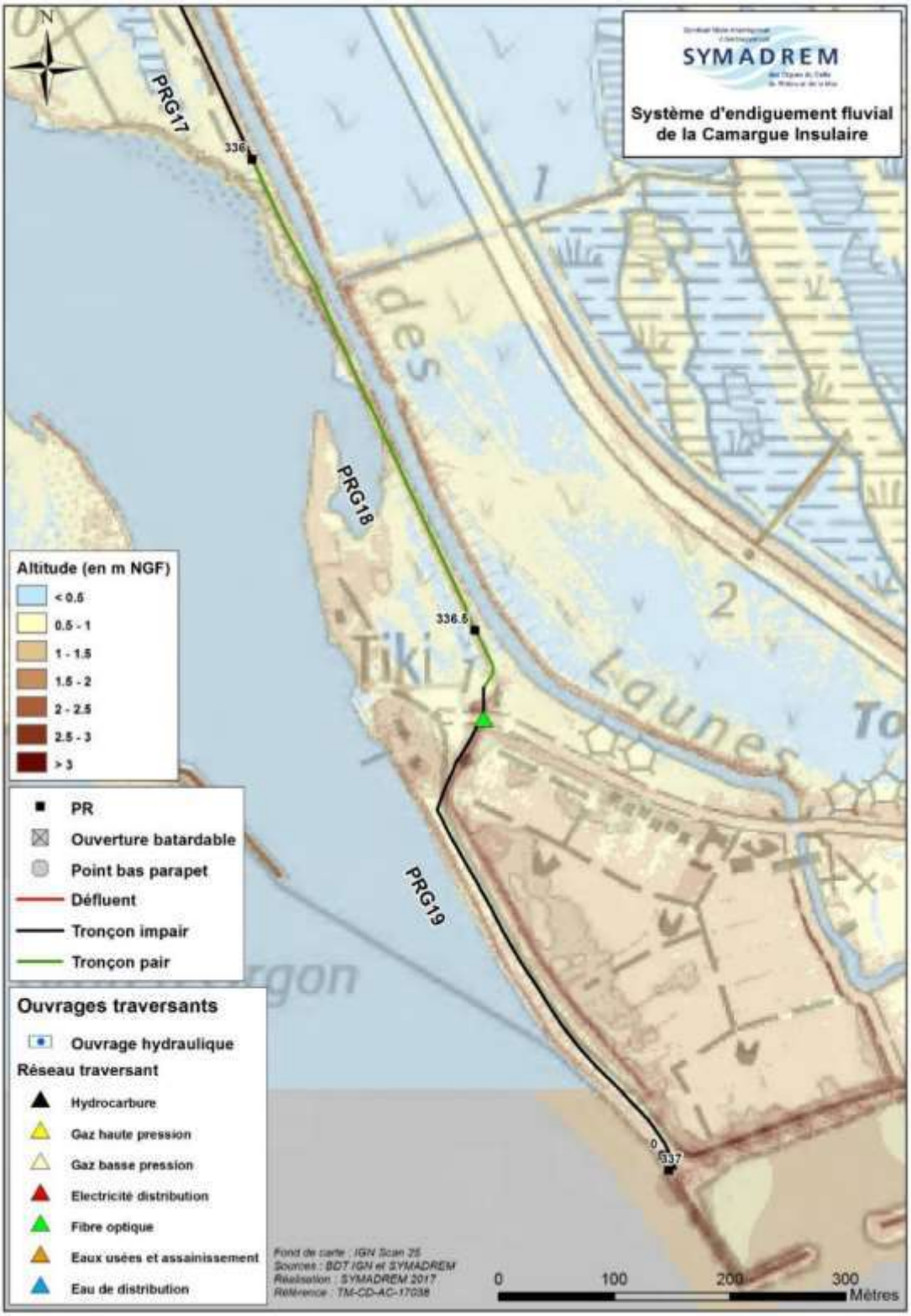


Figure 65. Plan de situation de l'Embouchure

Tableau 127. Synthèse de géométrie, tronçon de l'embouchure

Données		Max	Min	Moy	E T
Cote de crête	m NGF	3,1	1,8	2,6	0,6
Cote de pied de digue aval	m NGF	1,7	1,4	1,5	0,1
Cote à 20m du pdav	m NGF	1,6	0,9	1,3	0,3
Cote de pied de digue amont	m NGF	1,6	1,0	1,3	0,3
Cote à 20m du pdam	m NGF	1,2	-1,8	0,3	1,4
Hauteur de digue coté aval	m	1,8	0,2	1,1	0,7
Hauteur de digue côté amont	m	1,9	0,2	1,3	0,8
Fruit aval	L/V	14,4	1,9	5,4	6,0
Fruit amont	L/V	27,3	2,1	9,0	12,2
Largeur du ségonnal	m	48	17	32	13

Ce tronçon est relativement proche du Rhône et de la mer, la bathymétrie dans cette zone est de -2 m NGF.

Tableau 128. Données hydrauliques, tronçon de l'embouchure

Débit	Cote ligne d'eau		Revanche		Gradient		Gradient		Revanche
	m NGF		m		digue		fondation		/Haval
m^3/s	Amont	Aval	Min	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Moy
7 500	0,6	0,6	1,2	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
8 500	0,8	0,8	1,0	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
9 500	0,9	0,9	0,9	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
10 500	0,9	0,9	0,9	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
11 500	1,0	1,0	0,9	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
12 500	1,3	1,3	0,5	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9
14 160	1,5	1,5	0,3	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8

Caractéristiques du tronçon de l'embouchure vis-à-vis de l'analyse fonctionnelle :

Scénario de brèche 1 : Erosion de conduit - terrier de fouisseur
La fonction étanchéité est liée à la localisation de terriers, elle-même liée à la typologie de digue. Sur ce tronçon il y a une digue du XIXème siècle avec un REX neutre. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 2 : Erosion de conduit - Vide autour d'un ouvrage traversant
Il n'y a pas de réseau ou d'ouvrage connu sur ce tronçon.

Scénario de brèche 3 : Erosion de conduit - racine
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue du XIXème siècle avec présence d'arbres sur les deux talus. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,99
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 4 : Erosion de conduit - fissure
Sur ce tronçon, l'ouvrage est une digue ancienne sans observation d'infiltrations ou de terriers par le passé. La résistance à l'érosion est réalisée par des matériaux A1. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité d'initiation : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR
- Probabilité de non intervention : loi relative aux matériaux A1+A2 suivant GTR

Scénario de brèche 5 : Erosion régressive

L'érosion régressive dépend de la présence d'une couche de sable en fondation ; les données géotechniques sont inexistantes sur ce tronçon. La couche de sable considérée, dont le toit est à 1m de profondeur, mesure 5m d'épaisseur. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de soulèvement hydraulique : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 6 : Erosion de contact

La présence de brèche historique conditionne celle de grave dans le corps de digue, sur ce tronçon il n'y a pas de brèches connues. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,001
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 7 : Suffusion interne

L'historique du rehaussement des digues peut avoir laissé des couches de graves suffusives dans le corps de digue. Sur ce tronçon, la digue n'a pas été investiguée. Concernant le claquage hydraulique, la digue est ancienne et la qualité du perré, quand il est présent, est incertaine ; il n'y a pas eu de recharge aval, le bouchon considéré est alors de 1m. Il n'y a pas de système de filtration.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité de localisation : 0,1
- Probabilité de claquage hydraulique : épaisseur de bouchon de 1 m
- Probabilité d'initiation : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non filtration : 1
- Probabilité de progression : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non détection : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.
- Probabilité de non intervention : conformément à la formule établie au chapitre 7.1.

Scénario de brèche 8 : Erosion après surverse

En cas de surverse, la nature du parement aval détermine son érodabilité. Sur ce tronçon il est en terre damée.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative au parement en terre damée

Scénario de brèche 9 : Affouillement

La largeur minimum du ségonnal est de 17m et la pente hydraulique est de 1 à 11 cm/km; la berge est protégée par des enrochements anciens.

Conformément à la méthodologie exposée au chapitre 7.1., les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ont été calculées avec les hypothèses suivantes :

- Probabilité d'initiation : loi relative à une berge avec enrochements anciens

Tableau 129. Résultats des calculs de probabilité, tronçon de l'embouchure

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **minimum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			1E-06
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			1E-06
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			1E-06
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			1E-06
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			1E-06
12 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			1E-06
14 160	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-12	0E+00	0E+00			7E-04

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **moyenne** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-09	0E+00	0E+00			1E-06
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	1E-09	0E+00	0E+00			1E-06
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	3E-09	0E+00	0E+00	1E-06	1E-09	0E+00	0E+00			1E-06
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	3E-09	0E+00	0E+00	1E-06	1E-09	0E+00	0E+00			1E-06
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	3E-09	0E+00	0E+00	1E-06	1E-09	0E+00	0E+00			1E-06
12 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	5E-09	5E-11	7E-09	4E-04	1E-09	0E+00	0E+00			4E-04
14 160	1E-06	0E+00	2E-03	1E-04	8E-09	2E-08	1E-05	2E-02	1E-09	1E-04	8E-06			3E-02

Crue	Probabilité conditionnelle de brèche **maximum** par crue et par scénario													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	**Glob**
7 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-09	0E+00	0E+00			1E-06
8 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-06	4E-09	0E+00	0E+00			1E-06
9 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-09	0E+00	0E+00			1E-06
10 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-09	0E+00	0E+00			1E-06
11 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	0E+00	0E+00	1E-06	4E-09	0E+00	0E+00			1E-06
12 500	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E-08	1E-10	2E-08	2E-03	4E-09	0E+00	0E+00			2E-03
14 160	2E-06	0E+00	3E-03	2E-04	1E-08	6E-08	6E-05	1E-01	4E-09	3E-04	1E-05			1E-01

Probabilité annuelle maximale de brèche:	2E-04
Probabilité annuelle moyenne de brèche:	6E-05

Conclusion :

L'analyse menée sur les probabilités moyennes et maximales nous amène aux conclusions suivantes :

La probabilité annuelle maximale de brèche se situe au PRG 337. Elle est de 2.10^{-4}, ce qui correspond à un événement improbable (classe C) suivant la grille de lecture du guide de lecture des EDD barrages (Cf. §1.14.) Cette gamme de probabilité rend le risque inacceptable (> 10^{-4}) au regard des enjeux (Cf. critère d'acceptabilité au §1.4) et nécessite des mesures de réduction du risque, qui seront présentées au chapitre 9bis.
L'estimation de la crue de sûreté (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 5 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 14 160 m^3/s.

L'estimation de la crue de danger (correspondant à une probabilité conditionnelle de brèche de 50 %) basée sur les calculs de probabilités maximales donne une crue de 14 160 m^3/s.

La même analyse, conduite sur la base des probabilités moyennes, amène aux conclusions suivantes :

- une probabilité annuelle moyenne de brèche de 6.10^{-5}, ce qui correspond à un événement trèsimprobable (classe D) ;
- un risque acceptable (< 10^{-4}) au regard des enjeux ;
- une crue de sûreté de 14 160 m^3/s,
- une crue de danger de 14 160 m^3/s

Pour ce tronçon comme pour ceux à l'amont, il apparait un risque à partir du moment où la digue est en eau ; or les niveaux dans cette zone sont plus dépendants du niveau marin que du débit de crue ; ainsi les crues de sureté et de danger ont été recalées.
Pour l'étude des risques de venues d'eau (Cf. chapitre 8) et la détermination des niveaux de protection des sous-zones protégées, nous retiendrons une crue de sûreté de 8 500 m^3/s Pour la détermination du scénario d'inondation n°1 et une crue de danger de 12 500 m^3/s pour la détermination du scénario d'inondation n°3.

Pour la détermination du niveau d'alerte 4 (Cf. chapitre 9), nous retiendrons la crue de 12 500 m^3/s qui correspond à la crue de danger retenue.

Le principal risque est un glissement du talus aval, situé sur la partie amont du tronçon. A l'extrémité aval c'est la surverse qui présente le risque le plus important pour les fortes crues/tempêtes.

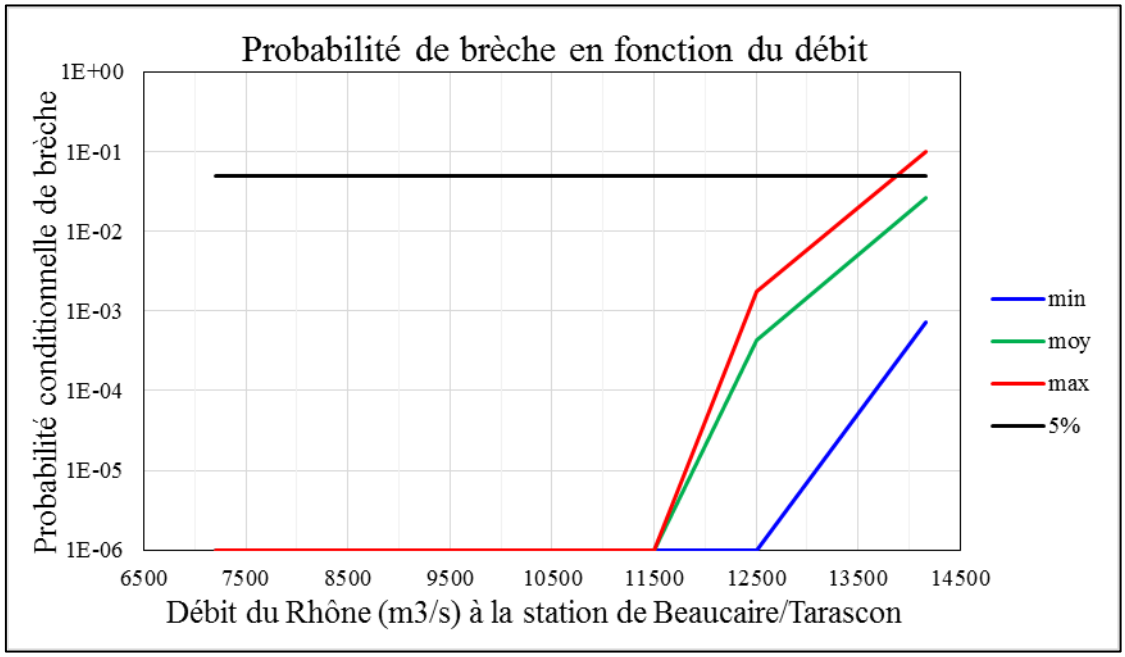


Figure 125 : Probabilité de brèche en fonction du débit pour le tronçon de l'embouchure

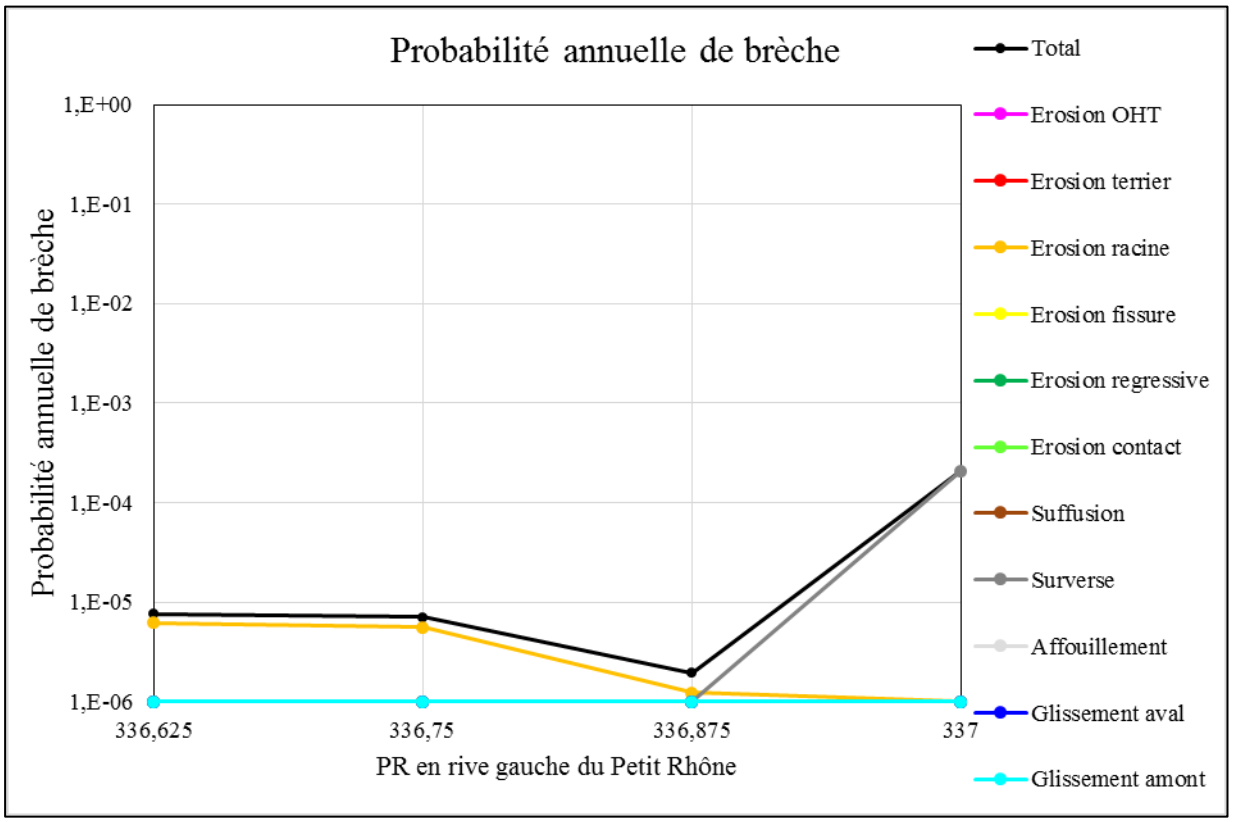


Figure 126 : Probabilité annuelle de brèche le long du tronçon de l'embouchure

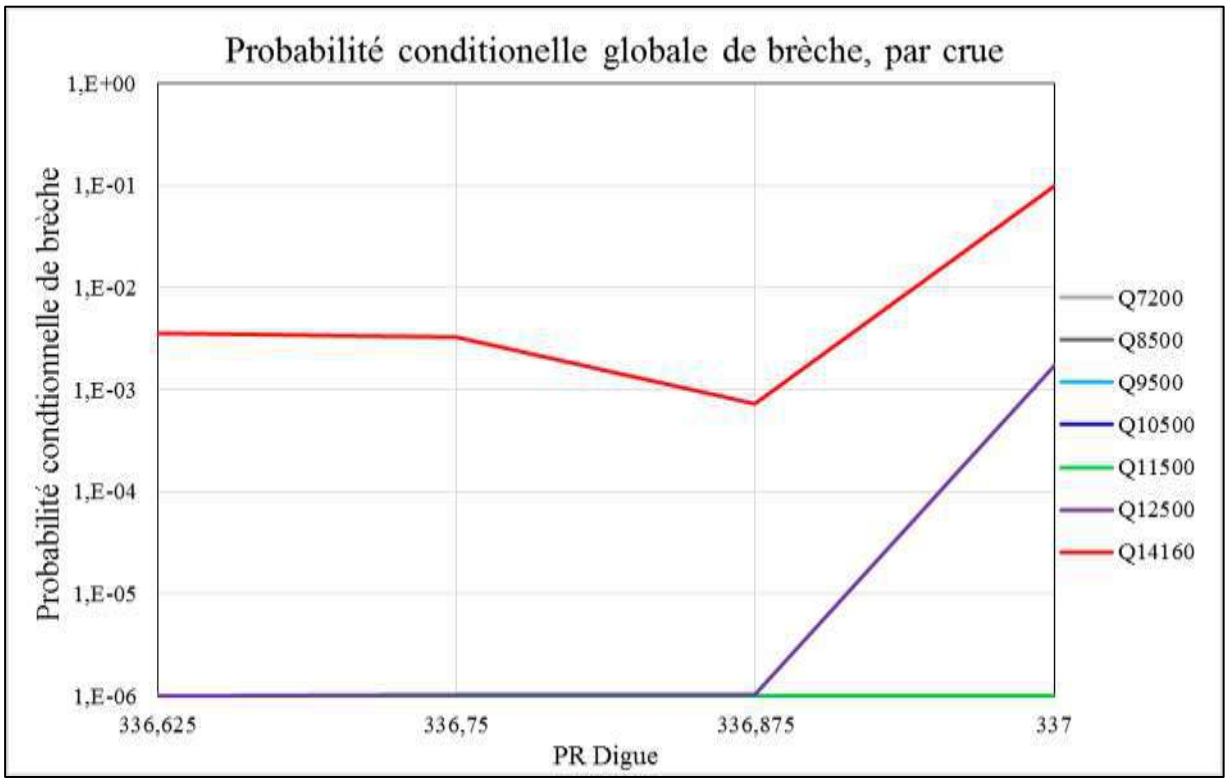


Figure 127 : Probabilité de brèche par crue, le long du tronçon de l'embouchure

Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement SYMADREM des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT FLUVIAL CAMARGUE INSULAIRE

DOCUMENT B

CHAPITRE N°8-B : ETUDE DES RISQUES DE VENUES D'EAU DANS ET EN DEHORS DE LA ZONE PROTEGEE

Version	Date	Commentaires
B-0	27/06/2018	Version initiale
B-1	31/01/2020	Modifications suite à instruction réglementaire par DREAL PACA et ARA
B-2	07/04/2020	Corrections hauteurs négatives + titres scénarios n°1

Sommaire

Table des matières

1 Introduction 6
2 Définitions réglementaires et techniques 7
2.1 Définitions réglementaires 7
2.2 Définitions techniques 8
3 Fonctionnement hydraulique du système 12
3.1 Scénarios d'inondation pris en compte 12
3.2 Probabilités de brèches et classe de débits 13
3.3 Niveaux caractéristiques des systèmes d'endiguement 17
3.4 Fonctionnement hydraulique du système d'endiguement 23
3.5 Cas des zones protégées avec plusieurs niveaux de protection 29
3.6 Limites de l'étude de dangers 32
3.7 Impact quantitatif d'une inondation avec et sans brèche 33
4 Retour d'expérience accidentologique 36
4.1 Définitions et données 36
4.2 Bilan des brèches sur la période 1840-2016 37
4.3 Conséquences des brèches sur les zones protégées 39
4.4 Enseignement des crues passées 49
5 Modélisation hydraulique des crues & inondations 56
5.1 Modèles utilisés 56
5.2 Scénarios de crues modélisés 63
5.3 Paramètres déterminants dans la modélisation des brèches 66
5.3.1 Débit de pointe et durée de la crue 66
5.3.2 Impact des brèches sur la ligne d'eau et les débits 68
5.3.3 Evolution des niveaux dans le Delta en fonction du débit en tête de Delta 73
5.3.4 Autres hypothèses retenues 73
6 Scénarios d'inondation modélisés 75
6.1 Caractéristiques des scénarios modélisés et localisation 75
6.2 Brèche amont de Cazeneuve 77
6.2.1 Crue 10500 – Etat actuel/initial - brèche amont Cazeneuve – PRG 282,0 77
6.2.2 Crue 11500 – Etat actuel/initial - brèche amont Cazeneuve – PRG 282,0 85
6.2.3 Crue 12500 – Etat actuel/initial - brèche amont Cazeneuve – PRG 282,0 91
6.2.4 Crue 14160 – Etat actuel/initial - brèche amont Cazeneuve – PRG 282,0 96
6.3 Brèche aval de Cazeneuve 103

6.3.1 Crue 10500 – Etat actuel/initial - Brèche aval Cazeneuve – PRG 283,0 103
6.3.2 Crue 11500 – Etat actuel/initial - Brèche aval Cazeneuve – PRG 283,0 110
6.3.3 Crue 12500 – Etat actuel/initial - Brèche aval Cazeneuve – PRG 283,0 115
6.4 Brèche amont A54 121
6.4.1 Crue 10500 – Etat actuel/initial – Brèche A54 – PRG 288,4 121
6.4.2 Crue 11500 – Etat actuel/initial – Brèche A54 – PRG 288,4 125
6.4.3 Crue 12500 – Etat actuel/initial – Brèche A54 – PRG 288,4 128
6.4.4 Crue 14160 – Etat actuel/initial – Brèche A54 – PRG 288,4 131
6.5 Brèche de Saliers 134
6.5.1 Crue 10500 – Etat actuel/initial - Brèche Saliers – PRG 295,5 134
6.5.2 Crue 11500 – Etat actuel/initial - Brèche Saliers – PRG 295,5 141
6.6 Brèche de Figarès 147
6.6.1 Crue 10500 - Etat actuel/initial – Brèche Figarès – PRG 298,0 147
6.6.2 Crue 11500 - Etat actuel/initial – Brèche Figarès – PRG 298,0 154
6.6.3 Crue 12500 - Etat actuel/initial – Brèche Figarès – PRG 298,0 160
6.6.4 Crue 14160 - Etat actuel/initial – Brèche Figarès – PRG 298,0 165
6.7 Brèche Aval Albaron 171
6.7.1 Crue 10500 – Etat actuel/initial - Brèche aval Albaron – PRG 307,8 171
6.7.2 Crue 11500 – Etat actuel/initial - Brèche aval Albaron – PRG 307,8 178
6.7.3 Crue 12500 – Etat actuel/initial - Brèche aval Albaron – PRG 307,8 184
6.7.4 Crue 14160 – Etat actuel/initial - Brèche aval Albaron – PRG 307,8 189
6.8 Brèche trinquetaille 194
6.9 Brèche de Montlong 196
6.9.1 Crue 11500 – Etat actuel/initial – Brèche Montlong – GRD 289,2 196
6.9.2 Crue 12500 – Etat actuel/initial – Brèche Montlong 200 m – GRD 298,2 203
6.9.3 Crue 12500 – Etat actuel/initial – Brèche Montlong 400 m – GRD 298,2 207
6.9.4 Crue 14160 – Etat actuel/initial – Brèche Montlong – GRD 289,2 214
6.10 Brèche d'Augery 221
6.10.1 Crue 11500 – Etat actuel/initial – Brèche Augery – GRD 294,5 221
6.10.2 Crue 12500 – Etat actuel/initial – Brèche Augery 200 ml – GRD 294,5 229
6.10.3 Crue 12500 – Etat actuel/initial – Brèche Augery 400 ml – GRD 294,5 233
6.10.4 Crue 14160 – Etat actuel/initial – Brèche Augery – GRD 294,5 239
6.11 Brèche de Boisverdun 245
6.11.1 Crue 11500 – Etat actuel/initial – Brèche Boisverdun – GRD 309,5 245
6.11.2 Crue 12500 – Etat actuel/initial – Brèche Boisverdun 200 m – GRD 309,5 ... 252
6.11.3 Crue 12500 – Etat actuel/initial – Brèche Boisverdun 400 m – GRD 309,5 ... 256

6.11.4 Crue 14160 – Etat actuel/initial – Brèche Boisverdun – GRD 309,5 263
6.12 Brèche d'Amérique 269
6.12.1 Crue 11500 – Etat actuel/initial – Brèche Amérique – GRD 313,7 269
6.12.2 Crue 12500 – Etat actuel/initial – Brèche Amérique – GRD 313,7 273
6.13 Brèche de Barcarin 277
6.13.1 Crue 11500 – Etat actuel/initial – Brèche Barcarin – GRD 315,7 277
6.13.2 Crue 12500 – Etat actuel/initial – Brèche Barcarin – GRD 315,7 281
6.14 Brèche de l'Esquineau 285
6.14.1 Crue 11500 – Etat actuel/initial – Brèche Esquineau – GRD 319,1 285
6.14.2 Crue 12500 – Etat actuel/initial – Brèche Esquineau – GRD 319,1 289
6.15 Surverse sans brèche 293
6.15.1 Crue 10500 – Etat actuel/initial – Surverse sans brèche 293
6.15.2 Crue 11500 – Etat actuel/initial – Surverse sans brèche 297
6.15.3 Crue 12500 – Etat actuel/initial – Surverse sans brèche 300
6.15.4 Crue 14160 (niveau mer 1,5 m NGF) – Etat actuel/initial – Surverse sans brèche 303
6.15.5 Crue 14160 (niveau mer 0,5 m NGF) – Etat actuel/initial – Surverse sans brèche 306
6.16 Enseignements liés aux modélisations 307
7 Scénarios d'inondation construits 311
7.1 Crue 8500 (volume de brèche ≈ 250 000 m^3) 311
7.2 Crue 9500 (volume de brèche ≈ 20 millions m^3) 318
7.3 Crue 10500 (volume de brèche ≈ 40 à 50 millions m^3) 323
8 Scénario n°1 : Fonctionnement nominal du système d'endiguement 325
8.1 Niveaux de sûreté des digues 325
8.2 SC n°1 : Fonctionnement nominal pour une crue 7500 328
8.3 SC n°1 : Fonctionnement nominal pour une crue 8500 330
8.4 SC n°1 : Fonctionnement nominal pour une crue 9500 335
8.5 SC n°1 : Fonctionnement nominal pour une crue 10500 342
8.6 SC n°1 : Fonctionnement nominal pour une crue 11500 349
8.7 SC n°1 : Fonctionnement nominal pour une crue 12500 356
8.8 SC n°1 : Fonctionnement nominal pour une crue 14160 363
8.9 Conclusion du scénario n°1 et niveaux de protection retenu 370
9 Scénario n°2 : Défaillance fonctionnelle du système d'endiguement pour un aléa correspondant à l'atteinte du niveau de protection 375
9.1 Non mise en place de batardeaux 375
9.2 Rupture de batardeaux 375

9.3 Non fermeture des vannes d'ouvrages hydrauliques traversants 376
9.4 Rupture des vannes d'ouvrages hydrauliques traversants 376
10 Scénario n°3 : Fonctionnement Réaliste et porteur d'enseignement pour les services de secours 377
10.1 Niveaux de danger des digues 377
10.2 SC n°3 : Fonctionnement probable a certain pour une crue 7500 379
10.3 SC n°3 : Fonctionnement probable a certain pour une crue 8500 382
10.4 SC n°3 : Fonctionnement probable a certain pour une crue 9500 385
10.5 SC n°3 : Fonctionnement probable a certain pour une crue 10500 392
10.6 SC n°3 : Fonctionnement probable a certain pour une crue 11500 399
10.7 SC n°3 : Fonctionnement probable a certain pour une crue 12500 406
10.8 SC n°3 : Fonctionnement probable a certain pour une crue 14160 413

1 INTRODUCTION

Le présent chapitre relatif à l'étude des venues d'eau comprend 9 parties :

- une 1ère partie relative aux définitions réglementaires et techniques nécessaires à la bonne compréhension de la qualification des niveaux de protection et du risque aux personnes en fonction du débit du Rhône à Beaucaire/Tarascon,
- une 2ème partie relative à la description des différentes possibilités de fonctionnement hydraulique en périodes de crues,
- une 3ème partie relative au retour d'expérience accidentologique sur les systèmes d'endiguement et dans les zones protégées,
- une 4ème partie relative à la modélisation hydraulique des crues, la description des scénarios de crues retenus et les paramètres hydrauliques déterminants,
- une 5ème partie relative aux scénarios d'inondation modélisés avec ou sans brèche et à l'enseignement lié à ces modélisations ;
- une 6ème partie relative aux scénarios d'inondation construits à partir des modélisations décrites en 5ème partie ;
- une 7ème partie relative au scénario n°1 défini dans l'arrêté EDD 2017 modifié, à savoir le fonctionnement nominal du système d'endiguement pour les sept scénarios de crues compris entre 7500 et 14160 m^3/s,
- une 8ème partie relative au scénario n°2 défini dans l'arrêté EDD 2017 modifié, à savoir la défaillance fonctionnelle du système d'endiguement au droit des ouvrages traversants ou batardeaux pour le niveau de protection des ouvrages,
- une 9ème partie relative au scénario n°3 défini dans l'arrêté EDD 2017 modifié, à savoir un fonctionnement du système d'endiguement pour les sept scénarios de crues compris entre 7500 et 14160 m^3/s. Ce fonctionnement traite de la défaillance structurelle des ouvrages. Il est réaliste et porteur d'enseignement pour permettre aux autorités compétentes en matière de secours de s'organiser en conséquence.

2 DEFINITIONS REGLEMENTAIRES ET TECHNIQUES

Ce chapitre présente les définitions et les concepts essentiels de l'étude des risques de venues d'eau dans la zone protégée en provenance du système d'endiguement.

2.1 DEFINITIONS REGLEMENTAIRES

Le niveau de protection d'une zone exposée au risque d'inondation ou de submersion marine assuré par un système d'endiguement est défini réglementairement par l'article R.214-119-1 du Code de l'Environnement, qui stipule :

« le niveau de protection d'une zone exposée au risque d'inondation ou de submersion marine assuré par un système d'endiguement au sens de l'article R. 562-13 ou par un aménagement hydraulique au sens de l'article R. 562-18 est déterminé par la hauteur maximale que peut atteindre l'eau sans que cette zone soit inondée en raison du débordement, du contournement ou de la rupture des ouvrages de protection quand l'inondation provient directement du cours d'eau ou de la mer. Lorsque la taille et les caractéristiques de la zone exposée le justifient, plusieurs niveaux de protection peuvent être déterminés, chacun étant associé à une partie délimitée de la zone protégée. «Le niveau de protection d'un système d'endiguement ou d'un aménagement hydraulique est apprécié au regard soit d'un débit du cours d'eau en crue considéré ou d'une cote de niveau atteinte par celui-ci, soit d'un niveau marin pour le risque de submersion marine ».

L'arrêté du 30 septembre 2019 modifiant l'arrêté du 7 avril 2017 précisant le plan de l'étude de dangers des digues organisées en systèmes d'endiguement et des autres ouvrages conçus ou aménagés en vue de prévenir les inondations et les submersions a cadré réglementairement certains concepts

Ainsi il est dit dans la partie 8 de l'annexe à l'arrêté :

« Le scénario 1 est celui du fonctionnement nominal du système d'endiguement quand le niveau des écoulements, sous l'effet de la crue ou d'une submersion marine, correspond au niveau de protection. .... on admettra que cette montée maximale du niveau de l'eau peut générer un risque résiduel de rupture d'ouvrage de 5 % au plus …… En outre, des venues d'eau plus ou moins dangereuses sont possibles en dehors de la zone protégée. Si la zone protégée comprend des parties délimitées avec des niveaux de protection différents, un scénario sera étudié pour chaque niveau de protection. »

« Le scénario 3 est représentatif d'une défaillance structurelle du système d'endiguement. Pour que ce scénario reflète une situation de terrain réaliste et porteuse d'enseignements pour les services en charge des secours aux personnes, le niveau d'aléa retenu doit être tel qu'il génère un risque de rupture supérieur à 50 % .... »

Et partie 10.2. :

« Elles représenteront, selon un code couleur approprié:

1. *Les parties de territoires susceptibles d'être affectées par des venues d'eau non dangereuses ou peu dangereuses;*

2. *Les parties de territoires susceptibles d'être affectées par des venues d'eau dangereuses. Sont réputées dangereuses les venues d'eau telles que la hauteur d'eau atteint au moins 1 mètre ou le courant au moins 0,5 mètre par seconde;*
3. *Les parties de territoires où les venues d'eau peuvent être particulièrement dangereuses en raison de l'existence de points bas ou d'un «effet cuvette» ou de l'existence d'une zone de dissipation d'énergie importante ».*

2.2 DEFINITIONS TECHNIQUES

La détermination du niveau de protection réglementaire d'une zone exposée au risque d'inondation ou de submersion marine assuré par un système d'endiguement nécessite l'évaluation préalable d'autres niveaux, qui ne sont pas définies réglementairement. Il s'agit des niveaux de protection, de sûreté et de danger des digues constituant le système d'endiguement. Plusieurs définitions existent dans la littérature. On peut citer dans l'ordre chronologique certaines publications présentées, lors de colloques organisés par le comité français des barrages et réservoirs (CFBR) :

- Royet P., Degoutte G., Peyras L., Lavabre J. et Lemperrière F. (2009). *Cotes et crues de protection, de sûreté et danger de rupture.* Colloque CFBR-SHF « Dimensionnement et fonctionnement des évacuateurs de crues »,
- Degoutte G. & al. (2012). les déversoirs sur les digues fluviales – éditions quae,
- Mallet T. Degoutte G. Royet P. (2013) – niveaux de protection, de sûreté, de danger pour les digues fluviales – définitions, conséquences et responsabilités - 2ème Colloque National sur les digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions – CFBR,
- Ledoux P., Deniaud Y., Salmon D., Loudière D., Tourment R. (2016). contribution des études de dangers à la sûreté des systèmes d'endiguement. Colloque sûreté des barrages et enjeux, CFBR,
- Houdant B., Gehant B., (2019). Etablir la cote de danger d'un barrage. Questions soulevées et éléments méthodologiques. Colloque sur la justification des barrages : état de l'art et perspectives» CFBR.

Dès lors, pour l'évaluation des risques liés aux ouvrages, on retiendra les quatre niveaux suivants :

- le niveau de protection d'un ouvrage correspond au niveau à partir duquel des entrées d'eau en provenance de l'ouvrage doivent être prises en compte dans la zone protégée (scénario n°1 de l'arrêté EDD 2017 modifié). Ces entrées d'eau peuvent s'effectuer par brèche ou par surverse sur les digues (cas d'un déversoir de sécurité ou d'une digue résistante à la surverse). Ce niveau est confondu avec le niveau de sûreté infra, quand la digue n'est pas résistante à la surverse ou quand la probabilité de brèche est supérieure à 5 % au moment des premiers débordements sur les tronçons de digue affichés comme « résistants à la surverse ». Ce niveau est donc la valeur minimale entre les niveaux respectivement de sûreté et de submersion définis ci-après ;
- Le niveau de sûreté d'un ouvrage correspond au niveau à partir duquel des entrées d'eau par brèche doivent être considérées. Il correspond à une probabilité résiduelle de rupture au plus de 5 %, conformément à l'arrêté précité ;

- Le niveau de danger d'un ouvrage correspond à une probabilité de brèche de 50 %. Ce niveau va permettre de définir le scénario dit n°3 défini dans l'arrêté susvisé pour permettre aux services, en charge des secours aux personnes, de préparer la gestion de crise. Pour les systèmes d'endiguement neufs ou sécurisés dans les règles de l'art comportant des digues résistantes à la surverse, cette probabilité n'est en général pas atteinte au moment du déversement sur les digues non renforcées au déversement. Dans ce cas, le niveau de danger est retenu comme étant le niveau de crue correspondant à la submersion des digues non renforcées au déversement ;
- Le niveau de submersion d'un ouvrage correspond à l'atteinte par le cours d'eau du niveau de la crête de digue.

Pour l'évaluation des risques dans la zone protégée, on retiendra les 2 niveaux suivants :

- Le niveau de protection des personnes résidant dans une zone protégée. Il correspond au niveau de protection défini réglementairement par l'article R.214-119-1 du Code de l'Environnement. Il correspond à la situation « pieds secs » ;
- Le niveau de sécurité des personnes résidant dans une zone protégée correspond aux situations de venues d'eau peu dangereuses (1er niveau), dangereuses (2ème niveau) et très dangereuses (3ème niveau).

Conformément à l'arrêté précité, les zones de venues d'eau non dangereuses correspondent à des hauteurs d'eau inférieures à 1 m et des vitesses d'écoulement inférieures à 0,5 m/s ; et les zones de venues d'eau dangereuses à des hauteurs d'eau supérieures à 1 m ou des vitesses d'écoulement supérieures à 0,5 m/s. Les zones de venues d'eau très dangereuses non quantifiées réglementairement correspondent aux hauteurs d'eau supérieures à 2 m ou vitesse d'écoulement supérieures à 1 m/s.

La figure ci-dessous illustre cette caractérisation des venues d'eau au sein de la zone protégée

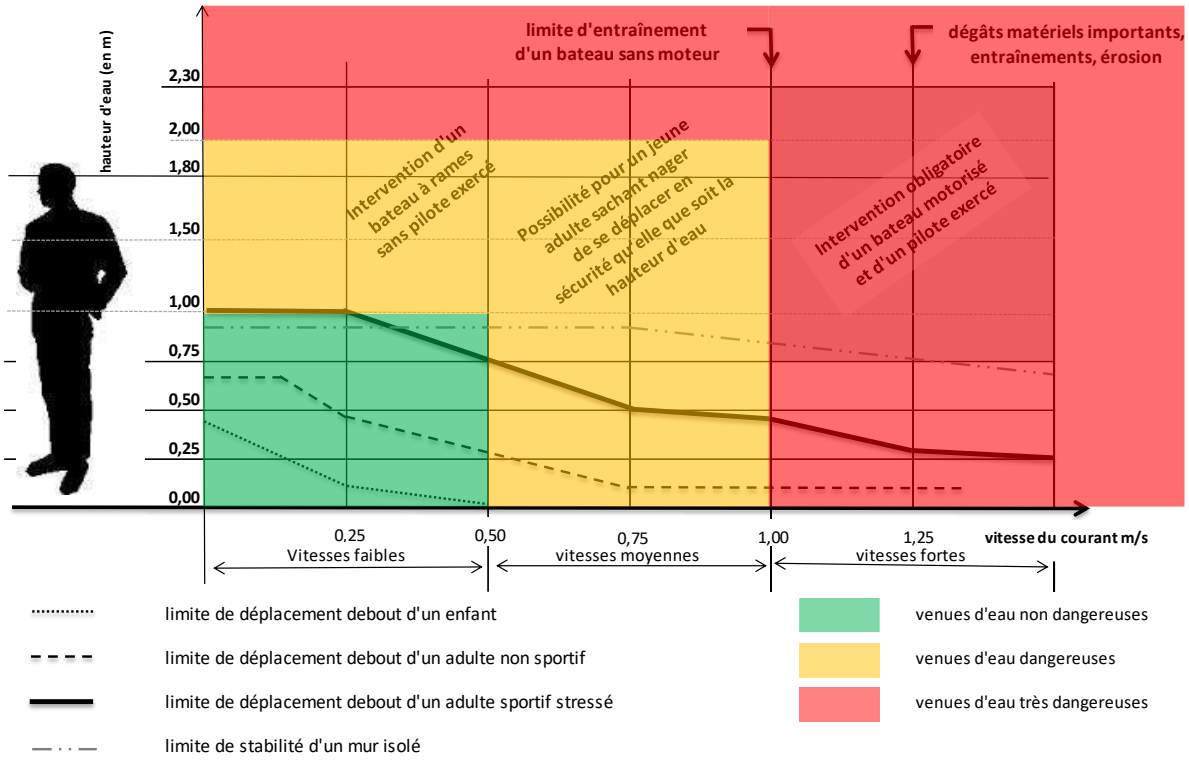


Figure 1. Caractérisation des venues d'eau en fonction de la hauteur et vitesse des écoulements

La figure suivante croise la caractérisation des venues d'eau définie dans l'arrêté EDD et l'aléa PPRI défini dans l'arrêté du 5 juillet 2019 relatif à la détermination, qualification et représentation cartographique de l'aléa de référence et de l'aléa à échéance 100 ans s'agissant de la submersion marine, dans le cadre de l'élaboration ou de la révision des plans de prévention des risques concernant les «aléas débordement de cours d'eau et submersion marine».

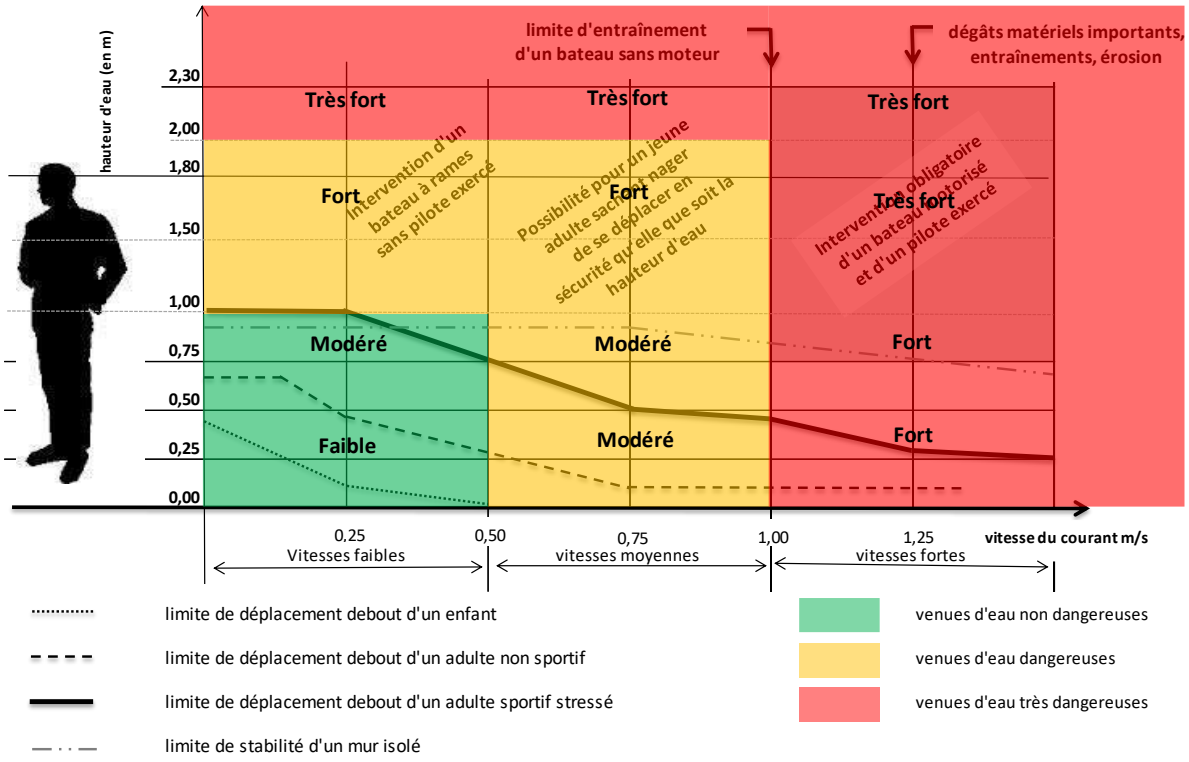


Figure 2. Caractérisation des venues d'eau de l'arrêté EDD 2017 et de l'aléa PPRI 2019

3 FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE DU SYSTEME

3.1 SCENARIOS D'INONDATION PRIS EN COMPTE

Quatre scénarios d'inondation en provenance du système d'endiguement ont été abordés. Trois concernent les risques incrémentaux (également qualifiés de technologiques, bien que ce qualificatif ne soit pas utilisé en France pour ce type d'ouvrage) induits par la présence même de la digue : la brèche avant surverse ; la brèche après surverse et la défaillance d'organes de fermeture des ouvrages traversants. Un scénario traite du risque lié à l'inondation, qui serait équivalente à celle causée en l'absence de digue : la surverse sans brèche (risque naturel). C'est la prise en compte de ces quatre scénarios d'inondation et du risque associé, qui a permis de déterminer et quantifier les niveaux de protection des sous-zones protégées et le niveau de sécurité des populations au-delà du niveau de protection.

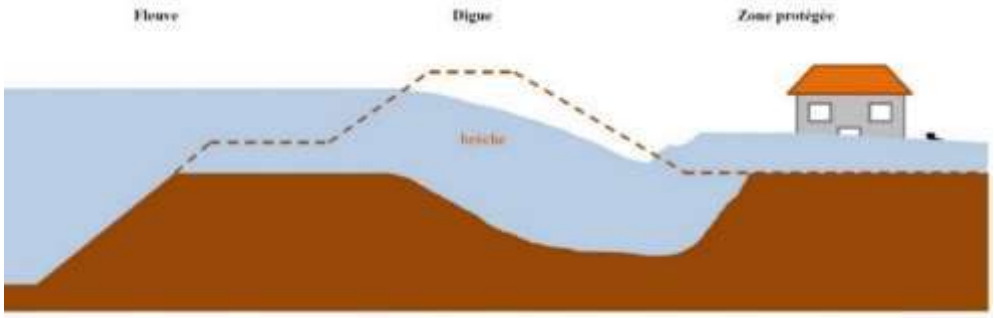


Figure 3. Brèche avant surverse

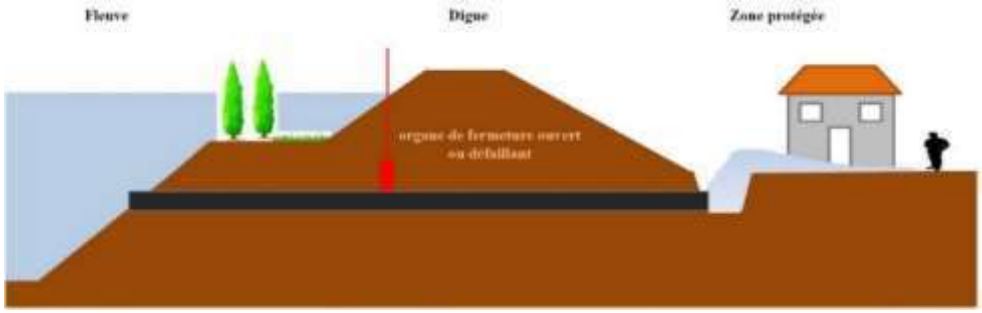


Figure 4. Défaillance d'un ouvrage hydraulique traversant

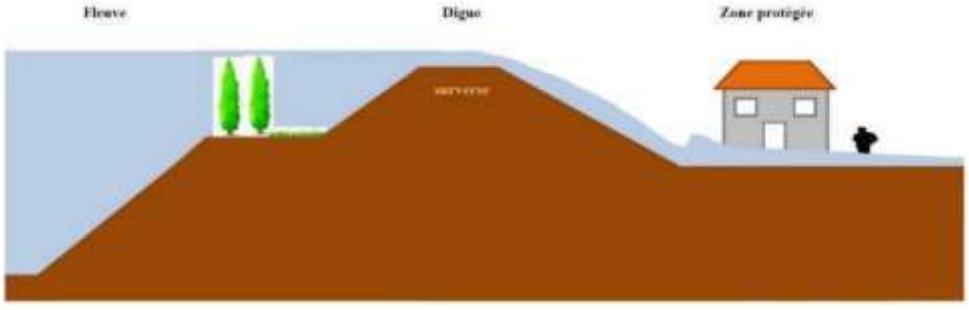


Figure 5. Surverse sans brèche

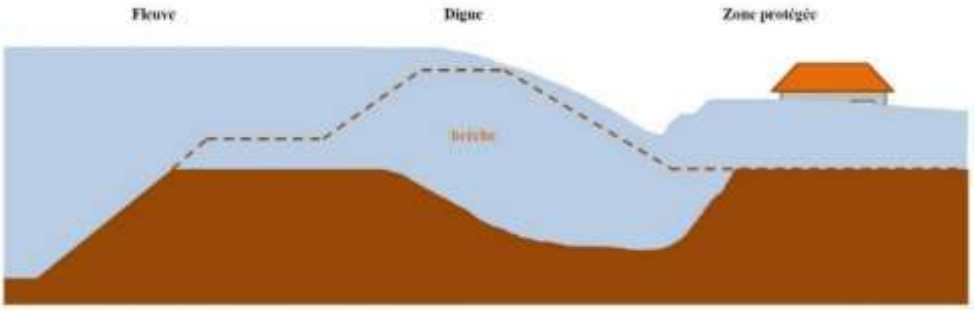


Figure 6. Brèche après surverse

3.2 PROBABILITES DE BRECHES ET CLASSE DE DEBITS

La prise en compte de l'un ou l'autre des scénarios dans la détermination des niveaux caractéristiques nécessite l'évaluation préalable du risque de brèche, le choix a été fait de construire un modèle probabiliste. Ce choix a été motivé par la facilité d'identification et de mise en œuvre du caractère probabiliste de l'aléa crue, du fait des nombreuses observations (données depuis 1816) et études hydrologiques sur le Rhône. Il a été renforcé par la grande hétérogénéité des faciès géotechniques rencontrés au sein d'un même sondage dans le Delta, à la fois au cœur des ouvrages, due aux différentes étapes de construction des digues et à la superposition de couches de différentes natures les unes sur les autres (effet mille feuilles) mais également dans leur fondation, compte tenu des multiples changements de tracés que le Rhône a connu dans son histoire. Cette hétérogénéité rend très difficile, voire illusoire le caractère déterministe d'un facteur de sécurité.

L'évaluation du risque, lié à chacun des scénarios, a été déterminée sous la forme simplifiée ci-après. L'analyse des risques, et notamment de la probabilité d'entrée d'eau dans la zone protégée, est basée sur cinq modèles construits à partir d'investigations exhaustives menées dans le cadre d'un diagnostic approfondi :

un modèle hydraulique (étude de calage CNR) et un modèle morpho-dynamique pour la quantification de la probabilité d'occurrence de l'aléa et trois modèles respectivement géométrique, géotechnique et fonctionnel pour l'évaluation de la probabilité de résistance et de franchissement de la digue. Les probabilités ont été définies par profil espacé de 125 m, ce qui correspond à l'extension maximale des brèches observées lors des crues récentes.

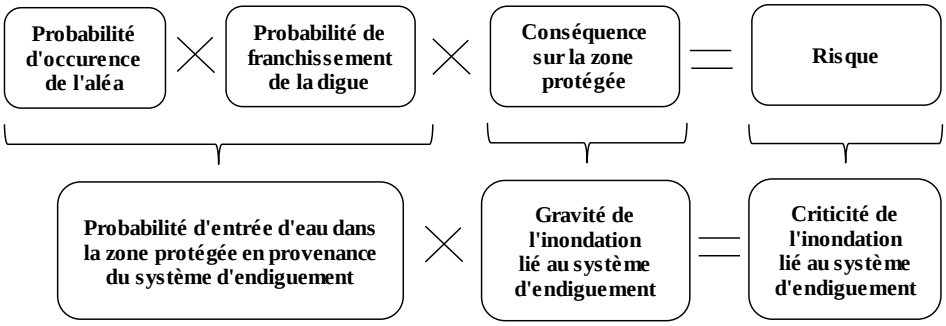


Figure 7. Définition du risque

L'analyse a porté sur 13 scénarios de brèche définis en fonction du retour d'expériences des crues passées, des investigations géotechniques et de l'état de l'art actuel.

Tableau 1. Identification des différents scénarios de brèches

N° scénario	Modes de rupture initiateurs	Libellé du scénario de brèche
1	Claquage hydraulique + Erosion de conduit	Claquage hydraulique d'un terrier de blaireau partiellement colmaté et érosion de conduit
2	Erosion de conduit	Erosion de conduit dans un vide le long d'un ouvrage hydraulique traversant
3	Erosion de conduit	Erosion de conduit dans une racine d'arbre mort
4	Erosion de conduit	Erosion de conduit dans une fissure traversante
5	Soulèvement hydraulique + Erosion régressive	Claquage hydraulique d'une couche de sol cohésive surplombant une couche de sable et érosion régressive de cette dernière
6	Claquage hydraulique + Erosion de contact	Claquage hydraulique du masque étanche et érosion de contact le long d'une couche de graviers
7	Claquage hydraulique + Suffusion interne	Claquage hydraulique du masque étanche et suffusion de couche de grave englobée dans la digue
8	Surverse	Surverse sur la digue
9	Affouillement de pied	Affouillement en pied amont de la digue
10	Glissement	Glissement du talus aval en crue
11	Glissement	Glissement du talus amont en crue
12	Mécanique	Stabilité mécanique des ouvrages hors glissement, claquage hydraulique et soulèvement du pied aval
13	Mécanique	Stabilité des parapets et batardeaux

Pour chaque tronçon homogène, une courbe de fragilité correspondant à la section la plus critique, a été construite. Elle donne la probabilité de brèche en fonction du débit du Rhône à la station de Beaucaire/Tarascon (Cf. exemple ci-après). Les résultats par tronçons homogènes figurent dans le chapitre 7.2.

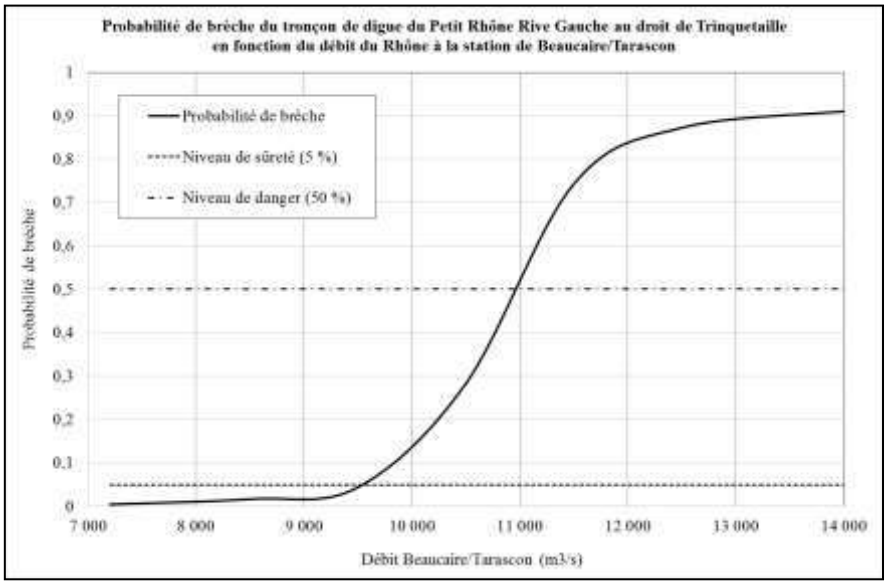


Figure 8. Exemple de courbe de fragilité

Une fois les probabilités de brèches déterminées, les niveaux de protection, de sûreté et de danger de chaque tronçon homogène du système ont été déterminés par classe.

Sept classes de débit ont été retenues. Elles sont décrites dans le tableau ci-après avec les incertitudes liées à ces paramètres.

Tableau 2. Classes de niveaux caractéristiques

Débit (m^3/s)* Beaucaire/ Tarascon	Cote** Beaucaire/Tarascon (m NGF IGN 69) suivant courbe de tarage (en vigueur depuis le 7/12/2003)	Cote*** Beaucaire/Tarascon (m NGF IGN 69) extraite du modèle ECPS PS (CNR) état initial	Niveau marin (m NGF IGN 69)	Période de retour (années arrondies)
14 160	Non valable	12,05	1,50	800 à 1000
12 500		11,79	1,30	200
11 500	11,30	11,44	0,96	100
10 500	10,77	10,83	0,80	50
9 500	10,22	10,45	0,94	20
8 500	9,58	9,94	0,90	10
7 500	8,77	9,34	0,90	3

* débit ± 5 % correspondant à la borne inférieure de la classe ** ± 10 cm *** ± 20 cm

La station de référence pour le relevé des niveaux et l'estimation débits du Rhône est la station Beaucaire/Tarascon gérée par le service prévision des crues du grand delta (SPC GD) au PK Rhône 269,6.

Les débits sont estimés à partir de la courbe de tarage en vigueur depuis le 7 décembre 2003 (courbe verte sur la figure ci-dessous). Les valeurs, en termes de débit et de hauteur, supérieures à celles connues en décembre 2003, ont été extrapolées mathématiquement sans

tenir compte des surverses occasionnées entre Beaucaire et Arles en rives droite et gauche du Rhône qui ont pour effet de contrôler les niveaux au droit de la station.

Cet effet est perceptible sur la figure ci-dessous, qui superpose la courbe de tarage actuellement en vigueur à la station de Beaucaire/Tarascon (courbe verte) et les niveaux modélisés par la $CNR_{ingénierie}$ dans le cadre de l'étude de calage (courbe bleu). On remarque que la courbe de tarage du SPC n'est pas valable pour les niveaux supérieurs à 11,5 m NGF (zone 1). A titre d'exemple, la crue exceptionnelle du Rhône (14 160 m^3/seconde) correspondrait suivant la courbe de tarage en vigueur à une cote d'environ 12,65 m NGF. Les niveaux modélisés par la $CNR_{ingénierie}$ dans le cadre de l'étude de calage donne une cote « plafonnée par les déversements aval » d'environ 12,05 m NGF dans l'état initial et 12,01 m NGF dans l'état après travaux.

Il est donc indispensable de modifier la courbe de tarage en vigueur pour les débits supérieurs à 11 500 m^3/s pour tenir compte du fonctionnement hydraulique (actuel ou projeté) entre Beaucaire et Arles.

De la même façon, on constate des écarts notables entre la courbe de tarage et les résultats de la modélisation CNR (en dehors de la fourchette de précision des débits de ± 5 %) pour les débits de pointe inférieurs à 9 500 m^3/s (zone 2) ; cet écart étant dû au fait que le modèle a été calé sur la seule crue de décembre 2003.

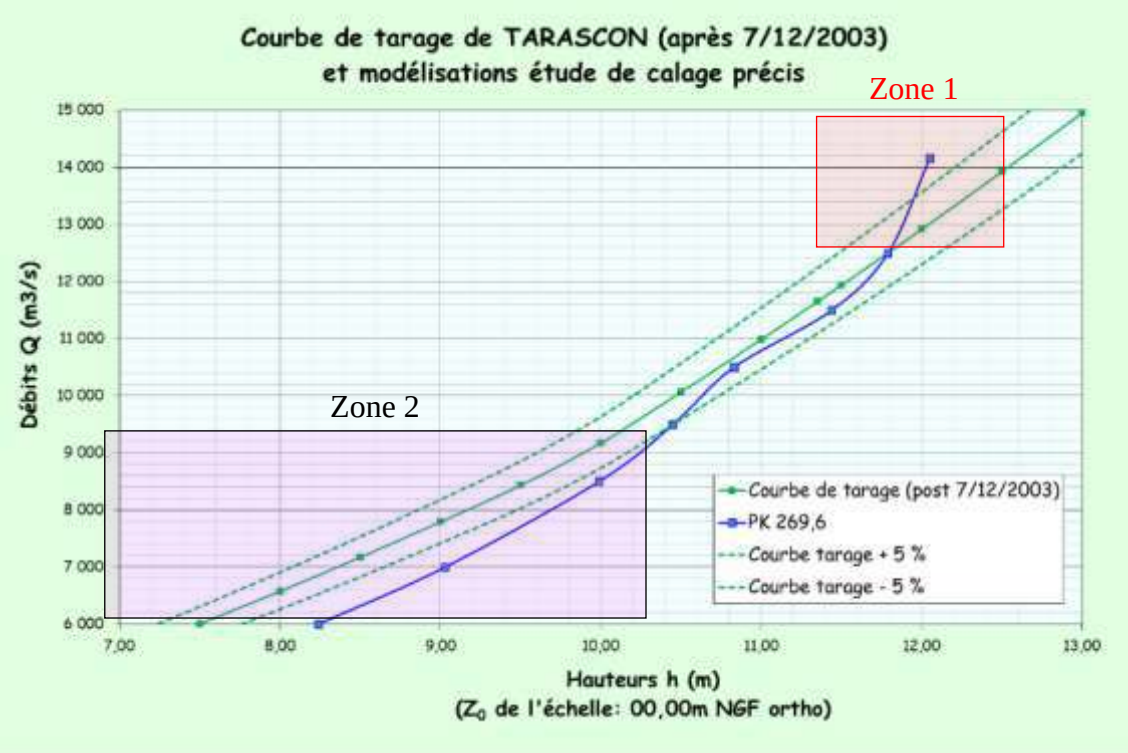


Figure 9. Courbe de tarage en vigueur à Beaucaire/Tarascon, fourchettes de précision et niveaux modélisés dans le cadre de l'étude de calage

3.3 NIVEAUX CARACTERISTIQUES DES SYSTEMES D'ENDIGUEMENT

Dans le cas du système d'endiguement fluvial de la Camargue Insulaire qui ne dispose pas de tronçon de digue résistant à la surverse, l'inondation de la zone protégée ne peut s'effectuer que par brèche, le niveau de protection des ouvrages est confondu avec le niveau de sûreté.

Pour les tronçons résistants à la crue exceptionnelle du Rhône, la probabilité de surverse sur les ouvrages étant sensiblement inférieure à la probabilité de la crue exceptionnelle elle-même, cette hypothèse n'a pas été prise en compte.

Les résultats de l'analyse de rupture (Cf. chapitre 7.2.) figurent dans les deux tableaux ci-dessous. Les tableaux se lisent ainsi : Pour le tronçon PRG1 pour une crue dont le débit atteint 9 500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon, la probabilité de brèche est de 5 %, elle passe à 50 % pour un débit de 10 500 m^3/s.

Tableau 3. Niveaux de sûreté et de danger des tronçons homogènes PRG du système d'endiguement

N°	Libellé	PR Digue		Débit à Beaucaire/Tarascon (m^3/s)	
		PRG début	PRG Fin	Sûreté (5% de brèche)	Danger (50 % de brèche)
PRG 1	Trinquetaille	281.1	282.5	9 500	10 500
PRG 2	Cazeneuve-Augéry	282.5	287.4	7 500	9 500
PRG 3	Beaumont –A54	287.4	288.5	12 500	14160
PRG 4	A54 - Cavalès	288.5	294.5	7 500	8 500
PRG 5	Cavalès - St Gilles	294.5	297.2	7 500	8 500
PRG 6	St-Gilles - Figarès	297.2	298.2	7 500	8 500
PRG 7	future digue résistante à la surverse (Figarès)	298.2	299.8	7 500	8 500
PRG 8	La Galante - Albaron	299.8	306.55	7 500	8 500
PRG 9	Albaron	306.55	307.7	14 160	14160
PRG 10	Albaron-Eymini	307.7	313	7 500	9 500
PRG 11	Eymini-Sénebier	313	320.75	7 500	11 500
PRG 12	Sénebier	320.75	322	14 160	14160
PRG 13	Sénebier-Icard	322	329.5	7 500	11 500
PRG 14	Mas d'Icard - Bac	329.5	330.5	7 500	11 500
PRG 15 à PRG 19	Bac – Mer Remblai hors système d'endiguement	330,625	337,0	Pour mémoire >> 8 500 m^3/s	Pour mémoire > 11 500 m^3/s

Tableau 4. Niveaux de sûreté et de danger des tronçons homogènes GRD du système d'endiguement

N°	Libellé	PR Digue		Débit à Beaucaire/Tarascon (m^3/s)	
		GRD début	GRD Fin	Sûreté (5% de brèche)	Danger (50 % de brèche)
D1	Défluent			14 160	>> 14160
GRD1	Quais	281.8	283.5	14 160	>> 14160
GRD2	Papeteries Etienne	283.5	284.15	14 160	>> 14160
GRD3	Emmaus	284.15	285.25	14 160	>> 14160
GRD4	Passeron-Monlong	285.25	288	14 160	>> 14160
GRD5	Monlong	288	288.9	14 160	>> 14160
GRD6	Montlong-Beaujeu	288.9	295.15	8 500	10 500
GRD7	Beaujeu-l'Armelière	295.15	298.2	10 500	11 500
GRD8	L'Armelière-la Commanderie	298.2	305.5	10 500	11 500
GRD9	La Commanderie-Bois Verdun	305.5	309.25	9 500	11 500
GRD10	Bois Verdun-Chartrouse	309.25	311.8	9 500	11 500
GRD11	Chartrouse-La Louisiane	311.8	313.1	9 500	11 500
GRD12	La Louisiane-L'Esquineau	313.1	319.4	7 500	9 500
GRD13	L'Esquineau-Palissade	319.4	323.3	8 500	11 500

Les cartes en pages suivantes illustrent respectivement les niveaux de sûreté, de danger et de submersion des tronçons homogènes constituant les trois systèmes d'endiguement fluviaux

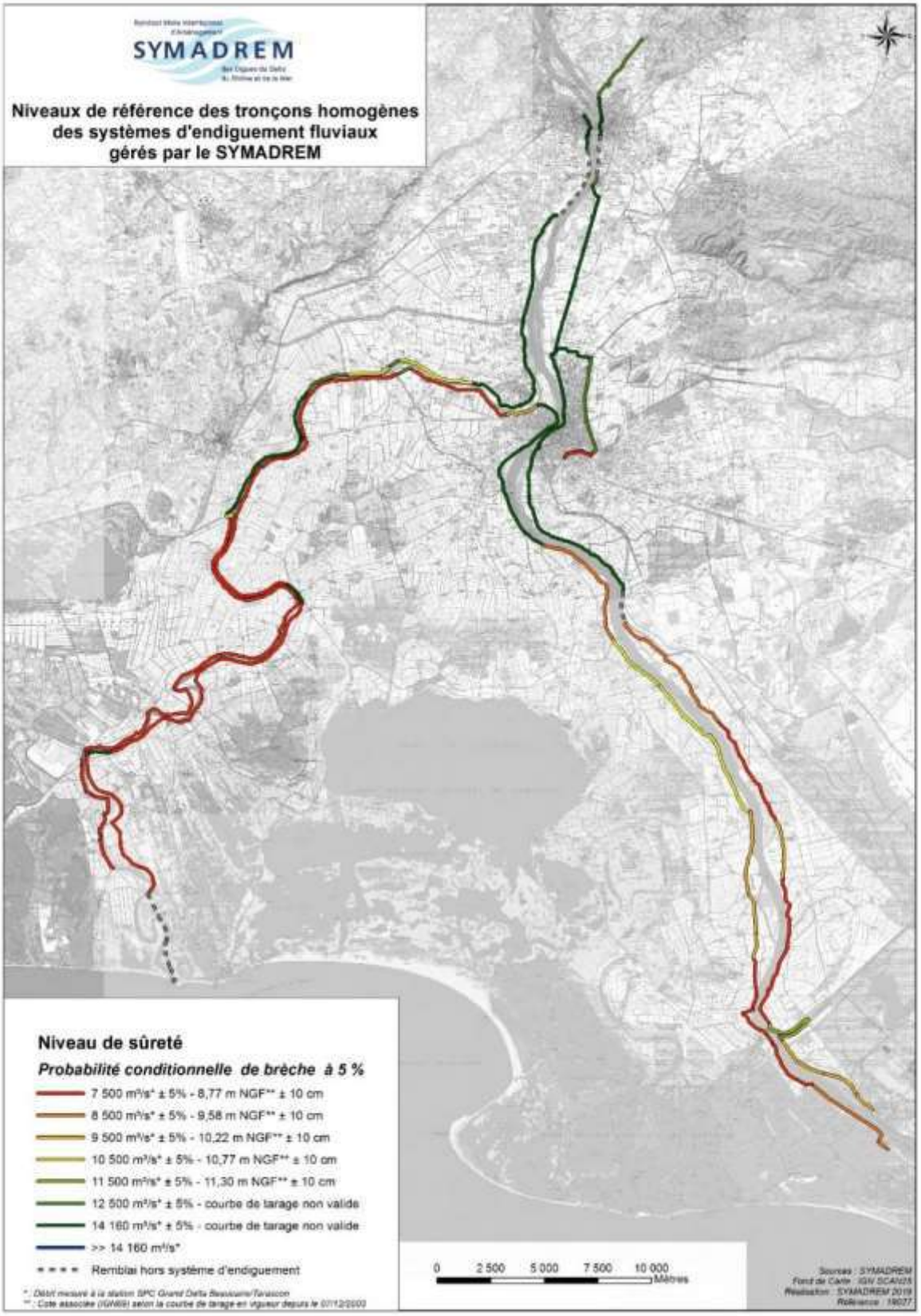


Figure 10. Système d'endiguement fluvial Camargue Insulaire – niveaux de sûreté des ouvrages (probabilité de brèche 5 %)

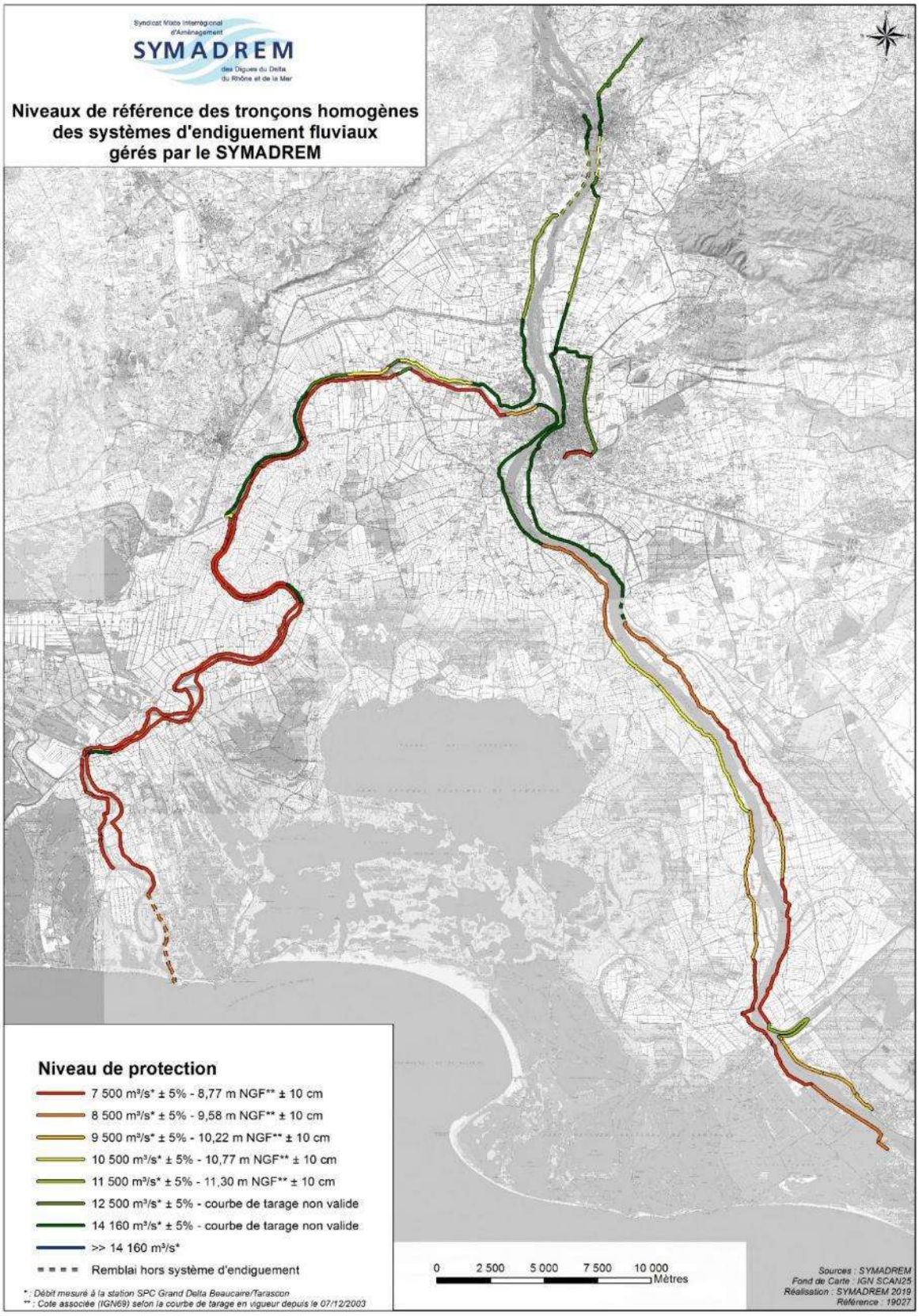


Figure 11. Système d'endiguement fluvial Camargue Insulaire – niveaux de protection des ouvrages (probabilité de brèche 5 %)

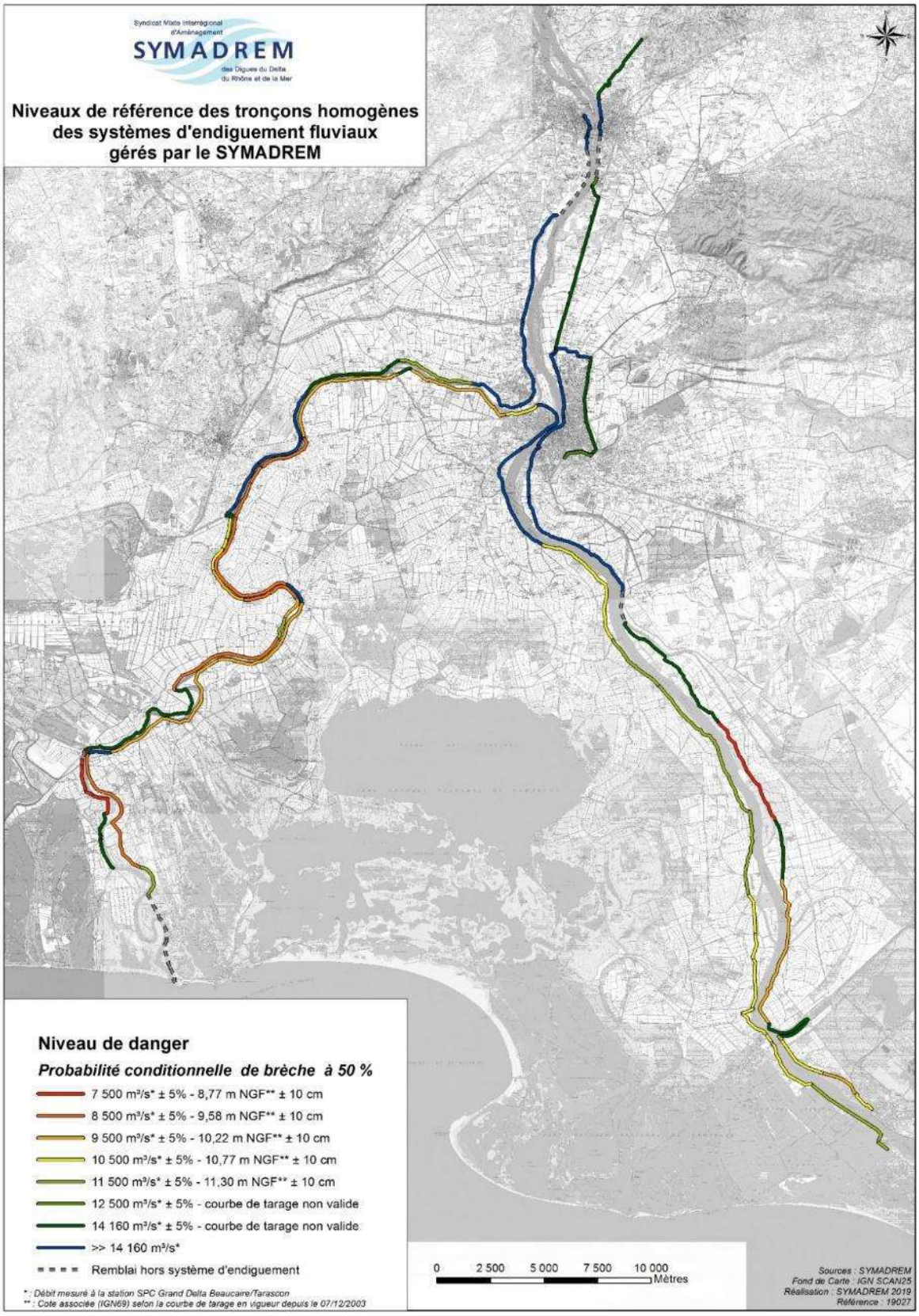


Figure 12. Système d'endiguement fluvial Camargue Insulaire – niveaux de danger des ouvrages (probabilité de brèche 50 %)

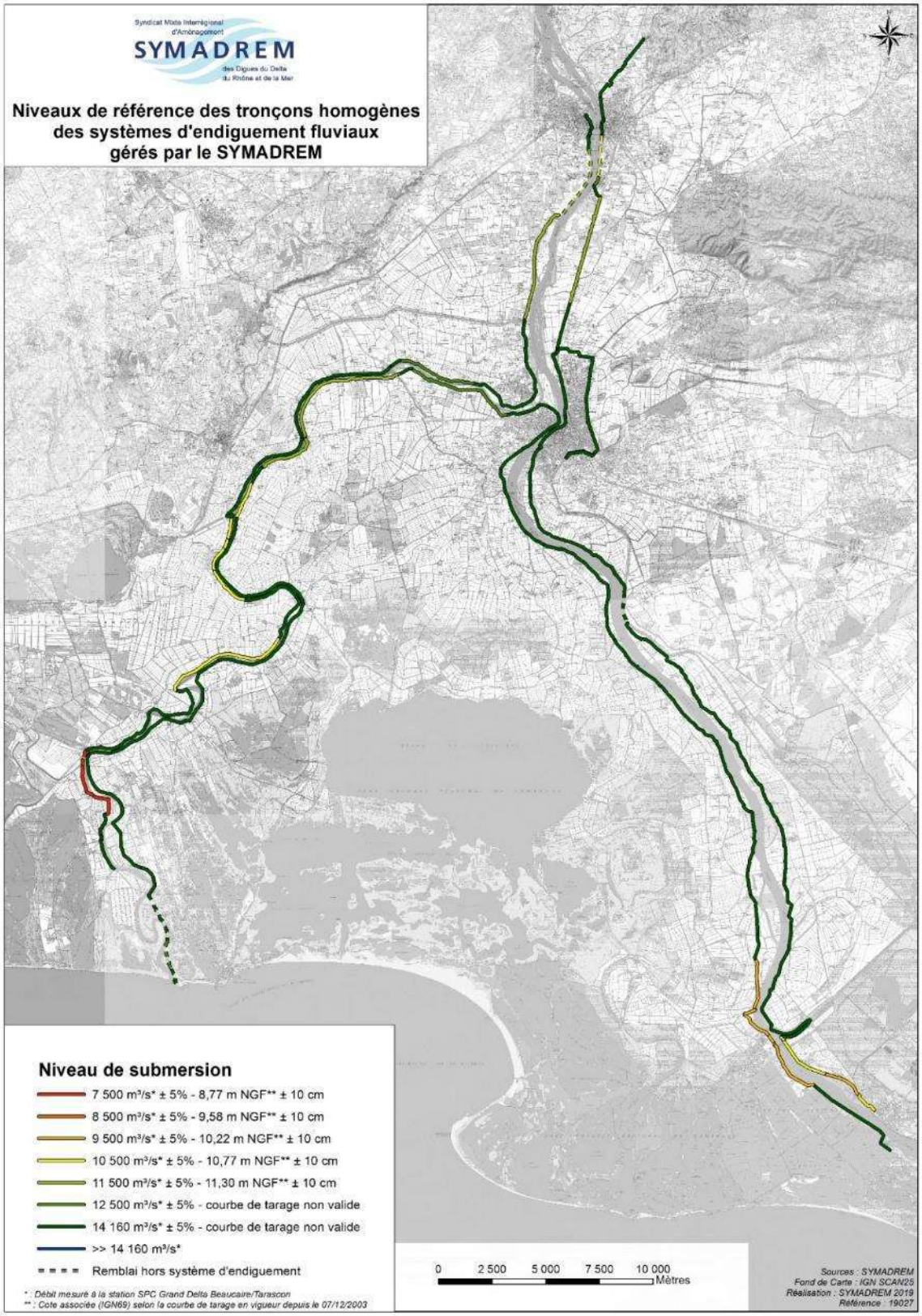


Figure 13. Système d'endiguement fluvial Camargue Insulaire – niveaux de submersion des ouvrages

L'analyse des probabilités de brèche dans les digues constituant le système d'endiguement, confirmée par le retour d'expérience accidentologique, montre que les niveaux de protection ou de sûreté des ouvrages sont très bas pour les digues d'origine du XIX^{ème} siècle. Les travaux de carrossabilité réalisés en 2010 et 2015 ont permis d'augmenter la capacité de détection et d'intervention du SYMADREM mais n'ont pas modifiés la résistance structurelle des ouvrages qui est très faible.

Le niveau de danger des ouvrages qui correspond à une probabilité de brèche de 50 % est également faible à très faible en dehors des tronçons renforcés après 1998. Il est sensiblement en deçà du niveau de la crête des ouvrages.

3.4 FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT

Compte tenu de la faible résistance des ouvrages, le principal et en définitif unique scénario d'inondation à retenir est celui de la brèche avant surverse. Le scénario de défaillance fonctionnelle relatif à la défaillance d'un organe de fermeture a également été étudié mais comme on le verra plus loin, il n'est pas déterminant dans l'évaluation des risques.

Le fonctionnement du système, illustré ci-après, est donc binaire :

- tant que le niveau du Rhône est inférieur au niveau de protection des ouvrages égal ici au niveau de sûreté, on considère qu'il n'y a pas d'entrées d'eau dans la zone protégée en provenance du système d'endiguement. La probabilité de brèche avant surverse est inférieure au seuil réglementaire de 5 %,
- quand le niveau du Rhône est supérieur au niveau de protection des ouvrages, la probabilité de brèche avant surverse augmente sensiblement avec l'intensité de la crue. des entrées d'eau par brèche avant surverse sont considérées.

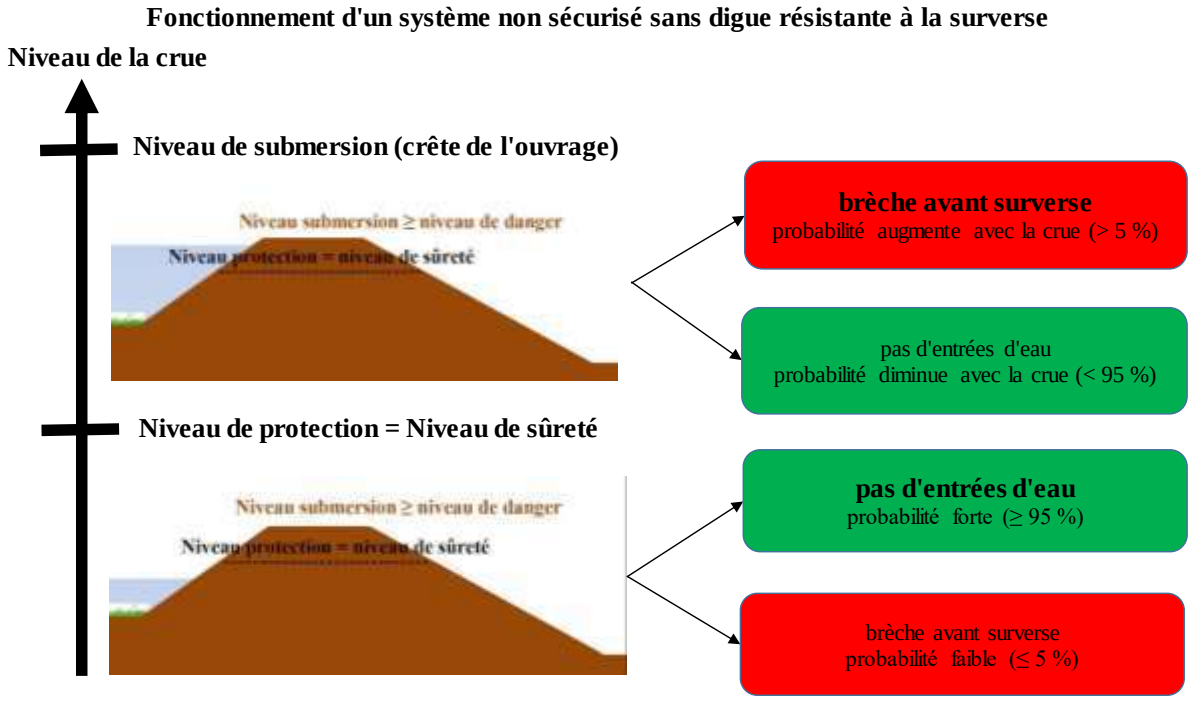


Figure 14. Fonctionnement d'un système non sécurisé sans digue résistante à la surverse

Ce type de fonctionnement est dangereux pour la sécurité des populations, car il est imprévisible et aléatoire. Il est imprévisible car la formation de brèche peut intervenir dès la dépassement du niveau de protection, soit pour des crues d'occurrence de 5 ans et de manière quasi certaine avant l'atteinte du niveau de submersion soit pour des crues d'occurrence rare (100 ans) à exceptionnelle (1000 ans). Entre la crue de sûreté et la crue de danger, les habitants de la zone protégée peuvent avoir une impression de sécurité, alors même que la cote de sûreté a été dépassée et que les ouvrages sont sollicités au-dessus de leur dimensionnement.

Il est aléatoire, car la formation de brèche peut démarrer à n'importe quel endroit, ce qui sur un système d'endiguement aussi étendu que celui du Delta du Rhône rend la gestion des secours très difficile, pour ne pas dire hasardeuse. La figure ci-après illustre la localisation historique des brèches et départs de brèche depuis 1840.

Par ailleurs, la brèche génère un effet de vagues et des vitesses très importantes qui ne permettent pas, dans la bande de sécurité et même au-delà, le déplacement des personnes.

Photo 1. Brèche sur le Vidourle en septembre 2002 (© Mairie d'Aimargues)

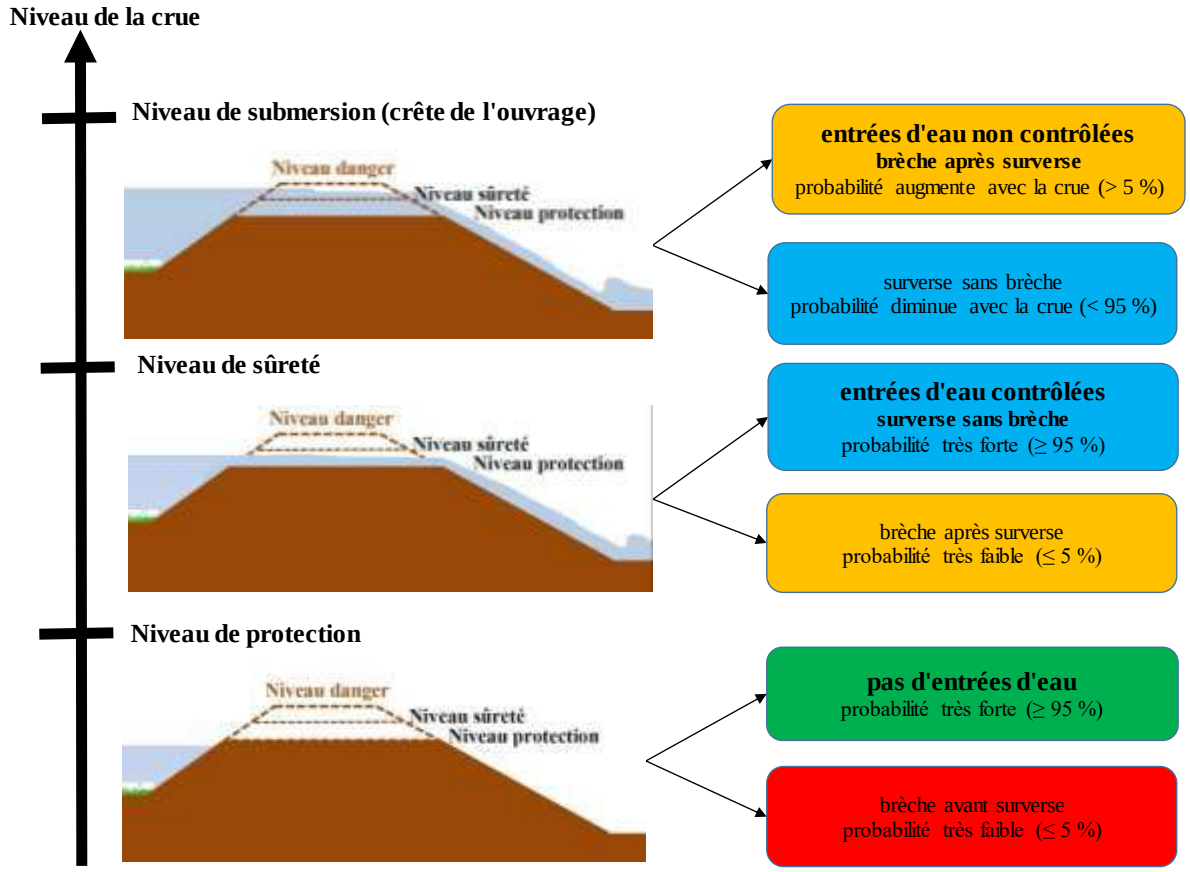
Figure 15. Localisation des brèches et départs de brèche de 1840 à 2003

L'objectif du programme de sécurisation est de construire un système sécurisé, dont la probabilité annuelle de brèche est inférieure au seuil d'acceptabilité et qui comportera des tronçons de digues résistant à la surverse.

Le fonctionnement de ce type système, illustré ci-après s'opère en trois étapes :

1. tant que le niveau du Rhône est inférieur au niveau de protection, il n'y a pas d'entrées d'eau dans la zone protégée en provenance du système d'endiguement. La probabilité de brèche avant surverse sera inférieure au seuil réglementaire de 5 % et le risque d'entrée d'eau par défaillance des organes de fermeture des ouvrages traversants à un niveau acceptable au regard des enjeux ;
2. quand le niveau du Rhône est supérieur au niveau de protection mais inférieur au niveau de sûreté, des déversements contrôlés se produisent sur la digue résistante à la surverse. La probabilité de brèche après surverse est inférieure au seuil réglementaire de 5 % et le risque de défaillance des organes de fermeture des ouvrages hydrauliques traversants à un niveau acceptable au regard des enjeux ;
3. quand le niveau du Rhône est supérieur au niveau de sûreté, les entrées d'eau ne sont plus considérées comme « contrôlées ». La probabilité de brèche après surverse augmente sensiblement avec l'intensité de la crue. La probabilité d'occurrence de ce type d'événement et sa cinétique sont suffisamment faibles pour rendre le risque acceptable au regard des enjeux.

Fonctionnement d'un système sécurisé avec digue résistante à la surverse



Au contraire du fonctionnement précédent, le fonctionnement de ce type de système est qualifié de sécurisé. La probabilité de brèche avant surverse est suffisamment faible pour être écartée, moyennant surveillance du SYMADREM. Les zones de premiers débordements et la cinétique de propagation des crues déversantes sont connues à l'avance, ce qui permet d'organiser de manière prévisible les secours. Par ailleurs, les vitesses en aval des secteurs déversants sont très rapidement faibles (< 0,5 m/s).

Photo 2. Déversement sans brèche

La figure ci-après localise les digues résistantes à la surverse envisagées dans le programme de sécurisation.

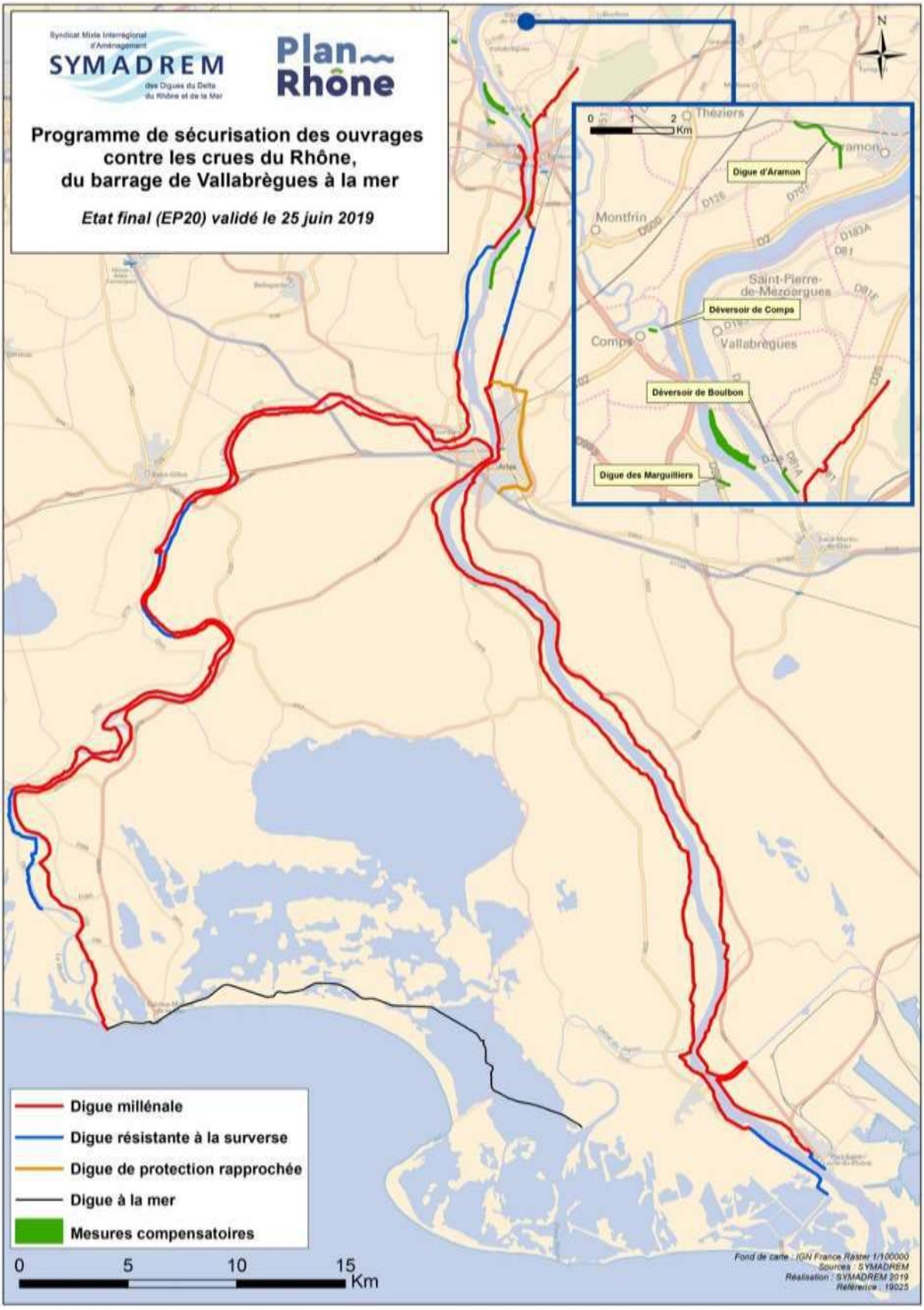


Figure 16. Programme de sécurisation du SYMADREM

3.5 CAS DES ZONES PROTEGEES AVEC PLUSIEURS NIVEAUX DE PROTECTION

Comme on l'a vu plus haut, la caractérisation du risque dans une zone protégée par un système d'endiguement peut s'exprimer sous la forme suivante

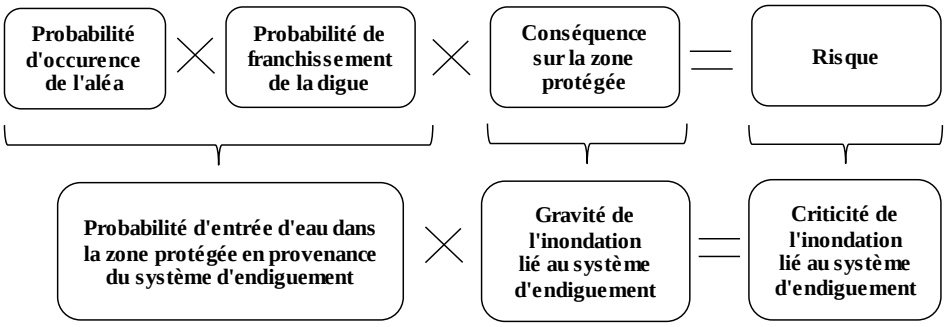


Figure 17. Caractérisation du risque d'un système d'endiguement

Cette représentation du risque correspondait typiquement à la réglementation digues 2007.

Avec la réglementation digues 2015, où l'objectif est de déterminer les zones hors d'eau pour un aléa donné avec une probabilité résiduelle de rupture inférieure à 5 %, la représentation ci-avant peut être adaptée comme suit :

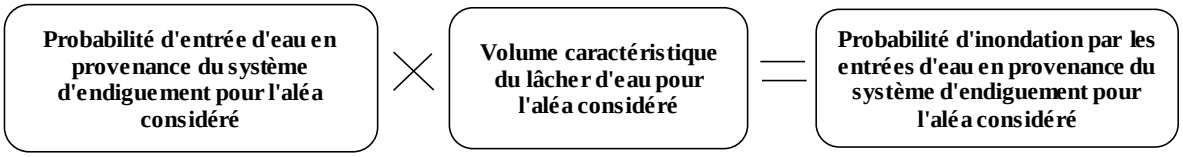


Figure 18. Caractérisation de la probabilité d'inondation d'une zone pour un aléa donné

Quand la zone protégée n'a qu'un niveau de protection, on admet que la zone protégée est inondée dès que le cours d'eau dépasse le niveau de protection des ouvrages. Pour un aléa donné :

probabilité d'entrée eau = probabilité d'inondation

Quand la zone protégée a plusieurs niveaux de protection, le paramètre cinétique de remplissage représenté ci-avant par la conséquence sur la zone protégée doit être pris en compte. Un volume caractéristique de déversement avec ou sans brèche doit être associé au niveau de crue considéré. Pour un aléa donné :

probabilité d'entrée eau X volume du lâcher d'eau = probabilité d'inondation

La figure ci-dessous illustre ce principe

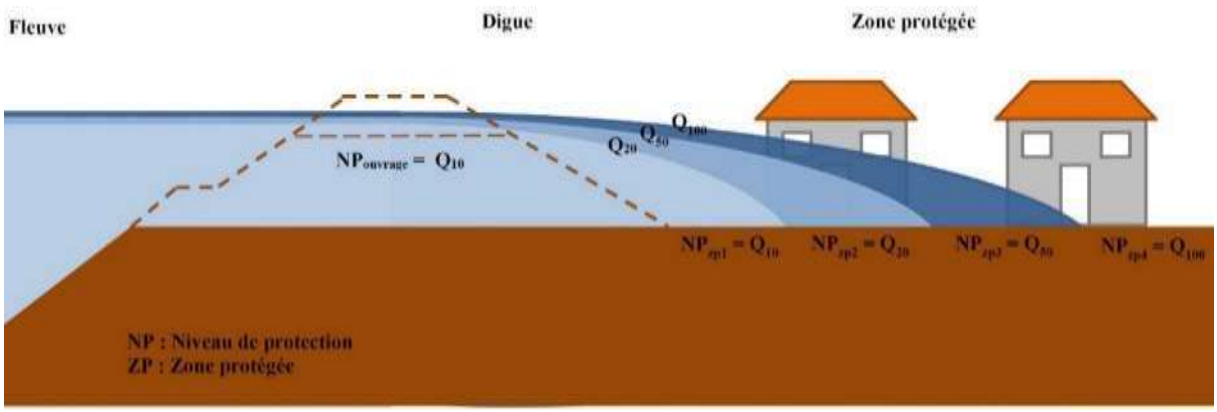


Figure 19. Cas des zones protégées avec plusieurs niveaux de protection

La figure ci-dessous illustre concrètement ce principe pour le système Camargue Insulaire. On constate que pour une même brèche, certaines parties du territoire ne sont pas inondées pour une crue cinquantennale et le sont pour la crue bicentennale.

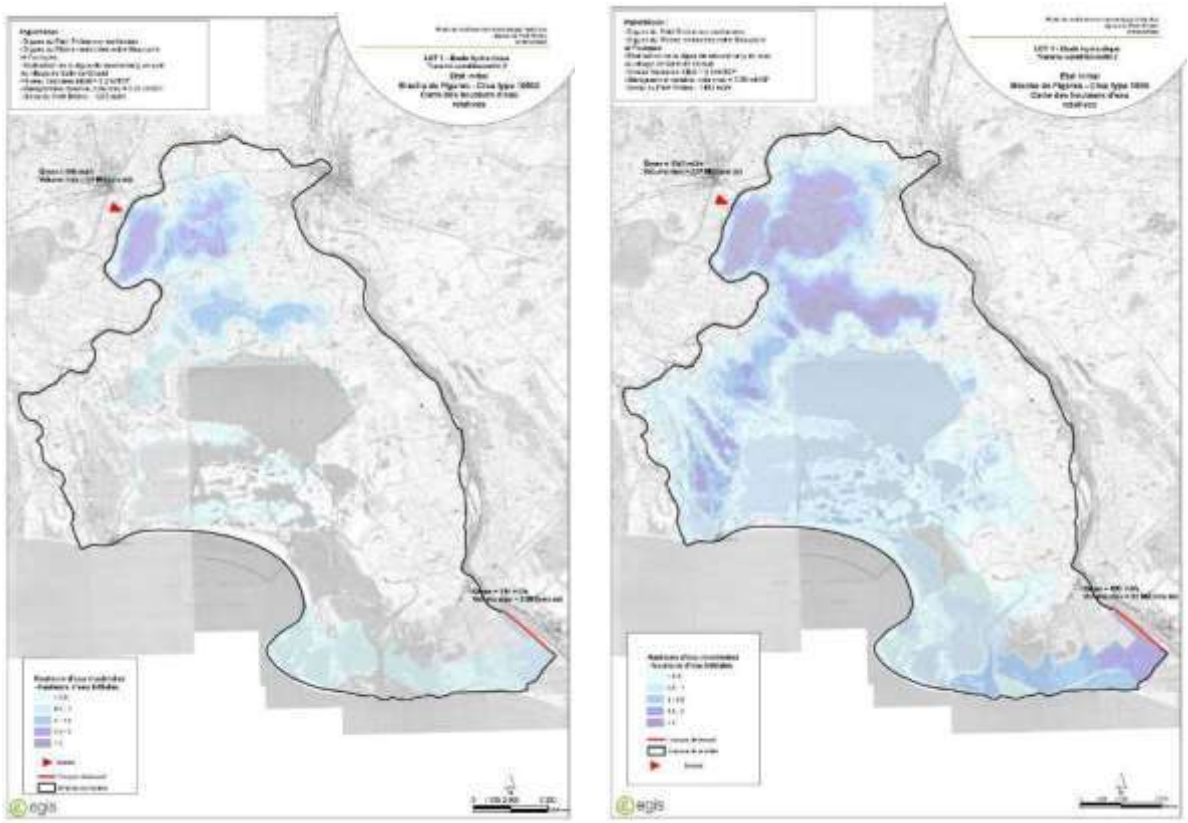


Figure 20. Inondation par brèche pour une crue cinquantennale et bicentennale

Le logigramme présenté ci-après est celui qui va permettre de passer des niveaux de protection des ouvrages aux niveaux de protection des sous-zones protégées.

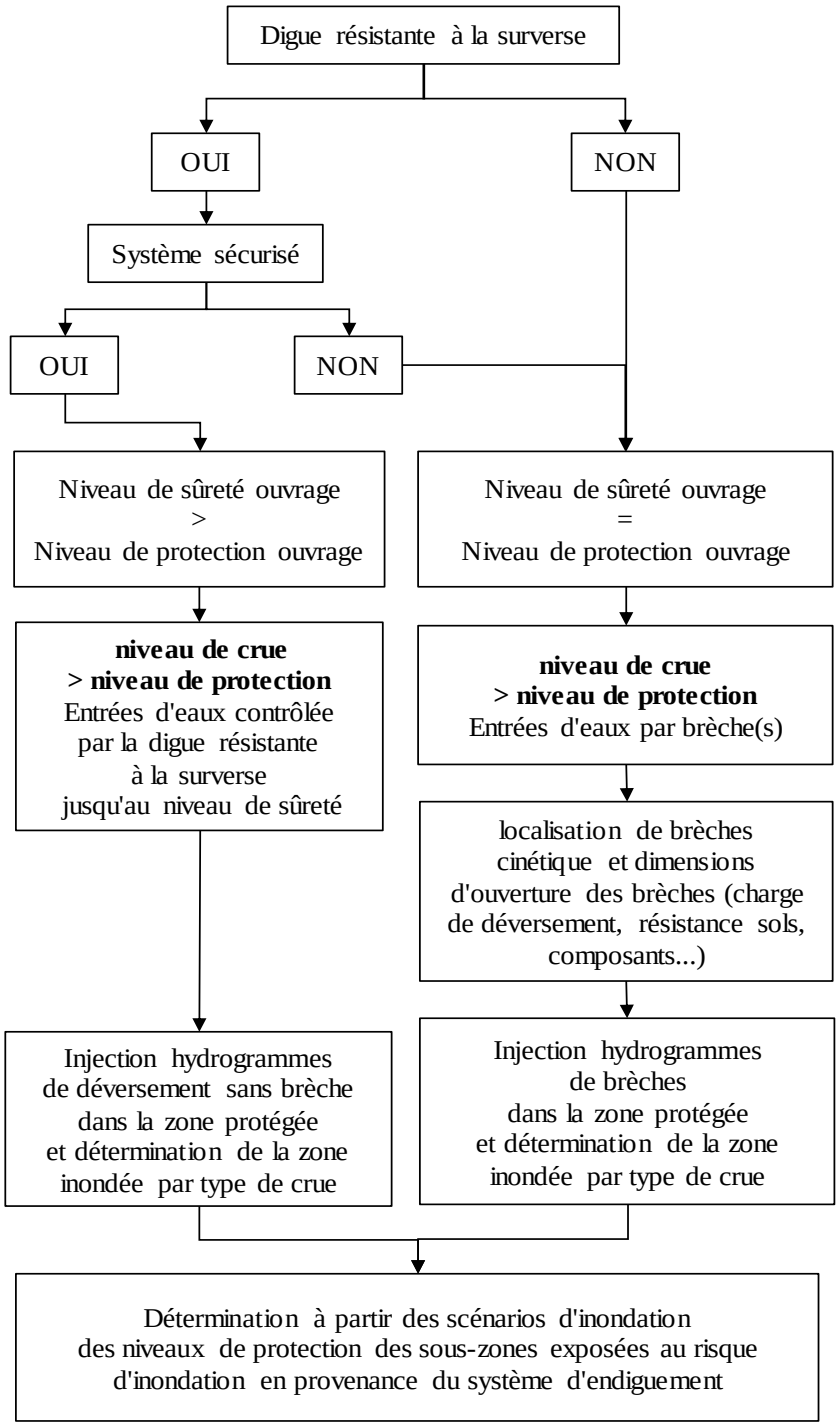


Figure 21. Logigramme de détermination des niveaux de protection de la zone protégée [X052]

3.6 LIMITES DE L'ETUDE DE DANGERS

Considérons une digue, avec ou sans tronçon résistant à la surverse, et sa zone protégée.

Soit une crue, dont le niveau est inférieur au niveau de la protection de la digue, qu'il y ait ou non un déversoir, on considère que la crue est contenue dans le lit endigué et qu'aucune entrée d'eau n'est possible.
Dans la zone protégée, certains secteurs peuvent cependant être inondés, soit par remontée de nappe, soit par débordements d'autres cours d'eau soit par accumulation du ruissellement pluvial.

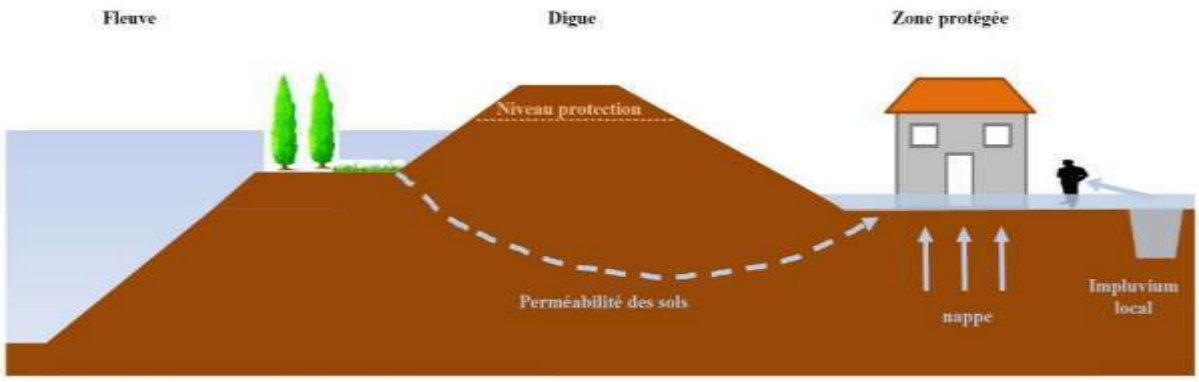


Figure 22. Zone protégée inondée avec un niveau de protection du système d'endiguement non atteint

Cette situation fut vécue par une partie des habitants du Cailar (Gard) en septembre 2005, lors de la crue centennale du Vistre (photo de gauche). La digue protégeant la commune assurait pleinement sa fonction, quand certains quartiers situés en pied de digue étaient inondés par ruissellement sous plusieurs décimètres d'eau (photo de droite).

Photo 3. Système d'endiguement du Vistre lors de la crue centennale de 2005 (côté cours d'eau à gauche et côté zone protégée à droite) (©ISL)

Mais d'autres secteurs peuvent être hors d'eau, même en cas de rupture. C'est pourquoi suivant l'endroit où l'on se situe dans la zone protégée, on peut avoir les situations suivantes :

niveau de protection des personnes < ou > niveau de protection de la digue

3.7 IMPACT QUANTITATIF D'UNE INONDATION AVEC ET SANS BRECHE

La figure suivante illustre la comparaison entre un déversement avec et sans brèche.

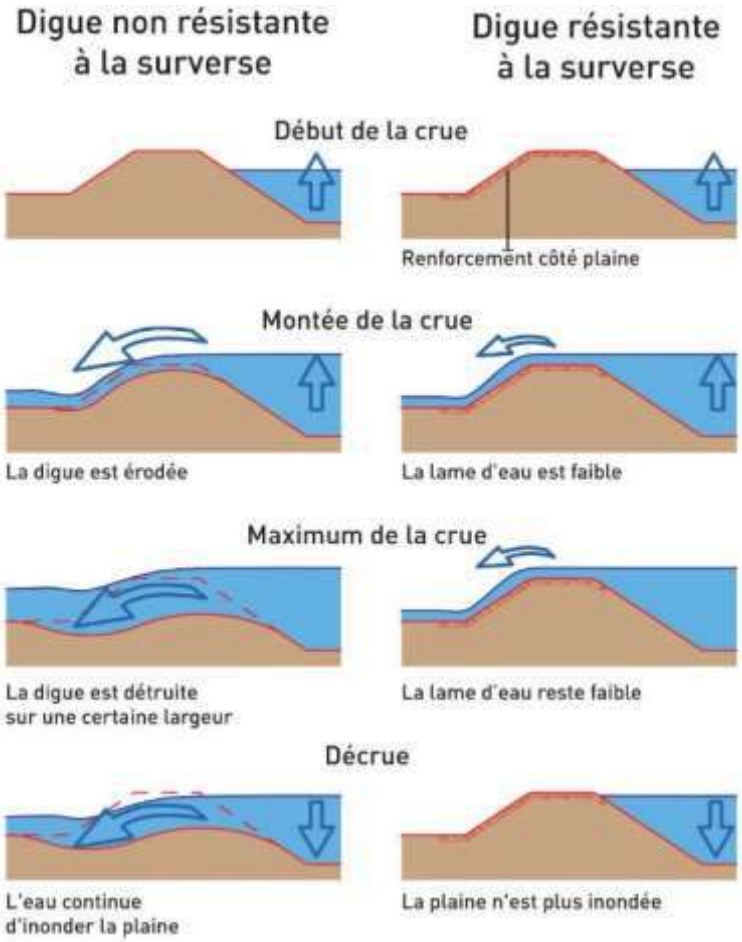


Figure 23. Déversement avec et sans brèche

Dans un système sécurisé avec digue résistante à la surverse, le fleuve est contenu jusqu'à l'atteinte du niveau de protection qui correspond à la crête de la digue résistante à la surverse. Au-delà de ce niveau, seule la petite lame d'eau correspondant au pic de crue, surverse sur les digues. Dès que la décrue s'amorce et que le niveau d'eau redescend en-dessous de la crête de la digue, les déversements sur la digue cessent et l'inondation est restreinte.

Dans un système non sécurisé et a fortiori sans digue résistante à la surverse, les entrées d'eau correspondent à la hauteur de déversement, soit toute la hauteur de la digue. Par ailleurs, l'ouverture créée dans la digue a pour conséquence de produire des entrées d'eau pendant toute la période de décrue jusqu'à ce que le fleuve redescende sous la cote du terrain naturel.

Les hydrogrammes figurant ci-dessous permettent d'illustrer l'impact des brèches pour la zone protégée :

- La courbe en bleu représente l'hydrogramme de crue à la station de Beaucaire/Tarascon (débit sur l'axe à gauche).
- La courbe en violet caractérise les déversements sans brèche (débit sur l'axe à droite)

- La courbe en rouge caractérise les déversements au droit de la brèche. La formation de la brèche intervient, dans cet exemple, à la pointe de crue (débit sur l'axe à droite).

Les écoulements transitant par la brèche peuvent atteindre des débits très élevés (env. 3700 m^3/s dans le cas présent) compte tenu de ce que la digue est effacée sur toute sa hauteur. Ce débit est à comparer avec les débits de déversements hors brèche qui sont beaucoup plus faibles et qui sont dus à la faible lame d'eau déversante même sur des linéaires importants (débit estimé à environ 440 m^3/s). La formation de brèche a également pour effet que les entrées d'eau se produisent pendant toute la durée de la décrue, alors que pour des déversements sans brèche, l'inondation par le fleuve cesse dès que les niveaux d'eau redescendent sous la crête digue. Dans le présent cas :

- Le volume de déversement par la brèche est estimé à 1 700 millions de m^3 ;
- Le volume de déversement hors brèche est estimé à 15 millions de m^3, soit 100 fois moins !

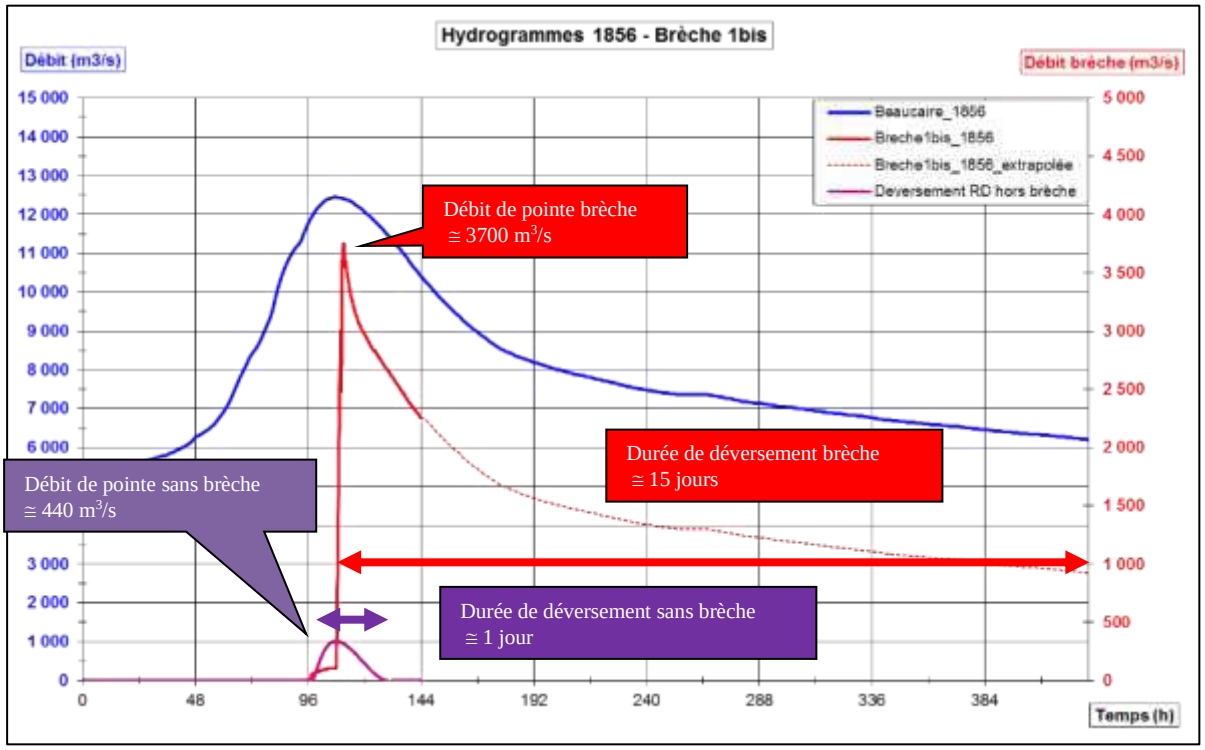


Figure 24. Comparaison quantitative d'un déversement avec et sans brèche (exemple digue Beaucaire-Fourques [K100]

La figure ci-dessous montre le profil en long de la vague provoquée par la brèche de Petite Argence et modélisée par ISL dans le cadre de l'étude de renforcement de la digue de Beaucaire/Fourques.

L'examen de ce profil en long montre que l'onde de rupture provoquée par la brèche de Petite Argence a été très importante sur une longueur de 100 mètres, puis progressivement à partir de 200 mètres, elle a perdu de sa puissance. On note néanmoins que la hauteur de la vague était supérieure à 1 mètre sur une distance d'environ 1,5 km.

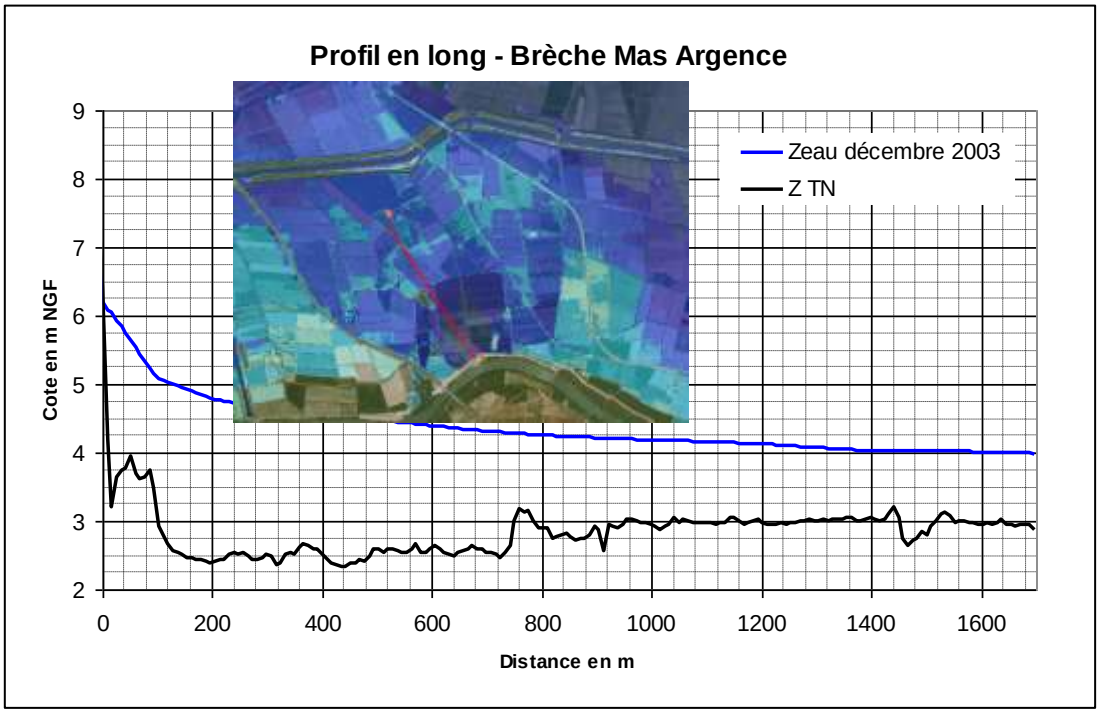


Figure 25. Profil en long de la vague provoquée par la brèche de Petite Argence (source ISL)

4 RETOUR D'EXPERIENCE ACCIDENTOLOGIQUE

La détermination des niveaux de protection au sein d'une zone protégée nécessite donc de bien appréhender la résistance des ouvrages mais également la propagation des crues en cas de brèche ou de surverse.
L'étude historique des crues et inondations passés, appelée également étude accidentologique est primordial pour appréhender cette phase.

4.1 DEFINITIONS ET DONNEES

L'analyse a été menée sur 15 crues couvrant la période 1840 – 2016 en distinguant trois types d'accidents et d'incidents : les brèches, les départs de brèche et les désordres.

La **brèche** est une rupture au sens de la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB) dont le lâcher d'eau ne peut plus être maîtrisé. La brèche est obtenue à la fin d'un processus impliquant des mécanismes de dégradation et de ruptures, qui se développe en trois étapes [X001]: initiation, formation et élargissement. Elle est donc caractérisée par une phase d'élargissement et des entrées d'eau dans la zone protégée qui ne peuvent plus être interrompues.

Photo 4. Exemple de brèche (© P. Blot)

Le **départ de brèche** se distingue de la brèche par le fait que la phase d'élargissement n'est pas encore en cours et/ou que le lâcher d'eau a été maîtrisé ou sans impact sur la zone protégée. Il peut y avoir des entrées d'eau, sans conséquence sur l'aval, qui peuvent être interrompues par un effondrement de la digue, une intervention d'urgence ou la diminution de la charge hydraulique liée à la décrue.

Photo 5. Exemple de départ de brèche (© BRLi)

Le **désordre** est défini quant à lui comme le signe observable ou quantifiable d'une dégradation de l'état initial de la digue qui peut être l'amorce d'une rupture et d'un processus de brèche.

Photo 6. Exemple de désordre (© Symadrem)

Ces choix de définition ont eu pour conséquences de requalifier, dans le cadre de l'analyse, certaines brèches de 1993 et 1994 [A1993 03] en départ de brèche ou en désordre.

4.2 BILAN DES BRECHES SUR LA PERIODE 1840-2016

Le détail du retour d'expérience accidentologique figure au chapitre 6. Seuls les éléments utiles à l'étude des risques des venues d'eau dans la zone protégée sont repris ci-dessous.

L'analyse a été menée sur 14 crues couvrant la période 1840 – 2016. Le nombre de brèches, de départs de brèche et de désordres par crue analysée figure ci-dessous :

Tableau 5. Bilan quantitatif des désordres, départs de brèche et brèche par crue analysée

Crue	Brèche (Nb.)	Départ de brèche (Nb)	Désordre (Nb.)	Brèche par retour (Nb)
Novembre 1840	18	4	Non connu	3
Novembre 1841	8	2	Non connu	
Novembre 1843	10	17	Non connu	
Octobre 1846	0	2	Non connu	
Mai 1856	9	14	Non connu	
Octobre 1872	0	1	Non connu	
Octobre 1993	4	10	Non connu	
Janvier 1994	2	2	Non connu	
Novembre 1994	0	0	8	
Novembre 1996	0	1	1	
Septembre 2002	0	1	5	
Novembre 2002	1	1	32	
Décembre 2003	4	2	68	
Novembre 2016	1	0	15	

Le bilan des brèches et départs de brèche par initiateur de rupture sur la période 1840-2016 figure ci-après.

Tableau 6. Période 1840/2016 – Bilan brèches et départs de brèche par initiateur de rupture

Initiateur de la brèche	Brèches			Brèches Départs de brèches Brèches par retour		
	Nb	%		Nb	%	
Surverse	19	33	33	21	18	18
Infiltrations (term. XIX^{ème} siècle)	29	51	67	65	55	76
Erosion de conduit dans un terrier	6	10		17	15	
Erosion de conduit le long d'un ouvrage traversant	2	4		6	5	
Erosion interne - autre mode de rupture	1	2		1	1	
Affouillement externe	0	0	0	7	6	6
Glissement talus côté fleuve	0	0	0	0	0	0
Glissement talus côté terre	0			0		
TOTAL	57	100		117	100	

Sur la période 1993-2016, le bilan devient le suivant :

Tableau 7. Période 1993/2016 – Bilan brèches et départs de brèche par initiateur de rupture

Initiateur de la brèche	Brèches totales			Brèches et Départs de brèche		
	Nb	%		Nb	%	
Surverse	3	25	25	5	17	17
Erosion de conduit dans un terrier	6	50	75	17	59	83
Erosion de conduit le long d'un ouvrage traversant	2	17		6	21	
Erosion interne - autre mode de rupture	1	8		1	3	
Affouillement externe	0	0	0	0	0	0
Glissement talus côté fleuve	0	0	0	0	0	0
Glissement talus côté terre	0			0		
TOTAL	12	100		29	100	

Sur la période 1840-2016, 67 % des brèches ont été causées avant surverse. Cette proportion passe à 75 % sur la période 1993-2016. Si l'on englobe les départs de brèches dans l'analyse, le rapport passe à 83 % pour la période récente.

4.3 CONSEQUENCES DES BRECHES SUR LES ZONES PROTEGEES

Les inondations provoquées par les crues de novembre 1840, novembre 1841, novembre 1843, mai 1856 et plus récemment en octobre 1993, janvier 1994, novembre 2002 et décembre 2003 sont les événements les plus importants depuis le milieu du XIX^{ème} siècle.

La carte ci-après illustre les contours des inondations de 1840 et 1856 provoquées par le Rhône.

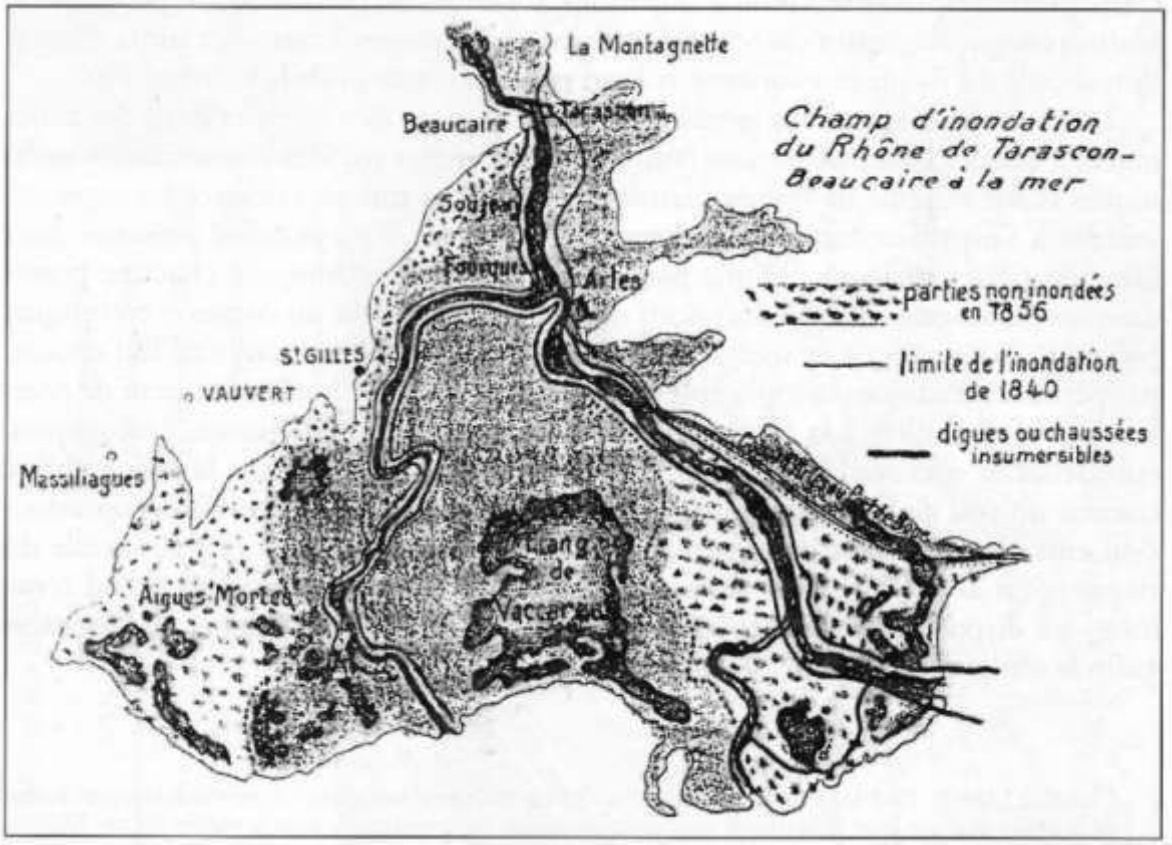


Figure 26. Inondations de 1840 et 1856 (source Pardé)

Les volumes d'eau ayant déversé par les brèches dans le système sont respectivement, pour les 3 crues les plus importantes, les suivants :

Tableau 8. Volume déversé lors des crues historiques de 1840, 1856 et 2003

Zone protégée	Nov. 1840	Mai 1856	Déc. 2003
Rive Droite	1 400 millions de m^3	300 millions de m^3	210 millions de m^3
Camargue Insulaire	800 millions de m^3	1 000 millions de m^3	Pas d'entrée d'eau du Rhône
Rive Gauche	> 600 millions de m^3	500 millions de m^3	17 millions de m^3
TOTAL	2 800 millions de m^3	1 800 millions de m^3	227 millions de m^3

Et pour les crues de 1993, 1994 et 2002, les suivants :

Tableau 9. Volume déversé lors des crues de 1993, 1994 et 2002

Zone protégée	Octobre 1993	Janvier 1994	Novembre 2002
Rive Droite	Pas d'entrée d'eau du Rhône	Pas d'entrée d'eau du Rhône	Inférieur à 2 millions de m^3
Camargue Insulaire	130 millions de m^3	60 millions de m^3	Pas d'entrée d'eau du Rhône
Rive Gauche	Pas d'entrée d'eau du Rhône	Pas d'entrée d'eau du Rhône	Pas d'entrée d'eau du Rhône

On ne dispose pas suffisamment d'information sur les crues de 1841 et 1843 pour faire une estimation du volume d'eaux déversées.

Les tableaux ci-après renseignent sur les cotes (en m NGF) de quelques laisses de crues relevées dans la zone protégée du delta pour les crues de 1840, 1843, 1856, 1993 et 1994.

Tableau 10. Laisses des crues de 1840 et 1856 en rive gauche du Rhône

Inondations du Rhône	Lieu	Cote relevée (m NGF)
Novembre 1840	Tarascon – Centre-ville	9,8 (d'après écrit)
	Mas de Grande Parade	7,92
	Château de Barbegal	7,87
	Mas de Truchet	7,68
	Mas de Truchet	7,60
	Amont de l'aqueduc de Pont de Crau	7,71
	Amont de l'aqueduc de Pont de Crau	7,83
Mai 1856	Tarascon – centre-ville – rue du château	11,44
	Tarascon –angle rue lubières et rue E. Pelletan	11,56
	Tarascon –Rue Amy, sur les contre fort de l'église	11,49
	Tarascon - angle de la rue de la révolution et de la rue du jeu de Paume	11,68
	Tarascon – rue Jean Jaurès	11,79
	Mas de Lucas	6,78

Tableau 11. Laisses des crues de 1840 et 1856 en rive droite du Rhône

Zone protégée	Lieu	Cote relevée (m NGF)
Novembre 1840	Beaucaire – rue nationale	7,01
	Fourques – Centre village	6,45
	Fourques – Mas de Marguerites	6,37
	Fourques – Mas de Marsane	6,29
	Bellegarde – rue de Beaucaire	6,23
	Saint Gilles – quai du canal	5,32
	Saint Gilles – avenue Anatole France	5,15
	Aigues Mortes - rempart	2,52
Mai 1856	Pas de laisses de crues recensées	

Tableau 12. Laisses des crues de 1840, 1843, 1856 et 1993 en Camargue Insulaire

Zone protégée	**Lieu**	**Cote relevée (m NGF)**
Novembre 1840	Mas des Bernacles	1,89 (3,30 autre relevé)
Novembre 1843	Mas de Bernacles	1,59
Mai 1856	Trinquetaille – avenue Edouard Herriot	6,26
	Mas de Bernacle	2,16
	Mas du Pont de Rousty	2,62
Octobre 1993	Mas du Pont de Rousty	2,42

L'image spot ci-après illustre quant à elle l'inondation des zones protégées Rive Gauche et Rive Droite en décembre 2003 provoquée par le Rhône (plaine du Trébon), le Vigueirat et l'impluvium local (Ancien marais d'Arles et Marais des Baux) en rive gauche et par le Rhône et l'impluvium en rive droite.

12 000 habitants ont été inondés en décembre 2003 (1/3 en rive droite et 2/3 en rive gauche).
Le montant des dommages est estimé à 700 millions d'euros de dommages répartis 50/50 entre les deux rives du Rhône.

Elle est suivie pour la Rive Gauche du Rhône par des extraits de la modélisation hydraulique réalisée par EGISeau dans le cadre de l'étude de ressuyage en rive gauche du Rhône [K107].

Les cotes relevées dans la plaine du Trébon sont comprises entre 5,1 et 5,6 m NGF. Dans le casier des alpilles, le Rhône a atteint la cote de 7,9 m NGF.
Dans les anciens marais d'Arles et les marais de la vallée des Baux, les laisses de crues relevées donnent des cotes comprises entre 2 et 2,1 m NGF, soit 5 m de moins qu'en 1840 et 4 m de moins qu'en 1856 !

La comparaison de ces cotes permet de mesurer l'ampleur des inondations de 1840 et 1856 provoquées par la formation de brèches dans la digue de la Montagnette en comparaison avec celle de 2003 provoquée par des brèches dans les digues de protection des trémies du remblai ferroviaire pour la partie Trébon et par une brèche dans le Vigueirat ainsi que l'impluvium local pour la partie marais.

Figure 27. Inondations de 2003 (image SPOT IGN)

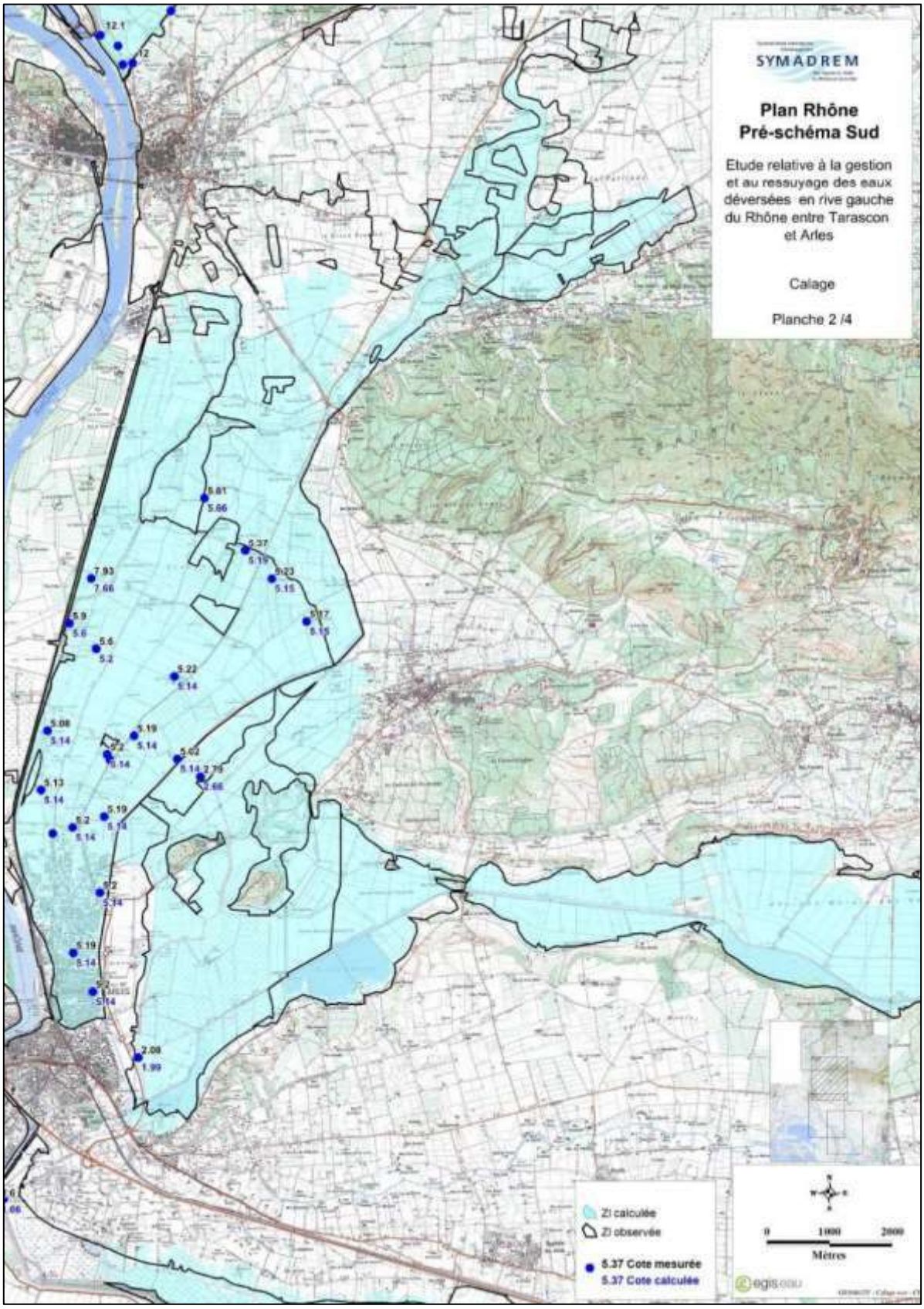


Figure 28. Inondations du Rhône, du Vigueirat et Impluvium local de 2003 cotes relevées et modélisées [K107]

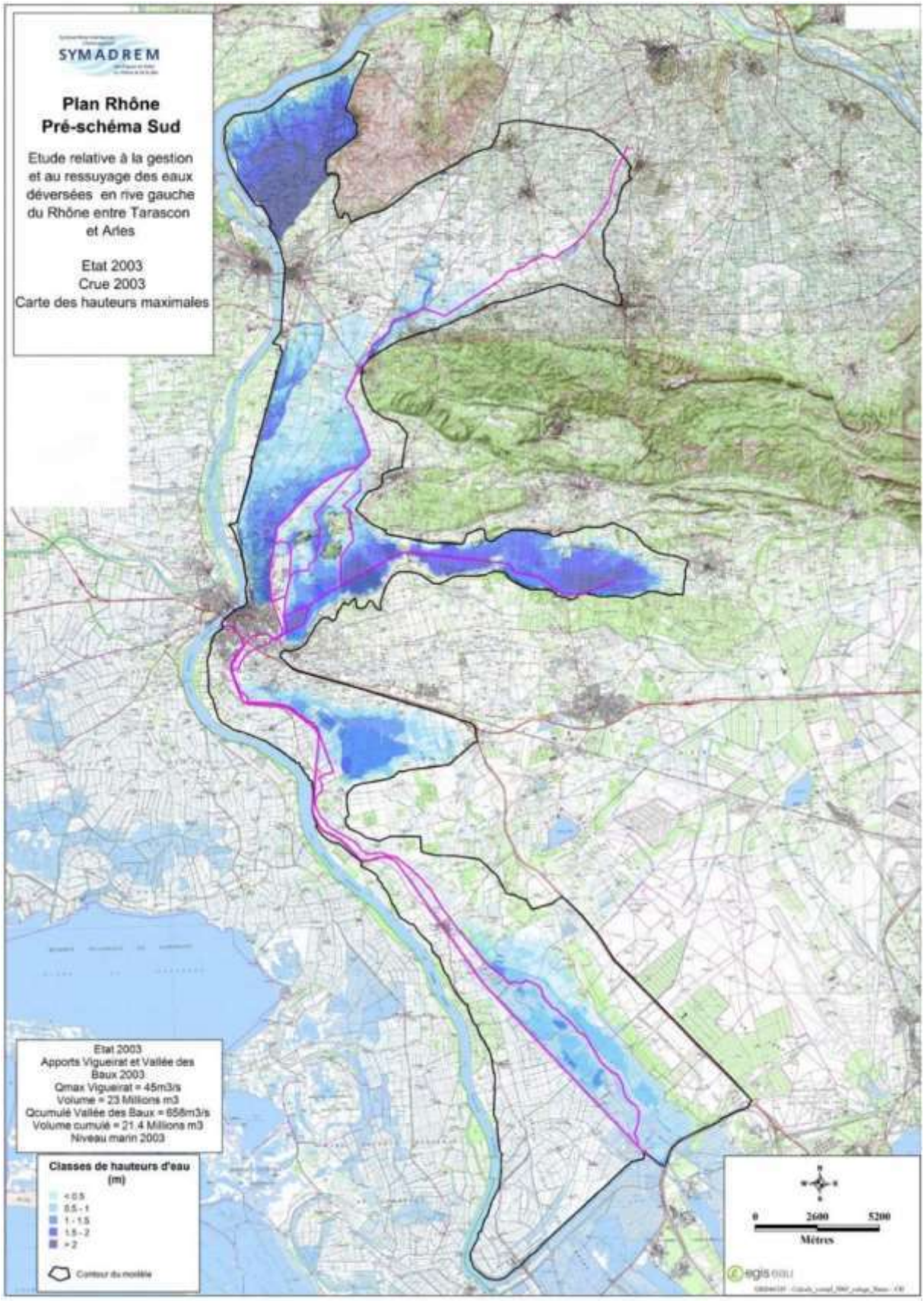


Figure 29. Inondations du Rhône, du Vigueirat et Impluvium local de 2003 hauteurs d'eau modélisées [K107]

La carte ci-après est extraite de la modélisation hydraulique réalisée en Rive Droite sur la plaine de Beaucaire par ISL dans le cadre de l'étude de la digue Beaucaire-Fourques [K121].

A l'instar de la rive gauche du Rhône, la comparaison des laisses de la crue de 2003 avec celles de 1840 et 1856 permet de mesurer l'ampleur des inondations du XIX^{ème} siècle en comparaison avec celle de 2003.

Les cotes relevées et modélisées dans la plaine de Beaucaire sont d'environ 3,4 m NGF, soit 3 m de moins qu'en novembre 1840 ! Dans le couloir de Saint Gilles, elles sont d'environ 3 m NGF, soit 2,5 m de moins qu'en novembre 1840.

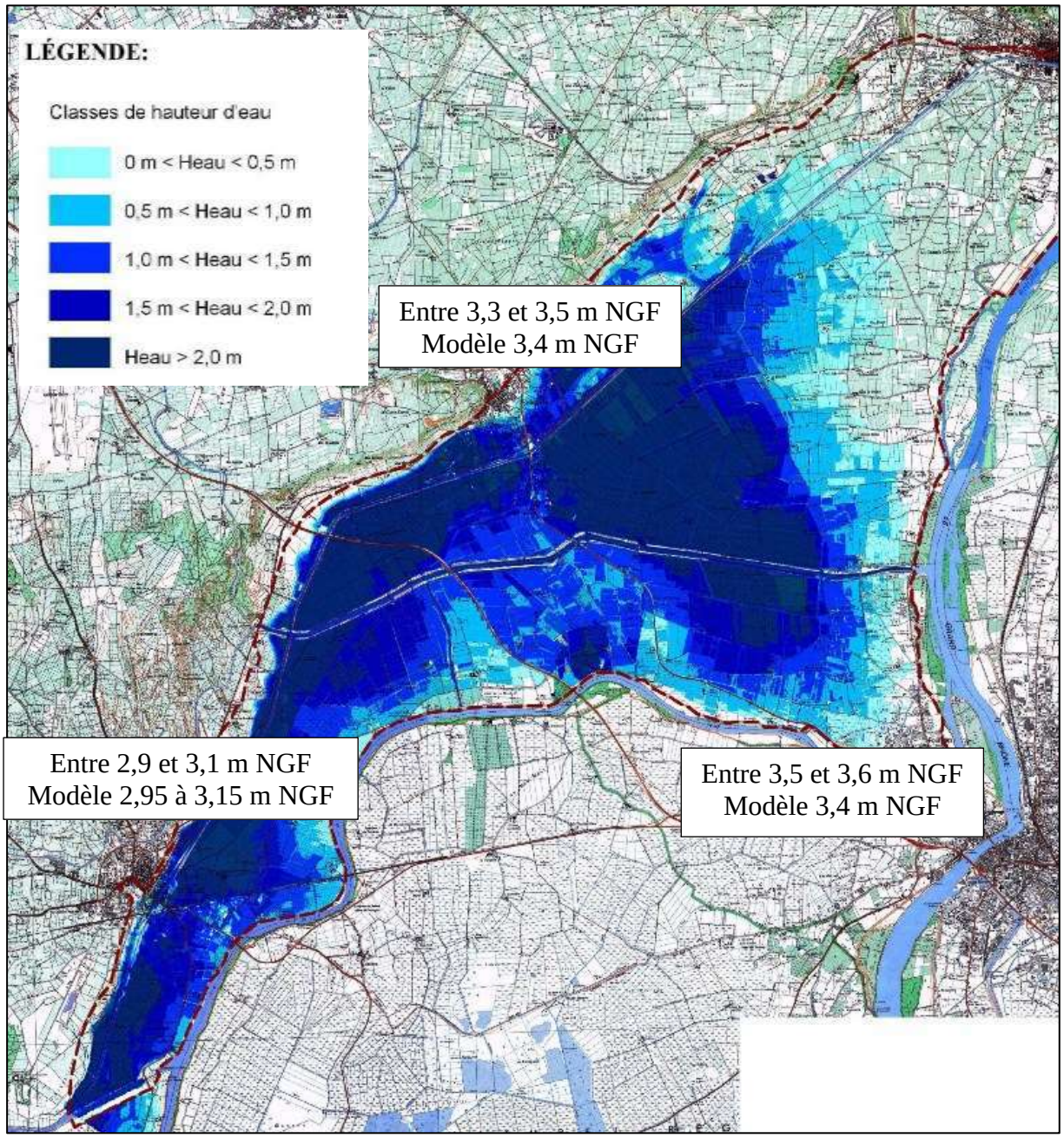


Figure 30. Plaine de Beaucaire - Modélisation inondation du Rhône – Déc. 2003 cotes relevées et modélisées [K121]

Les deux cartes ci-après sont extraites de la modélisation hydraulique réalisée par EGISeau dans l'étude de renforcement des digues du Petit Rhône [K117].

Les cotes relevées en Camargue Gardoise au nord de la RD58 sont d'environ 1,5 à 1,7 m NGF, soit 1 m de moins qu'en novembre 1840.

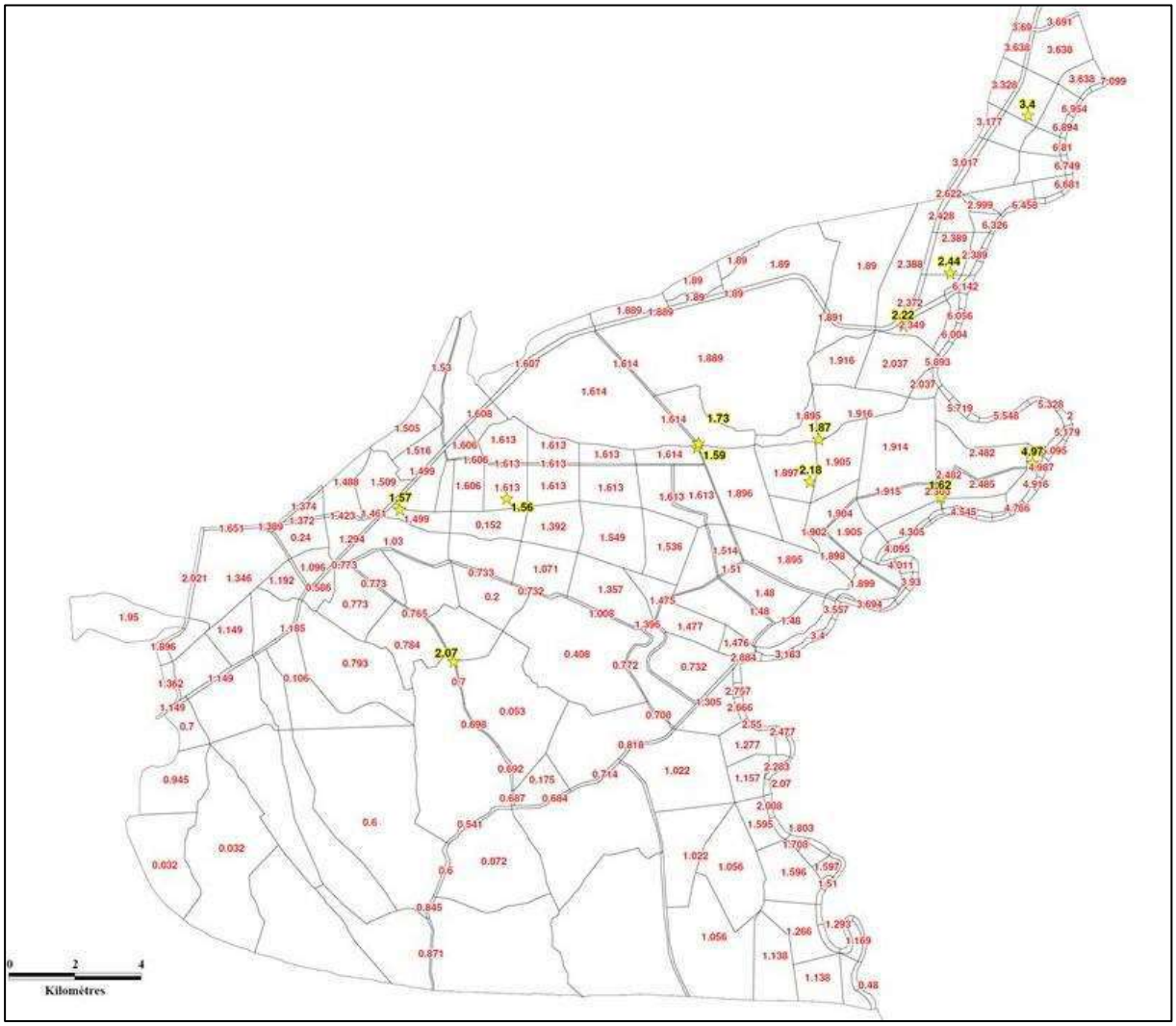


Figure 31. Camargue Gardoise – Modélisation inondation du Rhône – Déc. 2003
cotes relevées et modélisées [K117]

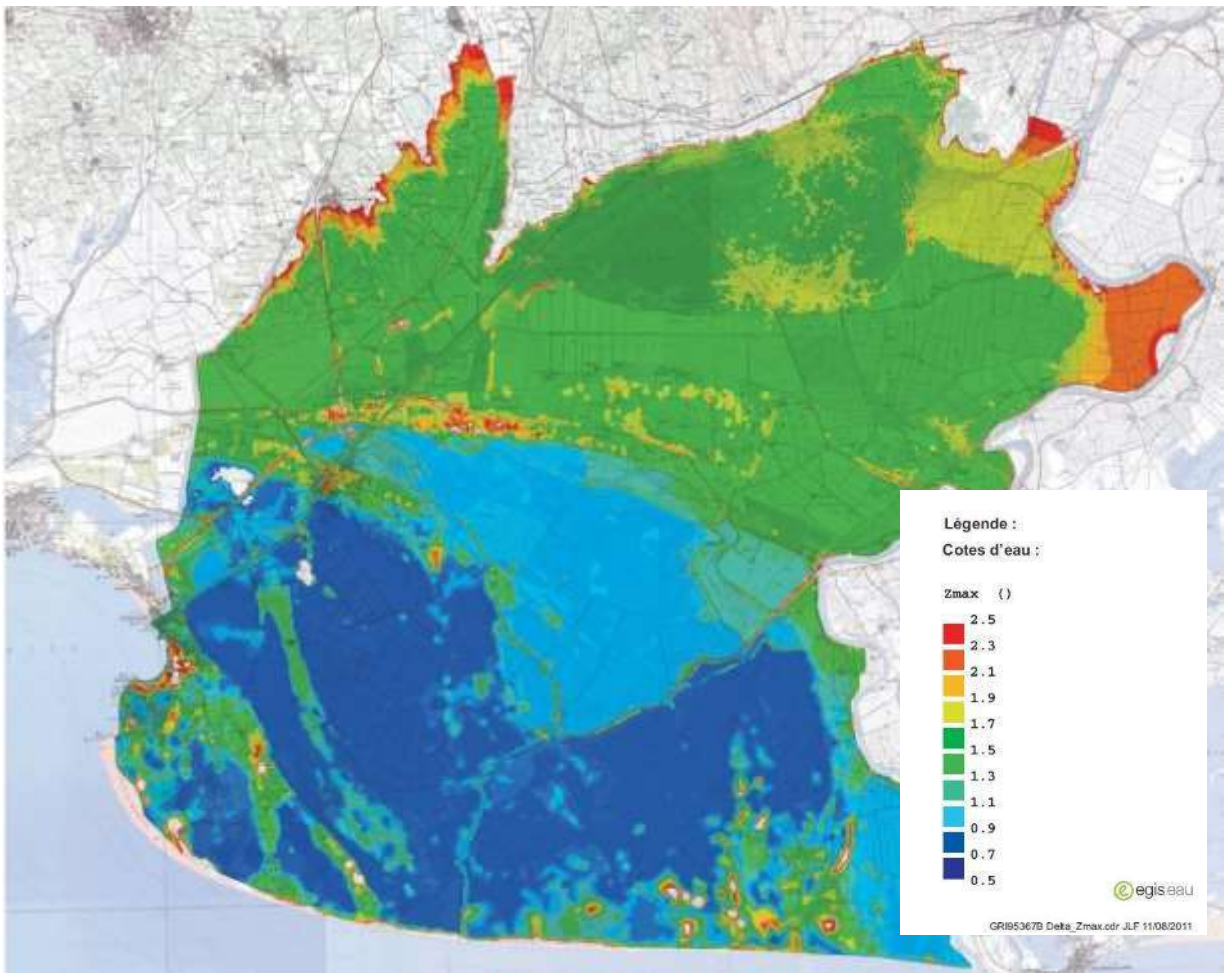


Figure 32. Camargue Gardoise – Modélisation inondation du Rhône – Déc. 2003 cotes relevées et modélisées [K117]

La carte ci-après illustre l'inondation la zone protégée en octobre 1993.

Le volume d'eaux déversées a été estimé à environ 130 millions de m^3.

450 maisons ont été inondées. La surface agricole touchée a été estimée à 13 000 ha sous une hauteur d'eau moyenne de 1 m.

Une partie de ce volume, 51 millions de m^3 a été rejeté dans le Rhône par les stations de pompage d'Albaron (PRG) et Beaujeu (GRD). La plus grande partie s'est écoulée vers le canal de Rousty et l'Etang de Vaccarès. De là, cette eau a été évacuée à la Mer, en partie gravitairement par le pertuis de la Fourcade (28 millions de m^3) et par pompage (44 millions de m^3). Ces pompages effectués pour éviter l'inondation des Saintes-Maries-de-la-Mer ont nécessité l'installation de puissantes pompes d'une capacité totale d'environ 14 m^3/s. Ils ont duré deux mois.

L'image satellitaire et la photographie aérienne ci-après illustre l'ampleur de l'inondation.

Figure 33. Inondation du Rhône d'octobre 1993 – source Spot [A1993 04]

En janvier 1994, le volume d'eaux déversées a été estimé à 60 millions de m^3, ce qui est plus faible qu'en octobre 1993, mais s'explique par la décrue qui a été plus rapide et par l'importance des moyens d'interventions pour fermer la brèche de Beaumont.

La surface touchée a été de 2000 Ha et le nombre d'habitations touchées : 45.

Le montant des dommages des crues d'octobre 1993 et janvier 1994 a été estimé sommairement dans le rapport Dambre à 200 millions de Francs, soit 30 millions d'euros. Cette estimation ne tient pas compte des dommages domestiques, dommages aux infrastructures et des interventions de moyens militaires.

Figure 34. Inondation du Rhône de janvier 1994 – source SPOT [A1994 02]

4.4 ENSEIGNEMENT DES CRUES PASSEES

Depuis 1840, 9 crues ont donné lieu à inondation : 1840, 1841, 1843, 1856, 1993, 1994, 2002, 2003, 2016. La crue d'octobre 1841 a été causée par des brèches dans les réparations des brèches de novembre 1840. La crue de novembre 2016 légèrement en deçà d'une crue décennale a causé contre toute attente une petite brèche dans la digue du Petit Rhône rive gauche. Elle a pu être rapidement colmatée, compte tenu de la faible charge d'eau. Le volume d'eau libérée dans la zone protégée a été de 30 000 m^3. Un mas a été inondé sous environ 50 cm. Cette brèche aurait pu être, compte tenu de ces caractéristiques, classée comme un départ de brèche au regard des départs de brèche passés mais nous avons préféré appliquer de manière doctrinaire les définitions préalablement posées pour l'étude accidentologique.

La figure ci-dessous donne, pour la période 1830-2016, le débit de pointe maximum du Rhône par année glissante (du 1er novembre de l'année n au 31 octobre de l'année n+1). Les crues ayant provoqué des inondations par brèche sont indiquées en couleur rouge. Seule manque la crue de 1841 qui s'est produite moins d'un an après celle de novembre 1840. Les classes de débits retenues pour la détermination des niveaux de protection sont indiquées.

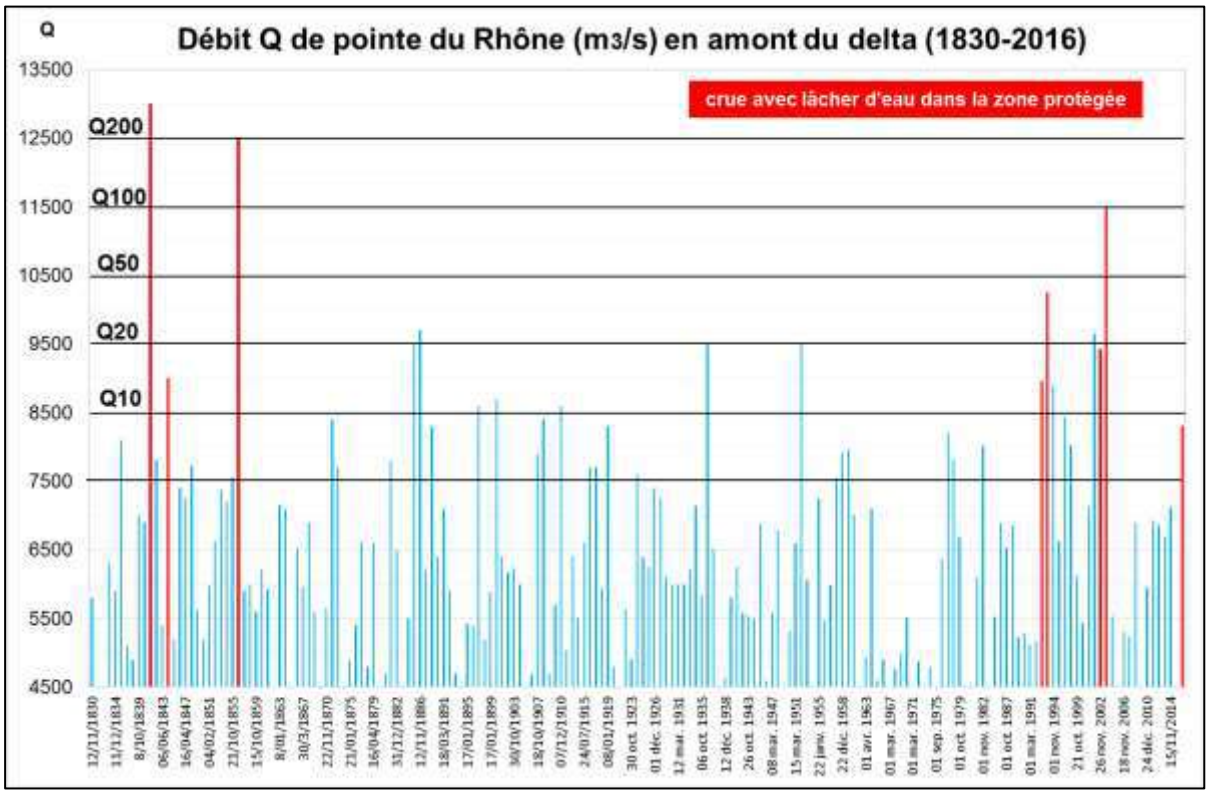


Figure 35. Crues max annuelles et inondations par brèche sur la période 1840-2016

Aucune inondation par lâcher d'eau n'a eu lieu pour un débit inférieur ou égal à 8300 m^3/s, débit de la crue de novembre 2016. La crue suivante est celle d'octobre 1993 d'un débit de 9000 m^3/s.
Le tableau ci-après donne par classe de débit, sur la base des observations passées, le nombre de crues et d'inondation du Rhône observées par classe de débit ainsi que la probabilité d'inondation par rupture observée. Il donne également la probabilité d'inondation retenue en tenant compte du débit de la première brèche (cf tableau ci-après).

Tableau 13. Nombres de crues et d'inondations par classe de débit, probabilités calculées et retenues

Débit (m^3/s)	Période de retour (ans)	Nombre de crues	Nombre d'inondations	Fréquence observée d'inondation	Probabilité d'inondation retenue
7500-8500	5-10	23	1	4 %	< 5 %
8500-9500	10-20	7	3	43 %	< 50 %
9500-10500	20-50	6	1	17 %	> 50 %
10500-11500	50-100	0	0	-	100 %
11500-12500	100-200	1	1	100 %	100 %
12500-14160	200-800	2	2	100 %	100 %

Ce premier bilan permet d'avoir une première approche fréquentielle du risque d'inondation du Rhône en fonction du débit à Beaucaire/Tarascon. Il est basé sur l'observation et ne tient donc pas compte ou partiellement, des travaux de confortement et de l'état actuel des digues ainsi que des moyens de surveillance et d'intervention mis en place. Il est une photographie de la période écoulée et de la période en cours qui permet de comparer les probabilités de brèches calculées (Cf. chapitre 7) avec les probabilités observées.

Des probabilités d'inondation sont retenues à dire d'expert sur la base des fréquences observées et de notre retour d'expérience. Pour la classe de débit 9500-10500, la fréquence observée d'inondation est inférieure à celle de la classe 8500-9500. Cette différence s'explique par l'absence d'archives pour les crues de 1886, 1910, 1935 et 1951 qui figurent dans cette classe de débit. Il n'y a pas eu d'inondation massive de la zone protégée pour ces crues. L'apparition de petites brèches avec des inondations localisées comme ce fut le cas en 2016, n'est néanmoins pas à exclure et même probable. On retiendra donc une probabilité de brèche supérieure à 50 % sur la base de l'observation faite en décembre 2003 ; le débit de la première brèche à Claire Farine a été en effet observé pour un débit de 10500 m^3/s (cf. tableau ci-après).

Le tableau ci-après indique le débit maximal de ces crues mais également le débit estimé lors de la formation de la première brèche, le nombre de brèches occasionnées, la largeur maximale et cumulée des brèches ainsi que les volumes de déversements dans la zone protégée et la part en % du volume déversé au travers des brèches sur le volume de crue contenu par les digues (au-dessus de 6 000 m^3/s)

Tableau 14. Période 1840-2016 : Caractéristiques et conséquences des brèches

Crue	Débit (m^3/s)	Période de retour (années)	Débit 1ère brèche (m^3/s)	Brèche (Nb.)	Largeur Brèche Max (m)	Largeur cumulée des brèches (m)	Volume Déversement (Millions m^3)	**Volume déversé/ Volume crue** (en %)
novembre 1840	13000	300	6500	18	480	2480	2800	72 %
mai 1856	12500	200	11000	9	500	1230	1800	82 %
octobre 1993	9000	15	8500	4	40	112	130	16 %
janvier 1994	10300	40	10000	2	65	100	60	4 %
novembre 2002	9400	20	9400	1	15	15	1,6	0 %
décembre 2003	11500	100	10500	4	130	266	227	23 %
novembre 2016	8300	10	8000	1	3	3	0,03	0 %

Le tableau précédent donne également le rapport du volume déversé au travers des brèches sur le volume des crues contenu par les digues, qui correspond au volume calculé quand le débit est supérieur à la cote du pied de digue amont, soit un débit d'environ 6000 m^3/s qui correspond à la crue biennale. Ce rapport a été d'environ 1/4 en décembre 2003 contre 3/4 en 1840 et 1856.

Les deux figures ci-après permettent de voir l'évolution de la largeur maximale des brèches sur respectivement le Petit Rhône et le Rhône en fonction de la hauteur estimée de charge au droit de la brèche mesurée depuis le terrain naturel aval. Sur le Petit Rhône, on constate une proportionnalité de la largeur maximale de la brèche en fonction de la hauteur de charge, qui s'explique facilement par la proportionnalité entre la hauteur de charge et la force tractrice s'exerçant sur les flancs latéraux de la brèche lors du processus d'élargissement. Cette proportionnalité permet même d'en déduire une certaine tendance linéaire, qui pourrait être estimée de façon sécuritaire à $L_{brèche} = 72 \text{ X } H_{charge} - 123$ (avec L et H exprimées en m). La brèche de Claire Farine de 2003 qui est la seule brèche initiée par surverse (en dehors des

deux brèches dans les digues de protection des trémies ferroviaires) suit un comportement similaire aux autres brèches initiées par érosion interne.

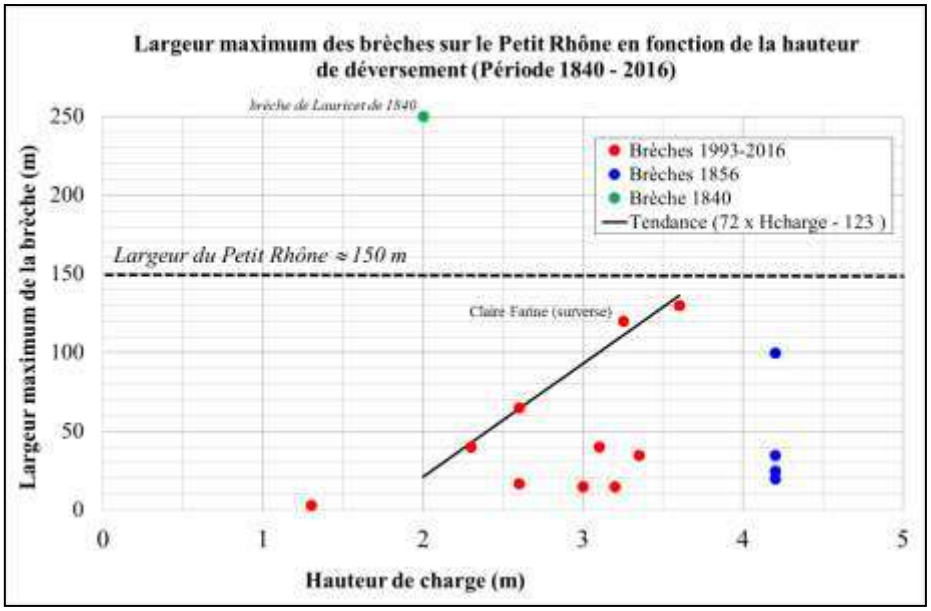


Figure 36. Petit Rhône - Largeur des brèches en fonction de la hauteur de charge

Sur le Grand Rhône, la proportionnalité est moins apparente bien qu'elle doive également exister. On constate que les brèches de 1840 (à l'exception d'une sur le Grand Rhône) initiée par surverse suivent un comportement analogue à celles de 1856 toutes initiées par érosion interne.
Sur les deux bras du fleuve, la largeur des brèches semble plafonnée par la largeur du fleuve (150 m sur le Petit Rhône et 500 m sur le Rhône). Sur le Grand Rhône, on note une seule brèche par érosion interne en 1840, pour une hauteur de charge de 1,5 m, qui ne nous permet pas de dresser une analyse.

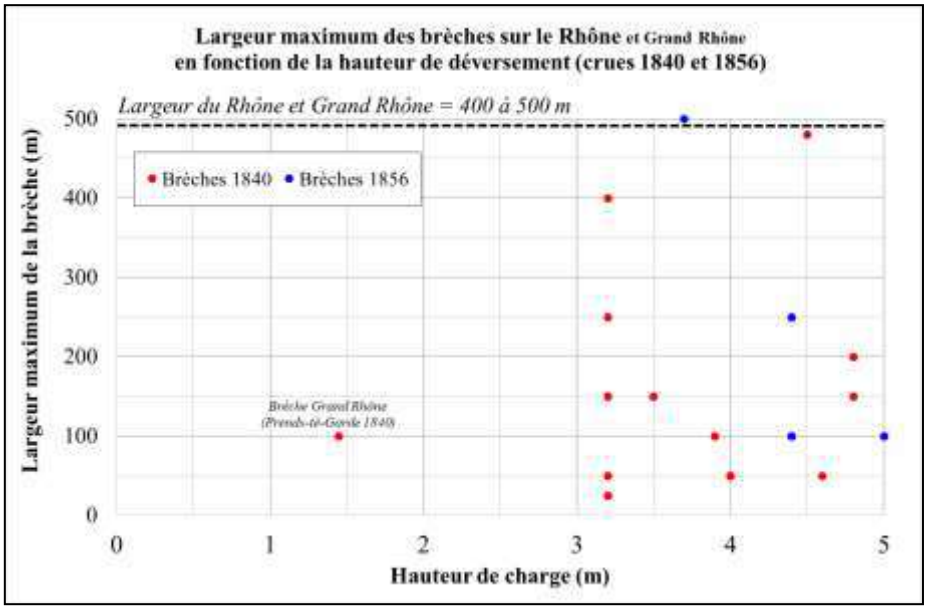


Figure 37. Rhône - Largeur des brèches en fonction de la hauteur de charge

La figure ci-après illustre la parfaite corrélation entre la largeur cumulée de brèches et le volume de déversement au travers des brèches en fonction du débit du Rhône en amont du delta.
L'évolution de la largeur cumulée de brèches et du volume de déversement au travers des brèches suit une tendance exponentielle vis-à-vis du débit en tête de delta. L'évolution très sensible de ces deux indicateurs au-delà du débit de 11500 m^3/s s'explique par le fait qu'en 1840 et 1856, la quasi-totalité des brèches a été occasionnée sur le Rhône entre Beaucaire et Arles, alors que l'ensemble des brèches sur la période récente a été observé sur le Petit Rhône qui ne prend que 12 % du débit total en fonctionnement sans brèche et de l'ordre de 20 % quand des brèches se produisent sur le Petit Rhône (ce qui est dû à l'appel de débit lié à l'abaissement de ligne d'eau causé par les brèches).

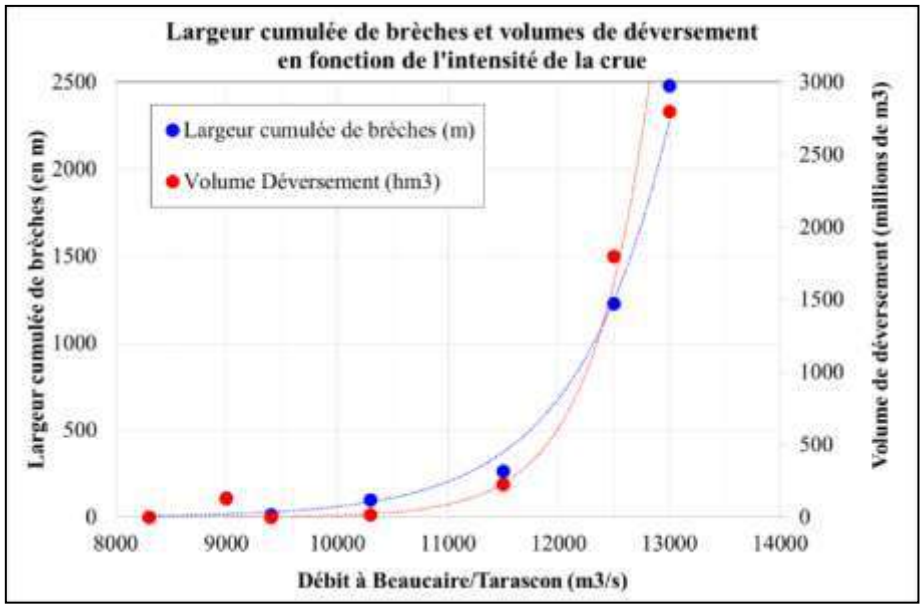


Figure 38. Largeur cumulée de brèches et volume de déversement en fonction du débit du Rhône

En décembre 2003, les digues du Rhône étaient en limite de rupture comme en attestent les débuts de surverse contenus au droit de la station BRL en rive droite et les infiltrations dans le ballast du remblai ferroviaire en rive gauche. Le sinistre de 2003 aurait très bien pu se transformer en catastrophe comparable aux catastrophes de 1840 et 1856 avec un surplus de débit de crue de quelques centaines de m^3/s.

La figure ci-dessous donne le rapport volume de déversement au travers des brèches sur largeur cumulée de brèche. Ce rapport est compris globalement entre 0,1 et 1,5. Il augmente globalement avec l'intensité de la crue ce qui est normal, compte tenu de ce que l'hydrogramme de crue et donc en définitif le volume de crue augmentent avec le débit de pointe de la crue.

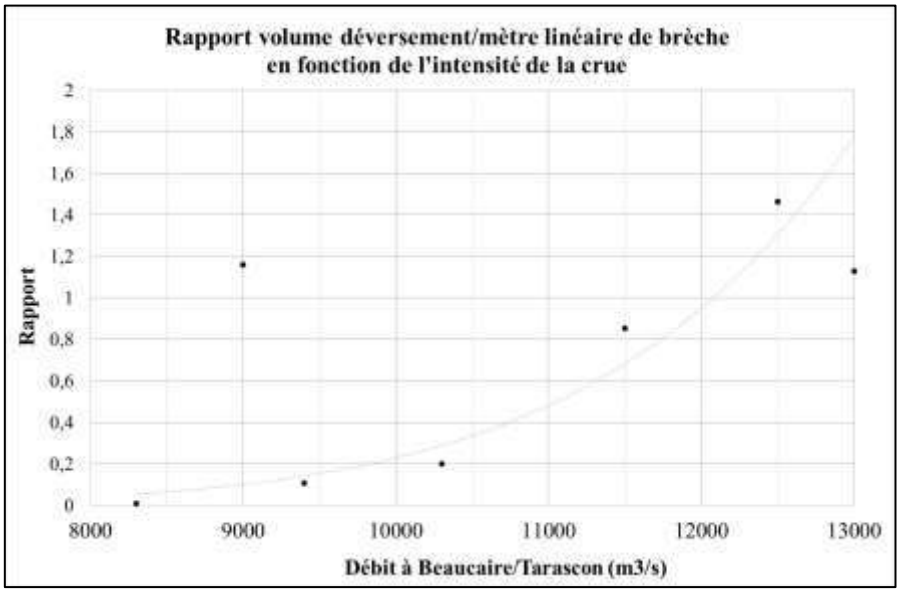


Figure 39. Rapport volume déversement sur largeur de brèche en fonction de l'intensité de crue

L'analyse des charges d'eau mesurées depuis le côté protégé (figure ci-après) montre que quasiment tous les départs de brèche par érosion interne présentaient une charge d'eau inférieure à 2,5 mètres (à l'exception d'une) et qu'a contrario, toutes les brèches également par érosion interne, avaient au moment du processus final d'ouverture, une charge d'eau supérieure ou égale à 2,5 mètres (à l'exception de celle de 2016).

L'analyse du paramètre Revanche/Hauteur (R/H) de digue a montré également une différence de comportement lors du processus de formation de la brèche par érosion interne. Lorsque ce rapport a été inférieur à 0,4, il y a eu systématiquement formation de brèche et a contrario quand ce rapport a été supérieur à 0,5, le processus de brèche n'est allé quasiment jamais jusqu'à sa fin, ce qui pourrait laisser à penser que l'effondrement du toit, lors du processus d'accroissement du conduit, a pu interrompre le processus de progression de la brèche. Dans tous les cas, les paramètres charge d'eau et le ratio R/H apparaissent fortement corrélés entre eux et jouent un rôle primordial dans le processus de brèche.

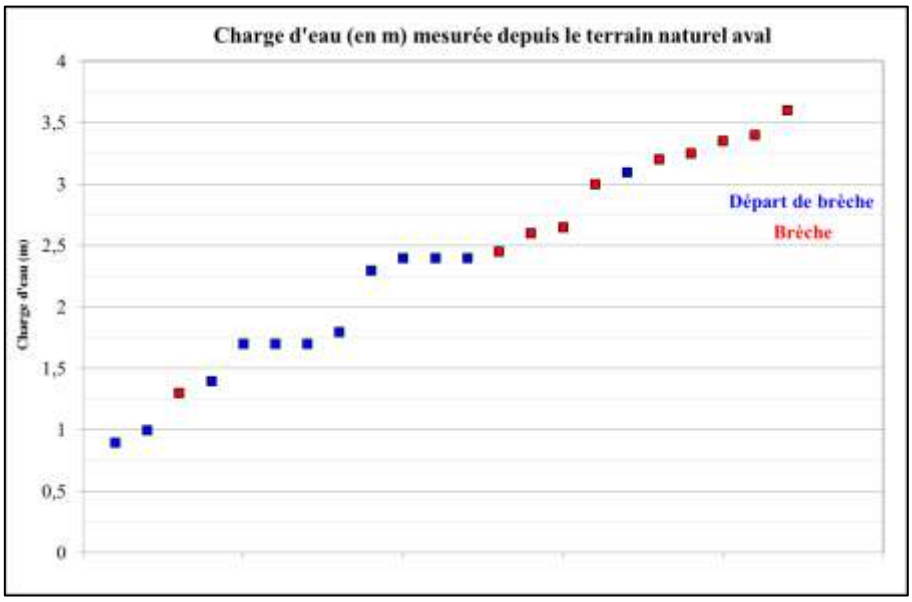


Figure 40. Distribution des charges d'eau pour les brèches et départs de brèche

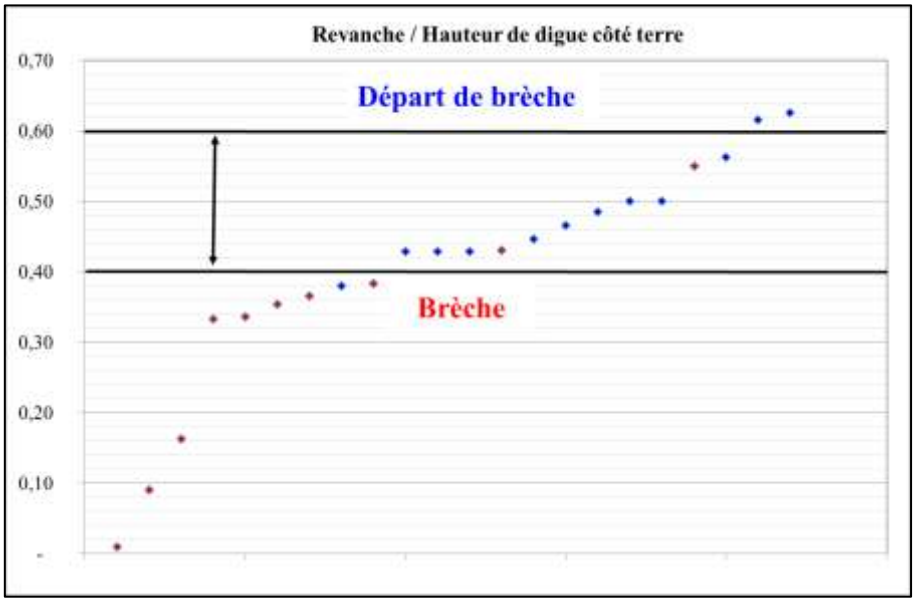


Figure 41. Distribution du paramètre Revanche/Hauteur pour les brèches et départs de brèche

Il est également à signaler que seules deux brèches ont pu être fermées en crue, celle de Beaumont en 1994 et celle de Ventabren en 2016. Les secteurs, où se sont produits ces brèches, comportaient un ségonnal ce qui a permis la mise en œuvre en becs de canard, d'enrochements côté fleuve de plus en plus petits pour limiter le débit fuite et terminer le colmatage par la mise en œuvre de matériaux fins dès que le débit de fuite était suffisamment faible. Les hauteurs de charge mesurées depuis l'amont étaient de 1,6 m en 1994 et 0,7 m en 2016. Aucune intervention héliportée avec largage de bigs-bags n'a permis le colmatage de brèche.

5 MODELISATION HYDRAULIQUE DES CRUES & INONDATIONS

5.1 MODELES UTILISES

Les modèles utilisés, sont les modèles développés dans le cadre du programme de sécurisation. Ce sont des modèles bidimensionnels (2D) dédiés aux opérations. Ce choix a été justifié par la mise à disposition de données topographiques et bathymétriques de précisions, et également par la nécessité de disposer d'un aléa de précision dans le cadre des études de dangers (modélisation des ondes de rupture et de la propagation des crues déversantes). Les figures ci-après illustrent respectivement les modèles numériques de terrain et modèles bathymétriques utilisés pour la mise en œuvre des modèles.

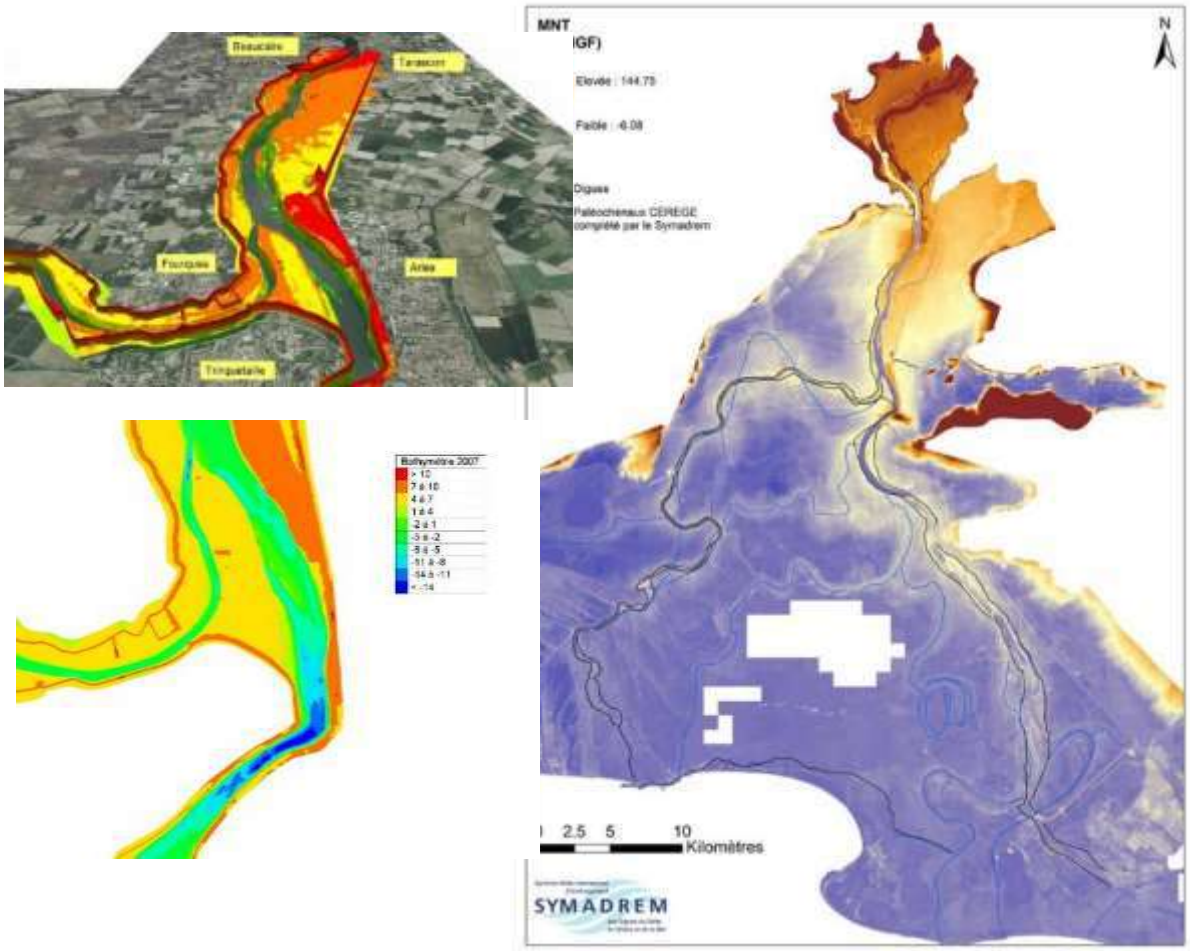


Figure 42. Modèles numériques de terrain et bathymétriques utilisés pour la construction des modèles hydrauliques (sources CNR et IGN)

Devant l'impossibilité de réaliser un modèle 2D de précision à l'échelle du grand delta, le choix de réaliser plusieurs modèles hydrauliques a été retenu. L'étendue des différents modèles hydrauliques a été définie en tenant compte du phasage opérationnelle du programme de sécurisation. Les périmètres de chaque modèle ont été déterminés sur la base des principes suivants :

- La relative (du moins pour l'évaluation des impacts hydrauliques) indépendance hydraulique des 3 bras du Rhône => les études, réalisées par la DREAL Rhône Alpes

pour la définition du schéma de gestion des inondations du Rhône aval, ont montré que les aménagements dans le Petit Rhône ont des impacts importants dans le Petit Rhône, mais qu'au-delà du défluent, ces impacts sont centimétriques. Il en est de même pour le Grand Rhône.

- Le fonctionnement dénoyé/noyé des déversements ou ondes de rupture du lit endigué vers le lit protégé. En effet, la configuration en toit du lit majeur du Rhône a pour conséquence que les déversements sur les digues ou au travers des brèches se font en écoulement dénoyé. Le fonctionnement en dénoyé n'est plus valable pour les brèches ou pour certains débordements au fur et à mesure que l'on s'approche des embouchures (cas de Port-Saint-Louis-du-Rhône ou de la rive droite du Petit Rhône en aval du bac du sauvage).

Sur la base des hypothèses susvisées, 5 modèles ont ainsi été définis. Leur étendue figure ci-après.

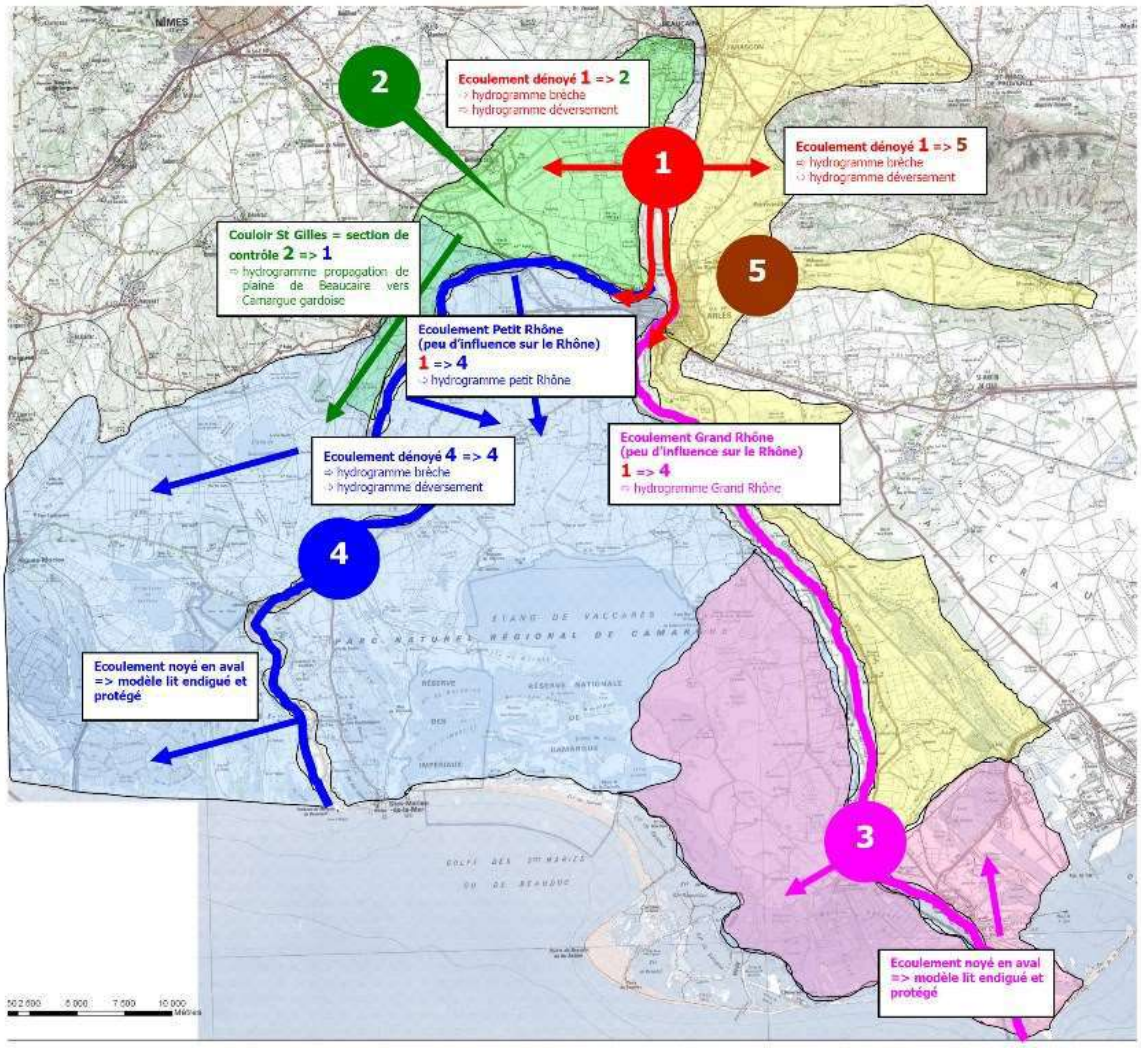


Figure 43. Découpage des modèles

Pour la présente étude de propagation, deux modèles ont été utilisés :

- Le couplage du modèle n°1 et n°3,
- Le modèle n°4.

Le modèle n°1 utilisé pour le calcul des lignes d'eau et le calage des ouvrages entre Beaucaire et Arles s'étend depuis l'aval du barrage de Vallabrègues jusqu'à la mer sur le Petit Rhône et à 4 km de l'embouchure sur le Grand Rhône. C'est un modèle 2D (code TELEMAC développé par EDF), qui a été développé par la CNR$_{ingénierie}$. Il a permis le calage des ouvrages entre Beaucaire et Arles [K100]. Il comporte 270 000 mailles de calculs. Ce modèle est le principal modèle développé dans le Plan Rhône, il permet de fournir l'ensemble des données nécessaires aux autres modèles. Pour définir l'impact global du programme de sécurisation, il a été, dans le cadre de prestations supplémentaires confiées à la CNR$_{ingénierie}$ [K103], couplé au modèle n°3 du Grand Rhône [K102] qui s'étend jusqu'à l'embouchure (315 000 mailles de calcul au total). L'étendue du modèle couplé [K103] figure ci-dessous.

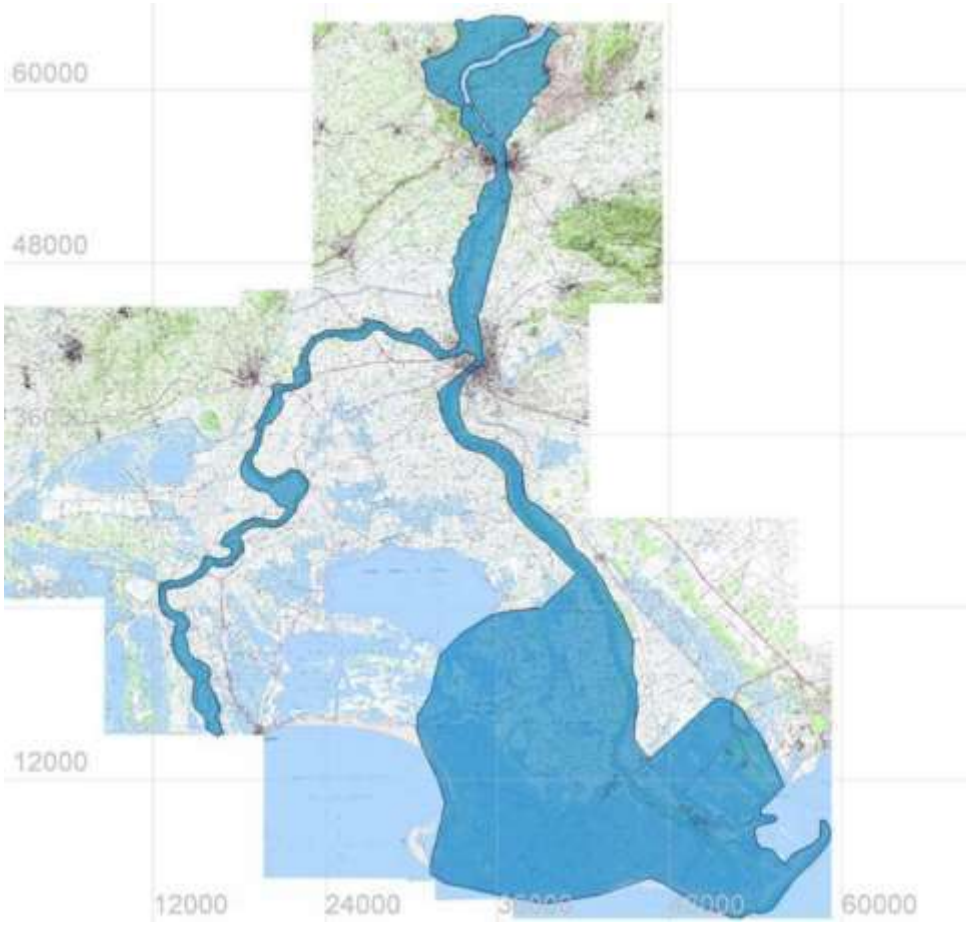


Figure 44. Etendue du modèle de l'étude de calage (source CNR [K103])

Les conditions limites amont du modèle sont :

- Débit du Vieux Rhône (barrage de Vallabrègues)
- Débit du Rhône usiné (usine hydro-électrique de Beaucaire)
- Débit du Gardon

Les conditions limites aval du modèle sont :

- Les marégrammes au Grau de la Dent (pour mémoire translaté au PK326 pour le Grand Rhône pour l'étude de calage – modèle n°1)

Le modèle a été calé sur la crue de décembre 2003 à partir des 9 limnigrammes de la CNR et des laisses de crues levées par la DREAL, la CNR et SNCF Réseau (ex-RFF).

L'étude de calage précis entre Beaucaire et Arles réalisée par la $CNR_{ingénierie}$ [K100] a fait l'objet de deux analyses de sensibilité :

- une analyse de sensibilité lors de la phase de calage du modèle, qui a porté sur les paramètres suivants : débit, rugosité, bathymétrie pour définir la précision de calage du modèle.
- une analyse de sensibilité lors du calage des ouvrages, qui a porté sur les paramètres suivants : gradient de crue, niveau marin pour définir l'incertitude du modèle.

Les résultats liés à cette analyse sont présentés au chapitre n°4 relatif aux aléas naturels. Le modèle a une précision absolue estimée à 10 cm dans le lit mineur, 20 cm en traversée d'Arles, et 30 cm dans le lit majeur, soit l'ordre de précision des mesures (sources [K100], [K102] et [K103]).

Le modèle 4 développé par $EGIS_{eau}$ utilise le code TELEMAC développé par EDF. Il a été réalisé dans le cadre de l'étude de renforcement et décorsetage limité des digues du Petit Rhône. Il est composé de 3 modèles couvrant respectivement (Cf. figures ci-après) :

- le lit endigué du Petit Rhône du PK 281 à la Mer (140 000 mailles),
- le lit protégé de la Camargue Gardoise (282 000 mailles),
- le lit protégé de la Camargue Insulaire (150 000 mailles).

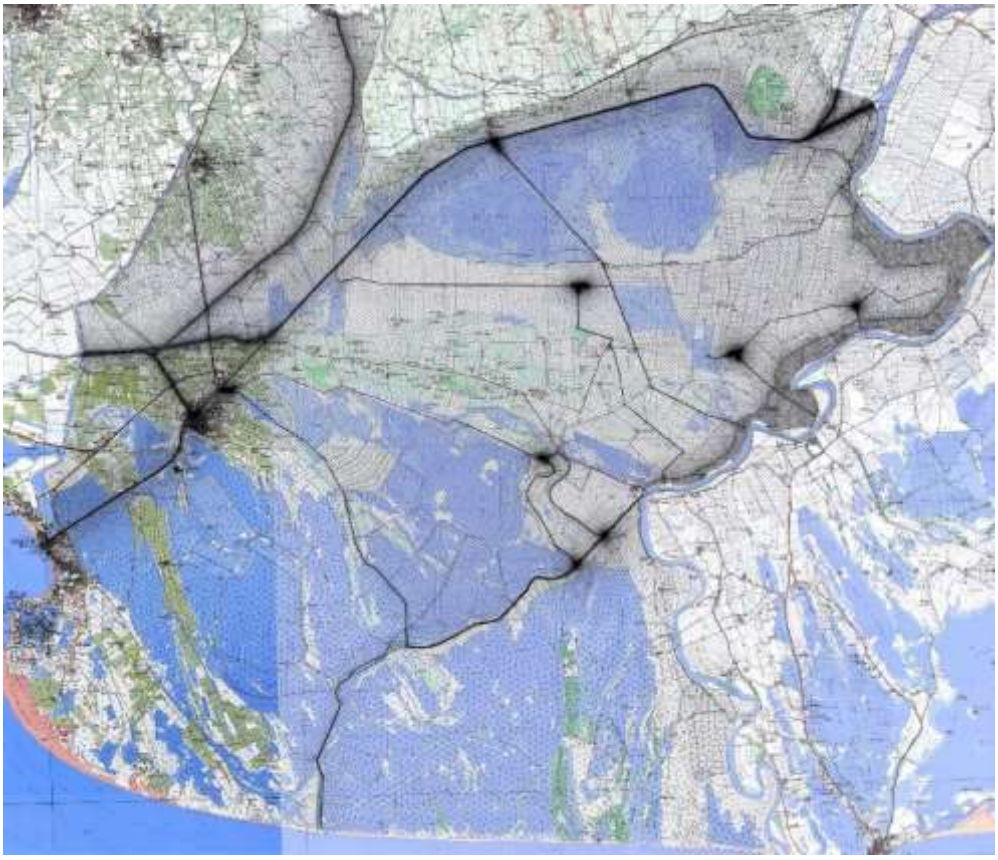


Figure 45. Etendue du modèle n°4 en Camargue Gardoise (source EGISeau [K117])

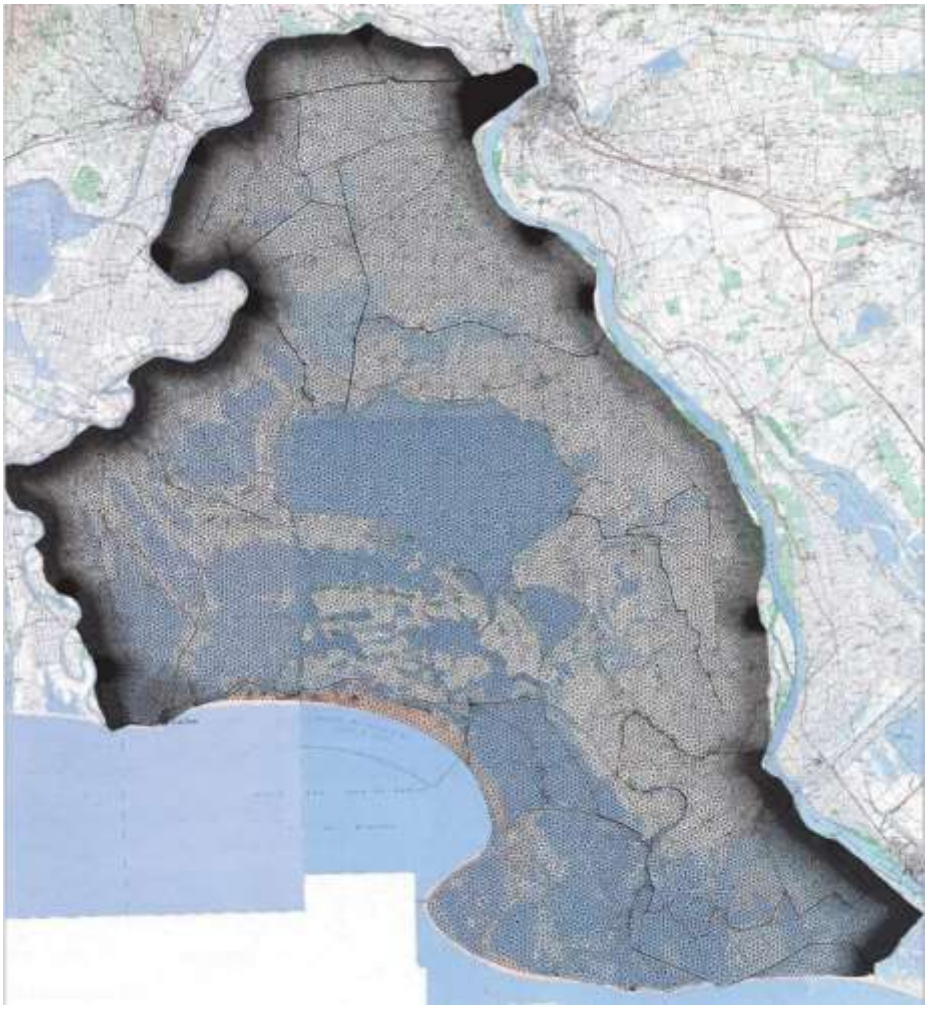


Figure 46. Etendue du modèle n°4 en Camargue Insulaire (source EGISeau [K117])

A l'instar des modèles développés par la CNR, ce modèle 4 a également fait l'objet d'analyse de sensibilité [K117].

Un modèle a également été construit par ISL pour représenter la propagation des brèches dans les centres urbains d'Arles. Le modèle numérique du terrain (MNT) exploité pour la modélisation a été réalisé par FUGRO en 2008 (LIDAR). Il est caractérisé par un maillage régulier au pas de 0,5 m et une précision planimétrique et altimétrique de l'ordre de 3 cm. Les figures suivantes présentent les lignes de niveau des zones modélisées.

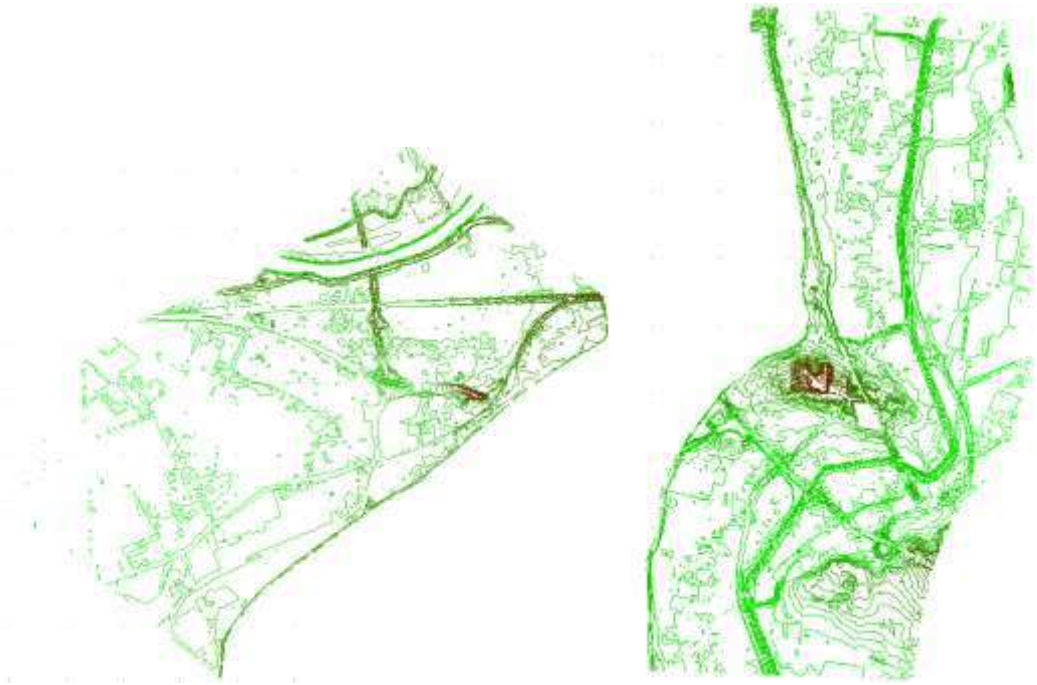


Figure 47. Emprise modèle quais lignes de niveau des zones modélisées

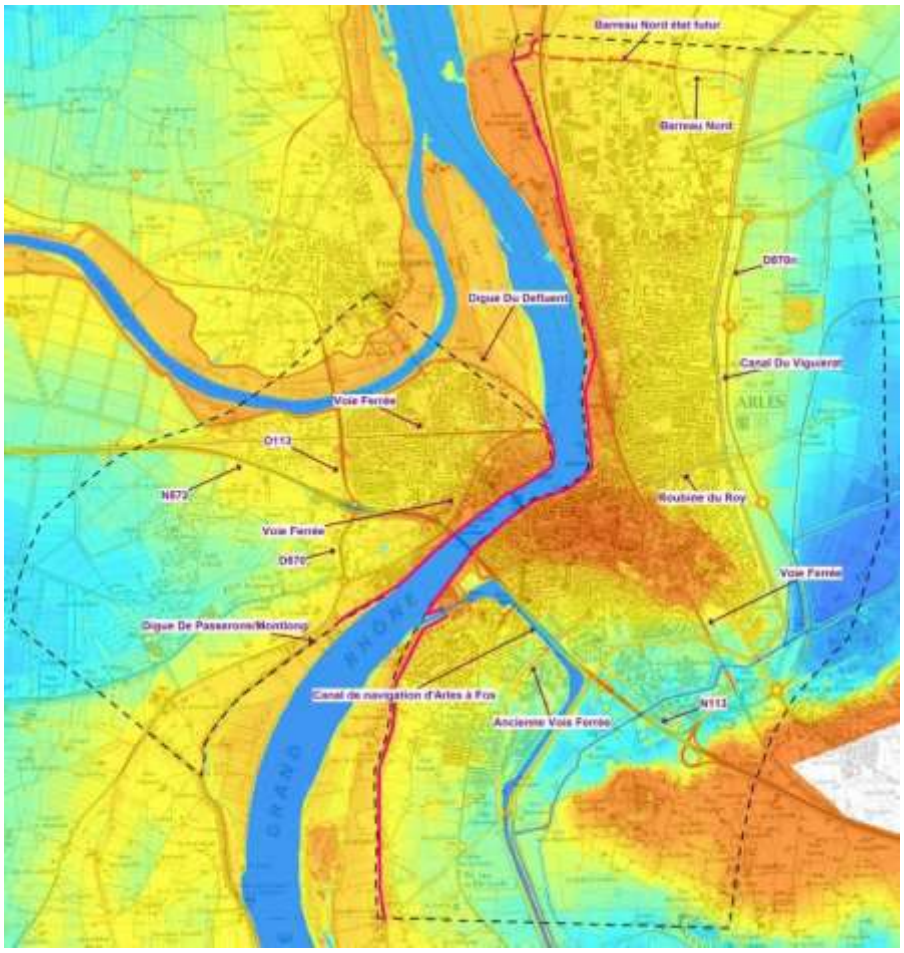


Figure 48. Topographie utilisée pour la construction du modèle

En rive gauche, la surface modélisée est de l'ordre de 20,9 km² et en rive droite, de l'ordre de 11,6 km². Les singularités de la plaine (autoroute, route nationale, voie ferrée, canaux…) sont intégrées au modèle. Le maillage a été affiné au droit des remblais structurants en adoptant un maillage de 2 m.
Pour les coefficients de frottement, les valeurs préconisées par le CEMAGREF ont utilisées pour l'établissement des modèles :

- habitat groupé : K = 10
- habitat peu groupé : K = 15
- habitat dispersé ou végétation importante : K = 20
- végétation basse : K = 30

Pour les conditions initiales, une modélisation sur fond sec a été retenue pour établir l'hydrogramme de rupture pour ne pas cumuler les phénomènes accidentels exceptionnels et afin de bien distinguer les aléas liés à la rupture de l'ouvrage.
La condition aux limites sur les contours du modèle est en écoulement de régime critique. Elle a peu d'incidence sur les résultats en dehors de la proximité immédiate des frontières du modèle.
Les simulations ont été menées sur une durée de 4 jours après l'occurrence du pic de la crue.
Dans la plaine, les vitesses d'écoulement sont faibles, de l'ordre du m/s et ne génère pas d'imprécision liée à la pression dynamique de l'écoulement (v2/2g = de l'ordre de quelques cm).
La principale incertitude réside dans la simplification de la topographie urbaine qui peuvent conduire à des particularités locales non prises en compte dans le modèle. En zone urbaine, des écarts de quelques décimètres sont envisageables. Dans les zones périurbaines, la précision du modèle est estimée de l'ordre du décimètre.

5.2 SCENARIOS DE CRUES MODELISES

5 scénarios de crues ont été retenus. Leurs caractéristiques sont définies ci-dessous

Tableau 15. scénarios de crues modélisées dans le programme du SYMADREM-Plan Rhône [K103]

Crues	Débit de pointe Beaucaire/Tarascon	Période de retour	Niveau marin
Crue 9500 (≅ crue de nov. 2002)	9 500 m^3/s	T ≈ 20 ans	Marégramme nov. 2002 (Max 0,95 NGF)
Crue 10500 (crue de janv. 1994 avec pointe translatée)	10 500 m^3/s	T ≈ 50 ans	Marégramme janv. 1994 (Max 0,81 NGF)
Crue 11500 (déc. 2003 sans brèche)	11 500 m^3/s ± 5 %	T ≈ 100 ans	Marégramme déc. 2003 (Max 0,98 NGF)
Crue 12500 (mai 1856 dans les conditions actuelles d'écoulement et sans brèche)	12 500 m^3/s	T ≈ 200 ans	Marégramme déc. 2003 translaté à 1,3 NGF. et concomitant avec pointe de crue
Crue 14160 scénario exceptionnelle	14 160 m^3/s	T ≈ 800 ans	Marégramme constant à 1,5 NGF

Pour les crues inférieures à 9500 m3/s, des modélisations en régime permanent avec un niveau marin constant à 0,9 m NGF ont été réalisées. Les résultats de ces modélisations ont été utilisés.

Les hypothèses concernant l'aléa marin relatif à ces crues ont été établies à partir de données du CEREGE. Dans sa thèse [ULMANN 2007] du CEREGE a estimé les périodes de retour des surcotes marines pour différentes stations du Golfe de Lyon. Elles sont les suivantes :

Tableau 16. surcote marine et période de retour (source CEREGE)

Station	Surcotes (cm NGF) durant une période d'octobre à mars pour un temps de retour de :			
	5 ans	10 ans	50 ans	100 ans
Port-Vendres	75	81	95	100
Sète	98	102	119	126
Grau-de-la-Dent	80	86	100	106

En sus de ces surcotes marines, la dérive tendancielle de montées des eaux a été prise en compte avec une dérive à moyen/long terme probable d'ici à 2050 comprise (au moment de l'étude de calage) d'après le CEREGE, entre 20 cm (cas de figure moyen) et 40 cm (cas de figure extrême).

En décembre 2003, les niveaux marins enregistrés aux stations du Grau de la dent (proche de l'embouchure du Grand Rhône) et du pertuis de la Fourcade (proche de l'embouchure du Petit Rhône) au moment de la pointe étaient identiques.

Le niveau marin de 1,5 m NGF du scénario de crue exceptionnelle correspond à une surcote marine de 1,1 m NGF, d'une période de retour légèrement supérieure à 100 ans avec une dérive extrême de montée des eaux, d'ici à 2050, de 40 cm. (préconisations CEREGE).

Les hydrogrammes et marégrammes des 5 scénarios modélisés figurent ci-dessous.

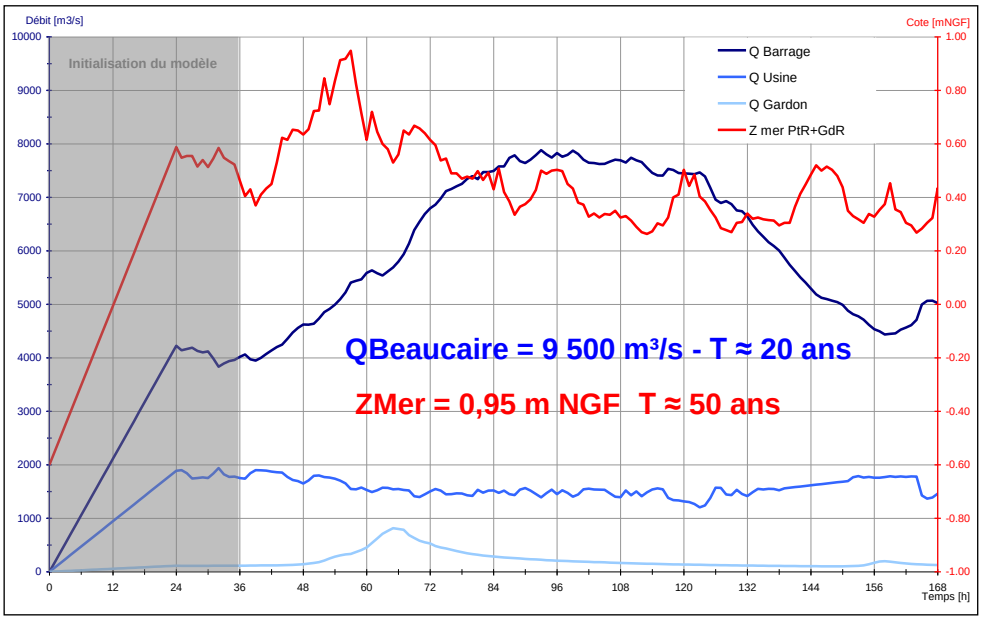


Figure 49. Hydrogramme et marégramme de la crue 9500

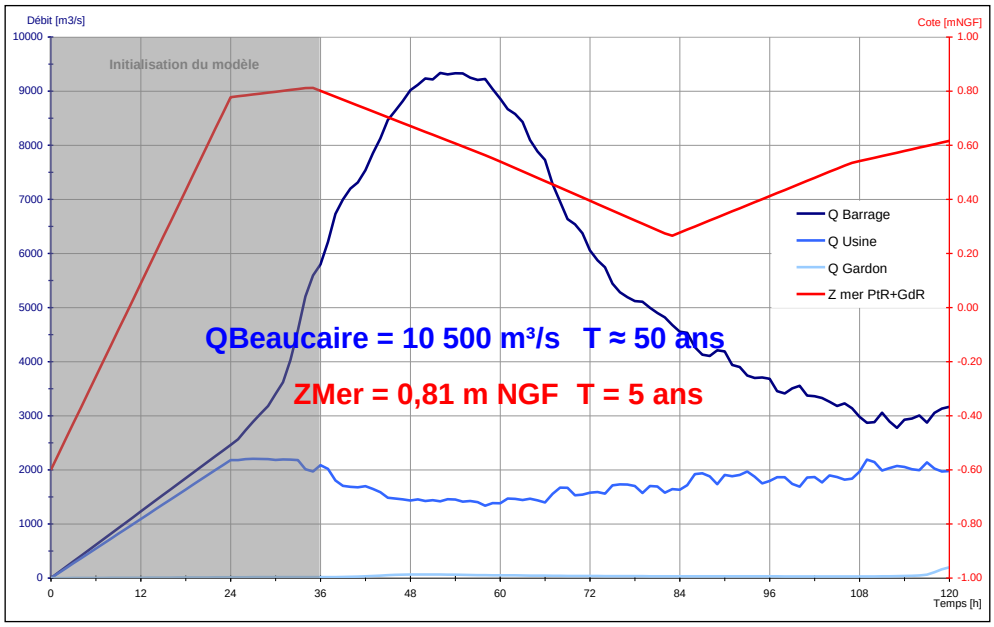


Figure 50. Hydrogramme et marégramme de la crue 10500

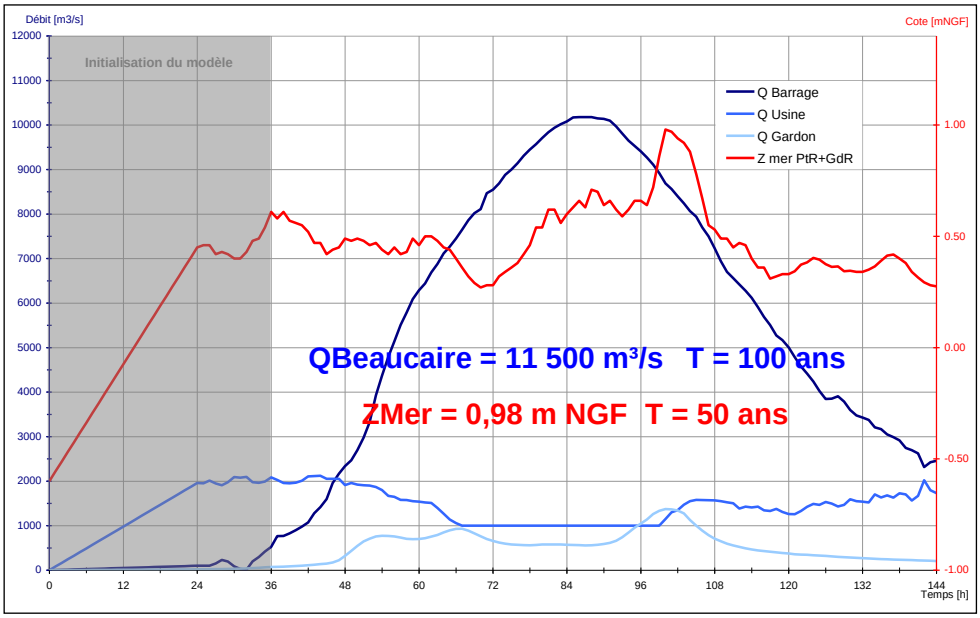


Figure 51. Hydrogramme et marégramme de la crue 11500

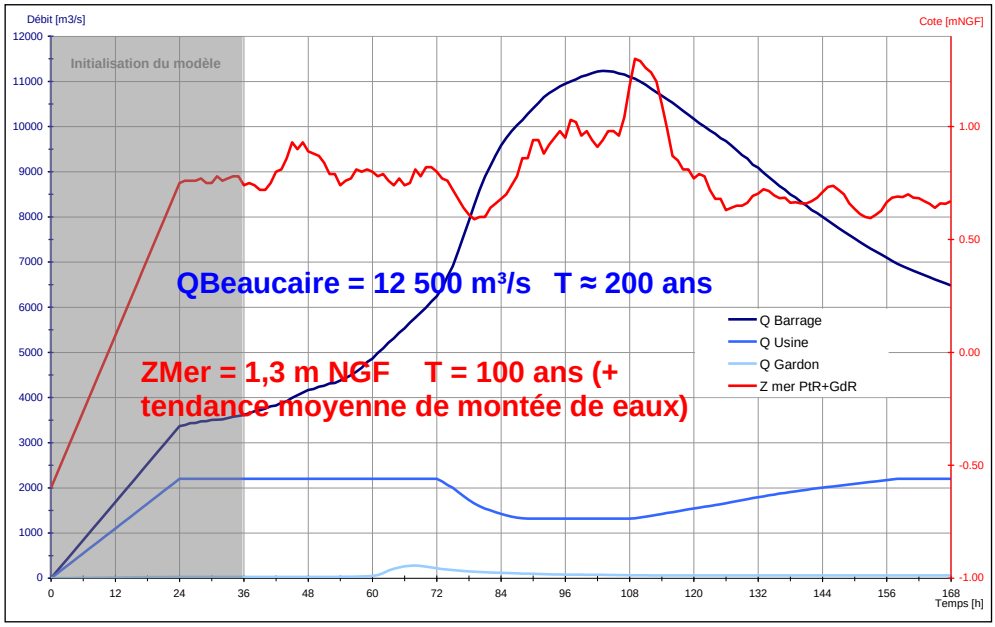


Figure 52. Hydrogramme et marégramme de la crue 12500

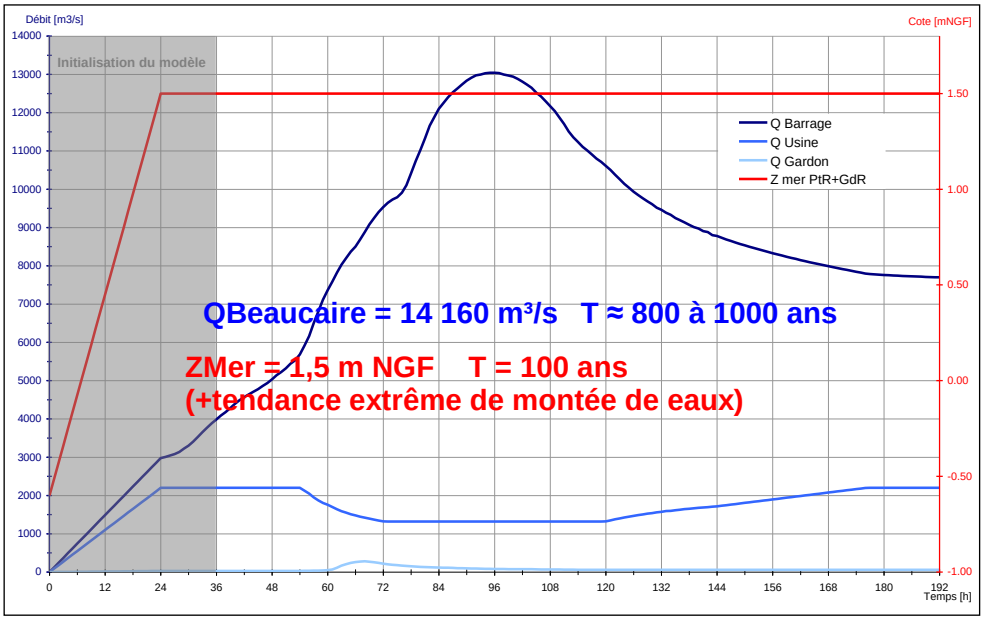


Figure 53. Hydrogramme et marégramme de la crue 14160

5.3 PARAMETRES DETERMINANTS DANS LA MODELISATION DES BRECHES

5.3.1 Débit de pointe et durée de la crue

Les deux principales caractéristiques des crues sont le débit de pointe et la durée de la crue. Le débit de pointe va directement conditionner les niveaux atteints le long des digues et la durée de la crue va directement conditionner le volume de la crue qui est directement lié au volume de déversement dans la zone protégée en cas de brèches.

La figure suivante illustre les hydrogrammes de crues utilisées pour le Plan Rhône et pour l'étude de dangers.

Le tableau ci-après donne quant à lui les principales caractéristiques des crues pour le fonctionnement hydraulique du système en cas d'entrée d'eau par brèche. Sont indiqués :

- le débit de pointe à Beaucaire/Tarascon,
- la durée de mise en charge des digues, qu'on considérera comme étant la durée pendant laquelle le débit à Beaucaire/Tarascon est supérieur à 6000 m^3/s,
- le volume de la crue contenu par les digues en cas d'absence d'entrées d'eaux. Ce volume correspond au volume total de la crue diminué du volume situé en dessous du débit de mise en charge des digues, soit 6000 m^3/s
- le volume de décrue crue contenu par les digues. Ce volume correspond à la part du volume précité après la pointe de la crue.

Pour les modélisations de brèche, l'instant de démarrage des brèches a chaque fois été retenu comme étant la pointe de crue au droit de la brèche. Cette hypothèse forte permet d'avoir les plus forts débits de pointe (la charge étant maximum). Elle peut être optimiste pour le calcul des volumes de déversements si le niveau de danger de la digue est inférieur au niveau de la pointe de crue. Mais comme le montre le tableau ci-après ; le volume de décrue représente la

part la plus importante du volume de la crue. La part du volume de crue compris entre le niveau de danger et le pic de crue non pris en compte dans la modélisation reste en définitif très en deçà de la précision des calculs, fortement tributaire d'autres paramètres (largeur de brèche, cinétique d'ouverture, durée de crue).

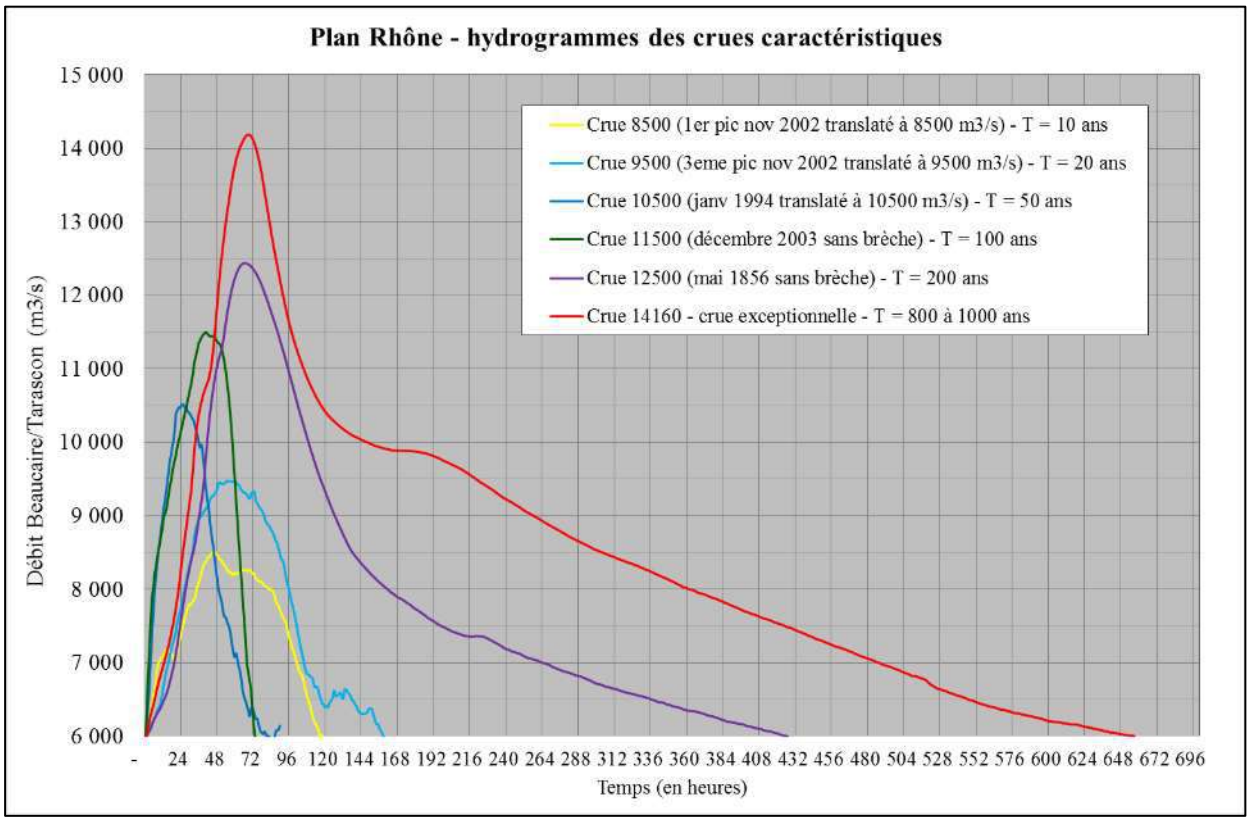


Figure 54. Hydrogrammes des crues modélisées

Tableau 17. Caractéristiques des crues modélisées pour l'étude de dangers

Débit Beaucaire/ Tarascon) (m^3/s)	Durée mise en charge (jours)	Volume de crue contenu par les digues (millions de m^3)	Volume de décrue contenu par les digues (millions de m^3)	Rapport volume crue/Volume décrue (%)
8500	5	660	470	71
9500	6,5	970	610	63
10500	3	660	490	73
11500	3	950	490	52
12500	18	2 900	2 200	78
14160	27	5 800	5 000	86

Pour les scénarios de crues 8500 à 11500, on constate que les volumes de décrue sont sensiblement identiques, ce qui s'explique par la rapidité des crues de janvier 1994 et décembre 2003 qui ont servi de base à la construction des scénarios 10500 et 11500, alors que les scénarios de crue 8500 et 9500 ont été bâtis à partir des pointes de la crue de novembre 2002. Les crues 12500 et 14160 ont quant à elles des durées très importantes justifiées par le retour d'expériences de 1840 et 1856 (Cf. chapitre 4 §1.12).

5.3.2 Impact des brèches sur la ligne d'eau et les débits

D'autres paramètres perturbent la ligne d'eau. Ce sont les brèches, qui ont des impacts notables sur la ligne d'eau aval [W004].

En aval d'une brèche qui vient de se produire, le lit endigué propage un hydrogramme de crue obtenu par différence entre l'hydrogramme amont et celui qui est dérivé vers le lit majeur au travers de la brèche. La ligne d'eau est abaissée en proportion de la réduction de débit.

Vers l'amont, l'effet hydraulique est d'une toute autre nature. Une brèche, tant qu'elle débite, induit un abaissement de la ligne d'eau par effet de remous. Cela peut constituer un avantage local, par exemple en arrêtant un débordement qui aurait commencé. Mais cela est rarement déterminant sur de longues distances, car peu à peu l'effet des pertes de charges tout au long du cours d'eau « dilue » le bénéfice de l'abaissement aval.

Deux exemples historiques sont présentés ci-après : celui de mai 1856 et celui de décembre 2003.

En mai 1856, plusieurs brèches se sont produites en amont de Beaucaire/Tarascon notamment sur la digue de la Montagnette et ont eu pour effet de dériver une grande partie du débit arrivant du Nord vers la rive gauche du Rhône (centre-ville de Tarascon puis Plaine du Trébon, puis ancien marais d'Arles….). Il en a résulté une baisse quasi-instantanée des niveaux en aval dans le lit du fleuve, comme le montre ces limnigrammes extraits de la thèse de Maurice Pardé. Le niveau du Rhône a augmenté jusqu'à la cote 7,95 m de l'échelle de Beaucaire pour descendre très rapidement après la formation des brèches dans la digue de la Montagnette (Cf. figure ci-dessous). Au limnigramme de Vallabrègue situé juste en amont des brèches, cette baisse n'a pas été sensible, compte tenu des apports d'eau en provenance de l'amont.
Ces limnigrammes montrent l'effet sensible d'une brèche sur les niveaux pour l'aval du lit endigué (en l'occurrence l'aval de Beaucaire) et le peu d'effet sur les niveaux pour l'amont (en l'occurrence, Vallabrègues).
On peut retenir sommairement que le maximum du débit pour la crue de mai 1856 a été de 12 500 m^3/s en amont de la digue de la Montagnette, mais le maximum du débit en traversée de Beaucaire/Tarascon n'a été que d'environ 11 000 m^3/s, compte tenu de ce qu'une partie du débit a été dérivée dans les brèches de la digue de la Montagnette. C'est ce qui explique que les laisses de la crue de 1856 sont plus basses dans le Delta que celles de la crue de décembre 2003.

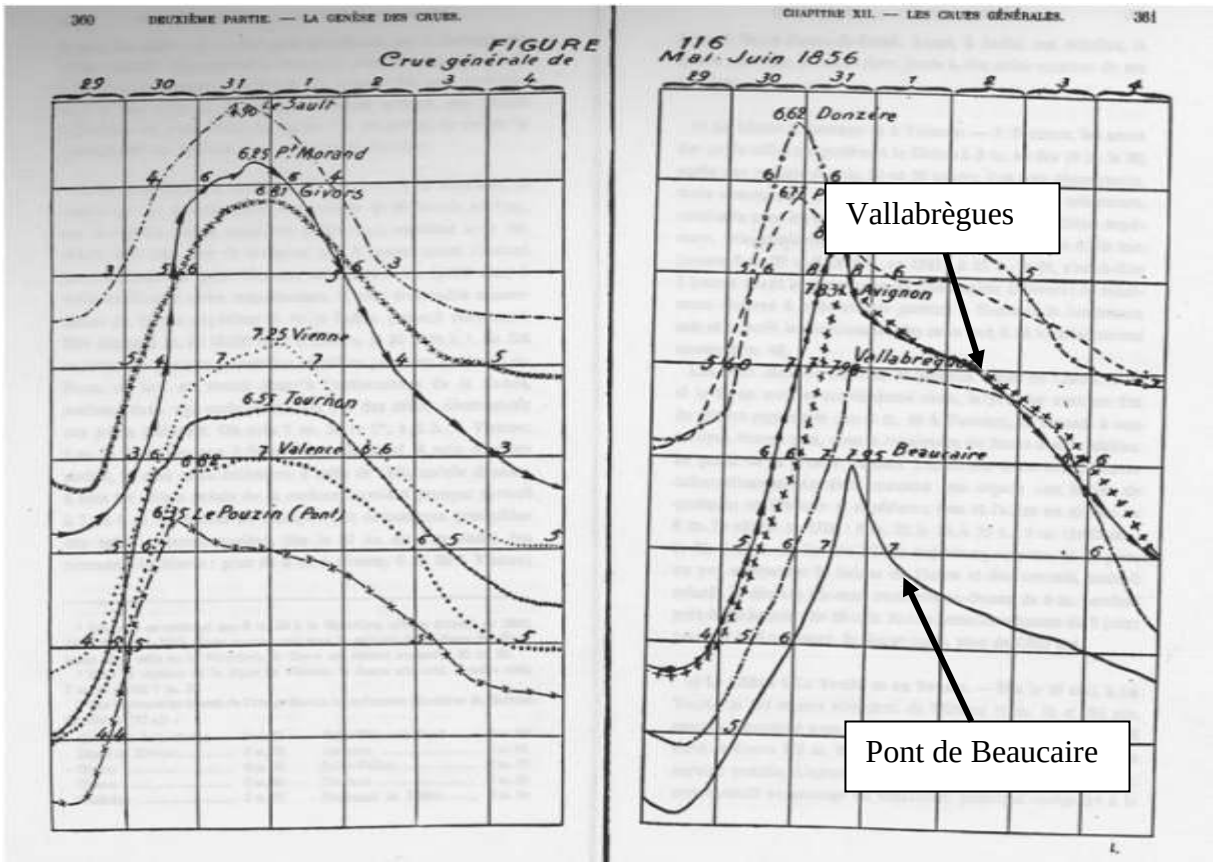


Figure 55. Limnigramme crue 1856 (source Maurice Pardé)

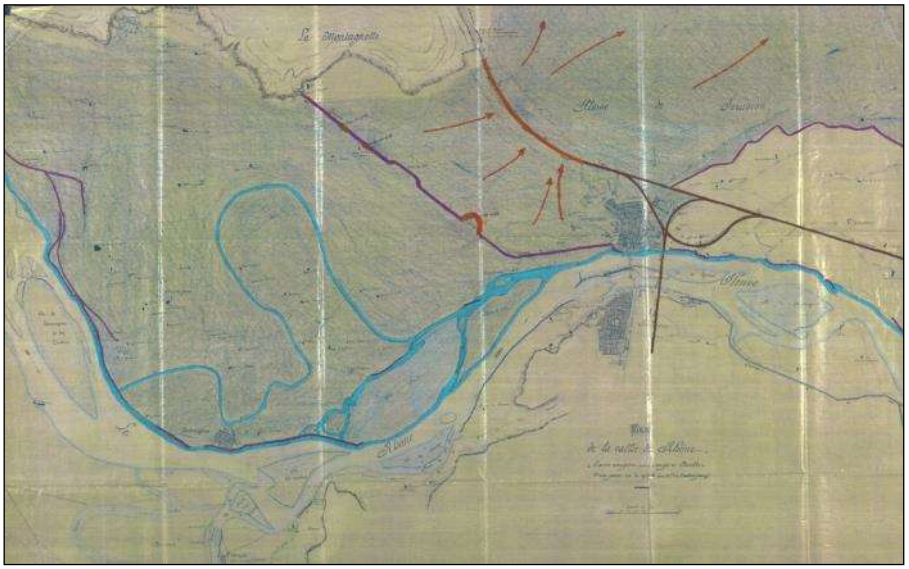


Figure 56. Brèches dans la digue de la montagnette et propagation des crues (sources archives départementales)

En décembre 2003, aucune brèche n'a été déplorée en amont de Beaucaire/Tarascon. Le débit de pointe de la crue a été estimé par la conférence de consensus à 11 500 m3/s. Le niveau atteint en traversée de Beaucaire/Tarascon a été de 8,30 m au pont de Beaucaire (PK 267.7) soit 35 cm de plus qu'en mai 1856 et 11,33 m NGF à la station de référence de Beaucaire/Tarascon (PK 269,6). 4 brèches se sont produites : 2 brèches sur le Tronçon Tarascon-Arles et 2 brèches sur le Petit Rhône. La figure ci-dessous extraite du programme de sécurisation du SYMADREM (p 98) montre la ligne d'eau observée réellement en décembre 2003 (trait bleu) et la ligne d'eau qui aurait été observée en l'absence de brèches dans le système (en rouge).
Le volume de déversement au travers des brèches du Petit Rhône a été estimé par la CNR à 210 millions de m^3 ; le volume de déversement au travers des brèches dans les deux trémies à 17 millions de m^3.

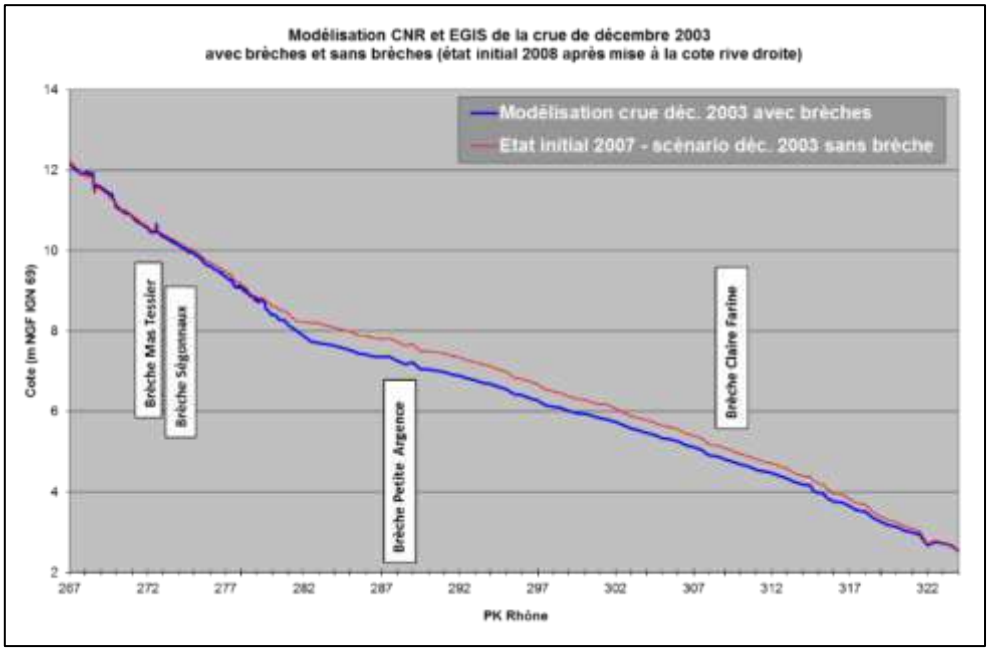


Figure 57. Impact des brèches sur les niveaux d'eau du Petit Rhône

La figure extraite de l'étude de calage réalisée par la CNR pour le SYMADREM, montre la répartition des débits entre le Petit Rhône et le Grand Rhône pendant la crue de décembre 2003.

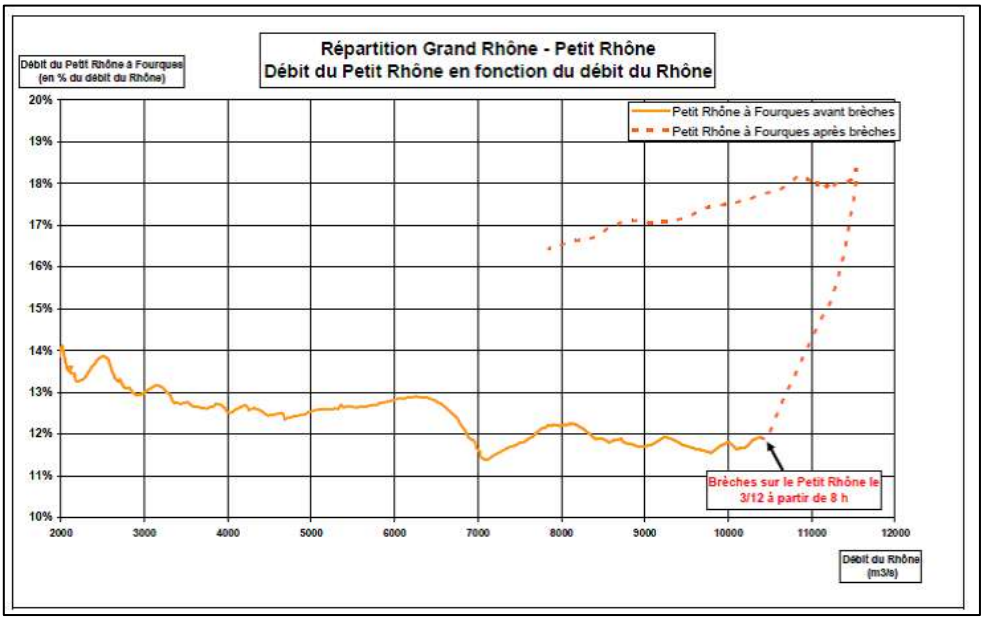


Figure 58. Répartition des débits à la diffluence en décembre 2003

La figure ci-dessous montre les débits calculés par la CNR sur le Rhône à Beaucaire, sur le Petit Rhône à Fourques et sur le Grand Rhône à Arles.

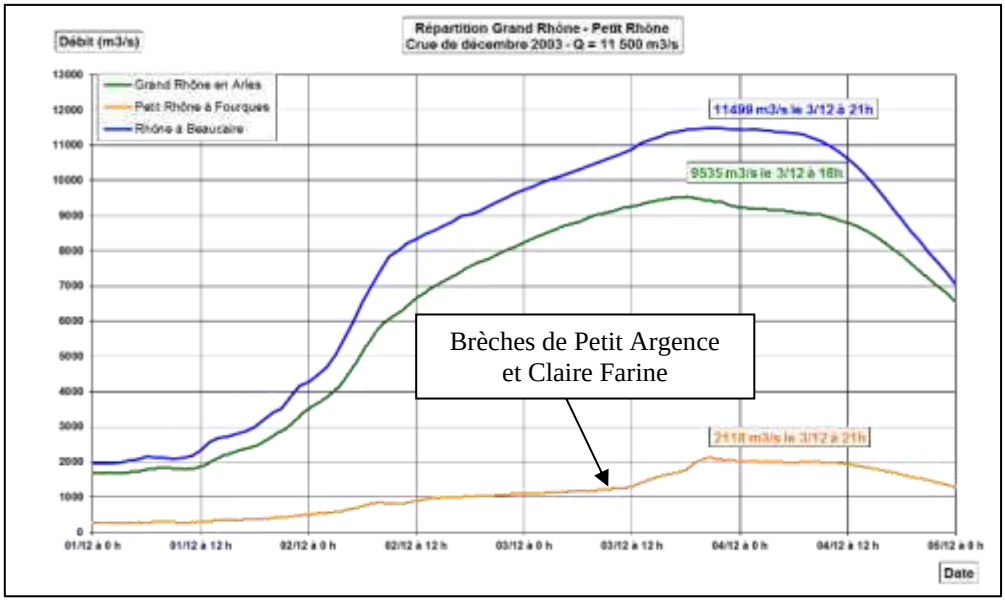
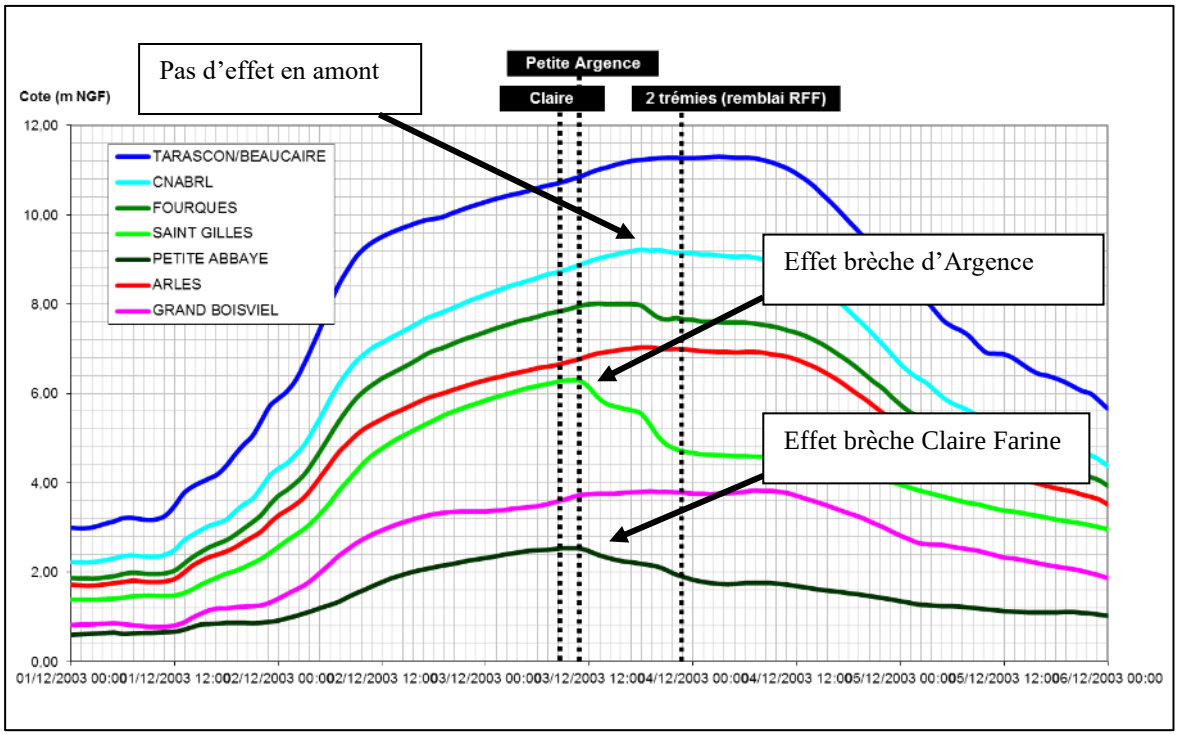


Figure 59. Hydrogrammes à Beaucaire/Tarascon, Arles et Fourques en décembre 2003

Ces trois figures permettent de voir l'appel de débit vers le Petit Rhône causé par les brèches sur le Petit Rhône et la modification de la répartition Petit Rhône/Grand Rhône. Avant l'apparition des brèches, la répartition entre le Petit Rhône et le Grand Rhône est de 12 et 88 %. Après l'apparition des brèches sur le Petit Rhône, les niveaux dans le Petit Rhône « plafonnent » dus à l'effet des brèches alors que ceux en amont continuent d'augmenter. La pente d'écoulement du Rhône vers le Petit Rhône augmente sensiblement et engendre un appel de débit sur le Petit Rhône modifiant la répartition entre le Petit Rhône et le Grand Rhône. Elle passe de 12/88 à 18/82. Ainsi, le débit de pointe sur le Petit Rhône en l'absence

de brèches dans le système aurait été de 1 378 m^3/s (source CNR) alors qu'il a été supérieur à 2100 m^3/s en décembre 2003.

Maintenant si on s'intéresse aux limnigrammes à la station de Beaucaire/Tarascon (PK 269,6) et à la station de BRL (PK 277.3) figurant ci-après, on voit que même après l'apparition des brèches sur le Petit Rhône le 3/12 à 8h et 10h, le niveau du Rhône entre Beaucaire et Arles a continué d'augmenter pour finalement surverser sur les digues de protection des trémies du Mas de Teissier et des Ségonnaux le 3/12 vers 22h.



Il en ressort que les brèches sur le Petit Rhône, en se produisant une dizaine d'heures avant la pointe de crue et en dérivant 210 millions de m^3 ont eu pour effet de plafonner la ligne d'eau sur le Petit Rhône Aval, qui sans cela aurait encore plus débordé sur les digues rive droite et rive gauche. Au moment de la formation de la brèche d'Argence, le Rhône avait déjà surversé sur la digue au droit de Claire Farine, les digues étaient en limite de surverse, voire en début de surverse en amont d'Argence, au droit de Figarès (rive gauche) et en aval de l'écluse de Saint Gilles.

5.3.3 Evolution des niveaux dans le Delta en fonction du débit en tête de Delta

La figure ci-dessous donne les niveaux le long du fleuve en fonction du débit en tête de Delta à Beaucaire/Tarascon.

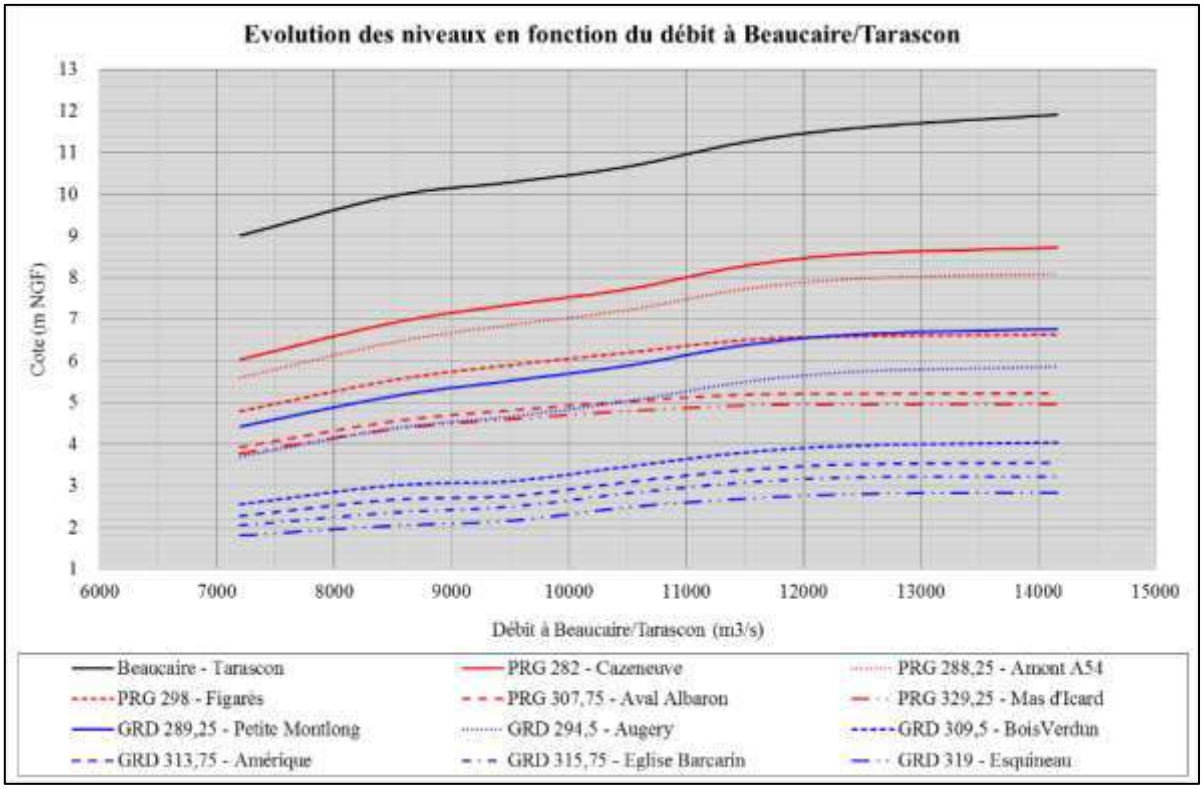


Figure 60. Evolution des niveaux le long du fleuve en fonction du débit en tête de Delta

On constate qu'en tête de delta, l'évolution du niveau entre 7 500 et 11 500 m^3/s est de 2,2 m et de 0,7 m entre 11 500 et 14 160 m^3/s. Comme indiqué ci-dessous, la formation d'une brèche en tête de delta compte tenu de hauteur de charge aura pour conséquence de dériver une partie du fleuve dans la zone protégée et d'abaisser en proportion les niveaux en aval. A contrario plus on s'approche de la mer et moins importante est la variation de niveau entre les crues fréquentes et crues exceptionnelles. Elle est au droit de Salin de Giraud de 1 m entre les crues de 7 500 et 11 500 m^3/s et de 10 cm entre les crues de 11 500 et 14 160 m^3/s. On notera l'influence très sensible de la mer pour le calcul des lignes d'eau. La formation d'une brèche au droit de ces secteurs « proches » de la mer perturbera moins les lignes d'eau.
Globalement, on retiendra que les variations de niveaux en fonction du débit amont sont sensibles de la tête de delta jusqu'à l'écluse de Saint Gilles sur le Petit Rhône et qu'au seuil de Terrin sur le Grand Rhône.

5.3.4 Autres hypothèses retenues

Les calculs ont été réalisés en supposant que l'hydrogramme entrant du Petit Rhône n'est pas modifié (donnée d'entrée du modèle n°4). En réalité l'hydrogramme en amont du modèle serait modifié compte tenu de la proximité de la diffluence. Il serait possible que cet abaissement entraine une variation du débit entrant dans le Petit Rhône. Cette variation de répartition de débit entre le Rhône et le Petit Rhône ne peut être calculée que dans la

modélisation globale du Rhône. Elle n'aurait pas d'incidence sur le débit maximal dans la brèche et donc sur les hauteurs et vitesses maximales à l'arrière immédiat de la brèche, par contre elle pourrait entrainer des volumes plus importants dans la brèche, mais qui restent dans l'ordre de grandeur des imprécisions liées à ce type de calcul (incertitude sur les hypothèses de position de brèche, largeur, durée, temps de début d'ouverture….).

6 SCENARIOS D'INONDATION MODELISES

Quarante et un (41) scénarios d'inondation avec brèches ont été modélisés dans le cadre des études du Plan Rhône et valorisés dans le cadre de la présente étude. 4 scénarios sans brèche ont été modélisés, ce qui totalise 45 scénarios d'inondation, qui ont permis de mieux appréhender le fonctionnement du système en cas d'inondation.

6.1 CARACTERISTIQUES DES SCENARIOS MODELISES ET LOCALISATION

Les scénarios avec brèches et leur principales caractéristiques sont résumés dans le tableau ci-dessous (L = Largeur de brèche en m, Q = débit de pointe de la brèche en m^3/s et V = Volume de la brèche en millions de m^3 ; NC non calculé).

Ces scénarios sont décrits et analysés dans les chapitres suivants. Les autres hypothèses (cinétique d'ouverture…) y figurent également.

Les scénarios de crue sans brèche modélisés sont ceux relatifs aux crues avec un débit à Beaucaire/Tarascon, respectivement de : 10500, 11500, 12500 et 14160 m^3/s.

Tableau 18. Scénarios de brèches modélisées pour les crues 10500 et 11500

Scénario crue	PR	Crue 10500 m^3/s			Crue 11500 m^3/s		
Brèches		L	Q	V	L	Q	V
Amont Cazeneuve	PRG 282,0	100	1000	40	130	1300	70
Aval Cazeneuve	PRG 283,0	100	1250	54	130	1600	71
Amont A54	PRG 288,4	100	200	5	130	450	20
Saliers	PRG 295,5	100	1000	68	130	1400	75
Figarès	PRG 298,0	100	900	60	130	1350	115
Aval Albaron	PRG 307,8	80	850	50	130	900	100
Trinquetaille	GRD 282,0						
Montlong	GRD 289,2				200	1500	200
Augery	GRD 294,5				200	1400	180
BoisVerdun	GRD 309,5				200	1200	170
Amerique	GRD 313,7				200	NC	NC
Barcarin	GRD 315,7				100	NC	NC
Esquineau	GRD 319,1				100	NC	NC

Tableau 19. Scénarios de brèches modélisées pour les crues 12500 et 14160

Scénario crue	PR	Crue 12500 m^3/s			Crue 14160 m^3/s		
Brèches		L	Q	V	L	Q	V
Amont Cazeneuve	PRG 282,0	130	1300	180	130	1400	650
Aval Cazeneuve	PRG 283,0	130	1650	380	130		
Amont A54	PRG 288,4	130	500	60	130	600	100
Saliers	PRG 295,5						
Figarès	PRG 298,0	130	1350	240	130	1350	900
Aval Albaron	PRG 307,8	130	900	200	130	900	600
Trinquetaille	GRD 282,0				50	NC	NC
Montlong	GRD 289,2	200	1750	450			
Montlong	GRD 289,2	400	3500	900	400	3700	1200
Augery	GRD 294,5	200	1600	400			
Augery	GRD 294,5	400	3200	800	400	3400	1100
BoisVerdun	GRD 309,5	200	1350	375			
BoisVerdun	GRD 309,5	400	2700	750	400	2800	1000
Amerique	GRD 313,7	200	NC	NC			
Barcarin	GRD 315,7	100	NC	NC			
Esquineau	GRD 319,1	100	NC	NC			

6.2 BRECHE AMONT DE CAZENEUVE

4 crues ont été modélisées pour cette brèche : 10500 ; 11500 ; 12500 et 14160.

6.2.1 Crue 10500 – Etat actuel/initial - brèche amont Cazeneuve – PRG 282,0

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située en aval du pont de la RD 6113 et en amont du Mas de Cazeneuve au PRG 282 pour une crue, dont le débit de pointe atteindrait 10 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon et dont l'hydrogramme aurait une forme équivalente à la crue de janvier 1994 (débit annoncé à l'époque de 11 000 m^3/s et qui est estimé aujourd'hui à 10 250 m^3/s).

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,016, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.
La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 30 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,3 X 0,016 ≅ 0,5 %.

Pour mémoire, la probabilité maximale annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 2.10^{-2} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 100 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 7 mètres,
- Temps d'ouverture : 5 heures pour la digue et 2 heures pour la fosse,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 4,2 m NGF,
- Cote de la crue : 7,7 m NGF.

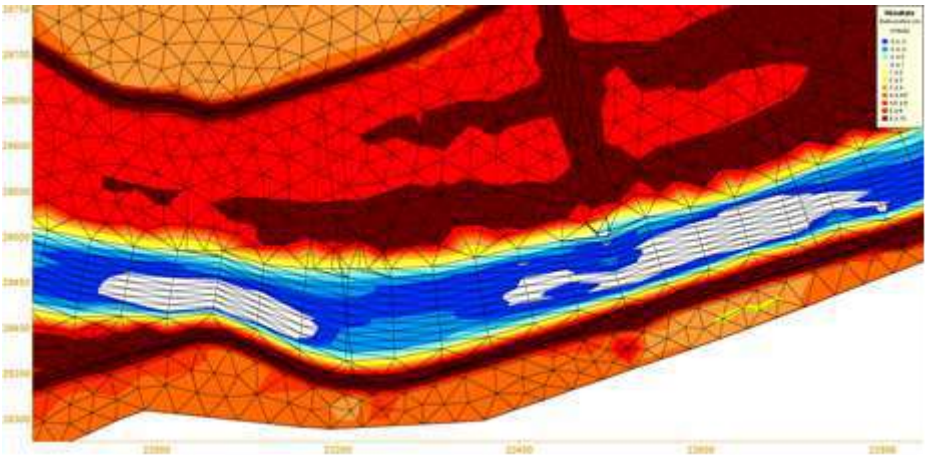
Le débit de pointe modélisé est estimé à 1 000 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 36 heures et le volume de déversement à environ 40 millions de m^3.

Les trois figures suivantes donnent la topographie au droit de la brèche aux trois instants :

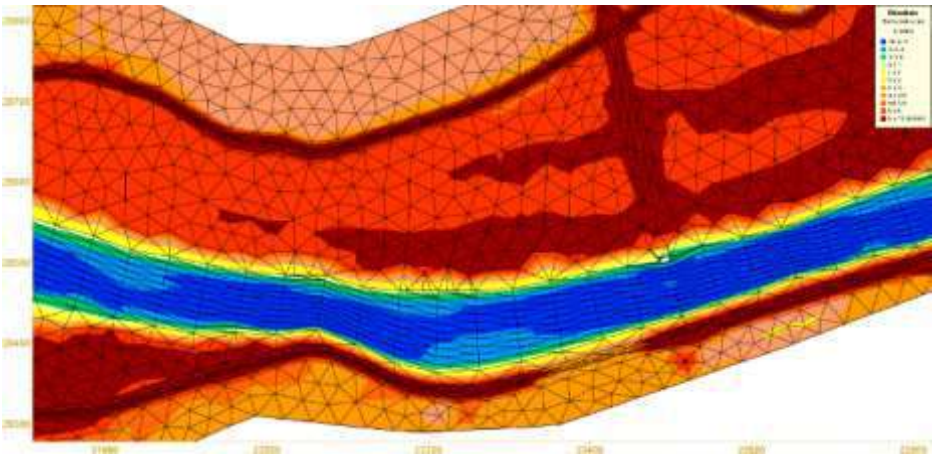
- avant la formation de la brèche
- à l'issue de la première étape de la rupture (ouverture au niveau du terrain naturel)
- à l'issue de la deuxième étape de la rupture (création de la fosse à l'arrière de la brèche).

On notera qu'en fin de processus d'ouverture, la fosse est en liaison directe avec le fleuve.

Avant la brèche



Ouverture du terrain naturel



Création de la fosse en aval de la digue

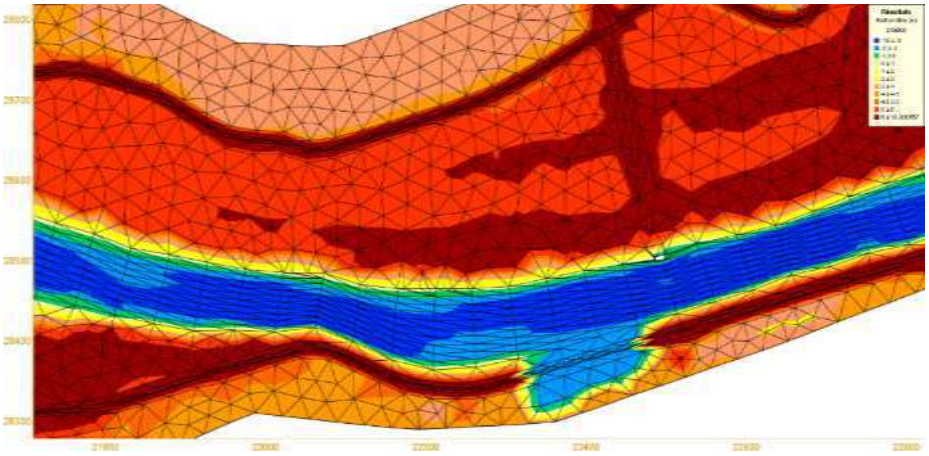


Figure 61. Modélisation de la brèche amont de Cazeneuve

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

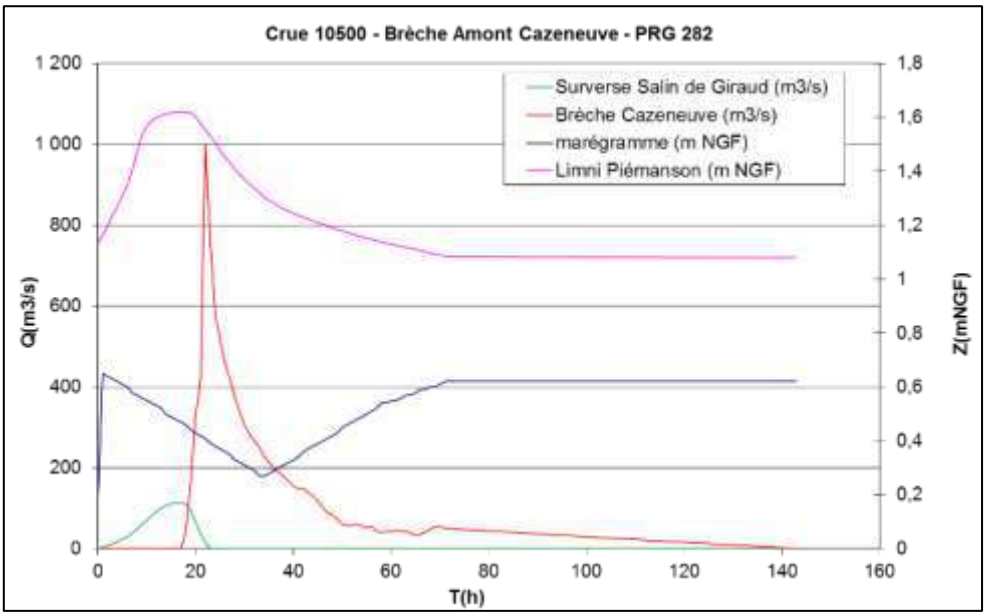


Figure 62. EI 10500 – Brèche Amont Cazeneuve – PRG 282,0 - Hydrogramme de brèche

Les figures ci-après illustrent respectivement la cartographie des vitesses maximum d'écoulement et le profil d'écoulement en aval de la brèche.

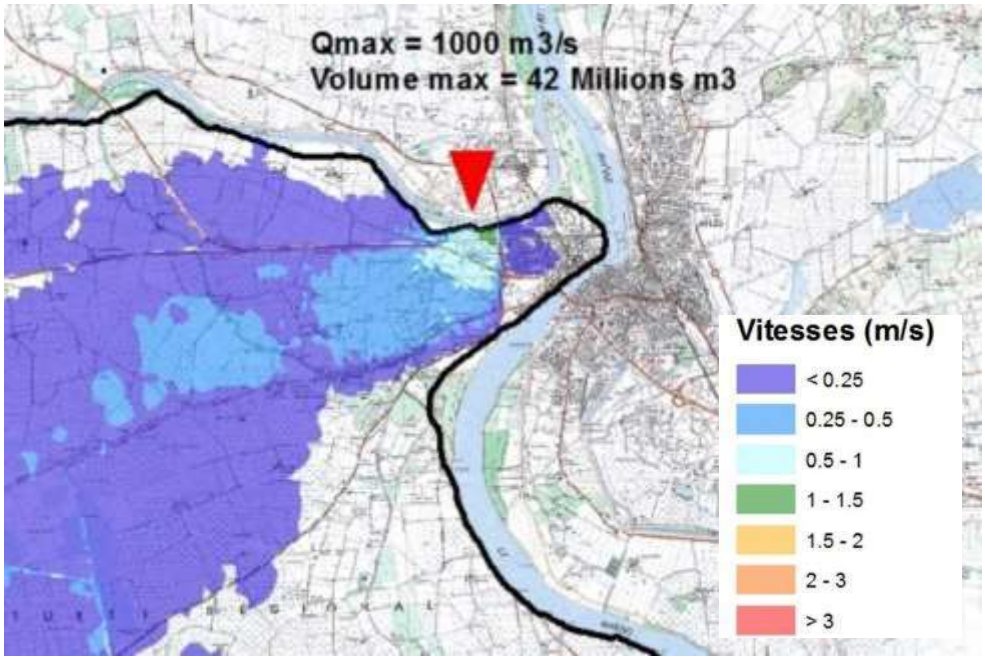
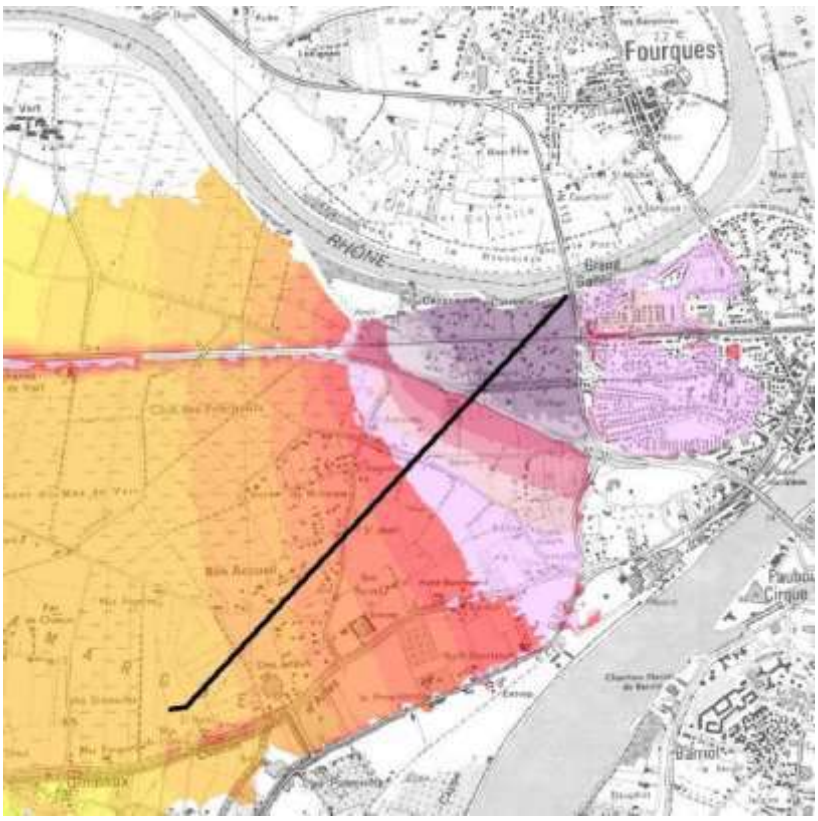


Figure 63. EI 10500 – Brèche Amont Cazeneuve – PRG 282,0 - Vitesse maximum (m/s)

La vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 300 et 1200 m de la digue.



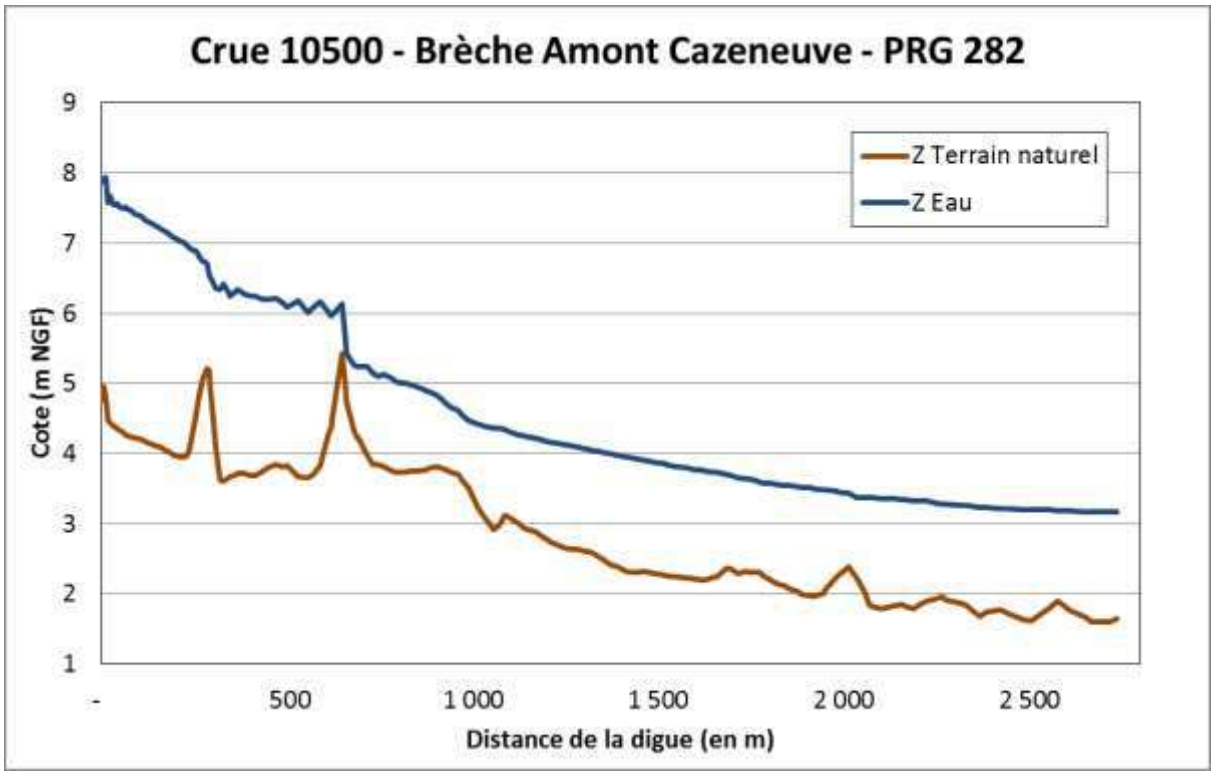


Figure 64. EI 10500 – Brèche Amont Cazeneuve – PRG 282,0 – Profil d'écoulement en aval de la brèche

On note des hauteurs d'eau supérieures à 3 mètres en amont du remblai ferroviaire. Les hauteurs d'eau demeurent supérieures à 2 mètres jusqu'à la RN113. Elles vont progressivement décroitre, avant d'accroitre à nouveau dans les zones des marais.

La figure ci-après illustre les hauteurs d'eau en fonction du temps. Trois heures après le démarrage de la brèche, les hauteurs d'eau dans les ZP n°4 & 5 sont entre 1 et 2 mètres. Elles sont comprises dans ces mêmes ZP entre 2 et 4 mètres après 6 heures. La ZP n°10 est inondée en grande partie sous 1 à 2 mètres d'eau après 3 heures. Les hauteurs sont maximales en tête de Camargue entre 6 et 12 heures puis diminuent légèrement au fur et à mesure de la propagation de l'onde de rupture.

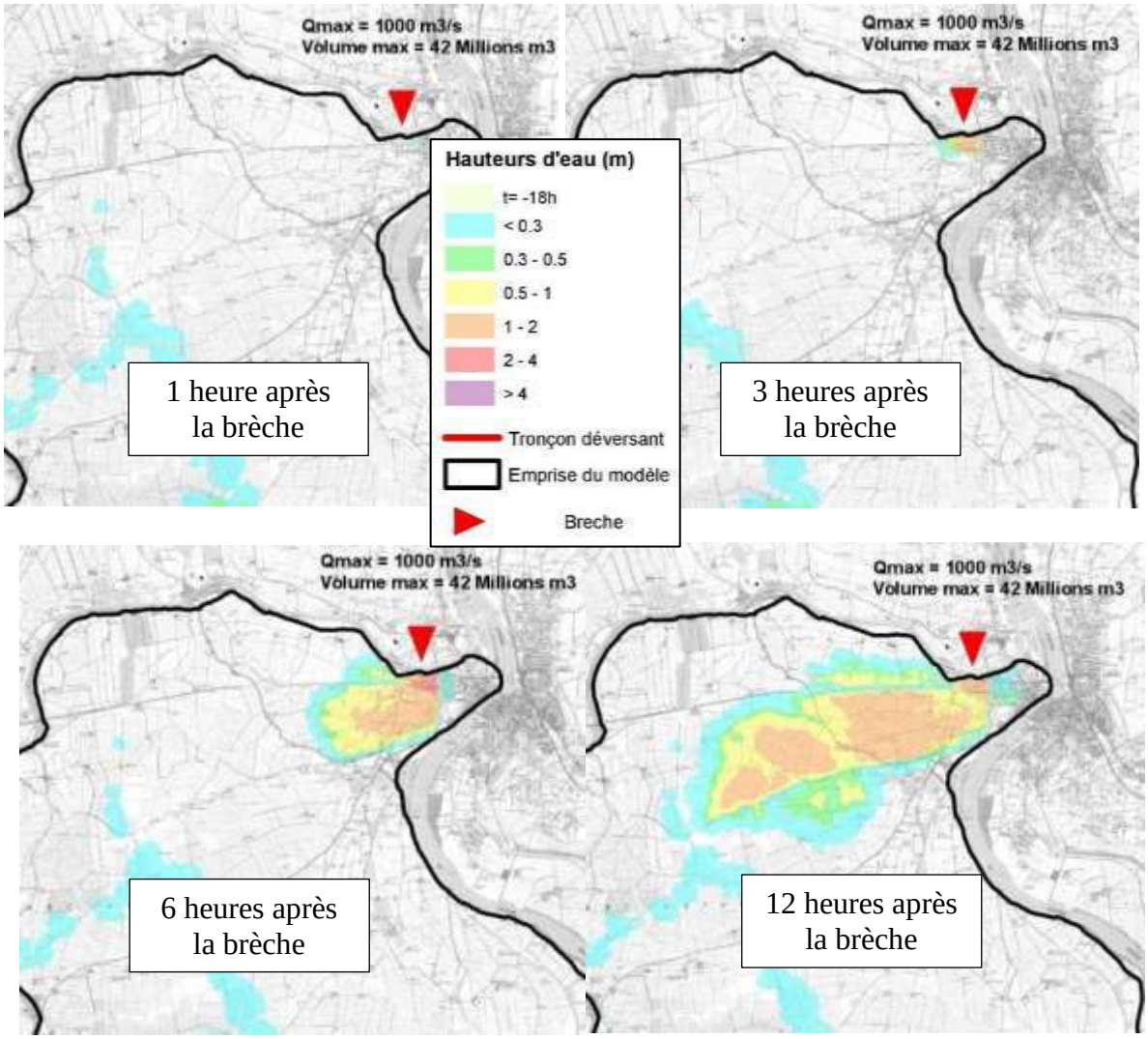


Figure 65. EI 10500 – Brèche Amont Cazeneuve – PRG282,0 – Hauteur d'eau en fonction du temps

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

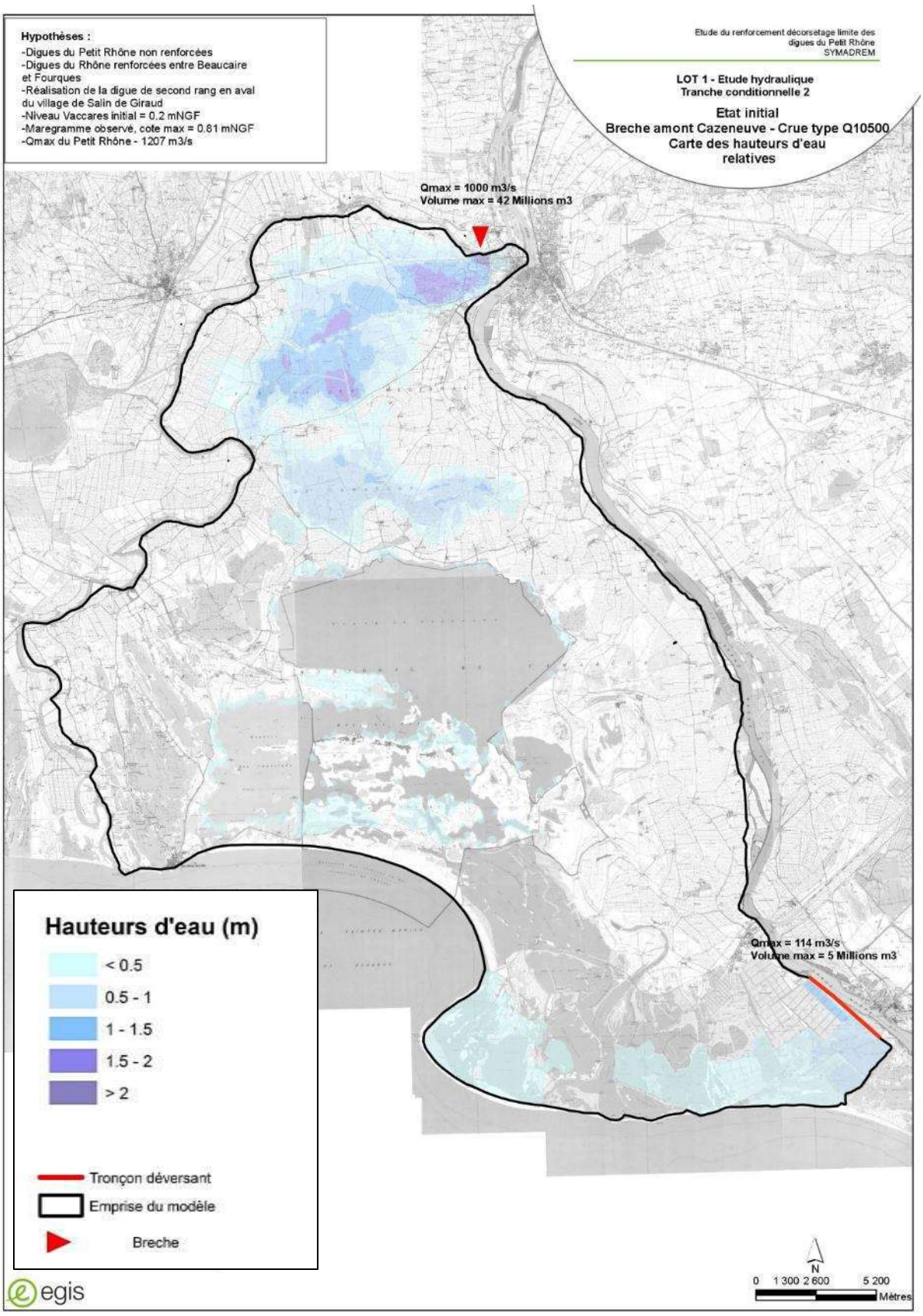


Figure 66. EI 10500 – Brèche Amont Cazeneuve – PRG 282,0 – Hauteur d'eau maximum (m)

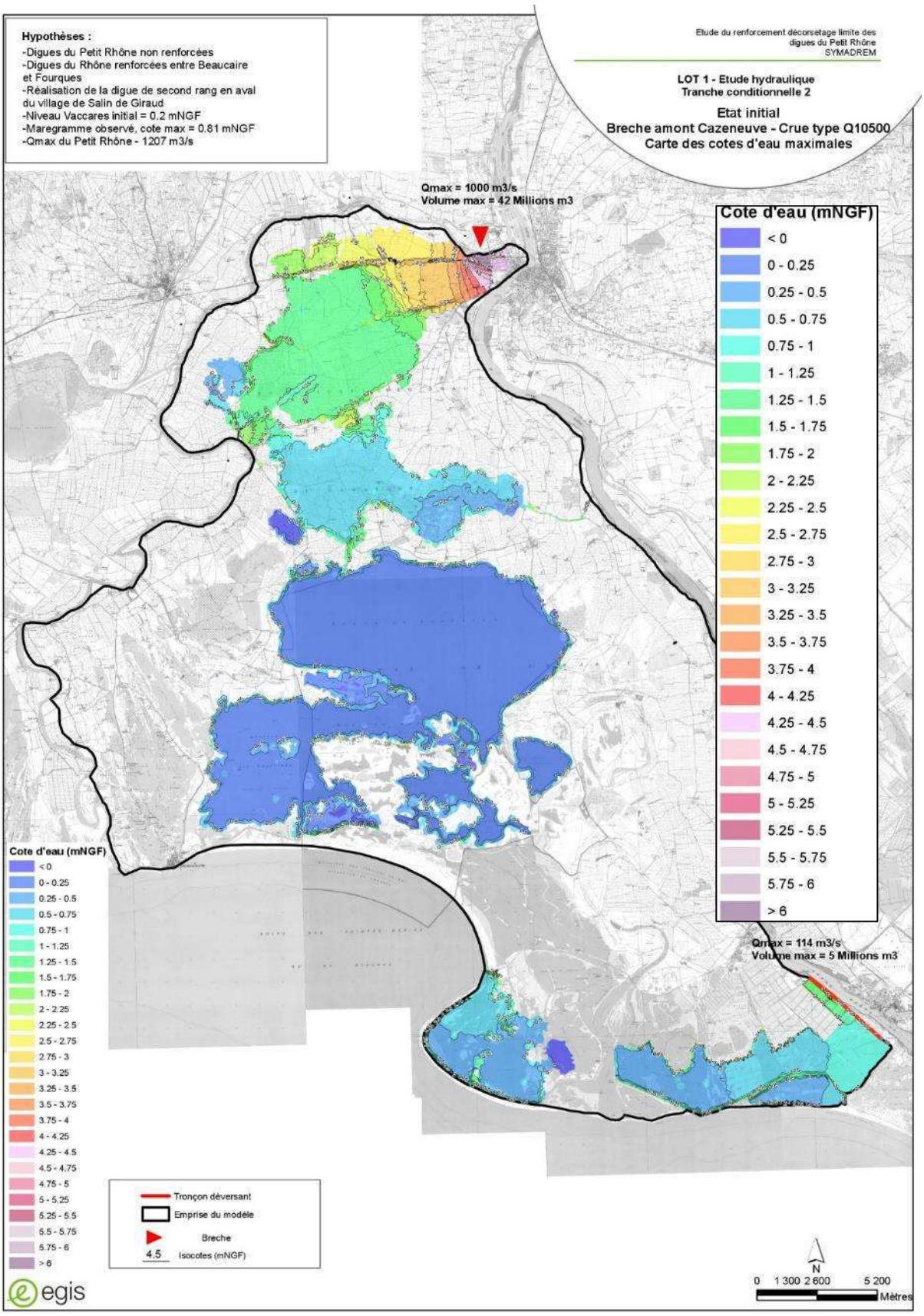


Figure 67. EI 10500 – Brèche Amont Cazeneuve – PRG 282,0 – Cote d'eau maximum (m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.

La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 20. EI 10500 – Brèche Amont Cazeneuve – PRG 282,0 – Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
1	Trinquetaille La Corrèze Gontier	7,00	0,1	2,4	3,0
2	Trinquetaille St Genest-Le Vittier	6,50	0	2,2	2,8
4	Trinquetaille Cazeneuve	7,00	0	2,8	3,2
5	Trinquetaille les prêcheurs	6,50	1,0	2,6	3,0
6	Trinquetaille St Antoine Billot	5,25	0,9	1,8	2,2
9	A54 Est	3,00	-0,5	0,7	1,4
10	Gimeaux	4,00	1,1	2,3	2,9
11	La Grande Sacristane	4,25	-0,2	0,8	1,8
12	Clos du Mas Neuf	2,50	-0,5	0,3	1,1
13	Marais du Pont de Rousty	1,75	-0,1	1,2	2,2
14	Marais de la Grand Mar	1,00	-1,8	0,1	0,9
16	Etang du Vaccarès	0,50	-0,6	0,0	0,3
27	Abords digue Cazeneuve - A54	4,25	-0,2	1,0	1,7
30	Saliers	1,50	-1,0	-0,1	1,0
31	Marais de Saliers	0,75	-1,0	0,2	0,8

6.2.2 Crue 11500 – Etat actuel/initial - brèche amont Cazeneuve – PRG 282,0

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située, en aval du pont de la RD 6113 et en amont du Mas de Cazeneuve, au PRG 282 pour une crue équivalente à celle de décembre 2003 (débit de pointe de 11 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,008, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.
La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 75 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,75 X 0,008 = 0,6 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 2.10^{-2} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 130 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 7 mètres,
- Temps d'ouverture : 2 heures pour la digue et 2 heures pour la fosse,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 4,2 m NGF,
- Cote de la crue : 8,3 m NGF.

Le débit de pointe modélisé est estimé à 1 300 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 40 heures et le volume de déversement à environ 70 millions de m^3.
L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

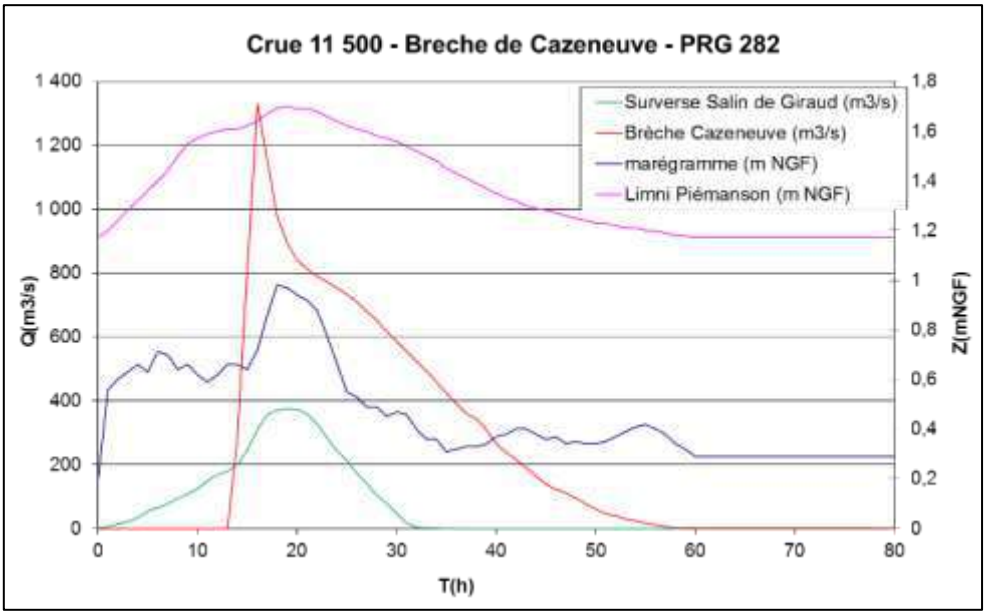


Figure 68. EI 11500 – Brèche Amont de Cazeneuve – PRG 282,0 - Hydrogramme de brèche

La figure ci-après illustre la cartographie des vitesses maximum d'écoulement. La vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 300 et 2500 m de la digue.

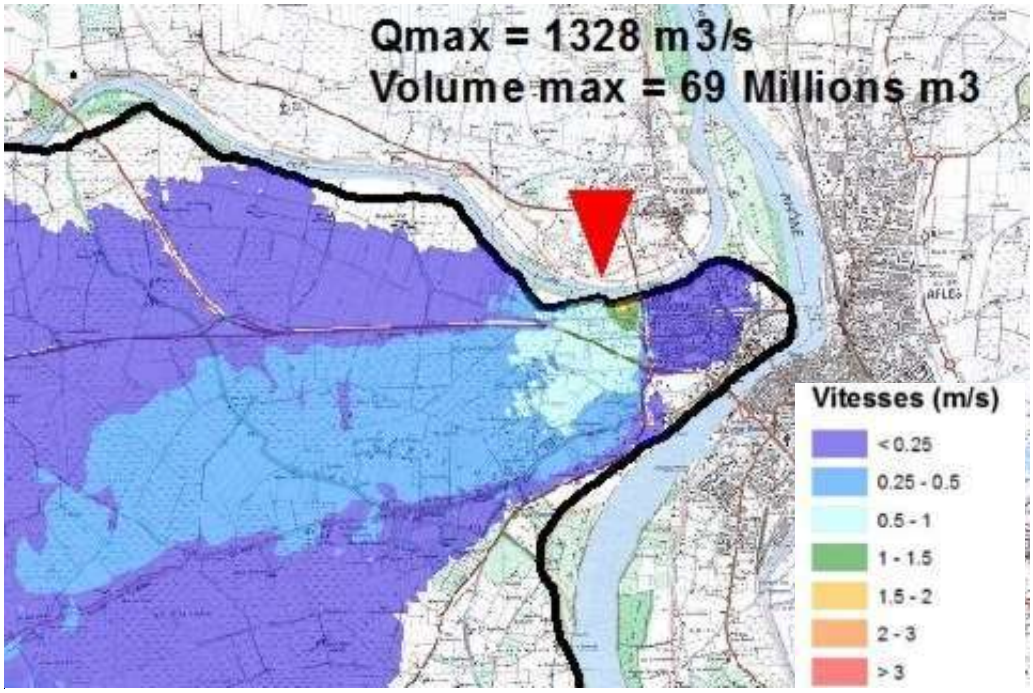


Figure 69. EI 11500 – Brèche Amont de Cazeneuve – PRG 282,0 - Vitesse maximum (m/s)

Le profil d'écoulement en aval de la brèche, non représenté, a un comportement similaire au scénario de brèche EI 10500 avec des cotes d'eau plus élevées. On note des hauteurs d'eau supérieures à 3 mètres en amont du remblai ferroviaire. Les hauteurs d'eau demeurent supérieures à 2,5 mètres jusqu'à la RN113. Elles vont progressivement décroitre, avant d'accroitre à nouveau dans les zones des marais.

La figure ci-après illustre les hauteurs d'eau en fonction du temps. Une heure après le démarrage de la brèche, les hauteurs d'eau dans les ZP n°4 & 5 sont entre 1 et 2 mètres. Elles sont comprises dans ces mêmes ZP entre 2 et 4 mètres après 3 heures. La ZP n°10 est inondée en totalité sous 1 à 2 mètres d'eau après 3 heures. Les hauteurs sont maximales en tête de Camargue entre 3 et 6 heures puis diminuent légèrement au fur et à mesure de la propagation de l'onde de rupture.

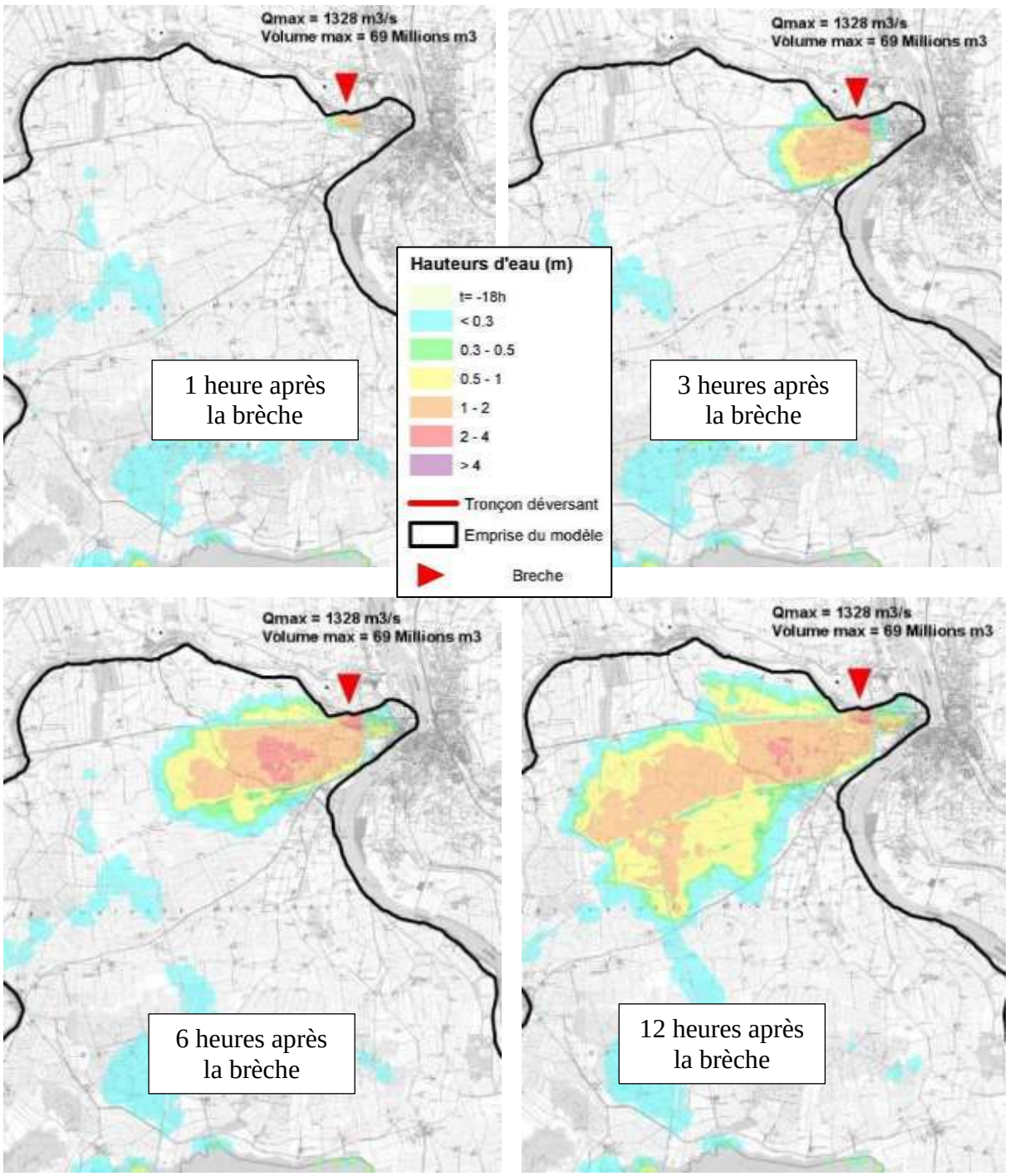


Figure 70. EI 11500 – Brèche Amont Cazeneuve – PRG 282,0 – Hauteur d'eau en fonction du temps

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

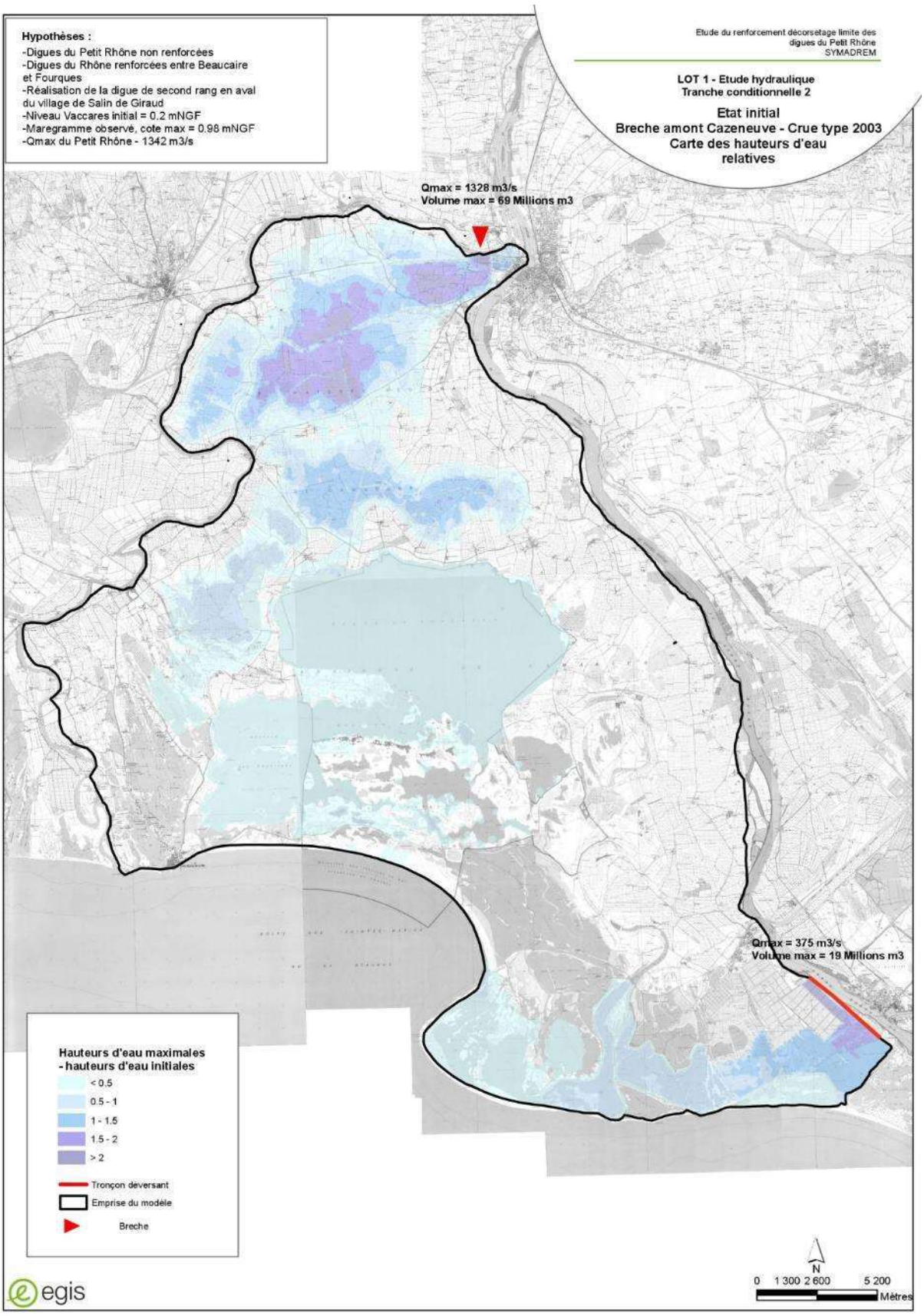


Figure 71. EI 11500 – Brèche Amont Cazeneuve – PRG 282,0 – Hauteur d'eau maximum (m)

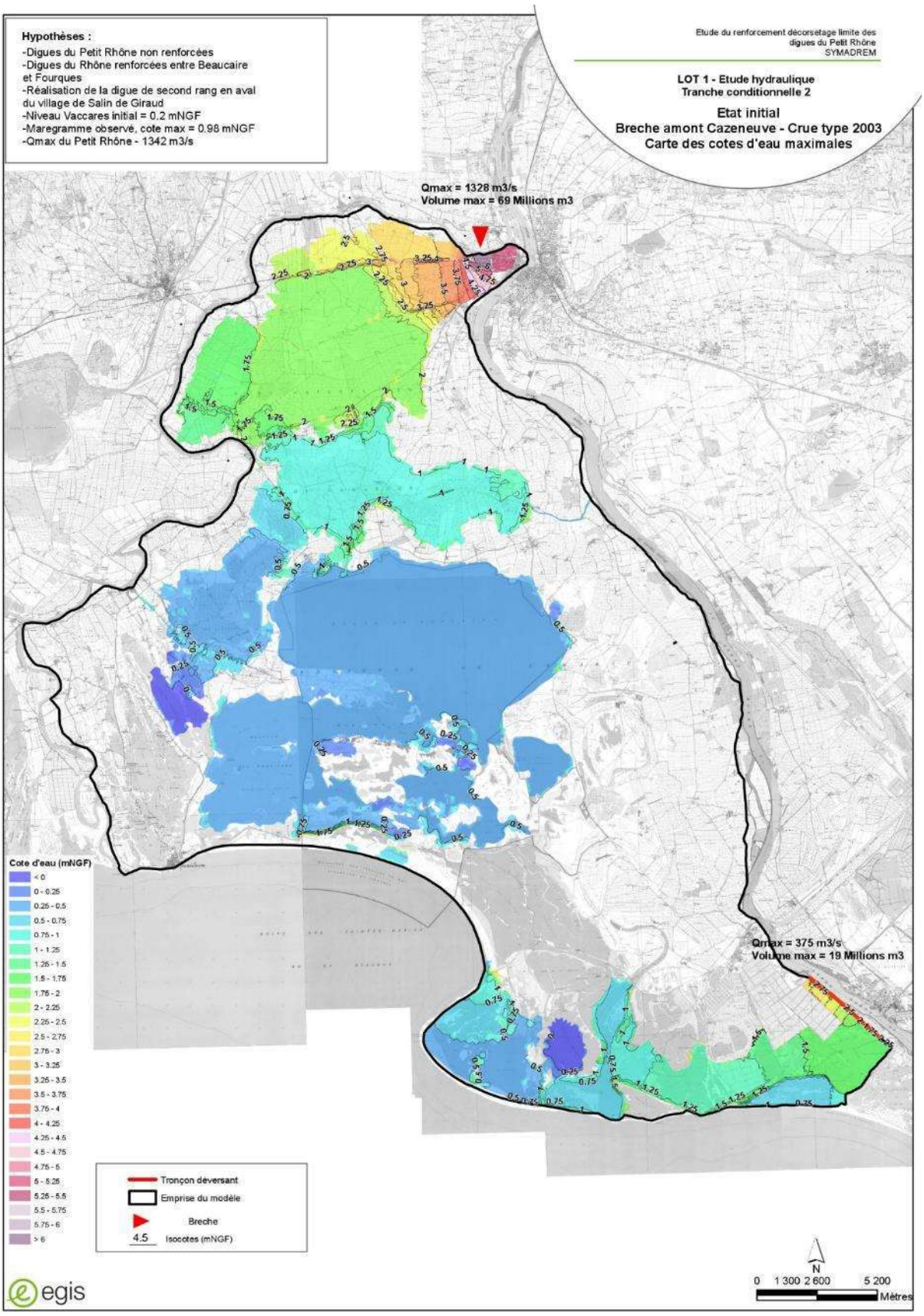


Figure 72. EI 11500 – Brèche Amont Cazeneuve – PRG 282,0 – Cote d'eau maximum (m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.

La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 21. EI 11500 – Brèche Amont Cazeneuve – PRG 282,0 – Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
1	Trinquetaille La Corrèze Gontier	7,50	0,6	2,9	3,5
2	Trinquetaille St Genest-Le Vittier	7,00	0	2,7	3,3
4	Trinquetaille Cazeneuve	7,50	0,1	3,3	3,7
5	Trinquetaille les prêcheurs	7,00	1,5	3,1	3,5
6	Trinquetaille St Antoine Billot	5,50	1,1	2,0	2,5
7	Trinquetaille zone humide	5,50	0	1,5	2,1
8	Anciennes Papeteries Etienne	4,75	0	0,1	0,6
9	A54 Est	3,25	0	0,9	1,7
10	Gimeaux	4,50	1,6	2,8	3,4
11	La Grande Sacristane	4,50	0,0	1,1	2,0
12	Clos du Mas Neuf	2,75	0	0,6	1,4
13	Marais du Pont de Rousty	2,25	0,4	1,7	2,7
14	Marais de la Grand Mar	1,25	0	0,3	1,1
16	Etang du Vaccarès	0,75	0	0,2	0,6
27	Abords digue Cazeneuve - A54	4,00	0	0,7	1,5
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	1,75	0	-0,4	0,4
30	Saliers	2,25	0	0,6	1,8
31	Marais de Saliers	1,75	0,0	1,2	1,8
39	Paty trinité	1,00	0	0,4	0,9

6.2.3 Crue 12500 – Etat actuel/initial - brèche amont Cazeneuve – PRG 282,0

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située, en aval du pont de la RD 6113 et en amont du Mas de Cazeneuve, au PRG 282 pour une crue équivalente à celle de mai 1856 (débit de pointe de 12 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée et dans les conditions actuelles d'écoulement.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,006, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.
La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 90 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,9 X 0,006 = $5{,}4.10^{-3} \cong 0{,}5$ %.
Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 2.10^{-2} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 130 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 7 mètres,
- Temps d'ouverture : 2 heures pour la digue et 2 heures ($2^{ème}$ étape) pour la fosse,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 4,2 m NGF,
- Cote de la crue : 8,5 m NGF.

Le débit de pointe modélisé est estimé à environ 1 300 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 120 heures et le volume de déversement à environ 180 millions de m^3.
L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après.

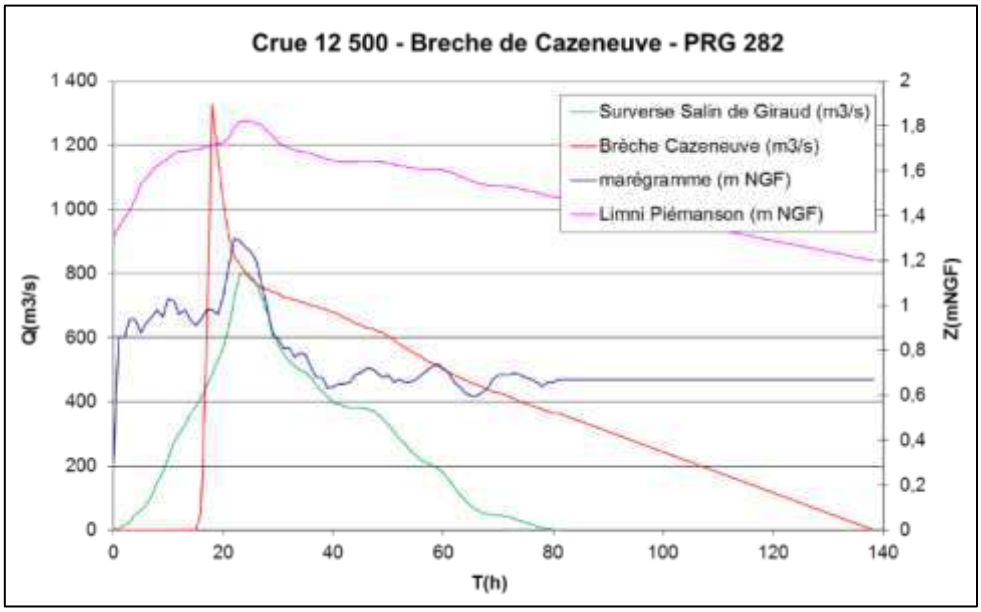


Figure 73. EI 12500 – Brèche Amont de Cazeneuve – PRG 282,0 – Hydrogramme de brèche

La figure ci-après illustre la cartographie des vitesses maximum d'écoulement. La vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 300 et 2200 m de la digue.

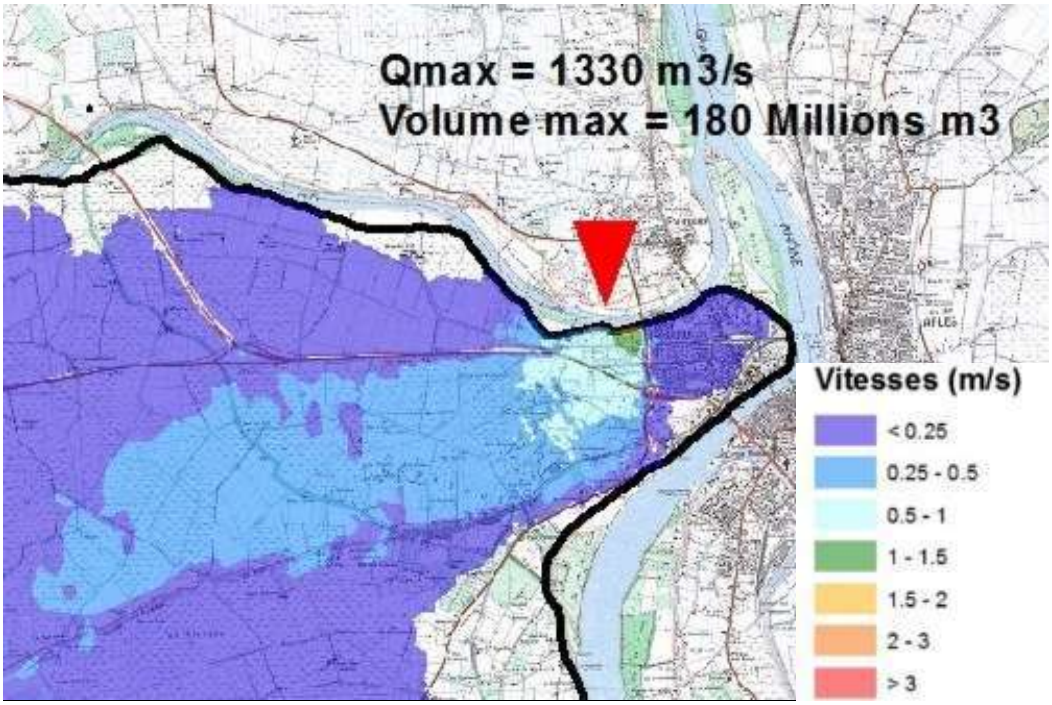


Figure 74. EI 12500 Brèche Amont de Cazeneuve – PRG 282,0 – Vitesse maximum (m/s)

Le profil d'écoulement en aval de la brèche, non représenté, a un comportement similaire aux scénarios de brèche EI 10500 et EI11500 avec des cotes d'eau plus élevées. On note des hauteurs d'eau supérieures à 3 mètres en amont du remblai ferroviaire. Les hauteurs d'eau demeurent supérieures à 2,5 mètres jusqu'à la RN113. Elles vont progressivement décroitre, avant d'accroitre à nouveau dans les zones des marais.

La dynamique de propagation de l'onde de rupture n'a pas été représentée mais compte tenu des cotes d'eau dans le Petit Rhône, de la cartographie des vitesses d'écoulement et du profil de brèche, on peut considérer qu'elle est analogue au scénario de brèche EI 11500.

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

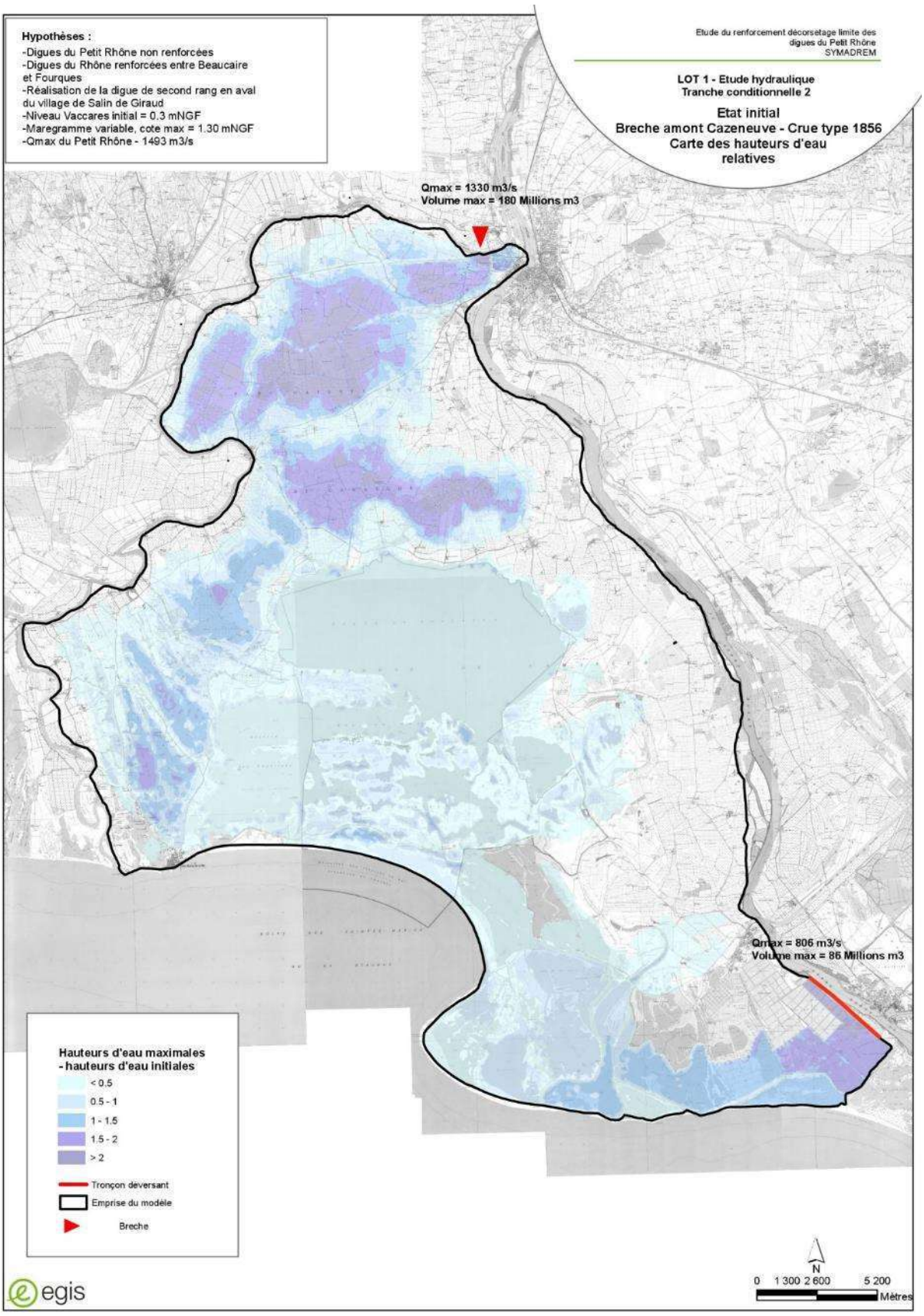


Figure 75. EI 12500 – Brèche Amont Cazeneuve – PRG 282,0 – Hauteur d'eau maximum (m)

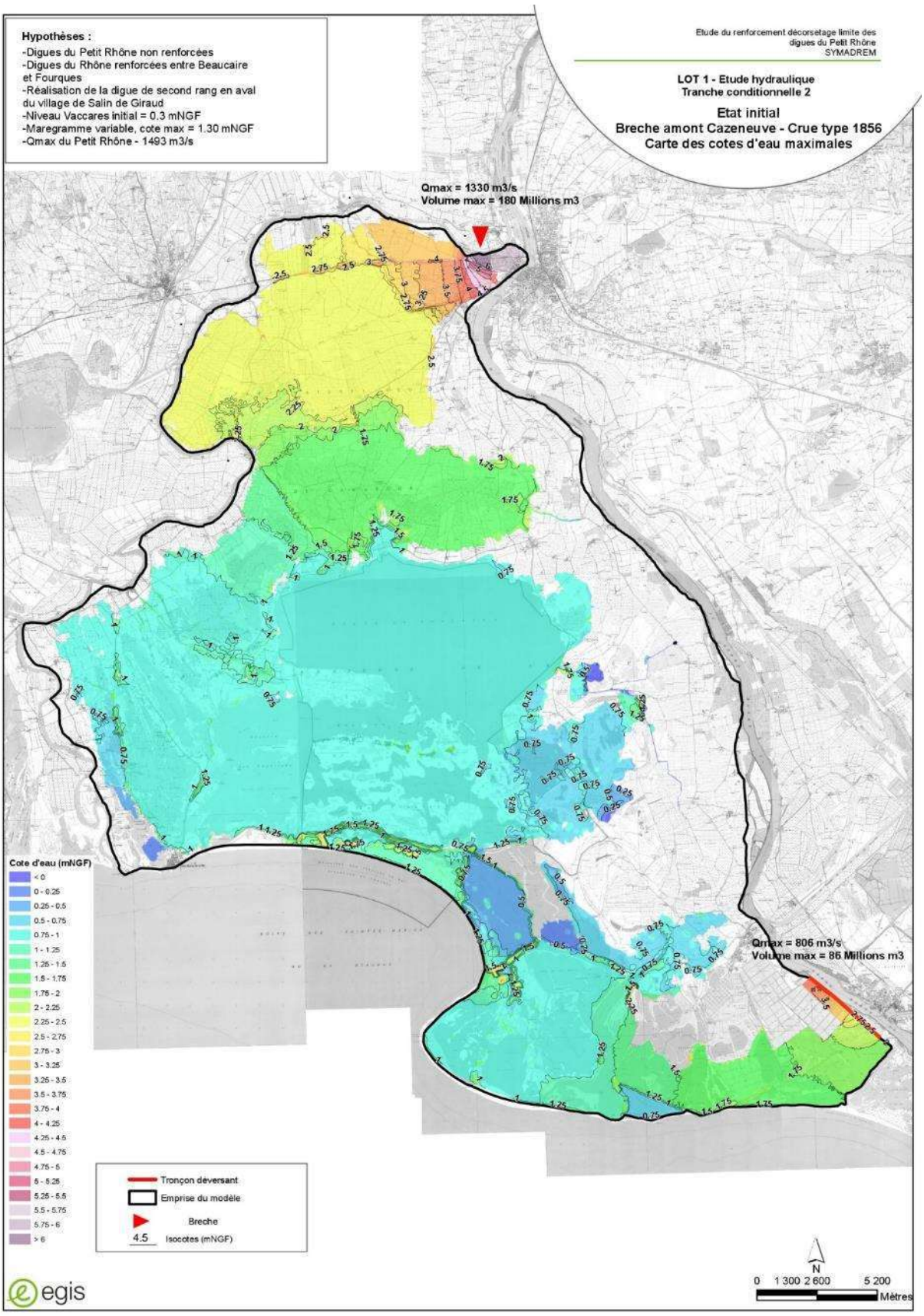


Figure 76. EI 12500 – Brèche Amont Cazeneuve – PRG 282,0 – Cote d'eau maximum (m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 22. EI 12500 – Brèche Amont Cazeneuve – PRG 282,0 – Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
1	Trinquetaille La Corrèze Gontier	7,50	0,6	2,9	3,5
2	Trinquetaille St Genest-Le Vittier	7,00	0	2,7	3,3
4	Trinquetaille Cazeneuve	7,50	0,1	3,3	3,7
5	Trinquetaille les prêcheurs	7,00	1,5	3,1	3,5
6	Trinquetaille St Antoine Billot	5,50	1,1	2,0	2,5
7	Trinquetaille zone humide	5,50	0	1,5	2,1
8	Anciennes Papeteries Etienne	4,75	0	0,1	0,6
9	A54 Est	3,25	0	0,9	1,7
10	Gimeaux	4,50	1,6	2,8	3,4
11	La Grande Sacristane	4,50	0,0	1,1	2,0
12	Clos du Mas Neuf	2,75	0	0,6	1,4
13	Marais du Pont de Rousty	2,25	0,4	1,7	2,7
14	Marais de la Grand Mar	2,00	0	1,1	1,9
16	Etang du Vaccarès	1,00	0	0,5	0,8
27	Abords digue Cazeneuve - A54	4,00	0	0,7	1,5
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	2,25	0	0,1	0,9
30	Saliers	2,50	0,0	0,9	2,0
31	Marais de Saliers	2,25	0,5	1,7	2,3
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	2,00	0	0,5	1,6
34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage	0,75	0	-0	0,4
35	Amarée Dromard	0,75	0	0,3	0,7
36	Panperdu Etang des Launes	1,00	0	0,4	0,9
37	Etang de Ginès	1,00	0,1	0,8	0,9
38	Saintes-Maries-de-la-Mer	1,25	0	0,1	0,5
39	Paty trinité	1,50	0,0	0,9	1,4
40	Vaccarès Est	1,25	0	0,5	0,9

6.2.4 Crue 14160 – Etat actuel/initial - brèche amont Cazeneuve – PRG 282,0

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située, en aval du pont de la RD 6113 et en amont du Mas de Cazeneuve, au PRG 282.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 95 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,95 X 0,001 ≅ 0,1 %.
Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 2.10^{-2} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 130 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 7 mètres,
- Temps d'ouverture : 2 heures pour la digue et 2 heures ($2^{ème}$ étape) pour la fosse,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 4,2 m NGF,
- Cote de la crue : 8,65 m NGF.

Le débit de pointe modélisé est estimé à environ 1 400 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 600 heures et le volume de déversement à environ 650 millions de m^3.

Ce scénario d'inondation a été modélisé en supposant que les digues de Salin de Giraud (tracé initial de 2012) étaient renforcées. Des déversements sans brèche sur la digue résistante à la surverse ont été pris en compte. Le volume de déversement en provenance de cette digue résistante à la surverse est :

- Volume surverse Salin de Giraud : ≅ 550 millions m^3 (débit pointe ≅ 1000 m^3/s),

Ces apports sont en deçà des incertitudes liées aux hypothèses de modélisation. On notera que les eaux en provenance du Petit Rhône et de la brèche se mélangent mais que celles en provenance de Salin de Giraud et de la brèche ne se mélangent pas.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

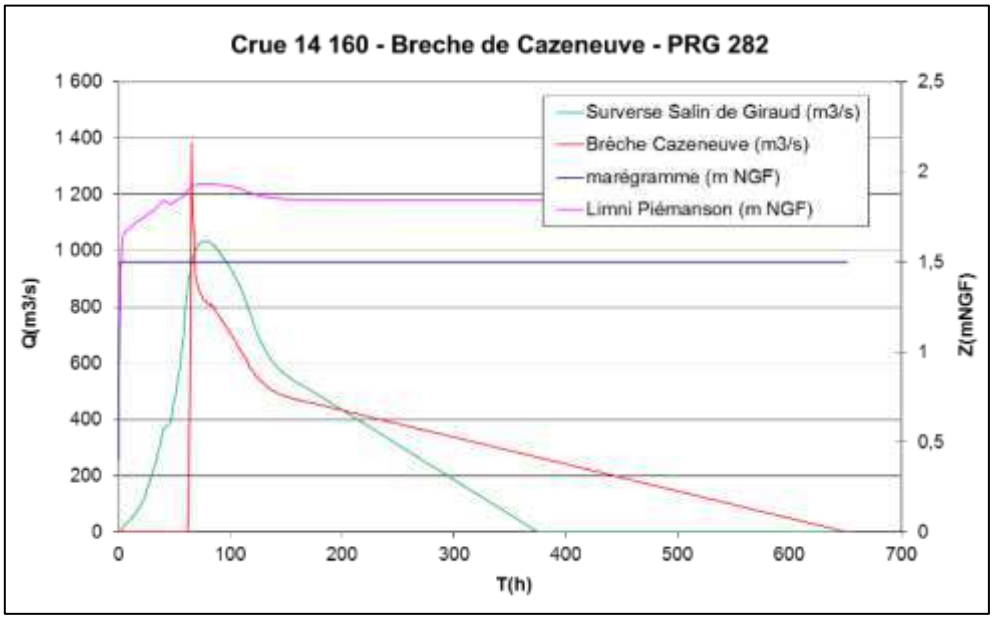


Figure 77. EI 14160 – Brèche Amont Cazeneuve – PRG 282,0 – Hydrogramme de brèche

La figure ci-après illustre la cartographie des vitesses maximum d'écoulement. La vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 300 et 2200 m de la digue.

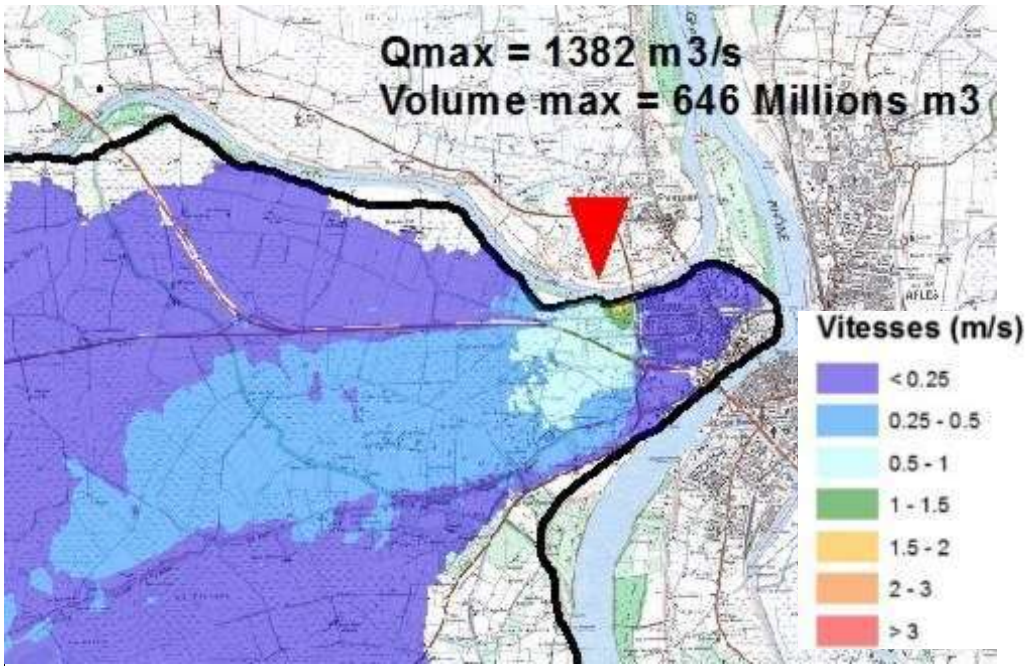


Figure 78. EI 14160 Brèche Amont de Cazeneuve – PRG 282,0 – Vitesse maximum (m/s)

Le profil d'écoulement en aval de la brèche, non représenté, a un comportement similaire au scénario de brèche EI 12500 avec des cotes d'eau plus élevées. On note des hauteurs d'eau supérieures à 3 mètres en amont du remblai ferroviaire. Les hauteurs d'eau demeurent supérieures à 2,5 mètres jusqu'à la RN113. Elles vont progressivement décroitre, avant d'accroitre à nouveau dans les zones des marais.

La dynamique de propagation de l'onde de rupture n'a pas été représentée mais compte tenu des cotes d'eau dans le Petit Rhône, de la cartographie des vitesses d'écoulement et du profil de brèche, on peut considérer qu'elle est analogue au scénario de brèche EI 12500.

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

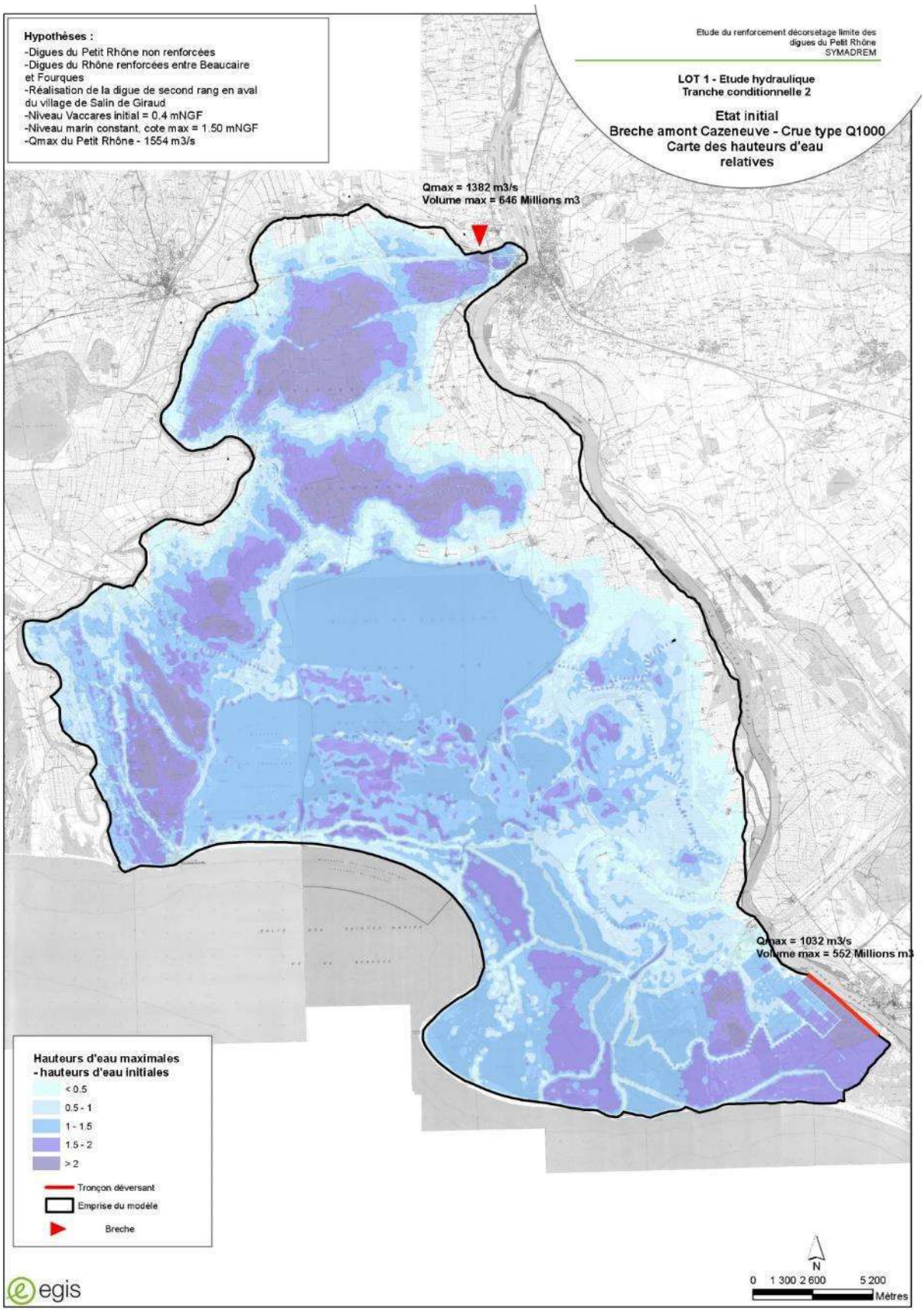


Figure 79. EI 14160 – Brèche Amont Cazeneuve – PRG 282,0 – Hauteur d'eau maximum (m)

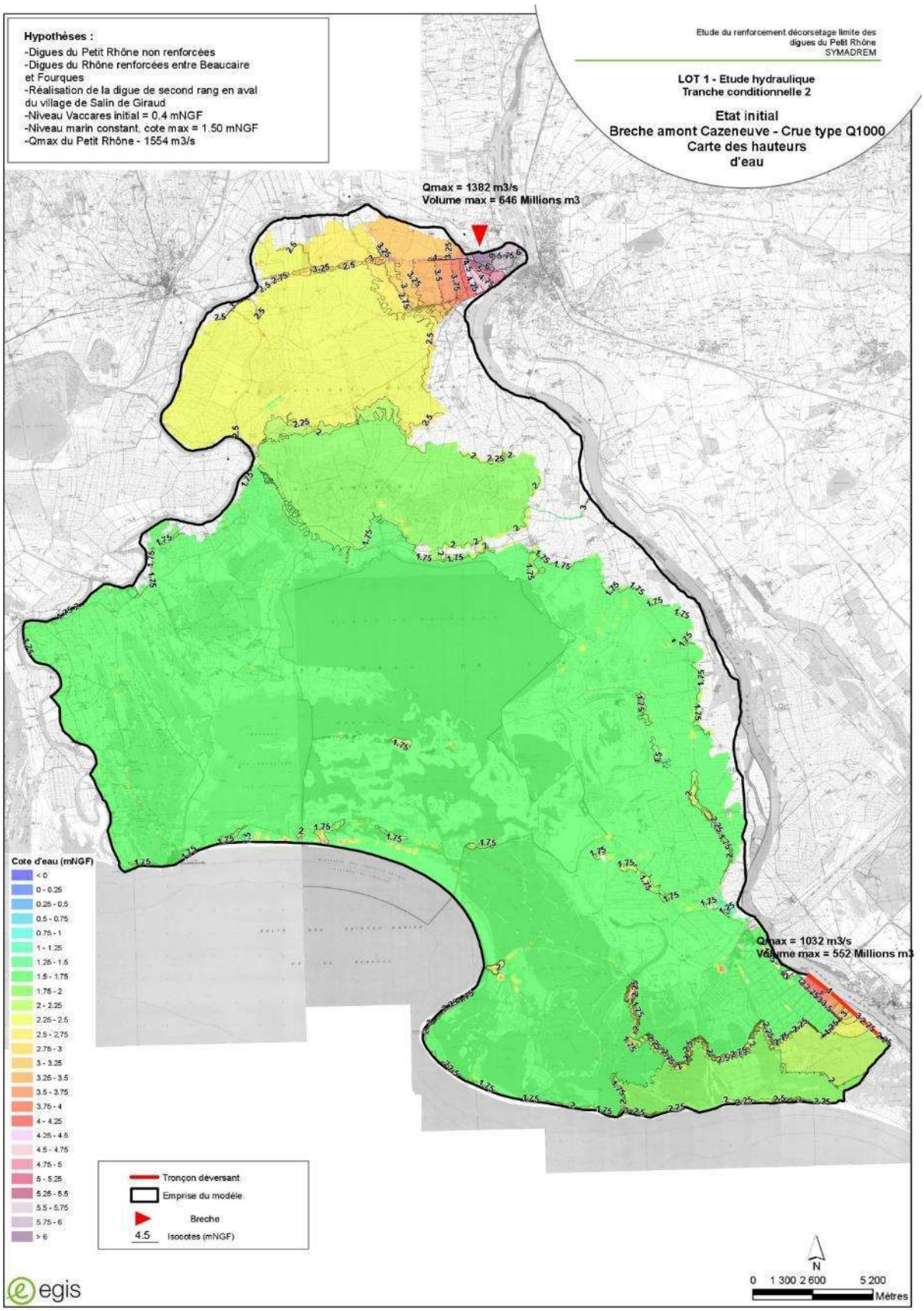


Figure 80. EI 14160 – Brèche Amont Cazeneuve – PRG 282,0 – Cote d'eau maximum (m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 23. EI 14160 – Brèche Amont Cazeneuve – PRG 282,0 – Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
1	Trinquetaille La Corrèze Gontier	7,50	0,6	2,9	3,5
2	Trinquetaille St Genest-Le Vittier	7,00	0	2,7	3,3
4	Trinquetaille Cazeneuve	7,50	0,1	3,3	3,7
5	Trinquetaille les prêcheurs	7,00	1,5	3,1	3,5
6	Trinquetaille St Antoine Billot	5,50	1,1	2,0	2,5
7	Trinquetaille zone humide	5,50	0	1,5	2,1
8	Anciennes Papeteries Etienne	5,25	0	0,6	1,1
9	A54 Est	3,25	0	0,9	1,7
10	Gimeaux	4,50	1,6	2,8	3,4
11	La Grande Sacristane	4,50	0,0	1,1	2,0
12	Clos du Mas Neuf	3,00	0,0	0,8	1,6
13	Marais du Pont de Rousty	2,75	0,9	2,2	3,2
14	Marais de la Grand Mar	2,25	0	1,3	2,1
15	Montlong	2,00	0	0	0,2
16	Etang du Vaccarès	1,75	0,6	1,2	1,6
17	Armelière Sambuc Chamone	1,75	0	0,2	1,0
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	1,75	0,6	1,1	1,6
19	Salin de Giraud	1,75	0,1	0,6	1,1
23	Abords digue Commanderie Boisverdun	1,75	0	0	0,7
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	1,75	0	0,2	0,9
25	Abords digue Salin de Giraud	1,75	0	0,4	1,2
26	Salins du midi sud-est	1,75	0,5	1,0	1,5
27	Abords digue Cazeneuve - A54	4,00	0	0,7	1,5
28	Abords digue A54 Pont de Cavalès	2,75	0	0	0,5
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	2,50	0	0,4	1,2
30	Saliers	2,50	0,0	0,9	2,0
31	Marais de Saliers	2,50	0,7	1,9	2,5
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	2,00	0	0,5	1,6
34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage	1,75	0,1	0,8	1,4
35	Amarée Dromard	1,75	0,7	1,3	1,7
36	Panperdu Etang des Launes	1,75	0,5	1,1	1,7
37	Etang de Ginès	1,75	0,9	1,6	1,7
38	Saintes-Maries-de-la-Mer	1,75	0	0,6	1,0
39	Paty trinité	1,75	0,2	1,2	1,7
40	Vaccarès Est	1,75	0	1,0	1,4
41	Esquineau	1,75	0	1,0	1,4

6.3 BRECHE AVAL DE CAZENEUVE

3 crues ont été modélisées pour cette brèche : 10500 ; 11500 et 12500.

6.3.1 Crue 10500 – Etat actuel/initial - Brèche aval Cazeneuve – PRG 283,0

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située en aval du Mas de Cazeneuve au PRG 283 pour une crue, dont le débit de pointe atteindrait 10 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon et dont l'hydrogramme aurait une forme équivalente à la crue de janvier 1994 (débit annoncé à l'époque de 11 000 m^3/s et qui est estimé aujourd'hui à 10 250 m^3/s).

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,016, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 55 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,55 X 0,016 ≅ 0,9 %.

Pour mémoire, la probabilité maximale annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 2.10^{-2} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 100 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 5 mètres,
- Temps d'ouverture : 5 heures pour la digue et 5 heures pour la fosse,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 3,25 m NGF,
- Cote de la crue : 7,65 m NGF.

Le débit de pointe modélisé est estimé à 1 250 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 45 heures et le volume de déversement à environ 54 millions de m^3.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

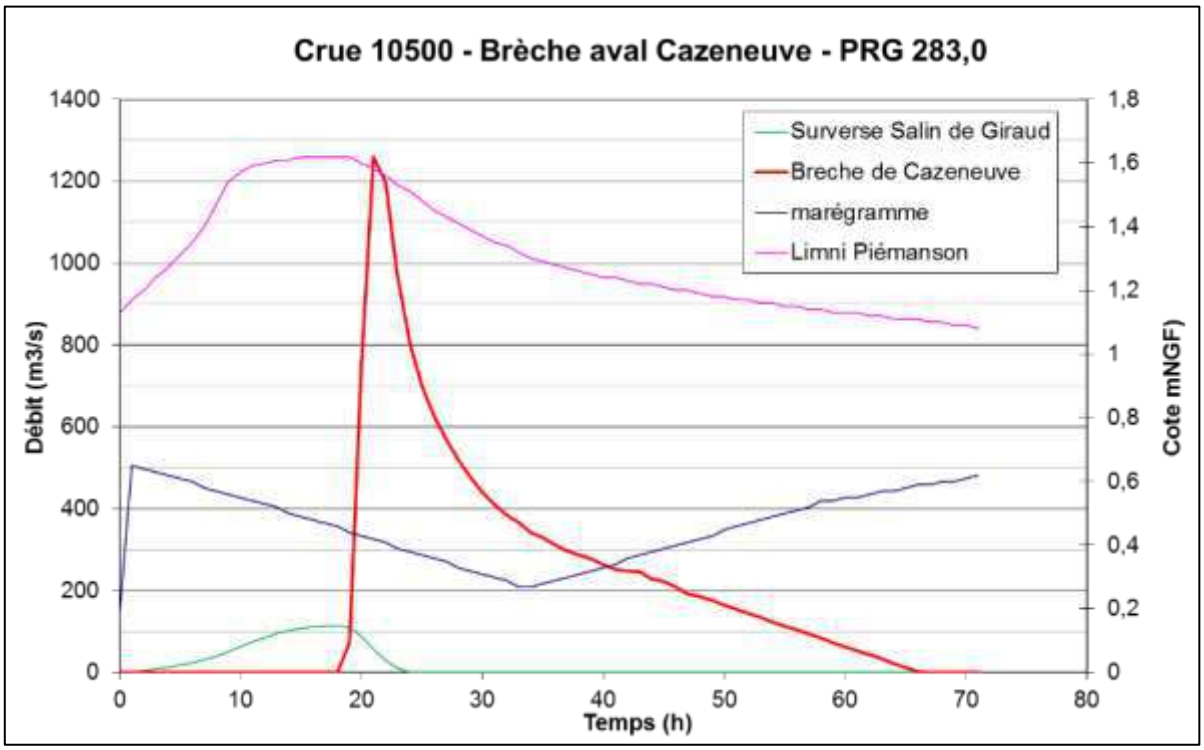


Figure 81. EI 10500 – Brèche Aval Cazeneuve – PRG 283,0 - Hydrogramme de brèche

Les figures ci-après illustrent respectivement la cartographie des vitesses d'écoulement et le profil d'écoulement en aval de la brèche

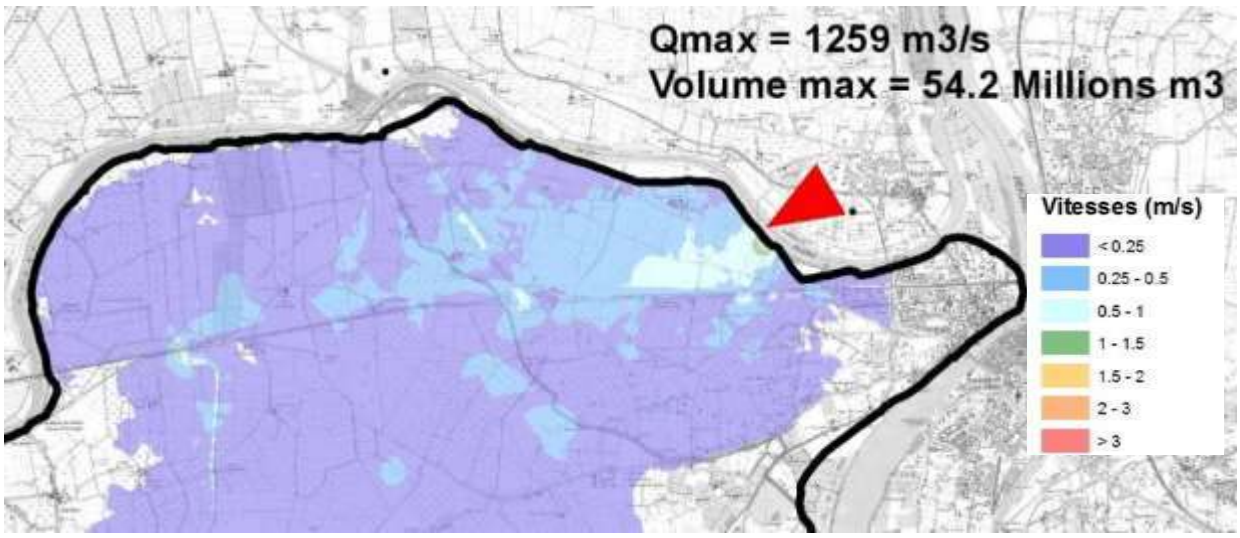
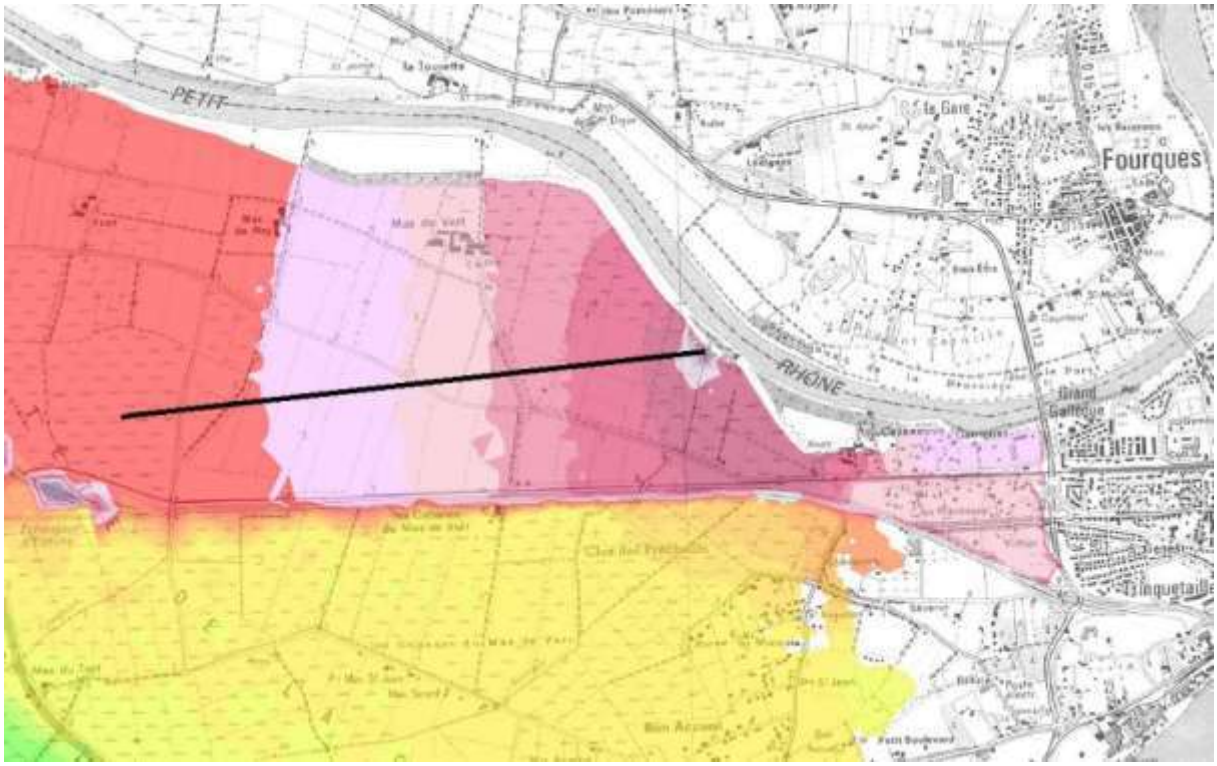


Figure 82. EI 10500 – Brèche Aval Cazeneuve – PRG 283,0 - Vitesse maximum (m/s)

La vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 200 et 2000 m de la digue.

Sur le profil d'écoulement en aval de la brèche, on note des hauteurs d'eau supérieures à 3 mètres sur 200 mètres. Les hauteurs d'eau demeurent supérieures à sensiblement

supérieures à 2 mètres au-delà de 2000 mètres. Elles vont progressivement décroitre, avant d'accroitre à nouveau dans les zones des marais.



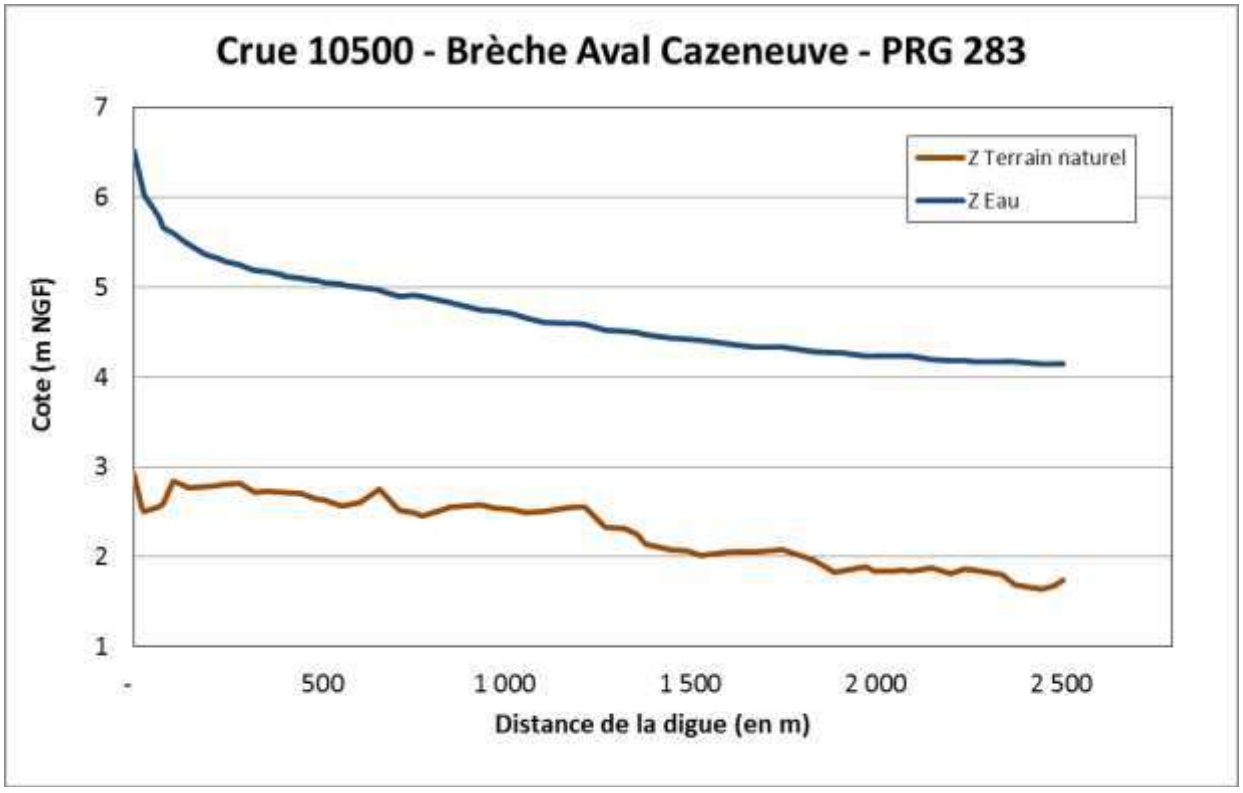


Figure 83. EI 10500 – Brèche Aval Cazeneuve – PRG 283,0 – Profil d'écoulement en aval de la brèche

La figure ci-après illustre les hauteurs d'eau en fonction du temps. Une heure après le démarrage de la brèche, les hauteurs d'eau dans la ZP n°27 & 9 sont inférieures à un mètre. Deux heures après, elles sont supérieures à 2 mètres. L'inondation des secteurs habités de trinquetaille débute trois heures après la brèche et reste modeste (inf. à 30 cm). L'inondation de Gimeaux (ZP n°10) débute.
Six heures après la brèche, Gimeaux est sous un mètre d'eau. Les ZP n°9 est entre 1 et 4 mètres. L'inondation sur les quartiers Ouest de Trinquetaille s'accentue tout en restant sous un mètre d'eau.
Après douze heures, les niveaux maximum en tête de Camargue commencent à diminuer. L'inondation se poursuit sur les ZP n°12 et 13.

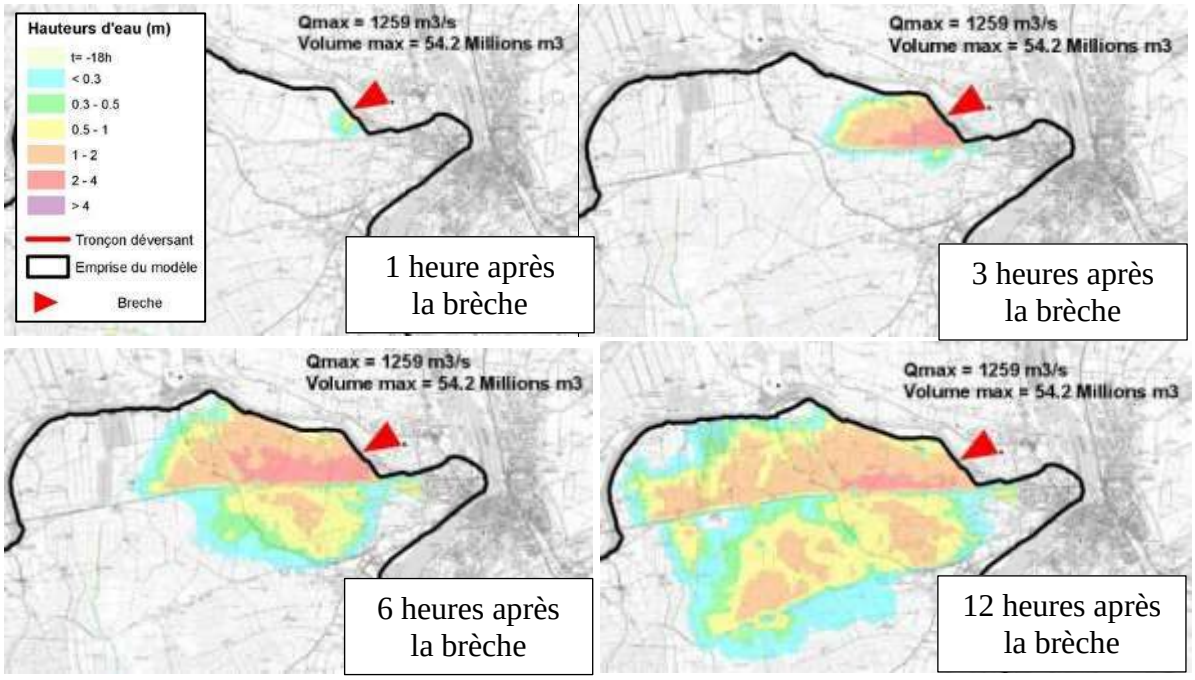


Figure 84. EI 10500 – Brèche Aval Cazeneuve – PRG 283,0 – Hauteur d'eau en fonction du temps

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

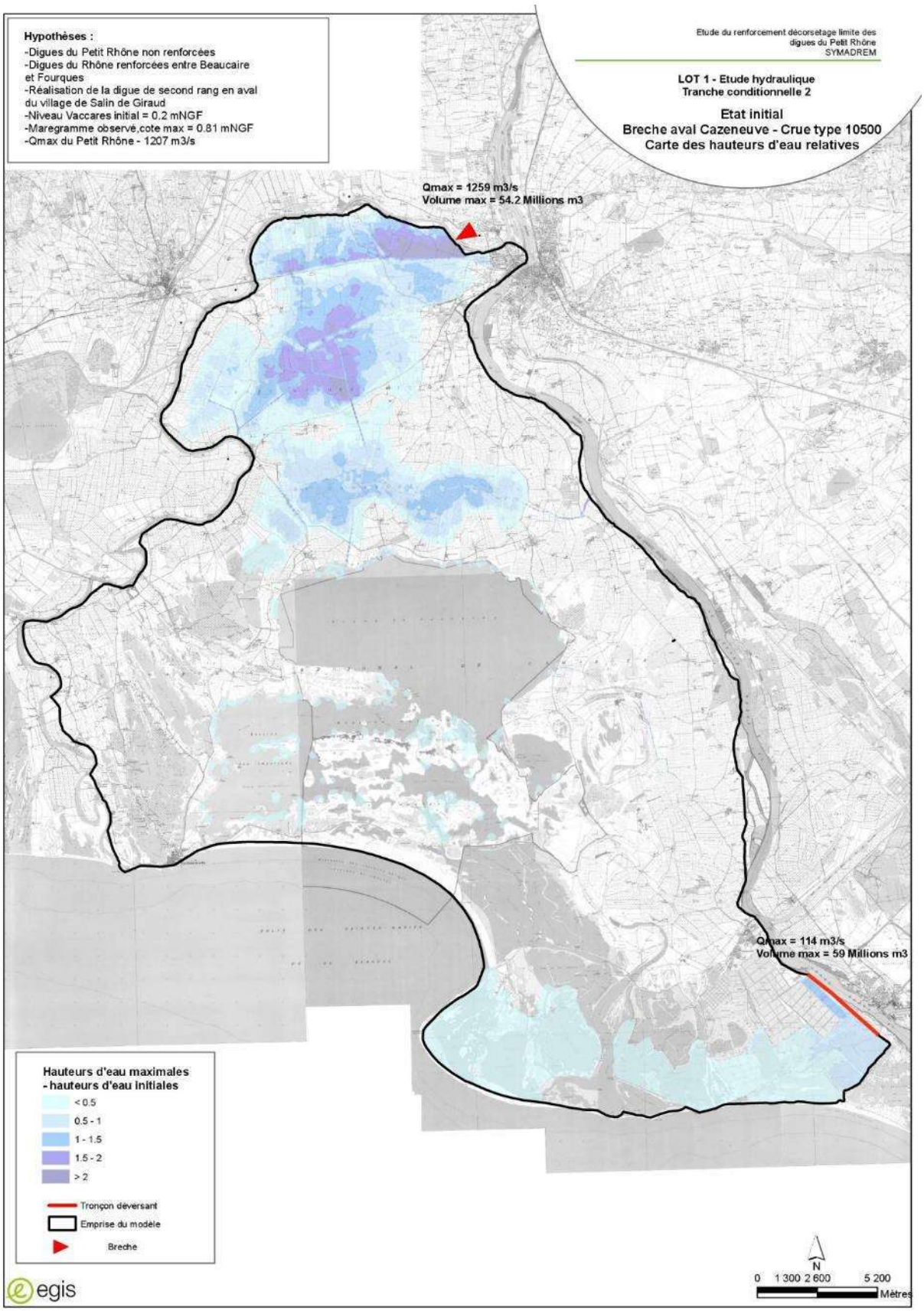


Figure 85. EI 10500 – Brèche Aval Cazeneuve – PRG 283,0 – Hauteur d'eau maximum (m)

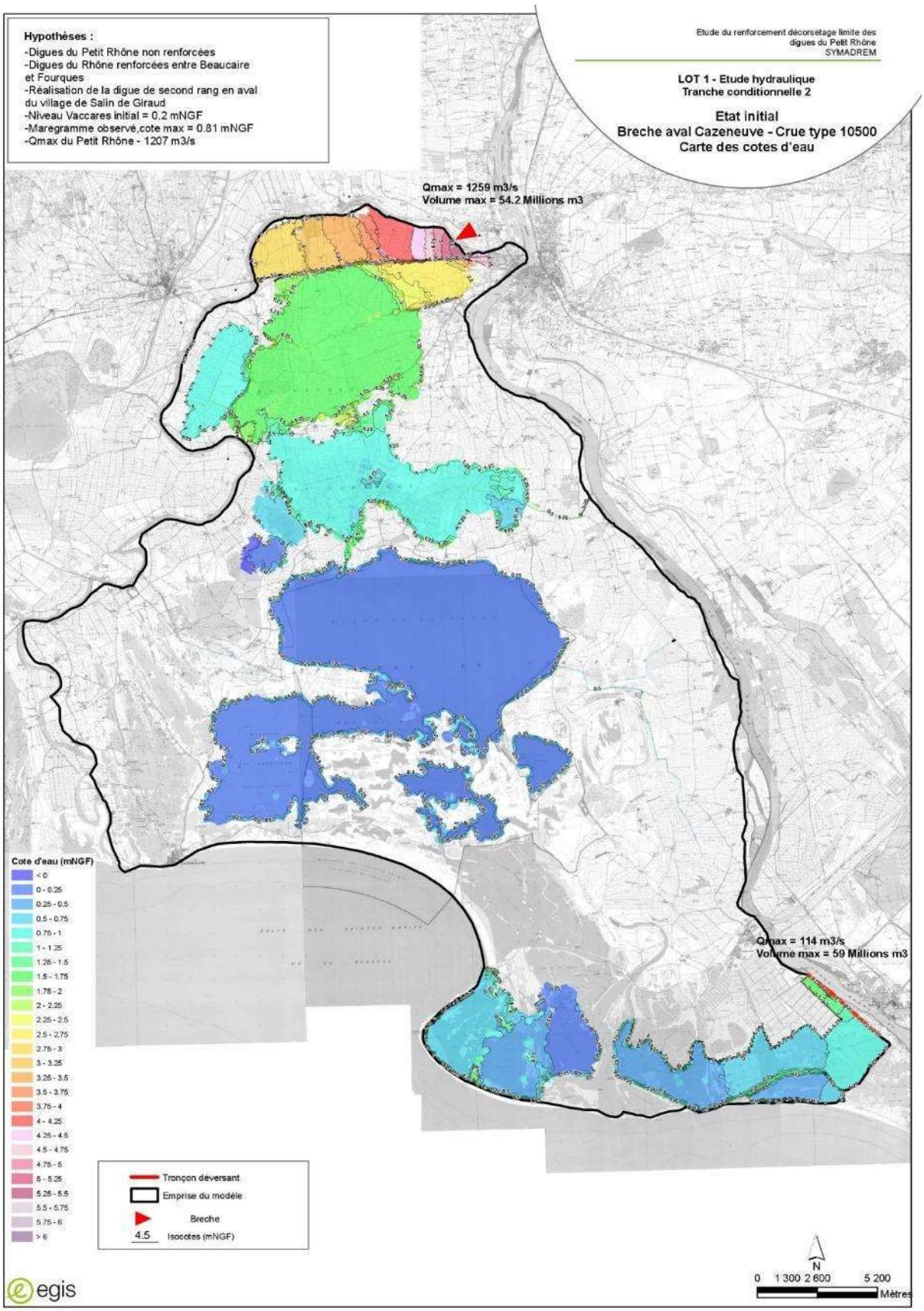


Figure 86. EI 10500 – Brèche Aval Cazeneuve – PRG 283,0 – Cote d'eau maximum (m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 24. EI 10500 – Brèche Aval Cazeneuve – PRG 283,0 – Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
4	Trinquetaille Cazeneuve	5,00	0	0,8	1,2
5	Trinquetaille les prêcheurs	5,00	0	1,1	1,5
6	Trinquetaille St Antoine Billot	4,00	0	0,5	1,0
9	A54 Est	4,75	1,2	2,4	3,2
10	Gimeaux	3,00	0,1	1,3	1,9
12	Clos du Mas Neuf	3,50	0,5	1,3	2,1
13	Marais du Pont de Rousty	2,00	0,1	1,5	2,5
14	Marais de la Grand Mar	1,25	0	0,3	1,1
16	Etang du Vaccarès	0,50	0	0,0	0,3
27	Abords digue Cazeneuve - A54	5,00	0,5	1,7	2,5
28	Abords digue A54 Pont de Cavalès	3,50	0	0,6	1,2
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	2,50	0	0,4	1,2
30	Saliers	2,50	0,0	0,9	2,0
31	Marais de Saliers	1,00	0	0,4	1,0
39	Paty trinité	1,25	0	0,7	1,2

6.3.2 Crue 11500 – Etat actuel/initial - Brèche aval Cazeneuve – PRG 283,0

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située en aval du Mas de Cazeneuve au PRG 283 pour une crue équivalente à celle de décembre 2003 (débit de pointe de 11 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,008, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 75 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,75 X 0,008 ≈ 0,6 %.
Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 2.10^{-2} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 130 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 5 mètres,
- Temps d'ouverture : 2 heures pour la digue et 2 heures pour la fosse,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 3,25 m NGF,
- Cote de la crue : 8,2 m NGF.

Le débit de pointe modélisé est estimé à 1 600 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 35 heures et le volume de déversement à environ 71 millions de m^3.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

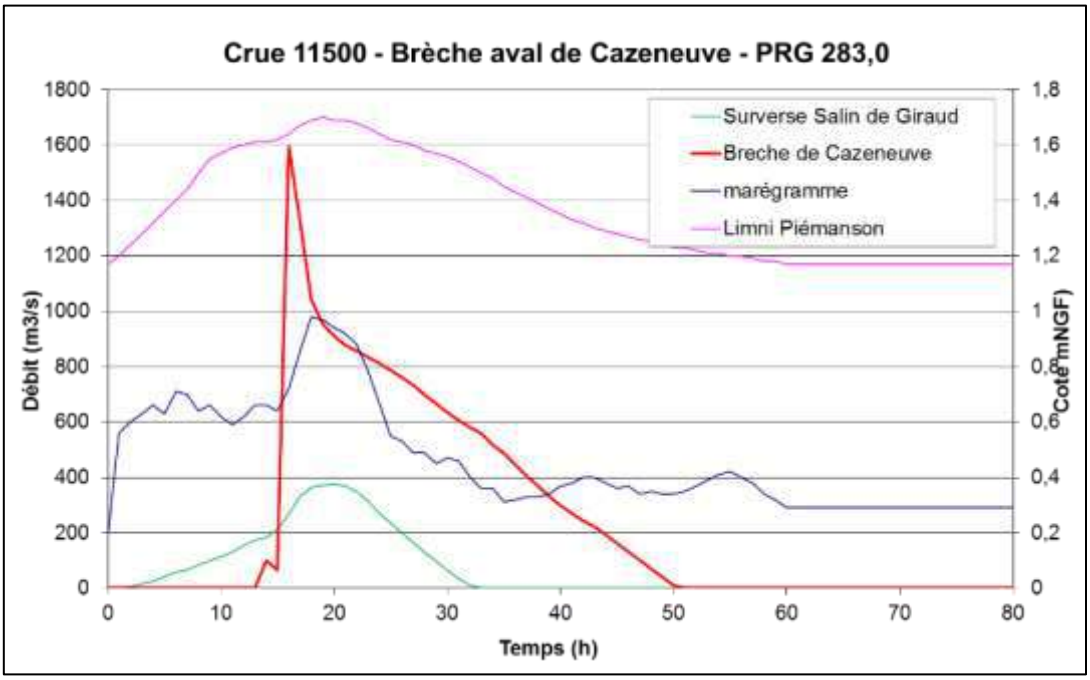


Figure 87. EI 11500 – Brèche Aval Cazeneuve – PRG 283,0 - Hydrogramme de brèche

Les figures ci-après illustrent respectivement la cartographie des vitesses d'écoulement et le profil d'écoulement en aval de la brèche.

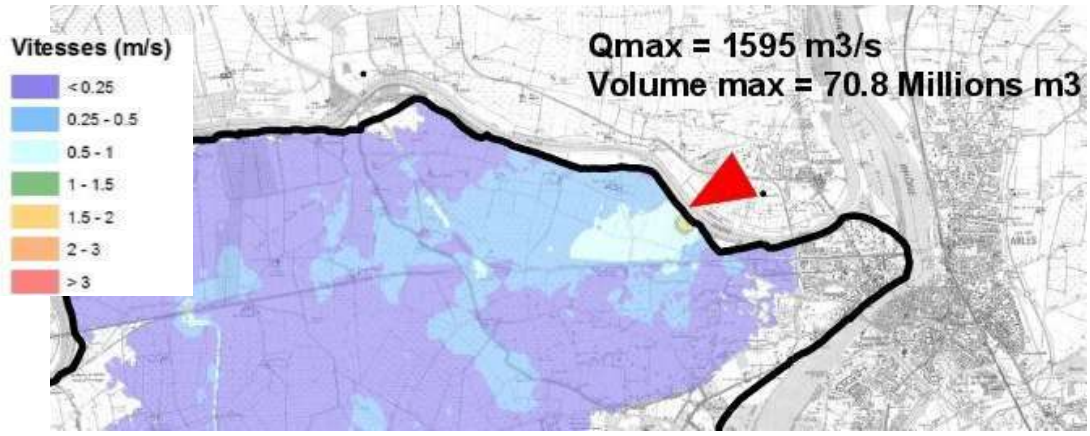


Figure 88. EI 11500 – Brèche Aval Cazeneuve – PRG 283,0 - Vitesse maximum (m/s)

La vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 200 et 2000 m de la digue.
Le profil d'écoulement en aval de la brèche est similaire au scénario EI 10500, on note des hauteurs d'eau supérieures à 3 mètres sur 200 mètres. Les hauteurs d'eau demeurent supérieures à sensiblement supérieures à 2 mètres au-delà de 2000 mètres. Elles vont progressivement décroitre, avant d'accroitre à nouveau dans les zones des marais.

La dynamique de propagation au cours du temps est également similaire à l'EI 10500.

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

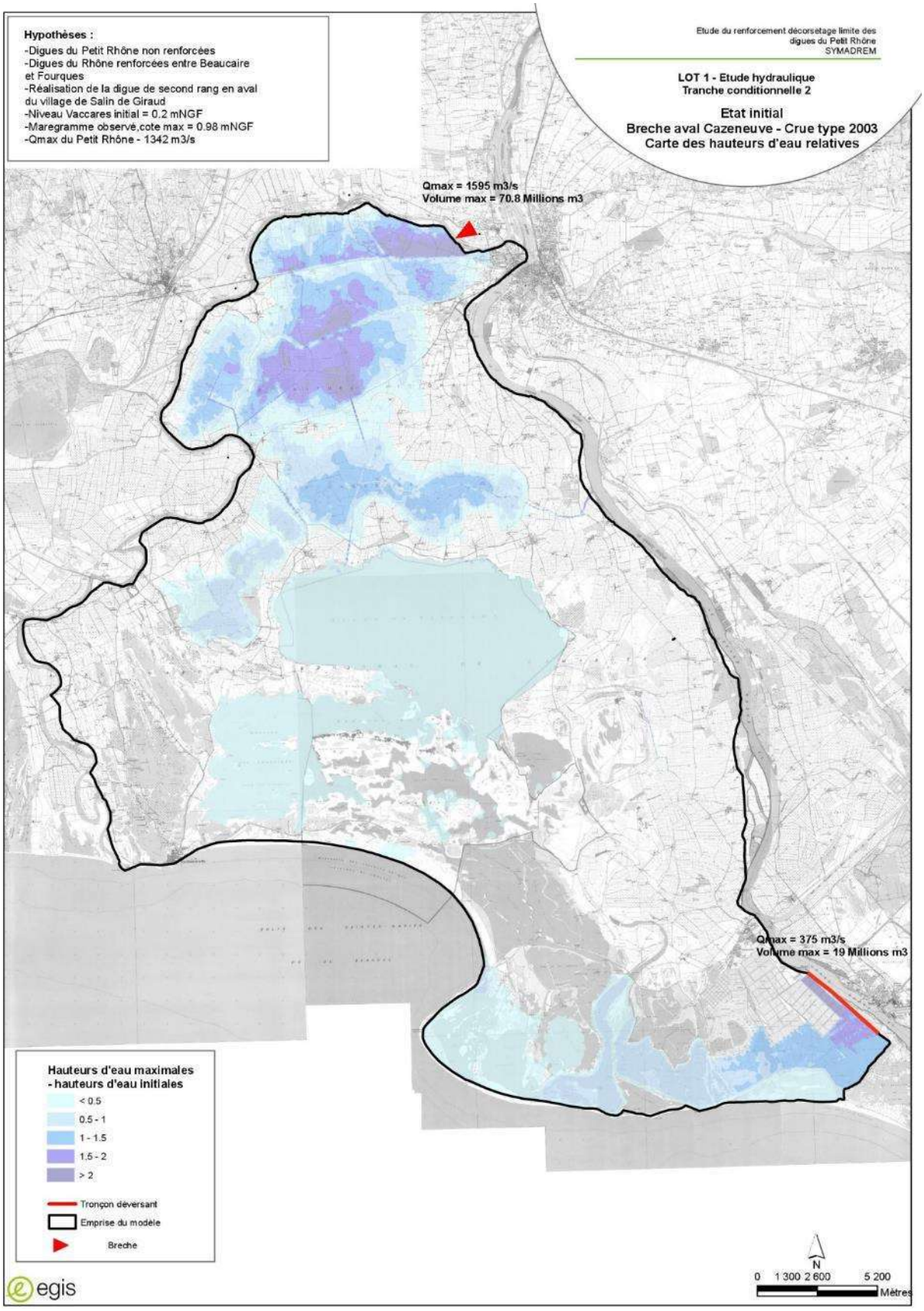


Figure 89. EI 11500 – Brèche Aval Cazeneuve – PRG 283,0 – Hauteur d'eau maximum (m)

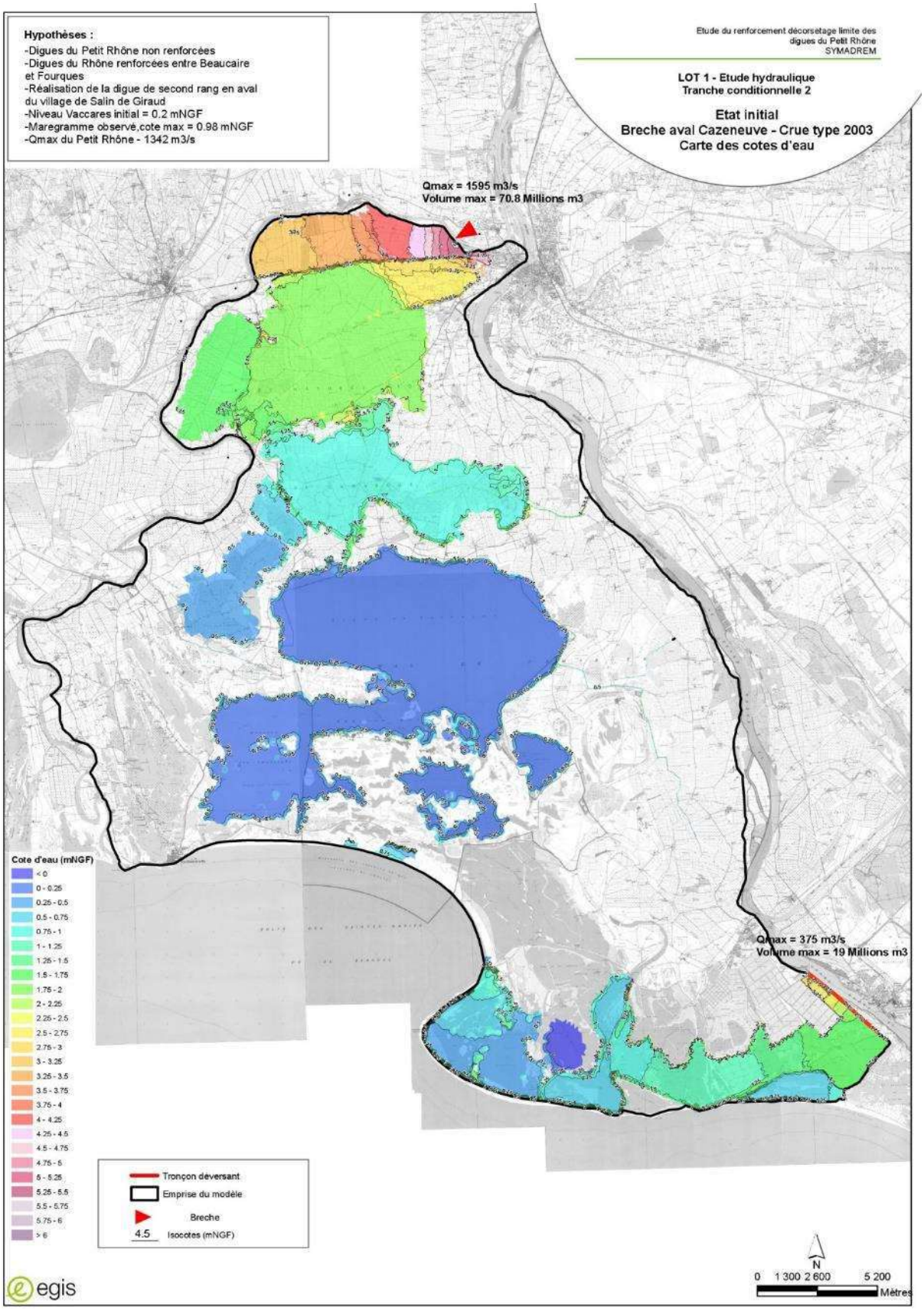


Figure 90. EI 11500 – Brèche Aval Cazeneuve – PRG 283,0 – Cote d'eau maximum (m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 25. EI 11500 – Brèche Aval Cazeneuve – PRG 283,0 – Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
4	Trinquetaille Cazeneuve	5,25	0	1,0	1,4
5	Trinquetaille les prêcheurs	5,25	0	1,3	1,8
6	Trinquetaille St Antoine Billot	4,00	0	0,5	1,0
9	A54 Est	4,75	1,2	2,4	3,2
10	Gimeaux	3,25	0,4	1,6	2,1
12	Clos du Mas Neuf	3,50	0,5	1,3	2,1
13	Marais du Pont de Rousty	2,25	0,4	1,7	2,7
14	Marais de la Grand Mar	1,50	0	0,6	1,4
16	Etang du Vaccarès	0,50	0	0,0	0,3
27	Abords digue Cazeneuve - A54	5,00	0,5	1,7	2,5
28	Abords digue A54 Pont de Cavalès	3,50	0	0,6	1,2
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	1,75	0	0	0,4
30	Saliers	2,50	0,0	0,9	2,0
31	Marais de Saliers	1,75	0,0	1,2	1,8
39	Paty trinité	1,00	0	0,4	0,9

6.3.3 Crue 12500 – Etat actuel/initial - Brèche aval Cazeneuve – PRG 283,0

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située, en aval du Mas de Cazeneuve (juste en aval du quartier de Trinquetaille), au PRG 283,2 pour une crue équivalente à celle de mai 1856 (débit de pointe de 12 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée et dans les conditions actuelles d'écoulement.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,006, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.
La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 85 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,85 X 0,006 ≅ 0,5 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 2.10^{-2} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 130 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 7 mètres,
- Temps d'ouverture : 2 heures pour la digue et 2 heures ($2^{ème}$ étape) pour la fosse,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 3,25 m NGF,
- Cote de la crue : 8,5 m NGF.

Le débit de pointe modélisé est estimé à environ 1 650 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 160 heures et le volume de déversement à environ 380 millions de m^3.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

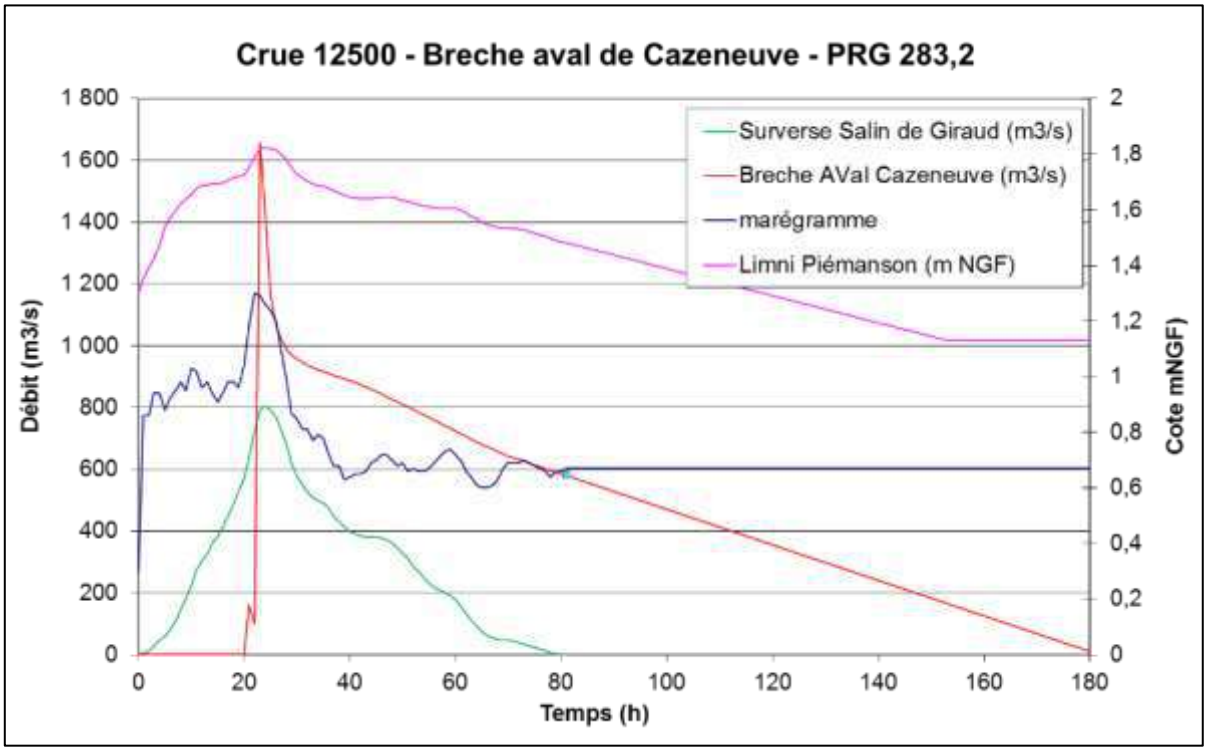


Figure 91. EI 12500 – Brèche Aval Cazeneuve – PRG 283,0 – Hydrogramme de brèche

Les deux cartes ci-après illustrent respectivement les vitesses d'écoulement et les hauteurs d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

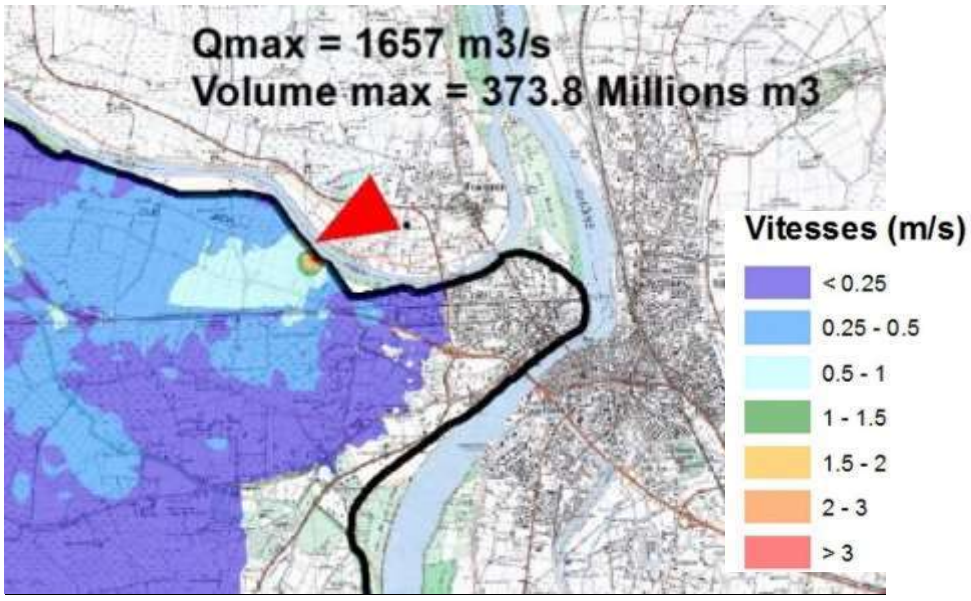


Figure 92. EI 12500 – Brèche Aval Cazeneuve – PRG 283,0 – Vitesse maximum (m/s)

La vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 200 et 2000 m de la digue.

Le profil d'écoulement en aval de la brèche est similaire aux scénarios EI 10500 & EI 11500, on note des hauteurs d'eau supérieures à 3 mètres sur 200 mètres. Les hauteurs d'eau demeurent supérieures à sensiblement supérieures à 2 mètres au-delà de 2000 mètres. Elles vont progressivement décroitre, avant d'accroitre à nouveau dans les zones des marais.

La dynamique de propagation au cours du temps n'a pas été représentée, mais compte tenu du profil en aval de la brèche et de la vitesse des écoulements, on peut considérer qu'elle similaire à l'EI 11500.

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

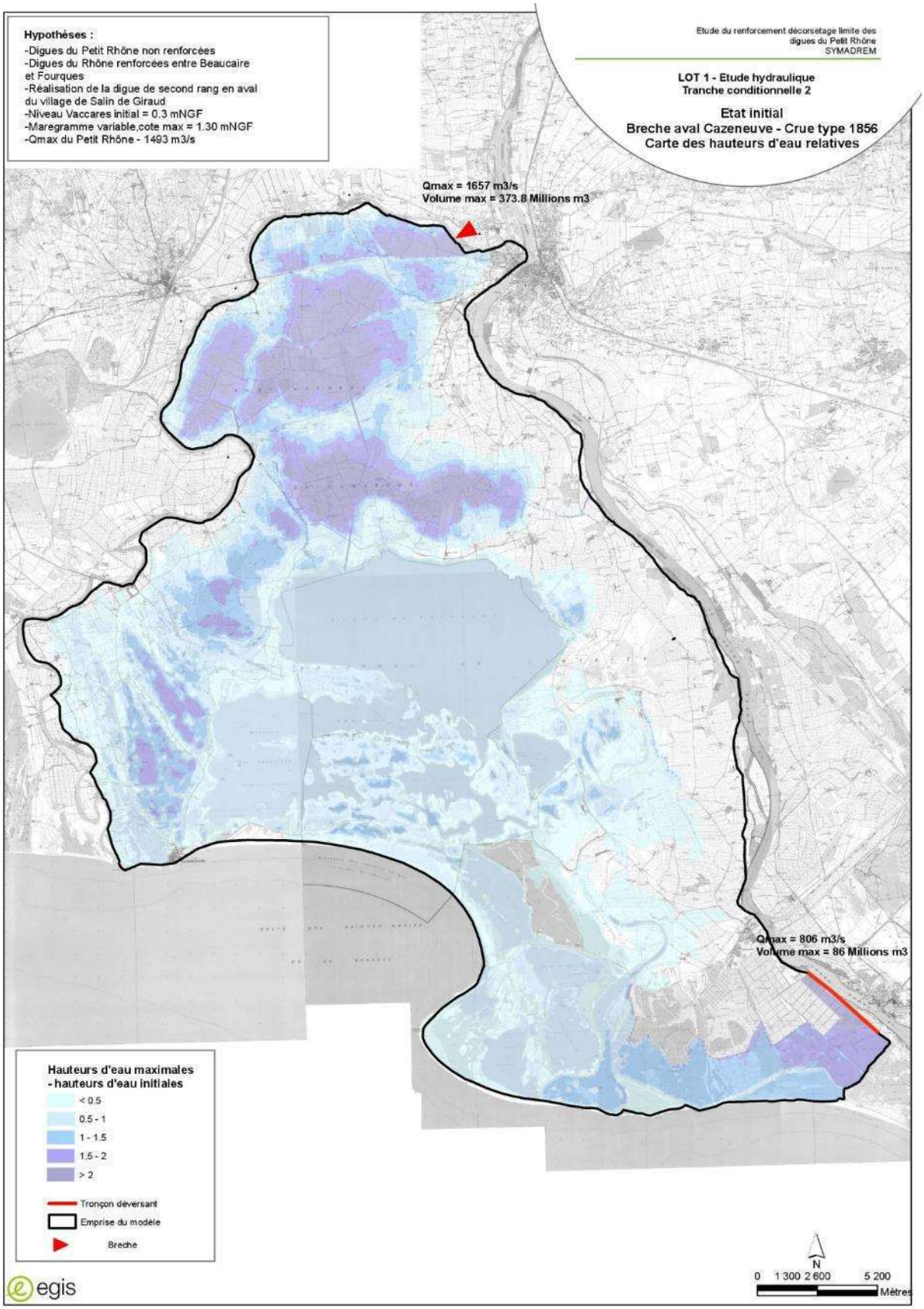


Figure 93. EI 12500 – Brèche Aval Cazeneuve – PRG 283,0 – Hauteur d'eau maximum (m)

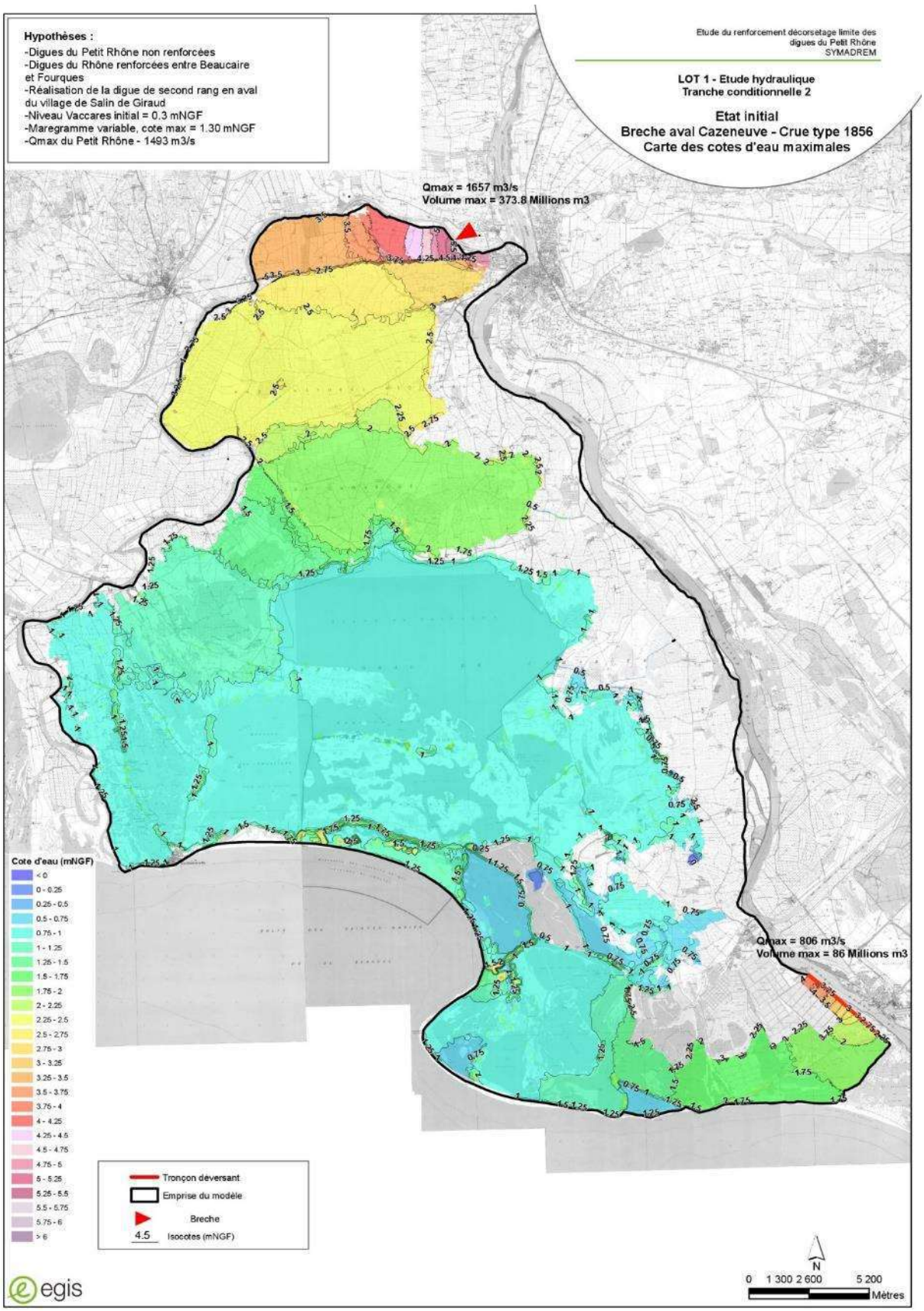


Figure 94. EI 12500 – Brèche Aval Cazeneuve – PRG 283,0 – Cote d'eau maximum (m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 26. EI 12500 – Brèche Aval Cazeneuve – PRG 283,0 – Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
4	Trinquetaille Cazeneuve	5,25	0	1,0	1,4
5	Trinquetaille les prêcheurs	5,25	0	1,3	1,8
6	Trinquetaille St Antoine Billot	4,00	0	0,5	1,0
9	A54 Est	4,75	1,2	2,4	3,2
10	Gimeaux	3,25	0,4	1,6	2,1
11	La Grande Sacristane	3,00	0	0	0,5
12	Clos du Mas Neuf	3,75	0,7	1,6	2,4
13	Marais du Pont de Rousty	2,75	0,9	2,2	3,2
14	Marais de la Grand Mar	2,25	0	1,3	2,1
16	Etang du Vaccarès	1,25	0,1	0,7	1,1
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	1,25	0,1	0,6	1,1
27	Abords digue Cazeneuve - A54	5,00	0,5	1,7	2,5
28	Abords digue A54 Pont de Cavalès	3,50	0	0,6	1,2
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	2,50	0	0,4	1,2
30	Saliers	2,75	0,2	1,1	2,3
31	Marais de Saliers	2,50	0,7	1,9	2,5
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	1,75	0	0,3	1,3
34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage	1,25	0	0,3	0,9
35	Amarée Dromard	1,25	0,2	0,8	1,2
36	Panperdu Etang des Launes	1,25	0,0	0,6	1,2
37	Etang de Ginès	1,25	0,4	1,1	1,2
38	Saintes-Maries-de-la-Mer	1,50	0	0,3	0,7
39	Paty trinité	1,75	0,2	1,2	1,7
40	Vaccarès Est	1,25	0	0,5	0,9

6.4 BRECHE AMONT A54

Ce scénario de brèche a été modélisé pour 4 crues : 10500, 11500, 12500, 14160.

6.4.1 Crue 10500 – Etat actuel/initial – Brèche A54 – PRG 288,4

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située en amont de l'A54 au PRG 288,3 pour une crue, dont le débit de pointe atteindrait 10 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon et dont l'hydrogramme aurait une forme équivalente à la crue de janvier 1994 (débit annoncé à l'époque de 11 000 m^3/s et qui serait estimé aujourd'hui à 10 250 m^3/s).

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,016, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon est de 0,1 %.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,001 X 0,016 $\approx 10^{-5}$.

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 100 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 7 mètres,
- Temps d'ouverture : 5 heures pour la digue et 2 heures pour la fosse,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 5,5 m NGF,
- Cote de la crue : 7,2 m NGF.

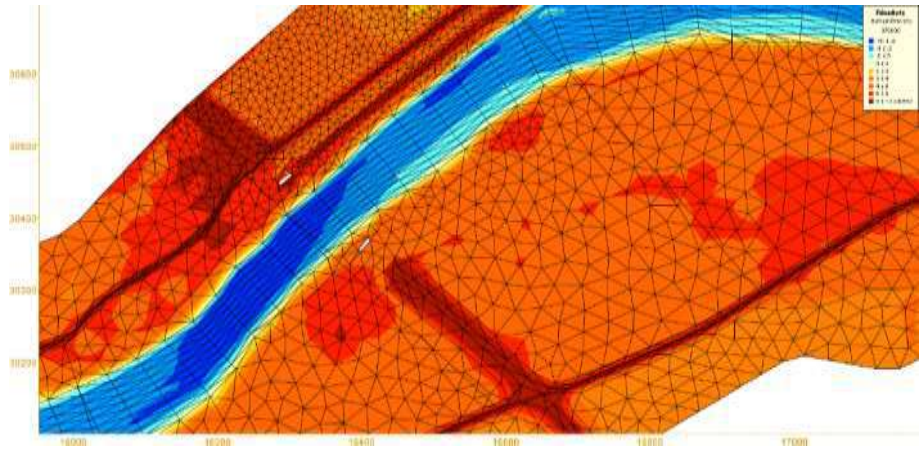
Le débit de pointe modélisé est estimé à environ 200 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 18 heures et le volume de déversement à environ 5 millions de m^3.

Les trois figures suivantes donnent la topographie au droit de la brèche aux trois instants :

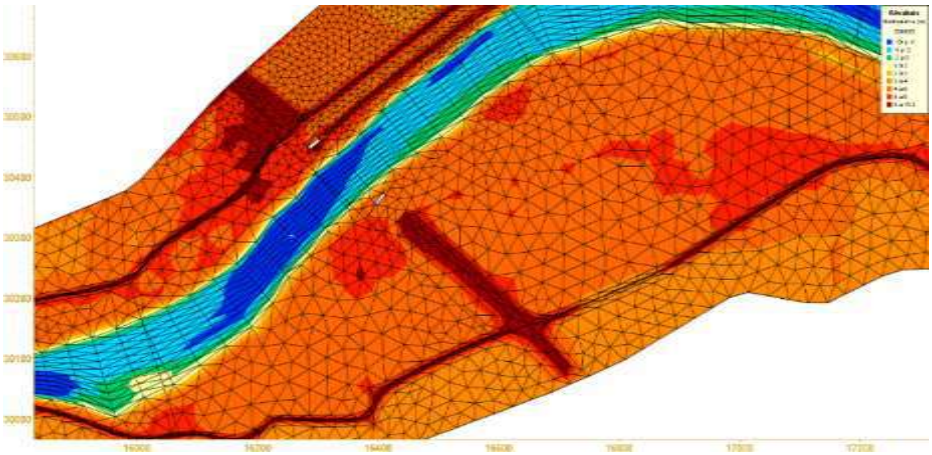
- avant la formation de la brèche,
- à l'issue de la première étape de la rupture (ouverture au niveau du terrain naturel),
- à l'issue de la deuxième étape de la rupture (création de la fosse à l'arrière de la brèche).

On notera que compte tenu de la localisation de la digue très éloigné du fleuve, la fosse n'est jamais en liaison directe avec le fleuve.

Avant la brèche



Ouverture du terrain naturel



Création de la fosse en aval de la digue

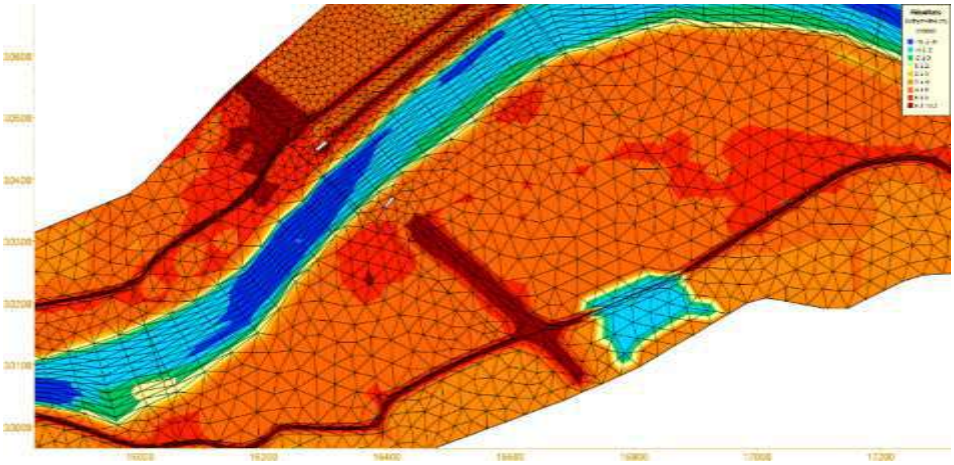


Figure 95. Modélisation de la brèche amont de l'A54

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

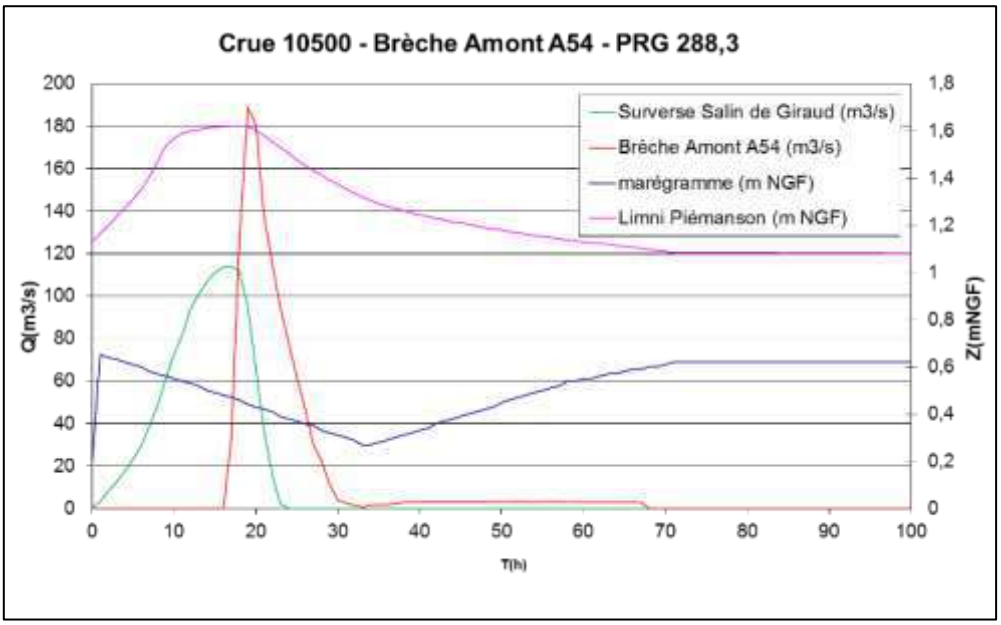


Figure 96. EI 10500 – Brèche Amont de l'A54 – PRG 288,3 - Hydrogramme de brèche

Les deux cartes ci-après illustrent respectivement les vitesses d'écoulement et hauteurs d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

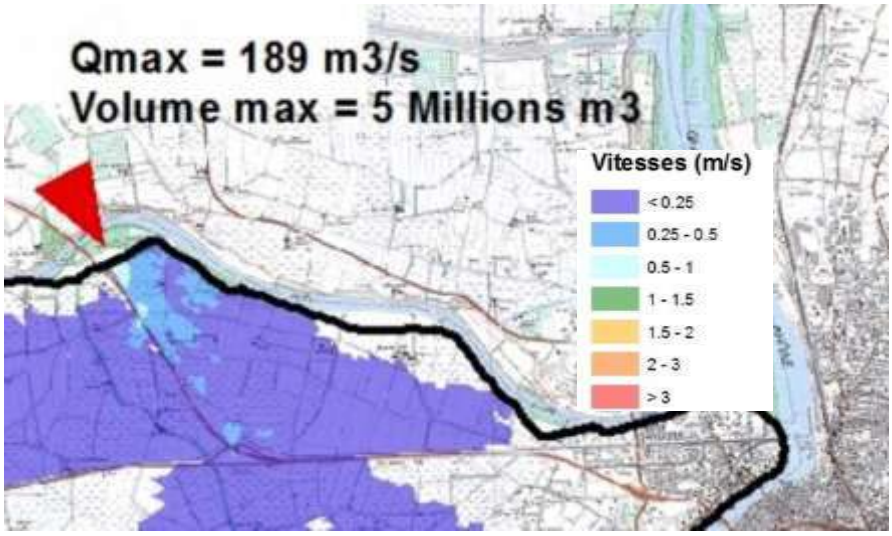


Figure 97. EI 10500 – Brèche Amont de l'A54 – PRG 288,3 - Vitesse maximum (m/s)

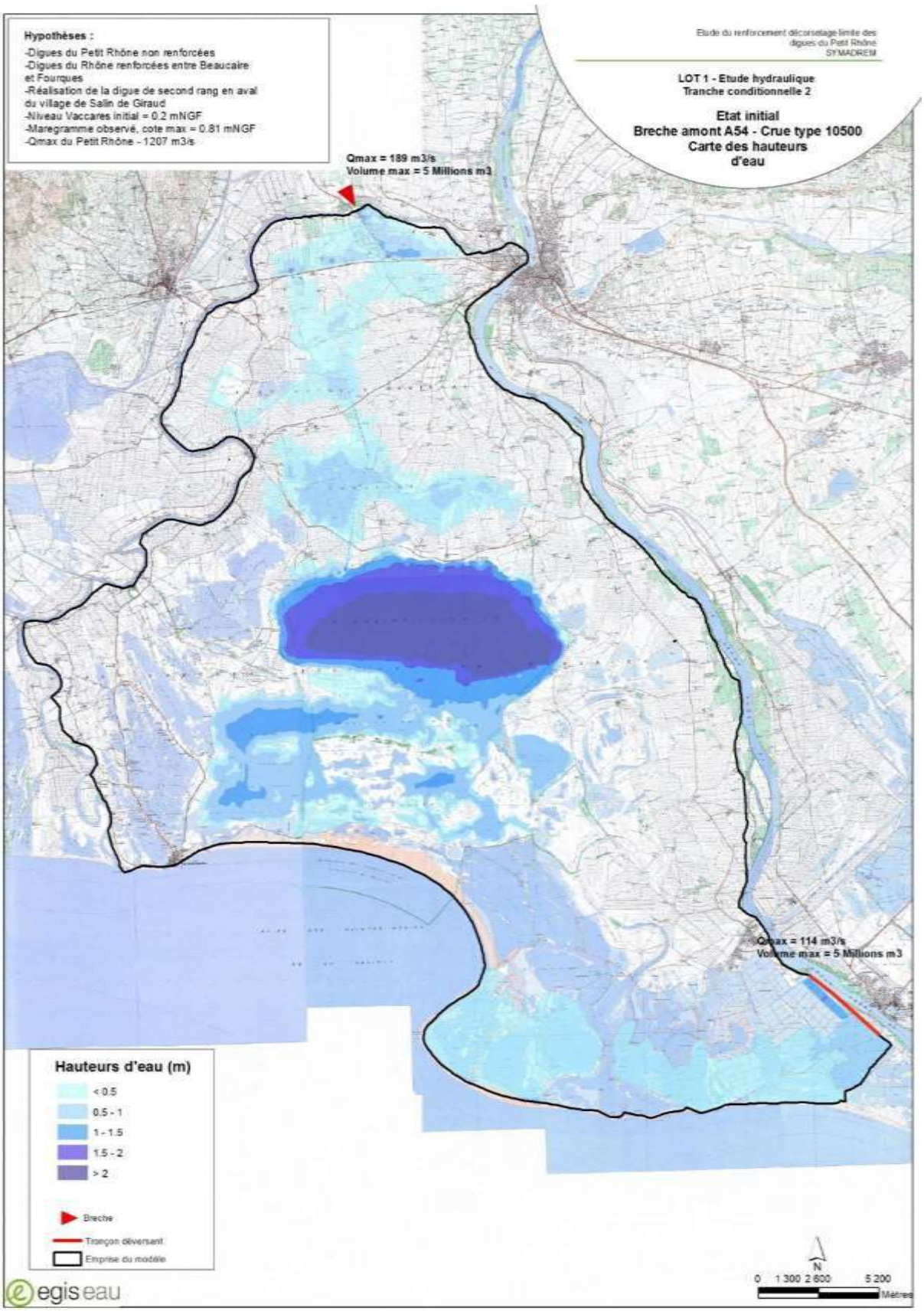


Figure 98. EI 10500 – Brèche Amont de l'A54 – PRG 288,3 - Hauteur d'eau maximum avec bathymétrie Vaccarès (m)

6.4.2 Crue 11500 – Etat actuel/initial – Brèche A54 – PRG 288,4

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située en amont de l'A54 au PRG 288,3 pour une crue équivalente à celle de décembre 2003 (débit de pointe de 11 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,008, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon est de 0,4 %.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,004 X 0,008 $\approx 10^{-5}$.

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 130 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 7 mètres,
- Temps d'ouverture : 2 heures pour la digue et 2 heures pour la fosse,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 5,5 m NGF,
- Cote de la crue : 7,7 m NGF.

Le débit de pointe modélisé est estimé à environ 450 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 30 heures et le volume de déversement à environ 20 millions de m^3.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

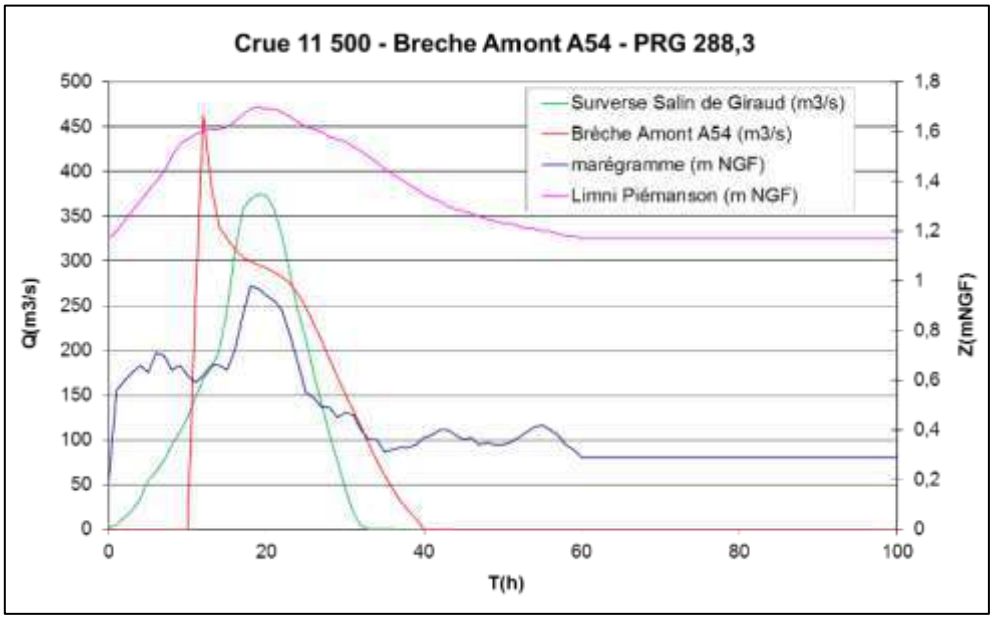


Figure 99. EI 10500 – Brèche Amont de l'A54 – PRG 288,3 – Hydrogramme de brèche

Les deux cartes ci-après illustrent respectivement les vitesses d'écoulement et les hauteurs d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

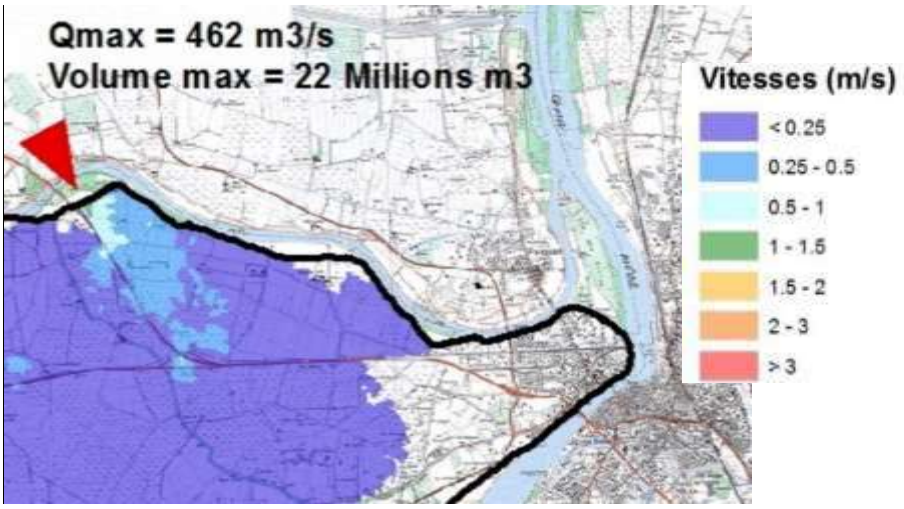


Figure 100. EI 10500 – Brèche Amont de l'A54 – PRG 288,3 – Vitesse maximum (m/s)

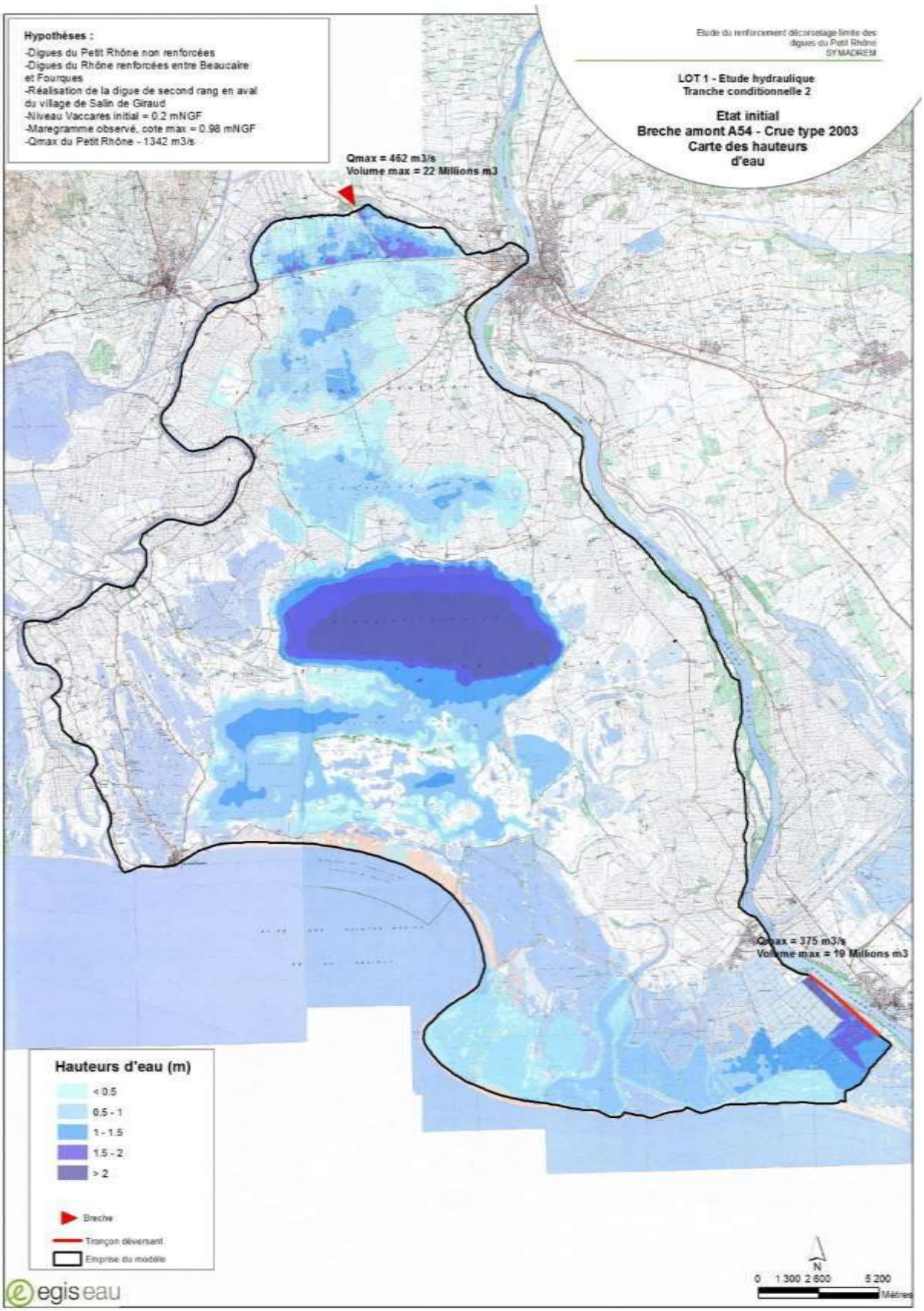


Figure 101. EI 11500 – Brèche Amont de l'A54 – PRG 288,3 - Hauteur d'eau maximum avec bathymétrie Vaccarès (m)

6.4.3 Crue 12500 – Etat actuel/initial – Brèche A54 – PRG 288,4

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située en amont de l'A54 au PRG 288,3 ; pour une crue équivalente à celle de mai 1856 (débit de pointe de 12 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée et dans les conditions actuelles d'écoulement.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,006, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon est de 0,8 %.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,004 X 0,006 $\approx 10^{-5}$.

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 130 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 7 mètres,
- Temps d'ouverture : 2 heures pour la digue et 2 heures pour la fosse,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 5,5 m NGF,
- Cote de la crue : 8 m NGF.

Le débit de pointe modélisé est estimé à environ 500 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 30 heures et le volume de déversement à environ 60 millions de m^3.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

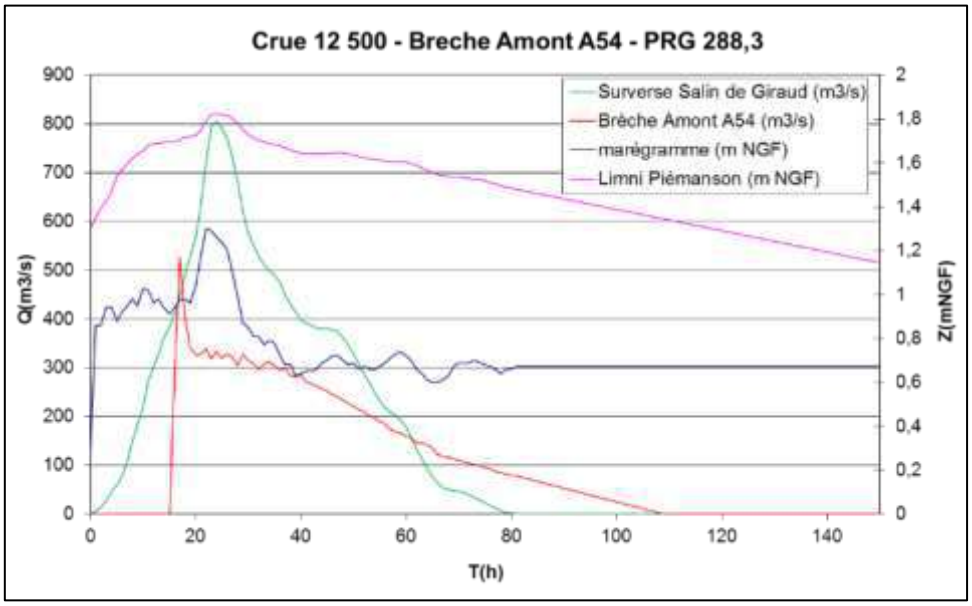


Figure 102. Scénario EI 12500 – 03 – Brèche Amont de l'A54 – Hydrogramme de brèche

Les deux cartes ci-après illustrent respectivement les vitesses d'écoulement et les hauteurs d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

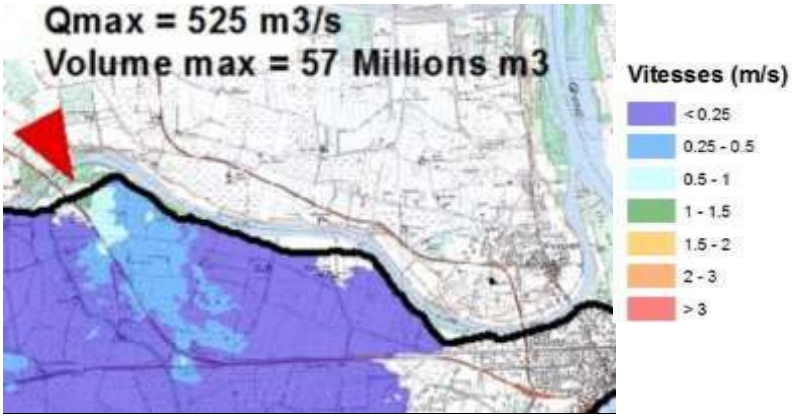


Figure 103. Scénario EI 12500 – 03 – Brèche Amont de A54 – Vitesse maximum (m/s)

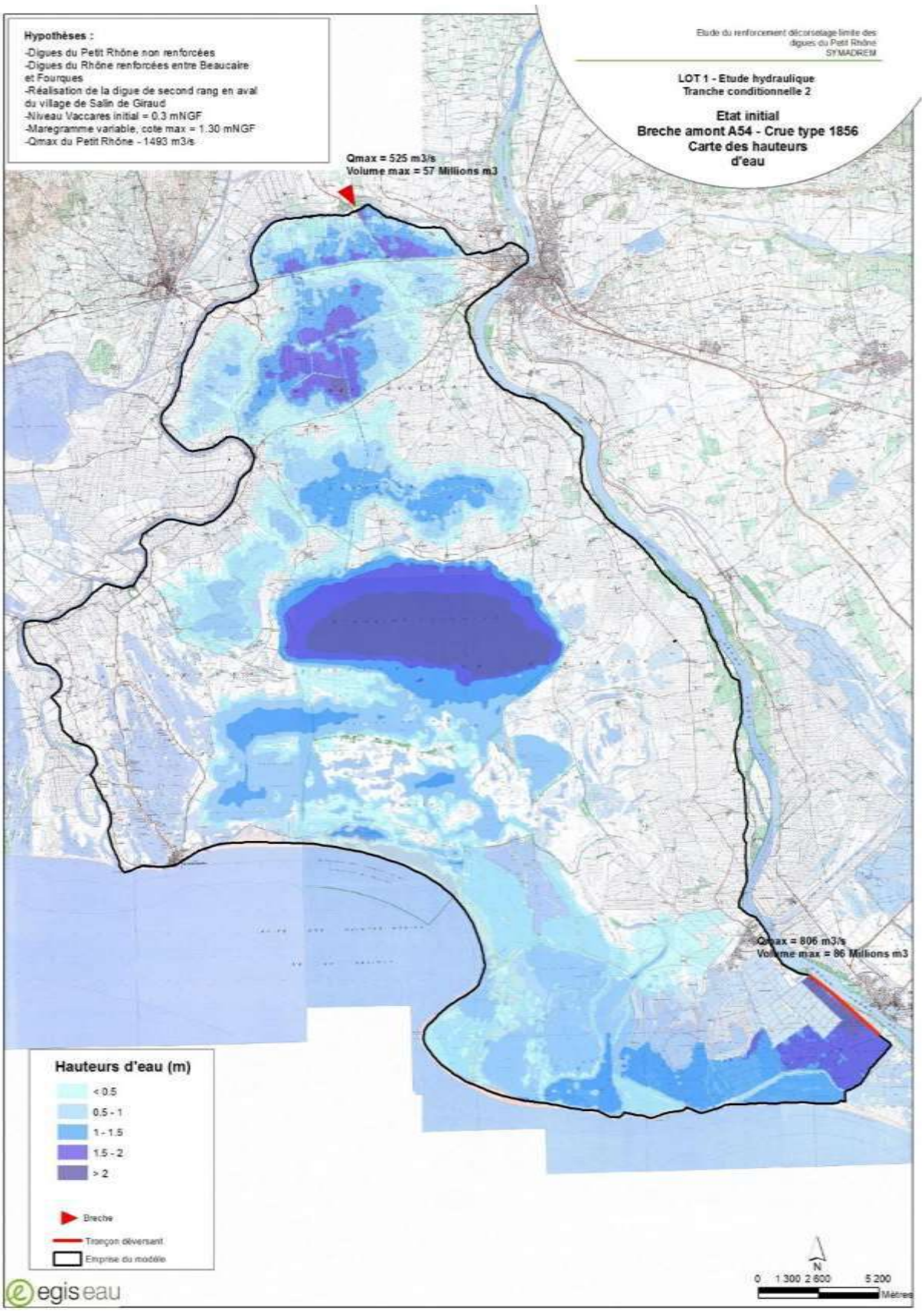


Figure 104. EI 12500 – Brèche Amont de l'A54 – PRG 288,3 - Hauteur d'eau maximum avec bathymétrie Vaccarès (m)

6.4.4 Crue 14160 – Etat actuel/initial – Brèche A54 – PRG 288,4

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située en amont de l'A54 au PRG 288,3.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon est de 1 %.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,001 X 0,001 ≈ 10^{-6}.

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 130 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 7 mètres,
- Temps d'ouverture : 2 heures pour la digue et 2 heures pour la fosse,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 5,5 m NGF,
- Cote de la crue : 8,15 m NGF.

Le débit de pointe modélisé est estimé à environ 600 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 200 heures et le volume de déversement à environ 100 millions de m^3.

Ce scénario d'inondation a été modélisé en supposant que les digues de Salin de Giraud (tracé initial de 2012) étaient renforcées. Des déversements sans brèche sur la digue résistante à la surverse ont été pris en compte. Le volume de déversement en provenance de cette digue résistante à la surverse est :

- Volume surverse Salin de Giraud : ≅ 550 millions m^3 (débit pointe ≅ 1000 m^3/s),

Ces apports sont en deçà des incertitudes liées aux hypothèses de modélisation. On notera que les eaux en provenance du Petit Rhône et de la brèche se mélangent mais que celles en provenance de Salin de Giraud et de la brèche ne se mélangent pas.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

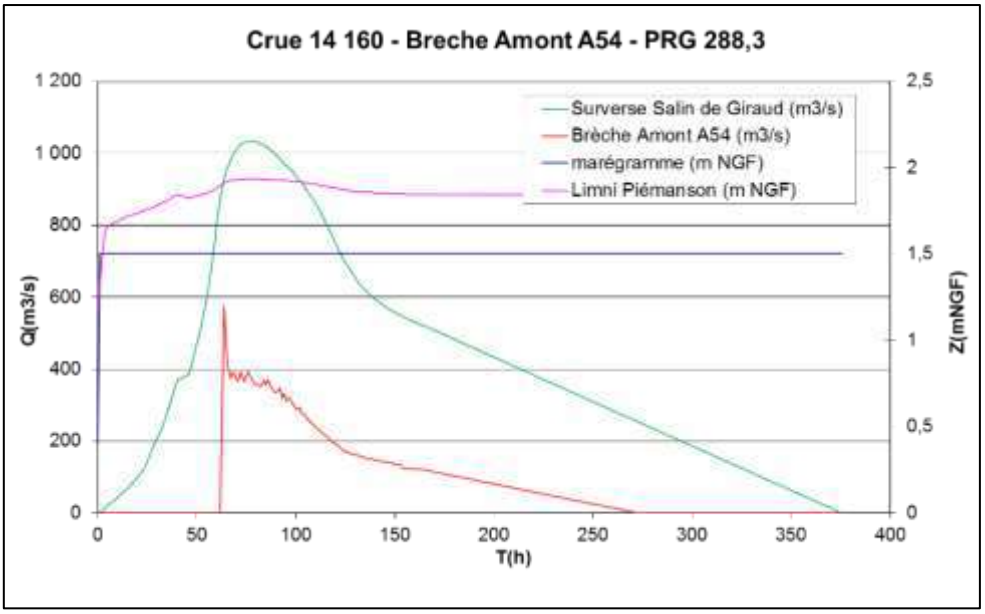


Figure 105. EI 14160 – Brèche Amont de l'A54 – PRG 288,3 – Hydrogramme de brèche

Les deux cartes ci-après illustrent respectivement les vitesses d'écoulement et les hauteurs d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

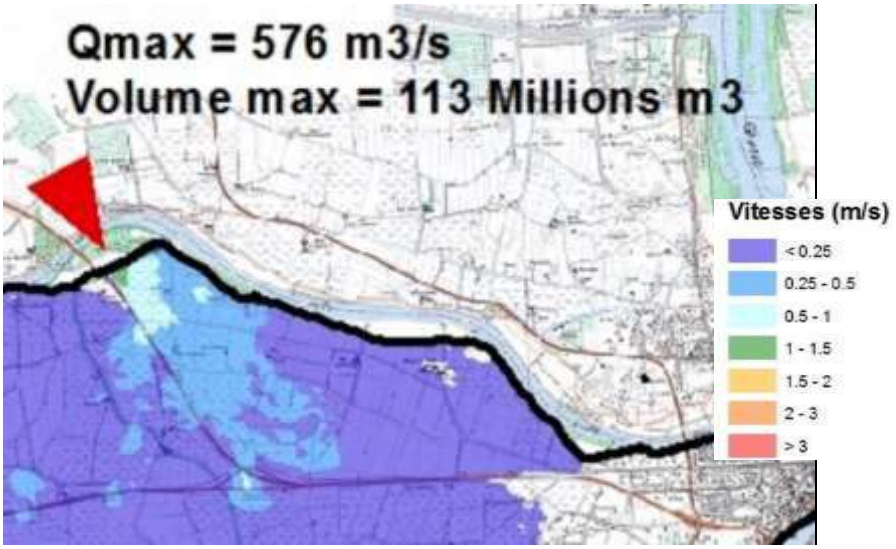


Figure 106. EI 14160 – Brèche Amont de l'A54 – PRG 288,3 – Vitesse maximum (m/s)

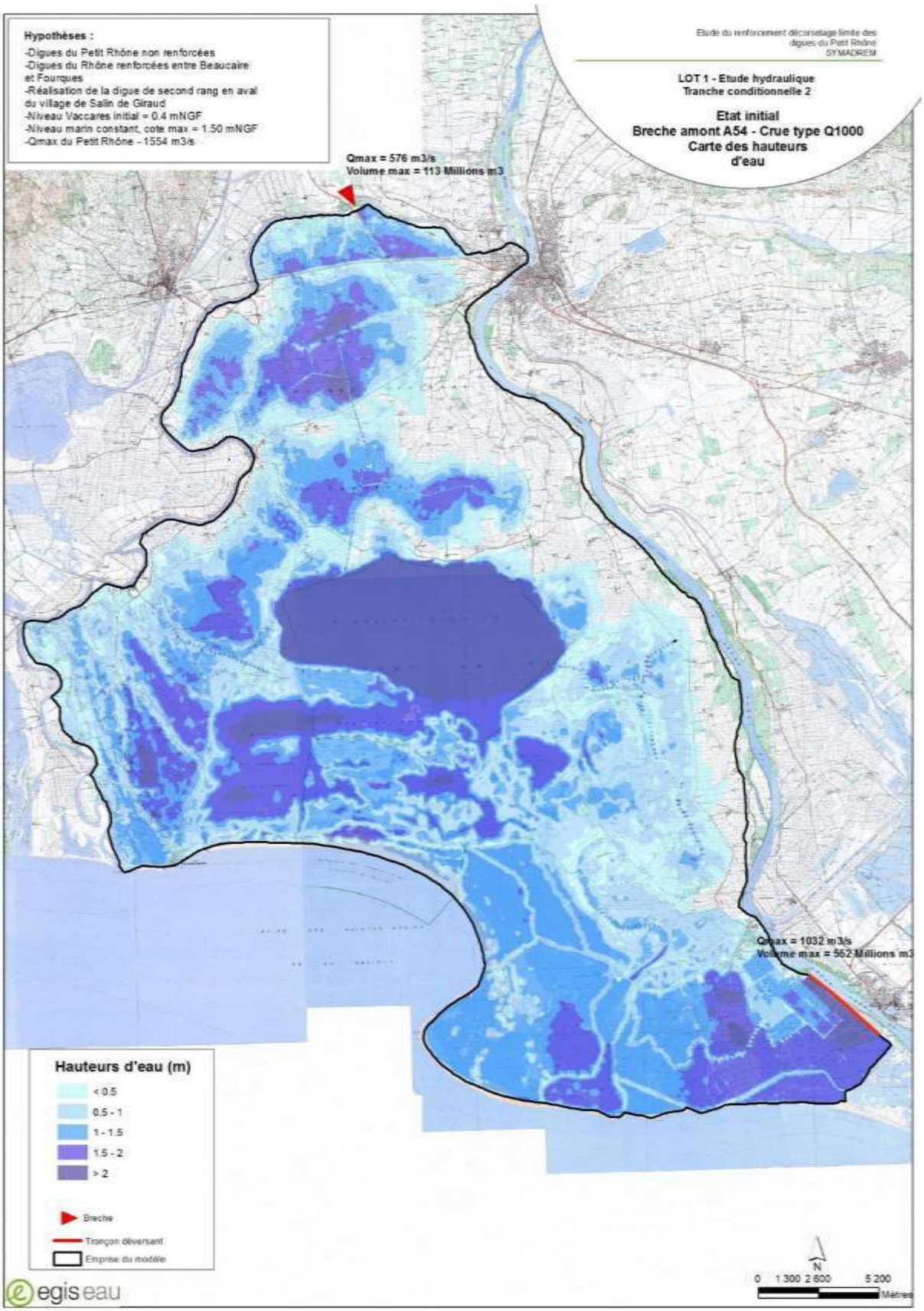


Figure 107. EI 14160 – Brèche Amont de l'A54 – PRG 288,3 - Hauteur d'eau maximum avec bathymétrie Vaccarès (m)

6.5 BRECHE DE SALIERS

2 crues ont été modélisées pour cette brèche : 10500 et 11500.

6.5.1 Crue 10500 – Etat actuel/initial - Brèche Saliers – PRG 295,5

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située au droit du hameau de Saliers au PRG 295,5 pour une crue, dont le débit de pointe atteindrait 10 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon et dont l'hydrogramme aurait une forme équivalente à la crue de janvier 1994 (débit annoncé à l'époque de 11 000 m^3/s et qui est estimé aujourd'hui à 10 250 m^3/s).

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,016, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 65 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,65 X 0,016 ≅ 1,0 %.

Pour mémoire, la probabilité maximale annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 2.10^{-2} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 100 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 5 mètres,
- Temps d'ouverture : 5 heures pour la digue et 5 heures pour la fosse,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 2,5 m NGF,
- Cote de la crue : 6, 5 m NGF.

Le débit de pointe modélisé est estimé à 1 000 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 45 heures et le volume de déversement à environ 68 millions de m^3.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

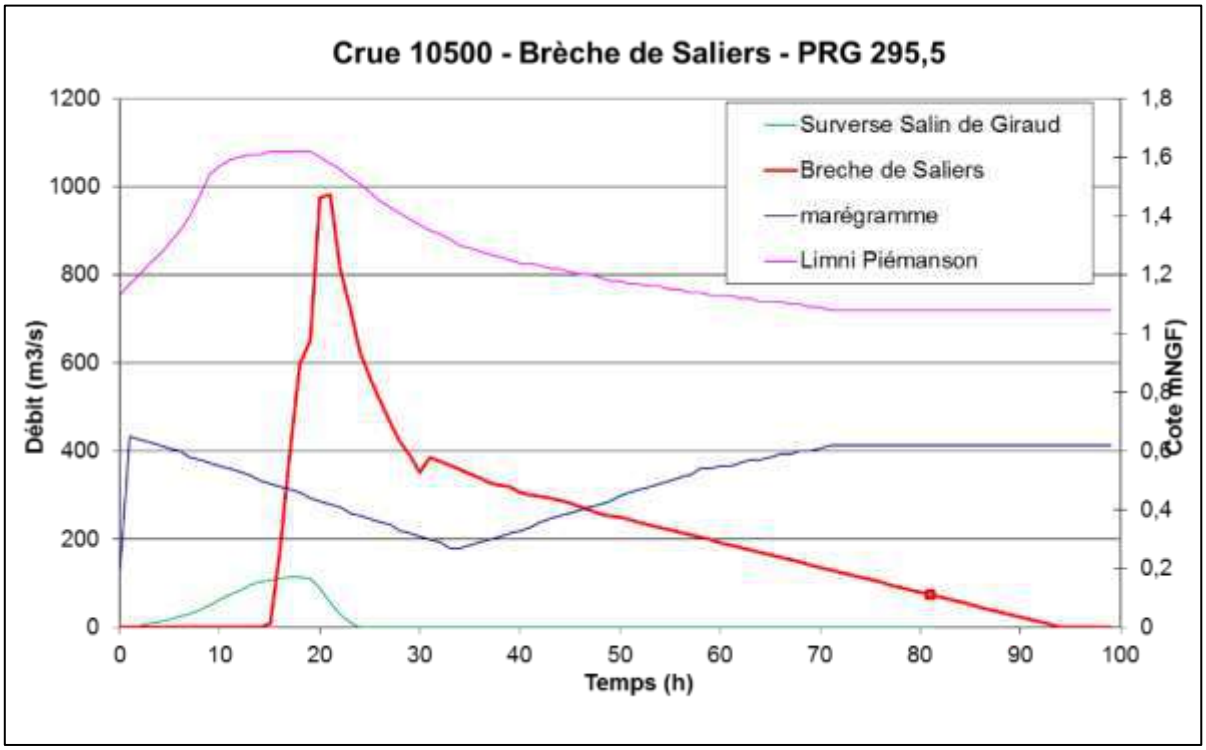


Figure 108. EI 10500 – Brèche de Saliers – PRG 295,5 - Hydrogramme de brèche

Les figures ci-après illustrent respectivement la cartographie des vitesses d'écoulement et le profil d'écoulement en aval de la brèche.

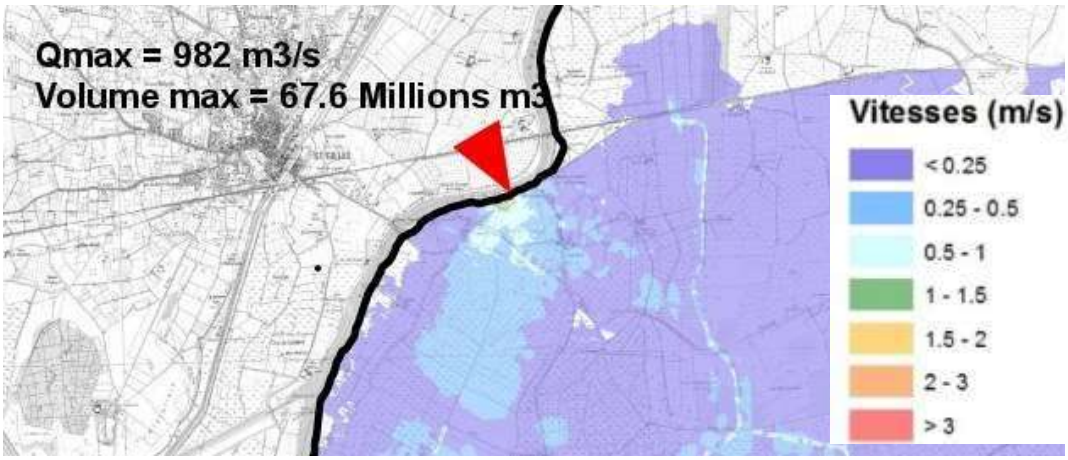
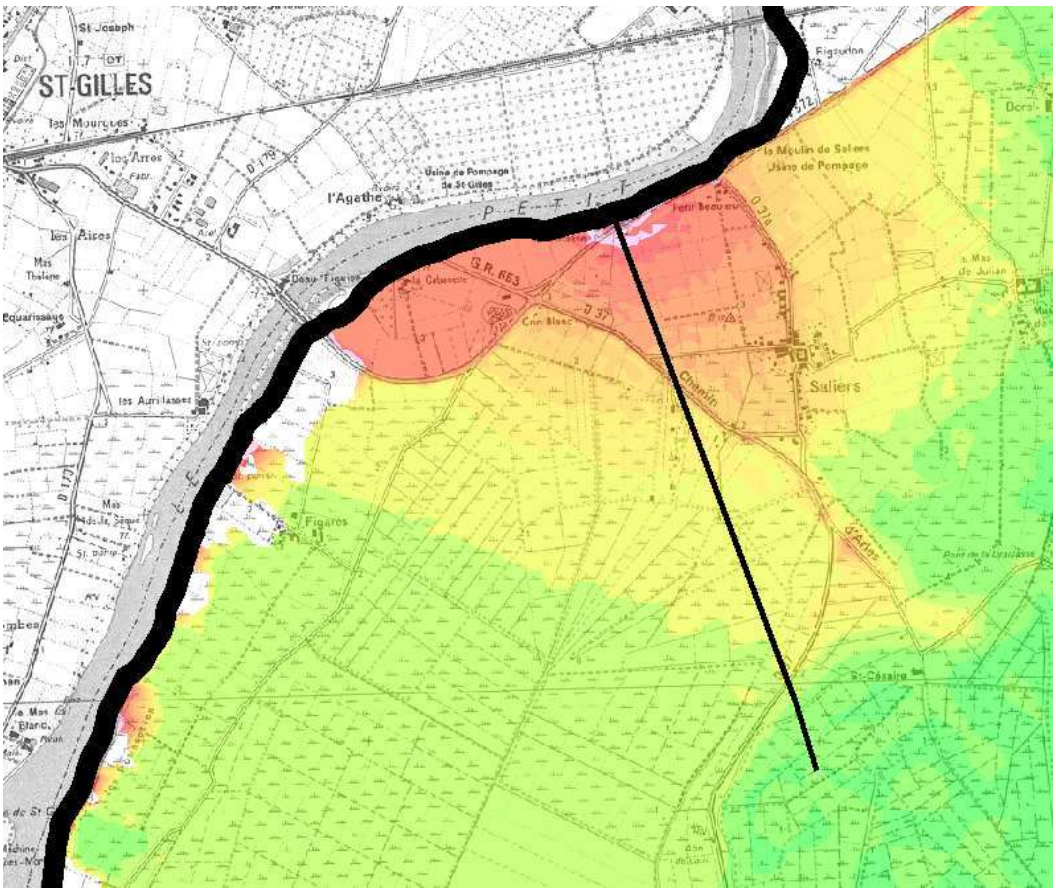


Figure 109. EI 10500 – Brèche de Saliers – PRG 295,5 - Vitesse maximum (m/s)

La vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 200 et 1200 m de la digue.

Sur le profil d'écoulement en aval de la brèche, on note des hauteurs d'eau supérieures à 3 mètres sur 200 mètres. Les hauteurs d'eau demeurent supérieures à 2 mètres sur 700 mètres. Elles vont progressivement décroitre.



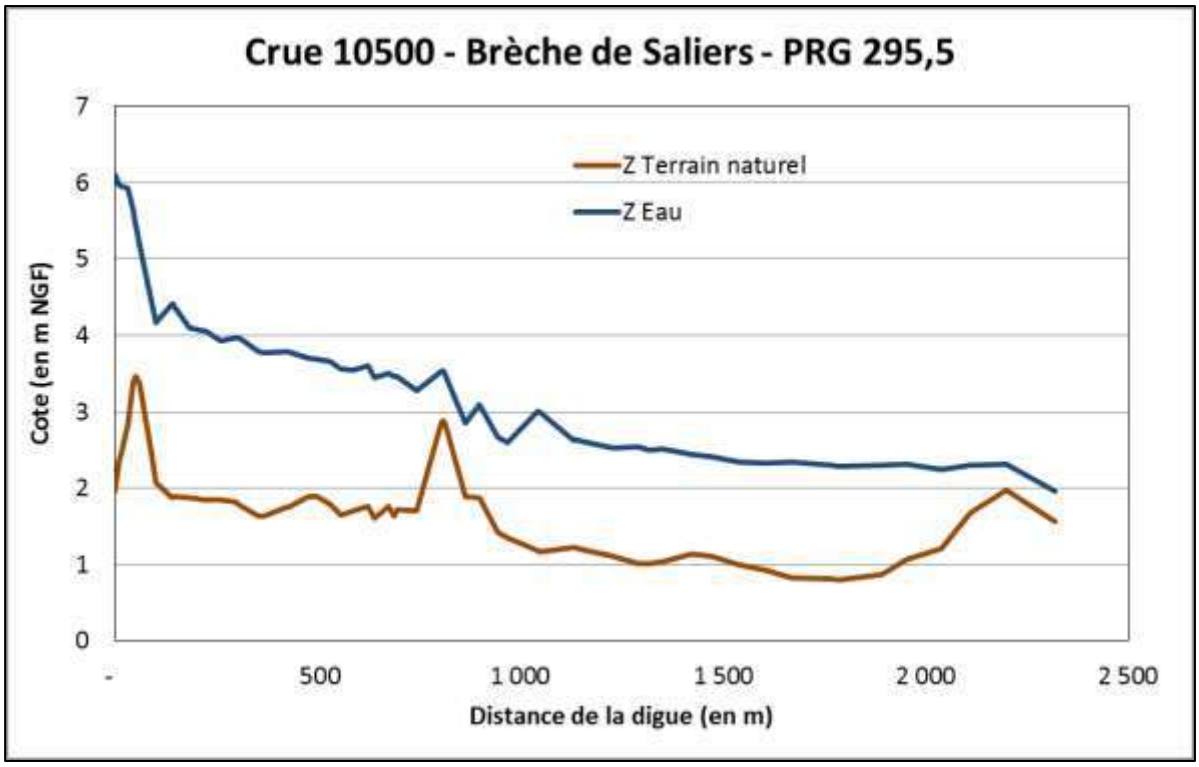


Figure 110. EI 10500 – Brèche de Saliers – PRG 295,5 – Profil d'écoulement en aval de la brèche

La figure ci-après illustre les hauteurs d'eau en fonction du temps. Une heure après le démarrage de la brèche, l'inondation est aux portes de Saliers. Après trois heures, la partie Ouest de Saliers est sous une hauteur d'eau comprise entre 1 et 2 mètres. La partie Est est sous moins de 30 cm d'eau. Après six heures, la partie Est sous une hauteur d'eau comprise entre 0,5 et 1 mètre. L'inondation de Saliers commence à diminuer au bout de douze heures pour se propager dans les marais de Saliers et du Rousty.

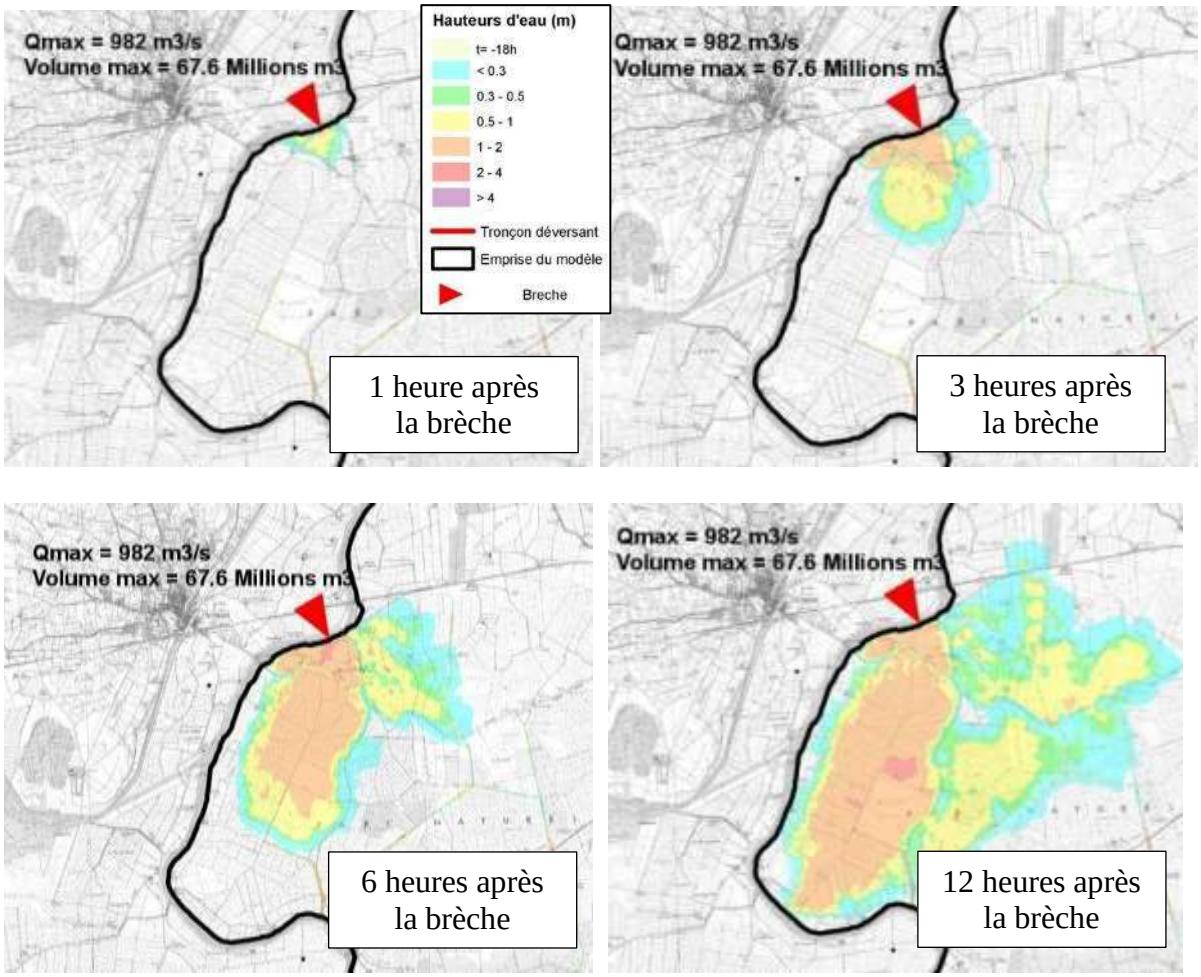


Figure 111. EI 10500 – Brèche de Saliers – PRG 295,5 – Hauteur d'eau en fonction du temps

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

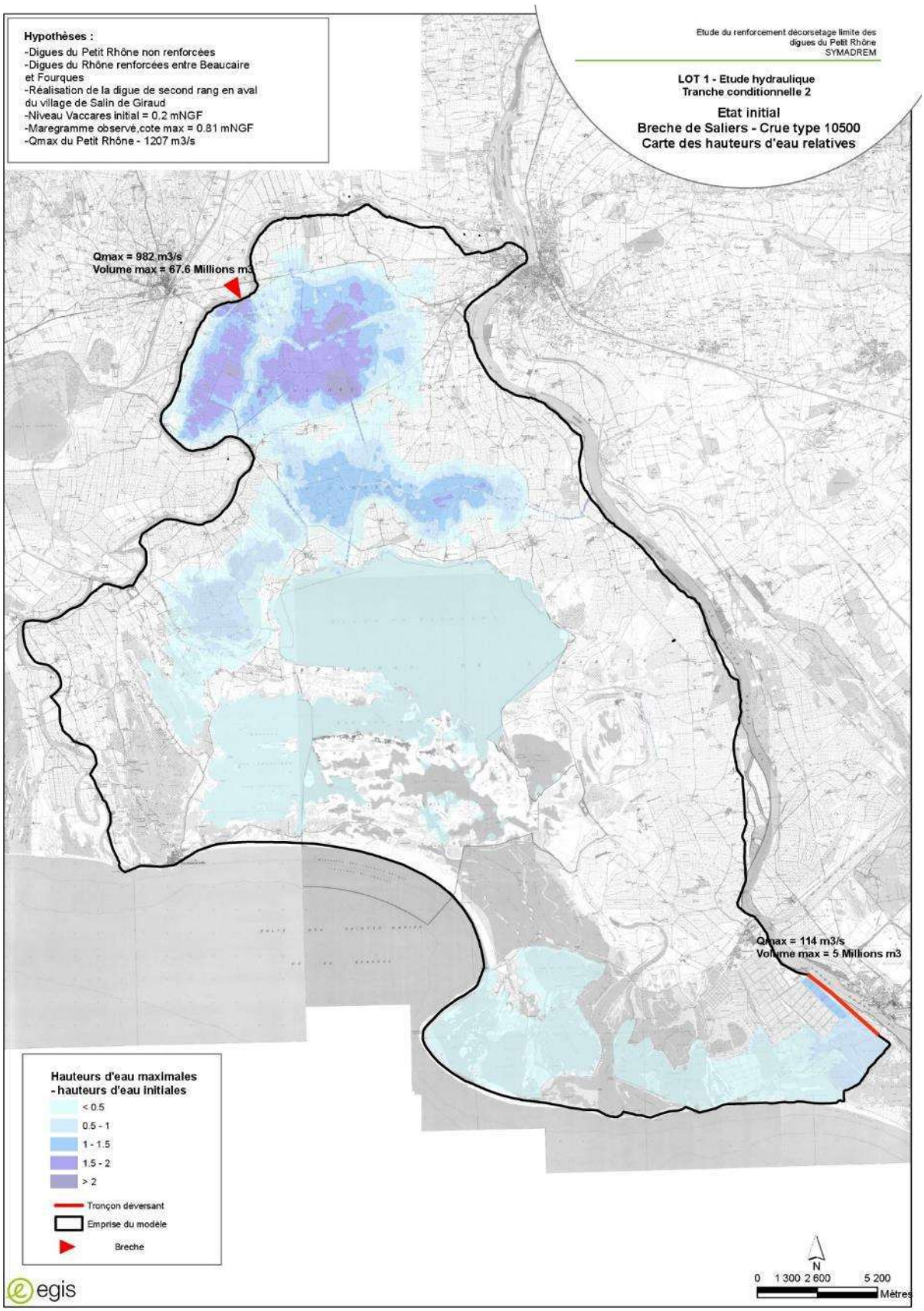


Figure 112. EI 10500 – Brèche de Saliers – PRG 295,5 – Hauteur d'eau maximum (m)

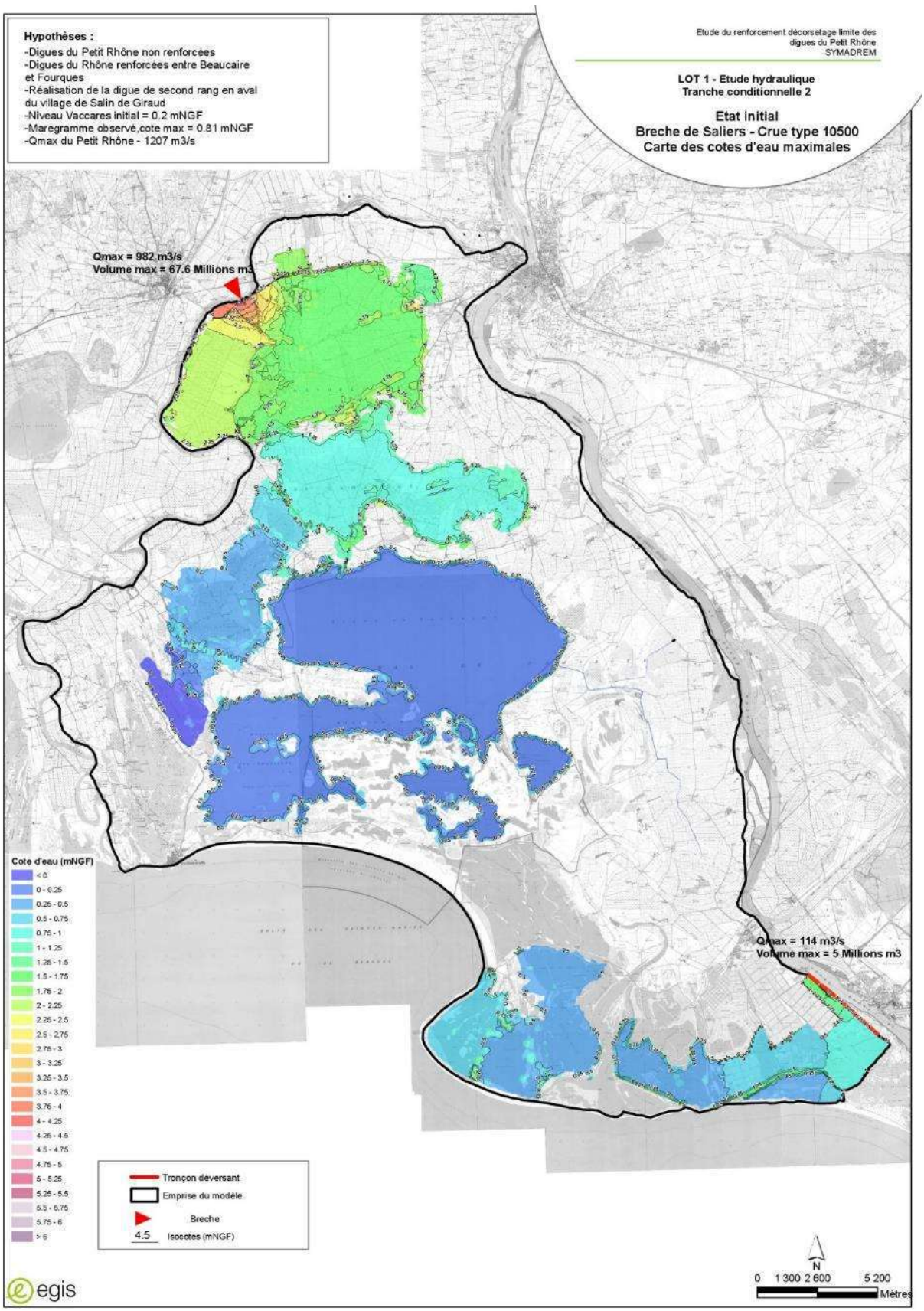


Figure 113. EI 10500 – Brèche de Saliers – PRG 295,5 – Cote d'eau maximum (m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 27. EI 10500 – Brèche de Saliers – PRG 295,5 – Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
10	Gimeaux	1,75	0	0,1	0,6
12	Clos du Mas Neuf	2,25	0	0,1	0,9
13	Marais du Pont de Rousty	2,00	0,1	1,5	2,5
14	Marais de la Grand Mar	1,50	0	0,6	1,4
16	Etang du Vaccarès	0,75	0	0,2	0,6
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	4,00	0,6	1,9	2,7
30	Saliers	3,25	0,7	1,6	2,8
31	Marais de Saliers	2,50	0,7	1,9	2,5
39	Paty trinité	1,00	0	0,4	0,9

6.5.2 Crue 11500 – Etat actuel/initial - Brèche Saliers – PRG 295,5

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située en amont de l'A54 au PRG 288,3 pour une crue équivalente à celle de décembre 2003 (débit de pointe de 11 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,008, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 85 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,85 X 0,008 ≅ 0,7 %.

Pour mémoire, la probabilité maximale annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 2.10^{-2} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 130 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 5 mètres,
- Temps d'ouverture : 2 heures pour la digue et 2 heures pour la fosse,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 2,5 m NGF,
- Cote de la crue : 6,8 m NGF.

Le débit de pointe modélisé est estimé à 1 400 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 45 heures et le volume de déversement à environ 75 millions de m^3.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

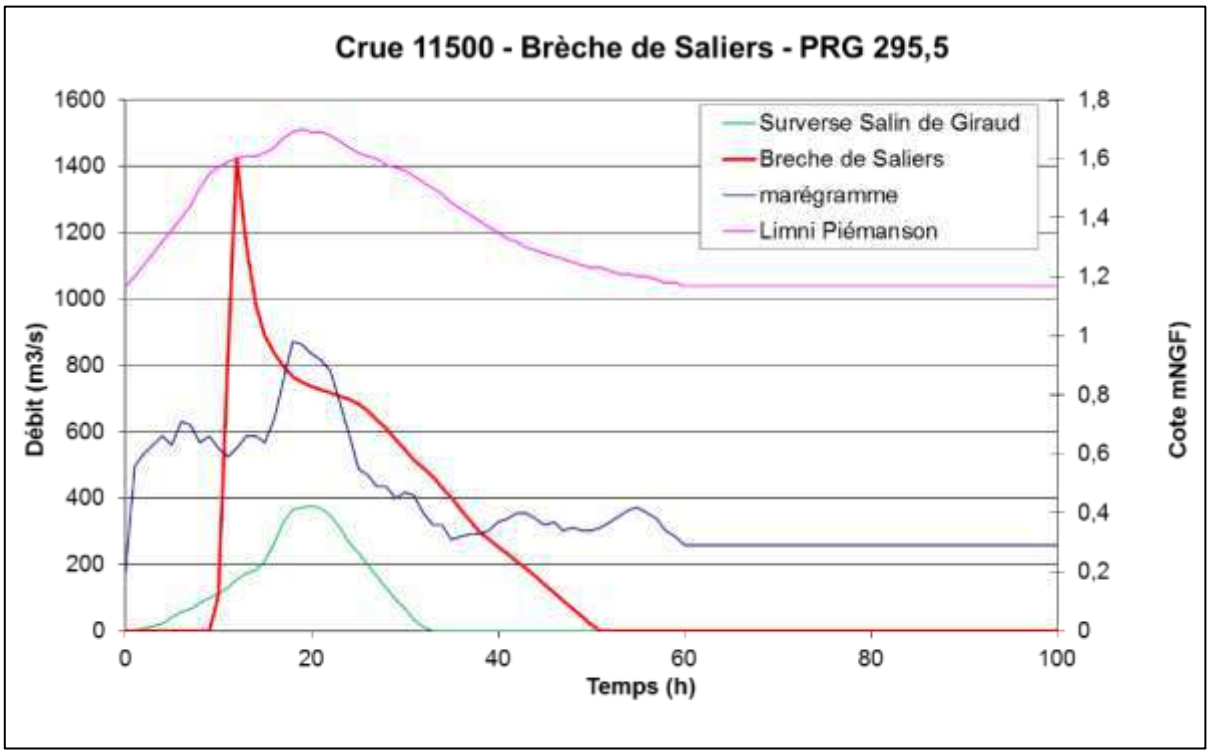


Figure 114. EI 11500 – Brèche de Saliers – PRG 295,5 - Hydrogramme de brèche

Les figures ci-après illustrent respectivement la cartographie des vitesses d'écoulement et le profil d'écoulement en aval de la brèche.

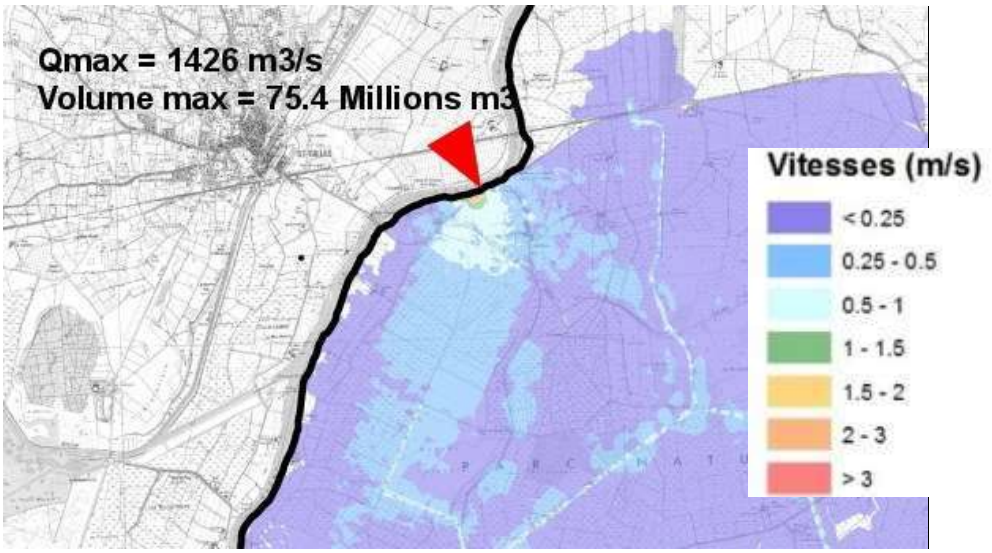


Figure 115. EI 11500 – Brèche de Saliers – PRG 295,5 - Vitesse maximum (m/s)

La vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 200 et 1200 m de la digue.

Le profil d'écoulement en aval de la brèche a un comportement similaire à celui du scénario EI 10500 avec des hauteurs d'eau supérieures.

La figure ci-après illustre les hauteurs d'eau en fonction du temps. La dynamique de propagation est plus intense que pour le scénario EI 10500. Une heure après le démarrage de la brèche, l'inondation est aux portes de Saliers. Après trois heures, la partie Ouest de Saliers est sous une hauteur d'eau comprise entre 1 et 2 mètres. La partie Est est sous une hauteur d'eau comprise entre 0,5 et 1 mètre. Après six heures, l'inondation de Saliers commence à diminuer pour se propager dans les marais de Saliers et du Rousty.

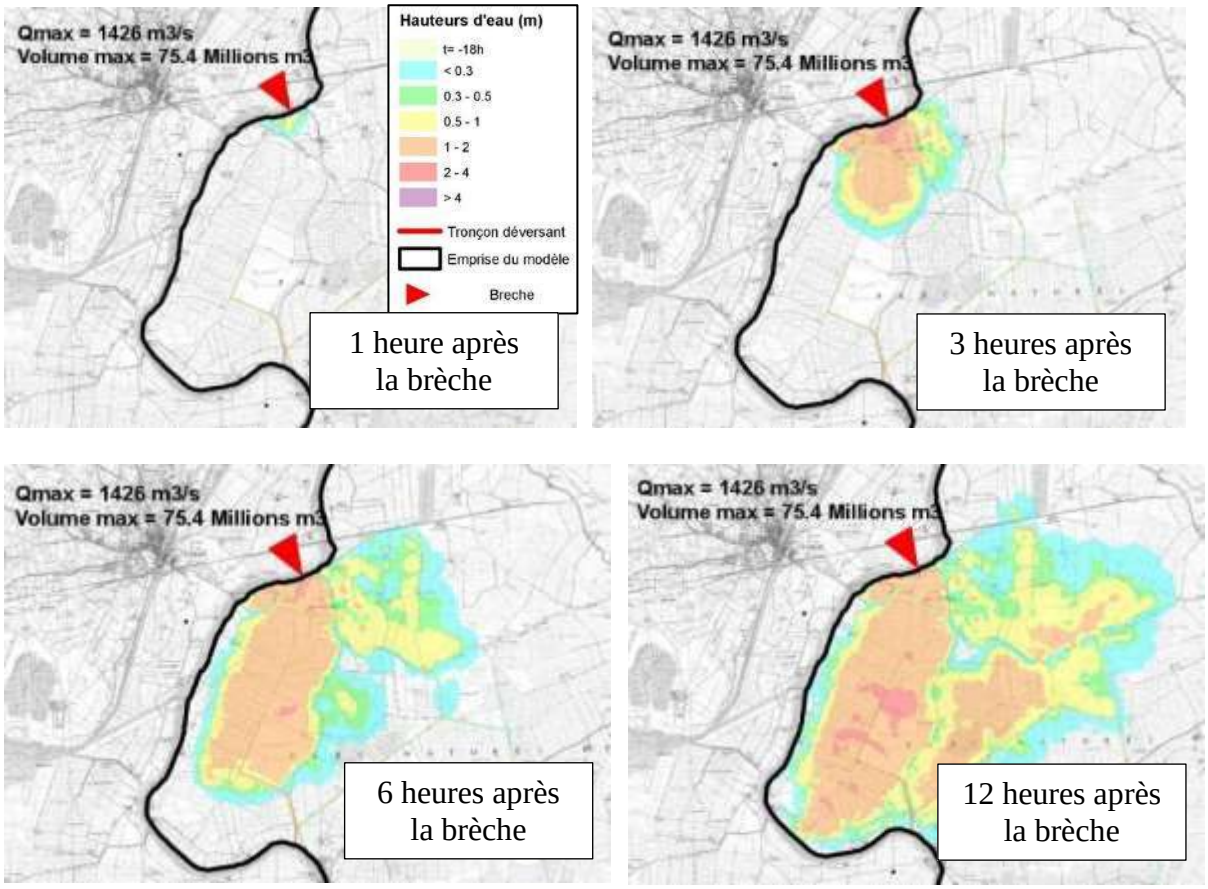


Figure 116. EI 11500 – Brèche de Saliers – PRG 295,5 – Hauteur d'eau en fonction du temps

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

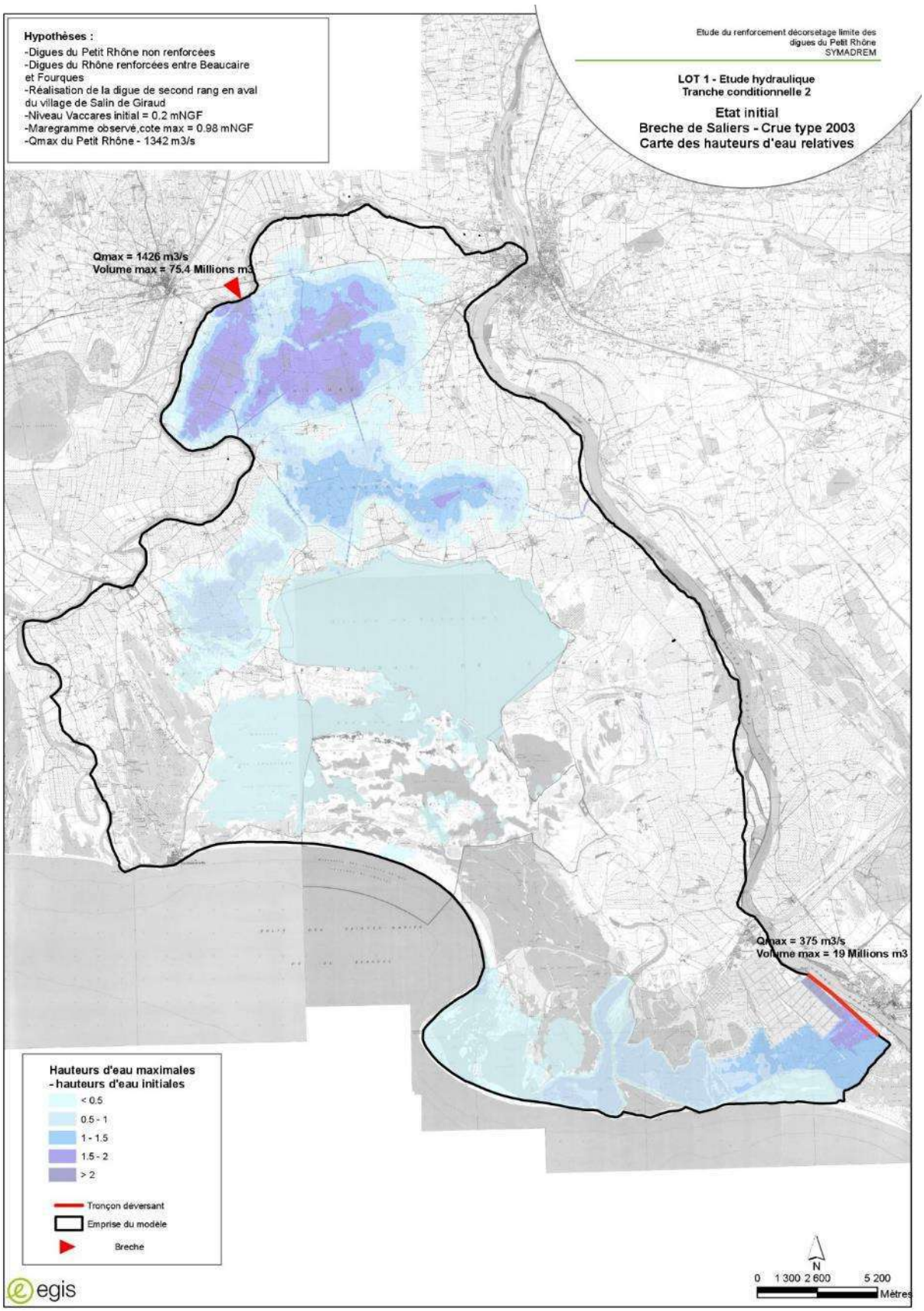


Figure 117. EI 11500 – Brèche de Saliers – PRG 295,5 – Hauteur d'eau maximum (m)

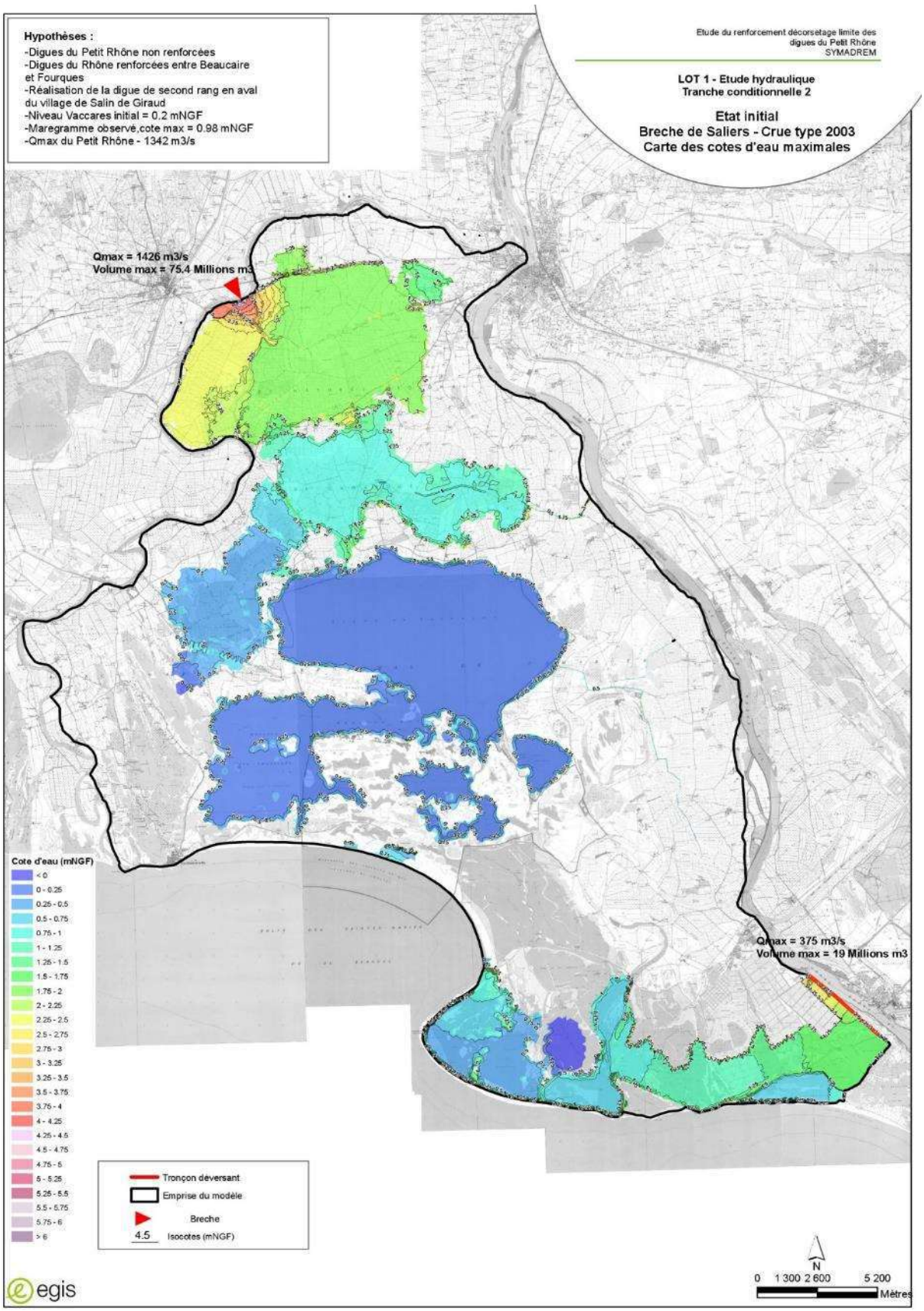


Figure 118. EI 11500 – Brèche de Saliers – PRG 295,5 – Cote d'eau maximum (m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 28. EI 11500 – Brèche de Saliers – PRG 295,5 – Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
10	Gimeaux	1,75	0	0,1	0,6
12	Clos du Mas Neuf	2,50	0	0,3	1,1
13	Marais du Pont de Rousty	2,50	0,6	2,0	3,0
14	Marais de la Grand Mar	1,75	0	0,8	1,6
16	Etang du Vaccarès	1,00	0	0,5	0,8
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	4,50	1,1	2,4	3,2
30	Saliers	3,50	1,0	1,9	3,0
31	Marais de Saliers	2,75	1,0	2,2	2,8
39	Paty trinité	1,25	0	0,7	1,2

6.6 BRECHE DE FIGARES

Ce scénario de brèche a été modélisé avec les crues 10500, 11500, 12500 et 14160.

6.6.1 Crue 10500 - Etat actuel/initial – Brèche Figarès – PRG 298,0

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située au droit du mas de Figarès au PRG 298 pour une crue, dont le débit de pointe atteindrait 10 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon et dont l'hydrogramme aurait une forme équivalente à la crue de janvier 1994 (débit annoncé à l'époque de 11 000 m^3/s et qui serait estimé aujourd'hui à 10 250 m^3/s).

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,016, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 60 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,6 X 0,016 ≅ 1 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 6.10^{-2} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 100 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 5 mètres,
- Temps d'ouverture : 5 heures pour la digue et 5 heures pour la fosse,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 2,8 m NGF,
- Cote de la crue : 6,2 m NGF.

Le débit de pointe modélisé est estimé à 900 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements : environ 120 heures et le volume de déversement à environ 60 millions de m^3.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

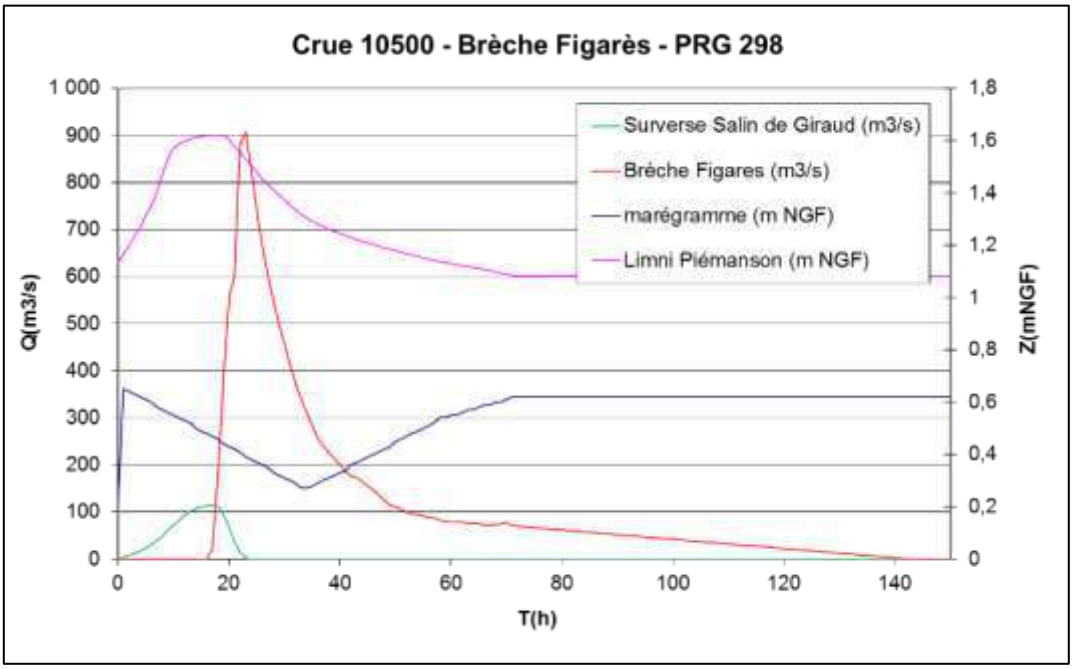


Figure 119. EI 10500 – Brèche Figarès – PRG 298,0 - Hydrogramme de brèche

Les figures ci-après illustrent respectivement la cartographie des vitesses d'écoulement et le profil d'écoulement en aval de la brèche.

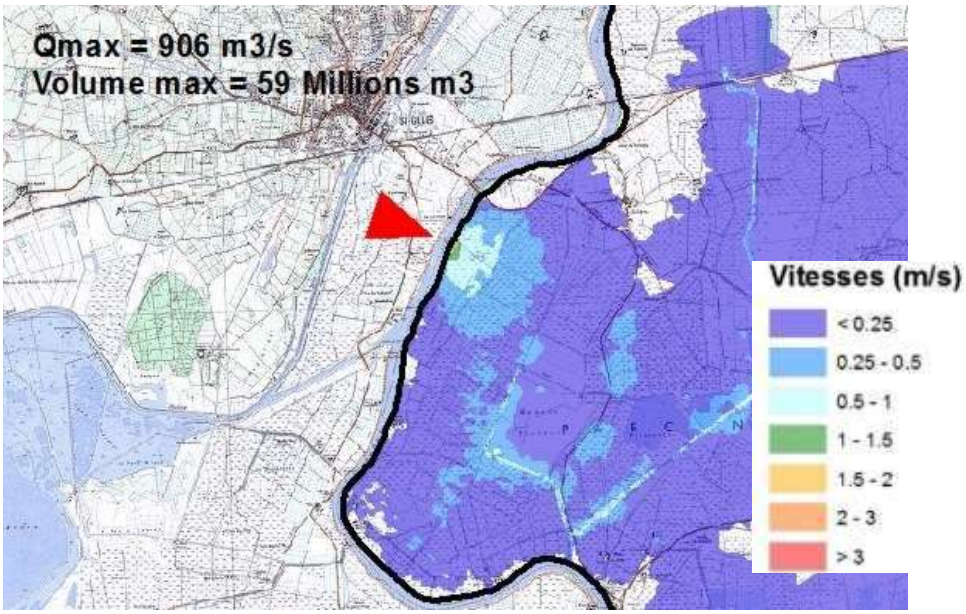
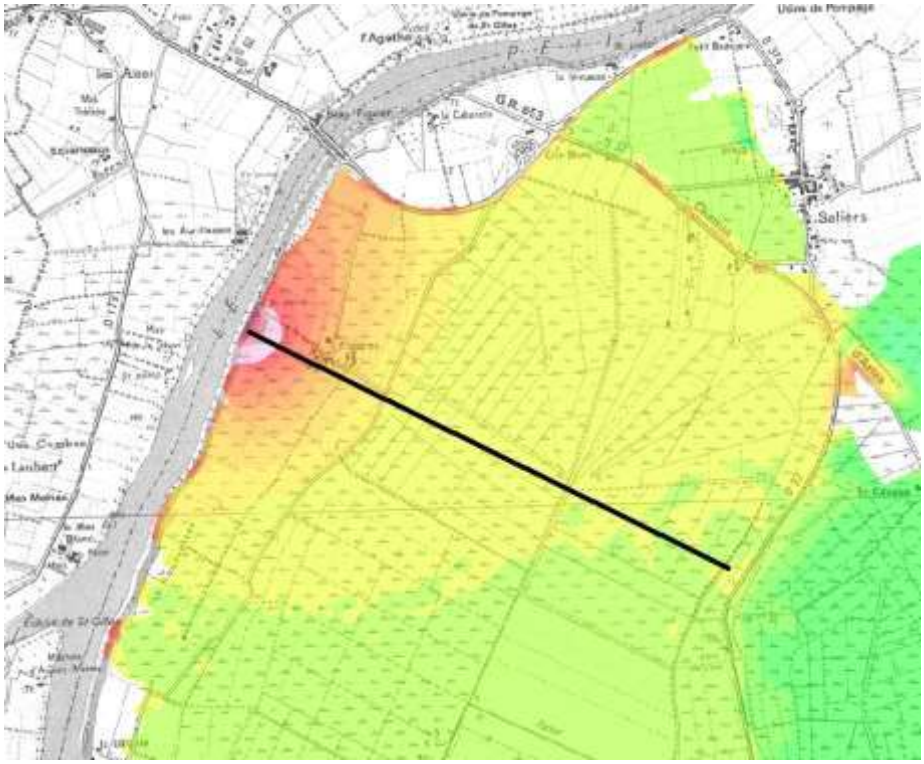


Figure 120. EI 10500 – Brèche Figarès – PRG 298,0 - Vitesse maximum (m/s)

La vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 200 et 700 m de la digue.

Le profil d'écoulement en aval de la brèche suit la topographie du site. Le Rhône plonge dans la « bassine » que constitue les marais de Saliers. On note des hauteurs d'eau supérieures à 2,5 mètres sur 200 mètres. Les hauteurs d'eau sont 2 mètres dans les marais.



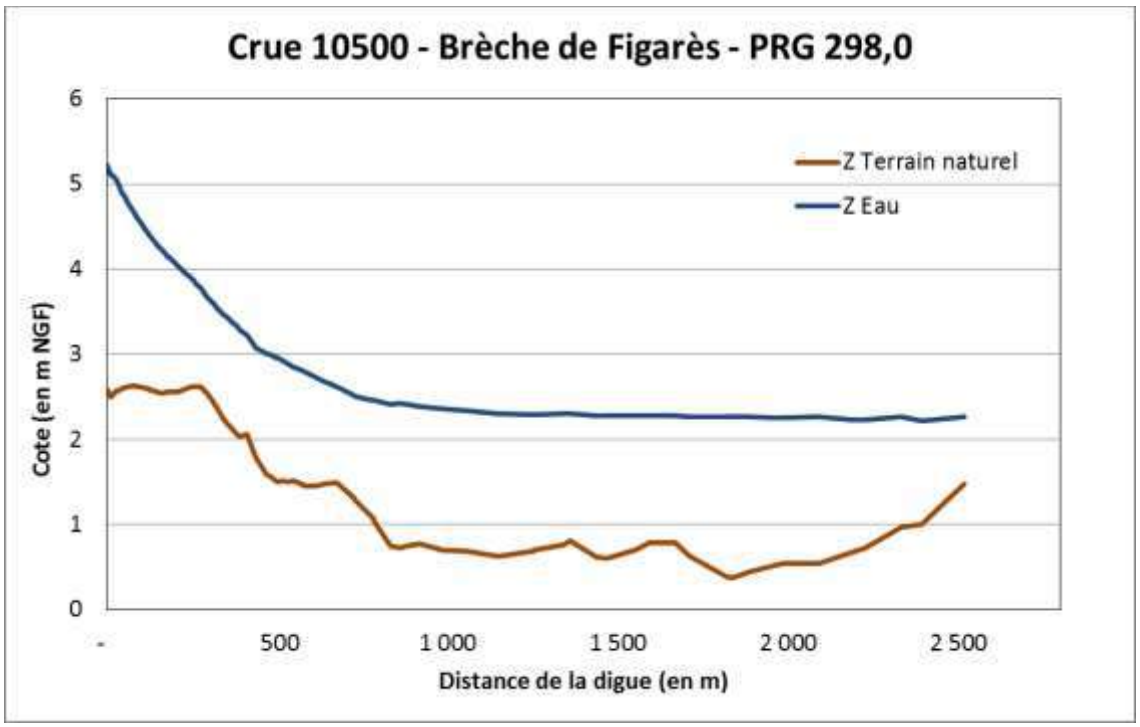


Figure 121. EI 10500 – Brèche de Figarès – PRG 298,0 – Profil d'écoulement en aval de la brèche

La figure ci-après illustre les hauteurs d'eau en fonction du temps. Après une heure, les niveaux d'eau sont inférieurs à 30 cm. Après trois heures, on note des hauteurs d'eau comprise entre 0 et 1 mètre dans les marais et comprise entre 1 et 2 mètres juste en aval de la brèche. La route longeant les marais est inondée après six heures. Les marais sont à leur niveau maximum au bout de douze heures. La propagation se poursuit sur les marais de rousty.

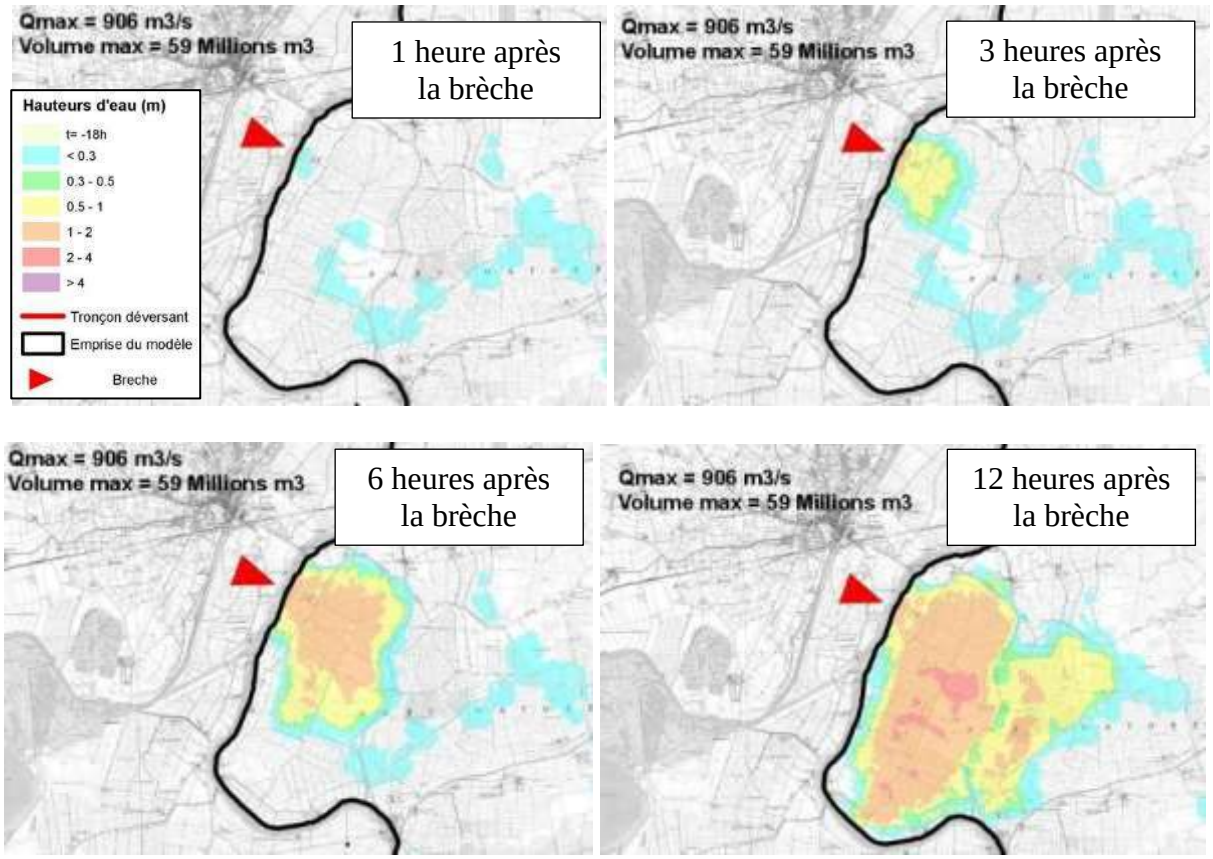


Figure 122. EI 10500 – Brèche Figarès – PRG 298,0 - Hauteur d'eau en fonction du temps

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

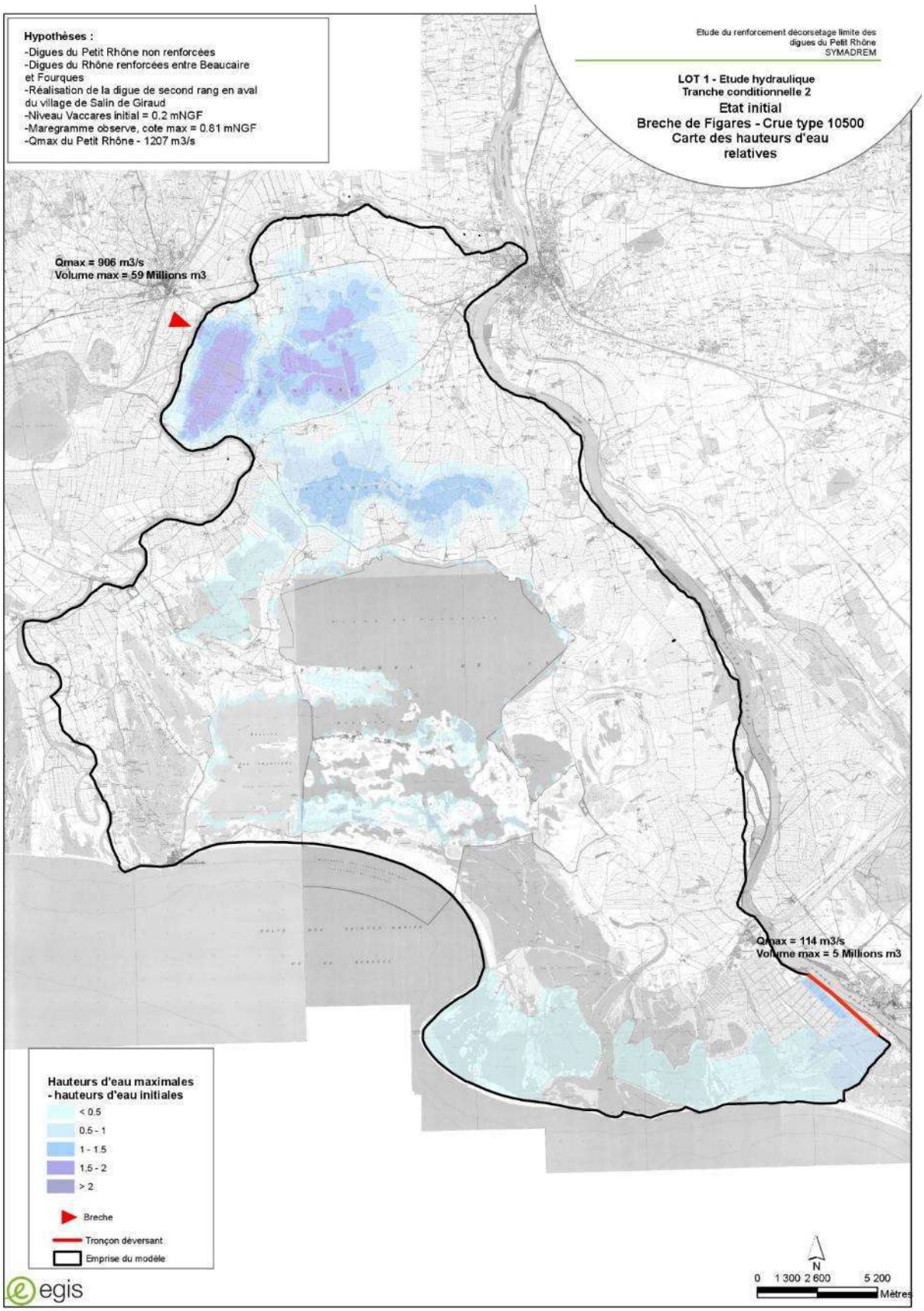


Figure 123. EI 10500 – Brèche Figarès – PRG 298,0 - Hauteur d'eau maximale (en m)

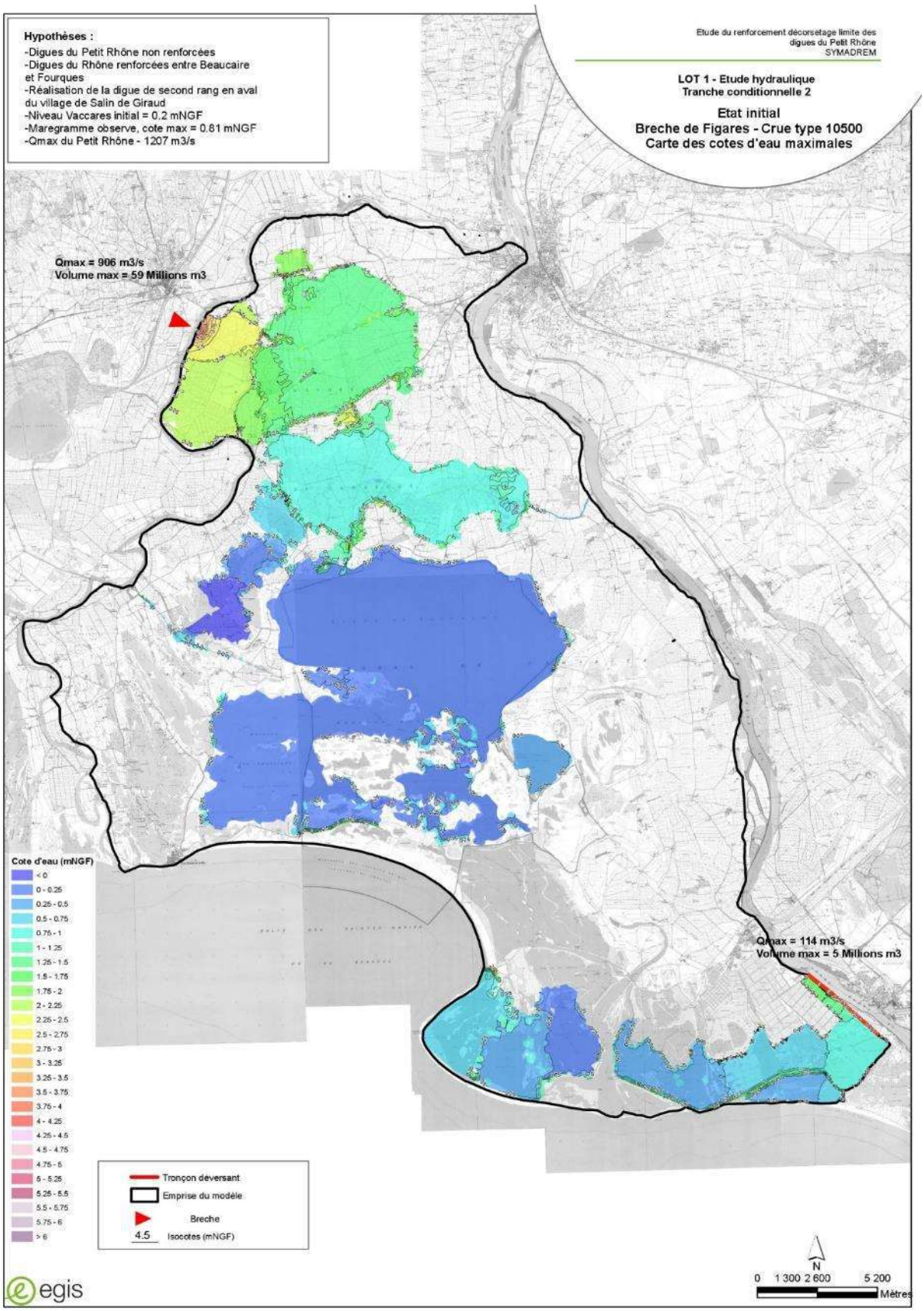


Figure 124. EI 10500 – Brèche Figarès – PRG 298,0 - Cote d'eau maximale (m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 30. EI 10500 – Brèche Figarès – PRG 298,0 – Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
12	Clos du Mas Neuf	2,25	0	0,1	0,9
13	Marais du Pont de Rousty	1,75	0	1,2	2,2
14	Marais de la Grand Mar	1,25	0	0,3	1,1
16	Etang du Vaccarès	1,00	0	0,5	0,8
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	4,50	1,1	2,4	3,2
30	Saliers	2,25	0	0,6	1,8
31	Marais de Saliers	2,50	0,7	1,9	2,5
39	Paty trinité	1,25	0	0,7	1,2

6.6.2 Crue 11500 - Etat actuel/initial – Brèche Figarès – PRG 298,0

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située à Figarès au PRG 298 pour une crue équivalente à celle de décembre 2003 (débit de pointe de 11 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,008, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 85 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,85 X 0,008 = 0,7 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 6.10^{-2} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 130 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 5 mètres,
- Temps d'ouverture : 2 heures pour la digue et 2 heures pour la fosse,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 2,8 m NGF,
- Cote de la crue : 6,4 m NGF.

Le débit de pointe modélisé est estimé à 1 350 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 70 heures et le volume de déversement à environ 115 millions de m^3.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

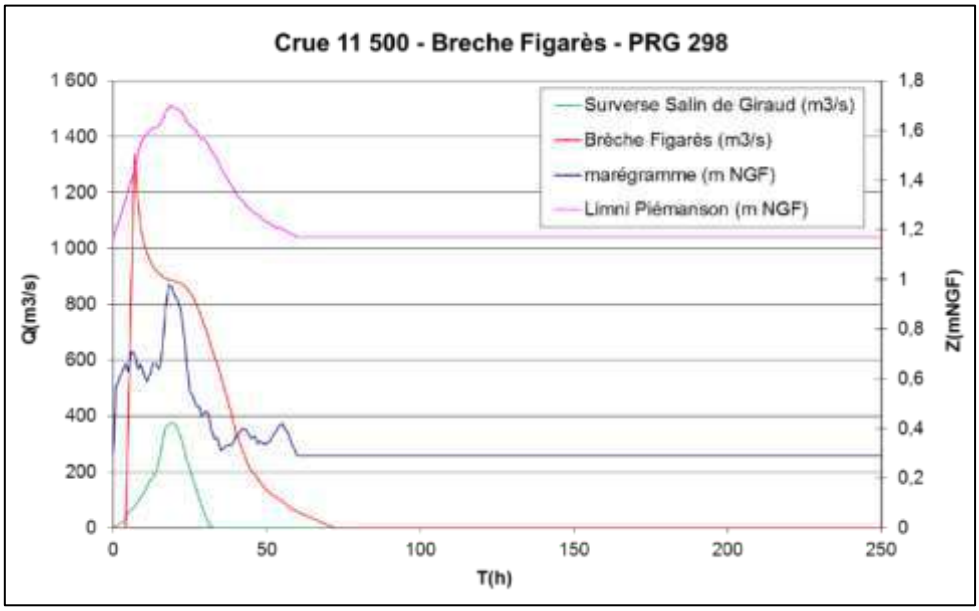


Figure 125. EI 11500 – Brèche Figarès – PRG 298,0 - Hydrogramme de brèche

La carte ci-après illustre la cartographie des vitesses d'écoulement en aval de la brèche.

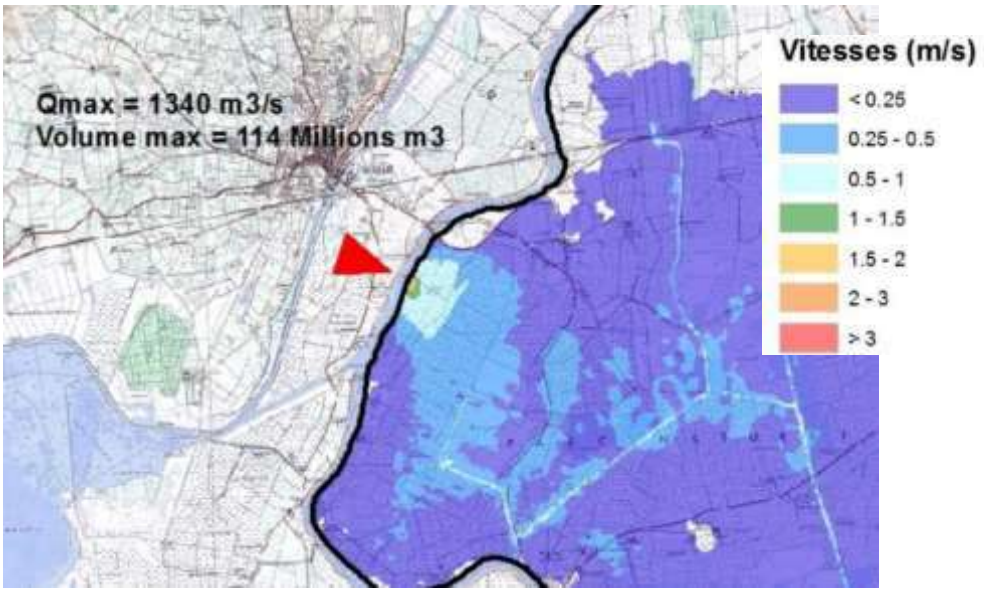


Figure 126. EI 11500 – Brèche Figarès – PRG 298,0 - Vitesse maximum (m/s)

La vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 300 et 800 m de la digue.

Le profil d'écoulement en aval de la brèche non représenté suit un comportement analogue à l'EI 10500 avec des hauteurs d'eau supérieures.

La figure ci-après illustre les hauteurs d'eau en fonction du temps. La dynamique de propagation est sensiblement plus rapide que pour le scénario EI 10500. Après une heure, les hauteurs d'eau en aval de la brèche sont comprises entre 0 et 1 mètre dans les marais et comprise entre 1 et 2 mètres juste en aval de la brèche. La route longeant les marais est

inondée après trois heures. Les marais sont entièrement noyés après six heures et à leur niveau maximum au bout de douze heures. La propagation de l'inondation dans les marais de rousty débute six heures après la brèche.

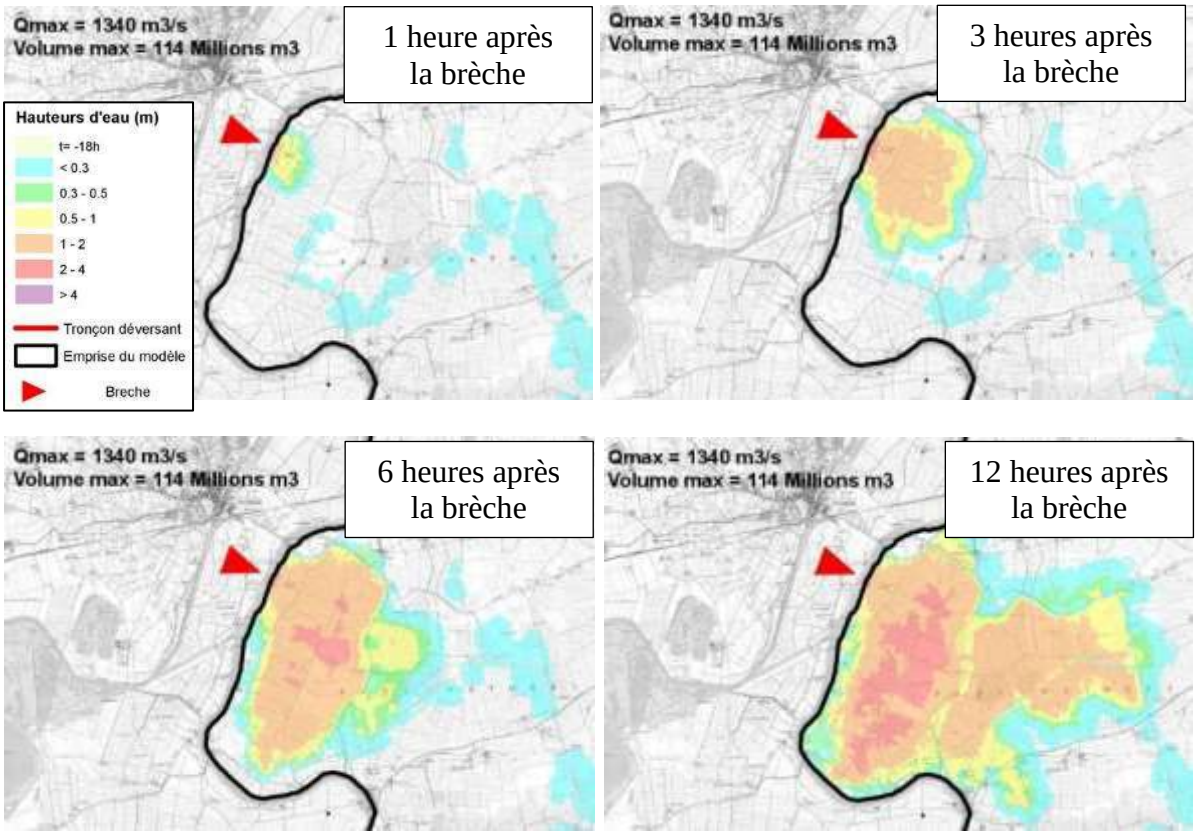


Figure 127. EI 11500– Brèche Figarès – PRG 298,0 - Hauteur d'eau en fonction du temps (m)

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

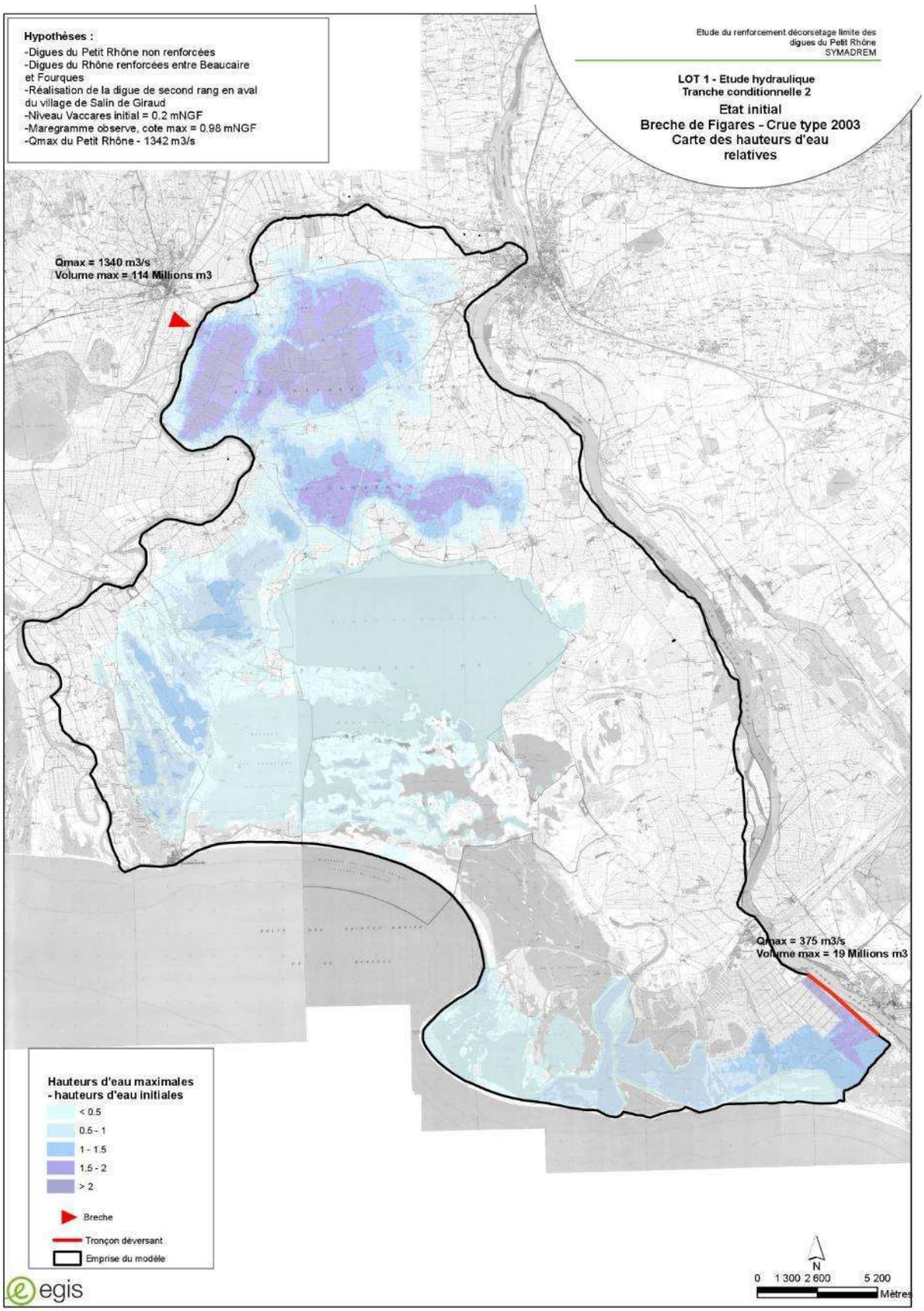


Figure 128. EI 10500 – Brèche Figarès – PRG 298,0 - Hauteur d'eau maximale (en m)

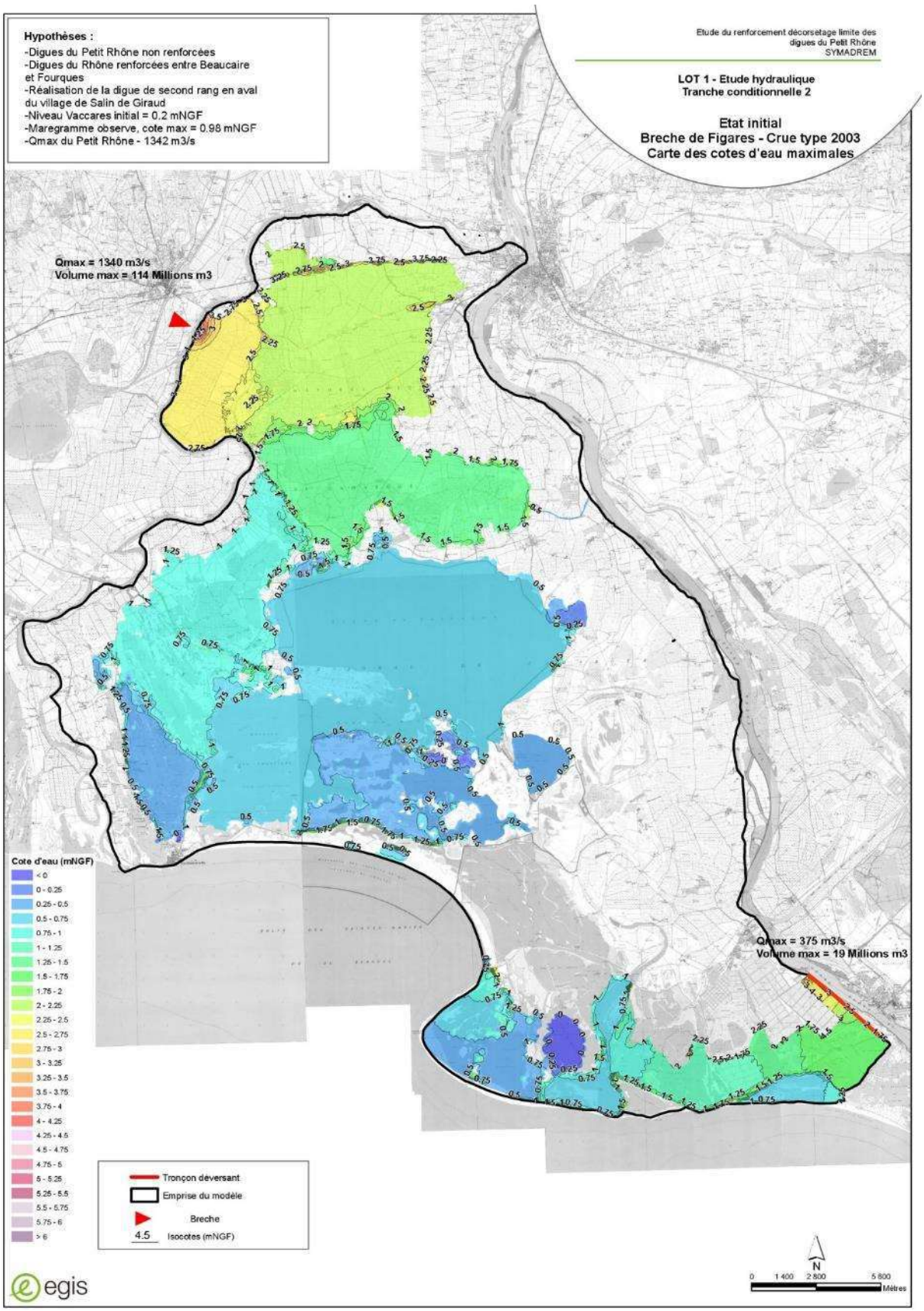


Figure 129. EI 10500 – Brèche Figarès – PRG 298,0 - Cote d'eau maximale (m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 31. EI 11500 – Brèche Figarès – PRG 298,0 – Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
10	Gimeaux	2,25	0	0,6	1,1
12	Clos du Mas Neuf	2,50	0	0,3	1,1
13	Marais du Pont de Rousty	2,25	0,4	1,7	2,7
14	Marais de la Grand Mar	1,75	0	0,8	1,6
16	Etang du Vaccarès	0,75	0	0,2	0,6
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	4,75	1,4	2,6	3,4
30	Saliers	2,50	0,0	0,9	2,0
31	Marais de Saliers	2,75	1,0	2,2	2,8
36	Panperdu Etang des Launes	0,75	0	0,1	0,7
37	Etang de Ginès	0,75	0	0,6	0,7
39	Paty trinité	1,00	0	0,4	0,9

6.6.3 Crue 12500 - Etat actuel/initial – Brèche Figarès – PRG 298,0

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située à Figarès au PRG 298 pour une crue équivalente à celle de mai 1856 (débit de pointe de 12 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée et dans les conditions actuelles d'écoulement.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,006, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.
La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 90 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,9 X 0,006 ≅ 0,5 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 6.10^{-2} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 130 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 5 mètres,
- Temps d'ouverture : 2 heures pour la digue et 2 heures pour la fosse,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 2,8 m NGF,
- Cote de la crue : 6,6 m NGF.

Le débit de pointe modélisé est estimé à 1 350 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 120 heures et le volume de déversement à environ 240 millions de m^3.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

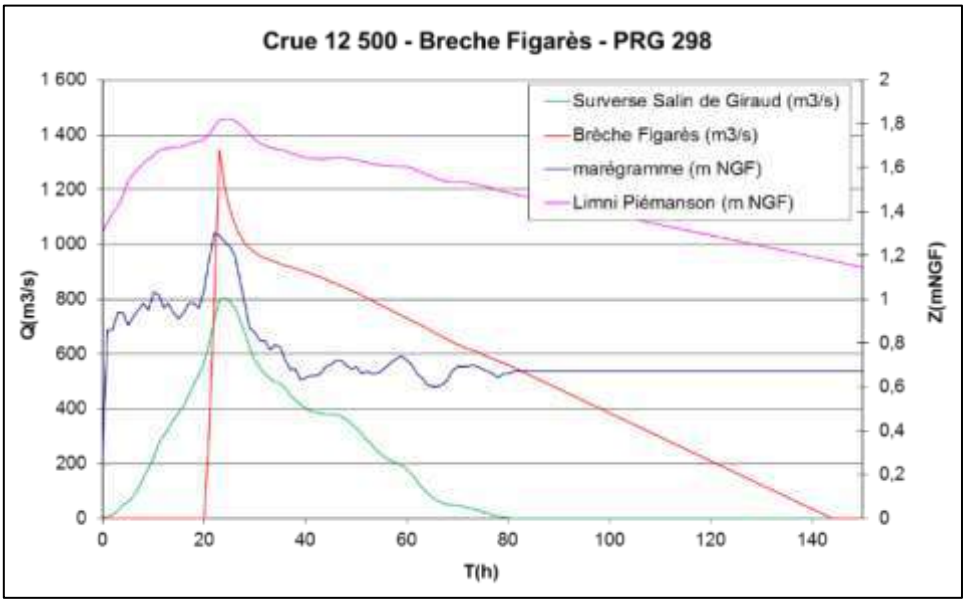


Figure 130. EI 12500 – Brèche Figarès – PRG 298,0 - Hydrogramme de brèche

La carte ci-après illustre la cartographie des vitesses d'écoulement en aval de la brèche.

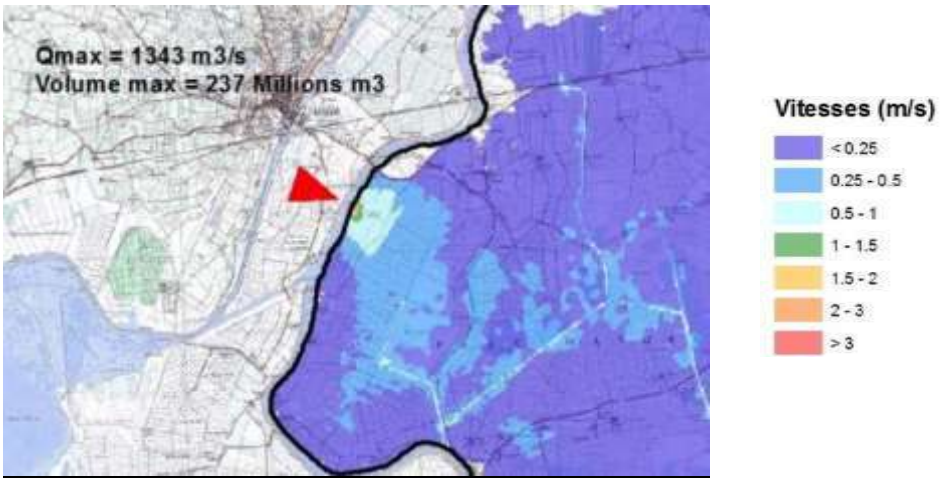


Figure 131. EI 12500 – Brèche Figarès – PRG 298,0 - Vitesse maximum (m/s)

La vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 300 et 800 m de la digue.

Le profil d'écoulement en aval de la brèche non représenté suit un comportement analogue à l'EI 10500 avec des hauteurs d'eau supérieures.

La propagation des crues dans les premières heures après la brèche n'a pas été représentée, mais compte tenu de ce que le débit de déversement est égal à celui de l'EI 11500 et du profil des vitesses. Il peut être considéré comme identique à l'EI 11500.

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

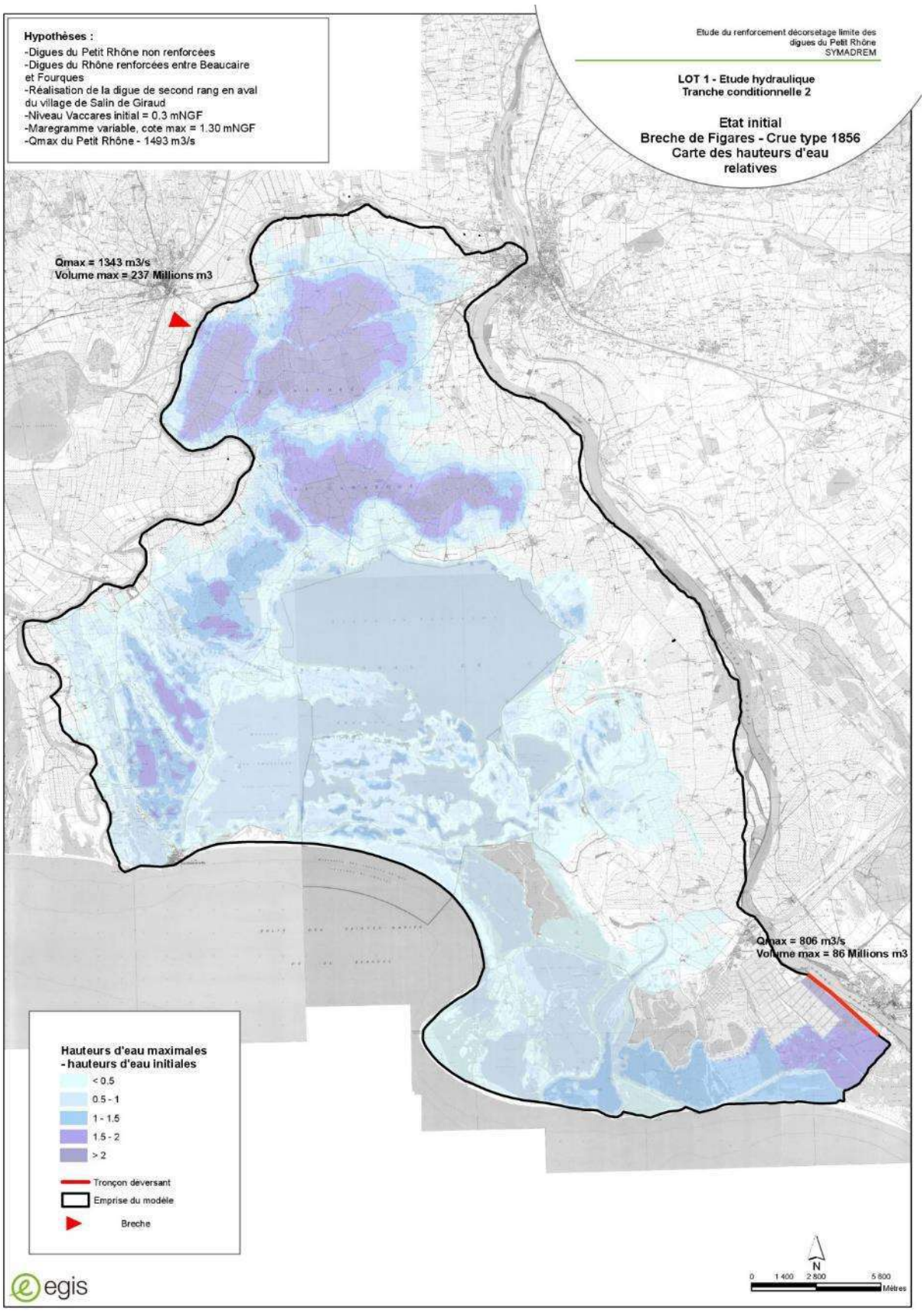


Figure 132. EI 12500 – Brèche Figarès – PRG 298,0 - Hauteur d'eau maximale (en m)

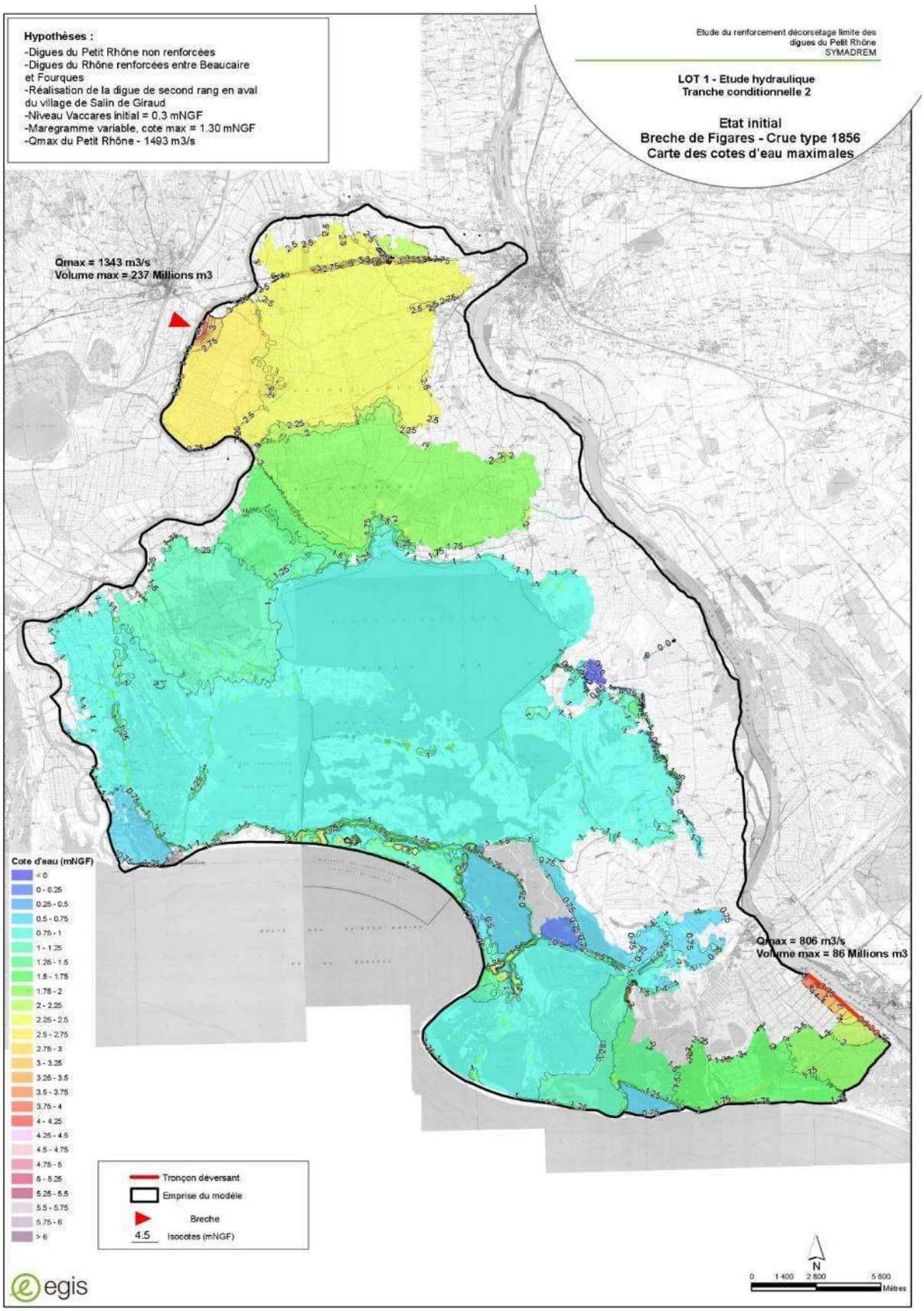


Figure 133. EI 12500 – Brèche Figarès – PRG 298,0 - Cote d'eau maximale (m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 32. EI 12500 – Brèche Figarès – PRG 298,0 – Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
9	A54 Est	2,25	0	0	0,7
10	Gimeaux	2,50	0	0,8	1,4
12	Clos du Mas Neuf	2,50	0	0,3	1,1
13	Marais du Pont de Rousty	2,50	0,6	2,0	3,0
14	Marais de la Grand Mar	2,00	0	1,1	1,9
16	Etang du Vaccarès	1,00	0	0,5	0,8
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	4,75	1,4	2,6	3,4
30	Saliers	2,75	0,2	1,1	2,3
31	Marais de Saliers	3,00	1,2	2,4	3,0
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	1,75	0	0,3	1,3
34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage	1,00	0	0,1	0,6
35	Amarée Dromard	1,00	0	0,6	0,9
36	Panperdu Etang des Launes	1,00	0	0,4	0,9
37	Etang de Ginès	1,00	0,1	0,8	0,9
38	Saintes-Maries-de-la-Mer	1,50	0	0,3	0,7
39	Paty trinité	1,50	0,0	0,9	1,4
40	Vaccarès Est	1,25	0	0,5	0,9

6.6.4 Crue 14160 - Etat actuel/initial – Brèche Figarès – PRG 298,0

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située à Figarès au PRG 298.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 95 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,95 X 0,001 ≅ 0,1 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 6.10^{-2} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 130 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 5 mètres,
- Temps d'ouverture : 2 heures pour la digue et 2 heures pour la fosse,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 2,8 m NGF,
- Cote de la crue : 6,6 m NGF.

Le débit de pointe modélisé est estimé à 1 350 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 600 heures et le volume de déversement à environ 900 millions de m^3.

Ce scénario d'inondation a été modélisé en supposant que les digues de Salin de Giraud (tracé initial de 2012) étaient renforcées. Des déversements sans brèche sur la digue résistante à la surverse ont été pris en compte. Le volume de déversement en provenance de cette digue résistante à la surverse est :

- Volume surverse Salin de Giraud : ≅ 550 millions m^3 (débit pointe ≅ 1000 m^3/s),

Ces apports sont en deçà des incertitudes liées aux hypothèses de modélisation. On notera que les eaux en provenance du Petit Rhône et de la brèche se mélangent mais que celles en provenance de Salin de Giraud et de la brèche ne se mélangent pas.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

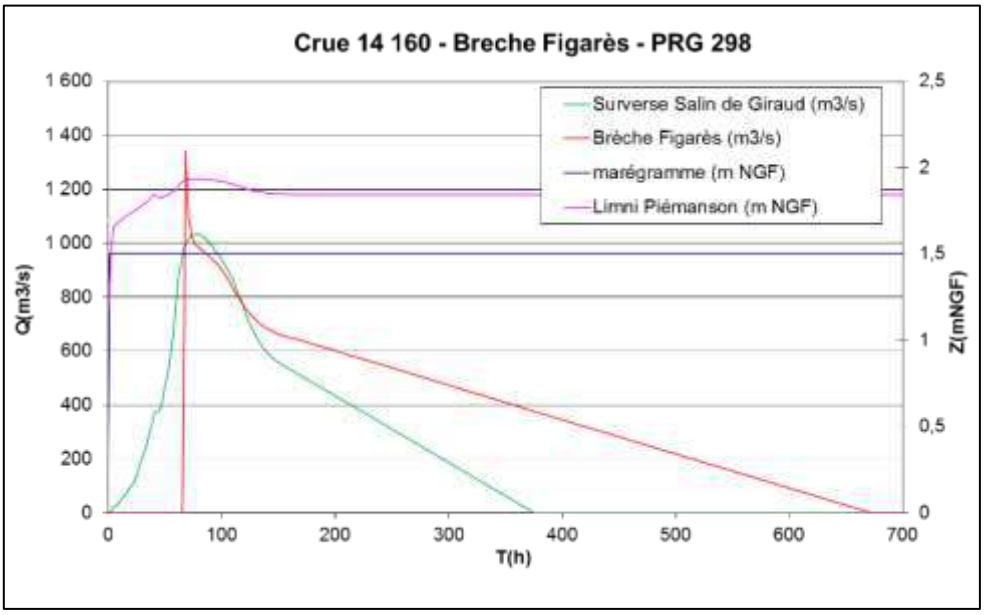


Figure 134. EI 14160 – Brèche Figarès – PRG 298,0 - Hydrogramme de brèche

La carte ci-après illustre la cartographie des vitesses d'écoulement en aval de la brèche.

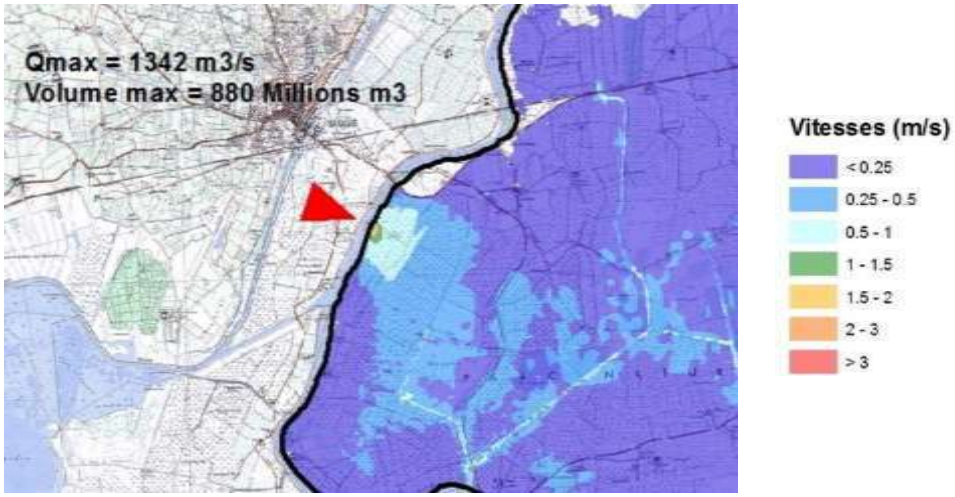


Figure 135. EI 14160 – Brèche Figarès – PRG 298,0 - Vitesse maximum (m/s)

La vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 300 et 800 m de la digue.

Le profil d'écoulement en aval de la brèche non représenté suit un comportement analogue à l'EI 10500 avec des hauteurs d'eau supérieures.

La propagation des crues dans les premières heures après la brèche n'a pas été représentée, mais compte tenu de ce que le débit de déversement est égal à celui de l'EI 11500 et du profil des vitesses. Il peut être considéré comme à l'EI 11500.

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

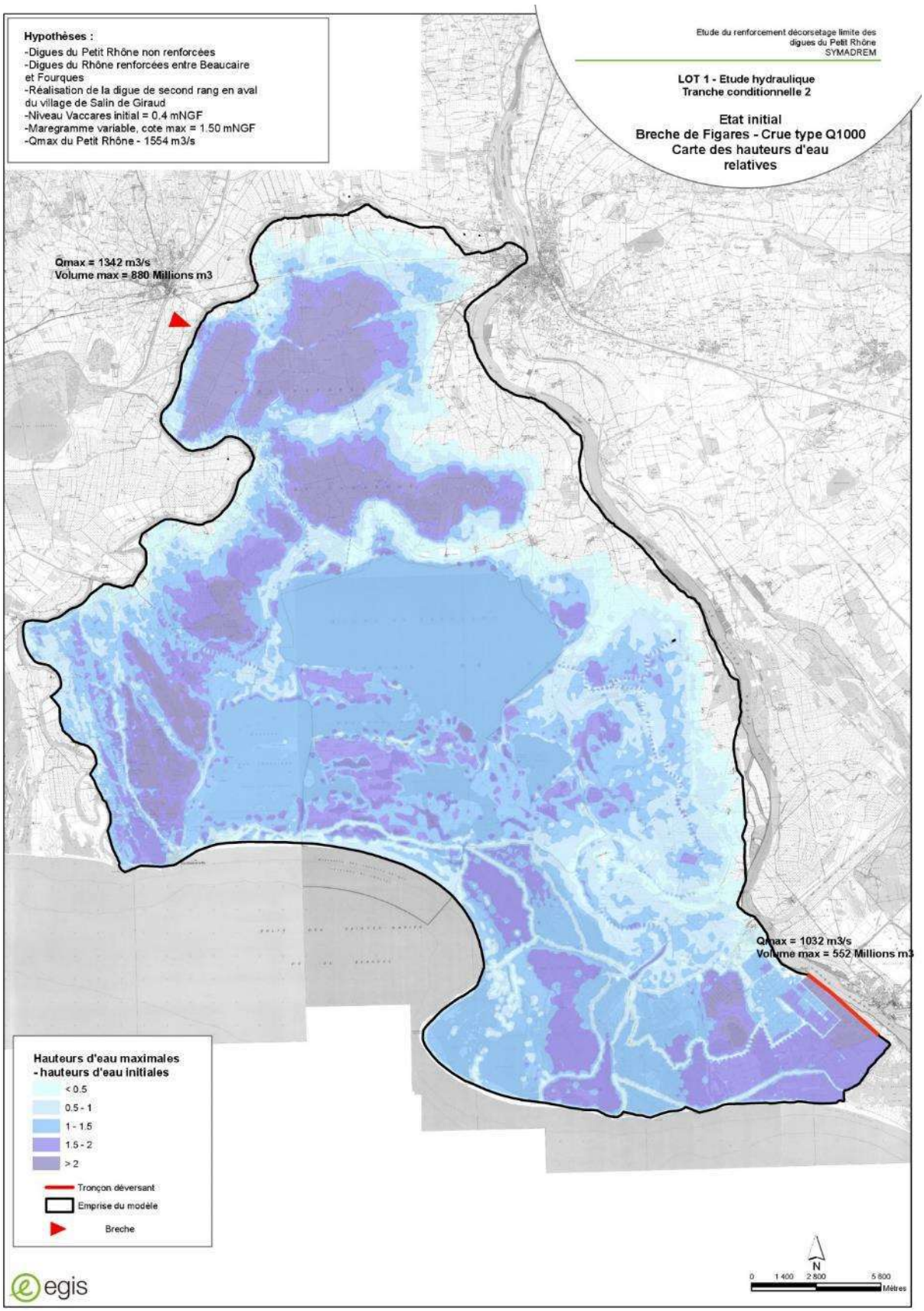


Figure 136. EI 14160 – Brèche Figarès – PRG 298,0 - Hauteur d'eau maximale (en m)

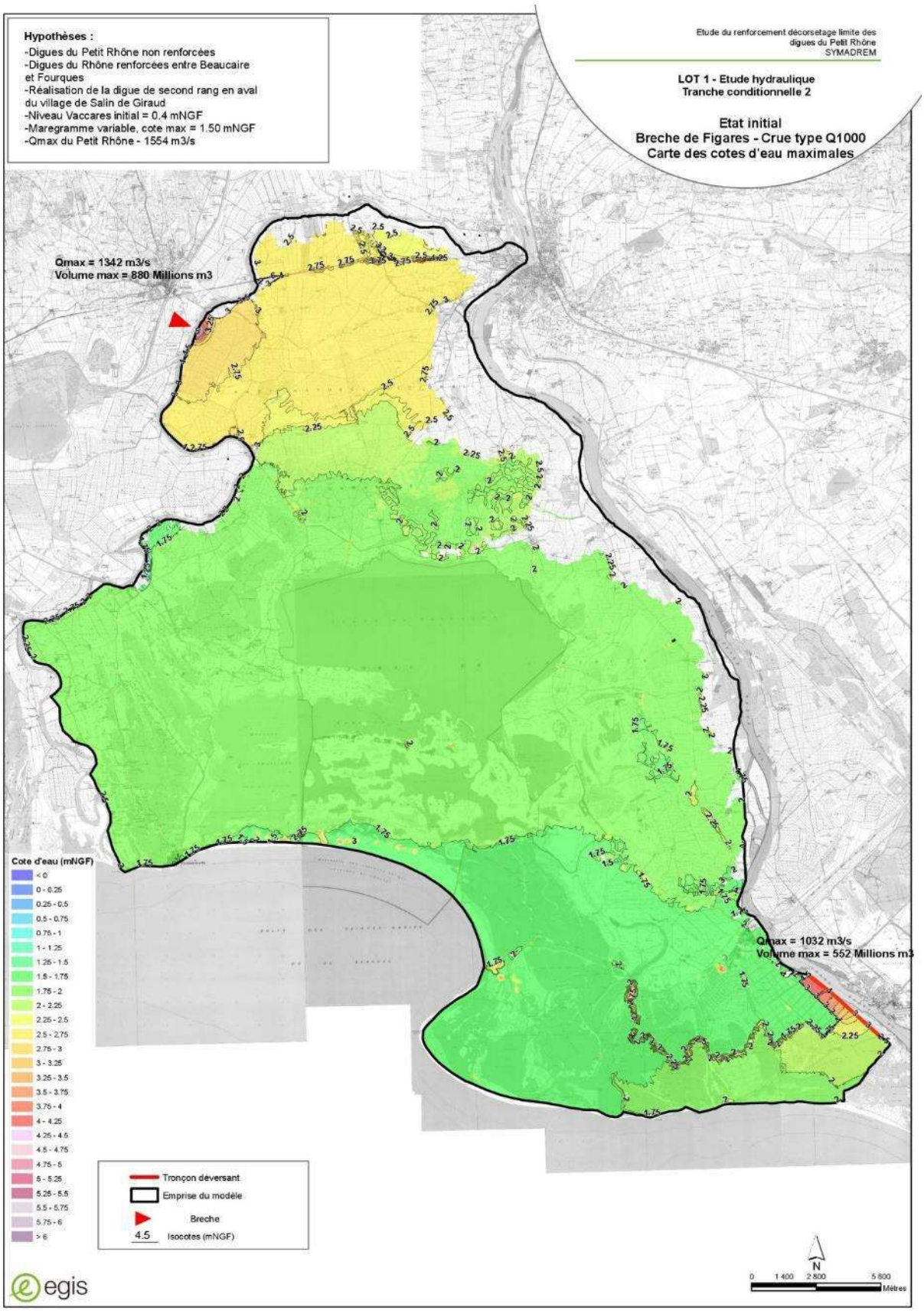


Figure 137. EI 14160 – Brèche Figarès – PRG 298,0 - Cote d'eau maximale (m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 33. EI 14160 – Brèche Figarès – PRG 298,0 – Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
9	A54 Est	2,75	0	0,4	1,2
10	Gimeaux	2,75	0	1,1	1,6
12	Clos du Mas Neuf	2,75	0	0,6	1,4
13	Marais du Pont de Rousty	2,75	0,9	2,2	3,2
14	Marais de la Grand Mar	2,50	0	1,6	2,4
16	Etang du Vaccarès	2,00	0,9	1,5	1,8
17	Armelière Sambuc Chamone	2,00	0	0,5	1,3
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	1,75	0,6	1,1	1,6
19	Salin de Giraud	1,75	0,1	0,6	1,1
23	Abords digue Commanderie Boisverdun	2,00	0	0,2	1,0
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	2,00	0	0,5	1,1
25	Abords digue Salin de Giraud	2,00	0	0,7	1,5
26	Salins du midi sud-est	1,75	0,5	1,0	1,5
27	Abords digue Cazeneuve - A54	2,50	0	0	0,0
28	Abords digue A54 Pont de Cavalès	2,75	0	0	0,5
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	4,75	1,4	2,6	3,4
30	Saliers	2,75	0,2	1,1	2,3
31	Marais de Saliers	3,00	1,2	2,4	3,0
32	Albaron	3,25	0	0,4	1,1
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	2,00	0	0,5	1,6
34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage	2,00	0,4	1,1	1,6
35	Amarée Dromard	2,00	0,9	1,6	1,9
36	Panperdu Etang des Launes	2,00	0,8	1,4	1,9
37	Etang de Ginès	2,00	1,1	1,8	1,9
38	Saintes-Maries-de-la-Mer	2,00	0,2	0,8	1,2
39	Paty trinité	2,00	0,5	1,4	1,9
40	Vaccarès Est	2,00	0,1	1,2	1,7
41	Esquineau	1,75	0	1,0	1,4

6.7 BRECHE AVAL ALBARON

4 crues ont été modélisées pour cette brèche dans l'état initial : 10500 ; 11500 ; 12500 et 14160.

2 crues ont été modélisées pour cette brèche dans l'état intermédiaire après renforcement des digues du petit Rhône du pont suspendu à Albaron : 11500 et 12500.

6.7.1 Crue 10500 – Etat actuel/initial - Brèche aval Albaron – PRG 307,8

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située en aval d'Albaron au PRG 307,8 pour une crue, dont le débit de pointe atteindrait 10 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon et dont l'hydrogramme aurait une forme équivalente à la crue de janvier 1994 (débit annoncé à l'époque de 11 000 m^3/s et qui serait estimé aujourd'hui à 10 250 m^3/s).

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,016, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 65 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,65 X 0,016 ≅ 1 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 7.10^{-2} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 80 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 7 mètres,
- Temps d'ouverture : 2 heures pour la digue et 2 heures pour la fosse,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 2,8 m NGF,
- Cote de la crue : 5,15 m NGF.

Le débit de pointe modélisé est estimé à 850 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 72 heures et le volume de déversement à environ 50 millions de m^3.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

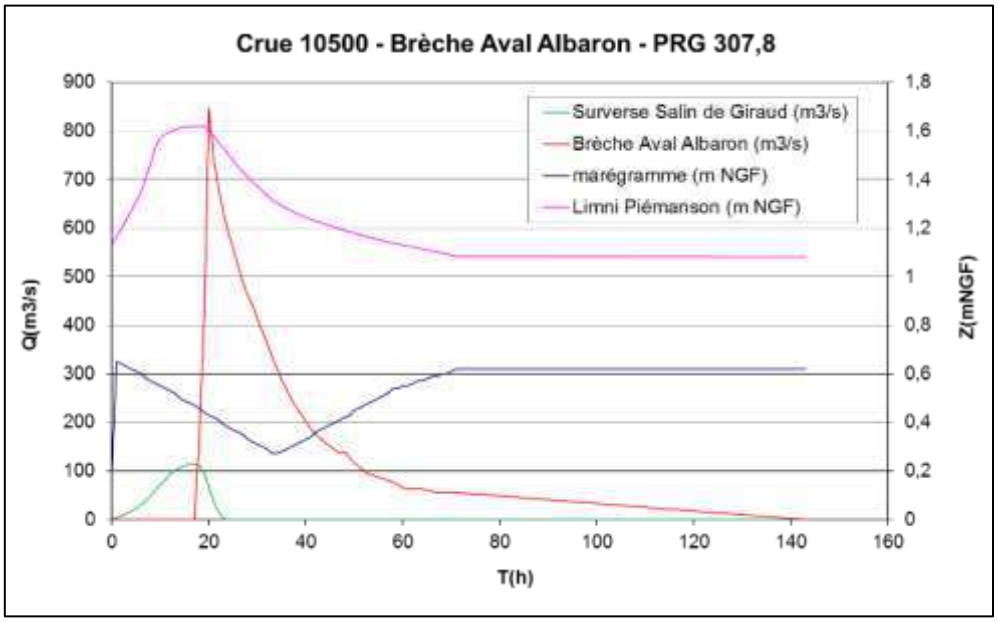


Figure 138. EI 10500 – Brèche Aval Albaron – PRG 307,8 - Hydrogramme de brèche

Les figures ci-après illustrent respectivement la cartographie des vitesses d'écoulement et le profil d'écoulement en aval de la brèche.

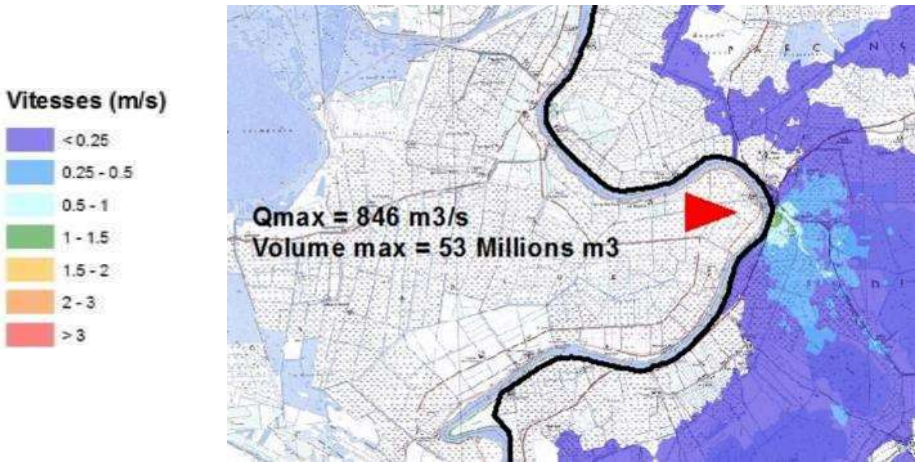
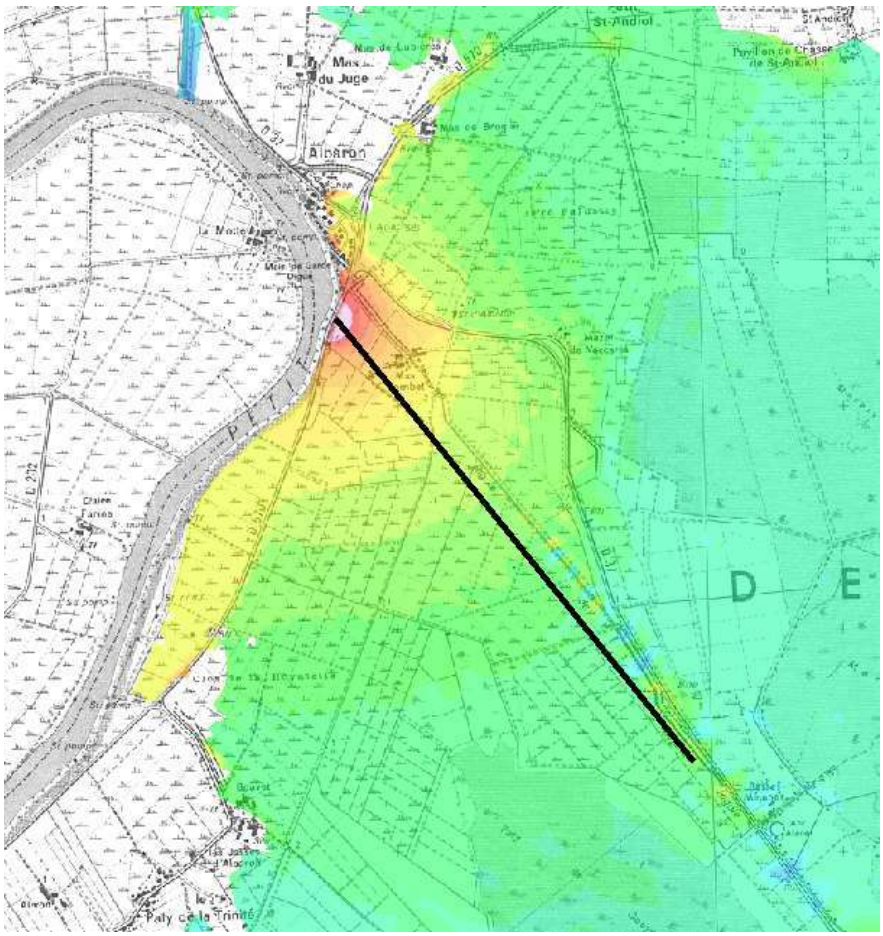


Figure 139. EI 10500 – Brèche Aval Albaron – PRG 307,8 - Vitesse maximum (m/s)

La vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 200 et 700 m de la digue.

Le profil d'écoulement en aval de la brèche suit la topographie du site. Le Rhône plonge dans la zone protégée. Les hauteurs d'eau sont supérieures à 2 mètres dans les 200 premiers mètres, puis diminue rapidement. L'eau a tendance à ne pas rester en pied de digue. Elle est inférieure à 1 mètre après 1000 mètres et tend vers 50 cm à 2500 mètres. Pour les crues supérieures, le profil d'écoulement suit un comportement analogue. Le matelas d'eau en aval augmente avec l'intensité de la crue, mais reste inférieur à 1 mètre après 2500 mètres.



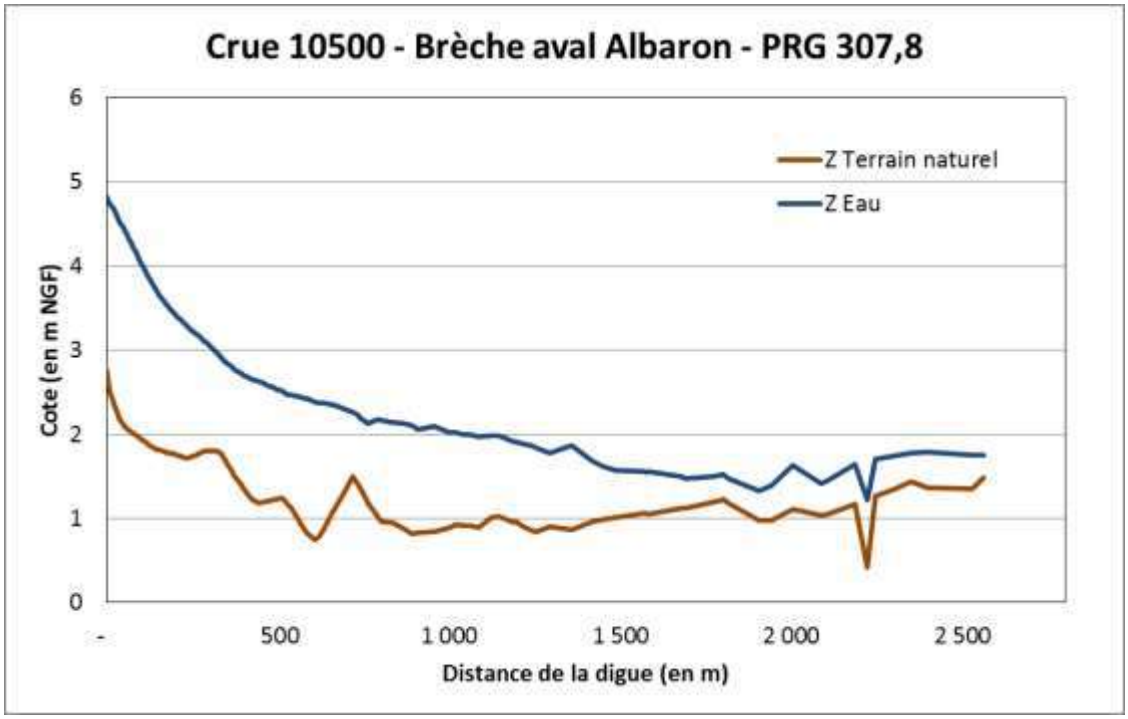


Figure 140. EI 10500 – Brèche Aval Albaron – PRG 307,8 – Profil d'écoulement en aval de la brèche

La figure ci-après illustre les hauteurs d'eau en fonction du temps. Après une heure, les niveaux d'eau sont supérieurs à 50 cm en aval de la brèche. Après trois heures, on note des hauteurs d'eau comprise entre 1 et 2 mètres en aval de la brèche. Après six heures, les hauteurs d'eau atteignent leur maximum compris entre 1 et 2 mètres. L'inondation se poursuit en aval d'Albaron. Le village et la RD570 commencent à être inondés par remontée des eaux après trois heures.

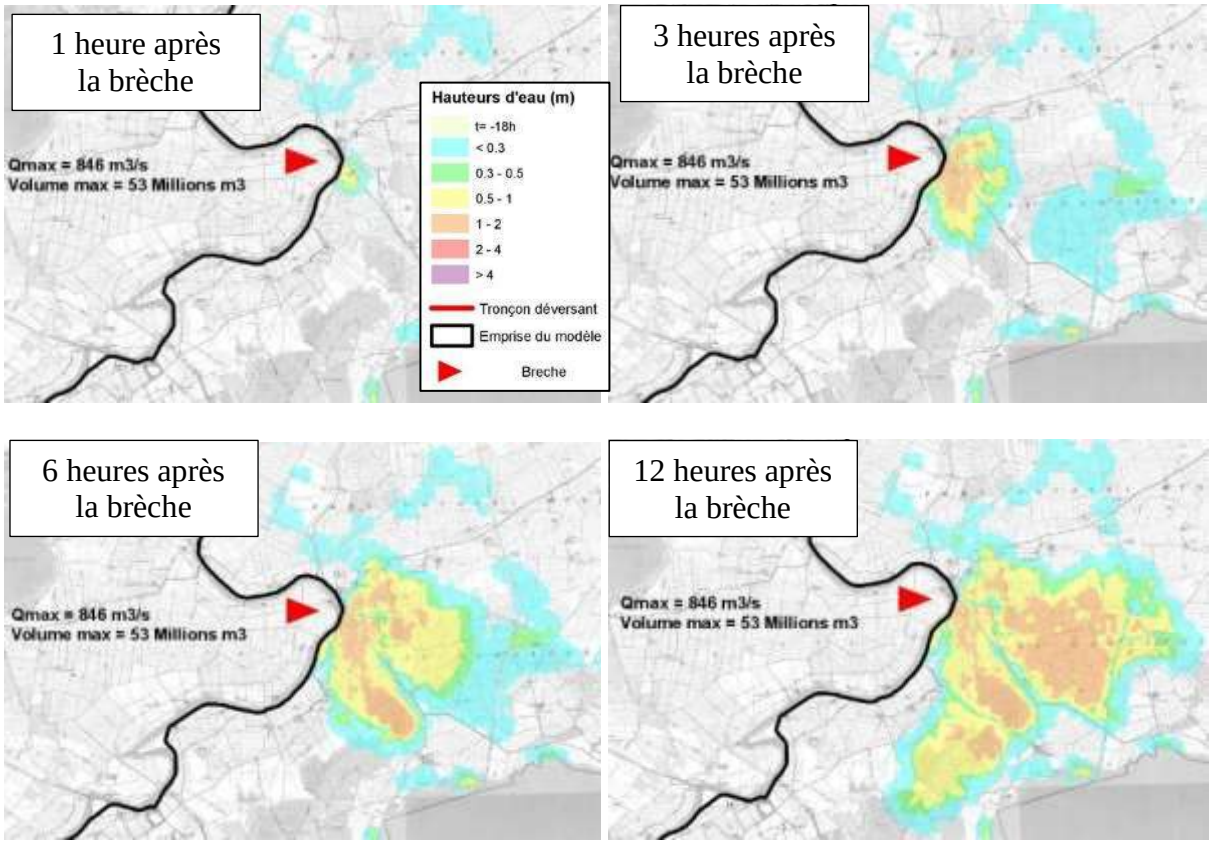


Figure 141. EI 10500 – Brèche Aval Albaron – PRG 307,8 - Hauteur d'eau en fonction du temps

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

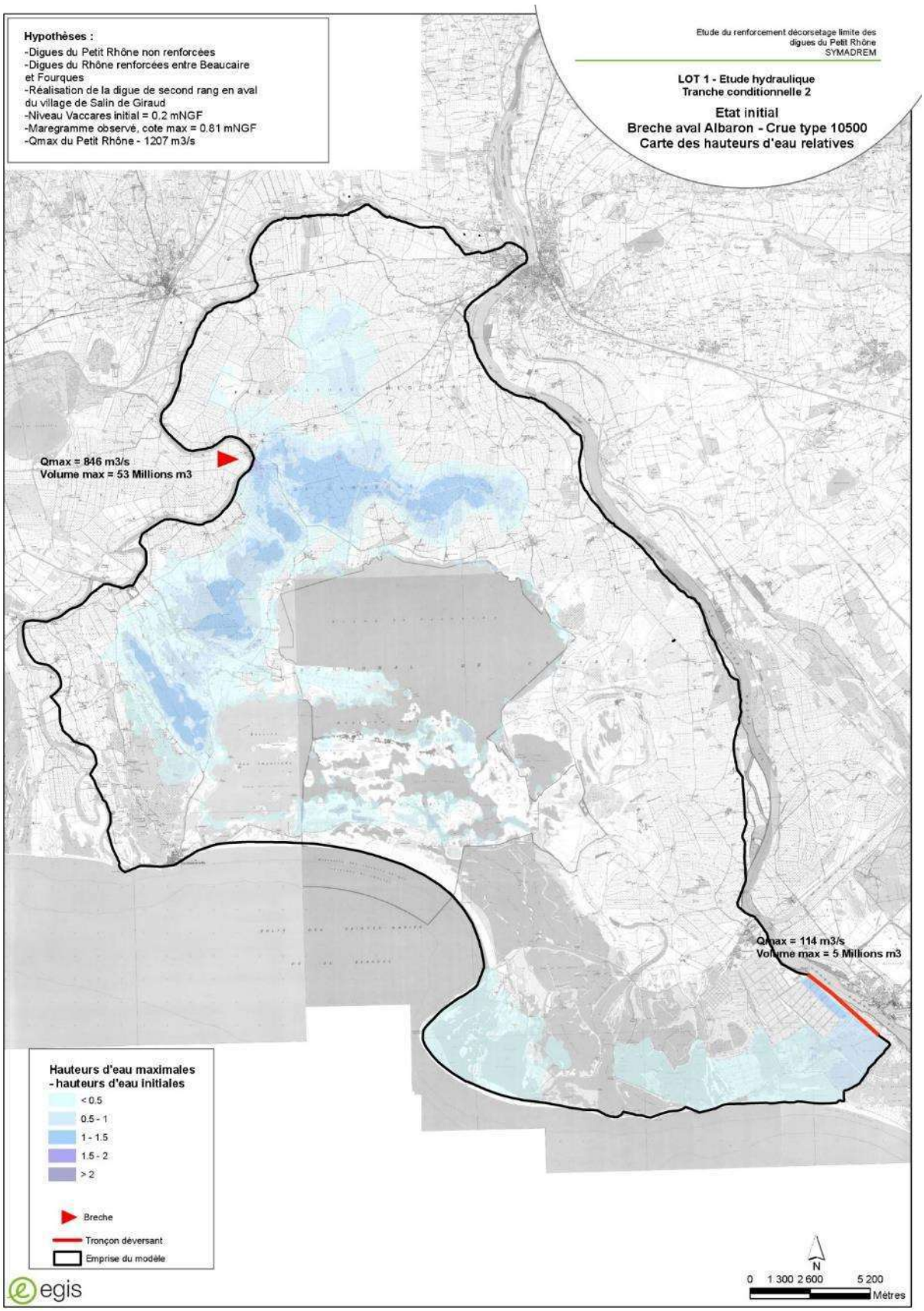


Figure 142. EI 10500 – Brèche Aval Albaron – PRG 307,8 - Hauteur d'eau maximale (en m)

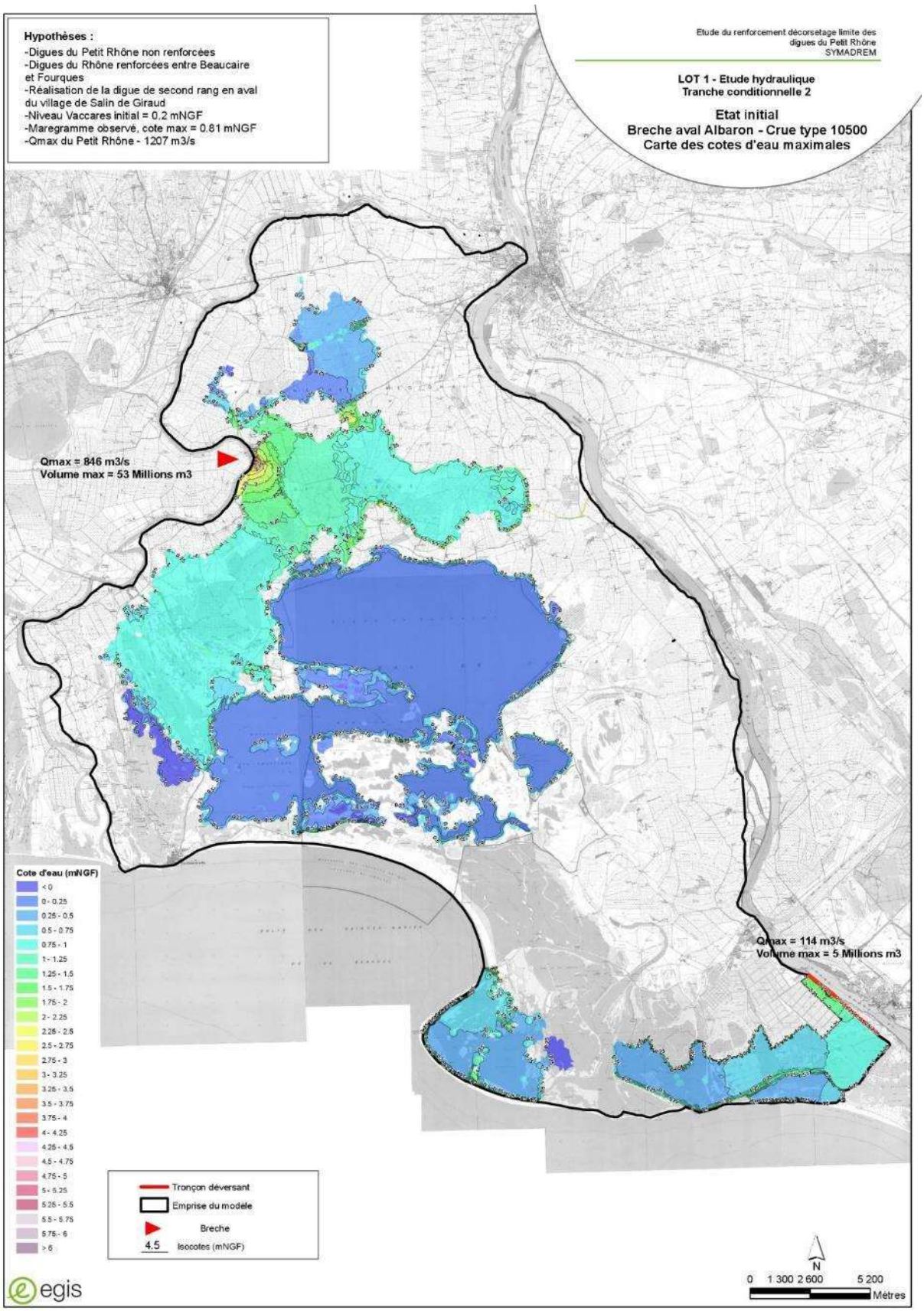


Figure 143. EI 10500 – Brèche Aval Albaron – PRG 307,8 - Cote d'eau maximale (m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 34. EI 10500 – Brèche Aval Albaron – PRG 307,8 – Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
13	Marais du Pont de Rousty	0,50	0	0,0	1,0
14	Marais de la Grand Mar	1,50	0	0,6	1,4
16	Etang du Vaccarès	1,00	0	0,5	0,8
31	Marais de Saliers	1,50	0	0,9	1,5
32	Albaron	3,50	0	0,7	1,3
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	4,00	1,4	2,5	3,6
37	Etang de Ginès	0,50	0	0,3	0,4
39	Paty trinité	2,00	0,5	1,4	1,9

6.7.2 Crue 11500 – Etat actuel/initial - Brèche aval Albaron – PRG 307,8

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située en aval d'Albaron au PRG 307,8 pour une crue équivalente à celle de décembre 2003 (débit de pointe de 11 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,008, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 65 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,65 X 0,008 ≅ 0,5 %.
Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 7.10^{-2} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 130 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 7 mètres,
- Temps d'ouverture : 2 heures pour la digue et 2 heures pour la fosse,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 2,8 m NGF,
- Cote de la crue : 5,25 m NGF.

Le débit de pointe modélisé est estimé à 900 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 80 heures et le volume de déversement à environ 100 millions de m^3.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après

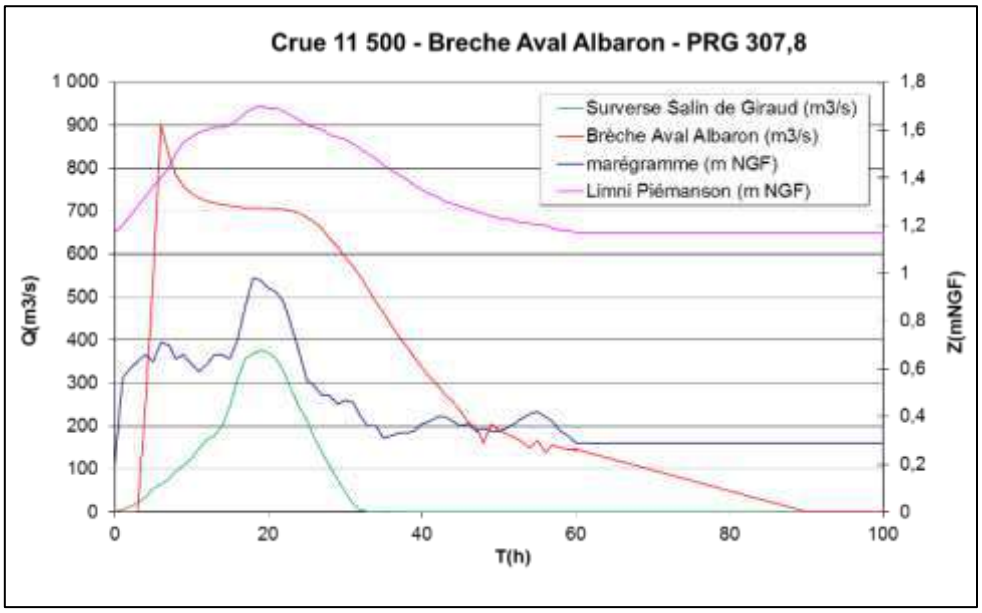


Figure 144. EI 11500 – Brèche Aval Albaron – PRG 307,8 - Hydrogramme de brèche

La carte ci-après illustre les vitesses d'écoulement en aval de la brèche.

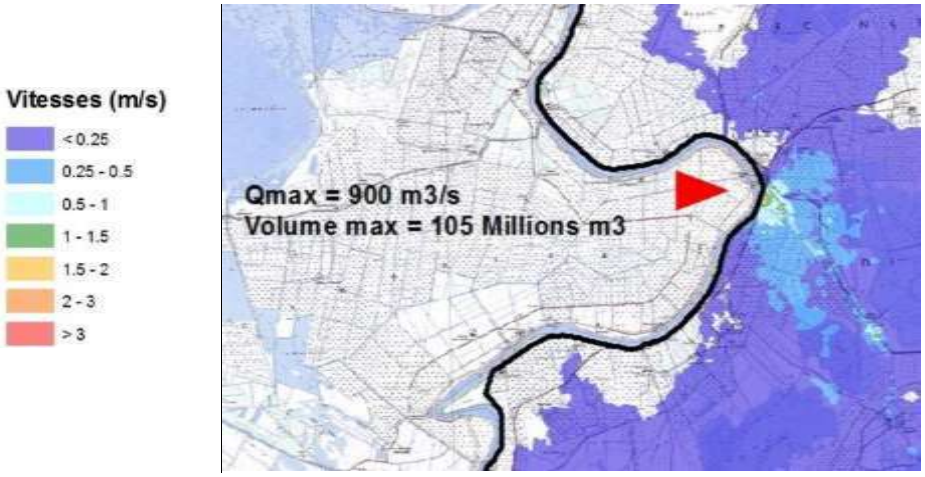


Figure 145. EI 11500 – Brèche Aval Albaron – PRG 307,8 - Vitesse maximum (m/s)

La vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 200 et 700 m de la digue.

Le profil d'écoulement en aval de la brèche non représenté suit un comportement analogue à l'EI 10500 avec un matelas d'eau en aval de la brèche légèrement supérieur.

La figure ci-après illustre les hauteurs d'eau en fonction du temps. Le comportement est analogue au scénario EI 10500. Après une heure, les niveaux d'eau sont supérieurs à 50 cm en aval de la brèche. Après trois heures, on note des hauteurs d'eau comprise entre 1 et 2 mètres en aval de la brèche. Après six heures, les hauteurs d'eau atteignent leur maximum compris entre 1 et 2 mètres. L'inondation se poursuit en aval d'Albaron. Le village et la RD570 commencent à être inondés par remontée des eaux après trois heures.

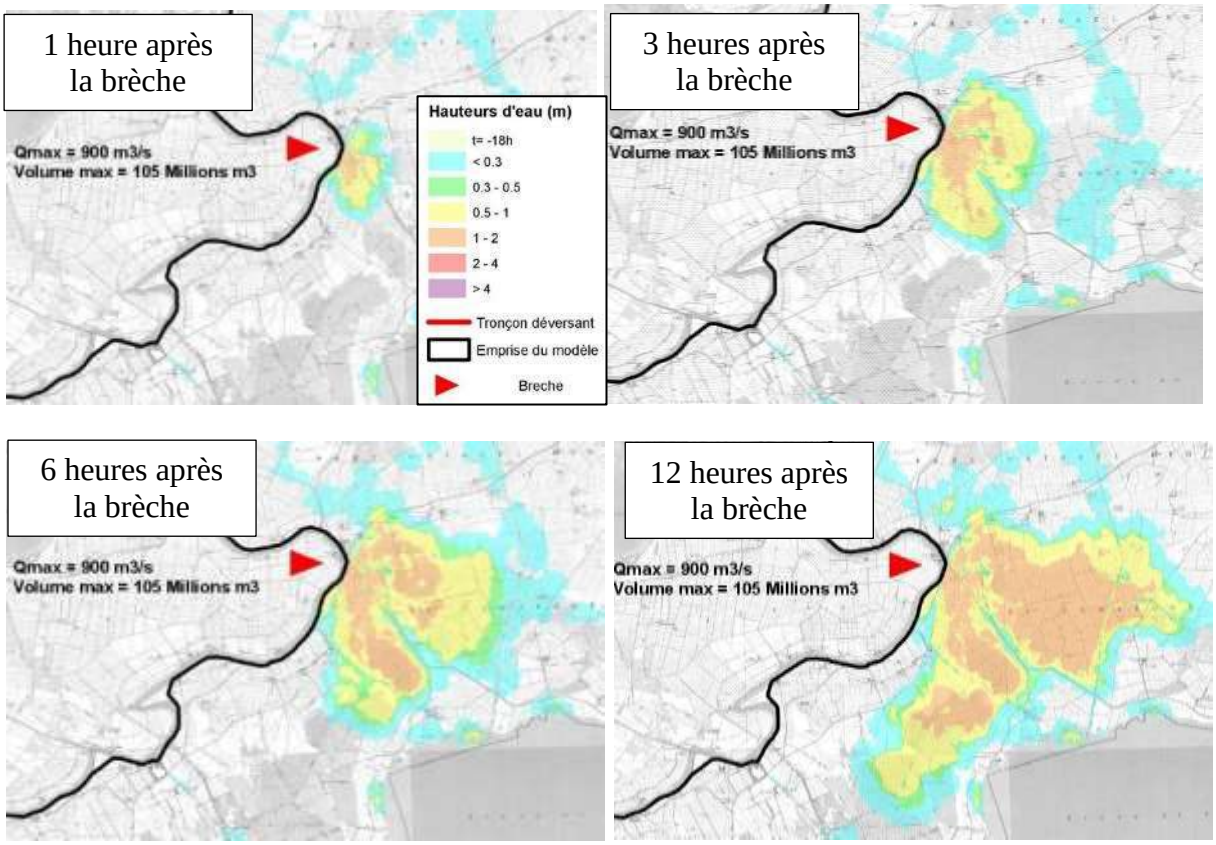


Figure 146. EI 11500 – Brèche Aval Albaron – PRG 307,8 - Hauteur d'eau en fonction du temps

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

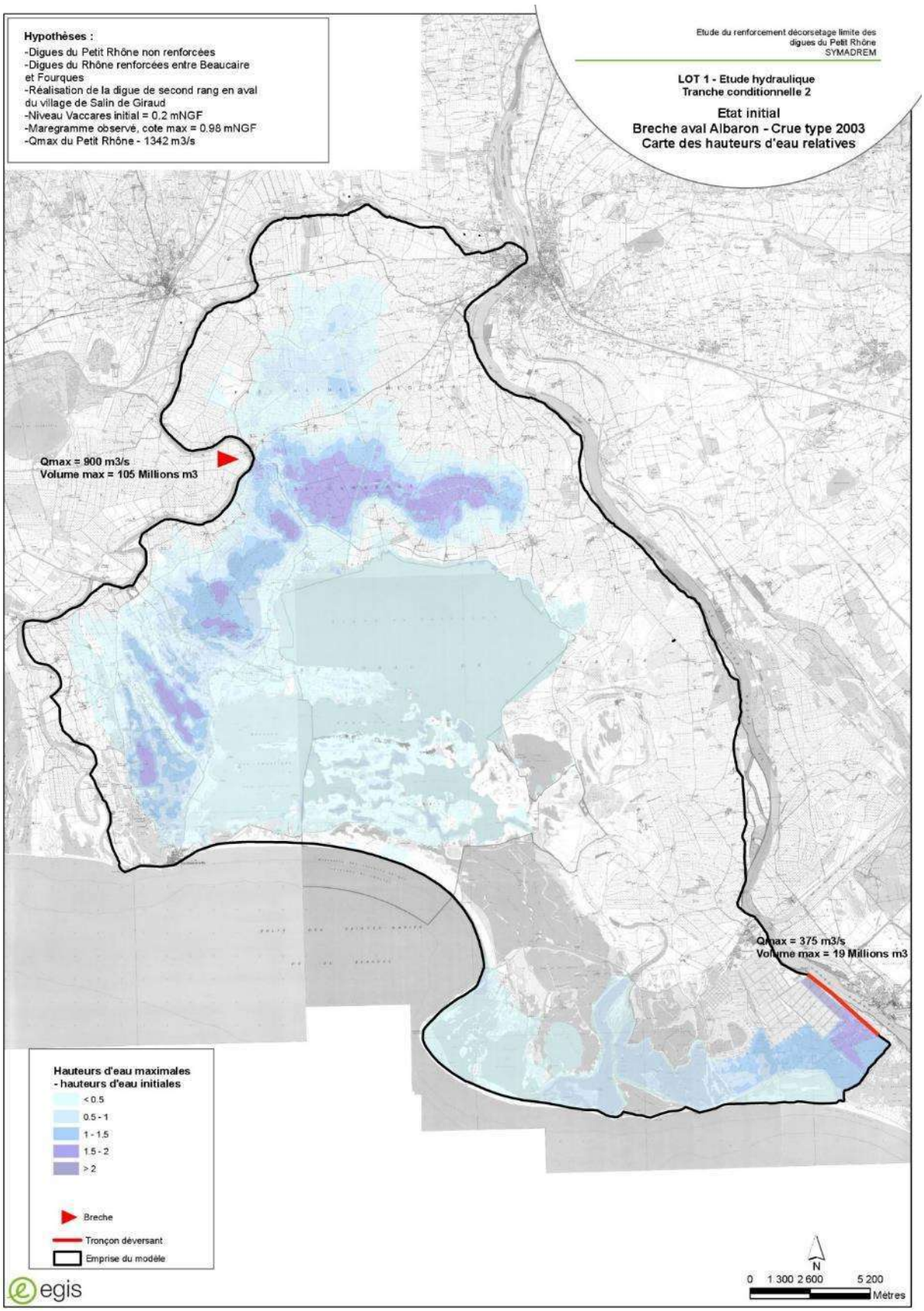


Figure 147. EI 11500 – Brèche Aval Albaron – PRG 307,8 - Hauteur d'eau maximale (en m)

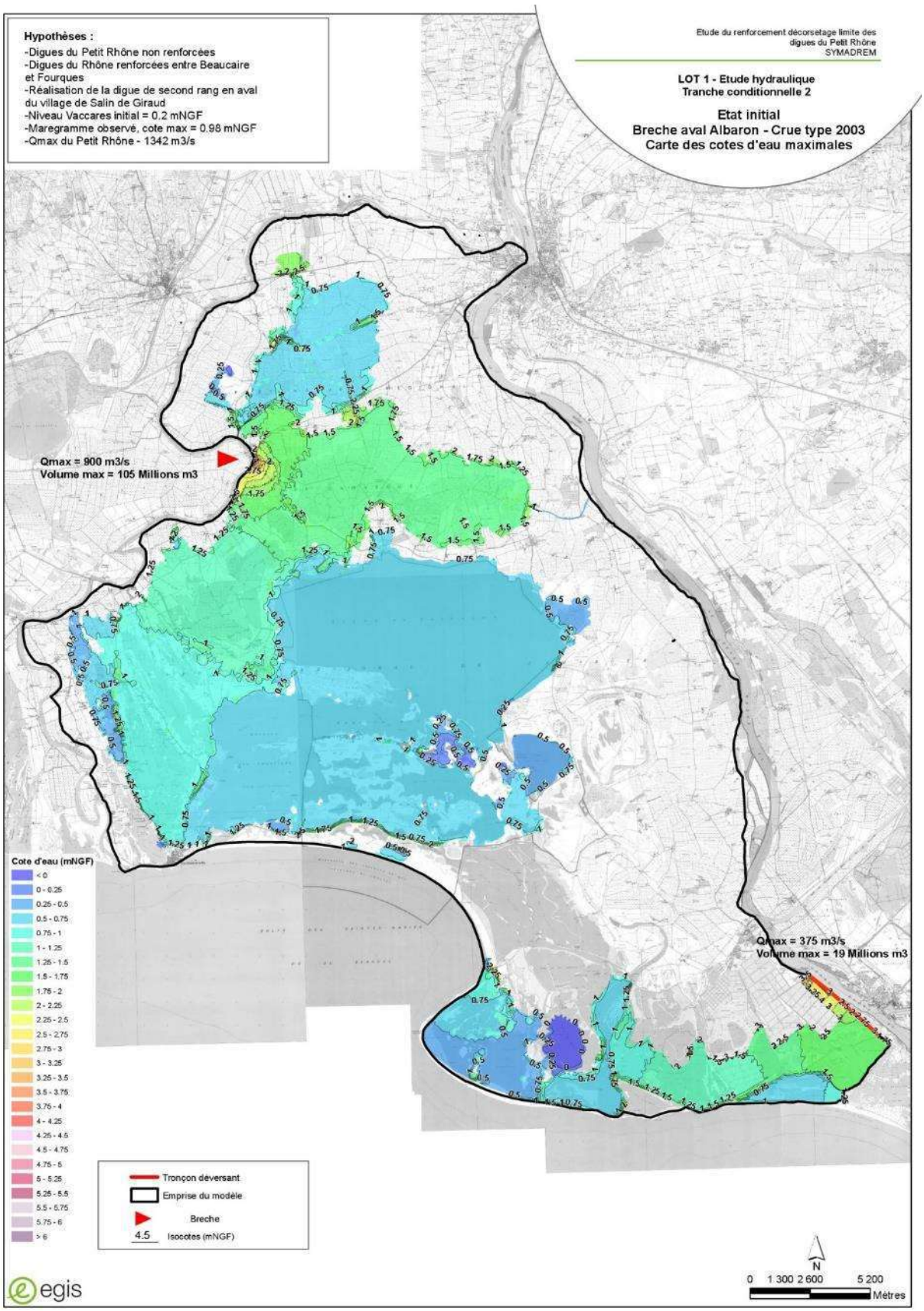


Figure 148. EI 11500 – Brèche Aval Albaron – PRG 307,8 - Cote d'eau maximale (m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 35. EI 11500 – Brèche Aval Albaron – PRG 307,8 – Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
12	Clos du Mas Neuf	2,00	0	0	0,6
13	Marais du Pont de Rousty	1,00	0	0,5	1,5
14	Marais de la Grand Mar	1,75	0	0,8	1,6
16	Etang du Vaccarès	1,00	0	0,5	0,8
31	Marais de Saliers	1,50	0	0,9	1,5
32	Albaron	3,75	0	0,9	1,6
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	4,00	1,4	2,5	3,6
36	Panperdu Etang des Launes	1,00	0	0,4	0,9
37	Etang de Ginès	1,00	0,1	0,8	0,9
39	Paty trinité	2,00	0,5	1,4	1,9

6.7.3 Crue 12500 – Etat actuel/initial - Brèche aval Albaron – PRG 307,8

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située en aval d'Albaron au PRG 307,8 pour une crue équivalente à celle de mai 1856 (débit de pointe de 12 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée et dans les conditions actuelles d'écoulement.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,006, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 65 %.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,65 X 0,006 ≅ 0,4 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 7.10^{-2} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 130 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 7 mètres,
- Temps d'ouverture : 2 heures pour la digue et 2 heures pour la fosse,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 2,8 m NGF,
- Cote de la crue : 5,3 m NGF.

Le débit de pointe modélisé est estimé à 900 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 130 heures et le volume de déversement à environ 200 millions de m^3.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

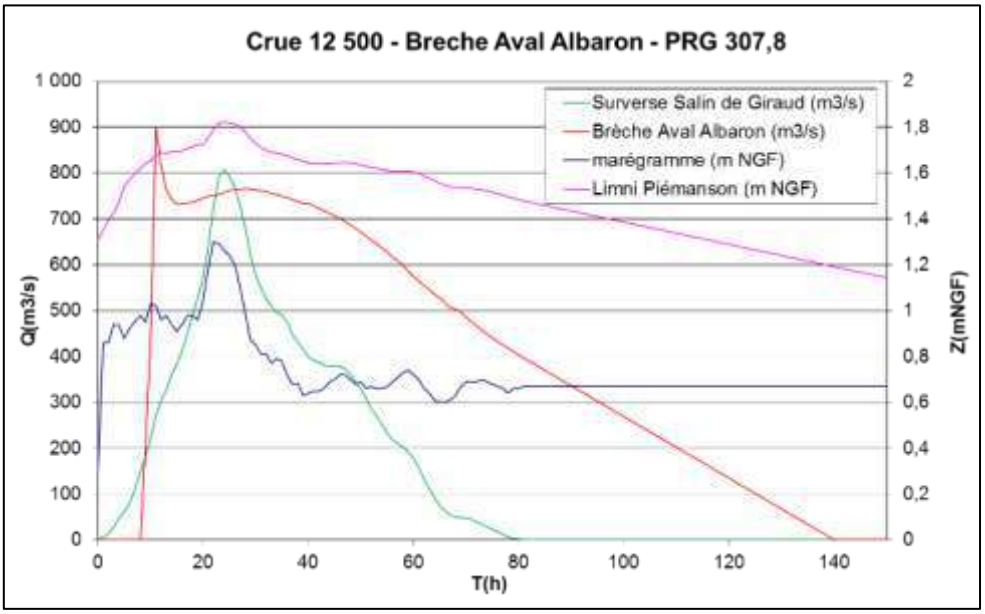


Figure 149. EI 12500 – Brèche Aval Albaron – PRG 307,8 - Hydrogramme de brèche

La carte ci-après illustre les vitesses d'écoulement au sein de la zone protégée.

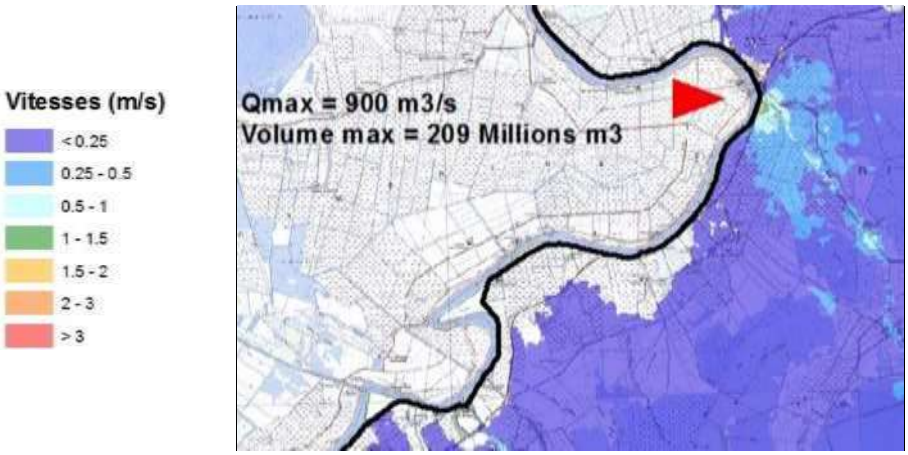


Figure 150. EI 12500 – Brèche Aval Albaron – PRG 307,8 - – Vitesse maximum (m/s)

La vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 200 et 700 m de la digue.

Le profil d'écoulement en aval de la brèche non représenté suit un comportement analogue à l'EI 10500 avec un matelas d'eau en aval de la brèche légèrement supérieur.

La propagation des crues dans les premières heures après la brèche n'a pas été représentée, mais compte tenu de ce que le débit de déversement est égal à celui de l'EI 11500 et du profil des vitesses. Il peut être considéré comme identique à l'EI 11500.

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

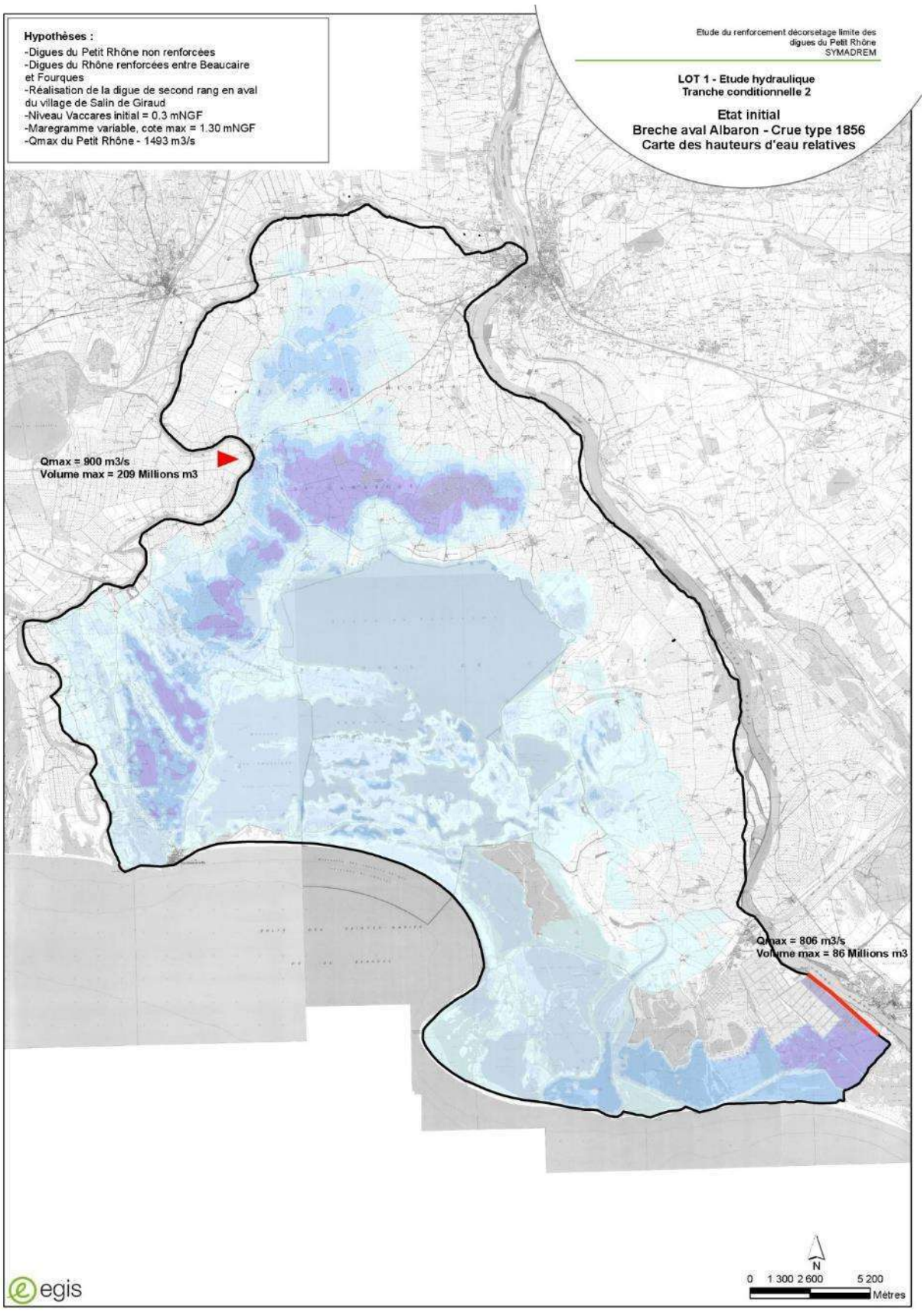


Figure 151. EI 12500 – Brèche Aval Albaron – PRG 307,8 - Hauteur d'eau maximale (en m)

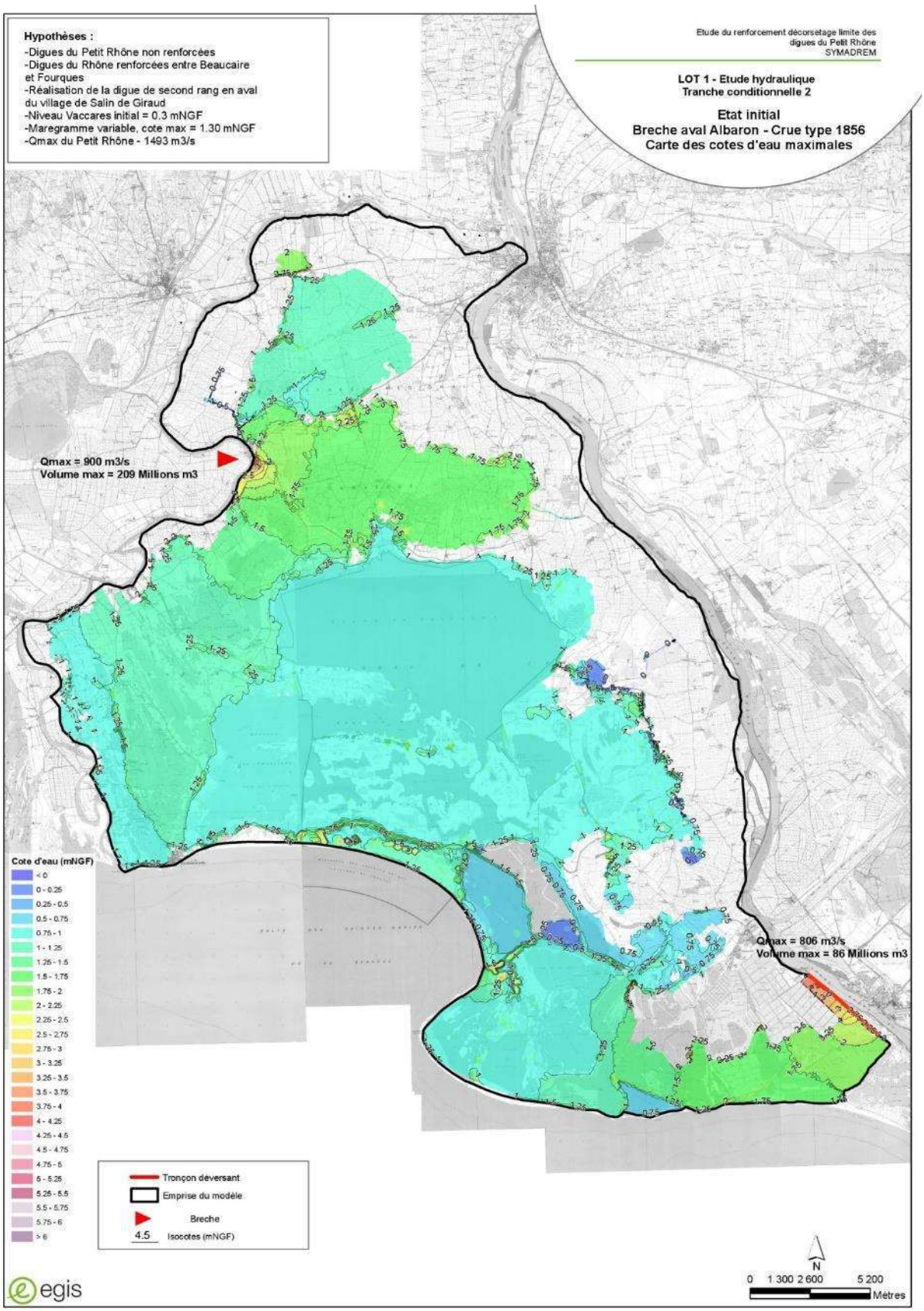


Figure 152. EI 12500 – Brèche Aval Albaron – PRG 307,8 - Cote d'eau maximale (m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 36. EI 12500 – Brèche Aval Albaron – PRG 307,8 – Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
12	Clos du Mas Neuf	2,00	0	0	0,6
13	Marais du Pont de Rousty	1,50	0	1,0	2,0
14	Marais de la Grand Mar	2,00	0	1,1	1,9
16	Etang du Vaccarès	1,25	0,1	0,7	1,1
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	1,25	0,1	0,6	1,1
31	Marais de Saliers	1,50	0	0,9	1,5
32	Albaron	3,75	0	0,9	1,6
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	4,00	1,4	2,5	3,6
36	Panperdu Etang des Launes	1,25	0,0	0,6	1,2
37	Etang de Ginès	1,25	0,4	1,1	1,2
38	Saintes-Maries-de-la-Mer	1,25	0	0,1	0,5
39	Paty trinité	2,00	0,5	1,4	1,9
40	Vaccarès Est	1,25	0	0,5	0,9
39	Paty trinité	2,00	0,5	1,4	1,9

6.7.4 Crue 14160 – Etat actuel/initial - Brèche aval Albaron – PRG 307,8

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située en aval d'Albaron au PRG 307,8.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 70 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,7 X 0,001 ≅ 0,1 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 7.10^{-2} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 130 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 7 mètres,
- Temps d'ouverture : 2 heures pour la digue et 2 heures pour la fosse,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 2,8 m NGF,
- Cote de la crue : 5,3 m NGF.

Le débit de pointe modélisé est estimé à 900 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 500 heures et le volume de déversement à environ 600 millions de m^3.

Ce scénario d'inondation a été modélisé en supposant que les digues de Salin de Giraud (tracé initial de 2012) étaient renforcées. Des déversements sans brèche sur la digue résistante à la surverse ont été pris en compte. Le volume de déversement en provenance de cette digue résistante à la surverse est :

- Volume surverse Salin de Giraud : ≅ 550 millions m^3 (débit pointe ≅ 1000 m^3/s),

Ces apports sont en deçà des incertitudes liées aux hypothèses de modélisation. On notera que les eaux en provenance du Petit Rhône et de la brèche se mélangent mais que celles en provenance de Salin de Giraud et de la brèche ne se mélangent pas.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

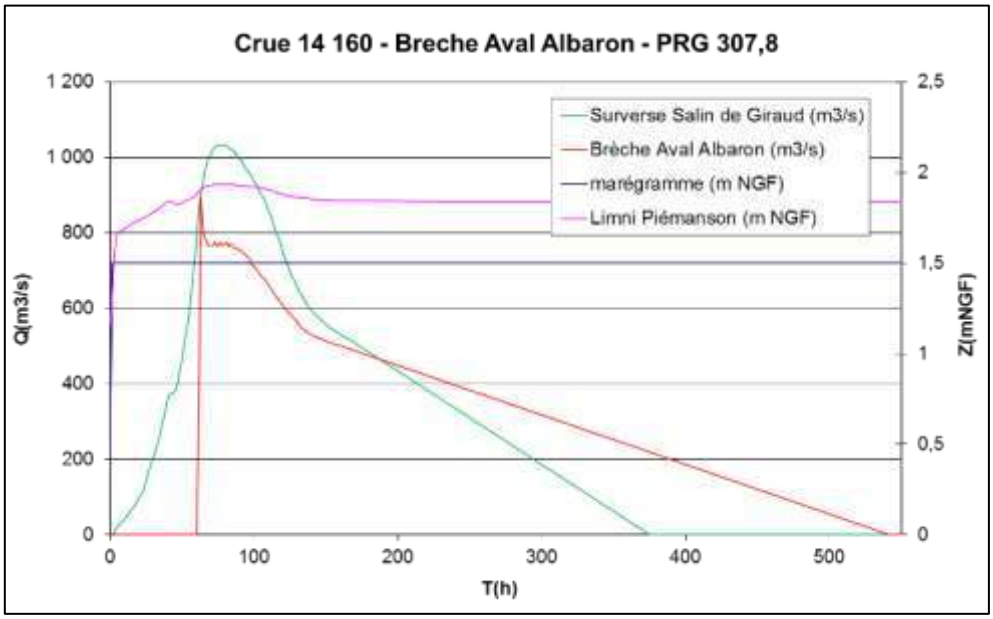


Figure 153. EI 14160 – Brèche Aval Albaron – PRG 307,8 - Hydrogramme de brèche

Les deux cartes ci-après illustrent respectivement les vitesses d'écoulement et les hauteurs d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

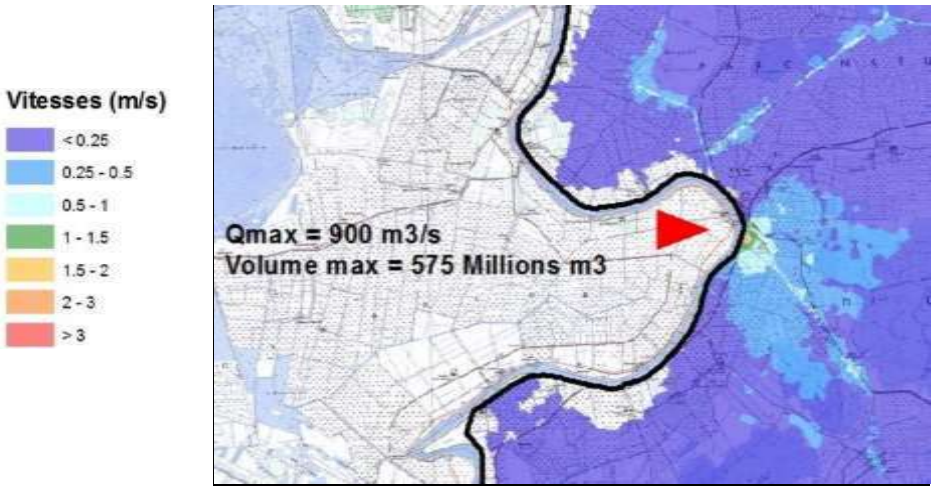


Figure 154. EI 14160 – Brèche Aval Albaron – PRG 307,8 - Vitesse maximum (m/s)

La vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 200 et 700 m de la digue.

Le profil d'écoulement en aval de la brèche non représenté suit un comportement analogue à l'EI 10500 avec un matelas d'eau en aval de la brèche légèrement supérieur.

La propagation des crues dans les premières heures après la brèche n'a pas été représentée, mais compte tenu de ce que le débit de déversement est égal à celui de l'EI 11500 et du profil des vitesses. Il peut être considéré comme identique à l'EI 11500.

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

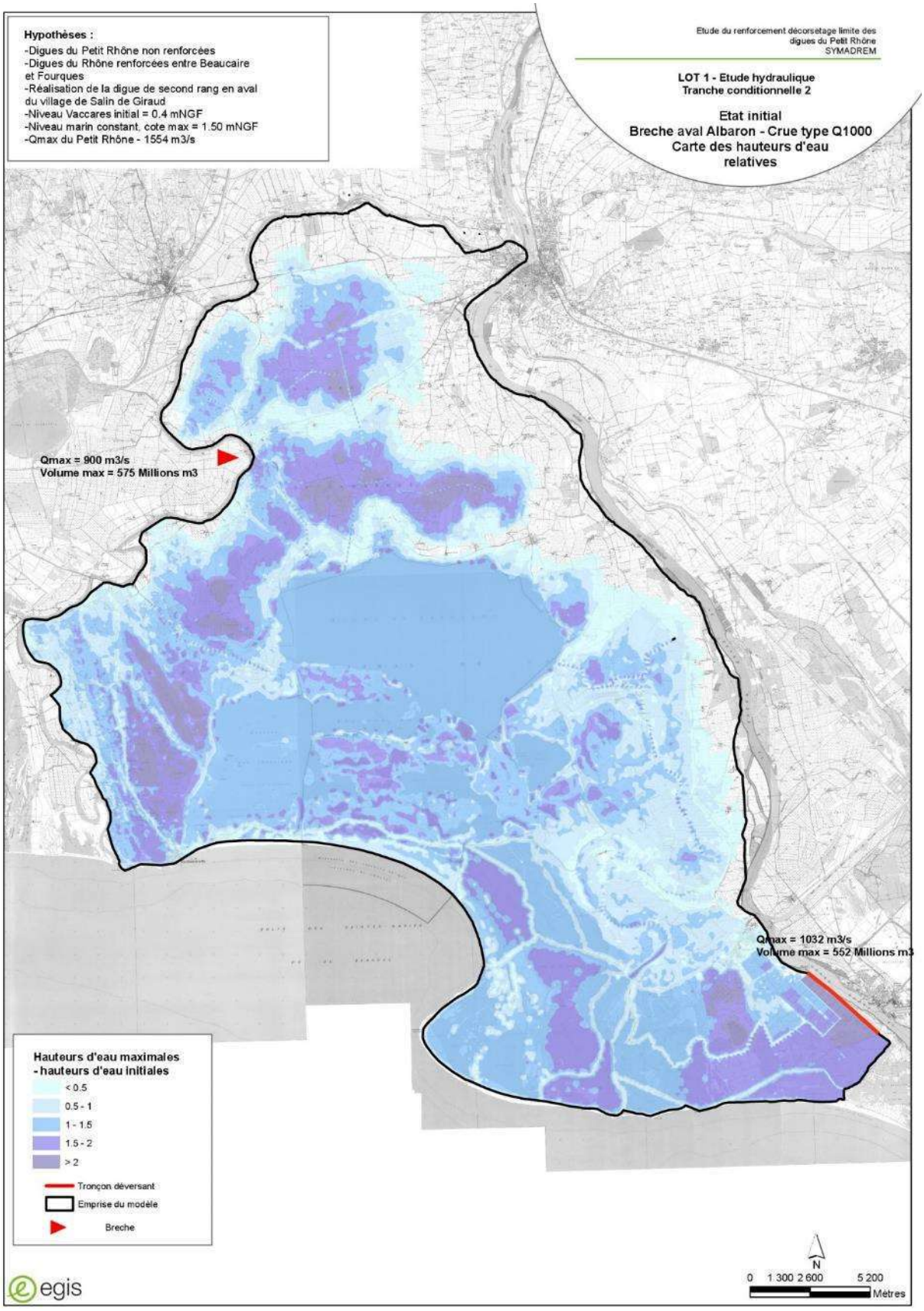


Figure 155. EI 14160 – Brèche Aval Albaron – PRG 307,8 - Hauteur d'eau maximale (en m)

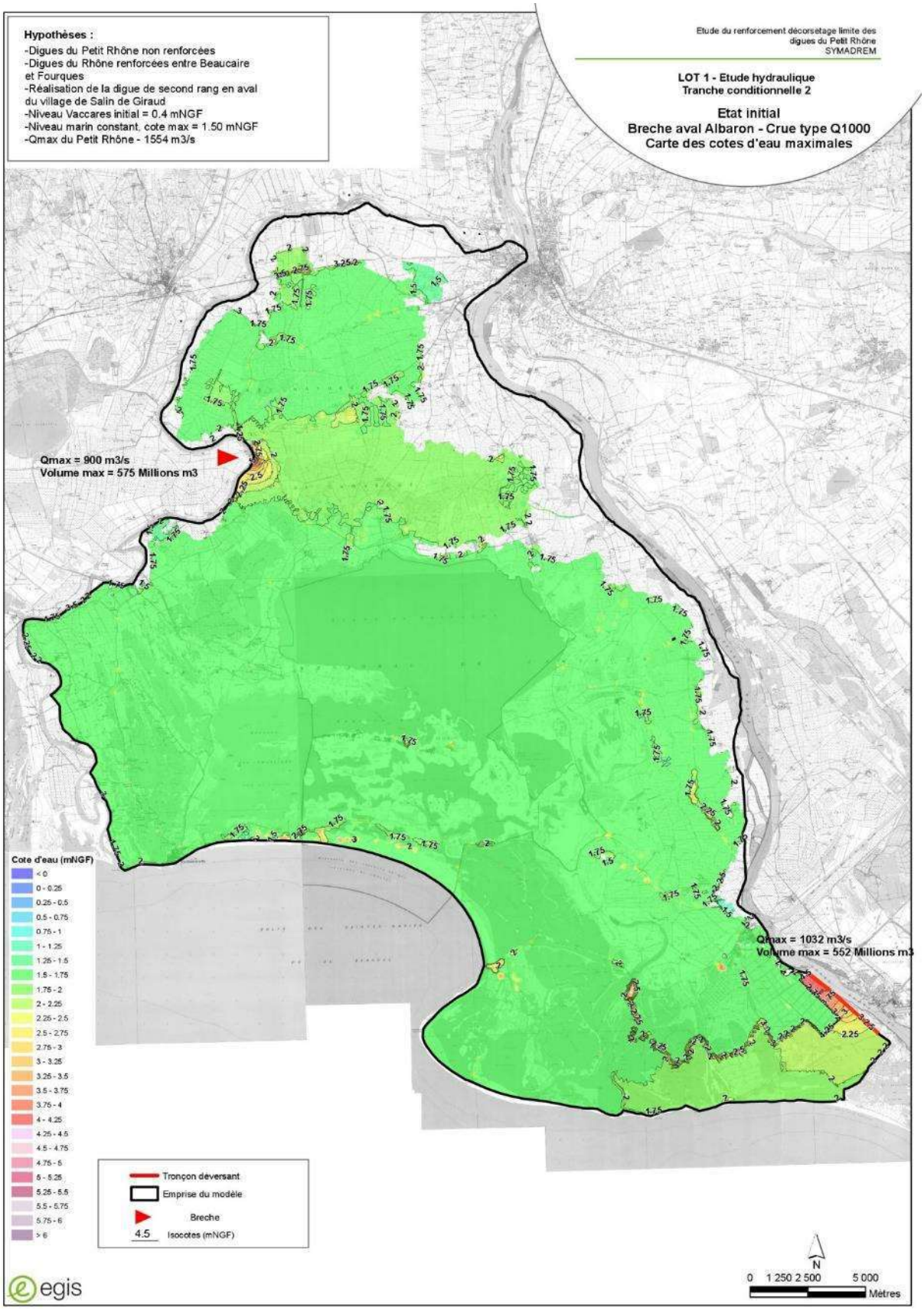


Figure 156. EI 14160 – Brèche Aval Albaron – PRG 307,8 - Cote d'eau maximale (m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 37. EI 14160 – Brèche Aval Albaron – PRG 307,8 – Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
10	Gimeaux	1,75	0	0,1	0,6
12	Clos du Mas Neuf	2,00	0	0	0,6
13	Marais du Pont de Rousty	1,75	0	1,2	2,2
14	Marais de la Grand Mar	2,00	0	1,1	1,9
16	Etang du Vaccarès	1,75	0,6	1,2	1,6
17	Armelière Sambuc Chamone	1,75	0	0,2	1,0
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	1,75	0,6	1,1	1,6
19	Salin de Giraud	1,75	0,1	0,6	1,1
23	Abords digue Commanderie Boisverdun	1,75	0	0	0,7
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	1,75	0	0,2	0,9
25	Abords digue Salin de Giraud	1,75	0	0,4	1,2
26	Salins du midi sud-est	1,75	0,5	1,0	1,5
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	1,75	0	0	0,4
30	Saliers	1,75	-0,8	0,1	1,3
31	Marais de Saliers	1,75	0,0	1,2	1,8
32	Albaron	3,75	0	0,9	1,6
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	4,25	1,7	2,8	3,8
34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage	1,75	0,1	0,8	1,4
35	Amarée Dromard	1,75	0,7	1,3	1,7
36	Panperdu Etang des Launes	1,75	0,5	1,1	1,7
37	Etang de Ginès	1,75	0,9	1,6	1,7
38	Saintes-Maries-de-la-Mer	1,75	0	0,6	1,0
39	Paty trinité	1,75	0,2	1,2	1,7
40	Vaccarès Est	1,75	0	1,0	1,4
41	Esquineau	1,75	0	1,0	1,4

6.8 BRECHE TRINQUETAILLE

Ce scénario pour mémoire, correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche dans les quais d'Arles au GRD 282,0.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 0,75 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7. Cette probabilité de brèche est très sensiblement inférieure au seuil réglementaire de 5 % pour la détermination du niveau de protection.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,75 X 0,001 ≅ $7{,}5.10^{-6}$. Cette probabilité est très sensiblement inférieure au seuil d'acceptabilité.

Le scénario de brèche correspond à la rupture de la partie supérieure du quai Saint-Pierre sur un linéaire de 50 m au droit du cimetière. Dans ce secteur, la dénivelée entre la cote d'eau atteinte par le Rhône et la zone protégée est la plus haute en rive droite.

La zone inondée par la brèche figure ci-dessous. L'ensemble de la zone urbanisée du défluent a été inondé. Les hauteurs d'eau peuvent dépasser 2 m et les populations du quartier de Trinquetaille paraissent particulièrement exposées. Les conséquences de la brèche sont désastreuses.

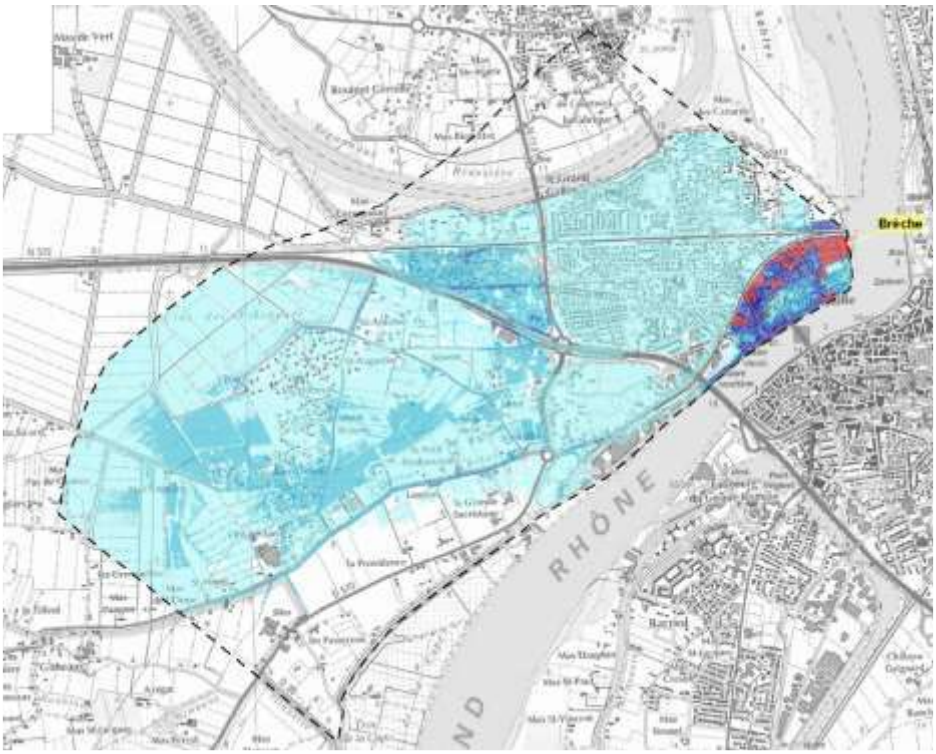


Figure 157. EI 14160 – Brèche Trinquetaille – GRD 282,0 - Hauteur d'eau maximale (en m)

La figure ci-après, qui zoome sur le centre-ville de Trinquetaille delimite la zone du ¼ heure en cas de brèche. La partie basse du quartier de Trinquetaille est submergée. Elle inclut des zones urbanisées dense. La zone inondée s'étend jusqu'à la voie ferrée à plus de 500 m du fleuve.

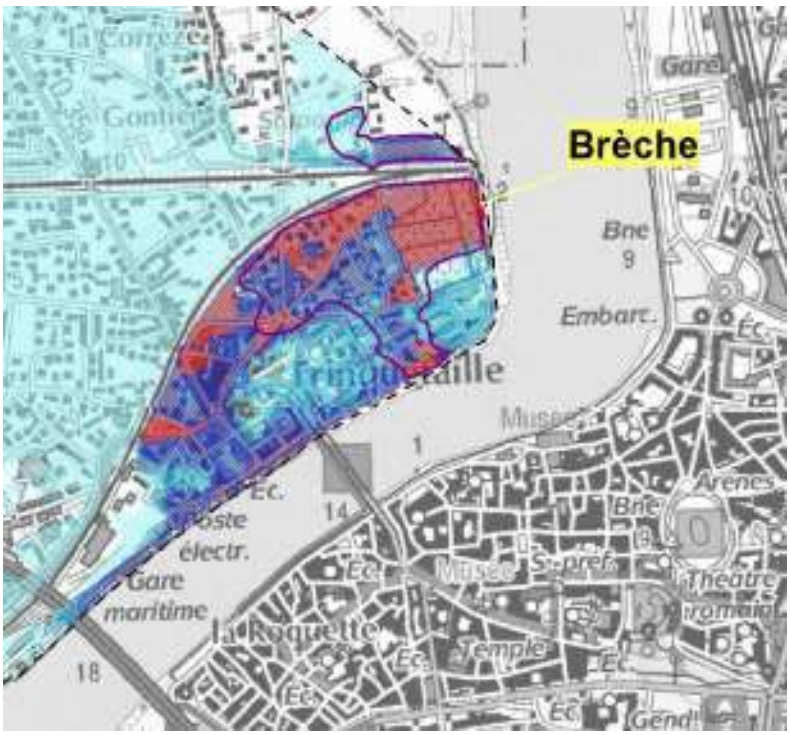


Figure 158. EI 14160 – Brèche Trinquetaille – GRD 282,0 - zone inondée en ¼ d'heure

6.9 BRECHE DE MONTLONG

3 crues ont été modélisées pour cette brèche dans l'état initial : 11500 ; 12500 et 14160.

Une variation de la largeur de brèche a été opérée pour la crue 12500.

6.9.1 Crue 11500 – Etat actuel/initial – Brèche Montlong – GRD 289,2

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située au GRD 289,2 juste en aval du tronçon de digue du Grand Rhône Rive Droite, conforté entre 1998 et 2006. Le scénario de crue est celui d'une crue équivalente à celle de décembre 2003 (débit de pointe de 11 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,008, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 55 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,55 X 0,008 ≅ 0,4 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 3.10^{-2}. (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 200 mètres,
- Temps d'ouverture : 2 heures,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 3,5 m NGF,
- Cote de la crue : 6,3 m NGF.

Le débit de pointe modélisé de la brèche est estimé à environ 1500 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 50 heures et le volume de déversement à environ 200 millions de m^3.

Ce scénario d'inondation a été modélisé en supposant que les digues de Salin de Giraud (tracé initial de 2012) et du Petit Rhône 1ère priorité étaient renforcées. Des déversements sans brèche sur les deux digues résistantes à la surverse ont également été pris en compte. Les volumes de déversements en provenance de ces deux digues résistantes à la surverse sont :

- Volume surverse Salin de Giraud : env. 20 millions de m^3 (débit pointe 380 m^3/s),
- Volume surverse Petit Rhône : env. 7 millions de m^3 (débit de pointe 90 m^3/s).

Ces apports sont en deçà des incertitudes liées aux hypothèses de modélisation. On notera que les eaux en provenance du Petit Rhône et de la brèche se mélangent mais que celles en provenance de Salin de Giraud et de la brèche ne se mélangent pas.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

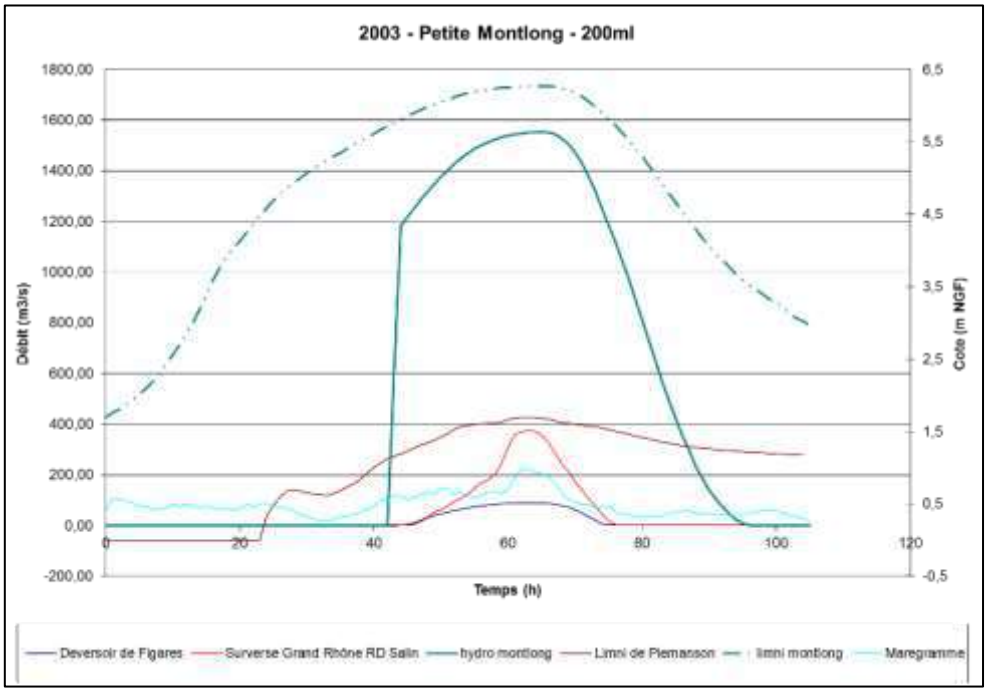


Figure 159. EI 11500 – Brèche Montlong – GRD 289,2 - Hydrogramme de brèche

Les figures ci-après illustrent respectivement la cartographie des vitesses d'écoulement et le profil d'écoulement en aval de la brèche. La vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 200 et 700 m de la digue.

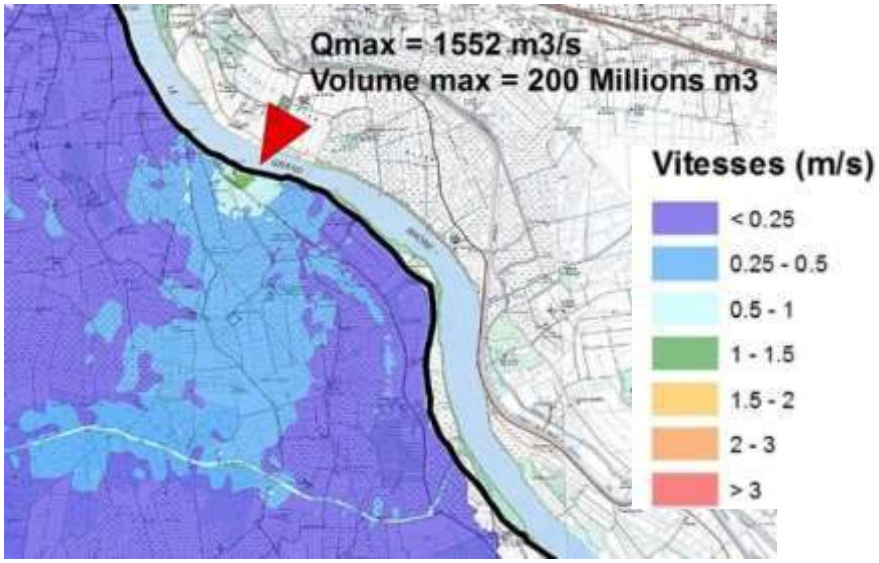
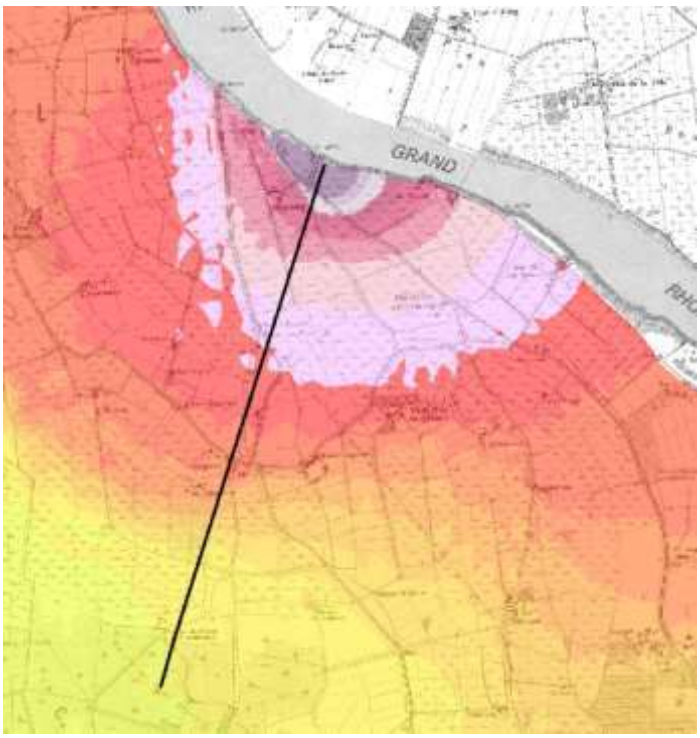


Figure 160. EI 11500 – Brèche Montlong – GRD 289,2 - Vitesse maximum (m/s)



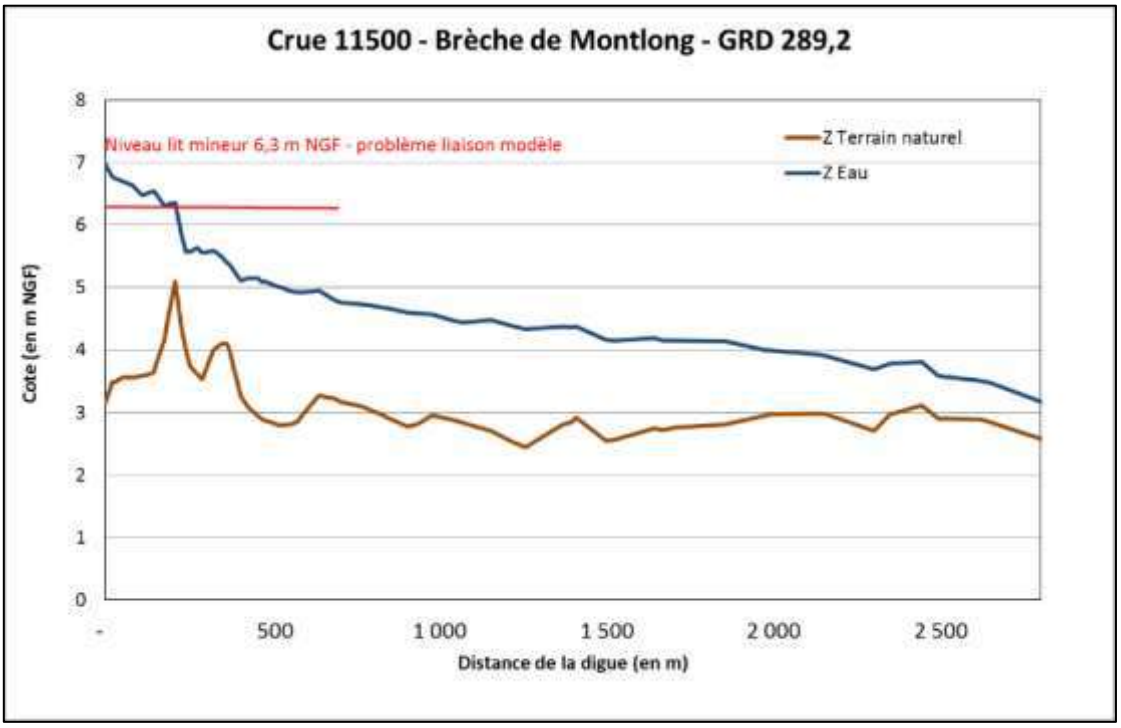


Figure 161. EI 11500 – Brèche Montlong – GRD 289,2 - Profil d'écoulement en aval de la brèche

On note sur ce profil un problème de liaison du modèle qui a été des effets sur les 200 premiers mètres, où les cotes d'eau en aval de la brèche sont supérieures aux niveaux dans le lit mineur. On note une perte de charge au droit de la RD36 située juste en aval. Les écoulements suivent la topographie du site. Les hauteurs d'eau sont de l'ordre de 2 mètres pendant 500 m et diminuent à moins de 1 mètre à 2000 mètres de la digue.

La figure ci-après donne le temps d'arrivée de l'onde de rupture :

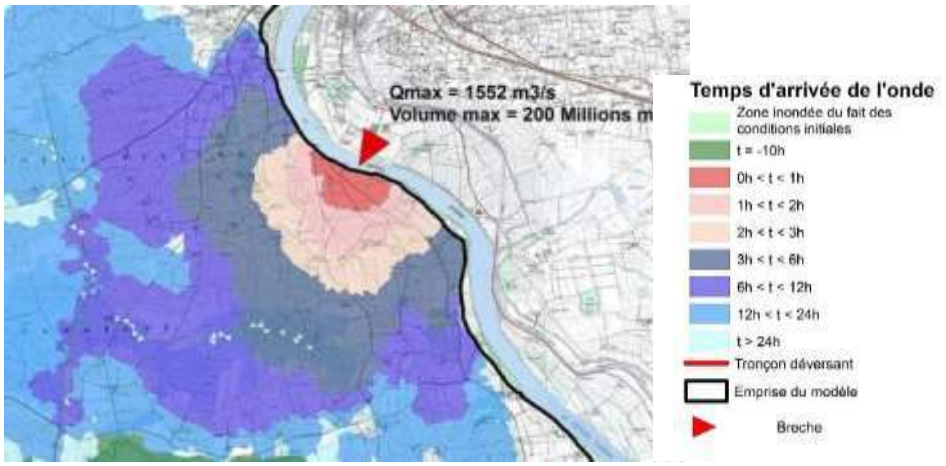


Figure 162. EI 11500 – Brèche Montlong – GRD 289,2 - Temps de propagation (h)

La figure ci-après est plus précise. Elle illustre les hauteurs d'eau en fonction du temps. Après une heure, les hauteurs d'eau entre la digue et la RD36 sont supérieures à 1 mètre. Le village de Gageron est atteint au bout de trois heures. L'inondation dans les marais de la Grand Mar débute après six heures.

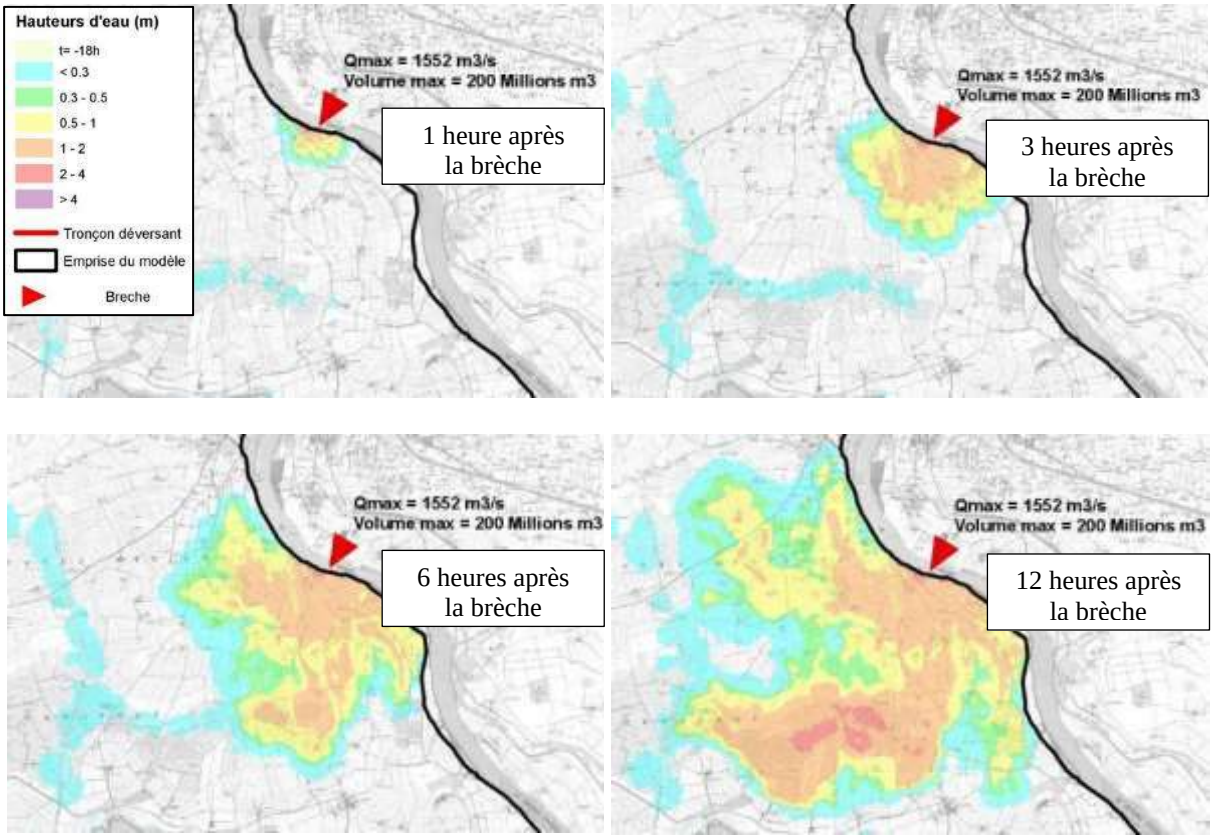


Figure 163. EI 11500 – Brèche Montlong – GRD 289,2 - Hauteur d'eau en fonction du temps

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

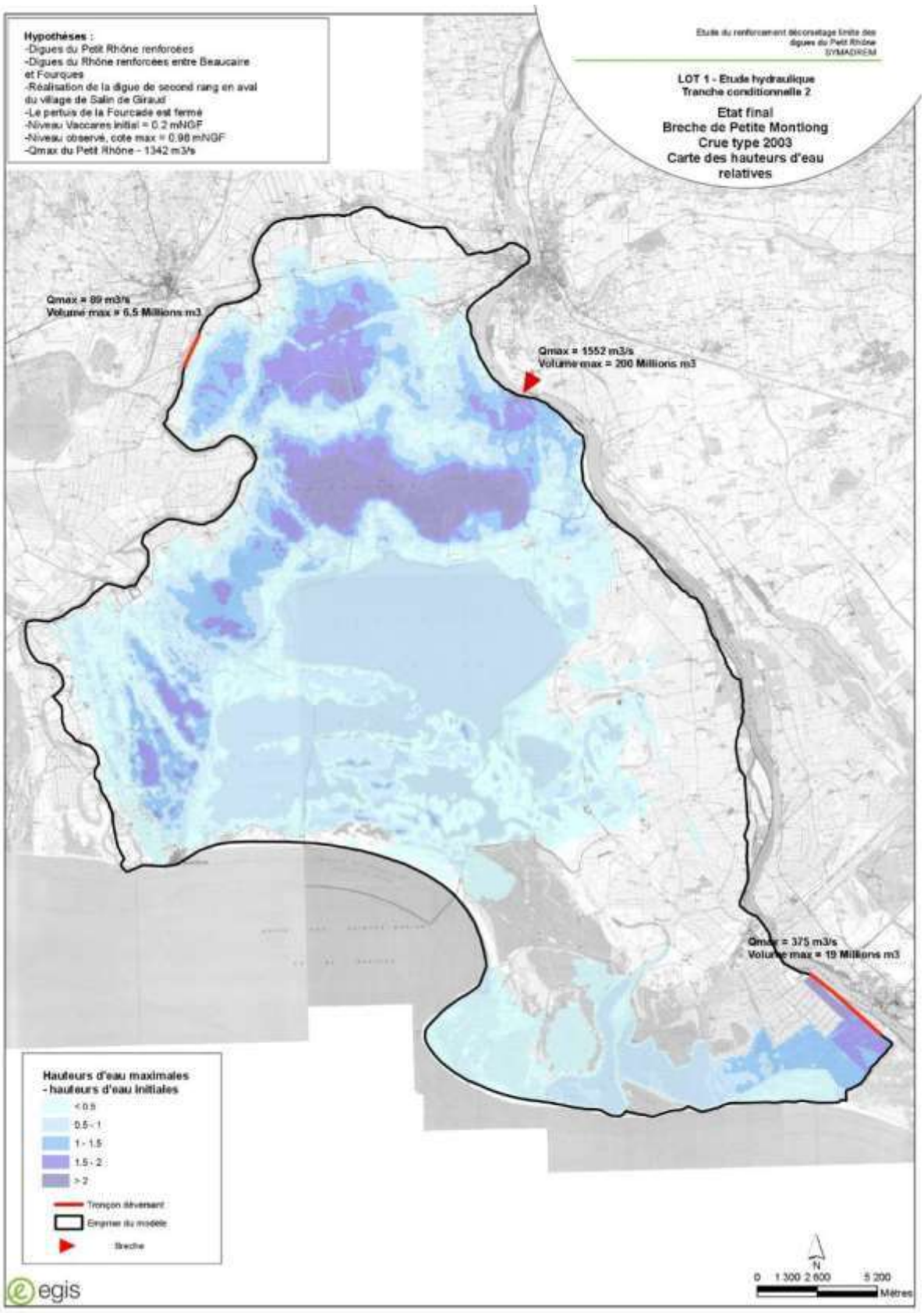


Figure 164. EI 11500 – Brèche Montlong – GRD 289,2 - Hauteur d'eau maximale (en m)

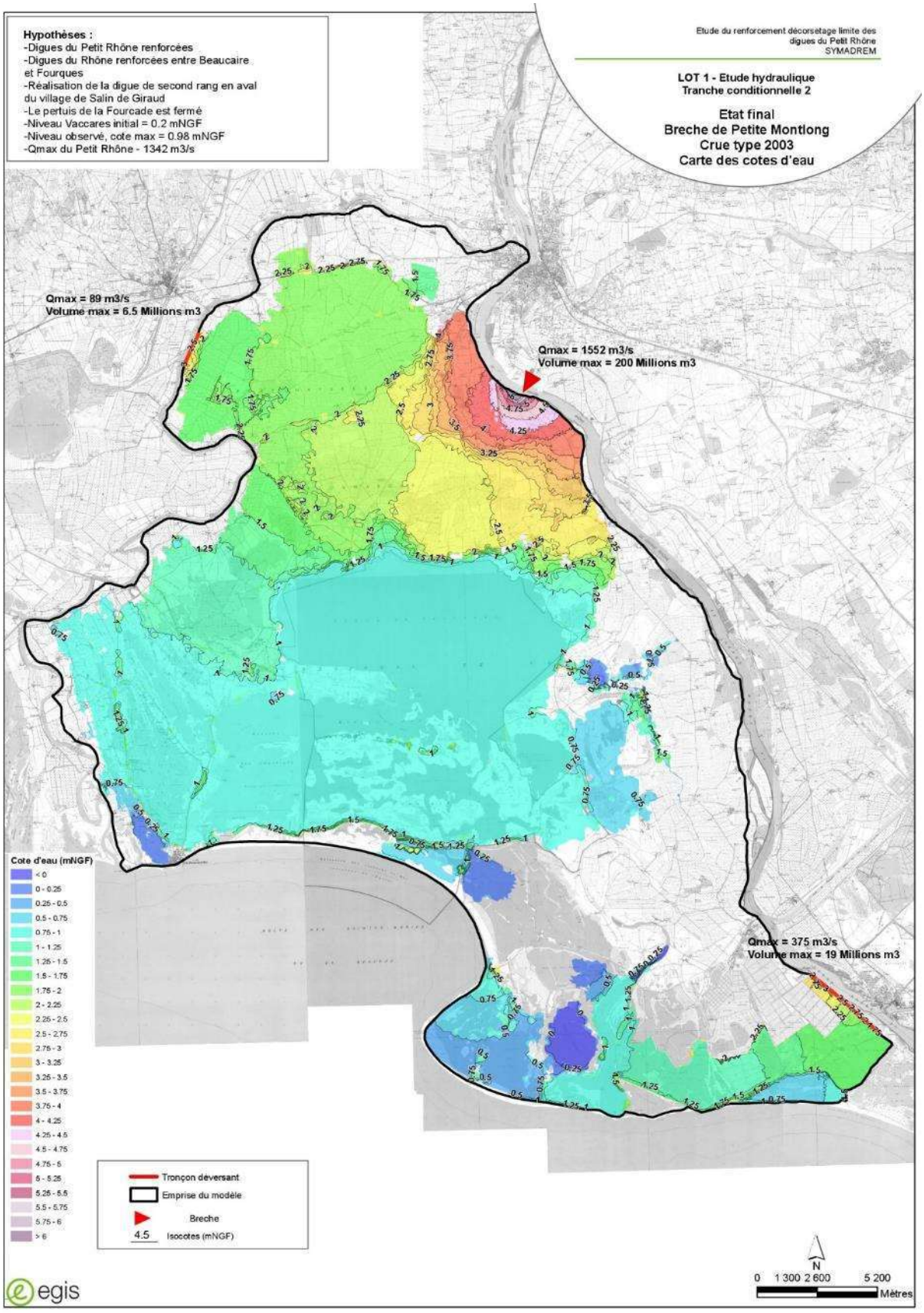


Figure 165. EI 11500 – Brèche Montlong – GRD 289,2 – Cote d'eau maximale (en m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 38. EI 11500 – Brèche Montlong – GRD 289,2 –Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
10	Gimeaux	1,75	0	0,1	0,6
12	Clos du Mas Neuf	2,00	0	0	0,6
13	Marais du Pont de Rousty	2,00	0,1	1,5	2,5
14	Marais de la Grand Mar	3,00	0,2	2,1	2,9
15	Montlong	5,00	1,4	2,2	3,2
16	Etang du Vaccarès	1,00	0	0,5	0,8
20	Abords digue Petite Montlong Beaujeu	5,50	1,6	2,4	3,1
21	Abords digue Beaujeau Tourtoulen	3,25	0	0,5	0,9
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	2,00	0	0	0,7
30	Saliers	2,00	0	0,4	1,5
31	Marais de Saliers	2,00	0,2	1,4	2,0
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	2,00	0	0,5	1,6
34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage	0,75	0	0	0,4
35	Amarée Dromard	0,75	0	0,3	0,7
36	Panperdu Etang des Launes	1,00	0	0,4	0,9
37	Etang de Ginès	1,00	0,1	0,8	0,9
38	Saintes-Maries-de-la-Mer	1,25	0	0,1	0,5
39	Paty trinité	1,75	0,2	1,2	1,7
40	Vaccarès Est	1,00	0	0,2	0,7

6.9.2 Crue 12500 – Etat actuel/initial – Brèche Montlong 200 m – GRD 298,2

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située au GRD 289,2 juste en aval du tronçon de digue du Grand Rhône Rive Droite conforté entre 1998 et 2006. Le scénario de crue est celui d'une crue équivalente à celle de mai 1856 (débit de pointe de 12 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée et dans les conditions actuelles d'écoulement.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,006, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 55 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,55 X 0,006 ≅ 0,3 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 3.10^{-2}. (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 200 mètres,
- Temps d'ouverture : 2 heures,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 3,5 m NGF,
- Cote de la crue : 6,5 m NGF.

Le débit de pointe modélisé de la brèche est estimé à environ 1750 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 100 heures et le volume de déversement à environ 450 millions de m^3.

Ce scénario d'inondation a été modélisé en supposant que les digues de Salin de Giraud (tracé initial de 2012) et du Petit Rhône 1ère priorité étaient renforcées. Des déversements sans brèche sur les deux digues résistantes à la surverse ont également été pris en compte. Les volumes de déversements en provenance de ces deux digues résistantes à la surverse sont :

- Volume surverse Salin de Giraud : env. 90 millions de m^3 (débit pointe 800 m^3/s),
- Volume surverse Petit Rhône : env. 20 millions de m^3 (débit pointe 140 m^3/s).

Ces apports sont en deçà des incertitudes liées aux hypothèses de modélisation. On notera que les eaux en provenance du Petit Rhône et de la brèche se mélangent mais que celles en provenance de Salin de Giraud et de la brèche ne se mélangent pas.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

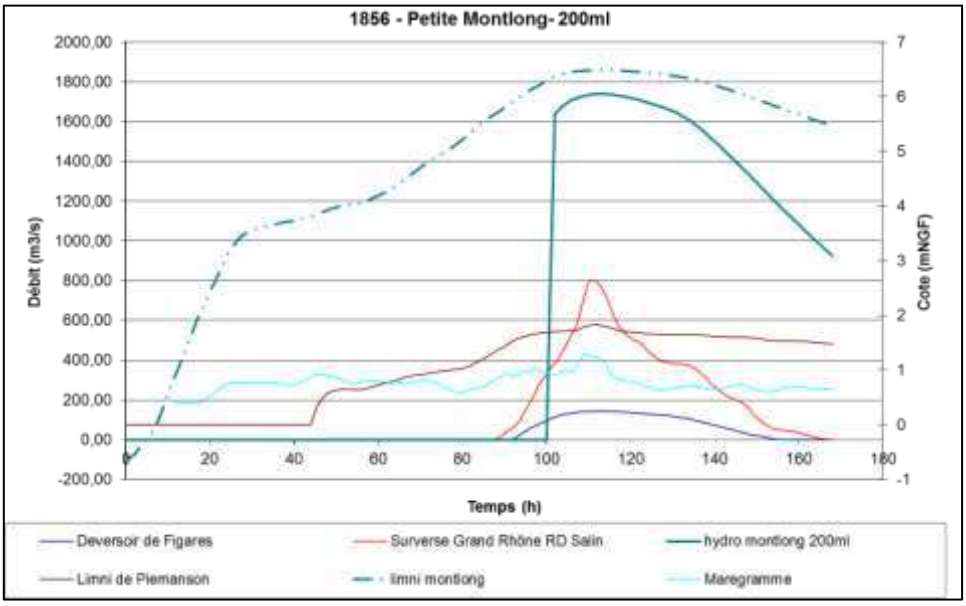


Figure 166. EI 12500 – Brèche Montlong 200 – GRD 289,2 – Hydrogramme de brèche

Les trois cartes ci-après illustrent respectivement les hauteurs d'eau maximum (avec prise en compte de la bathymétrie dans le Vaccarès), les temps de propagation et les vitesses d'écoulement maximum atteintes au sein de la zone protégée.

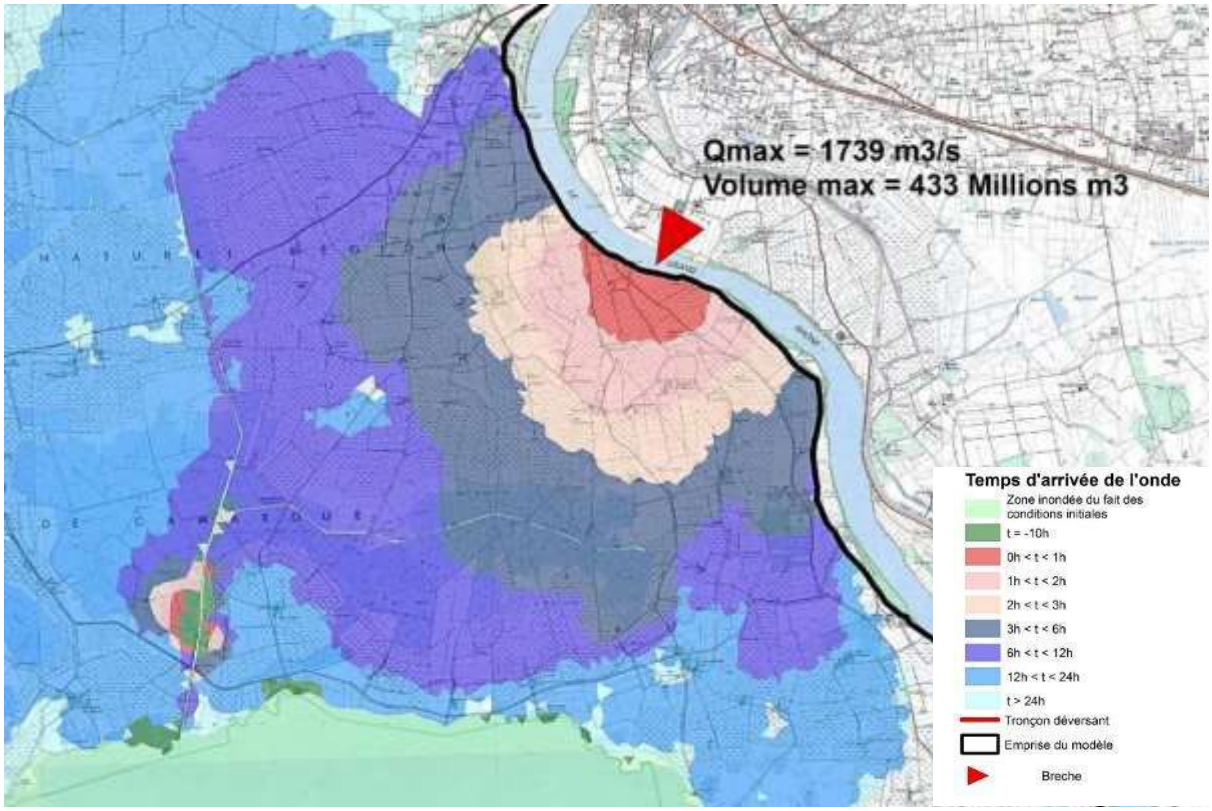


Figure 167. EI 12500 – Brèche Montlong 200 – GRD 289,2 – Temps de propagation (h)

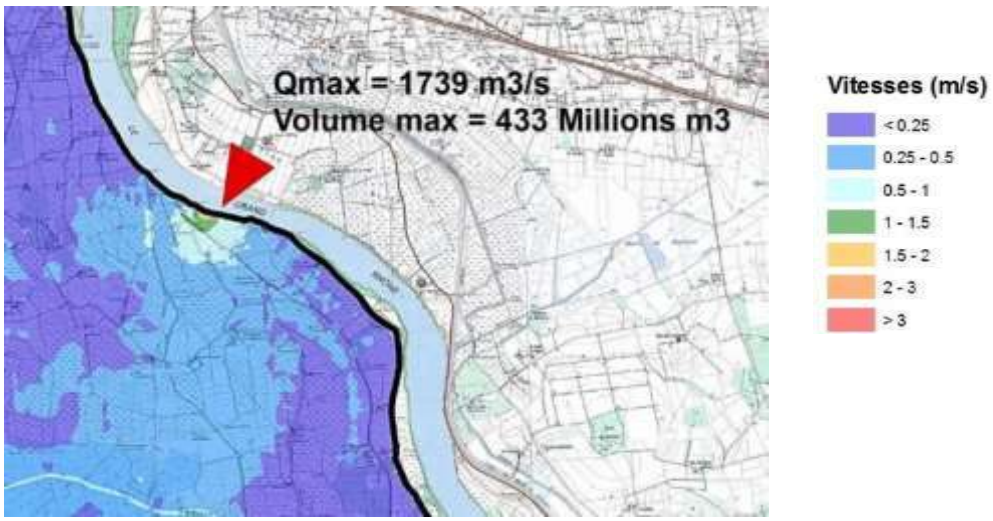


Figure 168. EI 12500 – Brèche Montlong 200 – GRD 289,2 – Vitesse maximum (m/s)

Comme pour la brèche EI 11500 avec un débit de 1500 m^3/s, la vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 200 et 700 m de la digue.

Le profil d'écoulement en aval de la brèche non représenté suit un comportement analogue.

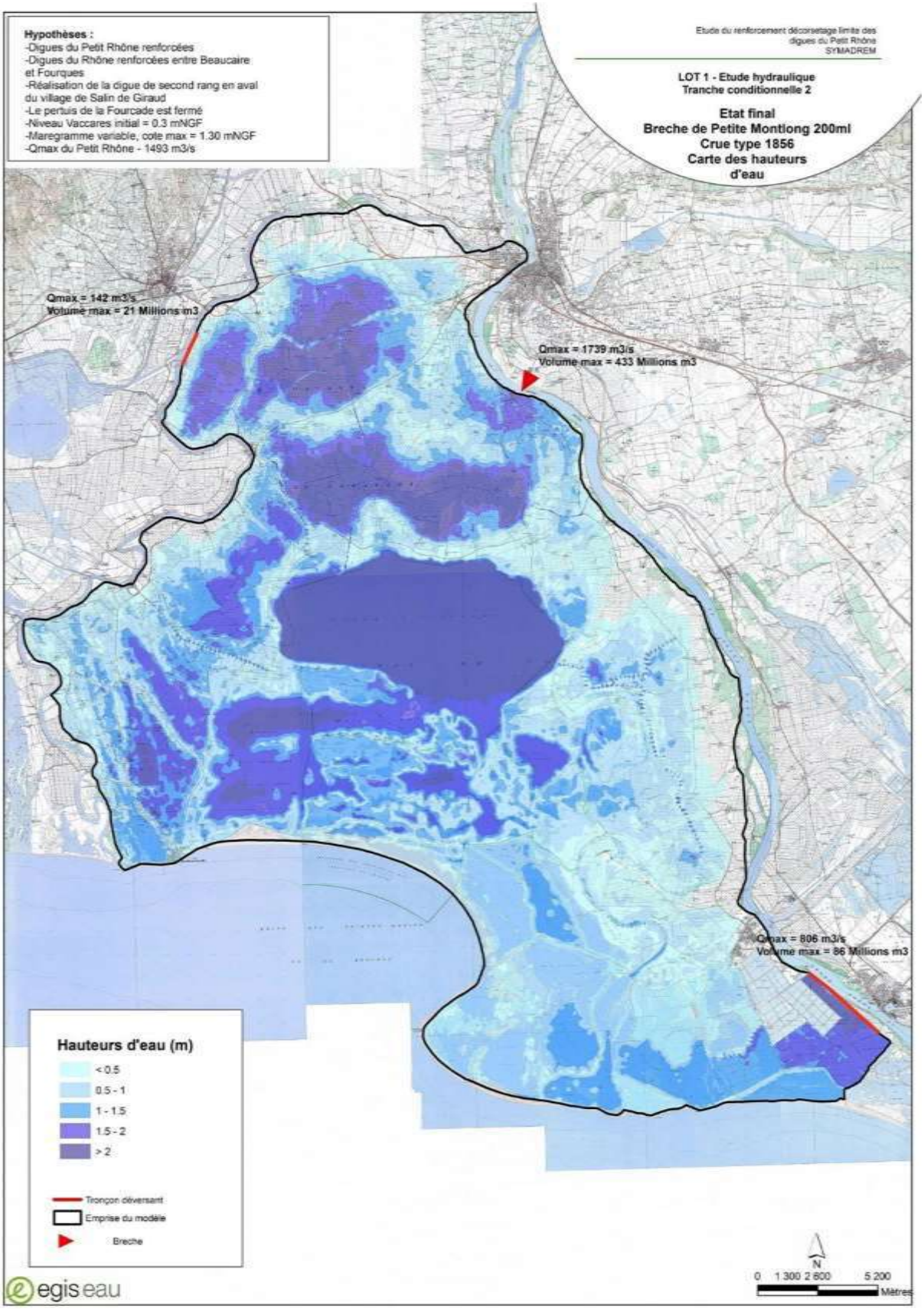


Figure 169. EI 12500 – Brèche Montlong 200 – GRD 289,2 – Hauteur d'eau maximale (avec prise en compte de la bathymétrie dans le Vaccarès) (en m)

6.9.3 Crue 12500 – Etat actuel/initial – Brèche Montlong 400 m – GRD 298,2

Ce scénario est identique au précédent à l'exception de l'extension finale de la brèche qui n'est plus de 200 m mais de 400 m. Il correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située au GRD 289,2 juste en aval du tronçon de digue du Grand Rhône Rive Droite, conforté entre 1998 et 2006. Le scénario de crue est celui d'une crue équivalente à celle de mai 1856 (débit de pointe de 12 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée et dans les conditions actuelles d'écoulement.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,006, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 55 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,55 X 0,006 ≅ 0,3 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 3.10^{-2}. (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 200 mètres,
- Temps d'ouverture : 5 heures,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 3,5 m NGF,
- Cote de la crue : 6,5 m NGF.

Le débit de pointe modélisé de la brèche est estimé à environ 3500 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : plus de 100 heures et le volume de déversement à environ 900 millions de m^3.

Ce scénario d'inondation a été modélisé en supposant que les digues de Salin de Giraud (tracé initial de 2012) et du Petit Rhône 1ère priorité étaient renforcées. Des déversements sans brèche sur les deux digues résistantes à la surverse ont également été pris en compte. Les volumes de déversements en provenance de ces deux digues résistantes à la surverse sont :

- Volume surverse Salin de Giraud : env. 90 millions de m^3 (débit pointe 800 m^3/s),
- Volume surverse Petit Rhône : env. 20 millions de m^3 (débit pointe 140 m^3/s).

Ces apports sont en deçà des incertitudes liées aux hypothèses de modélisation. On notera que les eaux en provenance du Petit Rhône et de la brèche se mélangent mais que celles en provenance de Salin de Giraud et de la brèche ne se mélangent pas.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

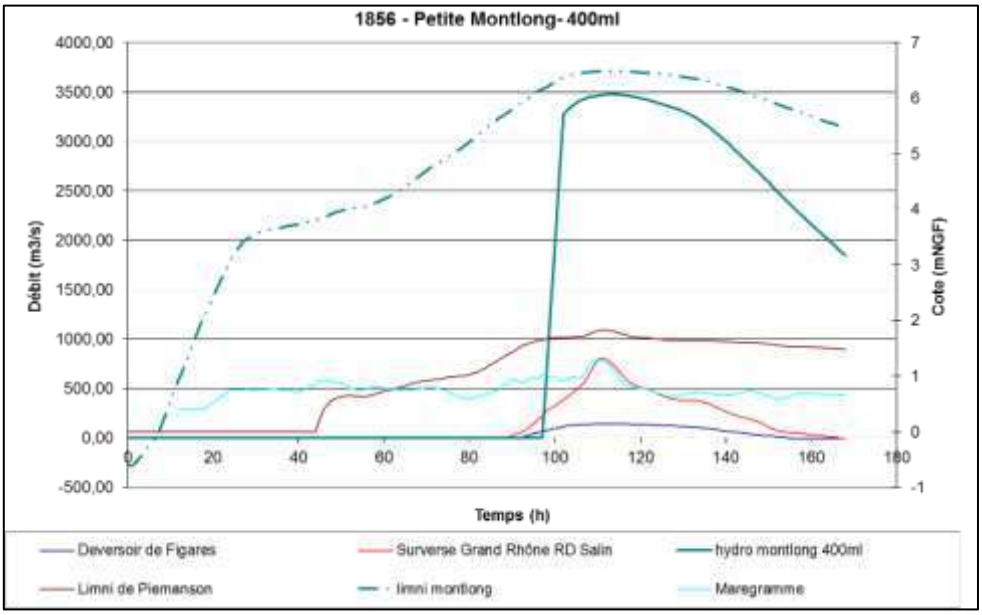


Figure 170. EI 12500 – Brèche Montlong 400 – GRD 289,2 – Hydrogramme de brèche

La carte ci-après illustre les vitesses d'écoulement en aval de la brèche.

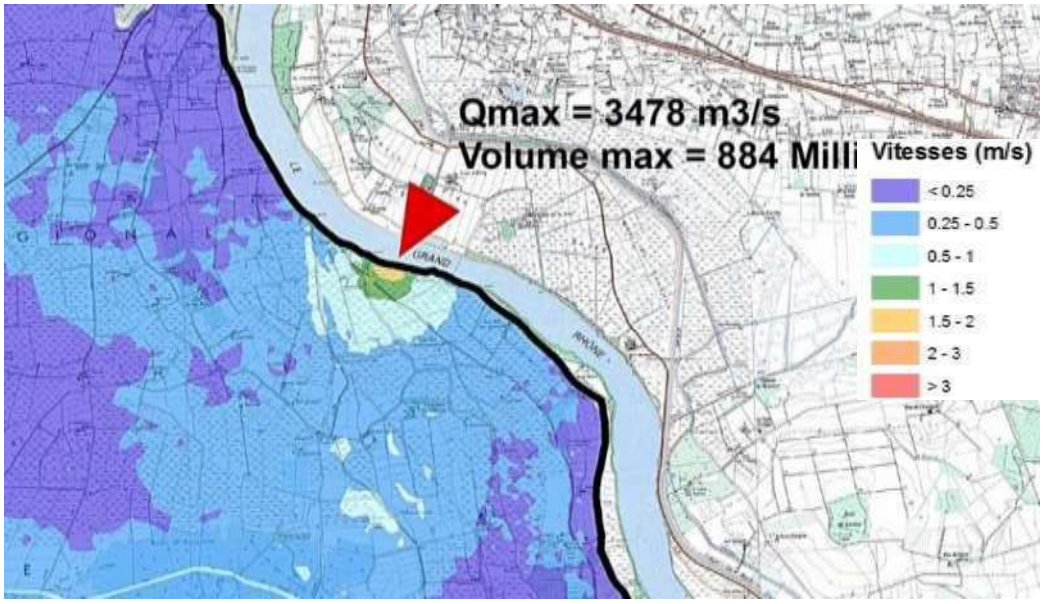


Figure 171. EI 12500 – Brèche Montlong 400 – GRD 289,2 – Vitesse maximum (m/s)

La vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 450 et 1200 m de la digue.

Le profil d'écoulement en aval de la brèche non représenté suit un comportement similaire avec des hauteurs d'eau sensiblement supérieures.

La figure ci-dessous donne le temps de propagation de l'onde de rupture, qui est quasiment identique à l'EI 11500. En revanche, comme indiqué plus haut, les hauteurs d'eau sont sensiblement supérieures.

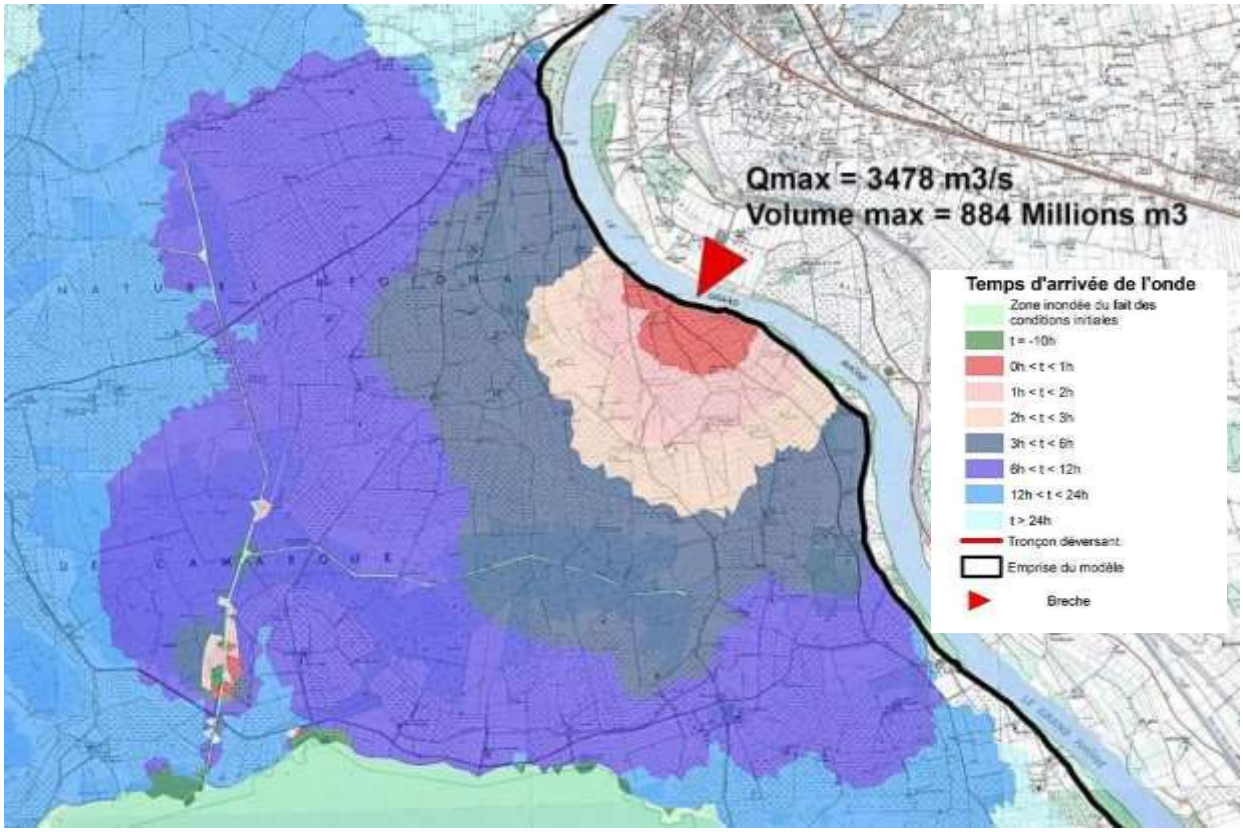


Figure 172. EI 12500 – Brèche Montlong 400 – GRD 289,2 – Temps de propagation (h)

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

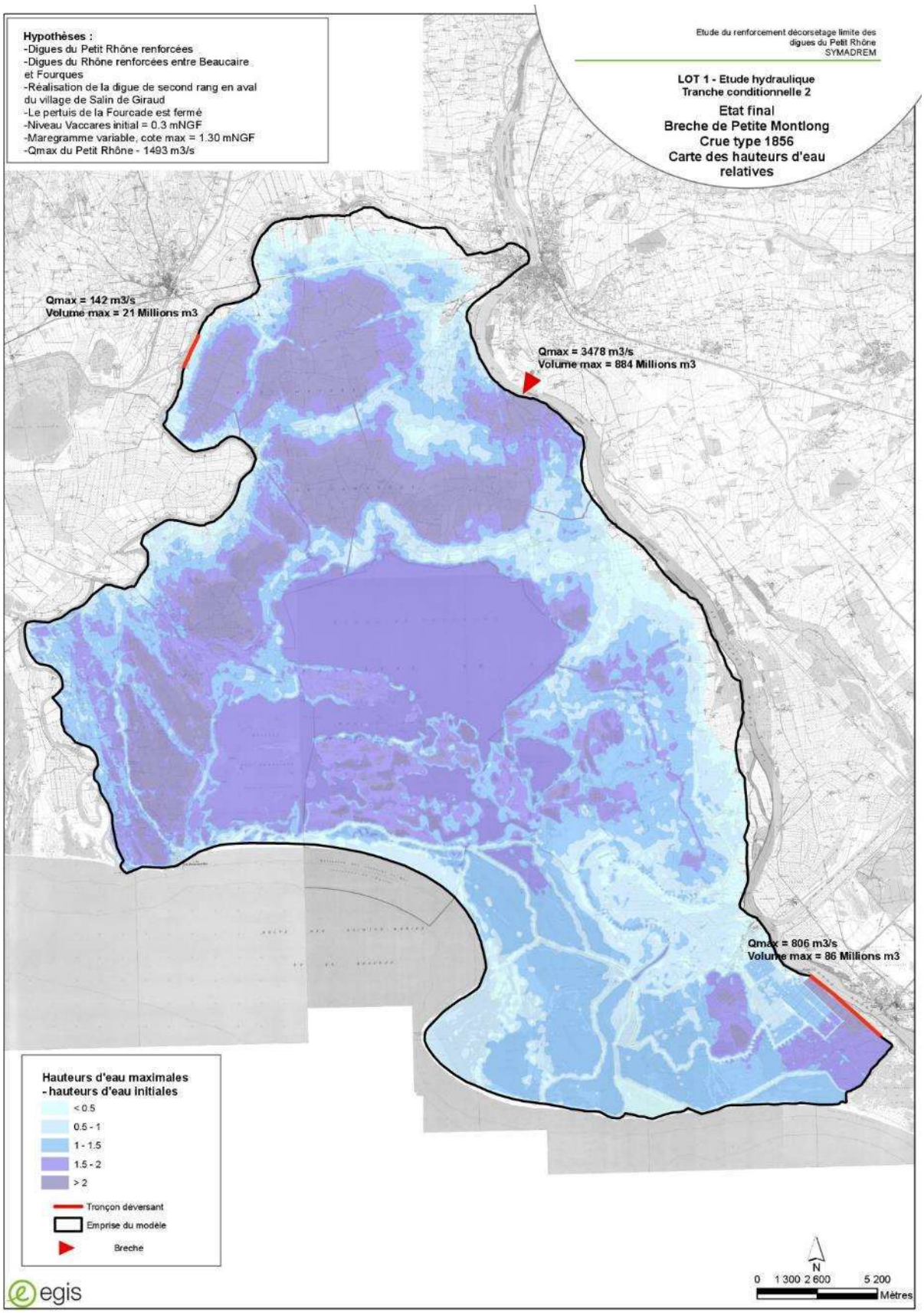


Figure 173. EI 12500 – Brèche Montlong 400 – GRD 289,2 – Hauteur d'eau maximale (en m)

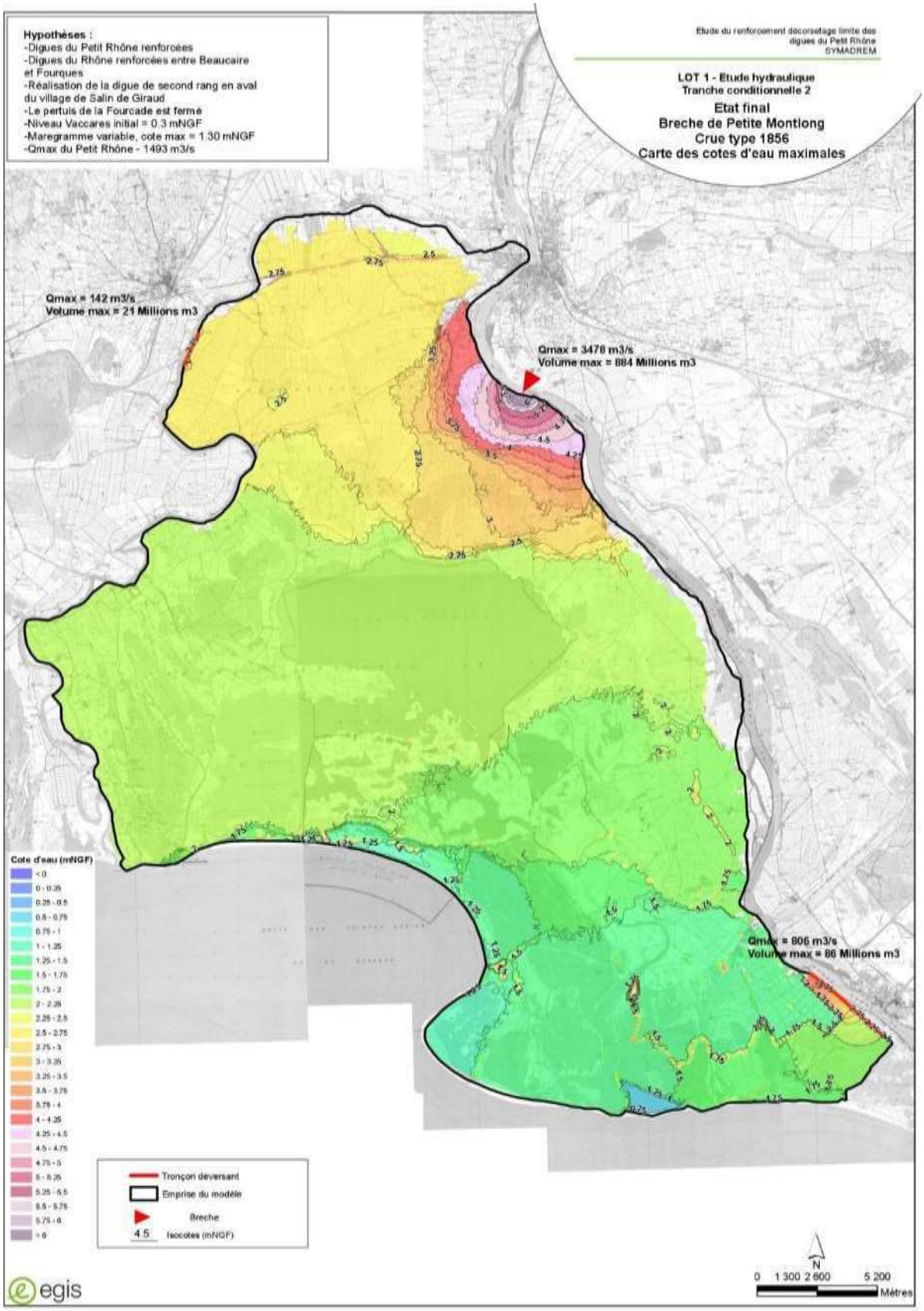


Figure 174. EI 12500 – Brèche Montlong 400 – GRD 289,2 – Cote d'eau maximale (m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 39. EI 12500 – Brèche Montlong 400 – GRD 289,2 – Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
9	A54 Est	2,50	0	0,2	0,9
10	Gimeaux	2,75	0	1,1	1,6
11	La Grande Sacristane	4,25	0	0,8	1,8
12	Clos du Mas Neuf	2,75	0	0,6	1,4
13	Marais du Pont de Rousty	2,75	0,9	2,2	3,2
14	Marais de la Grand Mar	3,25	0,4	2,3	3,1
15	Montlong	5,25	1,6	2,5	3,4
16	Etang du Vaccarès	2,25	1,1	1,7	2,1
17	Armelière Sambuc Chamone	2,25	0	0,7	1,5
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	1,75	0,6	1,1	1,6
19	Salin de Giraud	1,75	0,1	0,6	1,1
20	Abords digue Petite Montlong Beaujeu	6,00	2,1	2,9	3,6
21	Abords digue Beaujeau Tourtoulen	3,50	0	0,7	1,2
23	Abords digue Commanderie Boisverdun	2,25	0	0,4	1,2
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	2,25	0,1	0,7	1,4
25	Abords digue Salin de Giraud	2,00	0	0,7	1,5
26	Salins du midi sud-est	1,75	0,5	1,0	1,5
28	Abords digue A54 Pont de Cavalès	2,75	0	0	0,5
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	2,75	0	0,6	1,4
30	Saliers	2,75	0,2	1,1	2,3
31	Marais de Saliers	2,75	1,0	2,2	2,8
32	Albaron	2,75	0	0	0,6
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	2,25	0	0,8	1,8
34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage	2,25	0,6	1,3	1,9
35	Amarée Dromard	2,25	1,2	1,8	2,2
36	Panperdu Etang des Launes	2,25	1,0	1,6	2,2

37	Etang de Ginès	2,25	**1,4**	**2,1**	**2,2**
38	Saintes-Maries-de-la-Mer	2,25	**0,4**	**1,1**	**1,5**
39	Paty trinité	2,25	**0,7**	**1,7**	**2,2**
40	Vaccarès Est	2,25	**0,3**	**1,5**	**1,9**
41	Esquineau	1,75	**0**	**1,0**	**1,4**

Les deux figures ci-après donne les hauteurs d'eau maximales dans la zone protégée (avec prise en compte de la bathymétrie du Vaccarès) pour respectivement les scénarios de brèche EI 12500 – Brèche 200 ml et EI 12500 – Brèche 400 ml. Ces deux simulations donnent des extensions d'inondation quasiment équivalentes, seules les hauteurs d'eau diffèrent.

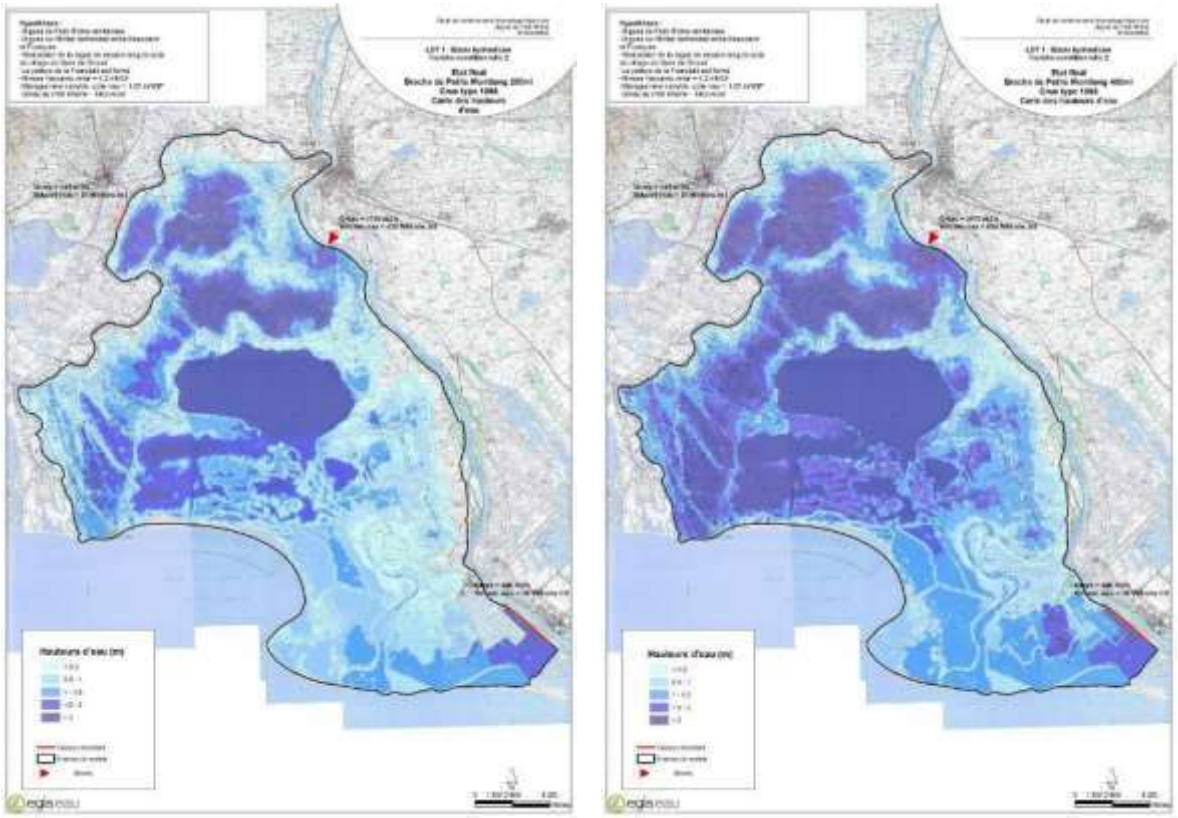


Figure 175. EI 12500 – Comparaison brèches Montlong 200 & 400 - hauteur d'eau maximale (en m)

6.9.4 Crue 14160 – Etat actuel/initial – Brèche Montlong – GRD 289,2

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située au GRD 289,2 juste en aval du tronçon de digue du Grand Rhône Rive Droite conforté entre 1998 et 2006.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 60 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,6 X 0,001 < 0,1 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 3.10^{-2}. (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 400 mètres,
- Temps d'ouverture : 5 heures,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 3,5 m NGF,
- Cote de la crue : 6,6 m NGF.

Le débit de pointe modélisé de la brèche est estimé à environ 3700 m^3/s et le volume de déversement à environ 1200 millions de m^3.

Ce scénario d'inondation a été modélisé en supposant que les digues de Salin de Giraud (tracé initial de 2012) et du Petit Rhône 1ère priorité étaient renforcées. Des déversements sans brèche sur les deux digues résistantes à la surverse ont également été pris en compte. Les volumes de déversements en provenance de ces deux digues résistantes à la surverse sont :

- Volume surverse Salin de Giraud : ≅ 350 millions de m^3 (débit pointe ≅ 1000 m^3/s),
- Volume surverse Petit Rhône : ≅ 35 millions de m^3 (débit pointe ≅ 175 m^3/s).

Les eaux en provenance des déversements et de la brèche se mélangent, mais ne sont pas de nature à modifier la caractérisation de l'aléa dans la zone protégée.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

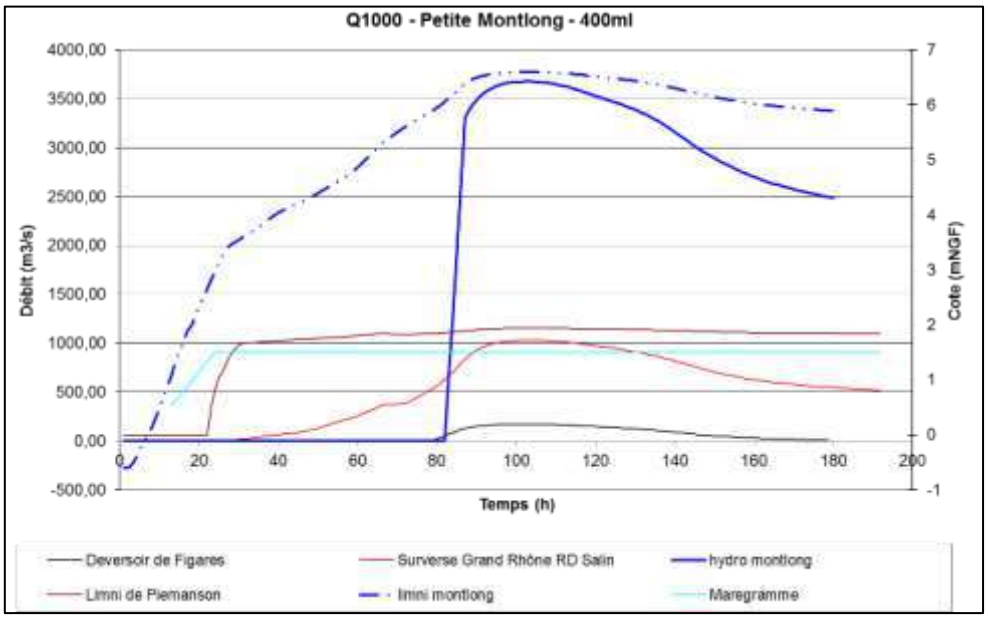


Figure 176. EI 14160 – Brèche Montlong – GRD 289,2 – Hydrogramme de brèche

La carte ci-après illustre les vitesses d'écoulement en aval de la brèche. A l'instar de la brèche Montlong 400 ml de l'EI 12500, la vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 450 et 1200 m de la digue.

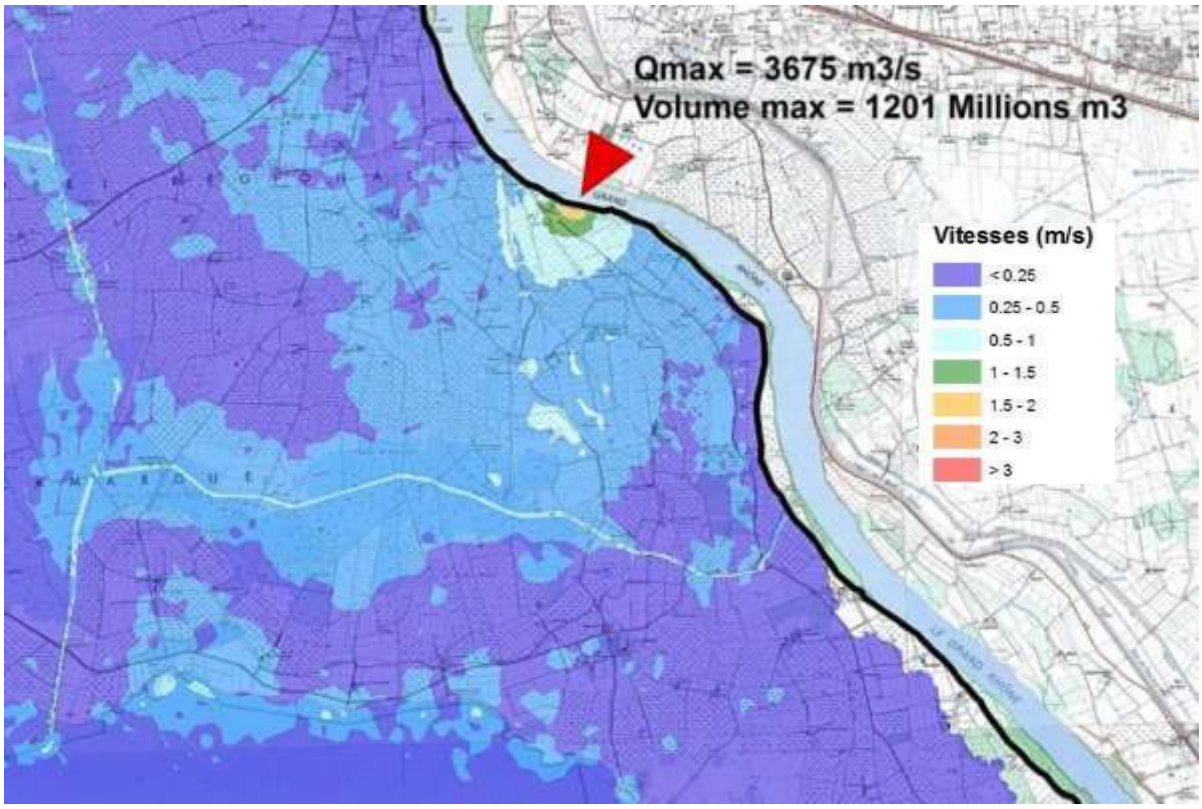


Figure 177. EI 14160 – Brèche Montlong – GRD 289,2 – Vitesse maximum (m/s)

Le profil d'écoulement en aval de la brèche non représenté suit un comportement similaire avec des hauteurs d'eau sensiblement supérieures à l'EI 11500 mais équivalentes à l'EI 12500.

La figure ci-dessous donne le temps de propagation de l'onde de rupture, qui est quasiment identique à l'EI 11500. En revanche, comme indiqué plus haut, les hauteurs d'eau sont sensiblement supérieures.

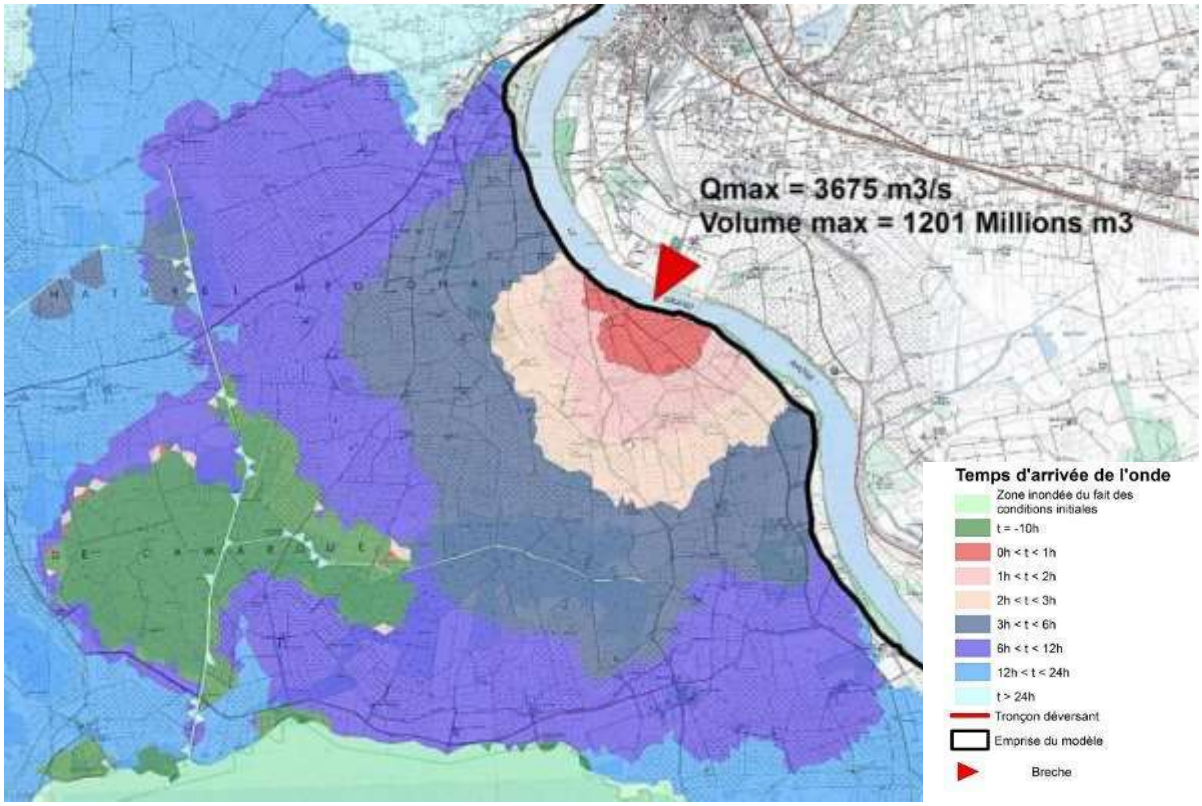


Figure 178. EI 14160 – Brèche Montlong – GRD 289,2 – Temps de propagation (h)

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

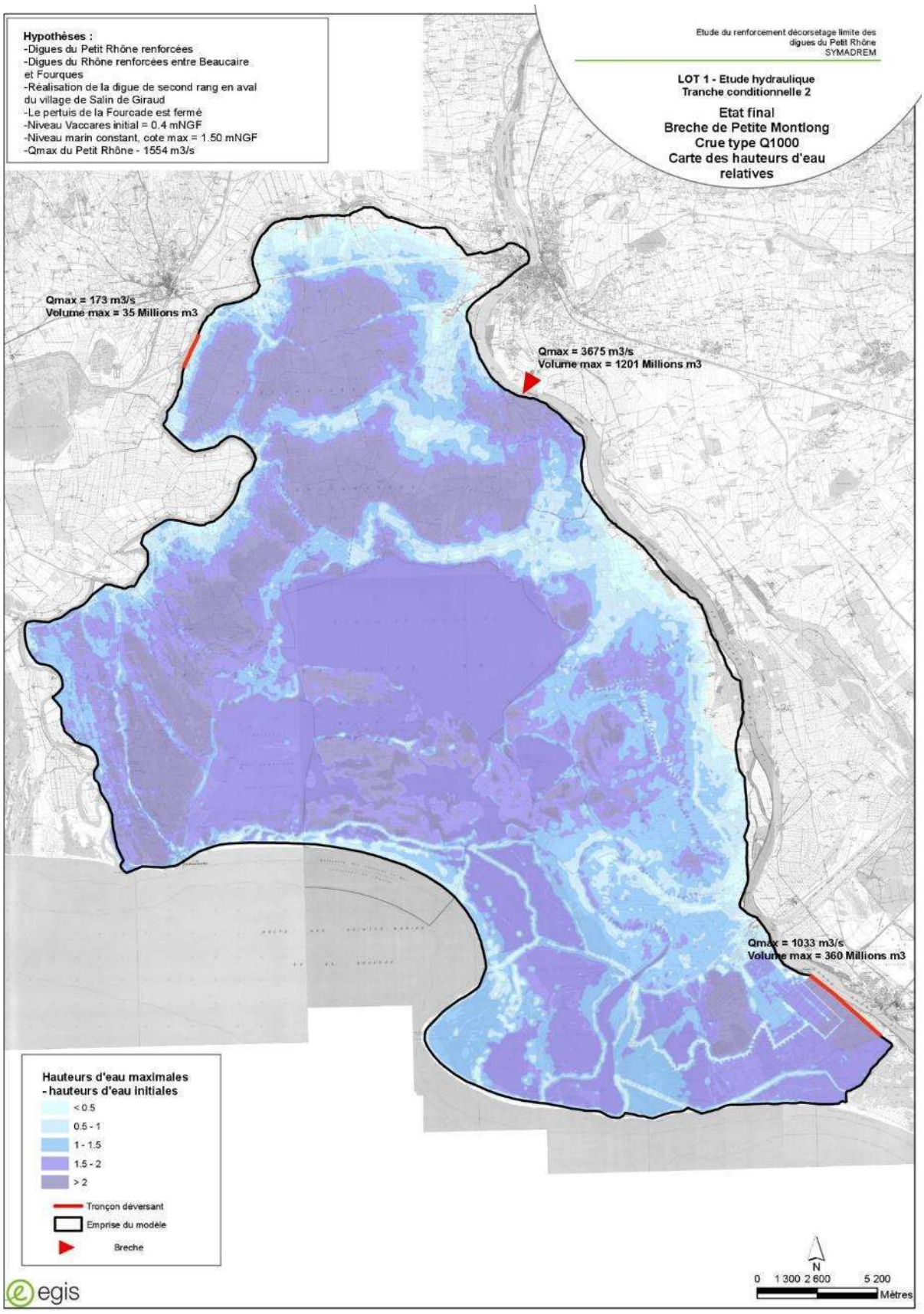


Figure 179. EI 14160 – Brèche Montlong – GRD 289,2 – Hauteur d'eau maximale (en m)

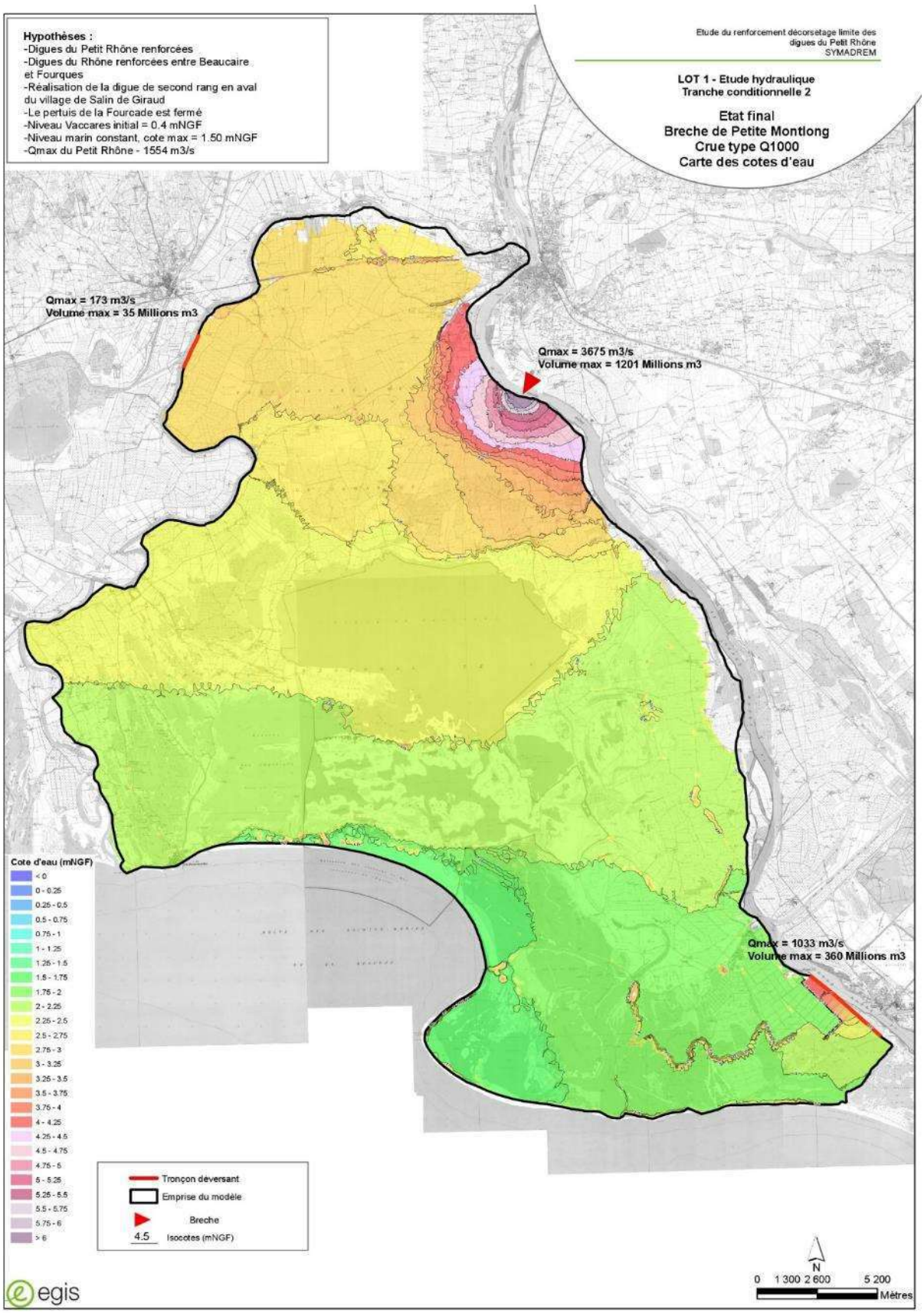


Figure 180. EI 14160 – Brèche Montlong – GRD 289,2 – Cote d'eau maximale (m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 40. EI 14160 – Brèche Montlong – GRD 289,2 – Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
9	A54 Est	2,75	0	0,4	1,2
10	Gimeaux	3,00	0,1	1,3	1,9
11	La Grande Sacristane	4,25	0	0,8	1,8
12	Clos du Mas Neuf	3,00	0,0	0,8	1,6
13	Marais du Pont de Rousty	3,00	1,1	2,5	3,5
14	Marais de la Grand Mar	3,25	0,4	2,3	3,1
15	Montlong	5,25	1,6	2,5	3,4
16	Etang du Vaccarès	2,50	1,4	2,0	2,3
17	Armelière Sambuc Chamone	2,25	0	0,7	1,5
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	2,00	0,8	1,4	1,9
19	Salin de Giraud	2,00	0,3	0,8	1,4
20	Abords digue Petite Montlong Beaujeu	6,00	2,1	2,9	3,6
21	Abords digue Beaujeau Tourtoulen	3,50	0	0,7	1,2
23	Abords digue Commanderie Boisverdun	2,25	0	0,4	1,2
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	2,25	0,1	0,7	1,4
25	Abords digue Salin de Giraud	2,00	0	0,7	1,5
26	Salins du midi sud-est	2,00	0,8	1,3	1,8
28	Abords digue A54 Pont de Cavalès	3,00	0	0,1	0,7
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	3,00	0	0,9	1,7
30	Saliers	3,00	0,5	1,4	2,5
31	Marais de Saliers	3,00	1,2	2,4	3,0
32	Albaron	3,00	0	0,2	0,8
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	2,50	0	1,0	2,1
34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage	2,50	0,9	1,6	2,1
35	Amarée Dromard	2,25	1,2	1,8	2,2
36	Panperdu Etang des Launes	2,50	1,3	1,9	2,4

37	Etang de Ginès	2,25	**1,4**	**2,1**	**2,2**
38	Saintes-Maries-de-la-Mer	2,25	**0,4**	**1,1**	**1,5**
39	Paty trinité	2,50	**1,0**	**1,9**	**2,4**
40	Vaccarès Est	2,50	**0,6**	**1,7**	**2,2**
41	Esquineau	2,00	**0**	**1,2**	**1,7**

6.10 BRECHE D'AUGERY

3 crues ont été modélisées pour cette brèche dans l'état initial : 11500 ; 12500 et 14160.

Une variation de la largeur de brèche a été opérée pour la crue 12500.

6.10.1 Crue 11500 – Etat actuel/initial – Brèche Augery – GRD 294,5

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située au GRD 294,5 en aval du tronçon de digue GRD6. Le scénario de crue est celui d'une crue équivalente à celle de décembre 2003 (débit de pointe de 11 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,008, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 55 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,55 X 0,008 ≅ 0,4 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 3.10^{-2}. (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 200 mètres,
- Temps d'ouverture : 2 heures,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 3 m NGF,
- Cote de la crue : 5,6 m NGF.

Le débit de pointe modélisé de la brèche est estimé à environ 1400 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 50 heures et le volume de déversement à environ 180 millions de m^3.

Ce scénario d'inondation a été modélisé en supposant que les digues de Salin de Giraud (tracé initial de 2012) et du Petit Rhône 1ère priorité étaient renforcées. Des déversements sans brèche sur les deux digues résistantes à la surverse ont également été pris en compte. Les volumes de déversements en provenance de ces deux digues résistantes à la surverse sont :

- Volume surverse Salin de Giraud : env. 20 millions de m^3 (débit pointe 380 m^3/s),
- Volume surverse Petit Rhône : env. 7 millions de m^3 (débit de pointe 90 m^3/s).

Ces apports sont en deçà des incertitudes liées aux hypothèses de modélisation. On notera que les eaux en provenance du Petit Rhône et de la brèche se mélangent mais que celles en provenance de Salin de Giraud et de la brèche ne se mélangent pas.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

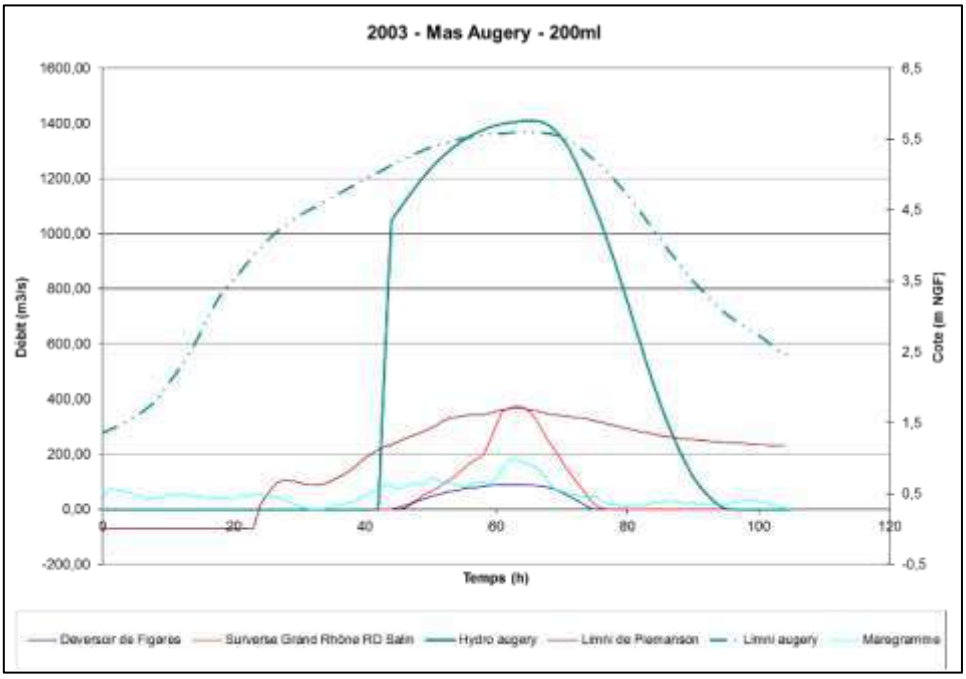


Figure 181. EI 11500 – Brèche Augery – GRD 294,5 - Hydrogramme de brèche

Les figures ci-après illustrent respectivement la cartographie des vitesses d'écoulement et le profil d'écoulement en aval de la brèche. La vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 250 et 700 m de la digue.

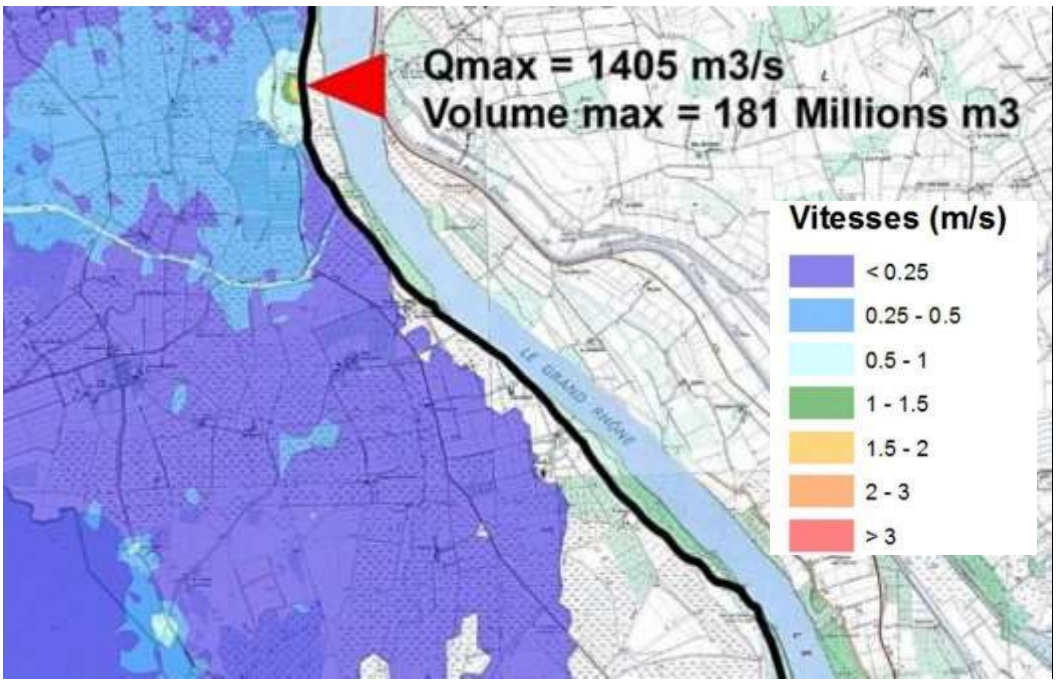
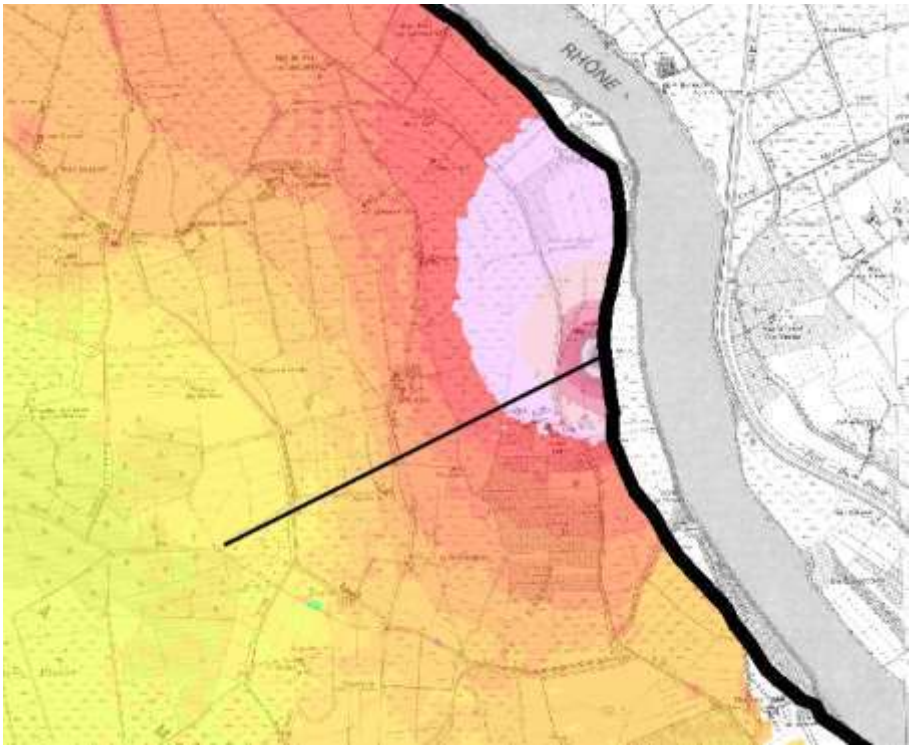


Figure 182. EI 11500 – Brèche Augery – GRD 294,5 - Vitesse maximum (m/s)

On note sur ce profil un problème de liaison du modèle, qui a été des effets sur les 200 premiers mètres, où les cotes d'eau en aval de la brèche sont supérieures aux niveaux dans le lit mineur. Les écoulements suivent la topographie du site. Les hauteurs d'eau sont supérieures à 1 mètre pendant 1000 m. Elles diminuent jusqu'à 2000 mètres de la digue avant d'augmenter lors de leur entrée dans les marais.



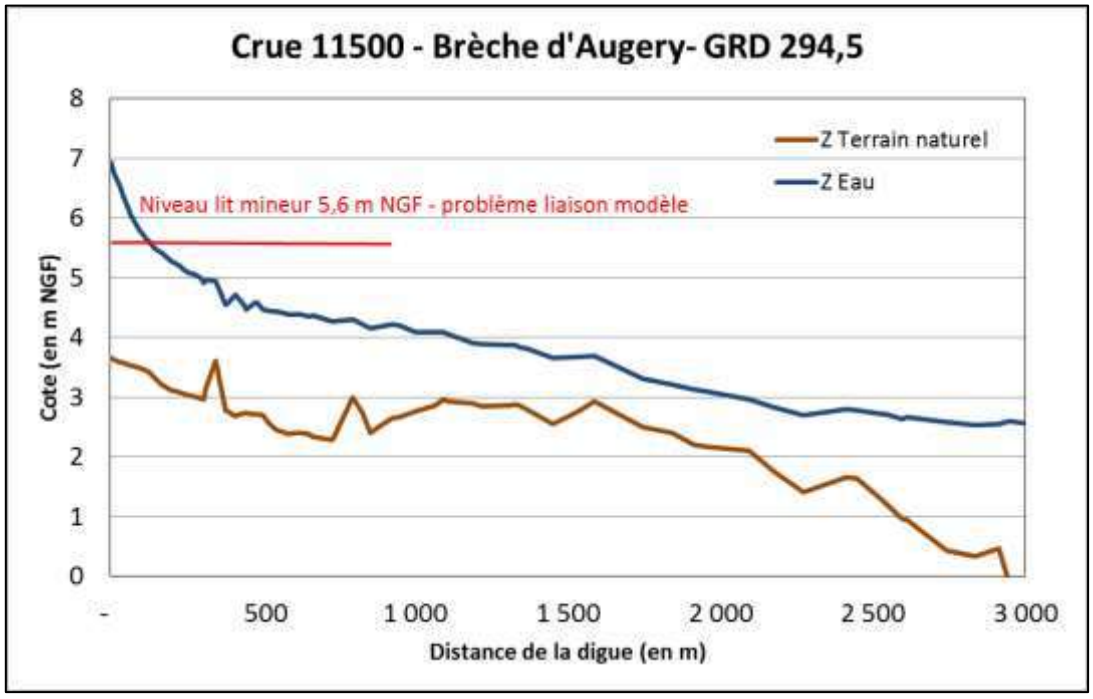


Figure 183. EI 11500 – Brèche Augery – GRD 294,5 - Profil d'écoulement en aval de la brèche

La figure ci-après donne le temps d'arrivée de l'onde de rupture :

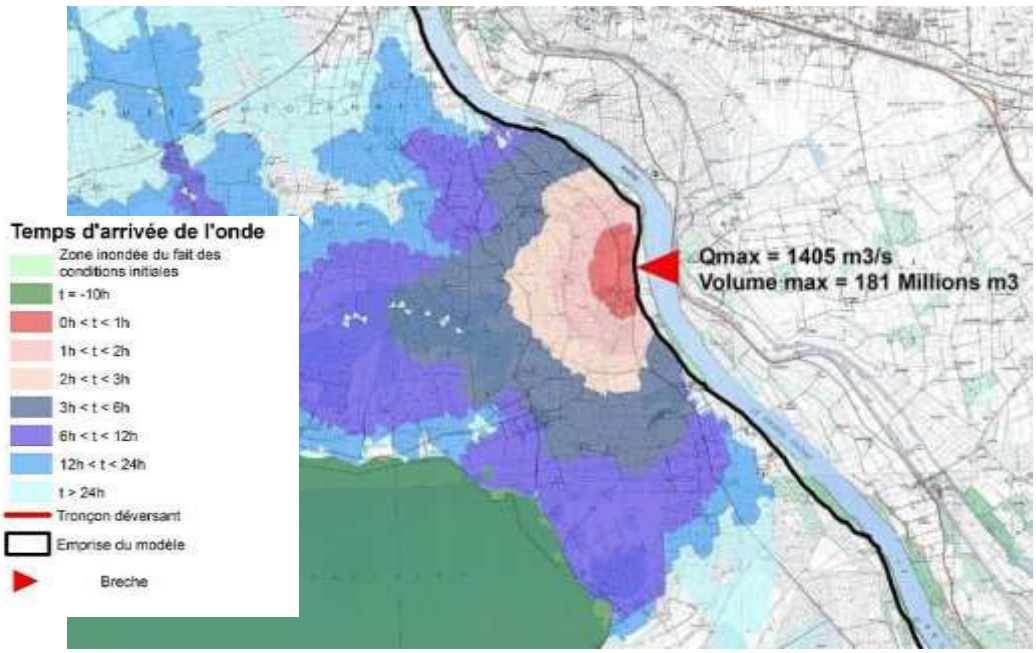


Figure 184. EI 11500 – Brèche Augery – GRD 294,5 - Temps de propagation (h)

La figure ci-après est plus précise. Elle illustre les hauteurs d'eau en fonction du temps.

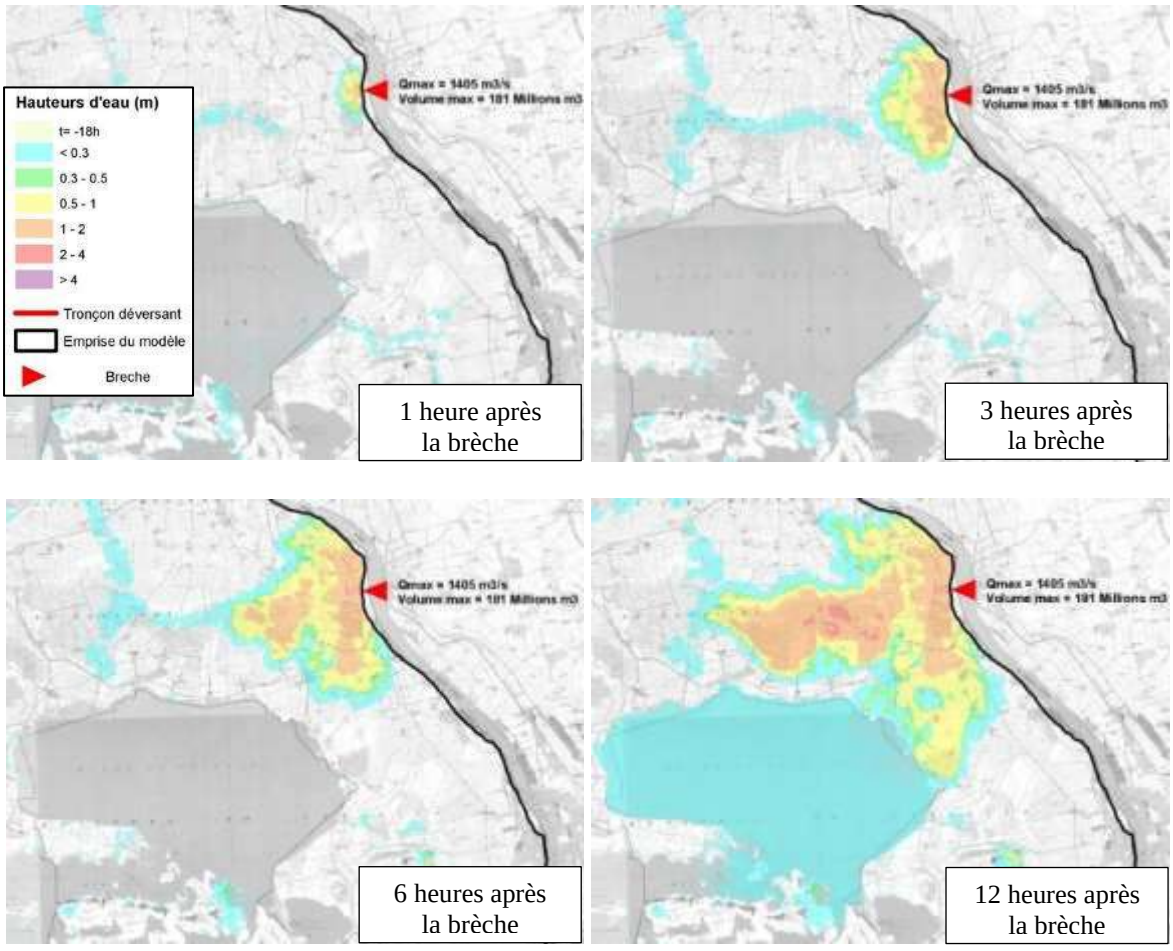


Figure 185. EI 11500 – Brèche Augery – GRD 294,5 - Hauteur d'eau en fonction du temps

Après une heure, la RD36 est coupée et les hauteurs d'eau sont supérieures à 1 mètre. L'inondation dans les marais de la Grand Mar débute après trois heures. Les niveaux sont maximaux en aval de la brèche après trois heures.

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

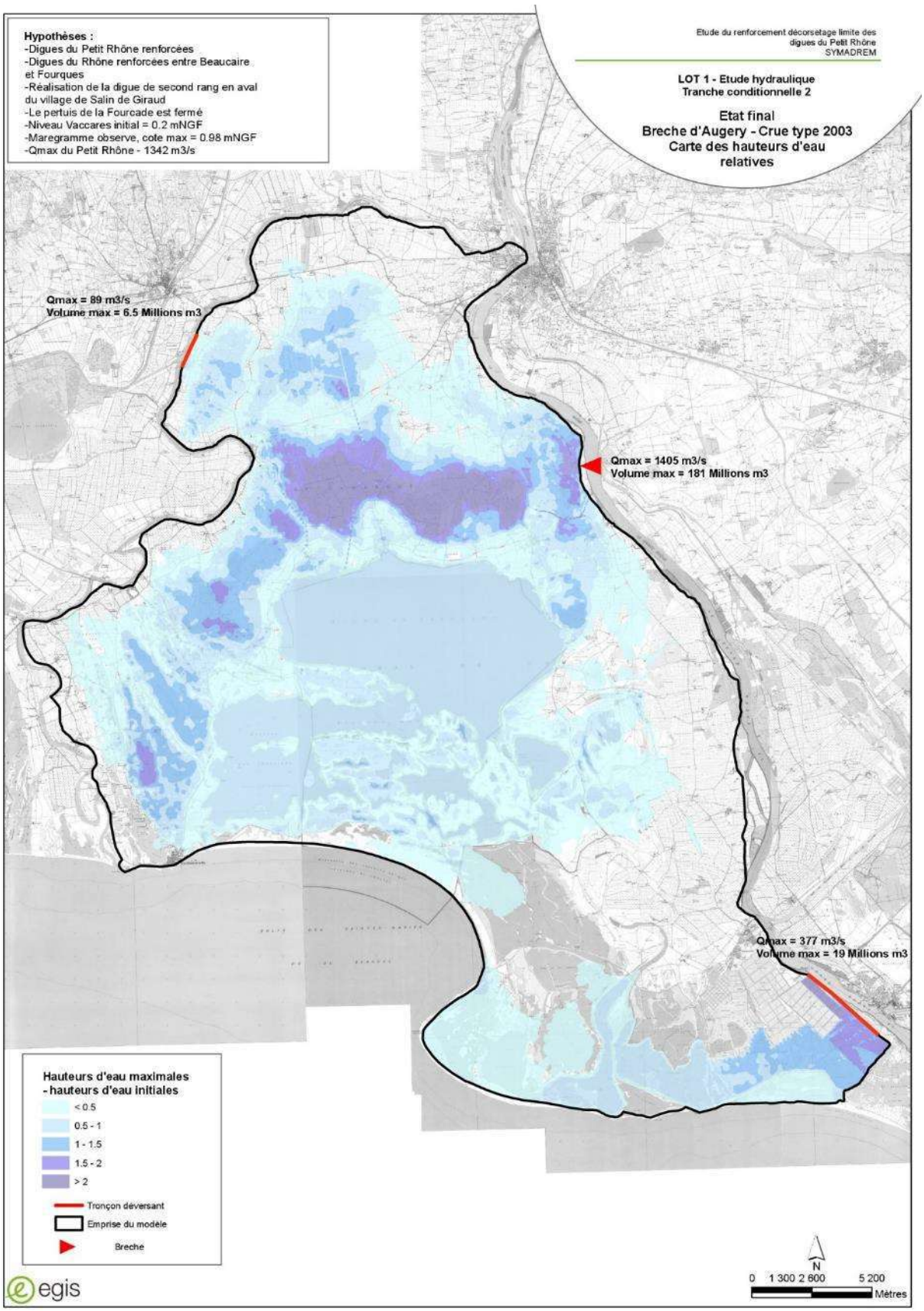


Figure 186. EI 11500 – Brèche Augery – GRD 294,5 - Hauteur d'eau maximale (en m)

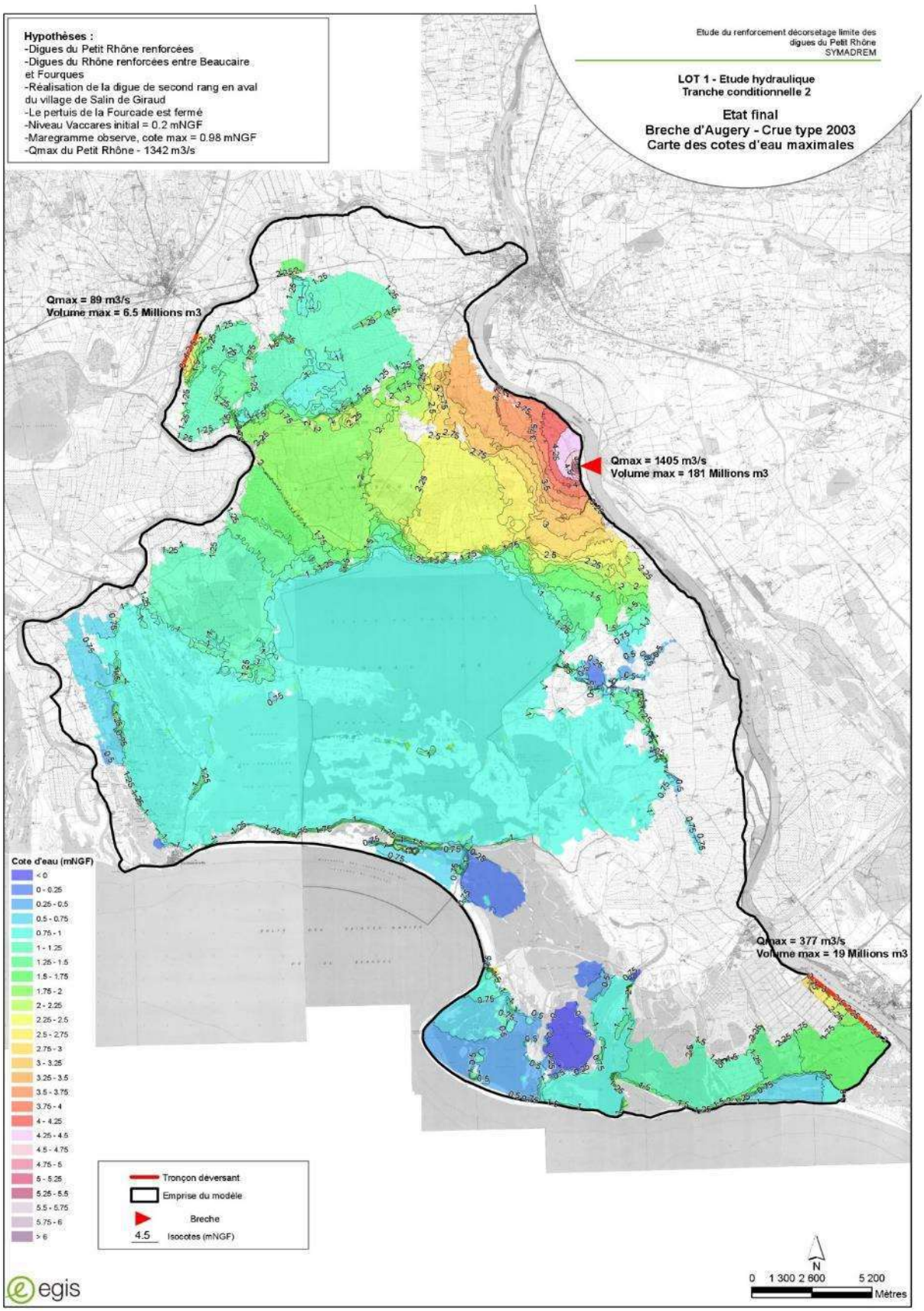


Figure 187. EI 11500 – Brèche Augery – GRD 294,5 - Cote d'eau maximale (m NGF)

Tableau 41. EI 11500 – Brèche Augery – GRD 294,5 - Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
12	Clos du Mas Neuf	2,00	0	0	0,6
13	Marais du Pont de Rousty	1,25	0	0,7	1,7
14	Marais de la Grand Mar	2,50	0	1,6	2,4
15	Montlong	4,25	0,6	1,5	2,4
16	Etang du Vaccarès	1,00	0	0,5	0,8
17	Armelière Sambuc Chamone	2,00	0	0,5	1,3
20	Abords digue Petite Montlong Beaujeu	4,75	0,8	1,6	2,4
21	Abords digue Beaujeau Tourtoulen	3,75	0	1,0	1,4
30	Saliers	1,25	0	0	0,8
31	Marais de Saliers	1,25	0	0,7	1,3
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	1,75	0	0,3	1,3
35	Amarée Dromard	0,75	0	0,3	0,7
36	Panperdu Etang des Launes	0,75	0	0,1	0,7
37	Etang de Ginès	1,00	0,1	0,8	0,9
38	Saintes-Maries-de-la-Mer	1,25	0	0,1	0,5
39	Paty trinité	1,75	0,2	1,2	1,7
40	Vaccarès Est	2,00	0,1	1,2	1,7

6.10.2 Crue 12500 – Etat actuel/initial – Brèche Augery 200 ml – GRD 294,5

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située au GRD 294,5 en aval du tronçon de digue GRD6. Le scénario de crue est celui d'une crue équivalente à celle de mai 1856 (débit de pointe de 12 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée et dans les conditions actuelles d'écoulement.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,006, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 55 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,55 X 0,006 ≅ 0,3 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 3.10^{-2}. (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 200 mètres,
- Temps d'ouverture : 2 heures,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 3 m NGF,
- Cote de la crue : 5,8 m NGF.

Le débit de pointe modélisé de la brèche est estimé à environ 1600 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : plus de 100 heures et le volume de déversement à environ 400 millions de m^3.

Ce scénario d'inondation a été modélisé en supposant que les digues de Salin de Giraud (tracé initial de 2012) et du Petit Rhône 1ère priorité étaient renforcées. Des déversements sans brèche sur les deux digues résistantes à la surverse ont également été pris en compte. Les volumes de déversements en provenance de ces deux digues résistantes à la surverse sont :

- Volume surverse Salin de Giraud : env. 90 millions de m^3 (débit pointe 800 m^3/s),
- Volume surverse Petit Rhône : env. 20 millions de m^3 (débit pointe 140 m^3/s).

Ces apports sont en deçà des incertitudes liées aux hypothèses de modélisation. On notera que les eaux en provenance du Petit Rhône et de la brèche se mélangent mais que celles en provenance de Salin de Giraud et de la brèche ne se mélangent pas.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

Figure 188. EI 12500 – Brèche Augery 200 – GRD 294,5 - Hydrogramme de brèche

Les trois cartes ci-après illustrent respectivement les hauteurs d'eau maximum, les temps de propagation et les vitesses d'écoulement maximum atteintes au sein de la zone protégée.

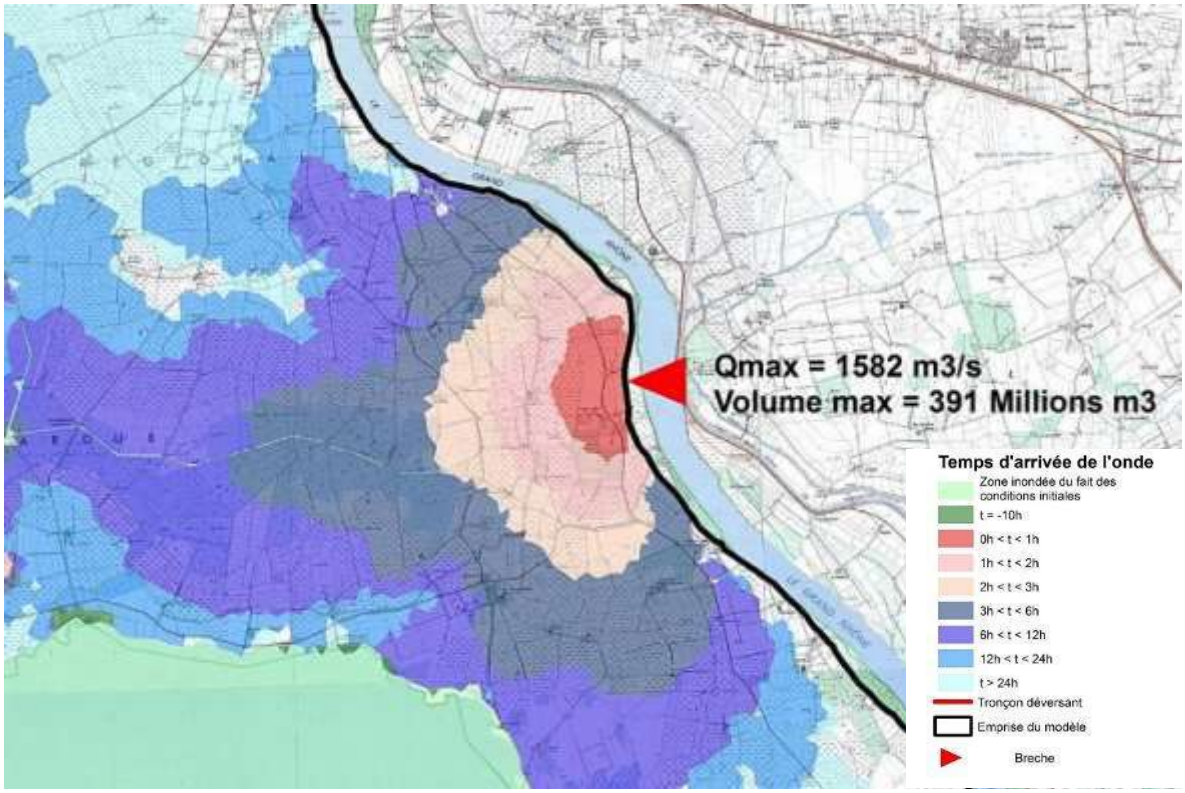


Figure 189. EI 12500 – Brèche Augery 200 – GRD 294,5 - Temps de propagation (h)

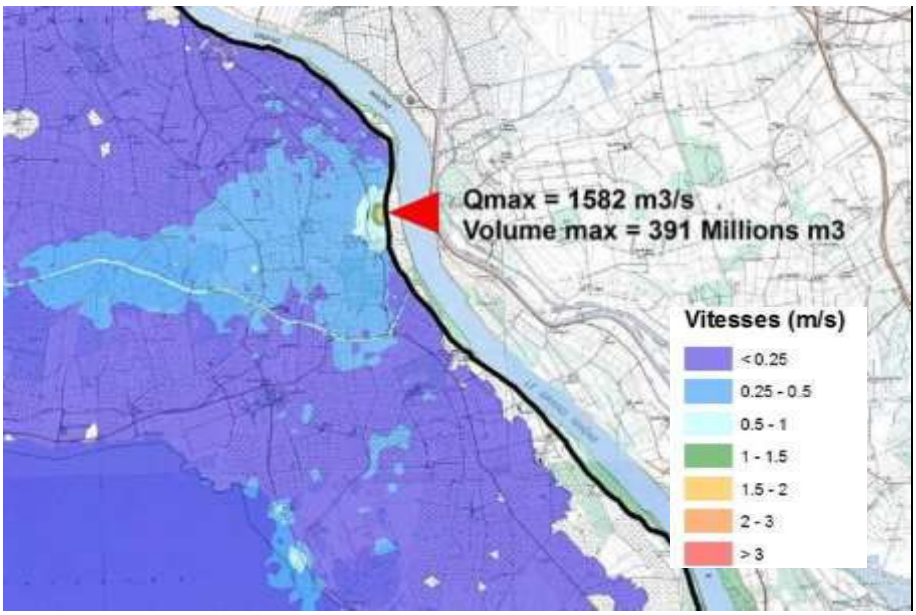


Figure 190. EI 12500 – Brèche Augery 200 – GRD 294,5 - Vitesse maximum (m/s)

Comme pour la brèche EI 11500 avec un débit de 1400 m^3/s, la vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 250 et 700 m de la digue.

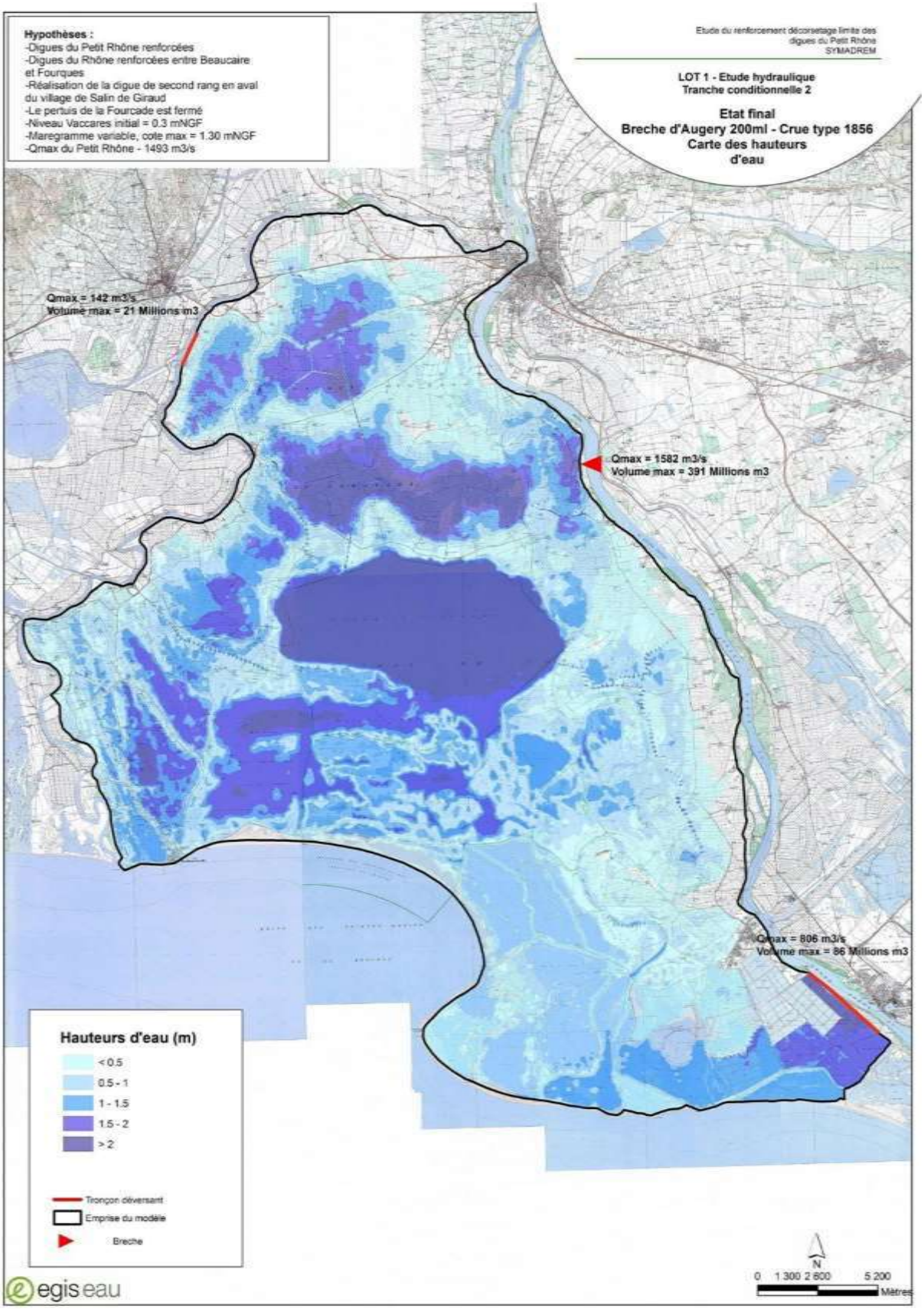


Figure 191. EI 12500 – Brèche Augery 200 – GRD 294,5 – Hauteur d'eau maximale (en m) avec prise en compte de la bathymétrie dans le Vaccarès

6.10.3 Crue 12500 – Etat actuel/initial – Brèche Augery 400 ml – GRD 294,5

Ce scénario est identique au précédent à l'exception de l'extension finale de la brèche qui n'est plus de 200 m mais de 400 m. Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située au GRD 294,5 en aval du tronçon de digue GRD6. Le scénario de crue est celui d'une crue équivalente à celle de mai 1856 (débit de pointe de 12 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée et dans les conditions actuelles d'écoulement.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,006, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 55 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,55 X 0,006 ≅ 0,3 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 3.10^{-2}. (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 400 mètres,
- Temps d'ouverture : 5 heures,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 3 m NGF,
- Cote de la crue : 5,8 m NGF.

Le débit de pointe modélisé de la brèche est estimé à environ 3200 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : plus de 100 heures et le volume de déversement à environ 800 millions de m^3.

Ce scénario d'inondation a été modélisé en supposant que les digues de Salin de Giraud (tracé initial de 2012) et du Petit Rhône 1ère priorité étaient renforcées. Des déversements sans brèche sur les deux digues résistantes à la surverse ont également été pris en compte. Les volumes de déversements en provenance de ces deux digues résistantes à la surverse sont :

- Volume surverse Salin de Giraud : env. 90 millions de m^3 (débit pointe 800 m^3/s),
- Volume surverse Petit Rhône : env. 20 millions de m^3 (débit pointe 140 m^3/s).

Ces apports sont en deçà des incertitudes liées aux hypothèses de modélisation. On notera que les eaux en provenance du Petit Rhône et de la brèche se mélangent mais que celles en provenance de Salin de Giraud et de la brèche ne se mélangent pas.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

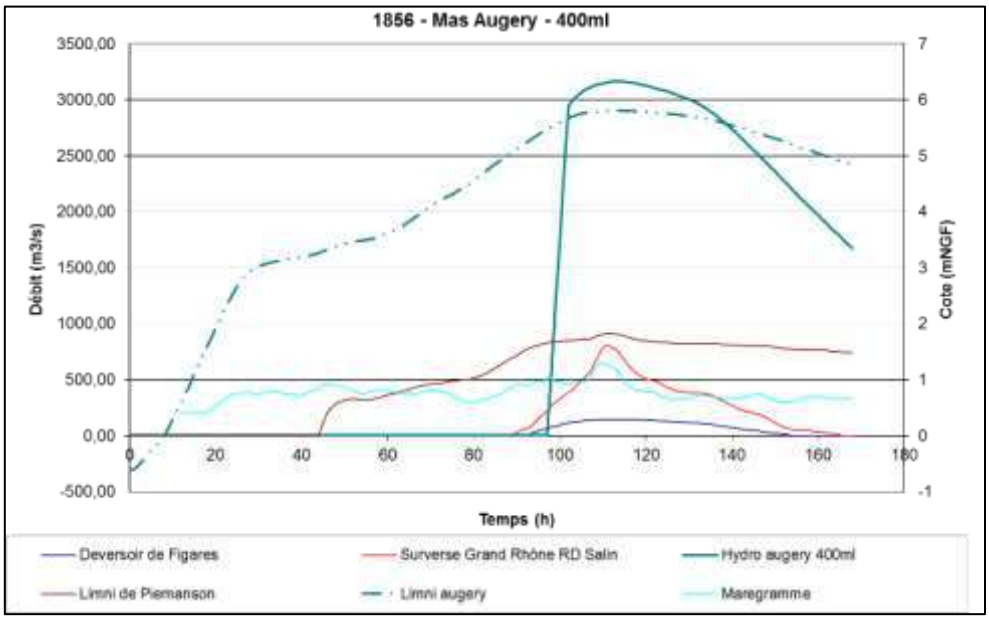


Figure 192. EI 12500 – Brèche Augery 400 – GRD 294,5 - Hydrogramme de brèche

La figure ci-après illustre la cartographie des vitesses d'écoulement. La vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 300 et 1000 m de la digue.
Le profil d'écoulement en aval de la brèche non représenté suit un comportement similaire avec des hauteurs d'eau sensiblement supérieures.

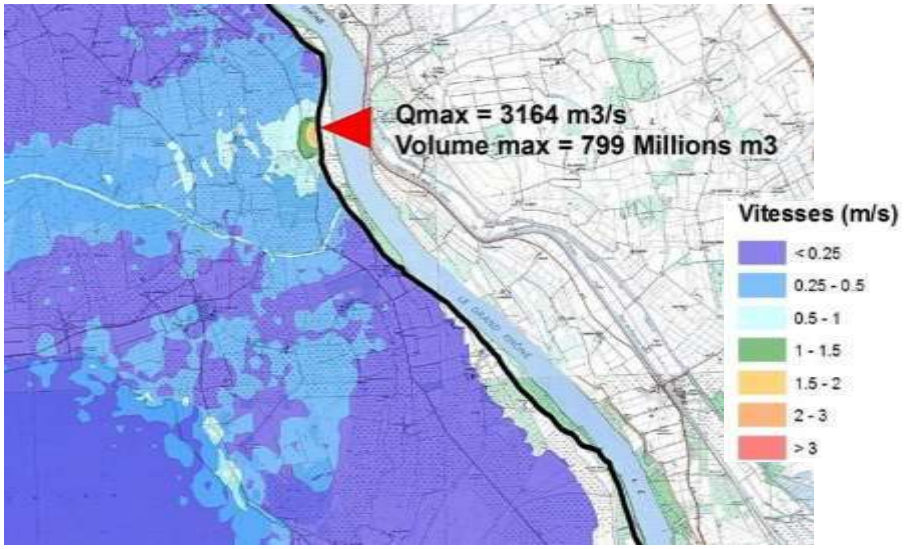


Figure 193. EI 12500 – Brèche Augery 400 – GRD 294,5 - Vitesse maximum (m/s)

La figure ci-dessous donne le temps de propagation de l'onde de rupture, qui est quasiment identique à l'EI 11500. En revanche, comme indiqué plus haut, les hauteurs d'eau sont sensiblement supérieures.

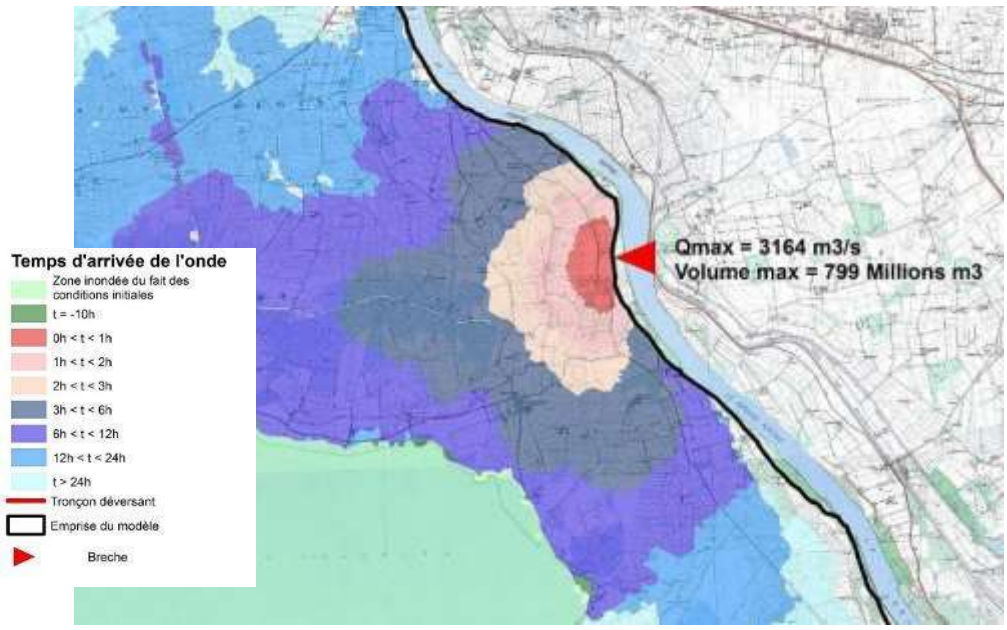


Figure 194. EI 12500 – Brèche Augery 400 – GRD 294,5 - Temps de propagation (h)

Les deux figures ci-après donne les hauteurs d'eau maximales dans la zone protégée (avec prise en compte de la bathymétrie du Vaccarès) pour respectivement les scénarios de brèche EI 12500 – Brèche 200 ml et EI 12500 – Brèche 400 ml. Ces deux simulations donnent des extensions d'inondation quasiment équivalentes, seules les hauteurs d'eau diffèrent.

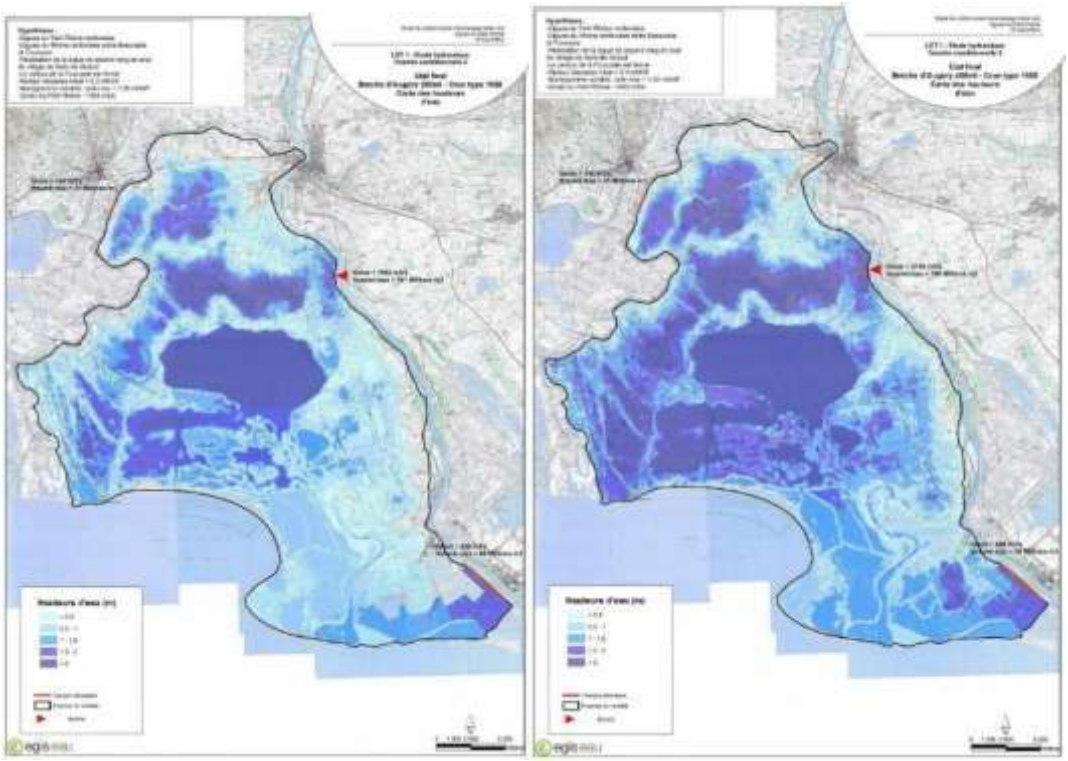


Figure 195. EI 12500 – Comparaison brèches Augery 200 & 400 - hauteur d'eau maximale (en m)

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximales atteintes au sein de la zone protégée.

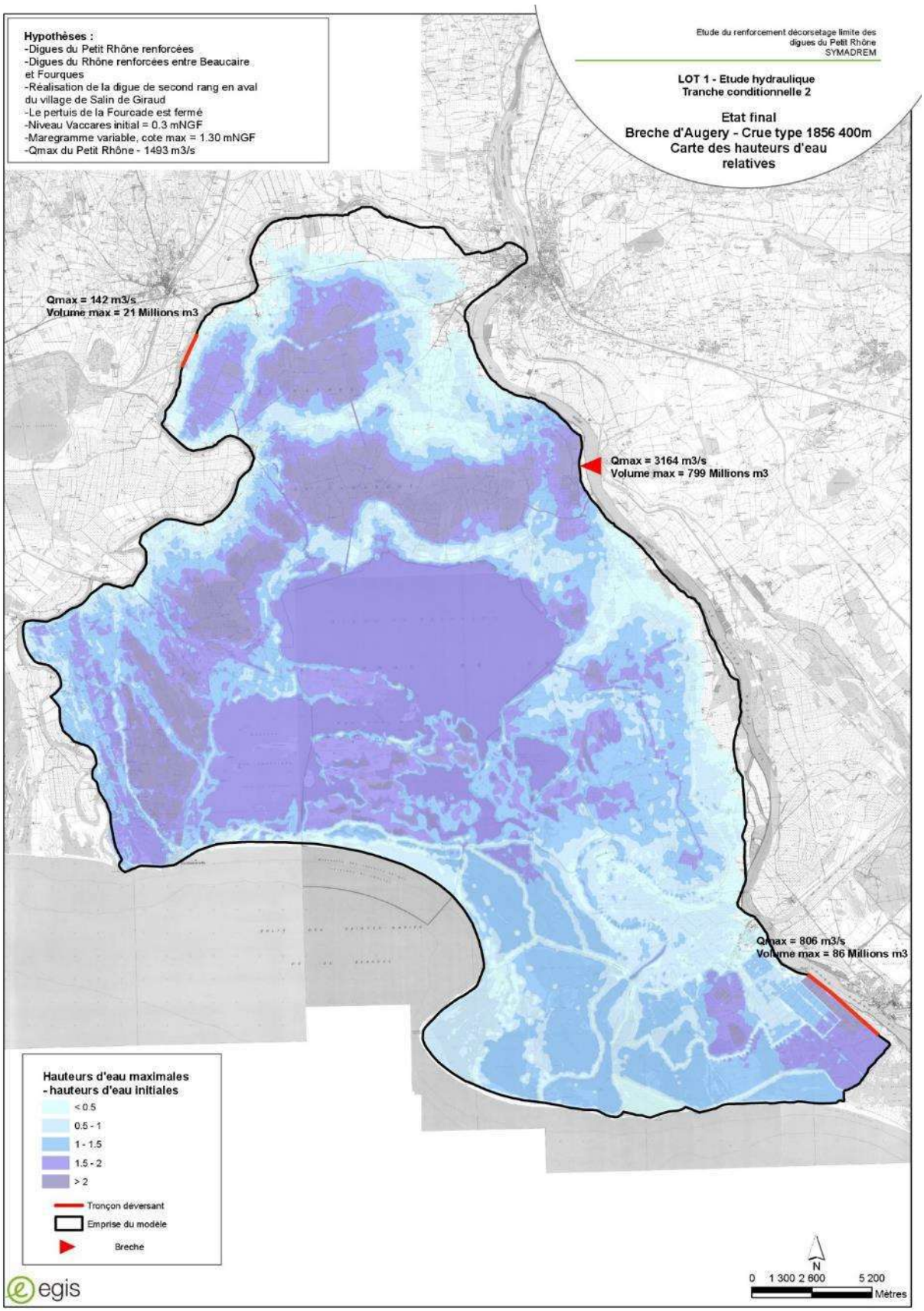


Figure 196. EI 12500 – Brèche Augery 400 – GRD 294,5 - Hauteur d'eau maximale (en m)

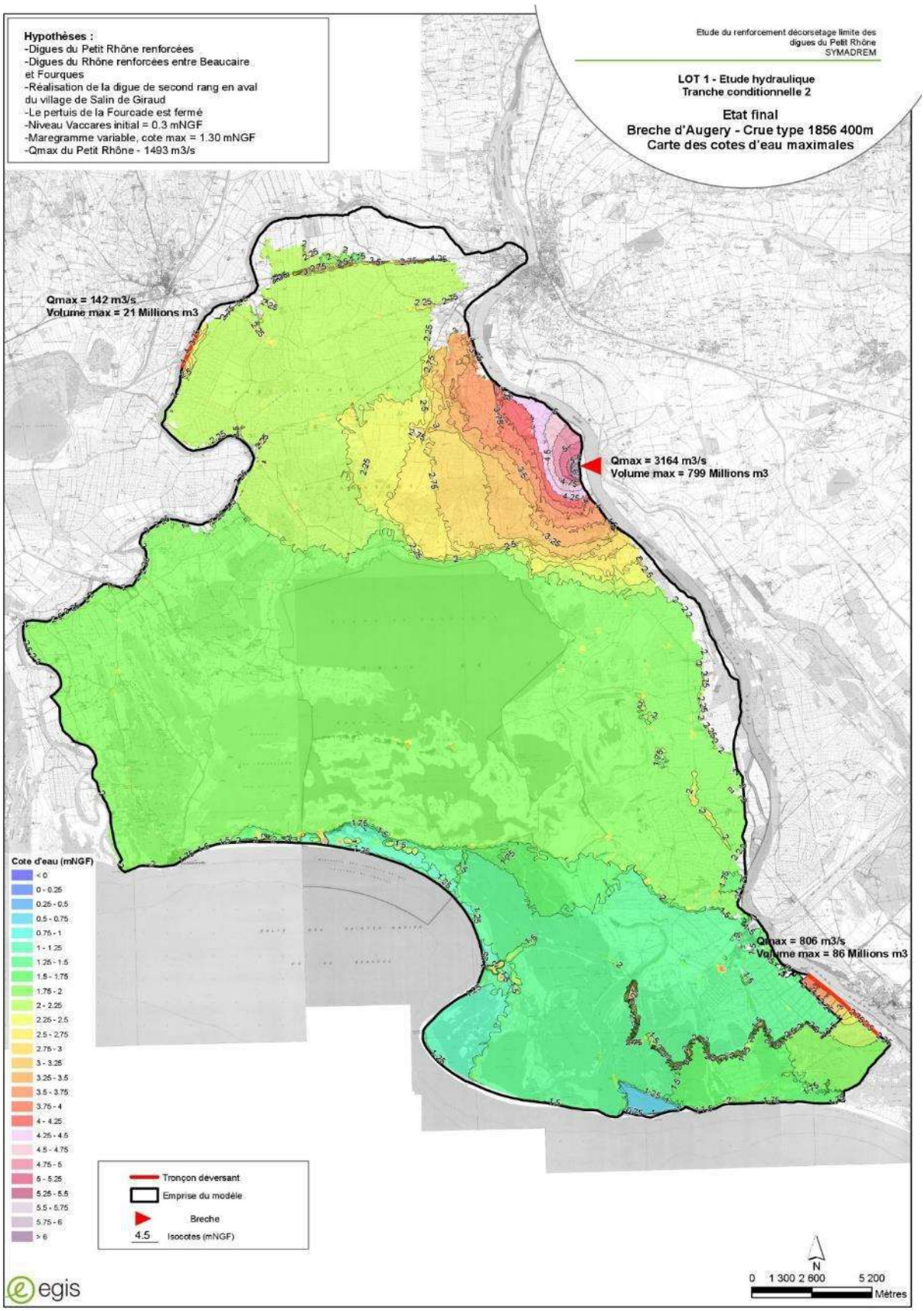


Figure 197. EI 12500 – Brèche Augery 400 – GRD 294,5 – Cote d'eau maximale (m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 42. EI 12500 – Brèche Augery 400 – GRD 294,5 - Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
10	Gimeaux	2,25	0	0,6	1,1
12	Clos du Mas Neuf	2,25	0	0,1	0,9
13	Marais du Pont de Rousty	2,25	0,4	1,7	2,7
14	Marais de la Grand Mar	3,00	0,2	2,1	2,9
15	Montlong	4,75	1,1	2,0	2,9
16	Etang du Vaccarès	2,00	0,9	1,5	1,8
17	Armelière Sambuc Chamone	2,00	0	0,5	1,3
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	1,75	0,6	1,1	1,6
19	Salin de Giraud	1,75	0,1	0,6	1,1
20	Abords digue Petite Montlong Beaujeu	5,00	1,1	1,9	2,6
21	Abords digue Beaujeau Tourtoulen	4,00	0	1,2	1,7
23	Abords digue Commanderie Boisverdun	2,00	0	0,2	1,0
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	2,00	0	0,5	1,1
25	Abords digue Salin de Giraud	1,75	0	0,4	1,2
26	Salins du midi sud-est	1,75	0,5	1,0	1,5
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	2,25	0	0,1	0,9
30	Saliers	2,25	0	0,6	1,8
31	Marais de Saliers	2,25	0,5	1,7	2,3
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	2,25	0	0,8	1,8
34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage	2,00	0,4	1,1	1,6
35	Amarée Dromard	2,00	0,9	1,6	1,9
36	Panperdu Etang des Launes	2,00	0,8	1,4	1,9
37	Etang de Ginès	2,00	1,1	1,8	1,9
38	Saintes-Maries-de-la-Mer	2,00	0,2	0,8	1,2
39	Paty trinité	2,25	0,7	1,7	2,2
40	Vaccarès Est	2,50	0,6	1,7	2,2
41	Esquineau	1,75	0	1,0	1,4

6.10.4 Crue 14160 – Etat actuel/initial – Brèche Augery – GRD 294,5

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située au GRD 294,5 en aval du tronçon de digue GRD6.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 60 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,6 X 0,001 < 0,1 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 3.10^{-2}. (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 400 mètres,
- Temps d'ouverture : 5 heures,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 3 m NGF,
- Cote de la crue : 5,9 m NGF,

Le débit de pointe modélisé de la brèche est estimé à environ 3400 m^3/s et le volume de déversement à environ 1100 millions de m^3.

Ce scénario d'inondation a été modélisé en supposant que les digues de Salin de Giraud (tracé initial de 2012) et du Petit Rhône 1ère priorité étaient renforcées. Des déversements sans brèche sur les deux digues résistantes à la surverse ont également été pris en compte. Les volumes de déversements en provenance de ces deux digues résistantes à la surverse sont :

- Volume surverse Salin de Giraud : ≅ 350 millions de m^3 (débit pointe ≅ 1000 m^3/s),
- Volume surverse Petit Rhône : ≅ 35 millions de m^3 (débit pointe ≅ 175 m^3/s).

Les eaux en provenance des déversements et de la brèche se mélangent, mais ne sont pas de nature à modifier la caractérisation de l'aléa dans la zone protégée.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

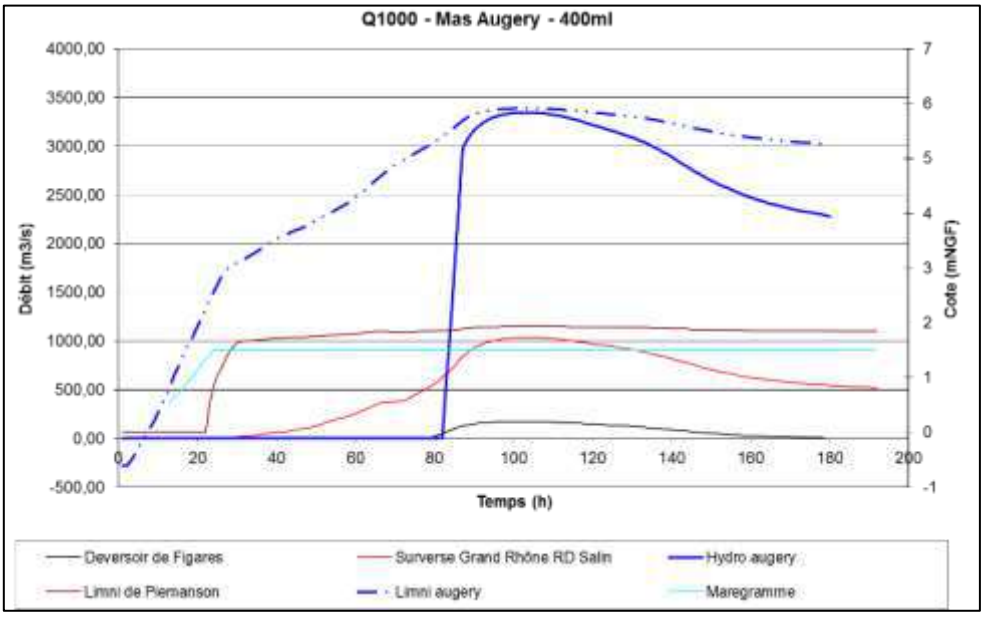


Figure 198. EI 14160 – Brèche Augery – GRD 294,5 - Hydrogramme de brèche

La figure ci-après illustre la cartographie des vitesses d'écoulement. Comme pour l'EI 12500 avec la brèche de 400 ml, la vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 300 et 1000 m de la digue.

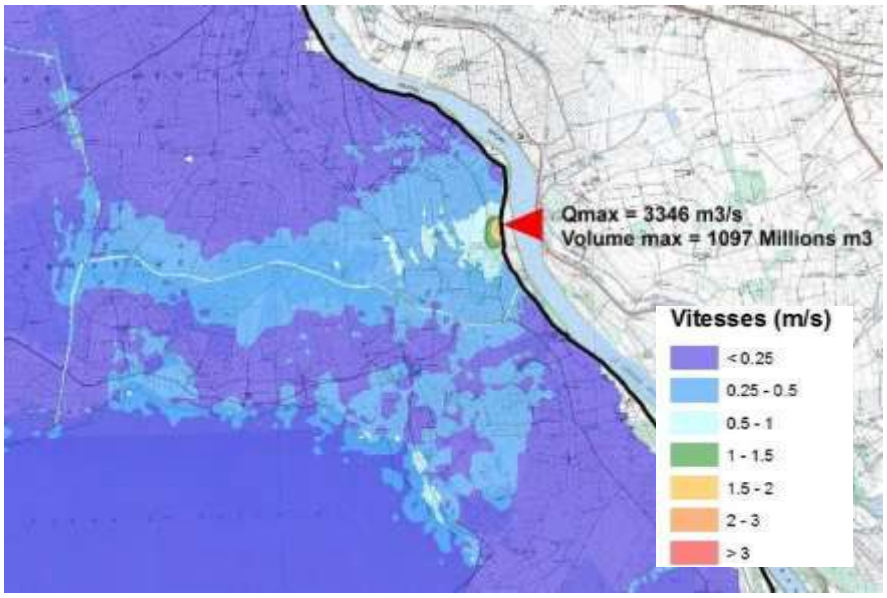


Figure 199. EI 14160 – Brèche Augery – GRD 294,5 - Vitesse maximum (m/s)

Le profil d'écoulement en aval de la brèche non représenté suit un comportement similaire à EI 11500 avec des hauteurs d'eau sensiblement supérieures.

La figure ci-dessous donne le temps de propagation de l'onde de rupture, qui est quasiment identique à l'EI 11500. En revanche, comme indiqué plus haut, les hauteurs d'eau sont sensiblement supérieures.

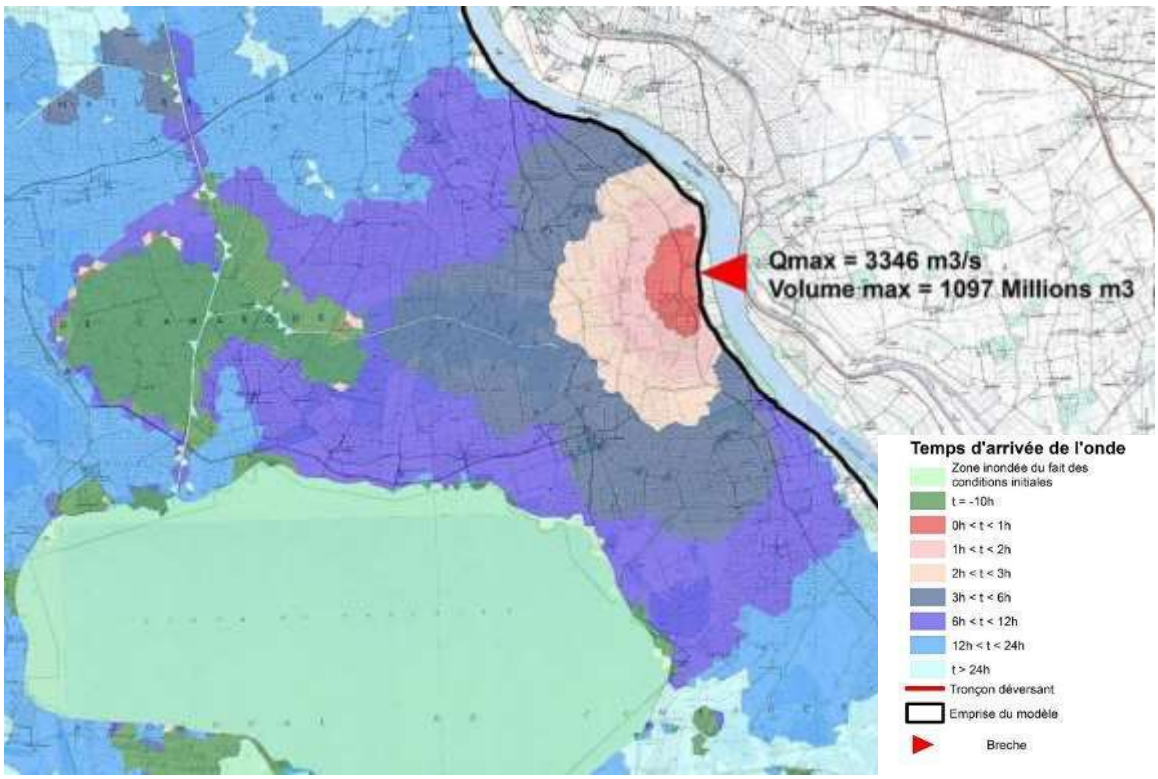


Figure 200. EI 14160 – Brèche Augery – GRD 294,5 - Temps de propagation (h)

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximales atteintes au sein de la zone protégée.

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

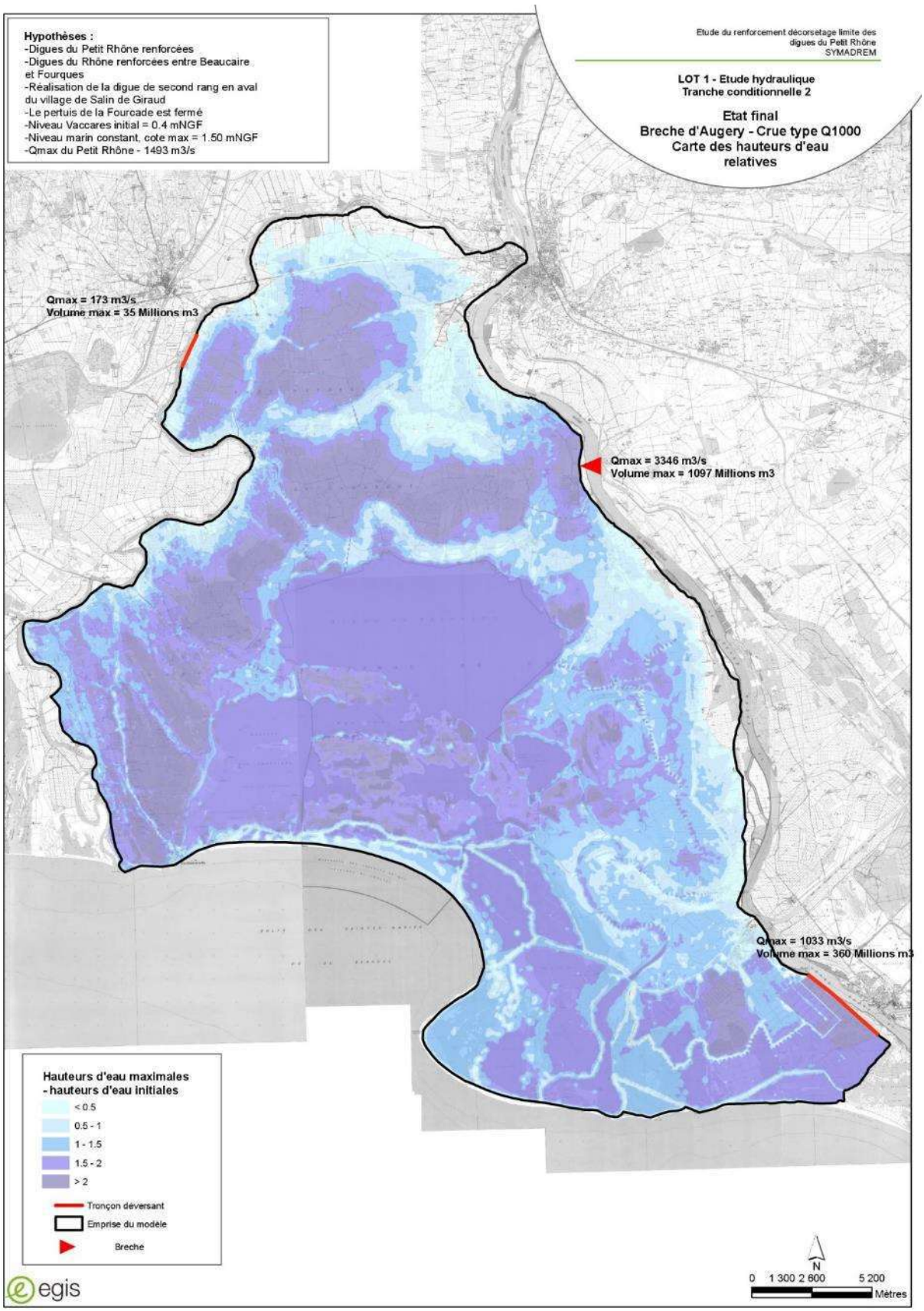


Figure 201. EI 14160 – Brèche Augery – GRD 294,5 - Hauteur d'eau maximale (en m)

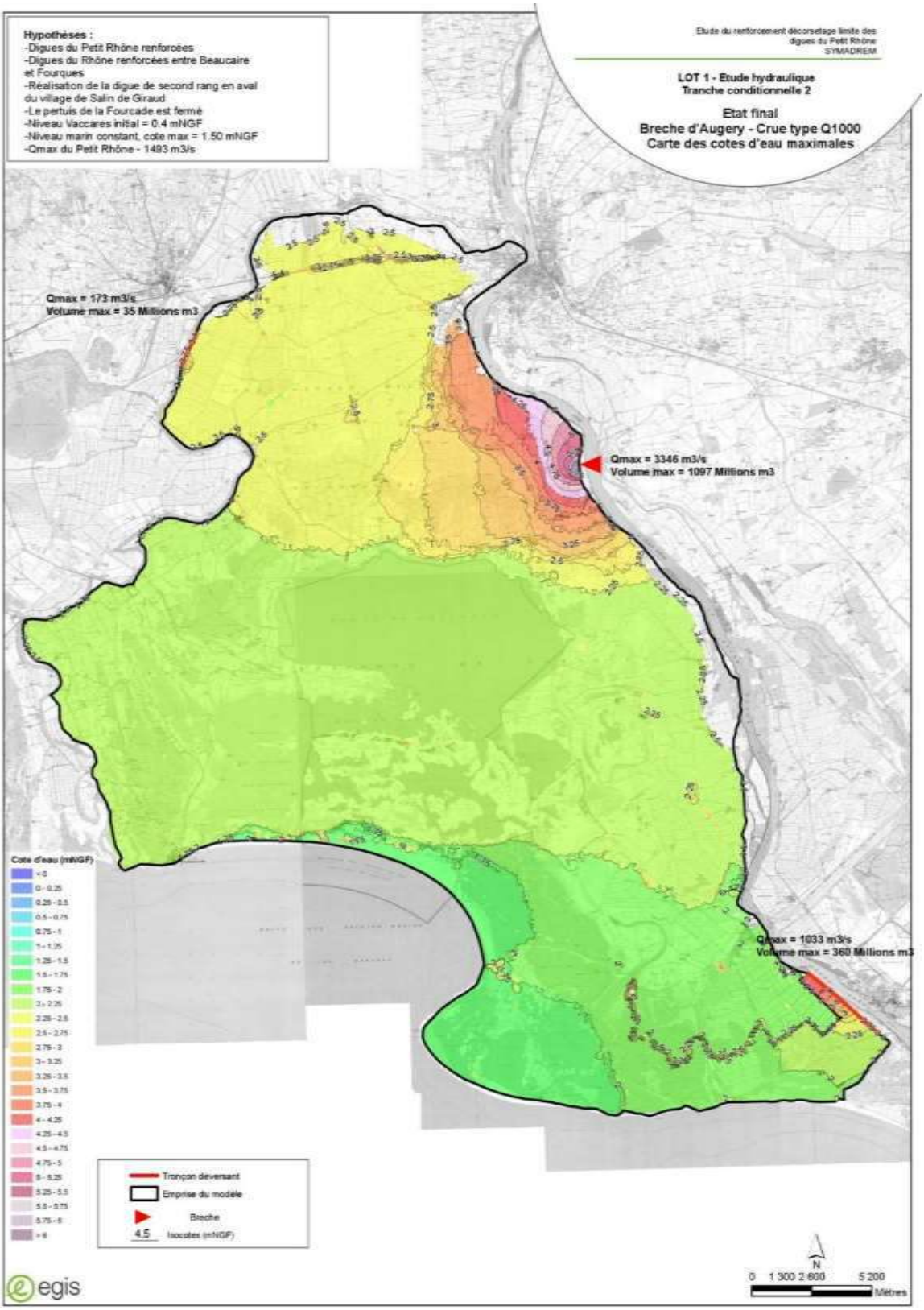


Figure 202. EI 14160 – Brèche Augery – GRD 294,5 - Cote d'eau maximale (m NGF)

Tableau 43. EI 11500 – Brèche Augery – GRD 294,5 - Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
9	A54 Est	2,50	0	0,2	0,9
10	Gimeaux	2,50	0	0,8	1,4
11	La Grande Sacristane	2,75	0	0	0,3
12	Clos du Mas Neuf	2,50	0	0,3	1,1
13	Marais du Pont de Rousty	2,50	0,6	2,0	3,0
14	Marais de la Grand Mar	3,00	0,2	2,1	2,9
15	Montlong	4,75	1,1	2,0	2,9
16	Etang du Vaccarès	2,25	1,1	1,7	2,1
17	Armelière Sambuc Chamone	2,25	0	0,7	1,5
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	2,00	0,8	1,4	1,9
19	Salin de Giraud	2,00	0,3	0,8	1,4
20	Abords digue Petite Montlong Beaujeu	5,75	1,8	2,6	3,4
21	Abords digue Beaujeau Tourtoulen	4,00	0	1,2	1,7
22	Abords digue Tourtoulen Commanderie	2,25	0	0	0,3
23	Abords digue Commanderie Boisverdun	2,25	0	0,4	1,2
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	2,25	0,1	0,7	1,4
25	Abords digue Salin de Giraud	2,00	0	0,7	1,5
26	Salins du midi sud-est	2,00	0,8	1,3	1,8
28	Abords digue A54 Pont de Cavalès	2,50	0	0	0,2
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	2,50	0	0,4	1,2
30	Saliers	2,50	0,0	0,9	2,0
31	Marais de Saliers	2,50	0,7	1,9	2,5
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	2,50	0	1,0	2,1
34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage	2,25	0,6	1,3	1,9
35	Amarée Dromard	2,25	1,2	1,8	2,2
36	Panperdu Etang des Launes	2,25	1,0	1,6	2,2
37	Etang de Ginès	2,25	1,4	2,1	2,2
38	Saintes-Maries-de-la-Mer	2,25	0,4	1,1	1,5
39	Paty trinité	2,50	1,0	1,9	2,4
40	Vaccarès Est	2,25	0,3	1,5	1,9
41	Esquineau	2,00	0	1,2	1,7

6.11 BRECHE DE BOISVERDUN

3 crues ont été modélisées pour cette brèche dans l'état initial : 11500 ; 12500 et 14160.

Une variation de la largeur de brèche a été opérée pour la crue 12500.

6.11.1 Crue 11500 – Etat actuel/initial – Brèche Boisverdun – GRD 309,5

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située au GRD 309,5 en amont du tronçon de digue GRD10. Le scénario de crue est celui d'une crue équivalente à celle de décembre 2003 (débit de pointe de 11 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,008, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 50 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,5 X 0,008 ≅ 0,4 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 2.10^{-2} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 200 mètres,
- Temps d'ouverture : 2 heures,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 1,5 m NGF,
- Cote de la crue : 3,9 m NGF.

Le débit de pointe modélisé de la brèche est estimé à environ 1200 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : environ 50 heures et le volume de déversement à environ 170 millions de m^3.

Ce scénario d'inondation a été modélisé en supposant que les digues de Salin de Giraud (tracé initial de 2012) et du Petit Rhône 1ère priorité étaient renforcées. Des déversements sans brèche sur les deux digues résistantes à la surverse ont également été pris en compte. Les volumes de déversements en provenance de ces deux digues résistantes à la surverse sont :

- Volume surverse Salin de Giraud : env. 20 millions de m^3 (débit pointe 380 m^3/s),
- Volume surverse Petit Rhône : env. 7 millions de m^3 (débit de pointe 90 m^3/s).

Ces apports sont en deçà des incertitudes liées aux hypothèses de modélisation. On notera que les eaux en provenance du Petit Rhône et de la brèche se mélangent mais que celles en provenance de Salin de Giraud et de la brèche ne se mélangent pas.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

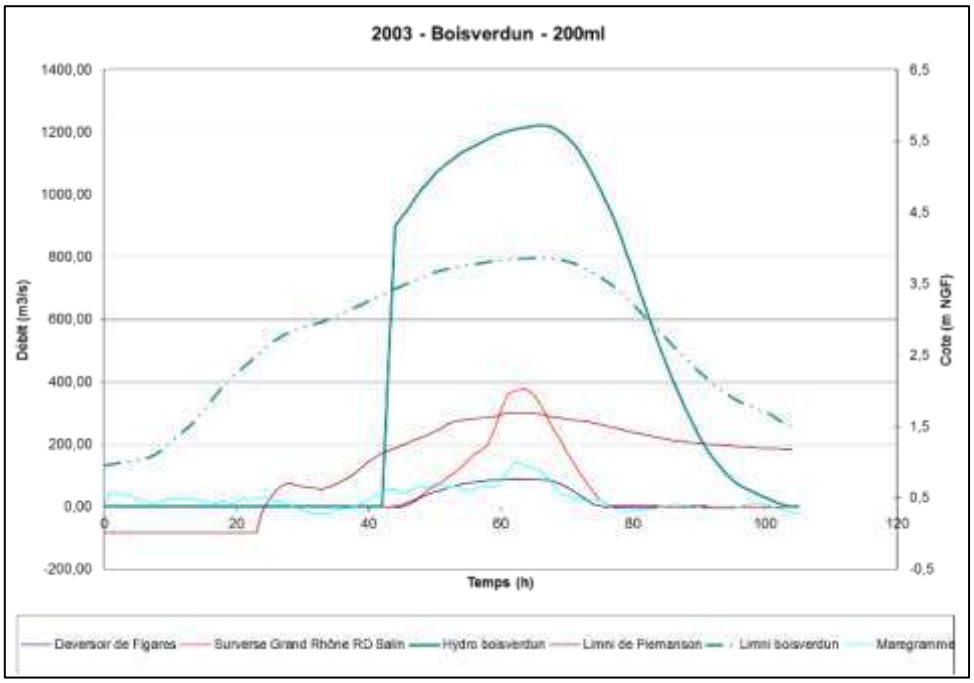


Figure 203. EI 11500 – Brèche Boisverdun – GRD 309,5 - Hydrogramme de brèche

Les figures ci-après illustrent respectivement la cartographie des vitesses d'écoulement et le profil d'écoulement en aval de la brèche. La vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 200 et 600 m de la digue.

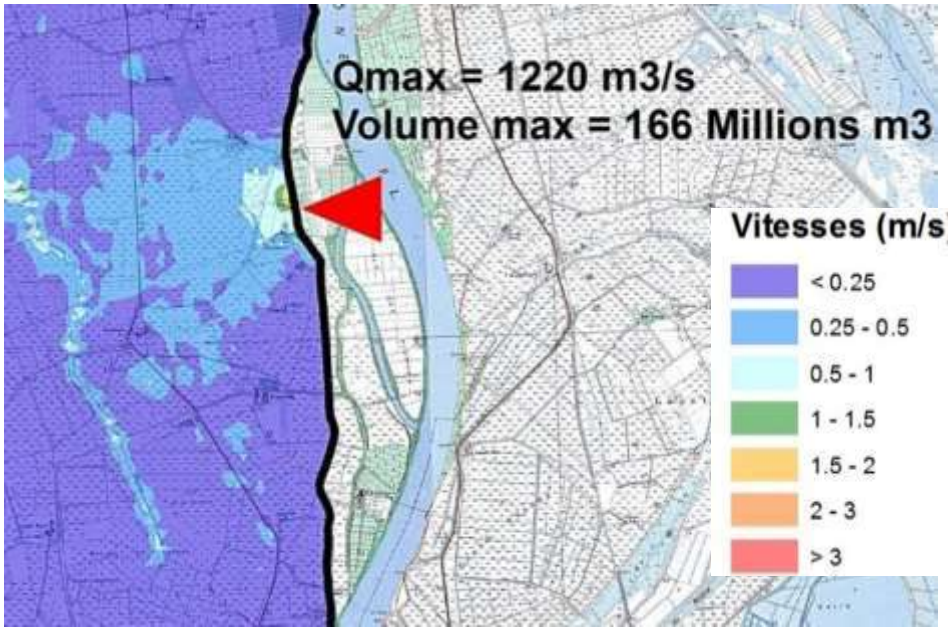
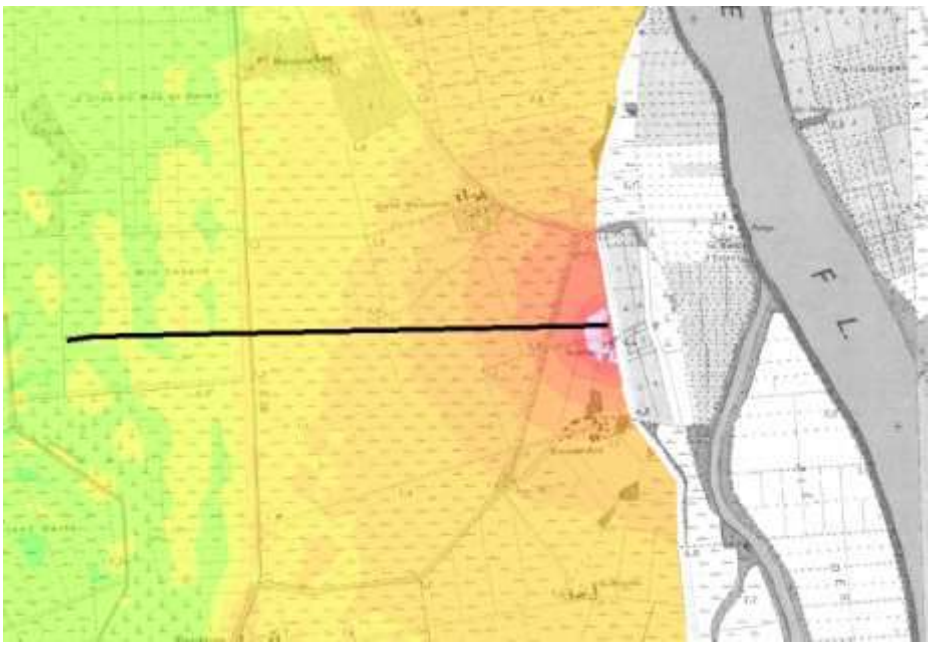


Figure 204. EI 11500 – Brèche Boisverdun – GRD 309,5 - Vitesse maximum (m/s)



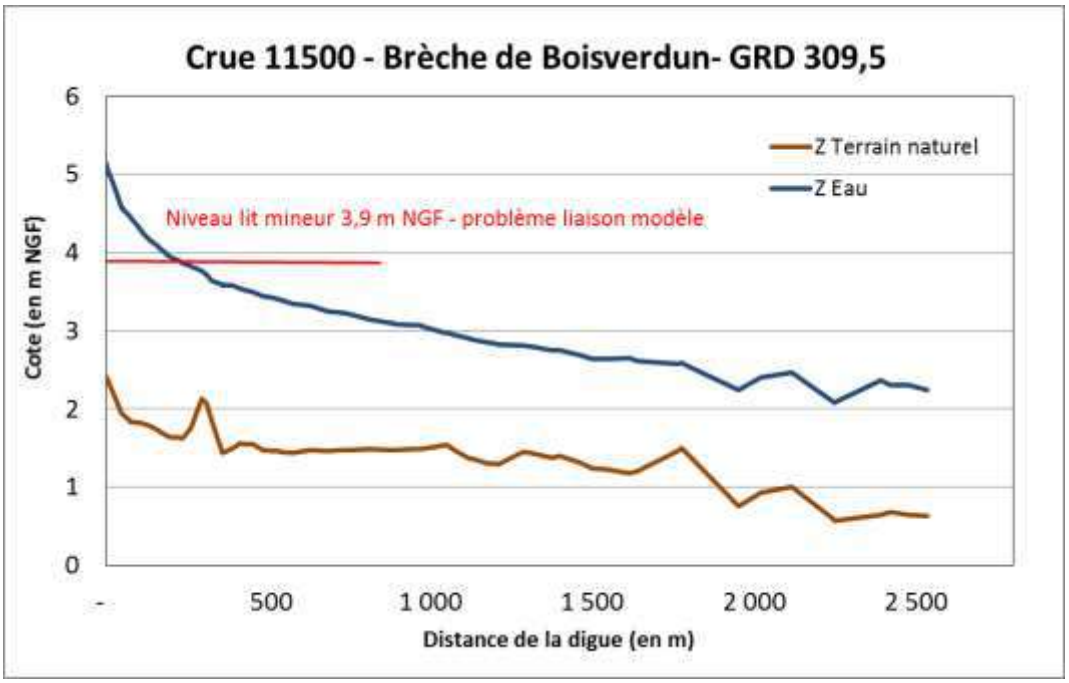


Figure 205. EI 11500 – Brèche Boisverdun – GRD 309,5 - Profil d'écoulement en aval de la brèche

On note sur ce profil un problème de liaison du modèle qui a été des effets sur les 200 premiers mètres, où les cotes d'eau en aval de la brèche sont supérieures aux niveaux dans le lit mineur. Les hauteurs d'eau diminuent de la brèche vers l'aval de 2 mètres à 1 mètre sur 2000 mètres avant de croître à nouveau.

La figure ci-après donne le temps d'arrivée de l'onde de rupture.

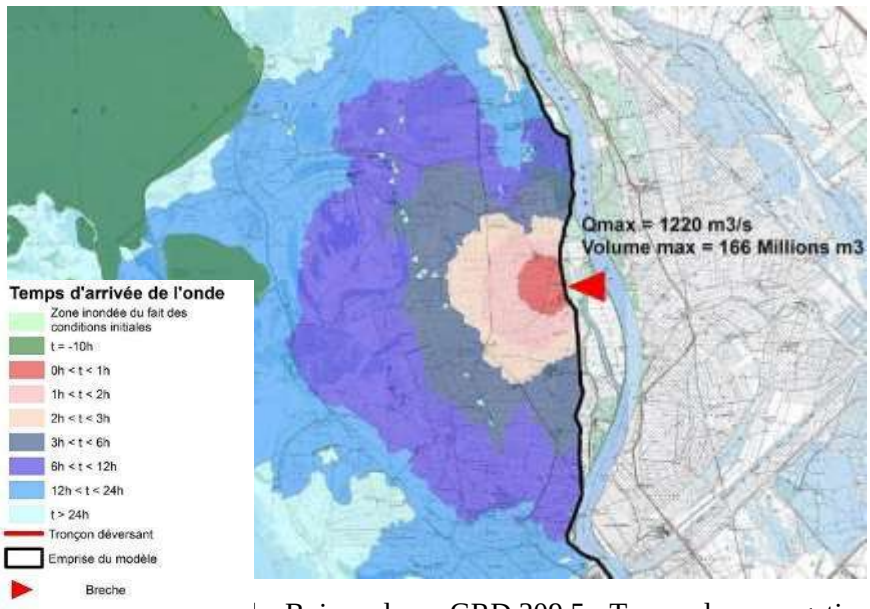


Figure EI 11500 – Brèche Boisverdun – GRD 309,5 - Temps de propagation (h)

La figure ci-après est plus précise. Elle illustre les hauteurs d'eau en fonction du temps.

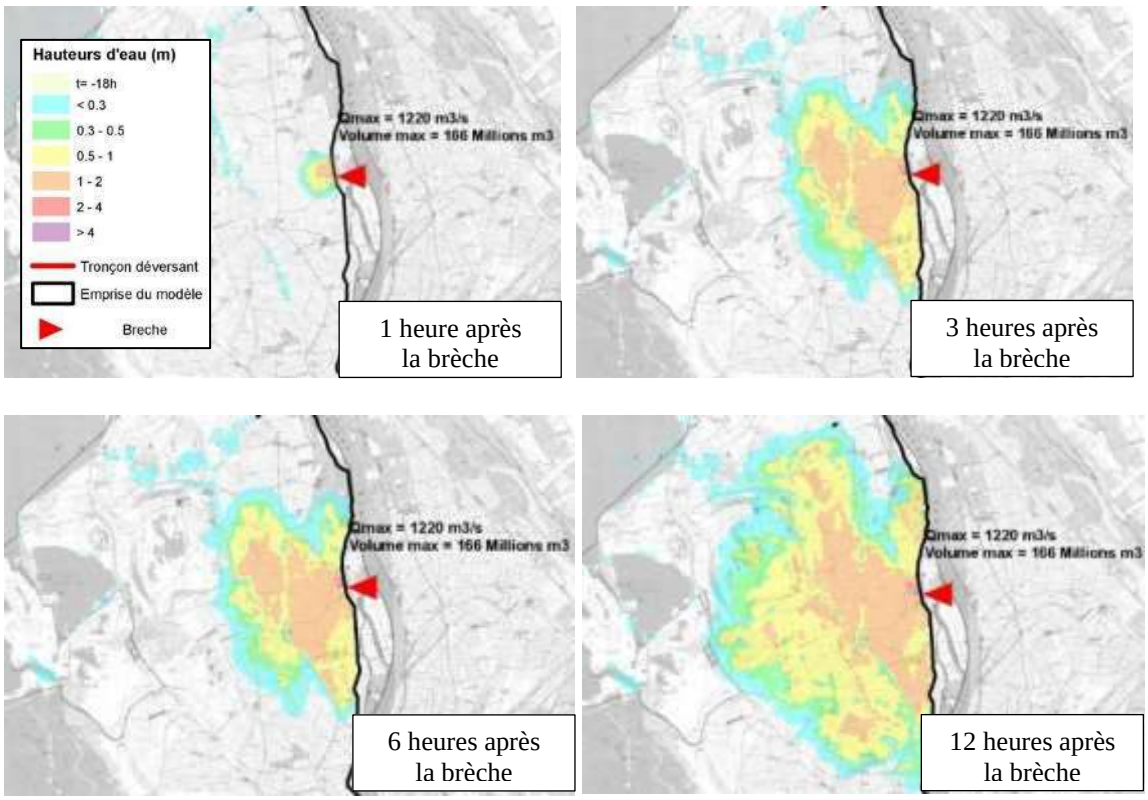


Figure 207. EI 11500 – Brèche Boisverdun – GRD 309,5 - Hauteur d'eau en fonction du temps (en m)

La RD36 est submergée sur environ 1 mètre d'eau après trois heures. Les hauteurs d'eau sont supérieures à 1 mètre après trois heures et s'étendent en amont de Salin de Giraud sans atteindre Salin de Giraud.

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

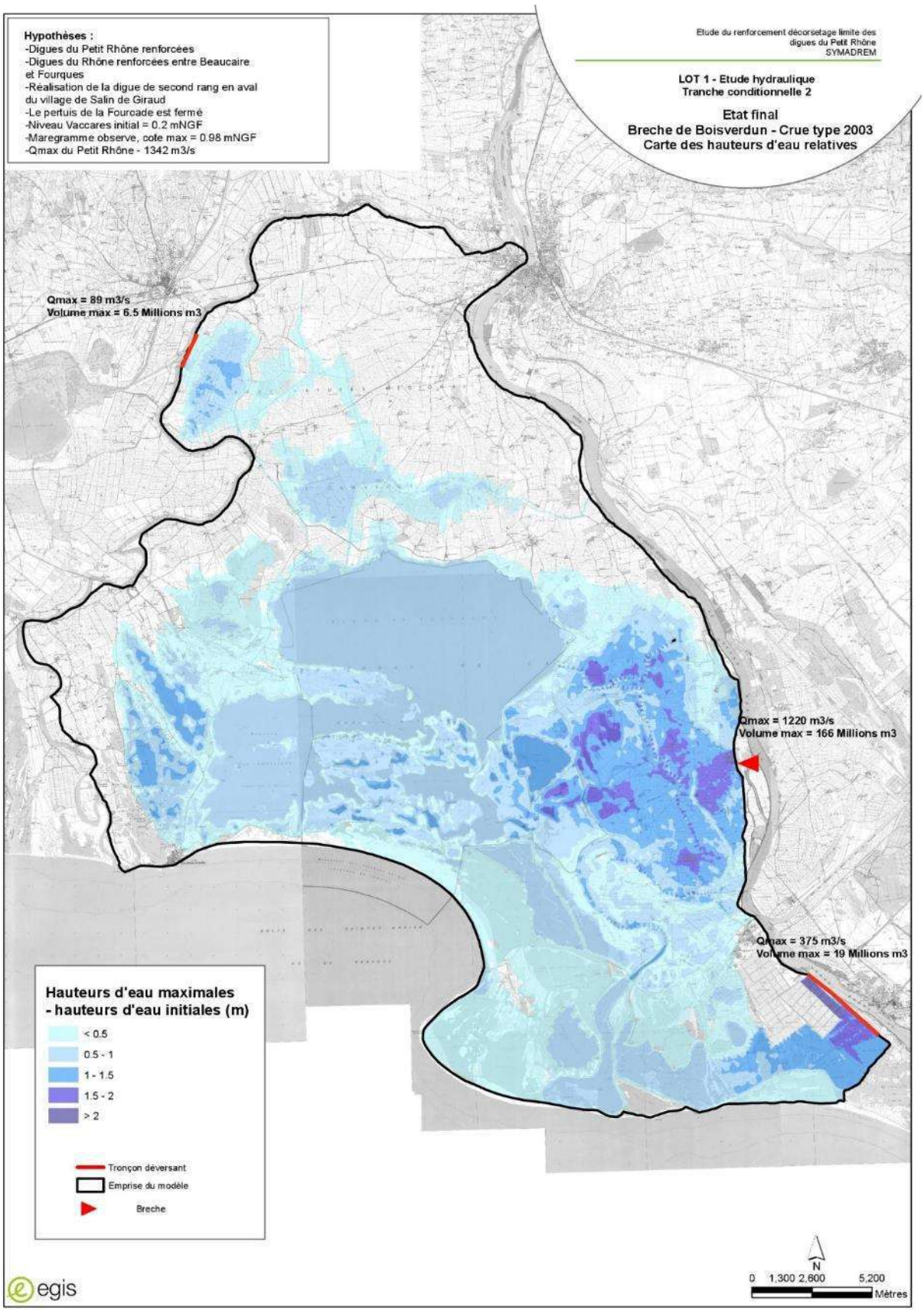


Figure 208. EI 11500 – Brèche Boisverdun – GRD 309,5 - Hauteur d'eau maximale (en m)

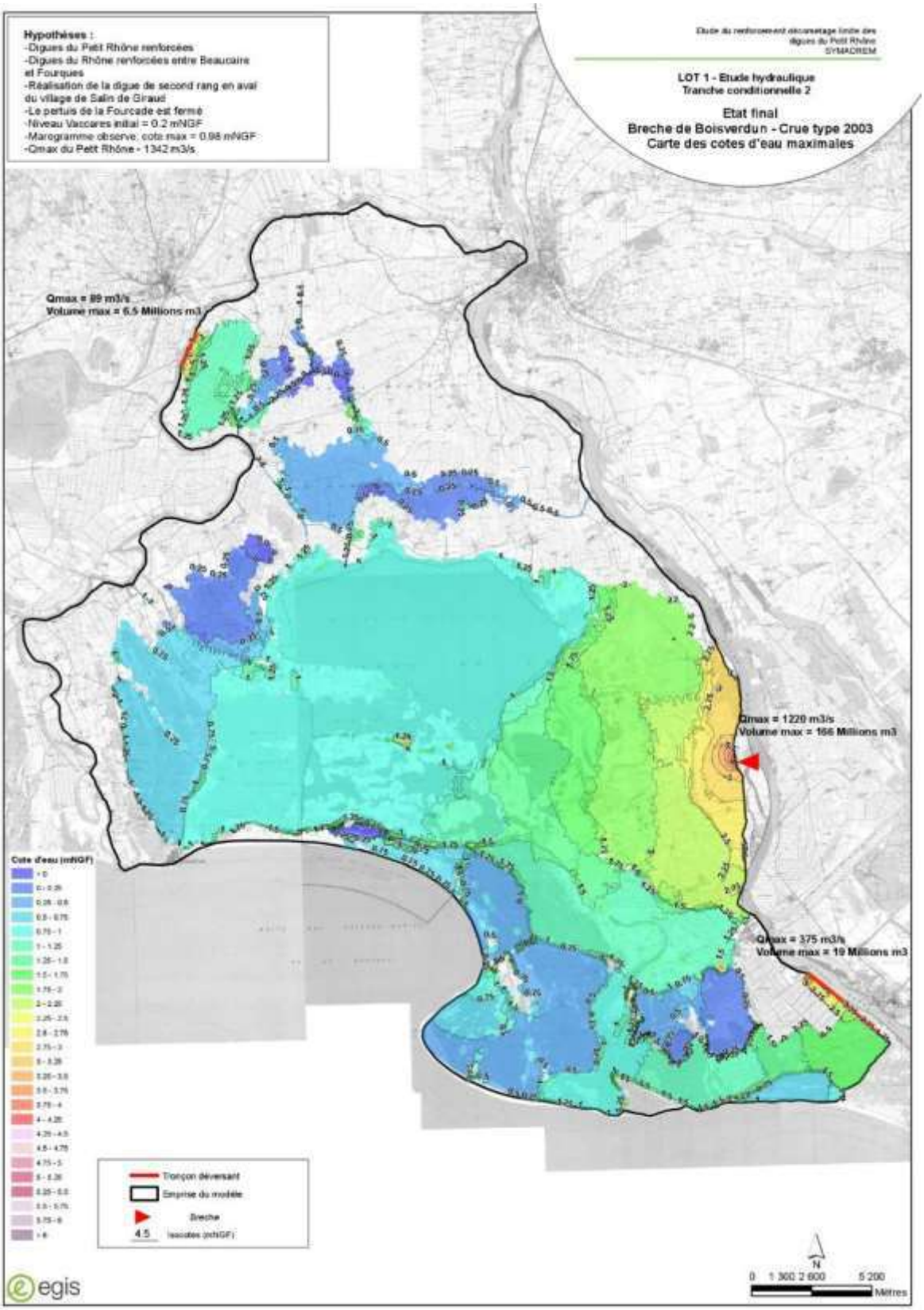


Figure 209. EI 11500 – Brèche Boisverdun – GRD 309,5 - Cote d'eau maximale (m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Figure 210. EI 11500 – Brèche Boisverdun – GRD 309,5 - Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
13	Marais du Pont de Rousty	0,50	0	0,0	1,0
14	Marais de la Grand Mar	0,50	0	0	0,4
16	Etang du Vaccarès	1,25	0,1	0,7	1,1
17	Armelière Sambuc Chamone	3,25	0,8	1,7	2,5
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	1,50	0,3	0,9	1,4
19	Salin de Giraud	1,50	0	0,3	0,9
22	Abords digue Tourtoulen Commanderie	3,00	0	0,4	1,1
23	Abords digue Commanderie Boisverdun	3,75	1,2	1,9	2,7
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	3,25	1,1	1,7	2,4
25	Abords digue Salin de Giraud	2,25	0,0	0,9	1,7
26	Salins du midi sud-est	1,50	0,3	0,8	1,3
31	Marais de Saliers	0,50	0	0	0,5
37	Etang de Ginès	0,75	0	0,6	0,7
38	Saintes-Maries-de-la-Mer	1,25	0	0,1	0,5
39	Paty trinité	0,50	0	0	0,4
40	Vaccarès Est	2,25	0,3	1,5	1,9
41	Esquineau	1,50	0	0,7	1,2

6.11.2 Crue 12500 – Etat actuel/initial – Brèche Boisverdun 200 m – GRD 309,5

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située au GRD 309,5 en amont du tronçon de digue GRD10. Le scénario de crue est celui d'une crue équivalente à celle de mai 1856 (débit de pointe de 12 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée et dans les conditions actuelles d'écoulement.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,006, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 55 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,55 X 0,006 ≅ 0,3 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 2.10^{-2} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 200 mètres,
- Temps d'ouverture : 2 heures,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 1,5 m NGF,
- Cote de la crue : 4,0 m NGF.

Le débit de pointe modélisé de la brèche est estimé à environ 1350 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : plus de 100 heures et le volume de déversement à environ 375 millions de m^3.

Ce scénario d'inondation a été modélisé en supposant que les digues de Salin de Giraud (tracé initial de 2012) et du Petit Rhône 1ère priorité étaient renforcées. Des déversements sans brèche sur les deux digues résistantes à la surverse ont également été pris en compte. Les volumes de déversements en provenance de ces deux digues résistantes à la surverse sont :

- Volume surverse Salin de Giraud : env. 90 millions de m^3 (débit pointe 800 m^3/s),
- Volume surverse Petit Rhône : env. 20 millions de m^3 (débit pointe 140 m^3/s).

Ces apports sont en deçà des incertitudes liées aux hypothèses de modélisation. On notera que les eaux en provenance du Petit Rhône et de la brèche se mélangent mais que celles en provenance de Salin de Giraud et de la brèche ne se mélangent pas.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

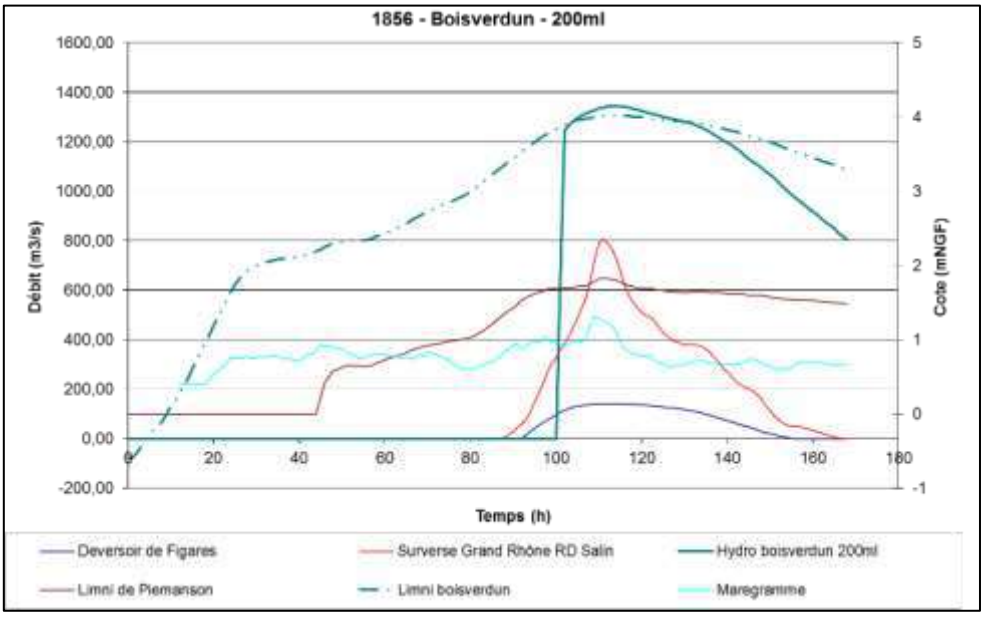


Figure 211. EI 12500 – Brèche Boisverdun 200 – GRD 309,5 - Hydrogramme de brèche

Les trois cartes ci-après illustrent respectivement les hauteurs d'eau maximum (avec prise en compte de la bathymétrie dans le Vaccarès), les temps de propagation et les vitesses d'écoulement maximum atteintes au sein de la zone protégée.

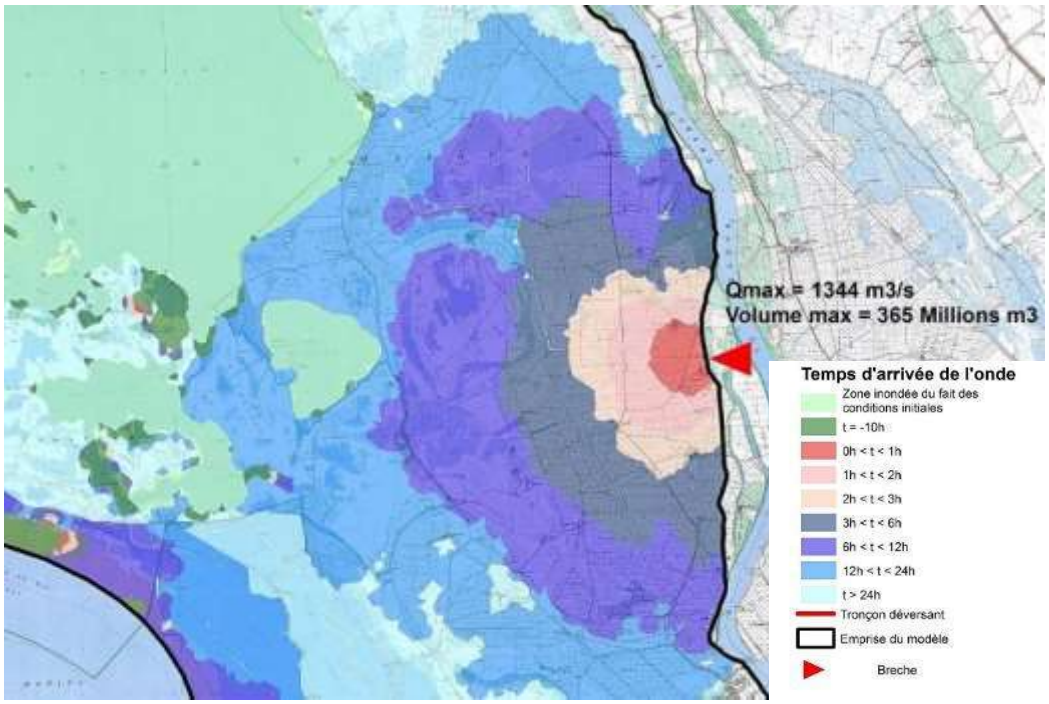


Figure 212. EI 12500 – Brèche Boisverdun – GRD 309,5 - Temps de propagation (h)

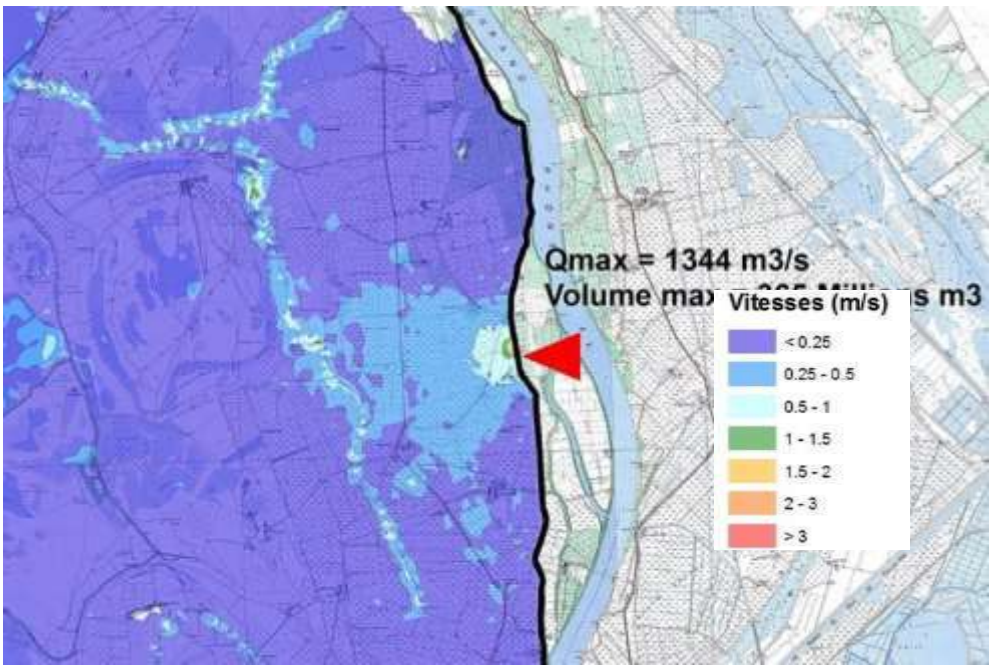


Figure 213. EI 12500 – Brèche Boisverdun – GRD 309,5 - Vitesse maximum (m/s)

Comme pour la brèche EI 11500 avec un débit de 1200 m^3/s, la vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 200 et 600 m de la digue.

Le profil d'écoulement en aval de la brèche non représenté suit un comportement analogue.

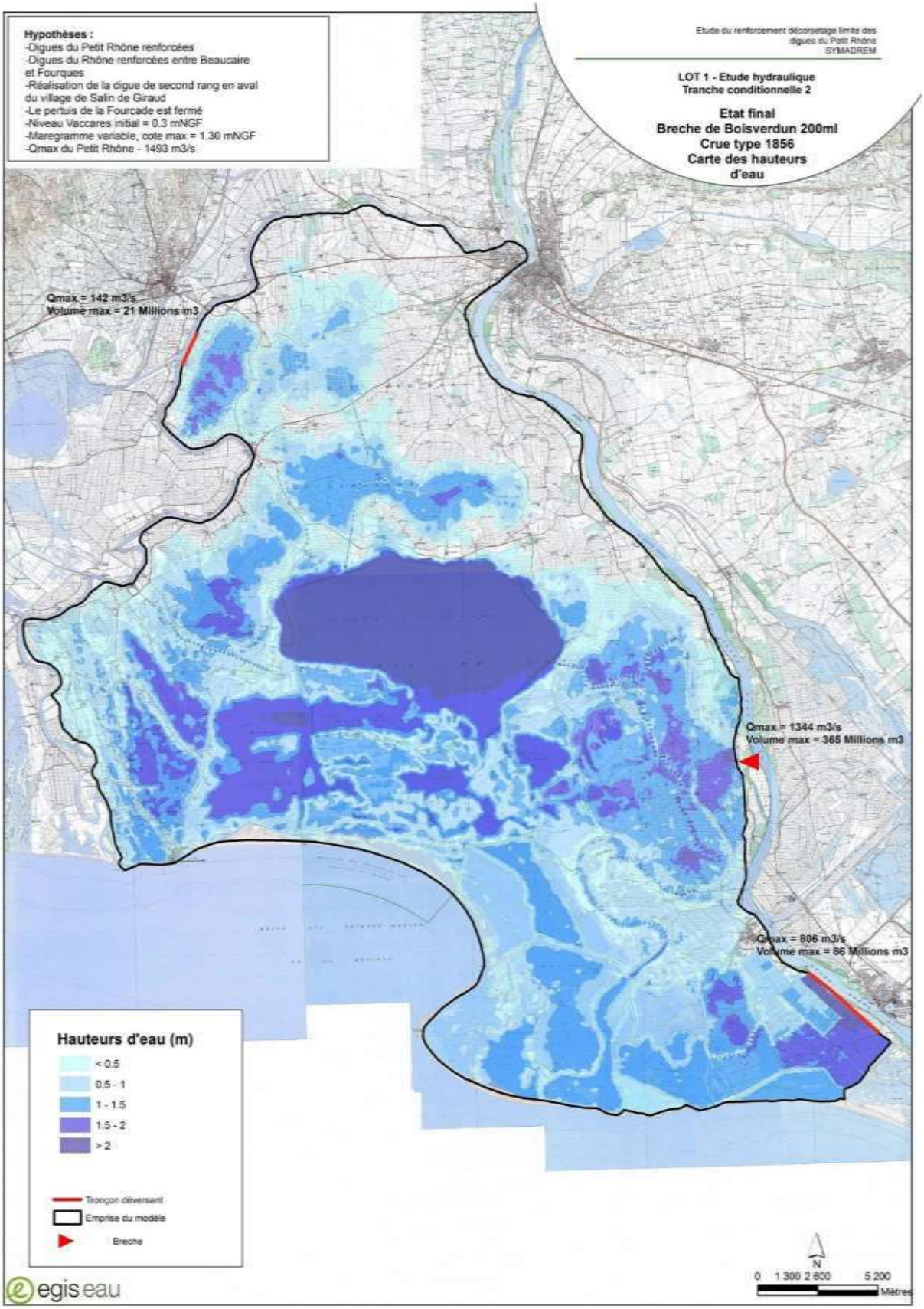


Figure 214. EI 12500 – Brèche Boisverdun 200 – GRD 309,5 - Hauteur d'eau maximale (avec prise en compte de la bathymétrie dans le Vaccarès) (en m)

6.11.3 Crue 12500 – Etat actuel/initial – Brèche Boisverdun 400 m – GRD 309,5

Ce scénario est identique au précédent à l'exception de l'extension finale de la brèche qui n'est plus de 200 m mais de 400 m. Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située au GRD 309,5 en amont du tronçon de digue GRD10. Le scénario de crue est celui d'une crue équivalente à celle de mai 1856 (débit de pointe de 12 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée et dans les conditions actuelles d'écoulement.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,006, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 55 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,55 X 0,006 ≅ 0,3 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 2.10^{-2} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 400 mètres,
- Temps d'ouverture : 5 heures,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 1,5 m NGF,
- Cote de la crue : 4,0 m NGF.

Le débit de pointe modélisé de la brèche est estimé à environ 2700 m^3/s ; la durée correspondant à des déversements importants : plus de 100 heures et le volume de déversement à environ 750 millions de m^3.

Ce scénario d'inondation a été modélisé en supposant que les digues de Salin de Giraud (tracé initial de 2012) et du Petit Rhône 1ère priorité étaient renforcées. Des déversements sans brèche sur les deux digues résistantes à la surverse ont également été pris en compte. Les volumes de déversements en provenance de ces deux digues résistantes à la surverse sont :

- Volume surverse Salin de Giraud : env. 90 millions de m^3 (débit pointe 800 m^3/s),
- Volume surverse Petit Rhône : env. 20 millions de m^3 (débit pointe 140 m^3/s).

Ces apports sont en deçà des incertitudes liées aux hypothèses de modélisation. On notera que les eaux en provenance du Petit Rhône et de la brèche se mélangent mais que celles en provenance de Salin de Giraud et de la brèche ne se mélangent pas.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après :

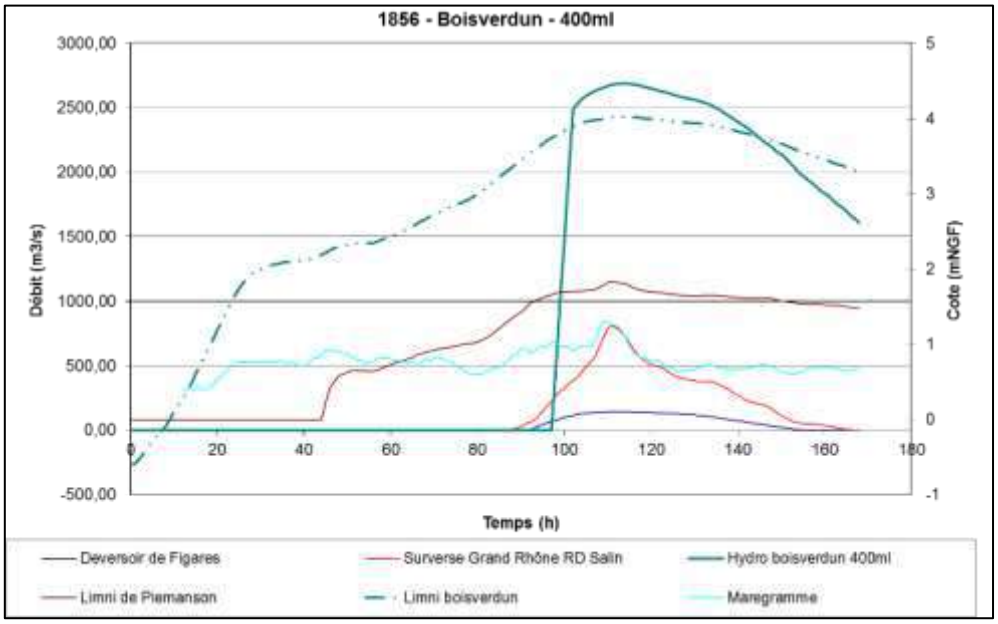


Figure 215. EI 12500 – Brèche Boisverdun 400 – GRD 309,5 - Hydrogramme de brèche

Les trois cartes ci-après illustrent respectivement les hauteurs d'eau maximum, les temps de propagation et les vitesses d'écoulement maximum atteintes au sein de la zone protégée.

La carte ci-après illustre les vitesses d'écoulement en aval de la brèche.

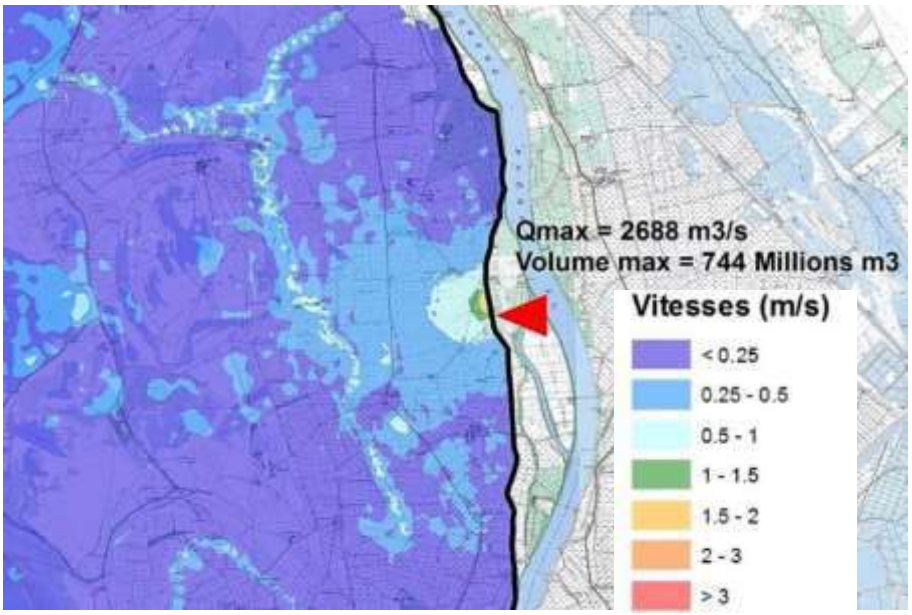


Figure 216. EI 12500 – Brèche Boisverdun 400 – GRD 309,5 - Vitesse maximum (m/s)

La vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 400 et 1200 m de la digue.

Le profil d'écoulement en aval de la brèche non représenté suit un comportement similaire avec des hauteurs d'eau sensiblement supérieures.

La figure ci-dessous donne le temps de propagation de l'onde de rupture, qui est quasiment identique à l'EI 11500. En revanche, comme indiqué plus haut, les hauteurs d'eau sont sensiblement supérieures.

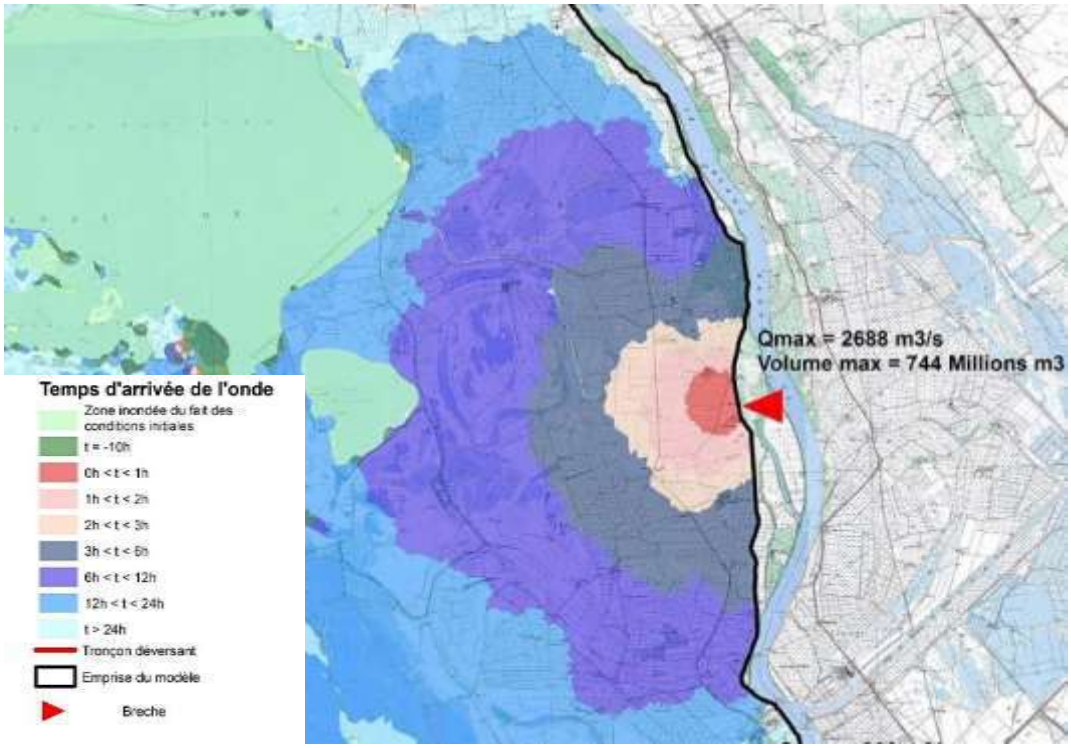


Figure 217. EI 12500 – Brèche Boisverdun 400 – GRD 309,5 - Temps de propagation (h)

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

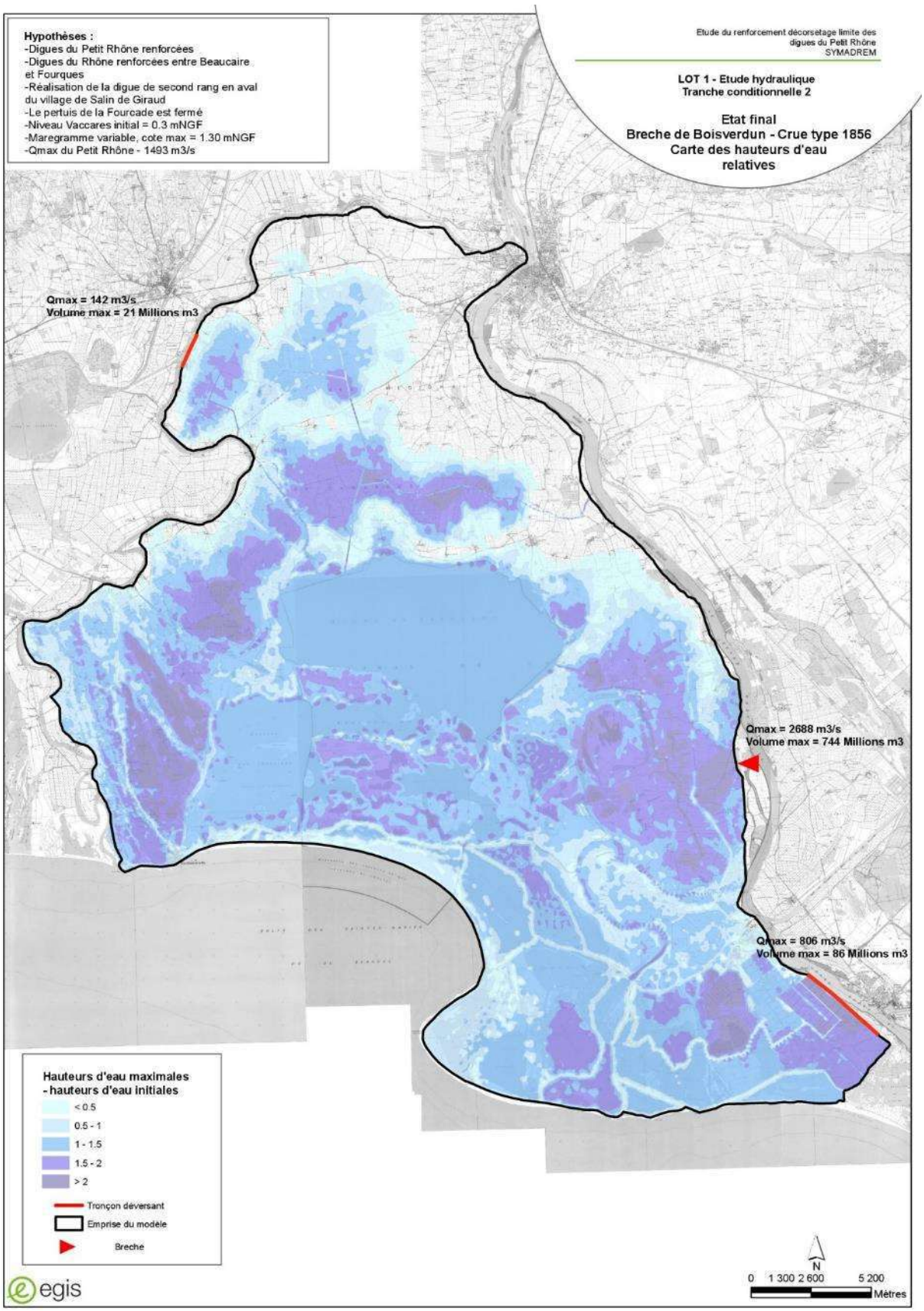


Figure 218. EI 12500 – Brèche Boisverdun 400 – GRD 309,5 - Hauteur d'eau maximale (en m)

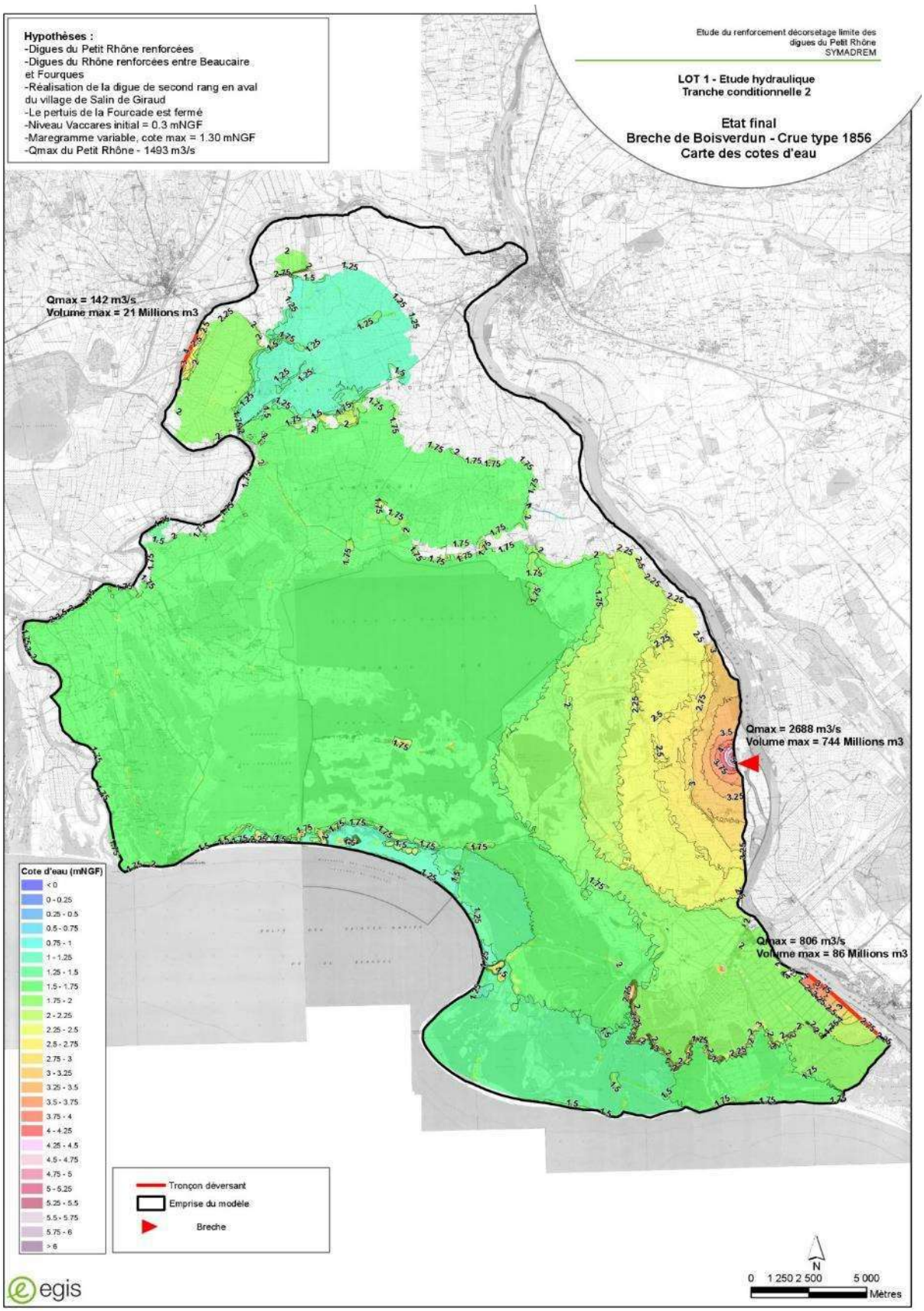


Figure 219. EI 12500 – Brèche Boisverdun 400 – GRD 309,5 - Cote d'eau maximale (m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 44. EI 12500 – Brèche Boisverdun – GRD 309,5 - Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
12	Clos du Mas Neuf	1,75	0	0	0,4
13	Marais du Pont de Rousty	1,75	0	1,2	2,2
14	Marais de la Grand Mar	1,75	0	0,8	1,6
16	Etang du Vaccarès	1,75	0,6	1,2	1,6
17	Armelière Sambuc Chamone	3,50	1,0	2,0	2,8
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	2,00	0,8	1,4	1,9
19	Salin de Giraud	2,00	0,3	0,8	1,4
21	Abords digue Beaujeau Tourtoulen	2,50	0	0	0,2
22	Abords digue Tourtoulen Commanderie	3,25	0	0,7	1,3
23	Abords digue Commanderie Boisverdun	3,75	1,2	1,9	2,7
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	3,50	1,3	2,0	2,6
25	Abords digue Salin de Giraud	2,25	0,0	0,9	1,7
26	Salins du midi sud-est	2,00	0,8	1,3	1,8
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	1,75	0	0	0,4
30	Saliers	1,75	0	0,1	1,3
31	Marais de Saliers	1,75	0,0	1,2	1,8
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	1,75	0	0,3	1,3
34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage	1,75	0,1	0,8	1,4
35	Amarée Dromard	1,75	0,7	1,3	1,7
36	Panperdu Etang des Launes	1,75	0,5	1,1	1,7
37	Etang de Ginès	1,75	0,9	1,6	1,7
38	Saintes-Maries-de-la-Mer	1,75	0	0,6	1,0
39	Paty trinité	1,75	0,2	1,2	1,7
40	Vaccarès Est	2,50	0,6	1,7	2,2
41	Esquineau	2,00	0	1,2	1,7

Les deux figures ci-après donne les hauteurs d'eau maximales dans la zone protégée (avec prise en compte de la bathymétrie du Vaccarès) pour respectivement les scénarios de brèche EI 12500 – Brèche 200 ml et EI 12500 – Brèche 400 ml. Ces deux simulations donnent des extensions d'inondation quasiment équivalentes, seules les hauteurs d'eau diffèrent.

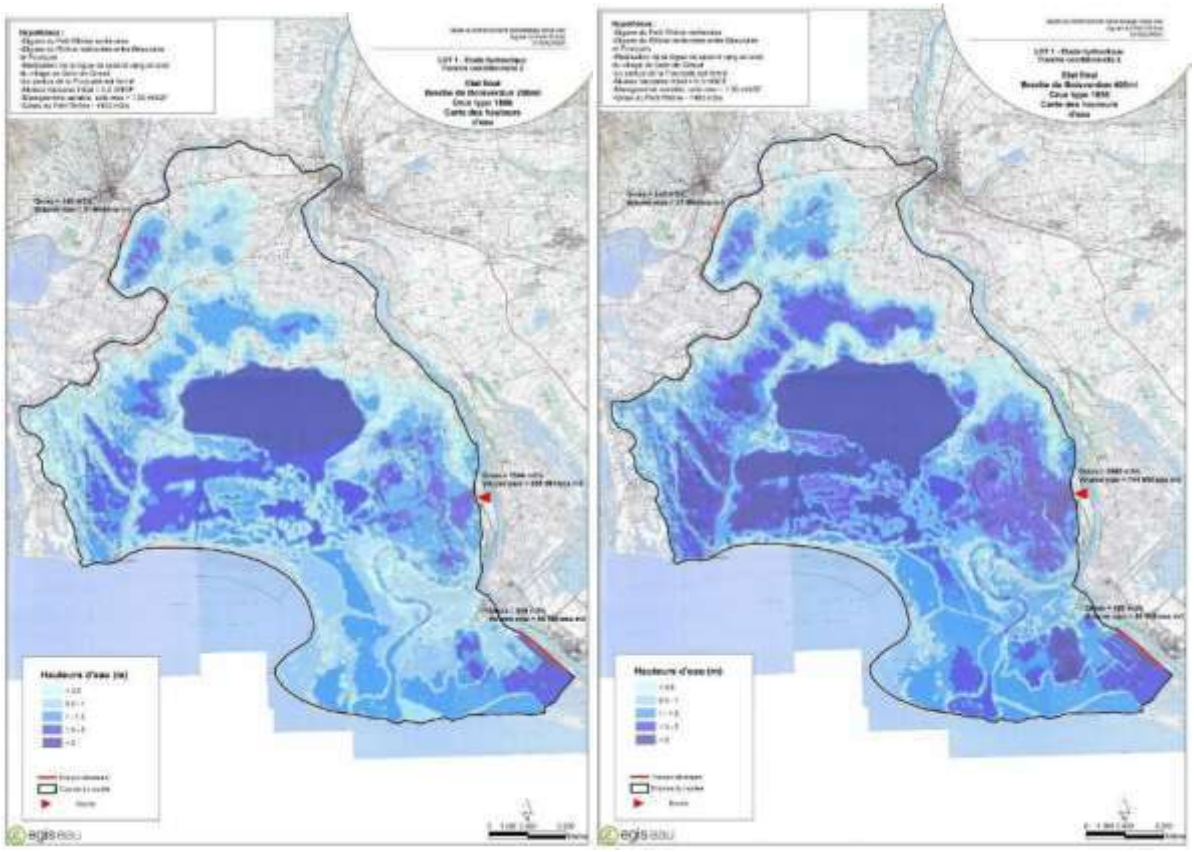


Figure 220. EI 12500 – Comparaison brèches Boisverdun 200 & 400 - hauteur d'eau maximale (en m)

6.11.4 Crue 14160 – Etat actuel/initial – Brèche Boisverdun – GRD 309,5

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située au GRD 309,5 en amont du tronçon de digue GRD10.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 60 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,6 X 0,001 < 0,1 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 2.10^{-2} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 400 mètres,
- Temps d'ouverture : 5 heures,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 1,5 m NGF,
- Cote de la crue : 4,1 m NGF.

Le débit de pointe modélisé de la brèche est estimé à environ 2800 m^3/s et le volume de déversement à environ 1000 millions de m^3.

Ce scénario d'inondation a été modélisé en supposant que les digues de Salin de Giraud (tracé initial de 2012) et du Petit Rhône 1ère priorité étaient renforcées. Des déversements sans brèche sur les deux digues résistantes à la surverse ont également été pris en compte. Les volumes de déversements en provenance de ces deux digues résistantes à la surverse sont :

- Volume surverse Salin de Giraud : ≅ 350 millions de m^3 (débit pointe ≅ 1000 m^3/s),
- Volume surverse Petit Rhône : ≅ 35 millions de m^3 (débit pointe ≅ 175 m^3/s).

Les eaux en provenance des déversements et de la brèche se mélangent, mais ne sont pas de nature à modifier la caractérisation de l'aléa dans la zone protégée.

L'hydrogramme du scénario est donné sur le graphique ci-après.

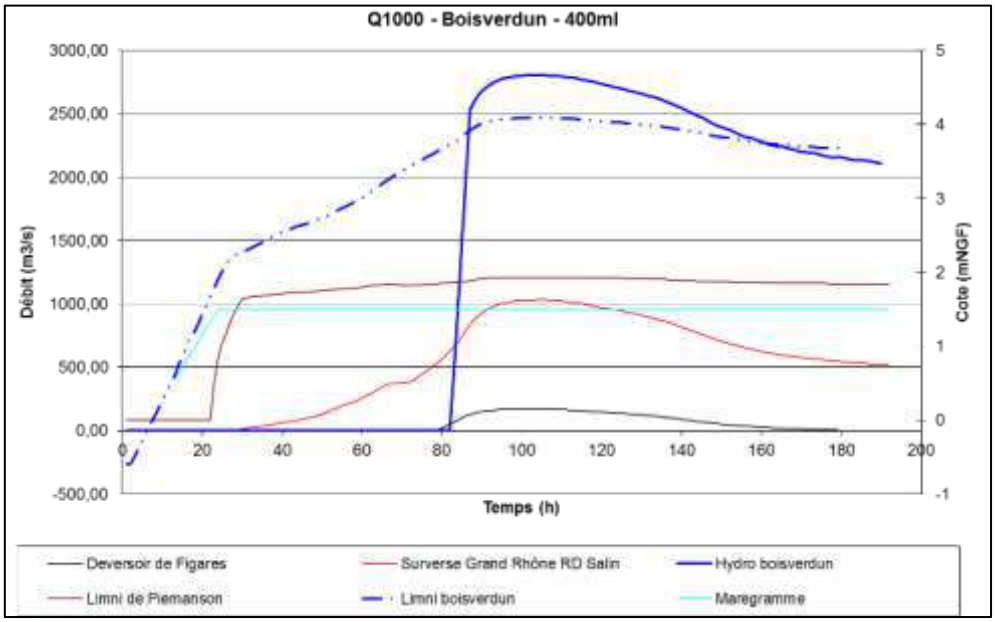


Figure 221. EI 14160 – Brèche Boisverdun – GRD 309,5 - Hydrogramme de brèche

La carte ci-après illustre les vitesses d'écoulement en aval de la brèche. A l'instar de la brèche Boisverdun 400 ml de l'EI 12500, la vitesse des écoulements est inférieure à 1 et 0,5 m/s à respectivement 400 et 1200 m de la digue.

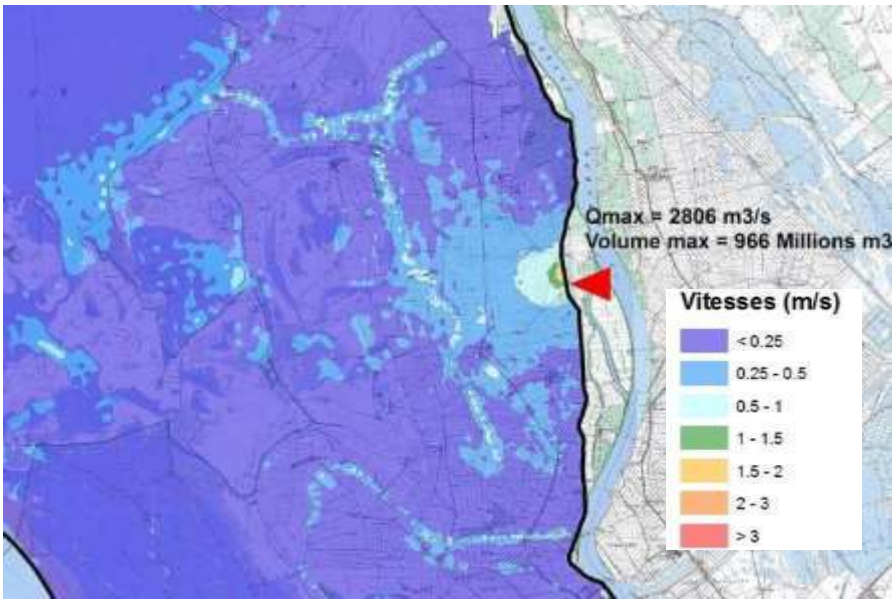


Figure 222. EI 14160 – Brèche Boisverdun – GRD 309,5 - Vitesse maximum (m/s)

Le profil d'écoulement en aval de la brèche non représenté suit un comportement similaire avec des hauteurs d'eau sensiblement supérieures à l'EI 11500 mais équivalentes à l'EI 12500.

La figure ci-dessous donne le temps de propagation de l'onde de rupture, qui est quasiment identique à l'EI 11500. En revanche, comme indiqué plus haut, les hauteurs d'eau sont sensiblement supérieures.

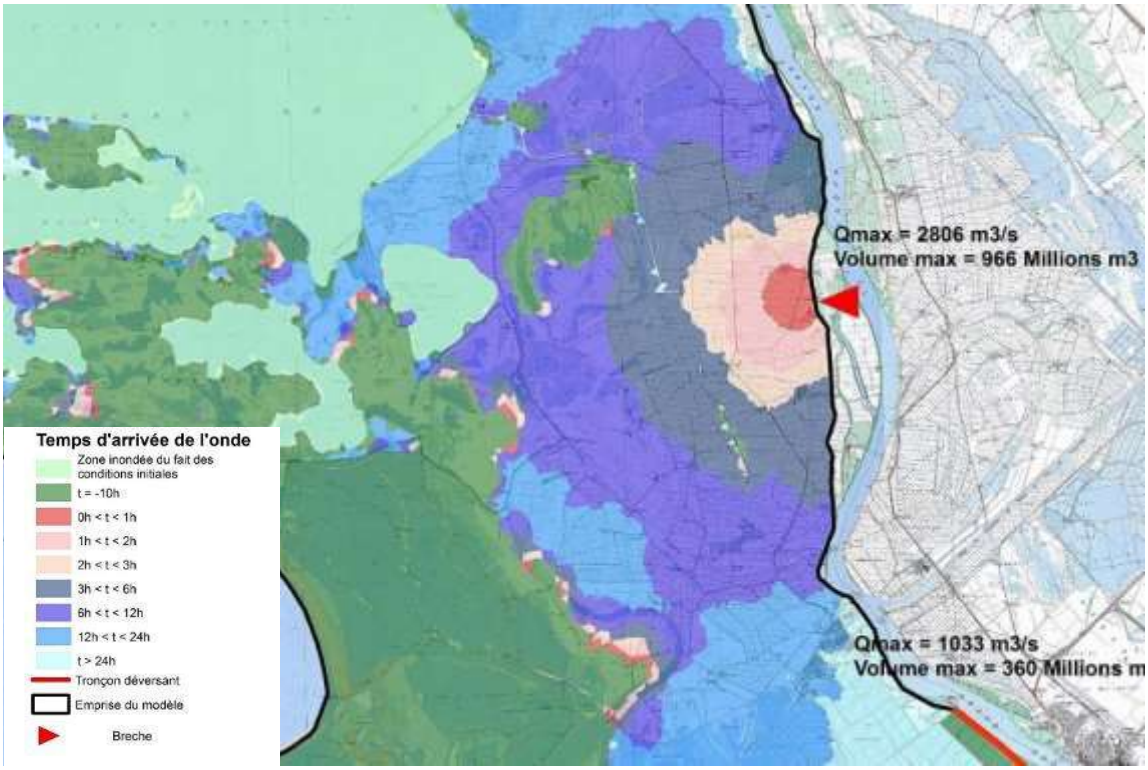


Figure 223. EI 14160 – Brèche Boisverdun – GRD 309,5 - Temps de propagation (h)

Les figures ci-après illustrent respectivement les hauteurs et cotes d'eau maximum atteintes au sein de la zone protégée.

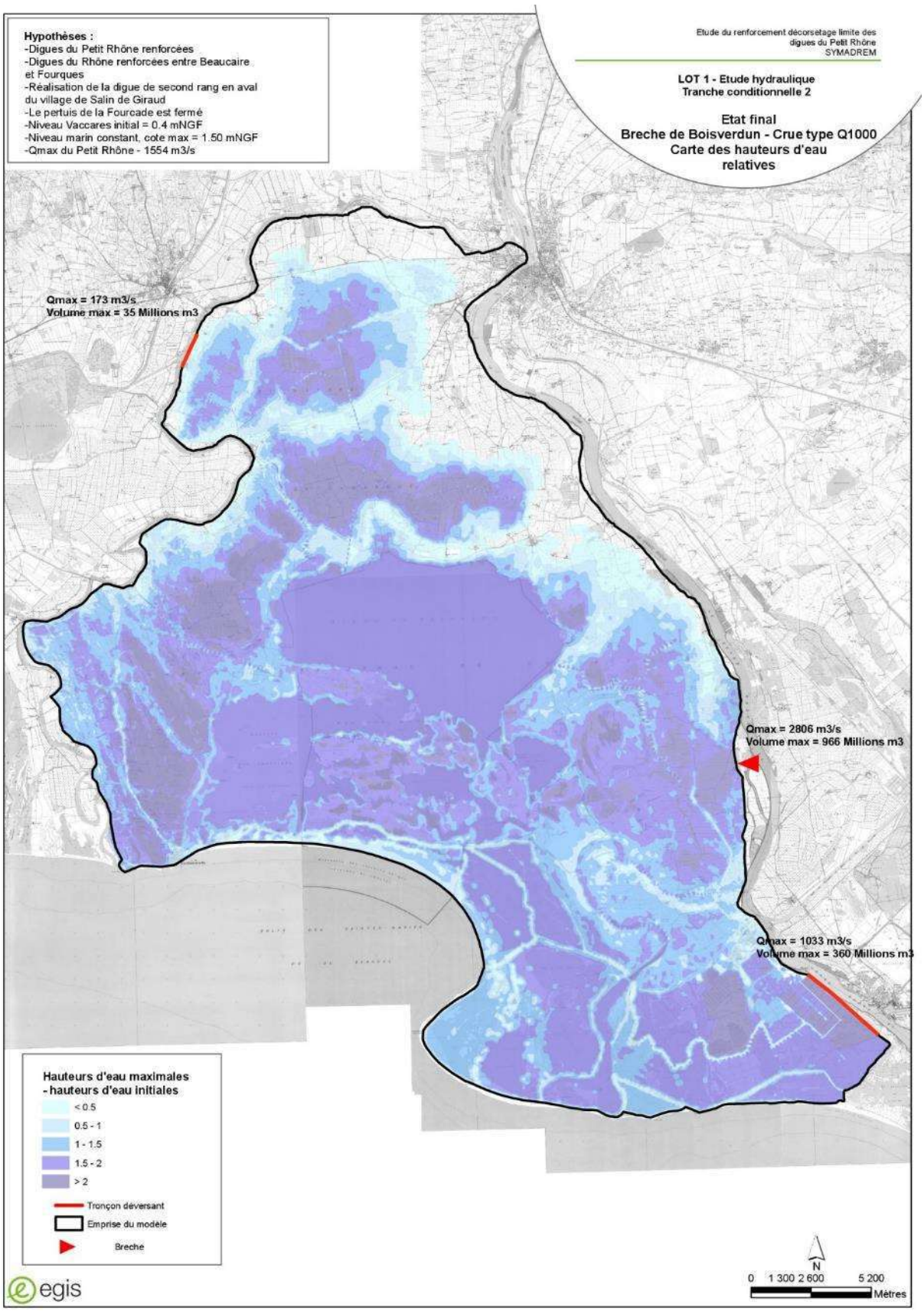


Figure 224. EI 14160 – Brèche Boisverdun – GRD 309,5 - Hauteur d'eau maximale (en m)

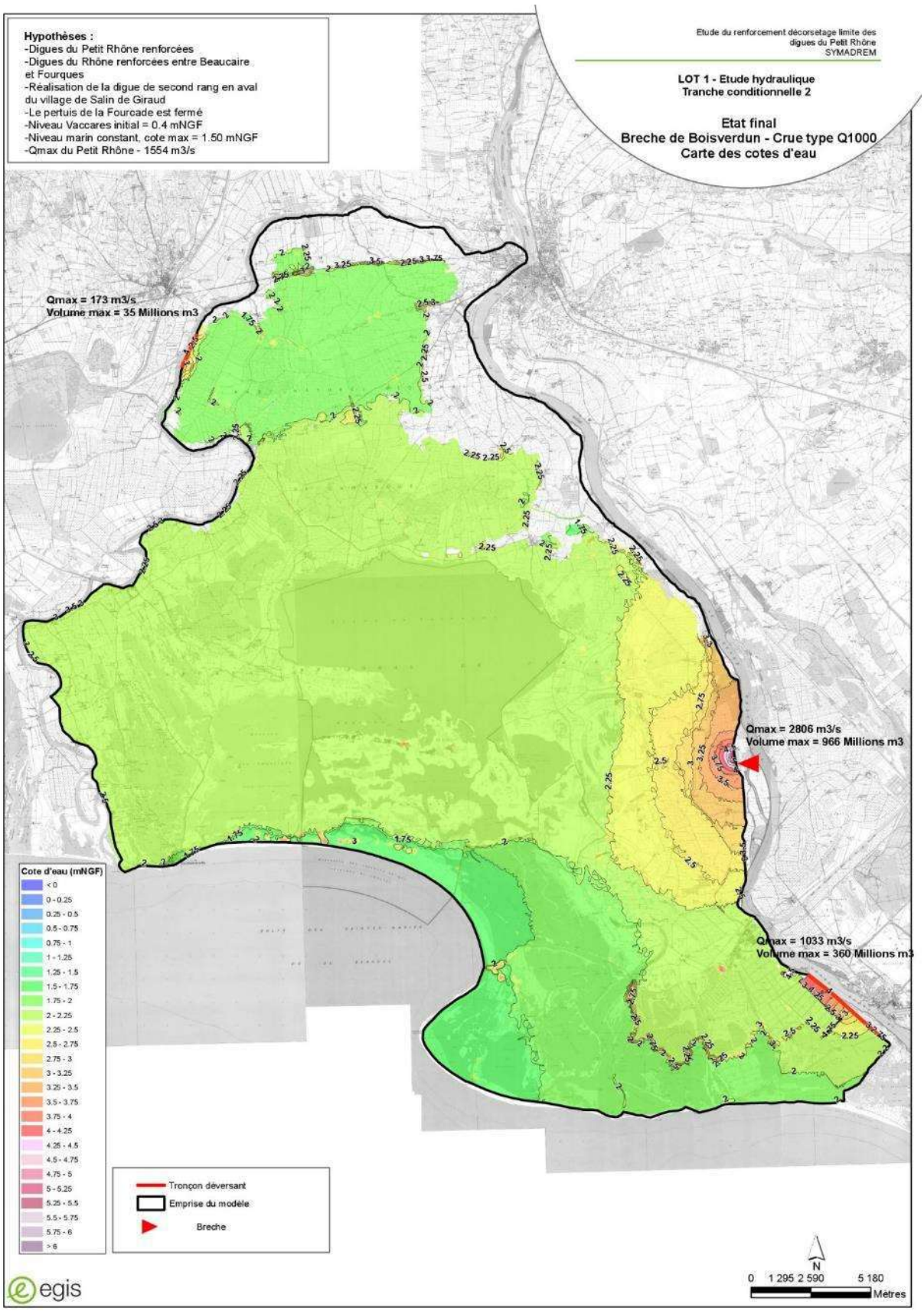


Figure 225. EI 14160 – Brèche Boisverdun – GRD 309,5 – Cote d'eau maximale (m NGF)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 45. EI 14160 – Brèche Boisverdun – GRD 309,5 - Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
10	Gimeaux	2,00	0	0,3	0,9
12	Clos du Mas Neuf	2,00	0	0	0,6
13	Marais du Pont de Rousty	2,00	0,1	1,5	2,5
14	Marais de la Grand Mar	2,25	0	1,3	2,1
15	Montlong	2,25	0	0	0,4
16	Etang du Vaccarès	2,25	1,1	1,7	2,1
17	Armelière Sambuc Chamone	3,75	1,3	2,2	3,0
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	2,25	1,1	1,6	2,1
19	Salin de Giraud	2,25	0,6	1,1	1,6
21	Abords digue Beaujeau Tourtoulen	2,50	0	0	0,2
22	Abords digue Tourtoulen Commanderie	3,25	0	0,7	1,3
23	Abords digue Commanderie Boisverdun	3,50	0,9	1,7	2,5
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	3,50	1,3	2,0	2,6
25	Abords digue Salin de Giraud	2,50	0,3	1,2	2,0
26	Salins du midi sud-est	2,25	1,0	1,5	2,0
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	2,00	0	0	0,7
30	Saliers	2,00	0	0,4	1,5
31	Marais de Saliers	2,00	0,2	1,4	2,0
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	2,25	0	0,8	1,8
34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage	2,25	0,6	1,3	1,9
35	Amarée Dromard	2,25	1,2	1,8	2,2
36	Panperdu Etang des Launes	2,25	1,0	1,6	2,2
37	Etang de Ginès	2,25	1,4	2,1	2,2
38	Saintes-Maries-de-la-Mer	2,25	0,4	1,1	1,5
39	Paty trinité	2,25	0,7	1,7	2,2
40	Vaccarès Est	2,50	0,6	1,7	2,2
41	Esquineau	2,25	0	1,5	1,9

6.12 BRECHE D'AMERIQUE

2 crues ont été modélisées pour cette brèche dans l'état initial : 11500 et 12500.

6.12.1 Crue 11500 – Etat actuel/initial – Brèche Amérique – GRD 313,7

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située au GRD 313,7 en amont du tronçon de la digue de Salin de Giraud en renforcer (GRD 12) pour une crue équivalente à celle de décembre 2003 (débit de pointe de 11 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,008, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 85 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,85 X 0,008 ≅ 0,7 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 2.10^{-1} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 200 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 7 mètres,
- Temps d'ouverture digue + fosse : 11 heures,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 1,3 m NGF,
- Cote de la crue : 3,4 m NGF.

La dynamique précise d'ouverture retenue est la suivante :

- début du mécanisme de brèche lorsque le niveau maximal est atteint dans le lit mineur,
- affaissement de la crête de 0,5 m, sur une longueur de 25 m, en 1 h,
- affaissement de la crête de 1 m de plus, sur une longueur totale de 100 m, pendant les 2 h suivantes,
- affaissement de la crête de 1 m de plus, sur une longueur totale de 200 m, pendant les 4 h suivantes,
- affaissement de 3 m de plus, sur une longueur totale de 200 m, jusqu'à former une fosse sur l'emprise de la digue se prolongeant d'environ 10 m en aval, pendant les 4 h suivantes.

Les trois cartes ci-après illustrent respectivement les hauteurs d'eau (2 échelles différentes) et vitesses d'écoulement maximum atteintes au sein de la zone protégée.

Jusqu'à l'atteinte des cotes maximales dans le lit endigué, le calcul est identique à la situation sans brèche. Puis survient la brèche de l'Amérique (t=100h) sur une zone déjà inondée par l'aval.
L'inondation par Chamone, qui a déjà touché la majeure partie de Salin de Giraud, rencontre l'inondation par l'Esquineau légèrement plus tard (t=113h) que dans la situation sans brèche, mais toujours au niveau des marais salants situés au sud de l'agglomération (salin des Vanneaux).
À la fin du calcul (t=120h), par rapport à la situation sans brèche, l'inondation est plus importante en surface et en niveau vers le nord, dans la plaine de Camargue, mais quasiment identique au sud dans les marais salants

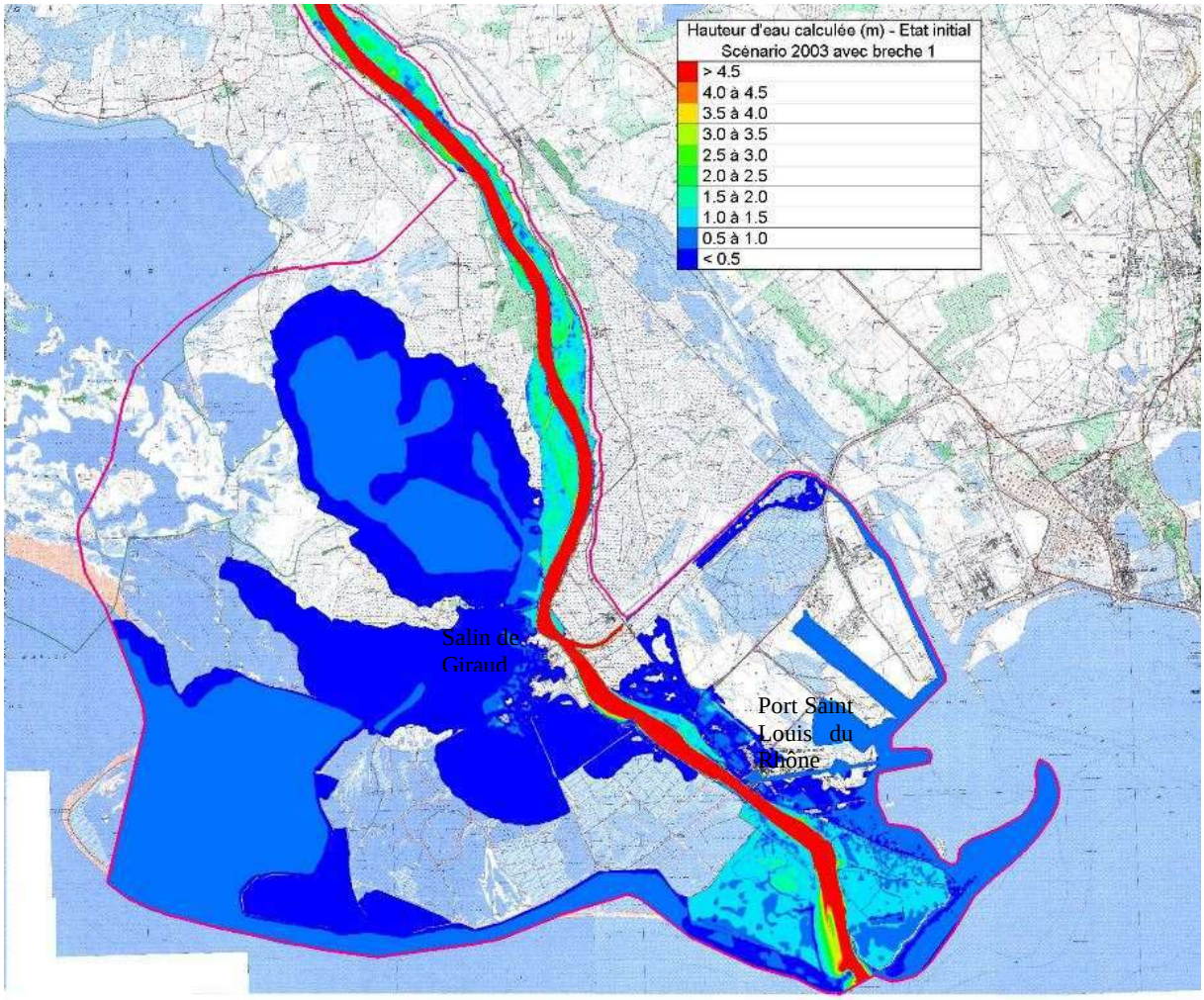


Figure 226. EI 11500 – Brèche Amérique – GRD 313,7 - Hauteur d'eau maximale (m)

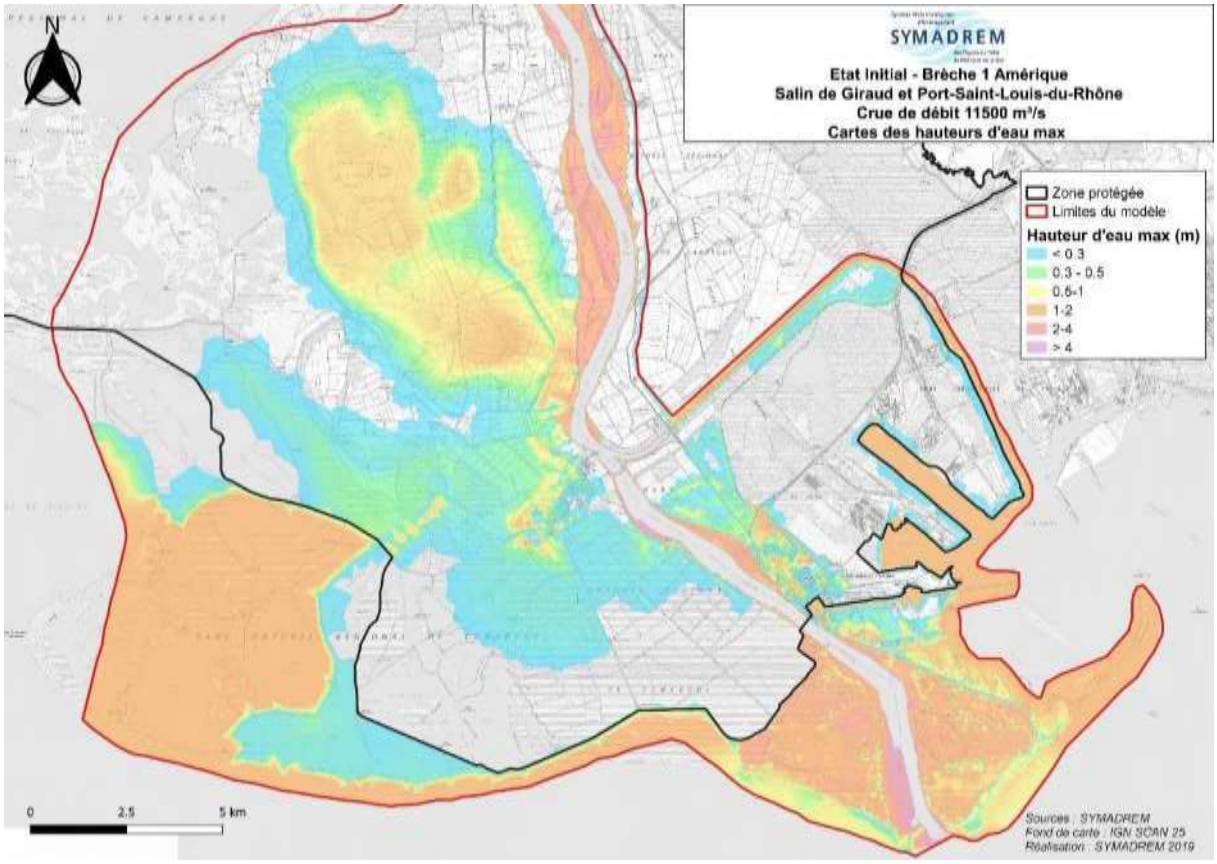


Figure 227. EI 11500 – Brèche Amérique – GRD 313,7 - Hauteur d'eau maximale (m)

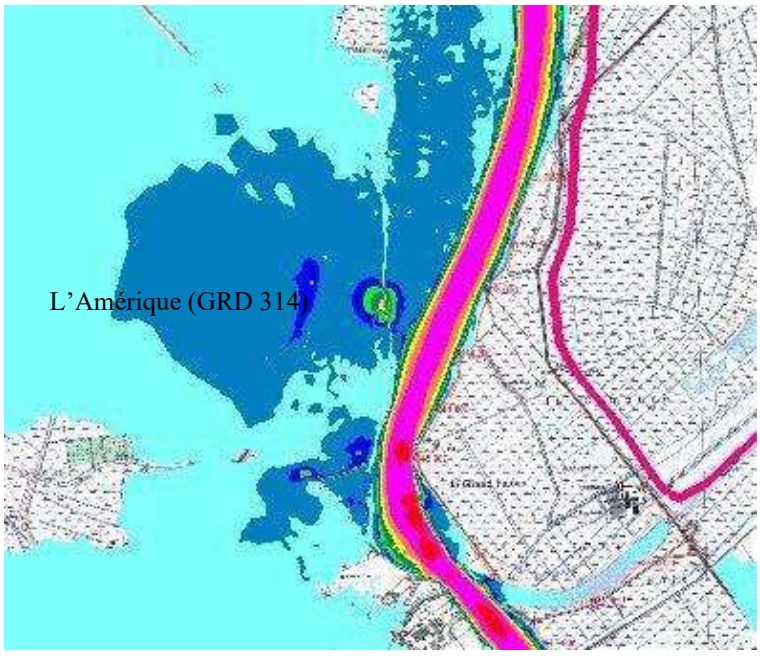


Figure 228. EI 11500 – Brèche Amérique – GRD 313,7 - Vitesse maximum (m/s)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 46. EI 11500 – Brèche Amérique – GRD 313,7 - Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
17	Armelière Sambuc Chamone	2,25	0	0,7	1,5
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	1,25	0,1	0,6	1,1
19	Salin de Giraud	1,75	0,1	0,6	1,1
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	2,75	0,6	1,2	1,9
25	Abords digue Salin de Giraud	3,00	0,8	1,7	2,5
26	Salins du midi sud-est	1,50	0,3	0,8	1,3
40	Vaccarès Est	1,50	0	0,7	1,2
41	Esquineau	1,50	0	0,7	1,2

6.12.2 Crue 12500 – Etat actuel/initial – Brèche Amérique – GRD 313,7

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située au GRD 313,7 en amont du tronçon de la digue de Salin de Giraud en renforcer (GRD 12) pour une crue équivalente à celle de mai 1856 (débit de pointe de 12 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée et dans les conditions actuelles d'écoulement.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,006, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 95 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,95 X 0,006 ≅ 0,6 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 2.10^{-1} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 200 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 7 mètres,
- Temps d'ouverture digue + fosse : 11 heures,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 1,3 m NGF,
- Cote de la crue : 3,5 m NGF.

La dynamique précise d'ouverture retenue est la suivante :

- début du mécanisme de brèche lorsque le niveau maximal est atteint dans le lit mineur,
- affaissement de la crête de 0,5 m, sur une longueur de 25 m, en 1 h,
- affaissement de la crête de 1 m de plus, sur une longueur totale de 100 m, pendant les 2 h suivantes,
- affaissement de la crête de 1 m de plus, sur une longueur totale de 200 m, pendant les 4 h suivantes,
- affaissement de 3 m de plus, sur une longueur totale de 200 m, jusqu'à former une fosse sur l'emprise de la digue se prolongeant d'environ 10 m en aval, pendant les 4 h suivantes.

Les trois cartes ci-après illustrent respectivement les hauteurs d'eau (2 échelles différentes) et vitesses d'écoulement maximum atteintes au sein de la zone protégée.

Jusqu'à l'atteinte des cotes maximales dans le lit endigué, le calcul est identique à la situation sans brèche. Puis survient la brèche de l'Amérique (t=112h) sur une zone déjà inondée par l'aval.

À la fin du calcul (t=144h), par rapport à la situation sans brèche, l'inondation est plus importante en surface et en niveau vers le nord dans la plaine de Camargue et elle atteint l'étang du Fournelet. En revanche, elle est moins étendue sur les marais salants au sud puisqu'elle n'atteint pas le marais de l'Eysselle, et en RG, le centre-ville de Port-Saint-Louis est très légèrement moins touché.

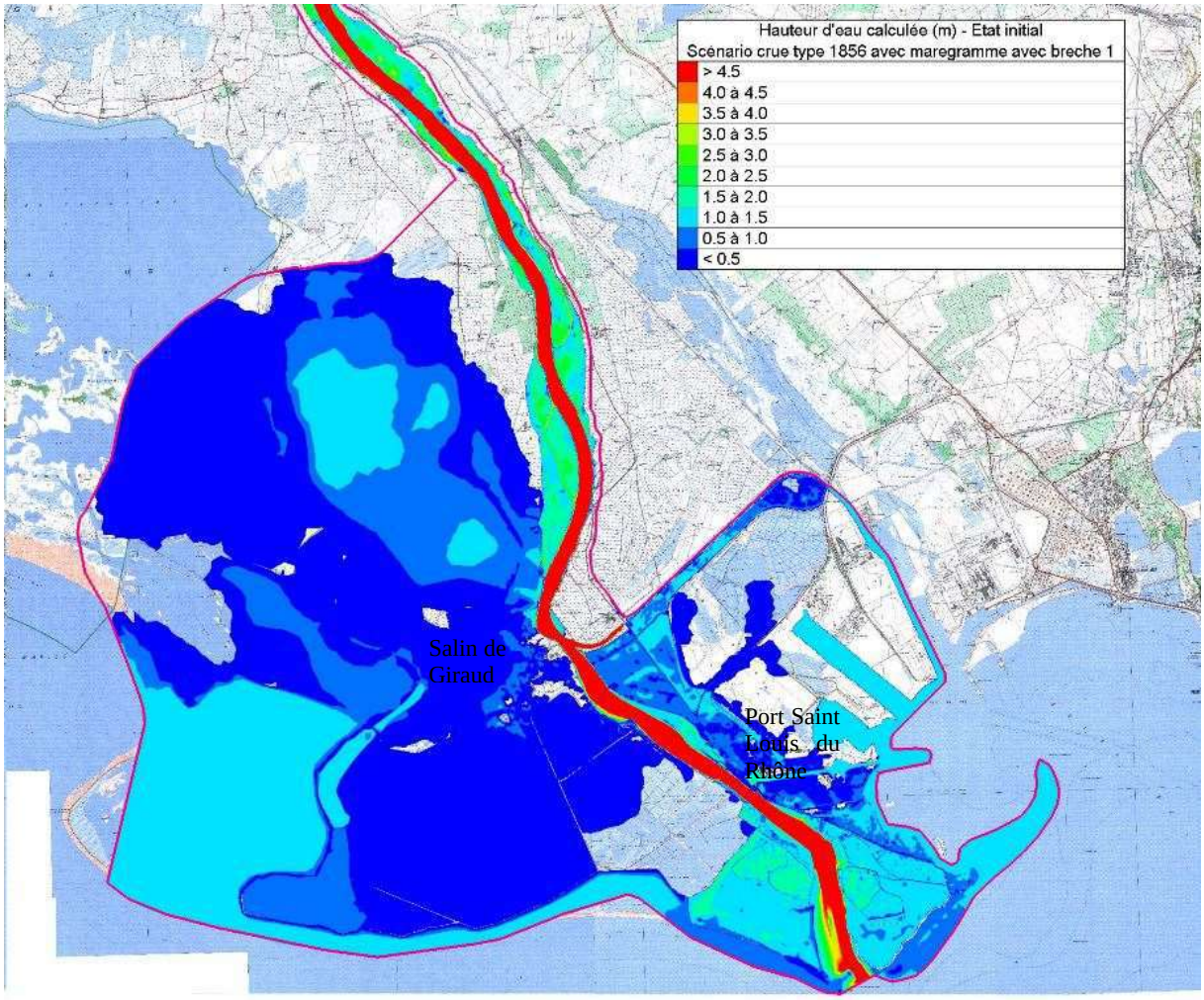


Figure 229. EI 12500 – Brèche Amérique – GRD 313,7 - Hauteur d'eau maximale (m)

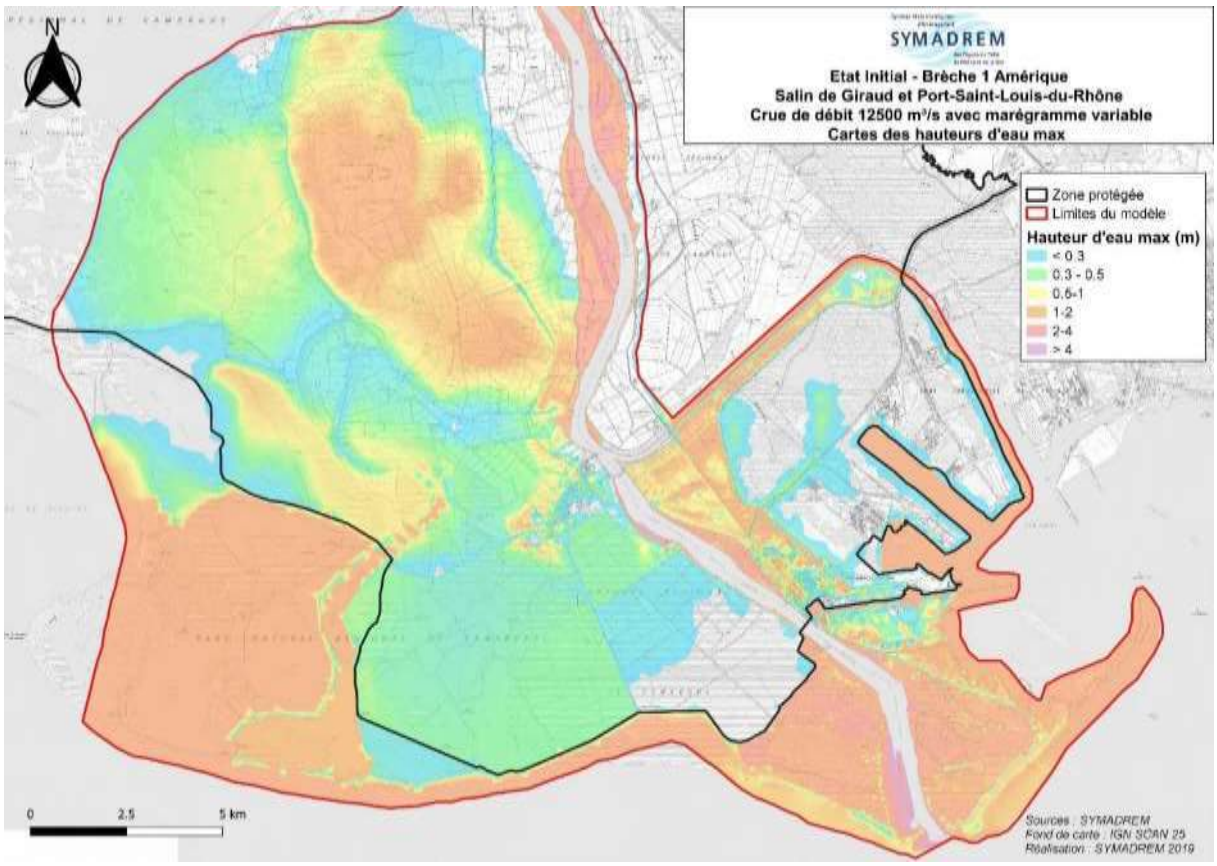


Figure 230. EI 12500 – Brèche Amérique – GRD 313,7 - Hauteur d'eau maximale (m)

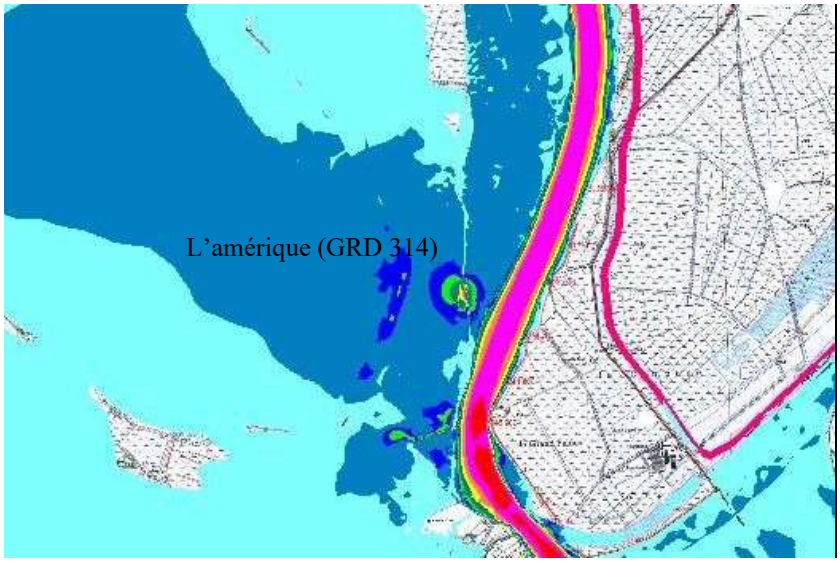


Figure 231. EI 12500 – Brèche Amérique – GRD 313,7 - Vitesse maximum (m/s)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle

est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 47. EI 12500 – Brèche Amérique – GRD 313,7 - Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
16	Etang du Vaccarès	1,25	**0,1**	**0,7**	**1,1**
17	Armelière Sambuc Chamone	2,25	**0**	**0,7**	**1,5**
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	1,50	**0,3**	**0,9**	**1,4**
19	Salin de Giraud	1,75	**0,1**	**0,6**	**1,1**
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	2,75	**0,6**	**1,2**	**1,9**
25	Abords digue Salin de Giraud	3,00	**0,8**	**1,7**	**2,5**
26	Salins du midi sud-est	1,50	**0,3**	**0,8**	**1,3**
40	Vaccarès Est	1,75	**0**	**1,0**	**1,4**
41	Esquineau	1,50	**0**	**0,7**	**1,2**

6.13 BRECHE DE BARCARIN

2 crues ont été modélisées pour cette brèche dans l'état initial : 11500 et 12500.

6.13.1 Crue 11500 – Etat actuel/initial – Brèche Barcarin – GRD 315,7

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située au GRD 315,7 juste en amont de Salin de Giraud sur le tronçon de la digue de Salin de Giraud à renforcer (GRD 12) pour une crue équivalente à celle de décembre 2003 (débit de pointe de 11 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,008, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 85 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,85 X 0,008 ≅ 0,7 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 2.10^{-1} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 100 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 7 mètres,
- Temps d'ouverture digue + fosse : 5,5 heures,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 1,2 m NGF,
- Cote de la crue : 3,15 m NGF.

La dynamique précise d'ouverture retenue est la suivante :

- affaissement brusque de la crête de 1,5 m, sur une longueur de 50 m, en 0,5 h,
- affaissement de la crête de 1,5 m de plus, sur une longueur totale de 100 m, pendant les 2 h suivantes,
- affaissement de 5 m de plus, sur une longueur totale de 100 m, jusqu'à former une fosse sur l'emprise de la digue se prolongeant d'environ 10 m en aval, pendant les 2 h suivantes.

Cette brèche a l'impact le plus préjudiciable pour Salin de Giraud, avec des vitesses très importantes dans l'agglomération et la coupure des voies d'évacuation.

Les trois cartes ci-après illustrent respectivement les hauteurs d'eau (2 échelles différentes) et vitesses d'écoulement maximum atteintes au sein de la zone protégée.

Jusqu'à l'atteinte des cotes maximales dans le lit endigué, le calcul est identique à la situation sans brèche. Puis survient la brèche à l'amont immédiat de Salin de Giraud (t=100h) sur une zone déjà inondée par l'aval.

Salin de Giraud –déjà touché par l'inondation par Chamone– est entièrement submergé avec des vitesses importantes. Cette inondation rencontre l'inondation par l'Esquineau plus tôt (t=107h) que dans la situation sans brèche, mais toujours au niveau des marais salants situés au sud de l'agglomération (salin des Vanneaux). De plus, l'inondation fluviale amont traverse les marais salants et atteint la digue à la mer au sud.
À la fin du calcul (t=120h), par rapport à la situation sans brèche, l'inondation est aggravée en surface et en niveau sur Salin de Giraud et vers le sud : la majeure partie des marais salants est touchée. L'extension nord de l'inondation est quasiment identique

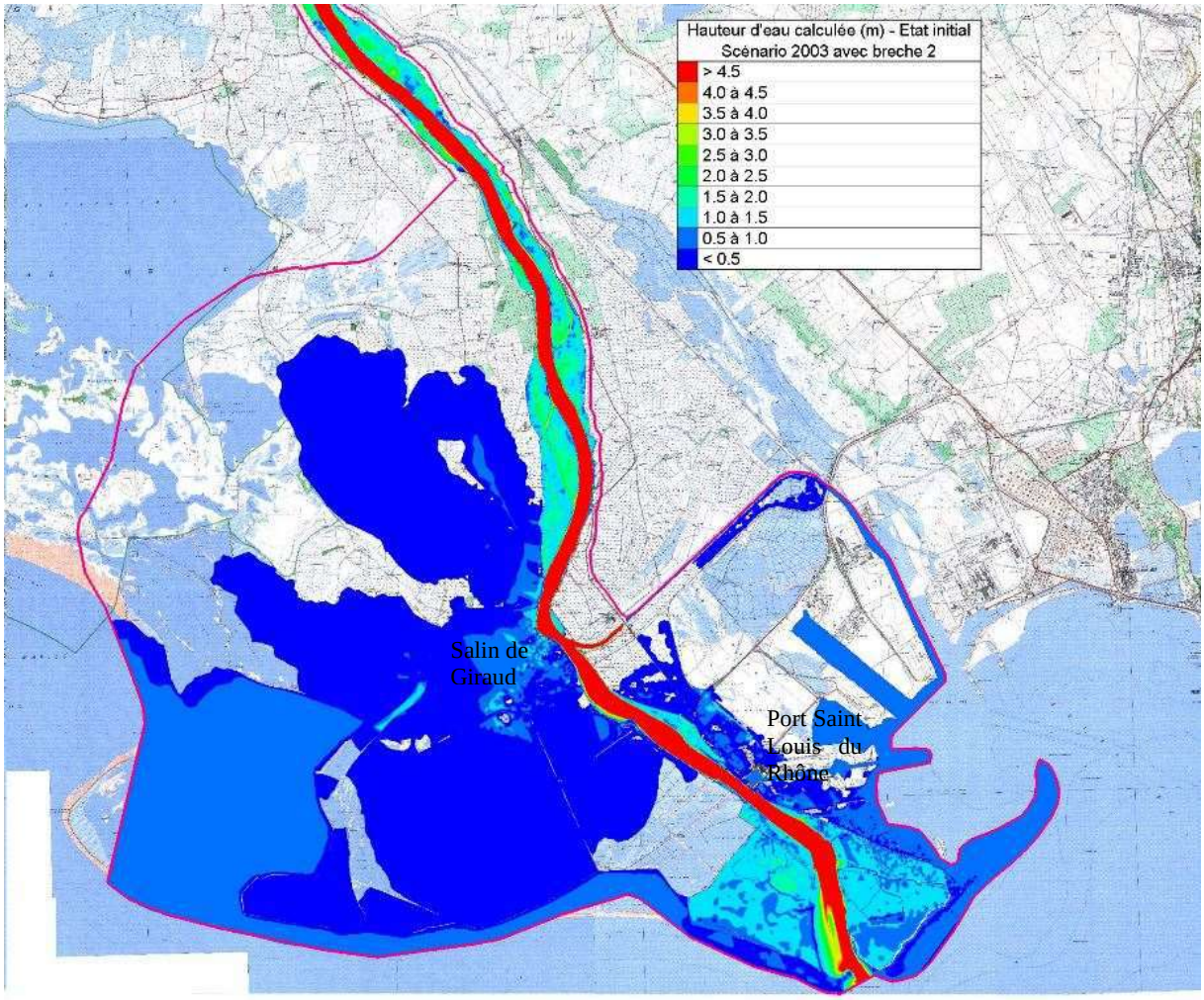


Figure 232. EI 11500 – Brèche Barcarin – GRD 315,7 - Hauteur d'eau maximale (m)

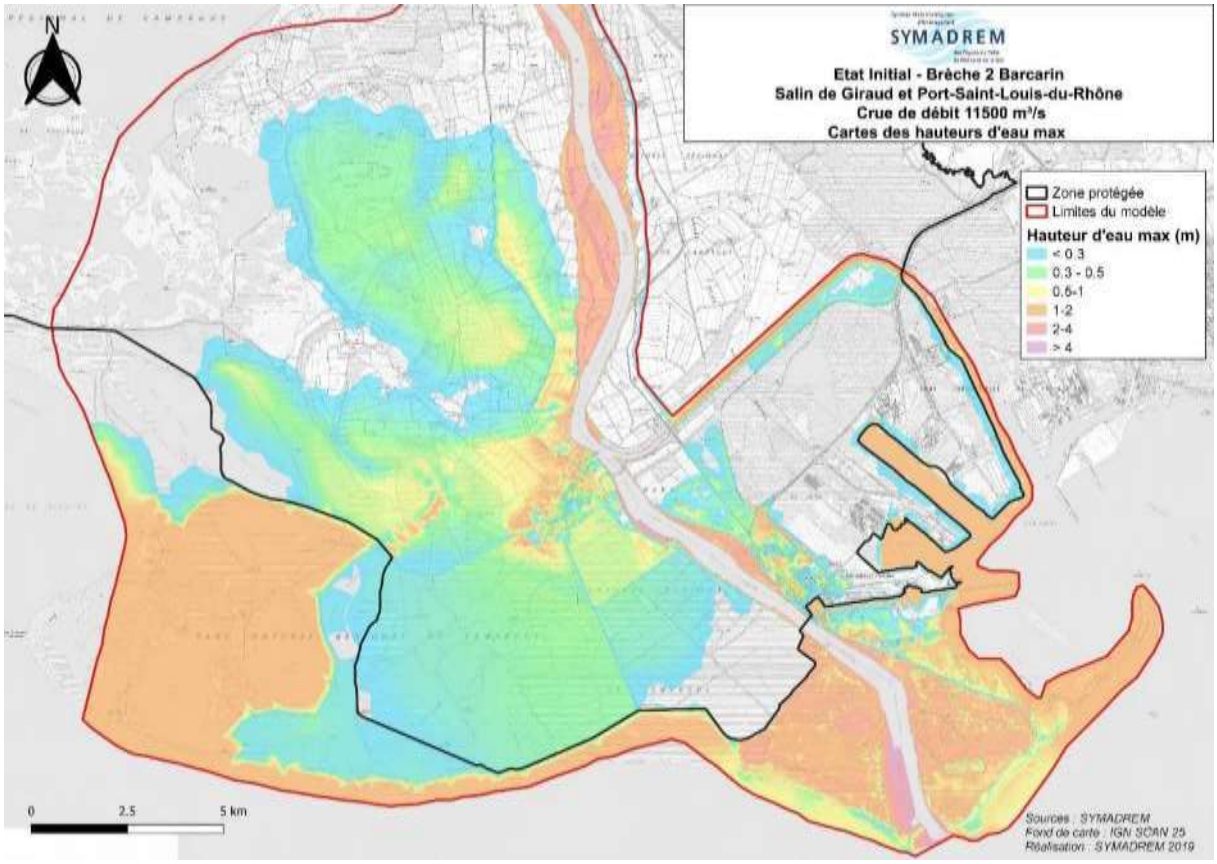


Figure 233. EI 11500 – Brèche Barcarin – GRD 315,7 - Hauteur d'eau maximale (m)

Figure 234. EI 11500 – Brèche Barcarin – GRD 315,7 - Vitesse maximum (m/s)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 48. EI 11500 – Brèche Barcarin – GRD 315,7 - Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
17	Armelière Sambuc Chamone	2,25	0	0,7	1,5
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	1,50	0,3	0,9	1,4
19	Salin de Giraud	2,00	0,3	0,8	1,4
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	3,00	0,8	1,5	2,1
25	Abords digue Salin de Giraud	3,00	0,8	1,7	2,5
26	Salins du midi sud-est	1,50	0,3	0,8	1,3
40	Vaccarès Est	1,50	0	0,7	1,2
41	Esquineau	1,75	0	1,0	1,4

6.13.2 Crue 12500 – Etat actuel/initial – Brèche Barcarin – GRD 315,7

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située au GRD 315,7 juste en amont de Salin de Giraud sur le tronçon de la digue de Salin de Giraud à renforcer (GRD 12) pour une crue équivalente à celle de mai 1856 (débit de pointe de 12 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée et dans les conditions actuelles d'écoulement.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,006, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 95 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,95 X 0,006 ≅ 0,6 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 2.10^{-1} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 100 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 7 mètres,
- Temps d'ouverture digue + fosse : 5,5 heures,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 1,2 m NGF,
- Cote de la crue : 3,3 m NGF.

La dynamique précise d'ouverture retenue est la suivante :

- affaissement brusque de la crête de 1,5 m, sur une longueur de 50 m, en 0,5 h,
- affaissement de la crête de 1,5 m de plus, sur une longueur totale de 100 m, pendant les 2 h suivantes,
- affaissement de 5 m de plus, sur une longueur totale de 100 m, jusqu'à former une fosse sur l'emprise de la digue se prolongeant d'environ 10 m en aval, pendant les 2 h suivantes.

Cette brèche a l'impact le plus préjudiciable pour Salin de Giraud, avec des vitesses très importantes dans l'agglomération et la coupure des voies d'évacuation.

Les trois cartes ci-après illustrent respectivement les hauteurs d'eau (2 échelles différentes) et vitesses d'écoulement maximum atteintes au sein de la zone protégée.

Jusqu'à l'atteinte des cotes maximales dans le lit endigué, le calcul est identique à la situation sans brèche. Puis survient la brèche à l'amont immédiat de Salin de Giraud (t=112h) sur une zone déjà inondée par l'aval.

Salin de Giraud –déjà touché par l'inondation par Chamone– est entièrement submergé par l'amont avec des vitesses importantes. L'inondation s'étend rapidement sur les marais salants, et le marais Faraman est noyé par le fleuve (t=115h) avant de subir l'entrée maritime.
À la fin du calcul (t=144h), par rapport à la situation sans brèche, l'inondation est plus importante en surface et en niveau sur Salin de Giraud et vers le sud : les marais salants sont entièrement inondés. En revanche, au nord, la surface inondée est légèrement inférieure.

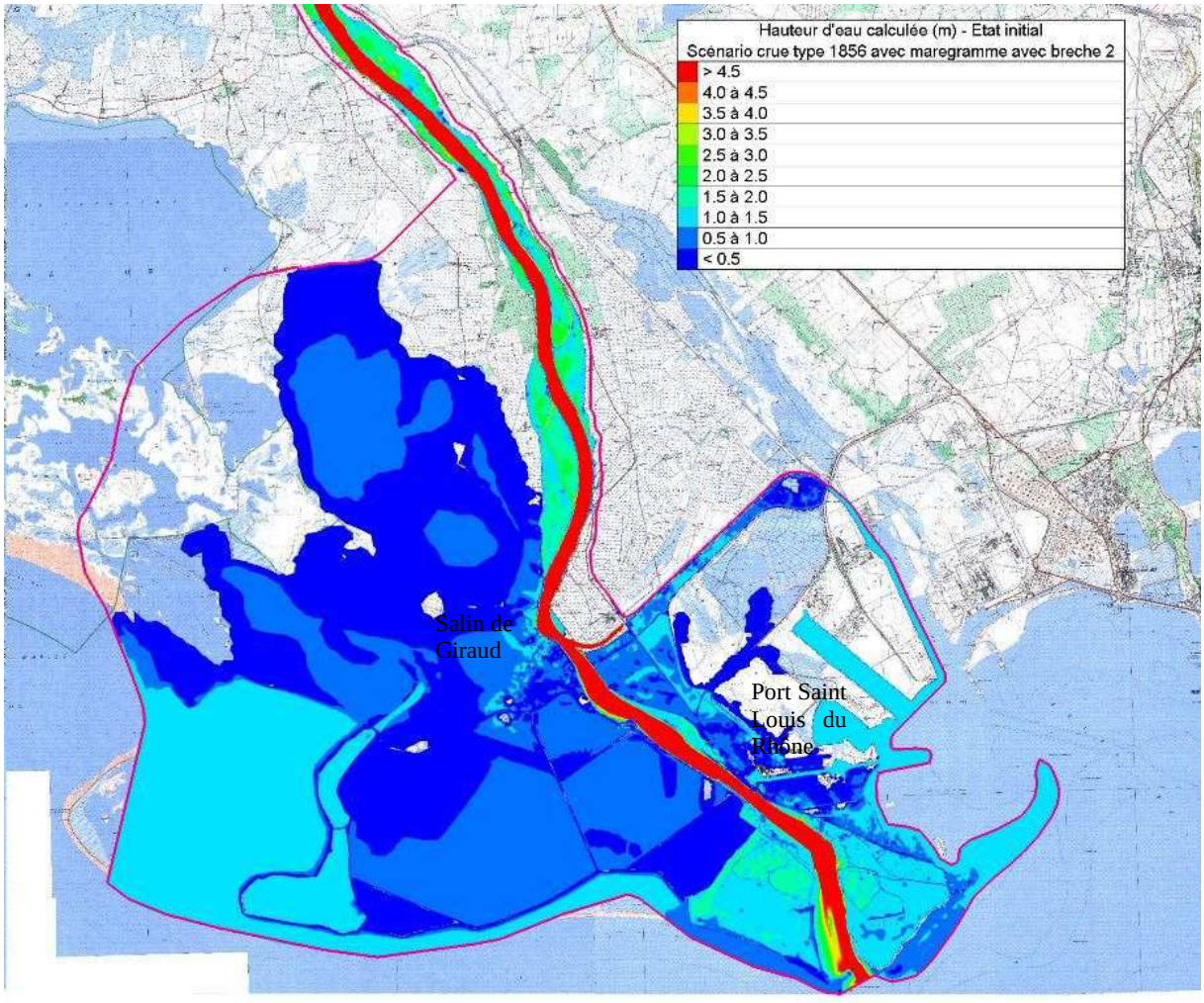


Figure 235. EI 12500 – Brèche Barcarin – GRD 315,7 - Hauteur d'eau maximum (m)

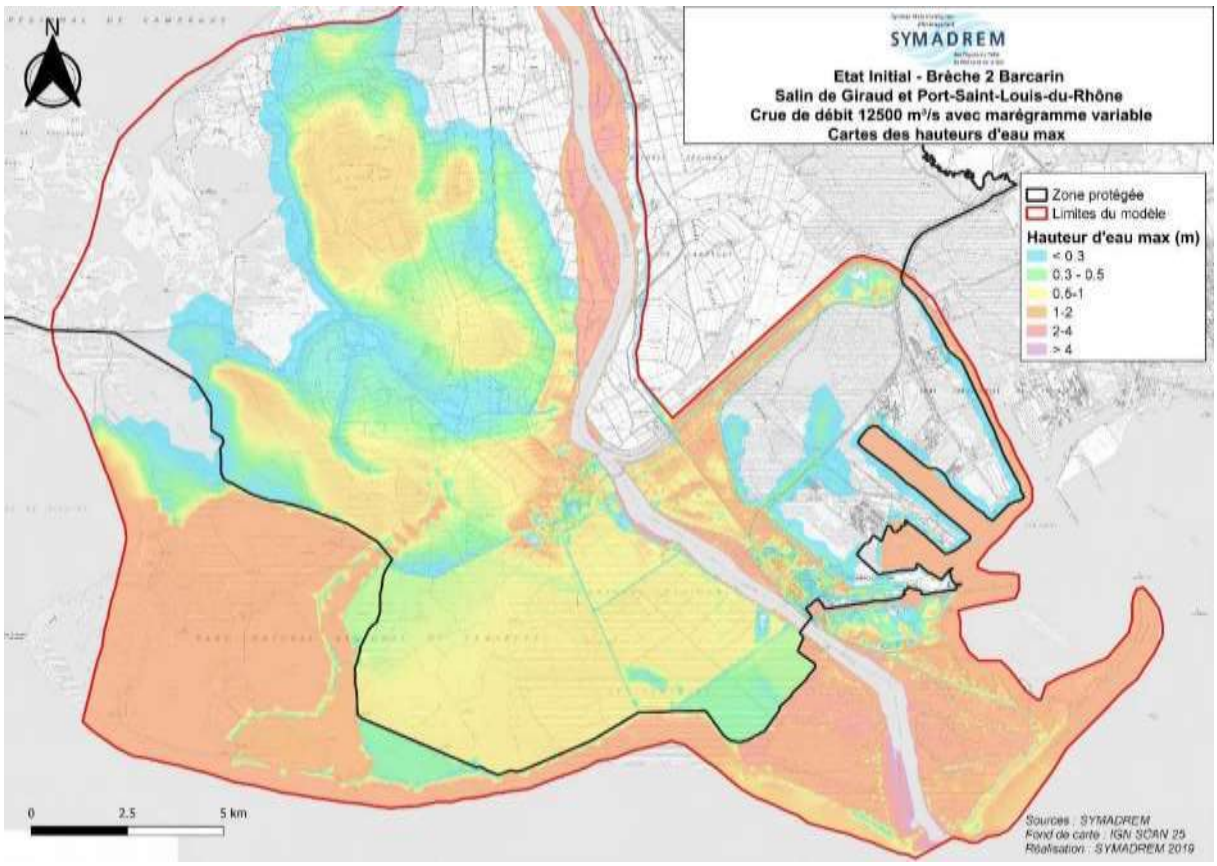


Figure 236. EI 12500 – Brèche Barcarin – GRD 315,7 - Hauteur d'eau maximum (m)

Figure 237. EI 12500 – Brèche Barcarin – GRD 315,7 - Vitesse maximum (m/s)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 49. EI 12500 – Brèche Barcarin – GRD 315,7 - Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
17	Armelière Sambuc Chamone	2,25	0	0,7	1,5
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	1,75	0,6	1,1	1,6
19	Salin de Giraud	2,00	0,3	0,8	1,4
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	3,00	0,8	1,5	2,1
25	Abords digue Salin de Giraud	3,00	0,8	1,7	2,5
26	Salins du midi sud-est	1,50	0,3	0,8	1,3
40	Vaccarès Est	1,50	0	0,7	1,2
41	Esquineau	1,75	0	1,0	1,4

6.14 BRECHE DE L'ESQUINEAU

2 crues ont été modélisées pour cette brèche dans l'état initial : 11500 et 12500.

6.14.1 Crue 11500 – Etat actuel/initial – Brèche Esquineau – GRD 319,1

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située au GRD 319,1 juste en aval de Salin de Giraud au droit de la transition digue millénale/digue résistante à la surverse (projet) pour une crue équivalente à celle de décembre 2003 (débit de pointe de 11 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,008, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 85 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,85 X 0,008 ≅ 0,7 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 2.10^{-1} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 100 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 7 mètres,
- Temps d'ouverture digue + fosse : 4 heures,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 1,6 m NGF,
- Cote de la crue : 2,7 m NGF.

La dynamique précise d'ouverture retenue est la suivante :

- affaissement instantané (modélisé en 6 minutes) de la crête de 1,8 m, sur une longueur de 25 m,
- affaissement de la crête de 1,8 m de plus, sur une longueur totale de 100 m, pendant les 2 h suivantes,
- affaissement de 5 m de plus, sur une longueur totale de 100 m, jusqu'à former une fosse sur l'emprise de la digue se prolongeant d'environ 10 m en aval, pendant les 2 h suivantes.

Cette brèche présente l'impact le plus faible sur les zones habitées et met en œuvre le volume déversé le moins important, compte tenu de la topographie à son aval.

Les trois cartes ci-après illustrent respectivement les hauteurs d'eau (2 échelles différentes) et vitesses d'écoulement maximum atteintes au sein de la zone protégée.

Jusqu'à l'atteinte des cotes maximales dans le lit endigué, le calcul est identique à la situation sans brèche. Puis survient la brèche au niveau du Point de Vue (t=100h) sur un début de débordement localisé.
Au sud de Salin de Giraud, l'inondation par Chamone rencontre l'inondation par l'Esquineau légèrement plus tôt (t=109h) que dans la situation sans brèche, mais toujours au niveau des marais salants situés au sud de l'agglomération (salin des Vanneaux).
À la fin du calcul (t=120h), par rapport à la situation sans brèche, l'inondation dans le marais salant de l'Eyselle est un peu supérieure. La situation est quasiment identique ailleurs

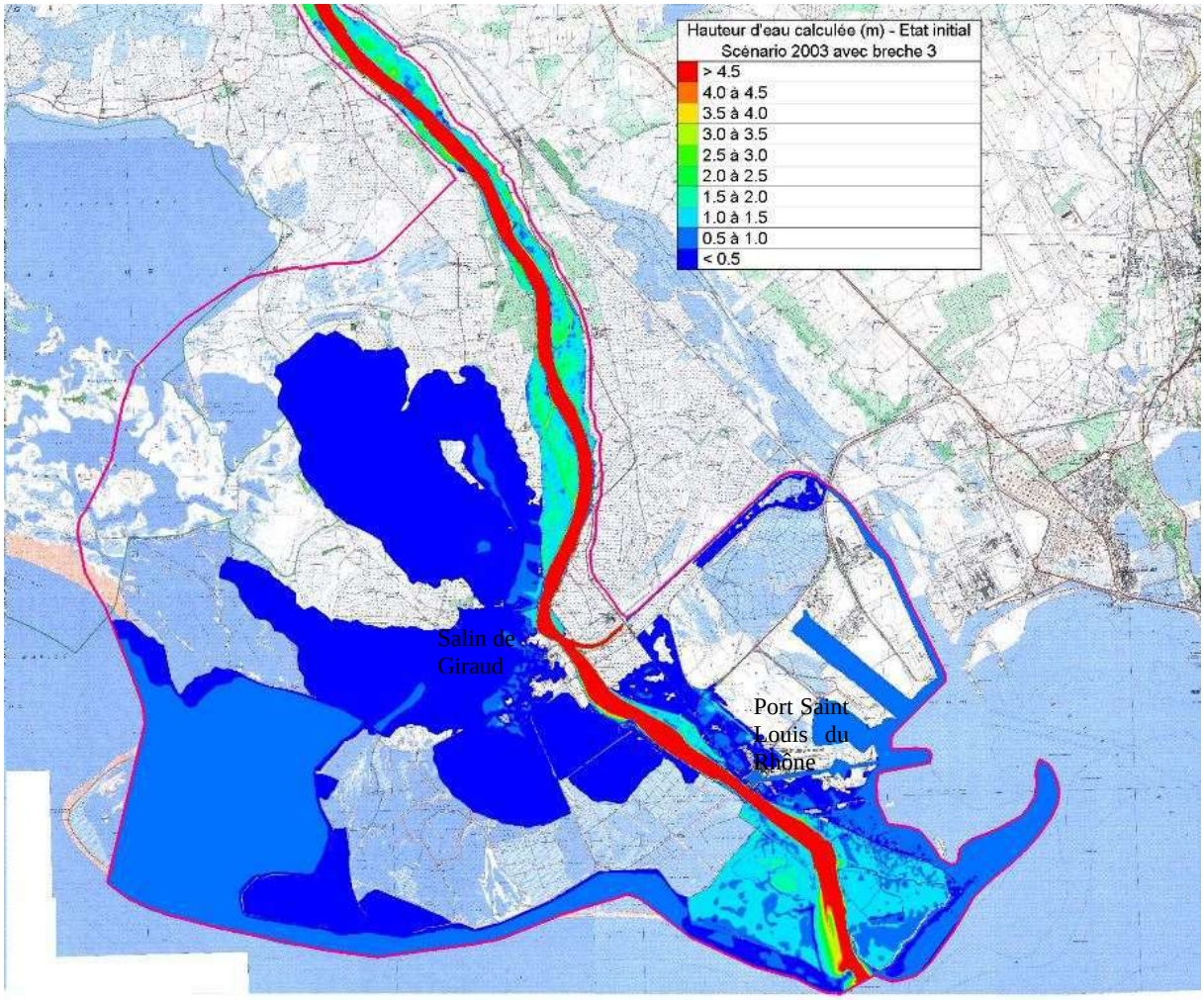


Figure 238. EI 11500 – Brèche Esquineau – GRD 319,1 - Hauteur d'eau maximale (m)

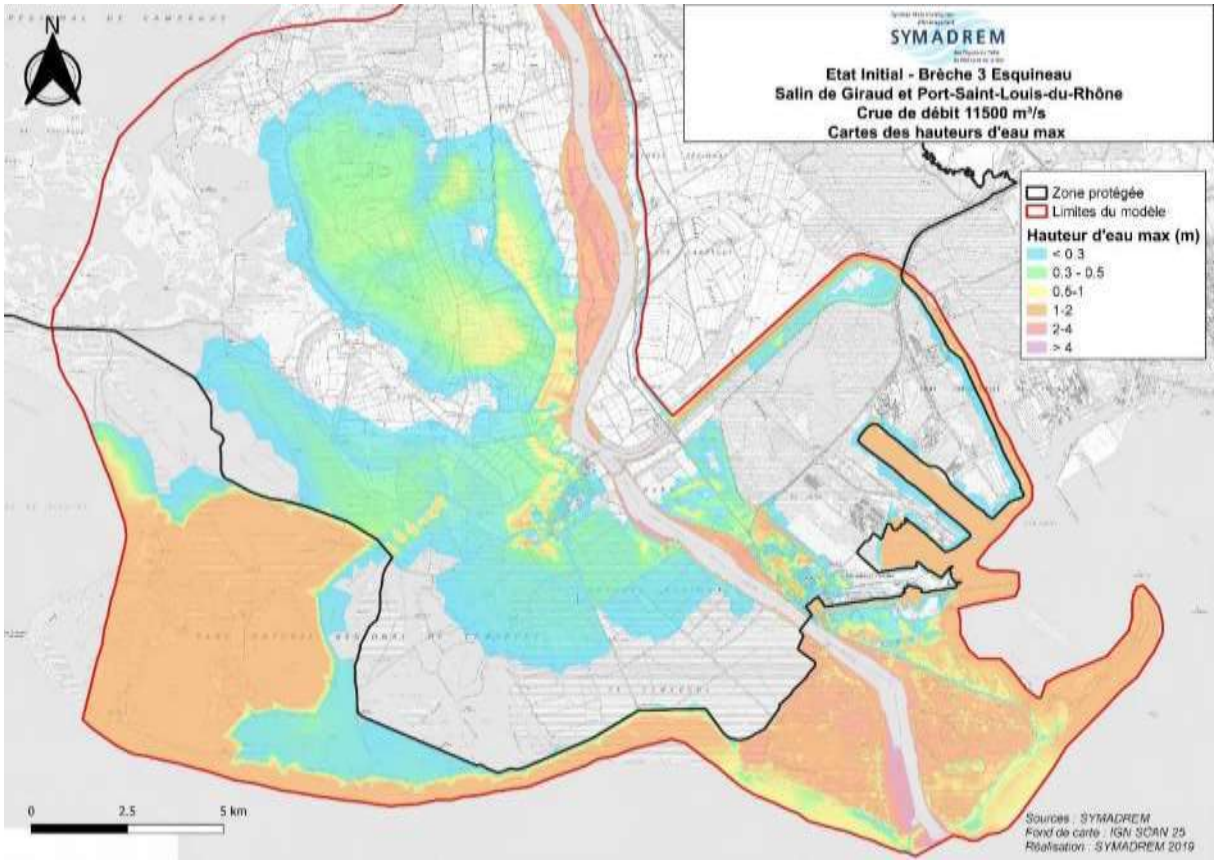


Figure 239. EI 11500 – Brèche Esquineau – GRD 319,1 - Hauteur d'eau maximale (m)

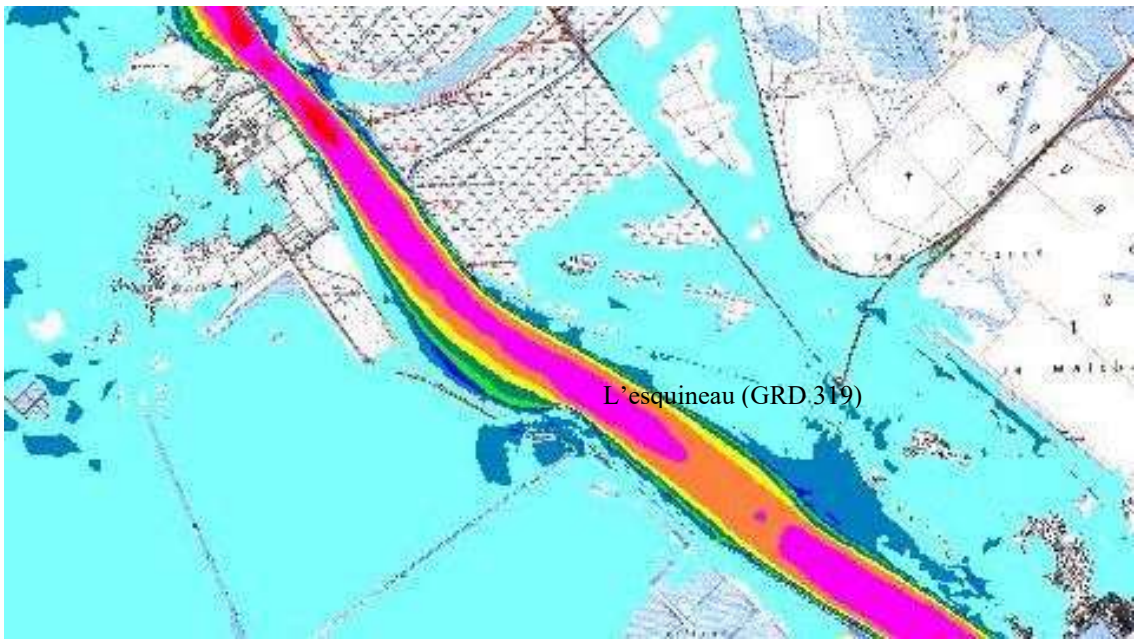


Figure 240. EI 11500 – Brèche Esquineau – GRD 319,1 - Vitesse maximum (m)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 50. EI 12500 – Brèche Amérique – GRD 313,7 - Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
17	Armelière Sambuc Chamone	2,25	0	0,7	1,5
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	1,50	0,3	0,9	1,4
19	Salin de Giraud	1,75	0,1	0,6	1,1
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	3,00	0,8	1,5	2,1
25	Abords digue Salin de Giraud	2,75	0,5	1,4	2,2
26	Salins du midi sud-est	1,75	0,5	1,0	1,5
40	Vaccarès Est	1,50	0	0,7	1,2
41	Esquineau	1,50	0	0,7	1,2

6.14.2 Crue 12500 – Etat actuel/initial – Brèche Esquineau – GRD 319,1

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une brèche située au GRD 319,1 juste en aval de Salin de Giraud au droit de la transition digue millénale/digue résistante à la surverse (projet) pour une crue équivalente à celle de mai 1856 (débit de pointe de 12 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée et dans les conditions actuelles d'écoulement.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,006, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 95 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,95 X 0,006 ≅ 0,6 %.

Pour mémoire, la probabilité annuelle de brèche sur ce tronçon de digue est de 2.10^{-1} (Cf. chapitre 7.2.).

Les caractéristiques de la brèche sont les suivantes :

- Largeur final : 100 mètres,
- Profondeur de la fosse en aval : 7 mètres,
- Temps d'ouverture digue + fosse : 4 heures,
- Instant de démarrage de la brèche : pointe de crue,
- Cote du terrain naturel : 1,6 m NGF,
- Cote de la crue : 2,8 m NGF.

La dynamique précise d'ouverture retenue est la suivante :

- affaissement instantané (modélisé en 6 minutes) de la crête de 1,8 m, sur une longueur de 25 m,
- affaissement de la crête de 1,8 m de plus, sur une longueur totale de 100 m, pendant les 2 h suivantes,
- affaissement de 5 m de plus, sur une longueur totale de 100 m, jusqu'à former une fosse sur l'emprise de la digue se prolongeant d'environ 10 m en aval, pendant les 2 h suivantes.

Cette brèche présente l'impact le plus faible sur les zones habitées et met en œuvre le volume déversé le moins important, compte tenu de la topographie à son aval.

Les trois cartes ci-après illustrent respectivement les hauteurs d'eau (2 échelles différentes) et vitesses d'écoulement maximum atteintes au sein de la zone protégée.

Jusqu'à l'atteinte des cotes maximales dans le lit endigué, le calcul est identique à la situation sans brèche. Puis survient la brèche au niveau du Point de Vue (t=112h) sur un début de débordement.
À la fin du calcul (t=144h), par rapport à la situation sans brèche, les zones inondées sont très comparables, avec une extension sur la totalité du marais salant de l'Eyselle.

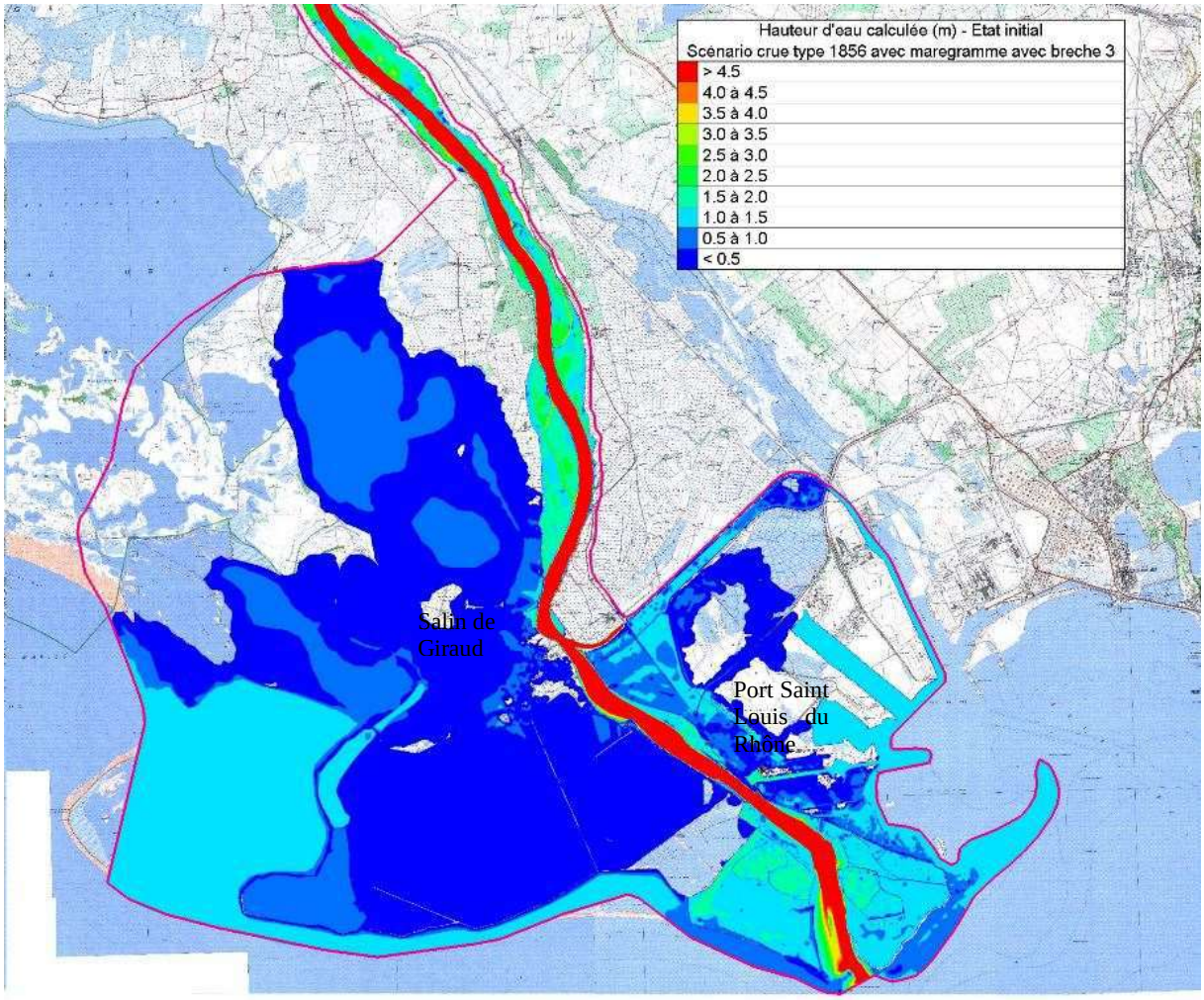


Figure 241. EI 12500 – Brèche Esquineau – GRD 319,1 - Hauteur d'eau maximale (m)

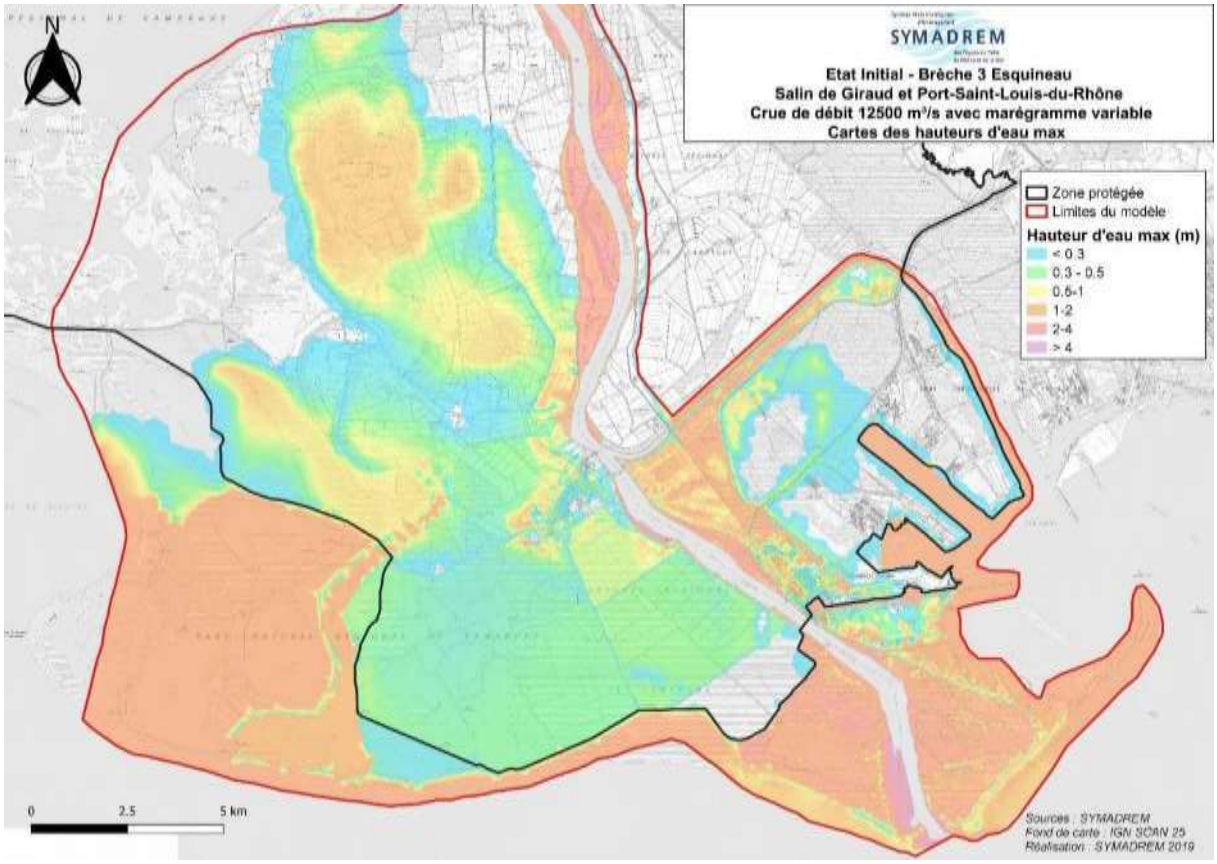


Figure 242. EI 12500 – Brèche Esquineau – GRD 319,1 - Hauteur d'eau maximale (m)

Figure 243. EI 12500 – Brèche Esquineau – GRD 319,1 - Vitesse maximum (m)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle

est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 51. EI 12500 – Brèche Esquineau – GRD 319,1 - Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
17	Armelière Sambuc Chamone	2,25	**0**	**0,7**	**1,5**
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	1,50	**0,3**	**0,9**	**1,4**
19	Salin de Giraud	1,75	**0,1**	**0,6**	**1,1**
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	3,00	**0,8**	**1,5**	**2,1**
25	Abords digue Salin de Giraud	2,75	**0,5**	**1,4**	**2,2**
26	Salins du midi sud-est	1,75	**0,5**	**1,0**	**1,5**
40	Vaccarès Est	1,50	**0**	**0,7**	**1,2**
41	Esquineau	1,75	**0**	**1,0**	**1,4**

6.15 SURVERSE SANS BRECHE

4 crues ont été modélisées pour cette brèche dans l'état initial : 10500, 11500, 12500 et 14160.

6.15.1 Crue 10500 – Etat actuel/initial – Surverse sans brèche

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une surverse sans brèche sur les digues du Grand Rhône aval pour une crue, dont le débit de pointe atteindrait 10 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon et dont l'hydrogramme aurait une forme équivalente à la crue de janvier 1994 (débit annoncé à l'époque de 11 000 m^3/s et qui est estimé aujourd'hui à 10 250 m^3/s).

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,016, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 45 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7. La probabilité de ne pas avoir de brèche et d'avoir une surverse sans brèche est donc de 55 %.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,55 X 0,016 ≅ 0,9 %.

Les trois cartes ci-après illustrent respectivement les hauteurs d'eau (2 échelles différentes) et vitesses d'écoulement maximum atteintes au sein de la zone protégée.

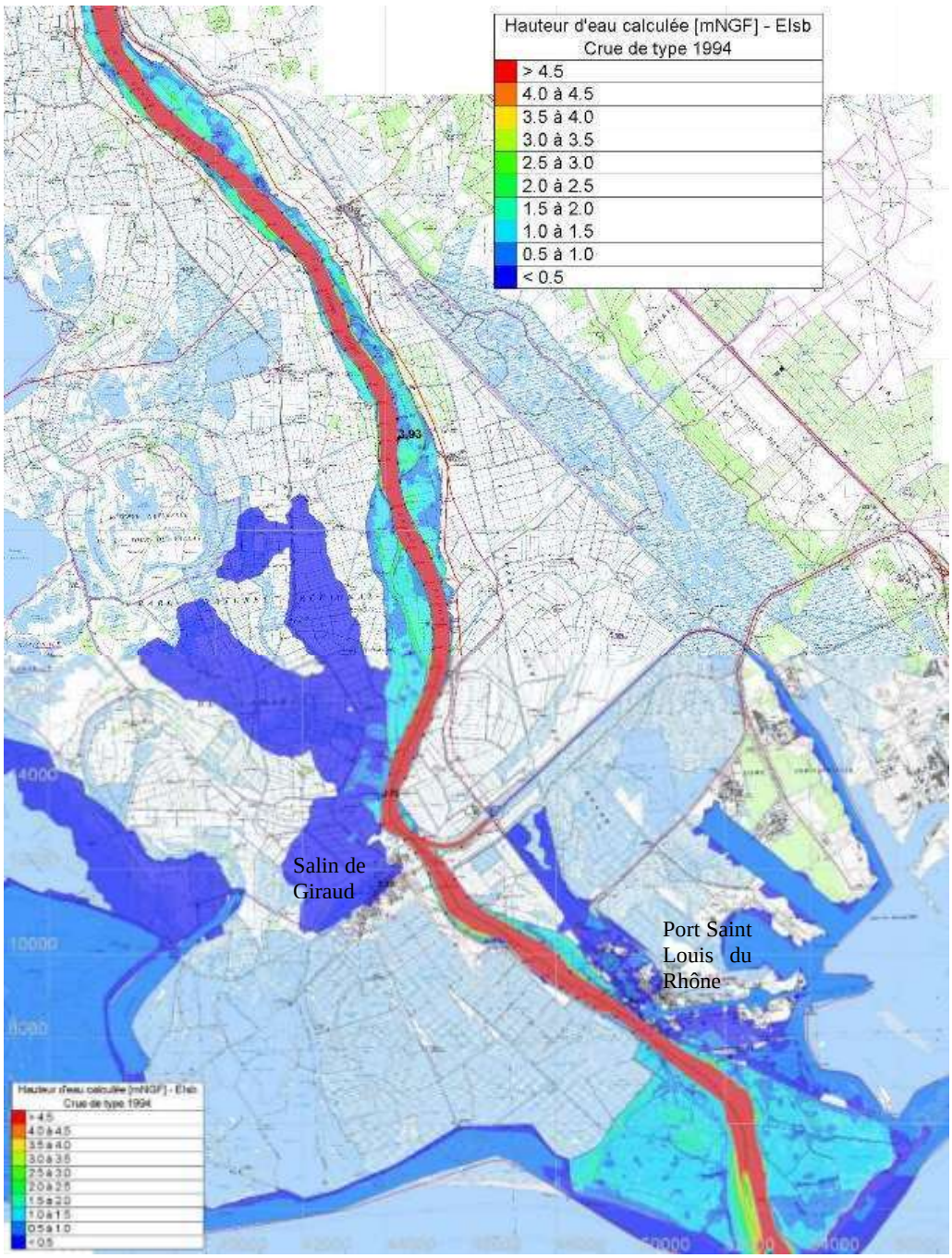


Figure 244. EI 10500 – Surverse sans brèche - Hauteur maximum (m)

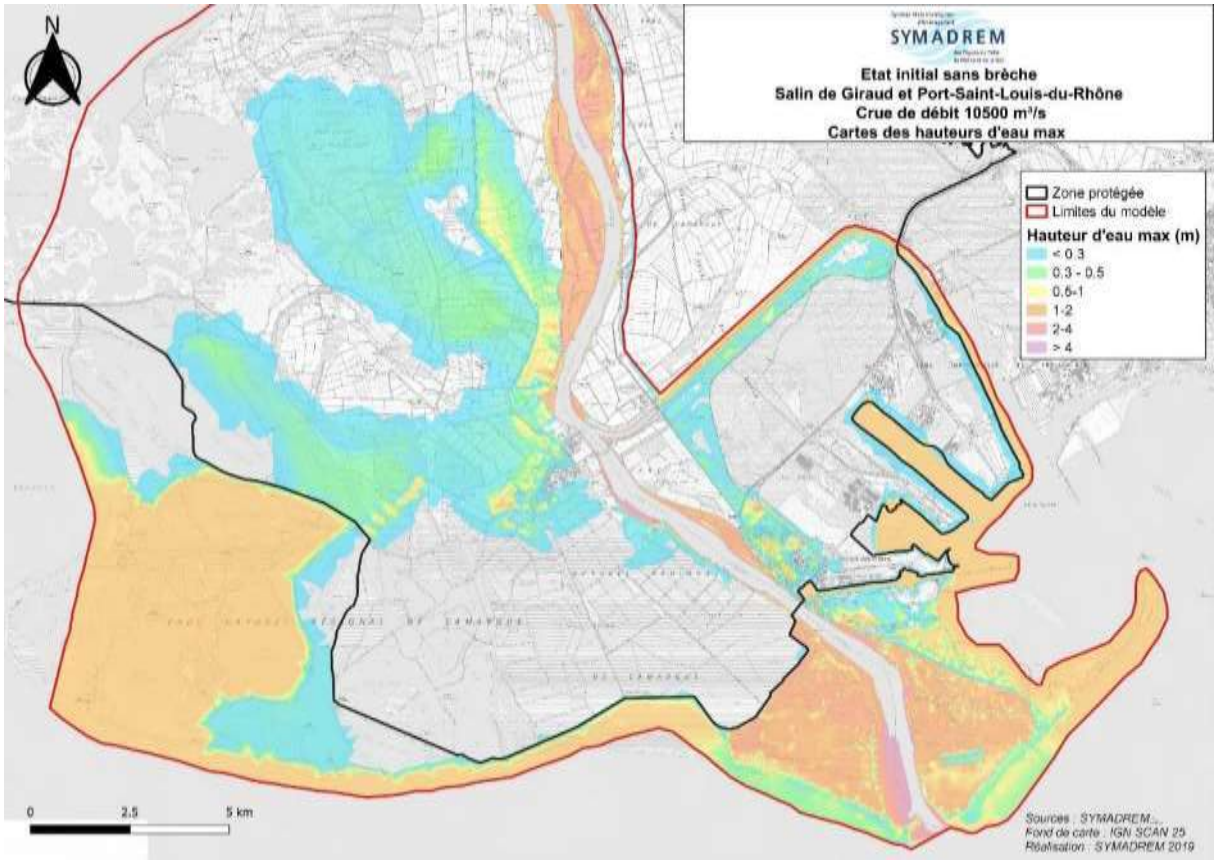


Figure 245. EI 10500 – Surverse sans brèche - Hauteur maximum (m)

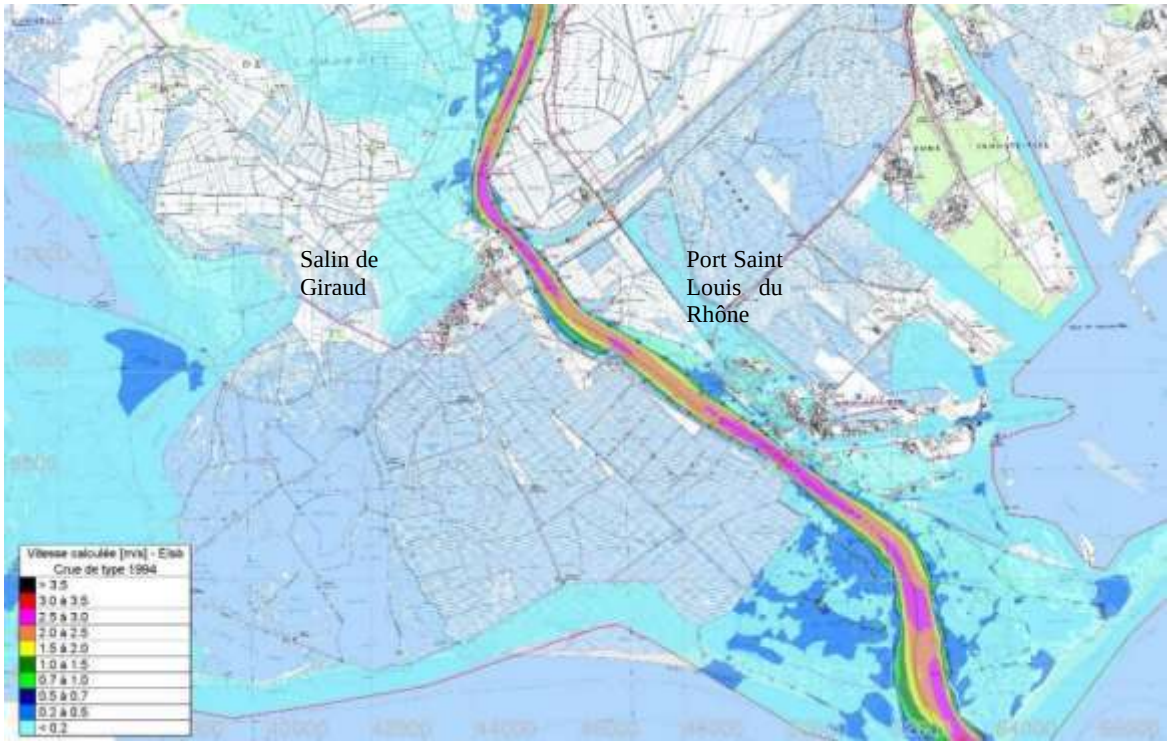


Figure 246. EI 10500 – Surverse sans brèche - Vitesse maximum (m)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 52. EI 10500 – Surverse sans brèche - Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
17	Armelière Sambuc Chamone	2,25	0	0,7	1,5
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	1,25	0,1	0,6	1,1
19	Salin de Giraud	1,50	0	0,3	0,9
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	3,00	0,8	1,5	2,1
25	Abords digue Salin de Giraud	2,75	0,5	1,4	2,2
26	Salins du midi sud-est	1,75	0,5	1,0	1,5
40	Vaccarès Est	1,25	0	0,5	0,9
41	Esquineau	1,50	0	0,7	1,2

6.15.2 Crue 11500 – Etat actuel/initial – Surverse sans brèche

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une surverse sans brèche sur les digues du Grand Rhône aval pour une crue équivalente à celle de décembre 2003 (débit de pointe de 11 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système en dehors de la brèche modélisée.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,008, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 85 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7. La probabilité de ne pas avoir de brèche et d'avoir une surverse sans brèche est donc de 15 %.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,15 X 0,008 ≅ 0,1 %.

Les trois cartes ci-après illustrent respectivement les hauteurs d'eau (2 échelles différentes) et vitesses d'écoulement maximum atteintes au sein de la zone protégée.

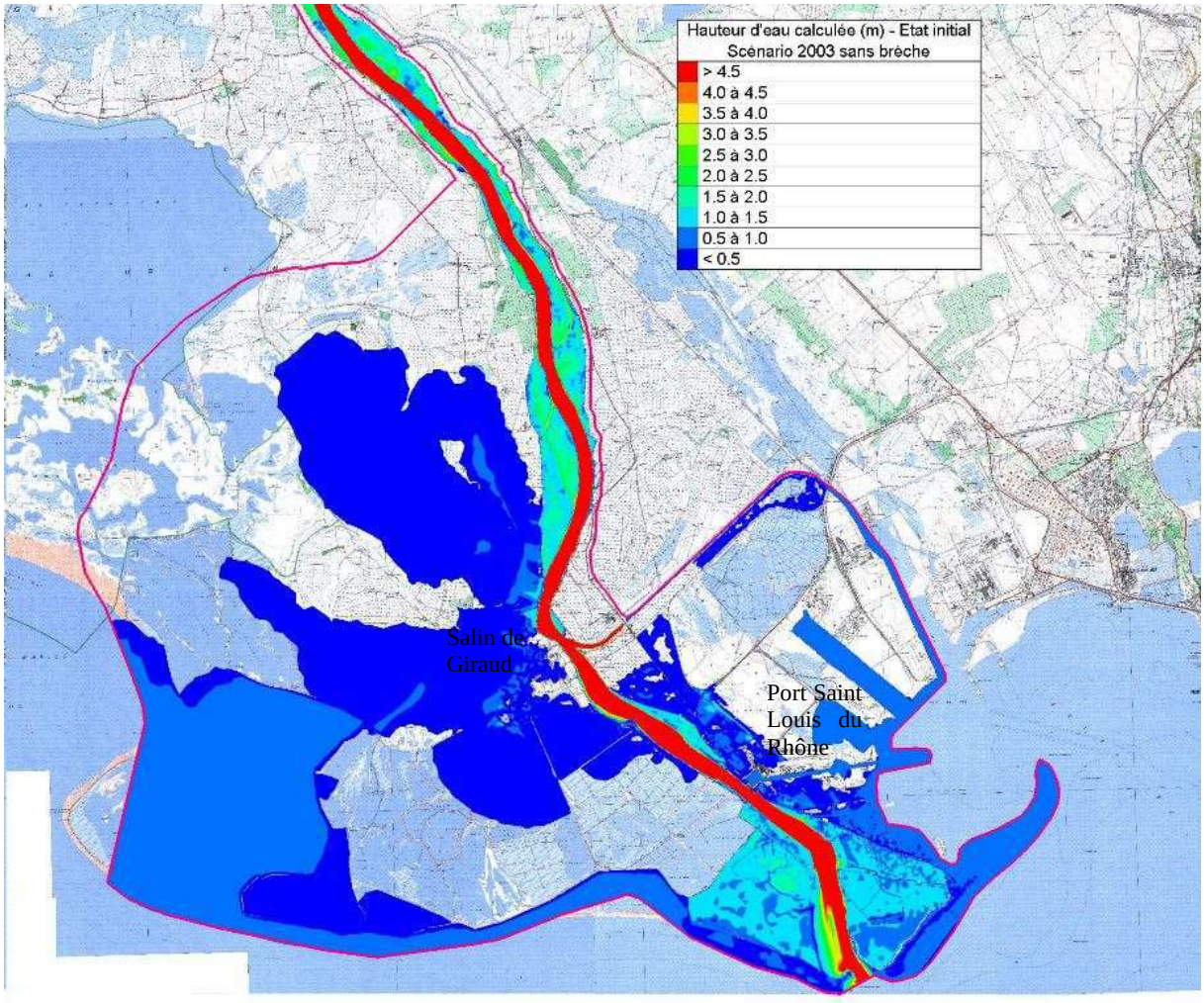


Figure 247. EI 11500 – Surverse sans brèche - Hauteur d'eau maximum (m)

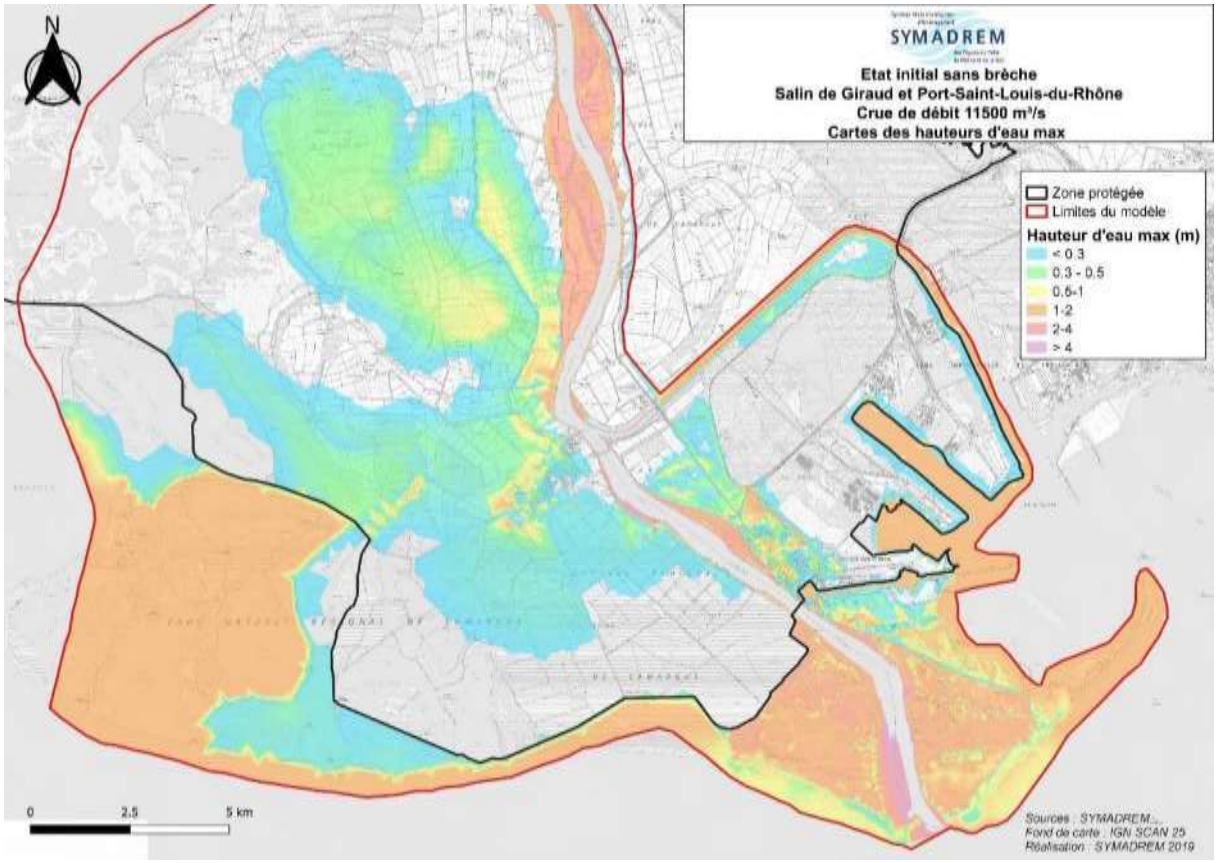


Figure 248. EI 11500 – Surverse sans brèche - Hauteur d'eau maximum (m)

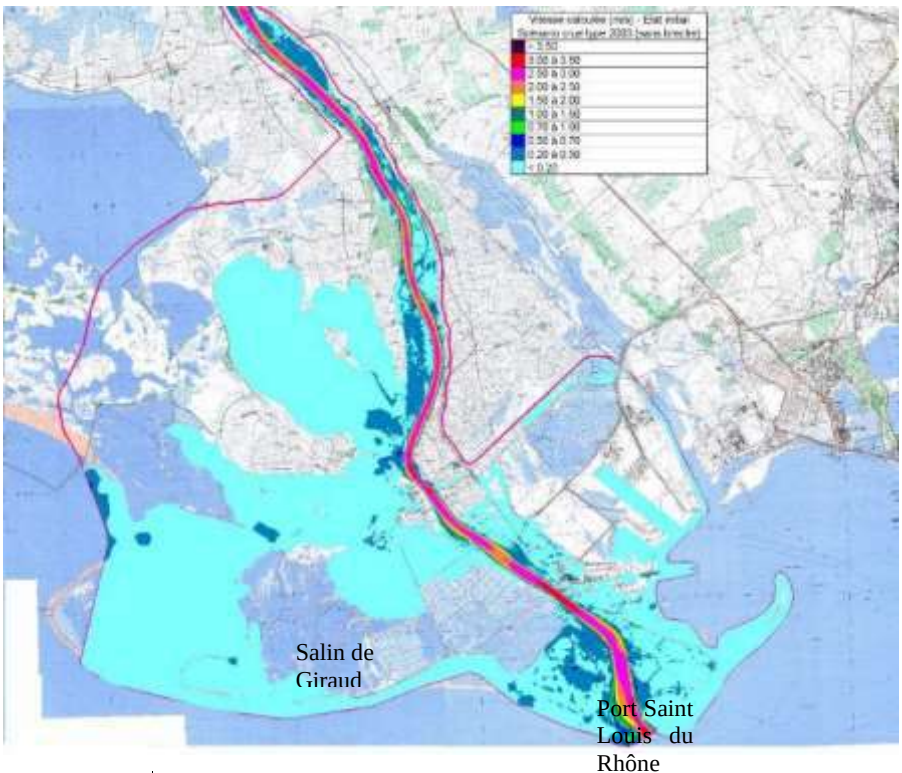


Figure 249. EI 11500 – Surverse sans brèche - Vitesse maximum (m/s)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 53. EI 11500 – Surverse sans brèche - Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
17	Armelière Sambuc Chamone	2,25	0	0,7	1,5
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	1,25	0,1	0,6	1,1
19	Salin de Giraud	1,50	0	0,3	0,9
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	3,00	0,8	1,5	2,1
25	Abords digue Salin de Giraud	2,75	0,5	1,4	2,2
26	Salins du midi sud-est	1,75	0,5	1,0	1,5
40	Vaccarès Est	1,50	0	0,7	1,2
41	Esquineau	1,50	0	0,7	1,2

6.15.3 Crue 12500 – Etat actuel/initial – Surverse sans brèche

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une surverse sans brèche sur les digues du Grand Rhône aval pour une crue équivalente à celle de mai 1856 (débit de pointe de 12 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,006, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 95 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7. La probabilité de ne pas avoir de brèche et d'avoir une surverse sans brèche est donc de 5 %.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,05 X 0,006 ≅ 0,03 %.

Les trois cartes ci-après illustrent respectivement les hauteurs d'eau (2 échelles différentes) et vitesses d'écoulement maximum atteintes au sein de la zone protégée.

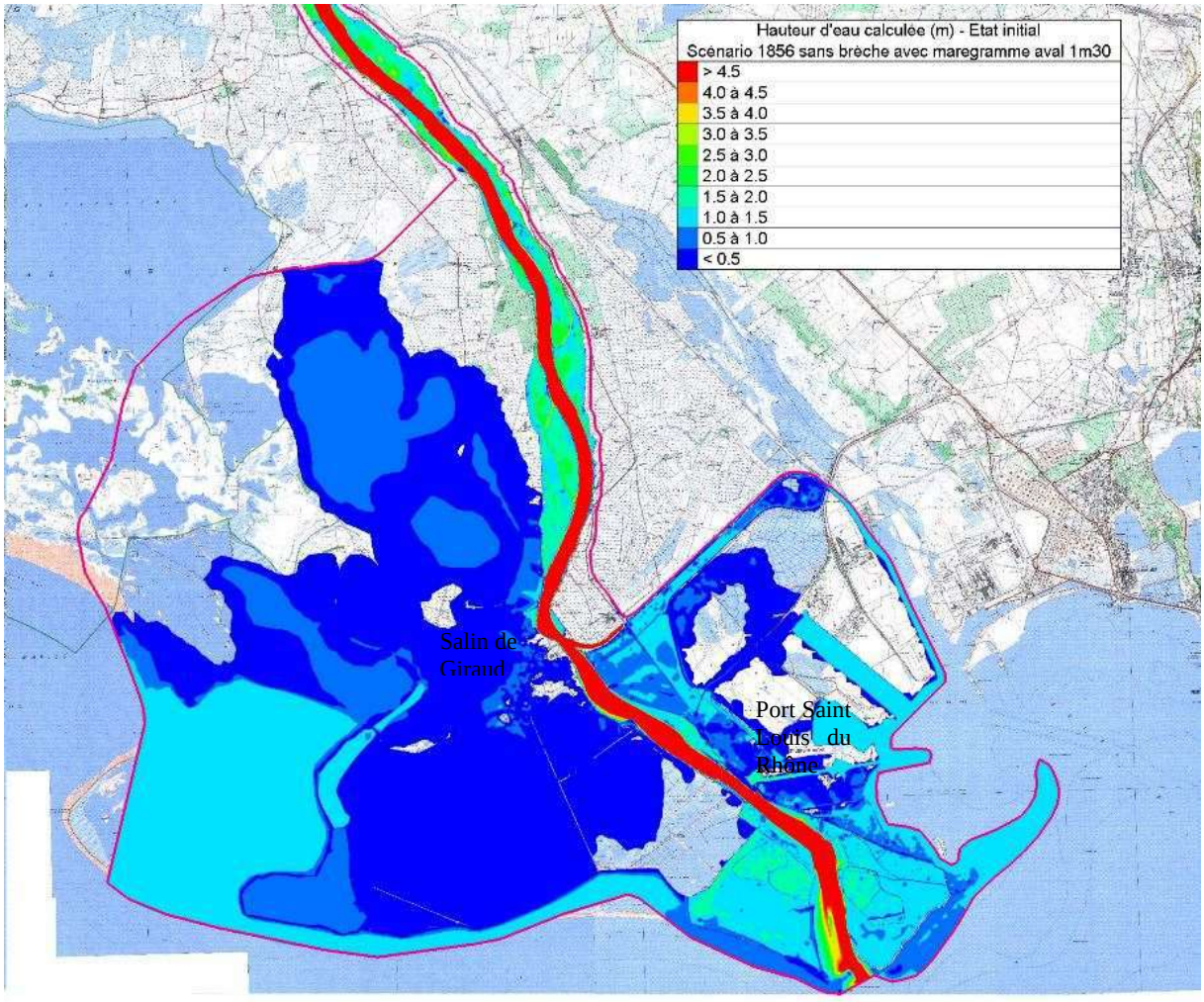


Figure 250. EI 12500 – Surverse sans brèche - Hauteur d'eau maximum (m)

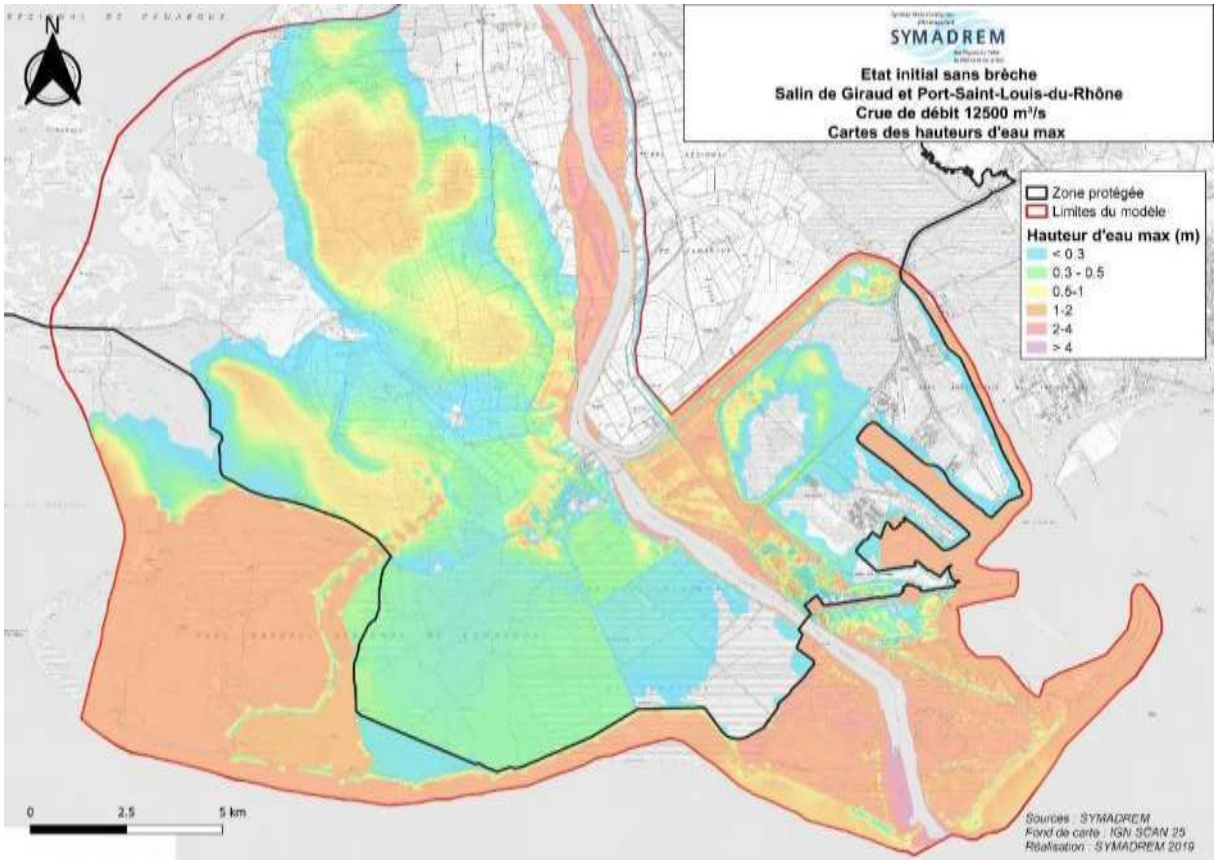


Figure 251. EI 12500 – Surverse sans brèche - Hauteur d'eau maximum (m)

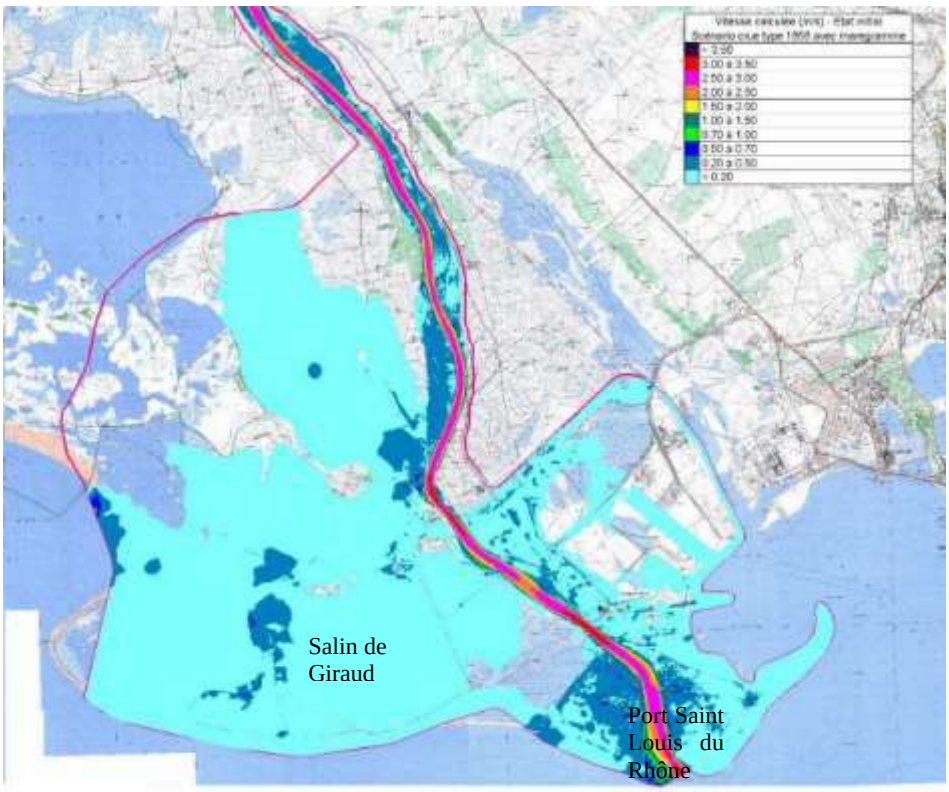


Figure 252. EI 12500 – Surverse sans brèche - Vitesse maximum (m/s)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 54. EI 12500 – Surverse sans brèche - Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
17	Armelière Sambuc Chamone	2,25	0	0,7	1,5
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	1,50	0,3	0,9	1,4
19	Salin de Giraud	1,75	0,1	0,6	1,1
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	3,00	0,8	1,5	2,1
25	Abords digue Salin de Giraud	2,75	0,5	1,4	2,2
26	Salins du midi sud-est	1,50	0,3	0,8	1,3
40	Vaccarès Est	1,50	0	0,7	1,2
41	Esquineau	1,50	0	0,7	1,2

6.15.4 Crue 14160 (niveau mer 1,5 m NGF) – Etat actuel/initial – Surverse sans brèche

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une surverse sans brèche sur les digues du Grand Rhône Rive Droite au droit de Salin de Giraud pour une crue exceptionnelle supérieure à toutes les crues connues avec un niveau marin constant à 1,5 m NGF (débit de pointe de 14 160 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,001, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 95 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7. La probabilité de ne pas avoir de brèche et d'avoir une surverse sans brèche est donc de 5 %.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,05 X 0,001 ≅ 0,01 %.

Les trois cartes ci-après illustrent respectivement les hauteurs d'eau (2 échelles différentes) et vitesses d'écoulement maximum atteintes au sein de la zone protégée.

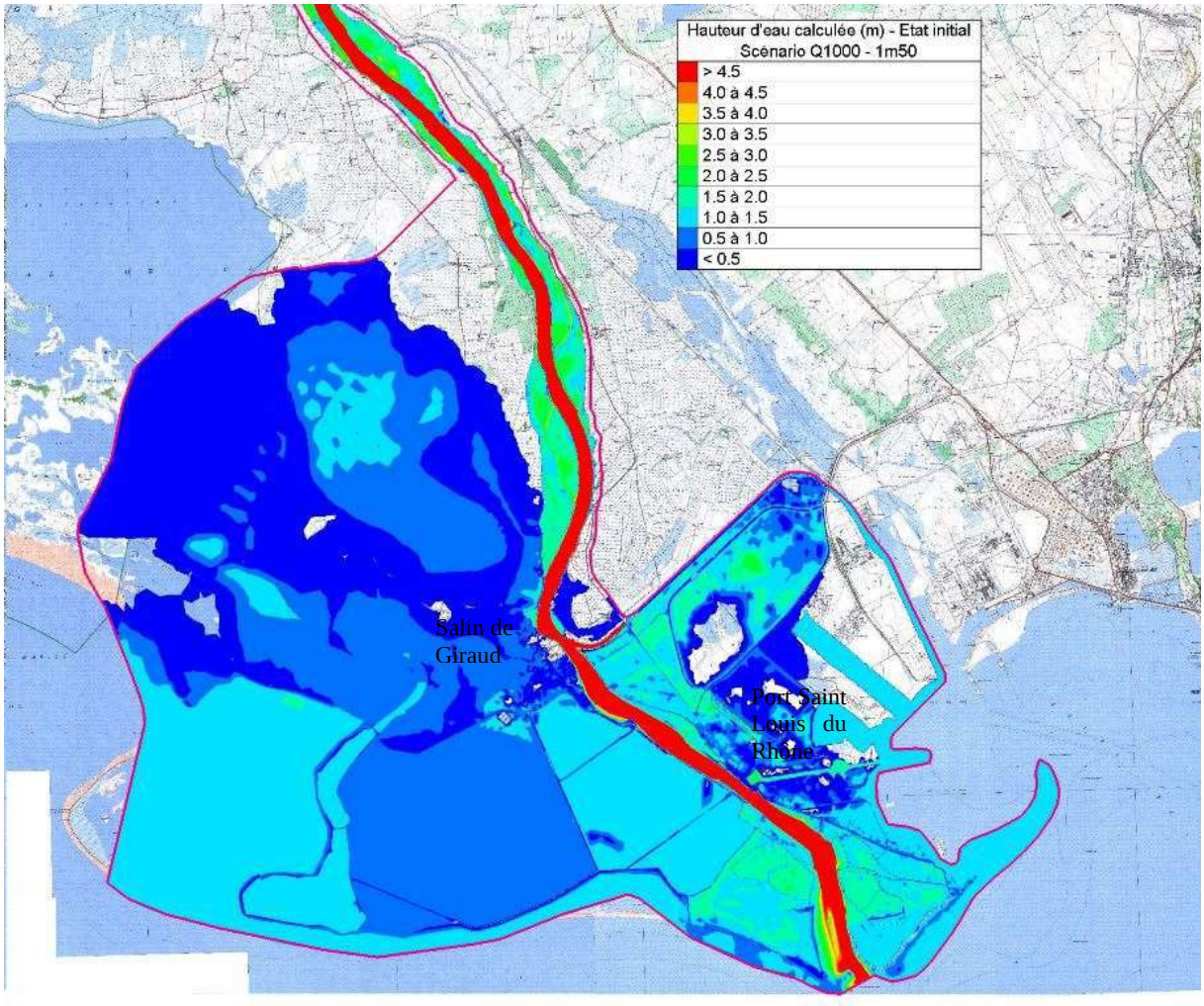


Figure 253. EI 14160-1,5 – Surverse sans brèche - Hauteur d'eau maximum (m)

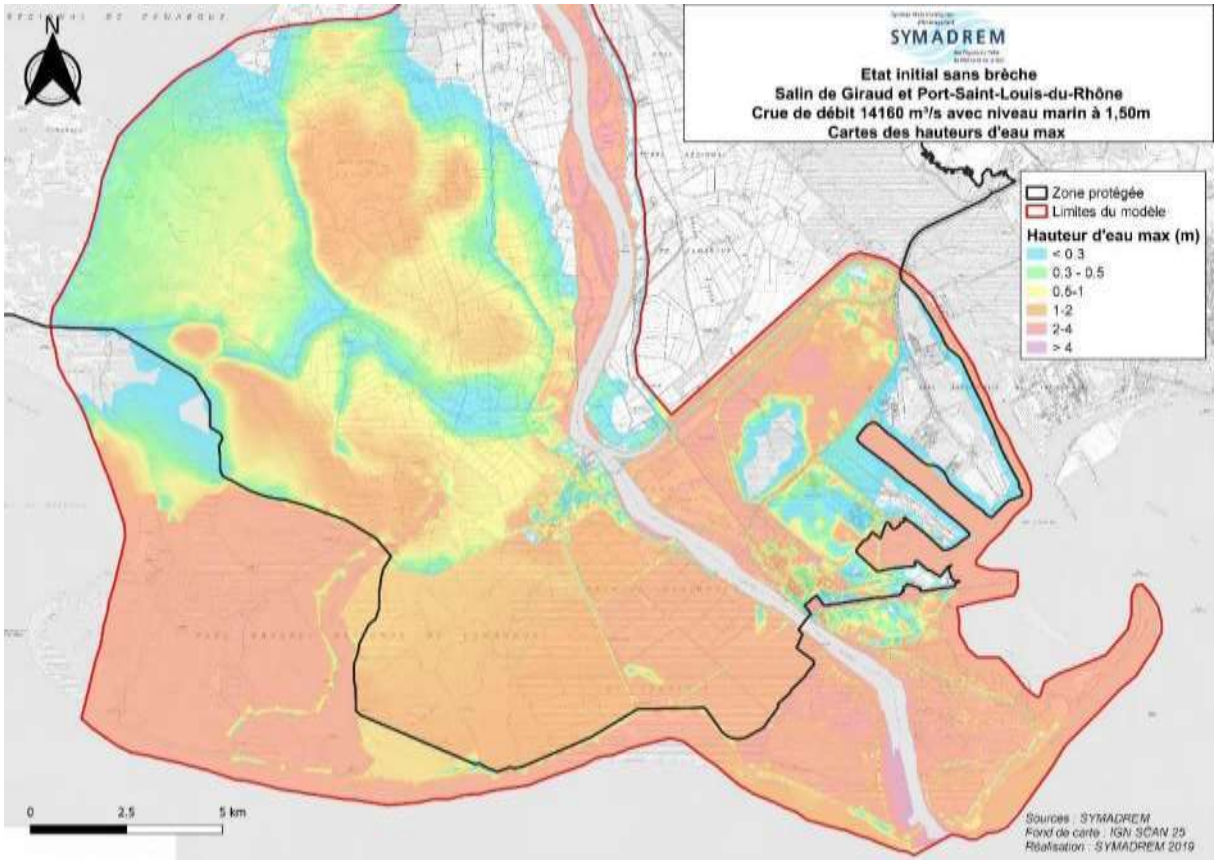


Figure 254. EI 14160-1,5 – Surverse sans brèche - Hauteur d'eau maximum (m)

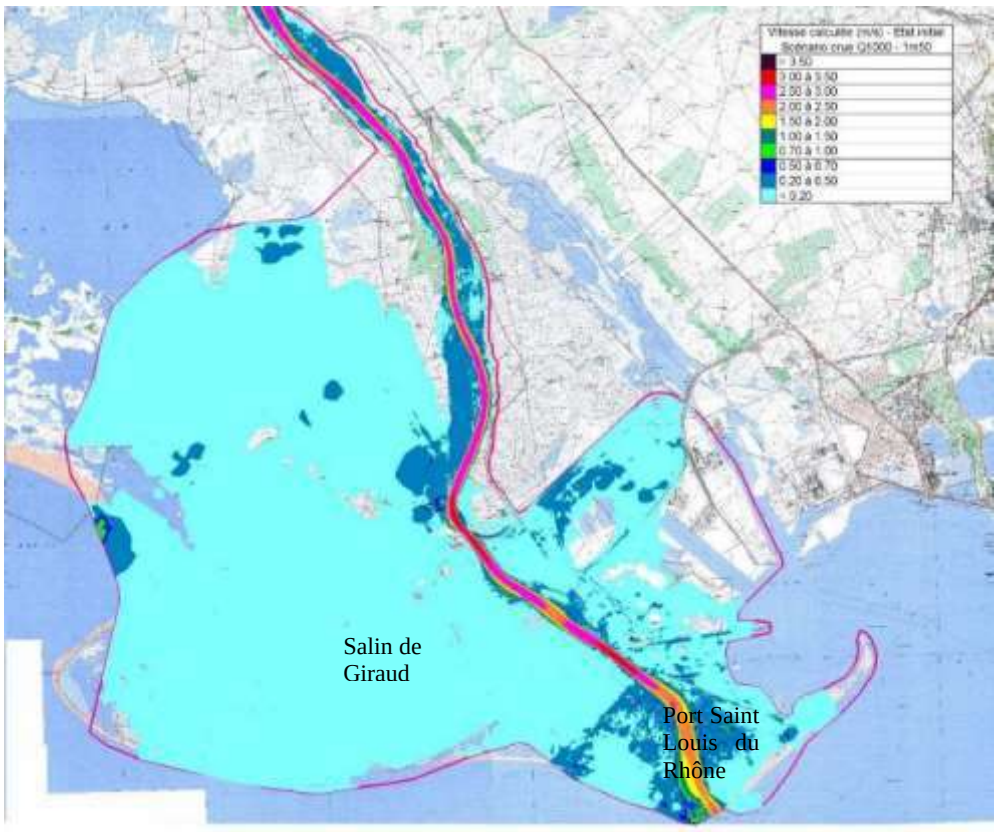


Figure 255. EI 14160-1,5 – Surverse sans brèche - Vitesse maximum (m/s)

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes en mètre NGF au sein des sous zones protégées inondées pour ce scénario. Cette cote est donnée par tranche de 25 cm, à dire d'expert. Elle correspond environ à une cote comprise entre la valeur médiane (fréquence de non dépassement de 50 %) et la cote C95, qui n'est pas dépassée dans 95 % des cas. Elle est une valeur légèrement prudente mais elle tient également compte des paramètres non modélisées comme le wind set up et le batillage provoqué par le vent.
La distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée figure également. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 55. EI 14160-1,5 – Surverse sans brèche - Dangerosité des venues d'eau

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
16	Etang du Vaccarès	1,00	0	0,5	0,8
17	Armelière Sambuc Chamone	2,25	0	0,7	1,5
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	1,75	0,6	1,1	1,6
19	Salin de Giraud	1,75	0,1	0,6	1,1
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	3,25	1,1	1,7	2,4
25	Abords digue Salin de Giraud	2,75	0,5	1,4	2,2
26	Salins du midi sud-est	2,25	1,0	1,5	2,0
40	Vaccarès Est	1,50	0	0,7	1,2
41	Esquineau	2,00	0	1,2	1,7

6.15.5 Crue 14160 (niveau mer 0,5 m NGF) – Etat actuel/initial – Surverse sans brèche

Ce scénario correspond à l'inondation de la zone protégée provoquée par une surverse sans brèche sur les digues du Grand Rhône Rive Droite au droit de Salin de Giraud pour une crue exceptionnelle supérieure à toutes les crues connues avec un niveau marin constant à 1,5 m NGF (débit de pointe de 14 160 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon) sans brèche dans le système.

La probabilité annuelle d'occurrence de la crue est estimée à 0,001, suivant l'analyse hydrologique et le découpage temporel retenu au chapitre 7.

La probabilité maximale de brèche au droit du tronçon considéré pour cette occurrence de crue est estimée à 95 %, suivant le modèle de rupture défini au chapitre 7. La probabilité de ne pas avoir de brèche et d'avoir une surverse sans brèche est donc de 5 %.

La probabilité annuelle de ce scénario est donc de 0,05 X 0,001 ≅ 0,01 %.

La carte ci-après illustre les hauteurs d'eau au sein de la zone protégée. Ce scénario d'inondation est quasiment équivalent à celui d'une crue de 12500 avec un marégramme à 1,3 m NGF.

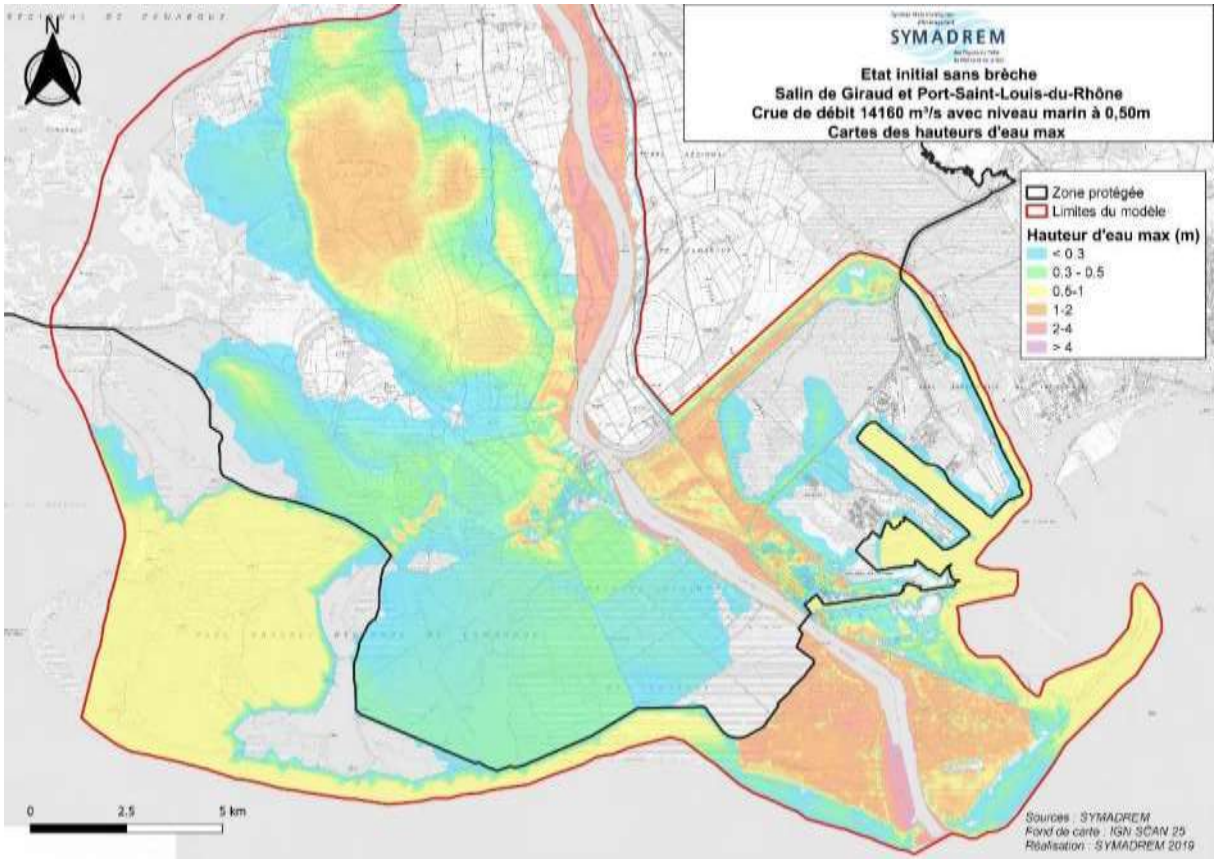


Figure 256. EI 14160-0,5 – Surverse sans brèche - Hauteur d'eau maximum (m)

6.16 ENSEIGNEMENTS LIES AUX MODELISATIONS

Les quatre tableaux ci-après donnent pour quatre scénarios de crues et par brèches modélisées dans les digues du Petit Rhône, successivement, la cote d'eau dans le lit mineur, la cote du terrain naturel en pied de digue à 20 m en aval de la digue, les cotes extraites du profil d'écoulement de la brèche à 25, 100, 400 et 1600 m de la digue et les distances en aval de la brèche où la vitesse d'écoulement descend sous le seuil respectivement de 1 m/s et 0,5 m/s. Les informations extraites des brèches modélisées en rive droite ont été intégrées.

Tableau 56. Crue 10500 – cotes extraites des profils de brèche et vitesses

Libellé Brèche	PR	Cote (m NGF)						Distance (en m) avec vitesse sous le seuil	
		lit mineur	Pied aval à 20 m	25 m aval	100 m aval	400 m aval	1600 m aval	< 1 m/s	< 0,5 m/s
Amont Cazeneuve	282	7,91	4	7,67	7,4	6,24	3,77	300	1200
Aval Cazeneuve	283	7,64	3	6,03	5,59	5,13	4,37	200	2000
Saliers	295,5	6,51	2	5,92	4,18	3,78	2,33	200	1200
Figarès	298	6,19	3,8	5,07	4,54	3,22	2,28	200	700
LaFosse	302,5	5,71	1,9	4	3,63	2,78	1,52	300	700
Aval Albaron	307,8	5,03	2,3	4,67	4,02	2,71	1,56	200	700
Capette	315	4,03	0,6	3,74	3,35	2,7	1,92	300	700
Sylvéréal	322	2,8	1,5					150	250

Tableau 57. Crue 11500 – cotes extraites des profils de brèche

Libellé Brèche	PR	Cote (m NGF)						Distance (en m) avec vitesse sous le seuil	
		lit mineur	< 0,5 m/s	25 m aval	100 m aval	400 m aval	1600 m aval	< 1 m/s	< 0,5 m/s
Brèche 1bis	268,4	11,85	6,9	10,55	9,94	8,68	7,52		
Brèche 2	275,1	10	4,1	6,76	6,57	6,02	4,35		
Amont Cazeneuve	282	8,28	4	7,89	7,61	6,4	4	300	2500
Aval Cazeneuve	283	8,2	3	6,38	5,76	5,21	4,38	200	2000
Argence 2003	288	7,18	3,2	5,22	5,11	4,57	3,98		
Saliers	295,5	6,88	2	6,51	4,56	4	2,46	200	1200
Figarès	298	6,49	3,8	5,77	5,01	3,49	2,62	300	800
LaFosse	302,5	5,93	1,6	4	3,64	2,79	1,6	300	700
Aval Albaron	307,8	5,19	2,3	4,81	4,2	2,82	1,61	200	700
Capette	315	4,14	0,6	3,61	3,38	2,71	2,03	300	700
Sylvéréal	322	2,83	1,5					150	250

Tableau 58. Crue 12500 – cotes extraites des profils de brèche

Libellé Brèche	PR	Cote (m NGF)						Distance (en m) avec vitesse sous le seuil	
		lit mineur	Pied aval à 20 m	25 m aval	100 m aval	400 m aval	1600 m aval	< 1 m/s	< 0,5 m/s
Brèche 1bis	268,4	12,2	6,9	10,71	10,15	8,93	7,71		
Brèche 2	275,1	10,33	4,1	7,04	6,96	6,35	4,93		
Amont Cazeneuve	282	8,58	4	8,11	7,82	6,52	4,06	300	2200
Aval Cazeneuve	283	8,49	3	6,45	5,82	5,27	4,43	200	2000
Figarès	298	6,58	3,8	5,77	5,01	3,48	2,68	300	800
LaFosse	302,5	5,97	1,6	4,02	3,65	2,79	2,06	300	700
Aval Albaron	307,8	5,22	2,3	4,73	4,12	2,77	1,75	200	700
Capette	315	4,16	0,6	3,46	3,21	2,61	2,08	300	700
Sylvéréal	322	2,84	1,5					150	250

Tableau 59. Crue 14160 – cotes extraites des profils de brèche

Libellé Brèche	PR	Cote (m NGF)						Distance (en m) avec vitesse sous le seuil	
		lit mineur	Pied aval à 20 m	25 m aval	100 m aval	400 m aval	1600 m aval	< 1 m/s	< 0,5 m/s
Brèche 1bis	268,4	12,46	6,9	10,96	10,45	9,24	7,99		
Brèche 2	275,1	10,45	4,1	7,15	6,96	6,35	5,43		
Amont Cazeneuve	282	8,72	4					300	2200
Brèche 5	284,5	8,51	4,8	5,97	5,55	4,17	3,54		
Brèche 6	294,2	7,35	2	4,38	4,15	3,45	3,1		
Brèche 7	297	6,85	2,1	3,8	3,77	3,28	3,1		
Figarès	298	6,62	3,8	5,77	4,99	3,47	2,79	300	800
LaFosse	302,5	5,98	1,6	4,02	3,65	2,79	2,36	300	700
Aval Albaron	307,8	5,23	2,3	5,34	4,64	3,08	1,89	200	700
Capette	315	4,16	0,6	3,47	3,22	2,63	2,38	300	700
Sylvéréal	322	2,84	1,5					150	250

Les figures ci-après donnent une représentation graphique de ces profils d'écoulement le long des brèches de l'amont du fleuve vers l'aval.

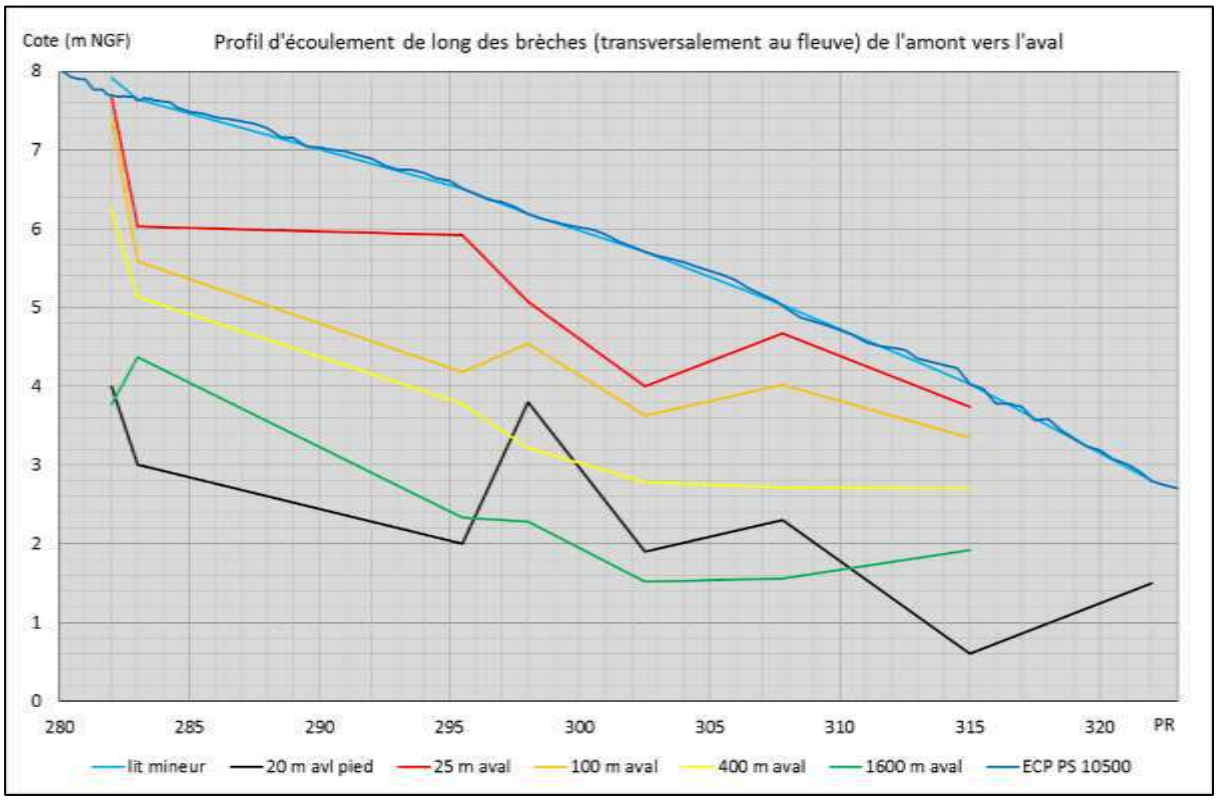


Figure 257. Crue 10500 – profils transversaux d'écoulement des brèches d'amont vers l'aval

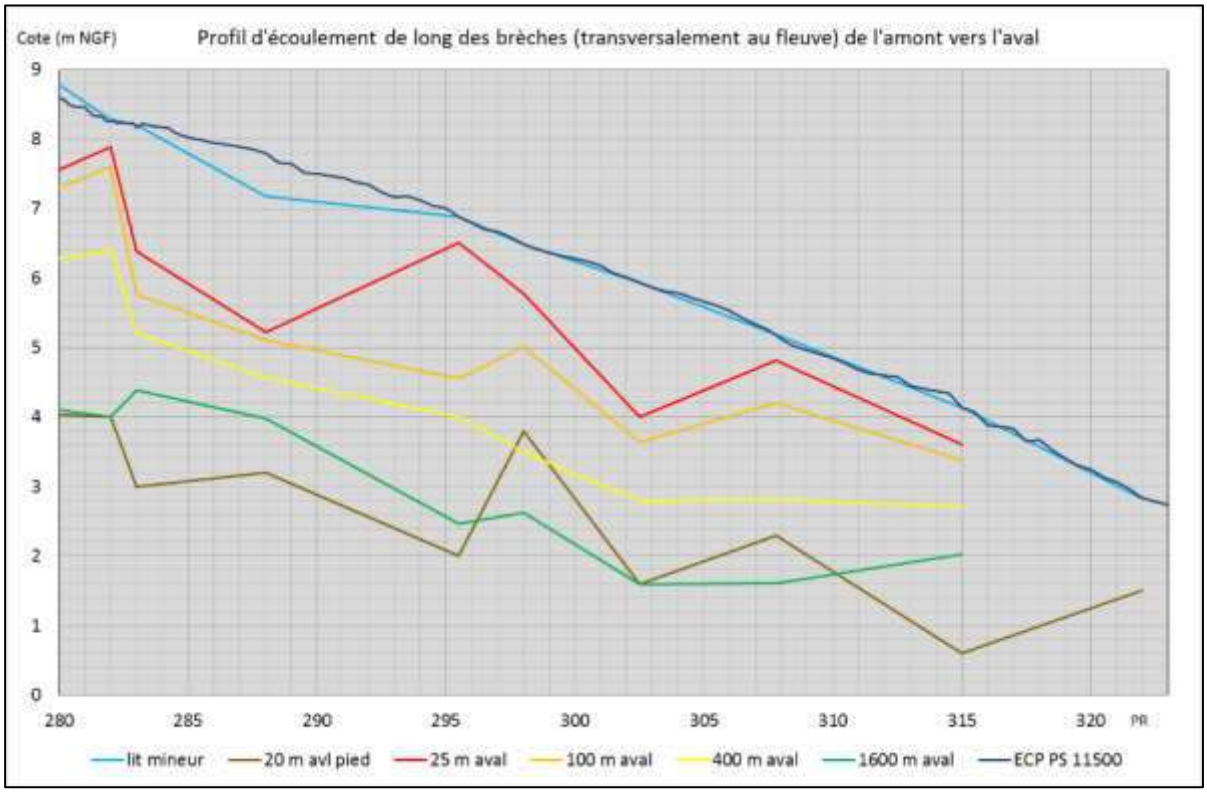


Figure 258. Crue 11500 – profils transversaux d'écoulement des brèches d'amont vers l'aval

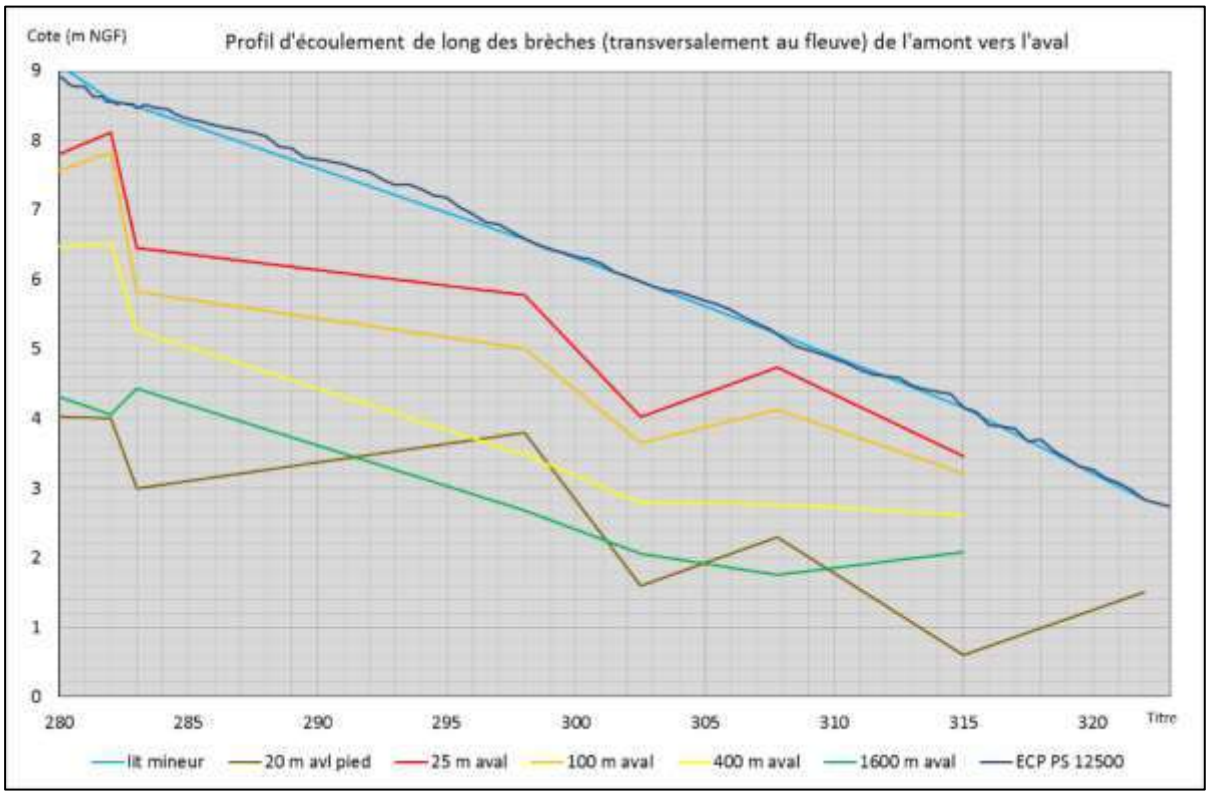


Figure 259. Crue 12500 – profils transversaux d'écoulement des brèches d'amont vers l'aval

Ces profils sont intéressants car ils permettent globalement de constater que le comportement des brèches est quasiment identique, quel que soit le scénario de crue. Ils montrent également une perte de charge importante de 1,5 à 2 m sur la partie amont du fleuve (du PK 281 au PK 307) là où le fleuve est haut perché par rapport au terrain naturel.. En aval du PK 307, la perte de charge est moins importante, compte tenu du fait également que la hauteur de charge en amont des digues est également plus faibles. On constate également qu'à 1600 m de la digue, le niveau de la brèche est quasiment au niveau du pied aval de la digue, ce qui est lié à la configuration en toit du fleuve. Les déversements de la brèche ne peuvent revenir au fleuve.

Concernant les vitesses, on constate que globalement elles sont inférieures à 1 m/s à 300 m en aval de la brèche quelle que soit la crue et quelle que soit la hauteur de déversement de la brèche. Pour le seuil de 0,5 m/s, on constate que cette distance décroit de l'amont vers l'aval du fleuve, et dépend directement de la hauteur de charge.

7 SCENARIOS D'INONDATION CONSTRUITS

La détermination de niveaux de protection au sein de la zone protégée nécessite d'avoir des scénarios d'inondation continus temporellement et géographiquement. Compte tenu de l'ampleur du territoire et de la large gamme de crues retenue pour une meilleure approche du risque, certains scénarios ont été construits à partir d'une analyse fine de la topographie ou à partir de modélisations existantes.

7.1 CRUE 8500 (VOLUME DE BRECHE ≈ 250 000 M^3)

Le retour d'expérience accidentologique (Cf. rapport 6 de l'étude de dangers) et sa synthèse rappelée dans le chapitre 4 de ce rapport montre que depuis 1840, la seule inondation causée pour une crue dont le débit a atteint 8500 m^3/s à la station Beaucaire/Tarascon et même moins est celle causée par la brèche de Ventabren en novembre 2016. Compte tenu de la faible étendue de l'inondation, il est probable que des inondations équivalentes aient eu lieu par le passé, mais qu'elles n'aient pas été reprises dans les archives. En tout état de cause, il est très peu probable, voire quasiment impossible qu'il y ait eu une inondation d'ampleur pour cette gamme de crue. On l'a également vu dans le retour d'expérience accidentologique, les brèches avec de faible charge n'engendrent pas des largeurs excessives. La contrainte de cisaillement s'exerçant sur les flancs de la brèche n'est pas suffisamment forte pour élargir la brèche, même avec une contrainte critique nulle mesurée au JET Erosion Test (cas de la brèche Ventabren).

Le volume de la brèche de Ventabren a été estimé comme base de référence pour les crues à 8500 m^3/s. Les hypothèses suivantes ont été considérées :

- le niveau de crue au droit de la brèche a été estimé par interpolation entre les stations limnimétriques amont (Saint Gilles) et aval (Petite Abbaye) ;
- le fond de la brèche a été retenu au niveau du terrain naturel aval (2.5 m NGF) ;
- la largeur de la brèche a été estimée à 3 m ;
- le débit dans la brèche par une formule de seuil avec une sécurité sur le coefficient de débit ;
- l'absence d'intervention d'urgence, réalisée en environ trois heures dans la réalité.

Avec ces hypothèses nous arrivons à un volume de 250 000m^3 qui peut faiblement varier entre les ouvrages mais donne l'ordre de grandeur recherché, très sécuritaire puisque dans la réalité, il a été estimé proche de 30 000 m^3.

Tableau 60. Brèche de Ventabren - estimation du volume de brèche avec et sans intervention

Temps post brèche (h)	Cote de la crue (m NGF)	Charge déversante (m)	Débit brèche (m^3/s)	Volume déversé (m^3)	
0	3,17	0,67	2,89	10 388	Brèche
1	3,19	0,69	3,06	21 415	
2	3,22	0,72	3,24	33 075	Intervention: V < 50 000 m^3
3	3,25	0,75	3,45	45 490	
4	3,28	0,78	3,64	58 603	
5	3,31	0,81	3,87	72 525	
6	3,34	0,84	4,06	87 129	
7	3,36	0,86	4,22	102 320	
8	3,38	0,88	4,41	118 195	
9	3,39	0,89	4,48	134 331	
10	3,38	0,88	4,39	150 153	
11	3,37	0,87	4,33	165 755	
12	3,34	0,84	4,10	180 524	
13	3,30	0,80	3,82	194 291	
14	3,26	0,76	3,50	206 886	
15	3,20	0,70	3,12	218 124	
16	3,14	0,64	2,71	227 883	
17	3,07	0,57	2,28	236 077	
18	2,99	0,49	1,82	242 616	
19	2,90	0,40	1,36	247 501	
20	2,82	0,32	0,96	250 975	
21	2,74	0,24	0,64	253 287	
22	2,67	0,17	0,39	254 680	
23	2,59	0,09	0,15	255 228	PAS d'intervention: V= 250 000m^3
24	2,51	0,01	0,01	255 258	
25	2,44	-0,06	0	255 258	

Pour éviter de modéliser des inondations à 250 000 m^3, qui aurait été couteuse en temps et en argent et pas forcément pertinente sur le plan technique car il aurait fallu modéliser quasiment tous les km des brèches au droit des tronçons de digue avec un niveau de sûreté de 7500 m^3/s, nous avons opté pour une analyse fine de la topographie dans l'environnement de la digue.

Sur des espaces cohérents, des zones d'expansions ont été estimées à dire d'expert, en se basant sur les routes ou des remblais en retrait des ouvrages capables de contenir les 250 000 m^3 d'eaux déversées. C'est ensuite un travail d'analyse de la topographie qui a été réalisé, ce dernier a permis de déterminer la cote de la limite de cette sous zone protégée puis le volume qu'elle pouvait contenir à ce niveau.

Lorsque les zones définies ne permettaient pas de stocker le volume recherché (250 000 m^3), elles ont été élargies jusqu'à trouver un nouvelle limite physique. Le travail a ainsi été itéré jusqu'à ce que l'ensemble des zones d'expansion répondent au critère recherché.

La figure ci-dessous illustre la méthodologie utilisée.

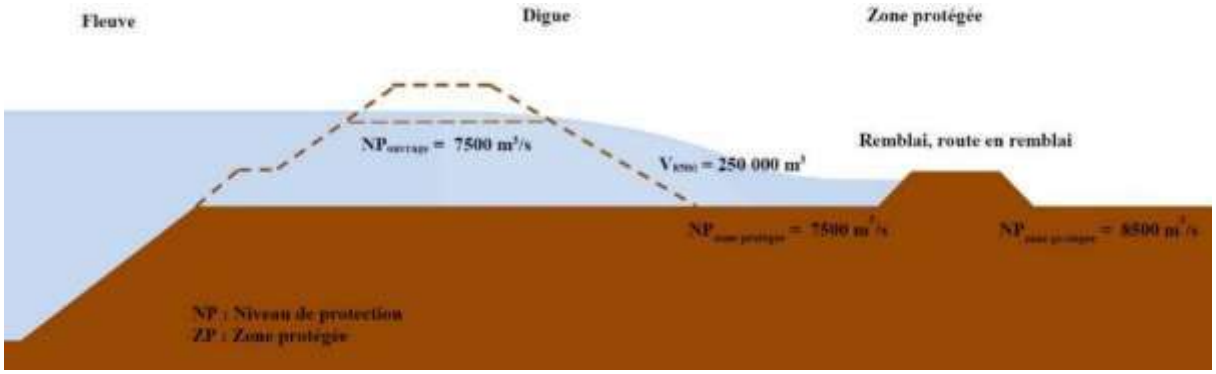


Figure 260. Méthode de détermination des zones protégées pour une crue à 8500 m^3/s

Le tableau ci-dessous récapitule, pour les sous zones en proximité du petit Rhône rive gauche en aval d'Albaron, leur localisation (PR_d), la cote (Z_{limite}) et le volume associé (V_{limite}) pour la limite de franchissement de cette sous zone. Cette cote est toujours supérieure à celle permettant un stockage d'environ 250 000 m^3 dans la zone. La cote (Z_{250}) correspondant au stockage de 250 000 m^3 figure également.

Tableau 61. Petit Rhône rive gauche aval - caractéristique des sous-zones de capacité 250 000 m^3

id	Rive	PR_d	PRfin	Z_{limite} (m NGF)	V_{limite} (m^3)	Z_{250} (m NGF)
1	PRG	307,60	309,70	1,00	2 013 084	0,45
2	PRG	309,70	311,50	0,70	5 587 964	0,20
3	PRG	311,50	315,50	2,00	810 775	1,60
4	PRG	315,50	319,25	1,30	359 072	1,20
5	PRG	319,25	320,30	1,10	609 146	0,70
7	PRG	321,80	325,25	1,00	536 913	0,80
8	PRG	325,25	327,50	1,32	251 533	1,32
9	PRG	327,50	329,50	1,10	251 717	1,10
10	PRG	329,50	330,35	0,70	1 064 126	0,40
11	PRG	330,35	330,80	0,85	301 595	0,80

La carte ci-dessous détaille les sous zones protégées à 7 500 m^3/s ainsi déterminées.

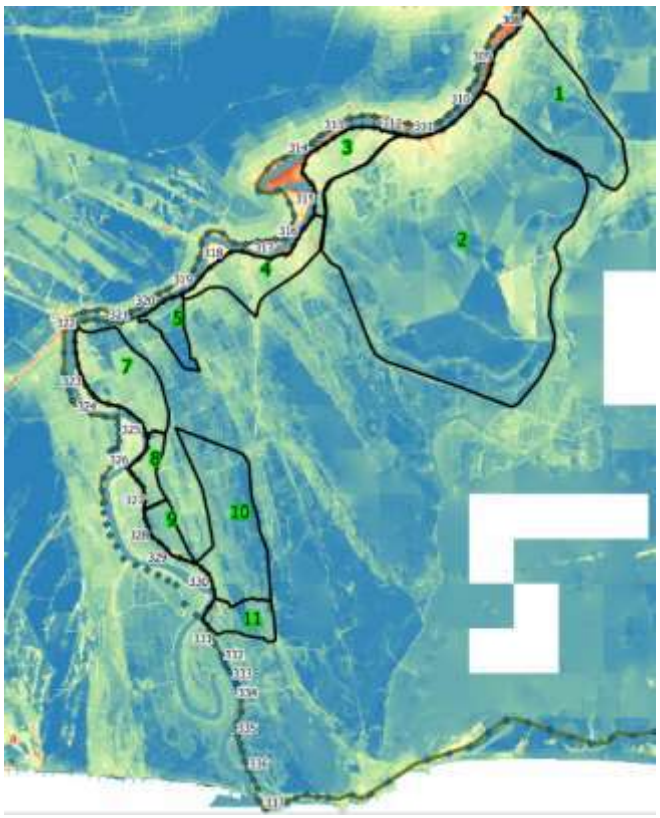


Figure 261. Petit Rhône aval : sous-zones protégées à 7 500 m^3/s et inondées à 8500 m^3/s en cas de brèche à 250 000 m^3

Afin d'avoir des zones aux limites facilement repérables, ces sous zones ont été ré-élargies pour être fixées sur les routes, ce qui est alors sécuritaire.

Le découpage final est présenté sur la carte suivante :

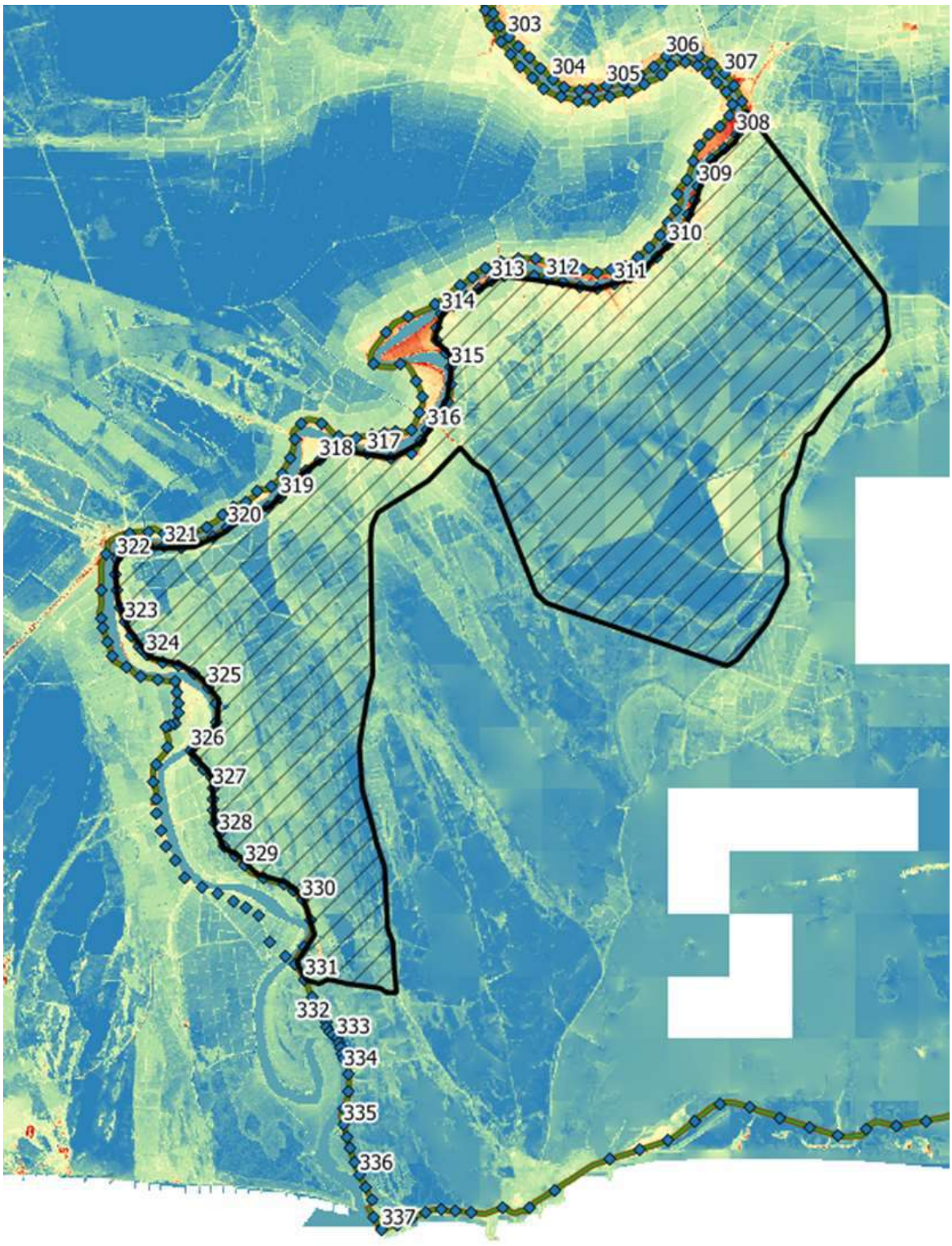


Figure 262. Petit Rhône aval : sous-zones protégées finales à 7 500 m^3/s et inondées à 8500 m^3/s en cas de brèche à 250 000 m^3

Sur la partie amont du Petit Rhône, le résultat est le présenté ci-après:

La sous-zone 14, comme la 20 et la 21, ont été redécoupées car la 14-1 ne permettait pas de stocker les 250 000 m^3 recherchés et déversait à l'Est et au Sud dans la 14-2. Le volume stocké dans 14 est donc celui la somme des volumes stockés dans la 14-1 et la 14-2.

Tableau 62. Petit Rhône rive gauche amont - caractéristique des sous-zones de capacité 250 000 m^3

id	Rive	PR_début	PRfin	Z_{limite} (m NGF)	V_{limite} (m^3)	Z_{250} (m NGF)
12	PRG	282.5	288	2,6	1 422 768	2
13	PRG	288	294.6	1,8	599 110	1,6
14	PRG	294.6	295.2		261 912	
14-1				3	159 831	3,5
14-2				0,7	102 081	
15	PRG	295.2	306.5	1,4	9 503 014	0,2

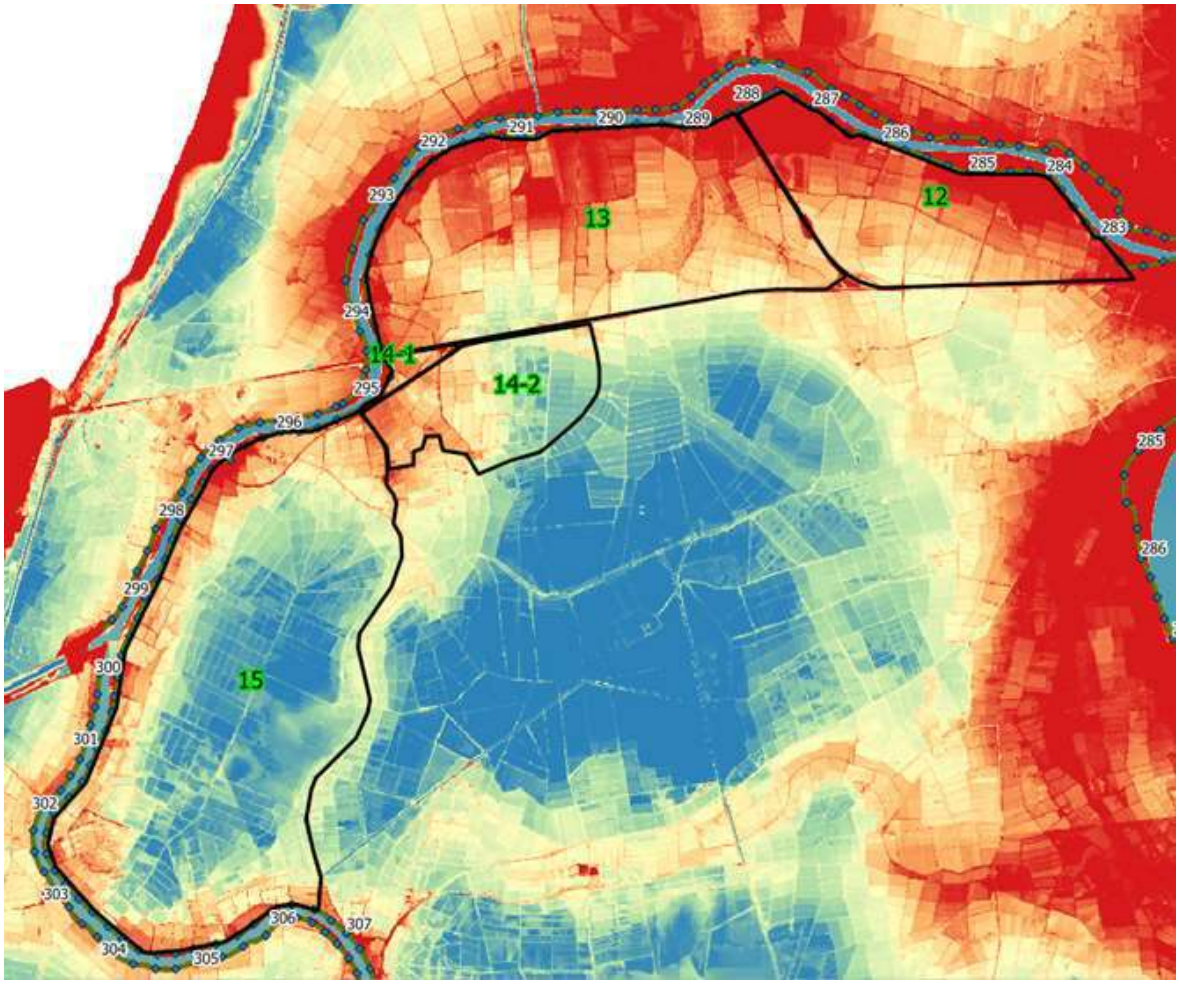


Figure 263. Petit Rhône amont : sous-zones protégées finales à 7 500 m^3/s et inondées à 8500 m^3/s en cas de brèche à 250 000 m^3

Sur le grand Rhône aval rive droite, les résultats sont présentés ci-après.

Figure 264. Grand Rhône rive droite aval : sous-zones protégées à 7 500 m^3/s et inondées à 8500 m^3/s en cas de brèche à 250 000 m^3

Tableau 63. Grand Rhône rive droite aval caractéristique des sous-zones de capacité 250 000 m^3

id	Rive	PR_début	PRfin	Z_{limite} (m NGF)	V_{limite} (m^3)	Z_{250} (m NGF)
16	GRD	313	313,8	1,4	320 494	1,3
17	GRD	313,8	314,2	2	254 038	2
18	GRD	314,25	314,9	2	474 953	1,6
19	GRD	314,9	315,55	1,3	356 233	1,2
20	GRD	315,55	317,25		583 229	
20-1				1,2	120 965	1,4
20-2				1	462 264	
21	GRD	317,25	319,4		256 453	
21-1				1,1	215 435	1,2
21-2				1	40 018	
22	GRD	319,4	323,3	1	3 033 609	0,4

7.2 CRUE 9500 (VOLUME DE BRECHE ≈ 20 MILLIONS M^3)

Pour une crue atteignant un débit de 9500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon, aucune modélisation n'a été réalisée. L'étude accidentologique donne deux inondations pour cette gamme de crue. Celle d'octobre 1993 avec un volume de déversement de 130 millions de m^3 et celle de novembre 2002 avec un volume de déversement de 2 millions de m^3. Celle d'octobre 1993 n'est pas représentative d'un fonctionnement attendu. Les digues n'étaient plus entretenues depuis un grand nombre d'année. Elles n'étaient pas accessibles. Les riverains et les services de l'Etat ont détecté relativement tôt la fuite initiatrice de la brèche, mais n'ont pas pu intervenir tant, lors du processus de formation que lors de la phase d'élargissement (Cf. rapport n°6).

L'inondation causée par la brèche de novembre 2002 semble beaucoup plus proche d'un scénario plausible. Par sécurité et compte tenu des incertitudes, nous estimerons le volume de déversement attendu pour cette gamme de crue à 10 fois celui constaté en 2002.

Pour estimer l'étendue de l'inondation correspondant à environ 20 millions de m^3, les hydrogrammes des brèches du Petit Rhône pour une crue à 10500 m^3/s ont été exploités. Sur le grand Rhône, les hydrogrammes de brèches relatifs à une crue à 11500 m^3/s ont été exploités.

Pour les brèches du Petit Rhône, le volume de 20 millions de m3 est atteint 12 heures après l'accident et pour les brèches du Grand Rhône, 6 heures après.

Les deux figures ci-dessous illustrent la méthode utilisée. La première montre l'étendue de l'inondation et les hauteurs d'eau atteintes 12 heures après la brèche (volume de déversement estimé à 29 millions de m^3) et la seconde, les mêmes paramètres mais pour la crue entière, soit après le déversement de 54 millions de m^3.

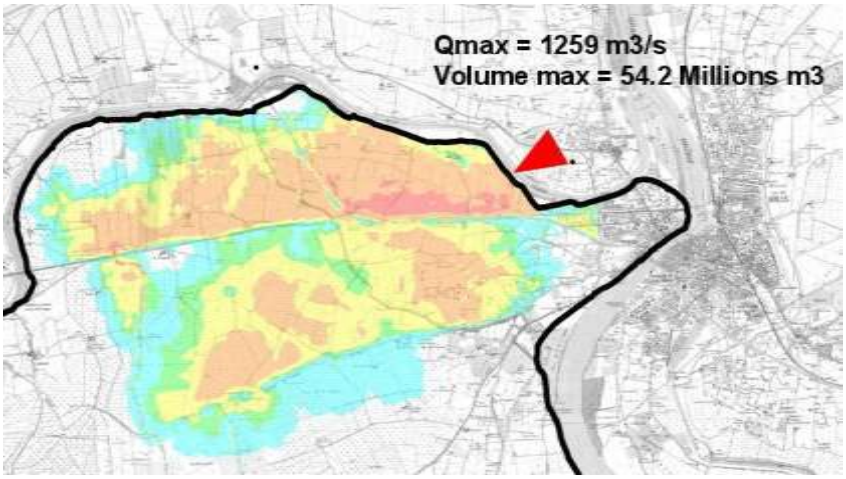


Figure 265. Crue 10500 – étendue inondation et hauteurs d'eau 12 h après la brèche

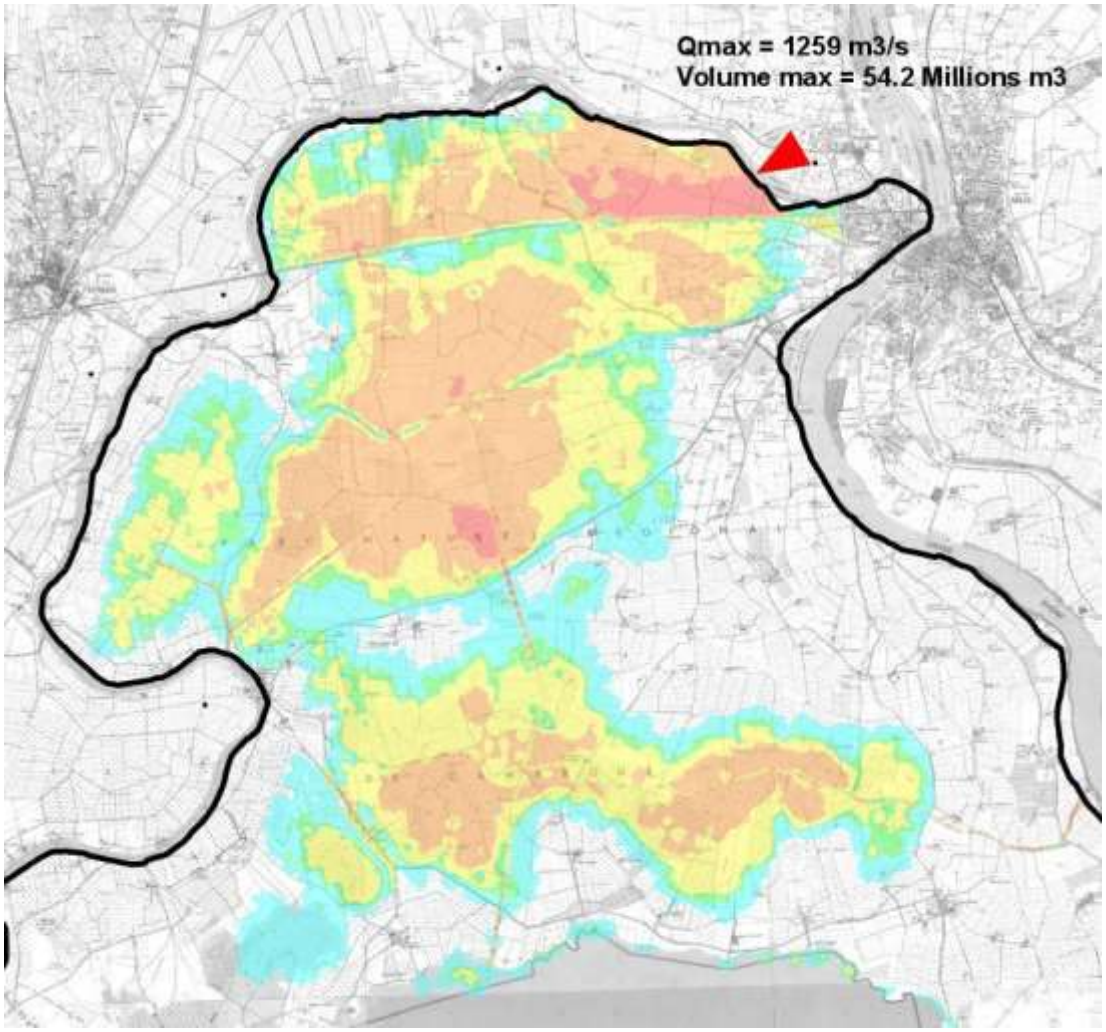


Figure 266. Crue 10500 – étendue inondation et hauteurs d'eau maximum

Le tableau ci-après donne les volumes de brèche pour les différentes brèches exploitées.

Tableau 64. Crue 9500 : brèches exploitées et caractéristiques retenues

brèche	Modélisation brèche exploitée	Temps retenu (h)	Volume estimé (millions de m^3)
Aval Cazeneuve	Crue 10500	12	29
Saliers	Crue 10500	12	26
Figarès	Crue 10500	12	24
Aval albaron	Crue 10500	12	23
Montlong	Crue 11500	6	22
Augery	Crue 11500	6	20
Salin de Giraud	Crue 10500 sans brèche	Toute la crue	

Pour Salin de Giraud, l'étendue de l'inondation et les cotes caractéristiques sont estimés à partir de la modélisation de la surverse sans brèche pour la crue 10500. Cette hypothèse vient de l'analyse des brèches modélisées pour les crues 11500 et 12500, qui modifie faiblement les

cotes d'eau dans la zone protégée. La principale problématique sur la digue rive droite de Salin de Giraud est la cote de submersion de l'ouvrage qui est faible.

Le tableau ci-après donne, pour les sept scénarios d'inondation précités, les valeurs caractéristiques des cotes au sein des sous-zones protégées.

Tableau 65. Cote (en m NGF) au sein de chaque sous-zone protégée en fonction des scénarios d'inondation construits pour une crue de 9500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon à partir de modélisations existantes

Casier ZP	Cote (en m NGF) +/- 20 cm						
	Aval Cazeneuve	**Saliers**	**Figarès**	**Aval Albaron**	**Montlong**	**Augery**	**Brèches Salin**
1							
2							
3							
4	5,00						
5	5,00						
6	4,00						
7							
8							
9	4,25						
10	3,00						
11							
12	3,50	1,75					
13	2,00	1,75	1,75	0,25	0,50		
14	0,50		0,5	1,50	2,25	2,25	
15					4,00	3,50	
16	0,50		0,5	0,50			
17							2,25
18							1,00
19							1,50
20					4,75	4,00	
21						3,00	
22							
23							
24							
25							2,50
26							1,25
27	5,00						
28	3,50						
29		4,00	4,25				
30		3,00	2,25				
31		2,50	2,5	0,50			
32				3,25			
33				3,75			
34							
35							
36							
37							
38							
39		1,00	1,25	2,00			
40						2,00	1,25
41							1,50

Pour le scénario : brèche aval Cazeneuve, les cotes caractéristiques sont celles retenues pour la crue 10500 à l'exception :

- des ZP n°9 et n°14, pour lesquelles la cote est légèrement moindre, compte tenu du volume réduit de l'inondation (29 millions de m^3 pour une crue 9500 contre 54 millions de m^3 pour une crue 10500),
- des ZP n°29, 30, 31 et 39, qui ne sont pas inondées, pour les raisons précitées.

Pour le scénario : brèche de Saliers, les cotes caractéristiques sont celles retenues pour la crue 10500 à l'exception :

- des ZP n°12 et n°13, pour lesquelles la cote est légèrement moindre, compte tenu du volume réduit de l'inondation (26 millions de m^3 pour une crue 9500 contre 68 millions de m^3 pour une crue 10500),
- des ZP n°10, 14, 16 et 30, qui ne sont pas inondées, pour les raisons précitées.

Pour le scénario : brèche de Figarès, les cotes caractéristiques sont celles retenues pour la crue 10500 à l'exception :

- des ZP n°14, 16 et n°29, pour lesquelles la cote est légèrement moindre, compte tenu du volume réduit de l'inondation (24 millions de m^3 pour une crue 9500 contre 59 millions de m^3 pour une crue 10500),
- de la ZP n°12, qui n'est pas inondée, pour les raisons précitées.

Pour le scénario : brèche aval d'Albaron, les cotes caractéristiques sont celles retenues pour la crue 10500 à l'exception :

- des ZP n°13, 16, 31, 32 et n°33, pour lesquelles la cote est légèrement moindre, compte tenu du volume réduit de l'inondation (23 millions de m^3 pour une crue 9500 contre 53 millions de m^3 pour une crue 10500),
- de la ZP n°37, qui n'est pas inondée, pour les raisons précitées.

Pour le scénario : brèche de Montlong, les cotes caractéristiques sont celles retenues pour la crue 10500 (construite pour mémoire à partir de la crue de 11500) à l'exception :

- des ZP n°13, 14, 15 et n°20, pour lesquelles la cote est légèrement moindre, compte tenu du volume réduit de l'inondation (22 millions de m^3 pour une crue 9500 contre 52 millions de m^3 pour une crue 10500 et 200 millions de m^3 pour une crue 11500).

Pour le scénario : brèche d'Augery, les cotes caractéristiques sont celles retenues pour la crue 10500 (construite pour mémoire à partir de la crue de 11500) à l'exception :

- des ZP n°14, 15 et n°20, pour lesquelles la cote est légèrement moindre, compte tenu du volume réduit de l'inondation (20 millions de m^3 pour une crue 9500 contre 47 millions de m^3 pour une crue 10500 et 188 millions de m^3 pour une crue 11500).

- des ZP n°16 et 21, qui ne sont pas inondées, pour les raisons précitées.

Pour le scénario : brèche Salin de Giraud, les cotes caractéristiques sont celles retenues pour la crue 10500 (surverse sans brèche) à l'exception :

- des ZP n°18, 25 et n°26, pour lesquelles la cote est légèrement moindre, compte tenu de la baisse de charge au droit de la digue,
- de la ZP n°24, qui n'est pas inondée, pour les raisons précitées.

7.3 CRUE 10500 (VOLUME DE BRECHE ≈ 40 A 50 MILLIONS M^3)

Pour une crue atteignant un débit de 10500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon, aucune modélisation n'a été réalisée pour le grand Rhône rive droite. L'étude accidentologique donne une inondation pour cette gamme de crue, celle de janvier 1994 avec un volume de déversement de 60 millions de m^3. Nous retiendrons pour cette gamme de crue un volume de l'ordre de 40 à 50 millions m^3, qui correspond, aux marges d'incertitude près, au retour d'expérience historique de cette gamme de crues.

Le même travail, que pour la crue 9500, a été réalisé pour les brèches du grand Rhône rive droite. Le temps retenu après la brèche a été de 12 heures pour obtenir le volume de déversement retenu.

Le tableau ci-après donne les volumes de brèche pour les différentes brèches exploitées :

Tableau 66. Crue 10500 : brèches exploitées et caractéristiques retenues

brèche	Modélisation brèche exploitée	Temps retenu (h)	Volume estimé (millions de m^3)
Montlong	Crue 11500	12	52
Augery	Crue 11500	12	47
Boisverdun	Crue 11500	12	40
Salin de Giraud	Crue 10500 sans brèche	Toute la crue	

Le tableau ci-après donne, pour les sept scénarios d'inondation précités, les valeurs caractéristiques des cotes au sein des sous-zones protégées.

Tableau 67. Cote (en m NGF) au sein de chaque sous-zone protégée en fonction des scénarios d'inondation construits pour une crue de 10500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon à partir de modélisations existantes

Casier ZP	Cote (en m NGF) +/- 20 cm			
	Montlong	**Augery**	**Boisverdun**	**Surverse sans brèche Salin**
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13	0,75			
14	2,50	2,50		
15	4,50	3,75		
16		0,75		
17			2,75	2,25
18				1,25

19				1,50
20	5,00	4,25		
21		3,25		
22			3,25	
23			3,25	
24			3,00	3,00
25			2,00	2,75
26				1,75
27				
28				
29				
30				
31				
32				
33				
34				
35				
36				
37				
38				
39				
40		2,00	2,00	1,25
41				1,50

Pour le scénario : brèche de Montlong, les cotes caractéristiques sont celles retenues pour la crue 11500 à l'exception :

- des ZP n°13, 14, 15 et 19, pour lesquelles la cote est légèrement moindre, compte tenu du volume réduit de l'inondation (52 millions de m^3 pour une crue 10500 contre 200 millions de m^3 pour une crue 11500).
- des ZP n°10, 12, 16, 22, 29, 30, 31, 33 à 40 qui ne sont pas inondées, pour les raisons précitées.

Pour le scénario : brèche d'Augery, les cotes caractéristiques sont celles retenues pour la crue 11500 à l'exception :

- des ZP n°15, 16 20 et 21 pour lesquelles la cote est légèrement moindre, compte tenu du volume réduit de l'inondation (47 millions de m^3 pour une crue 10500 contre 181 millions de m^3 pour une crue 11500).
- des ZP n°12, 13, 17, 29, 30, 31, 33, 35 à 39, qui ne sont pas inondées, pour les raisons précitées.

Pour le scénario : brèche de Boisverdun, les cotes caractéristiques sont celles retenues pour la crue 11500 à l'exception :

- des ZP n°17, 22 à 25 et 40 pour lesquelles la cote est légèrement moindre, compte tenu du volume réduit de l'inondation (40 millions de m^3 pour une crue 10500 contre 166 millions de m^3 pour une crue 11500).
- des ZP n°13, 14, 16, 18, 19, 26, 31, 37, 38, 39 et 41qui ne sont pas inondées, pour les raisons précitées.

Pour le scénario : brèche Salin de Giraud, les cotes caractéristiques sont celles retenues pour la crue 10500 (surverse sans brèche) sans exception.

8 SCENARIO N°1 : FONCTIONNEMENT NOMINAL DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT

Conformément à l'arrêté EDD de 2017 modifié *«le scénario 1 est celui du fonctionnement nominal du système d'endiguement quand le niveau des écoulements, sous l'effet de la crue ou d'une submersion marine, correspond au niveau de protection. Conformément à l'article 11 du présent arrêté, on admettra que cette montée maximale du niveau de l'eau peut générer un risque résiduel de rupture d'ouvrage de 5 % au plus ou, s'il n'est pas possible de préciser quantitativement le risque résiduel de rupture, que ce risque est limité au sens de l'annexe 3. En outre, des venues d'eau plus ou moins dangereuses sont possibles en dehors de la zone protégée. Si la zone protégée comprend des parties délimitées avec des niveaux de protection différents, un scénario sera étudié pour chaque niveau de protection »*

8.1 NIVEAUX DE SURETE DES DIGUES

Les niveaux de sûreté et de danger (pour mémoire) des digues du petit Rhône rive gauche et du grand Rhône rive droite figurent dans le tableau ci-dessous.

Tableau 68. Niveaux de sûreté et de danger des tronçons homogènes PRG du système d'endiguement

N°	Libellé	PR Digue		Débit à Beaucaire/Tarascon (m^3/s)	
		PRG début	PRG Fin	Sûreté (5% de brèche)	Danger (50 % de brèche)
PRG 1	Trinquetaille	281.1	282.5	9 500	10 500
PRG 2	Cazeneuve-Augéry	282.5	287.4	7 500	9 500
PRG 3	Beaumont –A54	287.4	288.5	12 500	14160
PRG 4	A54 - Cavalès	288.5	294.5	7 500	8 500
PRG 5	Cavalès - St Gilles	294.5	297.2	7 500	8 500
PRG 6	St-Gilles - Figarès	297.2	298.2	7 500	8 500
PRG 7	future digue résistante à la surverse (Figarès)	298.2	299.8	7 500	8 500
PRG 8	La Galante - Albaron	299.8	306.55	7 500	8 500
PRG 9	Albaron	306.55	307.7	14 160	14160
PRG 10	Albaron-Eymini	307.7	313	7 500	9 500
PRG 11	Eymini-Sénebier	313	320.75	7 500	11 500
PRG 12	Sénebier	320.75	322	14 160	14160
PRG 13	Sénebier-Icard	322	329.5	7 500	11 500
PRG 14	Mas d'Icard - Bac	329.5	330.5	7 500	11 500
PRG 16	Bac – Mer Remblai hors système d'endiguement	330,625	337,0	Pour mémoire >> 8 500 m^3/s	Pour mémoire > 11 500 m^3/s

Tableau 69. Niveaux de sûreté et de danger des tronçons homogènes GRD du système d'endiguement

N°	Libellé	PR Digue		Débit à Beaucaire/Tarascon (m^3/s)	
		GRD début	GRD Fin	Sûreté (5% de brèche)	Danger (50 % de brèche)
D1	Défluent			14 160	>> 14160
GRD1	Quais	281.8	283.5	14 160	>> 14160
GRD2	Papeteries Etienne	283.5	284.15	14 160	>> 14160
GRD3	Emmaus	284.15	285.25	14 160	>> 14160
GRD4	Passeron-Monlong	285.25	288	14 160	>> 14160
GRD5	Monlong	288	288.9	14 160	>> 14160
GRD6	Montlong-Beaujeu	288.9	295.15	8 500	10 500
GRD7	Beaujeu-l'Armelière	295.15	298.2	10 500	11 500
GRD8	L'Armelière-la Commanderie	298.2	305.5	10 500	11 500
GRD9	La Commanderie-Bois Verdun	305.5	309.25	9 500	11 500
GRD10	Bois Verdun-Chartrouse	309.25	311.8	9 500	11 500
GRD11	Chartrouse-La Louisiane	311.8	313.1	9 500	11 500
GRD12	La Louisiane-L'Esquineau	313.1	319.4	7 500	9 500
GRD13	L'Esquineau-Palissade	319.4	323.3	8 500	11 500

8.2 SC N°1 : FONCTIONNEMENT NOMINAL POUR UNE CRUE 7500

Pour une crue, dont le débit atteint un débit de 7500 m^3/s ± 5 % à la station Beaucaire/Tarascon gérée par le service prévision des crues grand delta (cote atteinte selon la courbe de tarage en vigueur depuis le 7 décembre 2003 de 8,77 m NGF ± 10 cm) conjugué à un niveau marin de 0,9 m NGF ± 10 cm, le fonctionnement du système d'endiguement serait le suivant :

Les probabilités de brèche dans les digues du petit Rhône rive gauche, estimées dans le rapport 7.2., sont majoritairement comprises entre 1 et 5 %, sans dépasser la valeur réglementaire de 5 %. La probabilité de brèche dans les ouvrages est considéré comme très peu probable. Sur les digues du grand Rhône rive droite, la probabilité de brèche est inférieure ou égale à 1 %, à l'exception du tronçon situé au droit du village de Salin de Giraud, qui suit un comportement analogue aux digues du petit Rhône rive gauche.

Les niveaux de sûreté des digues sont atteints mais pas dépassés. La probabilité d'entrées d'eau du Rhône est considérée comme très peu probable.

La cartographie du fonctionnement du système conformément au scénario n°1 de l'arrêté EDD modifié figure en page suivante.

L'ensemble de la zone protégée est hors d'eau vis à vis des inondations du Rhône.

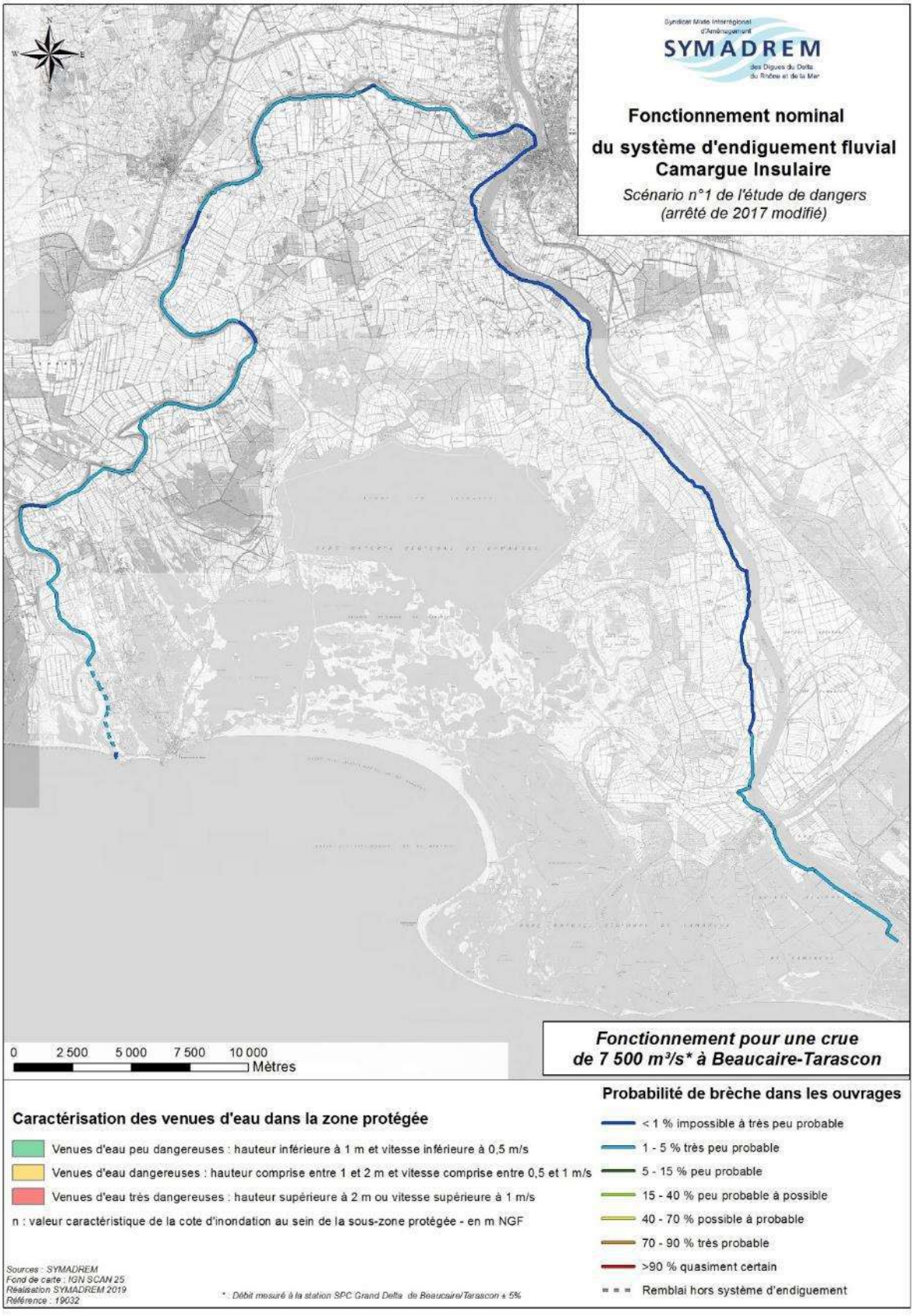


Figure 267. Scénario n°1 EDD pour une crue de 7500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

8.3 SC N°1 : FONCTIONNEMENT NOMINAL POUR UNE CRUE 8500

Pour une crue, dont le débit atteint un débit de 8500 m^3/s ± 5 % à la station Beaucaire/Tarascon gérée par le service prévision des crues grand delta (cote atteinte selon la courbe de tarage en vigueur depuis le 7 décembre 2003 de 9,58 m NGF ± 10 cm) conjugué à un niveau marin de 0,9 m NGF ± 10 cm, le fonctionnement du système d'endiguement serait le suivant :

Les probabilités de brèche dans les digues du petit Rhône rive gauche, estimées dans le rapport 7.2., sont globalement supérieures à 5 %. Les niveaux de sûreté des ouvrages sont en conséquence dépassés.
Les probabilités de brèche entre l'A54 et le pont de Sant Gilles, ainsi que sur le tronçon compris entre la Galante et Albaron et Albaron et Eymini sont supérieures à 40 % mais inférieures à 50 % (niveaux de danger atteints mais pas dépassés). Le tableau ci-après rappelle les niveaux de sûreté par tronçon homogène et donne les ordres de grandeur des probabilités de brèche dans les ouvrages pour cette gamme de crue.

Tableau 70. Niveaux de sûreté des tronçons homogènes PRG du système d'endiguement et probabilité maximale de brèche par tronçon homogène pour une crue de 8500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau sûreté Exprimé en débit m^3/s à B/T	Probabilité de brèche sur le tronçon pour une crue de 8500 m^3/s à B/T
PRG 1	Trinquetaille	281.1	282.5	9 500	1 - 5 %
PRG 2	Cazeneuve-Augéry	282.5	287.4	7 500	15 - 40 %
PRG 3	Beaumont –A54	287.4	288.5	12 500	< 1 %
PRG 4	A54 - Cavalès	288.5	294.5	7 500	40 - 70 %
PRG 5	Cavalès - St Gilles	294.5	297.2	7 500	40 - 70 %
PRG 6	St-Gilles - Figarès	297.2	298.2	7 500	15 - 40 %
PRG 7	future digue résistante à la surverse (Figarès)	298.2	299.8	7 500	15 - 40 %
PRG 8	La Galante - Albaron	299.8	306.55	7 500	40 - 70 %
PRG 9	Albaron	306.55	307.7	14 160	< 1 %
PRG 10	Albaron-Eymini	307.7	313	7 500	40 - 70 %
PRG 11	Eymini-Sénebier	313	320.75	7 500	5 - 15 %
PRG 12	Sénebier	320.75	322	14 160	< 1 %
PRG 13	Sénebier-Icard	322	329.5	7 500	15 - 40 %
PRG 14	Mas d'Icard - Bac	329.5	330.5	7 500	15 - 40 %
PRG 16	Bac – Mer Remblai hors système d'endiguement	330,625	337,0	Pour mémoire >> 8 500 m^3/s	1 - 5 %

Les probabilités de brèche dans les digues du grand Rhône rive droite sont inférieures à 5 %, à l'exception du tronçon de digue situé au droit de Salin de Giraud pour lequel la probabilité de brèche est compris entre 5 et 15 %.

Tableau 71. Niveaux de sûreté des tronçons homogènes GRD du système d'endiguement et probabilité maximale de brèche par tronçon homogène pour une crue de 8500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau sûreté Exprimé en débit m^3/s à B/T	Probabilité de brèche sur le tronçon pour une crue de 8500 m^3/s à B/T
D1	Défluent			14 160	< 1 %
GRD1	Quais	281.8	283.5	14 160	< 1 %
GRD2	Papeteries Etienne	283.5	284.15	14 160	< 1 %
GRD3	Emmaus	284.15	285.25	14 160	< 1 %
GRD4	Passeron-Monlong	285.25	288	14 160	< 1 %
GRD5	Monlong	288	288.9	14 160	< 1 %
GRD6	Montlong-Beaujeu	288.9	295.15	8 500	1 - 5 %
GRD7	Beaujeu-l'Armelière	295.15	298.2	10 500	< 1 %
GRD8	L'Armelière-la Commanderie	298.2	305.5	10 500	< 1 %
GRD9	La Commanderie-Bois Verdun	305.5	309.25	9 500	1 - 5 %
GRD10	Bois Verdun-Chartrouse	309.25	311.8	9 500	1 - 5 %
GRD11	Chartrouse-La Louisiane	311.8	313.1	9 500	1 - 5 %
GRD12	La Louisiane-L'Esquineau	313.1	319.4	7 500	5 - 15 %
GRD13	L'Esquineau-Palissade	319.4	323.3	8 500	1 - 5 %

Au droit des tronçons de digue pour lesquels le niveau de sûreté des ouvrages est dépassé, des entrées d'eau par brèche doivent être considérés. Selon le retour d'expérience historique depuis 1840 (article 4 du présent rapport) et plus particulièrement celui de novembre 2016 en supposant que le SYMADREM n'ait pas pu colmater la brèche (article 7 du présent rapport), il est considéré un lâcher d'eau de 250 000 m^3 dans la zone protégée en provenance respectivement des tronçons de digue pour lesquels le niveau de sûreté est dépassé.
La cartographie du fonctionnement du système conformément au scénario n°1 de l'arrêté EDD modifié figure en page suivante. Les venues d'eau sont toutes considérées comme dangereuses dans l'environnement proche de la digue avec des vitesses supérieures à 0,5 m/s juste en aval de la brèche et des hauteurs localement supérieures à 1 mètre. Après 400 mètres, venues d'eau sont toutes considérées comme non dangereuses compte tenu du faible volume

de lâcher d'eau. Les zones « pieds secs » avec une probabilité d'inondation inférieure à 5 % figure sur la carte ci-après.

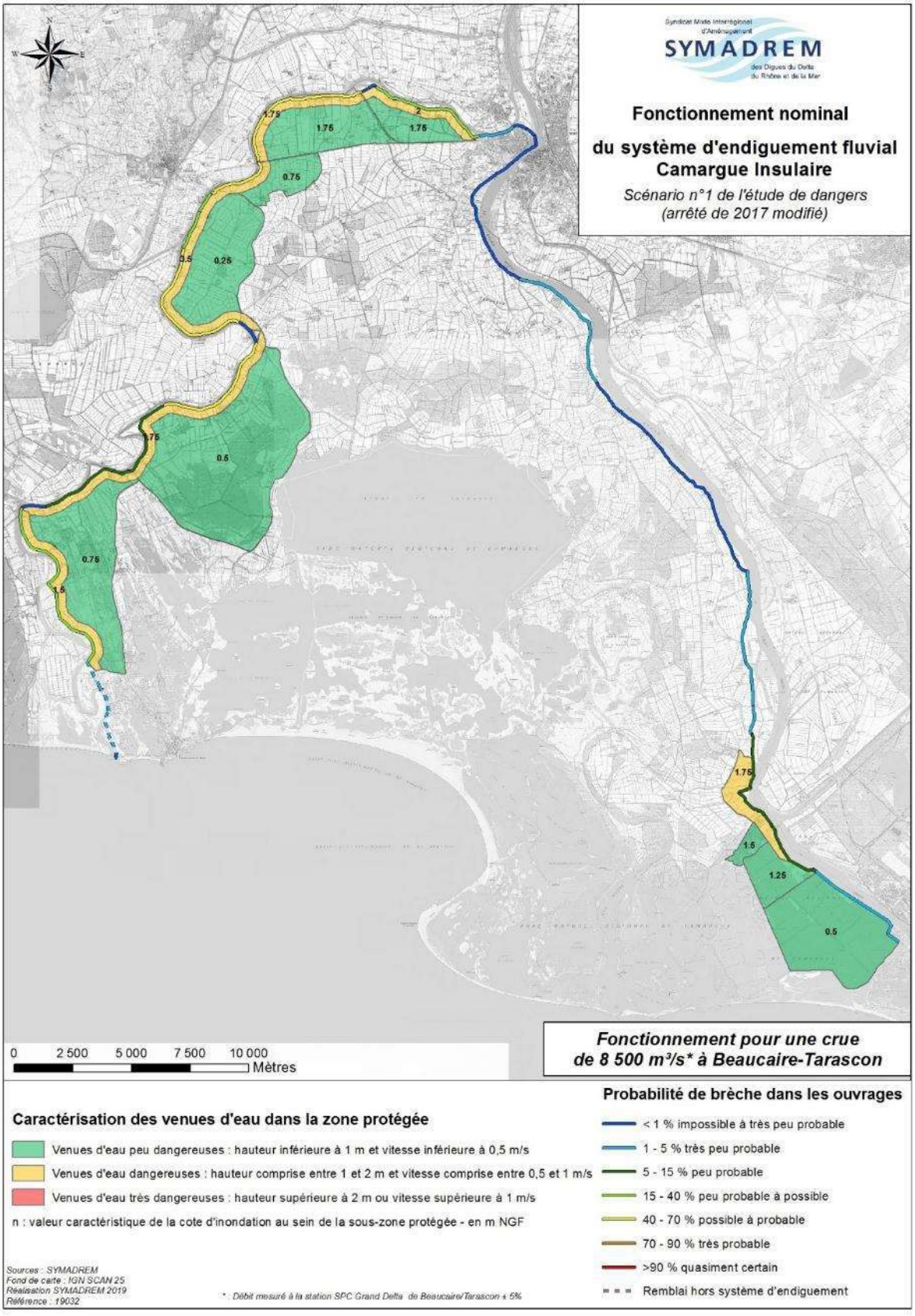


Figure 268. Scénario n°1 EDD pour une crue de 8500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

La carte ci-dessous est la résultante de la cote NGF appliquée à la sous-zone protégée moins la cote NGF du terrain naturel (données source BDT IGN). Cette carte nous montre que l'eau issue de la brèche a tendance à circuler et remplir les zones de marais. Les secteurs potentiellement inondés sont les habitations situées à moins de 400 mètres des digues pour lesquels le niveau de sûreté est dépassé et le village de Salin de Giraud, qui est inondé sous quelques centimètres.

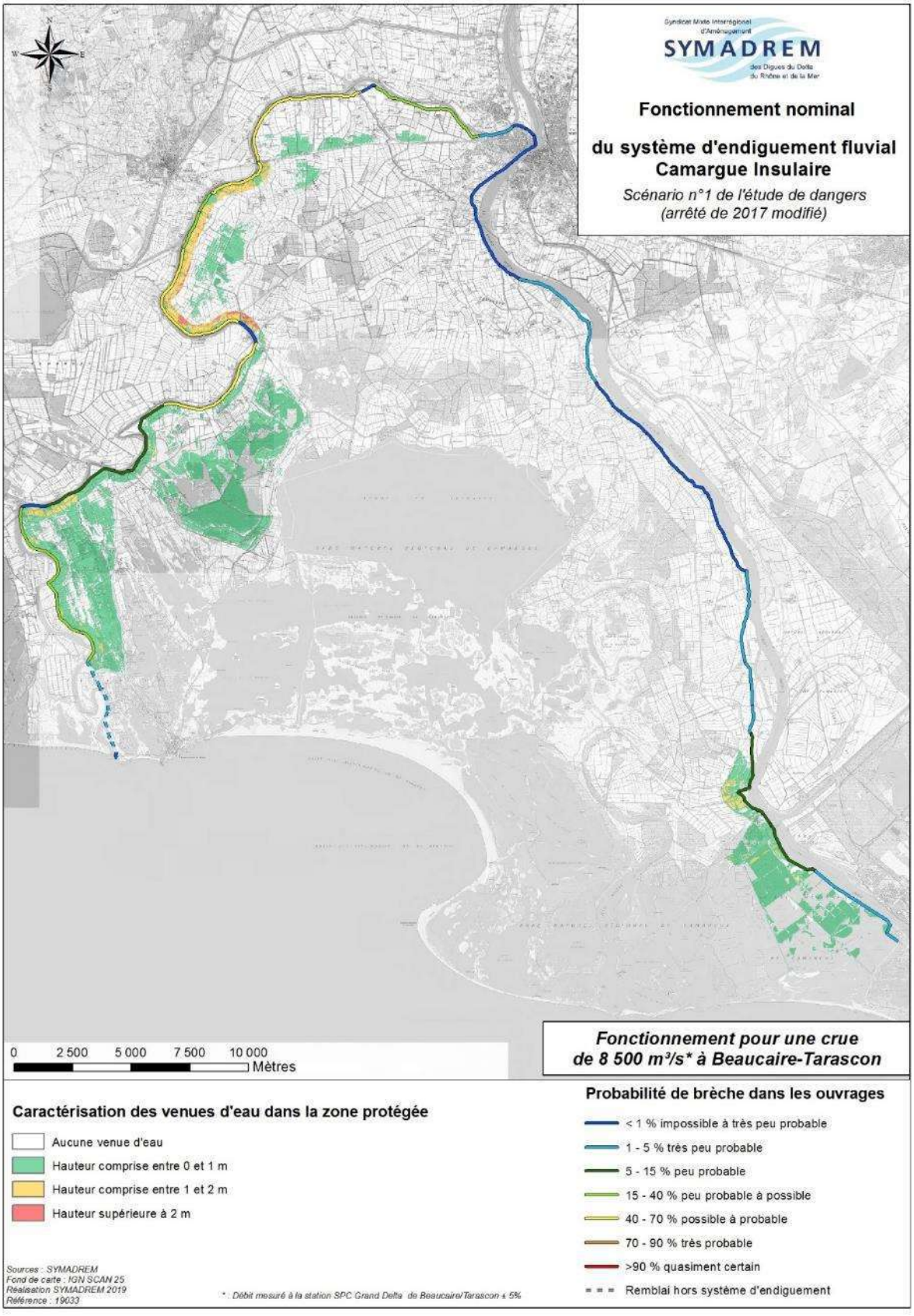


Figure 269. Scénario n°1 EDD pour une crue de 8500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon avec différentiel

8.4 SC N°1 : FONCTIONNEMENT NOMINAL POUR UNE CRUE 9500

Pour une crue, dont le débit atteint un débit de 9500 m^3/s ± 5 % à la station Beaucaire/Tarascon gérée par le service prévision des crues grand delta (cote atteinte selon la courbe de tarage en vigueur depuis le 7 décembre 2003 de 10,22 m NGF ± 10 cm) conjugué à un niveau marin de 0,95 m NGF ± 10 cm, le fonctionnement du système d'endiguement serait le suivant :

Les probabilités de brèche dans les digues du petit Rhône rive gauche, estimées dans le rapport 7.2., sont sensiblement supérieures à 5 %. Les niveaux de sûreté des ouvrages en aval du mas de Cazeneuve sont en conséquence dépassés.
Les probabilités de brèche entre l'A54 et Eymini, à l'exception du tronçon de digue situé au droit d'Albaron et en amont de l'A54 sont comprises entre 40 et 70 % %. Elles sont supérieures à 50 % de l'A54 à Albaron (niveaux de danger dépassés). Le tableau ci-après rappelle les niveaux de sûreté par tronçon homogène et donne les ordres de grandeur des probabilités de brèche dans les ouvrages pour cette gamme de crue.

Tableau 72. Niveaux de sûreté des tronçons homogènes PRG du système d'endiguement et probabilité maximale de brèche par tronçon homogène pour une crue de 9500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau sûreté Exprimé en débit m^3/s à B/T	Probabilité de brèche sur le tronçon pour une crue de 9500 m^3/s à B/T
PRG 1	Trinquetaille	281.1	282.5	9 500	1 - 5 %
PRG 2	Cazeneuve-Augéry	282.5	287.4	7 500	40 - 70 %
PRG 3	Beaumont –A54	287.4	288.5	12 500	< 1 %
PRG 4	A54 - Cavalès	288.5	294.5	7 500	40 - 70 %
PRG 5	Cavalès - St Gilles	294.5	297.2	7 500	40 - 70 %
PRG 6	St-Gilles - Figarès	297.2	298.2	7 500	40 - 70 %
PRG 7	future digue résistante à la surverse (Figarès)	298.2	299.8	7 500	40 - 70 %
PRG 8	La Galante - Albaron	299.8	306.55	7 500	40 - 70 %
PRG 9	Albaron	306.55	307.7	14 160	< 1 %
PRG 10	Albaron-Eymini	307.7	313	7 500	40 - 70 %
PRG 11	Eymini-Sénebier	313	320.75	7 500	5 - 15 %
PRG 12	Sénebier	320.75	322	14 160	< 1 %
PRG 13	Sénebier-Icard	322	329.5	7 500	15 - 40 %
PRG 14	Mas d'Icard - Bac	329.5	330.5	7 500	15 - 40 %
PRG 16	Bac – Mer Remblai hors système d'endiguement	330,625	337,0	Pour mémoire >> 8 500 m^3/s	1 - 5 %

Les probabilités de brèche dans les digues du grand Rhône rive droite sont inférieures à 5 %, à l'exception des tronçons de digue situés au droit et en aval de Salin de Giraud pour lequel la probabilité de brèche est respectivement comprise entre 40 et 70 % et 5 et 15 %, ainsi que sur le tronçon situé en aval de Petite Montlong pour lequel la probabilité de brèche est comprise entre 15 et 40 %.

Tableau 73. Niveaux de sûreté des tronçons homogènes GRD du système d'endiguement et probabilité maximale de brèche par tronçon homogène pour une crue de 9500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau sûreté Exprimé en débit m^3/s à B/T	Probabilité de brèche sur le tronçon pour une crue de 9500 m^3/s à B/T
D1	Défluent			14 160	< 1 %
GRD1	Quais	281.8	283.5	14 160	< 1 %
GRD2	Papeteries Etienne	283.5	284.15	14 160	< 1 %
GRD3	Emmaus	284.15	285.25	14 160	< 1 %
GRD4	Passeron-Monlong	285.25	288	14 160	< 1 %
GRD5	Monlong	288	288.9	14 160	< 1 %
GRD6	Montlong-Beaujeu	288.9	295.15	8 500	15 - 40 %
GRD7	Beaujeu-l'Armelière	295.15	298.2	10 500	1 - 5 %
GRD8	L'Armelière-la Commanderie	298.2	305.5	10 500	1 - 5 %
GRD9	La Commanderie-Bois Verdun	305.5	309.25	9 500	1 - 5 %
GRD10	Bois Verdun-Chartrouse	309.25	311.8	9 500	1 - 5 %
GRD11	Chartrouse-La Louisiane	311.8	313.1	9 500	1 - 5 %
GRD12	La Louisiane-L'Esquineau	313.1	319.4	7 500	40 - 70 %
GRD13	L'Esquineau-Palissade	319.4	323.3	8 500	5 - 15 %

Au droit des tronçons de digue pour lesquels le niveau de sûreté des ouvrages est dépassé, des entrées d'eau doivent être considérés. Selon le retour d'expérience historique depuis 1840 (article 4 du présent rapport) et plus particulièrement celui issu de la crue de novembre 2002 (volume de déversement de 2 millions de m^3) et celui issu de la crue d'octobre 1993 jugé très peu probable aujourd'hui (volume de déversement de 130 millions de m^3), il est considéré de manière prudente un lâcher d'eau dans la zone protégée compris entre 20 et 30 millions de m^3. Seuls les scénarios d'inondation, en provenance des tronçons de digue pour lesquels le niveau de sûreté est dépassé, sont retenus.

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes d'inondation au sein des sous-zones protégées, pour les sept scénarios d'inondation pris en compte (probabilité de brèche

dans les ouvrages > 5 %) pour caractériser le fonctionnement du système pour une crue de 9500 m^3/s. La cote retenue pour cette gamme de crue figure également. En général, elle correspond à la cote maximale. Parfois, elle a été modifiée à la hausse pour les raisons explicitées ci-après.

En effet, aucune brèche n'a été modélisée entre l'A54 et le pont de cavalès. Hors l'apparition de brèche sur ce tronçon est quasiment équiprobable au tronçon amont. A partir de l'enseignement des modélisations et plus particulièrement des niveaux d'eau dans le lit mineur, à 100 m, 400 et 1600 m de la brèche, les cotes de la ZP n°28 et ZP n°12 ont été rehaussées respectivement à 4,5 et 3,75 m NGF. Pour les ZP n°22 à 24, il a été retenu des cotes identiques au casier voisin, soit 2,25 m NGF. Les cotes d'eau des ZP n°34 à n°37 ont été estimées à partir du profil en long des brèches définis au §.6.16.

Tableau 74. Cote (en m NGF) au sein de chaque sous-zone protégée en fonction des scénarios d'inondation retenus (probabilité de brèche > 5 %) et non retenus (probabilité de brèche < 5 %) pour caractériser le fonctionnement du système pour une crue de 9500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon et cote globale retenue pour ce scénario de crue

Casier ZP	Cote (en m NGF) +/- 20 cm							Cote retenue
	Aval Cazeneuve	Saliers	Figarès	Aval Albaron	Montlong	Augery	Brèches Salin	
1								
2								
3								
4	5,00							5
5	5,00							5
6	4,00							4
7								
8								
9	4,25							4,25
10	3,00							3
11								
12	3,50	1,75						3,75
13	2,00	1,75	1,75	0,25	**0,50**			2
14	0,50		0,5	1,50	**2,25**	2,25		2,25
15					**4,00**	3,50		4
16	0,50		0,5	0,50				0,5
17							2,25	2,25
18							1,00	1
19							1,50	1,5
20					**4,75**	4,00		4,75
21						3,00		3
22								2,25
23								2,25
24								2,25
25							2,50	2,5
26							1,25	1,25
27	5,00							5
28	3,50							4,5
29		4,00	4,25					4,25
30		3,00	2,25					3
31		2,50	2,5	0,50				2,5
32				3,25				3,25
33				3,75				3,75
34								2,00

35								0,75
36								1,00
37								1,00
38								
39		1,00	1,25	2,00				2
40						2,00	1,25	2
41							1,50	1,5

Le tableau ci-après donne pour les cotes retenues, la distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 75. Fonctionnement scénario n°1 pour une crue de 9500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
1	Trinquetaille La Corrèze Gontier				
2	Trinquetaille St Genest-Le Vittier				
3	Trinquetaille Centre				
4	Trinquetaille Cazeneuve	5,00	0	0,8	1,2
5	Trinquetaille les prêcheurs	5,00	0	1,1	1,5
6	Trinquetaille St Antoine Billot	4,00	0	0,5	1,0
7	Trinquetaille zone humide				
8	Anciennes Papeteries Etienne				
9	A54 Est	4,25	0,7	1,9	2,7
10	Gimeaux	3,00	0,1	1,3	1,9
11	La Grande Sacristane				
12	Clos du Mas Neuf	3,75	0,7	1,6	2,4
13	Marais du Pont de Rousty	2,00	0,1	1,5	2,5
14	Marais de la Grand Mar	2,25	0	1,3	2,1
15	Montlong	4,00	0,4	1,2	2,2
16	Etang du Vaccarès	0,50	0	0,0	0,3
17	Armelière Sambuc Chamone	2,25	0	0,7	1,5
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	1,00	0	0,4	0,9
19	Salin de Giraud	1,50	0	0,3	0,9
20	Abords digue Petite Montlong Beaujeu	4,75	0,8	1,6	2,4
21	Abords digue Beaujeau Tourtoulen	3,00	0	0,2	0,7
22	Abords digue Tourtoulen Commanderie	2,25	0	-0,3	0,3
23	Abords digue Commanderie Boisverdun	2,25	0	0,4	1,2
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	2,25	0,1	0,7	1,4
25	Abords digue Salin de Giraud	2,50	0,3	1,2	2,0

26	Salins du midi sud-est	1,25	**0,0**	**0,5**	**1,0**
27	Abords digue Cazeneuve - A54	5,00	**0,5**	**1,7**	**2,5**
28	Abords digue A54 Pont de Cavalès	4,50	**0,5**	**1,6**	**2,2**
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	4,25	**0,9**	**2,1**	**2,9**
30	Saliers	3,00	**0,5**	**1,4**	**2,5**
31	Marais de Saliers	2,50	**0,7**	**1,9**	**2,5**
32	Albaron	3,25	**0**	**0,4**	**1,1**
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	3,75	**1,2**	**2,3**	**3,3**
34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage	2,00	**0,4**	**1,1**	**1,6**
35	Amarée Dromard	0,75	**0**	**0,3**	**0,7**
36	Panperdu Etang des Launes	1,00	**0**	**0,4**	**0,9**
37	Etang de Ginès	1,00	**0,1**	**0,8**	**0,9**
38	Saintes-Maries-de-la-Mer				
39	Paty trinité	2,00	**0,5**	**1,4**	**1,9**
40	Vaccarès Est	2,00	**0,1**	**1,2**	**1,7**
41	Esquineau	1,50	**0**	**0,7**	**1,2**

La carte ci-après est la représentation graphique du tableau précédant. La carte qui suit, résulte de la cote NGF appliquée à la sous-zone protégée moins la cote NGF du terrain naturel (données source BDT IGN). Cette carte nous montre que l'eau issue de la brèche a tendance à circuler et remplir les zones de marais. Les secteurs potentiellement inondés sont les habitations situées à moins de 400 mètres des digues pour lesquels le niveau de sûreté est dépassé et le village de Salin de Giraud, qui est inondé sous quelques centimètres.

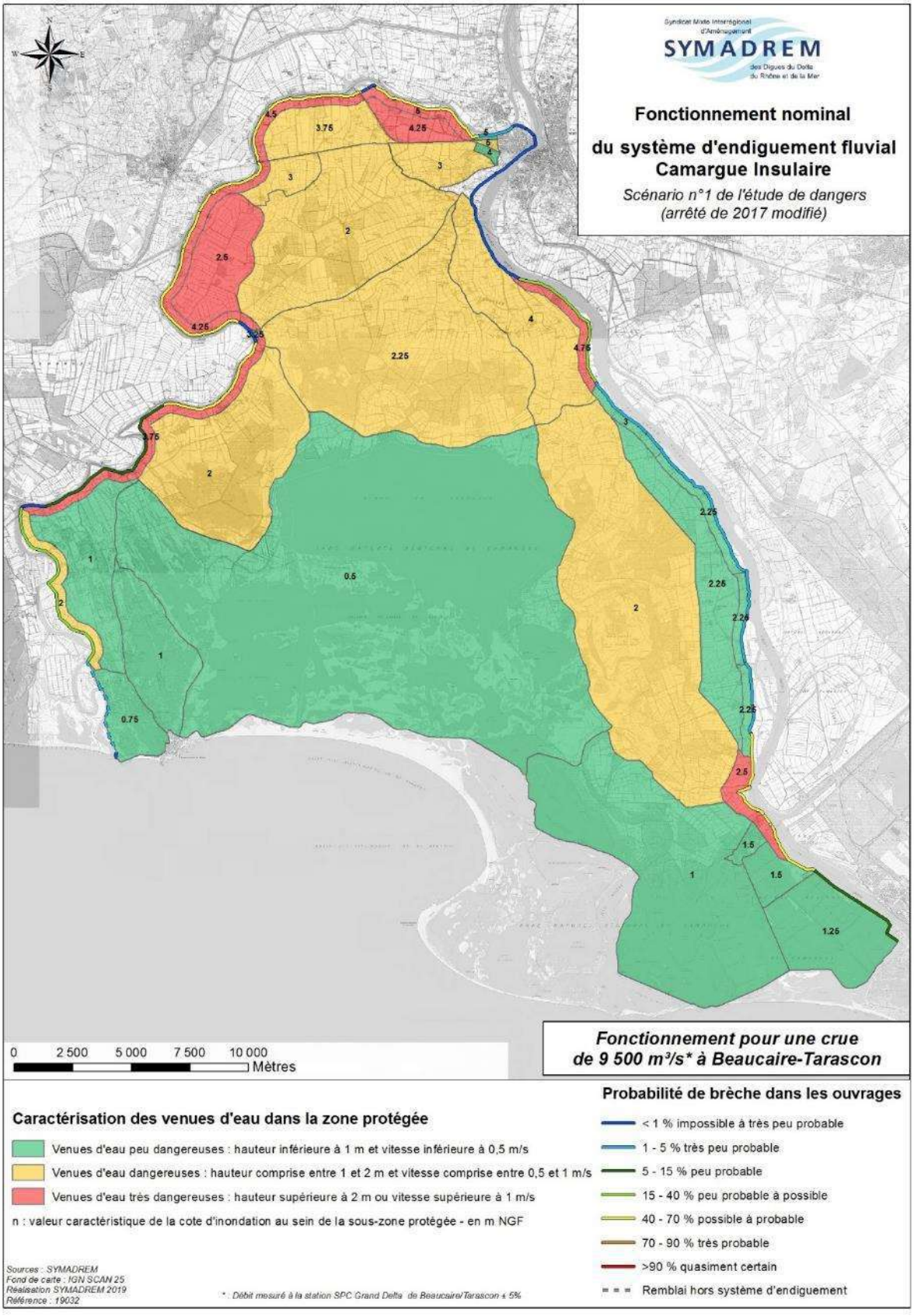


Figure 270. Scénario n°1 EDD pour une crue de 9500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

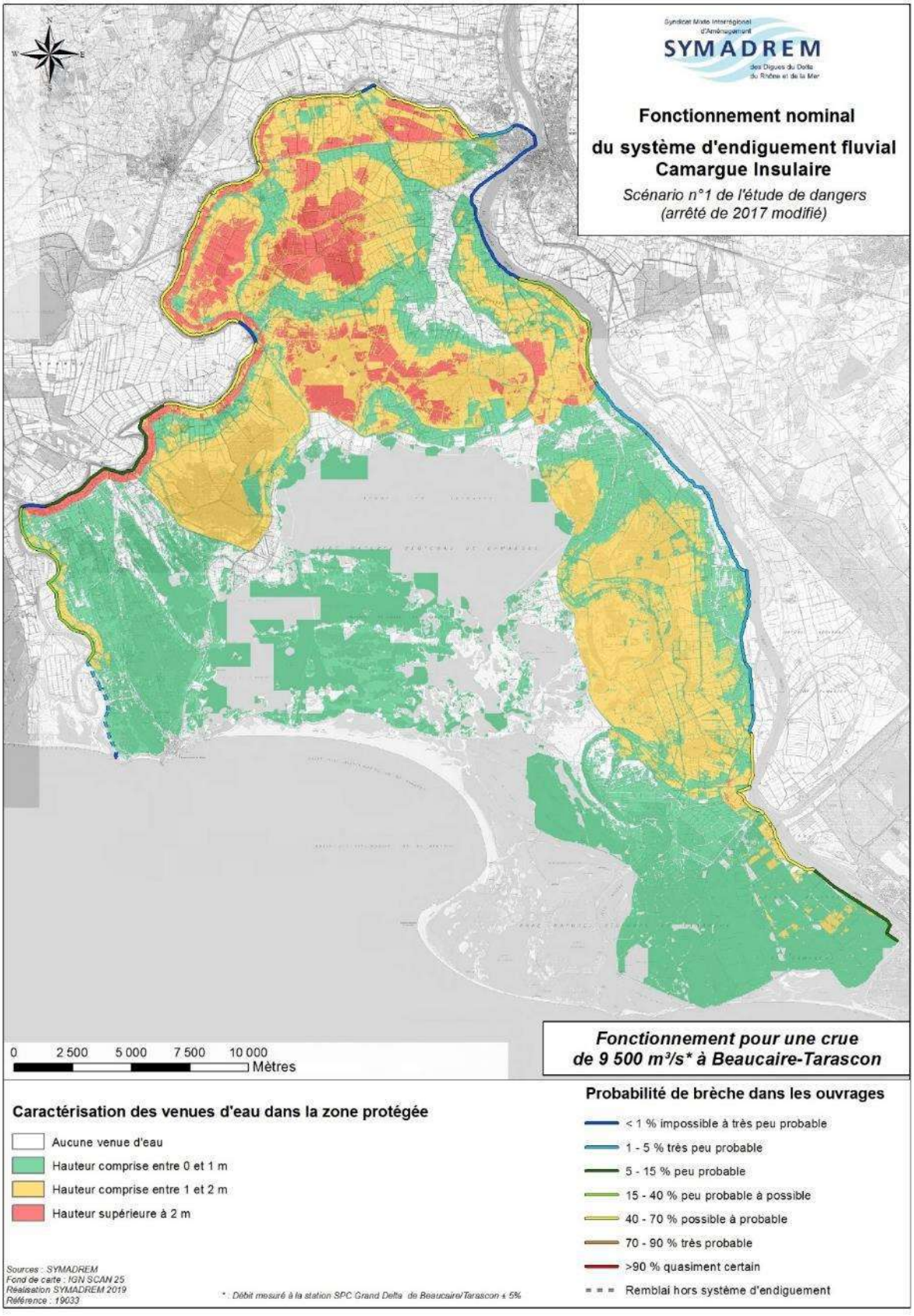


Figure 271. Scénario n°1 EDD pour une crue de 9500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon avec différentiel

8.5 SC N°1 : FONCTIONNEMENT NOMINAL POUR UNE CRUE 10500

Pour une crue, dont le débit atteint un débit de 10500 m^3/s ± 5 % à la station gérée par le service prévision des crues grand delta (cote atteinte selon la courbe de tarage en vigueur depuis le 7 décembre 2003 de 10,77 m NGF ± 10 cm) conjugué à un niveau marin de 0,95 m NGF ± 10 cm, le fonctionnement du système d'endiguement serait le suivant :

Les probabilités de brèche dans les digues du petit Rhône rive gauche estimées dans le rapport 7.2. sont sensiblement supérieures à 5 %. La probabilité de brèche dans les digues au droit de Trinquetaille est comprise entre 15 et 40 %. Le niveau de danger est atteint sur ce tronçon sans être dépassé. Les probabilités de brèche entre Cazeneuve et Eymini, à l'exception du tronçon de digue situé au droit d'Albaron et en amont de l'A54 sont comprises entre 40 et 70 % et mêmes supérieures à 50 % (niveaux de danger dépassés). Le tableau ci-après rappelle les niveaux de sûreté par tronçon homogène et donne les ordres de grandeur des probabilités de brèche dans les ouvrages pour cette gamme de crue.

Tableau 76. Niveaux de sûreté des tronçons homogènes PRG du système d'endiguement et probabilité maximale de brèche par tronçon homogène pour une crue de 10500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau sûreté Exprimé en débit m^3/s à B/T	Probabilité de brèche sur le tronçon pour une crue de 10500 m^3/s à B/T
PRG 1	Trinquetaille	281.1	282.5	9 500	15 - 40 %
PRG 2	Cazeneuve-Augéry	282.5	287.4	7 500	40 - 70 %
PRG 3	Beaumont –A54	287.4	288.5	12 500	< 1 %
PRG 4	A54 - Cavalès	288.5	294.5	7 500	40 - 70 %
PRG 5	Cavalès - St Gilles	294.5	297.2	7 500	40 - 70 %
PRG 6	St-Gilles - Figarès	297.2	298.2	7 500	40 - 70 %
PRG 7	future digue résistante à la surverse (Figarès)	298.2	299.8	7 500	40 - 70 %
PRG 8	La Galante - Albaron	299.8	306.55	7 500	40 - 70 %
PRG 9	Albaron	306.55	307.7	14 160	< 1 %
PRG 10	Albaron-Eymini	307.7	313	7 500	40 - 70 %
PRG 11	Eymini-Sénebier	313	320.75	7 500	15 - 40 %
PRG 12	Sénebier	320.75	322	14 160	< 1 %
PRG 13	Sénebier-Icard	322	329.5	7 500	15 - 40 %
PRG 14	Mas d'Icard - Bac	329.5	330.5	7 500	15 - 40 %
PRG 16	Bac – Mer Remblai hors système d'endiguement	330,625	337,0	Pour mémoire >> 8 500 m^3/s	1 - 5 %

Les probabilités de brèche dans les digues du grand Rhône rive droite sont inférieures à 1 % du défluent à Petite Montlong. Elles sont comprises entre 1 et 5 % entre Beaujeu et la commanderie. Sur ce dernier tronçon, les niveaux de sûreté sont atteints sans être dépassés. Sur les autres tronçons, les niveaux de sûreté sont tous dépassés. La probabilité de brèche au droit de Salin de Giraud est comprise entre 40 et 70 %. Le niveau de danger est dépassé.

Tableau 77. Niveaux de sûreté des tronçons homogènes GRD du système d'endiguement et probabilité maximale de brèche par tronçon homogène pour une crue de 10500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau sûreté Exprimé en débit m^3/s à B/T	Probabilité de brèche sur le tronçon pour une crue de 9500 m^3/s à B/T
D1	Défluent			14 160	< 1 %
GRD1	Quais	281.8	283.5	14 160	< 1 %
GRD2	Papeteries Etienne	283.5	284.15	14 160	< 1 %
GRD3	Emmaus	284.15	285.25	14 160	< 1 %
GRD4	Passeron-Monlong	285.25	288	14 160	< 1 %
GRD5	Monlong	288	288.9	14 160	< 1 %
GRD6	Montlong-Beaujeu	288.9	295.15	8 500	15 - 40 %
GRD7	Beaujeu-l'Armelière	295.15	298.2	10 500	1 - 5 %
GRD8	L'Armelière-la Commanderie	298.2	305.5	10 500	1 - 5 %
GRD9	La Commanderie-Bois Verdun	305.5	309.25	9 500	15 - 40 %
GRD10	Bois Verdun-Chartrouse	309.25	311.8	9 500	15 - 40 %
GRD11	Chartrouse-La Louisiane	311.8	313.1	9 500	15 - 40 %
GRD12	La Louisiane-L'Esquineau	313.1	319.4	7 500	40 - 70 %
GRD13	L'Esquineau-Palissade	319.4	323.3	8 500	15 - 40 %

Au droit des tronçons de digue pour lesquels le niveau de sûreté des ouvrages est dépassé, des entrées d'eau doivent être considérés. Selon le retour d'expérience historique depuis 1840 (article 4 du présent rapport) et plus particulièrement celui issu de la crue de janvier 1994 (volume de déversement de 60 millions de m^3), il est considéré de manière raisonnable un lâcher d'eau dans la zone protégée compris entre 40 et 70 millions de m^3. Seuls les scénarios d'inondation, en provenance des tronçons de digue pour lesquels le niveau de sûreté est dépassé, sont retenus.

Le tableau ci-après donne les valeurs caractéristiques des cotes d'inondation au sein des sous-zones protégées, pour les neuf scénarios d'inondation pris en compte (probabilité de brèche dans les ouvrages > 5 %) pour caractériser le fonctionnement nominal du système pour une

crue de 10500 m^3/s. La cote retenue pour cette gamme de crue figure également. En général, elle correspond à la cote maximale. Parfois, elle a été modifiée à la hausse pour les raisons explicitées ci-après. Une cote de 5,25 m NGF a été ainsi retenue pour la ZP N°7. En effet la brèche au droit de trinquetaille a été modélisée en aval de la RN113. Si elle avait modélisée en amont, la cote aurait plus haute dans cette ZP. Les cotes des ZP n°12 et n°28 ont été rehaussées pour les mêmes raisons pour pallier l'absence de modélisation entre l'A54 et le pont de Cavalès sur la base des enseignements du §.6.16. Pour la ZP n°19 (salin), la modélisation a été faite sans brèche. Il a été pris en compte les 3 brèches modélisées pour la crue 11500 en tenant compte du fait que la charge serait 25 cm plus faible pour cette gamme de crue. La cote de la ZP n°27 a légèrement été augmentée pour tenir compte de l'effet d'une brèche plus en aval. Les cotes d'eau des ZP n°34 à n°38 ont été estimées à partir du profil en long des brèches définis au §.6.16. Pour les Saintes (ZP n°38, il a été tenu compte des modélisations liées à la crue 11500.

Tableau 78. Cote (en m NGF) au sein de chaque sous-zone protégée en fonction des scénarios d'inondation retenus (probabilité de brèche > 5 %) et non retenus (probabilité de brèche < 5 %) pour caractériser le fonctionnement du système pour une crue de 10 500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon et cote globale retenue pour ce scénario de crue

Casier ZP	Cote (en m NGF) +/- 20 cm									Cote retenue
	Amont Cazeneuve	Aval Cazeneuve	Saliers	Figarès	Aval Albaron	Montlong	Augery	Boisverdun	Sans brèche	
1	7,00									7
2	6,50									6,5
3										
4	7,00	5,00								7
5	6,50	5,00								6,5
6	5,25	4,00								5,25
7										5,25
8										
9	3,00	4,75								4,75
10	4,00	3,00	1,75							4
11	4,25									4,25
12	2,50	3,50	2,25	2,25						4,25
13	1,75	2,00	2,00	1,75	0,50	**0,75**				2
14	1,00	1,25	1,50	1,25	1,50	**2,50**	2,50			2,5
15						**4,50**	3,75			4,5
16	0,50	0,50	0,75	1,00	1,00		0,75			1
17								2,75	2,25	2,75
18									1,25	1,25
19									1,50	1,75
20						**5,00**	4,25			5
21							3,25			3,25
22								3,25		3,25
23								3,25		3,25
24								3,00	3,00	3
25								2,00	2,75	2,75
26									1,75	1,75
27	4,25	5,00								5,25
28		3,50								4,75
29		2,50	4,00	4,50						4,5
30	1,50	2,50	3,25	2,25						3,25

31	0,75	1,00	2,50	2,50	1,50					2,5
32					3,50					3,5
33					4,00					4
34										2
35										0,75
36										1
37					0,50					1
38										1
39		1,25	1,00	1,25	2,00					2
40							2,00	2,00	1,25	2
41									1,50	1,5

Le tableau ci-après donne pour les cotes retenues, la distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 79. Fonctionnement scénario n°1 pour une crue de 10500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
1	Trinquetaille La Corrèze Gontier	7	0,1	2,4	3,0
2	Trinquetaille St Genest-Le Vittier	6,5	0	2,2	2,8
3	Trinquetaille Centre				
4	Trinquetaille Cazeneuve	7	0	2,8	3,2
5	Trinquetaille les prêcheurs	6,5	1,0	2,6	3,0
6	Trinquetaille St Antoine Billot	5,25	0,9	1,8	2,2
7	Trinquetaille zone humide	5,25	0	1,3	1,8
8	Anciennes Papeteries Etienne				
9	A54 Est	4,75	1,2	2,4	3,2
10	Gimeaux	4	1,1	2,3	2,9
11	La Grande Sacristane	4,25	0	0,8	1,8
12	Clos du Mas Neuf	4,25	1,2	2,1	2,9
13	Marais du Pont de Rousty	2	0,1	1,5	2,5
14	Marais de la Grand Mar	2,5	0	1,6	2,4
15	Montlong	4,5	0,9	1,7	2,7
16	Etang du Vaccarès	1	0	0,5	0,8
17	Armelière Sambuc Chamone	2,75	0,3	1,2	2,0
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	1,25	0,1	0,6	1,1
19	Salin de Giraud	1,75	0,1	0,6	1,1
20	Abords digue Petite Montlong Beaujeu	5	1,1	1,9	2,6
21	Abords digue Beaujeau Tourtoulen	3,25	0	0,5	0,9
22	Abords digue Tourtoulen Commanderie	3,25	0	0,7	1,3

23	Abords digue Commanderie Boisverdun	3,25	**0,7**	**1,4**	**2,2**
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	3	**0,8**	**1,5**	**2,1**
25	Abords digue Salin de Giraud	2,75	**0,5**	**1,4**	**2,2**
26	Salins du midi sud-est	1,75	**0,5**	**1,0**	**1,5**
27	Abords digue Cazeneuve - A54	5,25	**0,8**	**2,0**	**2,7**
28	Abords digue A54 Pont de Cavalès	4,75	**0,7**	**1,9**	**2,5**
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	4,5	**1,1**	**2,4**	**3,2**
30	Saliers	3,25	**0,7**	**1,6**	**2,8**
31	Marais de Saliers	2,5	**0,7**	**1,9**	**2,5**
32	Albaron	3,5	**0**	**0,7**	**1,3**
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	4	**1,4**	**2,5**	**3,6**
34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage	2	**0,4**	**1,1**	**1,6**
35	Amarée Dromard	0,75	**0**	**0,3**	**0,7**
36	Panperdu Etang des Launes	1	**0**	**0,4**	**0,9**
37	Etang de Ginès	1	**0,1**	**0,8**	**0,9**
38	Saintes-Maries-de-la-Mer	1	**0**	**-0**	**0,2**
39	Paty trinité	2	**0,5**	**1,4**	**1,9**
40	Vaccarès Est	2	**0,1**	**1,2**	**1,7**
41	Esquineau	1,5	**0**	**0,7**	**1,2**

La carte ci-après est la représentation graphique du tableau précédant. La carte qui suit, résulte de la cote NGF appliquée à la sous-zone protégée moins la cote NGF du terrain naturel (données source BDT IGN). Cette carte nous montre que chaque sous-zone protégée peut être inondée, à l'exception du centre de Trinquetaille et de la friche industrielle des Papeteries Etienne. Certaines sous-zones protégées ont une probabilité très faible d'inondation, mais d'autres ont une probabilité notable à certaine (Cf. chapitre 10 du présent rapport).

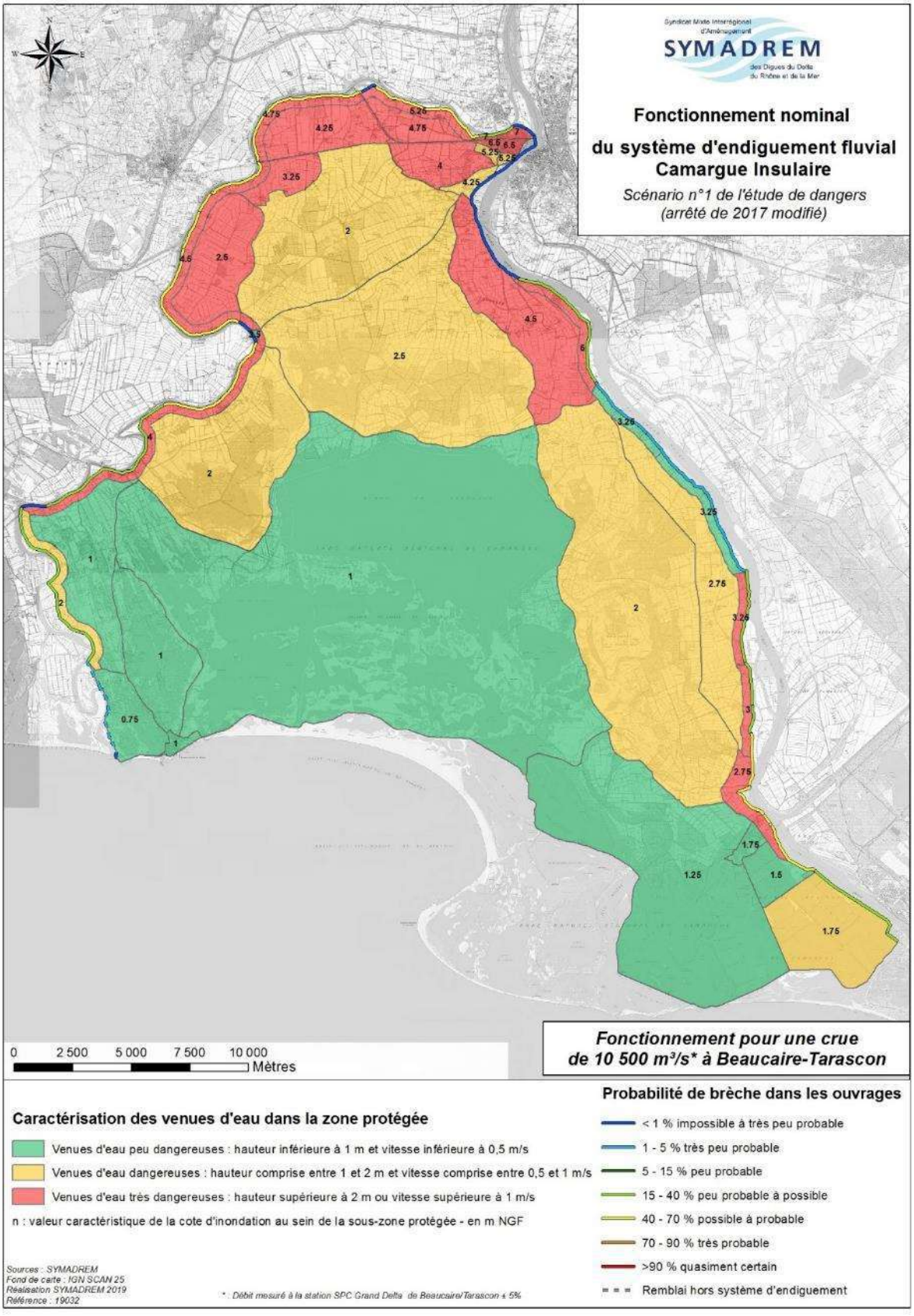


Figure 272. Scénario n°1 EDD pour une crue de 10500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

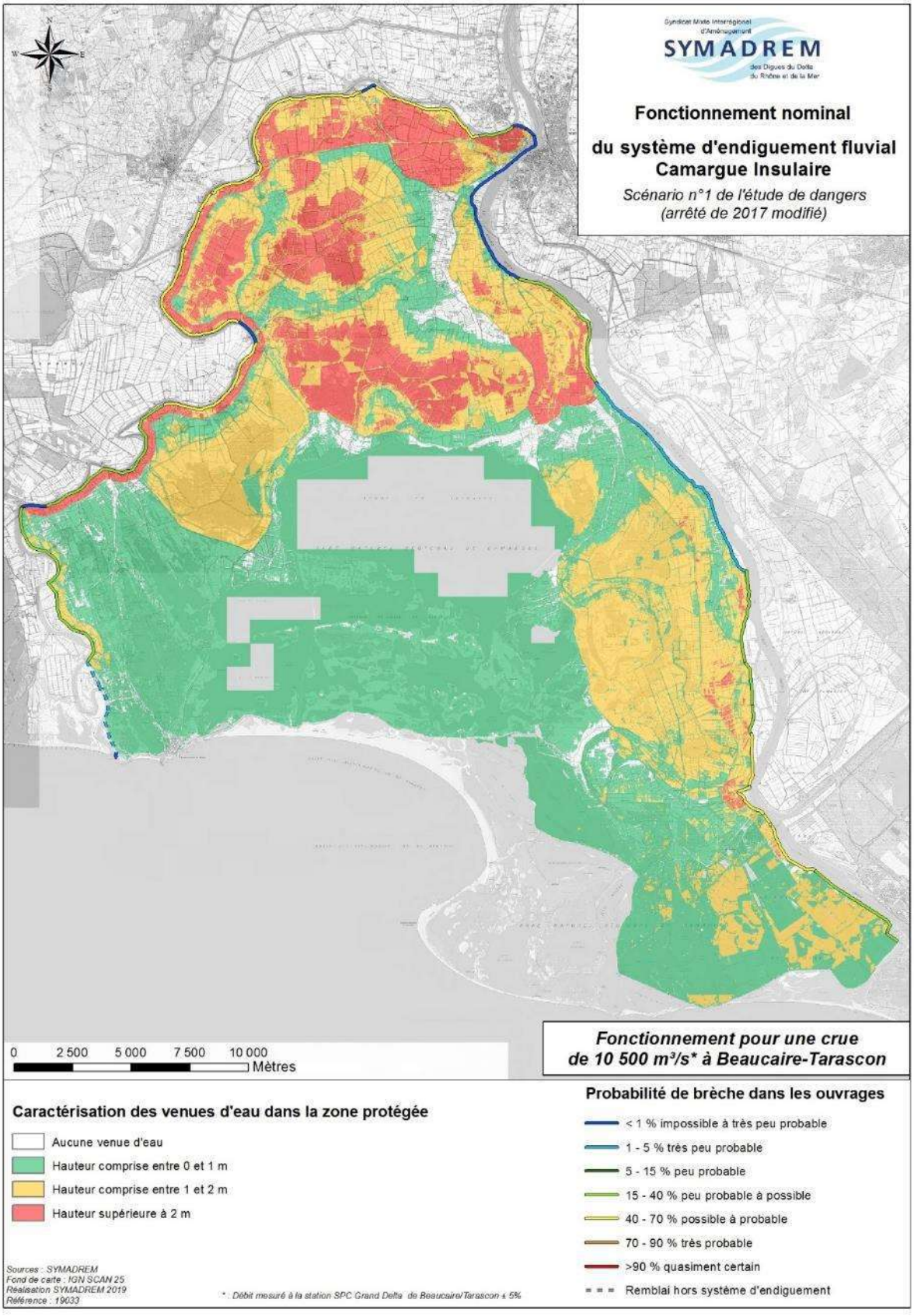


Figure 273. Scénario n°1 EDD pour une crue de 10500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon avec différentiel

8.6 SC N°1 : FONCTIONNEMENT NOMINAL POUR UNE CRUE 11500

Pour une crue, dont le débit atteint un débit de 11500 m^3/s ± 5 % à la station gérée par le service prévision des crues grand delta (cote atteinte selon la courbe de tarage en vigueur depuis le 7 décembre 2003 de 11,30 m NGF ± 10 cm) conjugué à un niveau marin de 0,98 m NGF ± 10 cm, le fonctionnement du système d'endiguement serait le suivant :

Les probabilités de brèche dans les digues du petit Rhône rive gauche estimées dans le rapport 7.2. sont sensiblement supérieures à 5 % et souvent supérieurs à 50 %. Les niveaux de sûreté des ouvrages et de dangers sont en conséquence dépassés sauf très localement. Les probabilités de brèche entre le Pont suspendu et Albaron, à l'exception du tronçon de digue situé au droit d'Albaron et en amont de l'A54 sont comprises entre 70 et 90 % ou légèrement inférieures à 70 %. De l'aval d'Albaron à Sénebier, elles sont comprises entre 40 et 70 % et de Sylvéréal au Bac de 15 à 40 %. Le tableau ci-après rappelle les niveaux de sûreté par tronçon homogène et donne les ordres de grandeur des probabilités de brèche dans les ouvrages pour cette gamme de crue.

Tableau 80. Niveaux de sûreté des tronçons homogènes PRG du système d'endiguement et probabilité maximale de brèche par tronçon homogène pour une crue de 11500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau sûreté Exprimé en débit m^3/s à B/T	Probabilité de brèche sur le tronçon pour une crue de 10500 m^3/s à B/T
PRG 1	Trinquetaille	281.1	282.5	9 500	70 - 90 %
PRG 2	Cazeneuve-Augéry	282.5	287.4	7 500	70 - 90 %
PRG 3	Beaumont –A54	287.4	288.5	12 500	< 1 %
PRG 4	A54 - Cavalès	288.5	294.5	7 500	70 - 90 %
PRG 5	Cavalès - St Gilles	294.5	297.2	7 500	70 - 90 %
PRG 6	St-Gilles - Figarès	297.2	298.2	7 500	40 - 70 %
PRG 7	future digue résistante à la surverse (Figarès)	298.2	299.8	7 500	70 - 90 %
PRG 8	La Galante - Albaron	299.8	306.55	7 500	40 - 70 %
PRG 9	Albaron	306.55	307.7	14 160	< 1 %
PRG 10	Albaron-Eymini	307.7	313	7 500	40 - 70 %
PRG 11	Eymini-Sénebier	313	320.75	7 500	40 - 70 %
PRG 12	Sénebier	320.75	322	14 160	< 1 %
PRG 13	Sénebier-Icard	322	329.5	7 500	15 - 40 %
PRG 14	Mas d'Icard - Bac	329.5	330.5	7 500	15 - 40 %
PRG 16	Bac – Mer Remblai hors système d'endiguement	330,625	337,0	Pour mémoire >> 8 500 m^3/s	5 - 15 %

Les probabilités de brèche dans les digues du grand Rhône rive droite sont inférieures à 1 % du défluent à Petite Montlong. La probabilité de brèche au droit de Salin de Giraud est comprise entre 70 et 90 %. Elles sont comprises entre 15 et 70 % entre Petite Montlong et l'amont de Salin de Giraud et en aval de l'Esquineau.

Tableau 81. Niveaux de sûreté des tronçons homogènes GRD du système d'endiguement et probabilité maximale de brèche par tronçon homogène pour une crue de 11500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau sûreté Exprimé en débit m^3/s à B/T	Probabilité de brèche sur le tronçon pour une crue de 9500 m^3/s à B/T
D1	Défluent			14 160	< 1 %
GRD1	Quais	281.8	283.5	14 160	< 1 %
GRD2	Papeteries Etienne	283.5	284.15	14 160	< 1 %
GRD3	Emmaus	284.15	285.25	14 160	< 1 %
GRD4	Passeron-Monlong	285.25	288	14 160	< 1 %
GRD5	Monlong	288	288.9	14 160	< 1 %
GRD6	Montlong-Beaujeu	288.9	295.15	8 500	40 - 70 %
GRD7	Beaujeu-l'Armelière	295.15	298.2	10 500	15 - 40 %
GRD8	L'Armelière-la Commanderie	298.2	305.5	10 500	15 - 40 %
GRD9	La Commanderie-Bois Verdun	305.5	309.25	9 500	40 - 70 %
GRD10	Bois Verdun-Chartrouse	309.25	311.8	9 500	40 - 70 %
GRD11	Chartrouse-La Louisiane	311.8	313.1	9 500	40 - 70 %
GRD12	La Louisiane-L'Esquineau	313.1	319.4	7 500	70 - 90 %
GRD13	L'Esquineau-Palissade	319.4	323.3	8 500	15 - 40 %

Au droit des tronçons de digue pour lesquels le niveau de sûreté des ouvrages est dépassé, des entrées d'eau doivent être considérés. Selon le retour d'expérience historique depuis 1840 (article 4 du présent rapport) et le retour d'expérience de la crue de décembre 2003 (volume de déversement de 217 millions de m^3), il est considéré de manière raisonnable un lâcher d'eau dans la zone protégée compris entre 70 et 210 millions de m^3. Seuls les scénarios d'inondation, en provenance des tronçons de digue pour lesquels le niveau de sûreté est dépassé, sont retenus.

Le tableau ci-après donne, pour les douze scénarios d'inondation retenus (Cf. chapitres 6 & 7 du présent rapport), les valeurs caractéristiques des cotes au sein des sous-zones protégées et la cote retenue pour cette gamme de crue (Cf. chapitres 6 & 7).

Tableau 82. Cote (en m NGF) au sein de chaque sous-zone protégée en fonction des scénarios d'inondation retenus (probabilité de brèche > 5 %) et non retenus (probabilité de brèche < 5 %) pour caractériser le fonctionnement du système pour une crue de 11 500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon et cote globale retenue pour ce scénario de crue

Casier ZP	Cote (en m NGF) +/- 20 cm												Cote retenue
	Amont Cazeneuve	Aval Cazeneuve	Saliers	Figarès	Aval Albaron	Montlong	Augery	Boisverdun	Amérique	Barcarin	Esquineau	Surverse	
1	7,50												7,5
2	7,00												7
3													
4	7,50	5,25											7,5
5	7,00	5,25											7
6	5,50	4,00											5,5
7	5,50												5,5
8	4,75												4,75
9	3,25	4,75											4,75
10	4,50	3,25	1,75	2,25		1,75							4,5
11	4,50												4,5
12	2,75	3,50	2,50	2,50	2,00	2,00	2,00						4,25
13	2,25	2,25	2,50	2,25	1,00	2,00	1,25	0,50					2,5
14	1,25	1,50	1,75	1,75	1,75	3,00	2,50	0,50					3
15						5,00	4,25						5
16	0,75	0,50	1,00	0,75	1,00	1,00	1,00	1,25					1,25
17							2,00	3,25	2,25	2,25	2,25	2,25	3,25
18								1,50	1,25	1,50	1,50	1,25	1,5
19								1,50	1,75	2,00	1,75	1,50	2
20						5,50	4,75						5,5
21						3,25	3,75						3,75
22								3,00					***3,75***
23								3,75					3,75
24								3,25	2,75	3,00	3,00	3,00	3,25
25								2,25	3,00	3,00	2,75	2,75	3
26								1,50	1,50	1,50	1,75	1,75	1,75
27	4,00	5,00											5,5
28		3,50											5
29	1,75	1,75	4,50	4,75		2,00	1,25						4,75
30	2,25	2,50	3,50	2,50		2,00	1,25						3,5
31	1,75	1,75	2,75	2,75	1,50	2,00	1,25	0,50					2,75
32					3,75								3,75
33					4,00	2,00	1,75						4,25
34						0,75							2
35						0,75	0,75						0,75
36				0,75	1,00	1,00	0,75						1
37				0,75	1,00	1,00	1,00	0,75					1
38						1,25	1,25	1,25					1,25
39	1,00	1,00	1,25	1,00	2,00	1,75	1,75	0,50					2
40						1,00	2,00	2,25	1,50	1,50	1,50	1,50	2,25
41								1,50	1,50	1,75	1,50	1,50	1,75

Certaines cotes ont augmentées pour les ZP n°12, 27, 28, 34 et 35 pour les mêmes raisons que celles évoquées pour les crues précédentes

Le tableau ci-après donne pour les cotes retenues, la distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 83. Fonctionnement scénario n°1 pour une crue de 11500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
1	Trinquetaille La Corrèze Gontier	7,5	0,6	2,9	3,5
2	Trinquetaille St Genest-Le Vittier	7	0	2,7	3,3
3	Trinquetaille Centre				
4	Trinquetaille Cazeneuve	7,5	0,1	3,3	3,7
5	Trinquetaille les prêcheurs	7	1,5	3,1	3,5
6	Trinquetaille St Antoine Billot	5,5	1,1	2,0	2,5
7	Trinquetaille zone humide	5,5	0	1,5	2,1
8	Anciennes Papeteries Etienne	4,75	0	0,1	0,6
9	A54 Est	4,75	1,2	2,4	3,2
10	Gimeaux	4,5	1,6	2,8	3,4
11	La Grande Sacristane	4,5	0,0	1,1	2,0
12	Clos du Mas Neuf	4,25	1,2	2,1	2,9
13	Marais du Pont de Rousty	2,5	0,6	2,0	3,0
14	Marais de la Grand Mar	3	0,2	2,1	2,9
15	Montlong	5	1,4	2,2	3,2
16	Etang du Vaccarès	1,25	0,1	0,7	1,1
17	Armelière Sambuc Chamone	3,25	0,8	1,7	2,5
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	1,5	0,3	0,9	1,4
19	Salin de Giraud	2	0,3	0,8	1,4
20	Abords digue Petite Montlong Beaujeu	5,5	1,6	2,4	3,1
21	Abords digue Beaujeau Tourtoulen	3,75	0	1,0	1,4
22	Abords digue Tourtoulen Commanderie	3,75	0,0	1,2	1,8
23	Abords digue Commanderie Boisverdun	3,75	1,2	1,9	2,7
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	3,25	1,1	1,7	2,4
25	Abords digue Salin de Giraud	3	0,8	1,7	2,5
26	Salins du midi sud-est	1,75	0,5	1,0	1,5
27	Abords digue Cazeneuve - A54	5,5	1,0	2,2	3,0
28	Abords digue A54 Pont de Cavalès	5	1,0	2,1	2,7
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	4,75	1,4	2,6	3,4
30	Saliers	3,5	1,0	1,9	3,0
31	Marais de Saliers	2,75	1,0	2,2	2,8
32	Albaron	3,75	0	0,9	1,6

33	Abords digue Albaron Sylvéréal	4,25	**1,7**	**2,8**	**3,8**
34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage	2	**0,4**	**1,1**	**1,6**
35	Amarée Dromard	0,75	**0**	**0,3**	**0,7**
36	Panperdu Etang des Launes	1	**0**	**0,4**	**0,9**
37	Etang de Ginès	1	**0,1**	**0,8**	**0,9**
38	Saintes-Maries-de-la-Mer	1,25	**0**	**0,1**	**0,5**
39	Paty trinité	2	**0,5**	**1,4**	**1,9**
40	Vaccarès Est	2,25	**0,3**	**1,5**	**1,9**
41	Esquineau	1,75	**0**	**1,0**	**1,4**

La carte ci-après est la représentation graphique du tableau précédant. La carte qui suit, résulte de la cote NGF appliquée à la sous-zone protégée moins la cote NGF du terrain naturel (données source BDT IGN). Cette carte nous montre que chaque sous-zone protégée peut être inondée, à l'exception du centre de Trinquetaille. Certaines sous-zones protégées ont une probabilité très faible d'inondation, mais d'autres ont une probabilité notable à certaine (Cf. chapitre 10 du présent rapport).

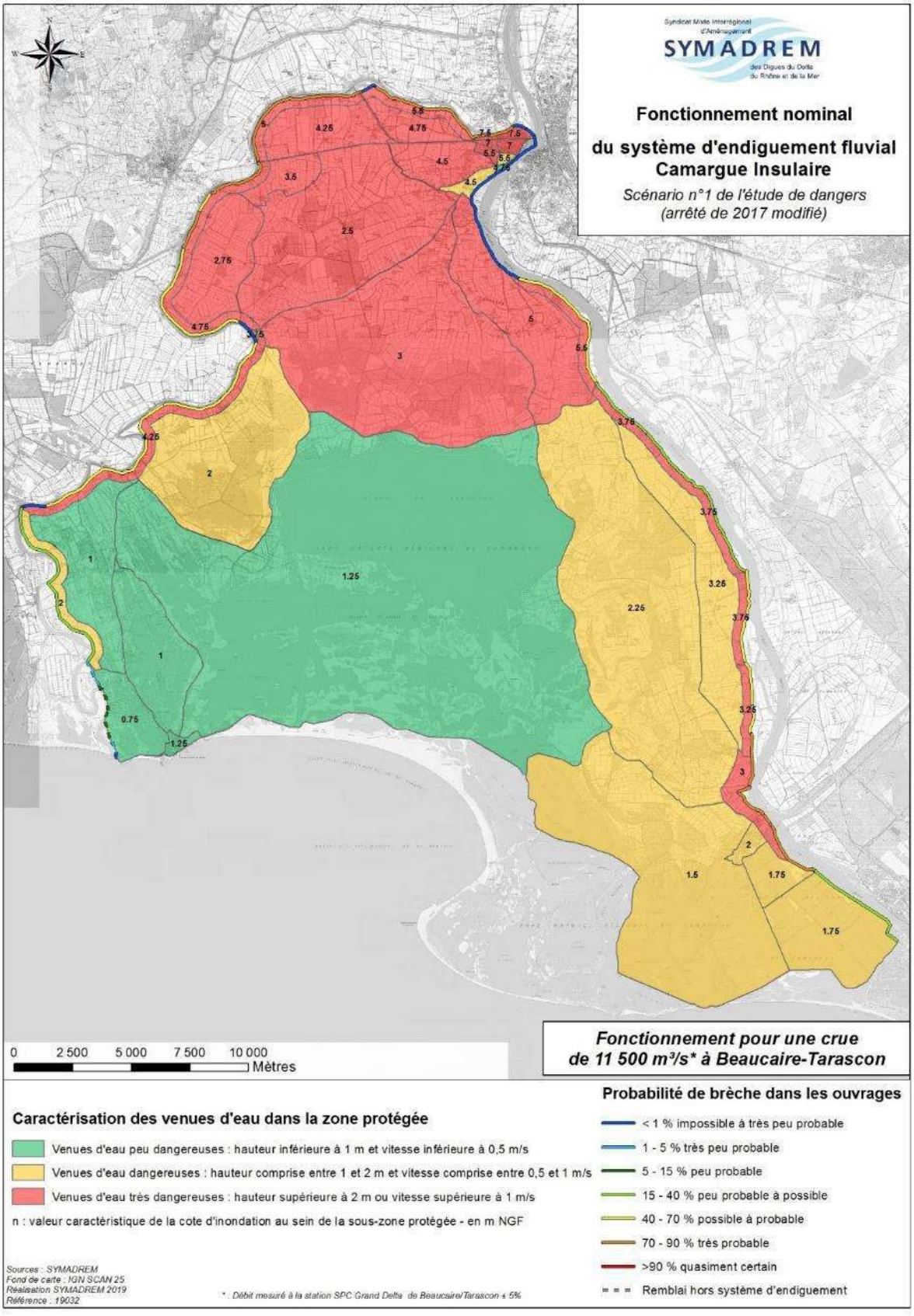


Figure 274. Scénario n°1 EDD pour une crue de 11500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

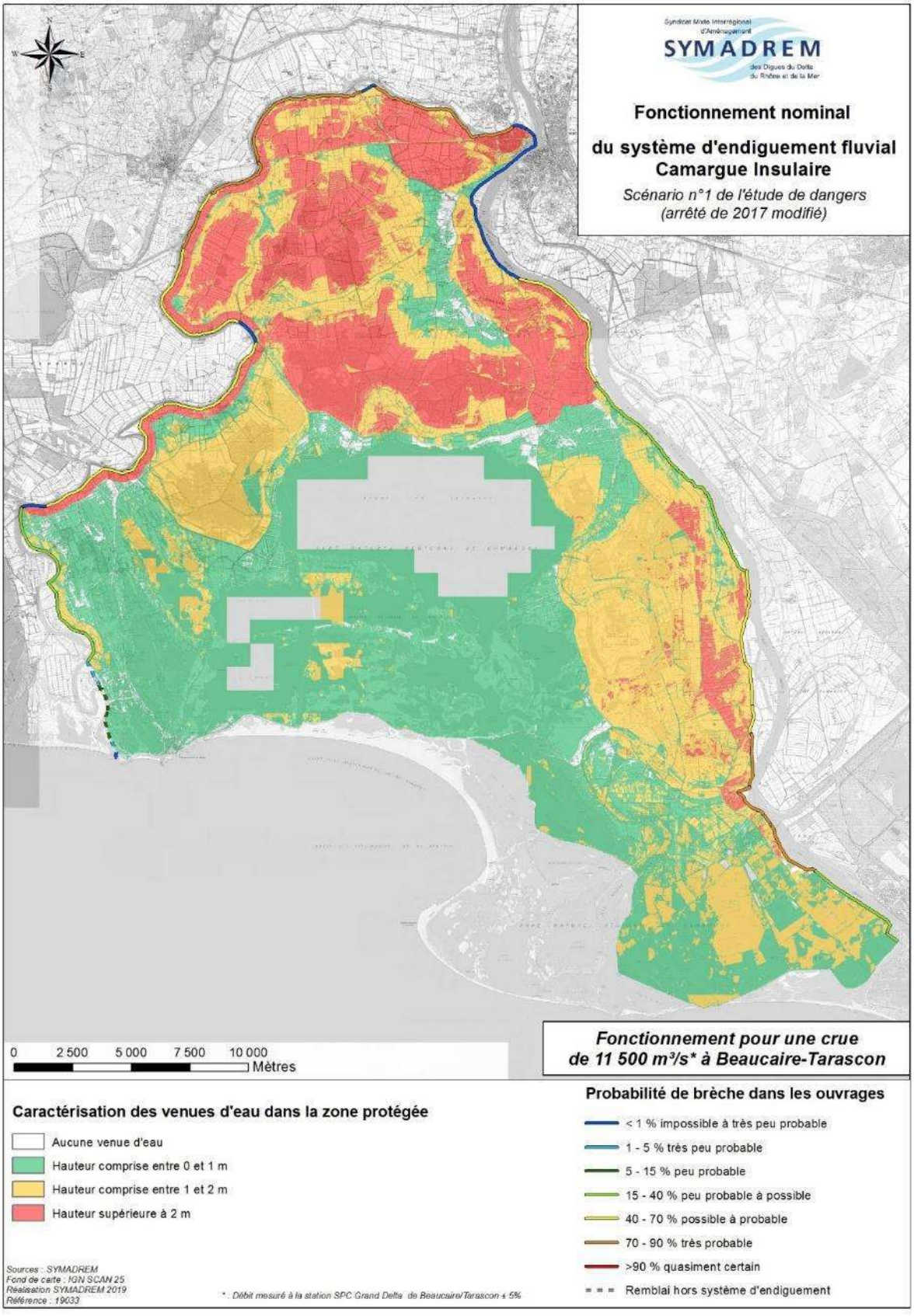


Figure 275. Scénario n°1 EDD pour une crue de 11500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon avec différentiel

8.7 SC N°1 : FONCTIONNEMENT NOMINAL POUR UNE CRUE 12500

Pour une crue, dont le débit atteint un débit de 12500 m^3/s ± 5 % à la station gérée par le service prévision des crues grand delta (cote atteinte ne peut être donnée du fait de la non validité de la courbe de tarage en vigueur depuis le 7 décembre 2003 pour cette gamme de débit) conjugué à un niveau marin de 1,30 m NGF ± 10 cm, le fonctionnement du système d'endiguement serait le suivant :

Les probabilités de brèche dans les digues du petit Rhône rive gauche estimées dans le rapport 7.2. sont sensiblement supérieures à 5 % et souvent supérieurs à 50 %.. Les niveaux de sûreté et de danger sont en conséquence dépassés.
Les probabilités de brèche entre le Pont suspendu et Albaron, à l'exception du tronçon de digue situé au droit d'Albaron et en amont de l'A54 sont comprises entre 70 et 90 % ou légèrement inférieures à 70 %. Elles sont supérieures à 90 % entre le pont de Cavalès et le pont de Saint-Gilles. De l'aval d'Albaron au bac, elles sont comprises entre 40 et 70 %. Le tableau ci-après rappelle les niveaux de sûreté par tronçon homogène et donne les ordres de grandeur des probabilités de brèche dans les ouvrages pour cette gamme de crue.

Tableau 84. Niveaux de sûreté des tronçons homogènes PRG du système d'endiguement et probabilité maximale de brèche par tronçon homogène pour une crue de 12500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau sûreté Exprimé en débit m^3/s à B/T	Probabilité de brèche sur le tronçon pour une crue de 10500 m^3/s à B/T
PRG 1	Trinquetaille	281.1	282.5	9 500	70 - 90 %
PRG 2	Cazeneuve-Augéry	282.5	287.4	7 500	70 - 90 %
PRG 3	Beaumont –A54	287.4	288.5	12 500	< 1 %
PRG 4	A54 - Cavalès	288.5	294.5	7 500	70 - 90 %
PRG 5	Cavalès - St Gilles	294.5	297.2	7 500	> 90 %
PRG 6	St-Gilles - Figarès	297.2	298.2	7 500	70 - 90 %
PRG 7	future digue résistante à la surverse (Figarès)	298.2	299.8	7 500	70 - 90 %
PRG 8	La Galante - Albaron	299.8	306.55	7 500	40 - 70 %
PRG 9	Albaron	306.55	307.7	14 160	< 1 %
PRG 10	Albaron-Eymini	307.7	313	7 500	40 - 70 %
PRG 11	Eymini-Sénebier	313	320.75	7 500	40 - 70 %
PRG 12	Sénebier	320.75	322	14 160	< 1 %
PRG 13	Sénebier-Icard	322	329.5	7 500	40 - 70 %
PRG 14	Mas d'Icard - Bac	329.5	330.5	7 500	40 - 70 %
PRG 16	Bac – Mer Remblai hors système d'endiguement	330,625	337,0	Pour mémoire >> 8 500 m^3/s	40 - 70 %

Les probabilités de brèche dans les digues du grand Rhône rive droite sont inférieures à 1 % du défluent à Petite Montlong et comprise entre 40 et 70 % en aval de petite Montlong, à l'exception de la digue au droit de Salin de Giraud, pour laquelle, la probabilité de brèche supérieure à 90 %.

Tableau 85. Niveaux de sûreté des tronçons homogènes GRD du système d'endiguement et probabilité maximale de brèche par tronçon homogène pour une crue de 12500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau sûreté Exprimé en débit m^3/s à B/T	Probabilité de brèche sur le tronçon pour une crue de 9500 m^3/s à B/T
D1	Défluent			14 160	< 1 %
GRD1	Quais	281.8	283.5	14 160	< 1 %
GRD2	Papeteries Etienne	283.5	284.15	14 160	< 1 %
GRD3	Emmaus	284.15	285.25	14 160	< 1 %
GRD4	Passeron-Monlong	285.25	288	14 160	< 1 %
GRD5	Monlong	288	288.9	14 160	< 1 %
GRD6	Montlong-Beaujeu	288.9	295.15	8 500	40 - 70 %
GRD7	Beaujeu-l'Armelière	295.15	298.2	10 500	40 - 70 %
GRD8	L'Armelière-la Commanderie	298.2	305.5	10 500	40 - 70 %
GRD9	La Commanderie-Bois Verdun	305.5	309.25	9 500	40 - 70 %
GRD10	Bois Verdun-Chartrouse	309.25	311.8	9 500	40 - 70 %
GRD11	Chartrouse-La Louisiane	311.8	313.1	9 500	40 - 70 %
GRD12	La Louisiane-L'Esquineau	313.1	319.4	7 500	>90 %
GRD13	L'Esquineau-Palissade	319.4	323.3	8 500	40 - 70 %

Au droit des tronçons de digue pour lesquels le niveau de sûreté des ouvrages est dépassé, des entrées d'eau doivent être considérés. Selon le retour d'expérience historique des crues de 1856 et 1840, il est considéré de manière raisonnable un lâcher d'eau dans la zone protégée compris entre 200 et 900 millions de m^3. Seuls les scénarios d'inondation, en provenance des tronçons de digue pour lesquels le niveau de sûreté est dépassé, sont retenus.

Le tableau ci-après donne, pour les onze scénarios d'inondation retenus (Cf. chapitres 6 & 7 du présent rapport), les valeurs caractéristiques des cotes au sein des sous-zones protégées et la cote retenue pour cette gamme de crue (Cf. chapitres 6 & 7).

Certaines cotes ont augmentées pour les ZP n°12, 27, 28 et n°33 pour les mêmes raisons que celles évoquées pour les crues précédentes. Pour la ZP n°22, la cote a été augmentée pour pallier l'absence de brèche entre Augery et Boisverdun. La cote de la ZP n°30 a été augmentée pour pallier l'absence de brèche à Saliers pour cette gamme de crue.

Tableau 86. Cote (en m NGF) au sein de chaque sous-zone protégée en fonction des scénarios d'inondation retenus (probabilité de brèche > 5 %) et non retenus (probabilité de brèche < 5 %) pour caractériser le fonctionnement du système pour une crue de 12 500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon et cote globale retenue pour ce scénario de crue

Casier ZP	Cote (en m NGF) +/- 20 cm											Cote retenue
	Amont Cazeneuve	Aval Cazeneuve	Figarès	Aval Albaron	Montlong	Augery	Boisverdun	Amérique	Barcarin	Esquineau	Surverse	
1	7,50											7,5
2	7,00											7
3												
4	7,50	5,25										7,5
5	7,00	5,25										7
6	5,50	4,00										5,5
7	5,50											5,5
8	4,75											4,75
9	3,25	4,75			2,50							4,75
10	4,50	3,25	2,25		2,75	2,25						4,5
11	4,50	3,00			4,25							4,5
12	2,75	3,75	2,25	2,00	2,75	2,25	1,75					4,25
13	2,25	2,75	2,25	1,50	2,75	2,25	1,75					2,75
14	2,00	2,25	1,5	2,00	3,25	3,00	1,75					3,25
15					5,25	4,75						5,25
16	1,00	1,25	0,75	1,25	2,25	2,00	1,75	1,25				2,25
17					2,25	2,00	3,50	2,25	2,25	2,25	2,25	3,5
18		1,25		1,25	1,75	1,75	2,00	1,50	1,75	1,50	1,50	2
19					1,75	1,75	2,00	1,75	2,00	1,75	1,75	2
20					6,00	5,00						6
21					3,50	4,00	2,50					4
22							3,25					3,75
23					2,25	2,00	3,75					3,75
24					2,25	2,00	3,50	2,75	3,00	3,00	3,00	3,5
25					2,00	1,75	2,25	3,00	3,00	2,75	2,75	3
26					1,75	1,75	2,00	1,50	1,50	1,75	1,50	2
27	4,00	5,00										5,75
28		3,50			2,75							5,5
29	2,25	2,50	4,75		2,75	2,25	1,75					4,75
30	2,50	2,75	2,5		2,75	2,25	1,75					3,75
31	2,25	2,50	2,75	1,50	2,75	2,25	1,75					2,75
32				3,75	2,75							3,75
33	2,00	1,75		4,00	2,25	2,25	1,75					4,25
34	0,75	1,25			2,25	2,00	1,75					2,25
35	0,75	1,25			2,25	2,00	1,75					2,25
36	1,00	1,25	0,5	1,25	2,25	2,00	1,75					2,25
37	1,00	1,25	0,5	1,25	2,25	2,00	1,75					2,25
38	1,25	1,50		1,25	2,25	2,00	1,75					2,25
39	1,50	1,75		2,00	2,25	2,25	1,75					2,25
40	1,25	1,25	1	1,25	2,25	2,50	2,50	1,75	1,50	1,50	1,50	2,5
41			0,25		1,75	1,75	2,00	1,50	1,75	1,75	1,50	2

Le tableau ci-après donne pour les cotes retenues, la distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 87. Fonctionnement scénario n°1 pour une crue de 12500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
1	Trinquetaille La Corrèze Gontier	7,5	0,6	2,9	3,5
2	Trinquetaille St Genest-Le Vittier	7	0	2,7	3,3
3	Trinquetaille Centre				
4	Trinquetaille Cazeneuve	7,5	0,1	3,3	3,7
5	Trinquetaille les prêcheurs	7	1,5	3,1	3,5
6	Trinquetaille St Antoine Billot	5,5	1,1	2,0	2,5
7	Trinquetaille zone humide	5,5	0	1,5	2,1
8	Anciennes Papeteries Etienne	4,75	0	0,1	0,6
9	A54 Est	4,75	1,2	2,4	3,2
10	Gimeaux	4,5	1,6	2,8	3,4
11	La Grande Sacristane	4,5	0,0	1,1	2,0
12	Clos du Mas Neuf	4,25	1,2	2,1	2,9
13	Marais du Pont de Rousty	2,75	0,9	2,2	3,2
14	Marais de la Grand Mar	3,25	0,4	2,3	3,1
15	Montlong	5,25	1,6	2,5	3,4
16	Etang du Vaccarès	2,25	1,1	1,7	2,1
17	Armelière Sambuc Chamone	3,5	1,0	2,0	2,8
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	2	0,8	1,4	1,9
19	Salin de Giraud	2	0,3	0,8	1,4
20	Abords digue Petite Montlong Beaujeu	6	2,1	2,9	3,6
21	Abords digue Beaujeau Tourtoulen	4	0	1,2	1,7
22	Abords digue Tourtoulen Commanderie	3,75	0,0	1,2	1,8
23	Abords digue Commanderie Boisverdun	3,75	1,2	1,9	2,7
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	3,5	1,3	2,0	2,6
25	Abords digue Salin de Giraud	3	0,8	1,7	2,5
26	Salins du midi sud-est	2	0,8	1,3	1,8
27	Abords digue Cazeneuve - A54	5,75	1,3	2,5	3,2
28	Abords digue A54 Pont de Cavalès	5,5	1,5	2,6	3,2
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	4,75	1,4	2,6	3,4
30	Saliers	3,75	1,2	2,1	3,3
31	Marais de Saliers	2,75	1,0	2,2	2,8
32	Albaron	3,75	0	0,9	1,6

33	Abords digue Albaron Sylvéréal	4,25	**1,7**	**2,8**	**3,8**
34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage	2,25	**0,6**	**1,3**	**1,9**
35	Amarée Dromard	2,25	**1,2**	**1,8**	**2,2**
36	Panperdu Etang des Launes	2,25	**1,0**	**1,6**	**2,2**
37	Etang de Ginès	2,25	**1,4**	**2,1**	**2,2**
38	Saintes-Maries-de-la-Mer	2,25	**0,4**	**1,1**	**1,5**
39	Paty trinité	2,25	**0,7**	**1,7**	**2,2**
40	Vaccarès Est	2,5	**0,6**	**1,7**	**2,2**
41	Esquineau	2	**0**	**1,2**	**1,7**

La carte ci-après est la représentation graphique du tableau précédant. La carte qui suit, résulte de la cote NGF appliquée à la sous-zone protégée moins la cote NGF du terrain naturel (données source BDT IGN). Cette carte nous montre que chaque sous-zone protégée peut être inondée, à l'exception du centre de Trinquetaille.

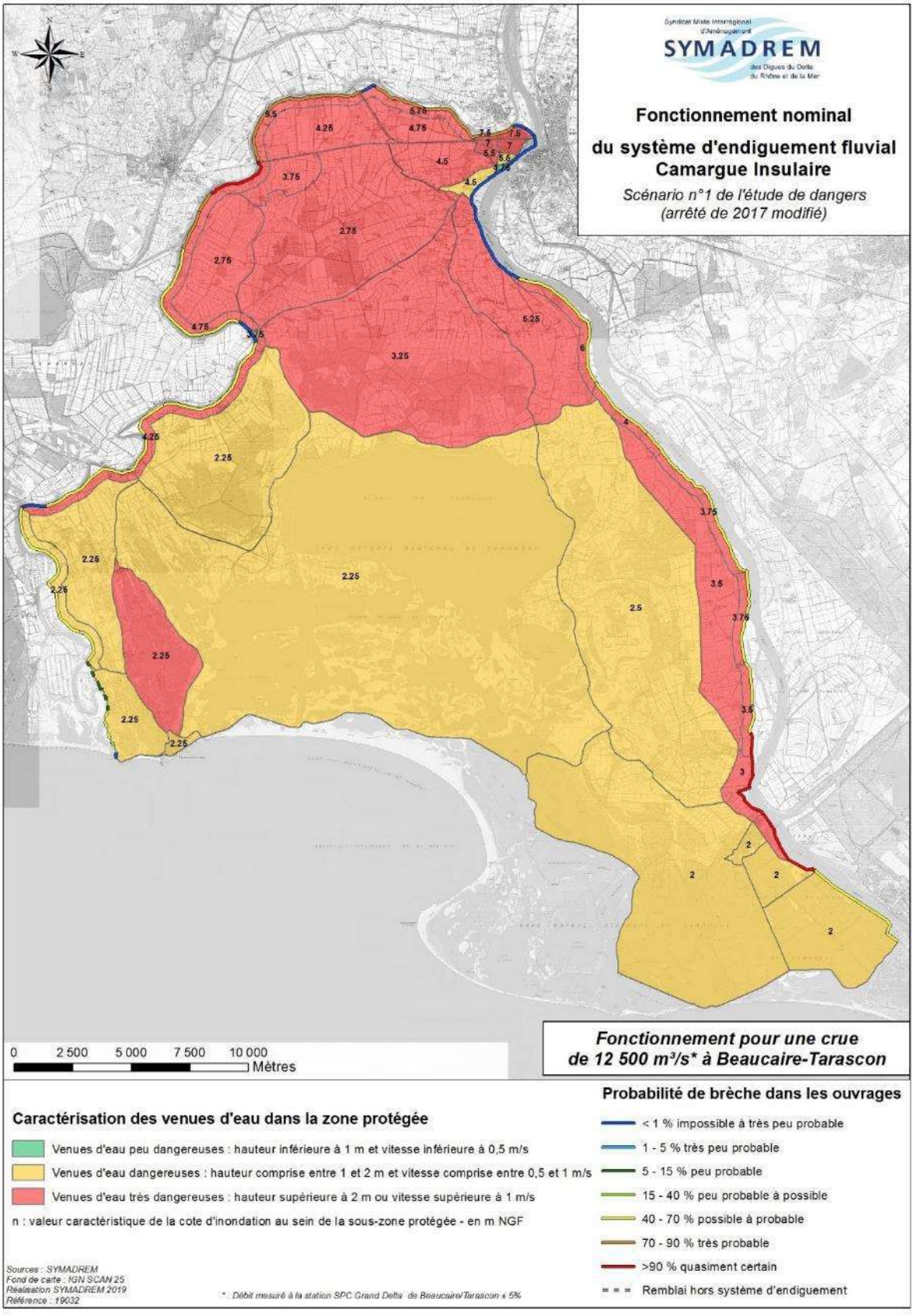


Figure 276. Scénario n°1 EDD pour une crue de 12500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

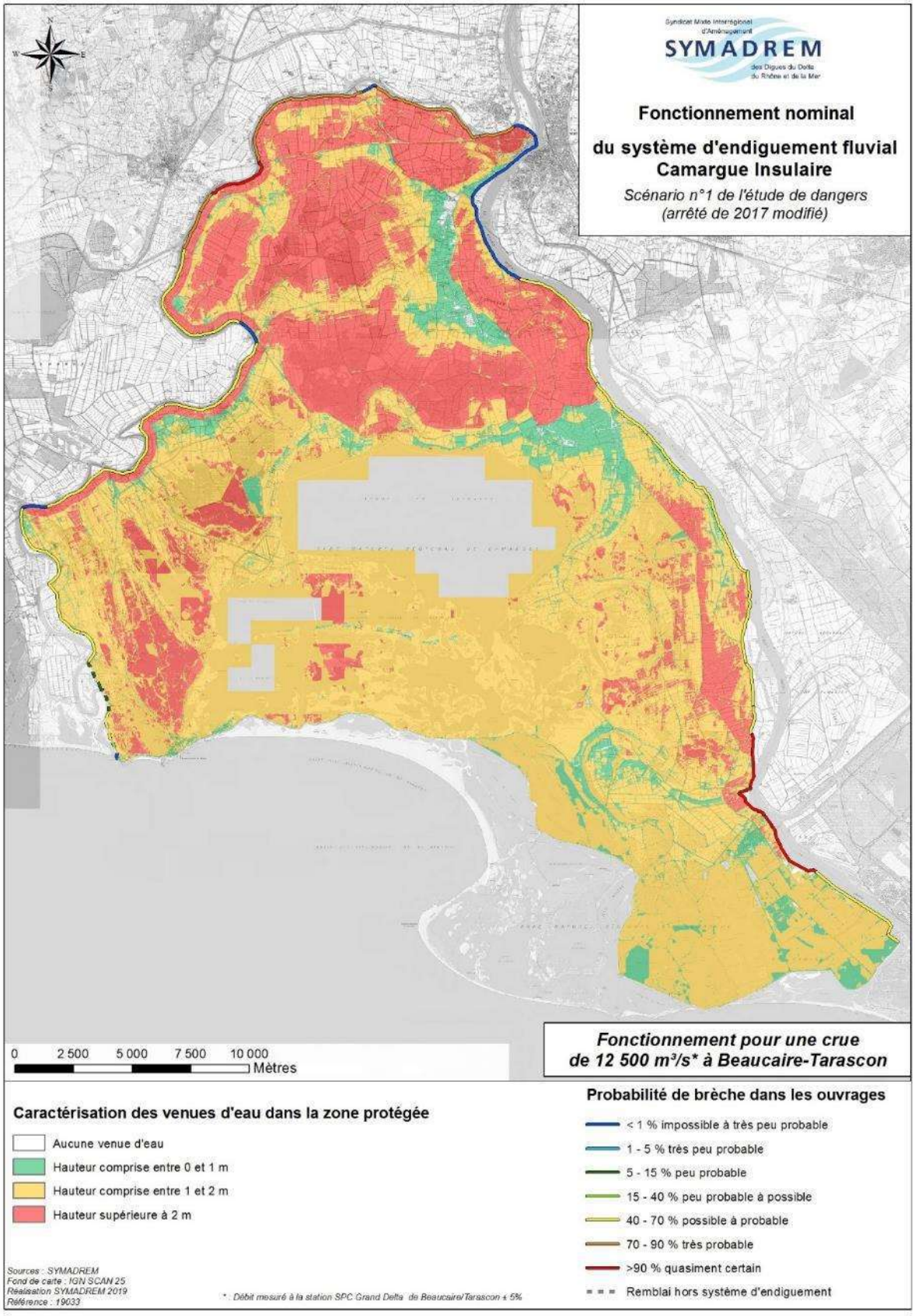


Figure 277. Scénario n°1 EDD pour une crue de 12500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon avec différentiel

8.8 SC N°1 : FONCTIONNEMENT NOMINAL POUR UNE CRUE 14160

Pour une crue, dont le débit atteint un débit de 14160 m^3/s ± 5 % à la station gérée par le service prévision des crues grand delta (cote atteinte ne peut être donnée du fait de la non validité de la courbe de tarage en vigueur depuis le 7 décembre 2003 pour cette gamme de débit) conjugué à un niveau marin de 1,50 m NGF ± 10 cm, le fonctionnement du système d'endiguement serait le suivant :

Les probabilités de brèche dans les digues du petit Rhône rive gauche estimées dans le rapport 7.2. sont sensiblement supérieures à 5 %. Les niveaux de sûreté et de danger des ouvrages sont en conséquence dépassés.
Les probabilités de brèche entre le Pont suspendu et Figarès, à l'exception du tronçon de digue situé en amont de l'A54 sont supérieures à 90 %. En aval, elles sont comprises entre 70 et 90 % jusqu'à Albaron. De l'aval d'Albaron jusqu'au bac, elles sont comprises entre 40 et 70 %. Le tableau ci-après rappelle les niveaux de sûreté par tronçon homogène et donne les ordres de grandeur des probabilités de brèche dans les ouvrages pour cette gamme de crue.

Tableau 88. Niveaux de sûreté des tronçons homogènes PRG du système d'endiguement et probabilité maximale de brèche par tronçon homogène pour une crue de 14160 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau sûreté Exprimé en débit m^3/s à B/T	Probabilité de brèche sur le tronçon pour une crue de 14160 m^3/s à B/T
PRG 1	Trinquetaille	281.1	282.5	9 500	>90 %
PRG 2	Cazeneuve-Augéry	282.5	287.4	7 500	>90 %
PRG 3	Beaumont –A54	287.4	288.5	12 500	1 - 5 %
PRG 4	A54 - Cavalès	288.5	294.5	7 500	>90 %
PRG 5	Cavalès - St Gilles	294.5	297.2	7 500	>90 %
PRG 6	St-Gilles - Figarès	297.2	298.2	7 500	70 - 90 %
PRG 7	future digue résistante à la surverse (Figarès)	298.2	299.8	7 500	70 - 90 %
PRG 8	La Galante - Albaron	299.8	306.55	7 500	70 - 90 %
PRG 9	Albaron	306.55	307.7	14 160	< 1 %
PRG 10	Albaron-Eymini	307.7	313	7 500	40 - 70 %
PRG 11	Eymini-Sénebier	313	320.75	7 500	40 - 70 %
PRG 12	Sénebier	320.75	322	14 160	< 1 %
PRG 13	Sénebier-Icard	322	329.5	7 500	40 - 70 %
PRG 14	Mas d'Icard - Bac	329.5	330.5	7 500	40 - 70 %
PRG 16	Bac – Mer Remblai hors système d'endiguement	330,625	337,0	Pour mémoire >> 8 500 m^3/s	70 - 90 %

Les probabilités de brèche dans les digues du grand Rhône rive droite sont inférieures à 1 % du défluent à Petite Montlong et comprise entre 40 et 70 % en aval de petite Montlong, à l'exception de la digue au droit de Salin de Giraud, pour laquelle, la probabilité de brèche supérieure à 90 %.

Tableau 89. Niveaux de sûreté des tronçons homogènes GRD du système d'endiguement et probabilité maximale de brèche par tronçon homogène pour une crue de 14160 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau sûreté Exprimé en débit m^3/s à B/T	Probabilité de brèche sur le tronçon pour une crue de 14160 m^3/s à B/T
D1	Défluent			14 160	< 1 %
GRD1	Quais	281.8	283.5	14 160	< 1 %
GRD2	Papeteries Etienne	283.5	284.15	14 160	< 1 %
GRD3	Emmaus	284.15	285.25	14 160	< 1 %
GRD4	Passeron-Monlong	285.25	288	14 160	< 1 %
GRD5	Monlong	288	288.9	14 160	< 1 %
GRD6	Montlong-Beaujeu	288.9	295.15	8 500	40 - 70 %
GRD7	Beaujeu-l'Armelière	295.15	298.2	10 500	40 - 70 %
GRD8	L'Armelière-la Commanderie	298.2	305.5	10 500	40 - 70 %
GRD9	La Commanderie-Bois Verdun	305.5	309.25	9 500	40 - 70 %
GRD10	Bois Verdun-Chartrouse	309.25	311.8	9 500	40 - 70 %
GRD11	Chartrouse-La Louisiane	311.8	313.1	9 500	40 - 70 %
GRD12	La Louisiane-L'Esquineau	313.1	319.4	7 500	>90 %
GRD13	L'Esquineau-Palissade	319.4	323.3	8 500	40 - 70 %

Au droit des tronçons de digue pour lesquels le niveau de sûreté des ouvrages est dépassé, des entrées d'eau doivent être considérés. Selon le retour d'expérience historique des crues de 1856 et 1840, il est considéré de manière raisonnable un lâcher d'eau dans la zone protégée compris entre 600 et 1200 millions de m^3. Seuls les scénarios d'inondation, en provenance des tronçons de digue pour lesquels le niveau de sûreté est dépassé, sont retenus.

Le tableau ci-après donne, pour les sept scénarios d'inondation retenus (Cf. chapitres 6 & 7 du présent rapport), les valeurs caractéristiques des cotes au sein des sous-zones protégées et la cote retenue pour cette gamme de crue (Cf. chapitres 6 & 7).

Tableau 90. Cote (en m NGF) au sein de chaque sous-zone protégée en fonction des scénarios d'inondation retenus (probabilité de brèche > 5 %) et non retenus (probabilité de brèche < 5 %) pour caractériser le fonctionnement du système pour une crue de 14 160 m^3/s à Beaucaire/Tarascon et cote globale retenue pour ce scénario de crue

Casier ZP	Cote (en m NGF) +/- 20 cm							Cote retenue
	Aval Cazeneuve	**Figarès**	**Aval Albaron**	**Montlong**	**Augery**	**Boisverdun**	**Surverse Sans brèche**	
1	7,50							7,5
2	7,00							7
3								
4	7,50							7,5
5	7,00							7
6	5,50							5,5
7	5,50							5,5
8	5,25							5,25
9	3,25	2,75		2,75	2,50			4,75
10	4,50	2,75	1,75	3,00	2,50	2,00		4,5
11	4,50			4,25	2,75			4,5
12	3,00	2,75	2,00	3,00	2,50	2,00		4,25
13	2,75	2,75	1,75	3,00	2,50	2,00		3
14	2,25	2,50	2,00	3,25	3,00	2,25		3,25
15	2,00			5,25	4,75	2,25		5,25
16	1,75	2,00	1,75	2,50	2,25	2,25	1,00	2,5
17	1,75	2,00	1,75	2,25	2,25	3,75	2,25	3,75
18	1,75	1,75	1,75	2,00	2,00	2,25	1,75	2,25
19	1,75	1,75	1,75	2,00	2,00	2,25	1,75	2,25
20				6,00	5,75			6
21				3,50	4,00	2,50		4
22					2,25	3,25		3,75
23	1,75	2,00	1,75	2,25	2,25	3,50		3,75
24	1,75	2,00	1,75	2,25	2,25	3,50	3,25	3,5
25	1,75	2,00	1,75	2,00	2,00	2,50	2,75	3
26	1,75	1,75	1,75	2,00	2,00	2,25	2,25	2,25
27	4,00	2,50		2,75				5,75
28	2,75	2,75		3,00	2,50			5,5
29	2,50	4,75	1,75	3,00	2,50	2,00		4,75
30	2,50	2,75	1,75	3,00	2,50	2,00		3,75
31	2,50	3,00	1,75	3,00	2,50	2,00		3
32		3,25	3,75	3,00				3,75
33	2,00	2,00	4,25	2,50	2,50	2,25		4,25
34	1,75	2,00	1,75	2,25	2,25	2,25		2,25
35	1,75	2,00	1,75	2,25	2,25	2,25		2,25
36	1,75	2,00	1,75	2,50	2,25	2,25		2,5
37	1,75	2,00	1,75	2,25	2,25	2,25		2,25
38	1,75	2,00	1,75	2,25	2,25	2,25		2,25
39	1,75	2,00	1,75	2,50	2,50	2,25		2,5
40	1,75	2,00	1,75	2,50	2,25	2,50	1,50	2,5
41	1,75	1,75	1,75	2,00	2,00	2,25	2,00	2,25

Certaines cotes ont augmentées pour es mêmes raisons que celles évoquées pour les crues précédentes

Le tableau ci-après donne pour les cotes retenues, la distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous

zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 91. Fonctionnement scénario n°1 pour une crue de 14160 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
1	Trinquetaille La Corrèze Gontier	7,5	0,6	2,9	3,5
2	Trinquetaille St Genest-Le Vittier	7	0	2,7	3,3
3	Trinquetaille Centre				
4	Trinquetaille Cazeneuve	7,5	0,1	3,3	3,7
5	Trinquetaille les prêcheurs	7	1,5	3,1	3,5
6	Trinquetaille St Antoine Billot	5,5	1,1	2,0	2,5
7	Trinquetaille zone humide	5,5	0	1,5	2,1
8	Anciennes Papeteries Etienne	5,25	0	0,6	1,1
9	A54 Est	4,75	1,2	2,4	3,2
10	Gimeaux	4,5	1,6	2,8	3,4
11	La Grande Sacristane	4,5	0,0	1,1	2,0
12	Clos du Mas Neuf	4,25	1,2	2,1	2,9
13	Marais du Pont de Rousty	3	1,1	2,5	3,5
14	Marais de la Grand Mar	3,25	0,4	2,3	3,1
15	Montlong	5,25	1,6	2,5	3,4
16	Etang du Vaccarès	2,5	1,4	2,0	2,3
17	Armelière Sambuc Chamone	3,75	1,3	2,2	3,0
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	2,25	1,1	1,6	2,1
19	Salin de Giraud	2,25	0,6	1,1	1,6
20	Abords digue Petite Montlong Beaujeu	6	2,1	2,9	3,6
21	Abords digue Beaujeau Tourtoulen	4	0	1,2	1,7
22	Abords digue Tourtoulen Commanderie	3,75	0,0	1,2	1,8
23	Abords digue Commanderie Boisverdun	3,75	1,2	1,9	2,7
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	3,5	1,3	2,0	2,6
25	Abords digue Salin de Giraud	3	0,8	1,7	2,5
26	Salins du midi sud-est	2,25	1,0	1,5	2,0
27	Abords digue Cazeneuve - A54	5,75	1,3	2,5	3,2
28	Abords digue A54 Pont de Cavalès	5,5	1,5	2,6	3,2
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	4,75	1,4	2,6	3,4
30	Saliers	3,75	1,2	2,1	3,3
31	Marais de Saliers	3	1,2	2,4	3,0
32	Albaron	3,75	0	0,9	1,6
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	4,25	1,7	2,8	3,8

34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage	2,25	**0,6**	**1,3**	**1,9**
35	Amarée Dromard	2,25	**1,2**	**1,8**	**2,2**
36	Panperdu Etang des Launes	2,5	**1,3**	**1,9**	**2,4**
37	Etang de Ginès	2,25	**1,4**	**2,1**	**2,2**
38	Saintes-Maries-de-la-Mer	2,25	**0,4**	**1,1**	**1,5**
39	Paty trinité	2,5	**1,0**	**1,9**	**2,4**
40	Vaccarès Est	2,5	**0,6**	**1,7**	**2,2**
41	Esquineau	2,25	**0**	**1,5**	**1,9**

La carte ci-après est la représentation graphique du tableau précédant. La carte qui suit, résulte de la cote NGF appliquée à la sous-zone protégée moins la cote NGF du terrain naturel (données source BDT IGN). Cette carte nous montre que chaque sous-zone protégée peut être inondée, à l'exception du centre de Trinquetaille.

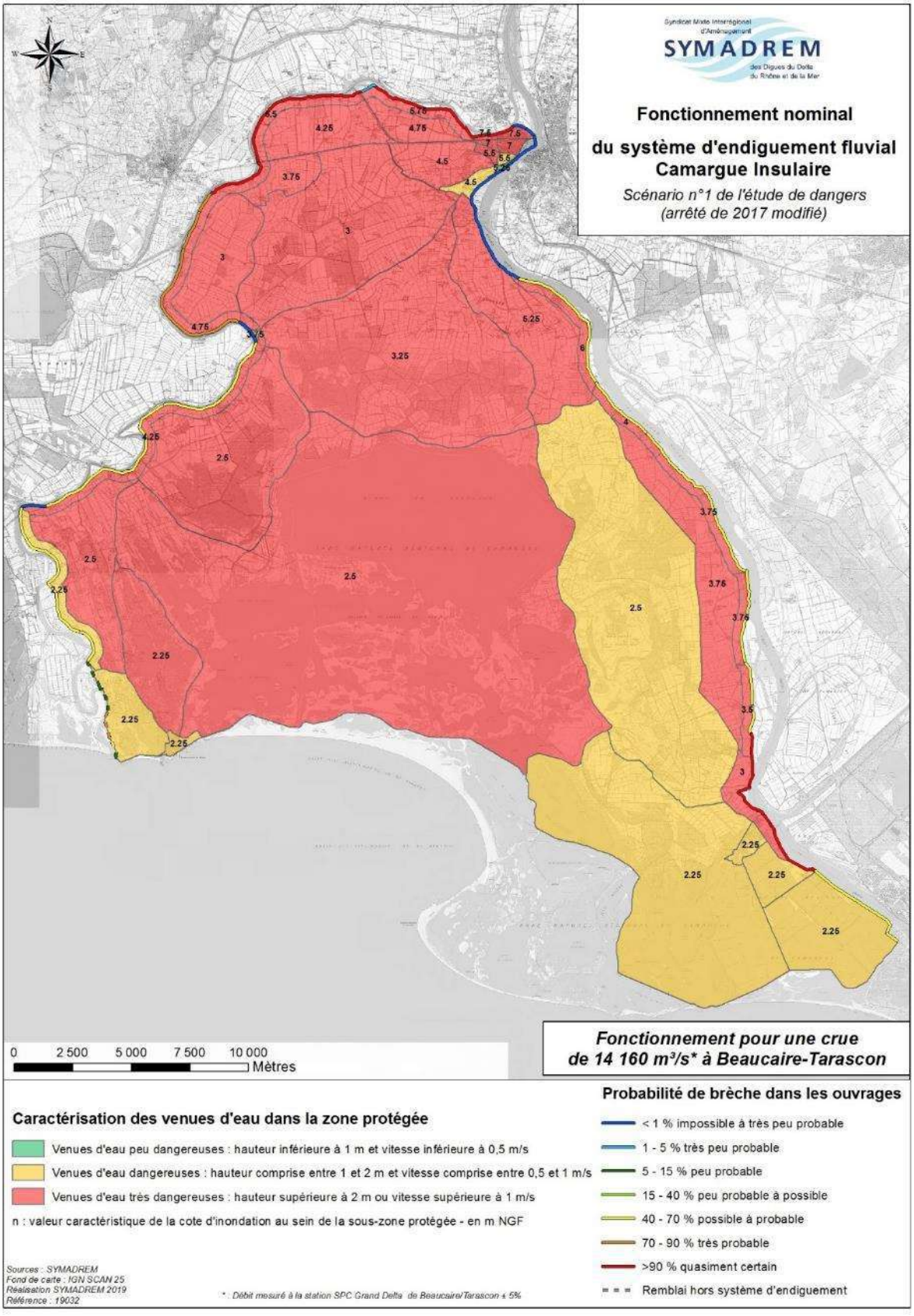


Figure 278. Scénario n°1 EDD pour une crue de 14160 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

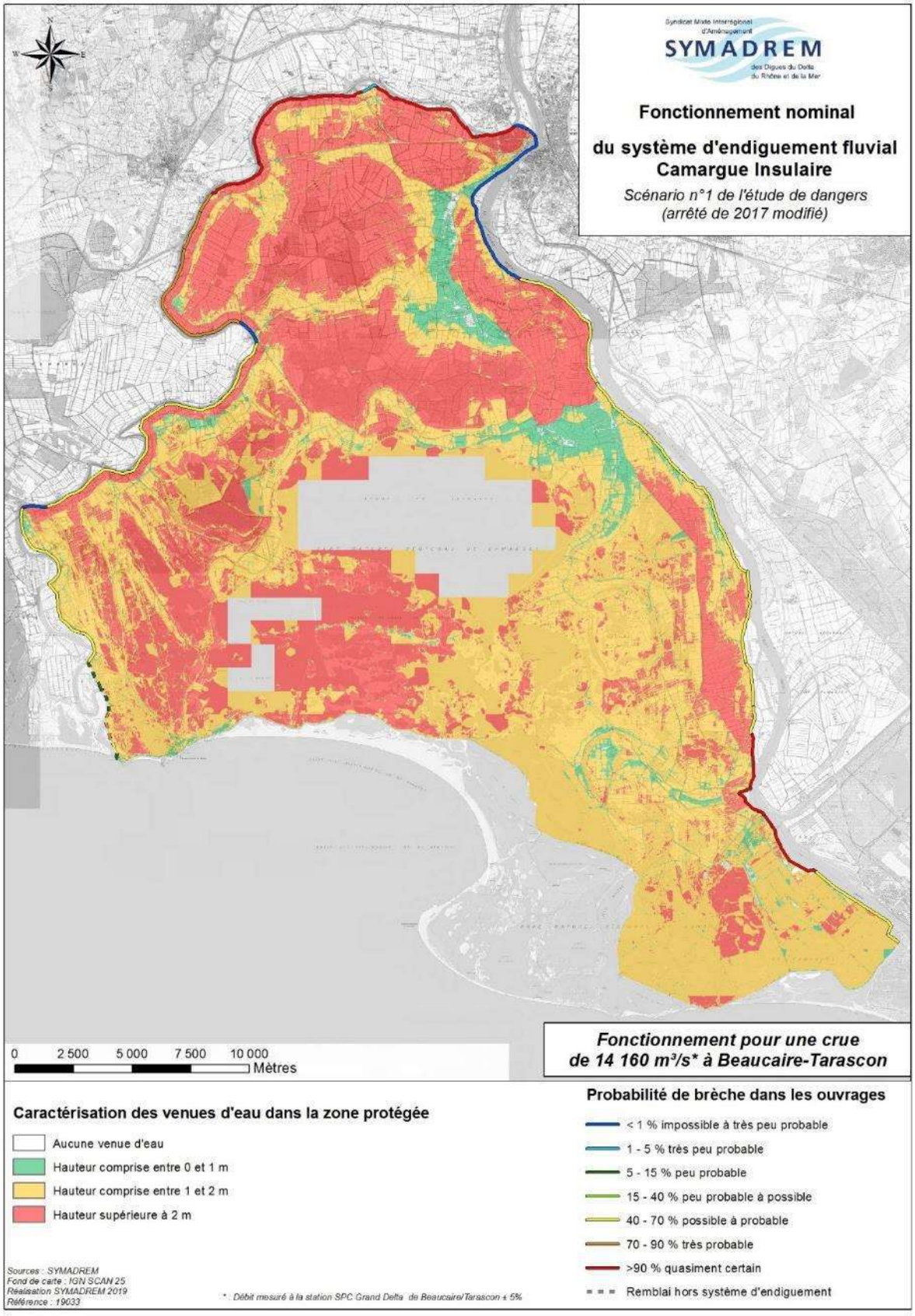


Figure 279. Scénario n°1 EDD pour une crue de 14160 m^3/s à Beaucaire/Tarascon avec différentiel

8.9 CONCLUSION DU SCENARIO N°1 ET NIVEAUX DE PROTECTION RETENU

Du fonctionnement du système d'endiguement conformément au scénario n°1 de l'arrêté EDD 2017 modifié, on retient les niveaux de protection suivants pour les sous-zones protégées. Les cotes caractéristiques au sein des sous-zones par scénario de crue sont rappelées. Les cartes, en pages suivantes, illustrent ces niveaux de protection respectivement pour la Camargue insulaire fluvial et pour la tête de Camargue.

Tableau 92. Camargue insulaire fluvial - niveaux de protection de la sous-zone protégée

N°SZP	Inondation avec probabilité brèche < 5 %							Niveau de protection en débit ± 5 % à Beaucaire/Tarascon
	7500	8500	9500	10500	11500	12500	14160	
1				7,00	7,50	7,50	7,50	9500
2				6,50	7,00	7,00	7,00	9500
3								14160
4			5,00	7,00	7,50	7,50	7,50	8500
5			5,00	6,50	7,00	7,00	7,00	8500
6			4,00	5,25	5,50	5,50	5,50	8500
7				5,25	5,50	5,50	5,50	9500
8					4,75	4,75	5,25	10500
9		**1,75**	4,25	4,75	4,75	4,75	4,75	7500
10			3,00	4,00	4,50	4,50	4,50	8500
11				4,25	4,50	4,50	4,50	9500
12		1,75	3,75	4,25	4,25	4,25	4,25	7500
13			2,00	2,00	2,50	2,75	3,00	8500
14			2,25	**2,50**	3,00	3,25	3,25	8500
15			4,00	**4,50**	5,00	5,25	5,25	8500
16			0,50	1,00	1,25	2,25	2,50	8500
17			2,25	2,75	3,25	3,50	3,75	8500
18			1,00	1,25	1,50	2,00	2,25	8500
19		**1,50**	**1,50**	1,75	2,00	2,00	2,25	7500
20			4,75	5,00	5,50	6,00	6,00	8500
21			3,00	3,25	3,75	4,00	4,00	8500
22			2,25	3,25	3,75	3,75	3,75	8500
23			2,25	3,25	3,75	3,75	3,75	8500
24			2,25	3,00	3,25	3,50	3,50	8500
25		1,75	2,50	2,75	3,00	3,00	3,00	7500
26		0,50	1,25	1,75	1,75	2,00	2,25	7500
27		2,00	5,00	5,25	5,50	5,75	5,75	7500
28		1,75	4,50	4,75	5,00	5,50	5,50	7500
29		3,50	4,25	4,50	4,75	4,75	4,75	7500
30		**0,75**	3,00	3,25	3,50	3,75	3,75	7500
31		0,25	2,50	2,50	2,75	2,75	3,00	7500
32			3,25	3,50	3,75	3,75	3,75	8500
33		1,75	3,75	4,00	4,25	4,25	4,25	7500
34		1,50	2,00	2,00	2,00	2,25	2,25	7500
35			0,75	0,75	0,75	2,25	2,25	8500
36		**0,75**	1,00	1,00	1,00	2,25	2,50	7500
37			1,00	1,00	1,00	2,25	2,25	8500
38				1,00	1,25	2,25	2,25	9500
39		0,50	2,00	2,00	2,00	2,25	2,50	7500
40			2,00	2,00	2,25	2,50	2,50	8500
41		1,25	1,50	1,50	1,75	2,00	2,25	7500

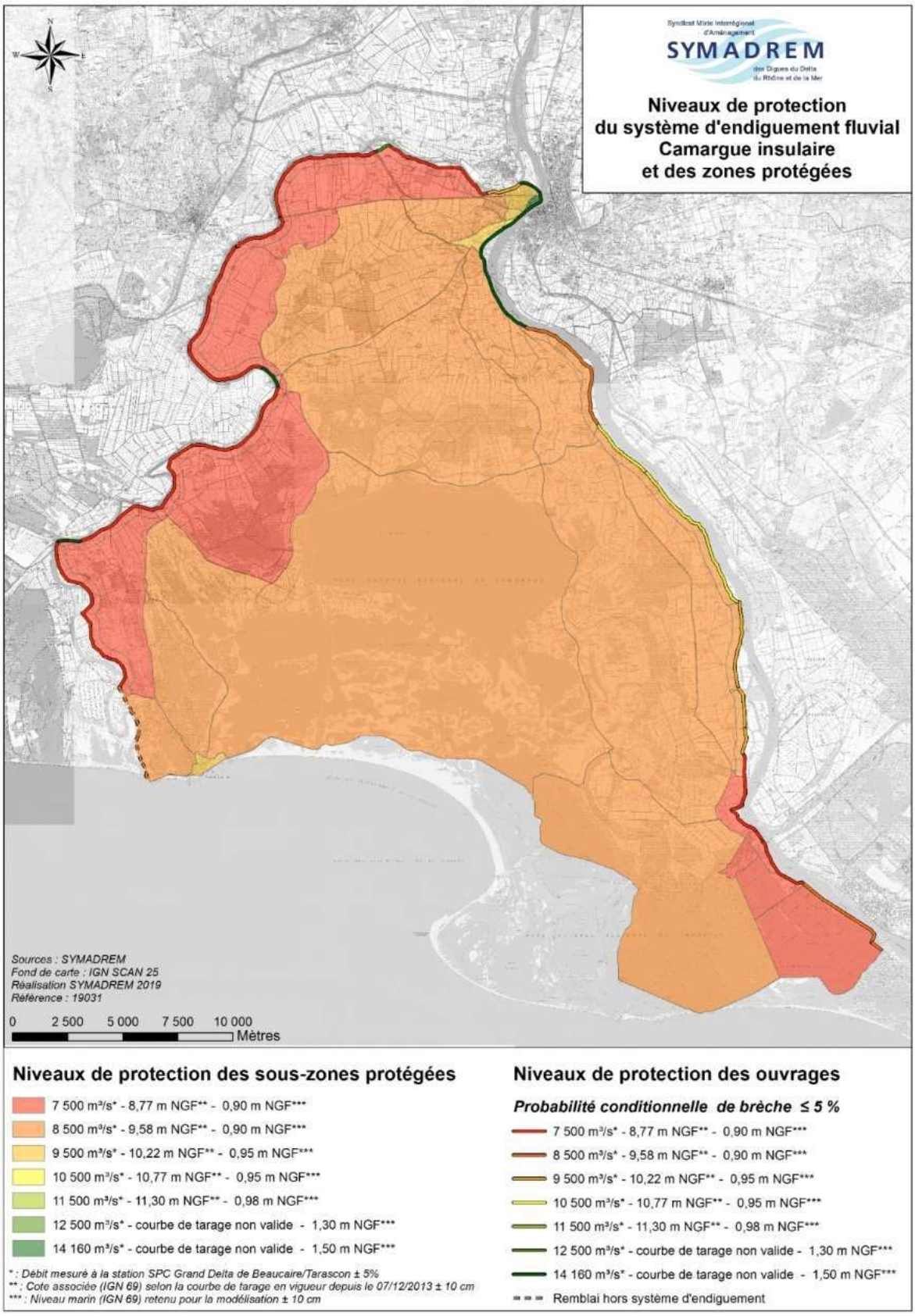


Figure 280. Camargue insulaire fluvial - niveaux de protection de la sous-zone protégée

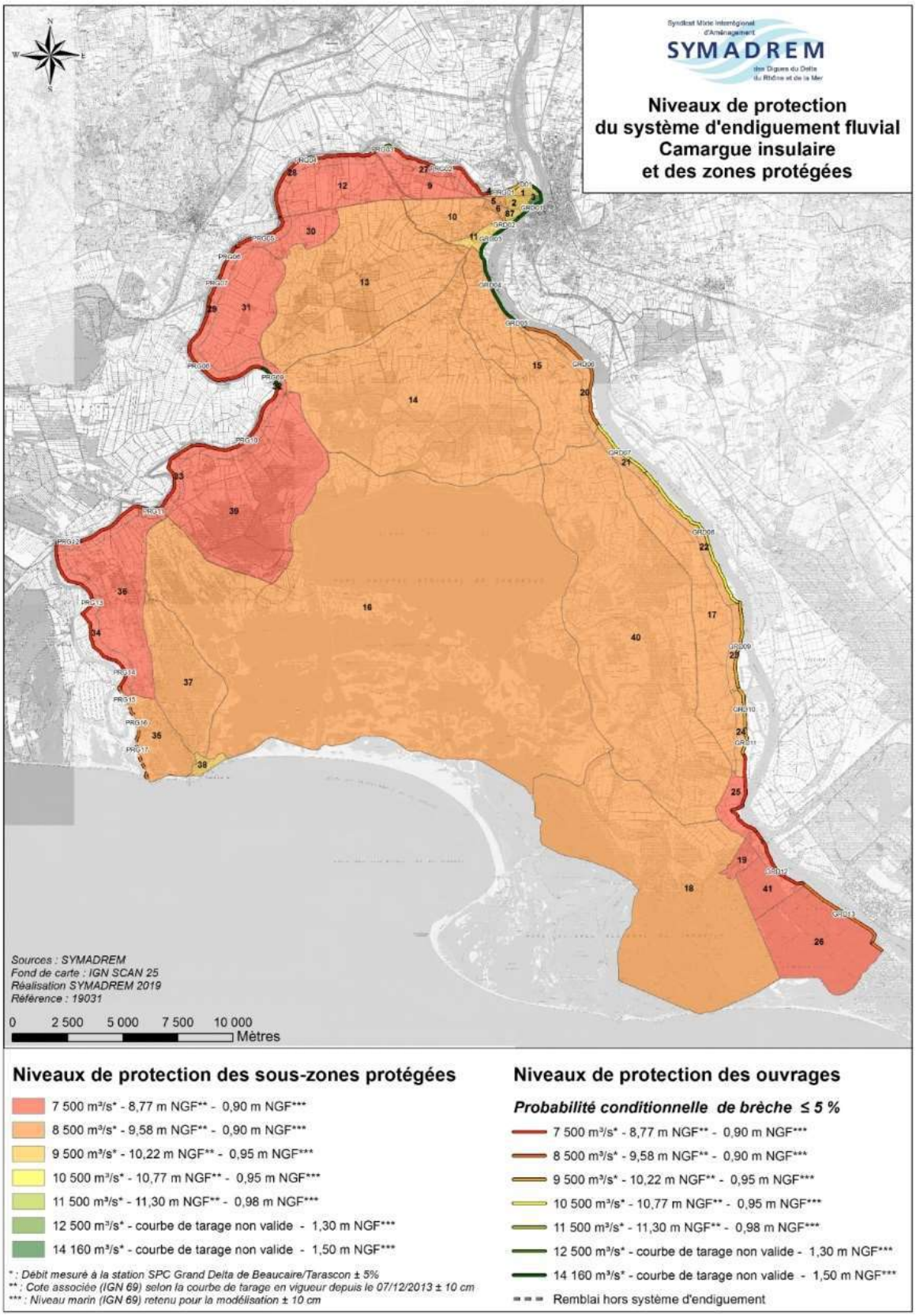


Figure 281. Camargue insulaire fluvial - niveaux de protection de la sous-zone protégée

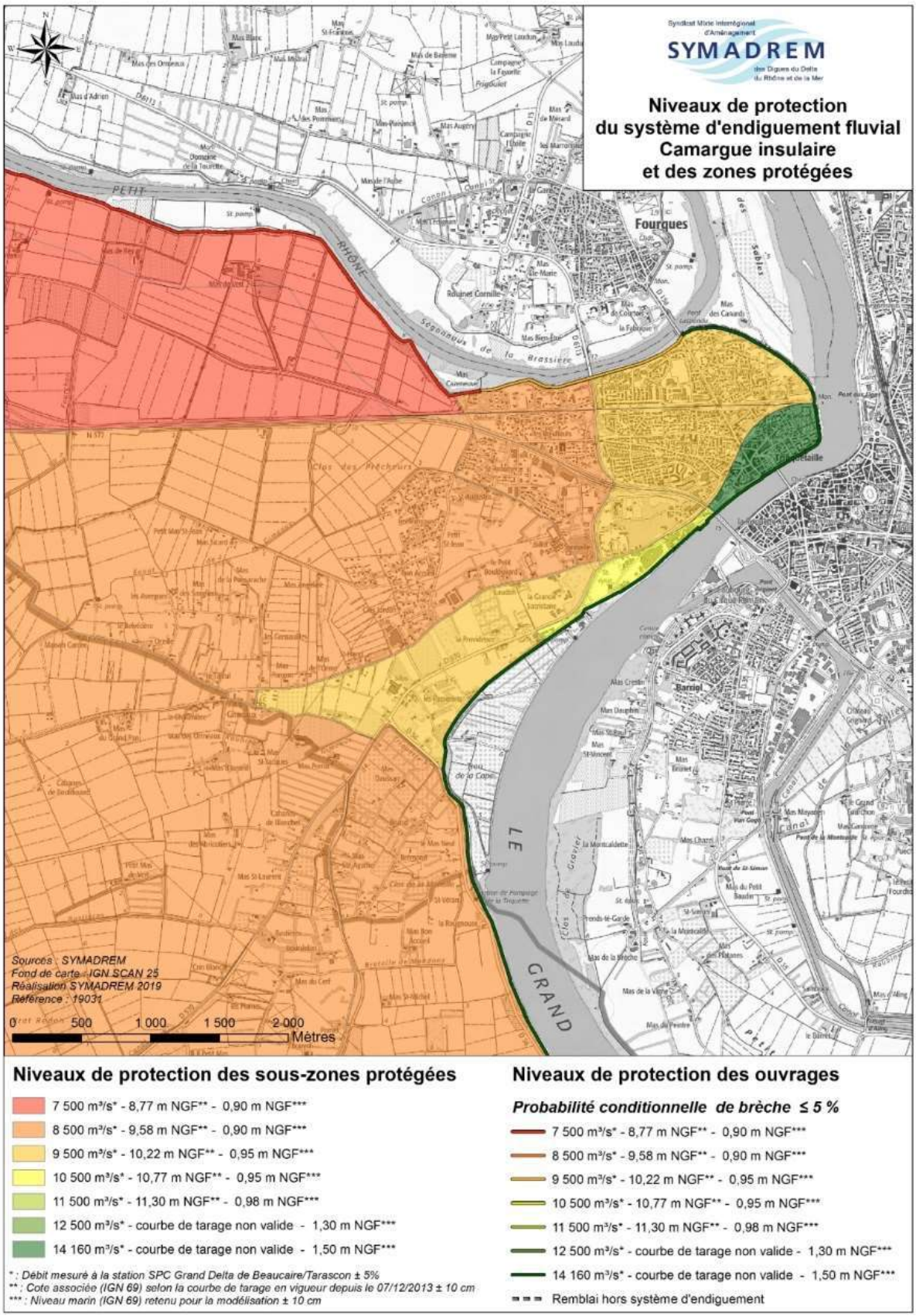


Figure 282. Tête de Camargue - niveaux de protection de la sous-zone protégée

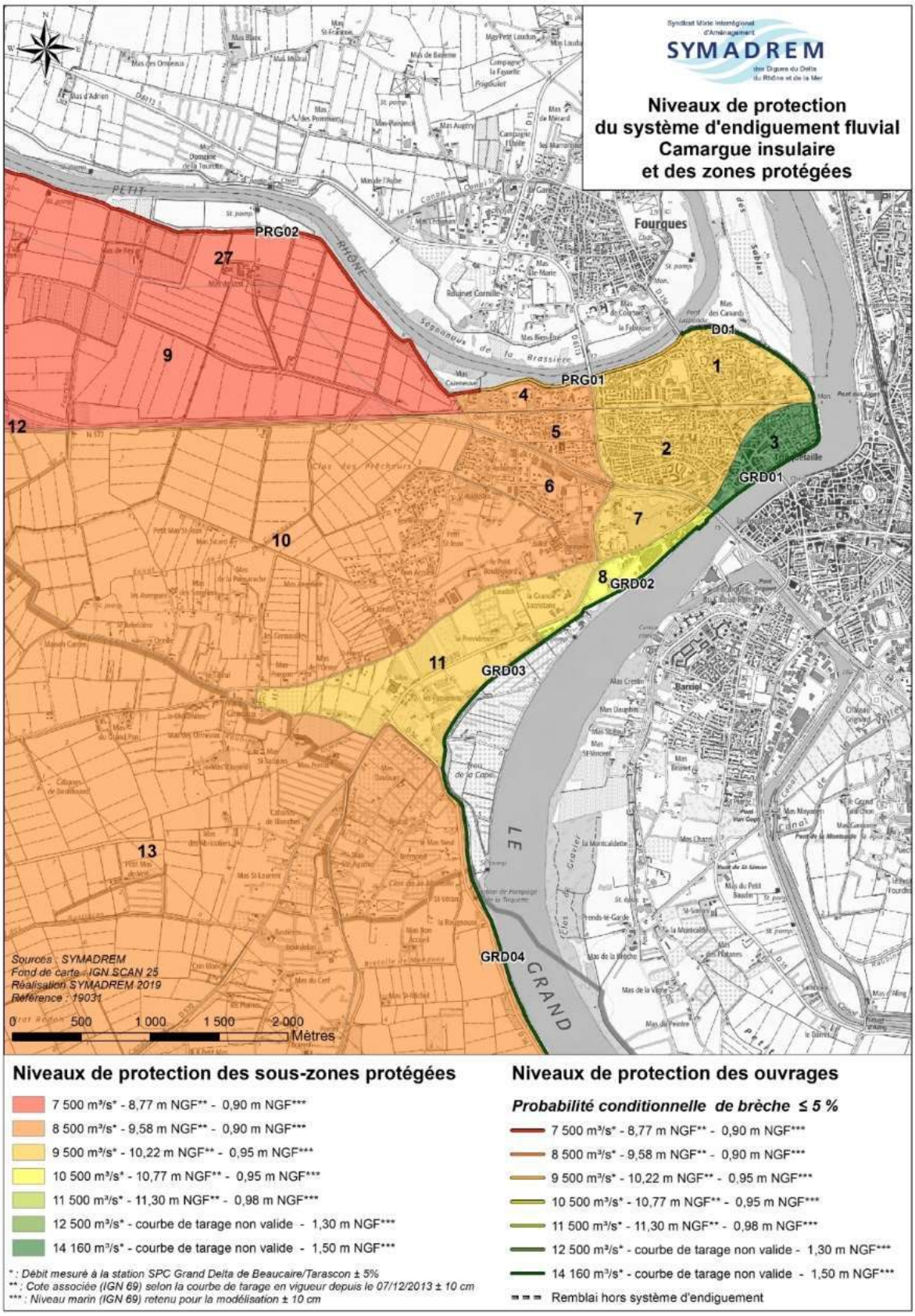


Figure 283. Tête de Camargue - niveaux de protection de la sous-zone protégée

9 SCENARIO N°2 : DEFAILLANCE FONCTIONNELLE DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT POUR UN ALEA CORRESPONDANT A L'ATTEINTE DU NIVEAU DE PROTECTION

Conformément à la réglementation, ce scénario 2 est représentatif d'une défaillance fonctionnelle du système d'endiguement au moment où se produit un aléa dont l'intensité équivaut à l'intensité de l'aléa correspondant au niveau de protection. La défaillance fonctionnelle qui est réputée liée à la défaillance d'un dispositif de régulation des écoulements hydrauliques (batardeau qui n'est pas mis en place ou qui se rompt, vanne qui reste en position ouverte, station de pompage en panne, etc.) ne s'accompagne pas d'une défaillance structurelle des ouvrages. Il en résulte néanmoins des venues d'eau plus ou moins dangereuses dans la zone protégée ou une aggravation des venues d'eau en dehors de cette dernière.

9.1 NON MISE EN PLACE DE BATARDEAUX

Les batardeaux du système d'endiguement sont tous englobés dans les quais d'Arles. Ils sont, conformément au Plan Communal de Sauvegarde de la ville d'Arles et la convention tripartite signée le 11 mars 2019 entre la ville d'Arles, VNF et le SYMADREM, mis en place pour une crue dépassant 6000 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon. Ce débit correspond à une période de retour de 2 ans environ. Le fil d'eau des batardeaux les plus exposés correspond à un débit supérieur à 8000 m^3/s. Sur un plan pratique, la mise en place de ces batardeaux aurait pu être calée sur un seuil de débit supérieur et être adaptée au calage altimétrique des fils d'eau.
La ville d'Arles a préféré retenir un seuil de mise en œuvre très bas et global des batardeaux de manière à remplacer les exercices, qui n'auraient été que partiels et appliqués sur certains batardeaux, par de véritables opérations statistiquement biénnales. La dernière date de novembre 2019.

De ce fait, la probabilité de non mise en place de batardeaux pour l'atteinte du niveau de protection des ouvrages concernés qui correspond à la crue exceptionnelle est quasiment nulle et inférieure au seuil d'acceptabilité.

9.2 RUPTURE DE BATARDEAUX

La rupture d'un batardeau a été abordée dans le chapitre 7.1. de l'étude de dangers. Elle correspond au scénario n°13. La probabilité annuelle de rupture du batardeau de la porte des Curatiers, qui est le batardeau le plus exposé en termes de fréquence et de charge d'eau, est d'environ 10^{-4}, ce qui est inférieur au seuil d'acceptabilité.

Bien que les probabilités calculées soient basses et que toutes les mesures de conception, de réalisation et d'entretien soient mises en œuvre, l'hypothèse d'une rupture est retenue.

Le batardeau a une largeur de 5 m. La hauteur de charge pour la crue exceptionnelle est de 1,9 m. Le débit maximum calculé suivant une formule de seuil est estimé à 17 m^3/s. La vitesse critique (passage d'un écoulement fluvial à torrentiel) est estimé à 3,25 m/s et la vitesse maximum en aval en supposant un tirant d'eau nul à environ 5,5 m/s. Ces caractéristiques

hydrauliques sont similaires à la brèche de Ventabren de novembre 2016 (Cf. chapitre 6 de l'étude de dangers). L'intervention au milieu de la Camargue avait débuté 1 heure après l'observation et s'est achevée 3 heures après le démarrage. En estimant à 1h30, la durée d'entrée d'eau massive, on estime à environ 100 000 m^3, le volume libéré dans la zone protégée, ce qui équivaut pour le centre du quartier Trinquetaille à une hauteur moyenne maximale de 40 cm.

Dans le cas présent, un colmatage avec enrochements pourrait être entrepris, non pas côté fleuve comme ce fut le cas pour la brèche de Ventabren, mais côté zone protégée. Le principe d'intervention consisterait en la réalisation d'un cordon en enrochements en arc de cercle qui répartirait la charge déversante au droit du batardeau en une charge déversante moins importante sur le cordon en enrochements à édifier.

La blocométrie des enrochements à mettre en œuvre, compte tenu des vitesses, serait de l'ordre de 1 tonne.

9.3 NON FERMETURE DES VANNES D'OUVRAGES HYDRAULIQUES TRAVERSANTS

La fermeture des ouvrages hydrauliques est assurée par les propriétaires des ouvrages. Le contrôle de cette fermeture est assuré par les gardes digues en alerte 1 (Cf. chapitre 9 de l'étude de dangers).
La non fermeture des ouvrages hydrauliques peut occasionner une inondation lente qui sera perceptible dès la mise en charge des ouvrages. L'absence de fermeture lors de crues importantes a été par le passé observée. Lors de la détection de la non fermeture, le garde digues ou si nécessaire la direction du SYMADREM prévienne le propriétaire. Si cette fermeture n'est techniquement pas possible, il est procédé à une intervention d'urgence telle que décrite dans le scénario A du chapitre 7.1. ou telle décrite dans le chapitre 9 de l'étude de dangers.

9.4 RUPTURE DES VANNES D'OUVRAGES HYDRAULIQUES TRAVERSANTS

La rupture des organes de fermetures des ouvrages hydrauliques a été étudiée dans le chapitre 7.1. de l'étude de dangers (scénario n°A). Elle a été jugée acceptable dans l'état actuel (probabilité annuelle inférieure ou égale à 10^{-3}).

Bien que ce scénario soit jugé acceptable, l'hypothèse d'une rupture est retenue sur un ouvrage fictif traversant le système d'endiguement, qui cumulerait la plus grande surface (conduite traversant au GRD 281.93 avec un diamètre de 1800 mm, soit une surface de 2,5 m^2) et soumis à une charge maximale de 5,5 m (correspondant à l'ouvrage située au PRG 306,57). Dans le cas présent, la vitesse et le débit serait respectivement de 6,25 m/s et 15,6 m^3/s, soit des valeurs sensiblement équivalentes à la rupture du batardeau des curatiers.

Le principe consisterait à colmater l'ouvrage avec des big-bags ou des enrochements suivant le principe présenté ci-dessus. A l'instar de la rupture du batardeau, le volume maximal libéré serait d'environ 100 000 m^3, la blocométrie à utiliser serait de l'ordre de 2,5 tonnes.

10 SCENARIO N°3 : FONCTIONNEMENT REALISTE ET PORTEUR D'ENSEIGNEMENT POUR LES SERVICES DE SECOURS

Conformément à l'arrêté EDD de 2017 modifié *« le scénario 3 est représentatif d'une défaillance structurelle du système d'endiguement. Pour que ce scénario reflète une situation de terrain réaliste et porteuse d'enseignements pour les services en charge des secours aux personnes, le niveau d'aléa retenu doit être tel qu'il génère un risque de rupture supérieur à 50 % ou, s'il n'est pas possible de préciser quantitativement le risque résiduel de rupture, un risque de rupture aigu au sens de l'annexe 3. »*

10.1 NIVEAUX DE DANGER DES DIGUES

Les niveaux de sûreté (pour mémoire) et de danger des digues du petit Rhône rive gauche et du grand Rhône rive droite figurent dans le tableau ci-dessous.

Tableau 93. Niveaux de sûreté et de danger des tronçons homogènes PRG du système d'endiguement

N°	Libellé	PR Digue		Débit à Beaucaire/Tarascon (m^3/s)	
		PRG début	PRG Fin	Sûreté (5% de brèche)	Danger (50 % de brèche)
PRG 1	Trinquetaille	281.1	282.5	9 500	10 500
PRG 2	Cazeneuve-Augéry	282.5	287.4	7 500	9 500
PRG 3	Beaumont –A54	287.4	288.5	12 500	14160
PRG 4	A54 - Cavalès	288.5	294.5	7 500	8 500
PRG 5	Cavalès - St Gilles	294.5	297.2	7 500	8 500
PRG 6	St-Gilles - Figarès	297.2	298.2	7 500	8 500
PRG 7	future digue résistante à la surverse (Figarès)	298.2	299.8	7 500	8 500
PRG 8	La Galante - Albaron	299.8	306.55	7 500	8 500
PRG 9	Albaron	306.55	307.7	14 160	14160
PRG 10	Albaron-Eymini	307.7	313	7 500	9 500
PRG 11	Eymini-Sénebier	313	320.75	7 500	11 500
PRG 12	Sénebier	320.75	322	14 160	14160
PRG 13	Sénebier-Icard	322	329.5	7 500	11 500
PRG 14	Mas d'Icard - Bac	329.5	330.5	7 500	11 500
PRG 16	Bac – Mer Remblai hors système d'endiguement	330,625	337,0	Pour mémoire >> 8 500 m^3/s	Pour mémoire > 11 500 m^3/s

Tableau 94. Niveaux de sûreté et de danger des tronçons homogènes GRD du système d'endiguement

N°	Libellé	PR Digue		Débit à Beaucaire/Tarascon (m^3/s)	
		GRD début	GRD Fin	Sûreté (5% de brèche)	Danger (50 % de brèche)
D1	Défluent			14 160	>> 14160
GRD1	Quais	281.8	283.5	14 160	>> 14160
GRD2	Papeteries Etienne	283.5	284.15	14 160	>> 14160
GRD3	Emmaus	284.15	285.25	14 160	>> 14160
GRD4	Passeron-Monlong	285.25	288	14 160	>> 14160
GRD5	Monlong	288	288.9	14 160	>> 14160
GRD6	Montlong-Beaujeu	288.9	295.15	8 500	10 500
GRD7	Beaujeu-l'Armelière	295.15	298.2	10 500	11 500
GRD8	L'Armelière-la Commanderie	298.2	305.5	10 500	11 500
GRD9	La Commanderie-Bois Verdun	305.5	309.25	9 500	11 500
GRD10	Bois Verdun-Chartrouse	309.25	311.8	9 500	11 500
GRD11	Chartrouse-La Louisiane	311.8	313.1	9 500	11 500
GRD12	La Louisiane-L'Esquineau	313.1	319.4	7 500	9 500
GRD13	L'Esquineau-Palissade	319.4	323.3	8 500	11 500

10.2 SC N°3 : FONCTIONNEMENT PROBABLE A CERTAIN POUR UNE CRUE 7500

Pour une crue, dont le débit atteint un débit de 7500 m^3/s ± 5 % à la station gérée par le service prévision des crues grand delta (cote atteinte selon la courbe de tarage en vigueur depuis le 7 décembre 2003 de 8,77 m NGF ± 10 cm) conjugué à un niveau marin de 0,9 m NGF ± 10 cm, le fonctionnement du système d'endiguement serait le suivant :

Les deux tableaux ci-après rappellent les niveaux de danger par tronçon homogène. Pour cette gamme de crue, aucun niveau de dangers n'est atteint.

Tableau 95. Niveaux de danger des tronçons homogènes PRG du système d'endiguement et état de dépassement pour une crue de 7500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau danger Exprimé en débit m^3/s à B/T	Etat du niveau de danger pour 7500 m^3/s à B/T
PRG 1	Trinquetaille	281.1	282.5	10 500	Non atteint
PRG 2	Cazeneuve-Augéry	282.5	287.4	9 500	
PRG 3	Beaumont –A54	287.4	288.5	14160	
PRG 4	A54 - Cavalès	288.5	294.5	8 500	
PRG 5	Cavalès - St Gilles	294.5	297.2	8 500	
PRG 6	St-Gilles - Figarès	297.2	298.2	8 500	
PRG 7	future digue résistante à la surverse (Figarès)	298.2	299.8	8 500	
PRG 8	La Galante - Albaron	299.8	306.55	8 500	
PRG 9	Albaron	306.55	307.7	14160	
PRG 10	Albaron-Eymini	307.7	313	9 500	
PRG 11	Eymini-Sénebier	313	320.75	11 500	
PRG 12	Sénebier	320.75	322	14160	
PRG 13	Sénebier-Icard	322	329.5	11 500	
PRG 14	Mas d'Icard - Bac	329.5	330.5	11 500	
PRG 16	Bac – Mer Remblai hors système d'endiguement	330,625	337,0	Pour mémoire > 11 500 m^3/s	

Tableau 96. Niveaux de danger des tronçons homogènes GRD du système d'endiguement et état de dépassement pour une crue de 8500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau danger Exprimé en débit m^3/s à B/T	Etat du niveau de danger pour 8500 m^3/s à B/T
D1	Défluent			>> 14160	Non atteint
GRD1	Quais	281.8	283.5	>> 14160	
GRD2	Papeteries Etienne	283.5	284.15	>> 14160	
GRD3	Emmaus	284.15	285.25	>> 14160	
GRD4	Passeron-Monlong	285.25	288	>> 14160	
GRD5	Monlong	288	288.9	>> 14160	
GRD6	Montlong-Beaujeu	288.9	295.15	10 500	
GRD7	Beaujeu-l'Armelière	295.15	298.2	11 500	
GRD8	L'Armelière-la Commanderie	298.2	305.5	11 500	
GRD9	La Commanderie-Bois Verdun	305.5	309.25	11 500	
GRD10	Bois Verdun-Chartrouse	309.25	311.8	11 500	
GRD11	Chartrouse-La Louisiane	311.8	313.1	11 500	
GRD12	La Louisiane-L'Esquineau	313.1	319.4	9 500	
GRD13	L'Esquineau-Palissade	319.4	323.3	11 500	

Le fonctionnement probable à certain pour une crue de 7500 m^3/s est l'absence d'entrées d'eau en provenance du système d'endiguement.

La cartographie du fonctionnement du système, conformément au scénario n°3 de l'arrêté EDD modifié, figure en page suivante.

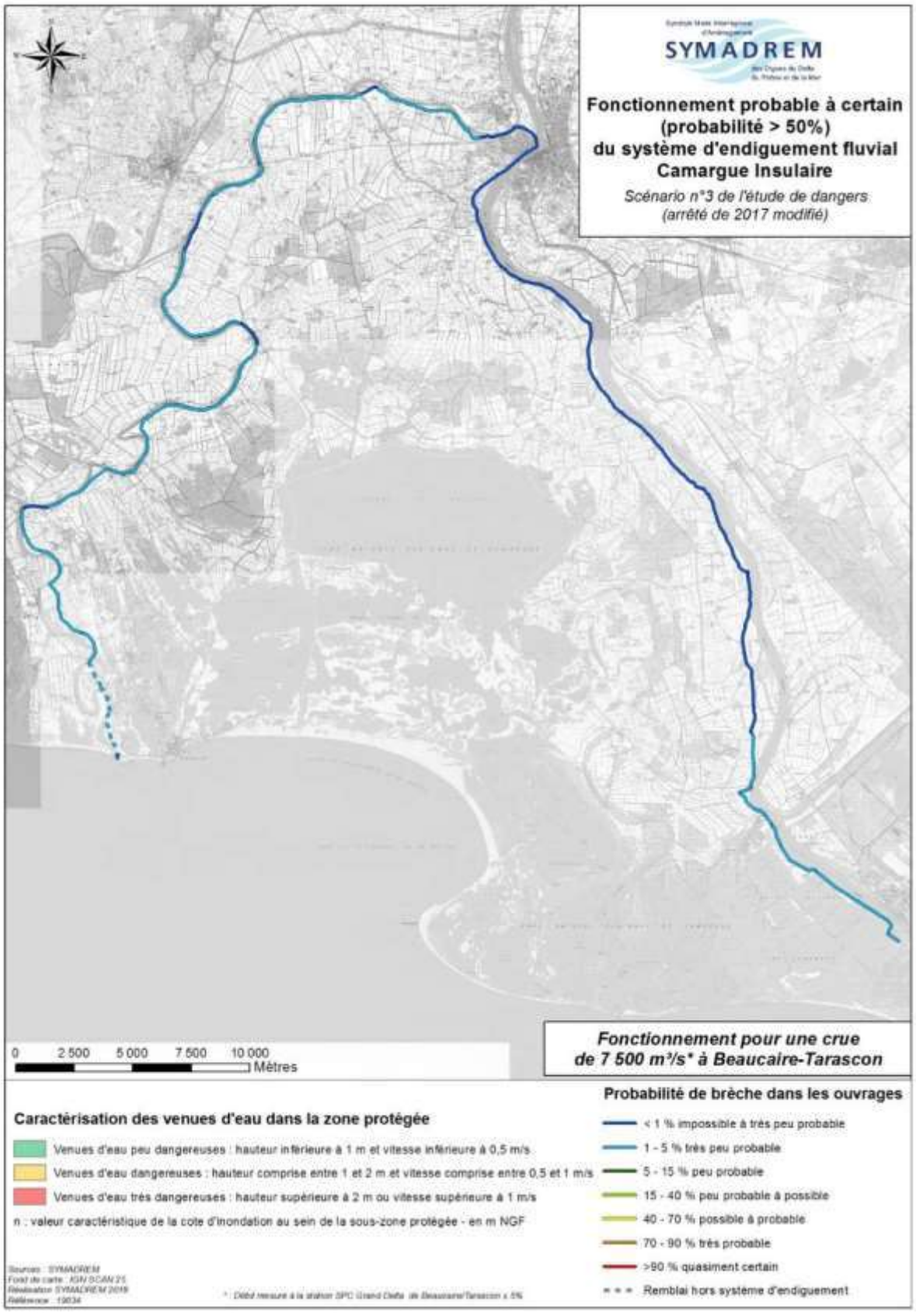


Figure 284. Scénario n°3 EDD pour une crue de 7500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

10.3 SC N°3 : FONCTIONNEMENT PROBABLE A CERTAIN POUR UNE CRUE 8500

Pour une crue, dont le débit atteint un débit de 8500 m^3/s ± 5 % à la station gérée par le service prévision des crues grand delta (cote atteinte selon la courbe de tarage en vigueur depuis le 7 décembre 2003 de 9,58 m NGF ± 10 cm) conjugué à un niveau marin de 0,9 m NGF ± 10 cm, le fonctionnement du système d'endiguement serait le suivant :

Les deux tableaux ci-après rappellent les niveaux de danger par tronçon homogène. Pour cette gamme de crue, des niveaux de dangers sont atteints mais aucun niveau n'est dépassé (probabilité de brèche ≤ 50 %).

Tableau 97. Niveaux de danger des tronçons homogènes PRG du système d'endiguement et état de dépassement pour une crue de 8500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau danger Exprimé en débit m^3/s à B/T	Etat du niveau de danger pour 8500 m^3/s à B/T
PRG 1	Trinquetaille	281.1	282.5	10 500	Non atteint
PRG 2	Cazeneuve-Augéry	282.5	287.4	9 500	
PRG 3	Beaumont –A54	287.4	288.5	14160	
PRG 4	A54 - Cavalès	288.5	294.5	8 500	Atteint
PRG 5	Cavalès - St Gilles	294.5	297.2	8 500	
PRG 6	St-Gilles - Figarès	297.2	298.2	8 500	
PRG 7	future digue résistante à la surverse (Figarès)	298.2	299.8	8 500	
PRG 8	La Galante - Albaron	299.8	306.55	8 500	
PRG 9	Albaron	306.55	307.7	14160	Non atteint
PRG 10	Albaron-Eymini	307.7	313	9 500	
PRG 11	Eymini-Sénebier	313	320.75	11 500	
PRG 12	Sénebier	320.75	322	14160	
PRG 13	Sénebier-Icard	322	329.5	11 500	
PRG 14	Mas d'Icard - Bac	329.5	330.5	11 500	
PRG 16	Bac – Mer Remblai hors système d'endiguement	330,625	337,0	Pour mémoire > 11 500 m^3/s	

Tableau 98. Niveaux de danger des tronçons homogènes GRD du système d'endiguement et état de dépassement pour une crue de 8500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau danger Exprimé en débit m^3/s à B/T	Etat du niveau de danger pour 8500 m^3/s à B/T
D1	Défluent			>> 14160	Non atteint
GRD1	Quais	281.8	283.5	>> 14160	
GRD2	Papeteries Etienne	283.5	284.15	>> 14160	
GRD3	Emmaus	284.15	285.25	>> 14160	
GRD4	Passeron-Monlong	285.25	288	>> 14160	
GRD5	Monlong	288	288.9	>> 14160	
GRD6	Montlong-Beaujeu	288.9	295.15	10 500	
GRD7	Beaujeu-l'Armelière	295.15	298.2	11 500	
GRD8	L'Armelière-la Commanderie	298.2	305.5	11 500	
GRD9	La Commanderie-Bois Verdun	305.5	309.25	11 500	
GRD10	Bois Verdun-Chartrouse	309.25	311.8	11 500	
GRD11	Chartrouse-La Louisiane	311.8	313.1	11 500	
GRD12	La Louisiane-L'Esquineau	313.1	319.4	9 500	
GRD13	L'Esquineau-Palissade	319.4	323.3	11 500	

Le fonctionnement probable à certain pour une crue de 8500 m^3/s est l'absence d'entrées d'eau en provenance du système d'endiguement.

La cartographie du fonctionnement du système, conformément au scénario n°3 de l'arrêté EDD modifié, figure en page suivante.

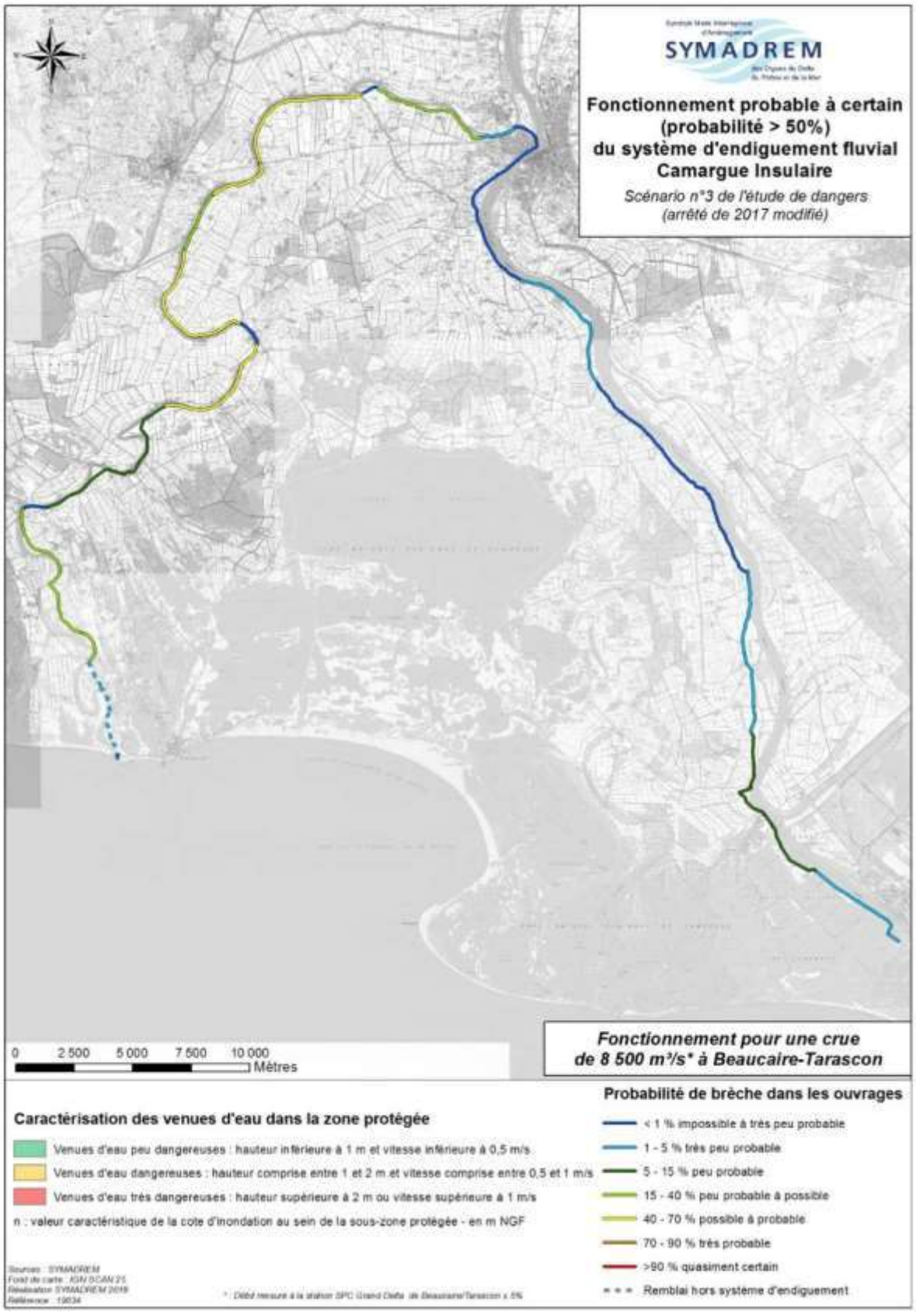


Figure 285. Scénario n°3 EDD pour une crue de 8500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

10.4 SC N°3 : FONCTIONNEMENT PROBABLE A CERTAIN POUR UNE CRUE 9500

Pour une crue, dont le débit atteint un débit de 9500 m^3/s ± 5 % à la station gérée par le service prévision des crues grand delta (cote atteinte selon la courbe de tarage en vigueur depuis le 7 décembre 2003 de 10,22 m NGF ± 10 cm) conjugué à un niveau marin de 0,95 m NGF ± 10 cm, le fonctionnement du système d'endiguement serait le suivant :

Les deux tableaux ci-après rappellent les niveaux de danger par tronçon homogène. Pour cette gamme de crue, des niveaux de dangers sur les digues du Petit Rhône sont dépassés entre l'A54 et Albaron et sont atteints en amont de l'A54 et en aval d'Albaron.

Tableau 99. Niveaux de danger des tronçons homogènes PRG du système d'endiguement et état de dépassement pour une crue de 9500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau danger Exprimé en débit m^3/s à B/T	Etat du niveau de danger pour 9500 m^3/s à B/T
PRG 1	Trinquetaille	281.1	282.5	10 500	Non atteint
PRG 2	Cazeneuve-Augéry	282.5	287.4	9 500	Atteint
PRG 3	Beaumont –A54	287.4	288.5	14160	Non atteint
PRG 4	A54 - Cavalès	288.5	294.5	8 500	Dépassé
PRG 5	Cavalès - St Gilles	294.5	297.2	8 500	
PRG 6	St-Gilles - Figarès	297.2	298.2	8 500	
PRG 7	future digue résistante à la surverse (Figarès)	298.2	299.8	8 500	
PRG 8	La Galante - Albaron	299.8	306.55	8 500	
PRG 9	Albaron	306.55	307.7	14160	Non atteint
PRG 10	Albaron-Eymini	307.7	313	9 500	Atteint
PRG 11	Eymini-Sénebier	313	320.75	11 500	Non atteint
PRG 12	Sénebier	320.75	322	14160	
PRG 13	Sénebier-Icard	322	329.5	11 500	
PRG 14	Mas d'Icard - Bac	329.5	330.5	11 500	
PRG 16	Bac – Mer Remblai hors système d'endiguement	330,625	337,0	Pour mémoire > 11 500 m^3/s	

Sur les digues du Grand Rhône, le niveau de danger est atteint au droit de Salin de Giraud.

Tableau 100. Niveaux de danger des tronçons homogènes GRD du système d'endiguement et état de dépassement pour une crue de 9500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau danger Exprimé en débit m^3/s à B/T	Etat du niveau de danger pour 9500 m^3/s à B/T
D1	Défluent			>> 14160	Non atteint
GRD1	Quais	281.8	283.5	>> 14160	
GRD2	Papeteries Etienne	283.5	284.15	>> 14160	
GRD3	Emmaus	284.15	285.25	>> 14160	
GRD4	Passeron-Monlong	285.25	288	>> 14160	
GRD5	Monlong	288	288.9	>> 14160	
GRD6	Montlong-Beaujeu	288.9	295.15	10 500	
GRD7	Beaujeu-l'Armelière	295.15	298.2	11 500	
GRD8	L'Armelière-la Commanderie	298.2	305.5	11 500	
GRD9	La Commanderie-Bois Verdun	305.5	309.25	11 500	
GRD10	Bois Verdun-Chartrouse	309.25	311.8	11 500	
GRD11	Chartrouse-La Louisiane	311.8	313.1	11 500	
GRD12	La Louisiane-L'Esquineau	313.1	319.4	9 500	Atteint
GRD13	L'Esquineau-Palissade	319.4	323.3	11 500	Non atteint

Des entrées d'eau, en provenance du système d'endiguement, doivent être prises en compte. Les scénarios d'inondation sont limités aux brèches en provenance des tronçons de digue du Petit Rhône pour lesquels le niveau de danger est dépassé. Les hypothèses de lâcher d'eau sont identiques à celles du scénario n°1.

Le tableau ci-après donne, pour les deux scénarios d'inondation retenus (Cf. chapitre 7 du présent rapport), les valeurs caractéristiques des cotes au sein des sous-zones protégées et la cote retenue pour cette gamme de crue (Cf. chapitres 6 & 7). Certaines cotes retenues sont supérieures à celles des scénarios d'inondation. Pour les ZP n°28 et n°12, aucune brèche n'a été modélisée de l'A54 au pont de Cavalès. A l'instar du scénario n°1, les résultats de la brèche en aval de Cazeneuve ont été exploités pour estimer la cote probable dans ces zones. Pour les ZP n°27, 9 et 10, il n'y a pas d'inondation directe par brèche, on est dans une inondation par remous en cas de brèche en aval de l'A54. Pour la ZP n°13, on retient la même cote que la brèche en aval de Cazeneuve.

La cartographie du fonctionnement du système, conformément au scénario n°3 de l'arrêté EDD modifié, figure à la suite des deux tableaux.

Tableau 101. Cote (en m NGF) au sein de chaque sous-zone protégée en fonction des scénarios d'inondation retenus (probabilité de brèche > 50 %) pour caractériser le fonctionnement probable à certain du système pour une crue de 9500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon et la cote globale retenue pour ce scénario de crue

Casier ZP	Cote (en m NGF) +/- 20 cm		Cote retenue
	Saliers	Figarès	
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			3,00
10			3,00
11			
12	1,75		3,75
13	1,75	1,75	2,00
14		0,5	0,50
15			
16		0,5	0,50
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			3,00
28			4,50
29	4,00	4,25	4,25
30	3,00	2,25	3,00
31	2,50	2,5	2,50
32			
33			
34			
35			
36			
37			
38			
39			
40			
41			

Le tableau ci-après donne pour les cotes retenues, la distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de

cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 102. Fonctionnement probable à certain (> 50 %) pour une crue de 9500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
1	Trinquetaille La Corrèze Gontier				
2	Trinquetaille St Genest-Le Vittier				
3	Trinquetaille Centre				
4	Trinquetaille Cazeneuve				
5	Trinquetaille les prêcheurs				
6	Trinquetaille St Antoine Billot				
7	Trinquetaille zone humide				
8	Anciennes Papeteries Etienne				
9	A54 Est	3	0	0,7	1,4
10	Gimeaux	3	0,1	1,3	1,9
11	La Grande Sacristane				
12	Clos du Mas Neuf	3,75	0,7	1,6	2,4
13	Marais du Pont de Rousty	2	0,1	1,5	2,5
14	Marais de la Grand Mar	0,5	0	0	0,4
15	Montlong				
16	Etang du Vaccarès	0,5	0	0,0	0,3
17	Armelière Sambuc Chamone				
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud				
19	Salin de Giraud				
20	Abords digue Petite Montlong Beaujeu				
21	Abords digue Beaujeau Tourtoulen				
22	Abords digue Tourtoulen Commanderie				
23	Abords digue Commanderie Boisverdun				
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane				
25	Abords digue Salin de Giraud				
26	Salins du midi sud-est				
27	Abords digue Cazeneuve - A54	3	0	0	0,5
28	Abords digue A54 Pont de Cavalès	4,5	0,5	1,6	2,2
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	4,25	0,9	2,1	2,9
30	Saliers	3	0,5	1,4	2,5
31	Marais de Saliers	2,5	0,7	1,9	2,5
32	Albaron				
33	Abords digue Albaron Sylvéréal				
34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage				
35	Amarée Dromard				

36	Panperdu Etang des Launes				
37	Etang de Ginès				
38	Saintes-Maries-de-la-Mer				
39	Paty trinité				
40	Vaccarès Est				
41	Esquineau				

La carte ci-après est la représentation graphique du tableau précédant. La carte qui suit, résulte de la cote NGF appliquée à la sous-zone protégée moins la cote NGF du terrain naturel (données source BDT IGN).

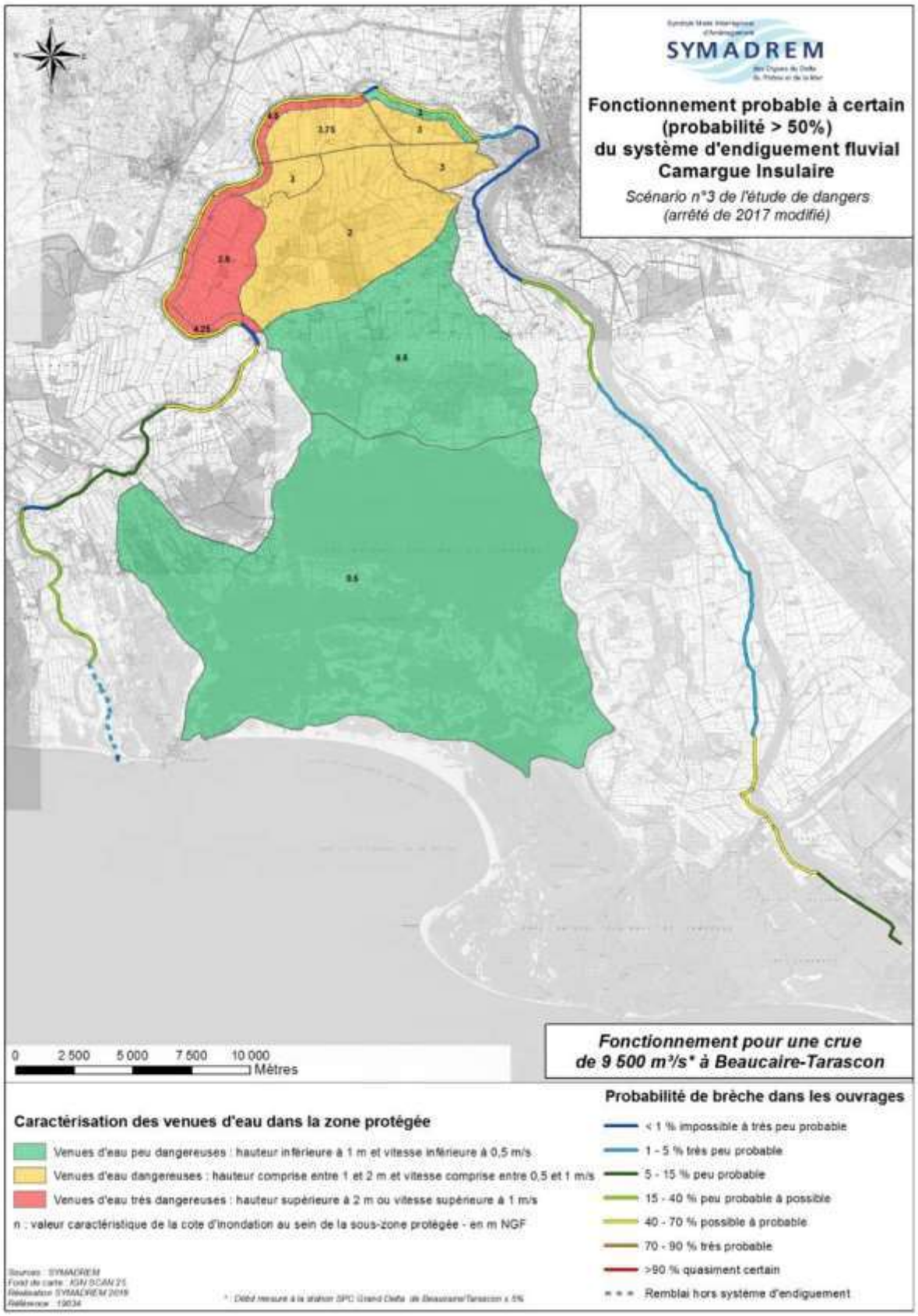


Figure 286. Scénario n°3 EDD pour une crue de 9500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

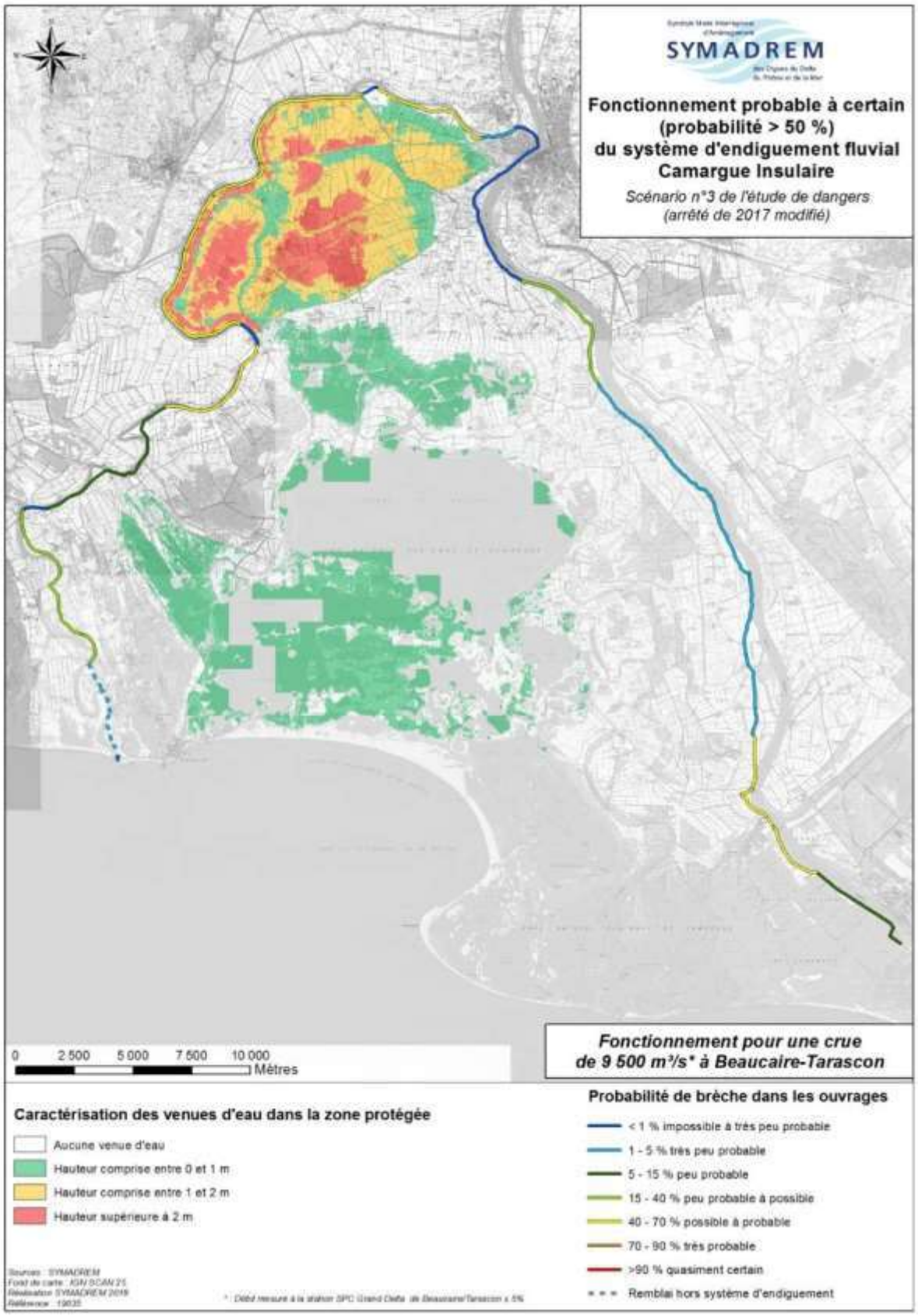


Figure 287. Scénario n°3 EDD pour une crue de 9500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon avec différentiel

10.5 SC N°3 : FONCTIONNEMENT PROBABLE A CERTAIN POUR UNE CRUE 10500

Pour une crue, dont le débit atteint un débit de 10500 m^3/s ± 5 % à la station gérée par le service prévision des crues grand delta (cote atteinte selon la courbe de tarage en vigueur depuis le 7 décembre 2003 de 10,77 m NGF ± 10 cm) conjugué à un niveau marin de 0,95 m NGF ± 10 cm, le fonctionnement du système d'endiguement serait le suivant :

Les deux tableaux ci-après rappellent les niveaux de danger par tronçon homogène. Pour cette gamme de crue, les niveaux de dangers sur les digues du Petit Rhône sont dépassés entre de l'aval de Cazeneuve à Albaron et en aval d'Albaron. Il est atteint au droit de Trinquetaille.

Tableau 103. Niveaux de danger des tronçons homogènes PRG du système d'endiguement et état de dépassement pour une crue de 10500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau danger Exprimé en débit m^3/s à B/T	Etat du niveau de danger pour 10500 m^3/s à B/T
PRG 1	Trinquetaille	281.1	282.5	10 500	Atteint
PRG 2	Cazeneuve-Augéry	282.5	287.4	9 500	Dépassé
PRG 3	Beaumont –A54	287.4	288.5	14160	Non atteint
PRG 4	A54 - Cavalès	288.5	294.5	8 500	Dépassé
PRG 5	Cavalès - St Gilles	294.5	297.2	8 500	
PRG 6	St-Gilles - Figarès	297.2	298.2	8 500	
PRG 7	future digue résistante à la surverse (Figarès)	298.2	299.8	8 500	
PRG 8	La Galante - Albaron	299.8	306.55	8 500	
PRG 9	Albaron	306.55	307.7	14160	Non atteint
PRG 10	Albaron-Eymini	307.7	313	9 500	Dépassé
PRG 11	Eymini-Sénebier	313	320.75	11 500	Non atteint
PRG 12	Sénebier	320.75	322	14160	
PRG 13	Sénebier-Icard	322	329.5	11 500	
PRG 14	Mas d'Icard - Bac	329.5	330.5	11 500	
PRG 16	Bac – Mer Remblai hors système d'endiguement	330,625	337,0	Pour mémoire > 11 500 m^3/s	

Sur les digues du Grand Rhône, le niveau de danger est dépassé au droit de Salin de Giraud et atteint en aval de Montlong.

Tableau 104. Niveaux de danger des tronçons homogènes GRD du système d'endiguement et état de dépassement pour une crue de 10500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau danger Exprimé en débit m^3/s à B/T	Etat du niveau de danger pour 10500 m^3/s à B/T
D1	Défluent			>> 14160	
GRD1	Quais	281.8	283.5	>> 14160	
GRD2	Papeteries Etienne	283.5	284.15	>> 14160	
GRD3	Emmaus	284.15	285.25	>> 14160	
GRD4	Passeron-Monlong	285.25	288	>> 14160	
GRD5	Monlong	288	288.9	>> 14160	
GRD6	Montlong-Beaujeu	288.9	295.15	10 500	Atteint
GRD7	Beaujeu-l'Armelière	295.15	298.2	11 500	
GRD8	L'Armelière-la Commanderie	298.2	305.5	11 500	
GRD9	La Commanderie-Bois Verdun	305.5	309.25	11 500	
GRD10	Bois Verdun-Chartrouse	309.25	311.8	11 500	
GRD11	Chartrouse-La Louisiane	311.8	313.1	11 500	
GRD12	La Louisiane-L'Esquineau	313.1	319.4	9 500	Dépassé
GRD13	L'Esquineau-Palissade	319.4	323.3	11 500	

Des entrées d'eau, en provenance du système d'endiguement, doivent être prises en compte. Les scénarios d'inondation sont limités aux brèches en provenance des tronçons de digue du Petit Rhône et du grand Rhône pour lesquels le niveau de danger est dépassé. Les hypothèses de lâcher d'eau sont identiques à celles du scénario n°1.

Le tableau ci-après donne, pour les cinq scénarios d'inondation retenus, les valeurs caractéristiques des cotes au sein des sous-zones protégées et la cote retenue pour cette gamme de crue (Cf. chapitres 6 & 7). Certaines cotes retenues sont supérieures à celles des scénarios d'inondation. Pour les ZP n°12, 27 et 28, aucune brèche n'a été modélisée de l'A54 au pont de Cavalès. A l'instar du scénario n°1, les résultats de la brèche en aval de Cazeneuve ont été exploités pour estimer la cote probable dans ces zones. Pour la ZP n°19 (salin), la modélisation a été faite sans brèche. Il a été pris en compte les 3 brèches modélisées pour la crue 11500 en tenant compte du fait que la charge serait 25 cm plus faible pour cette gamme de crue.

La cartographie du fonctionnement du système, conformément au scénario n°3 de l'arrêté EDD modifié, figure à la suite des deux tableaux.

Tableau 105. Cote (en m NGF) au sein de chaque sous-zone protégée en fonction des scénarios d'inondation retenus (probabilité de brèche > 50 %) pour caractériser le fonctionnement probable à certain du système pour une crue de 10 500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon et la cote globale retenue pour ce scénario de crue

Casier ZP	Cote (en m NGF) +/- 20 cm					Cote retenue
	Aval Cazeneuve	Saliers	Figarès	Aval Albaron	Sans brèche salin	
1						
2						
3						
4	5,00					5,00
5	5,00					5,00
6	4,00					4,00
7						
8						
9	4,75					4,75
10	3,00	1,75				3,00
11						
12	3,50	2,25	2,25			4,25
13	2,00	2,00	1,75	0,50		2,00
14	1,25	1,50	1,25	1,50		1,50
15						
16	0,50	0,75	1,00	1,00		1,00
17					2,25	2,25
18					1,25	1,25
19					1,50	1,75
20						
21						
22						
23						
24					3,00	3,00
25					2,75	2,75
26					1,75	1,75
27	5,00					5,25
28	3,50					4,75
29	2,50	4,00	4,50			4,50
30	2,50	3,25	2,25			3,25
31	1,00	2,50	2,50	1,50		2,50
32				3,50		3,50
33				4,00		4,00
34						
35						
36						
37				0,50		0,50
38						
39	1,25	1,00	1,25	2,00		2,00
40					1,25	1,25
41					1,50	1,50

Le tableau ci-après donne pour les cotes retenues, la distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de

cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 106. Fonctionnement probable à certain (> 50 %) pour une crue de 10500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
1	Trinquetaille La Corrèze Gontier				
2	Trinquetaille St Genest-Le Vittier				
3	Trinquetaille Centre				
4	Trinquetaille Cazeneuve	5	0	0,8	1,2
5	Trinquetaille les prêcheurs	5	0	1,1	1,5
6	Trinquetaille St Antoine Billot	4	0	0,5	1,0
7	Trinquetaille zone humide				
8	Anciennes Papeteries Etienne				
9	A54 Est	4,75	1,2	2,4	3,2
10	Gimeaux	3	0,1	1,3	1,9
11	La Grande Sacristane				
12	Clos du Mas Neuf	4,25	1,2	2,1	2,9
13	Marais du Pont de Rousty	2	0,1	1,5	2,5
14	Marais de la Grand Mar	1,5	0	0,6	1,4
15	Montlong				
16	Etang du Vaccarès	1	0	0,5	0,8
17	Armelière Sambuc Chamone	2,25	0	0,7	1,5
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	1,25	0,1	0,6	1,1
19	Salin de Giraud	1,75	0,1	0,6	1,1
20	Abords digue Petite Montlong Beaujeu				
21	Abords digue Beaujeau Tourtoulen				
22	Abords digue Tourtoulen Commanderie				
23	Abords digue Commanderie Boisverdun				
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	3	0,8	1,5	2,1
25	Abords digue Salin de Giraud	2,75	0,5	1,4	2,2
26	Salins du midi sud-est	1,75	0,5	1,0	1,5
27	Abords digue Cazeneuve - A54	5,25	0,8	2,0	2,7
28	Abords digue A54 Pont de Cavalès	4,75	0,7	1,9	2,5
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	4,5	1,1	2,4	3,2
30	Saliers	3,25	0,7	1,6	2,8
31	Marais de Saliers	2,5	0,7	1,9	2,5
32	Albaron	3,5	0	0,7	1,3
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	4	1,4	2,5	3,6
34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage				

35	Amarée Dromard				
36	Panperdu Etang des Launes				
37	Etang de Ginès	0,5	**0**	**0,3**	**0,4**
38	Saintes-Maries-de-la-Mer				
39	Paty trinité	2	**0,5**	**1,4**	**1,9**
40	Vaccarès Est	1,25	**0**	**0,5**	**0,9**
41	Esquineau	1,5	**0**	**0,7**	**1,2**

La carte ci-après est la représentation graphique du tableau précédant. La carte qui suit, résulte de la cote NGF appliquée à la sous-zone protégée moins la cote NGF du terrain naturel (données source BDT IGN).

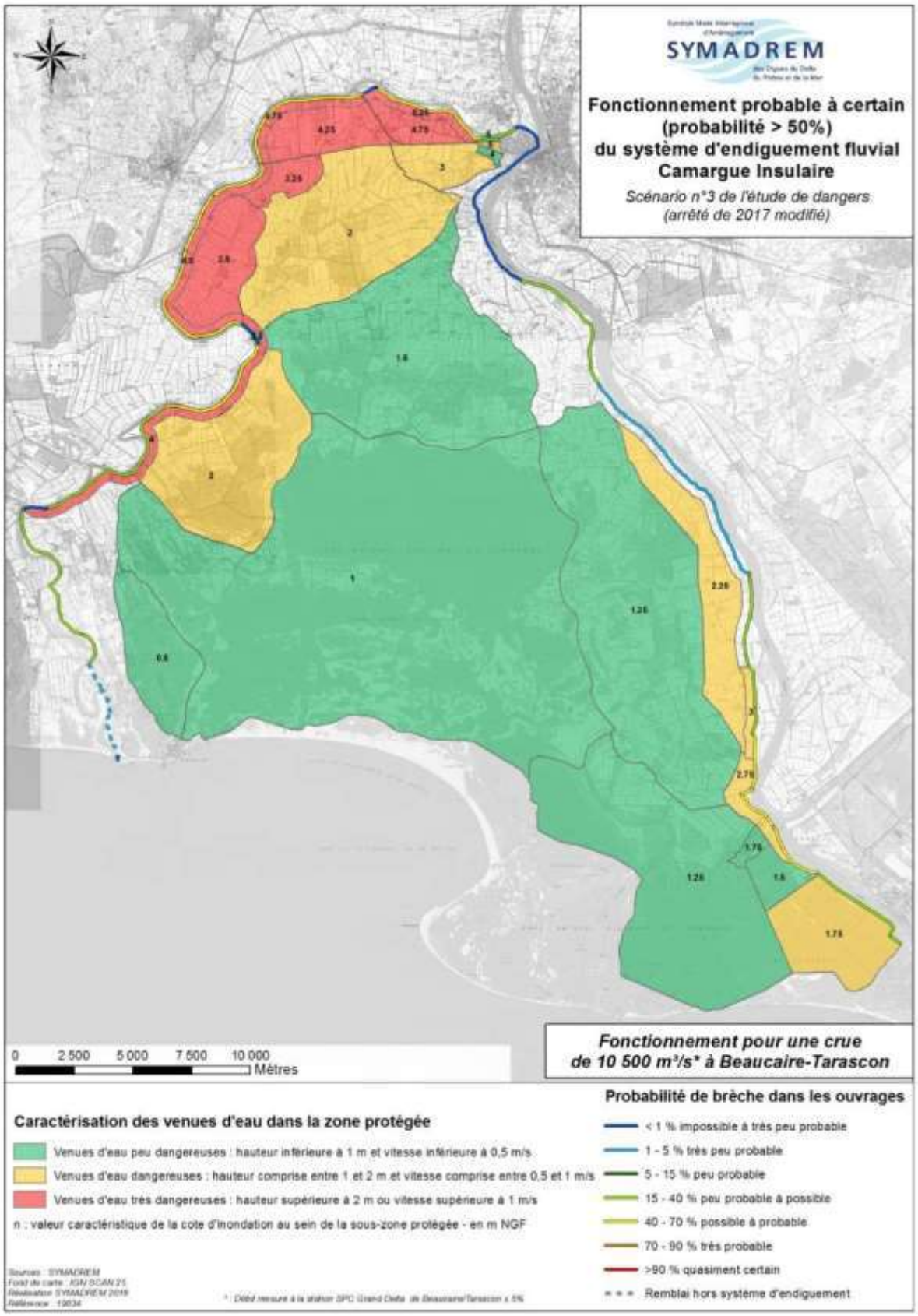


Figure 288. Scénario n°3 EDD pour une crue de 10500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

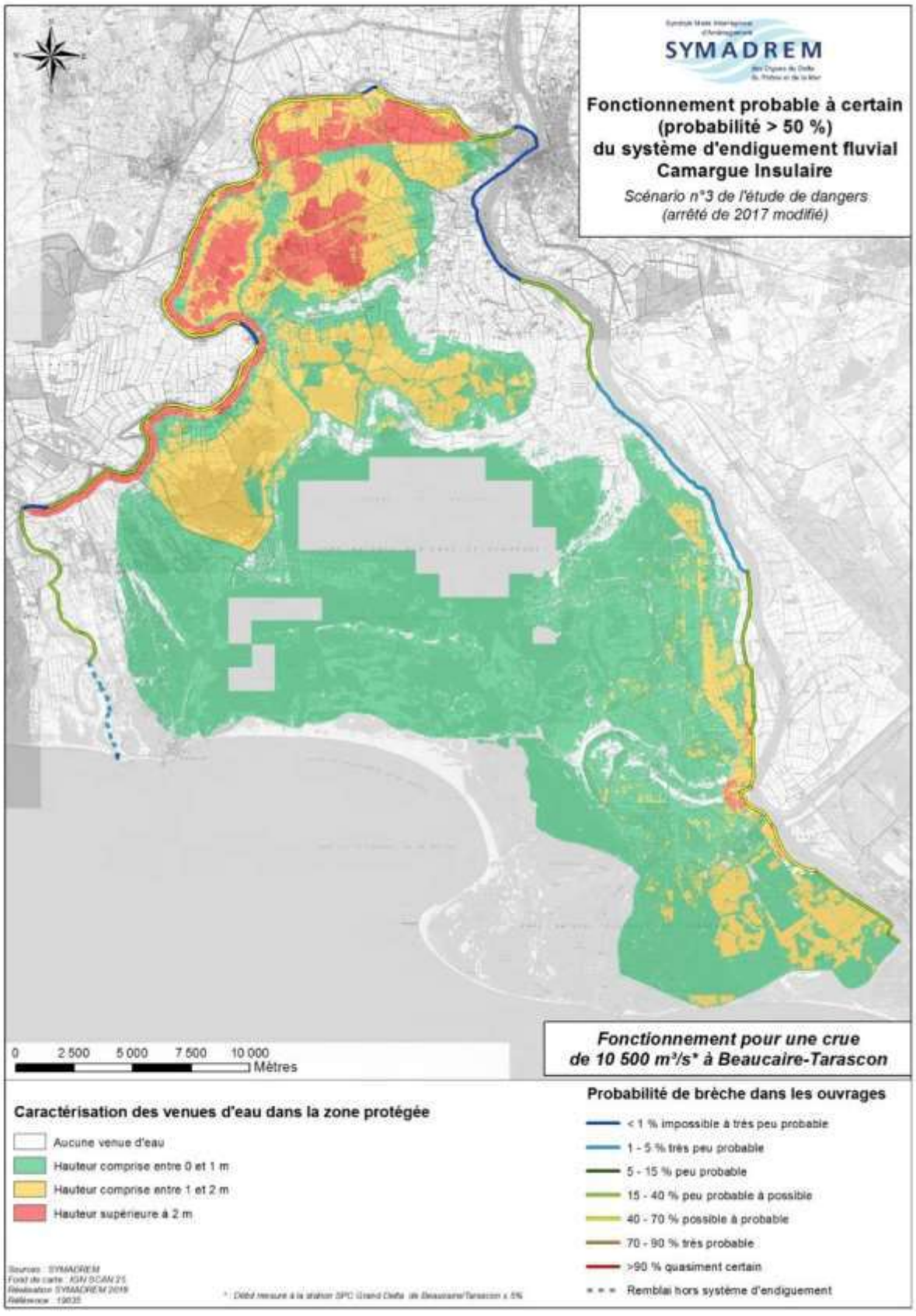


Figure 289. Scénario n°3 EDD pour une crue de 10500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon avec différentiel

10.6 SC N°3 : FONCTIONNEMENT PROBABLE A CERTAIN POUR UNE CRUE 11500

Pour une crue, dont le débit atteint un débit de 11500 m^3/s ± 5 % à la station gérée par le service prévision des crues grand delta (cote atteinte selon la courbe de tarage en vigueur depuis le 7 décembre 2003 de 11,30 m NGF ± 10 cm) conjugué à un niveau marin de 0,98 m NGF ± 10 cm, le fonctionnement du système d'endiguement serait le suivant :

Les deux tableaux ci-après rappellent les niveaux de danger par tronçon homogène. Pour cette gamme de crue, les niveaux de dangers sur les digues du petit Rhône sont dépassés de Trinquetaille à Eymini, à l'exception de la digue au droit d'Albaron et tronçons localisés. En aval d'Eymini, les niveaux de dangers sont atteints.

Tableau 107. Niveaux de danger des tronçons homogènes PRG du système d'endiguement et état de dépassement pour une crue de 11500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau danger Exprimé en débit m^3/s à B/T	Etat du niveau de danger pour 11500 m^3/s à B/T
PRG 1	Trinquetaille	281.1	282.5	10 500	Dépassé
PRG 2	Cazeneuve-Augéry	282.5	287.4	9 500	
PRG 3	Beaumont –A54	287.4	288.5	14160	Non atteint
PRG 4	A54 - Cavalès	288.5	294.5	8 500	Dépassé
PRG 5	Cavalès - St Gilles	294.5	297.2	8 500	
PRG 6	St-Gilles - Figarès	297.2	298.2	8 500	
PRG 7	future digue résistante à la surverse (Figarès)	298.2	299.8	8 500	
PRG 8	La Galante - Albaron	299.8	306.55	8 500	
PRG 9	Albaron	306.55	307.7	14160	Non atteint
PRG 10	Albaron-Eymini	307.7	313	9 500	Dépassé
PRG 11	Eymini-Sénebier	313	320.75	11 500	Atteint
PRG 12	Sénebier	320.75	322	14160	Non atteint
PRG 13	Sénebier-Icard	322	329.5	11 500	Atteint
PRG 14	Mas d'Icard - Bac	329.5	330.5	11 500	
PRG 16	Bac – Mer Remblai hors système d'endiguement	330,625	337,0	Pour mémoire > 11 500 m^3/s	

En amont de Montlong, les niveaux de danger sont non atteints. En aval, ils sont dépassés juste en aval de Montlong et au droit de Salin de Giraud. Ils sont atteints sur les autres tronçons.

Tableau 108. Niveaux de danger des tronçons homogènes GRD du système d'endiguement et état de dépassement pour une crue de 11500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau danger Exprimé en débit m^3/s à B/T	Etat du niveau de danger pour 11500 m^3/s à B/T
D1	Défluent			>> 14160	Non atteint
GRD1	Quais	281.8	283.5	>> 14160	
GRD2	Papeteries Etienne	283.5	284.15	>> 14160	
GRD3	Emmaus	284.15	285.25	>> 14160	
GRD4	Passeron-Monlong	285.25	288	>> 14160	
GRD5	Monlong	288	288.9	>> 14160	
GRD6	Montlong-Beaujeu	288.9	295.15	10 500	Dépassé
GRD7	Beaujeu-l'Armelière	295.15	298.2	11 500	Atteint
GRD8	L'Armelière-la Commanderie	298.2	305.5	11 500	
GRD9	La Commanderie-Bois Verdun	305.5	309.25	11 500	
GRD10	Bois Verdun-Chartrouse	309.25	311.8	11 500	
GRD11	Chartrouse-La Louisiane	311.8	313.1	11 500	
GRD12	La Louisiane-L'Esquineau	313.1	319.4	9 500	Dépassé
GRD13	L'Esquineau-Palissade	319.4	323.3	11 500	Atteint

Des entrées d'eau, en provenance du système d'endiguement, doivent être prises en compte. Les scénarios d'inondation sont limités aux brèches en provenance des tronçons de digue du Petit Rhône et du grand Rhône pour lesquels le niveau de danger est dépassé. Les hypothèses de lâcher d'eau sont identiques à celles du scénario n°1.

Le tableau ci-après donne, pour les onze scénarios d'inondation retenus, les valeurs caractéristiques des cotes au sein des sous-zones protégées et la cote retenue pour cette gamme de crue (Cf. chapitres 6 & 7). Certaines cotes retenues sont supérieures à celles des scénarios d'inondation. Pour les ZP n°12, 27 et 28, aucune brèche n'a été modélisée de l'A54 au pont de Cavalès. A l'instar du scénario n°1, les résultats de la brèche en aval de Cazeneuve ont été exploités pour estimer la cote probable dans ces zones. Pour les ZP n°21 et 22, il a été envisagé la possibilité d'inondation par remous. Les cotes ont été déterminées en fonction des cotes dans les zones situées à proximité. Pour la zone 34, c'est le profil de brèche (§6.16.) qui a été exploitée pour définir la cote.

La cartographie du fonctionnement du système, conformément au scénario n°3 de l'arrêté EDD modifié, figure à la suite des deux tableaux.

Tableau 109. Cote (en m NGF) au sein de chaque sous-zone protégée en fonction des scénarios d'inondation retenus (probabilité de brèche > 50 %) pour caractériser le fonctionnement probable à certain du système pour une crue de 11 500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon et la cote globale retenue pour ce scénario de crue

Casier ZP	Cote (en m NGF) +/- 20 cm											Cote retenue
	Amont Cazeneuve	Aval Cazeneuve	Saliers	Figarès	Aval Albaron	Montlong	Augery	Amérique	Barcarin	Esquineau	Surverse	
1	7,50											7,50
2	7,00											7,00
3												
4	7,50	5,25										7,50
5	7,00	5,25										7,00
6	5,50	4,00										5,50
7	5,50											5,50
8	4,75											4,75
9	3,25	4,75										4,75
10	4,50	3,25	1,75	2,25		1,75						4,50
11	4,50											4,50
12	2,75	3,50	2,50	2,50	2,00	2,00	2,00					4,25
13	2,25	2,25	2,50	2,25	1,00	2,00	1,25					2,50
14	1,25	1,50	1,75	1,75	1,75	3,00	2,50					3,00
15						5,00	4,25					5,00
16	0,75	0,50	1,00	0,75	1,00	1,00	1,00					1,00
17							2,00	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25
18								1,25	1,50	1,50	1,25	1,50
19								1,75	2,00	1,75	1,50	2,00
20						5,50	4,75					5,50
21						3,25	3,75					3,75
22												2,25
23												2,75
24								2,75	3,00	3,00	3,00	3,00
25								3,00	3,00	2,75	2,75	3,00
26								1,50	1,50	1,75	1,75	1,75
27	4,00	5,00										5,50
28		3,50										5,00
29	1,75	1,75	4,50	4,75		2,00	1,25					4,75
30	2,25	2,50	3,50	2,50		2,00	1,25					3,50
31	1,75	1,75	2,75	2,75	1,50	2,00	1,25					2,75
32					3,75							3,75
33					4,00	2,00	1,75					4,25
34						0,75						0,75
35						0,75	0,75					0,75
36				0,75	1,00	1,00	0,75					1,00
37				0,75	1,00	1,00	1,00					1,00
38						1,25	1,25					1,25
39	1,00	1,00	1,25	1,00	2,00	1,75	1,75					2,00
40						1,00	2,00	1,50	1,50	1,50	1,50	2,00
41								1,50	1,75	1,50	1,50	1,75

Le tableau ci-après donne pour les cotes retenues, la distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la

sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau. Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 110. Fonctionnement probable à certain (> 50 %) pour une crue de 11500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
1	Trinquetaille La Corrèze Gontier	7,50	0,6	2,9	3,5
2	Trinquetaille St Genest-Le Vittier	7,00	0	2,7	3,3
3	Trinquetaille Centre				
4	Trinquetaille Cazeneuve	7,50	0,1	3,3	3,7
5	Trinquetaille les prêcheurs	7,00	1,5	3,1	3,5
6	Trinquetaille St Antoine Billot	5,50	1,1	2,0	2,5
7	Trinquetaille zone humide	5,50	0	1,5	2,1
8	Anciennes Papeteries Etienne	4,75	0	0,1	0,6
9	A54 Est	4,75	1,2	2,4	3,2
10	Gimeaux	4,50	1,6	2,8	3,4
11	La Grande Sacristane	4,50	0,0	1,1	2,0
12	Clos du Mas Neuf	4,25	1,2	2,1	2,9
13	Marais du Pont de Rousty	2,50	0,6	2,0	3,0
14	Marais de la Grand Mar	3,00	0,2	2,1	2,9
15	Montlong	5,00	1,4	2,2	3,2
16	Etang du Vaccarès	1,00	0	0,5	0,8
17	Armelière Sambuc Chamone	2,25	0	0,7	1,5
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	1,50	0,3	0,9	1,4
19	Salin de Giraud	2,00	0,3	0,8	1,4
20	Abords digue Petite Montlong Beaujeu	5,50	1,6	2,4	3,1
21	Abords digue Beaujeau Tourtoulen	3,75	0	1,0	1,4
22	Abords digue Tourtoulen Commanderie	2,25	0	0	0,3
23	Abords digue Commanderie Boisverdun	2,75	0,2	0,9	1,7
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	3,00	0,8	1,5	2,1
25	Abords digue Salin de Giraud	3,00	0,8	1,7	2,5
26	Salins du midi sud-est	1,75	0,5	1,0	1,5
27	Abords digue Cazeneuve - A54	5,50	1,0	2,2	3,0
28	Abords digue A54 Pont de Cavalès	5,00	1,0	2,1	2,7
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	4,75	1,4	2,6	3,4
30	Saliers	3,50	1,0	1,9	3,0
31	Marais de Saliers	2,75	1,0	2,2	2,8
32	Albaron	3,75	0	0,9	1,6
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	4,25	1,7	2,8	3,8
34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage	0,75	0	0	0,4
35	Amarée Dromard	0,75	0	0,3	0,7

36	Panperdu Etang des Launes	1,00	**0**	**0,4**	**0,9**
37	Etang de Ginès	1,00	**0,1**	**0,8**	**0,9**
38	Saintes-Maries-de-la-Mer	1,25	**0**	**0,1**	**0,5**
39	Paty trinité	2,00	**0,5**	**1,4**	**1,9**
40	Vaccarès Est	2,00	**0,1**	**1,2**	**1,7**
41	Esquineau	1,75	**0**	**1,0**	**1,4**

La carte ci-après est la représentation graphique du tableau précédant. La carte qui suit, résulte de la cote NGF appliquée à la sous-zone protégée moins la cote NGF du terrain naturel (données source BDT IGN).

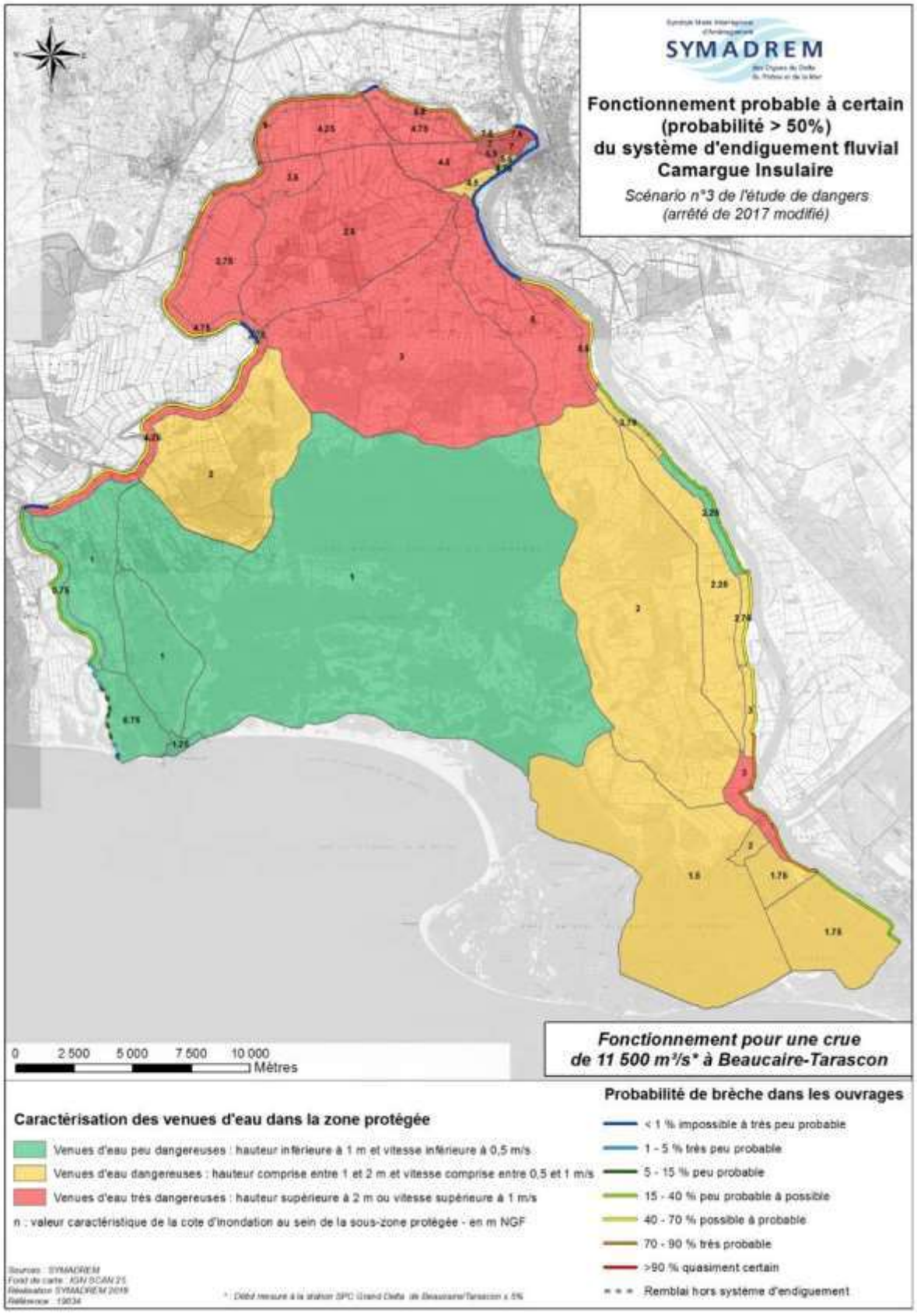


Figure 290. Scénario n°3 EDD pour une crue de 11500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

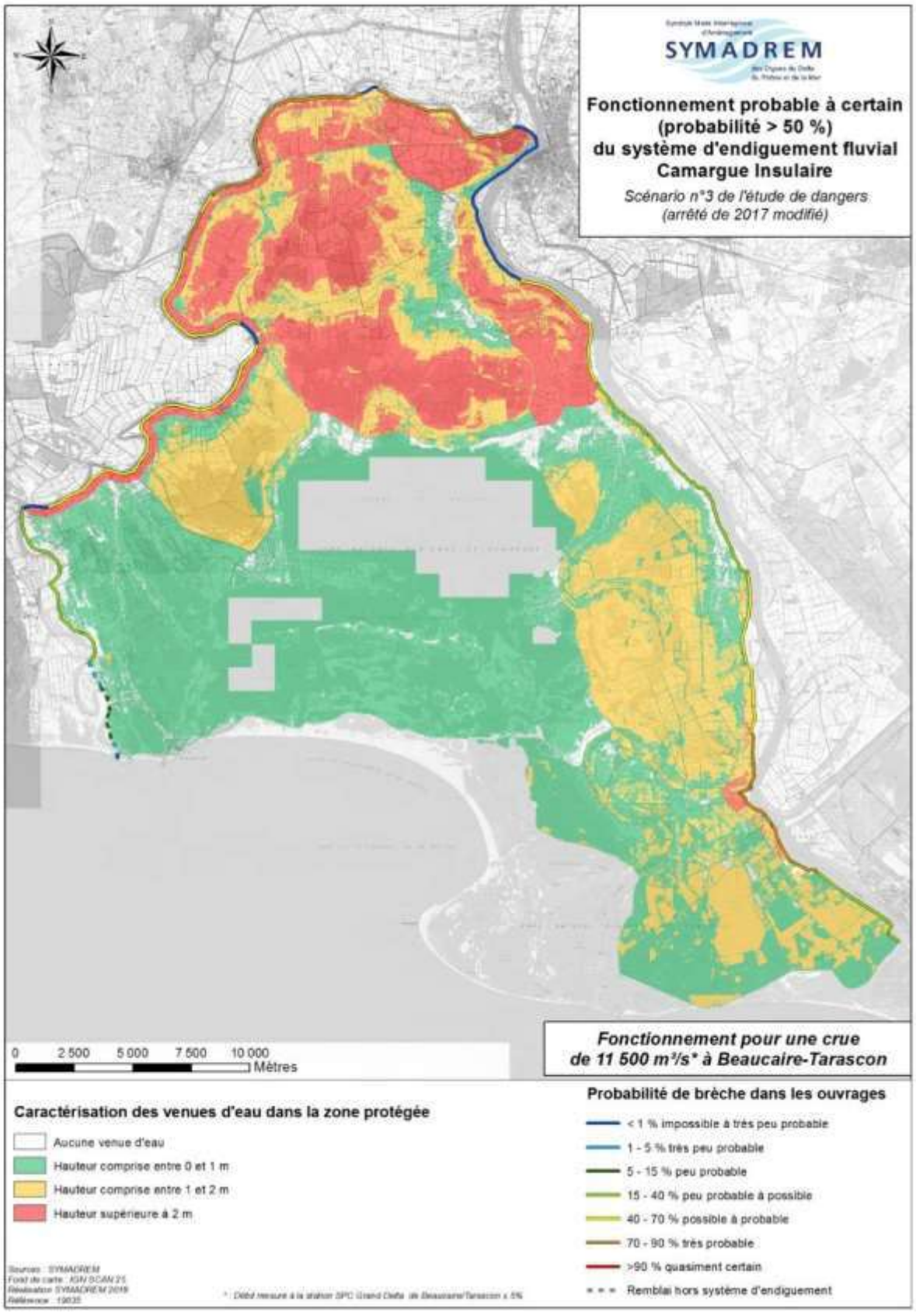


Figure 291. Scénario n°3 EDD pour une crue de 11500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon avec différentiel

10.7 SC N°3 : FONCTIONNEMENT PROBABLE A CERTAIN POUR UNE CRUE 12500

Pour une crue, dont le débit atteint un débit de 12500 m^3/s ± 5 % à la station gérée par le service prévision des crues grand delta (cote atteinte ne peut être donnée du fait de la non validité de la courbe de tarage en vigueur depuis le 7 décembre 2003 pour cette gamme de débit) conjugué à un niveau marin de 1,30 m NGF ± 10 cm, le fonctionnement du système d'endiguement serait le suivant :

Les deux tableaux ci-après rappellent les niveaux de danger par tronçon homogène. Pour cette gamme de crue, les niveaux de dangers sur les digues du petit Rhône sont dépassés de Trinquetaille à la Mer, à l'exception de la digue au droit d'Albaron et de tronçons localisés.

Tableau 111. Niveaux de danger des tronçons homogènes PRG du système d'endiguement et état de dépassement pour une crue de 12500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau danger Exprimé en débit m^3/s à B/T	Etat du niveau de danger pour 12500 m^3/s à B/T
PRG 1	Trinquetaille	281.1	282.5	10 500	Dépassé
PRG 2	Cazeneuve-Augéry	282.5	287.4	9 500	
PRG 3	Beaumont –A54	287.4	288.5	14160	Non atteint
PRG 4	A54 - Cavalès	288.5	294.5	8 500	Dépassé
PRG 5	Cavalès - St Gilles	294.5	297.2	8 500	
PRG 6	St-Gilles - Figarès	297.2	298.2	8 500	
PRG 7	future digue résistante à la surverse (Figarès)	298.2	299.8	8 500	
PRG 8	La Galante - Albaron	299.8	306.55	8 500	
PRG 9	Albaron	306.55	307.7	14160	Non atteint
PRG 10	Albaron-Eymini	307.7	313	9 500	Dépassé
PRG 11	Eymini-Sénebier	313	320.75	11 500	Dépassé
PRG 12	Sénebier	320.75	322	14160	Non atteint
PRG 13	Sénebier-Icard	322	329.5	11 500	Dépassé
PRG 14	Mas d'Icard - Bac	329.5	330.5	11 500	
PRG 16	Bac – Mer Remblai hors système d'endiguement	330,625	337,0	Pour mémoire > 11 500 m^3/s	

En amont de Montlong, les niveaux de danger sont non atteints. En aval, ils sont dépassés jusqu'à la mer

Tableau 112. Niveaux de danger des tronçons homogènes GRD du système d'endiguement et état de dépassement pour une crue de 12500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau danger Exprimé en débit m^3/s à B/T	Etat du niveau de danger pour 12500 m^3/s à B/T
D1	Défluent			>> 14160	Non atteint
GRD1	Quais	281.8	283.5	>> 14160	
GRD2	Papeteries Etienne	283.5	284.15	>> 14160	
GRD3	Emmaus	284.15	285.25	>> 14160	
GRD4	Passeron-Monlong	285.25	288	>> 14160	
GRD5	Monlong	288	288.9	>> 14160	
GRD6	Montlong-Beaujeu	288.9	295.15	10 500	Dépassé
GRD7	Beaujeu-l'Armelière	295.15	298.2	11 500	
GRD8	L'Armelière-la Commanderie	298.2	305.5	11 500	
GRD9	La Commanderie-Bois Verdun	305.5	309.25	11 500	
GRD10	Bois Verdun-Chartrouse	309.25	311.8	11 500	
GRD11	Chartrouse-La Louisiane	311.8	313.1	11 500	
GRD12	La Louisiane-L'Esquineau	313.1	319.4	9 500	
GRD13	L'Esquineau-Palissade	319.4	323.3	11 500	

Des entrées d'eau, en provenance du système d'endiguement, doivent être prises en compte. Les scénarios d'inondation sont limités aux brèches en provenance des tronçons de digue du Petit Rhône et du grand Rhône pour lesquels le niveau de danger est dépassé. Les hypothèses de lâcher d'eau sont identiques à celles du scénario n°1.

Le tableau ci-après donne, pour les onze scénarios d'inondation retenus, les valeurs caractéristiques des cotes au sein des sous-zones protégées et la cote retenue pour cette gamme de crue (Cf. chapitres 6 & 7). Ces cotes sont identiques à celles retenues pour le scénario n°1. On se reportera au chapitre 8 pour les justifications

La cartographie du fonctionnement du système, conformément au scénario n°3 de l'arrêté EDD modifié, figure à la suite des deux tableaux.

Tableau 113. Cote (en m NGF) au sein de chaque sous-zone protégée en fonction des scénarios d'inondation retenus (probabilité de brèche > 50 %) pour caractériser le fonctionnement probable à certain du système pour une crue de 12 500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon et la cote globale retenue pour ce scénario de crue

Casier ZP	Cote (en m NGF) +/- 20 cm											Cote retenue
	Amont Cazeneuve	Aval Cazeneuve	Figarès	Aval Albaron	Montlong	Augery	Boisverdun	Amérique	Barcarin	Esquineau	Surverse	
1	7,50											7,5
2	7,00											7
3												
4	7,50	5,25										7,5
5	7,00	5,25										7
6	5,50	4,00										5,5
7	5,50											5,5
8	4,75											4,75
9	3,25	4,75			2,50							4,75
10	4,50	3,25	2,25		2,75	2,25						4,5
11	4,50	3,00			4,25							4,5
12	2,75	3,75	2,25	2,00	2,75	2,25	1,75					4,25
13	2,25	2,75	2,25	1,50	2,75	2,25	1,75					2,75
14	2,00	2,25	1,5	2,00	3,25	3,00	1,75					3,25
15					5,25	4,75						5,25
16	1,00	1,25	0,75	1,25	2,25	2,00	1,75	1,25				2,25
17					2,25	2,00	3,50	2,25	2,25	2,25	2,25	3,5
18		1,25		1,25	1,75	1,75	2,00	1,50	1,75	1,50	1,50	2
19					1,75	1,75	2,00	1,75	2,00	1,75	1,75	2
20					6,00	5,00						6
21					3,50	4,00	2,50					4
22							3,25					3,75
23					2,25	2,00	3,75					3,75
24					2,25	2,00	3,50	2,75	3,00	3,00	3,00	3,5
25					2,00	1,75	2,25	3,00	3,00	2,75	2,75	3
26					1,75	1,75	2,00	1,50	1,50	1,75	1,50	2
27	4,00	5,00										5,75
28		3,50			2,75							5,5
29	2,25	2,50	4,75		2,75	2,25	1,75					4,75
30	2,50	2,75	2,5		2,75	2,25	1,75					3,75
31	2,25	2,50	2,75	1,50	2,75	2,25	1,75					2,75
32				3,75	2,75							3,75
33	2,00	1,75		4,00	2,25	2,25	1,75					4,25
34	0,75	1,25			2,25	2,00	1,75					2,25
35	0,75	1,25			2,25	2,00	1,75					2,25
36	1,00	1,25	0,5	1,25	2,25	2,00	1,75					2,25
37	1,00	1,25	0,5	1,25	2,25	2,00	1,75					2,25
38	1,25	1,50		1,25	2,25	2,00	1,75					2,25
39	1,50	1,75		2,00	2,25	2,25	1,75					2,25
40	1,25	1,25	1	1,25	2,25	2,50	2,50	1,75	1,50	1,50	1,50	2,5
41			0,25		1,75	1,75	2,00	1,50	1,75	1,75	1,50	2

Le tableau ci-après donne pour les cotes retenues, la distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau.

Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 114. Fonctionnement probable à certain (> 50 %) pour une crue de 12500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
1	Trinquetaille La Corrèze Gontier	7,5	0,6	2,9	3,5
2	Trinquetaille St Genest-Le Vittier	7	0	2,7	3,3
3	Trinquetaille Centre				
4	Trinquetaille Cazeneuve	7,5	0,1	3,3	3,7
5	Trinquetaille les prêcheurs	7	1,5	3,1	3,5
6	Trinquetaille St Antoine Billot	5,5	1,1	2,0	2,5
7	Trinquetaille zone humide	5,5	0	1,5	2,1
8	Anciennes Papeteries Etienne	4,75	0	0,1	0,6
9	A54 Est	4,75	1,2	2,4	3,2
10	Gimeaux	4,5	1,6	2,8	3,4
11	La Grande Sacristane	4,5	0,0	1,1	2,0
12	Clos du Mas Neuf	4,25	1,2	2,1	2,9
13	Marais du Pont de Rousty	2,75	0,9	2,2	3,2
14	Marais de la Grand Mar	3,25	0,4	2,3	3,1
15	Montlong	5,25	1,6	2,5	3,4
16	Etang du Vaccarès	2,25	1,1	1,7	2,1
17	Armelière Sambuc Chamone	3,5	1,0	2,0	2,8
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	2	0,8	1,4	1,9
19	Salin de Giraud	2	0,3	0,8	1,4
20	Abords digue Petite Montlong Beaujeu	6	2,1	2,9	3,6
21	Abords digue Beaujeau Tourtoulen	4	0	1,2	1,7
22	Abords digue Tourtoulen Commanderie	3,75	0,0	1,2	1,8
23	Abords digue Commanderie Boisverdun	3,75	1,2	1,9	2,7
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	3,5	1,3	2,0	2,6
25	Abords digue Salin de Giraud	3	0,8	1,7	2,5
26	Salins du midi sud-est	2	0,8	1,3	1,8
27	Abords digue Cazeneuve - A54	5,75	1,3	2,5	3,2
28	Abords digue A54 Pont de Cavalès	5,5	1,5	2,6	3,2
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	4,75	1,4	2,6	3,4
30	Saliers	3,75	1,2	2,1	3,3
31	Marais de Saliers	2,75	1,0	2,2	2,8
32	Albaron	3,75	0	0,9	1,6
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	4,25	1,7	2,8	3,8
34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage	2,25	0,6	1,3	1,9
35	Amarée Dromard	2,25	1,2	1,8	2,2
36	Panperdu Etang des Launes	2,25	1,0	1,6	2,2
37	Etang de Ginès	2,25	1,4	2,1	2,2

38	Saintes-Maries-de-la-Mer	2,25	**0,4**	**1,1**	**1,5**
39	Paty trinité	2,25	**0,7**	**1,7**	**2,2**
40	Vaccarès Est	2,5	**0,6**	**1,7**	**2,2**
41	Esquineau	2	**-0**	**1,2**	**1,7**

La carte ci-après est la représentation graphique du tableau précédant. La carte qui suit, résulte de la cote NGF appliquée à la sous-zone protégée moins la cote NGF du terrain naturel (données source BDT IGN).

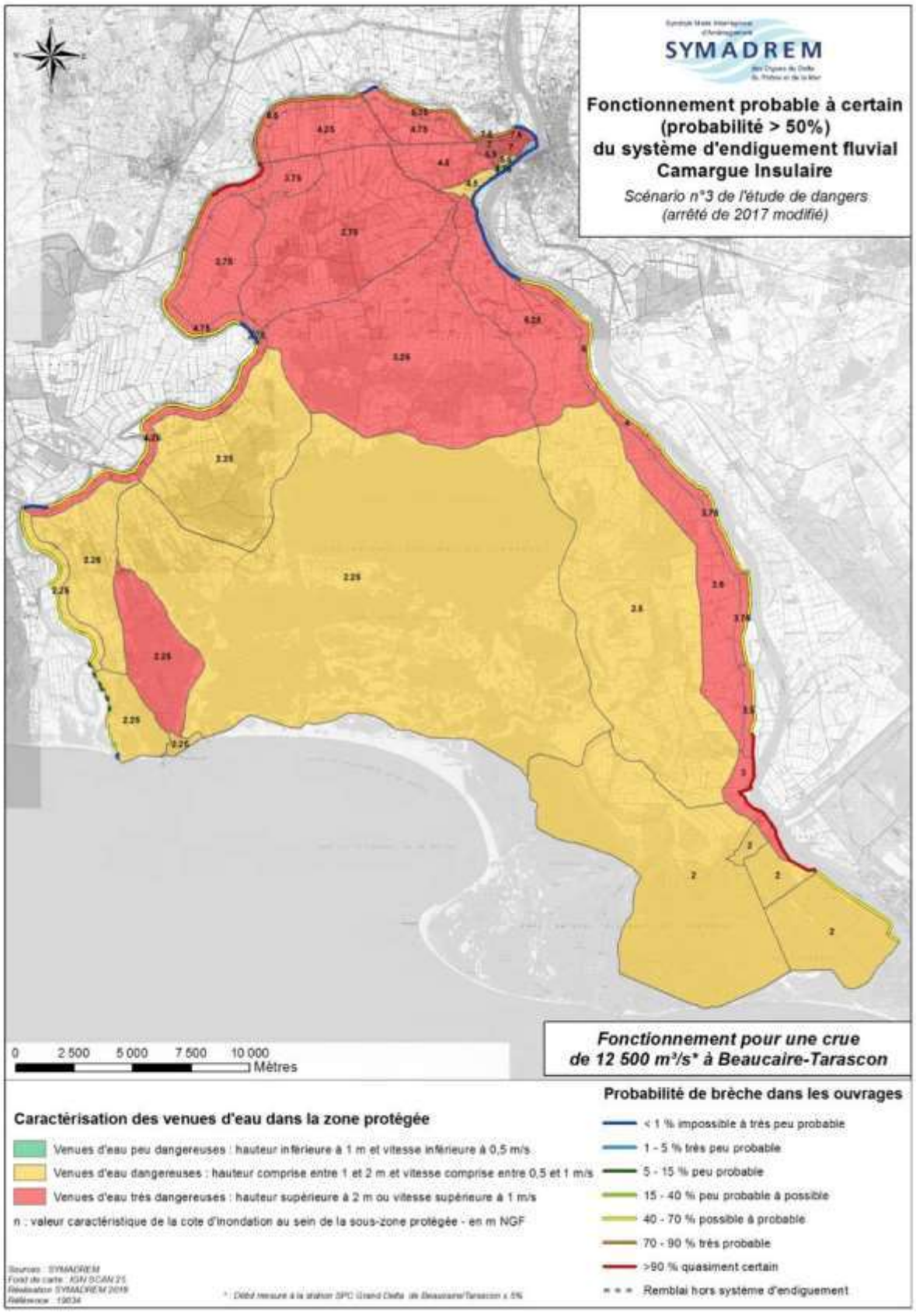


Figure 292. Scénario n°3 EDD pour une crue de 12500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

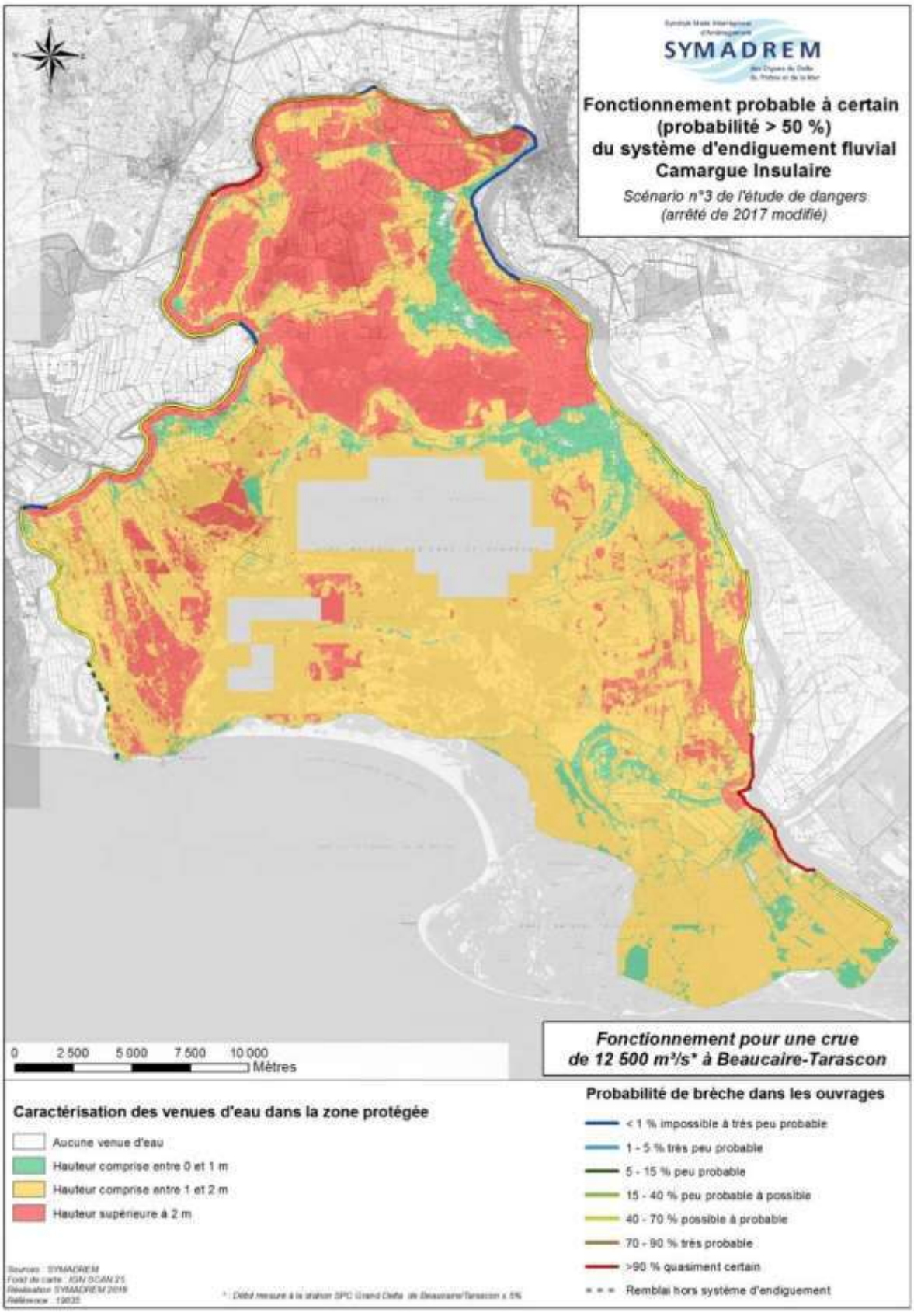


Figure 293. Scénario n°3 EDD pour une crue de 12500 m^3/s à Beaucaire/Tarascon avec différentiel

10.8 SC N°3 : FONCTIONNEMENT PROBABLE A CERTAIN POUR UNE CRUE 14160

Pour une crue, dont le débit atteint un débit de 14160 m^3/s ± 5 % à la station gérée par le service prévision des crues grand delta (cote atteinte ne peut être donnée du fait de la non validité de la courbe de tarage en vigueur depuis le 7 décembre 2003 pour cette gamme de débit) conjugué à un niveau marin de 1,50 m NGF ± 10 cm, le fonctionnement du système d'endiguement serait le suivant :

Les deux tableaux ci-après rappellent les niveaux de danger par tronçon homogène. Pour cette gamme de crue, les niveaux de dangers sur les digues du petit Rhône sont dépassés de Trinquetaille à la Mer, à l'exception de la digue au droit d'Albaron et de tronçons localisés.

Tableau 115. Niveaux de danger des tronçons homogènes PRG du système d'endiguement et état de dépassement pour une crue de 14160 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau danger Exprimé en débit m^3/s à B/T	Etat du niveau de danger pour 14160 m^3/s à B/T
PRG 1	Trinquetaille	281.1	282.5	10 500	Dépassé
PRG 2	Cazeneuve-Augéry	282.5	287.4	9 500	
PRG 3	Beaumont –A54	287.4	288.5	14160	atteint
PRG 4	A54 - Cavalès	288.5	294.5	8 500	Dépassé
PRG 5	Cavalès - St Gilles	294.5	297.2	8 500	
PRG 6	St-Gilles - Figarès	297.2	298.2	8 500	
PRG 7	future digue résistante à la surverse (Figarès)	298.2	299.8	8 500	
PRG 8	La Galante - Albaron	299.8	306.55	8 500	
PRG 9	Albaron	306.55	307.7	14160	atteint
PRG 10	Albaron-Eymini	307.7	313	9 500	Dépassé
PRG 11	Eymini-Sénebier	313	320.75	11 500	Dépassé
PRG 12	Sénebier	320.75	322	14160	atteint
PRG 13	Sénebier-Icard	322	329.5	11 500	Dépassé
PRG 14	Mas d'Icard - Bac	329.5	330.5	11 500	
PRG 16	Bac – Mer Remblai hors système d'endiguement	330,625	337,0	Pour mémoire > 11 500 m^3/s	

En amont de Montlong, les niveaux de danger sont non atteints. En aval, ils sont dépassés jusqu'à la mer

Tableau 116. Niveaux de danger des tronçons homogènes GRD du système d'endiguement et état de dépassement pour une crue de 14160 m^3/s à Beaucaire/Tarascon (B/T)

N°	Libellé	PRG début	PRG Fin	Niveau danger Exprimé en débit m^3/s à B/T	Etat du niveau de danger pour 14160 m^3/s à B/T
D1	Défluent			>> 14160	Non atteint
GRD1	Quais	281.8	283.5	>> 14160	
GRD2	Papeteries Etienne	283.5	284.15	>> 14160	
GRD3	Emmaus	284.15	285.25	>> 14160	
GRD4	Passeron-Monlong	285.25	288	>> 14160	
GRD5	Monlong	288	288.9	>> 14160	
GRD6	Montlong-Beaujeu	288.9	295.15	10 500	Dépassé
GRD7	Beaujeu-l'Armelière	295.15	298.2	11 500	
GRD8	L'Armelière-la Commanderie	298.2	305.5	11 500	
GRD9	La Commanderie-Bois Verdun	305.5	309.25	11 500	
GRD10	Bois Verdun-Chartrouse	309.25	311.8	11 500	
GRD11	Chartrouse-La Louisiane	311.8	313.1	11 500	
GRD12	La Louisiane-L'Esquineau	313.1	319.4	9 500	
GRD13	L'Esquineau-Palissade	319.4	323.3	11 500	

Des entrées d'eau, en provenance du système d'endiguement, doivent être prises en compte. Les scénarios d'inondation sont limités aux brèches en provenance des tronçons de digue du Petit Rhône et du grand Rhône pour lesquels le niveau de danger est dépassé. Les hypothèses de lâcher d'eau sont identiques à celles du scénario n°1.

Le tableau ci-après donne, pour les sept scénarios d'inondation retenus, les valeurs caractéristiques des cotes au sein des sous-zones protégées et la cote retenue pour cette gamme de crue (Cf. chapitres 6 & 7). Ces cotes sont identiques à celles retenues pour le scénario n°1. On se reportera au chapitre 8 pour les justifications

La cartographie du fonctionnement du système, conformément au scénario n°3 de l'arrêté EDD modifié, figure à la suite des deux tableaux.

Tableau 117. Cote (en m NGF) au sein de chaque sous-zone protégée en fonction des scénarios d'inondation retenus (probabilité de brèche > 50 %) pour caractériser le fonctionnement probable à certain du système pour une crue de 10160 m^3/s à Beaucaire/Tarascon et la cote globale retenue pour ce scénario de crue

Casier ZP	Cote (en m NGF) +/- 20 cm							Cote retenue
	Aval Cazeneuve	Figarès	Aval Albaron	Montlong	Augery	Boisverdun	Surverse	
1	7,50							7,5
2	7,00							7
3								
4	7,50							7,5
5	7,00							7
6	5,50							5,5
7	5,50							5,5
8	5,25							5,25
9	3,25	2,75		2,75	2,50			4,75
10	4,50	2,75	1,75	3,00	2,50	2,00		4,5
11	4,50			4,25	2,75			4,5
12	3,00	2,75	2,00	3,00	2,50	2,00		4,25
13	2,75	2,75	1,75	3,00	2,50	2,00		3
14	2,25	2,50	2,00	3,25	3,00	2,25		3,25
15	2,00			5,25	4,75	2,25		5,25
16	1,75	2,00	1,75	2,50	2,25	2,25	1,00	2,5
17	1,75	2,00	1,75	2,25	2,25	3,75	2,25	3,75
18	1,75	1,75	1,75	2,00	2,00	2,25	1,75	2,25
19	1,75	1,75	1,75	2,00	2,00	2,25	1,75	2,25
20				6,00	5,75			6
21				3,50	4,00	2,50		4
22					2,25	3,25		3,75
23	1,75	2,00	1,75	2,25	2,25	3,50		3,75
24	1,75	2,00	1,75	2,25	2,25	3,50	3,25	3,5
25	1,75	2,00	1,75	2,00	2,00	2,50	2,75	3
26	1,75	1,75	1,75	2,00	2,00	2,25	2,25	2,25
27	4,00	2,50		2,75				5,75
28	2,75	2,75		3,00	2,50			5,5
29	2,50	4,75	1,75	3,00	2,50	2,00		4,75
30	2,50	2,75	1,75	3,00	2,50	2,00		3,75
31	2,50	3,00	1,75	3,00	2,50	2,00		3
32		3,25	3,75	3,00				3,75
33	2,00	2,00	4,25	2,50	2,50	2,25		4,25
34	1,75	2,00	1,75	2,25	2,25	2,25		2,25
35	1,75	2,00	1,75	2,25	2,25	2,25		2,25
36	1,75	2,00	1,75	2,50	2,25	2,25		2,5
37	1,75	2,00	1,75	2,25	2,25	2,25		2,25
38	1,75	2,00	1,75	2,25	2,25	2,25		2,25
39	1,75	2,00	1,75	2,50	2,50	2,25		2,5
40	1,75	2,00	1,75	2,50	2,25	2,50	1,50	2,5
41	1,75	1,75	1,75	2,00	2,00	2,25	2,00	2,25

Le tableau ci-après donne pour les cotes retenues, la distribution des hauteurs d'eau au sein de chaque sous-zone protégée. La valeur correspondant à H5 signifie qu'il y a 5 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et donc 95 % au-dessus. La valeur correspondant à H50 signifie qu'il y a 50 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 50 % au-dessus. La valeur correspondant à H95 signifie qu'il y a 95 % de la sous zone protégée qui est en dessous de cette valeur et 5 % au-dessus. Les couleurs relatives aux H5, H50 et H95 indiquent la dangerosité des venues d'eau sur la base des hauteurs d'eau.

Une couleur unique est retenue pour la sous-zone protégée en intégrant la vitesse des écoulements. La couleur rouge identifie les venues d'eau très dangereuses ; la couleur orange les venues d'eau dangereuses ; la couleur verte les venues d'eau non dangereuses.

Tableau 118. Fonctionnement probable à certain (> 50 %) pour une crue de 14160 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

N°SZP	Nom sous-zone protégée	C (m NGF)	H5 (m)	H50 (m)	H95 (m)
1	Trinquetaille La Corrèze Gontier	7,5	0,6	2,9	3,5
2	Trinquetaille St Genest-Le Vittier	7	0	2,7	3,3
3	Trinquetaille Centre				
4	Trinquetaille Cazeneuve	7,5	0,1	3,3	3,7
5	Trinquetaille les prêcheurs	7	1,5	3,1	3,5
6	Trinquetaille St Antoine Billot	5,5	1,1	2,0	2,5
7	Trinquetaille zone humide	5,5	0	1,5	2,1
8	Anciennes Papeteries Etienne	5,25	0	0,6	1,1
9	A54 Est	4,75	1,2	2,4	3,2
10	Gimeaux	4,5	1,6	2,8	3,4
11	La Grande Sacristane	4,5	0,0	1,1	2,0
12	Clos du Mas Neuf	4,25	1,2	2,1	2,9
13	Marais du Pont de Rousty	3	1,1	2,5	3,5
14	Marais de la Grand Mar	3,25	0,4	2,3	3,1
15	Montlong	5,25	1,6	2,5	3,4
16	Etang du Vaccarès	2,5	1,4	2,0	2,3
17	Armelière Sambuc Chamone	3,75	1,3	2,2	3,0
18	Salin du Midi et Nord Salin de Giraud	2,25	1,1	1,6	2,1
19	Salin de Giraud	2,25	0,6	1,1	1,6
20	Abords digue Petite Montlong Beaujeu	6	2,1	2,9	3,6
21	Abords digue Beaujeau Tourtoulen	4	0	1,2	1,7
22	Abords digue Tourtoulen Commanderie	3,75	0,0	1,2	1,8
23	Abords digue Commanderie Boisverdun	3,75	1,2	1,9	2,7
24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	3,5	1,3	2,0	2,6
25	Abords digue Salin de Giraud	3	0,8	1,7	2,5
26	Salins du midi sud-est	2,25	1,0	1,5	2,0
27	Abords digue Cazeneuve - A54	5,75	1,3	2,5	3,2
28	Abords digue A54 Pont de Cavalès	5,5	1,5	2,6	3,2
29	Abords digue Pont de Cavalès Albaron	4,75	1,4	2,6	3,4
30	Saliers	3,75	1,2	2,1	3,3
31	Marais de Saliers	3	1,2	2,4	3,0
32	Albaron	3,75	0	0,9	1,6
33	Abords digue Albaron Sylvéréal	4,25	1,7	2,8	3,8
34	Abords digue Sylvéréal Bac du Sauvage	2,25	0,6	1,3	1,9
35	Amarée Dromard	2,25	1,2	1,8	2,2
36	Panperdu Etang des Launes	2,5	1,3	1,9	2,4
37	Etang de Ginès	2,25	1,4	2,1	2,2

38	Saintes-Maries-de-la-Mer	2,25	**0,4**	**1,1**	**1,5**
39	Paty trinité	2,5	**1,0**	**1,9**	**2,4**
40	Vaccarès Est	2,5	**0,6**	**1,7**	**2,2**
41	Esquineau	2,25	**0**	**1,5**	**1,9**

La carte ci-après est la représentation graphique du tableau précédant. La carte qui suit, résulte de la cote NGF appliquée à la sous-zone protégée moins la cote NGF du terrain naturel (données source BDT IGN).

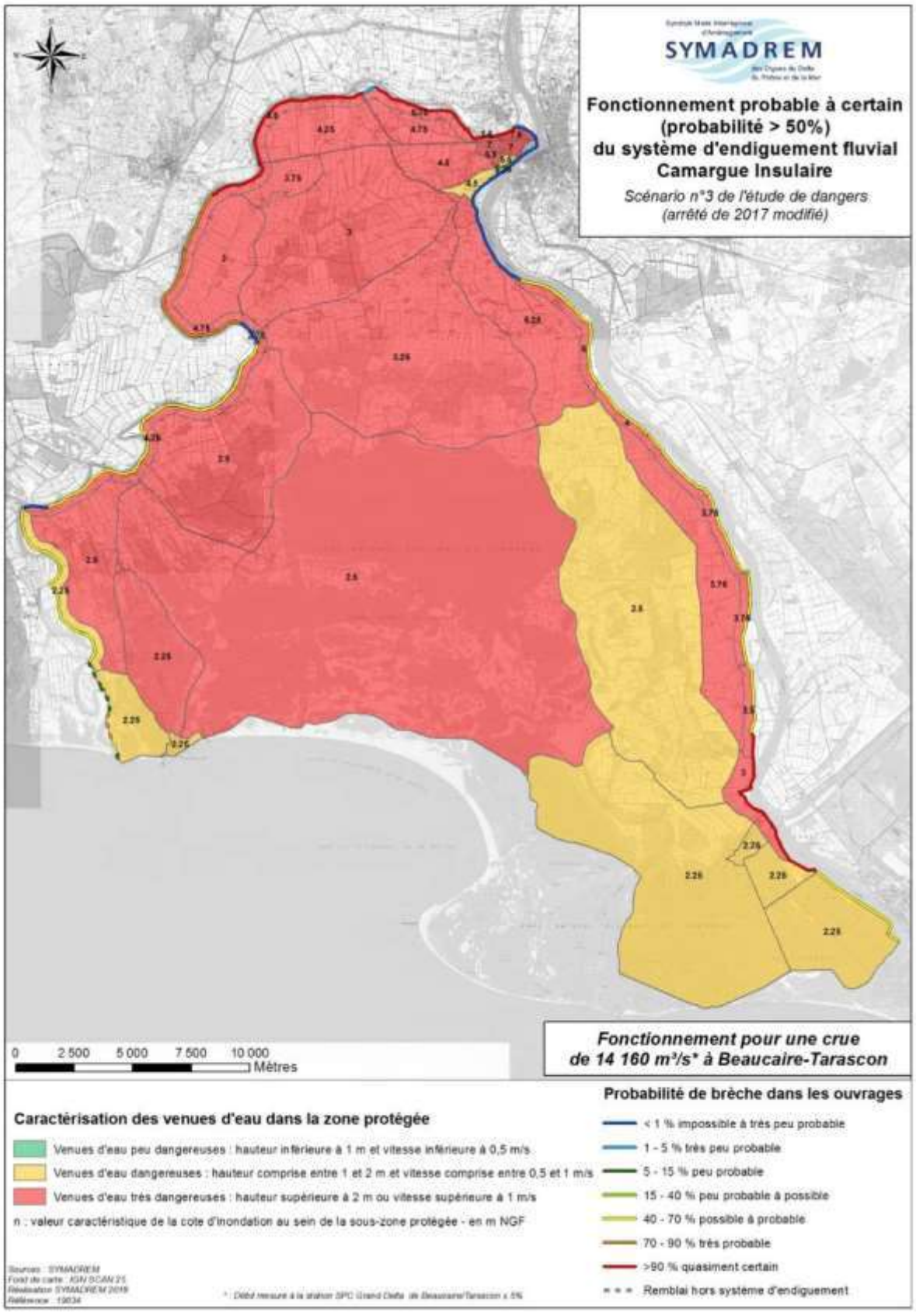


Figure 294. Scénario n°3 EDD pour une crue de 14160 m^3/s à Beaucaire/Tarascon

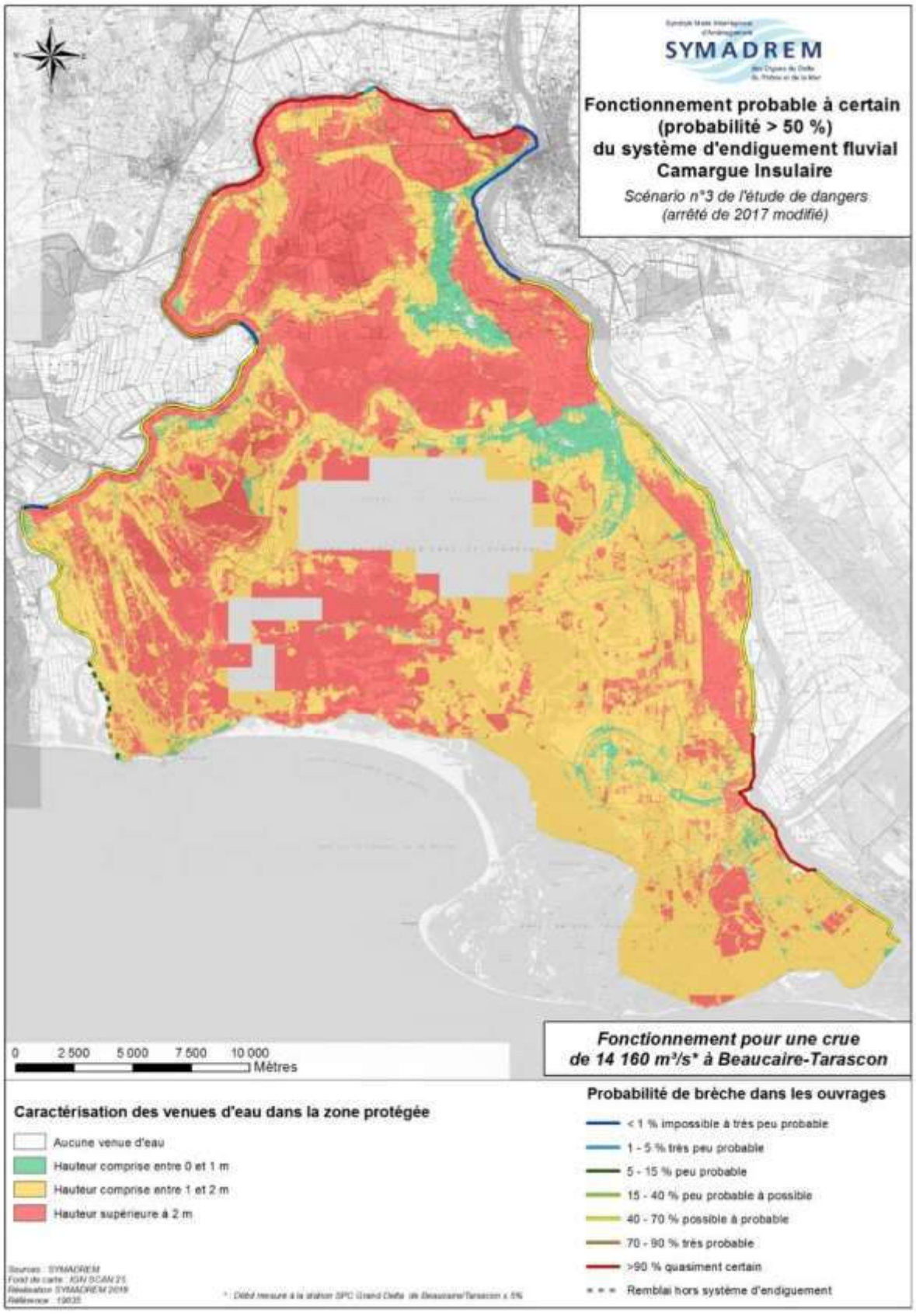


Figure 295. Scénario n°3 EDD pour une crue de 14160 m^3/s à Beaucaire/Tarascon avec différentiel

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DES SYSTEMES D'ENDIGUEMENT FLUVIAUX DU DELTA DU RHONE

DOCUMENT B

CHAPITRE N°9 : POLITIQUE DE PREVENTION DES ACCIDENTS MAJEURS ET SYSTEME DE GESTION DE LA SECURITE

Pour les éléments de ce chapitre, se reporter au document « DESCRIPTION DE L'ORGANISATION ET DES CONSIGNES MISES EN PLACE POUR ASSURER L'EXPLOITATION, L'ENTRETIEN ET LA SURVEILLANCE EN TOUTES CIRCONSTANCES DES OUVRAGES DES SYSTEMES D'ENDIGUEMENT FLUVIAUX ET MARITIME », présent en annexe de la demande d'autorisation du système.

Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT FLUVIAL CAMARGUE INSULAIRE

DOCUMENT B

CHAPITRE N°9BIS : RECOMMANDATIONS POUR LA REDUCTION DES RISQUES

SOMMAIRE

1 Introduction 3
2 Mesures d'information auprès des gestionnaires de crise 4
3 Mesures organisationnelles de surveillance et d'exploitation en période de crues 5
3.1 Mesures organisationnelles mises en place 5
3.2 Mesures organisationnelles à mettre en place 6
4 Mesures structurelles 8
5 Mesures administratives 9

1 INTRODUCTION

A partir des scénarios identifiés comme critiques, quatre types de mesures de réduction du risque ont été identifiés :

- Mesures d'information auprès des gestionnaires de crise ;
- Mesures organisationnelles ;
- Mesures structurelles.
- Mesures administratives

La dernière mesure étant la seule permettant de rendre le risque acceptable vis-à-vis des populations.

2 MESURES D'INFORMATION AUPRES DES GESTIONNAIRES DE CRISE

Cette mesure consiste à transmettre auprès des gestionnaires de crise les principaux résultats de l'étude de dangers (résumé non technique) de façon à leur permettre de les intégrer dans les documents de gestion de crise relevant de leurs compétences (plans communaux de sauvegarde, plans d'organisation des secours…)

Cette mesure sera conduite dans les 3 mois qui suivront l'approbation de l'étude de dangers par le Préfet des Bouches-du-Rhône et notamment des niveaux de protection et de sûreté des ouvrages.

Les acteurs concernés par cette mesure sont les suivants :

- Préfet de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur - Etat-Major Interzones ;
- Sous-Préfet d'Arles ;
- Maires des 2 communes membres du SYMADREM situés dans la zone protégée ;
- Président de la structure intercommunale localisée dans la zone protégée ;
- Service Départemental d'Incendie et de Secours des Bouches-du-Rhône ;
- Entreprises de terrassement titulaires du marché d'intervention d'urgence.

3 MESURES ORGANISATIONNELLES DE SURVEILLANCE ET D'EXPLOITATION EN PERIODE DE CRUES

Ces mesures concernent le plan de gestion des ouvrages en périodes de crues (P.G.O.P.C), à présent intégré dans le document de « description de l'organisation et des consignes mises en places pour assurer l'exploitation, l'entretien et la surveillance en toute circonstances des ouvrages des systèmes d'endiguement fluviaux et maritime ».

La plupart de ces mesures ont déjà été mises en place mais sont citées pour mémoire.

3.1 MESURES ORGANISATIONNELLES MISES EN PLACE

La mise en place d'une signalisation directionnelle des accès aux ouvrages, à partir de la voirie principale, dans tout le Delta du Rhône a été réalisée en 2013 et 2014 pour faciliter l'accès aux digues des équipes de surveillance. Cette mesure a été accompagnée de travaux de mise en place de bornes de repérage positionnées en crête de digue afin d'aider les équipes de surveillance et les gardes digues à se repérer sur les ouvrages en périodes de crues.

Des travaux d'aménagement d'aires de stockage de matériaux nécessaires aux interventions d'urgence ont été réalisés en 2015.

Des dispositions ont également été réalisées pour améliorer la mise en œuvre du PGOPC, notamment en situation dégradée.

Un réseau radio numérique PMR, propre au SYMADREM a été déployé. Ce réseau permet de s'affranchir des réseaux GSM qui sont rapidement saturés en cas de crise. Chaque équipe de surveillance et acteurs du PGOPC sont dotés en crue d'un terminal. Ces terminaux permettent également le géo positionnement en temps réel des agents sur le terrain.
La mise en œuvre est opérationnelle depuis 2015.

Un groupe électrogène pour l'alimentation électrique basse tension du siège du SYMADREM a également été installé pour pallier les coupures éventuelles du réseau public. Cette mesure est opérationnelle depuis 2015.

D'autre part, pour palier l'impossibilité d'accéder au site internet Vigicrues, le SYMADREM a développé l'élaboration d'un outil informatique de prévision sommaire des crues, basé sur la propagation de l'onde de crue, à partir des données des principales stations hydrométriques, récupérées par voie hertzienne. Ce modèle est opérationnel depuis 2016.

Un automate d'appel téléphonique à destination des acteurs du PGOPC est opérationnel depuis 2015.

3.2 MESURES ORGANISATIONNELLES A METTRE EN PLACE

Ces mesures sont :

- la mise en œuvre en crête de digue au droit des 140 ouvrages et réseaux traversant les digues de bornes repères.

Cette mesure, sous réserve d'éligibilité au CPIER Plan Rhône 2015-2020 sera réalisée concomitamment avec les travaux projetés.

La mise en œuvre de stations limnigraphiques le long des ouvrages du SYMADREM. Cette action a été inscrite au projet de CPIER Plan Rhône 2015/2020. Cette action est indispensable d'une part au regard des différentes incertitudes entachant les lignes d'eau utilisées pour la détermination des niveaux de protection (Cf. Chapitre n°4) et d'autres part pour déterminer plus précisément ces niveaux de protection sous forme de profil en long notamment à l'approche des embouchures où la concomitance des tempêtes marines et crues du Rhône rendent très complexe sa détermination.

Le planning prévisionnel de cette mesure est dépendant des partenaires financiers du CPIER Plan Rhône.

Au cours de la présente étude, les mesures suivantes ont été avancées :

La digue du défluent est exposée au vent du Nord avec un Fetch potentiel de 1,5 km. Le retour d'expérience des crues passées n'a pas montré de risque d'érosion liée aux vagues. La digue présente une revanche confortable par rapport à la crue exceptionnelle. Compte tenu des enjeux humains, il conviendrait d'envisager la plantation d'une haie d'arbres au nord de la digue de manière à dissiper l'énergie des vagues et réduire le risque de déferlement sur la digue qu'on peut évaluer à 40 cm en cas de vent annuel concomitant avec une crue.
Egalement sur le défluent, le fruit du talus aval est localement faible (de 1.5/1) ce qui engendre un risque élevé de glissement en cas de mise en charge, ce qui ne serait le cas que pour une crue longue, la digue étant large dans ce secteur. Des calculs plus précis (prise en compte des données des sondages et de la géométrie au niveau local) pourraient être réalisés et suite à ces derniers la digue pourrait être à conforter. La proximité d'un lotissement limite l'adoucissement du talus ; une solution pourrait être la mise en place d'un filtre ou d'une coupure hydraulique.

Ponctuellement le niveau de sureté et ou de danger a été rehaussé afin de ne pas pénaliser tout un tronçon pour une zone de faiblesse.
Ces secteurs doivent être particulièrement surveillés avant la mise en charge :

- Au niveau du GRD 290.25, vérification de l'état de l'ouvrage traversant ;
- Autour du GRD 291.5, vérification de l'absence de terriers dans le corps de digue ;
- Autour du GRD 312.875, vérification de l'absence de terriers dans le corps de digue ;
- Au niveau du PRG 285.125, vérification de l'absence de terriers dans le corps de digue.
- Au niveau du PRG 285.5, vérification de l'absence de terriers dans le corps de digue.
- Autour du PRG 285.875, vérification de l'absence de terriers dans le corps de digue et de non infiltration au droit de l'ouvrage du mas d'Yvan ;

- Au niveau du PRG 290.875, vérification de l'absence de terriers dans le corps de digue et de l'état de l'ouvrage traversant.
- Au niveau du PRG 293.375, vérification de l'absence de terriers dans le corps de digue.
- Au niveau du PRG 294.875, vérification de l'absence de terriers dans le corps de digue et de l'état de l'ouvrage traversant.
- Au niveau du PRG 303.125, vérification de l'absence de terriers dans le corps de digue et d'infiltration d'eau pouvant provenir d'un départ d'érosion (racine).
- Au niveau du PRG 310.375, vérification de l'absence de terriers dans le corps de digue et de non infiltration au droit de l'ouvrage du mas d'Alivon ;
- Du PRG 314.125 au PRG 319.5, vérification de l'absence de terriers dans le corps de digue ;
- Du PRG 322.875 au PRG 319.5, vérification de l'absence de terriers dans le corps de digue.

Au cours des visites de surveillance régulières, le SYMADREM repère et intègre dans le SIRS digues, les terriers d'animaux fouisseurs observés. Dès le déclenchement de la pré-alerte, les terriers d'animaux fouisseurs font l'objet de travaux de colmatage.
Par ailleurs, le PGOC prévoit, dès le déclenchement de la pré-alerte, que les gardes digues contrôlent et s'assurent que tous les terriers d'animaux fouisseurs soient bien traités avant la mise en charge de la digue.

Parfois c'est le glissement d'un des talus qui fait apparaitre des probabilités non négligeables, même hors crue ; cela implique que les caractéristiques des matériaux ont été légèrement sous estimées, si il n'y a en réalité pas de risque hors d'eau, ces secteurs sont à surveiller en crue (risque sur talus aval) ou en décrue (risque sur le talus amont) :

- Au niveau du GRD 313.5, vérification de la stabilité du talus aval de la digue ;
- Au niveau du GRD 316.625, vérification de la stabilité du talus amont de la digue ;
- Au niveau du GRD 317.25, vérification de la stabilité du talus aval de la digue ;
- Au niveau du GRD 320.875, vérification de la stabilité du talus amont de la digue ;
- Au niveau du PRG 286.375, vérification de l'état du talus aval vis-à-vis du glissement.

En cas de crue longue, le talus aval à l'amont du Petit Rhône rive gauche serait également à contrôler en crue.

4 MESURES STRUCTURELLES

Une grande partie des tronçons présentent un risque inacceptable ; des mesures structurelles vont être mises en place. Ces mesures concernent la mise en œuvre des quatre opérations du programme de sécurisation :

- Le renforcement et rehaussement des digues du Petit Rhône Rive Gauche – 1ère priorité, qui concerne les tronçons PRG 1 à PRG 8 et les tronçons PRG 14 à PRG 19 ;
- Le renforcement et rehaussement des digues du Grand Rhône Rive Droite – 1ère priorité, qui concerne les tronçons GRD 12 et GRD 13 ;
- Le renforcement et rehaussement des digues du Petit Rhône Rive Gauche – 2ème priorité, qui concerne les tronçons PRG 10, PRG 11 et PRG 13 ;
- Le renforcement et rehaussement des digues du Grand Rhône Rive Droite – 2ème priorité, qui concerne les tronçons GRD 6 à GRD 11.

4.1.1 Renforcement des digues du Grand Rhône – 1ère priorité et du Petit Rhône – 1ère priorité

Ces opérations sont intégrées dans le CPIER Plan Rhône 2015-2020.

Les études sont en phase d'avant-projet et des mises à jour de cette étude de danger seront prochainement réalisées afin d'intégrer les travaux et ainsi compléter les dossiers loi sur l'eau des deux opérations.
On se reportera aux études AVP pour le détail des travaux prévus.

Les travaux sur les digues du Grand Rhône sont prévus pour 2021 ; ceux sur les digues du petit Rhône devraient débuter en 2023.

Une carte présentant l'ensemble des travaux prévus sur le grand delta du Rhône est présente en chapitre 10 (9ème carte liée au chapitre 2).

4.1.2 Renforcement des digues du Grand Rhône – 2ème priorité et du Petit Rhône – 2ème priorité

On se reportera au programme de sécurisation pour le détail des travaux envisagés.

Ces opérations ne sont pas contractualisées dans le CPIER Plan Rhône 2015-2020. Elle devra être intégrée dans un prochain CPIER Plan Rhône, non programmé à ce jour.

5 MESURES ADMINISTRATIVES

Afin d'avoir un gestionnaire unique sur l'ensemble du système d'endiguement, des conventions de superpositions d'affectation pourraient être passées avec les propriétaires des ouvrages de transitions, à savoir les ponts.

De même des acquisitions foncières de parcelles par le SYMADREM permettraient de clarifier la situation dans des zones où des propriétaires privés sont en procession de la parcelle sur laquelle est bâtie la digue (voir chapitre 1 pour la liste des parcelles). Pour les zones qui sont concernées par les travaux de première priorité, décris ci-dessus, cela sera fait dans le cadre des travaux.

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT
DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT
CAMARGUE INSULAIRE

DOCUMENT B

CHAPITRE N°10 : CARTOGRAPHIE

1 CARTES ADMINISTRATIVES

1- PERIMETRE DE COMPETENCE DU SYMADREM – 1 PLANCHE

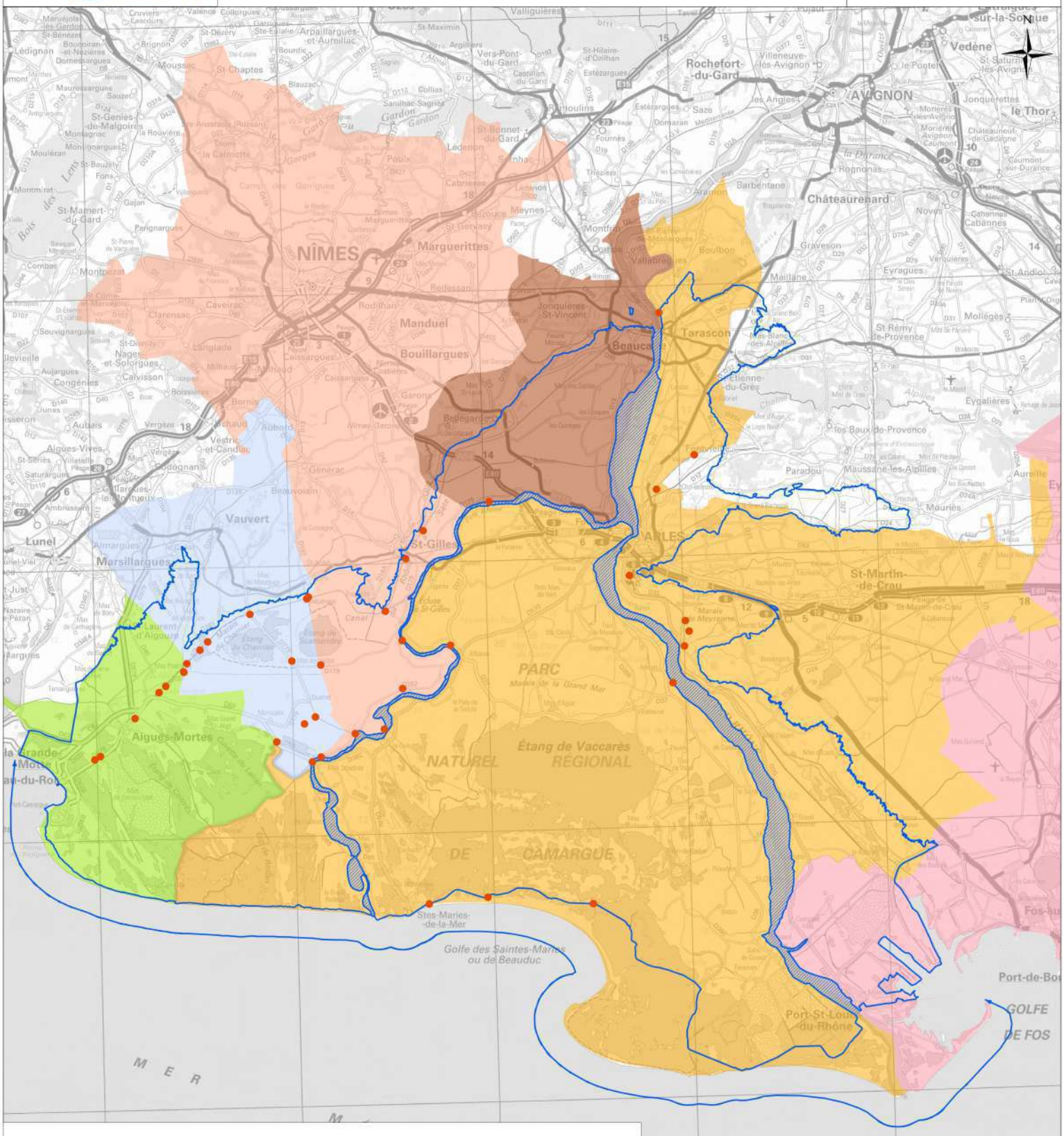
2- SYSTEME D'ENDIGUEMENT CAMARGUE INSULAIRE ET ZONE PROTEGEE ; LIMITES COMMUNALES ET STATION DE REFERENCE – 1 PLANCHE

3- SYSTEME D'ENDIGUEMENT CAMARGUE INSULAIRE ET SOUS-ZONES PROTEGEES – 1 PLANCHE

Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

Périmètre de compétence et d'intervention du SYMADREM

DÉPARTEMENT BOUCHES·DU·RHÔNE



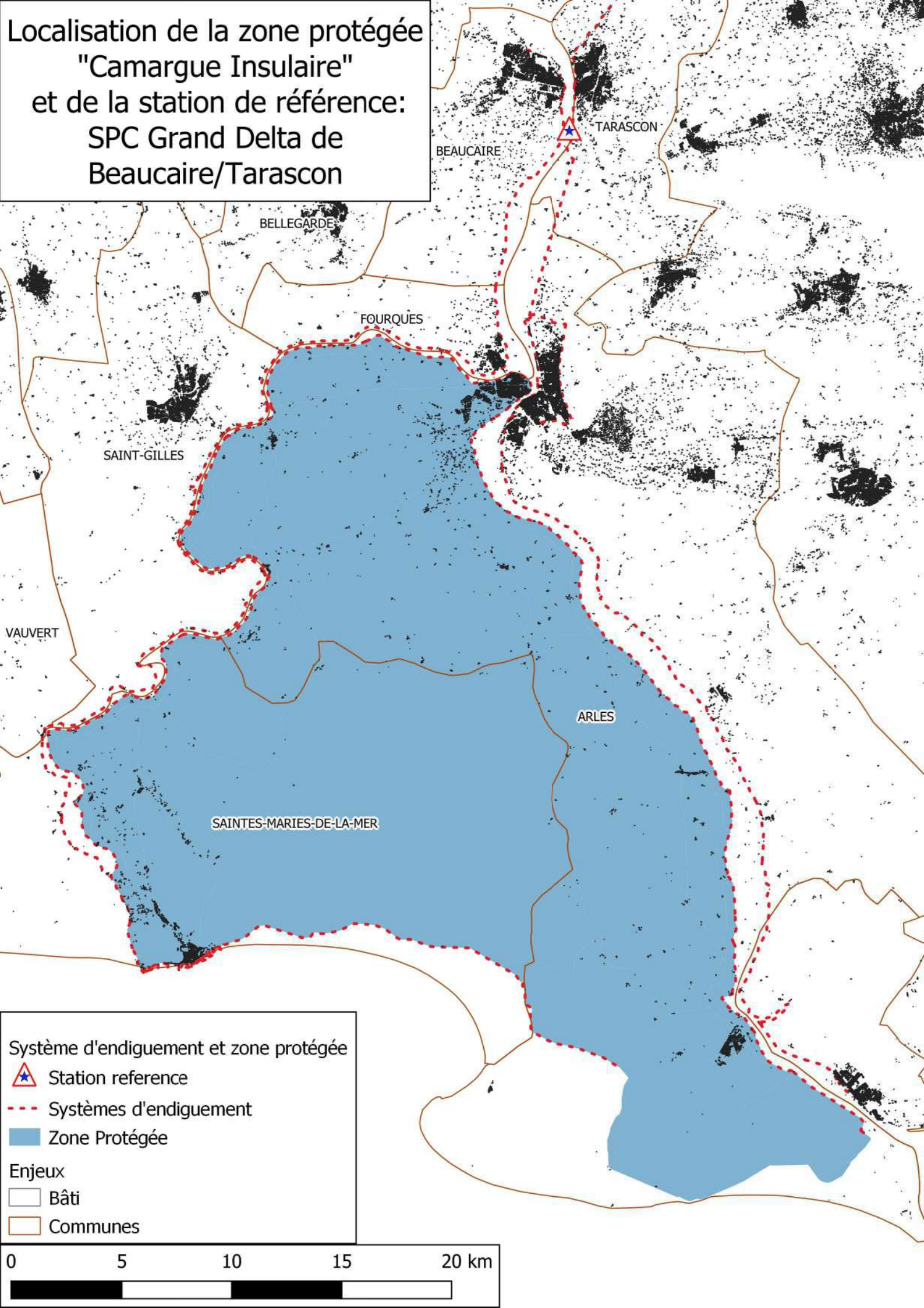
- Ouvrages de ressuyage (co)gérés par le SYMADREM (et les ASA)
- Zone protégée par les systèmes d'endiguement (SE) du Rhône et de la mer
- Lit endigué (hors zone protégée)
- Façade maritime sous compétence SYMADREM

EPCI-FP membres du SYMADREM

- CA Arles Crau Camargue Montagnette
- CA Nîmes Métropole
- CC Beaucaire Terre d'Argence
- CC Petite Camargue
- CC Terre de Camargue
- Métropole Aix Marseille Provence

Fond de carte : IGN SCAN-REG 2005
Sources: IGN GEOFLA, INSEE, Statuts du SYMADREM, Etude SOCLE
Réalisation SYMADREM
Référence : 20033

0 5 10 15 Km


Localisation de la zone protégée
"Camargue Insulaire"
et de la station de référence:
SPC Grand Delta de
Beaucaire/Tarascon
TARASCON
BEAUCAIRE
BELLEGARDE
FOURQUES
SAINT-GILLES
VAUVERT
ARLES
SAINTES-MARIES-DE-LA-MER
Système d'endiguement et zone protégée
Station reference
Systèmes d'endiguement
Zone Protégée
Enjeux
Bâti
Communes
0
5
10
15
20 km

Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

Système d'endiguement fluvial de la Camargue Insulaire

Sources : IGN BD TOPO, SYMADREM
Réalisation : SYMADREM 2019
Référence : 19026

- Système d'endiguement fluvial de la Camargue Insulaire
- Zone protégée
- Limites des sous-zones protégées
- Bâti

0 2 500 5 000 7 500 10 000 Meters

2 CARTES DES VENUES D'EAU - ACTUEL

1- NIVEAU DE PROTECTION DES SOUS-ZONES PROTEGEES – 1 PLANCHE

2- DE 7500 A 14160 : ALEA AU-DELA DU NIVEAU DE PROTECTION DANS LES SOUS-ZONES PROTEGEES – 7 PLANCHES

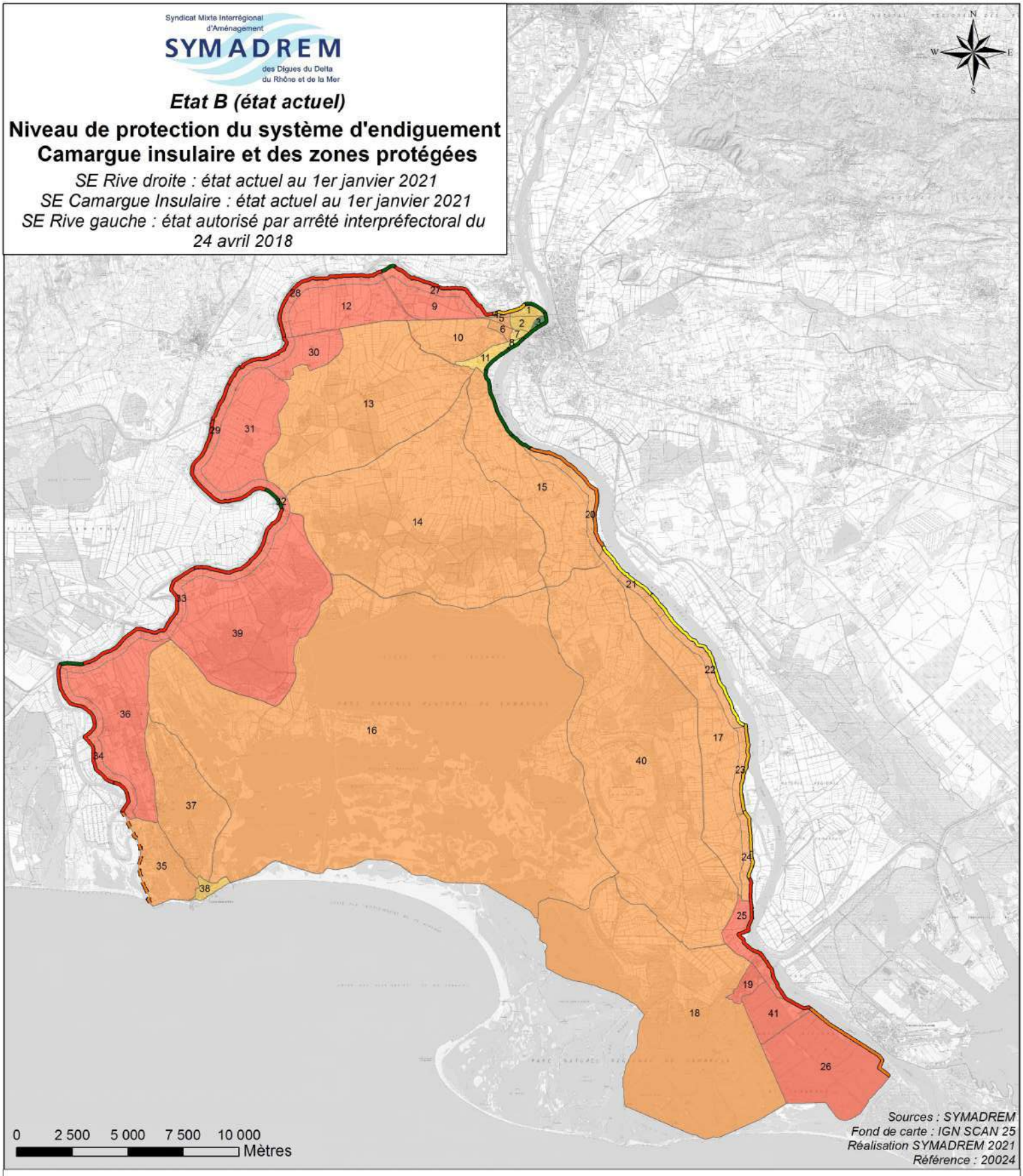
3- DE 7500 A 14160 : ALEA AU-DELA DU NIVEAU DE DANGER DANS LES SOUS-ZONES PROTEGEES – 7 PLANCHES

Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

Etat B (état actuel)

Niveau de protection du système d'endiguement Camargue insulaire et des zones protégées

SE Rive droite : état actuel au 1er janvier 2021
SE Camargue Insulaire : état actuel au 1er janvier 2021
SE Rive gauche : état autorisé par arrêté interpréfectoral du 24 avril 2018



Sources : SYMADREM
Fond de carte : IGN SCAN 25
Réalisation SYMADREM 2021
Référence : 20024

Niveaux de protection des sous-zones protégées

- 7 500 m³/s* - 8,77 m NGF** - 0,90 m NGF***
- 8 500 m³/s* - 9,58 m NGF** - 0,90 m NGF***
- 9 500 m³/s* - 10,22 m NGF** - 0,95 m NGF***
- 10 500 m³/s* - 10,77 m NGF** - 0,81 m NGF***
- 11 500 m³/s* - 11,30 m NGF** - 0,98 m NGF***
- 12 500 m³/s* - courbe de tarage non valide - 1,30 m NGF***
- 14 160 m³/s* - courbe de tarage non valide - 1,50 m NGF***

** : Débit mesuré à la station SPC Grand Delta de Beaucaire/Tarascon ± 5%*
*** : Cote associée (IGN 69) selon la courbe de tarage en vigueur depuis le 07/12/2013 ± 10 cm*
**** : Niveau marin (IGN 69) retenu pour la modélisation ± 10 cm*

Niveaux de protection des ouvrages

Probabilité conditionnelle de brèche ≤ 5 %

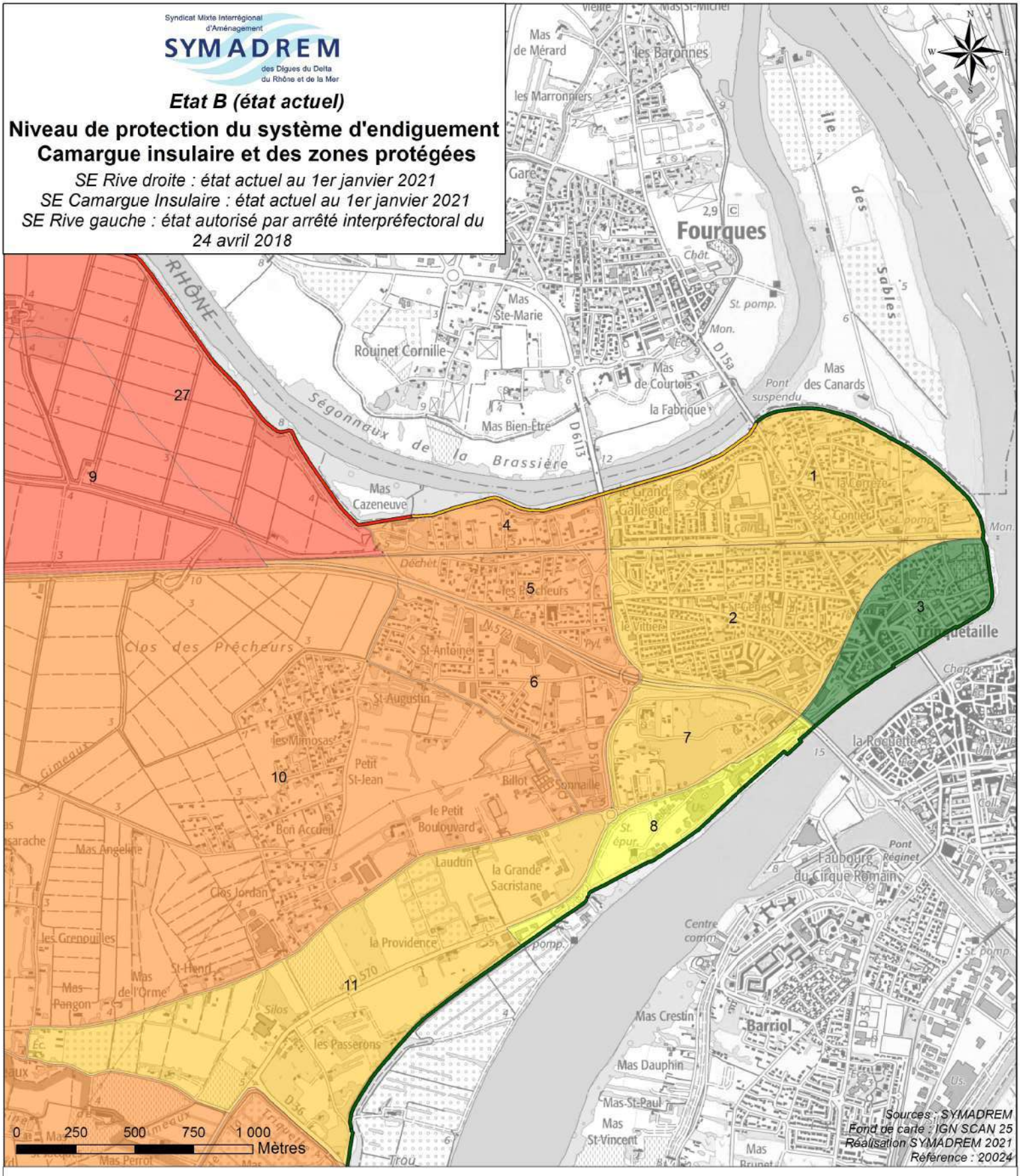
- 7 500 m³/s* - 8,77 m NGF** - 0,90 m NGF***
- 8 500 m³/s* - 9,58 m NGF** - 0,90 m NGF***
- 9 500 m³/s* - 10,22 m NGF** - 0,95 m NGF***
- 10 500 m³/s* - 10,77 m NGF** - 0,81 m NGF***
- 11 500 m³/s* - 11,30 m NGF** - 0,98 m NGF***
- 12 500 m³/s* - courbe de tarage non valide - 1,30 m NGF***
- 14 160 m³/s* - courbe de tarage non valide - 1,50 m NGF***
- Remblai hors système d'endiguement

Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

Etat B (état actuel)

Niveau de protection du système d'endiguement Camargue insulaire et des zones protégées

SE Rive droite : état actuel au 1er janvier 2021
SE Camargue Insulaire : état actuel au 1er janvier 2021
SE Rive gauche : état autorisé par arrêté interpréfectoral du 24 avril 2018



Sources : SYMADREM
Fond de carte : IGN SCAN 25
Réalisation SYMADREM 2021
Référence : 20024

Niveaux de protection des sous-zones protégées

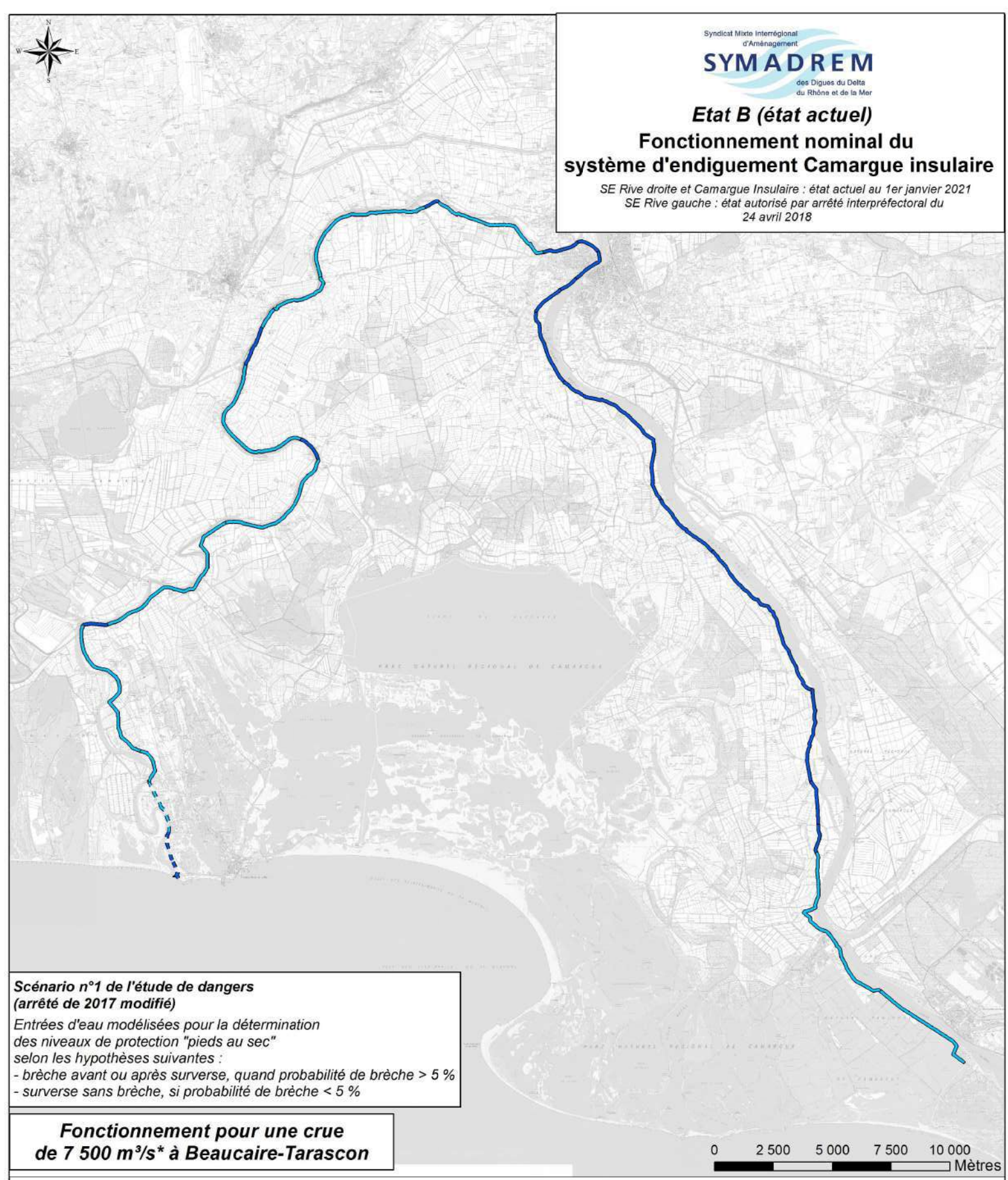
- 7 500 m³/s* - 8,77 m NGF** - 0,90 m NGF***
- 8 500 m³/s* - 9,58 m NGF** - 0,90 m NGF***
- 9 500 m³/s* - 10,22 m NGF** - 0,95 m NGF***
- 10 500 m³/s* - 10,77 m NGF** - 0,81 m NGF***
- 11 500 m³/s* - 11,30 m NGF** - 0,98 m NGF***
- 12 500 m³/s* - courbe de tarage non valide - 1,30 m NGF***
- 14 160 m³/s* - courbe de tarage non valide - 1,50 m NGF***

** : Débit mesuré à la station SPC Grand Delta de Beaucaire/Tarascon ± 5%*
*** : Cote associée (IGN 69) selon la courbe de tarage en vigueur depuis le 07/12/2013 ± 10 cm*
**** : Niveau marin (IGN 69) retenu pour la modélisation ± 10 cm*

Niveaux de protection des ouvrages

Probabilité conditionnelle de brèche ≤ 5 %

- 7 500 m³/s* - 8,77 m NGF** - 0,90 m NGF***
- 8 500 m³/s* - 9,58 m NGF** - 0,90 m NGF***
- 9 500 m³/s* - 10,22 m NGF** - 0,95 m NGF***
- 10 500 m³/s* - 10,77 m NGF** - 0,81 m NGF***
- 11 500 m³/s* - 11,30 m NGF** - 0,98 m NGF***
- 12 500 m³/s* - courbe de tarage non valide - 1,30 m NGF***
- 14 160 m³/s* - courbe de tarage non valide - 1,50 m NGF***
- Remblai hors système d'endiguement



Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

Etat B (état actuel)

Fonctionnement nominal du système d'endiguement Camargue insulaire

SE Rive droite et Camargue Insulaire : état actuel au 1er janvier 2021
SE Rive gauche : état autorisé par arrêté interpréfectoral du 24 avril 2018

Scénario n°1 de l'étude de dangers (arrêté de 2017 modifié)

Entrées d'eau modélisées pour la détermination des niveaux de protection "pieds au sec" selon les hypothèses suivantes :
- brèche avant ou après surverse, quand probabilité de brèche > 5 %
- surverse sans brèche, si probabilité de brèche < 5 %

Fonctionnement pour une crue de 7 500 m³/s* à Beaucaire-Tarascon

0 2 500 5 000 7 500 10 000 Mètres

Caractérisation des venues d'eau dans la zone protégée

- Venues d'eau peu dangereuses : hauteur inférieure à 1 m et vitesse inférieure à 0,5 m/s
- Venues d'eau dangereuses : hauteur comprise entre 1 et 2 m et vitesse comprise entre 0,5 et 1 m/s
- Venues d'eau très dangereuses : hauteur supérieure à 2 m ou vitesse supérieure à 1 m/s

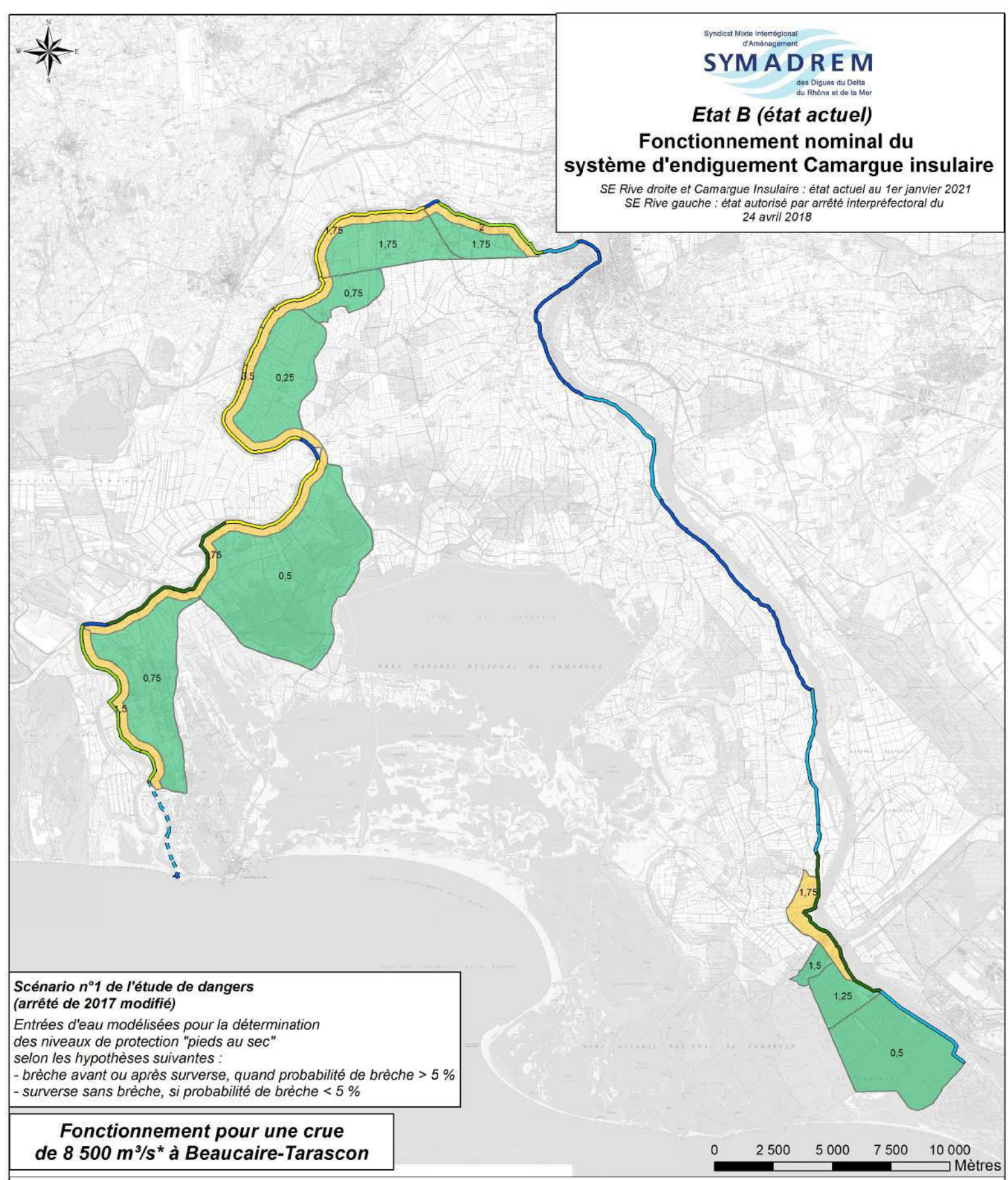
n : valeur caractéristique de la cote d'inondation au sein de la sous-zone protégée - en m NGF

Probabilité de brèche dans les ouvrages

- < 1 % impossible à très peu probable
- 1 - 5 % très peu probable
- 5 - 15 % peu probable
- 15 - 40 % peu probable à possible
- 40 - 70 % possible à probable
- 70 - 90 % très probable
- >90 % quasiment certain
- Remblai hors système d'endiguement

Sources : SYMADREM
Fond de carte : IGN SCAN 25
Réalisation SYMADREM 2021
Référence : 20025

** : Débit mesuré à la station SPC Grand Delta de Beaucaire/Tarascon ± 5% cote associée 8,77 m NGF ± 10 cm et niveau marin retenu 0,90 m NGF*



Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

Etat B (état actuel)

Fonctionnement nominal du système d'endiguement Camargue insulaire

SE Rive droite et Camargue Insulaire : état actuel au 1er janvier 2021
SE Rive gauche : état autorisé par arrêté interpréfectoral du 24 avril 2018

Scénario n°1 de l'étude de dangers (arrêté de 2017 modifié)

Entrées d'eau modélisées pour la détermination des niveaux de protection "pieds au sec" selon les hypothèses suivantes :
- brèche avant ou après surverse, quand probabilité de brèche > 5 %
- surverse sans brèche, si probabilité de brèche < 5 %

Fonctionnement pour une crue de 8 500 m³/s* à Beaucaire-Tarascon

0 2 500 5 000 7 500 10 000 Mètres

Caractérisation des venues d'eau dans la zone protégée

- Venues d'eau peu dangereuses : hauteur inférieure à 1 m et vitesse inférieure à 0,5 m/s
- Venues d'eau dangereuses : hauteur comprise entre 1 et 2 m et vitesse comprise entre 0,5 et 1 m/s
- Venues d'eau très dangereuses : hauteur supérieure à 2 m ou vitesse supérieure à 1 m/s

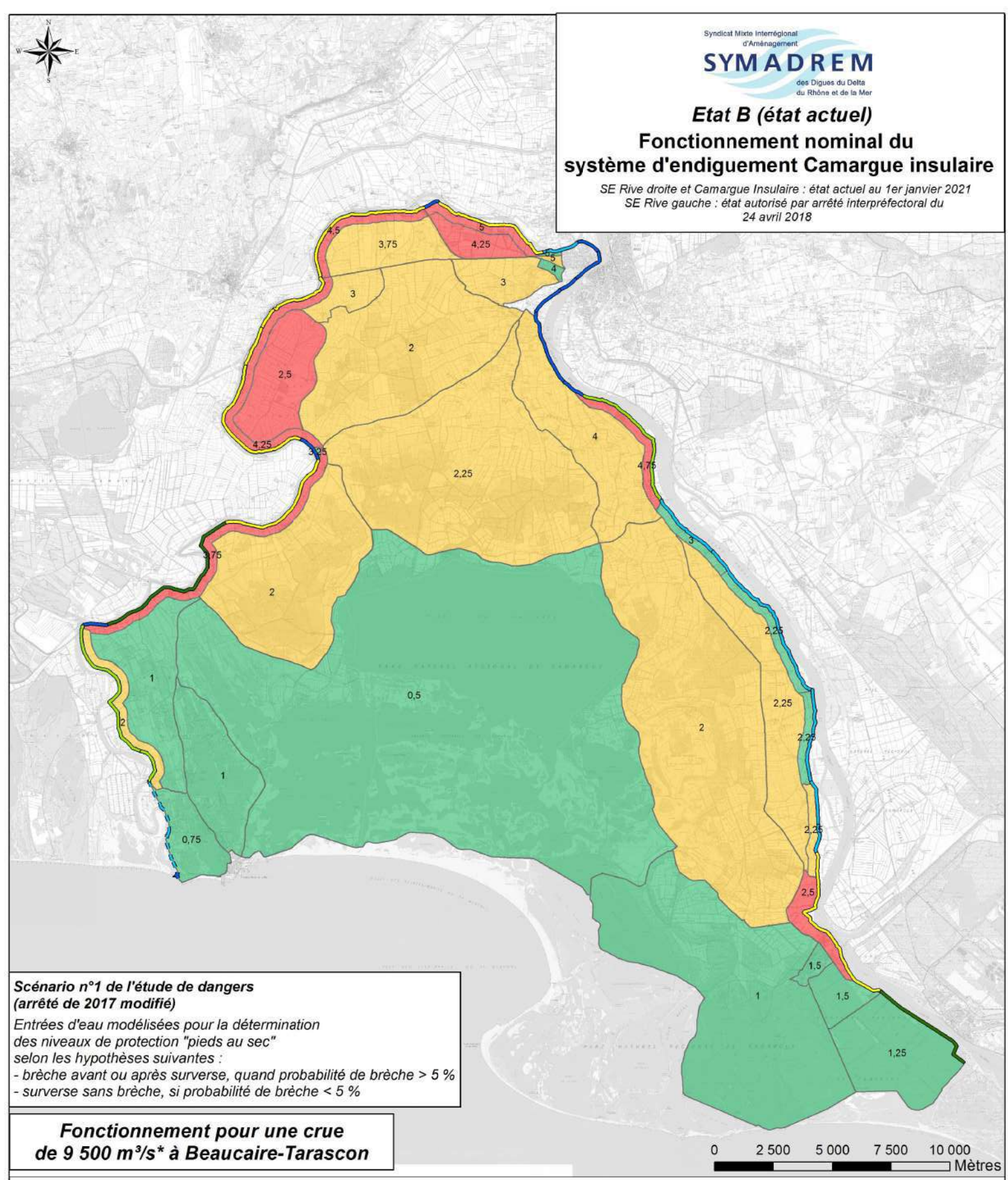
n : valeur caractéristique de la cote d'inondation au sein de la sous-zone protégée - en m NGF

Probabilité de brèche dans les ouvrages

- < 1 % impossible à très peu probable
- 1 - 5 % très peu probable
- 5 - 15 % peu probable
- 15 - 40 % peu probable à possible
- 40 - 70 % possible à probable
- 70 - 90 % très probable
- >90 % quasiment certain
- = = = Remblai hors système d'endiguement

Sources : SYMADREM
Fond de carte : IGN SCAN 25
Réalisation SYMADREM 2021
Référence : 20025

** : Débit mesuré à la station SPC Grand Delta de Beaucaire/Tarascon ± 5% cote associée 9,58 m NGF ± 10 cm et niveau marin retenu 0,90 m NGF*

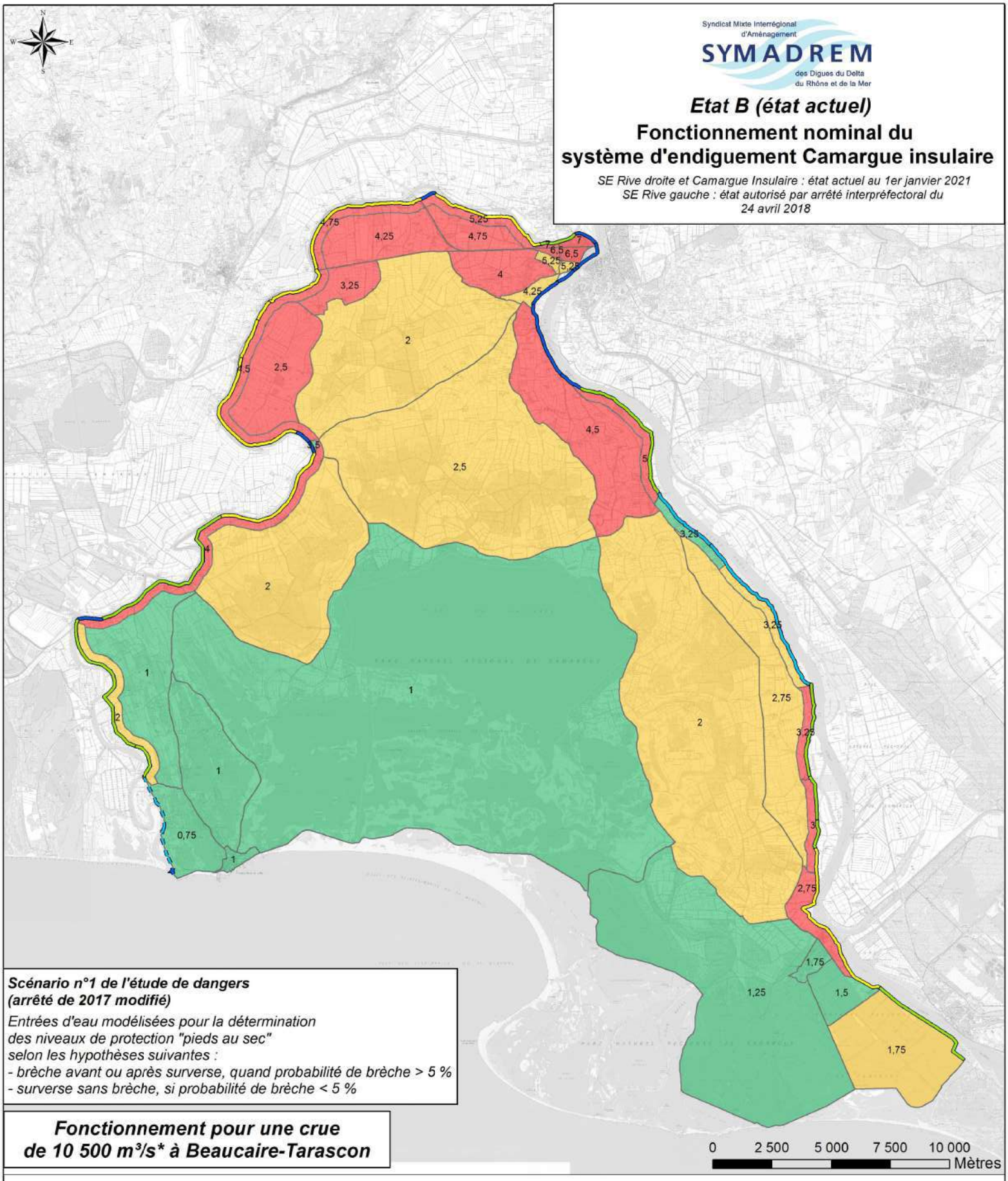

Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer
Etat B (état actuel)
Fonctionnement nominal du système d'endiguement Camargue insulaire
SE Rive droite et Camargue Insulaire : état actuel au 1er janvier 2021
SE Rive gauche : état autorisé par arrêté interpréfectoral du 24 avril 2018
4,5
3,75
5
4,25
3,5
4
3
3
2
2,5
4,25
3,25
2,25
4
4,75
3
3,75
2
2,25
1
0,5
2
2,25
2
2,25
2
1
0,75
2,25
2,5
1,5
1
1,5
1,25
Scénario n°1 de l'étude de dangers
(arrêté de 2017 modifié)
Entrées d'eau modélisées pour la détermination
des niveaux de protection "pieds au sec"
selon les hypothèses suivantes :
- brèche avant ou après surverse, quand probabilité de brèche > 5 %
- surverse sans brèche, si probabilité de brèche < 5 %
Fonctionnement pour une crue
de 9 500 m³/s* à Beaucaire-Tarascon
0
2 500
5 000
7 500
10 000
Mètres
Caractérisation des venues d'eau dans la zone protégée
Venues d'eau peu dangereuses : hauteur inférieure à 1 m et vitesse inférieure à 0,5 m/s
Venues d'eau dangereuses : hauteur comprise entre 1 et 2 m et vitesse comprise entre 0,5 et 1 m/s
Venues d'eau très dangereuses : hauteur supérieure à 2 m ou vitesse supérieure à 1 m/s
n : valeur caractéristique de la cote d'inondation au sein de la sous-zone protégée - en m NGF
Probabilité de brèche dans les ouvrages
< 1 % impossible à très peu probable
1 - 5 % très peu probable
5 - 15 % peu probable
15 - 40 % peu probable à possible
40 - 70 % possible à probable
70 - 90 % très probable
>90 % quasiment certain
Remblai hors système d'endiguement
Sources : SYMADREM
Fond de carte : IGN SCAN 25
Réalisation SYMADREM 2021
Référence : 20025
* : Débit mesuré à la station SPC Grand Delta de Beaucaire/Tarascon ± 5%
cote associée 10,22 m NGF ± 10 cm et niveau marin retenu 0,95 m NGF

Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

Etat B (état actuel)

Fonctionnement nominal du système d'endiguement Camargue insulaire

SE Rive droite et Camargue Insulaire : état actuel au 1er janvier 2021
SE Rive gauche : état autorisé par arrêté interpréfectoral du 24 avril 2018



Scénario n°1 de l'étude de dangers (arrêté de 2017 modifié)

Entrées d'eau modélisées pour la détermination des niveaux de protection "pieds au sec" selon les hypothèses suivantes :
- brèche avant ou après surverse, quand probabilité de brèche > 5 %
- surverse sans brèche, si probabilité de brèche < 5 %

Fonctionnement pour une crue de 10 500 m³/s* à Beaucaire-Tarascon

0 2 500 5 000 7 500 10 000 Mètres

Caractérisation des venues d'eau dans la zone protégée

- Venues d'eau peu dangereuses : hauteur inférieure à 1 m et vitesse inférieure à 0,5 m/s
- Venues d'eau dangereuses : hauteur comprise entre 1 et 2 m et vitesse comprise entre 0,5 et 1 m/s
- Venues d'eau très dangereuses : hauteur supérieure à 2 m ou vitesse supérieure à 1 m/s

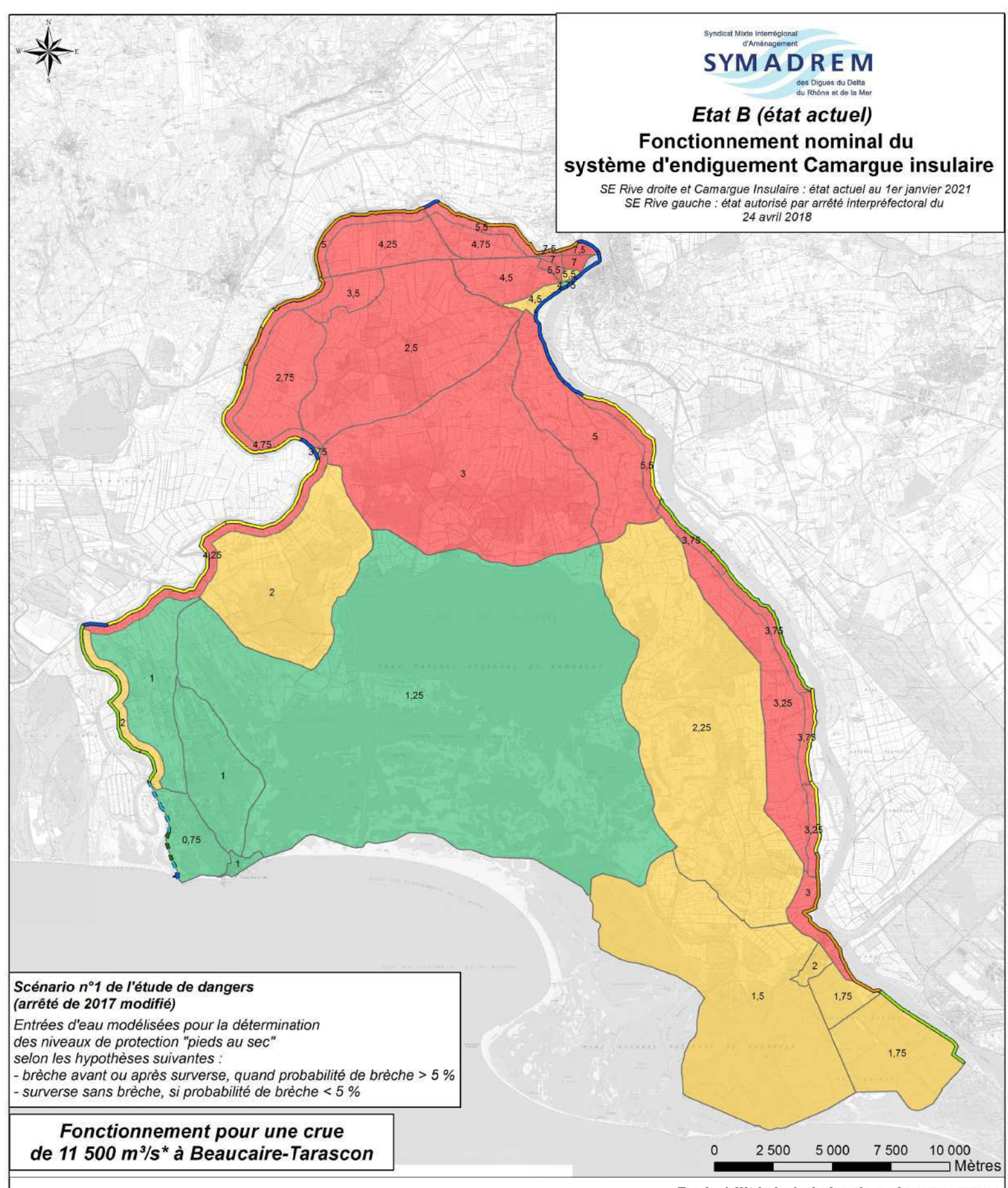
n : valeur caractéristique de la cote d'inondation au sein de la sous-zone protégée - en m NGF

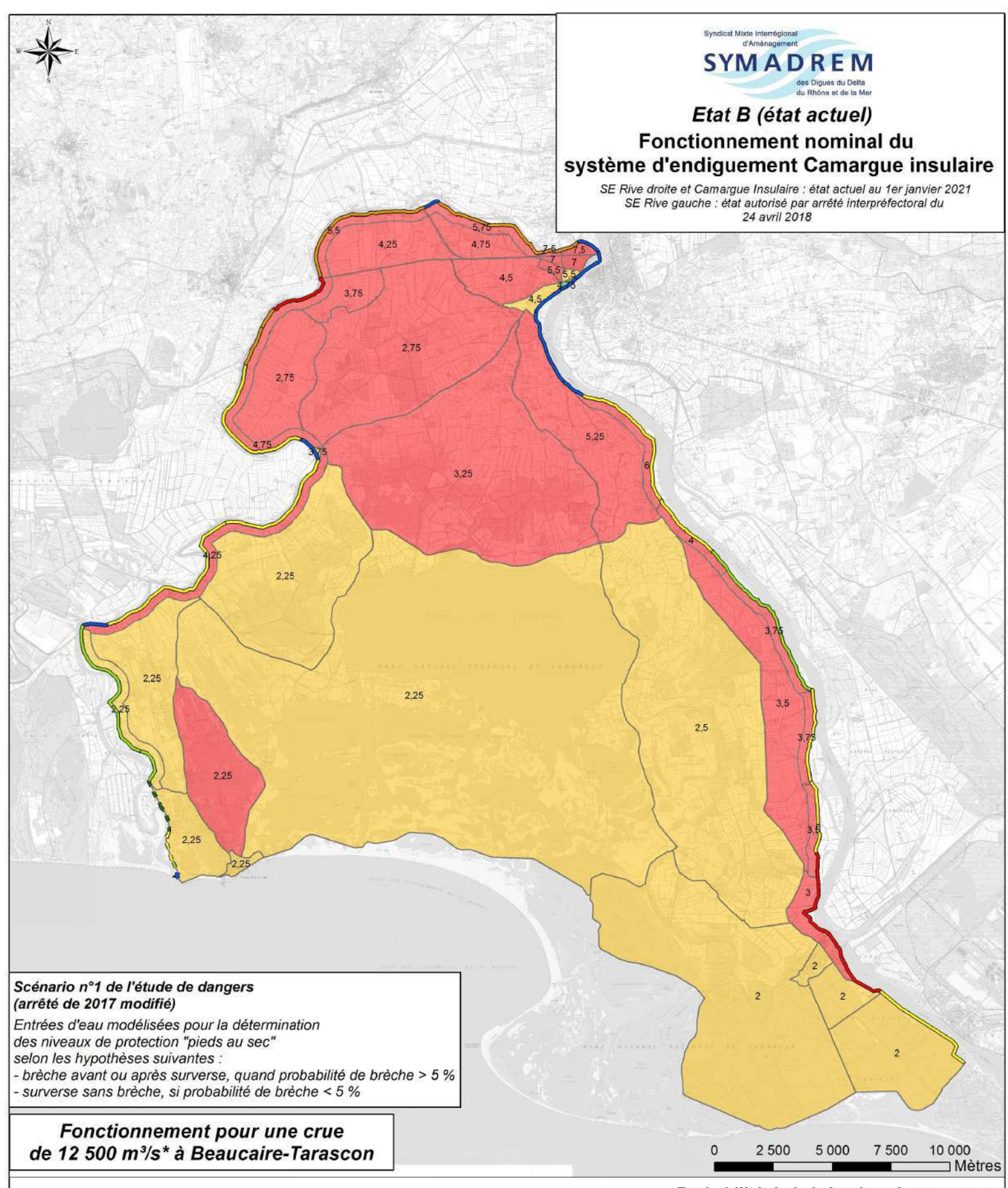
Probabilité de brèche dans les ouvrages

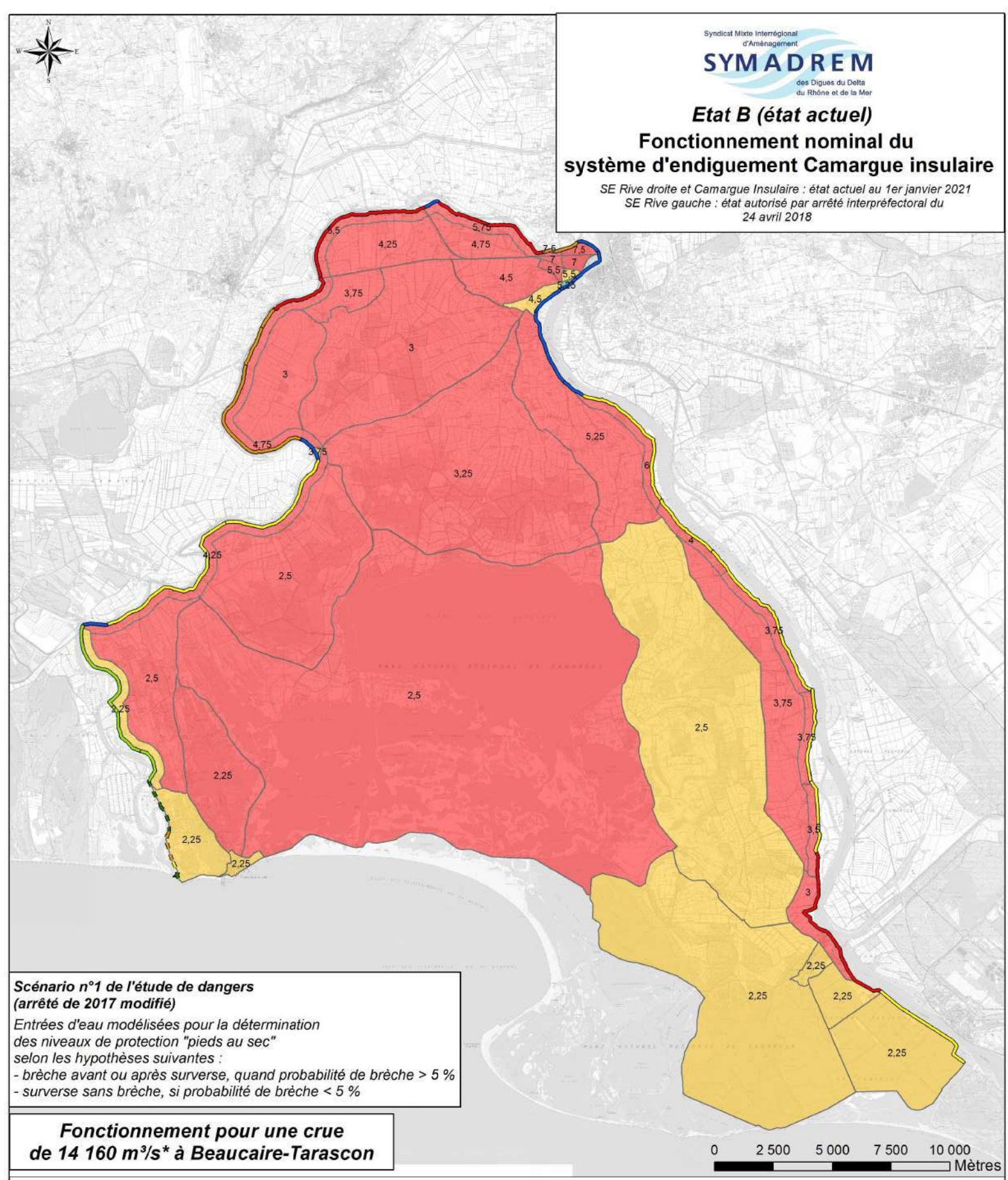
- < 1 % impossible à très peu probable
- 1 - 5 % très peu probable
- 5 - 15 % peu probable
- 15 - 40 % peu probable à possible
- 40 - 70 % possible à probable
- 70 - 90 % très probable
- >90 % quasiment certain
- Remblai hors système d'endiguement

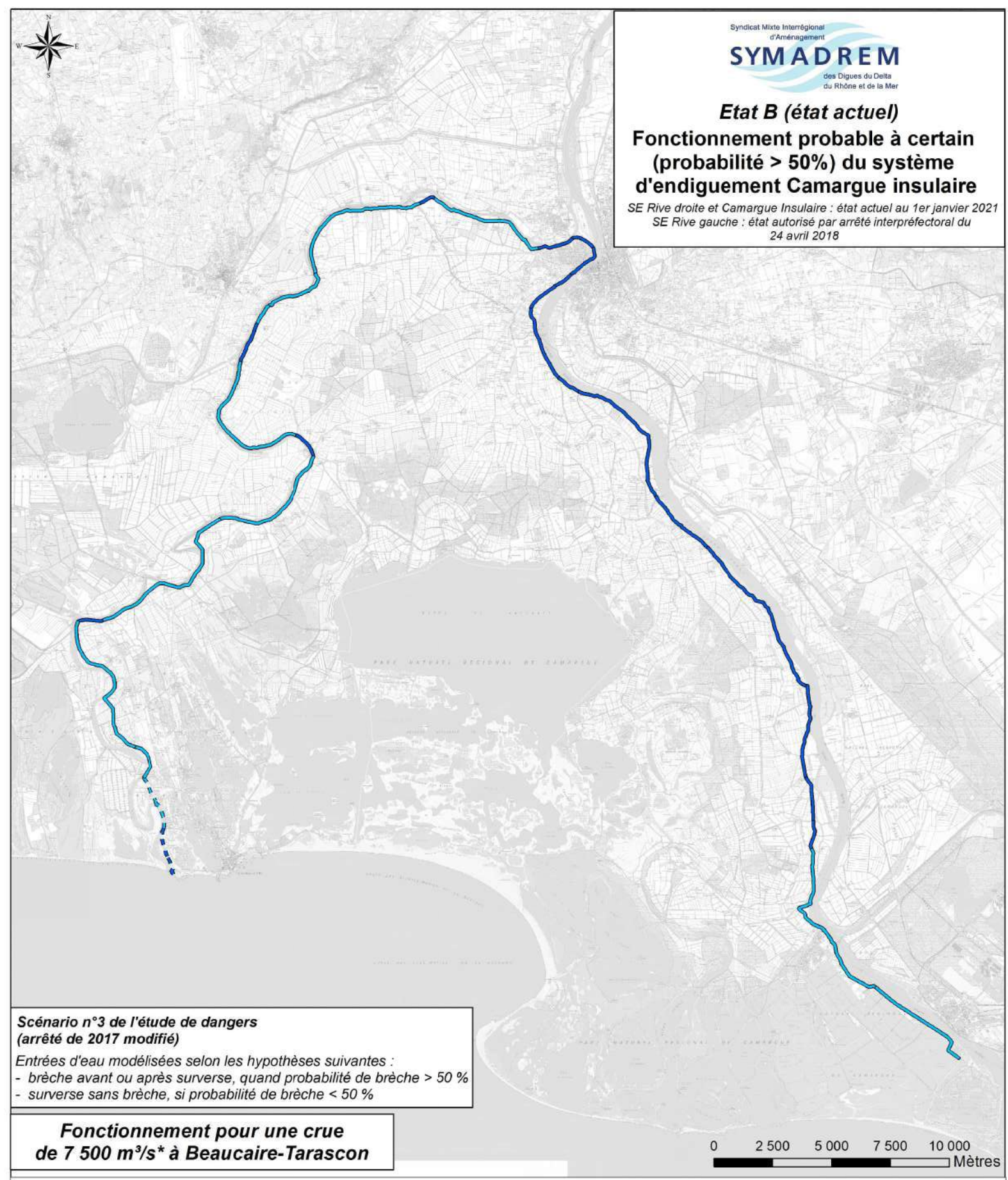
Sources : SYMADREM
Fond de carte : IGN SCAN 25
Réalisation SYMADREM 2021
Référence : 20025

** : Débit mesuré à la station SPC Grand Delta de Beaucaire/Tarascon ± 5% cote associée 10,77 m NGF ± 10 cm et niveau marin retenu 0,81 m NGF*


Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer
Etat B (état actuel)
Fonctionnement nominal du système d'endiguement Camargue insulaire
SE Rive droite et Camargue Insulaire : état actuel au 1er janvier 2021
SE Rive gauche : état autorisé par arrêté interpréfectoral du 24 avril 2018
5,5
5
4,25
4,75
7,5
7,5
7
7
5,5
5,5
4,5
3,5
4,5
2,5
2,75
4,75
3,75
5
3
5,5
3,75
4,25
2
3,75
1
1,25
3,25
2
2,25
3,75
1
3,25
0,75
1
3
2
1,5
1,75
1,75
Scénario n°1 de l'étude de dangers
(arrêté de 2017 modifié)
Entrées d'eau modélisées pour la détermination
des niveaux de protection "pieds au sec"
selon les hypothèses suivantes :
- brèche avant ou après surverse, quand probabilité de brèche > 5 %
- surverse sans brèche, si probabilité de brèche < 5 %
Fonctionnement pour une crue
de 11 500 m³/s* à Beaucaire-Tarascon
0
2 500
5 000
7 500
10 000
Mètres
Caractérisation des venues d'eau dans la zone protégée
Venues d'eau peu dangereuses : hauteur inférieure à 1 m et vitesse inférieure à 0,5 m/s
Venues d'eau dangereuses : hauteur comprise entre 1 et 2 m et vitesse comprise entre 0,5 et 1 m/s
Venues d'eau très dangereuses : hauteur supérieure à 2 m ou vitesse supérieure à 1 m/s
n : valeur caractéristique de la cote d'inondation au sein de la sous-zone protégée - en m NGF
Probabilité de brèche dans les ouvrages
< 1 % impossible à très peu probable
1 - 5 % très peu probable
5 - 15 % peu probable
15 - 40 % peu probable à possible
40 - 70 % possible à probable
70 - 90 % très probable
>90 % quasiment certain
Remblai hors système d'endiguement
Sources : SYMADREM
Fond de carte : IGN SCAN 25
Réalisation SYMADREM 2021
Référence : 20025
* : Débit mesuré à la station SPC Grand Delta de Beaucaire/Tarascon ± 5%
cote associée 11,30 m NGF ± 10 cm et niveau marin retenu 0,98 m NGF


Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer
Etat B (état actuel)
Fonctionnement nominal du système d'endiguement Camargue insulaire
SE Rive droite et Camargue Insulaire : état actuel au 1er janvier 2021
SE Rive gauche : état autorisé par arrêté interpréfectoral du 24 avril 2018
5,5
4,25
5,75
4,75
7,5
7,5
7
7
5,5
5,5
4,5
3,75
4,5
2,75
2,75
4,75
3,75
3,25
5,25
6
4
4,25
2,25
3,75
2,25
2,25
3,5
2,5
3,75
2,25
3,5
2,25
2,25
3
2
2
2
2
0
2 500
5 000
7 500
10 000
Mètres
Scénario n°1 de l'étude de dangers
(arrêté de 2017 modifié)
Entrées d'eau modélisées pour la détermination
des niveaux de protection "pieds au sec"
selon les hypothèses suivantes :
- brèche avant ou après surverse, quand probabilité de brèche > 5 %
- surverse sans brèche, si probabilité de brèche < 5 %
Fonctionnement pour une crue
de 12 500 m³/s* à Beaucaire-Tarascon
Caractérisation des venues d'eau dans la zone protégée
Venues d'eau peu dangereuses : hauteur inférieure à 1 m et vitesse inférieure à 0,5 m/s
Venues d'eau dangereuses : hauteur comprise entre 1 et 2 m et vitesse comprise entre 0,5 et 1 m/s
Venues d'eau très dangereuses : hauteur supérieure à 2 m ou vitesse supérieure à 1 m/s
n : valeur caractéristique de la cote d'inondation au sein de la sous-zone protégée - en m NGF
Probabilité de brèche dans les ouvrages
< 1 % impossible à très peu probable
1 - 5 % très peu probable
5 - 15 % peu probable
15 - 40 % peu probable à possible
40 - 70 % possible à probable
70 - 90 % très probable
>90 % quasiment certain
Remblai hors système d'endiguement
Sources : SYMADREM
Fond de carte : IGN SCAN 25
Réalisation SYMADREM 2021
Référence : 20025
* : Débit mesuré à la station SPC Grand Delta de Beaucaire/Tarascon ± 5%
cote associée : courbe de tarage non valide, niveau marin retenu 1,30 m NGF


Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer
Etat B (état actuel)
Fonctionnement nominal du système d'endiguement Camargue insulaire
SE Rive droite et Camargue Insulaire : état actuel au 1er janvier 2021
SE Rive gauche : état autorisé par arrêté interpréfectoral du 24 avril 2018
5,5
4,25
5,75
4,75
7,5
7,5
7
7
5,5
5,5
4,5
3,75
4,5
3
3
4,75
3,75
3,25
5,25
6
4
4,25
2,5
3,75
2,5
2,25
2,5
3,75
2,5
3,75
2,25
3,5
2,25
3
2,25
2,25
2,25
2,25
0
2 500
5 000
7 500
10 000
Mètres
Scénario n°1 de l'étude de dangers
(arrêté de 2017 modifié)
Entrées d'eau modélisées pour la détermination
des niveaux de protection "pieds au sec"
selon les hypothèses suivantes :
- brèche avant ou après surverse, quand probabilité de brèche > 5 %
- surverse sans brèche, si probabilité de brèche < 5 %
Fonctionnement pour une crue
de 14 160 m³/s* à Beaucaire-Tarascon
Caractérisation des venues d'eau dans la zone protégée
Venues d'eau peu dangereuses : hauteur inférieure à 1 m et vitesse inférieure à 0,5 m/s
Venues d'eau dangereuses : hauteur comprise entre 1 et 2 m et vitesse comprise entre 0,5 et 1 m/s
Venues d'eau très dangereuses : hauteur supérieure à 2 m ou vitesse supérieure à 1 m/s
n : valeur caractéristique de la cote d'inondation au sein de la sous-zone protégée - en m NGF
Probabilité de brèche dans les ouvrages
< 1 % impossible à très peu probable
1 - 5 % très peu probable
5 - 15 % peu probable
15 - 40 % peu probable à possible
40 - 70 % possible à probable
70 - 90 % très probable
>90 % quasiment certain
Remblai hors système d'endiguement
Sources : SYMADREM
Fond de carte : IGN SCAN 25
Réalisation SYMADREM 2021
Référence : 20025
* : Débit mesuré à la station SPC Grand Delta de Beaucaire/Tarascon ± 5%
cote associée : courbe de tarage non valide, niveau marin retenu 1,50 m NGF



Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

Etat B (état actuel)

Fonctionnement probable à certain (probabilité > 50%) du système d'endiguement Camargue insulaire

SE Rive droite et Camargue Insulaire : état actuel au 1er janvier 2021
SE Rive gauche : état autorisé par arrêté interpréfectoral du 24 avril 2018

Scénario n°3 de l'étude de dangers (arrêté de 2017 modifié)

Entrées d'eau modélisées selon les hypothèses suivantes :
- *brèche avant ou après surverse, quand probabilité de brèche > 50 %*
- *surverse sans brèche, si probabilité de brèche < 50 %*

Fonctionnement pour une crue de 7 500 m³/s* à Beaucaire-Tarascon

0 2 500 5 000 7 500 10 000 Mètres

Caractérisation des venues d'eau dans la zone protégée

- Venues d'eau peu dangereuses : hauteur inférieure à 1 m et vitesse inférieure à 0,5 m/s
- Venues d'eau dangereuses : hauteur comprise entre 1 et 2 m et vitesse comprise entre 0,5 et 1 m/s
- Venues d'eau très dangereuses : hauteur supérieure à 2 m ou vitesse supérieure à 1 m/s

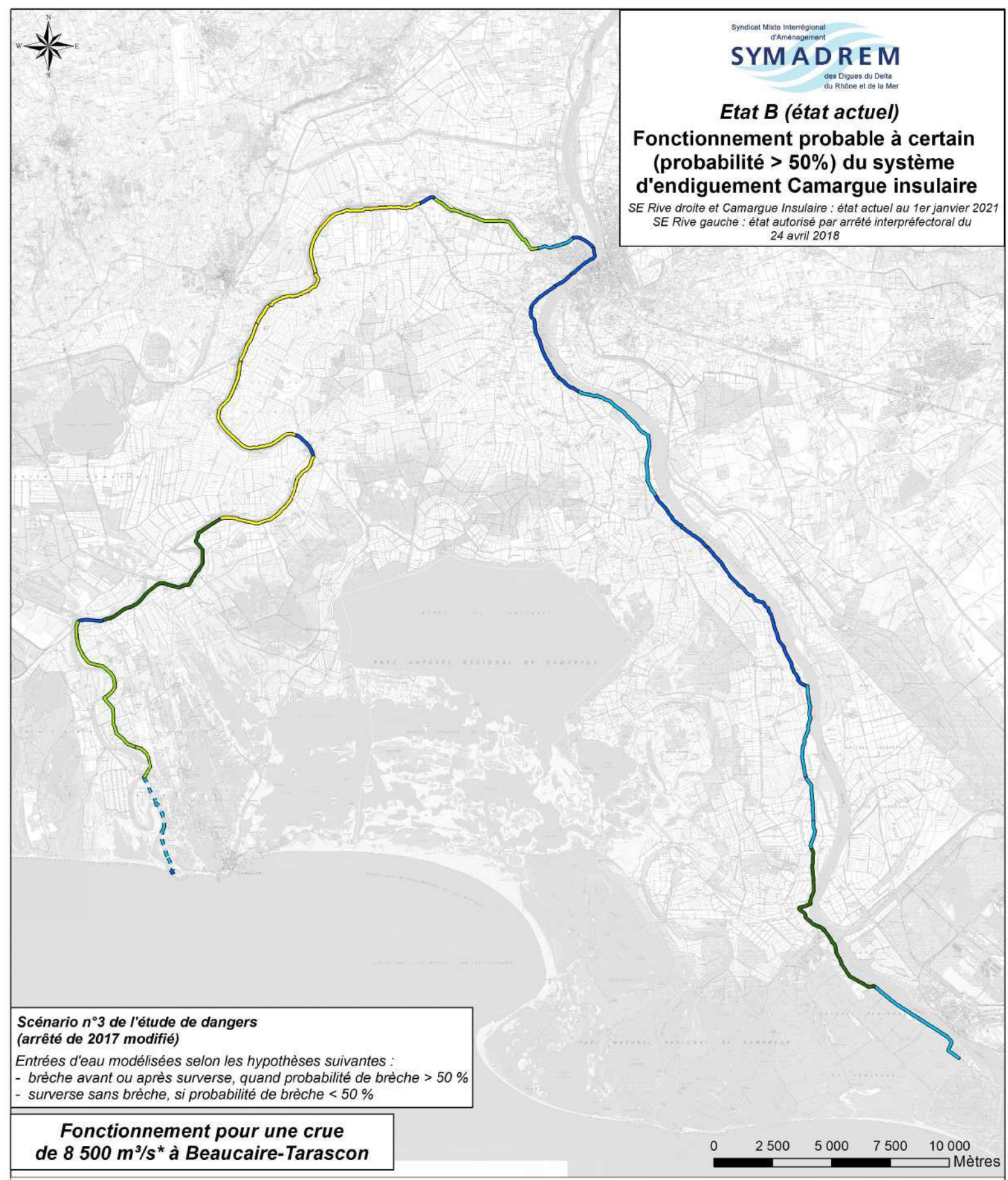
n : valeur caractéristique de la cote d'inondation au sein de la sous-zone protégée - en m NGF

Probabilité de brèche dans les ouvrages

- < 1 % impossible à très peu probable
- 1 - 5 % très peu probable
- 5 - 15 % peu probable
- 15 - 40 % peu probable à possible
- 40 - 70 % possible à probable
- 70 - 90 % très probable
- >90 % quasiment certain
- Remblai hors système d'endiguement

Sources : SYMADREM
Fond de carte : IGN SCAN 25
Réalisation SYMADREM 2021
Référence : 20026

** : Débit mesuré à la station SPC Grand Delta de Beaucaire/Tarascon ± 5%*
cote associée 8,77 m NGF ± 10 cm et niveau marin retenu 0,90 m NGF



Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

Etat B (état actuel)

Fonctionnement probable à certain (probabilité > 50%) du système d'endiguement Camargue insulaire

SE Rive droite et Camargue Insulaire : état actuel au 1er janvier 2021
SE Rive gauche : état autorisé par arrêté interpréfectoral du 24 avril 2018

Scénario n°3 de l'étude de dangers (arrêté de 2017 modifié)

Entrées d'eau modélisées selon les hypothèses suivantes :
- *brèche avant ou après surverse, quand probabilité de brèche > 50 %*
- *surverse sans brèche, si probabilité de brèche < 50 %*

Fonctionnement pour une crue de 8 500 m³/s* à Beaucaire-Tarascon

0 2 500 5 000 7 500 10 000 Mètres

Caractérisation des venues d'eau dans la zone protégée

- Venues d'eau peu dangereuses : hauteur inférieure à 1 m et vitesse inférieure à 0,5 m/s
- Venues d'eau dangereuses : hauteur comprise entre 1 et 2 m et vitesse comprise entre 0,5 et 1 m/s
- Venues d'eau très dangereuses : hauteur supérieure à 2 m ou vitesse supérieure à 1 m/s

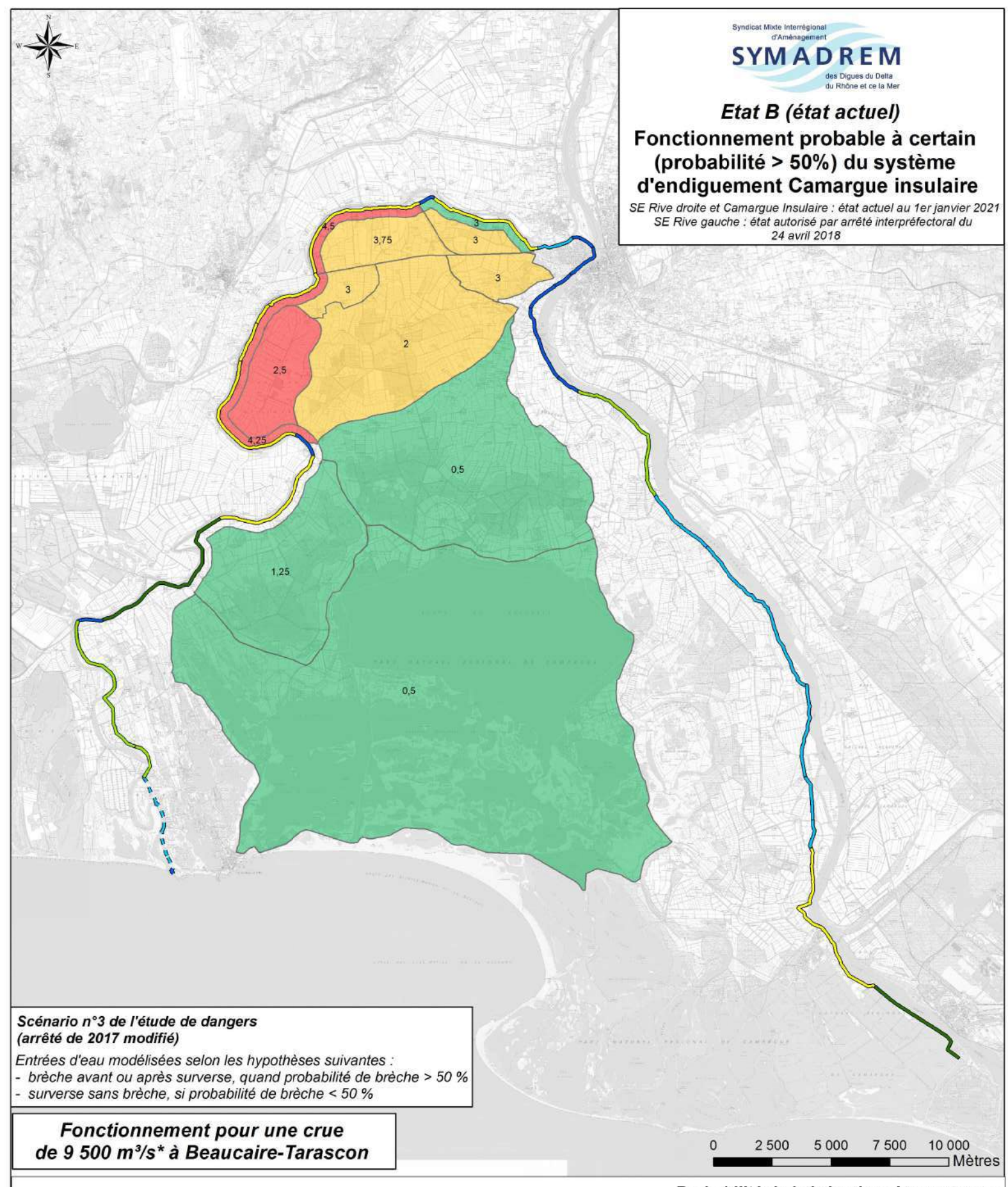
n : valeur caractéristique de la cote d'inondation au sein de la sous-zone protégée - en m NGF

Probabilité de brèche dans les ouvrages

- < 1 % impossible à très peu probable
- 1 - 5 % très peu probable
- 5 - 15 % peu probable
- 15 - 40 % peu probable à possible
- 40 - 70 % possible à probable
- 70 - 90 % très probable
- >90 % quasiment certain
- Remblai hors système d'endiguement

Sources : SYMADREM
Fond de carte : IGN SCAN 25
Réalisation SYMADREM 2021
Référence : 20026

** : Débit mesuré à la station SPC Grand Delta de Beaucaire/Tarascon ± 5%*
cote associée 9,58 m NGF ± 10 cm et niveau marin retenu 0,90 m NGF



Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

Etat B (état actuel)

Fonctionnement probable à certain (probabilité > 50%) du système d'endiguement Camargue insulaire

SE Rive droite et Camargue Insulaire : état actuel au 1er janvier 2021
SE Rive gauche : état autorisé par arrêté interpréfectoral du 24 avril 2018

Scénario n°3 de l'étude de dangers (arrêté de 2017 modifié)

Entrées d'eau modélisées selon les hypothèses suivantes :
- *brèche avant ou après surverse, quand probabilité de brèche > 50 %*
- *surverse sans brèche, si probabilité de brèche < 50 %*

Fonctionnement pour une crue de 9 500 m³/s* à Beaucaire-Tarascon

0 2 500 5 000 7 500 10 000 Mètres

Caractérisation des venues d'eau dans la zone protégée

- Venues d'eau peu dangereuses : hauteur inférieure à 1 m et vitesse inférieure à 0,5 m/s
- Venues d'eau dangereuses : hauteur comprise entre 1 et 2 m et vitesse comprise entre 0,5 et 1 m/s
- Venues d'eau très dangereuses : hauteur supérieure à 2 m ou vitesse supérieure à 1 m/s

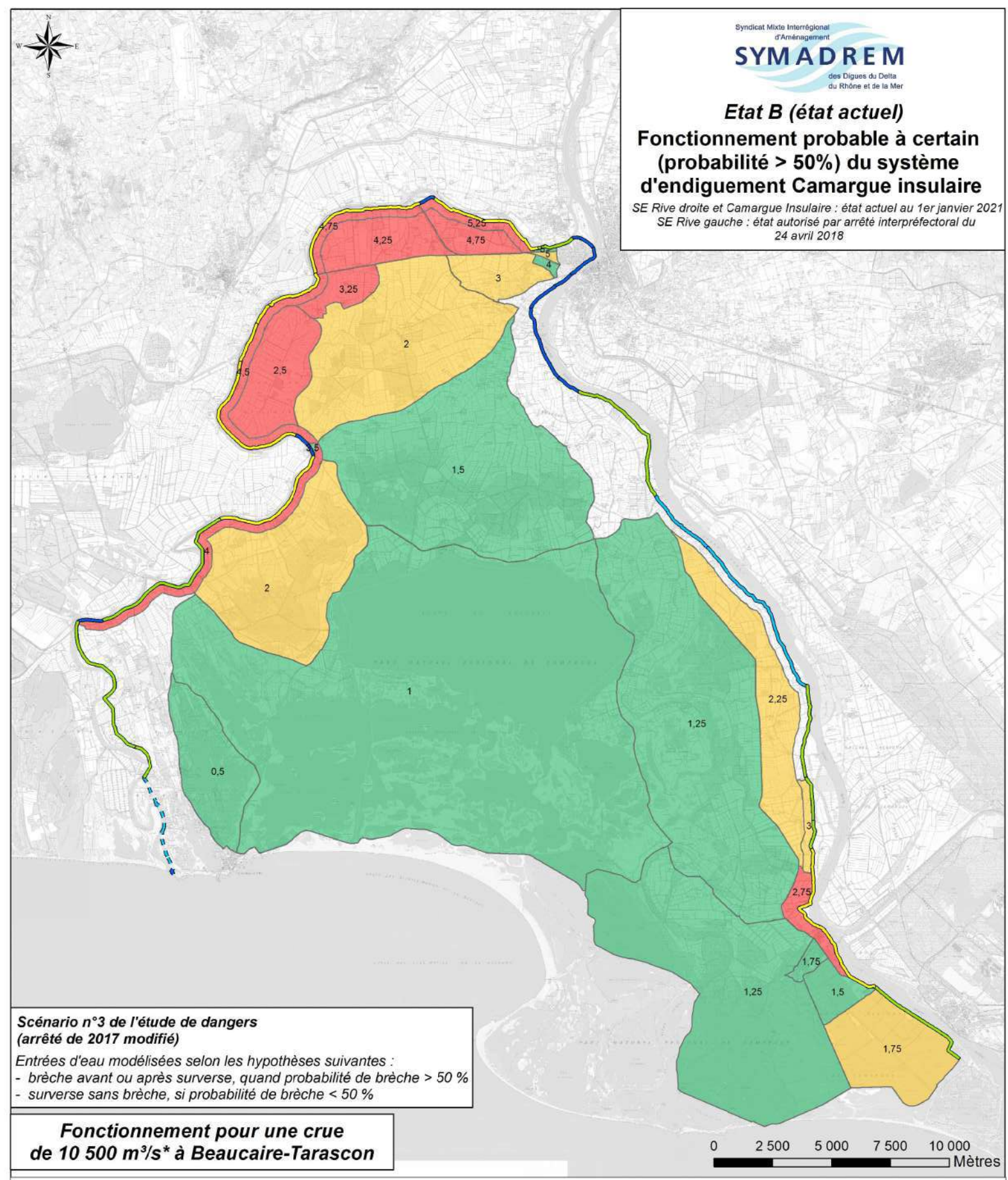
n : valeur caractéristique de la cote d'inondation au sein de la sous-zone protégée - en m NGF

Probabilité de brèche dans les ouvrages

- < 1 % impossible à très peu probable
- 1 - 5 % très peu probable
- 5 - 15 % peu probable
- 15 - 40 % peu probable à possible
- 40 - 70 % possible à probable
- 70 - 90 % très probable
- >90 % quasiment certain
- = = = Remblai hors système d'endiguement

Sources : SYMADREM
Fond de carte : IGN SCAN 25
Réalisation SYMADREM 2021
Référence : 20026

** : Débit mesuré à la station SPC Grand Delta de Beaucaire/Tarascon ± 5%*
cote associée 10,22 m NGF ± 10 cm et niveau marin retenu 0,95 m NGF



Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

Etat B (état actuel)

Fonctionnement probable à certain (probabilité > 50%) du système d'endiguement Camargue insulaire

SE Rive droite et Camargue Insulaire : état actuel au 1er janvier 2021
SE Rive gauche : état autorisé par arrêté interpréfectoral du 24 avril 2018

Scénario n°3 de l'étude de dangers (arrêté de 2017 modifié)

Entrées d'eau modélisées selon les hypothèses suivantes :
- *brèche avant ou après surverse, quand probabilité de brèche > 50 %*
- *surverse sans brèche, si probabilité de brèche < 50 %*

Fonctionnement pour une crue de 10 500 m³/s à Beaucaire-Tarascon*

Caractérisation des venues d'eau dans la zone protégée

- Venues d'eau peu dangereuses : hauteur inférieure à 1 m et vitesse inférieure à 0,5 m/s
- Venues d'eau dangereuses : hauteur comprise entre 1 et 2 m et vitesse comprise entre 0,5 et 1 m/s
- Venues d'eau très dangereuses : hauteur supérieure à 2 m ou vitesse supérieure à 1 m/s

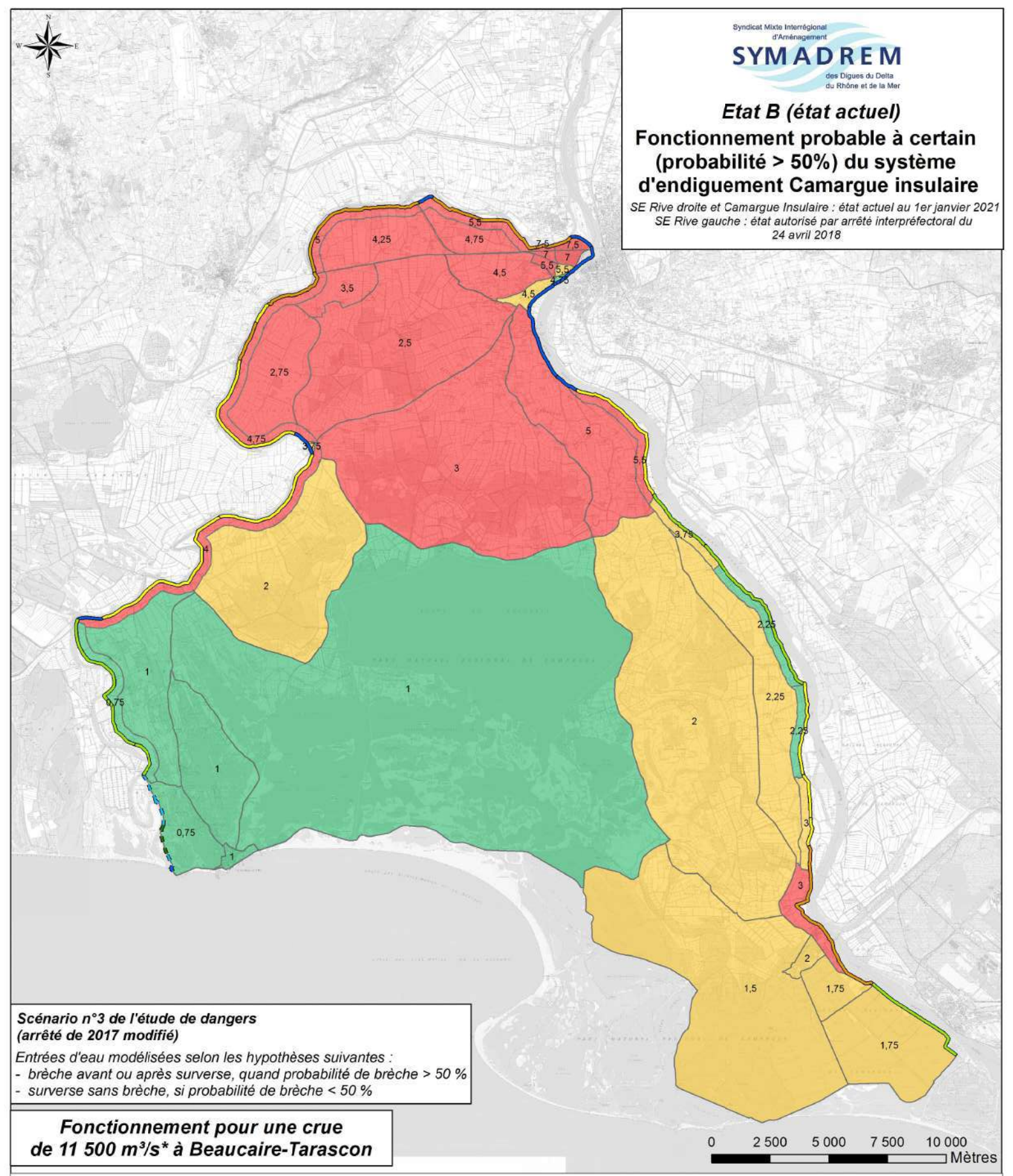
n : valeur caractéristique de la cote d'inondation au sein de la sous-zone protégée - en m NGF

Probabilité de brèche dans les ouvrages

- < 1 % impossible à très peu probable
- 1 - 5 % très peu probable
- 5 - 15 % peu probable
- 15 - 40 % peu probable à possible
- 40 - 70 % possible à probable
- 70 - 90 % très probable
- >90 % quasiment certain
- = = = Remblai hors système d'endiguement

Sources : SYMADREM
Fond de carte : IGN SCAN 25
Réalisation SYMADREM 2021
Référence : 20026

** : Débit mesuré à la station SPC Grand Delta de Beaucaire/Tarascon ± 5% cote associée 10,77 m NGF ± 10 cm et niveau marin retenu 0,81 m NGF*



Caractérisation des venues d'eau dans la zone protégée

- Venues d'eau peu dangereuses : hauteur inférieure à 1 m et vitesse inférieure à 0,5 m/s
- Venues d'eau dangereuses : hauteur comprise entre 1 et 2 m et vitesse comprise entre 0,5 et 1 m/s
- Venues d'eau très dangereuses : hauteur supérieure à 2 m ou vitesse supérieure à 1 m/s

n : valeur caractéristique de la cote d'inondation au sein de la sous-zone protégée - en m NGF

Probabilité de brèche dans les ouvrages

- < 1 % impossible à très peu probable
- 1 - 5 % très peu probable
- 5 - 15 % peu probable
- 15 - 40 % peu probable à possible
- 40 - 70 % possible à probable
- 70 - 90 % très probable
- >90 % quasiment certain
- Remblai hors système d'endiguement

Sources : SYMADREM
Fond de carte : IGN SCAN 25
Réalisation SYMADREM 2021
Référence : 20026

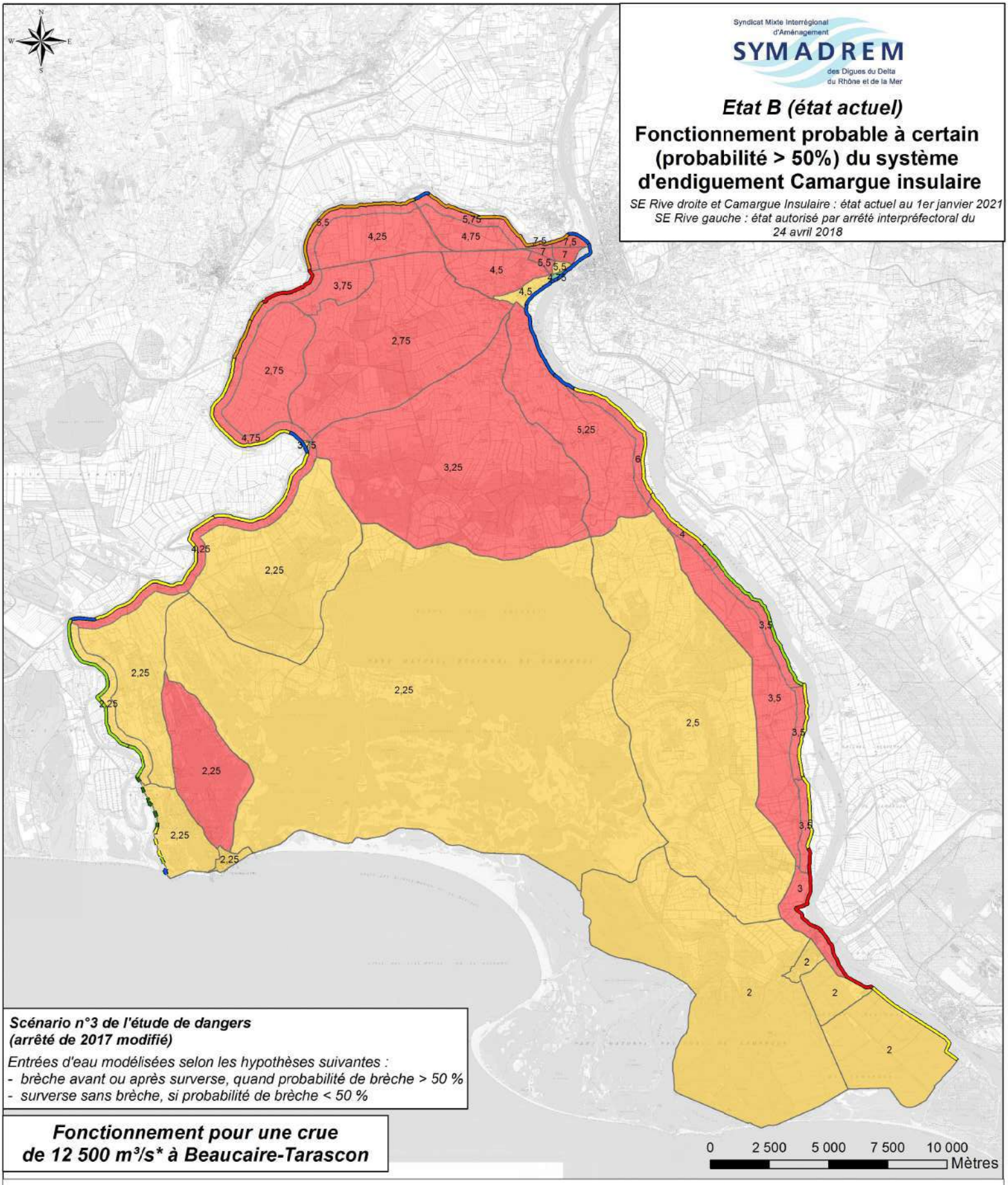
** : Débit mesuré à la station SPC Grand Delta de Beaucaire/Tarascon ± 5% cote associée 11,30 m NGF ± 10 cm et niveau marin retenu 0,98 m NGF*

Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

Etat B (état actuel)

Fonctionnement probable à certain (probabilité > 50%) du système d'endiguement Camargue insulaire

SE Rive droite et Camargue Insulaire : état actuel au 1er janvier 2021
SE Rive gauche : état autorisé par arrêté interpréfectoral du 24 avril 2018



Scénario n°3 de l'étude de dangers (arrêté de 2017 modifié)

Entrées d'eau modélisées selon les hypothèses suivantes :
- *brèche avant ou après surverse, quand probabilité de brèche > 50 %*
- *surverse sans brèche, si probabilité de brèche < 50 %*

Fonctionnement pour une crue de 12 500 m³/s* à Beaucaire-Tarascon

Caractérisation des venues d'eau dans la zone protégée

- Venues d'eau peu dangereuses : hauteur inférieure à 1 m et vitesse inférieure à 0,5 m/s
- Venues d'eau dangereuses : hauteur comprise entre 1 et 2 m et vitesse comprise entre 0,5 et 1 m/s
- Venues d'eau très dangereuses : hauteur supérieure à 2 m ou vitesse supérieure à 1 m/s

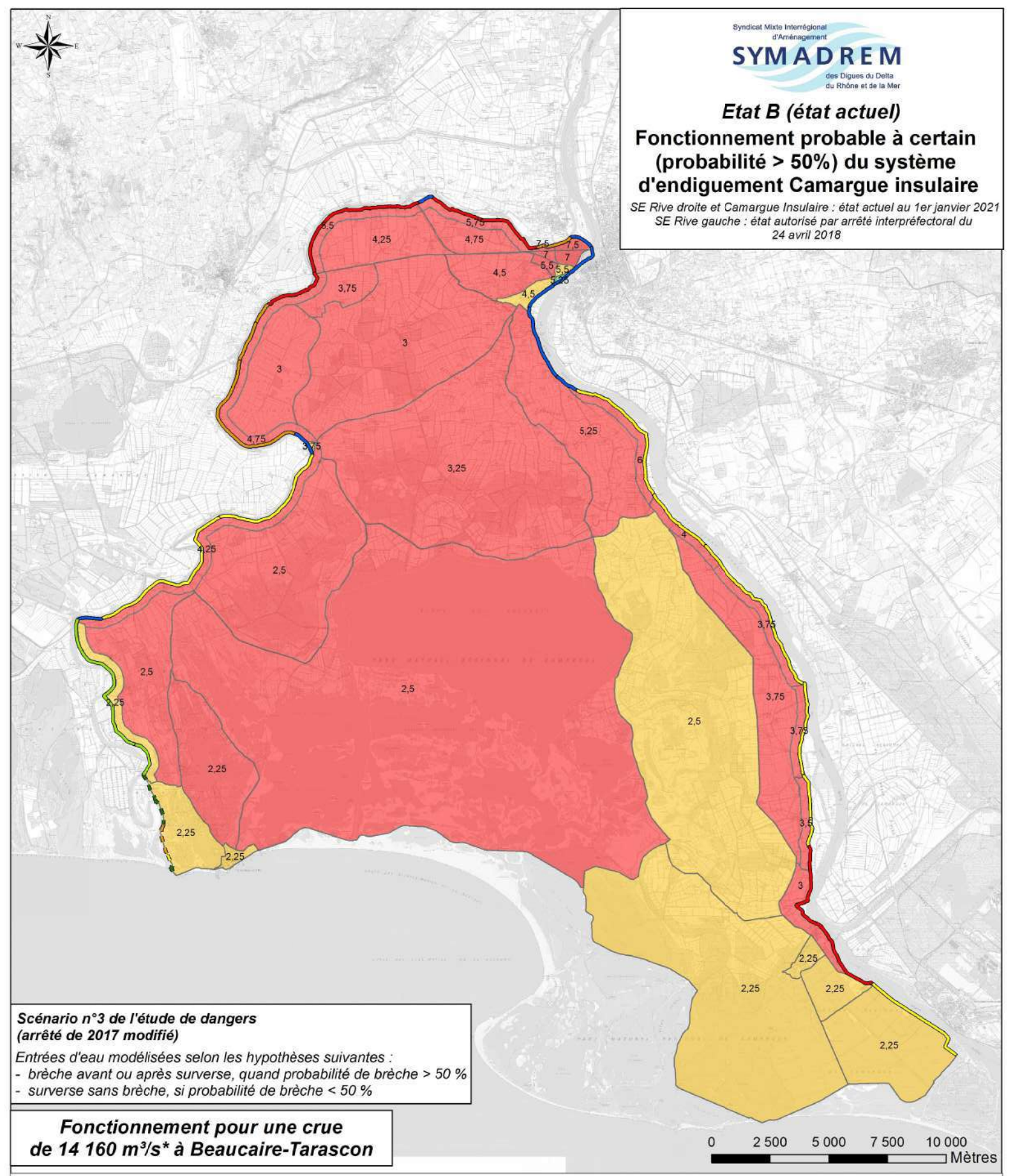
n : valeur caractéristique de la cote d'inondation au sein de la sous-zone protégée - en m NGF

Probabilité de brèche dans les ouvrages

- < 1 % impossible à très peu probable
- 1 - 5 % très peu probable
- 5 - 15 % peu probable
- 15 - 40 % peu probable à possible
- 40 - 70 % possible à probable
- 70 - 90 % très probable
- >90 % quasiment certain
- = = = Remblai hors système d'endiguement

Sources : SYMADREM
Fond de carte : IGN SCAN 25
Réalisation SYMADREM 2021
Référence : 20026

** : Débit mesuré à la station SPC Grand Delta de Beaucaire/Tarascon ± 5%*
cote associée : courbe de tarage non valide, niveau marin retenu 1,30 m NGF



Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

Etat B (état actuel)

Fonctionnement probable à certain (probabilité > 50%) du système d'endiguement Camargue insulaire

SE Rive droite et Camargue Insulaire : état actuel au 1er janvier 2021
SE Rive gauche : état autorisé par arrêté interpréfectoral du 24 avril 2018

Scénario n°3 de l'étude de dangers (arrêté de 2017 modifié)

Entrées d'eau modélisées selon les hypothèses suivantes :
- *brèche avant ou après surverse, quand probabilité de brèche > 50 %*
- *surverse sans brèche, si probabilité de brèche < 50 %*

Fonctionnement pour une crue de 14 160 m³/s* à Beaucaire-Tarascon

Caractérisation des venues d'eau dans la zone protégée

- Venues d'eau peu dangereuses : hauteur inférieure à 1 m et vitesse inférieure à 0,5 m/s
- Venues d'eau dangereuses : hauteur comprise entre 1 et 2 m et vitesse comprise entre 0,5 et 1 m/s
- Venues d'eau très dangereuses : hauteur supérieure à 2 m ou vitesse supérieure à 1 m/s

n : valeur caractéristique de la cote d'inondation au sein de la sous-zone protégée - en m NGF

Probabilité de brèche dans les ouvrages

- < 1 % impossible à très peu probable
- 1 - 5 % très peu probable
- 5 - 15 % peu probable
- 15 - 40 % peu probable à possible
- 40 - 70 % possible à probable
- 70 - 90 % très probable
- >90 % quasiment certain
- = = = Remblai hors système d'endiguement

Sources : SYMADREM
Fond de carte : IGN SCAN 25
Réalisation SYMADREM 2021
Référence : 20026

** : Débit mesuré à la station SPC Grand Delta de Beaucaire/Tarascon ± 5%*
cote associée : courbe de tarage non valide, niveau marin retenu 1,50 m NGF

3 CARTES DES VENUES D'EAU – POST TRAVAUX

NON Concerné

4 CARTES LIEES AU CAS DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT NOUVEAU AU PROFIT DE TERRITOIRES PRECEDEMMENT DEPOURVUS DE TOUTE PROTECTION

NON Concerné

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT FLUVIAL CAMARGUE INSULAIRE

ANNEXES :

ANNEXE N°1 : BIBLIOGRAPHIE 1

ANNEXE N°2 : GLOSSAIRE 14

Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
SYMADREM
des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT FLUVIAL CAMARGUE INSULAIRE

ANNEXE N°1 : BIBLIOGRAPHIE

Les références utilisées dans le cadre de la présente étude de dangers sont les suivantes :

Accidentologie

[A1840 01] : Journal de Toulouse et de la Haute Garonne – éditions novembre 1840
[A1840 02] : Journal le Censeur de Lyon – éditions novembre 1840
- [A1840 04] : Conseil Général du Département du Gard – Session 1840 – Procès-verbal des délibérations – 1841 – source Gallica

[A1840 06] : Réparation d'urgence des huit brèches ouvertes dans les digues du Rhône entre Beaucaire et Fourques par l'inondation extra-ordinaire du 3 novembre 1840 et des jours suivants – Devis et cahier des charges – Ponts et Chaussées – Navigation Intérieure – Arrondissement de Nîmes - 24 novembre 1840
[A1840 08] : Réparation d'urgence des huit brèches ouvertes dans les digues du Rhône entre Beaucaire et Fourques par l'inondation extra-ordinaire du 3 novembre 1840 et des jours suivants – Avant métré – Ponts et Chaussées – Navigation Intérieure – Arrondissement de Nîmes – 9 décembre 1840
[A1840 11] : Projet de fermeture de la brèche de Saint Denis - Ponts et Chaussées – Département du Gard - juillet 1841
[A1840 13] : Décompte général et définitif des travaux exécutés dans la commune de Fourques pour la fermeture des brèches – Ponts et Chaussées – arrondissement de Nîmes – 31 juillet 1841
[A1840 17] : La crue du Rhône en 1840 – Gilles BERNARD – SYMADREM - 2012
[A1841 03] : Plans et Evaluation sommaire et approximative des ouvrages à exécuter pour la fermeture de la brèche de l'abattoir dans la digue du Rhône à Beaucaire - Ponts et Chaussées – Département du Gard - 23 novembre 1841
[A1841 04] : Plans et Evaluation sommaire et approximative des ouvrages à exécuter et des dépenses à faire pour la fermeture de la nouvelle brèche de Saint Denis et pour l'achèvement des travaux commencés en 1841 pour la réparation des digues du Rhône dans la commune de Beaucaire – Ponts et Chaussées – Département du Gard – 23 novembre 1841
[A1843 01] : Journal de Toulouse et de la Haute Garonne – éditions novembre 1843
[A1843 02] : Journal le Censeur de Lyon – éditions novembre 1843
[A1843 03] : Fermeture immédiate des brèches ouvertes par l'inondation du 2 novembre 1843 dans les chaussées du trébon- territoire de Tarascon – 21 novembre 1843
[A1843 04] : Etat général des travaux de 1ère classe à exécuter sur le crédit de 1 million affecté à la réparation des dégâts causés par la crue du 2 novembre 1843 - Ponts et Chaussées - Service Spécial du Rhône 3ème section – 27 mars 1844
[A1856 06] : Recherche historique de la crue de 1856 en bas Rhône – DDE des Bouches du Rhône/GINGER – décembre 2008
[A1872 01] : Brèche partielle Commanderie – Archive départementale du Vaucluse
[A1993 01] : Tribunal administratif de Marseille – Note technique n°1 sur les origines et causes des inondations de Camargue en 1993 et 1994 – Louis GOUILLART – Ingénieur INSA, expert près de la cour d'appel d'Aix en Provence et le Tribunal Administratif de Marseille
- Annexe 28 : Emplacement et description des brèches
- Annexe 29 : CNRS - suivi des inondations survenues en Camargue suite à la crue d'octobre 1993 – novembre 1993 – Didier Pont et Eric Coulet
- Annexe 30 : Activités de la subdivision d'Arles du Service Navigation pendant la crue d'octobre 1993
- Annexe 31 : Notes de synthèse du PC de crise d'Arles pendant la crue de janvier 1994

[A1993 02] : Commune d'Arles - Bulletin Interne du Personnel communal d'Arles – novembre 1993
[A1993 03] : R. BONNEFOY et P. ROYET– Désordres relevés sur les digues de Camargue pendant les crues du Rhône d'octobre 1993 et janvier 1994 et premiers travaux d'urgence - Comité Français des Grands Barrages de mai 1994
[A1993 04] : Image SPOT 1993
[A1993 05] : Vidéos Christian SMIDT – Mairie d'Arles
[A1993 06] : Photos prises par la Direction Départementale des Bouches-du-Rhône - 1993
[A1993 07] : Photos prises par Service Navigation Rhône-Saône - 1993
[A1993 08] : Syndicat Intercommunal des Digues du Rhône – Crue du Rhône d'octobre 1993 – Rapport de Monsieur Gilles DUMAS – Président du Syndicat – 26 octobre 1993.
[A1994 01] : Commune d'Arles – Profils en long et en travers levés sur la digue de protection des crues du Petit Rhône en rive gauche avant et après les travaux de création de piste d'accès entre Arles et Albaron et levers des laisses de crue de janvier 1994 - Géomètre expert M. GOURRAUD - 1994
[A1994 02] : Image SPOT 1994
[A1994 03] : Photographies aériennes P. BLOT
[A1994 04] : Photos prises par Monsieur Yvan CAVALLINI en janvier 1994
[A1994 05] : Photos prises par la Direction Départementale des Bouches-du-Rhône - 1994
[A1994 06] : Photos prises par Service Navigation Rhône-Saône - 1994
[A1994 07] : La Provence – articles journaux
[A1996 04] : Syndicat Intercommunal des Digues du Rhône de Beaucaire à la Mer – projet de confortement des digues du Rhône et du Petit Rhône – Dossier d'enquête préalable à la Déclaration d'Utilité Publique, de demande d'autorisation et de Déclaration d'Intérêt Général – BRLingénierie – décembre 2000
[A1996 05] : Domaine de la Motte – courrier au Préfet du Gard – 20/11/1996
[A1996 06] : Syndicat Intercommunal des Digues du Rhône de Beaucaire à la Mer – Compte rendu de la réunion du 15/11/1996
[A1996 07] : Syndicat Intercommunal des Digues du Rhône de Beaucaire à la Mer – Devis de travaux de réparation de terriers de blaireaux au droit du domaine de la Motte – CROZEL TP – 29 novembre 1996
[A1996 08] : Mairie de Saint Gilles – courrier du maire au président du SIDR – 13 novembre 1996
[A1996 09] : Syndicat Intercommunal des Digues du Rhône de Beaucaire à la Mer – Facture de travaux de confortement des digues du Rhône sur les domaines de Pradeaux, de la Motte et du Mas neuf de Capette – CROZEL TP – 31 décembre 1996
[A1996 10] : Syndicat Intercommunal des Digues du Rhône de Beaucaire à la Mer – Devis de travaux de confortement des digues du Rhône sur les domaines de Pradeaux, de la Motte et Mas de Claire Farine – CROZEL TP – 18 mars 1997
[A1996 11] : Syndicat Intercommunal des Digues du Rhône de Beaucaire à la Mer – Courrier du président à monsieur Roland GRONCHI du 6 décembre 1996
[A1996 12] : Syndicat Intercommunal des Digues du Rhône de Beaucaire à la Mer – Courrier du président à monsieur le Préfet du Gard du 30 avril 1997
[A2002 01] : La Provence – article du 12 septembre 2002
[A2002 02]: SYMADREM – Photos
[[A2002 03]: SYMADREM – Travaux d'urgence menés sur les digues - 2002
[A2002 04]: Cemagref/SIDR - Mémento de la visite rapide en date du 6/12/2002 du site de la brèche de Claire Farine et du point de la surverse de Mas Bel air (désordres survenus lors de la crue des 25,26 et 27 novembre 2002) – janvier 2003

[A2002 06]: SIDR : Fiches de suivi des Gardes digues – 1996 à 2003
[A2002 07]: Cemagref/SYMADREM - Travaux d'urgence suite aux crues du 16 au 28 novembre 2002 – compléments de diagnostic et capitalisation du retour d'expérience – juillet 2003
[A2002 08]: SYMADREM – photos des interventions d'urgence
[A2002 10]: La Provence – photo brèche de Claire Farine 2002 – 27 novembre 2002 et 11 décembre 2002
[A2002 11]: Ville des Saintes-Maries-de-la-Mer – Journal d'informations municipales – déc. 2002
[A2002 12] : Parc Naturel Régional de Camargue – photos désordre
[A2002 13]: SIDR – vidéo tournée par le directeur
[A2003 02] : Cemagref – procès-verbal de la visite de contrôle des 18 et 19 février 2004 sur la digue du Syndicat Intercommunal des digues du Rhône de Beaucaire à la Mer – février 2004
[A2003 03] : Cemagref – Dégâts et désordres suite à la crue du 2 au 5 décembre 2003 – Compléments de diagnostic et capitalisation du retour d'expérience – SYMADREM – version provisoire du 06/04/2004
[A2003 07] : SYMADREM – Crue décembre 2003 – Bilan et Priorités
[A2003 08] : Ville Arles – Crue décembre 2003 – Vidéos Christian SCHMIDT
[A2003 09] : Image SPOT - IGN
[A2003 18] : Mémoires de la crue du Rhône de décembre 2003 à Bellegarde du Gard - Commune de Bellegarde – Elie Bataille et Pascal Crapé - 2004
[A2003 19] : Monographie de la crue de décembre 2003 – Déroulement des inondations – DIREN Rhône Alpes – GINGER - 2006

Bathymétrie

Traversée d'Arles

[B001] : SYMADREM – Traversée d'Arles – Profil PK VNF – ISL – 2002
[B002] : SYMADREM – Traversée d'Arles – Profils en travers – Bathys – 2007
[B003] : SYMADREM – Traversée d'Arles – Profils en travers après travaux tranches 1 à 4 – ATGTSM – 2009
[B004] : SYMADREM – Traversée d'Arles – Profils en travers Gare Maritime – ATGTSM – 2010
[B005] : SYMADREM – Traversée d'Arles – MNT et Profils en travers - INGEO – 2015

Petit Rhône
Les levés bathymétriques mis à disposition par VNF couvrent le chenal navigable du Petit Rhône, localement étendu aux déflecteurs. Les données sont de nature très différente. Certaines données sont par rapport au fil d'étiage théorique, ou en m NGF.

[B101] : SYMADREM – Etude de renforcement et décorsetage limité des digues du Petit Rhône – Comparaison bathymétrie et tracé du lit 1876 à 1994 – EGISeau – avril 2009
[B102] : CEREGE – bathymétrie 1876 du Petit Rhône à partir des plans d'archives des ponts et chaussées – 2008
[B103] : VNF – profils en travers bathymétriques PK 279 à PK 336,5 – 1994
[B104] : VNF – profils en travers bathymétriques PK 279 à PK 300 - 2001
Les données sont non géoréférencées. L'implantation des profils est faite suivant l'axe de navigation et les données altimétriques sont des profondeurs relatives par rapport à une ligne

d'eau théorique d'étiage marquant 0,40 m à l'échelle de la station de Fourques, 0,20 m à l'échelle de Saint Gilles et 0,0 m à l'embouchure.

[B105] : VNF – profils en travers bathymétriques PK 279 à PK 336 - 2004
Les données planimétriques sont géo-référencées. Les données altimétriques sont des profondeurs relatives par rapport à une ligne d'eau théorique d'étiage marquant 0,40 m à l'échelle de la station de Fourques, 0,20 m à l'échelle de Saint Gilles et 0,0 m à l'embouchure.

[B106] : VNF – profils en travers bathymétriques localisés après travaux de dragage (données géo-référencées et cotes NGF) - 2006

- PK 283,5 et PK 284,0 (28 profils)
- PK 284,7 et PK 285,5 (31 profils)
- PK 288,1 et PK 288,8 (29 profils)
- PK 294,6 et PK 295,0 (18 profils)
- PK 295,6 et PK 296,6 (32 profils)
- PK 296,7 et PK 297,2 (30 profils)
- PK 298,5 et PK 298,7 (19 profils)

[B107] : VNF – profils en travers bathymétriques du PK 279 au PK 300 - 2007

[B108] : SYMADREM – profils en travers (1 par PK) bathymétriques du PK 279 au PK 336,5 et profils en long – Bathys – 2009

[B109] : VNF – Bathymétrie générale (données géo-référencées et cotes NGF) – 2010
[B110] : VNF – Bathymétrie avant et après travaux de dragage (données géo-référencées et cotes NGF) – 2011
[B111] : SYMADREM – Bathymétrie digues du Petit Rhône proches du fleuve dans le cadre de l'opération de décorsetage – INGEO – 2012
[B112] : VNF – Bathymétrie générale été 2013 petit Rhône aval (données géo-référencées et cotes NGF) – 2013
[B113] : SYMADREM – Bathymétrie digues du Petit Rhône Rive Droite proches du fleuve dans le cadre de l'examen technique complet et revue de sûreté – INGEO – 2014
[B114] : VNF – Bathymétrie générale été 2015 petit Rhône amont (données géo-référencées et cotes NGF) – 2015
[B113] : SYMADREM – Bathymétrie digues du Petit Rhône Rive Droite Mas des Aurillasses – ATGTSM – 2017

Rhône et Grand Rhône

[B201] : CEREGE – bathymétrie 1876 du Rhône à partir des plans d'archives des ponts et chaussées – 2008
[B202] : CEREGE – bathymétrie 1907 du Grand Rhône à partir des plans d'archives des ponts et chaussées – 2008
[B203] : CNR – Profils bathymétriques du Rhône et Grand Rhône du PK 269,1 à 323 – 1999
[B204] : CNR – Profils bathymétriques du Rhône et Grand Rhône du PK 262,6 à 323 – 2006
[B205] : CEREGE – bathymétrie embouchure du Grand Rhône - 2006

Topographie

[C001] : Plan SIDR 1994

[C201] : SYMADREM : Plan topographique à l'échelle 1/500ème (bande de 200m) – Orthophotographies géo-référencées et ortho-rectifiée (taille pixel : 7cm) - profil en long de la crête de digue et des pieds de digue amont et aval - Modèle Numérique de Terrain (MNT) et d'élévation (MNE) (bande de 200m) - FUGRO GEOID - 2007
[C202] : Agence de l'eau : Base de données topographiques réalisée dans le cadre du Plan Rhône – Modèle numérique de terrain – IGN - 2011

Etudes préliminaires, d'avant-projet et de projet

[D801] : SYMADREM – Digue Salin de Giraud et Port Saint Louis - AVP
[D1001] : SYMADREM – Petit Rhone - AVP - lots 2 à 7 - 2013-2016

Etude de dangers

[E602] : SYMADREM : Réparation des quais du Rhône dans la traversée d'Arles - Etude de dangers – ISL – 2012

[E607] : SYMADREM : Réparation des quais du Rhône dans la traversée d'Arles - Etude de dangers après travaux – ISL – 2017

Géotechnique

[G102] : CNR - Reconnaissance géotechnique des digues de Camargue – rapport EA 95 008 – Fondasol – 1195

[G103] : SYMADREM – Confortement des quais de la roquette et de la gare maritime - rapport 24M CK 584 I0G - Fugro géotechnique - 2003

[G104] : SYMADREM – Arles - Diagnostic des Quais du Rhône - rapport 24M CK 419 I0G - Fugro géotechnique - 2003

[G105] : SYMADREM – Port Saint Louis – confortement des digues - rapport 34M CK 376 I1G - Fugro géotechnique - 2003

[G106] : SYMADREM – Arles – Confortement des quais de la gare maritime et du 8 mai 1945 - rapport 441C 138 I1G - Fugro géotechnique - 2004

[G107] : SYMADREM – Tarascon – Digue de la montagnette et de protection du centre-ville - rapport 441C 689 CKO I0G - Fugro géotechnique - 2005

[G108] : SYMADREM – Arles – Digues du Grand Rhône rive gauche Secteurs Barriol/Tour d'Aling - rapport 541C 116 CKO I0G - Fugro géotechnique – 2005

[G109] : CD 13 – Extension du Musée d'Arles Antique - rapport C/G/10/169/G/095- hydrogéotechnique – 2010

[G110] : SYMADREM – Tarascon-Renforcement de la digue de la Montagnette - rapport 09M 0184 A00 CKO I0G - Fugro géotechnique – 2010

[G111] : RFF – Mise en transparence hydraulique du remblai ferroviaire entre Tarascon et Arles - rapport C.11.50112_A0- hydrogéotechnique – 2012

[G112] : SYMADREM – renforcements des quais de Tarascon et de la digue de la Montagnette – rapport CMO2.D.2145 - GINGER CEBTP – 2013

[G113] : SYMADREM – renforcement de la digue grand Rhône rive gauche entre prend te garde et grand molleges – rapport CMO2.D.2081- GINGER CEBTP – 2014

[G114] : SYMADREM – création d'une digue entre Tarascon et Arles – rapport S13MOH002- GINGER CEBTP – 2015

[G203] : SYMADREM – Digue Tarascon-Arles – rapport D14cp0001ind1 – Sol Solution – 2015
[G204] : SYMADREM – Digue Tarascon-Arles – rapport Geophy00067BPE01 – GeophyConsult – 2015
[G205] : SYMADREM – Digue Tarascon-Arles – rapport 2015_LONATT_HET – IRSTEA – 2015
[G207] : SYMADREM – Digue Tarascon-Arles - Etude de l'évolution de la résistance à l'érosion de la digue de l'Amarée – rapport geophy00146BPE01 – GeophyConsult – 2016

Historique

[H0003] : Carte du Rhône en 31 feuilles (feuilles n°38 à 52) – Ponts et Chaussées - 1876
[H0004] : Pichard Georges et Roucaute Emeline – Sept Sicèles d'Histoire HydroClimatique du Rhône d'Orange à la Mer – Revue Méditerranée – 2014
[H0005] : Etude historique des aménagements pour lutter contre le risque inondation dans le grand delta du Rhône – Adrien MEJEAN – SYMADREM – 2007
[H1009] : Mémoire sur l'organisation d'un syndicat général de Beaucaire à la Mer rédigé par les ingénieurs du service spécial du Rhône (Alex. Surrel et Bouvier) et décret de l'An XIII qui régit les chaussées – 15 juillet 1844
[H1023] : Le canal d'irrigation de Beaucaire et les chaussées de la rive droite du Grand et Petit Rhône – Simple exposé adressé à Monsieur le Préfet du Gard par Ad. VALZ – Syndicat des digues du Rhône de Beaucaire à la Mer – 5 avril 1877
[H1032] : Service Spécial du Rhône - Plan travaux – Siphon projeté au droit du Mas de Claire Farine - 1909
[H1033] : Réglementation générale des prises d'eau de la rive droite du Petit Rhône – Clauses à insérer dans les projets de règlement dans l'intérêt de la digue syndicale de Beaucaire à la Mer – Profil en long de la digue syndical entre Beaucaire et Sylvéréal- Ponts et Chaussées - Service Spécial du Rhône 4ème arrondissement – 10 octobre 1912
[H1034] : Le Rhône de Beaucaire-Tarascon à la Mer – Digues de défense contre les inondations – projet de renforcement des digues – Syndicat des digues de Beaucaire à la Mer : Syndicat des digues de la Grande Camargue – profil en long et profil en travers type - Service Navigation Rhône–Saône – 1984

Hydrologie

[J001] : Institution Interdépartementale des Bassins Rhône-Saône/Territoire Rhône : Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône (EGR) – Volet 1 : hydrologie : SAFEGE CETIIS – 2003.
[J002] : DREAL Rhône-Alpes – Ré-estimation des débits caractéristiques aux stations hydrométriques du Rhône de Viviers et de Beaucaire – SAFEGE – Juillet 2014
[J003] : CNR : rapport de la crue de décembre 2003 : synthèse hydrologique – septembre 2004
[J004] : CNR : Bilan d'activités 1992 – 1992

Hydraulique

[K001] : Pardé Maurice : le régime du Rhône à Beaucaire. In : recueil des travaux de l'institut de géographie alpine 1919, tome 7 N°2. pp. 309-368 - http://www.persee.fr
[K003] : Pardé Maurice : la grande crue du Rhône en novembre 1935. In : revue de géographie alpine. 1936, tome 24 N°2. pp. 395-420 - http://www.persee.fr
[K008] : ATGTSM – relevé des échelles du Pont de Beaucaire et du Pont de Fourques – 2010
[K100] : SYMADREM - Etude de calage précis entre Beaucaire et Arles – rapports de phase 1 à 5 – CNR – 2009
[K101] : SYMADREM – Etude de renforcement et décorsetage limité des digues du Petit Rhône – lot n°1 : étude hydraulique – EGISeau - 2010
[K102] : SYMADREM – Etude de renforcement de la digue rive droite à Salin de Giraud et mise à la cote de la digue de Port-Saint-Louis-du-Rhône - Etude hydraulique – CNR – 2010
[K103] : SYMADREM - Etude de calage prestations supplémentaires – CNR – 2013
[K104] : SYMADREM - Etude de calage prestations supplémentaires – étude hydraulique d'opportunité du recul aval esquineau – note de synthèse - CNR – 2012
[K105] : SYMADREM – Etude de calage prestations supplémentaires - Etude de renforcement de la digue rive droite à Salin de Giraud et mise à la cote de la digue de Port-Saint-Louis-du-Rhône - Etude hydraulique – CNR – 2015
[K106] : SYMADREM - Création d'une digue à l'ouest du remblai ferroviaire Tarascon/Arles et mesures associées – projet – étude hydraulique et analyse morphodynamique de la lône projetée – SAFEGE - 2015
[K107] : SYMADREM - Etude relative à la gestion et au ressuyage des eaux déversées en rive gauche du Rhône entre Tarascon et Arles – EGISeau – 2014
[K108] : SYMADREM - Etude de l'impact hydraulique de la déviation de la RD35 et du contournement autoroutier – EGISeau – 2013
[K109] : SYMADREM - Etude de l'impact hydraulique de la digue nord sur la crue de décembre 2003 – EGISeau – 2014
[K110] : SYMADREM - Etude relative à la gestion et au ressuyage des eaux déversées en rive gauche du Rhône entre Tarascon et Arles –modélisation de brèche du Grand Rhône EGISeau – 2014
[K111] : SYMADREM - Etude de l'impact hydraulique de la rehausse du déversoir de Boulbon – EGISeau – 2015
[K112] : Etude relative à la gestion et au ressuyage des eaux déversées en rive gauche du Rhône entre Tarascon et Arles – étude hydraulique complémentaire dans le cadre de l'étude de dangers de la digue Tarascon-Arles – 2015
[K113] : Etude relative à la gestion et au ressuyage des eaux déversées en rive gauche du Rhône entre Tarascon et Arles – Modélisations complémentaires dans le cadre des EDD – 2016
[K114] : Etude relative à la gestion et au ressuyage des eaux déversées en rive gauche du Rhône entre Tarascon et Arles – Modélisations complémentaires dans le cadre des EDD rupture de l'écluse d'Arles – 2017
[K203] : limnigrammes CNR
[K204] : Règlement de surveillance de prévision et de transmission de l'information sur les crues (RIC) – DREAL Rhône Alpes - Service Prévision des Crues du Grand Delta – 2013
[K205] : DIREN de bassin - Propositions pour le choix d'un échantillon représentatif des crues du Rhône – SOGREAH – septembre 2006

Morphodynamique

[M003] : Carte géomorphologique – Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt – 1970

[M005] : FASSETTA G. Arnaud : Dynamiques fluviales holocènes dans le delta du Rhône. Thèse de géographie physique, Université de Provence (Aix-Marseille 1) – CEREGE -1998

[M006] : ANTONELLI Christelle : Flux sédimentaires et morphogénèse récente dans le chenal du Rhône aval — Thèse de géographie physique, Université de Provence (Aix-Marseille 1) - CEREGE – 2002

[M007] : RACCASI Guillaume : Mutations géomorphologiques récentes du Rhône aval, Recherches en vue de la restauration hydraulique et de la gestion des crues – Thèse de géographie physique, Université de Provence (Aix-Marseille 1) - CEREGE – 2008

[M013] : SYMADREM – Diagnostic géomorphologique dans le cadre des travaux de 2ème urgence – SAFEGE 2006

Crues

[O0002] : Archives départementales de l'Hérault – mesures de niveaux de 1830 à 1928 Station Pont de Beaucaire
[O1840 01] : Inondation du mois de novembre 1840 – Profils du mouvement de la crue aux échelles d'Avignon, de Beaucaire et d'Arles - Ponts et Chaussées - Service Spécial du Rhône 4ème arrondissement – 30 mai 1857
[O1856 01] : Echelle de Beaucaire – Bulletin journalier du 14 mai au 13 juin 1856 - Ponts et Chaussées - Service Spécial du Rhône 4ème arrondissement – 1856
[O1856 02] : Observations Rhônométriques aux échelles de Fourques, Saint Gilles et Sylvéréal lors de la crue du 31 mai 1856 – 1856
[O1856 04] : Courbe des débits de la crue du 31 mai 1856 à l'échelle de Beaucaire - Ponts et Chaussées - Service Spécial du Rhône 4ème arrondissement – 28 septembre 1857
[O1856 05] : Profils en long et en travers du Rhône entre l'écluse du canal de Beaucaire et la tête de la Camargue - Ponts et Chaussées - Service Spécial du Rhône 4ème arrondissement – 10 octobre 1859
[O1856 06] : - Travaux du Rhône – Digue du Syndicat de Beaucaire à la Mer – Profil en long et profil type - Ponts et Chaussées - Service Spécial du Rhône 4ème arrondissement – 31 décembre 1885
[O1856 07] : Réglementation générale des prises d'eau de la rive droite du Petit Rhône – Clauses à insérer dans les projets de règlement dans l'intérêt de la digue syndicale de Beaucaire à la Mer – Profil en long de la digue syndical entre Beaucaire et Sylvéréal- Ponts et Chaussées - Service Spécial du Rhône 4ème arrondissement – 10 octobre 1912
[O1856 08] : Cote atteinte par la crue de 1856 - Service Navigation Rhône–Saône – 1978
[O1856 09] : Le Rhône de Beaucaire-Tarascon à la Mer – Digues de défense contre les inondations – projet de renforcement des digues – Syndicat des digues de Beaucaire à la Mer : Syndicat des digues de la Grande Camargue – profil en long et profil en travers type - Service Navigation Rhône–Saône – 1984
[O1856 10] : repère des crues de 1856 / 1840 / 1843 / 1755 / 1846 Ponts et Chaussées - Service Spécial du Rhône 4ème arrondissement (Archives départementales / S 479)
[O1993 01] : CNR : Limnigrammes aux stations du Grand Delta crue d'octobre 1993
[O1994 01] : CNR : Limnigrammes aux stations du Grand Delta crue de janvier 1994
[O1996 01] : CNR : Limnigrammes aux stations du Grand Delta crue de novembre 1996
[O2002 01] : CNR : Limnigrammes aux stations du Grand Delta crues de 2002
[O2003 01] : bulletins du Service d'Annonce de Crues lors de la crue de décembre 2003
[O2003 02] : enregistrement du SYMADREM des débits lors de la crue des 3 et 4 décembre 2003, à partir des données Inforhône de la CNR

[O2003 05] : courbe de tarage ancienne et réactualisée suite à la conférence de consensus – Service Prévision des Crues du Grand Delta
[O2003 06] : Hydrogramme reconstitué de la crue de décembre 2003 à la station de Beaucaire - Service Prévision des Crues du Grand Delta ;
[O2003 09] : Conférence de consensus sur le débit du Rhône à Beaucaire pour la crue de décembre 2003 – document de synthèse et autres contributions – juin 2005 - http://ccbr.lyon.cemagref.fr/
[O2003 10] : DUBAND Daniel (expert SHF) et Philippe BOIS (ENSHMG) : rapport sur la crue du Rhône et ses affluents du 1er au 5 décembre 2003 - http://ccbr.lyon.cemagref.fr/

Dossier des Ouvrages Exécutés

[T300] : SYMADREM – Carrossabilité Défluent-Albaron – 1994
[T301] : SYMADREM – Digue Trinquetaille 1ere phase – 1994
[T302] : SYMADREM – Digue Trinquetaille 2eme phase – 1997
[T303] : SIDRHEMER – Digue Beaumont-Mazel – 1998
[T304] : SYMADREM – Digue Sénebier-Sylvéréal – 1998
[T305] : SYMADREM – Digue Albaron – 2005

[T400] : SYMADREM – Emmaüs-Passerons- 1998
[T401] : SYMADREM – Quai de la Gabelle – 2001
[T402] : SYMADREM – Défluent- 2001
[T403] : SYMADREM – Cimetière Trinquetaille - 2003
[T404] : SYMADREM – Passerons Montlong - 2004
[T405] : SYMADREM – Urgence Quai de la gare maritime – 2003
[T406] : SYMADREM – Quai de la gare maritime – 2004
[T407] : SYMADREM – Porte des Curatiers - 2004
[T408] : SYMADREM – Grande à Petite Montlong - 2006
[T409] : SYMADREM – Quais d'Arles (T1 à T4) – St Pierre Trinquetaille Gabelle - 2009
[T410] : SYMADREM – Quais d'Arles (T5 à T6) – Gare Maritime basse- 2015
[T411] : SYMADREM – Quais d'Arles (T5 à T6) – Gare Maritime haute - 2015
[T412] : SYMADREM – Papeteries Etienne - 2016
[T413] : SYMADREM – Quais d'Arles (T5 à T6) – St Pierre Trinquetaille Gabelle - 2010

[T601] : SYMADREM – Carrossabilité des digues

Inspections ministérielles

[W001] : Mission Ministérielle sur les Inondations de la vallée du Rhône en aval de Lyon d'Octobre 1993 et de Janvier 1994 – rapport de synthèse dit « rapport Dambre » – mai 1994
[W002] : Mission Ministérielle sur les Inondations de la vallée du Rhône en aval de Lyon d'Octobre 1993 et de Janvier 1994 – rapport particulier sur la Camargue n°94-002 dit « rapport Dambre » – avril 1994
[W003] : Conseil Général des Ponts et Chaussées – Rapport sur la gestion de l'eau en Camargue – protection contre les inondations – Pierre BALLAND et Al. – septembre 1999
[W004] : Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable – Expertise du schéma de protection contre les crues du secteur de Tarascon-Arles – Rapport Général et Rapport technique - 2008

Références techniques

[X001] : International Commission of Large Dams (ICOLD/CIGB) : internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations – bulletin n°164 – Volume 1 : internal erosion processes and engineering assessment – Fev. 2015

[X002] : ICOLD Embankment Dams Committee Knowledge Transfer Workshop – 2 june 2014 – Rodney Bridle / Jean-Jacques FRY / Thibaut MALLET

[X003] : Mallet T, Outalmit K. & Fry JJ. (2013). *Probability of failure of an embankment by internal erosion using the Hole Erosion Test*. ICOLD BALI 2014, International Symposium on Dams in a Global Environmental Challenges, Sub Theme 6, pp278-287.

[X004] : USBR (2012) *Best Practices and Risk Methodology, chapter 13 Subjective Probability and Expert Elicitation.* http://www.usbr.gov/ssle/damsafety/risk/methodology.html

[X005] : Bonelli (editor) – Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees – Editions Wiley-ISTE – 2013

[X006] : Bonelli (coord.)- Erosion des géo-matériaux – érosion interne de surface – Editions Lavoisier - 2012

[X007] : Deroo L., FRY J.J. – Recommandations ERINOH (volume 3) : maîtrise de l'érosion interne – 2ème Colloque National sur les digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions – 2013 – Comité Français des Barrages et Réservoirs ;

[X008] : Bonelli S. and Benahmed N. - Piping Flow erosion in water retaining structures — The international journal on hydropower and dams – issue 3 – 2011

[X009] : Bonelli S. – 6th International Conference on Scour and Erosion – Short course - Paris 27-31 August 2012

[X010] : Fry J. J. – Projet National ERINOH – Développement du renard – étude de l'effondrement – publication interne - 2010

[X011] : Sellmeijer J.B., Lopez de la Cruz J., V.M. van Beek, Knoeff J.G., Fine-tuning of the backward erosion piping model through small-scale, medium-scale and IJkdijk experiments – 2011

[X012] : Hoffmans Gijs J.C.M. – The influence of Laminar Flow on piping – Draft – July 2012

[X013] : Hoffmans Gijs J.C.M. – Shields-Darcy model – alternating piping model ? – Deltares – 2015

[X014] : Van Beek V. – Backward erosion Piping Initiation and Progression – Thesis Deltares - 2015

[X015] : USACE/MEDDE/CIRIA - The International Levee Handbook – 2013

[X016] : Beguin R. - Etude multi-échelle de l'érosion de contact au sein des ouvrages hydrauliques en terre – Thèse universitaire - 2011

[X017] : Hans Rönnqvist, Peter Viklander - Applying Empirical Methods to Assess the Internal Stability of Embankment Dam Cores of Glacial Till - Geomaterials, 2015, 5, 1-18 Published Online January 2015 in SciRes. http://www.scirp.org/journal/gm - http://dx.doi.org/10.4236/gm.2015.51001

[X018] : USBR - Engineering and Design - DESIGN AND CONSTRUCTION OF LEVEES – manual n°110-2-1913 - 2000

[X019] : Fry J.J. et Al. – Analyse et traitement de l'érosion interne – procédés classiques et nouveaux – ICOLD Stavanger – 2015

[X020] : Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR) : recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai – recommandations définitives – 2015

[X021] : FRY J.J., Courivaud J.R. – Analyses de modes de rupture peu communs pouvant affecter des digues – 2ème Colloque National sur les digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions – 2013 – Comité Français des Barrages et Réservoirs ;

[X022] : Courivaud J.R. ruptures d'ouvrages hydrauliques en remblai par surverse ou érosion interne : processus physiques et modélisation numérique – Congrès SHF « Grands Transitoires Hydrauliques Juin 2014

[X023] : Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations – Guide pratique à l'usage des propriétaires et gestionnaires – Mériaux, Royet et Folton – Cemagref – 2001 ;

[X024] : Degoutte G. & Al. : Les déversoirs sur les digues fluviales – éditions quae - 2012

[X025] : Degoutte G. & Al. : Petits Barrages – recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi – Comité Français des Grands Barrages – éditions Cemagref - 2001

[X026] : CETMEF/CUR/CIRAI - Rock Manual – Guide Enrochement - 2009

[X027] : LACHAT B. – Guide de protection des berges de cours d'eau en techniques végétales – Ministère de l'environnement et de l'aménagement du territoire – 1999 (réédition de 1994)

[X028] : DEGOUTTE G. – Diagnostic, aménagement et gestion des rivières – hydraulique et morphologie appliquées (2ème édition) – Lavoisier - 2012

[X029] : BERNIER J. VERON R. – sur quelques difficultés rencontrées dans l'estimation d'un débit de crue de probabilité donnée – revue de statistique appliquée, tome 12, n°1 (1964), p25-48

[X030] : MALLET T. FRY J.J. – Probability of failure of an embankment by backward erosion using the formulas of Sellmeijer and Hoffmans – ICOLD Johannesburg 2016 - International Symposium on "Appropriate technology to ensure proper Development, Operation and Maintenance of Dams in Developing Countries" - Theme 2b. Advances in the rehabilitation of dams and appurtenant works to extend their service life including structural improvements to mitigate the effects of alkali aggregate reaction, internal erosion potential, foundation failure – May 18th 2016

[X031] : FRY J.J. Degoutte G. & Poulain D. - Lessons from Geotextile Use in Embankment Dams - ICOLD Johannesburg 2016 - International Symposium on "Appropriate technology to ensure proper Development, Operation and Maintenance of Dams in Developing Countries" - Theme 2b. Advances in the rehabilitation of dams and appurtenant works to extend their service life including structural improvements to mitigate the effects of alkali aggregate reaction, internal erosion potential, foundation failure – May 18th 2016

[X032] : HUNT S.L., HANSON G.J., COOK K.R., KADAVY K.C. - Breach widening Observations from earthen embankment tests - American Society of Agricultural Engineers ISSN 0001−2351 - Vol. 48(3): 1115−1120 – 2005

[X033] : VISSER K. - User Guide to WinDAM C Earthen Embankment Soil Inputs – non daté

[X034] : DEROO L. FRY J.J. – Guide ERINOH sur l'ingénierie – en cours de publication

[X035] : Federal Emergency Management Agency : Filters for Embankment Dams – Best Practices for Design and Construction – 2011

[X036] : Comité International des Grands Barrages : Barrages en remblai – filtres et drains granulaires – synthèse des recommandations – bulletin n°95 – 1994

[X038] : MALLET T. DEGOUTTE G. ROYET P. – Niveaux de protection, de sûreté, de danger pour les digues fluviales – Définitions, conséquences et responsabilités - 2ème Colloque National sur les digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions – 2013 – Comité Français des Barrages et Réservoirs

[X039] : DJERBOUA A. – Prédétermination des pluies et crues extrêmes dans les alpes Franco-Italiennes – prévision quantitative des pluies journalières par la méthode des analogues – thèse universitaire INPG -

[X040] : Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR) : recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages – recommandations définitives – 2013

[X041] : Guide sur les Plans de Préventions du Risque Inondation – Ministère de l'environnement

[X042] : DREAL Bassin - Doctrine Rhône en matière Plans de Préventions du Risque Inondation -2006

[X043] : FRY J.J. – Analyse fonctionnelle – DRAFT

[X044] : Direction Générale de la Prévention des Risques – Risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques – 2014

[X045] : BENAHMED N. & Al. - Caractérisation du comportement mécanique des mélanges sable /fines constitutifs des digues - 2ème Colloque National sur les digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions – 2013 – Comité Français des Barrages et Réservoirs

[X046] : VINET F. & Al. – La mortalité comme expression de la vulnérabilité humaine face aux catastrophes naturelles : deux inondations récentes en France (Xynthia, Var, 2010) – VetigO la revue électronique en sciences de l'environnement – volume 11 numéro 2 – 2011

[X047] : SYMADREM – note interne sur la capacité des hélicoptères de la sécurité civile

[X048] : Zielinski M., Sentenac P. Utili S., Dyer M. – Influence of the weather changes of the desiccation fissuring propagation and stability of flood embankments

SYNDICAT MIXTE INTERREGIONAL D'AMENAGEMENT DES DIGUES DU DELTA DU RHONE ET DE LA MER

ETUDE DE DANGERS

DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT FLUVIAL CAMARGUE INSULAIRE

ANNEXE N°2 : GLOSSAIRE

Pour la bonne compréhension du rapport nous retiendrons les définitions suivantes issues de la réglementation, de circulaires relatives à la sûreté des ouvrages hydrauliques, de recommandations du Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR), de bulletins de la Commission Internationale des Grands Barrages, de publications et présentations orales faites lors de colloques nationaux ou internationaux, issus de rapports du Symadrem.

PK : Point kilométrique le long du Rhône.

PR : Point repère sur la digue correspondant à la projection du PK sur la digue

Rhône : Bras du Rhône en amont du défluent (PK281). Au XIX^{ème} siècle, ce bras était également appelé *Grand Rhône*.

Grand Rhône : Bras principal du Rhône en aval du défluent (bras où transite en crue environ 88 % du Rhône) depuis le PK 281 jusqu'au PK 330.

Petit Rhône : Bras du Rhône en aval du défluent (bras où transite en crue environ 12 % du Rhône) depuis le PK 281 jusqu'au PK 337.

Delta du Rhône : extension du delta camarguais aux villes de Beaucaire et Tarascon. Le Delta du Rhône couvre les plaines de Beaucaire, de Tarascon, du Trébon, les anciens marais d'Arles, les marais de la vallée des Baux, les marais de Meyranne, le Petit et le Grand Plan du Bourg, la Camargue Insulaire, la Camargue Gardoise, la Camargue Saintoise.

Lit protégé ou Zone protégée : zone inondable située derrière les digues et soustraite à l'inondation par les digues (lit majeur inactif).

Lit endigué : secteur situé entre les digues, donc non protégé par les digues. Il comprend le fleuve (lit mineur et lit moyen) et le ségonnal (lit majeur actif).

Berge : bord du lit mineur d'un cours d'eau.

Franc-Bord ou Ségonnal : lit majeur actif compris entre le haut de berge et le pied de digue

Lône : une lône (du franco-provençal lona, issu du germanique lûnho) est un bras mort d'un fleuve qui reste en retrait du lit de celui-ci et se trouve alimenté en eau par infiltration ou en période de crue, au cours desquelles son tracé peut alors être modifié. Le terme lône était utilisé à l'origine pour le Rhône, mais il est aussi étendu à d'autres cours d'eau notamment l'Isère (source Wikipédia).

Entretien : Action de maintenir un ouvrage en bon état de façon à ce qu'il conserve sa fonction.

Réparation : action de réparer quelque chose qui a été endommagée et d'en restaurer l'état antérieur à l'endommagement.

Conforter : renforcer, rendre plus solide.

Renforcer : conforter, rendre plus fort, rendre plus solide. Pour ce qui concerne le domaine des digues :

- les **travaux d'entretien et de réparation** peuvent être considérés comme faisant partie de la même mission et consistent en : le ***maintien de la digue dans son état initial***,
- les **travaux de confortement ou de renforcement** peuvent être considérés comme synonymes et consistent à ***augmenter le niveau de sûreté et/ou de protection*** de l'ouvrage par rapport à son état initial.

Cette différenciation entre types de travaux figure à l'article R122-2 du code de l'environnement, qui stipule que *« Sauf dispositions contraires, les travaux d'entretien, de maintenance et de grosses réparations, quels que soient les ouvrages, aménagements ou travaux auxquels ils se rapportent, ne sont pas soumis à évaluation environnementale ».*

Travaux d'urgence : Travaux de réparations intervenant en période de crues.

Travaux de 2ème urgence : Travaux de réparations intervenant après réalisation d'une visite post-crue

VSP : Visite de Surveillance Programmée ou visite de routine réalisée régulièrement par les gardes digues

VTA : Visite Technique Approfondie qui consiste en l'examen visuel des parties de la digue

VPC : Visite Post-Crue. Visite effectuée par le garde digues à l'issue d'une crue

VPS : Visite effectuée après un séisme

Brèche : La fonction principale d'une digue est de retenir l'eau. Tout mouvement engendrant une incapacité du remblai à contenir la crue provoque une brèche. En conséquence, la brèche est la perte de cette fonction principale. Il importe de distinguer la notion de brèche de la notion de rupture. L'évènement redouté des ouvrages hydrauliques est la brèche. La brèche est obtenue à la fin d'un processus impliquant des mécanismes de dégradation et de ruptures, qui se développe en trois étapes : initiation, formation et élargissement.
La brèche est initiée par une perte incontrôlée d'eau de la retenue tant que la crête résiste, la formation commence dès que la crête est détruite et se termine à l'érosion de tout un profil et est suivie par l'élargissement à partir du moment où l'extension de la brèche est horizontale par érosion latérale. Elle est donc caractérisée par la phase d'élargissement et des entrées d'eau massive dans la zone protégée qui ne peuvent plus être interrompues. Un mécanisme de rupture n'engendre pas systématiquement la brèche. Il importe donc de remplacer le terme rupture, au sens de la CIGB, par celui de brèche.

Rupture : une perte momentanée d'équilibre d'un matériau ou d'un composant.

Départ de brèche : Le processus impliquant des mécanismes de dégradation et de ruptures est en cours. La phase d'élargissement caractérisant la brèche n'est pas encore en cours. Il peut y avoir des entrées d'eau mais qui peuvent être interrompues par un effondrement de la digue, interventions d'urgence ou la diminution de la charge hydraulique liée à la décrue.

Scénario ou processus ou mécanisme de brèche : série de processus physiques, mécaniques et hydrauliques, qui aboutit à la formation d'une brèche dans un ouvrage.

Mode de rupture : mécanisme dont le processus principal est induit par un mode d'action bien défini : surverse, érosion interne, affouillement ou glissement.

Processus de rupture: ce processus décrit comment une digue pourrait se rompre par érosion interne sous un chargement donné. La rupture par érosion interne comprend la définition du chargement, le cheminement de l'érosion, les quatre phases (initiation, continuation, progression et l'initiation de la brèche). Dans une analyse d'arbres d'évènements, chaque mode est représenté par un arbre entier.

Défaut : Un défaut est une condition physique qui permet un écoulement préférentiel. Une fissure continue ou une couche mal compactée dans laquelle un écoulement préférentiel se développe en sont des exemples.

Dégradation : détérioration d'une propriété physique ou fonctionnelle de la digue.

Désordre : signe observable ou quantifiable d'une dégradation de l'état initial de la digue.

Détection: la détection est la faculté de détecter par exemple l'une des phases du processus d'érosion interne. L'érosion interne est actuellement plus facilement détectée en phase de progression ou de brèche.

Intervention : l'intervention est l'aptitude à arrêter par exemple un processus d'érosion interne au cours d'une de ses phases avant l'initiation de la brèche.

Chargement : les principaux chargements exercés sur une digue sont la charge hydrostatique (qui est liée au niveau du cours d'eau) et les chargements sismiques (qui sont exprimés en termes de magnitude et d'accélération maximale). Les autres charges potentielles peuvent comprendre les actes de terrorisme ou les accidents comme un choc de bateau ou un écrasement d'avion. L'occurrence d'un niveau d'eau de cours d'eau est exprimée en probabilité annuelle ou fréquence que ce niveau soit atteint ou dépassé. De même l'occurrence d'un séisme est exprimée en probabilité annuelle ou fréquence que le chargement sismique (l'accélération maximale) soit atteint ou dépassé.

Claquage hydraulique : il apparaît dans le noyau ou la fondation d'un barrage quand la pression interstitielle dépasse la contrainte totale principale mineure et que la contrainte effective chute à 0 (ou légèrement négative si le sol a une résistance à la traction La pression de l'eau de retenue pénétrant le noyau dépasse alors la contrainte totale de compression et développe une fissure ou agrandit une fissure existante dans laquelle l'érosion de conduit peut être initiée.

EGR : Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône réalisée de 1998 à 2002.

Plan Rhône : document d'objectifs qui s'organise autour de plusieurs volets thématiques : Patrimoine et culture ; inondations ; qualité des eaux ; ressources et biodiversité ; énergie ;

transport fluvial ; tourisme, et mis en œuvre à travers le contrat de projet interrégional du Plan Rhône, qui a été signé le 21 mars 2007 pour le CPIER 2007-2014 et le 30 octobre 2015 pour le CPIER 2015-2020 entre l'Etat, les conseils régionaux, la Compagnie Nationale du Rhône, l'Agence de l'eau, l'ADEME et Voies Navigables de France.

Pré-schéma sud : Le Pré-schéma sud correspond à la stratégie globale de prévention des inondations du plan Rhône de Viviers à la Mer avec une priorité pour l'aval de Beaucaire. Il a été établi par la DREAL de bassin et est téléchargeable sur le lien suivant :

http://www.rhone-alpes.ecologie.gouv.fr/include/rhone/pdf/Rapport_preschema_juin2006V7_1.pdf

Le Pré-schéma sud a été validé le 7 juillet 2006 par le comité de pilotage du Plan Rhône et constitue la feuille de route du SYMADREM pour les 20 prochaines années, qui a accepté par délibération du comité syndical en date du 17 novembre 2006, d'être maître d'ouvrage des actions du Plan Rhône, identifiées sur son périmètre de compétences. En 2009, le pré-schéma sud a été intégré au **Schéma de Gestion des Inondations du Rhône Aval**, qui reprend l'ensemble des actions rattachées au Volet Inondations du Plan Rhône sur le Rhône aval. Par la suite, il sera fait référence uniquement au **Schéma de Gestion des Inondations du Rhône Aval**.

Digue non renforcée au déversement : digue, dont le parement aval et la crête ne sont pas conçus pour supporter un déversement sans rupture.

« Digue millénale » : appellation retenue par le SYMADREM pour qualifier les digues non renforcées au déversement calées au niveau d'eau atteint par une crue exceptionnelle du Rhône, assorti d'une revanche de sécurité. La fréquence annuelle de cette crue a été estimée à 1/800ème.

Digue résistante à la surverse : digue renforcée pour permettre un déversement sans rupture pour toutes les gammes de crues inférieures ou égales à la crue de sûreté.

Station de Beaucaire/Tarascon : Cette station de mesure est située en aval de la confluence du Vieux Rhône (transitant par le barrage de Vallabrègues) et du Rhône dérivé (transitant par l'usine hydro-électrique de Beaucaire) au Point Kilométrique 269,6. Elle est dotée d'une courbe de tarage régulièrement révisée. Elle permet de mesurer les débits du Rhône en tête du Grand Delta. Elle est parfois appelée station de Tarascon, qui est l'ancienne dénomination utilisée par le service de prévision des crues du Grand Delta ou station de Beaucaire, qui est l'ancienne dénomination utilisée par la CNR.

Crue type janvier 1994 : C'est la crue de janvier 1994 sans brèche dans le système. Le débit de pointe de cette crue a été estimé par la CNR à 11 000 m^3/s et à 10500 m^3/s par l'EGR. La courbe de tarage de la station de Beaucaire/Tarascon modifiée suite à la conférence de consensus, donnerait dans l'état actuel, un débit de pointe de 10 250 m^3/s.

Crue type 10 500 : c'est la crue de janvier 1994, dont l'hydrogramme de crue a été translaté pour avoir un débit de pointe à la station de Beaucaire/Tarascon de 10 500 m^3/s. La période de retour de cet événement est d'environ 50 ans.

Crue type décembre 2003 : C'est la crue des 3 et 4 décembre 2003 sans brèche dans le système. Le débit de pointe de cette crue a été estimé par la conférence de consensus, à 11 500 $m^3/s \pm 5$ % à la station de Beaucaire/Tarascon. La période de retour de cet événement, est légèrement supérieure à 100 ans suivant l'analyse statistique définie dans l'Etude Globale Rhône (EGR) et égale à 100 ans dans l'analyse statistique réalisée dans le cadre de la présente étude.

Crue de référence : C'est la crue retenue par les services de l'Etat pour l'élaboration des Plans de Préventions des Risques Inondations (PPRI). Elle correspond à la crue du 31 mai 1856 dans les conditions d'écoulements actuels et sans brèche dans le système. Le débit de pointe de cette crue a été estimé, par Pardé, à 12 500 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon. La période de retour attribuée à cet événement est d'environ 250 ans, suivant l'analyse statistique définie dans l'Etude Globale Rhône (EGR). La période de retour de cet événement a été revue à la baisse (≅ 200 ans) dans le cadre de la présente étude.

Crue exceptionnelle : dans l'EGR, elle est appelée crue très forte du Rhône. Le débit de pointe de cette crue est de 14 160 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon. La période de retour attribuée à cet événement est de 1000 ans, suivant l'analyse statistique définie dans l'Etude Globale Rhône (EGR). La période de retour de cet événement a été revue à la baisse (≅ 800 ans) dans le cadre de la présente étude.

Crue décennale (Q10) : C'est la crue de période de retour 10 ans ; soit qui a 1 chance sur 10, d'être dépassée, chaque année. Le débit de la crue décennale est estimé, dans l'EGR, à 8 400 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon. Il a été revu légèrement à la hausse dans le cadre de la présente étude (Q10 = 8 500 m^3/s).

Crue cinquantennale (Q50) : C'est la crue de période de retour 50 ans ; soit qui a 1 chance sur 50, d'être dépassée, chaque année. Le débit de la crue cinquantennale est estimé, dans l'EGR, à 10 400 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon. Il a été revu légèrement à la hausse dans le cadre de la présente étude (Q50 = 10 600 m^3/s).

Crue centennale (Q100) : C'est la crue de période de retour 100 ans ; soit qui a 1 chance sur 100, d'être dépassée, chaque année. Le débit de la crue centennale est estimé, dans l'EGR, à 11 300 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon.. Il a été revu légèrement à la hausse dans le cadre de la présente étude (Q100 = 11 500 m^3/s).

Crue millénale (Q1000) : C'est la crue de période de retour 1000 ans ; soit qui a 1 chance sur 1000, d'être dépassée, chaque année. Le débit de la crue millénale est estimé, dans l'EGR, à 14 160 m^3/s à la station de Beaucaire/Tarascon. C'est la crue exceptionnelle ou très forte du Rhône. Il a été revu légèrement à la hausse dans le cadre de la présente étude (Q1000 = 14 500 m^3/s).

Définition introduite par le décret digues de 2015

Niveau de protection (réglementaire) : Au sens du R.214-119-1 du code de l'environnement, le niveau de protection d'une zone exposée au risque d'inondation ou de submersion marine assuré par un système d'endiguement au sens de l'article R. 562-13 ou par un aménagement hydraulique au sens de l'article R. 562-18 est déterminé par la hauteur maximale que peut atteindre l'eau sans que cette zone soit inondée en raison du débordement,

du contournement ou de la rupture des ouvrages de protection quand l'inondation provient directement du cours d'eau ou de la mer. Lorsque la taille et les caractéristiques de la zone exposée le justifient, plusieurs niveaux de protection peuvent être déterminés, chacun étant associé à une partie délimitée de la zone protégée.

Digue de protection : Ouvrage construit ou aménagé en vue de prévenir les inondations et les submersions.

Système d'endiguement : au sens du R.562-13 du code de l'environnement, le système d'endiguement comprend une ou plusieurs digues ainsi que tout ouvrage nécessaire à son efficacité et à son bon fonctionnement, notamment: des ouvrages, autres que des barrages, qui, eu égard à leur localisation et à leurs caractéristiques, complètent la prévention; des dispositifs de régulation des écoulements hydrauliques tels que vannes et stations de pompage. Ne sont toutefois pas inclus dans le système d'endiguement les éléments naturels situés entre des tronçons de digues ou à l'extrémité d'une digue ou d'un ouvrage composant le système et qui en forment l'appui.

Les cinq définitions ci-après sont issues de l'article suivant :

MALLET T., DEGOUTTE G. ROYET P. - Niveaux de protection, de sûreté et de danger pour les digues fluviales - Définitions, conséquences et responsabilités - 2ème Colloque National sur les digues maritimes et fluviales de protection submersions – 2013 – Comité Français des Barrages et Réservoirs ;

Niveau de protection d'une digue

Si la digue est équipée d'un déversoir de sécurité ou d'un tronçon de digue résistant à la surverse, le niveau de protection de la digue est le niveau de la crête de cet ouvrage déversant. Ceci en supposant bien sûr que la digue résiste jusque-là. C'est le niveau au-delà duquel la zone n'est plus protégée par la digue. Les lieux initialement protégés par la digue sont peu à peu inondés par les eaux provenant du déversoir (en supposant qu'ils n'aient pas été inondés précédemment par un autre processus tel que remontée de nappe, ruissellement ou remous aval).
Dans un système d'endiguement sans déversoir ou sans digue résistante à la surverse, les niveaux de protection et de sûreté de la digue sont confondus. L'inondation de la zone protégée ne peut se faire par brèche dans les digues. Cette situation est inconfortable car le niveau de protection n'est pas visualisable et rien ne permet d'alerter de son dépassement.

Niveau de sûreté d'une digue

C'est le niveau pour lequel la digue conserve une certaine marge de sécurité pour les différents mécanismes de rupture. Elle doit donc :

- disposer d'une certaine revanche par rapport à la ligne d'eau de la crue de danger ;
- assurer la stabilité mécanique du corps de digue avec des coefficients de sécurité correspondant aux situations exceptionnelles des recommandations CFBR sur la stabilité des digues et barrages en remblai ;
- présenter une sécurité vis-à-vis des mécanismes d'érosion interne ;
- assurer le fonctionnement sans endommagement du déversoir s'il existe et de ses composants.

Niveau de danger d'une digue : Dans un système sécurisé, le niveau de danger correspond à la crue qui affleure le sommet de la digue en terre. Dans un système ancien non sécurisé, le niveau de danger peut bien entendu être situé sous la crête de la digue (cas observé sur les digues de Camargue lors de la crue de décembre 2003). Si le profil en long de la digue comporte des irrégularités, c'est la crue qui affleure au moins un des points bas

Niveau de protection des personnes : Le niveau de protection d'une personne résidant dans une zone protégée correspond à sa situation à « pieds secs » ; tant que sa résidence ou ses voiries ne sont pas inondées, son niveau de protection n'est pas atteint. Elle peut se considérer protégée.

Niveau de sécurité des personnes : Le niveau de sécurité des personnes peut être défini comme le niveau à partir duquel une personne résidant dans une zone protégée se trouve en situation de danger. Les différentes recommandations en matière d'élaboration de plans de prévention du risque inondation (PPRI) donnent certains critères permettant d'apprécier l'aléa en zone inondable. Le seuil de déplacement d'une personne en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse des écoulements semble être un critère pertinent permettant de définir le niveau de sécurité des personnes tout en restant cohérent avec la doctrine de l'État en matière de PPRI.

Niveau de submersion de la digue : cote de la crête d'une digue. Dans un système sécurisé, elle correspond à la cote de protection pour les digues résistantes à la surverse et à la cote de danger pour les digues non renforcées au déversement. Dans un système non sécurisé, comme c'est le cas actuellement, elle correspond à la cote de protection apparente mais en aucun à la cote de protection réelle qui est calée en dessous de cette cote ou à la cote de danger qui peut être également située en dessous de cette cote.

Evaluation des risques : processus consistant à émettre une recommandation de décision concernant la tolérabilité des risques existants et l'adéquation des mesures actuelles de contrôle des risques, et à proposer éventuellement d'autres options de contrôle des risques. L'évaluation des risques comprend une phase d'analyse des risques et une phase d'appréciation des risques.

Fréquence : mesure de probabilité exprimée comme le nombre d'occurrences d'un évènement au cours d'une période donnée ou pour un nombre donné d'essais (voir également vraisemblance et probabilité).

Probabilité: une mesure du degré de confiance d'une prévision, Cette mesure a une valeur comprise entre 0 (impossibilité) et 1 (certitude). C'est une estimation de la vraisemblance d'une quantité incertaine ou de l'occurrence d'un évènement futur incertain. Il existe deux interprétations principales :

- **Statistique – fréquence** ou fraction : résultat d'une expérience répétée, par exemple jeter une pièce. Elle inclut également l'idée de variabilité d'une population. Un tel nombre est appelé probabilité « objective » car il existe dans le monde réel et il est théoriquement mesurable en faisant l'expérience.
- **Probabilité subjective (degré de confiance)** : mesure quantifiée d'une croyance, d'un jugement ou confiance en la vraisemblance d'un résultat, obtenu en considérant toutes les informations disponibles de manière honnête, équitable et avec un biais minimum. Une probabilité subjective est affectée par l'état de compréhension d'un

processus, le jugement concernant une évaluation, ou la qualité et la quantité d'informations. Elle peut évoluer lorsque l'état des connaissances évolue.

Probabilité de dépassement annuelle : la probabilité estimée que l'ampleur donnée d'un évènement soit dépassée au cours d'une année quelconque.

Vraisemblance : probabilité conditionnelle d'un tirage pour un jeu initial de données, d'hypothèses et d'informations. Utilisée également comme une description qualitative de la probabilité et de la fréquence.
TN
AVAL

SIP : Site-Industrialo-Portuaire.

SIF : Site-Industrialo-Fluvial

ZEC : Zone d'Expansion de Crues.

Amont/ Aval : Côté d'où vient un cours d'eau, sa partie supérieure opposée à la partie inférieure qu'on appelle aval. Dans la présente étude, à l'instar de nombreuses publications scientifiques, on utilise parfois le terme d'amont pour localiser la partie de digue côté fleuve et aval pour localiser la partie de digue côté protégé

Pente d'un talus : c'est le rapport de la hauteur verticale du talus sur la longueur mesurée horizontalement du talus (Vertical/Horizontal)

Fruit d'un talus : c'est l'inverse de la pente (Horizontal/Vertical)

ELS : Etat-limite de service (ELS), correspondant à des conditions au-delà desquelles les exigences d'aptitude au service de l'ouvrage ne sont plus satisfaites

ELU : Etat-limite ultime (ELU), associé à des pertes d'équilibres statiques ou des modes de ruine.

EISH : Evénement Important pour la Sûreté Hydraulique défini par l'arrêté du 21 mai 2010 définissant l'échelle de gravité des événements ou évolutions concernant un barrage ou une digue ou leur exploitation et mettant en cause ou étant susceptibles de mettre en cause la sécurité des personnes ou des biens et précisant les modalités de leur déclaration

Sont classés en « **accidents** » - couleur rouge, les événements à caractère hydraulique ou consécutifs à une crue ayant entraîné :

- soit des décès ou des blessures graves aux personnes ;
- soit une inondation totale ou partielle de la zone protégée suite à une brèche.

Leur déclaration est immédiate.

Sont classés en « **incidents graves** » - couleur orange, les événements :

- à caractère hydraulique ou consécutifs à une crue ayant entraîné une mise en danger des personnes sans qu'elles aient subi de blessures graves ;

- ayant entraîné des dégradations importantes de l'ouvrage, quelles que soient leurs origines, mettant en cause sa capacité à résister à une nouvelle crue et nécessitant une réparation en urgence.

Leur déclaration n'excède pas une semaine.

Sont classés en « **incidents** » - couleur jaune, les événements ayant conduit à une dégradation significative de la digue nécessitant une réparation dans les meilleurs délais, sans mise en danger des personnes.

Leur déclaration est annuelle pour les digues.

Victime : personnes décédées lors de l'inondation

Sinistré : personnes touchées par l'inondation à des degrés divers, mais sans décès

Analyse des risques : l'analyse des risques est l'utilisation des informations disponibles pour estimer les risques concernant des individus ou des populations, des biens ou l'environnement, entraînés par des phénomènes dangereux. L'analyse des risques comprend en général les étapes suivantes : définition du domaine d'application, identification des phénomènes dangereux et évaluation des risques. Cohérent avec la définition courante du dictionnaire du mot analyse (à savoir, « examen détaillé d'un phénomène complexe effectué pour comprendre sa nature et déterminer ses caractéristiques principales »), l'analyse des risques implique une décomposition du système étudié et des sources de risques en composants élémentaires.

Arbre de défaillances : représentation de toutes les combinaisons logiques des différents états de l'ouvrage et des causes qui peuvent contribuer à un événement problématique spécifique, nommé l'événement redouté central (ERC). La méthode repose sur l'idée que la défaillance a pour origine des changements ou des variations intervenant par rapport à une configuration de référence. Elle permet de détecter des combinaisons d'événements pouvant engendrer un accident.

Arbre d'évènements : construction graphique arborescente qui traduit la séquence logique de l'occurrence des événements et des effets résultants pour l'ouvrage, suite à un événement initial (crue par exemple, ou défaillance humaine par oubli de pose d'un batardeau …).

Barrière de sécurité ou Mesure de maîtrise des risques : ensemble d'éléments techniques et/ou organisationnels nécessaires et suffisants pour assurer une fonction de sécurité. On peut distinguer :

- les mesures (ou barrières) de prévention : mesures visant à éviter ou limiter la probabilité d'un événement indésirable, en amont du phénomène dangereux.
- les mesures (ou barrières) de limitation : mesures visant à limiter l'intensité des effets d'un phénomène dangereux.
- les mesures (ou barrières) de protection : mesure visant à limiter les conséquences sur les cibles potentielles par diminution de la vulnérabilité.

Cibles : voir la définition « enjeux »

Enjeux (« elements at risk ») ou Éléments vulnérables ou Cibles : ensemble des éléments exposés au danger (population, bâtiments, infrastructures, patrimoine environnemental, activités et organisations). Les enjeux sont donc susceptibles de subir des dommages ou des préjudices. Pour définir les enjeux de manière complète, il convient d'en estimer la valeur et la vulnérabilité. C'est une phase de l'évaluation des risques.

Événement initiateur ou Elément initiateur : événement courant ou anormal, interne ou externe au système, situé en amont de l'événement redouté central dans l'enchaînement causal et qui constitue une cause directe dans les cas simples ou une combinaison d'événements à l'origine de cette cause directe.

Mode de défaillance : non-aptitude d'un composant à assurer une fonction pour laquelle il a été conçu : perte ou dégradation d'une fonction, réalisation d'une fonction non prévue.

Risque : « Combinaison de la probabilité d'un événement et de ses conséquences » (ISO/CEI 73) ou « Combinaison de la probabilité d'un dommage et de sa gravité » (ISO/CEI 51)