



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

ETUDE DE DANGERS

*DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT MARITIME
CAMARGUE INSULAIRE*

<u>CHAPITRE 0</u> :	RESUME NON TECHNIQUE	3
<u>DOCUMENT A</u> :	PRESENTATION GENERALE	15
CHAPITRE 1 :	RENSEIGNEMENTS ADMINISTRATIF	17
CHAPITRE 2 :	OBJET DE L'ETUDE	23
CHAPITRE 3 :	DESCRIPTION	32
<u>CHAPITRE 4</u> :	CARACTERISATION DES ALEAS NATURELS	58
<u>CHAPITRE 5</u> :	DESCRIPTION	98
<u>CHAPITRE 6</u> :	RETOUR D'EXPERIENCE	153
<u>CHAPITRE 7</u> :	DIAGNOSTIC APPROFONDI	178
<u>CHAPITRE 8</u> :	ETUDE DES RISQUES DE VENUES D'EAU	242
<u>CHAPITRE 9</u> :	ORGANISATION MISE EN PLACE	266
<u>CHAPITRE 9BIS</u> :	RECOMMANDATIONS	272
<u>CHAPITRE 10</u> :	CARTOGRAPHIE	276



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

ETUDE DE DANGERS
DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT MARITIME
CAMARGUE INSULAIRE

CHAPITRE N°0 : RESUME NON TECHNIQUE

Version	Date	Commentaires
0	28/02/2023	Version initiale
1	23/03/2023	Reprises suite à relecture interne

SOMMAIRE

1	système d'endiguement et gestionnaire	3
1.1	Le gestionnaire	3
1.2	Le système d'endiguement	3
2	La zone protégée	7
2.1	Définition.....	7
2.2	Niveau de protection.....	8
2.3	Fonctionnement pour différents scénarios.....	10

1 SYSTEME D'ENDIGUEMENT ET GESTIONNAIRE

Le système d'endiguement maritime de la Camargue insulaire, qui a pour vocation de protéger la Camargue Insulaire des submersions marines, est géré par le SYMADREM.

1.1 LE GESTIONNAIRE

En dehors des pertuis pour lesquelles la gestion est partagée entre différents acteurs du territoire, le système d'endiguement maritime de la Camargue insulaire est géré par le SYMADREM.

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

Le Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement des Dignes du Delta du Rhône et de la Mer (SYMADREM), est un établissement public territorial (syndicat mixte ouvert) qui regroupe depuis le 1^{er} janvier 2020 :

- 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).

L'objet du SYMADREM est : l'exercice de la compétence gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations (GEMAPI) qui lui a été transférée par les établissements publics de coopération intercommunale à fiscalité propre (EPCI-FP) membres du SYMADREM, sur le territoire dit "Grand Delta du Rhône", tel que défini dans le schéma d'organisation de la compétence locale de l'eau « Grand Delta », en application de l'article L5211-61 du CGCT.

1.2 LE SYSTEME D'ENDIGUEMENT

1.2.1 Fonctionnement et rôle

Le système d'endiguement maritime « Camargue insulaire » a pour but de protéger la Camargue insulaire des entrées d'eau marines et de limiter la dangerosité de ces entrées d'eau. Les franchissements, rupture, submersion et contournement sont les principales sources d'incursion marine qui ont été analysées.

Le but de la présente étude est de définir à partir de quel niveau marin ces phénomènes deviennent possibles et quel serait leur impact.

1.2.2 Description de la protection actuelle

La protection est principalement réalisée par une digue côtière de 26 km nommée « digue à la mer » qui va de l'embouchure du petit Rhône au vieux Rhône. Cette protection se raccorde sur des remblais à Salin de Giraud.

Au droit des Saintes-Maries-de-la-Mer, elle est renforcée par des épis et des brise lames. Cette protection contre la submersion marine est complétée par les ouvrages du système d'endiguement fluvial qui empêchent le contournement.

Ces différents ouvrages sont présentés sur les cartes suivantes, qui vont d'Ouest en Est.



Figure 1. Localisation des ouvrages du système d'endiguement 1/3

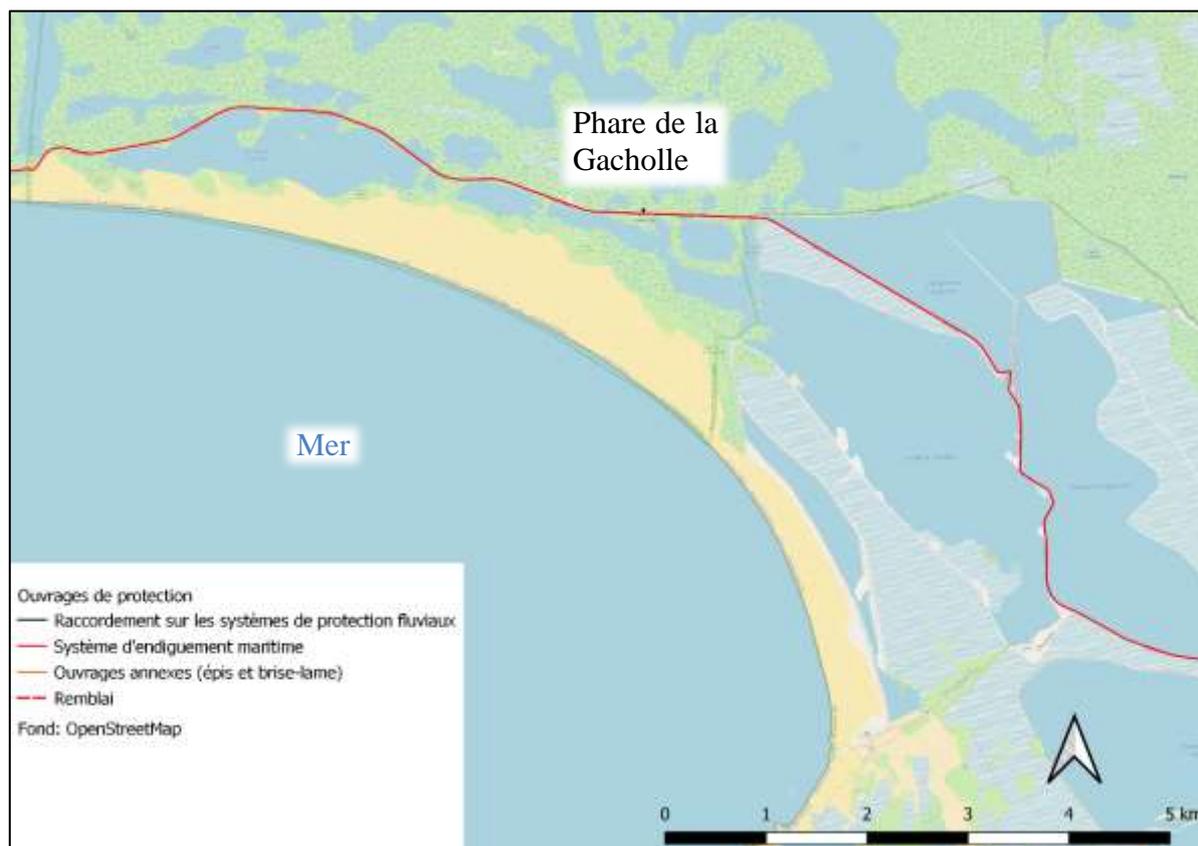


Figure 2. Localisation des ouvrages du système d'endiguement 2/3

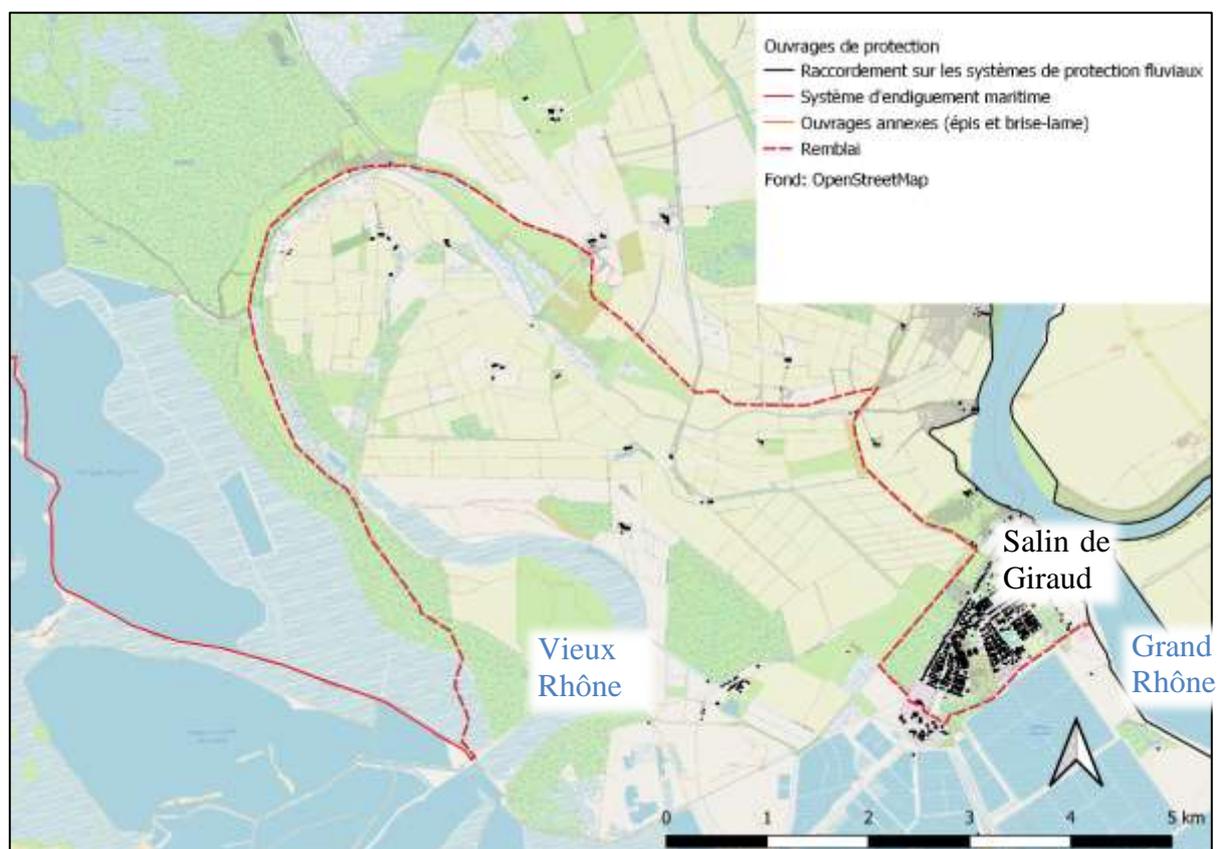


Figure 3. Localisation des ouvrages du système d'endiguement 3/3

1.2.3 Les travaux prévus

Une stratégie littorale est en cours d'élaboration, elle porte sur les thématiques de la submersion marine et de l'érosion du trait de côte sur le littoral du Grand Delta du Rhône. Elle sera suivie par la réalisation d'un PAPI (Programme d'Actions de Préventions des Inondations) qui intégrera un programme de travaux.

L'étude de dangers actuelle n'intègre pas ces travaux et une actualisation sera nécessaire.

2 LA ZONE PROTEGEE

2.1 DEFINITION

La zone protégée est le territoire qui est soustrait à l'inondation grâce au système d'endiguement.

Les terrains supérieurs à 1,55 mNGF sont en dehors de la zone d'influence des vagues et sont hors d'eau, avec ou sans système d'endiguement jusqu'à une tempête avec une élévation du niveau marin de 1.55mNGF, bien supérieure à la tempête de référence.

La zone protégée a été divisée en 20 sous-zones protégées qui sont représentées sur la carte ci-dessous. Le découpage a été réalisé de façon à reprendre au maximum les casiers de l'étude fluviale afin de pouvoir, en 1 point, n'être relié qu'à une zone et avoir immédiatement les 2 niveaux de protection ; il y a environ 500 km² compris dans ces casiers.

Dans les zones éloignées des digues, les zones supérieures à 1.55 mNGF seront hors d'eau, le découpage en casier, qui intègre des terrains de plus haute altimétrie, est ainsi sécuritaire.

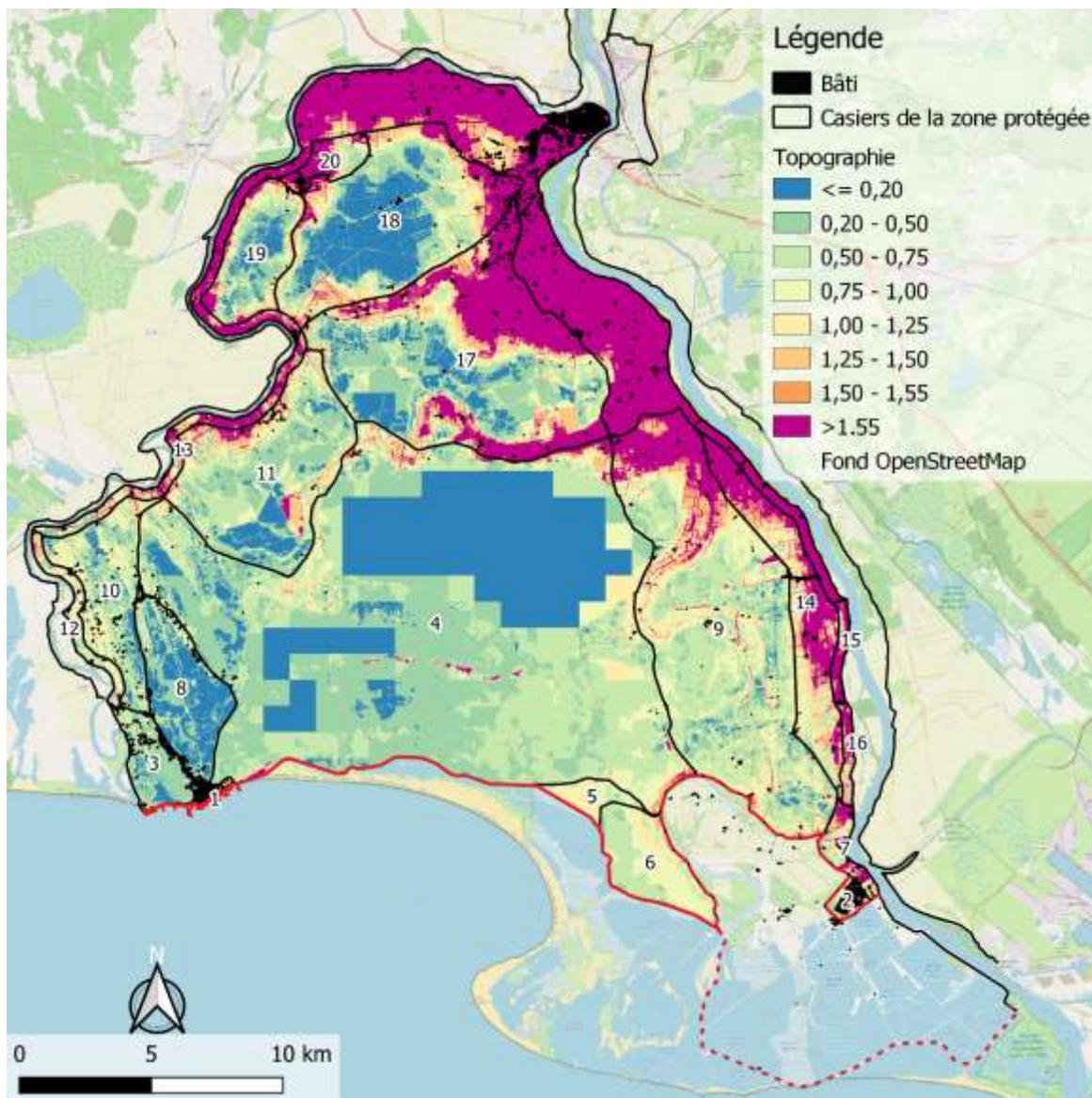


Figure 4. Zone protégée, casiers et topographie (en mNGF)

2.2 NIVEAU DE PROTECTION

Le système d'endiguement a pour rôle de protéger la Zone Protégée jusqu'à un niveau de protection qui dépend de la géométrie et de la résistance des ouvrages composant le système d'endiguement.

Cette protection est liée à un aléa particulier : les entrées d'eau marines ; le système d'endiguement n'a pas de rôle contre des entrées d'eau autres, telles que les remontées de nappes, l'impluvium local, les débordements de marais ou les crues du Rhône.

Le comportement des ouvrages du système d'endiguement a été analysé (chap. 7) puis les entrées d'eau associées ont été modélisées (chap. 8).

2.2.1 *Station de référence*

Le niveau de protection, vis-à-vis de l'aléa submersion marine, est basé sur le niveau moyen horaire mesuré à la station de référence : le pertuis de la Fourcade.

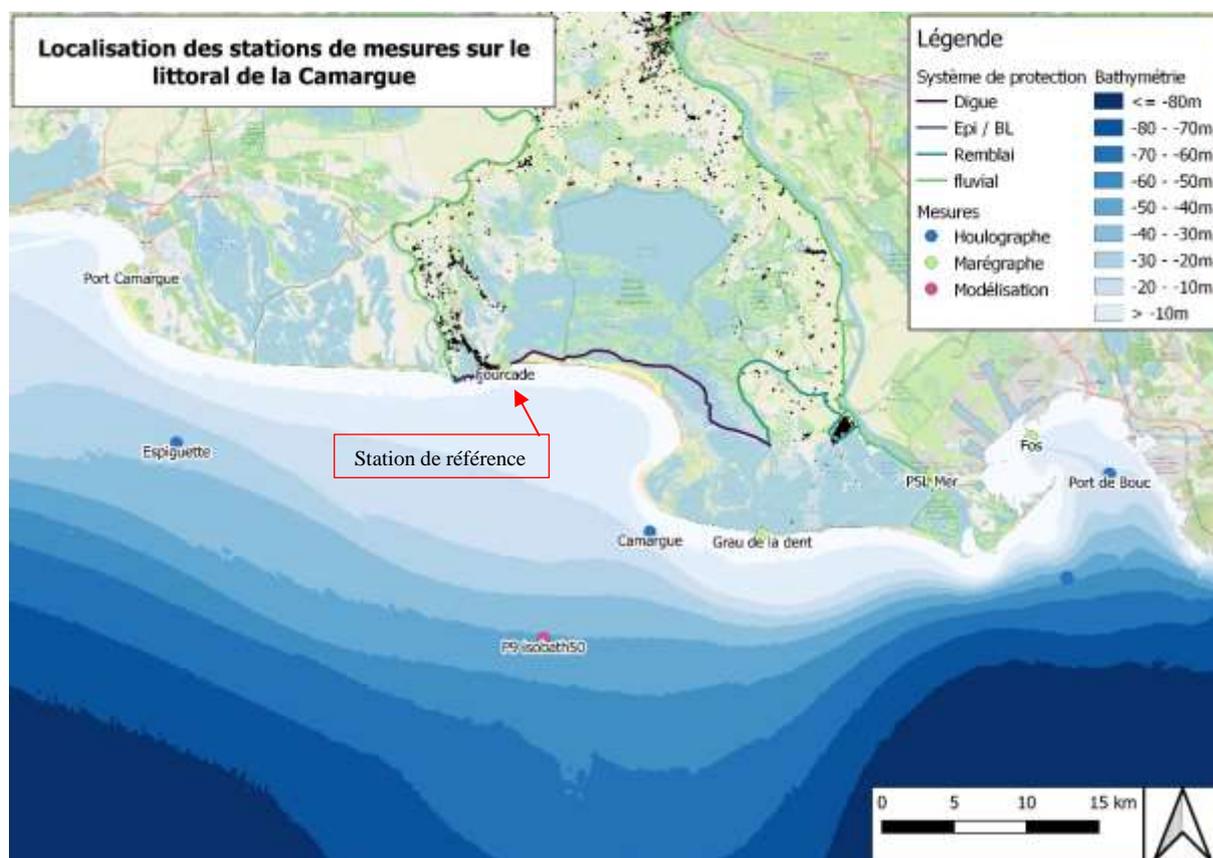


Figure 5. Localisation des stations sur le secteur, dont la station de référence

2.2.2 *Aléa modélisés*

Les calculs ont été menés sur 5 scénario qui ont été modélisés par le BRGM et repris par Egis.

Tableau 1. Niveaux modélisés

Scénario BRGM	Fréquence	Nom	Niveau marin modélisé [mNGF]	Hauteur de vagues associée [m]	Période au pic [s]	Direction des vagues [°N]	Vitesse du vent [m/s]	Direction du vent [°]
8 – Tempête 2014	Courante	T0.97	0.97	4.04	9.1		19.6	120-180
1 – Décennale	Rare	T1.06	1.06	4.70	9.0	155	22.4	121
2 – Trentennale	Rare	T1.17	1.17	5.09	9.2	155	23.6	121
3 – Centennale	Exceptionnelle	T1.30	1.30	5.33	9.4	155	24.2	121
4 – Exceptionnelle	Extrême	T1.55	1.55	8.75	11.5	155	30.0	121

2.2.3 Niveaux de protection retenus

Les premières entrées d'eau se font par contournement du système d'endiguement, via des buses non vannées puis des franchissements par paquet de mer ; à partir de T0.97 il peut y avoir des entrées d'eau par brèche, qui sont plus massives.

Tableau 2. Niveaux de protection des sous zones protégée de la Camargue insulaire

N°SZP	dénomination sous-zone protégée	Niveau de protection [m NGF]	N°SZP	dénomination sous-zone protégée	Niveau de protection [m NGF]
1	Saintes-Maries-de-la-Mer	0,85	11	Paty trinité	1,30
2	Salin de Giraud	0,85	12	Abords digue Sylvéreal Bac du Sauvage	1,30
3	Amarée Dromar	0,85	13	Abords digue Albaron Sylvéreal	1,30
4	Etang du Vaccarès	0,50	14	Armelière Sambuc Chamone	1,55
5	Vignolle	0,50	15	Abords digue Commanderie Boisverdun	1,55
6	Etang du Fangassier	0,85	16	Abords digue Boisverdun La Louisiane	1,55
7	Abords digue Salin de Giraud	0,85	17	Marais de la Grand Mar	1,55
8	Etang de Ginès	0,97	18	Marais du Pont de Rousty	1,55
9	Vaccarès Est	0,97	19	Marais de Saliers	1,55
10	Panperdu Etang des Launes	1,30	20	Saliers	1,55

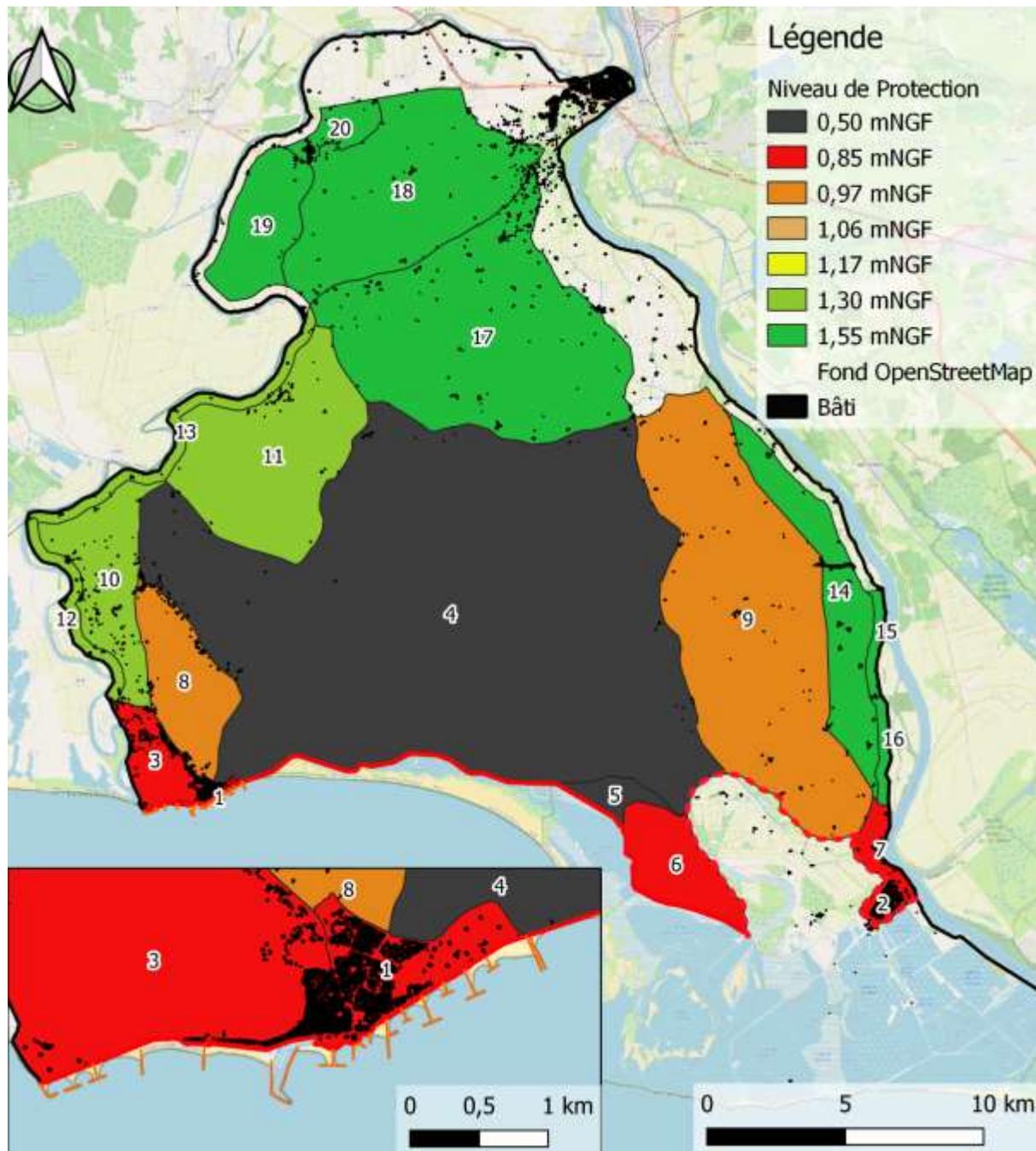


Figure 6. Niveaux de protection des sous zones protégée de la Camargue insulaire

2.3 FONCTIONNEMENT POUR DIFFERENTS SCENARIOS

2.3.1 *Scénario 1 : fonctionnement normal du système*

Les premières entrées d'eau attendues sont des contournements de la digue par les buses non vannées ; ces entrées d'eaux restent limitées à la zone des marais (Niveau de protection = 0,5 mNGF).

A partir d'une tempête fréquente (Niveau de protection = 0,85 mNGF), des franchissements sont possibles à proximité et au droit du village des Saintes-Maries-de-la-Mer ; ils resteraient limités à la proximité des ouvrages. Les zones à l'Est (fin de la digue et remblai) pourraient

finir par surverser en cas de tempête de longue durée (remplissage des marais et étangs entre la mer et la digue).

Pour une tempête supérieure à 0.97 mNGF, les niveaux de sûreté des ouvrages sont atteints et des entrées d'eau par brèche, plus volumineuses, sont attendues.

Le volume d'eau et donc la surface impactée augmente ensuite avec l'intensité de l'évènement.

2.3.2 Scenario 2 : défaillance fonctionnelle

Il n'y a pas d'organe manipulable en dehors des vannes positionnées sur les ouvrages traversant la digue. Une partie des ouvrages n'étant pas équipée de dispositif de fermeture, le niveau de protection est faible et il n'y a pas d'impact lié à la défaillance de ceux présents, autres que des débits entrants supérieurs. Les entrées d'eau resteraient limitées aux marais.

2.3.3 Scenario 3 : défaillance structurelle

Dans le scénario 1, les risques de ruptures sont pris en compte dès qu'ils apparaissent (probabilité de 5%) ; dans le présent scénario est représenté ce qu'il y a de plus probable (probabilité supérieure à 50%).

Les entrées d'eau par contournement, franchissement et surverse sont identiques ; les entrées d'eau sont alors similaires pour les petites tempêtes.

Pour les plus fortes tempêtes, les niveaux de danger et de sûreté des ouvrages sont tous deux dépassés, il y a à nouveau des entrées d'eau similaires au scénario 1.

En revanche, au nord du village des Saintes-Maries-de-la-Mer, le niveau de danger minimum (1.06 mNGF) est supérieur aux niveaux de sûreté (0.97 mNGF), les entrées d'eaux massives au droit du village et l'inondation de la zone 8 sont alors retardées.

Tableau 3. Niveaux hors d'eau pour le scénario 3 des sous zones protégées de la Camargue insulaire

N°SZP	dénomination sous-zone protégée	Niveau de Scénario 3 [m NGF]	N°SZP	dénomination sous-zone protégée	Niveau de Scénario 3 [m NGF]
1	Saintes-Maries-de-la-Mer	0,85	11	Paty trinité	1,30
2	Salin de Giraud	0,85	12	Abords digue Sylvéreal Bac du Sauvage	1,30
3	Amarée Dromar	0,85	13	Abords digue Albaron Sylvéreal	1,30
4	Etang du Vaccarès	0,50	14	Armelière Sambuc Chamone	1,55
5	Vignolle	0,50	15	Abords digue Commanderie Boisverdun	1,55
6	Etang du Fangassier	0,85	16	Abords digue Boisverdun La Louisiane	1,55
7	Abords digue Salin de Giraud	0,85	17	Marais de la Grand Mar	1,55

N°SZP	dénomination sous-zone protégée	Niveau de Scénario 3 [m NGF]	N°SZP	dénomination sous-zone protégée	Niveau de Scénario 3 [m NGF]
8	Etang de Ginès	1,06	18	Marais du Pont de Rousty	1,55
9	Vaccarès Est	0,97	19	Marais de Saliers	1,55
10	Panperdu Etang des Launes	1,30	20	Saliers	1,55

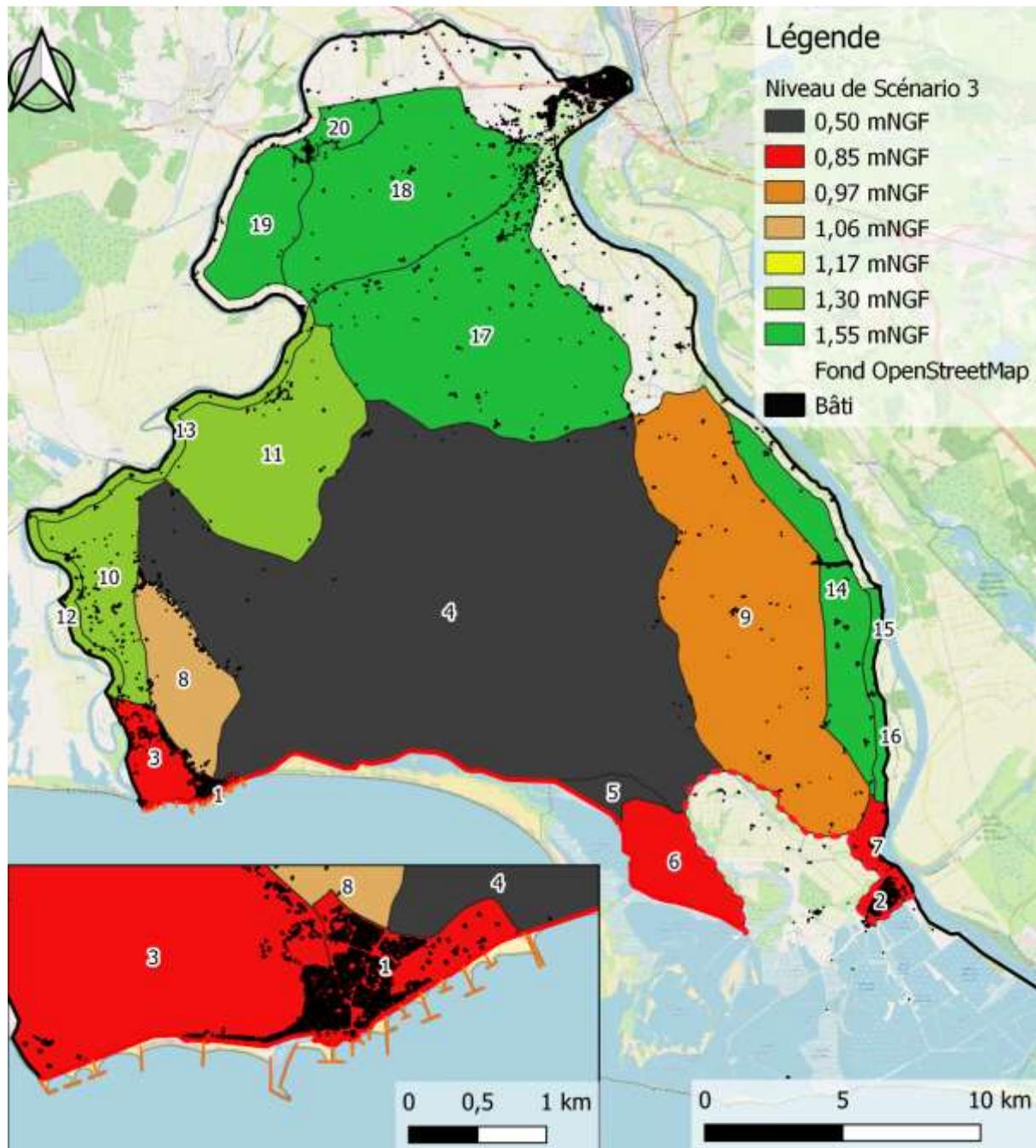


Figure 7. Niveau du Scénario 3, par sous zone protégée



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

ETUDE DE DANGERS
DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT MARITIME
CAMARGUE INSULAIRE

DOCUMENT A
(CHAPITRES N°1 A 3)

Version	Date	Commentaires
0	28/02/2023	Version initiale
1	23/03/2023	Reprises suite à relecture interne

SOMMAIRE

1	CHAPITRE 1 : RENSEIGNEMENTS ADMINISTRATIFS	3
1.1	IDENTIFICATION DU GESTIONNAIRE	3
1.1.1	<i>Gestionnaire</i>	3
1.1.2	<i>Propriétaires et Conventonnement</i>	3
1.1.3	<i>Ouvrages traversants</i>	5
1.2	IDENTIFICATION DU REDACTEUR	6
1.3	HISTORIQUE DES AUTORISATIONS DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT	7
1.4	DATE DE DEPOT	7
1.5	AMENAGEMENTS HYDRAULIQUES.....	8
2	CHAPITRE 2 : OBJET DE L'ETUDE.....	9
2.1	CADRE DE L'ETUDE	9
2.2	COMMUNES CONCERNEES	9
2.3	LIMITES DE LA ZONE PROTEGEE	9
2.3.1	<i>Enjeux dans la Zone protégée</i>	12
2.4	OUVRAGES DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT	14
2.4.1	<i>Description</i>	14
2.4.2	<i>Localisation</i>	15
3	CHAPITRE 3 : DESCRIPTION	18
3.1	LA ZONE PROTEGEE	18
3.1.1	<i>Les communes protégées</i>	18
3.1.2	<i>Les communes intégrées au SYMADREM</i>	19
3.2	L'ALEA.....	20
3.2.1	<i>Les tempêtes</i>	20
3.2.2	<i>Cellule hydro-sédimentaire.....</i>	22
3.2.3	<i>Le vent.....</i>	24
3.2.4	<i>Changement climatique et impact</i>	25
3.2.5	<i>Géologie</i>	25
3.2.6	<i>Les séismes</i>	26
3.2.7	<i>Les tsunامي.....</i>	27
3.2.8	<i>Les références scientifiques</i>	27
3.2.9	<i>Le retour d'expérience</i>	27
3.3	LES ELEMENTS DU SYSTEME DE PROTECTION	29
3.3.1	<i>Plan d'ensemble</i>	29
3.3.2	<i>Caractéristiques et localisation du système de protection</i>	30
3.3.3	<i>aménagements hydrauliques</i>	33
3.3.4	<i>Topographie</i>	33
3.4	LE FONCTIONNEMENT	34
3.4.1	<i>Données historiques</i>	34
3.4.2	<i>Rôle des composants</i>	34
3.4.3	<i>Station de référence</i>	35
3.4.4	<i>Niveau de protection des ouvrages</i>	35
3.4.5	<i>Niveau de protection de la zone protégée</i>	39
3.4.6	<i>Fonctionnement au-delà du niveau de protection</i>	40
3.4.7	<i>Organisation du gestionnaire.....</i>	41

1 CHAPITRE 1 : RENSEIGNEMENTS ADMINISTRATIFS

1.1 IDENTIFICATION DU GESTIONNAIRE

1.1.1 Gestionnaire

L'organisme gestionnaire du système d'endiguement maritime de la Camargue Insulaire est :

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

Le Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement des Dignes du Delta du Rhône et de la Mer (SYMADREM), est un établissement public territorial (syndicat mixte ouvert) qui regroupe depuis le 1^{er} janvier 2020 :

- 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).

L'objet du SYMADREM est : l'exercice de la compétence gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations (GEMAPI) qui lui a été transférée par les établissements publics de coopération intercommunale à fiscalité propre (EPCI-FP) membres du SYMADREM, sur le territoire dit "Grand Delta du Rhône", tel que défini dans le schéma d'organisation de la compétence locale de l'eau « Grand Delta », en application de l'article L5211-61 du CGCT.

1.1.2 Propriétaires et Conventionnement

Le SYMADREM n'est pas propriétaire du système d'endiguement.

Le tableau suivant recense le propriétaire des différents tronçons de digues, inclus dans le système d'endiguement maritime « Camargue Insulaire »

Tableau I. Système d'endiguement maritime Camargue Insulaire - digue

PR digue		Linéaire (m)	Propriétaire	Convention
Début	Fin			
0	1.79	1790	Ville des SMDLM (cadastré)	Transfert de compétence de l'ACCM au SYMADREM Le 01/01/2020

PR digue		Linéaire (m)	Propriétaire	Convention
Début	Fin			
1.79	2.92	1130	Ville des SMDLM (non cadastré)	Transfert de compétence de l'ACCM au SYMADREM Le 01/01/2020
2.92	3.11	190	Ville des SMDLM	Transfert de compétence de l'ACCM au SYMADREM Le 01/01/2020
3.11	3.88	770	Ville des SMDLM (non cadastré)	Transfert de compétence de l'ACCM au SYMADREM Le 01/01/2020
3.88	4.07	190	Etat (partie sud) et Ville des SMDLM (partie nord - non cadastré)	Transfert de gestion de l'Etat au SYMADREM Le 18/08/2002 Transfert de compétence de l'ACCM au SYMADREM Le 01/01/2020
4.07	4.31	240	Etat (partie sud) et Ville des SMDLM (partie nord)	Transfert de gestion de l'Etat au SYMADREM Le 18/08/2002
4.31	6	1690	Etat (partie sud) et Département 13 (partie nord)	Transfert de gestion de l'Etat au SYMADREM Le 18/08/2002
6	15.89	9890	Etat	Transfert de gestion de l'Etat au SYMADREM Le 18/08/2002
15.89	15.91	26	Conservatoire du littoral	Transfert de gestion de l'Etat au SYMADREM Le 18/08/2002 Convention SYMADREM / SNPN Le 27/09/2010
15.91	16.1	200	Etat (partie nord) et Conservatoire du littoral (partie sud)	Transfert de gestion de l'Etat au SYMADREM Le 18/08/2002
16.1	18.82	2720	Etat	Transfert de gestion de l'Etat au SYMADREM Le 18/08/2002
18.82	19.02	300	Conservatoire du littoral	Changement de tracé effectué entre 1943 et 1953, non régularisé sur le cadastre Géré de fait par le SYMADREM
19.02	20.75	1730	Etat (partie est/nord) et Conservatoire du littoral (partie ouest/sud)	Transfert de gestion de l'Etat au SYMADREM Le 18/08/2002
20.75	20.87	120	Etat	Transfert de gestion de l'Etat au SYMADREM Le 18/08/2002

PR digue		Linéaire (m)	Propriétaire	Convention
Début	Fin			
20.87	24.45	3580	Etat (crête) et Conservatoire du littoral (talus)	Transfert de gestion de l'Etat au SYMADREM Le 18/08/2002
24.45	25.56	1110	Etat (crête) ; Conservatoire du littoral (talus nord) et Compagnie des Salins du midi (talus sud)	Transfert de gestion de l'Etat au SYMADREM Le 18/08/2002

Tableau 2. Système d'endiguement maritime Camargue Insulaire – épis et brise lame

Ouvrage (N° dans arrêté)	Linéaire	Propriétaire	Convention
	(m)		
A-Clos du Rhône - Epi tenon (1 / A)	172	Etat (DPM non cadastré)	Arrêté portant concession d'endiguage et d'utilisation des dépendances du Domaine Public Maritime au SYMADREM pour la construction et la conservation d'ouvrages de défense contre la mer sur la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer Le 22/02/2001 Et Convention de mise à disposition de la commune des Saintes au SYMADREM pour l'ouvrage F Le 03/04/2001
B-Clos du Rhône – BL1 (B)	125		
C-Clos du Rhône – BL2 (C)	110+125		
D-Launes Ouest (D)	172		
E-Launes Est (E)	171		
F-Port Gardian Ouest (hors arrêté)	385		
G-Port Gardian Est (hors arrêté)	330		
H-Arènes T (2)	111+186		
I-Camille transversal (3 / F)	203		
J-Camille Est (4)	66		
K-Amphores (G)	272+81		
M-Thalacap Petit (H)	91+58		
N-Thalacap Grand (I)	200+141		
O-Grand Large Petit (5)	83+91		
P-Grand Large Grand (6)	197+146		
Q-Poste secours (9)	83+91		
R-Epis de la fourcade – Ouest (7 / K)	270	Etat (DPM non cadastré) et Ville des SMDLM	
S-Epis de la Fourcade – Est (8)	243	Ville des SMDLM	

1.1.3 Ouvrages traversants

Des ouvrages traversent le système d'endiguement et leur gestion est commune entre le SYMADREM et leur exploitants.

En dehors d'un réseau (petite prise d'eau de Thalacap), les ouvrages sont soit non-utilisés soit en gestion multiple dont le SYMADREM fait partie par conventionnement.

Tableau 3. Digue à la mer– Ouvrages hydrauliques traversants

PR	Libellé ou lieu-dit	Exploitant
3,00	Epi N - Thalacap	Thalacap Contact : 04 90 99 22 28
3,88	Pertuis de la Fourcade	SYMADREM + Commune des Saintes-Maries-de-la-Mer
8,26	Pertuis du Rousty	SYMADREM + Commune des Saintes-Maries-de-la-Mer
14,07	Prise d'eau de la Gacholle	abandonné
14,93	Phare de la Gacholle	abandonné
15,91	Pertuis de la comtesse	SYMADREM + SNPN
16,38	Vignole-Galabert	abandonné
18,86	Clos Desclaux 1	abandonné
18,88	Clos Desclaux 3	abandonné
21,25	Pertuis du Fangassier	SYMADREM + PNRC/Tour du Valat/ SNPN/Conservatoire du littoral
23,47	Grand rascaillan-contre canal	abandonné
24,85	Petit rascaillan-contre canal	abandonné

1.2 IDENTIFICATION DU REDACTEUR

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

**Le Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement
des Dignes du Delta du Rhône et de la Mer**
service exploitation et sûreté
1182 Chemin de Fourchon
VC33
13200 ARLES

Le rédacteur de l'étude de dangers est :

- Charlie DAST : ingénieur sûreté des ouvrages du service exploitation et sûreté

La rédaction de l'étude accidentologique a été réalisée en étroite collaboration avec le garde digues du SYMADREM opérant sur la digue à la mer :

- Thierry LIABOEUF

La relecture a été réalisée par :

- Thibaut MALLET : directeur général
- Séverine CHARDES : chef du service exploitation et sûreté
- Céline de PARIS : ingénieur travaux et territoires en charge de la stratégie littorale

La validation a été assurée par :

- Gilles DUMAS : vice-président par délégation de pouvoir du comité syndical en date du 28 juin 2022

Le service exploitation et sûreté du SYMADREM dispose, par arrêté du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement du 18 juillet 2022 portant agrément d'organismes intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques de l'agrément n°62-c « **Digues et Petits Barrages – Etudes et diagnostics** » jusqu'au 31 juillet 2030 et de l'agrément n°62-d « Digues et Petits Barrages – Etudes, diagnostics et suivi de travaux » jusqu'au 31 juillet 2025.

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 entre autres la réalisation de l'étude de dangers d'un système d'endiguement en application de l'article R. 214-116 du code de l'environnement

1.3 HISTORIQUE DES AUTORISATIONS DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT

La digue à la mer a fait l'objet d'une reconnaissance d'antériorité au titre de l'article R.214-53 du code de l'environnement, considérée dans l'arrêté préfectoral de PACA du 5 aout 2014 autorisant le conservatoire du littoral à recalibrer l'ouvrage hydraulique situé au PK 20.7 de la digue à la mer [R201].

Cette étude de dangers est associée à la demande d'autorisation initiale sans travaux du système d'endiguement maritime Camargue Insulaire qui est la première demande d'autorisation au titre des systèmes d'endiguement.

C'est un système d'endiguement de classe B, le nombre de personnes situées dans la zone protégée étant de l'ordre de 5500.

1.4 DATE DE DEPOT

Cette première étude de dangers du système d'endiguement maritime Camargue Insulaire a été approuvée par délibération n°2023-20 du 13/03/2023 et remise au Préfet des Bouches-du-Rhône le 28/03/2023.

Tableau 4. Suivi administratif de l'étude de dangers

Indice	Approbation Comité Syndical	Envoi Préfet	Arrêté préfectoral	Nature des modifications
1	13 mars 2023	28 mars 2023		Autorisation initiale

1.5 AMENAGEMENTS HYDRAULIQUES

Sans objet

2 CHAPITRE 2 : OBJET DE L'ETUDE

2.1 CADRE DE L'ETUDE

Le dépôt de demande d'autorisation est 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 aux dispositions de l'arrêté du 7 avril 2017 modifié.

L'étude de dangers traite de l'aléa submersion marine.

2.2 COMMUNES CONCERNEES

La zone protégée est comprise dans la Camargue insulaire, soit sur les communes d'Arles et des Saintes-Maries-de-la-Mer.

Ces 2 communes du département des Bouches Du Rhône sont membres de la communauté d'agglomération Arles-Crau-Camargue-Montagnette, qui est membre du SYMADREM.

2.3 LIMITES DE LA ZONE PROTEGEE

La zone protégée par le système d'endiguement s'étend sur environ 500 km².

Les contours de la zone protégée ont d'abord été déterminés par la localisation des bras du Rhône et de celle des ouvrages du système d'endiguement maritime « Camargue Insulaire ». Dans cet espace fermé où l'altimétrie est faible, les terrains en dessous de 1.55 mNGF ont été retenus, le reste étant hors d'eau bien au-delà de la tempête de référence.

Puis la zone protégée a été divisée en 20 sous-zones protégées qui sont représentées sur la carte ci-après. Le découpage a été réalisé de façon à reprendre au maximum les casiers de l'étude fluviale afin de pouvoir, en 1 point, n'être relié qu'à une zone et avoir immédiatement les 2 niveaux de protection.

Dans les zones éloignées des digues, les zones supérieures à 1.55 mNGF seront hors d'eau, le découpage en casier, qui intègre donc des terrains de plus haute altimétrie, est ainsi sécuritaire.

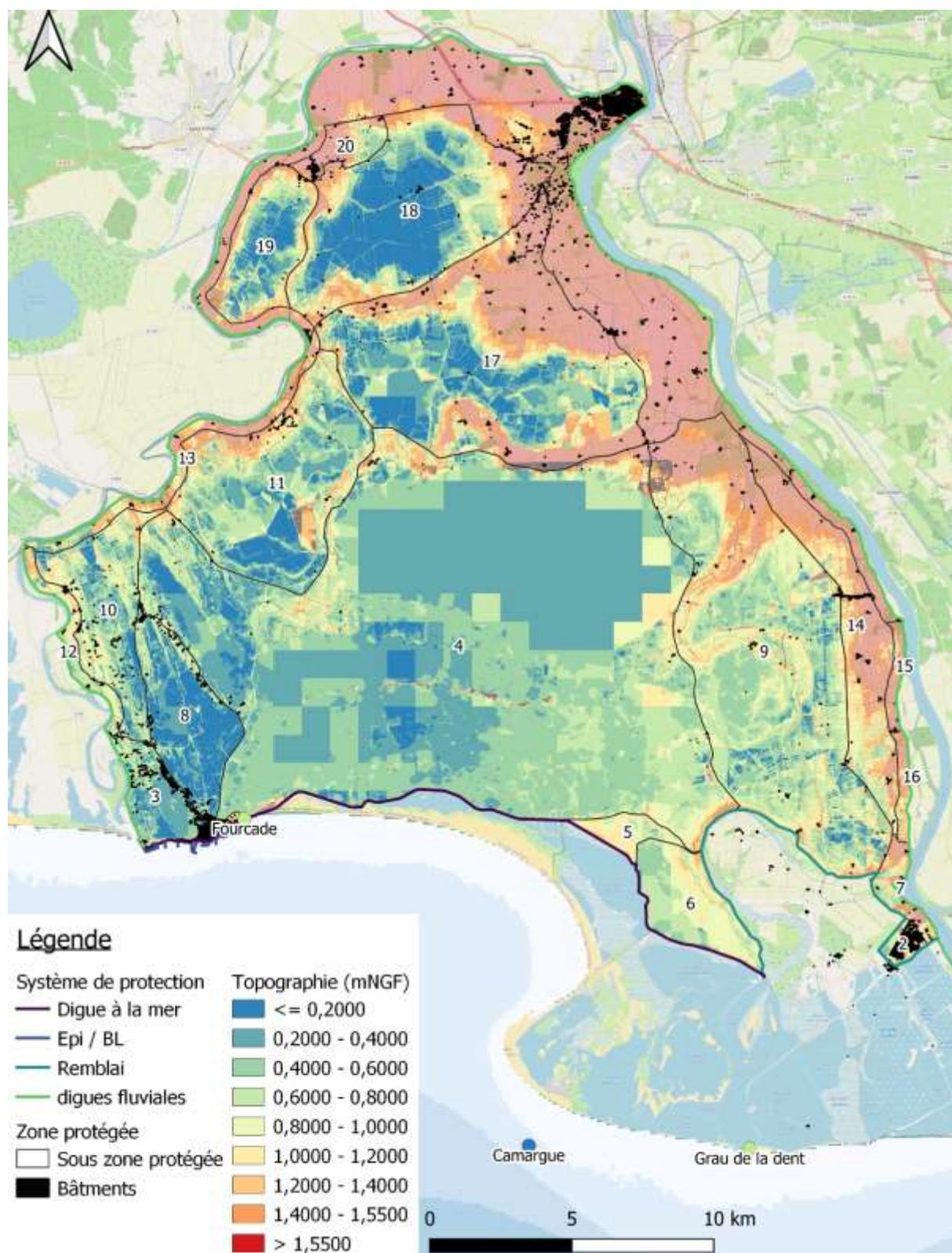


Figure 1. Zone protégée : découpage en casiers et zones situées sous 1.55 mNGF

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 5. Camargue Insulaire – Caractéristiques topographiques relatives aux enjeux

N° SZP	N° SZP fluviale	dénomination sous-zone protégée	Surface (en km ²)	Cote (en m NGF)		
				moyenne	médiane	5 % - 95 %
1	38	Saintes-Maries-de-la-Mer	0,9	1,2	1,2	0,8 1,8
2	19*	Salin de Giraud	1,6	1,1	1,1	0,5 1,8
3	35	Amarée Dromar	6,9	0,5	0,4	0,1 1,1
4	16*	Etang du Vaccarès	200,1	0,4	0,5	0,2 1,0
5	16*	Vignolle	3,1	1,0	1,0	0,6 1,3
6	18*	Etang du Fangassier	10,9	0,8	0,8	0,5 1,2
7	25*	Abords digue Salin de Giraud	3,0	1,3	1,3	0,5 2,2
8	37	Etang de Ginès	14,6	0,3	0,2	0,1 0,9
9	40*	Vaccarès Est	72,6	0,9	0,8	0,3 1,9
10	36	Panperdu Etang des Launes	15,9	0,6	0,6	0,1 1,2
11	39	Paty trinité	34,2	0,7	0,6	0,1 1,5
12	34	Abords digue Sylvéreal Bac du Sauvage	3,4	1,0	0,9	0,4 1,6
13	33	Abords digue Albaron Sylvéreal	5,9	1,5	1,5	0,4 2,6
14	17	Armelière Sambuc Chamone	18,2	1,5	1,5	0,7 2,5
15	23	Abords digue Commanderie Boisverdun	1,6	1,8	1,8	1,0 2,6
16	24	Abords digue Boisverdun La Louisiane	1,6	1,5	1,5	0,9 2,2
17	14	Marais de la Grand Mar	63,9	1,1	0,9	0,1 2,8
18	13	Marais du Pont de Rousty	40,7	0,6	0,5	-0,5 1,9
19	31	Marais de Saliers	12,8	0,7	0,6	0,0 1,8
20	30	Saliers	3,9	1,5	1,6	0,5 2,5
Total			515,5	0,7		

* : Les sous zone protégées fluviales et maritimes n'ont pas la même géométrie au sud est du territoire.

2.3.1 *Enjeux dans la Zone protégée*

2.3.1.1 La population

Tableau 6. Camargue Insulaire – Principales données relatives aux populations

N°SZP	N° SZP fluviale	nombre ménages	Nombre d'individus	Proportions Individus Vulnérables (< 18 ans et > 65 ans)	Densité population (nb/km ²)	Nombre logements	% Plain-Pied
1	38	965	1 846	41%	2 124	1 453	20%
2	19*	875	1 903	43%	1 217	1 043	30%
3	35	161	356	40%	52	528	79%
4	16*	39	86	31%	0	120	68%
5	16*	0	0	-	0	0	-
6	18*	0	0	-	0	0	-
7	25*	12	27	51%	9	24	50%
8	37	83	157	31%	11	301	76%
9	40*	55	112	36%	2	145	68%
10	36	92	190	37%	12	206	63%
11	39	40	95	26%	3	89	57%
12	34	37	82	39%	24	84	60%
13	33	21	47	37%	8	67	36%
14	17	98	240	40%	13	195	58%
15	23	2	4	20%	3	20	35%
16	24	1	2	35%	1	2	100%
17	14	95	229	36%	4	327	52%
18	13	71	168	36%	4	189	50%
19	31	7	14	26%	1	17	65%
20	30	105	265	32%	68	177	18%
Total		2759	5823	40%	11,3	4987	43%

* : Les sous zone protégées fluviales et maritimes n'ont pas la même géométrie au sud est du territoire.

Les bâtiments, et donc la population, se trouvant dans la zone protégée sont principalement concentrés au centre des Saintes-Maries-de-la-Mer et au hameau de Salin de Giraud ; il y a ensuite des logements éparses avec une concentration aux Saintes-Maries-de-la-Mer, le long des routes entre Pioch-Badet et le centre village, ainsi qu'au niveau du Sambuc. Les zones d'habitations plus éloignées des ouvrages de protection sont généralement au dessus de 1.55mNGF (grisé sur la carte ci-dessous)

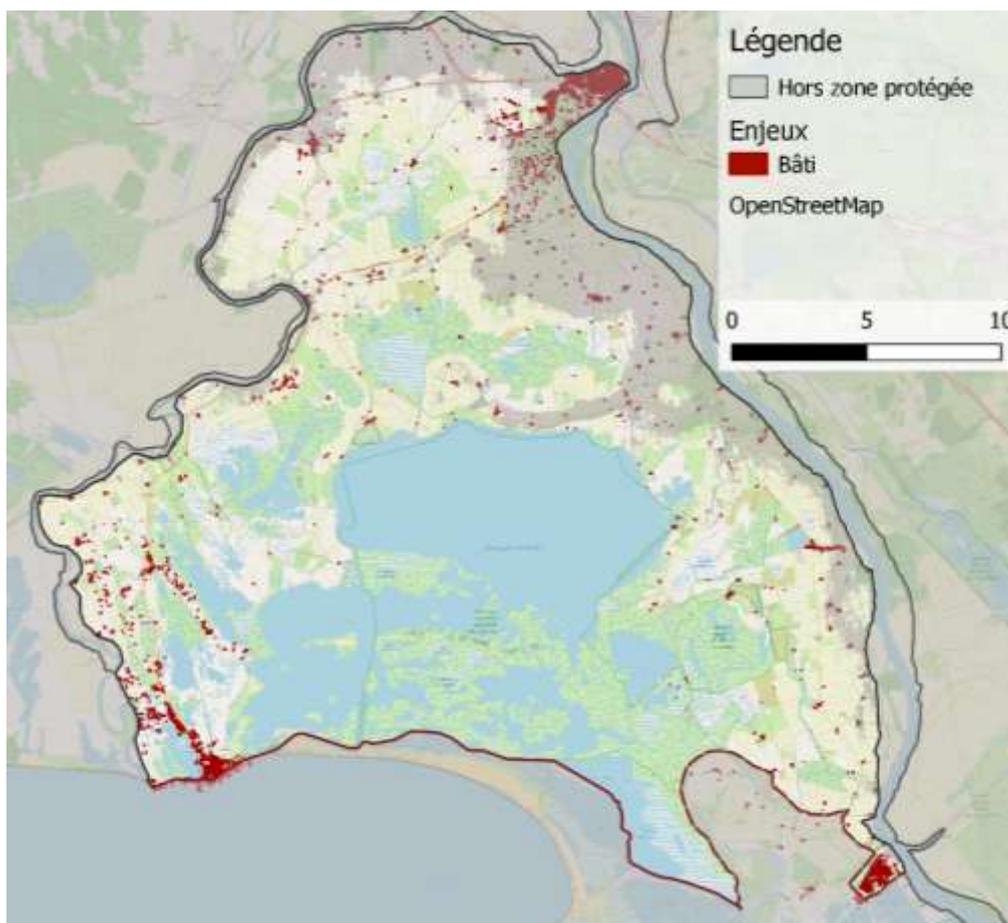


Figure 2. Localisation du bâti en Camargue Insulaire

2.3.1.2 Sites sensibles

Il y a quelques établissements sensibles, à savoir :

- 1 site Seveso (seuil bas) : M2I Salin à Salin de Giraud
- 4 autres ICPE (dont une adresse avec 10 références)
- 1 établissement de santé (Salin de Giraud)
- 3 campings (2 vers le centre des Saintes-Maries-de-la-Mer et 1 à Saliers)
- 2 établissements d'enseignement (Saintes-Maries-de-la-Mer et Salin de Giraud)

Concernant la gestion de crise, il y a mairie, pompiers et police aux Saintes-Maries-de-la-Mer et à Salin de Giraud, ainsi qu'une mairie au Sambuc.

2.4 OUVRAGES DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT

2.4.1 Description

Le système d'endiguement est composé de la digue à la mer, qui s'étend sur 26 km à l'Est de l'embouchure du Petit Rhône, et d'ouvrages contributifs que sont les épis et brises lames du village des Saintes-Maries-de-la-Mer.

Il se raccorde à l'Ouest sur les digues fluviales du Petit Rhône et à l'Est sur un remblai puis sur les digues fluviales du Grand Rhône, ce qui permet de constituer un système de protection complet.

2.4.1.1 Système d'endiguement : Digue à la mer

La création d'un ouvrage de protection contre les entrées marines date du milieu du XIX^{ème} siècle, afin de maîtriser les niveaux d'eau dans l'île de Camargue. Il est aujourd'hui possible de distinguer 3 zones principales :

- Au droit du village

Il existe, sur les 4 premiers kilomètres, une forte variabilité des ouvrages, ils sont décrits plus en détail au chapitre 5.

Il y a une protection en enrochements sur la majeure partie du linéaire afin de protéger les ouvrages de la houle. Les autres secteurs sont en béton et un secteur est dunaire.

Les ouvrages sont au-delà de 2 mNGF à l'exception de la promenade de port Gardian qui se situe autour de 1.5 mNGF et dont la protection est assurée par un muret discontinu.

Il y a une alternance de digues à noyau sablo-limoneux protégé par une carapace et d'ouvrages béton localement discontinus.

- Du pertuis de la Fourcade à la digue des Toscans,

C'est une digue argilo-sableuse de largeur en crête de 5m minimum avec des pentes à 2/1 ou plus. La digue s'éloigne progressivement du cordon littoral et passe alors progressivement de 2mNGF à 1mNGF, avec des paliers au niveau du phare de la Gacholle et du clos d'Esclaux.

Sur les premières centaines de mètres, la forte érosion a fini par mettre la mer directement contre la digue qui a alors été équipée d'enrochements en 2014.

- De la digue des Toscans au Vieux Rhône

Largeur en crête est importante, de 9m minimum, car cette portion sert également de piste. Le trafic a érodé la zone circulaire et il n'est alors pas rare d'avoir un merlon coté mer plus haut que la piste qui présente elle des points bas à 0.5mNGF.

2.4.1.2 Protection a l'est du vieux Rhône

Une digue privée, de la Compagnie des Salins du Midi, contourne les marais salants en allant jusque contre la mer. Les coûts d'entretien sont alors importants (solllicitation directe de la mer), pour des bénéfices privés.

Il a été fait le choix de définir le système de protection en recul, comme une protection plus rapprochée du village de Salin de Giraud. Un terrain continu de plus d'0.85m d'altitude, dans la continuité de la digue à la mer et jusqu'à la digue du Grand Rhône, a été retenu. Ce remblai est alors long de 20km, il suit principalement un ancien bras du Rhône.

2.4.1.3 Fermeture du Système de protection

A l'Ouest et à l'Est, le système se raccorde au système de protection fluvial de la Camargue insulaire.

2.4.1.4 Ouvrages : Epis et brise lame

Au niveau du village, la digue se retrouve en front de mer. Les ouvrages seraient alors soumis à l'érosion du trait de côte et à l'impact de la houle sans la présence des épis, permettant de maintenir les plages, et des brise-lame, servant à casser la houle. Ces ouvrages font donc parties intégrantes du système d'endiguement.

Ce sont des ouvrages en enrochements lourds qui ont été mis en place à partir des années 1940 pour limiter l'impact du recul du trait de côte, il y en a aujourd'hui 19 entre l'embouchure du Petit Rhône et le pertuis de la fourcade (soit sur 4km).

2.4.2 Localisation

Les cartographies ci-après permettent de situer les éléments décrits au paragraphe précédent, de l'Ouest (embouchure du petit Rhône) à l'Est (Grand Rhône) :

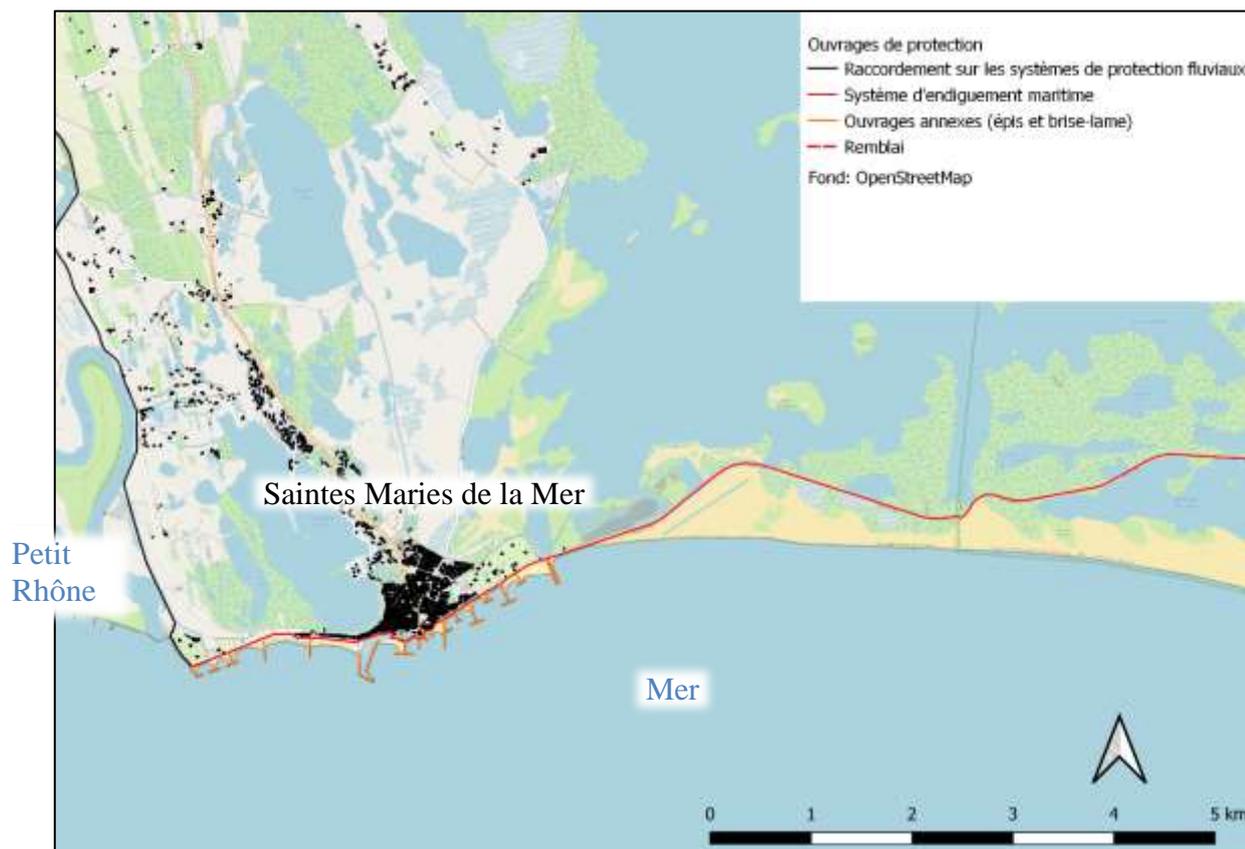


Figure 3. Localisation des ouvrages du système d'endiguement 1/3

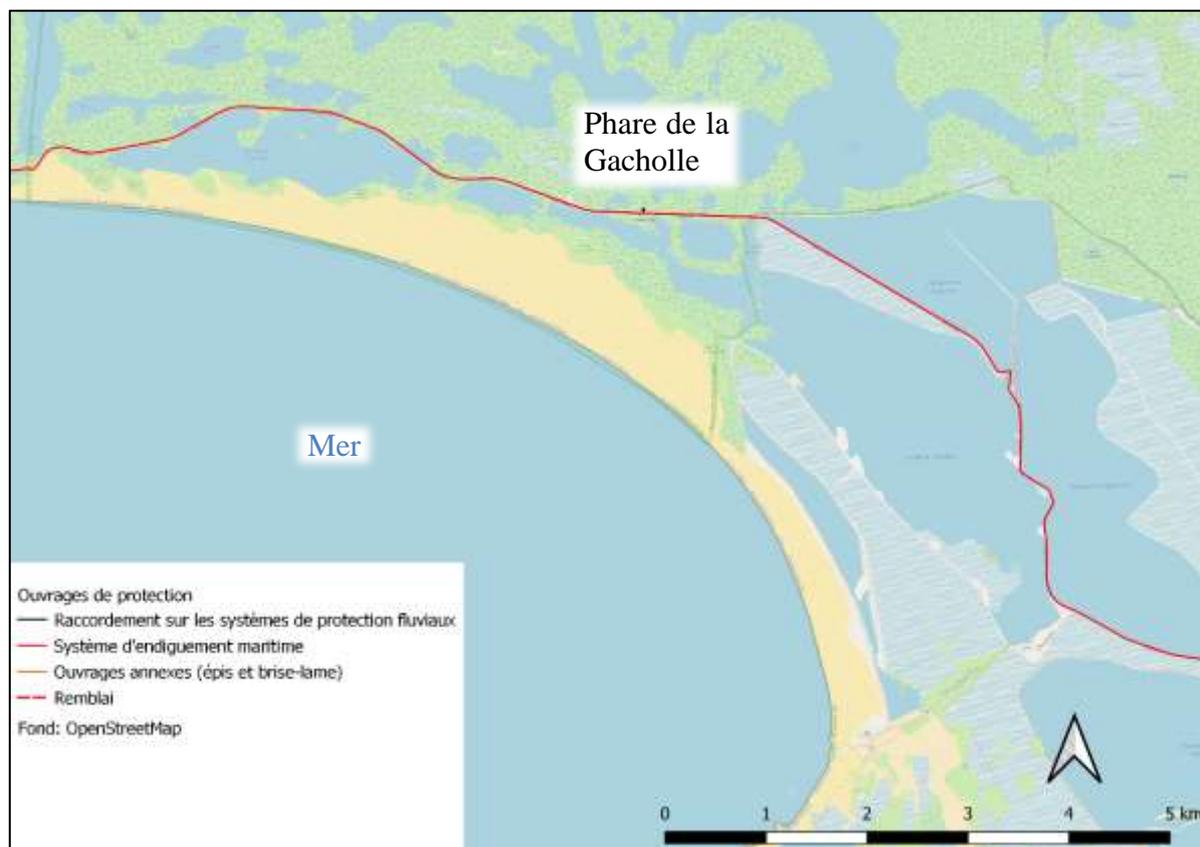


Figure 4. Localisation des ouvrages du système d'endiguement 2/3

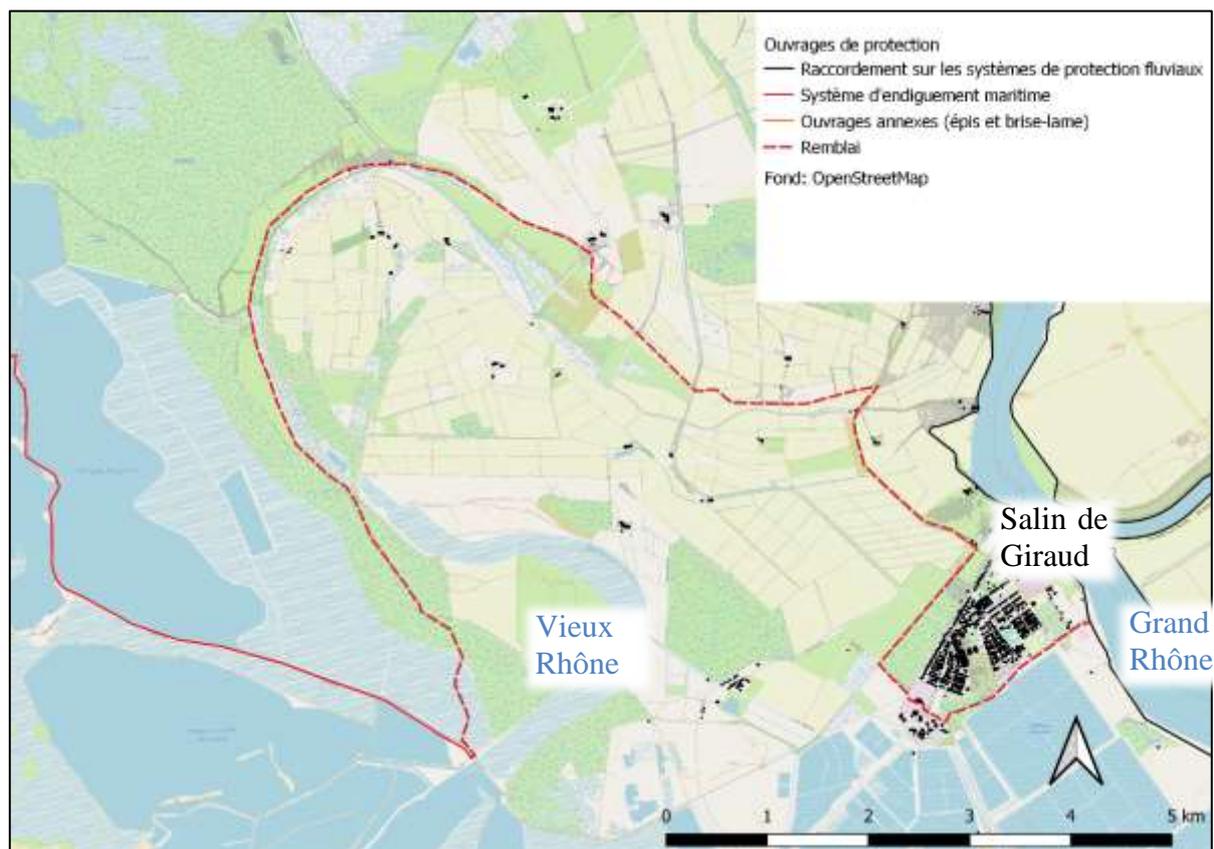


Figure 5. Localisation des ouvrages du système d'endiguement 3/3

3 CHAPITRE 3 : DESCRIPTION

3.1 LA ZONE PROTEGEE

3.1.1 *Les communes protégées*

La zone protégée, définie au §2.3, est comprise dans la Camargue insulaire, soit sur les communes d'Arles et des Saintes-Maries-de-la-Mer.

Ces 2 communes du département des Bouches Du Rhône sont membres de la communauté d'agglomération Arles-Crau-Camargue-Montagnette, qui adhère au SYMADREM.

Le territoire de la Camargue insulaire, ainsi que les limites communales sont représentés sur la carte ci-dessous.

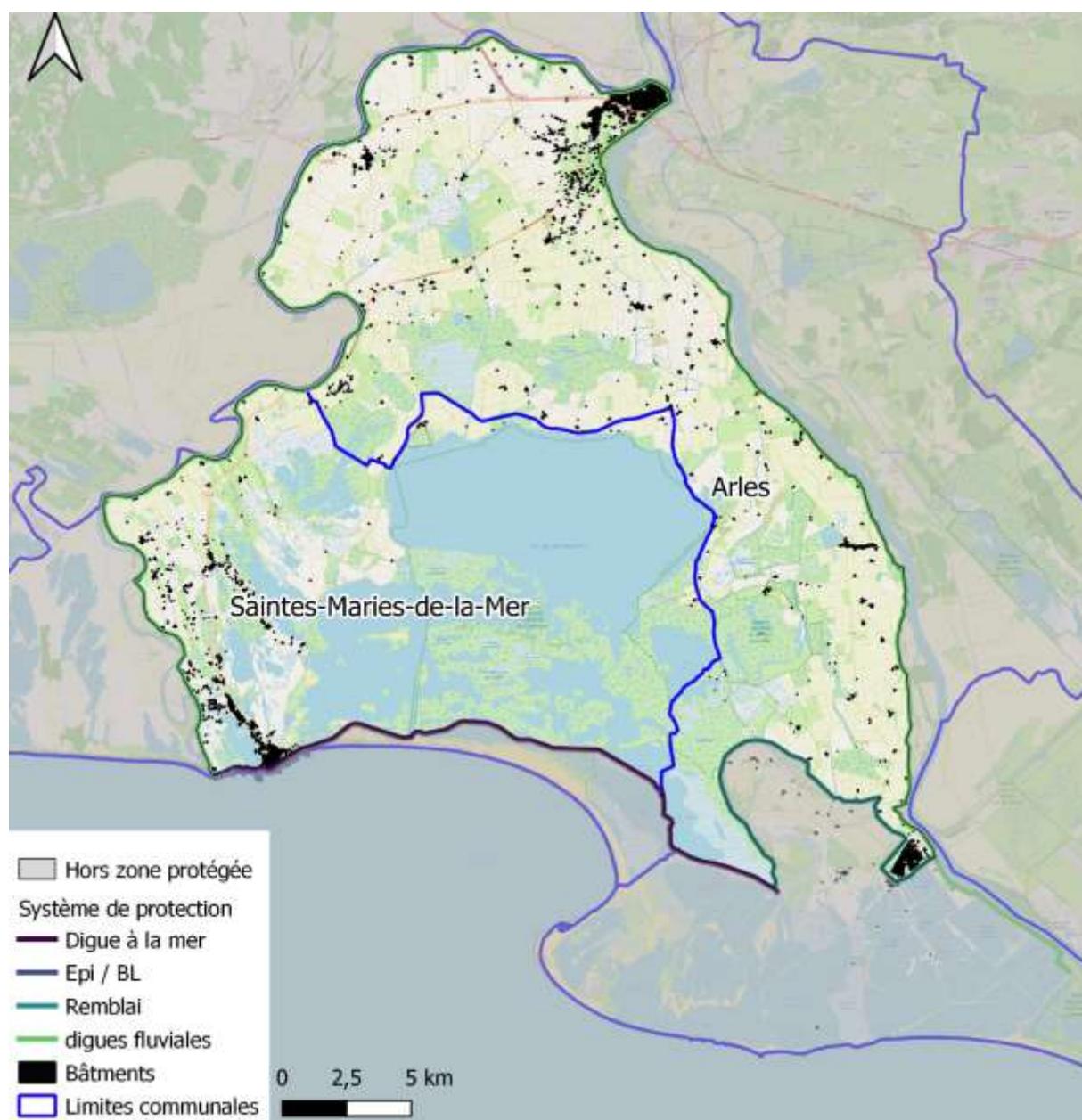


Figure 6. Communes en Camargue Insulaire

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

Commune	Surface Commune (m ²)	Surface communale en Camargue insulaire (m ²)	Surface communale en Zone protégée (%)	Poids de la zone protégée (%)
Arles	757 541 805	254 857 111	68.0%	49.4%
Saintes-Maries-de-la-Mer	371 765 889	260 637 026	70.1%	50.6%
TOTAL		515 494 137		100 %

3.1.2 Les communes intégrées au SYMADREM

Le SYMADREM est autorité compétente en matière de GEMAPI sur la zone protégée ; il l'est plus largement sur le périmètre du Grand Delta du Rhône. Cela fait suite à la délégation de compétence de la part des intercommunalités membres.

Ce territoire représente les communes suivantes :

- Port Saint Louis du Rhône et Fos sur mer (métropole Aix Marseille Provence),
- Tarascon, **Arles**, Saint Martin de Crau et les **Saintes-Maries-de-la-Mer** (communauté d'agglomération Arles Crau Camargue Montagnette),
- Saint Gilles (communauté d'agglomération Nîmes Métropole),
- Aigues Morte, le Grau du Roi et Saint Laurent d'Aigouze (communauté de communes Terre de Camargue),
- Beaucaire, Bellegarde et Fourques (communauté de communes de Beaucaire Terre d'Argence),
- Vauvert, Beauvoisin, Le Cailar et Aimargues (communauté de communes de la Petite Camargue),

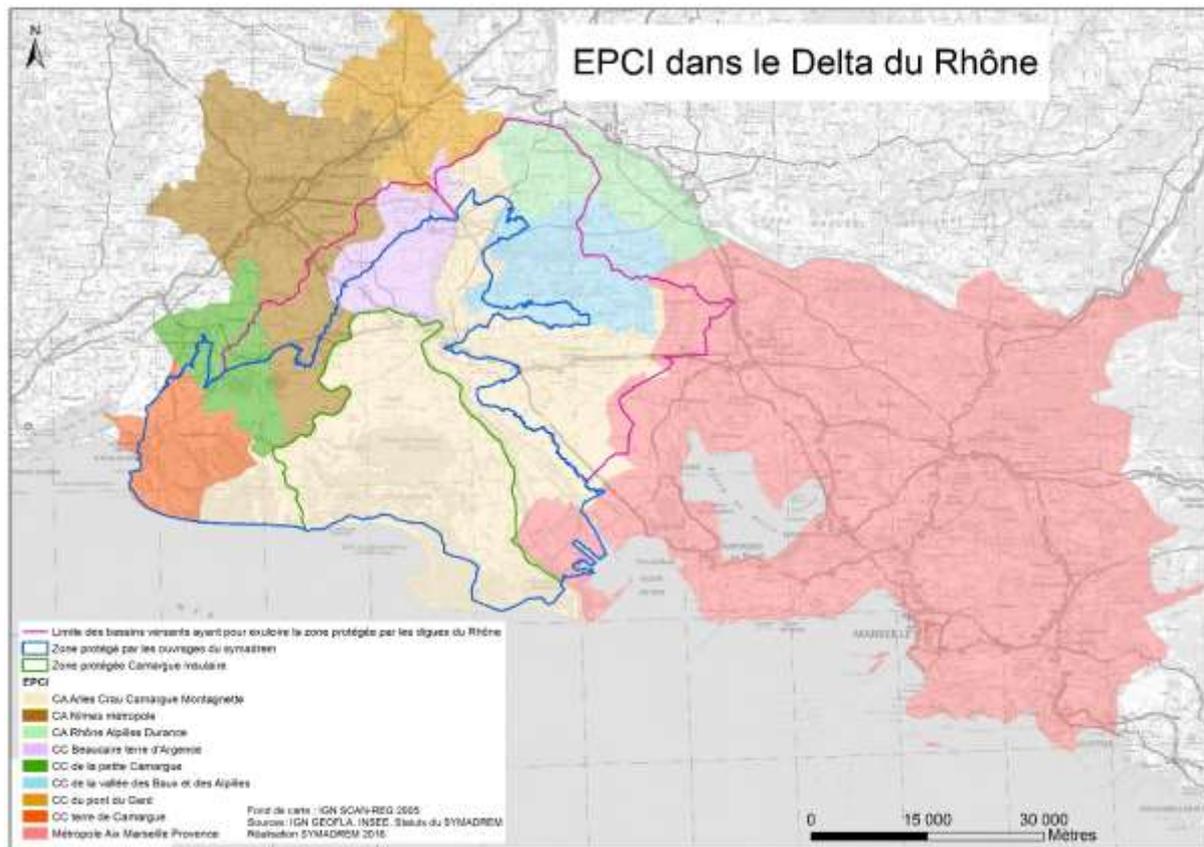


Figure 7. La zone protégée du Grand Delta du Rhône dans le contexte intercommunal

3.2 L'ALEA

L'aléa représente l'ensemble des éléments qui peuvent venir solliciter les ouvrages de protection. Cela comprend principalement les tempêtes mais également les facteurs aggravants de tempête, le sol de fondation et les tsunamis.

3.2.1 Les tempêtes

La sollicitation sur les ouvrages est déterminée par deux paramètres principaux que sont le niveau statique en pied d'ouvrage et la houle caractéristique.

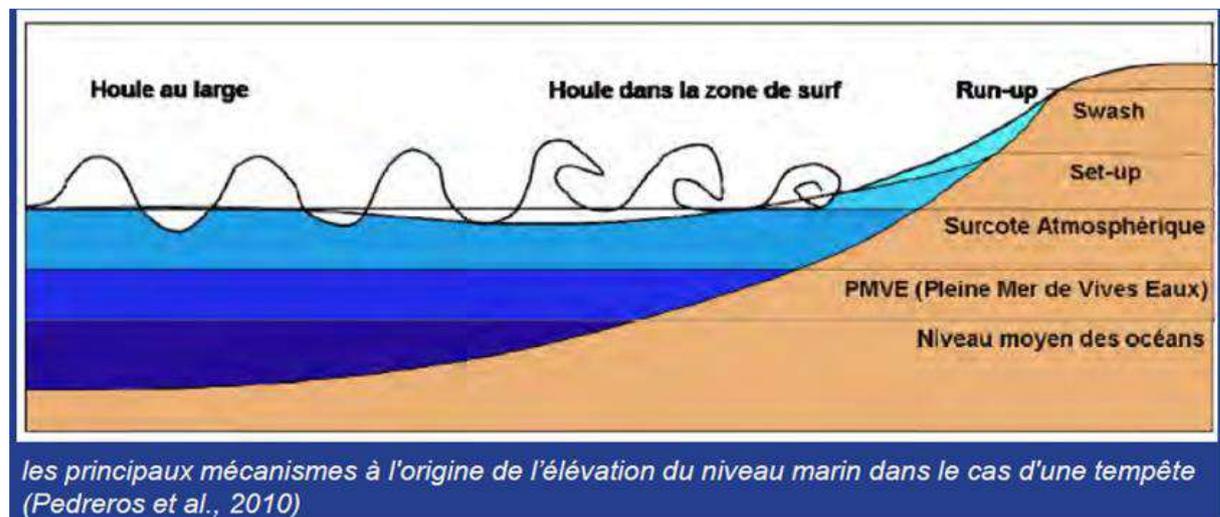
Le niveau marin statique est lié à la conjonction de plusieurs éléments :

- Marée astronomique, phénomène cyclique lié à l'attraction gravitationnelle des astres et en particulier la Lune ; elle est de type semi-diurne à inégalité diurne sur la méditerranée et de faible amplitude : 40 à 50 cm entre les plus hautes et les plus basses marées ;
- Surcote atmosphérique, phénomène due à une dépression atmosphérique ; une diminution d'un hectopascal équivaut approximativement à une élévation d'un centimètre de niveau marin (exemple : dépression de 990 hPa = augmentation de 23 cm).

- Le wind set-up, le vent exerce une contrainte à la surface de l'eau générant une modification du plan d'eau et des courants
- Le wave set-up : à l'approche des côtes, les vagues déferlent et transfèrent alors leur énergie sur la colonne d'eau, ce qui provoque une surélévation moyenne. Cette élévation peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres en fonction des caractéristiques des vagues (hauteur, période et direction), qui dépendent quant à elles des phénomènes de shoaling et réfraction/diffraction ayant lieu au niveau des côtes.

Pour obtenir le niveau maximal atteint par la mer, il faut aussi tenir compte du jet de rive (« swash »), c'est à dire le flux et le reflux des vagues sur l'estran ou sur les parements. On appelle « run-up » l'altitude maximale atteinte par la mer au-dessus de son niveau de référence.

Un événement est donc composé d'un niveau statique (niveau de la marée + surcote atmosphérique+ set-up) et d'une composante dynamique (run-up).



Sur la cote camarguaise, la marée astronomique va engendrer une base autour de 0.2-0.35 mNGF au pic, avec une variation journalière de l'ordre de 20cm ; soit un niveau variant **entre 0 et 0.35 mNGF**.

La surcote atmosphérique est de l'ordre de **20-25cm**.

Le wind setup est fortement variable , **entre 40 cm et 1m**.

Le wave setup est variable mais reste de l'ordre de **50 cm** dans les zones les plus impactées.

C'est donc le vent, à l'origine de la majeure partie du setup, qui est dimensionnant pour les tempêtes méditerranéennes.

3.2.1.1 Modélisations

L'étude est basée sur 5 scénario qui ont été modélisés par le BRGM et repris par Egis.

Tableau 8. Niveaux modélisés

Scénario BRGM	Fréquence	Nom	Niveau marin modélisé [mNGF]	Hauteur de vagues associée [m]	Période au pic [s]	Direction des vagues [°N]	Vitesse du vent [m/s]	Direction du vent [°]
8 – Tempête 2014	Courante	T0.97	0.97	4.04	9.1		19.6	120-180
1 – Décennale	Rare	T1.06	1.06	4.70	9.0	155	22.4	121
2 – Trentennale	Rare	T1.17	1.17	5.09	9.2	155	23.6	121
3 – Centennale	Exceptionnelle	T1.30	1.30	5.33	9.4	155	24.2	121
4 – Exceptionnelle	Extrême	T1.55	1.55	8.75	11.5	155	30.0	121

3.2.2 Cellule hydro-sédimentaire

La distance entre la cote et les ouvrages de protection a un impact sur l'intensité de la sollicitation au droit des ouvrages. C'est le fonctionnement de la cellule hydro-sédimentaire qui renseigne de cette évolution.

L'évolution du littoral est liée à des mouvements de sédiments qui s'opèrent à différentes échelles de temps et d'espace. La cellule hydro-sédimentaire est ainsi un concept permettant d'identifier, à une échelle donnée, des compartiments du littoral qui peuvent être décrits et analysés de manière autonome sur le plan des transports sédimentaires (*source : [L202]*).

Les limites de la cellule définissent la zone géographique dans laquelle le budget sédimentaire peut être calculé, ce qui donne le cadre pour une analyse quantitative de l'érosion et de la sédimentation. Entre deux cellules voisines, les échanges sont faibles voire nuls ou inférieurs à ceux réalisées à l'intérieur même de la cellule. On admet donc que sous l'action des facteurs naturels (houles, vents...), le sable reste à l'intérieur de la cellule ou sort définitivement du système littoral (perte au large, à terre...). [...]. En termes de pratique et de gestion, la cellule sédimentaire côtière se situe dans un cadre composé de trois zones géographiques : le bassin-versant, la ligne de côte et l'environnement marin proche de la côte (*source : Observatoire de la côte sableuse catalane - ObsCat – glossaire*).

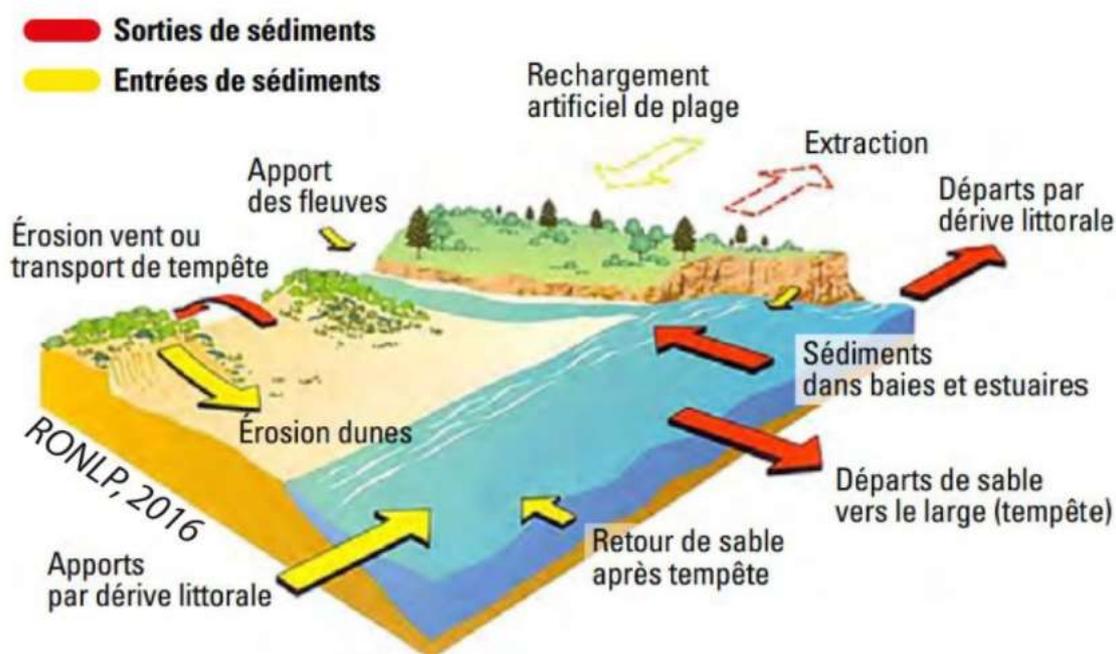


Figure 8. Echange sédimentaire au sein d'une cellule hydrosédimentaire (source : ObsCat)

Entre les deux embouchures du Rhône il y a 2 cellules hydro-sédimentaires avec 3 courants principaux, qui sont représentés sur la carte suivante :



Figure 9. cellules hydrosédimentaires du Delta du Rhône - extrait – Sabatier

La première comprend une alimentation de Beauduc à la fois par l'ouest depuis l'embouchure du petit Rhône et par le sud-est depuis le grau de la dent.
La seconde est un déplacement est-ouest du grau de la dent à l'embouchure du grand Rhône.

Les secteurs où les reculs sont les plus rapides sont Plage Est des Saintes-Maries-de-la-Mer et le secteur de la digue de Véran et de l'étang de Beauduc, à Arles.

Le secteur où les avancées du trait de côte sont les plus rapides est la pointe des Sablons à Beauduc (commune d'Arles).

Le bilan sédimentaire général du Grand Delta du Rhône décroît depuis 1872 et devient négatif à partir des années 80s. Le déficit le plus important concerne la période la plus récente, entre 2006 et 2013. Cela est dû à une diminution lente et continue des gains sédimentaires aux embouchures (liées à la réduction du nombre de crues depuis la fin du Petit Age Glaciaire, à la revégétalisation du bassin versant et à la construction de barrages) ainsi qu'au niveau des flèches (Beauduc, Gracieuse), du fait des pertes sédimentaires vers le large. Par ailleurs les pertes sédimentaires dans les secteurs en érosion sous-marine augmentent et s'accroissent, en particulier devant les Saintes-Maries-de-la-Mer et sur le littoral de Faraman.

Le recul du trait de cote au droit du village a été stoppé par la mise en place d'épis, de brise lame et d'enrochements sur la digue.

En aval-dérive des batteries d'épis ainsi qu'aux extrémités des ouvrages frontaux en enrochements, on observe une aggravation de l'érosion. Le linéaire concerné est de 8 km, correspondant aux secteurs de la Plage Est des Saintes-Maries-de-la-Mer ainsi que le secteur du phare de Beauduc.

3.2.3 Le vent

Le vent agit sur les 2 paramètres des tempêtes :

- le niveau à la cote en créant une inclinaison du plan d'eau (wind set-up)
- la hauteur des vagues, qui sont directement créées par le vent, en fonction de son intensité.

Les vents majoritaires sont des vents du Nord (Mistral), qui ne sont pas de nature à impacter négativement les ouvrages.

Les vents secondaires sont en revanche Sud-Sud Est et sont ceux qui sont le plus à même d'engendrer des tempêtes ; ce sont les vents dominants lors des épisodes historiques de tempête.

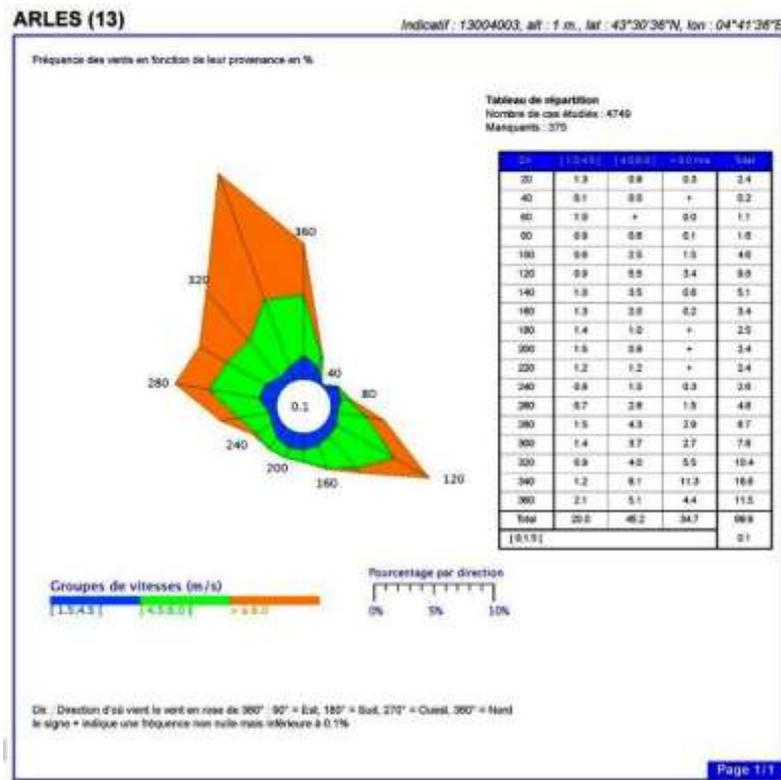


Figure 10. Rose des vents à Arles Tour du Valat

En suivant les eurocodes sur la vitesse du vent, le territoire est un des plus exposés de métropole, avec une vitesse de vent cinquantennale de 105 km/h.

Ce qui donne une vitesse de vent cinquantennale de 105 km/h, la vitesse millénaire vaut 126 km/h et la vitesse quinquennale 85 km/h.

3.2.4 *Changement climatique et impact*

Le changement climatique a été fortement étudié par le GIEC, ces études montrent qu'il induit une élévation du niveau marin et a peu ou pas d'effets sur la houle.

Les mesures locales montrent une évolution du niveau marin moyen à vitesse équivalente à celle de l'élévation globale du niveau marin.

Ce phénomène long terme tend à augmenter la fréquence des tempêtes.

3.2.5 *Géologie*

Les sondages mettent en avant une fondation globalement sableuse mais avec une couche d'argile, d'épaisseur variable, en fondation superficielle. Sur la partie digue route, à l'Est, les sables de fondation sont plus lâches.

Plus globalement les sondages en grande profondeur indiquent des alternances sable/argile liées à l'historique du delta, qui a fortement varié.

Les couches superficielles sont liées aux zones de plages (dominante sableuse) et de marais (dominante limoneuse).

Une coupe schématique des sondages entre le petit Rhône et la plage Est est présentée ci-dessous.

PK	0 CPT01	0.8 S02	0.8 CPT02	1.7 CPT03	2.2 CPT26	4.2 CPT27	4.2 S27	4.8 CPT06
0.0	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
0.1	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
0.2	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
0.3	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
0.4	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
0.5	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
0.6	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
0.7	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
0.8	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
0.9	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
1.0	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
1.1	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
1.2	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
1.3	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
1.4	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Argiles molles
1.5	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Argiles molles
1.6	Sable lache	Sable dense	Sable lache	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Argiles molles
1.7	Sable lache	Argiles molles	Argiles molles	Sable lache	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Argiles molles
1.8	Sable lache	Argiles molles	Sable lache	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Argiles molles
1.9	Sable lache	Argiles molles	Sable lache	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense
2.0	Sable lache	Argiles molles	Sable lache	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense
2.1	Sable lache	Argiles molles	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
2.2	Sable lache	Argiles molles	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
2.3	Sable lache	Argiles molles	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
2.4	Sable lache	Argiles molles	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
2.5	Sable lache	Argiles molles	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
2.6	Sable lache	Argiles molles	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
2.7	Sable lache	Argiles molles	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
2.8	Sable lache	Argiles molles	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
2.9	Sable lache	Argiles molles	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
3.0	Sable lache	Argiles molles	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
3.1	Argiles molles	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
3.2	Argiles molles	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
3.3	Argiles molles	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
3.4	Argiles molles	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
3.5	Argiles molles	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
3.6	Sable dense	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
3.7	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
3.8	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
3.9	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
4.0	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
4.1	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
4.2	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
4.3	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
4.4	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
4.5	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
4.6	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
4.7	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
4.8	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
4.9	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
5.0	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
5.1	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
5.2	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
5.3	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
5.4	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
5.5	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
5.6	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
5.7	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
5.8	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
5.9	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Argiles compactes	Sable dense	Sable dense	Sable dense
6.0	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Argiles compactes	Sable dense	Sable dense	Sable dense

Figure 11. Résultats des sondages géotechniques (grisé : dans digue)

3.2.6 Les séismes

La probabilité d'avoir deux évènements rares (séisme et tempête) en même temps est extrêmement rare et n'est pas pris en compte.

En revanche un séisme seul peut impacter les ouvrages ou leur fondation, diminuant ainsi leur capacité à résister aux prochaines tempêtes.

3.2.7 Les tsunami

Le tsunami est un aléa différent de la tempête ; il se compose d'une vague principale et est issu d'un séisme sous marin de magnitude importante (>6.5).

3.2.8 Les références scientifiques

La fréquence des événements de tempête au niveau de la Camargue a été analysée par le BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) dans le cadre de 3 études successives :

- RP-65241-FR ; Modélisation de la submersion marine en Camargue - Phase 1 ; Décembre 2015
- RP-66804-FR ; Modélisation de la submersion marine en Camargue ; Avril 2017
- RP-68619-FR Modélisation de la submersion marine en Camargue – Simulations complémentaires pour le SYMADREM ; Avril 2019

L'impact du changement climatique sur l'élévation du niveau marin et la houle a été étudié par le Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). Les dernières publications du GIEC traitant de la question de l'élévation du niveau marin sont :

- Cinquième rapport d'évaluation du GIEC, dit AR5 paru en 2014 [L300] ;
- Rapport spécial sur les océans et la cryosphère dans le contexte du changement climatique, dit SROCC paru en 2019 [L302] ;
- Sixième rapport d'évaluation du GIEC, dit AR6 paru en 2021 [L303]. Les données présentées dans les paragraphes suivant proviennent de ce sixième rapport, la référence est « Climate Change 2021 – The Physical Science Basis » - IPCC.

Les études suivantes ont été utilisées concernant les informations sur les positions du rivage et leur évolution dans le temps (cellule hydro-sédimentaire) :

- L'étude du CEREGE de 2017 : « Une approche scientifique pour une connaissance des risques littoraux en Camargue », en particulier la « Tâche 2 : variation du rivage depuis 150 ans » - [L001] ;
- La thèse de F. SABATIER de 2001 : « Fonctionnement hydrosédimentaire du littoral du delta du Rhône » - [L007] ;
- La thèse d'O. SAMAT de 2007 : « Efficacité et impact des ouvrages en enrochement sur les plages microtidales. Le cas du Languedoc et du Delta du Rhône » - [L008].
- L'étude du CEREGE de 2017 : « Une approche scientifique pour une connaissance des risques littoraux en Camargue », en particulier la « Tâche 3 : Quantification des fonds de l'avant côte du Rhône : bilan sédimentaire entre 1872 et 2013 » - [L001]

3.2.9 Le retour d'expérience

Tempêtes

La tempête la plus marquante sur le territoire est celle de novembre 1982, qui est la tempête de référence.

Météo France, sur une analyse nationale de l'évènement précise :

« Vers le delta du Rhône des creux de 6 à 9 m sont observés la nuit du 7 au 8 et la matinée du 8. Sans doute une des plus grosses tempêtes de sud à sud-est, sinon la plus grosse, sur le sud-est de la France depuis un siècle. »

Le village des Saintes-Maries-de-la-Mer a été inondé suite à du franchissement puis à des brèches dans les digues.



Figure 12. Photo depuis avenue Gilbert Leroy, devant l'hôtel « Les Amphores »

Il y a depuis eut des évènements de moindre ampleur qui ont mené à des désordres sur les ouvrages de protection et à des entrées d'eau dues aux franchissements par paquets mais plus d'inondation majeure. Ce fut le cas en novembre 2014, mars 2018 ou novembre 2019 par exemple.

Séismes

Les ouvrages sont dans des zones de sismicité faible à très faibles et aucun séisme n'a sollicité les ouvrages jusque là.

Seuls 3 séismes de magnitude supérieure à 3 à proximité du système d'endiguement (<100 km) ont été relevés dans le cadre du projet SI-Hex (depuis 1962). Il s'agit d'un séisme de magnitude 3.1 en 1986 à Avignon (60 km des ouvrages), d'un séisme de magnitude 3.6 en 1984 à Fuveau (70 km des ouvrages) et d'un séisme de magnitude 3.3 en 1978 vers Lodève (95 km des ouvrages). Aucun n'a été ressenti dans la zone d'étude.

Le séisme le plus important survenu sur le territoire métropolitain depuis la création des ouvrages (Lambesc, en 1909, magnitude 6,2) se trouvait à 50km des ouvrages les plus à l'Est. Il n'est pas fait mention de dégâts liés à ce dernier même s'ils ne sont pas à exclure.

Tsunami

Les rares tsunامي qui ont impacté les cotes françaises méditerranéennes n'ont pas eut d'impact sur le littoral camarguais. Ceux de la mer de Ligure n'impactent que le littoral orienté Sud Est (à l'Est de Toulon) et ceux provenant de la cote algérienne sont fortement diminués en arrivant sur le territoire.

Le dernier évènement marquant est celui de 2003 avec un séisme de magnitude 6.9 sur les cotes algériennes qui a provoqué une vague importante mais réduite à 0.1m en arrivant sur les cotes métropolitaines. Il n'y a donc pas eu de sollicitation du système d'endiguement.

Un évènement rentre en revanche potentiellement dans ce cadre et doit être mentionné :

Dans la nuit du 5 au 6 août 1985, entre 23h30 et 1h du matin, un raz-de-marée, composé d'au moins deux vagues, a déferlé sur la côte méditerranéenne, noyant le littoral entre les Saintes-Maries-de-la-Mer et Port-Saint-Louis-du-Rhône.

La cause est incertaine mais le raz-de-marée a probablement été causé par un glissement de terrain sous-marin, faisant suite à un séisme de faible magnitude, à proximité des côtes.

Les vagues provoquent d'importants dégâts, pénétrant de 800 mètres dans l'intérieur des terres, faisant, 12 blessés et une victime. Ce sont principalement des campeurs, situés à Beauduc, au Sud du système d'endiguement, qui ont été victimes de l'inondation, qui a emporté tentes et caravanes ; il y a également eu des dégâts sur les bateaux de Port Gardian.

3.3 LES ELEMENTS DU SYSTEME DE PROTECTION

3.3.1 Plan d'ensemble

Le système d'endiguement ceinture le Sud de la Camargue en reliant le petit Rhône à un remblai qui joint le Grand Rhône. Des ouvrages annexes sont présents au droit du village des Saintes-Maries-de-la-Mer ; ces épis et brise-lame permettent de limiter la sollicitation sur le système d'endiguement.



Figure 13. Plan d'ensemble du système de protection maritime Camargue Insulaire

3.3.2 *Caractéristiques et localisation du système de protection*

3.3.2.1 Système d'endiguement

La création d'un ouvrage de protection contre les entrées marines date du milieu du XIX^{ème} siècle, afin de maîtriser les niveaux d'eau dans l'île de Camargue. Il est aujourd'hui possible de distinguer 3 zones principales :

- Au droit du village

Il existe, sur les 4 premiers kilomètres, une forte variabilité des ouvrages, ils sont décrits plus en détail au chapitre 5.

Il y a une protection en enrochement sur la majeure partie du linéaire afin de protéger les ouvrages de la houle. Les autres secteurs sont en béton ou, plus localement, des dunes.

Les ouvrages sont au-delà de 2 mNGF à l'exception de la promenade de port Gardian qui se situe autour de 1.5 mNGF.

Il y a une alternance de digues à noyau sablo-limoneux protégé par une carapace et d'ouvrages béton.

- Du pertuis de la Fourcade à la digue des Toscans,

C'est une digue argilo-sableuse de largeur en crête de 5m minimum avec des pentes à 2/1 ou plus. La digue s'éloigne progressivement du cordon littoral et passe alors

progressivement de 2mNGF à 1mNGF, avec des paliers au niveau du phare de la Gacholle et du clos d'Esclaux.

Sur les premières centaines de mètres, la forte érosion a fini par mettre la digue directement contre la mer, elle a alors été équipée d'enrochements à partir de 2014.

- De la digue des Toscans au Vieux Rhône

Largeur en crête est importante, de 9m minimum, car cette portion sert également de piste. Le trafic a érodé la zone circulaire et il n'est alors pas rare d'avoir un merlon coté mer plus haut que la piste qui présente elle des points bas à 0.5mNGF.

3.3.2.2 Protection à l'est du vieux Rhône

Une digue privée, de la Compagnie des Salins du Midi, contourne les marais salants en allant jusque contre la mer. Les coûts d'entretien sont alors importants (solicitation directe de la mer), pour des bénéficiaires privés.

Il a été fait le choix de définir le système de protection en recul, comme une protection plus rapprochée du village de Salin de Giraud. Un terrain continu de plus d'0.85m d'altitude, dans la continuité de la digue à la mer et jusqu'à la digue du Grand Rhône, a été retenu. Ce remblai est alors long de 20km, il suit principalement un ancien bras du Rhône.

3.3.2.3 Fermeture du Système de protection

À l'Ouest et à l'Est, le système se raccorde au système de protection fluvial de la Camargue insulaire.

3.3.2.4 Ouvrages : Epis et brise lame

Au niveau du village, la digue se retrouve en front de mer. Les ouvrages seraient alors soumis à l'érosion du trait de côte et à l'impact de la houle sans des épis, permettant de maintenir les plages, et des brise-lame, servant à casser la houle.

Ces ouvrages sont intégrés au système d'endiguement.

Ce sont des ouvrages en enrochements lourds qui ont été mis en place à partir des années 1940 pour limiter l'impact du recul du trait de côte, il y en a aujourd'hui 19 entre l'embouchure du Petit Rhône et le pertuis de la fourcade (soit 4km).

3.3.2.5 Représentation cartographique

Les cartes ci-après représentent les différents éléments du système d'endiguement ainsi que les dispositifs de régulation des écoulements hydrauliques et les voies d'accès :



Figure 14. Localisation des ouvrages du système d'endiguement 1/3

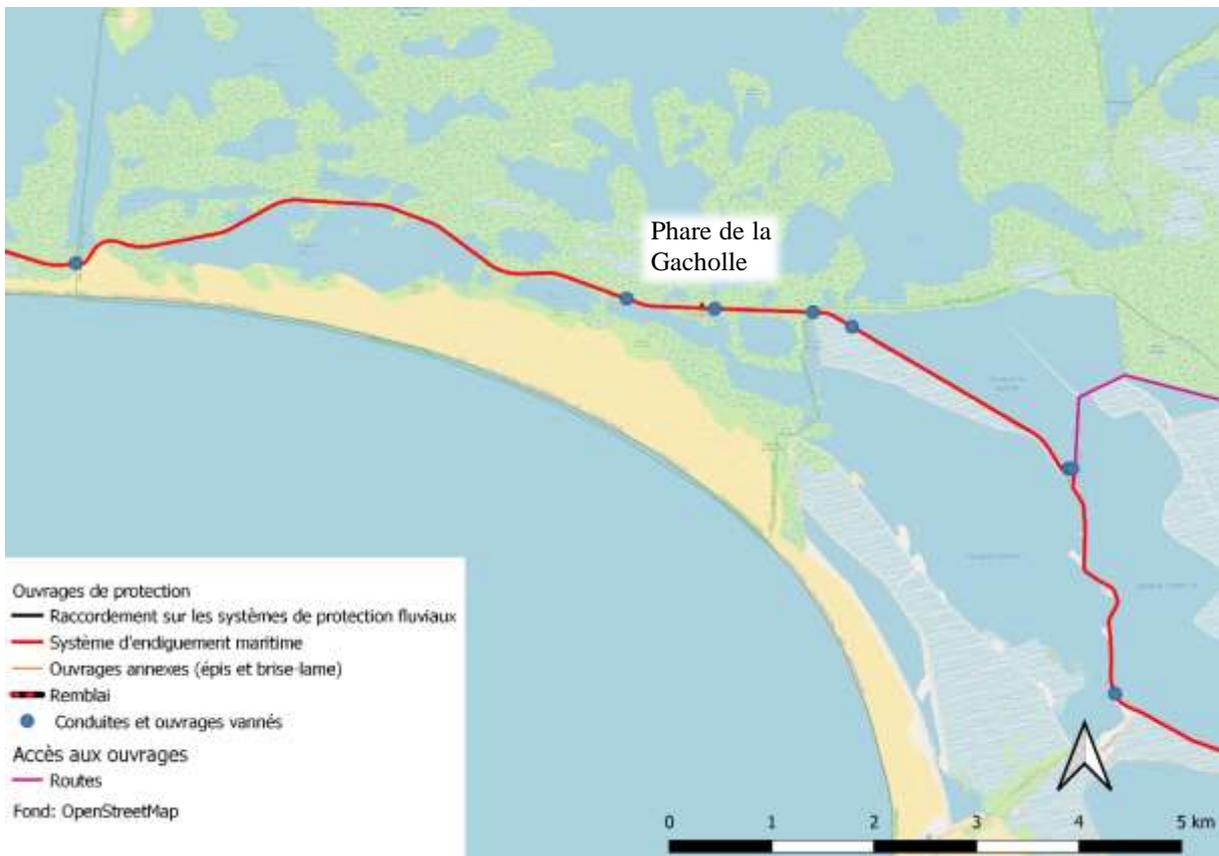


Figure 15. Localisation des ouvrages du système d'endiguement 2/3

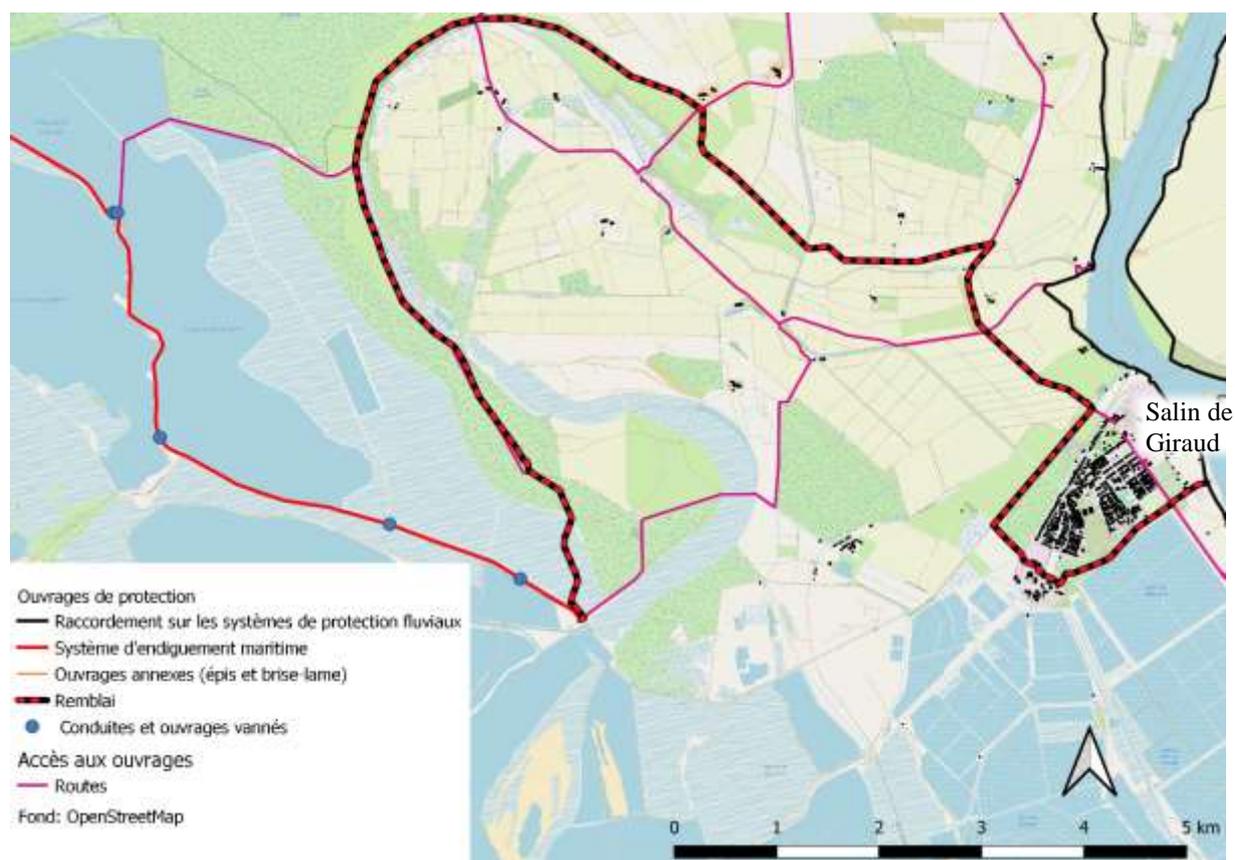


Figure 16. Localisation des ouvrages du système d'endiguement 3/3

3.3.3 aménagements hydrauliques

Sans objet

3.3.4 Topographie

La topographie de la zone protégée est connue via des levés de Litto3D et de la BDT Rhône ; ils ont tous deux une précision altimétrique de 15-20 cm mais des mailles différentes : 1*1 m sur Litto3D et 5*5 m pour la BDT. Il est à noter que le territoire est majoritairement couvert de zones en eau dont le niveau fluctue ; les données intègrent le niveau au moment du levé.

Cette précision convient pour l'étalement des eaux mais ne permet pas de bien définir les ouvrages.

Des levés topographiques au GPS de la digues et de routes ont été réalisés en 2015 par le BRGM ; ils ont une précision centimétrique.

Enfin la géométrie des ouvrages a été complétée par un levé réalisé en 2018 pour repérer les points caractéristiques des digues (pied d'ouvrage, niveau de la crête, niveau d'étanchéité, ...) ; ce levé GPS est de précision centimétrique.

3.4 LE FONCTIONNEMENT

3.4.1 Données historiques

La digue à la mer est un ouvrage qui est en mauvais état mais qui connaît peu d'avaries importantes sur les zones éloignées du front de mer car peu sollicité. Lorsque le trait de cote se rapproche, l'état se dégrade rapidement ; pour palier à cela des enrochements sont progressivement venus couvrir les ouvrages du centre et des épis et brise lame ont été ajoutés (ils sont postérieurs à la tempête de 1982 pour les zones ayant subies des brèches). Aujourd'hui ce sont ces derniers qui sont le plus sollicités, ainsi que la plage Est qui n'est pas protégée par les épis.

Seule la tempête de novembre 1982 a mené à des brèches et donc des entrées d'eau massives, en particulier au droit du village des Saintes-Maries-de-la-Mer.

Selon le témoignage du garde digues, qui était déjà résident du village, il y a eu des entrées d'eau par paquet sur une partie des digues du village car il n'y avait pas les épis et brise lame. Il y a ensuite eu une rupture au niveau du poste de secours n°2 (DM 3.63), qui a inondé le camping puis le village, et une au clos du Rhône (DM 0.2) qui a créé des entrées d'eau mais qui ne sont pas revenues vers le village. Il y a potentiellement eu des entrées d'eau plus à l'Est dont il n'a pas connaissance.

Des franchissements par paquets de mer sont en revanche assez fréquents, ils entraînent une dégradation de la promenade mais pas de dégradation structurelle au niveau du centre ; plus à l'Est des érosions apparaissent mais n'ont pas menée à des brèches.

Ces dégradations sur les épis et la plage Est peuvent-être importantes et, sans réparation post tempête, l'ouvrage ne serait plus en mesure de résister à de nouvelles sollicitations.

De façon plus générale, des ouvrages de protection marine peuvent se retrouver détériorés suite à l'érosion externe du talus coté mer par la houle, l'érosion externe par affouillement du pied de talus coté mer, l'érosion externe coté terre suite à de la surverse ou des franchissements, l'érosion interne dans le corps de digue ou encore l'instabilité des talus.

3.4.2 Rôle des composants

Les ouvrages digues sont homogènes ; en dehors du corps de digue seul le composant enrochement est parfois présent.

Le corps de digue assure alors les fonctions « résistance à l'érosion externe », « étanchéité », « stabilité », et « résistance à l'érosion interne ».

La résistance à l'érosion externe est complétée, vis-à-vis de la houle, directement par les enrochements situés en parement et indirectement (réduction de la houle) par les épis et brise lame.

La fonction « capacité de ressuyage » est de fait lié au réseau pluvial en ville et aux pertuis pour les zones de marais.

3.4.3 Station de référence

La carte ci-dessous représente les différentes stations qui sont, ou ont été, utilisées pour mesurer les niveaux (en vert) ou la hauteur des vague (en bleu). Les niveaux de protection retenus sont exprimés en mNGF et la station de référence est le pertuis de la Fourcade (juste à l'Est du village des Saintes-Maries-de-la-Mer), qui est relevé par le garde digues.

Une opération d'amélioration des données limnigraphiques est en cours, une fois cette opération terminée, la récupération des données de la Fourcade sera automatisée et le niveau dans le port de Port Saint Louis (PSL Mer) sera disponible, il servira de station de secours.

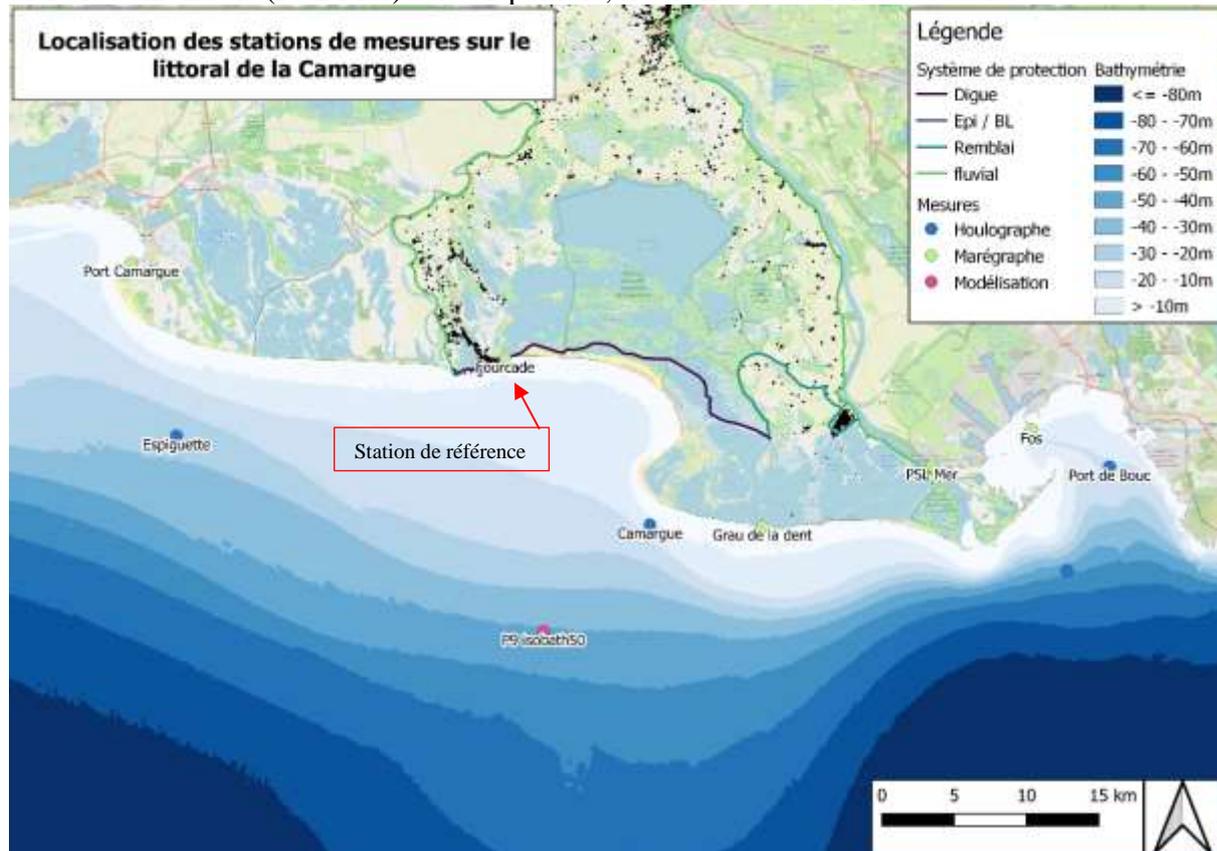


Figure 17. Localisation des stations sur le secteur, dont la station de référence

3.4.4 Niveau de protection des ouvrages

Les niveaux caractéristiques des ouvrages ont été calculés au chapitre 7 et sont exprimés par rapport au niveau marin ; ce dernier est mesuré à la station de référence : pertuis de la Fourcade. Ce n'est donc pas le niveau au droit des ouvrages, dans les zones en front de mer, l'effet du run up et de la houle peut être légèrement différent ; pour les ouvrages en recul, le niveau au droit des ouvrages sera plus bas que celui mesuré à la station.

Pour l'évaluation des risques liés aux ouvrages, les cinq niveaux suivants sont étudiés :

- 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. Elles peuvent être liées aux niveaux de sûreté, submersion ou franchissement ci-après ;

- Le niveau de sûreté d'un ouvrage correspond à une probabilité résiduelle de rupture au plus de 5 % ;
- Le niveau de danger d'un ouvrage correspond à une probabilité de brèche de 50 % ;
- Le niveau de submersion d'un ouvrage correspond à l'atteinte du niveau de la crête de digue
- Le niveau de franchissement correspond aux seuil des entrées d'eau par paquet de mer.

Tableau 9. Tableau de synthèse des niveaux caractéristiques des ouvrages

Nom	DM ini	DM fin	Niveau Surverse	Niveau Franchissement	Niveau Sûreté	Niveau Protection	Niveau Danger
Clos du Rhône	0	1	T1.55	T0.85	T0.97	T0.85	T1.17
Crin Blanc	1	1.3	T1.55	T1.55	T1.55	T1.55	> T1.55
Av. Aubanel	1.3	1.7	T1.55	T1.30	T1.55	T1.30	> T1.55
Port Gardian	1.7	2.1	T1.30	T1.06	T1.17	T1.06	T1.30
Arènes	2.1	2.6	T1.55	T0.85	T0.97	T0.85	T1.06
Parking Amphores	2.6	3.05	T1.55	T0.85	T0.97	T0.85	T1.17
Thalacap	3.05	3.2	T1.55	T0.85	T1.17	T0.85	T1.30
Parking plage est	3.2	3.6	T1.55	T0.85	T1.06	T0.85	T1.17
Fourcade Ouest	3.6	3.8	T1.55	T1.30	T1.55	T1.30	> T1.55
Parking	3.8	4	T1.55	T1.17	T1.30	T1.17	T1.30
Plage Est	4	4.8	T1.55	T0.85	T0.97	T0.85	T0.97
Baisse du radeau	4.8	5.6	T1.55	T1.30	T1.30	T1.30	T1.30
Zone des marais	5.6	7.55	T1.30	T1.17	T0.97	T0.97	T0.97
Mouillot – Rousty	7.55	8.3	T1.55	T1.17	T0.97	T0.97	T1.06
Rousty – Comtesse	8.3	16	T1.06	T0.97	T0.97	0.5*	T0.97
Comtesse – Toscans	16	21.75	T0.97	T0.97	T0.97	0.5*	T0.97
Toscans – Vieux Rhône	21.75	26	T0.97	T0.97	T0.97	T0.97	T0.97

* A l'Est et à l'Ouest du pertuis de la comtesse il y a des buses dont les organes de fermetures sont aujourd'hui inexistants ; des contournements du système de protection par ces ouvertures est alors possible. Ces entrées d'eaux restent limitées à la zone des marais.

La représentation en carte des niveaux de protection des ouvrages est proposée ci-après :

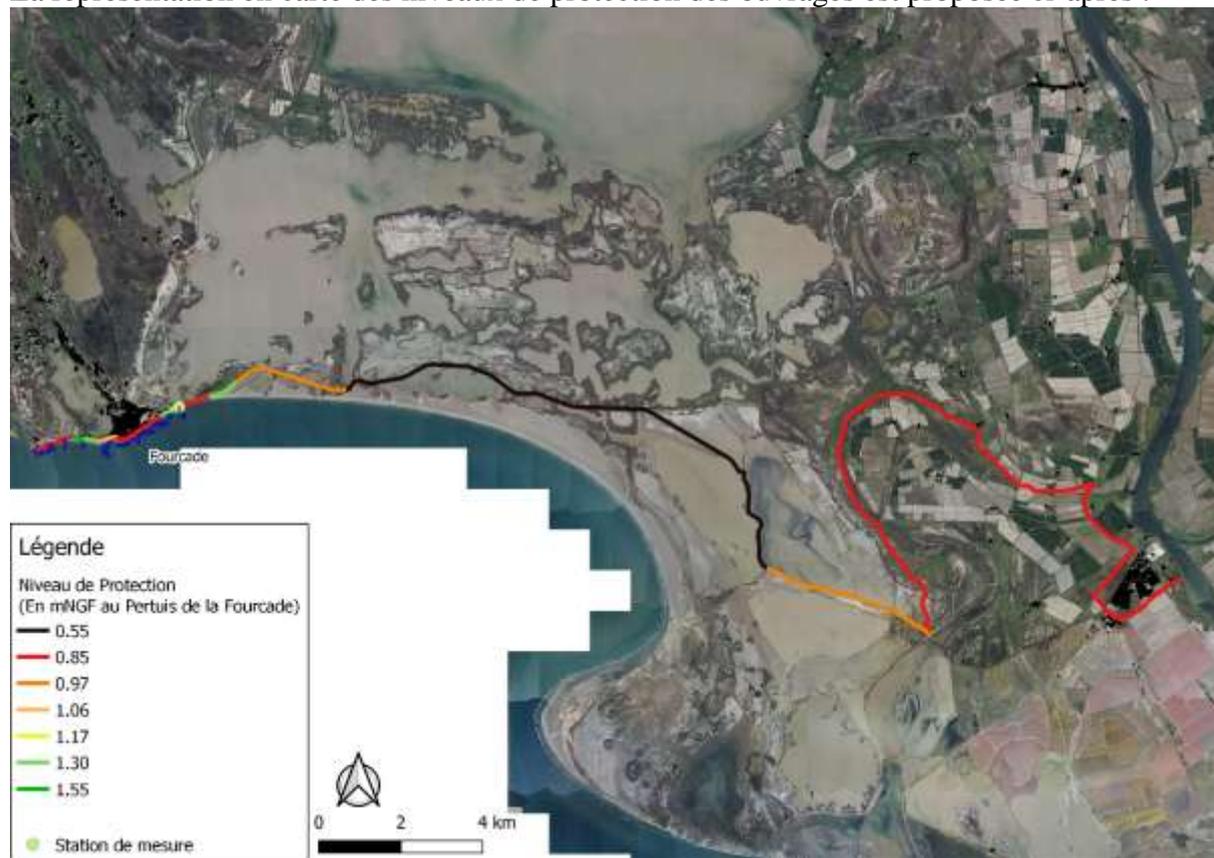


Figure 18. Niveau de protection des ouvrages



Figure 19. Niveau de protection des ouvrages – zoom sur les Saintes-Maries-de-la-Mer

La représentation en profil en long est à prendre avec du recul car, comme précisé en début de section 3.4.3, le niveau de protection (jaune) est celui de la station de référence et non celui au droit des ouvrages, contrairement à la cote des ouvrages (noir).

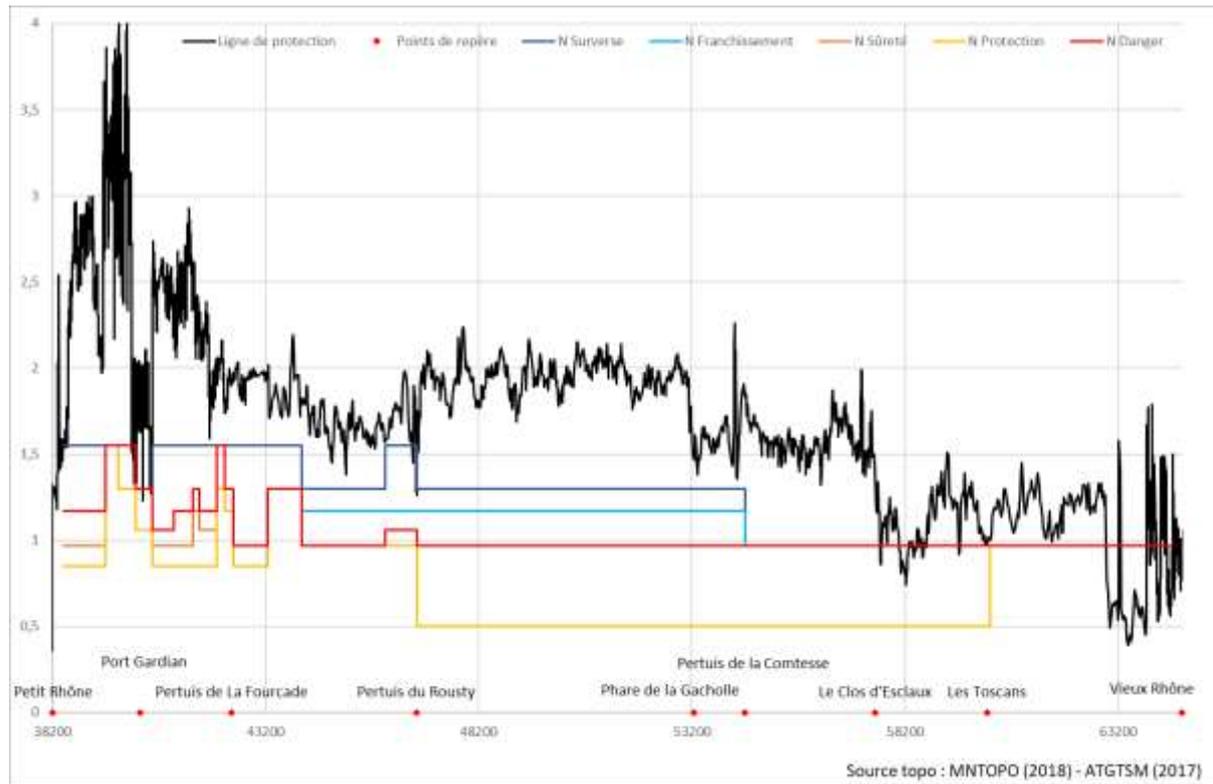


Figure 20. Niveau de protection des ouvrages – profil en long

3.4.5 Niveau de protection de la zone protégée

Le niveau de protection correspond au niveau jusqu'auquel la zone est garantie « pied sec », avec une probabilité supérieure à 95%.

Les niveaux de protection dans la zone protégée sont définis vis-à-vis de l'aléa submersion marine. D'autres phénomènes peuvent mener à une inondation et ne sont pas étudiés dans la présente étude de dangers :

- Impluvium local
- Crue du Rhône (voir « Etude de dangers du Système d'Endiguement Fluvial Camargue Insulaire »)
- Basculement des étangs : en cas de vent fort, les étangs comme la mer sont soumis au set-up (voir §3.2.1), c'est un phénomène décorrélé de la submersion tant que la mer ne franchit pas le système d'endiguement et ne fait donc pas monter le niveau de ces plans d'eau.

En analysant les scénarios de brèches et d'entrées d'eau normales (franchissement et surverse), l'analyse menée au chapitre 8 a permis de définir les niveaux de protection dans la zone protégée ; ils sont indiqués sur la carte ci-dessous :

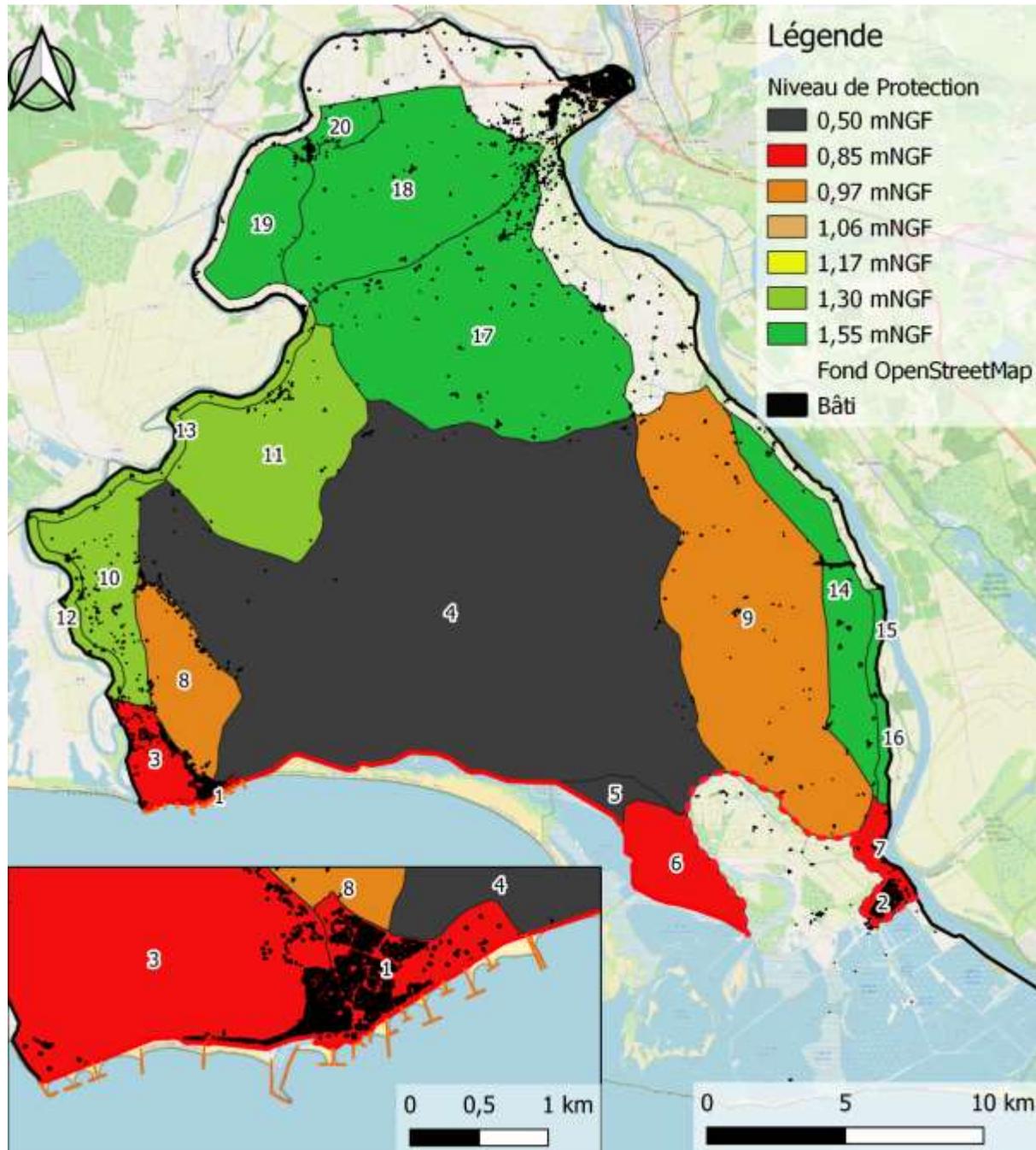


Figure 21. Niveaux de protection des sous zones protégée de la Camargue insulaire

3.4.6 *Fonctionnement au-delà du niveau de protection*

Le niveau est le niveau marin mesuré au pertuis de la fourcade et exprimé en m NGF.

niveau < 0.50

Jusqu'à la mise en eau des buses non vannées présentes aux alentours du pertuis de la comtesse, les eaux de la mer restent à l'extérieur de la zone protégée.

L'ensemble de la zone protégée reste alors protégée.

0.50 < niveau < 0.85

Il peut ensuite y avoir des premières entrées d'eau par contournement de la digue via les buses qui ne sont pas vannées, les eaux restent limitées aux marais, en eau en permanence.
Les niveaux de protection des zones en noir est dépassé.

0.85 < niveau < 0.97

Des franchissements peuvent se produire en différentes zones : Clos du Rhône, village des saintes maries et à la plage Est. De plus, le niveau du remblai à l'Est du vieux Rhône, en cas de tempête de très longue durée, pourrait être localement franchi.

Les niveaux de protection des zones en rouge est dépassé.

0.97 < niveau < 1.06

Des niveaux de sûreté seront dépassés au droit du village des Saintes-Maries-de-la-Mer, dans les zones où il y a déjà franchissement.

Des entrées d'eaux par brèches, plus massives, sont alors possibles. Les eaux s'étaleront un peu plus et pourront dépasser le village.

A l'Est du pertuis de la comtesse les niveaux de submersion sont dépassés, en même temps que celui de sûreté ; si la tempête est suffisamment longue il y aura des entrées d'eau dans ce secteur.

Les niveaux de protection des zones en orange foncé est dépassé.

1.06 < niveau < 1.17

Les premiers niveaux de danger sont atteints au niveau du village (tronçon des arènes).

Des franchissements nouveaux sont attendus à Port Gardian.

A l'est les eaux continueront de s'étaler dans les marais et zones humides.

Il n'y a pas de changement de niveau de protection sur la carte.

1.17 < niveau < 1.30

Des franchissements sont attendus sur la quasi intégralité du linéaire.

Il y aura plus d'entrées d'eau mais celles-ci resteront dans les zones déjà potentiellement inondées.

Il n'y a pas de changement de niveau de protection sur la carte.

1.30 < niveau < 1.55

Le niveau de submersion de port Gardian est dépassé, l'inondation du village des saintes maries est à présent certain.

Les volumes de franchissement sont également importants et le risque de brèche au droit de ce secteur urbanisé est important (3km sur les 4 voient leur niveau de sûreté dépassé).

Des entrées d'eau par brèches pourraient s'étaler jusqu'à l'ouest de la Camargue insulaire.

Les niveaux de protection des zones en vert clair est dépassé.

1.55 < niveau

En cas de tempête extrêmement forte et de durée importante, les zones du Nord et de l'Est de la Camargue Insulaire pourraient finir par être en eau.

Les niveaux de protection des zones en vert foncé est dépassé.

3.4.7 Organisation du gestionnaire

A partir du moment où le niveau marin au pertuis de la Fourcade dépasse 0.50 mNGF, le SYMADREM passe d'un fonctionnement normal à une gestion en tempête.

3.4.7.1 Fonctionnement normal

L'organisation du SYMADREM en situation normale comprend trois domaines que sont la surveillance, la gestion, et l'entretien et réparation.

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

- Les visites de surveillance programmée (VSP) effectuées mensuellement par les Gardes-digues
- Les visites techniques approfondies (VTA) effectuées annuellement et à pied par une équipe de trois personnes dont un ingénieur

L'entretien et la réparation comprend :

- La définition d'un 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 tel que du débroussaillage ponctuel,
- Les travaux d'entretien réalisés en entreprise sont réalisés par une ou plusieurs entreprises de travaux publics et correspondent au débroussaillage général des digues de façon régulière. Et lorsque c'est nécessaire de travaux divers nécessitant 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.

3.4.7.2 Fonctionnement en tempête

Ce dispositif s'applique dès l'alerte aléa vagues-submersion de météo France et s'achève à la fin de l'alerte ; le SYMADREM est prévenu via SMS par la préfecture des Bouches du Rhône.

Suite a cela un poste de commandement (PC) réduit est mis en place comprenant : un Directeur des Opérations (DO), un Directeur du Poste de Commandement (DPC), un agent du service technique (relais) et, le cas échéant, un chargé du suivi des travaux d'intervention d'urgence.

Le linéaire est surveillé par le garde digues en charge de la digue à la mer. La visite est réalisée en cheminant pour les 5km les plus à l'ouest et en véhicule pour le reste ; en cas de déferlement, l'observation est faite aux jumelles et les secteurs à l'Est de la Fourcade ne peuvent plus être observés. Les épis et brise lame sont observés aux jumelles.

En cas d'évènement long il peut être remplacé par l'ingénieur chargé d'opération littorale ou un autre garde digue.

Des seuils d'alerte sont également définis ; ils sont fonction des secteurs, du niveau marin mesuré au pertuis de la Fourcade et du vent moyen.

Ce seuil impacte la fréquence des visites ; alors qu'elles sont de 1 à 2 par jour en alerte 1 (selon que la zone soit directement sollicitée ou non) elles passent à une surveillance quasi continue entre 7h et 22h (1 passage toutes les 2h) en alerte 2.

Si des désordres sont repérés, le garde digue en informe le PC ; le DPC et l'entreprise de travaux, qui a été mobilisée lors de la mise en alerte, se rendent si possible sur place afin d'examiner et commander les travaux à réalisés.

Si les conditions le permettent, l'intervention est programmée immédiatement en utilisant les matériaux disponibles sur les aires de stockage à proximité ; un chargé du suivi des travaux d'intervention d'urgence est désigné et se rend sur place pour la durée de l'intervention. Ce dernier fait le relai avec le PC, prévient de l'évolution et peut demander à renforcer les moyens de l'entrepreneur.

Ces travaux d'urgence sont amenés à être repris post évènement et post diagnostic.

A la suite de la tempête, une visite post tempête est réalisée ; celle-ci est similaire à une VTA et porte en particulier sur les érosions et mouvement des blocs d'enrochements.



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

ETUDE DE DANGERS
DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT MARITIME
CAMARGUE INSULAIRE

DOCUMENT B

CHAPITRE N°4 : CARACTERISATION DES ALEAS NATURELS

Version	Date	Commentaires
0	27/02/2023	Version initiale
1	23/03/2023	Reprises suite à la relecture interne

SOMMAIRE

1	L'aléa Tempête	3
1.1	Introduction	3
1.2	Niveau marin	4
1.3	La Houle	11
1.4	Tempêtes modélisées	14
2	Hydro-sédimentologie du Delta	16
2.1	Les cellules hydro-sédimentaires	16
2.2	Données disponibles	17
2.3	Evolution historique de la position du trait de côte	18
2.4	Projection d'évolution de la position du trait de côte	19
2.5	Evolution morphologique et bilan sédimentaire	22
2.6	Conclusion du volet « exposition du territoire aux phénomènes d'érosion et d'accrétion du trait de côte »	31
3	Vent	32
3.1	Données de vents	32
3.2	Vents observés lors des tempêtes	35
4	Changement climatique et élévation du niveau marin	36
5	Séismes	37
6	Tsunami	38
6.1	Définition	38
6.2	Historique et référence	38

1 L'ALEA TEMPETE

1.1 INTRODUCTION

La sollicitation sur les ouvrages est déterminée par deux paramètres principaux que sont le niveau statique en pied d'ouvrage et la houle caractéristique.

Le niveau marin statique est lié à la conjonction de plusieurs éléments :

- Marée astronomique, phénomène cyclique lié à l'attraction gravitationnelle des astres et en particulier la Lune ; elle est de type semi-diurne à inégalité diurne sur la méditerranée et de faible amplitude : 40 à 50 cm entre les plus hautes et les plus basses marées ;
- Surcote atmosphérique, phénomène due à une dépression atmosphérique ; une diminution d'un hectopascal équivaut approximativement à une élévation d'un centimètre de niveau marin (exemple : dépression de 990 hPa = augmentation de 23 cm).
- Le wind set-up, le vent exerce une contrainte à la surface de l'eau générant une modification du plan d'eau et des courants
- Le wave set-up : à l'approche des côtes, les vagues déferlent et transfèrent alors leur énergie sur la colonne d'eau, ce qui provoque une surélévation moyenne. Cette élévation peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres en fonction des caractéristiques des vagues (hauteur, période et direction), qui dépendent quant à elles des phénomènes de shoaling et réfraction/diffraction ayant lieu au niveau des côtes.

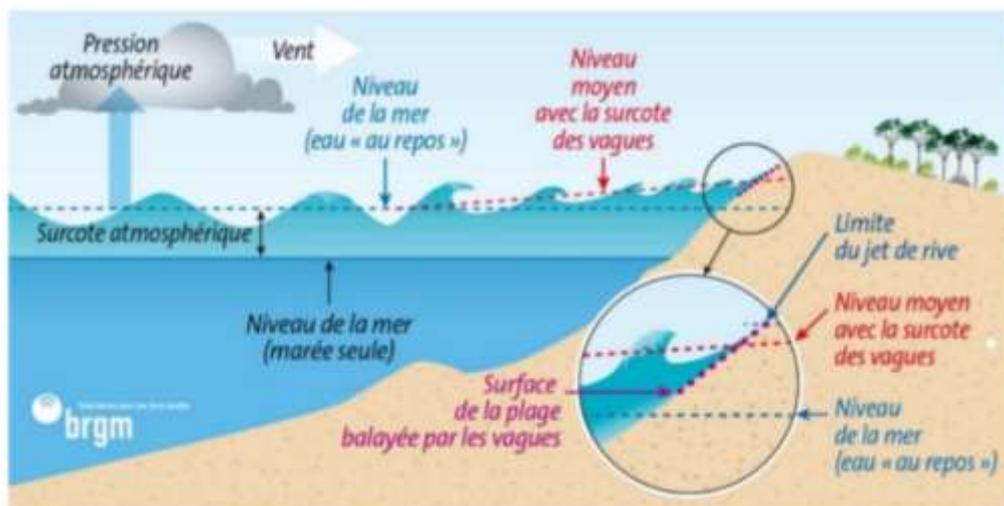


Figure 1. Schéma reprenant les différentes contributions (source : BRGM)

La houle caractéristique est quand à elle fonction du vent et de la houle au large.

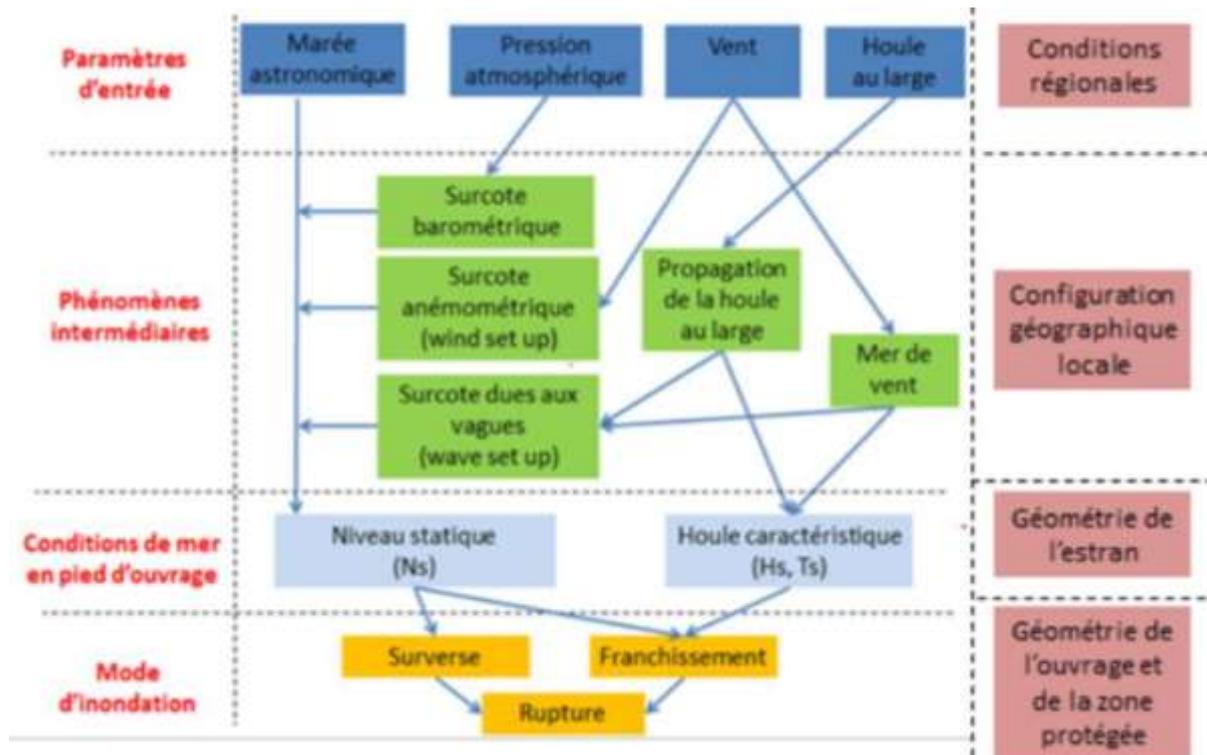


Figure 2. Logigramme général sur la caractérisation des aléas maritimes appliqués aux digues (*Source ISL*)

1.2 NIVEAU MARIN

1.2.1 Marée astronomique

Les côtes Sud de la France continentale et les côtes de Corse sont couvertes par une unique zone de marée.

Le port de référence est Toulon (observatoire permanent de marée).

Le type de marée est semi-diurne à inégalité diurne.

Il y a 3 sites à proximité du système d'endiguement dont celui des Saintes Maries de la mer qui est la station de référence pour la présente étude.

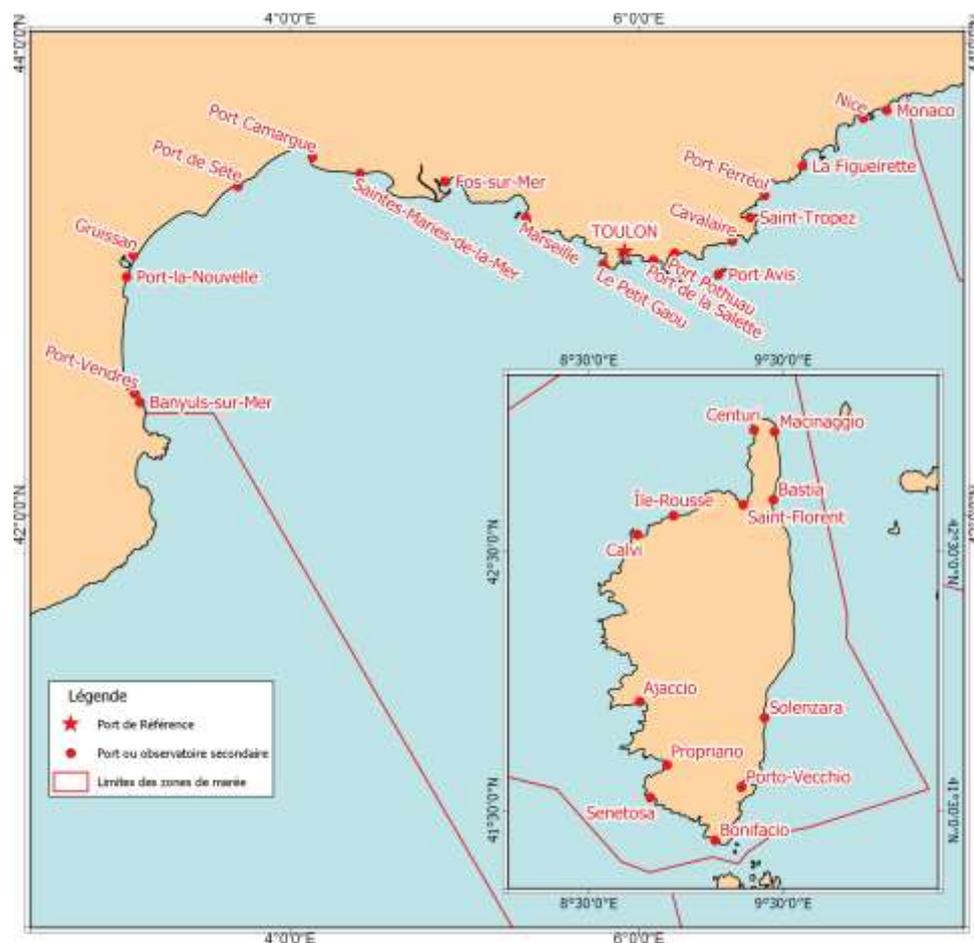


Figure 3. Carte de la zone de marée Méditerranéenne

Tableau 1. Références Altimétriques Maritimes pour les sites de Méditerranée (extrait SHOM)

Nom	Type	Lat.	Long.	Année CH	PHMA	NM	PBMA	ZH/Ref
Toulon	R	43 07 N	05 55 E	2007	00.64	00.42	00.17	-0.253
Port Camargue	S	43 31 N	04 08 E	2012	00.76	00.53	00.35	-0.282
Saintes-Maries-de-la-Mer	S	43 27 N	04 24 E	2014	00.59	00.40	00.17	-0.267
Fos-sur-Mer	S	43 25 N	04 53 E	2017	00.71	00.49	00.27	-0.334

Les éléments mentionnés relatifs à l'observatoire de marée sont les suivants :

- le nom du port ;
- le type de port : port de référence (R) de la zone de marée, port principal (P) et port secondaire (S) ;
- la latitude (en dd°mm'N-S) (système géodésique légal) ;
- la longitude (en ddd°mm'E-W) (système géodésique légal) ;
- la date de calcul des constantes harmoniques du site.

Les niveaux caractéristiques de la marée (exprimés en mètres et rapportés au zéro hydrographique), pour les marées de type semi-diurne à inégalité diurne (cas de la méditerranée) :

- le niveau des plus hautes mers astronomiques (PHMA) ;
- le niveau moyen (NM) ;
- le niveau des plus basses mers astronomiques (PBMA).
- la cote du zéro hydrographique dans le système altimétrique légal (ZH/Ref) - (valeur en mètres). Cette valeur est négative lorsque le zéro hydrographique est au dessous du zéro du système altimétrique légal qui est l'IGN69 dans le cas des stations étudiées.

Ces informations indiquent que le niveau des plus hautes **mers astronomiques** est environ de **0.323 mNGF IGN69** aux Saintes-Maries-de-la-Mer et **0.376 mNGF IGN69** à Fos sur mer.

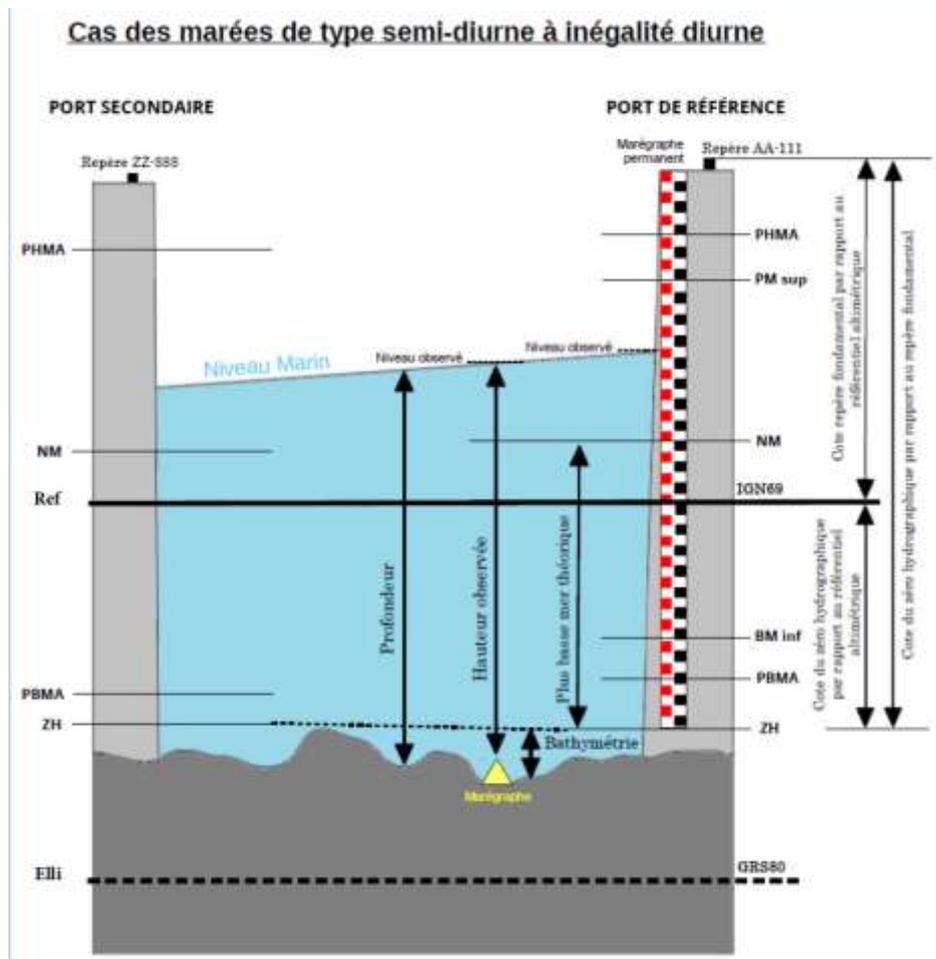


Figure 4. Schéma récapitulatif des niveaux de marée (source SHOM)

Lors de la tempête de 1982, il y a eu un maximum cohérent avec la PHMA, en lui restant légèrement inférieur, avec 0.346 mNGF à Fos.

Pour les évènements plus récents comme en 2014 (0.3mNGF) ou 2018 (0.25mNGF), il n'y a pas de corrélation entre forte marée et niveau maximum de tempête ; ce qui est souvent le cas en méditerranée où la variabilité de la marée est faible.

De même la durée de la tempête est indépendante de la marée puisque les variations journalières sont de l'ordre de 20cm.

1.2.2 *Surcote atmosphérique*

Ce phénomène, due à une dépression atmosphérique, crée une élévation d'un centimètre de niveau marin pour une diminution d'un hectopascal environ.

Lors des évènements historiques présentés au chapitre 6, la pression atmosphérique était de :

- entre 992 et 998 hPa en 2014 ;
- entre 988 et 998 hPa en 2018 ;
- entre 989 et 1004 hPa en 2019 ;

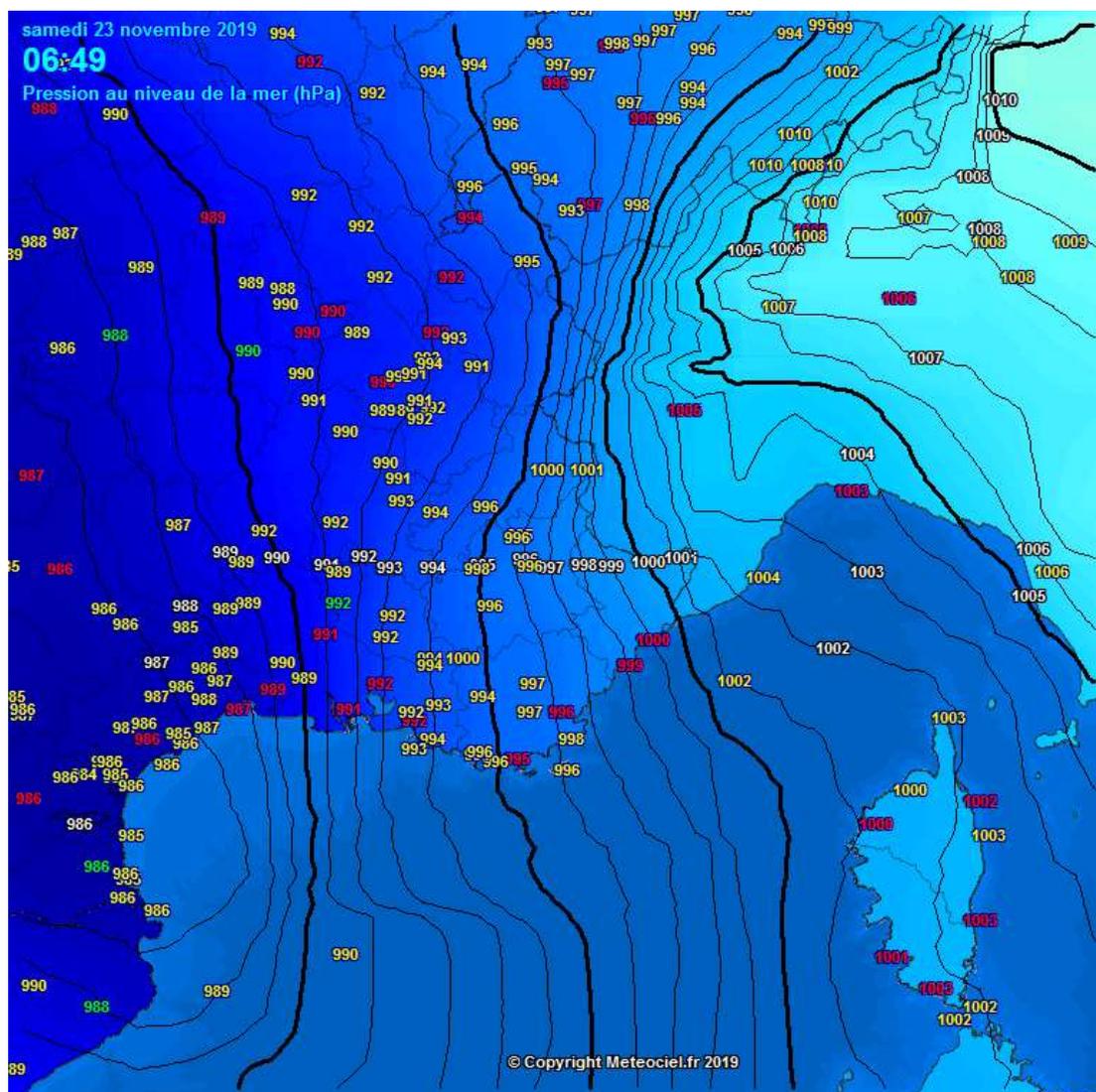


Figure 5. Historique des pression, exemple du 23/11/2019 (source meteociel.fr)

Il y avait donc une **surcote atmosphérique** théorique de l'ordre de **20-25cm**.

Pour la tempête de 1982, les données sont moins précises mais une carte d'archive indique des pressions aux alentours de 995-1000 hP, impliquant une surcote de l'ordre de 15 cm :

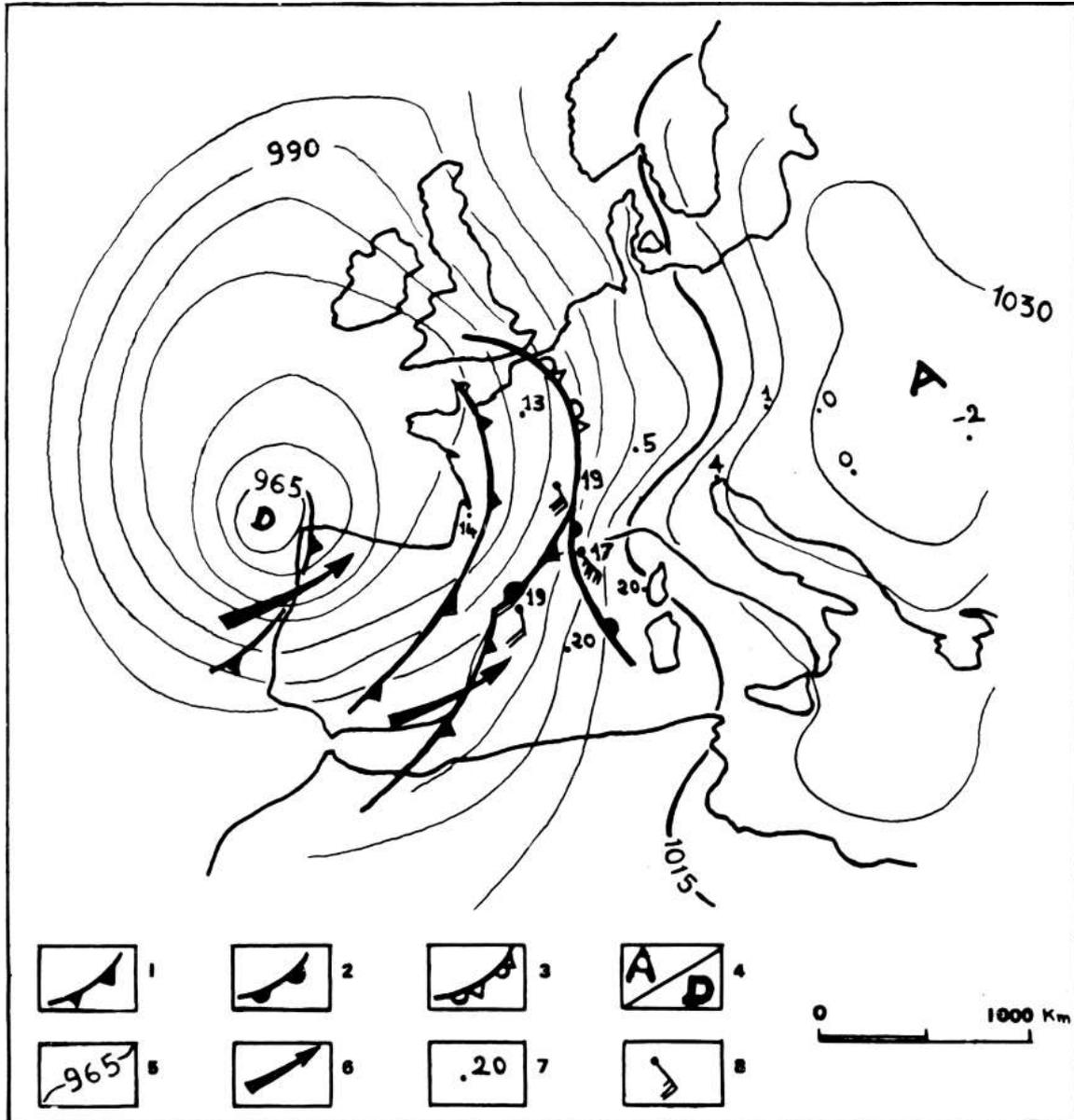


Fig. 1. — Situation générale en surface, à 18 H T.U., Dimanche 7 Novembre 1982.

1. Front froid ; 2. Front chaud ; 3. Front occlus ; 4. Anticyclone, Dépression ; 5. Isobare 965 millibars ;
6. Sens du déplacement des perturbations ; 7. Température en degrés C. ; 8. Vent au sol (direction et force).

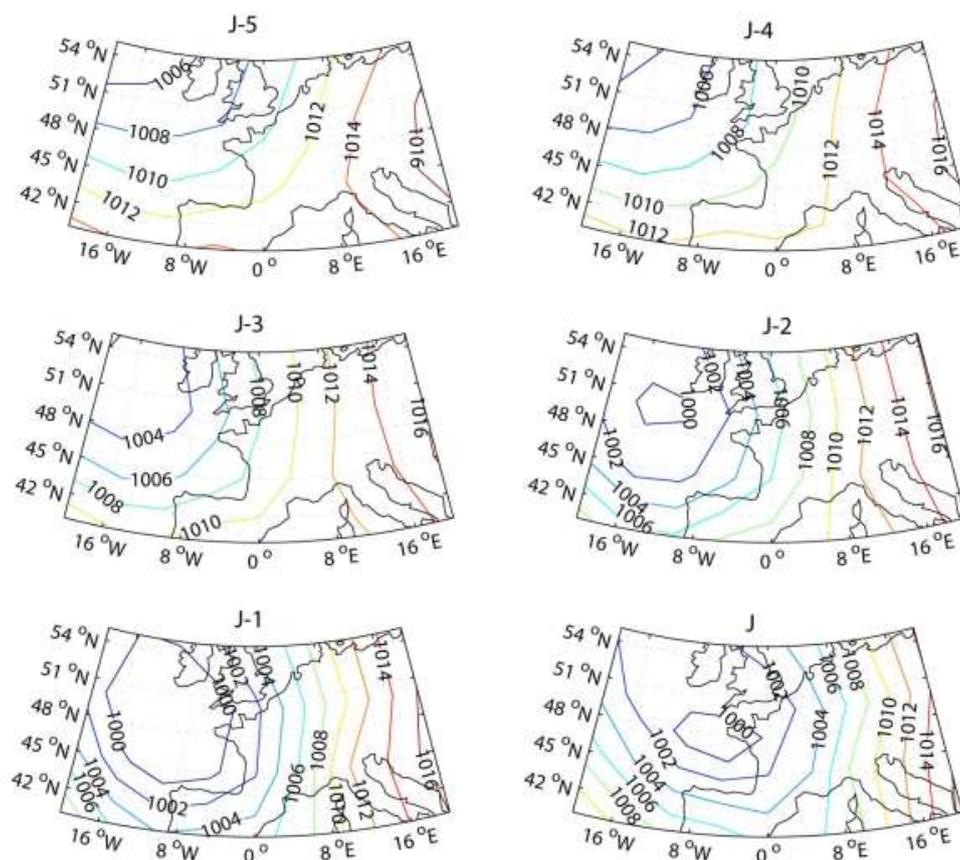
Il est à noter que cette dépression locale est liée à une forte dépression dans le golfe de Gascogne que ce soit en mars 2018, novembre 2019 ou novembre 1982.

Albin Ullmann a d'ailleurs écrit un article à ce sujet « Changement climatique et évolution des tempêtes dans le Golfe du Lion : approche par intégration d'échelles spatio-temporelles » dont un extrait est repris ci-dessous :

« A l'échelle locale, les tempêtes capables d'engendrer des pics de niveau marin extrême au niveau du littoral sont celles associées aux vents de mer de secteur sud-est (90° - 180°) dont la vitesse dépasse 5 m/s. Ces vents sont alors capables de pousser la masse d'eau méditerranéenne vers les côtes du Golfe du Lion (Ullmann et al, 2007; Ullmann et Pirazzoli, 2007). De plus, lors d'un épisode tempétueux, le vent souffle de secteur sud-est de façon synchrone dans l'ensemble du Golfe (Ullmann et Pirazzoli, 2007). Le fait que les tempêtes soient d'échelle régionale témoigne d'un mode de variabilité atmosphérique agissant à une plus vaste échelle spatiale que le Golfe du Lion.

Les tempêtes du Golfe du Lion sont associées au passage d'une dépression autour du Golfe de Gascogne qui engendre des forts vents de mer de secteur sud-est, capable de pousser et d'accumuler la masse d'eau vers les côtes.

La figure ci-dessous présente la géographie barométrique moyenne des jours où le vent souffle de 90° - $180^{\circ} > 5$ m/s de façon synchrone à Cap Couronne, Sète et à Port-Vendres de 1961 à 2003. Les résultats sont ici présentés du Jour J-5 au Jour-J pour analyser l'évolution de la situation synoptique lors de la formation de telles tempêtes.



A partir de 5 jours avant le jour-J, une dépression se forme sur l'Atlantique Nord au niveau de l'Islande. Elle suit ensuite une trajectoire méridionale jusqu'à stagner et se renforcer autour du Golfe de Gascogne où elle atteint le minimum de 1000 hPa le jour-J. Le vent tournant dans le sens antihoraire autour d'une dépression, l'ensemble du Golfe du Lion se trouve alors sous des vents de sud-est > 5 m/s. »

1.2.3 *Set up*

Il n'y a pas de mesures du set up, qu'il soit lié au vent, aux vagues ou global, car il n'est pas homogène mais dépendant de la bathymétrie et de la topographie locale.

Le Wind set-up est compris dans les données au large ; car la variabilité du plan d'eau se fait à l'échelle du Golfe du Lion, le point P9 ou les bouées peuvent alors être considérés à la cote (<20km alors que la zone d'influence du vent est sur plusieurs centaines de kilomètres). Comme vu ci-dessus, une forte marée avec dépression importante va engendrer des niveaux de l'ordre de 0.60 mNGF maximum ; le **Wind set-up** est donc fortement variable , **entre 40 cm et 1m**.

Les niveaux d'eau atteints autour des ouvrages vont de +1.3mNGF à +2.1mNGF alors que les niveaux au large sont compris entre 0.97 et 1.55 mNGF ; le **wave set up** est donc de l'ordre de **50 cm** et les dépasse localement pour des événements importants.



Figure 6. Visualisation de la surcote au rivage pour la tempête T1.30.

A titre d'exemple, pour le scénario 4 (niveau marin entré de 1.55 m NGF), le niveau d'eau maximum au niveau du pertuis de la Fourcade est de 2.14 mNGF soit 59 cm de wave setup ; pour la tempête T1.17 il est 1.53 mNGF soit 36 cm de wave setup.

1.2.4 *Synthèse niveau marin*

La marée astronomique va engendrer une base autour de 0.2-0.35 mNGF au pic, avec une variation journalière de l'ordre de 20cm ; soit un niveau variant **entre 0 et 0.35 mNGF**.

La surcote atmosphérique est de l'ordre de **20-25cm**.

Le wind setup est fortement variable , **entre 40 cm et 1m**.

Le wave setup est variable mais reste de l'ordre de **50 cm** dans les zones les plus impactées.

C'est donc le vent, à l'origine de la majeure partie du setup, qui est dimensionnant pour les tempêtes méditerranéennes.

1.3 LA HOULE

En plus des modélisations réalisées par le BRGM, 2 bouées sont situées à proximité de la zone d'étude.

La bouée Camargue, située au large de la pointe de Beauduc, a fonctionnée pendant un peu moins de 3 ans, répartis entre juillet 1999 et janvier 2004.

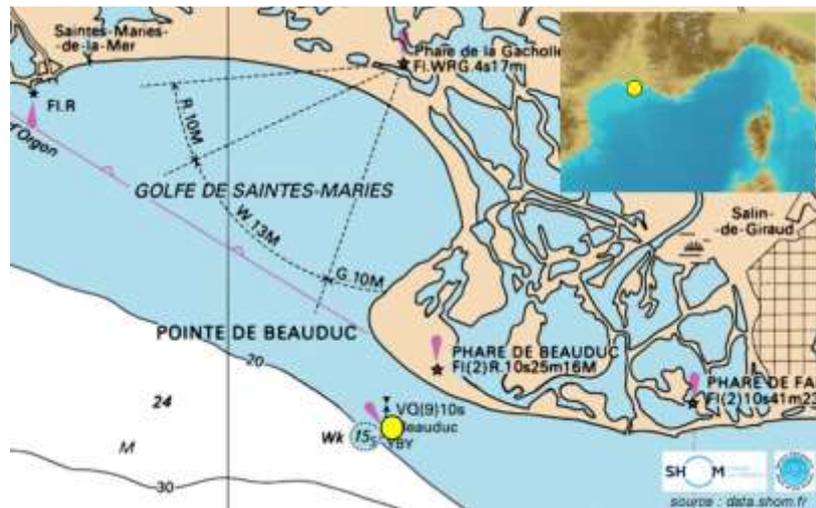


Figure 7. Localisation bouée Camargue (CANDHIS 01301)

Les données statistiques de cette station ne sont pas représentatives du fait de la plage de mesure réduite.

La bouée Espiguette a été mise en fonctionnement en aout 2008 ; l'analyse publiée en 2022 par CANDHIS a été réalisée sur les données allant jusqu'au 15 novembre 2021.

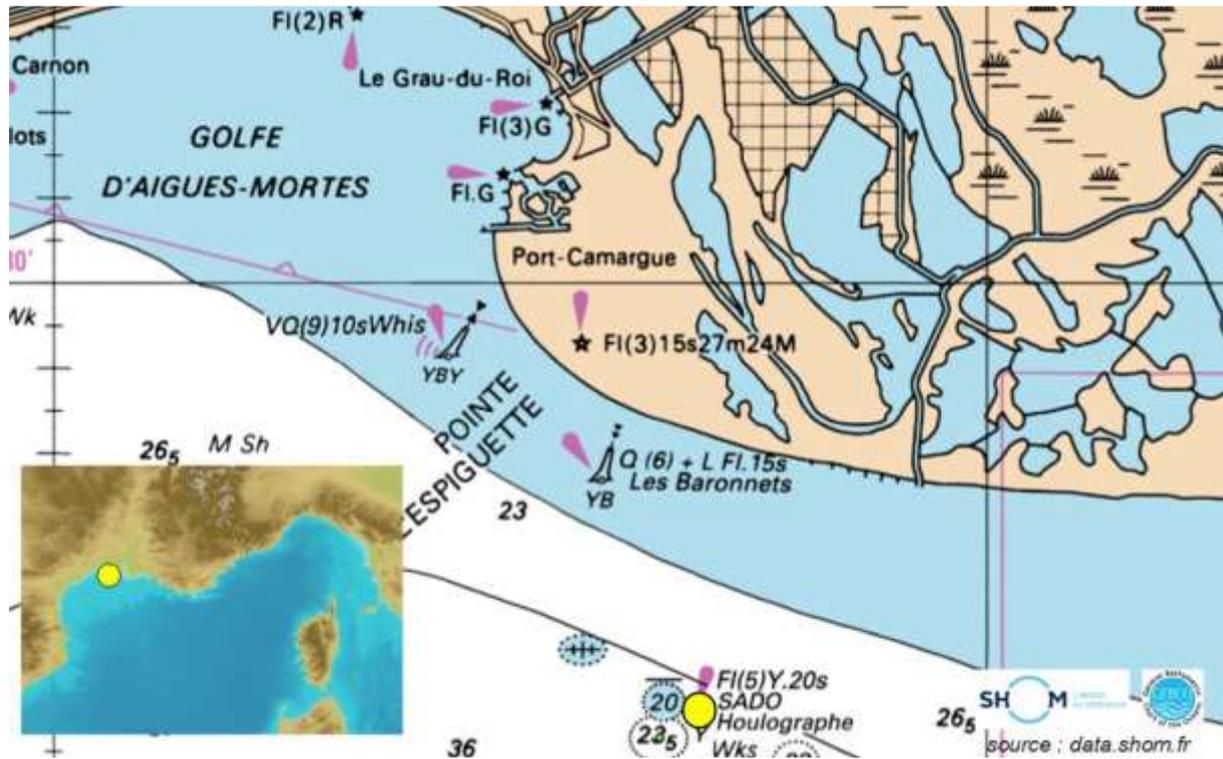
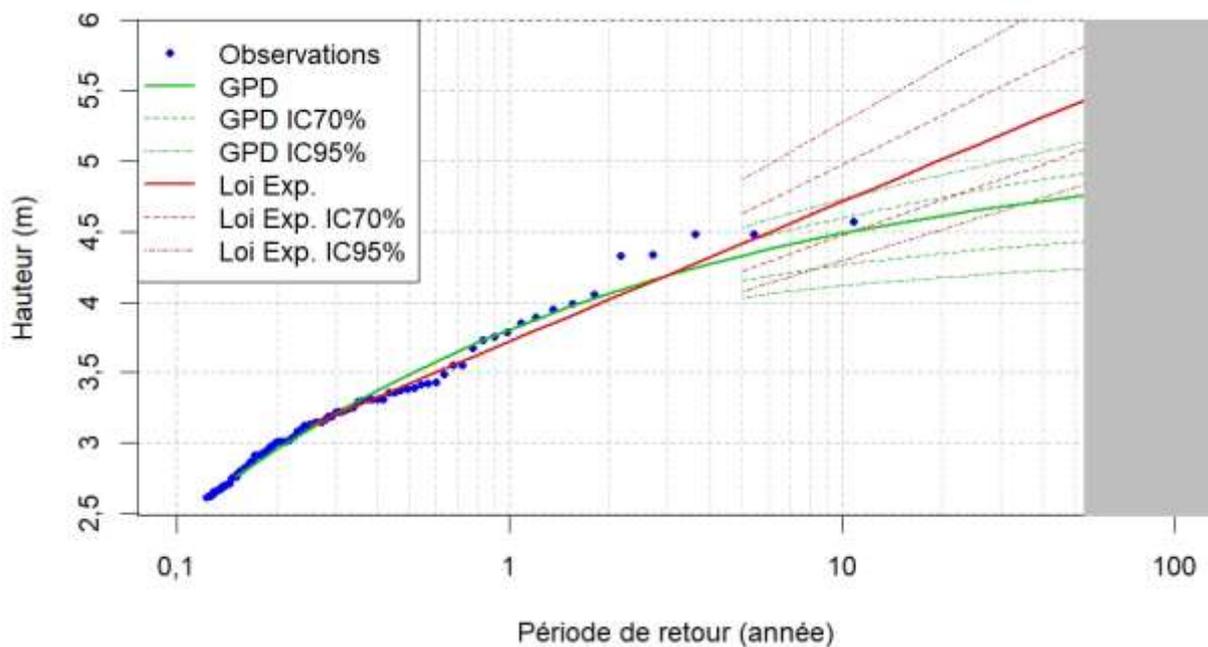


Figure 8. Localisation bouée Espiguette (CANDHIS 03001)

Sur un peu plus de 10 ans de données, il en ressort que H_{m0} est supérieur à 0.53 m une fois sur 2 ; que 20% des données sont supérieures à 0.98m ; 5% supérieures à 1.74m et 1% supérieures à 2.73m.

Les périodes de retour estimées de $H_{1/3}$ sont reprises ci-dessous :



L'étude menée par le BRGM [RP 66804, 3.2.2] est basée sur 31 ans de données environs (1979-2009), extraites au point P9 (isobath 50m). Une loi GDP (Generalized Pareto Distribution), avec la méthode des moments pondérés, a été retenue.

Les résultats diffèrent du fait d'une localisation différente (peu d'impact), d'une bathymétrie différente (impact quasi nul) et d'un jeu de données différent (impact fort : 10 ans et tempête de 2014 non mesurée pour l'Espiguette ; 31 ans de données pour P9).

Tableau 2. Estimation des hauteurs significatives

Période de retour [années]	CANDHIS Espiguette GDP [m]	BRGM P9 GDP [m]
1	3.8	4.11
5	4.33	5.22
10	4.49	5.72
20	4.62	6.17
50	4.75	6.80
100	-	7.27

La direction des vagues est, pour les événements tempêteux ($H_s (P9) > 4.75m$), aux alentours de 125° (Est-Sud-Est) ; elle peut être exceptionnellement plus Sud.

La période de pic augmente globalement avec la hauteur des vagues ; elle peut être approximée à $T_p = 2.936 \cdot \ln(H_s) + 4.62$; soit des périodes de pics comprises entre 9 et 11 secondes pour H_s comprise entre 4.5 et 8.5 m.

Au droit des ouvrages celle houle est en général très faible ; les brise-lame et les plages cassent la houle dont l'énergie crée alors du wave-setup (voir 1.1.3).

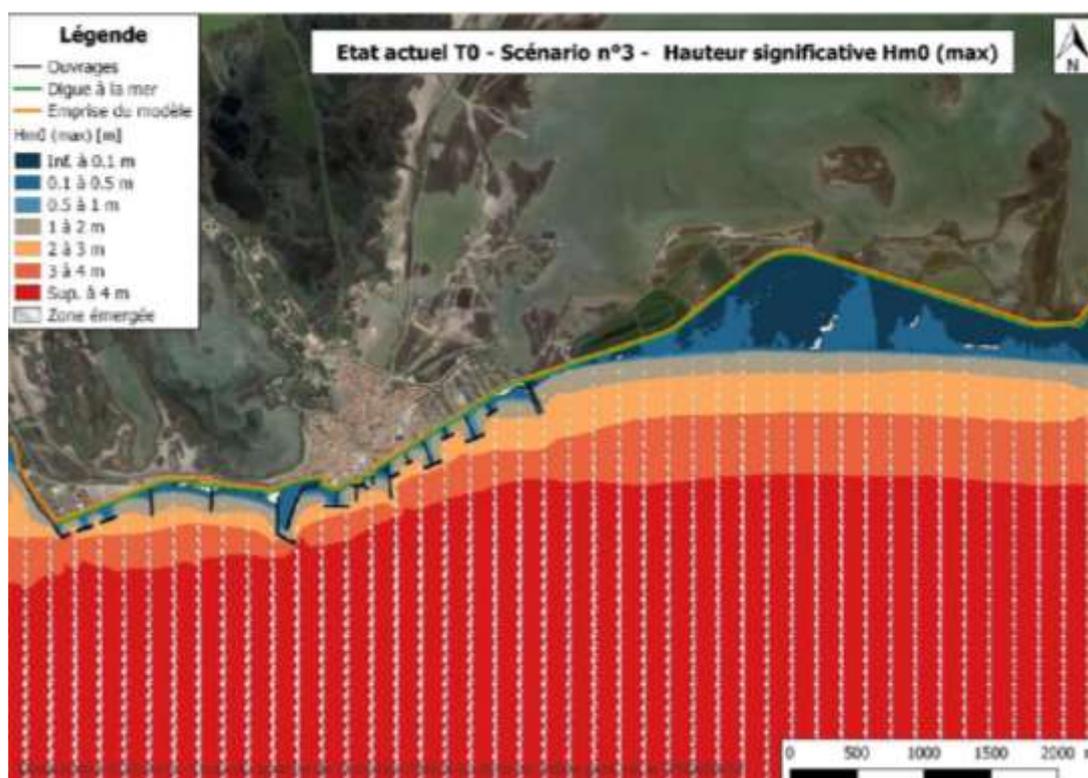


Figure 9. Visualisation de la hauteur des vagues pour la tempête T1.30 ($H_{m0}=5.33\text{m}$).

1.4 TEMPETES MODELISEES

Les modélisations des tempêtes ne pouvant être réalisées qu'en nombre limité, les événements passés ont été analysés pour repérer les corrélations et les phénomènes prédominants.

Le modèle mis en place est un modèle dynamique de la submersion marine qui prend en compte une cinétique de l'évolution des paramètres de forçages au cours de la tempête (vagues, vents, niveau marin). La cinétique retenue est celle de la tempête de novembre 1982. Pour chacun des scénarios, il est réalisé une normalisation de l'évolution des forçages en fonction de cette tempête.

Ainsi les scénarios (1 à 4) se basent sur la cinétique de la tempête de référence 1982 avec une normalisation de leurs valeurs maximum de scénario en termes de niveau d'eau, de hauteur des vagues et des vitesses du vent (voir ci-dessous). La direction des vagues (155°) et de vents (121°) sont les mêmes pour l'ensemble des 4 scénarios. Les séries temporelles des niveaux d'eau sont relativement homogènes avec une augmentation progressive des niveaux en fonction de la période de retour et des scénarios d'élévation du niveau moyen de la mer. Les séries temporelles de vagues et de vents sont plus marquées entre les valeurs du scénario exceptionnel (4) et les scénarios plus courants (1 à 3).

Le scénario 8 est la modélisation de la tempête de 2014 ; elle ne suit donc pas les mêmes variations temporaires.

Pour la suite, les scénarii seront parfois utilisés en les nommant par leur pic de niveau marin :

Tableau 3. Niveaux modélisés

Scénario BRGM	Fréquence	Nom	Niveau marin modélisé [mNGF]	Hauteur de vagues associée [m]	Période au pic [s]	Direction des vagues [°N]	Vitesse du vent [m/s]	Direction du vent [°]
8 – Tempête 2014	Courante	T0.97	0.97	4.04	9.1		19.6	120-180
1 – Décennale	Rare	T1.06	1.06	4.70	9.0	155	22.4	121
2 – Trentennale	Rare	T1.17	1.17	5.09	9.2	155	23.6	121
3 – Centennale	Exceptionnelle	T1.30	1.30	5.33	9.4	155	24.2	121
4 – Exceptionnelle	Extrême	T1.55	1.55	8.75	11.5	155	30.0	121

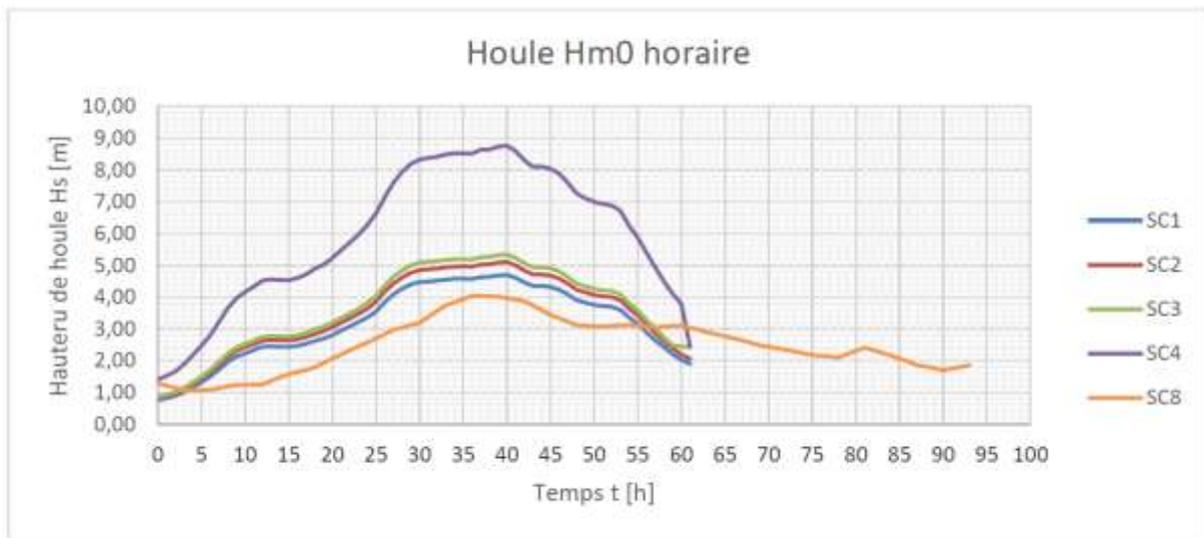


Figure 10. Evolution de la houle au cours des événements modélisés (au point P9, à l'isobathe 50m)

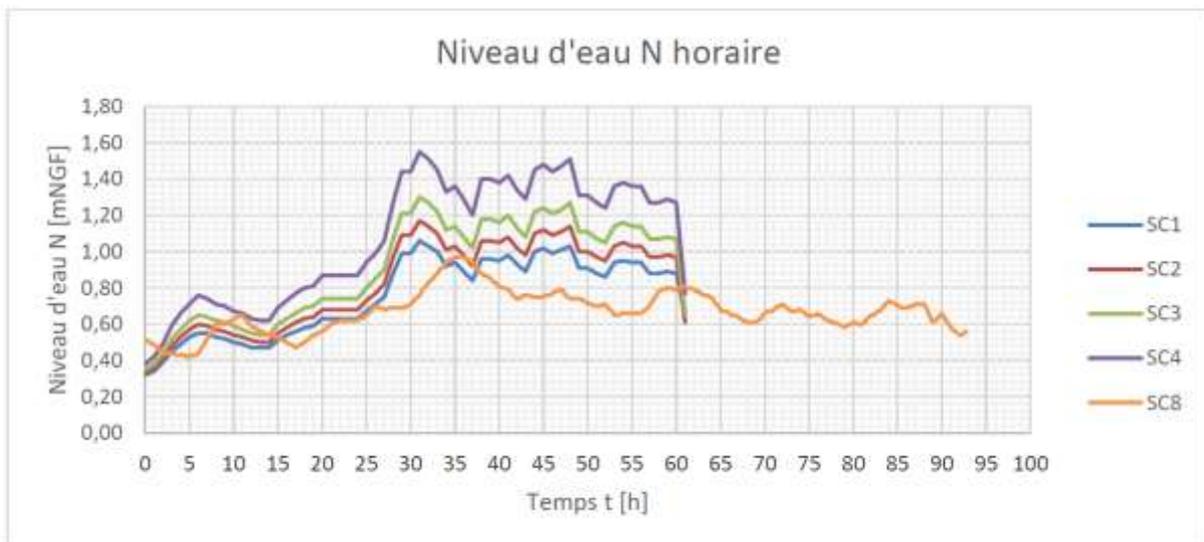


Figure 11. Evolution du niveau marin au cours des événements modélisés (au large, limites du modèle)

2 HYDRO-SEDIMENTOLOGIE DU DELTA

La distance entre la cote et les ouvrages de protection a un impact sur l'intensité de la sollicitation au droit des ouvrages. C'est le fonctionnement de la cellule hydro-sédimentaire qui renseigne de cette évolution.

Ce paragraphe est issu du diagnostic réalisé au SYMADREM dans le cadre de la « stratégie sur le littoral du grand delta du Rhône sur les thématiques de l'évolution de la position du trait de cote et de la submersion marine », Version 4 du 5 juillet 2022.

2.1 LES CELLULES HYDRO-SEDIMENTAIRES

L'évolution du littoral est liée à des mouvements de sédiments qui s'opèrent à différentes échelles de temps et d'espace. La cellule hydro-sédimentaire est ainsi un concept permettant d'identifier, à une échelle donnée, des compartiments du littoral qui peuvent être décrits et analysés de manière autonome sur le plan des transports sédimentaires (*source : [L202]*).

Les limites de la cellule définissent la zone géographique dans laquelle le budget sédimentaire peut être calculé, ce qui donne le cadre pour une analyse quantitative de l'érosion et de la sédimentation. Entre deux cellules voisines, les échanges sont faibles voire nuls ou inférieurs à ceux réalisés à l'intérieur même de la cellule. On admet donc que sous l'action des facteurs naturels (houles, vents...), le sable reste à l'intérieur de la cellule ou sort définitivement du système littoral (perte au large, à terre...). [...]. En termes de pratique et de gestion, la cellule sédimentaire côtière se situe dans un cadre composé de trois zones géographiques : le bassin-versant, la ligne de côte et l'environnement marin proche de la côte (*source : Observatoire de la côte sableuse catalane - ObsCat – glossaire*).

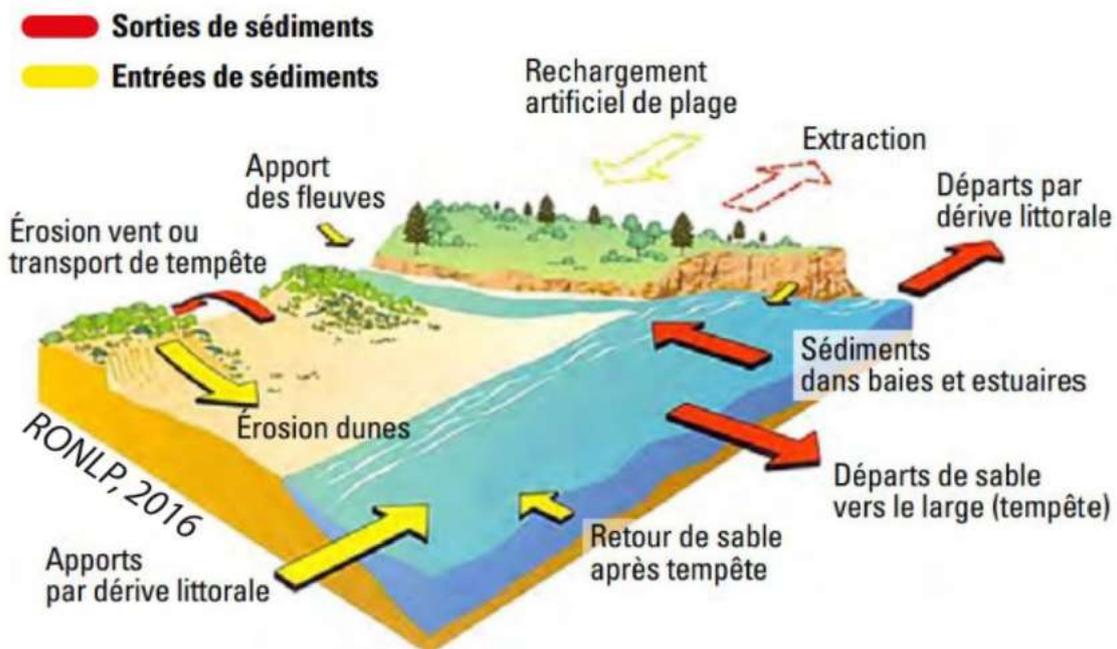


Figure 1 : Echange sédimentaire au sein d'une cellule hydrosédimentaire (*source : ObsCat*)

Entre les deux embouchures il y a 2 cellules hydro-sédimentaires avec 3 courants principaux, qui sont représentés sur la carte suivante :

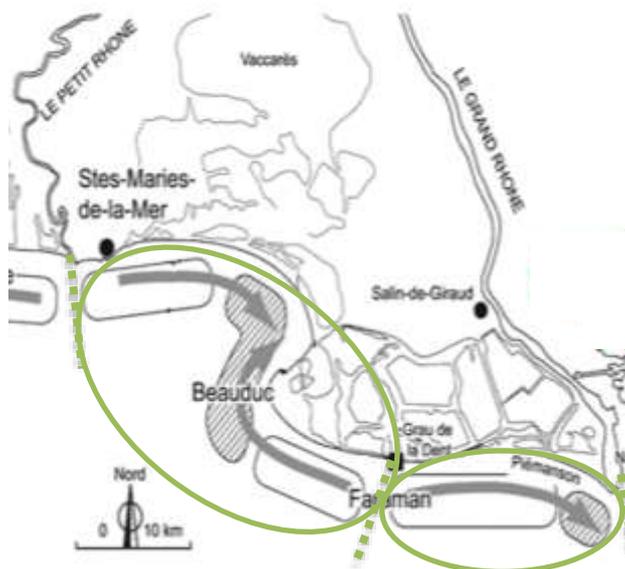


Figure 12. cellules hydro-sédimentaires du Delta du Rhône - extrait – Sabatier

La première comprend une alimentation de Beauduc à la fois par l'ouest depuis l'embouchure du petit Rhône et par le sud-est depuis le grau de la dent.

La seconde est un déplacement est-ouest du grau de la dent à l'embouchure du grand Rhône.

2.2 DONNEES DISPONIBLES

Les études suivantes ont été utilisées concernant les informations sur les positions du rivage et leur évolution dans le temps :

- L'étude du CEREGE de 2017 : « Une approche scientifique pour une connaissance des risques littoraux en Camargue », en particulier la « Tâche 2 : variation du rivage depuis 150 ans » - [L001] ;
- La thèse de F. SABATIER de 2001 : « Fonctionnement hydrosédimentaire du littoral du delta du Rhône » - [L007] ;
- La thèse d'O. SAMAT de 2007 : « Efficacité et impact des ouvrages en enrochement sur les plages microtidales. Le cas du Languedoc et du Delta du Rhône » - [L008].

L'étude suivante a été utilisée concernant les informations sur les bilans sédimentaires :

- L'étude du CEREGE de 2017 : « Une approche scientifique pour une connaissance des risques littoraux en Camargue », en particulier la « Tâche 3 : Quantification des fonds de l'avant côte du Rhône : bilan sédimentaire entre 1872 et 2013 » - [L001] ;

2.3 EVOLUTION HISTORIQUE DE LA POSITION DU TRAIT DE COTE

Les données issues des sources précitées ont été compilées de façon à obtenir une seule et même cartographie représentant les zones en érosion et les zones en accrétion. **Le linéaire en érosion représente 76 % du linéaire total du périmètre de la stratégie littorale.**

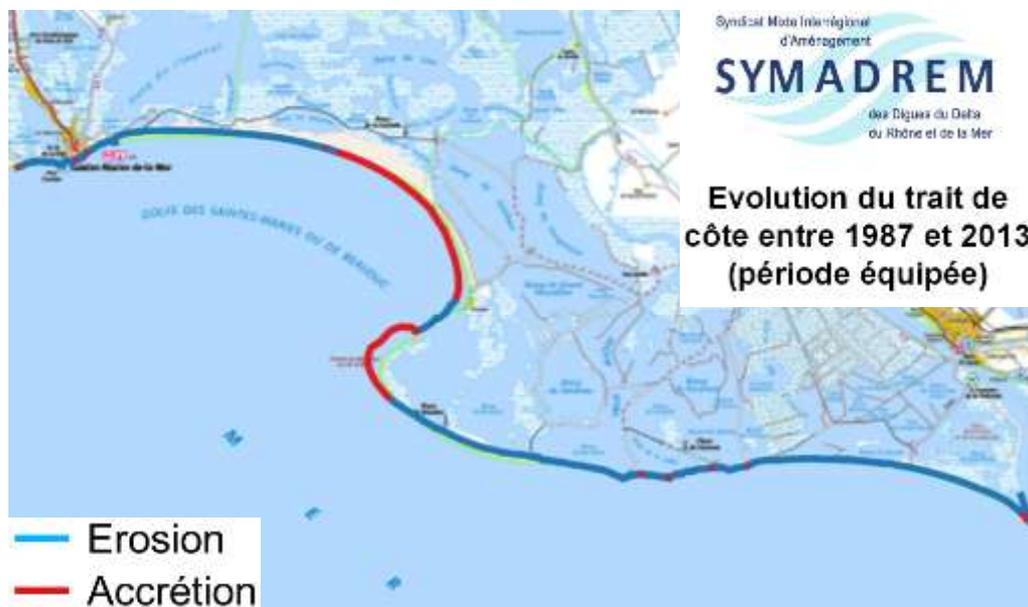


Figure 13. Carte de l'évolution du trait de côte entre 1987 et 2013

Les secteurs où les **reculs** sont les plus rapides sont les suivants :

- L'embouchure du Grand Rhône en rive droite (commune d'Arles) : la vitesse de recul est comprise entre 7,5 et 15 m/an. Notons que par définition, l'embouchure d'un fleuve est mobile, les fortes vitesses de recul observées de façon localisée dans ce secteur sont accompagnées de fortes vitesses d'avancées à proximité immédiate, mettant en évidence la mobilité de ce « bouchon » situé à l'embouchure du Grand Rhône ;
- La Plage Est (commune des Saintes Maries de la Mer) : la vitesse de recul est comprise entre 5 et 7,5 m/an ;
- Le secteur de la digue de Véran et de l'étang de Beauduc (commune d'Arles) : la vitesse de recul est comprise entre 5 et 7,5 m/an ;

Les secteurs où les **avancées** du trait de côte sont les plus rapides sont :

- La pointe des Sablons à Beauduc (commune d'Arles) : la vitesse d'avancée est comprise entre 15 et 30 m/an ;
- L'embouchure du Grand Rhône en rive droite : la vitesse d'avancée est comprise entre 7,5 et 15 m/an (voir explication ci-dessus).

2.4 PROJECTION D'EVOLUTION DE LA POSITION DU TRAIT DE COTE

2.4.1 *Données utilisées*

Les données sont issues de l'étude du CEREGE [L001]. La méthodologie employée consiste à extrapoler les vitesses d'évolution de la position du rivage, déterminée sur la base de l'analyse du comportement passé du rivage, pour déterminer sa position future supposée.

Trois hypothèses sont envisagées et cartographiées :

- La position future du rivage est basée sur l'analyse des vitesses d'évolution durant la **période naturelle** (c'est-à-dire la période avant enrochements, entre 1872 et 1977) ;
- La position future du rivage est basée sur l'analyse des vitesses d'évolution durant la **période équipée** (c'est-à-dire la période avec enrochements, entre 1987 et 2013) ;
- La position future du rivage est basée sur l'analyse des **vitesse maximale** annuelles observées entre 1987 et 2013. Il s'agit d'un scénario pessimiste, débouchant sur une cartographie au rivage saccadée et qui doit être interprétée selon des ordres de grandeur.

2.4.2 *Extrait des cartographies des projections d'évolution de la position du trait de côte*

Des zooms ont été effectués sur les zones urbanisées de la frange littorale (Saintes Maries de la Mer), et sur les secteurs où les tendances d'évolution sont les plus extrêmes (la Plage Est et la pointe des Sablons à Beauduc). Ils sont présentés ci-dessous pour les années 2030 et 2050.



Figure 14. Légende des cartes suivantes

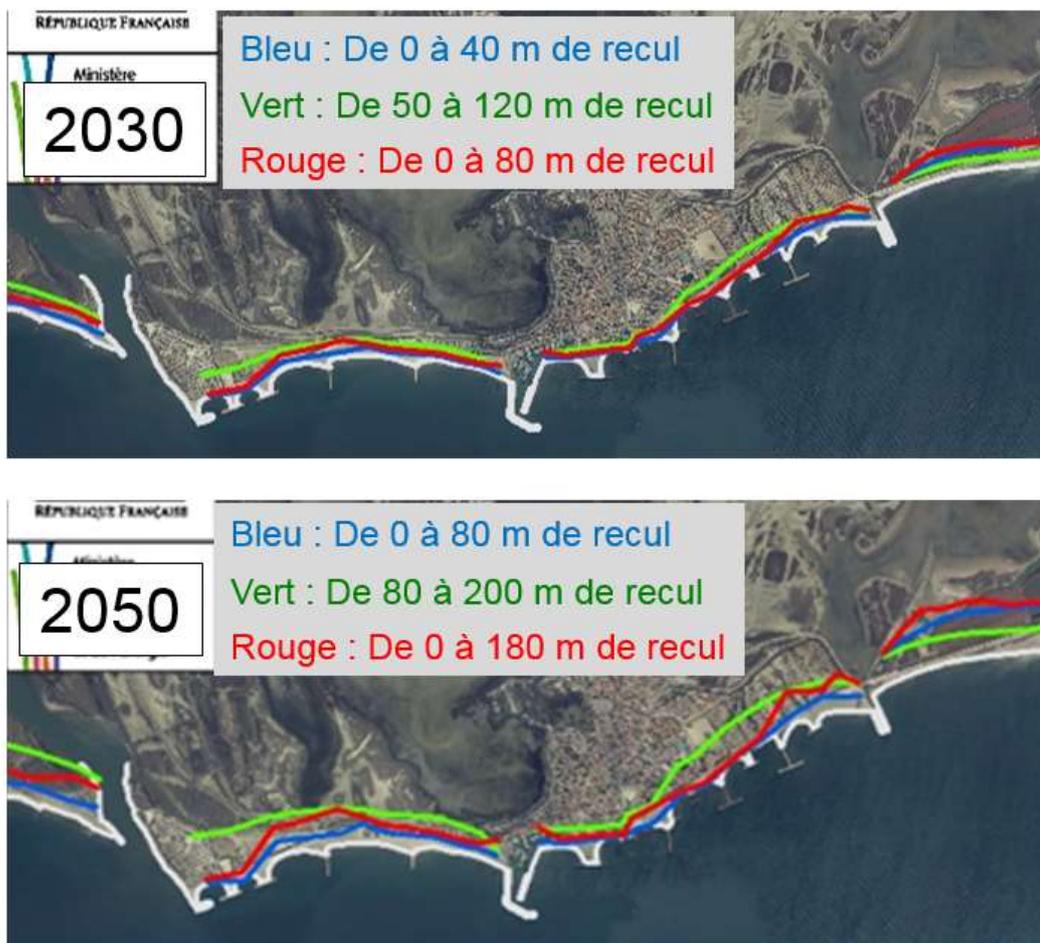


Figure 15. Zoom au droit des Saintes Maries de la Mer

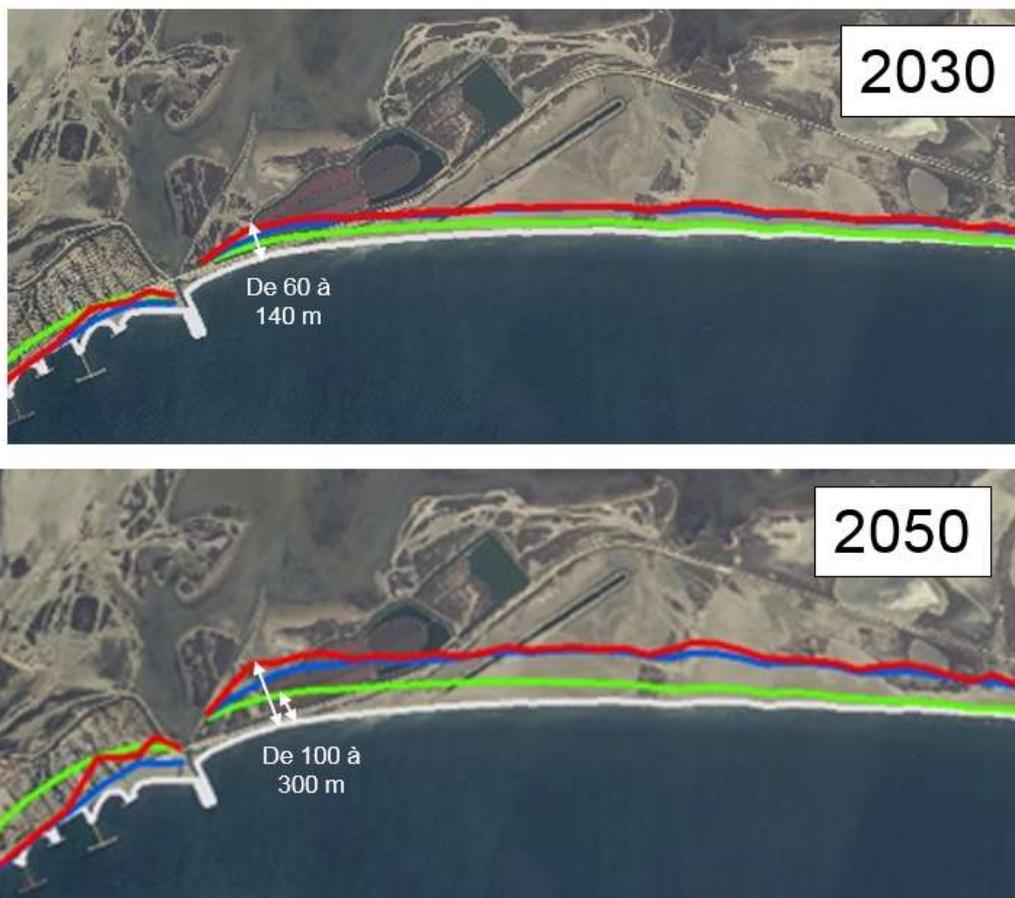


Figure 16. Zoom sur la plage Est des Saintes-Maries-de-la-Mer

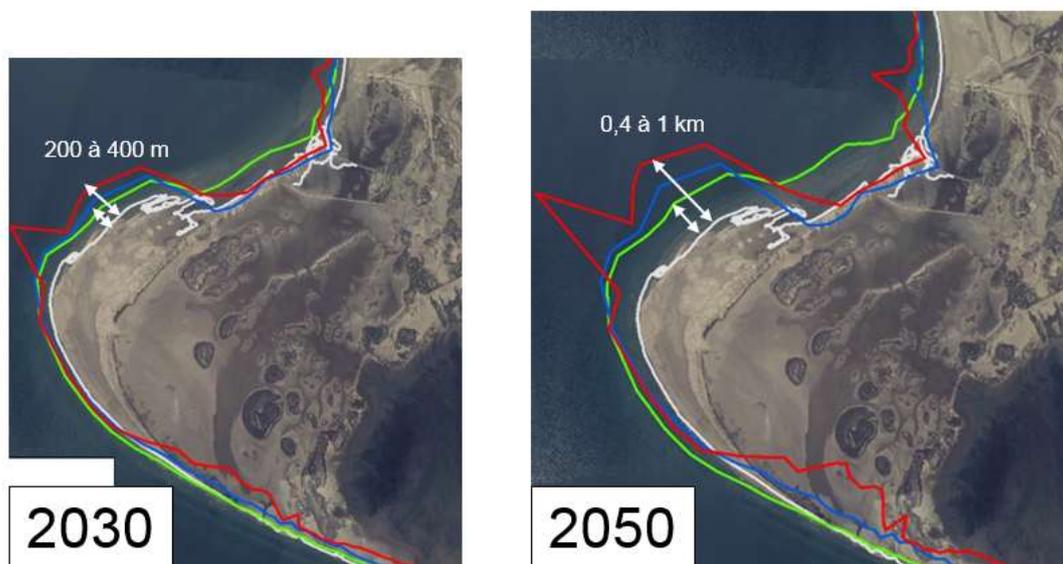


Figure 17. Zoom sur Beauduc

2.4.3 Synthèse des Scénarios d'évolution de la position du trait de côte étudié par le CEREMA

Sans aménagement visant à stopper l'évolution, les tendances passées vont être amenées à continuer et pourraient impacter les ouvrages du système d'endiguement situés au centre des Saintes Maries de la Mer et au niveau de la plage Est.

2.5 EVOLUTION MORPHOLOGIQUE ET BILAN SEDIMENTAIRE

2.5.1 Analyse à l'échelle des cellules hydrosédimentaires du Delta du Rhône

Pour compléter, par une analyse du bilan sédimentaire a été réalisée. Ce travail a été réalisé par le CEREGE dans le cadre de la Tâche 3 l'étude [L001]. Les principales conclusions sont présentées ci-dessous.

« Le bilan sédimentaire général décroît depuis 1872 et devient négatif à partir des années 80s. Il passe d'un excédent de 2,1 millions m³/an à la fin du XIX^{ème} siècle à un déficit de 5,4 millions m³/an au début du XXI^{ème} siècle. Le déficit le plus important concerne la période la plus récente, entre 2006 et 2013 ».

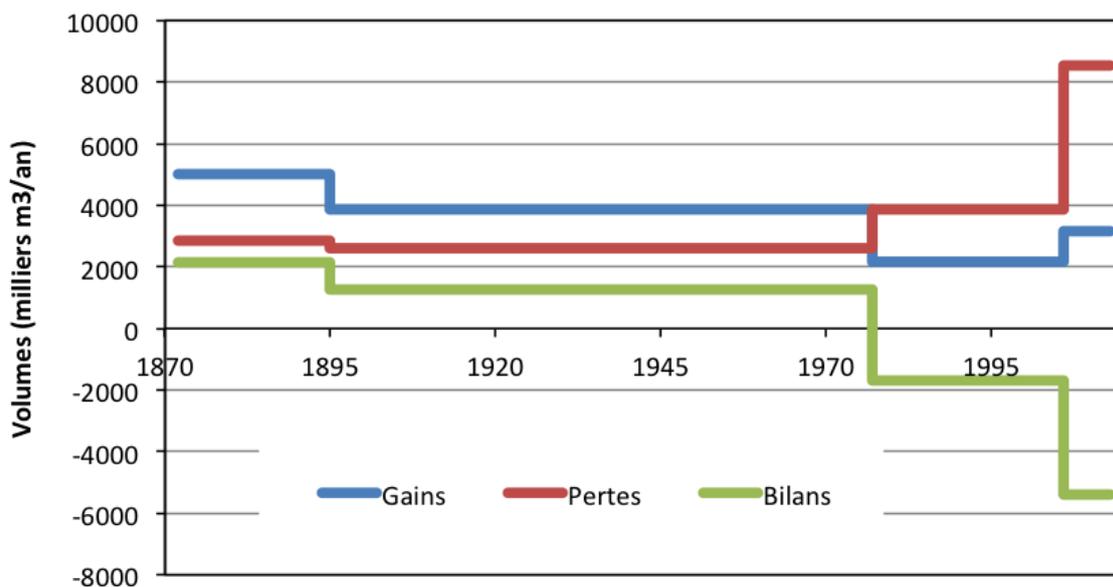


Figure 18. Bilan sédimentaire général de l'avant côte du Rhône - source : [L001]

Les causes de cette diminution sont les suivantes :

- Diminution lente et continue des gains :
 - Cela concerne d'abord l'embouchure du Grand Rhône pour les raisons suivantes :
 - baisse documentée des apports sédimentaires du Rhône à la mer du fait d'une réduction du nombre de crues depuis la fin du Petit Age Glaciaire
 - revégétalisation du bassin versant en relation avec l'exode rural, la modification de pratiques pastorales et les actions de restauration des terrains de montagne

- construction de barrages, extractions, endiguements, recalibrages...sur le Rhône et ses affluents qui prélèvent et/ou bloquent le transit des sédiments.
- toutes les flèches (Beauduc, Gracieuse), c'est à dire les puits de stockages sédimentaires alimentés par les dérives littorales, montrent une diminution de leurs gains annuels. Ces résultats dévoilent le rôle majeur des pertes sédimentaires vers le large ainsi que la diminution des apports sédimentaires par le fleuve.
- Augmentation et accélération des pertes dans les secteurs en érosion et la dernière période, entre 2006 et 2013, montre les valeurs les plus élevées. Ce comportement est causé par l'augmentation significative de l'érosion sous-marine du littoral devant les Saintes-Maries-de-la-Mer et Faraman entre 2006 et 2013.

Quelques chiffres sur les gains sédimentaires :

- Embouchure du Grand Rhône :
 - 1,9 millions m³/an à la fin du XIX^{ème} siècle
 - 0,05 millions m³/an depuis 2006,Soit 40 fois moins d'apport annuel qu'il y a 150 ans
- Flèche de Beauduc :
 - 500.000 m³/an à la fin du XIX^{ème}
 - 350.000 m³/an environ aujourd'huiSoit une diminution d'un facteur 1,5
- Flèche de la Gracieuse :
 - 250.000 m³/an à la fin du XIX^{ème}
 - 100.000 m³/an environSoit une diminution d'un facteur 2,4

Quelques chiffres sur les pertes sédimentaires :

- les valeurs passent de 2,8 à 8,5 millions de m³/an environ sur 150 ans ;
- Littoral au droit des Saintes-Maries-de-la-Mer :
 - 0,5 millions de m³/an à la fin du XIX^{ème}
 - 2,5 millions m³/an aujourd'huiSoit une augmentation d'un facteur 4,7
- Littoral de Faraman :
 - 0,9 millions m³/an à la fin du XIX^{ème}
 - 2,5 millions m³/an aujourd'huiSoit une augmentation d'un facteur 2,7

Les évolutions des bilans sédimentaires sont présentées sur la figure suivante :

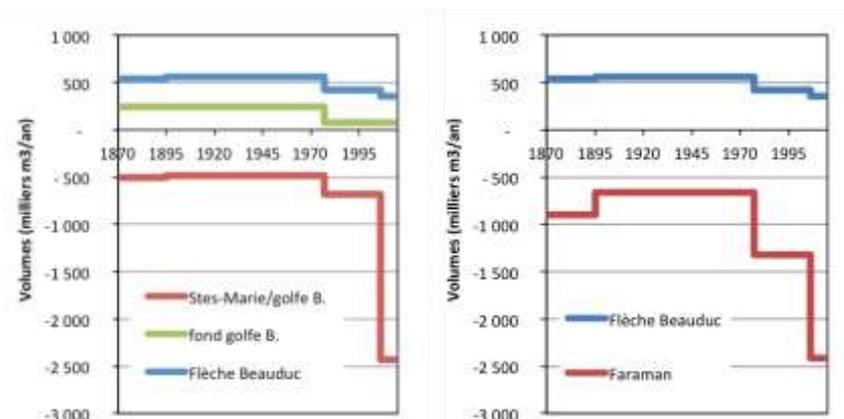


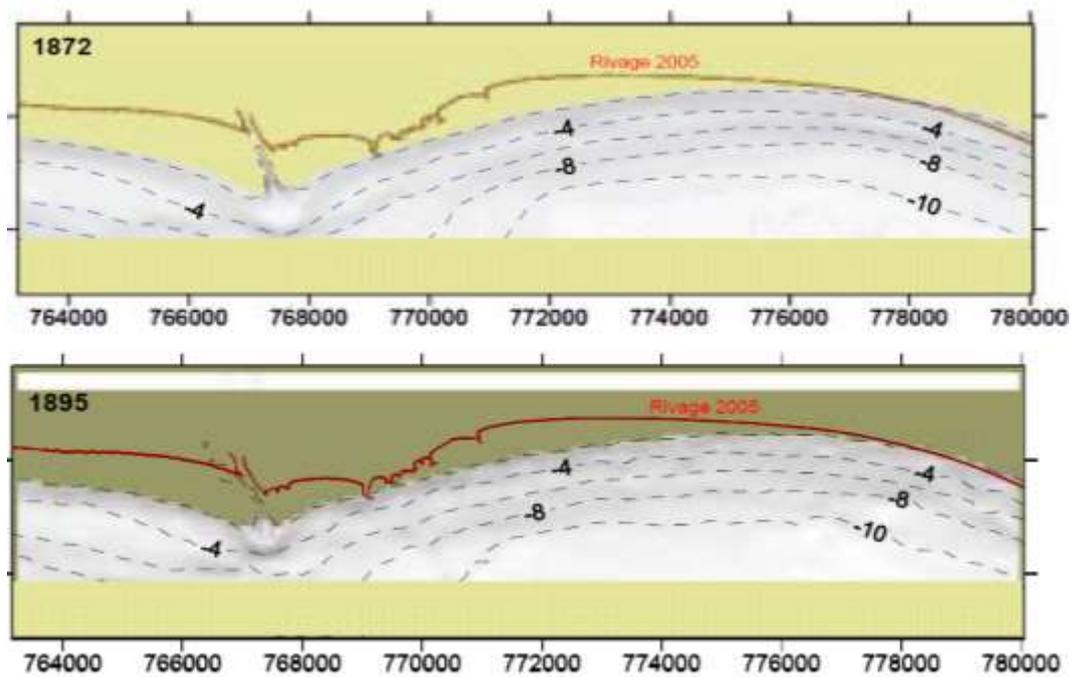
Figure 19. bilans sédimentaires par secteur géographique – source : [L001]

2.5.2 Zoom sur le littoral des Saintes-Maries-de-la-Mer

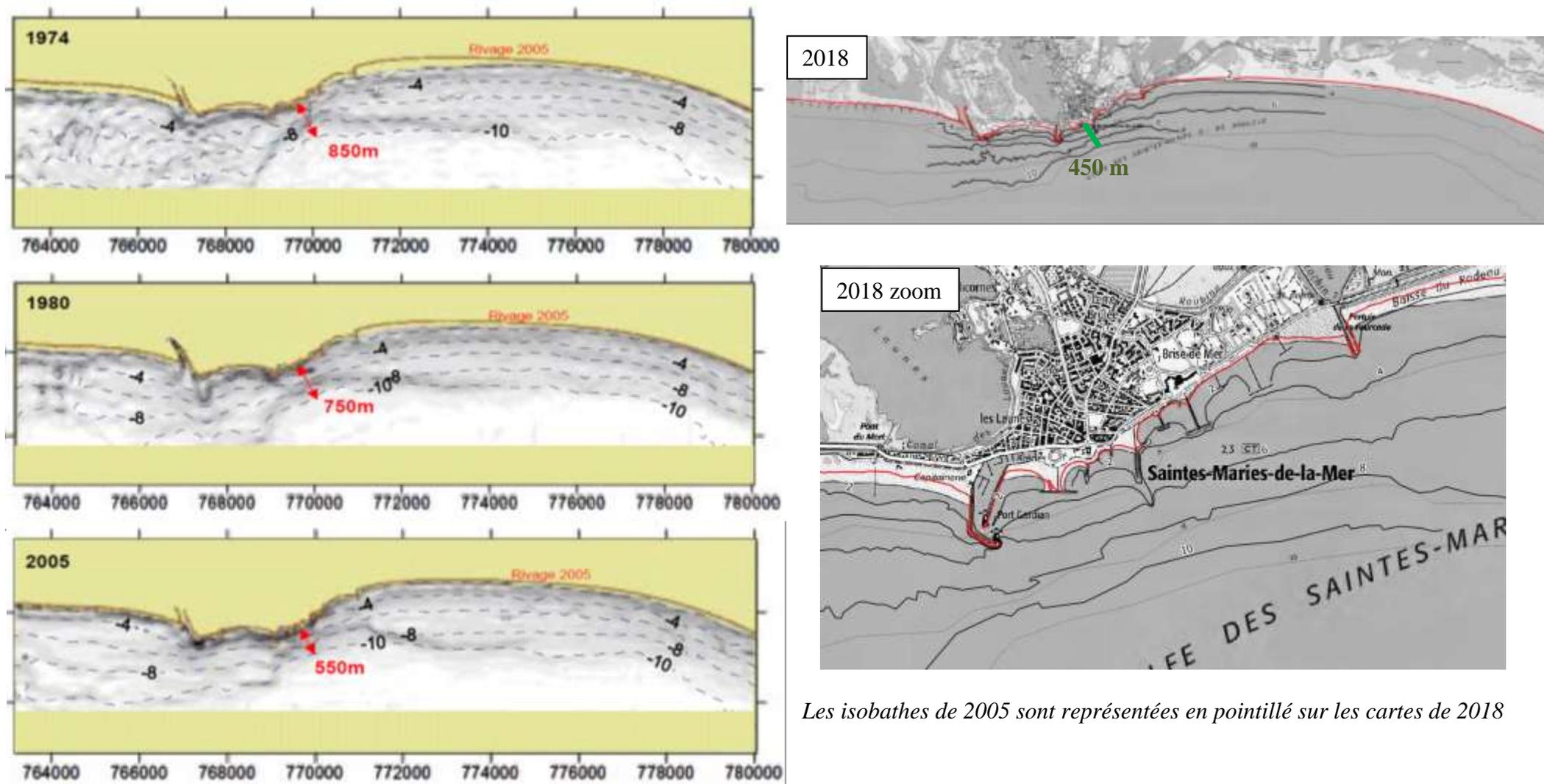
Une analyse précise de l'évolution des pentes des fonds marins dans le secteur des Saintes-Maries-de-la-Mer a été menée en 2007 dans le cadre de la thèse d'O. Samat « Efficacité et impact des ouvrages en enrochement sur les plages microtidales. Le cas du Languedoc et du Delta du Rhône » [L008]. Ce travail s'appuie sur des données bathymétriques des années 1872, 1895, 1974, 1980 et 2005. Une partie des résultats est rappelée dans ce paragraphe. Le Symadrem a également complété l'analyse en exploitant les résultats d'un relevé bathymétrique réalisé en 2018 par Geocart'eau pour le Symadrem. Le périmètre de ce relevé étant parfois trop restreint pour mener l'analyse, il a été complété lorsque cela été nécessaire par les données du relevé Litto3D réalisé en 2015.

Deux types de résultats sont présentés ci-après :

- Vues en plan des isobathes (ou cartes des pentes) pour les années 1872, 1895, 1974, 1980, 2005 et 2018 ;
 - Comparaison de profils de plage transversaux du secteur étudié pour les années 1872, 1895, 1974, 1980, 2005, 2015/2018
- Vues en plan des isobathes :



Les positions des isobathes sont présentées sur la figure ci-dessous pour les dates précitées :



Les isobathes de 2005 sont représentées en pointillé sur les cartes de 2018

Figure 20. Positions des isobathes de 1872 à 2018 – source de 1872 à 2005 : [L008] – source 2018 : Symadrem

Dans la thèse précitée [L008] l'analyse est la suivante : « la comparaison des pentes sur les MNT traités (1895, 1974, 1980 et 2005) met en évidence plusieurs phénomènes. Tout d'abord une homogénéité relative des valeurs de pente à la fin du XIX^{ème} siècle (1895) qui s'oppose à la forte irrégularité observée en 1974-1980 et 2005. [...] ». Cette irrégularité se confirme sur la carte de 2018.

« Une zone se démarque au large, autour de l'isobathe -8m. Elle présente une organisation des lignes de pentes maximales en arc de cercle, orienté SSW- Est. Le phénomène majeur est ici la migration de cet arc des fortes pentes vers le NW. La distance de cet arc de fortes pentes par rapport à la côte, passe en effet d'environ 850 m en 1974 à 750 m en 1980, puis 550 m en 2005 ».

Cette distance est réduite à 450 m environ en 2018. Sur cet arc de cercle, la distance entre les isobathes -10 m de 2005 et de 2018 varie de 90 à 160 m, soit un recul de l'ordre de 7 à 12 m/an.

La conclusion suivante se confirme donc : « L'ensemble de ces constats confirme non seulement une érosion importante, mais également une modification des fonds avec un raidissement des pentes, conduisant à une fragilisation accentuée du littoral au droit de la ville des Saintes-Maries-de-la-Mer ».

- Comparaison des profils de plage transversaux :

Ce travail s'appuie sur la comparaison de cinq profils localisés autour de Saintes-Maries. La localisation des profils est celle définie dans la thèse d'O. Samat [L008] :



Figure 21. Localisation des profils de plage transversaux

Les profils sont les suivants. L'axe des abscisses indique la distance en mètre. L'axe des ordonnées indique la profondeur en mètre :

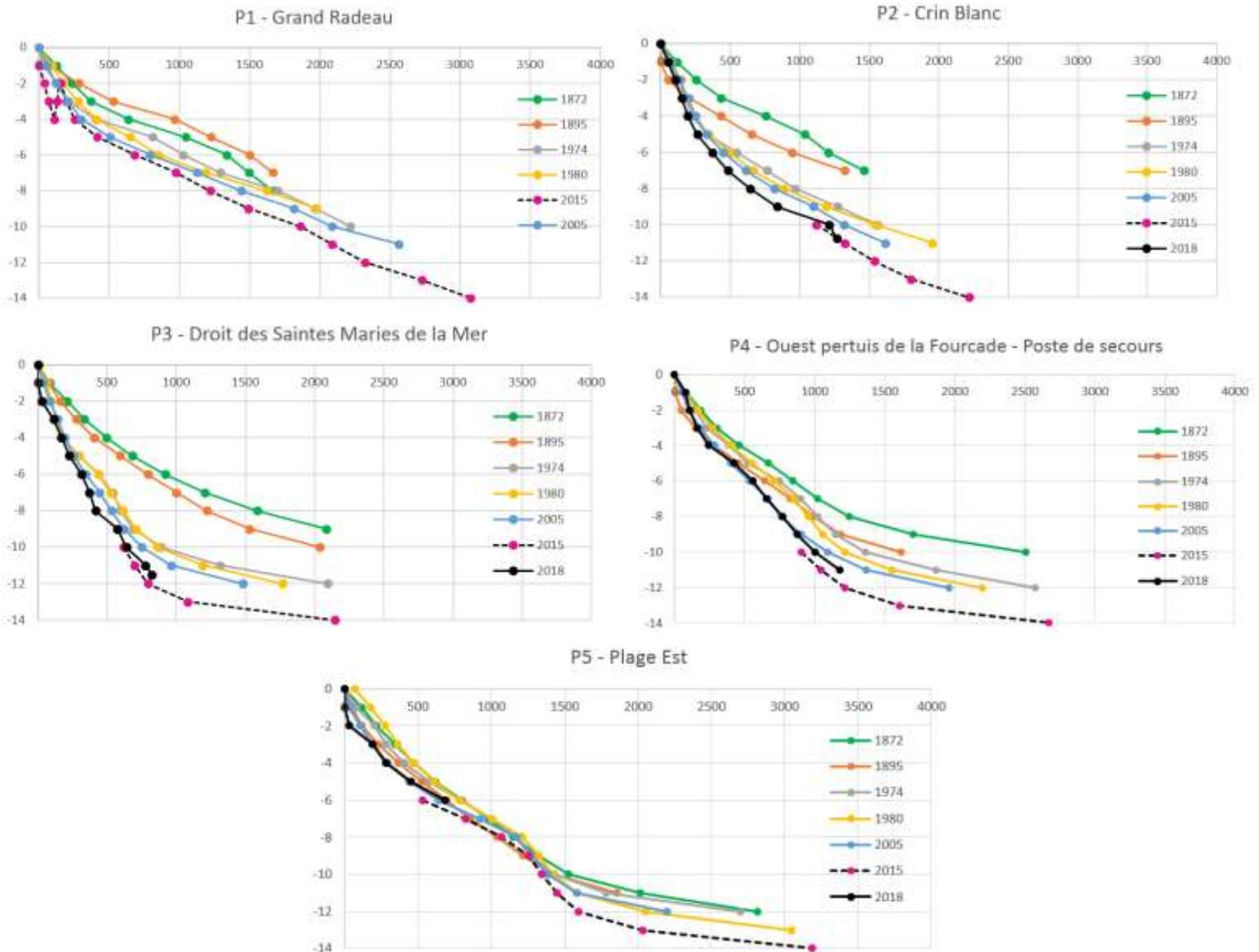


Figure 22. Evolution des profils de plage transversaux

Dans la thèse précitée, l'analyse est la suivante : « En termes de morphologie, le profil P1 se différencie des autres par sa forme rectiligne. Les profils P2 à P5 présentent en effet une forme concave. Une évolution des fonds spatialement hétérogène apparaît. En effet la profondeur de fermeture sur une période de 133 ans diffère sur les divers profils étudiés. Elle se situe autour de -12m sur les profils P1 et P5 (profils de part et d'autre de la ville) et au-delà de 14 m (non atteinte à partir de la comparaison de nos profils) sur la section au droit de la ville (P2 et P3). Il ressort aussi qu'à l'intérieur d'une même cellule sédimentaire (Sabatier 2001), de fortes disparités peuvent apparaître ».

La profondeur de fermeture du profil correspond à la limite sous-marine à partir de laquelle on n'enregistre plus de variations significatives des profils bathymétriques (Hallermeier, 1981). Plus généralement la profondeur de fermeture permet de définir l'extension transversale de la mobilité d'un profil de plage très utile pour évaluer la réponse morphologique globale des fonds aux dynamiques marines.

La superposition de la bathymétrie 2015/2018 sur ces mêmes graphiques amène à l'analyse suivante :

- La profondeur de fermeture des profils a augmenté, y compris sur les profils situés de part à d'autre de la ville P1 et P5. L'étendue des relevés bathymétriques anciens ne permet pas de définir cette profondeur avec précision ;
- La comparaison des pentes des profils de 2005 avec celles de 2015/2018 met en évidence un raidissement des pentes généralisé à l'ensemble du profil jusqu'à la profondeur de fermeture, sauf pour P4 et P5 où le raidissement des pentes commencent à partir de -10 m, les profils P4 et P5 étant relativement stable aux profondeurs inférieures.

Ces résultats peuvent être mis en lien avec les évolutions des fonds de l'avant côte présentée dans la tâche 3 de l'étude récente du CEREGE [L001]. Les cartes présentées ci-dessous montrent qu'entre 1970 et 2006, les différences bathymétriques en m/an entre 1970 et 2006 sont bien moins importantes, dans le secteur où les profils ont été comparés – entouré en jaune, qu'entre les années 2006 et 2013. Au niveau de la plage Est, on retrouve un approfondissement important à partir de 1,5/2 km du rivage.

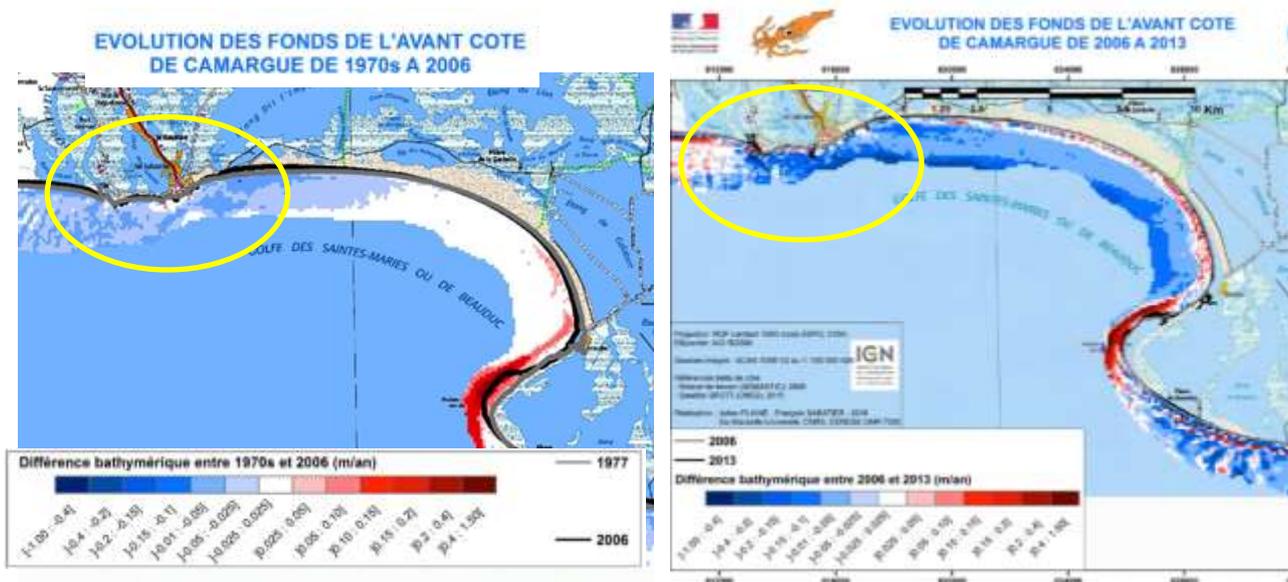


Figure 23. Evolution des fonds de l'avant-côte aux Saintes-Maries-de-la-Mer (source : [L001])

En conclusion, la thèse [L008] indiquait « Cette étude des variations des pentes a permis de confirmer le caractère hétérogène du secteur mis en évidence dans l'analyse des bilans sédimentaires. La relative stabilité morphologique des profils de part et d'autre de la ville contraste en effet avec la forte instabilité de la section au droit du secteur stabilisé des Saintes Maries de la Mer ».

L'analyse des données bathymétriques récentes semble montrer que les tendances observées jusqu'en 2005 se poursuivent. L'instabilité semble également s'étendre aux profils situés de part et d'autre de la ville.

2.5.3 Zoom sur le secteur de la digue de Véran

D'après l'étude du CEREGE ([L001]) :

« Pour le littoral de Faraman, la partie Est de la plage de Piémanson, avant la zone en accumulation de l'embouchure et les petits fonds, au niveau de la digue de Véran connaissent l'érosion la plus forte. Cette dernière zone, où les enrochements s'effondrent, montre une érosion chronique et forte depuis 1895 du fait de la bathymétrie lobée en relation avec l'ancienne embouchure du Rhône du Bras de Fer. Par conséquent, et à cette échelle spatio-temporelle, on ne doit pas ici surinterpréter le rôle des enrochements qui augmenteraient spécifiquement l'érosion de ce secteur (même si ce phénomène est mis en évidence par d'autres méthodes dans la thèse de Samat 2007). Nous rappelons que si des enrochements ont été édifiés ici, c'est précisément parce que l'érosion et le recul du rivage étaient très élevés avec, en arrière, une activité économique à conserver. **Les enrochements contribuent à l'érosion sous-marine en augmentant la réflexion des vagues mais ils n'ont pas déclenché ce processus historique** (probablement depuis 1711 avec le changement de cours du Rhône du Bras de Fer au profit de celui de Pégoulie) ».

Le diagnostic du plan de gestion des Etangs et des marais des Salins de Camargue (Conservatoire du Littoral, 2022) fournit les explications suivantes, portant notamment sur le phénomène d'overwash :

« L'*overwash* désigne un processus de transfert d'eau et de sédiments sur une dune côtière, une crête de plage ou un aménagement, lors des événements de tempête ou autres situations de hautes eaux. Il s'accompagne de dépôts des sédiments en arrière de la côte.

Les chenaux temporaires ou permanents, se formant au niveau des brèches [qui se sont formées sur les digues sous l'effet des tempêtes et qui n'ont pas été réparées], contribuent également aux transferts de sédiments vers les étangs. Les processus sont à l'origine de la reconstitution des lidos et participent à leur translation en direction des étangs. **Ainsi, un ensablement rapide intervient en arrière des anciennes digues, sur la plus grande partie du lido de l'étang de Beauduc. Un ensablement est aussi observé en arrière de la brèche située dans le sud-ouest de l'étang de Sainte-Anne.** Toutefois, l'accumulation de ces stocks de sédiments sur le bord des étangs semble favorisée par la présence des anciennes digues, celles-ci jouant le rôle de brise-lame. Lorsque ces anciennes digues se sont davantage enfoncées en mer ou ont disparu, on observe une reprise rapide du recul du trait de côte ».

2.5.4 Synthèse des bilans sédimentaires des cellules

La cartographie ci-dessous synthétise les bilans sédimentaires par année et par kilomètre.

Les données sont issues de l'étude du CEREGE [L001], elles sont établies d'après une analyse sur la période 2006-2013.

On note les pertes importantes dans le secteur de Faraman et des Saintes-Maries-de-la-Mer/Golfe de Beauduc.

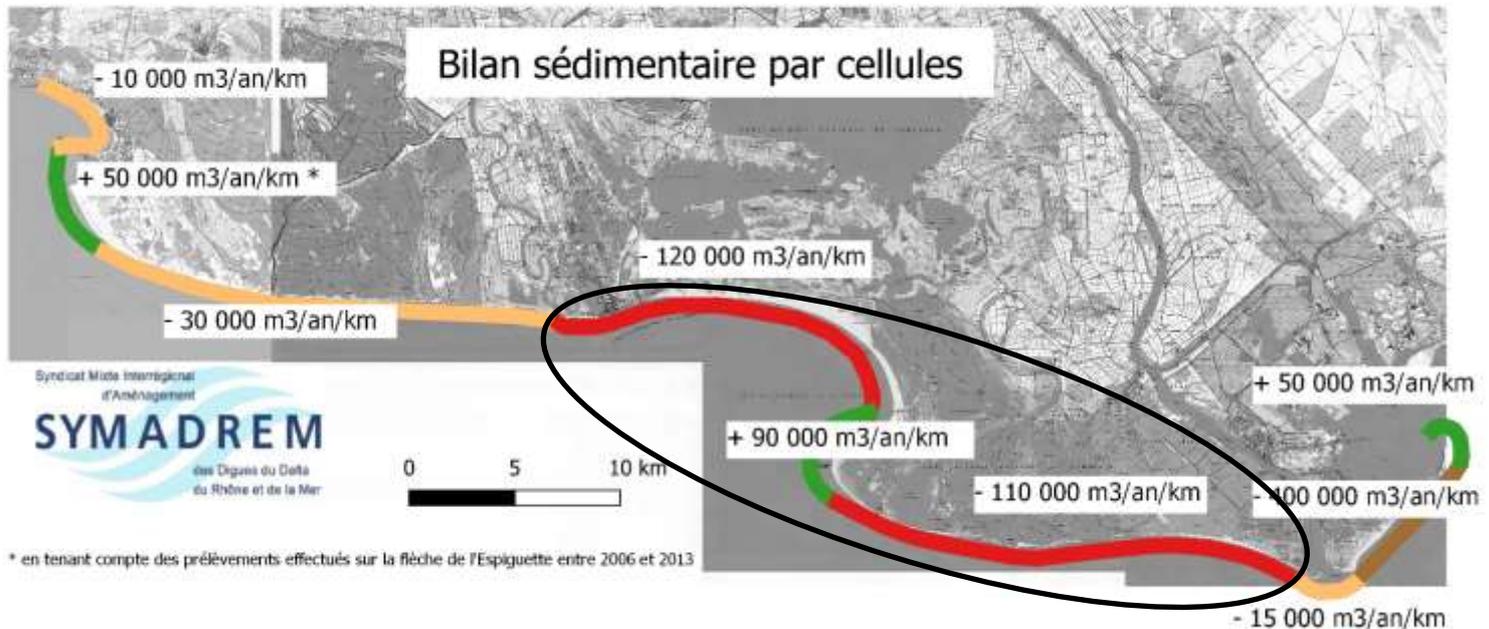


Figure 24. Bilan sédimentaire par cellules – période d'analyse : 2006-2013

2.6 CONCLUSION DU VOLET « EXPOSITION DU TERRITOIRE AUX PHENOMENES D'EROSION ET D'ACCRETION DU TRAIT DE COTE »

Les secteurs où les reculs sont les plus rapides sont Plage Est des Saintes-Maries-de-la-Mer et le secteur de la digue de Véran et de l'étang de Beauduc, à Arles.

Le secteur où les avancées du trait de côte sont les plus rapides est la pointe des Sablons à Beauduc (commune d'Arles).

Les enrochements des Saintes Maries de la mer ont été efficaces pour fixer le rivage mais ont accéléré l'érosion aval-dérive de ces batteries d'épis et contribué à l'approfondissement des fonds.

Les profils bathymétriques au droit des zones enrochées ont évolué depuis les années 90. Cela se traduit notamment par la modification des largeurs de plage, qui ont tendance à diminuer. Ce comportement traduit le phénomène d'érosion sous-marine et de pertes sédimentaires dans ces secteurs. Les reculs de plage observés dans les zones enrochées entre 1987 et 2013 sont de l'ordre de 30 à 70 m.

Le bilan sédimentaire général du Grand Delta du Rhône décroît depuis 1872 et devient négatif à partir des années 80s. Le déficit le plus important concerne la période la plus récente, entre 2006 et 2013. Cela est dû à une diminution lente et continue des gains sédimentaires aux embouchures (liées à la réduction du nombre de crues depuis la fin du Petit Age Glaciaire, à la revégétalisation du bassin versant et à la construction de barrages) ainsi qu'au niveau des flèches (Beauduc, Gracieuse), du fait des pertes sédimentaires vers le large. Par ailleurs les pertes sédimentaires dans les secteurs en érosion sous-marine augmentent et s'accélèrent, en particulier devant les Saintes-Maries-de-la-Mer et sur le littoral de Faraman.

3 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

Cinq stations météo sont présentes dans le Delta du Rhône ou à proximité.

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		

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).

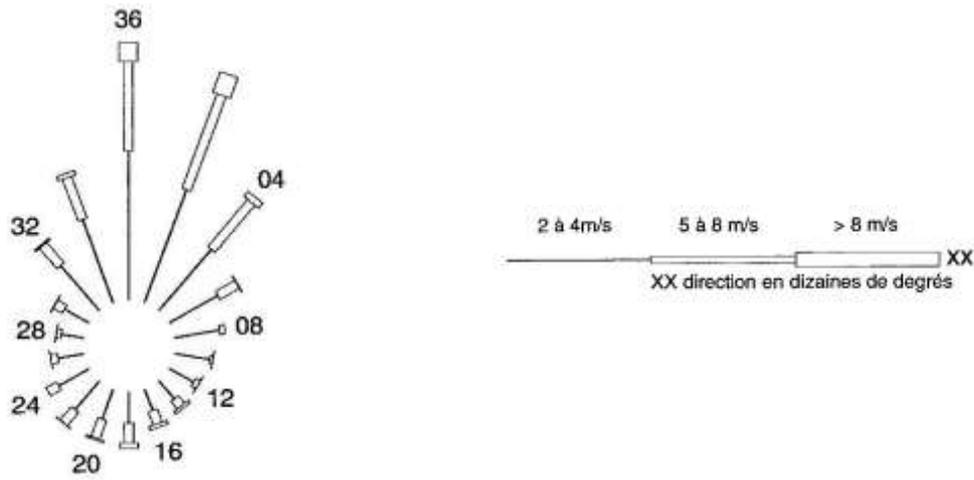


Figure 25. rose des vents à Nîmes-Courbessac (source Météo-France)

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.

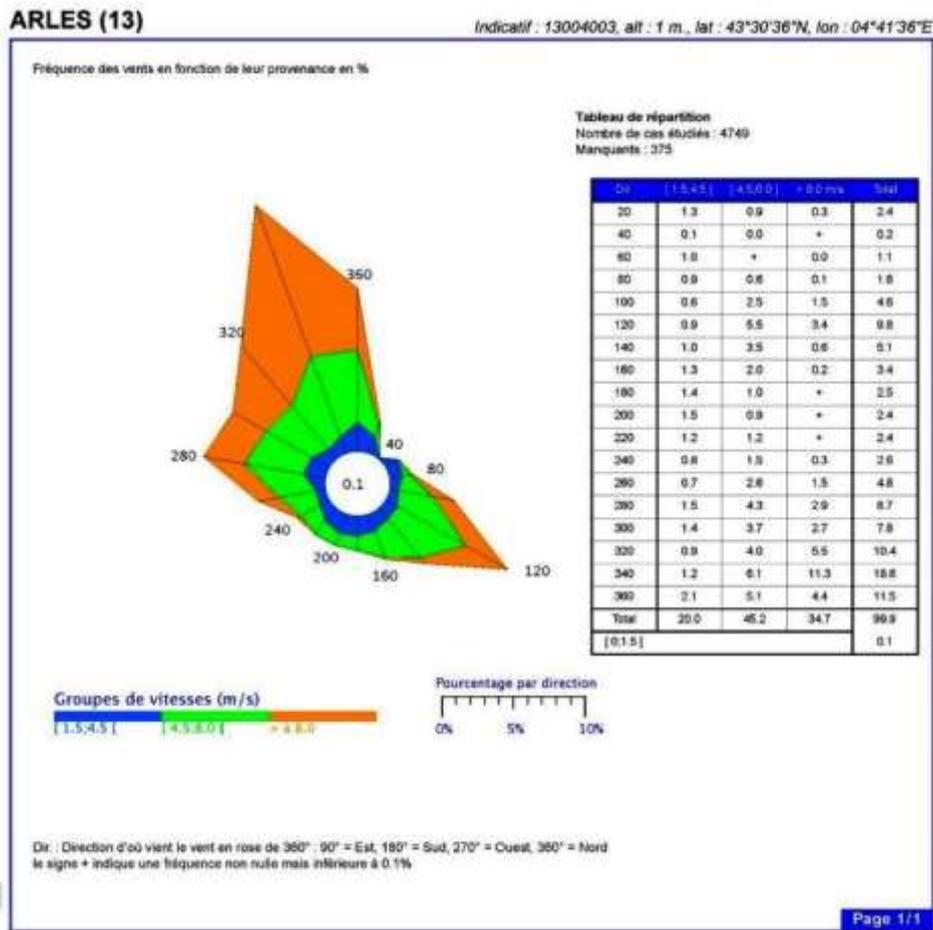


Figure 26. Rose des vents à Arles Tour du Valat

Ce sont les vents du Sud qui jouent un rôle en tempête, le mistral éloignant au contraire les masses d'eau du rivage.
Retenir les vitesses maximales, est donc sécuritaire.

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.

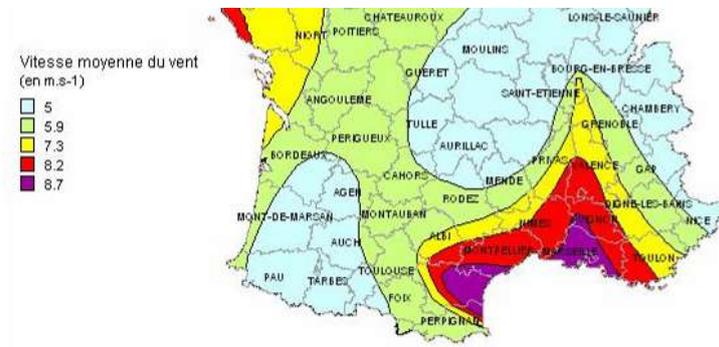


Figure 27. Carte de France des vents moyens (extrait)

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.

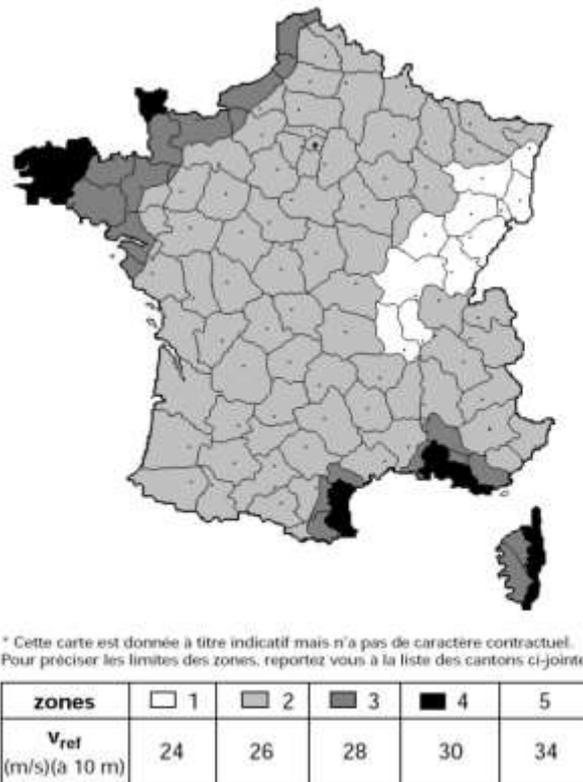


Figure 28. Vent de référence (source eurocode 1)

La vitesse de vent pour une période de retour T en années est donnée par :

$$\frac{V_T}{V_{50}} = \sqrt{\frac{1 - 0,33 \cdot \ln(-\ln(1 - 1/T))}{2,29}}$$

soit par le tableau suivant :

Tableau 5. 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 0,81 fois celle pour 50 ans. Par exemple, pour une vitesse de vent cinquantennale de 105 km/h comme en Camargue, la vitesse millénale vaut 126 km/h et la vitesse quinquennale 85 km/h.

3.2 VENTS OBSERVES LORS DES TEMPETES

Le site Ventusky.com permet de visualiser les vents à 10m du sol lors d'évènement passés.

En novembre 1982, les rafales ont dépassé les 100km/h pendant plus de 24h, avec un pic à 110km/h dans la nuit du 7 au 8. Durant cette même période, le vent moyen était de 70 km/h en provenance Est-Sud-Est puis Sud Est.

En Novembre 2014 c'est un vent d'Est de 40 km/h en moyenne qui a agité la mer ; les rafales étaient de 65 km/h.

En Mars 2018 c'est un vent du Sud-Est de 50 à 70 km/h en moyenne qui a agité la mer lors d'une partie de la nuit du 28/02 au 01/03 ; les rafales sont montées jusqu'à 108 km/h dans la nuit.

En Novembre 2019 c'est un vent de Sud-Sud-Est de 45 à 60 km/h en moyenne qui a agité la mer ; les rafales étaient de 85 km/h.

Une vitesse de vent moyenne de **40km/h** semble donc être le seuil bas des tempêtes ayant un impact sur les ouvrages ; il n'a pas dépassé les 70km/h. En revanche les rafales peuvent atteindre facilement les 100 km/h.

Dans les modélisations, un vent de direction 121° a été utilisé, avec des vitesses allant de 70km/h à 108km/h, suivant l'intensité de l'évènement.

4 CHANGEMENT CLIMATIQUE ET ELEVATION DU NIVEAU MARIN

L'élévation du niveau marin ne modifie pas les modélisations utilisées pour déterminer la résistance des ouvrages mais la période de retour de ces derniers, qui seront de plus en plus fréquents.

La figure ci-dessous illustre ce propos :

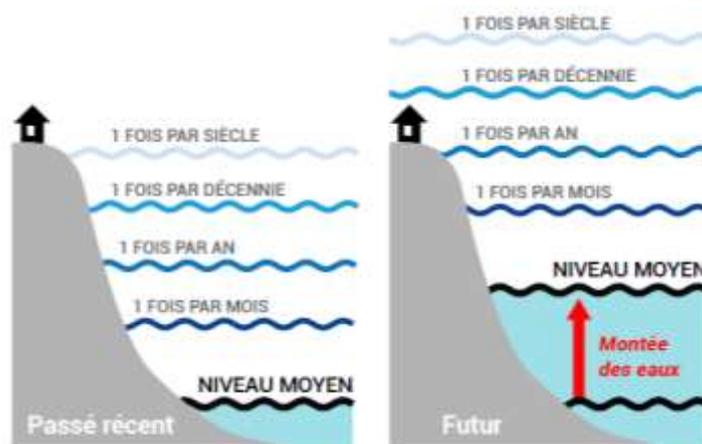


Figure 29. Schéma des conséquences de l'élévation du niveau marin moyen sur les événements rares (source : Citoyens pour le climat)

Il est prévu une élévation d'une dizaine de centimètres sur la période de validité de l'étude et de l'ordre de 50 cm d'ici 2100.

Les niveaux de protection étant donnés en niveau marin, il n'y a pas d'influence de l'élévation du niveau marin sur ces niveaux.

5 SEISMES

Suivant le zonage sismique de la France en vigueur depuis le 1^{er} mai 2011, et repris dans l'article D563-8-1 du code de l'environnement, l'ouvrage se situe dans une zone de risque faible à très faible. La carte ci-après illustre le zonage au droit de la zone étudiée.



Figure 30. Zonage sismique de la France –zoom sur la Camargue

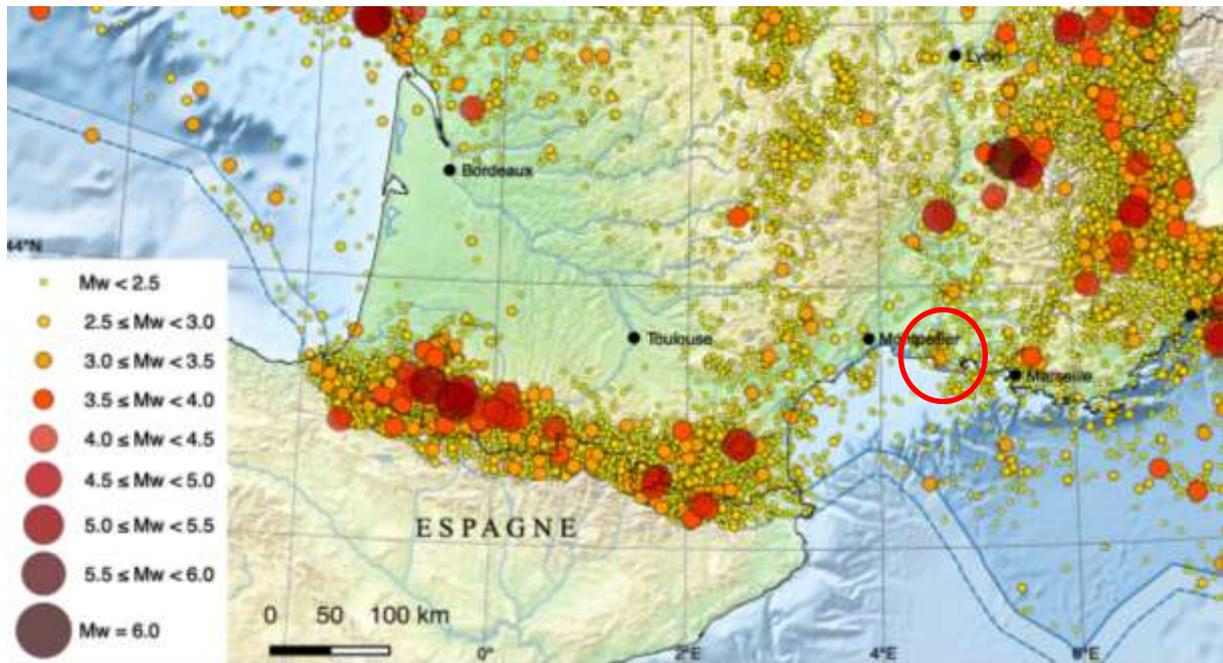


Figure 31. sismicité instrumentale de la France métropolitaine 1962-2020 (source: www.franceseisme.fr).

Seuls 3 séismes de magnitude supérieure à 3 à proximité du système d'endiguement (<100 km) ont été relevés dans le cadre du projet SI-Hex (depuis 1962). Il s'agit d'un séisme de magnitude 3.1 en 1986 à Avignon (60 km des ouvrages), d'un séisme de magnitude 3.6 en 1984 à Fuveau (70 km des ouvrages) et d'un séisme de magnitude 3.3 en 1978 vers Lodève (95 km des ouvrages).

Aucun n'a été ressenti dans la zone d'étude.

Celui de 1909 à Lambesc, le plus important depuis le XVI^{ème} siècle n'a semble-t-il pas non plus créé de dommages aux ouvrages.

6 TSUNAMI

6.1 DEFINITION

Un tsunami est provoqué par un séisme sous marin ou côtier se produisant à faible profondeur (moins de 50 km de profondeur) et possédant une magnitude d'au moins 6,5. L'amplitude du tsunami généré augmente avec la magnitude du séisme. A partir d'une magnitude 8, le séisme peut générer un tsunami potentiellement dévastateur au niveau d'une mer ou d'un bassin océanique. Les séismes dont la magnitude dépasse 8,7 comme celui du Japon du 11 mars 2011 et celui de Sumatra du 26 décembre 2004 (Mw 9,2) induisent des tsunamis majeurs qui provoquent des inondations le long des côtes de tout le bassin océanique concerné.

6.2 HISTORIQUE ET REFERENCE

Depuis le début du XX^{ème} siècle, une centaine de tsunamis ont été observés en Méditerranée et dans les mers qui y sont reliées (Mer de Marmara et Mer noire), soit 10 % du total des tsunamis observés sur la planète.

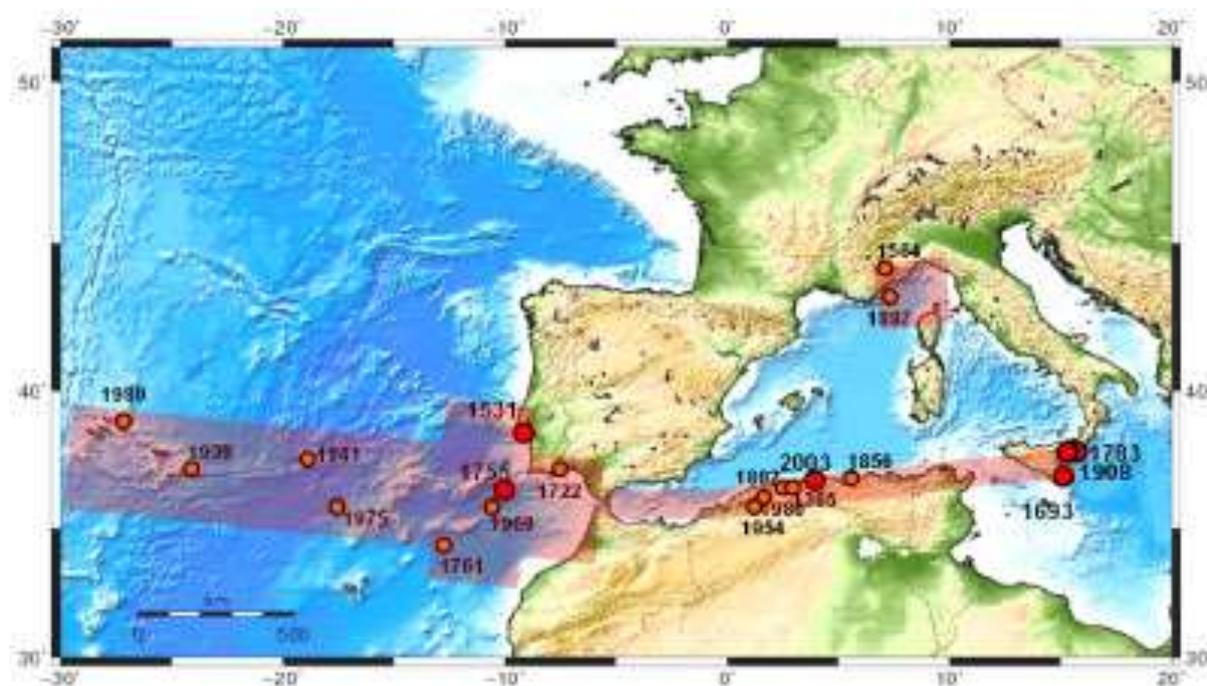


Figure 32. Principaux séismes tsunamigènes en Atlantique nord-est et Méditerranée occidentale. (Les bandes rouges correspondent aux zones sismiques tsunamigènes)

En Méditerranée occidentale, 11 séismes ont induit des tsunamis recensés (voir carte ci-dessus), dont deux en mer de Ligurie en 1564 et 1887 et un au large de l'Algérie en 2003, qui ont eu un impact sur les côtes métropolitaines.

En Sicile, à la limite de la zone surveillée par le centre d'alerte, de très nombreux séismes ont été à l'origine de tsunamis, dont 3 majeurs entre 1693 et 1908, mais ces derniers n'impactent pas la métropole.

La menace pour les côtes françaises vient principalement de la sismicité le long des côtes algériennes où les vagues du tsunami arrivent sur les côtes françaises avec un délai de 1 h à 2 h par rapport au déclenchement du séisme.

L'autre menace est associée à la sismicité de la mer de Ligure où dans ce cas les côtes françaises sont en situation de champ proche avec une possibilité d'arrivée des vagues en moins de 10 minutes ; le littoral camarguais est néanmoins protégé par l'orientation de la cote à l'Ouest de Toulon.

D'après les connaissances actuelles, la région PACA n'a pas connu de dommages considérables liés aux tsunamis

En moyenne, la Grande Bleue vit un grand tsunami par siècle. Ces raz de marée sont générés par des séismes eux-mêmes provoqués par le glissement de la plaque africaine sous la plaque eurasiennne. Ce fut le cas en 1693, 1793 et 1908 en Sicile puis en 2003 en Algérie.

1908, un tremblement de terre de magnitude 7,0 frappe la région de Messine, en Italie. Le tsunami qui en résulte crée des vagues dépassant parfois 10 mètres de hauteur et fait des milliers de victimes.

Le tsunami du 21 mai 2003 - Boumerdès, Algérie

Le tsunami le plus récent est celui du 21 mai 2003, provoqué par le séisme de Boumerdès de magnitude 6,9. Ce tsunami a été observé le long de toutes les côtes espagnoles et françaises de Méditerranée, et enregistré par de nombreux marégraphes.

Les amplitudes maximales ont atteint plus de 2 m aux Baléares. Aux Baléares, les run-up mesurés ont dépassé 1 m en de nombreux endroits et atteint 3 m localement.

Une enquête de terrain a permis de montrer que huit ports de plaisance de la Côte d'Azur avaient connu des chutes importantes du niveau de la mer (50 cm à 1,5 m), des purges de bassins, de forts tourbillons et courants, des embarcations endommagées, des déplacements de corps morts, compatibles avec des phénomènes de résonances portuaires.

Le long des côtes françaises, les amplitudes du tsunami ont été de l'ordre de la dizaine de cm ; elles ont été sous-estimées car la cadence d'enregistrement des marégraphes n'était que de 10 minutes.

L'absence de tempête en parallèle a fait que cet événement a été neutre pour le système d'endiguement.

Le tsunami du 23 février 1887 - Mer de Ligure, Italie

Le tsunami le plus récent connu en mer Ligure est celui du 23 février 1887, provoqué par un séisme de magnitude estimée à 6,2. Ce tsunami a été observé le long des côtes italiennes et françaises de Méditerranée, et enregistré par quelques marégraphes.

Le long des côtes françaises, la mer s'est tout d'abord retirée à de nombreux endroits. Les run-up maximum observés sont de l'ordre de 2 m à Cannes et Antibes.

Le changement d'orientation de la cote à l'Ouest de Toulon a très fortement limité l'impact sur le littoral camarguais.

Le raz de marée du 6 août 1985 – Golfe de Beauduc

Dans la nuit du 5 au 6 août 1985, entre 23h30 et 1h du matin, un raz-de-marée, composé d'au moins deux vagues, a déferlé sur la côte méditerranéenne, noyant le littoral entre les Saintes-Maries-de-la-Mer et Port-Saint-Louis-du-Rhône.

Le raz-de-marée a probablement été causé par un glissement de terrain sous-marin, faisant suite à un séisme de faible magnitude, à proximité des côtes.

Les vagues provoquent d'importants dégâts, pénétrant de 800 mètres dans l'intérieur des terres, faisant, 12 blessés et une victime. Ce sont principalement des campeurs, situés à Beauduc, au Sud du système d'endiguement, qui ont été victimes de l'inondation, qui a emporté tentes et caravanes ; il y a également eu des dégâts sur les bateaux de Port Gardian.



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

ETUDE DE DANGERS
DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT MARITIME
CAMARGUE INSULAIRE

DOCUMENT B

CHAPITRE N°5 : DESCRIPTION

Version	Date	Commentaires
0	27/02/2023	Version initiale
1	23/03/2023	Reprises suite à la relecture interne

SOMMAIRE

0	Le sous Sol.....	3
0.1	Géologie.....	3
0.2	Sondages géotechniques	4
0.3	Données géophysiques	10
1	Les ouvrages	11
1.1	La digue à la mer, de l'embouchure du petit Rhône au pertuis de la fourcade (DM 0 à 3.9) 11	
1.2	La digue à la mer, du pertuis de la fourcade au pertuis de rousty (DM 4 à 8.3)	27
1.3	La digue à la mer, du pertuis de Rousty au pertuis de la comtesse (DM8.3 à 15.9) .	30
1.4	La digue à la mer, du pertuis de la comtesse à la digue des Toscans (DM 15.9 à 21.75) 32	
1.5	La digue à la mer, de la digue des Toscans au Vieux Rhône (DM 21.75 à 26)	34
1.6	La protection à l'Est du Vieux Rhône (DM 26 à la fin)	37
1.7	Les ouvrages annexes : épis et brise lame	39
1.8	Dispositifs de régulation des écoulements.....	44
2	Les ouvrages projetés.....	46
3	Potentiels de danger	47
3.1	Ecoulements autour de la zone protégée	47
3.2	Identification et caractérisation des potentiels de dangers	47
3.3	Caractérisation des potentiels de danger	48
3.4	Ecoulement pour les différents niveaux de protections.....	53

Ce chapitre décrit les ouvrages constituant le système de protection de la camargue insulaire vis-à-vis de l'aléa marin. Le sous sol est préalablement analysé puis les potentiels de danger, c'est-à-dire les façons qu'à la mer de se retrouver dans la zone protégée sont présentés.

0 LE SOUS SOL

0.1 GEOLOGIE

Le système d'endiguement est situé sur des horizons géologiques de l'Holocène, comprenant des sables, limons et dépôts vaseux.

Plus précisément ils répondent aux catégories suivantes :

- NMz : Sables éoliens des dunes littorales
- RMz3 : Sables remaniés d'anciens cardons
- Mz2 : Sables légèrement envasés de l'arrière plage
- Mz3 : Sables d'anciens cordons littoraux plus ou moins éolisés en surface
- Mz4 : Sables limoneux de dépression au sein des cordons
- LMz1S : Limons argileux des « Radeaux »
- FzR : Limons, silts et sables des levées
- FMz1 : Limons fluviatiles consolidés
- FMz2 : Limons de colmatage d'anciens bras
- LM : Vase des étangs



Figure 1. Carte géologique (source infoterre – BRGM)



Figure 4. Sondage BRGM 2 : carte et interprétation

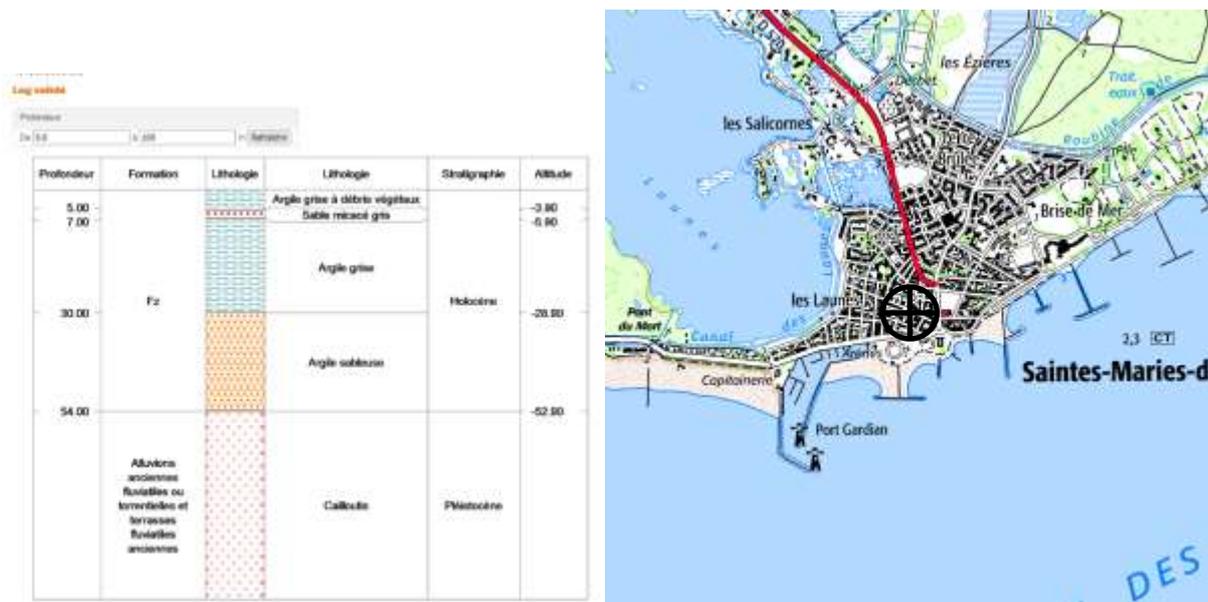


Figure 5. Sondage BRGM 3 : carte et interprétation

Il y a également 2 sondages qui sont situés dans l’environnement des ouvrages, au Sud de la protection (voir ci-dessous).

Ils indiquent que les sols sont sableux au niveau des plages et argilo-tourbeux au niveau des étangs. Les digues en recul sont donc sur des sols plus imperméables que celles en front de mer analysées ci-dessus.



Figure 6. Sondage BRGM 4 : carte et interprétation (Beauduc, à 2.5km au sud ouest des ouvrages)

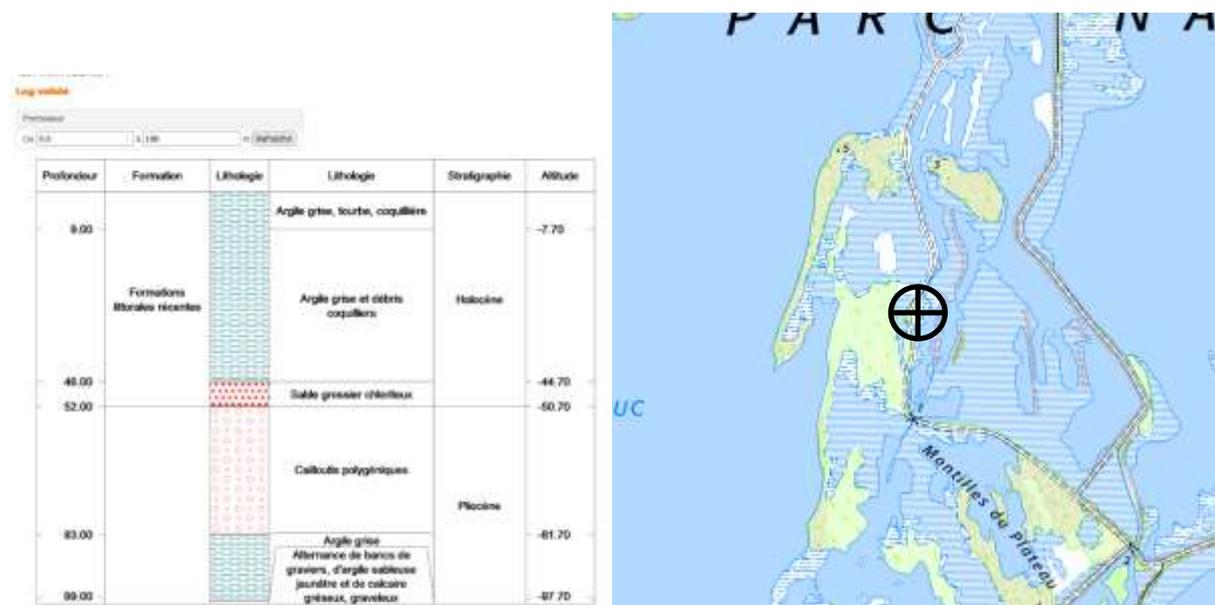


Figure 7. Sondage BRGM 5 : carte et interprétation (à 5km au sud des ouvrages)

0.2.1.2 SYMADREM

Pour l'étude littorale et des missions locales, comme Digue 2020 ou les épis, le SYMADREM a commandé des campagnes géotechniques.

Des sondages géotechniques ont été réalisés par GINGER CEBTP en juillet-août 2018 le long de la digue à la mer.

La localisation des sondages de la zone située entre le petit Rhône et la plage Est est présentée sur les figures ci-dessous.

Ce sont des essais de pénétration statique ainsi que des sondages carottés avec prélèvements d'échantillons. L'espacement entre deux sondages est d'environ 1 km.

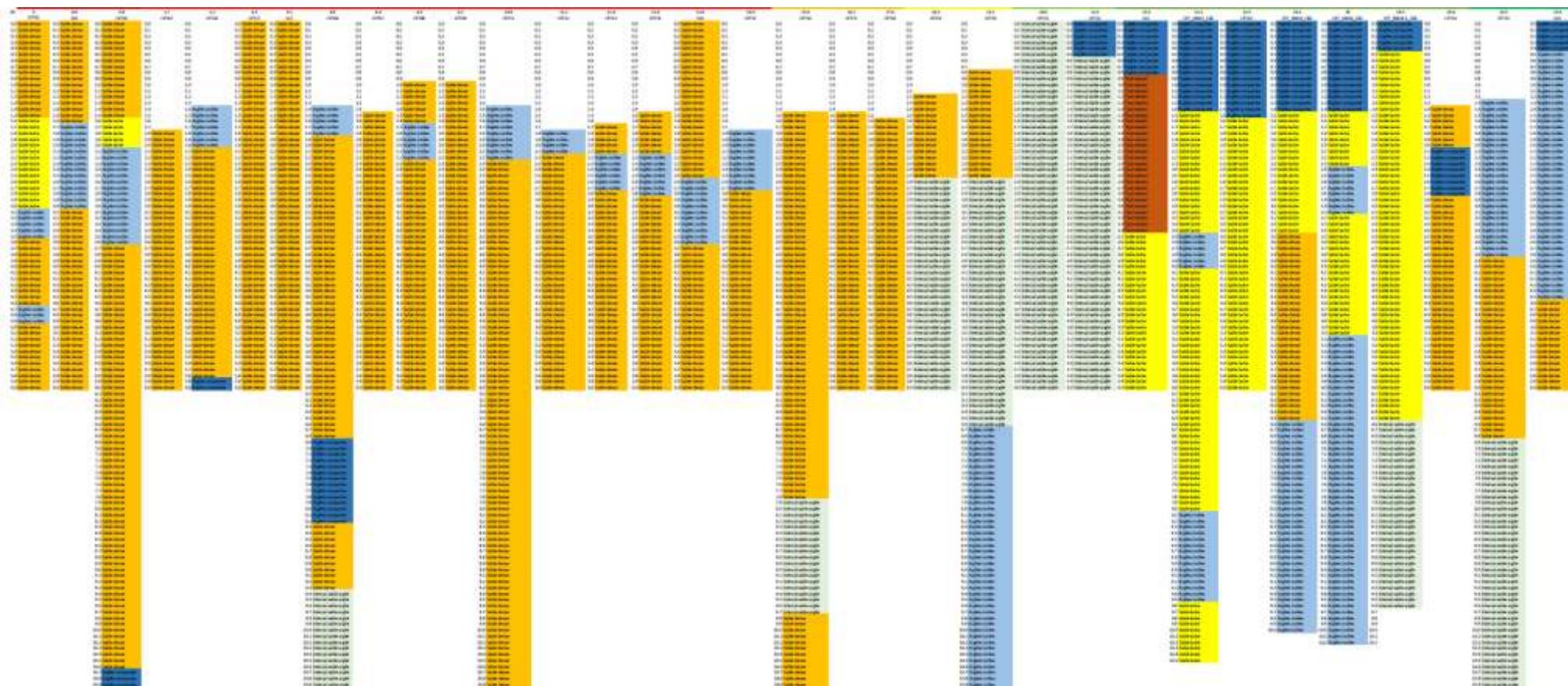


Figure 8. Localisation des sondages géotechniques

Les résultats de sondages montrent des conditions de sol principalement sableuses avec la présence d'un horizon argileux relativement meuble d'épaisseur variant de 1,7 m à moins de 1 m. Une coupe schématique des sondages entre le petit Rhône et le Vieux Rhône est présentée ci-dessous.

La DDTM (en charge de la maîtrise d'ouvrage des ouvrages invariants dans les années 2000) a mentionné avoir rencontré des lentilles argileuses molles pendant les travaux. Ce matériau ne pouvant assurer la portance des ouvrages en enrochements, il avait été purgé sous l'emprise de l'ouvrage et remplacé par du sable. Le risque de rencontrer des couches de sols meubles reste non négligeable.

Figure 9. Résultats des sondages géotechniques



Légende :

Argiles molles	Argiles compactes	Tout venant
Sable dense	Intercal sable argile	Sable lache

PK	0 CPT01	0.8 S02	0.8 CPT02	1.7 CPT03	2.2 CPT26	4.2 CPT27	4.2 S27	4.8 CPT06
0.0	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
0.1	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
0.2	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
0.3	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
0.4	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
0.5	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
0.6	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
0.7	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
0.8	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
0.9	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
1.0	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
1.1	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
1.2	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
1.3	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
1.4	Sable lache	Sable lache	Sable lache	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Argiles molles
1.5	Sable lache	Sable lache	Sable lache	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Argiles molles
1.6	Sable lache	Sable lache	Sable lache	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Argiles molles
1.7	Sable lache	Argiles molles	Argiles molles	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Argiles molles
1.8	Sable lache	Argiles molles	Sable lache	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Argiles molles
1.9	Sable lache	Argiles molles	Sable lache	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense
2.0	Sable lache	Argiles molles	Sable lache	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense
2.1	Sable lache	Argiles molles	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
2.2	Sable lache	Argiles molles	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
2.3	Sable lache	Argiles molles	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
2.4	Sable lache	Argiles molles	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
2.5	Sable lache	Argiles molles	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
2.6	Sable lache	Argiles molles	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
2.7	Sable lache	Argiles molles	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
2.8	Sable lache	Argiles molles	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
2.9	Sable lache	Argiles molles	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
3.0	Sable lache	Argiles molles	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
3.1	Argiles molles	Argiles molles	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
3.2	Argiles molles	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
3.3	Argiles molles	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
3.4	Argiles molles	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
3.5	Argiles molles	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
3.6	Sable dense	Sable dense	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
3.7	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
3.8	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
3.9	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
4.0	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
4.1	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
4.2	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
4.3	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
4.4	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
4.5	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
4.6	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
4.7	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
4.8	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
4.9	Argiles molles	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
5.0	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
5.1	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
5.2	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
5.3	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
5.4	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
5.5	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
5.6	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
5.7	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
5.8	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense
5.9	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Argiles compactes	Sable dense	Sable dense	Sable dense
6.0	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Sable dense	Argiles compactes	Sable dense	Sable dense	Sable dense
6.1			Sable dense					Sable dense
6.2			Sable dense					Sable dense

Figure 10. Résultats des sondages géotechniques (grisé : dans digue), zoom au droit du village

0.2.2 *Caractérisation du sol*

Ces sondages mettent en avant une fondation globalement sableuse mais avec une couche d'argile, d'épaisseur variable, en fondation superficielle. Plus globalement les sondages en grande profondeur indiquent des alternances sable/argile liées à l'historique du delta qui a fortement varié. Les couches superficielles sont liées aux zones de plages et de marais.

Malgré la présence de ces argiles, la partie à l'Ouest du pertuis de la Comtesse comprend une exposition moyenne au phénomène de gonflement retrait ; elle est même faible à l'Est.

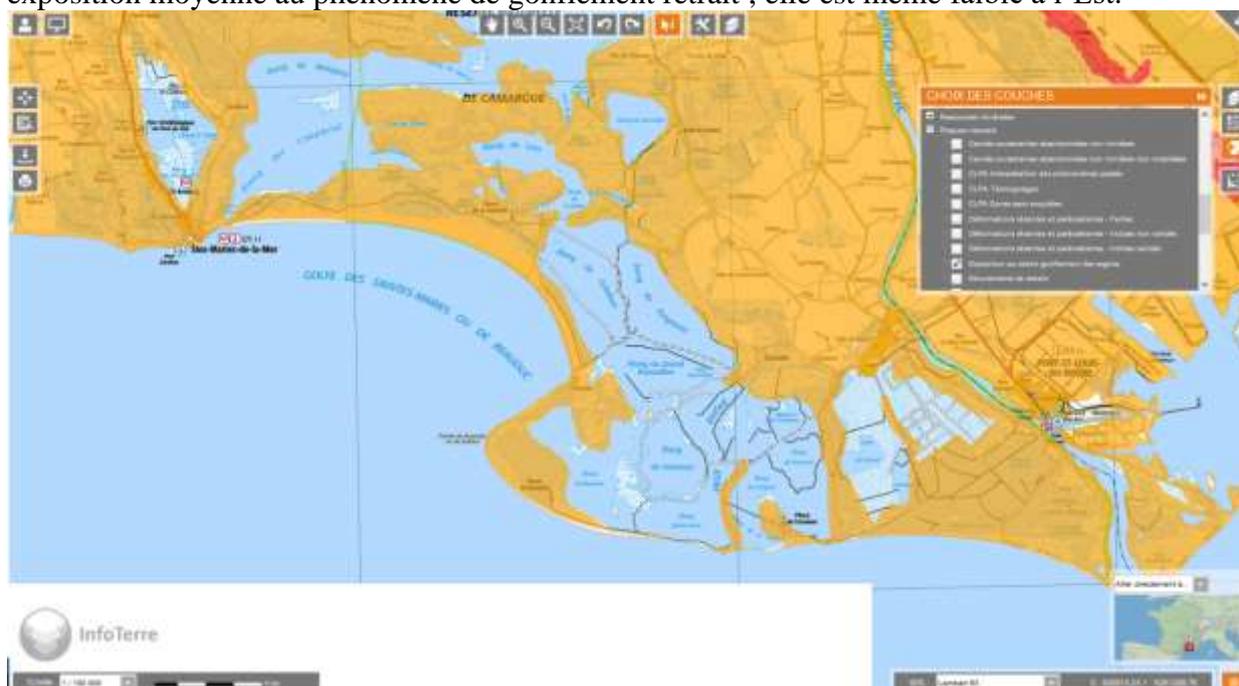


Figure 11. Retrait gonflement des argiles (source BRGM) : exposition faible à moyenne

0.3 DONNEES GEOPHYSIQUES

Il n'y a pas de campagne géophysique réalisée au droit du système d'endiguement.

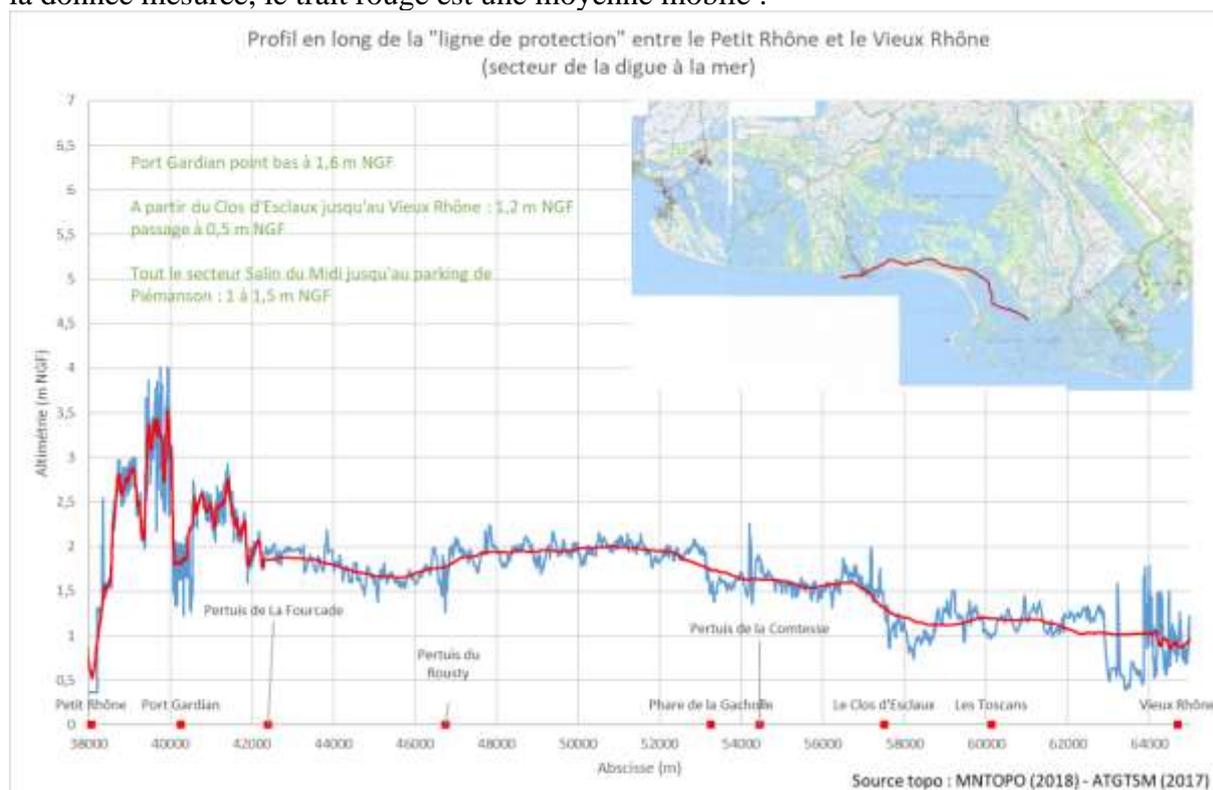
1 LES OUVRAGES

La création d'un ouvrage de protection contre les entrées marines date du milieu du XIX^{ème} siècle, afin de maîtriser les niveaux d'eau dans l'île de Camargue.

Il n'y a pas eu de gestion lors des 30 premières années d'existence de la digue et de nombreuses réparations ont été nécessaires à la fin du XIX^{ème} siècle.

Les ouvrages décrits ci-dessous sont ceux actuellement présent en ligne de défense contre les incursions marines.

Le profil en long de la partie système d'endiguement est présenté ci-dessous, le tracé bleu est la donnée mesurée, le trait rouge est une moyenne mobile :



1.1 LA DIGUE A LA MER, DE L'EMBOUCHURE DU PETIT RHONE AU PERTUIS DE LA FOURCADE (DM 0 A 3.9)

Cet ouvrage a la particularité d'être à proximité immédiate des enjeux (centre urbain des Saintes Maries de la mer) et de l'aléa (mer).

Des épis et brise-lames sont alors présents sur tout le linéaire de ce secteur en érosion ; ils sont présentés au §1.7.

La digue présente une géométrie variable, répartie en 10 sous secteurs présentés ci-après. L'ouvrage est quasi-intégralement protégé par des enrochements.

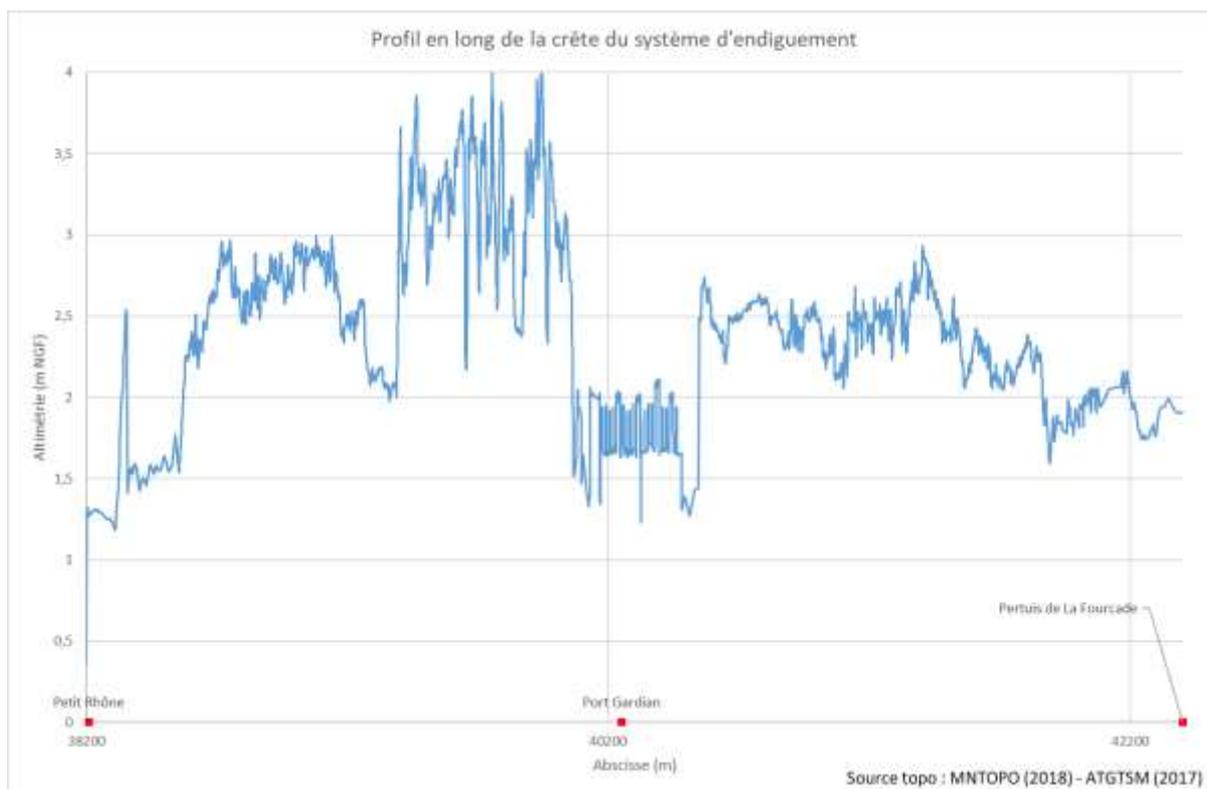


Figure 12. Cote des ouvrages de protection aux Saintes-Maries-de-la-Mer

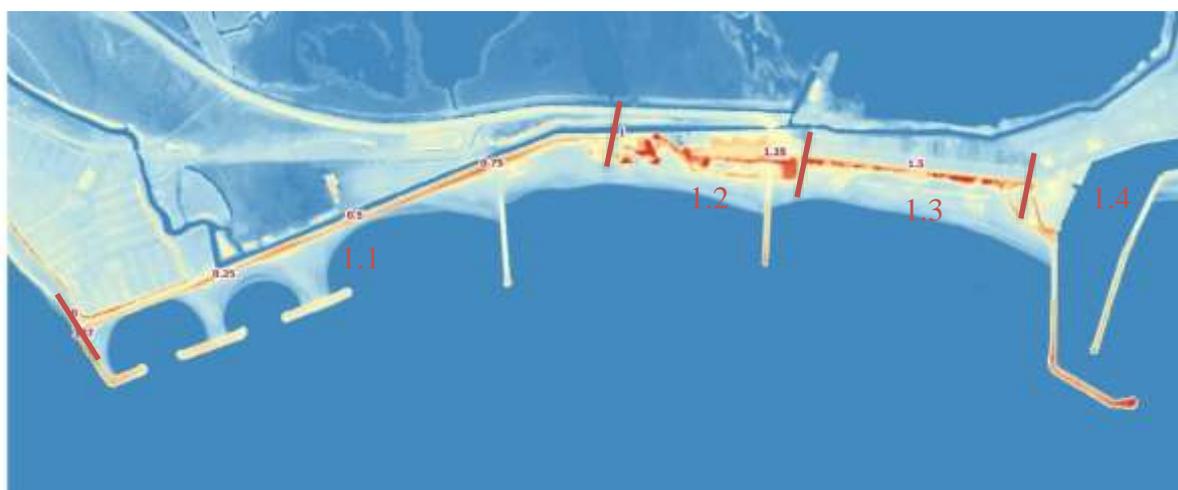


Figure 13. Levé topographique au droit du tronçon (1/2)

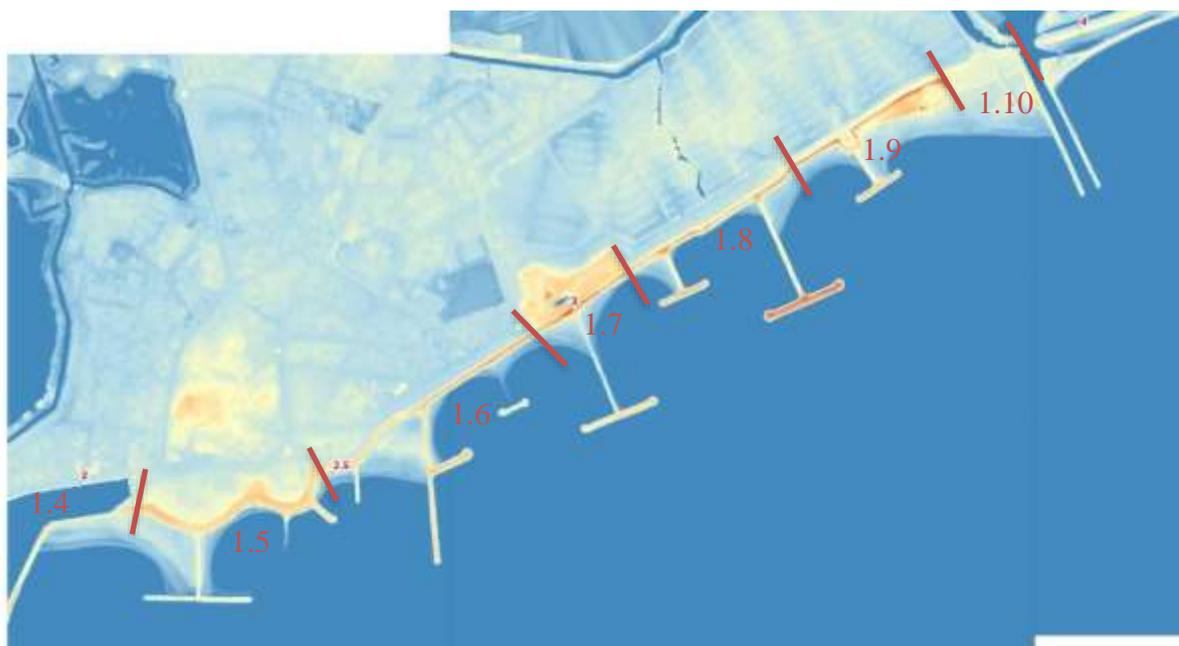


Figure 14. Levé topographique au droit du tronçon (2/2)

1.1.1 DM 0 à 1 (Clos du Rhône)



Figure 15. Localisation du tronçon 1

La coupe type du linéaire est une digue argilo-sableuse protégée coté mer par une carapace en enrochement (1 à 2 tonnes) qui monte au dessus de la piste et descend sur un sabot améliorant sa stabilité. Il est à noter le niveau d'étanchéité est inférieur à la crête de l'ouvrage ; en effet les enrochements du talus amont se retrouvent au dessus de la piste.

Le sommet des ouvrages est au-delà de 2 mNGF.

Il existe des points bas localisés liés aux accès à la plage.

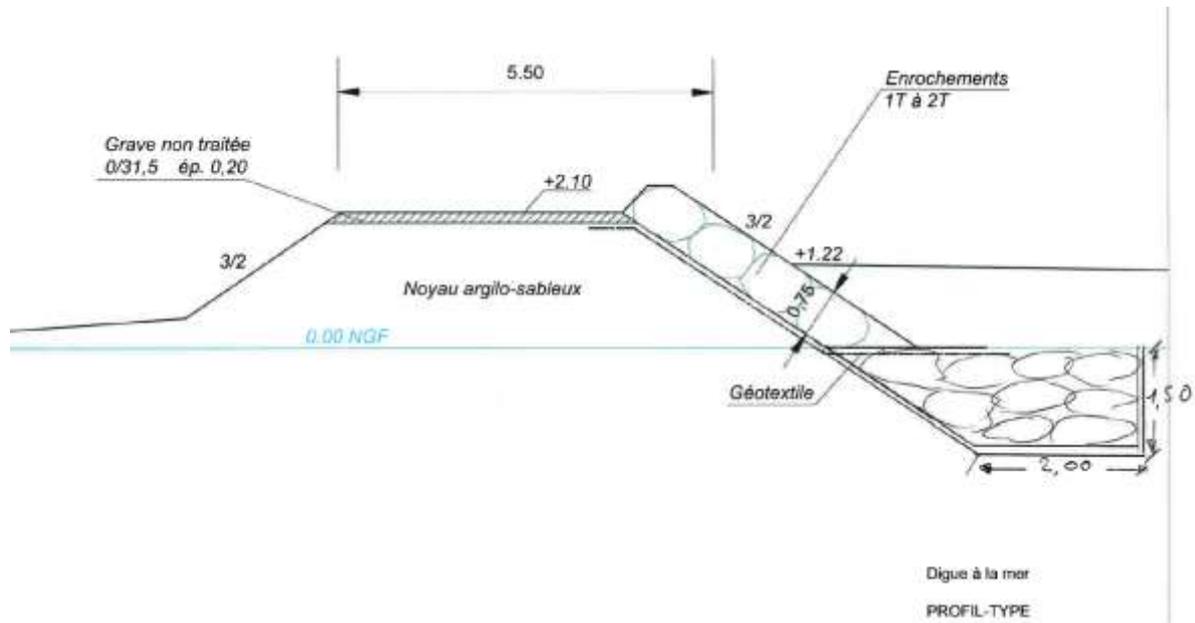


Figure 16. Coupe type du tronçon



Photo 1. Vue de l'extrémité ouest de la protection



Photo 2. Secteur du Clos du Rhône : enrochements entre 2.4 et 2.7 ; piste entre 1.4 et 1.6 mNGF

1.1.2 DM 1 à 1.3 (Crin Blanc)



Figure 17. Localisation du tronçon 2

Un petit massif dunaire est présent au niveau de la résidence Crin Blanc.

En dehors des zones de raccordement qui sont enrochées, il n'y a pas d'élément technique dans le corps de l'ouvrage ; c'est sa géométrie qui assure son efficacité.

L'ouvrage culmine à plus de 3m pour une largeur de l'ordre de 20m (pour la partie supérieure à 2mNGF).

Il existe néanmoins un point bas lié à un accès où l'ensemble reste supérieur à 2.15mNGF.

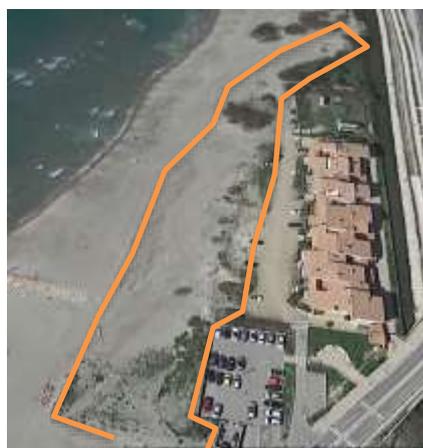


Figure 18. Vue du secteur de Crin Blanc

1.1.3 DM 1.3 à 1.7 (Avenue aubanel)



Figure 19. Localisation du tronçon 3

Sur ce linéaire l'ouvrage est maçonné avec deux parements verticaux et une largeur en crête d'un peu plus de 3m.

- le mur coté zone protégée mesure environ 1m de haut
- il y a une piste en crête de 3-4m de large
- le mur coté mer culmine environ 70 cm au dessus de la crête
- un massif dunaire est majoritairement présent coté mer, contre le mur.



Photo 3. Vue du secteur bétonné



Photo 4. Secteur Av . Aubanel

1.1.4 DM 1.7 à 2.1 (Port Gardian)



Figure 20. Localisation du tronçon 4

La promenade de Port Gardian, située aux abords immédiats du centre-ville des Saintes-Maries-de-la-Mer.

Ce secteur est protégé de l'agitation par les épis du port ; les quais sont environ à la cote 1.4 mNGF et la protection présente une altitude moyenne autour de 1,6 mNGF avec des points bas, au droit des ouvertures dans le parapet.

Au raccordement avec le tronçon précédent il y a un point bas, car il n'y a pas de muret, et en cas de vent sud à sud-ouest l'agitation n'est limitée que par la plage ; c'est alors un des premiers points dépassés



Photo 5. Vue du secteur port gardian



Photo 6. Promenade de Port Gardian



Photo 7. Jonction Av. Aubanel - Port Gardian

1.1.5 DM 2.1 à 2.6 (arènes)



Figure 21. Localisation du tronçon 5

Une large crête est présente sur ce linéaire, elle est bétonnée et comprend un petit muret de part et d'autre.

Le parement amont est protégé par des enrochement et localement des dalles béton.

Le talus aval est quasi horizontal : il y a un remblai.



Photo 8. Protection, juste en aval des arènes

1.1.6 *DM 2.6 à 3.05 (parking des amphores)*



Figure 22. Localisation du tronçon 6

L'ouvrage est assez proche de celui de l'avenue Aubanel, sans le massif dunaire. Il y a alors des enrochements sur le parement coté mer.

Le mur coté ville fait environ 1.4m de haut et dépasse de la crête de 10cm environ. La crête a une largeur variable qui est de l'ordre de 4m.



Photo 9. Secteur du parking des amphores

1.1.7 *DM 3.05 à 3.2 (Thalacap)*



Figure 23. Localisation du tronçon 7

Sur ce secteur, les terrains coté ville de la protection ont été remblayés et sont environ à 2.5 mNGF ; l'ouvrage sert alors principalement contre l'effet de la houle.
En dehors d'un accès à la plage qui est bétonné, il y a des enrochements qui sont plus haut que la crête des ouvrages coté mer.



Photo 10. Secteur de Thalacap

1.1.8 DM 3.2 à 3.6 (Parking plage Est)



Figure 24. Localisation du tronçon 8

Ce secteur est similaire à celui du parking des amphores : mur coté ville, crête bétonnée de 3-4m et protection en enrochements coté mer. En revanche, comme pour le secteur juste en amont, les enrochements montent au dessus de la piste de crête.



Photo 11. Secteur Parking plage Est

1.1.9 *DM 3.6 à 3.8 (Fourcade ouest)*



Figure 25. Localisation du tronçon 9

La route remonte au niveau de la crête ; l'ouvrage est alors un remblai avec une protection en enrochement et dune coté mer. Les enrochements se trouvent plus haut que le niveau d'étanchéité.



Photo 12. Vue du raccordement avec le parking de la plage Est

1.1.10 *DM 3.8 à 3.95 (parking)*



Figure 26. Localisation du tronçon 10

Au droit du parking du pertuis de la fourcade, la dune enrochée s'arrête ; seul l'altitude du terrain permet de limiter les entrées d'eau.

Le terrain est à une altimétrie supérieure à 1.75 mNGF.



Photo 13. Limite ouest du secteur

1.2 LA DIGUE A LA MER, DU PERTUIS DE LA FOURCADE AU PERTUIS DE ROUSTY (DM 4 A 8.3)



Figure 27. Localisation du tronçon 11



Figure 28. Localisation du tronçon 12



Figure 29. Localisation du tronçon 13



Figure 30. Localisation du tronçon 14

Les premiers mètres de ce tronçon sont aujourd'hui directement contre la mer et sont pourvus d'enrochement depuis 2013.

Des rechargements avaient été réalisés, comme en 2007, afin de contrer le recul du trait de cote lié à la cellule hydro-sédimentaire qui déplace les matériaux vers l'Est alors que les épis à l'Ouest bloquent les arrivées de matériaux. Ces matériaux ont été emportés à l'Est ou au large.



Figure 31. Est du Pertuis de la Fourcade, en 2008 et en 2018



La coupe type du linéaire est une digue argilo-sableuse.

Sur ce secteur la géométrie est la suivante :

- le talus a une pente de 3/1 minimum coté zone protégée (sauf DM 5,5 : 1) et 3.5/1 en moyenne
- le talus a une pente de 2/1 minimum coté zone mer (sauf DM 5-5,5 : 1.8) et 3.3/1 en moyenne
- largeur en crête 8 m en moyenne (entre 5 et 17 m).

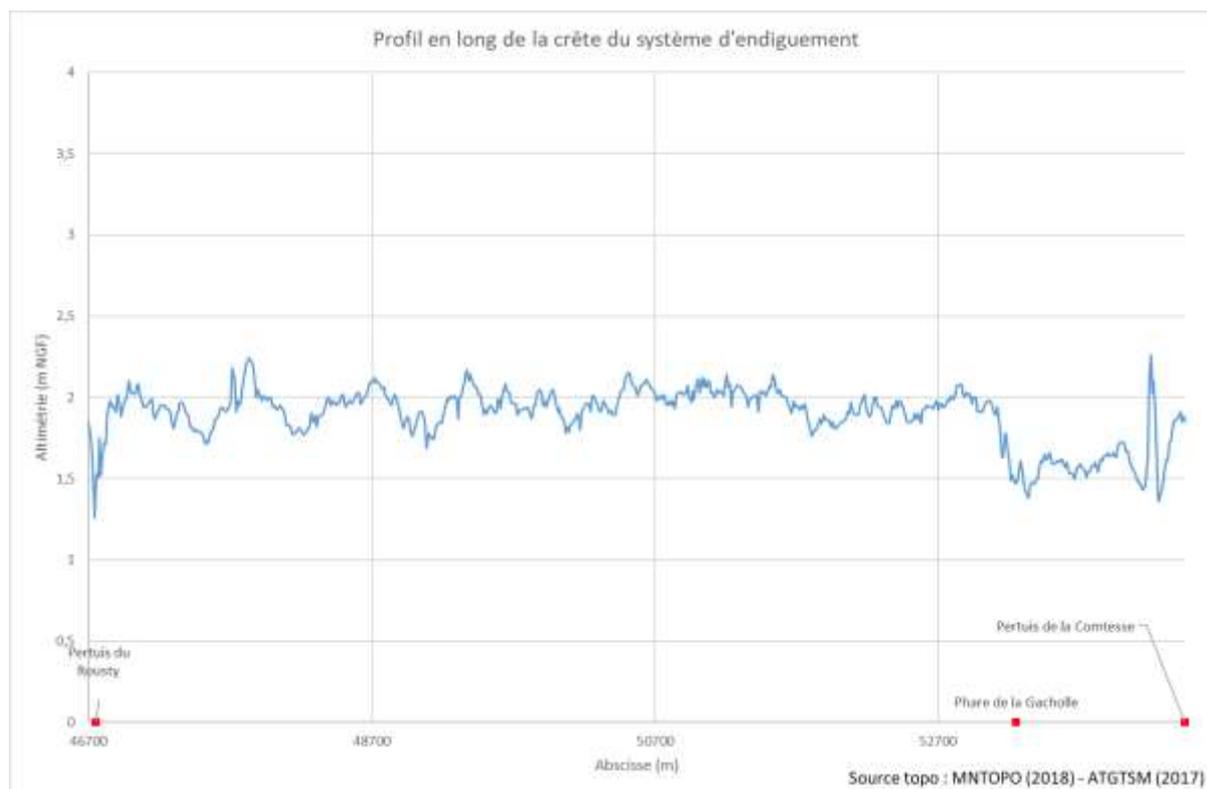
- la hauteur est de l'ordre de 2m coté zone protégée (entre 1.3 et 3 m)
- la hauteur est de l'ordre de 1.3m coté zone protégée (entre 0.8 et 2.5 m)
- La crête des ouvrages varie de près de 2m à l'ouest à 1.5m vers le DM6.5

1.3 LA DIGUE A LA MER, DU PERTUIS DE ROUSTY AU PERTUIS DE LA COMTESSE (DM8.3 A 15.9)



Figure 32. Localisation du tronçon 15

La coupe type du linéaire est une digue argilo-sableuse.



Sur ce secteur la géométrie est la suivante :

- le talus a une pente de 3/1 minimum coté zone protégée (sauf 5500 : 1) et 3.5/1 en moyenne
- le talus a une pente de 2/1 minimum coté zone mer (sauf 5000-5500 : 1.8) et 3.3/1 en moyenne
- largeur en crête 8 m en moyenne (entre 5 et 17 m).
- la hauteur est de l'ordre de 2m coté zone protégée (entre 1.3 et 3 m)
- la hauteur est de l'ordre de 1.3m coté zone protégée (entre 0.8 et 2.5 m)
- jusqu'au DM15, la crête de digue oscille autour de 2mNGF (entre 1.8 et 2.1) ; sur le dernier kilomètre elle est plutôt vers 1.6 mNGF.



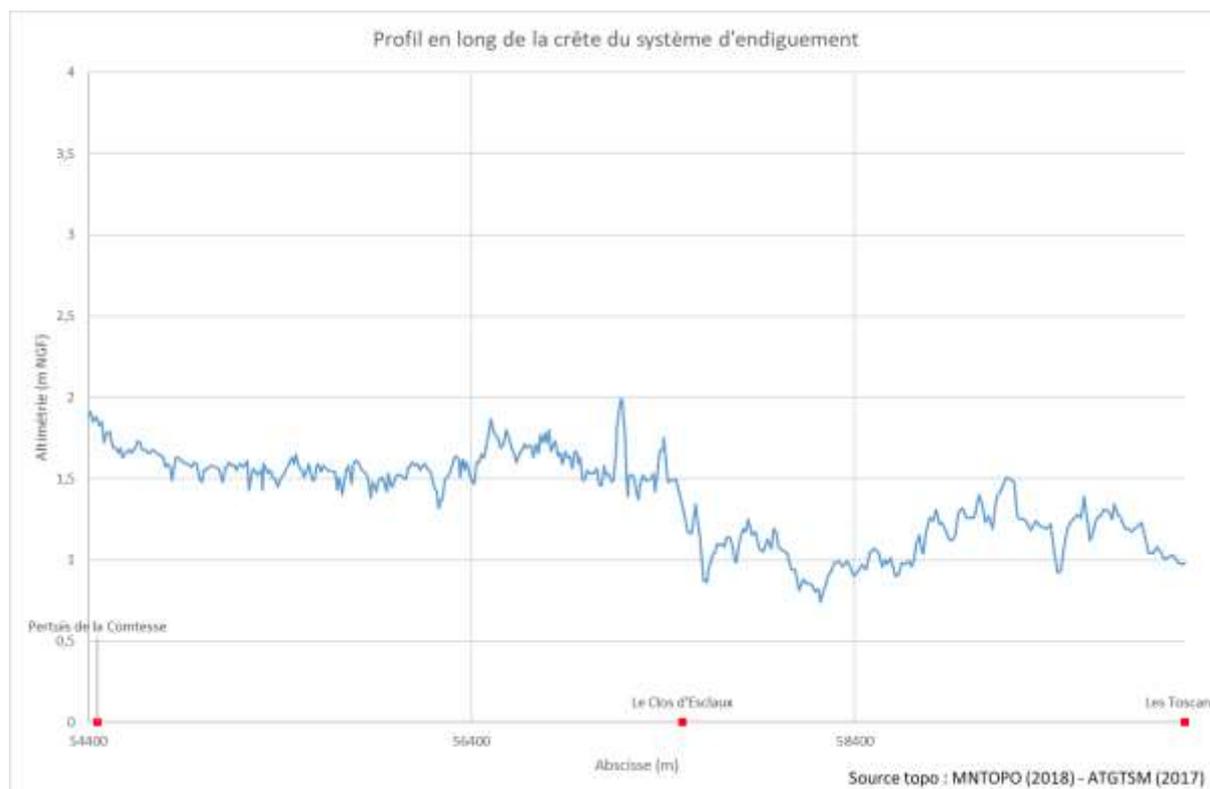
Figure 33. Secteur Rousty-Comtesse

1.4 LA DIGUE A LA MER, DU PERTUIS DE LA COMTESSE A LA DIGUE DES TOSCANS (DM 15.9 A 21.75)



Figure 34. Localisation du tronçon 16

La coupe type du linéaire est une digue argilo-sableuse, intégralement comprise entre des étangs.



La largeur en crête est de 3.50 m environ, les talus ont une pente à 4/3 environ.

A partir du clos d'esclaux (DM19), l'altimétrie de l'ouvrage passe de 1.5/1.8mNGF à 1/1.2 mNGF.

Une zone de 200m vers le DM21, a fait l'objet de travaux liés à un programme de recherche (Digue 2020) ; la zone est alors élargie à 7m en crête avec des ouvrages neufs. La moitié coté Sud est expérimentale et instrumentalisée ; celle au nord est dans la continuité des digues alentours et reste la protection officielle.



Photo 14. Secteur Comtesse – Clos d'Esclaux



Photo 15. Secteur Clos d'Esclaux - Toscans

1.5 LA DIGUE A LA MER, DE LA DIGUE DES TOSCANS AU VIEUX RHONE (DM 21.75 A 26)



Figure 35. Localisation du tronçon 17

L'ouvrage est toujours une digue argilo-sableuse.

A partir de la digue des toscans, qui donne accès à la plage de Beauduc, la digue est une digue-route. La largeur en crête est alors de l'ordre de 9m.

Dans la continuité du secteur précédent, l'altimétrie est faible et varie entre 1 et 1.5mNGF ; au niveau de la partie circulaire de la crête, usée par le trafics, elle descend même à 0.5 mNGF ; . La pente des talus est de l'ordre de 3/2 mais cela à peu d'impact, le rapport largeur/hauteur étant important il n'y a pas de risque lié à la stabilité.

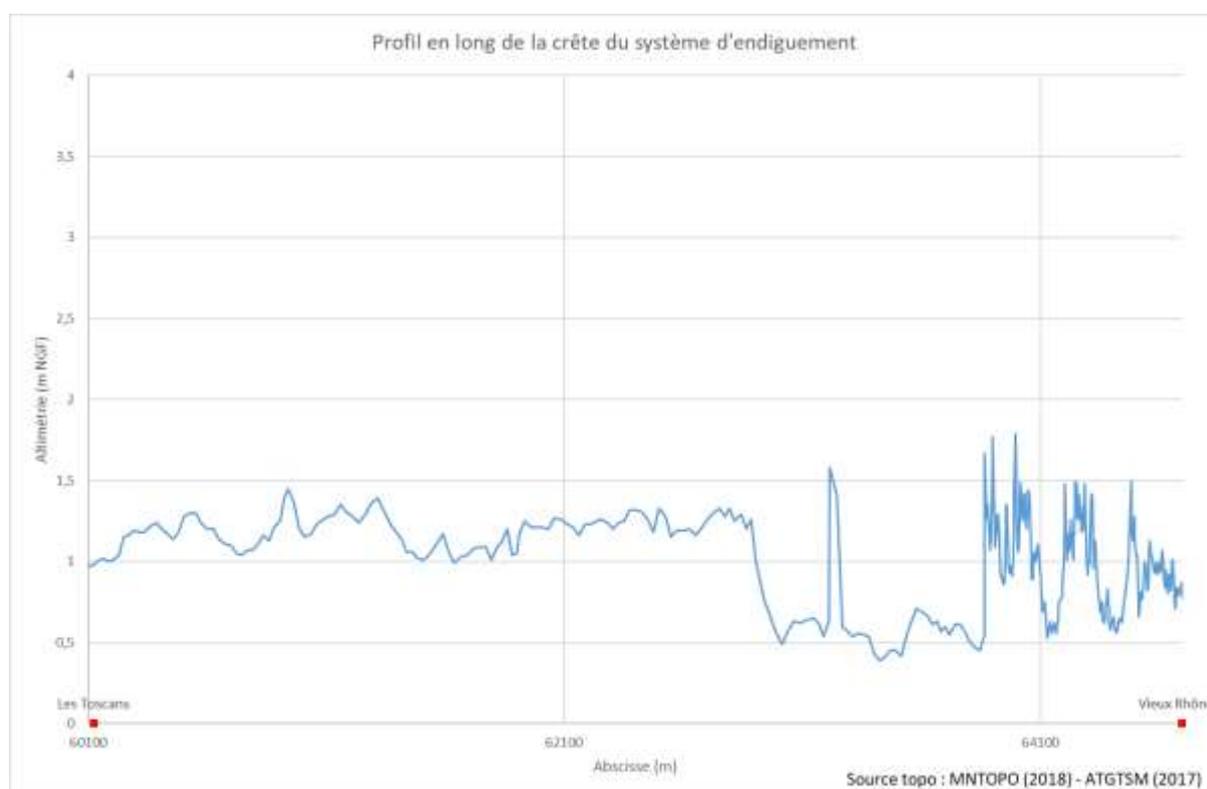




Photo 16. Secteur toscans - vieux Rhône



Photo 17. Secteur toscans - vieux Rhône ; point bas à 0.5m (niveau des marais) dans la zone circulaire ; supérieure à 1m coté mer

1.6 LA PROTECTION A L'EST DU VIEUX RHONE (DM 26 A LA FIN)

Une digue privée, de la Compagnie des Salins du Midi, contourne les marais salants en allant jusque contre la mer. Les coûts d'entretien sont alors importants (solicitation directe de la mer), pour des bénéficiaires privés. Il a été fait le choix de définir le système d'endiguement en recul, comme une protection plus rapprochée du village de Salin de Giraud.

Un terrain continu de plus d'0.85m d'altitude a alors été recherché, dans la continuité de la digue à la mer. Comme pour la majorité des zones au dessus du niveau de la mer en Camargue, c'est un ancien bras du Rhône qui a créé un remblai (voir carte ci-dessous)

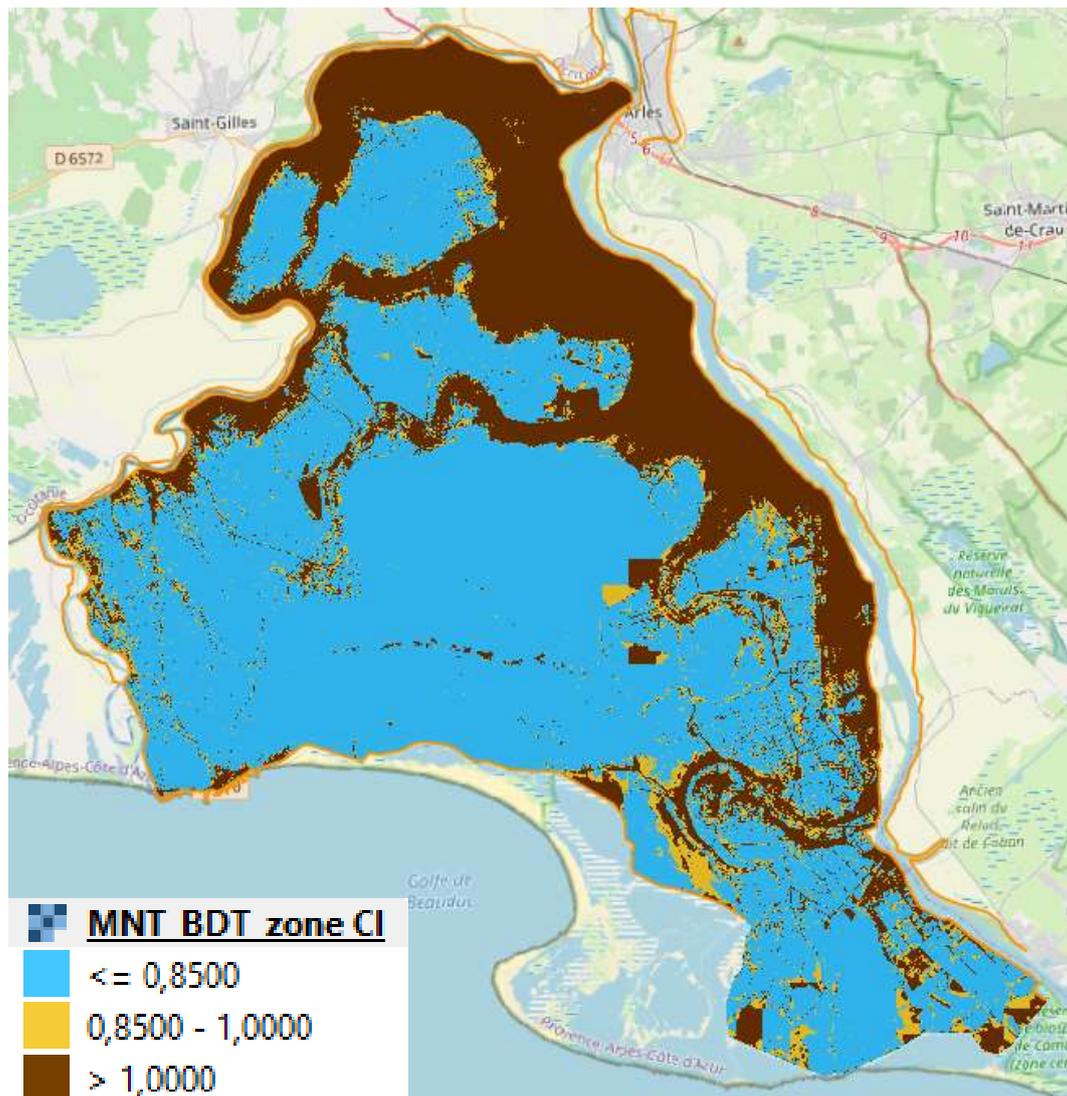


Figure 36. Topographie de la Camargue insulaire, mettant en avant les paléo-chenaux

Le tracé présenté ci-dessous comprend le remblai créé par l'ancien bras du Rhône ; il est alors possible de relier la digue à la mer (DM26) au grand Rhône (GRD315).

Pour encercler en plus salin de Giraud, il faut ajouter la route départementale 36 puis la berge de la roubine faisant face à Barcarin, la route de Paulet et la berge du chenal Sud-Est du village.

C'est ainsi un linéaire de remblai de 20 km qui est retenu pour fermer le système de protection à l'Est du système d'endiguement.



Figure 37. Tracé du système de protection, entre la digue à la mer et le fleuve (rouge)

Aujourd'hui ce linéaire n'est pas soumis aux effets des tempêtes car la digue privée est située plus au Sud. Ne pouvant s'engager sur l'état de cette dernière, elle n'est pas retenue dans l'analyse des niveaux de protection dans les chapitres qui suivent.

1.7 LES OUVRAGES ANNEXES : EPIS ET BRISE LAME

Au droit du village des Saintes-Maries-de-la-Mer, seule zone où la digue est à proximité immédiate de la mer et où les enjeux sont également très proches, des ouvrages ont été mis en œuvre pour limiter les effets des vagues contre la digue.

Il y en a de deux types :

- les épis qui permettent de conserver une zone de plage devant la digue : ils sont perpendiculaires au rivage,
- les brises lame qui ont pour rôle de déclencher le déferlement en amont : ils sont parallèles au rivage.

1.7.1 *Historique*

La création de ces ouvrages est liée au rapprochement du front de mer du village, les cartes historiques de Cassini (XVIII^{ème} siècle) ou de l'état major (milieu du XIX^{ème} siècle) montrent en effet que le village est en recul par rapport à la mer.

Dès les années 30, les premiers épis à claire-voie en bois sont installés aux Saintes-Maries-de-la-Mer et sur le littoral de Faraman au droit de la CSME. Mais ce n'est qu'à partir des années 40 que l'enrochement du littoral commence avec l'installation ponctuelle des premiers épis en dur sur ces secteurs.

Les années 70 marquent une deuxième étape, avec la construction en 1972 par la CSME d'une digue artificielle servant à renforcer le littoral de Faraman, du secteur de la Courbe aux cabanons de Beauduc. Sur la plage de Salin de Giraud, le cordon dunaire est « consolidé » par la construction d'un bourrelet de galets recouverts d'un géotextile, puis ensablé. Ces ouvrages ne sont plus tous entretenus, aucun n'est intégré au système d'endiguement.

La construction du port de plaisance dans les années 80 est associée à l'artificialisation du front de mer des Saintes-Maries-de-la-Mer : digue frontale renforcée par 10 épis dont 3 en T.

Entre 2002 et 2010, le SYMADREM a assuré la réalisation d'un programme de travaux dénommé « Invariants littoral », localisé dans le secteur du centre-ville des Saintes-Maries-de-la-Mer. Ce programme a consisté en des opérations de reprofilage des ouvrages existants, à la construction de huit nouveaux ouvrages de type brise lame et épi en T.

A partir de 2013, à l'est du pertuis de la Fourcade, des enrochements sont posés sur le talus de la digue à la mer, côté mer.

Les figures suivantes présentent successivement, d'Ouest en Est, la localisation et les dates de construction des ouvrages en enrochements existants sur le rivage.

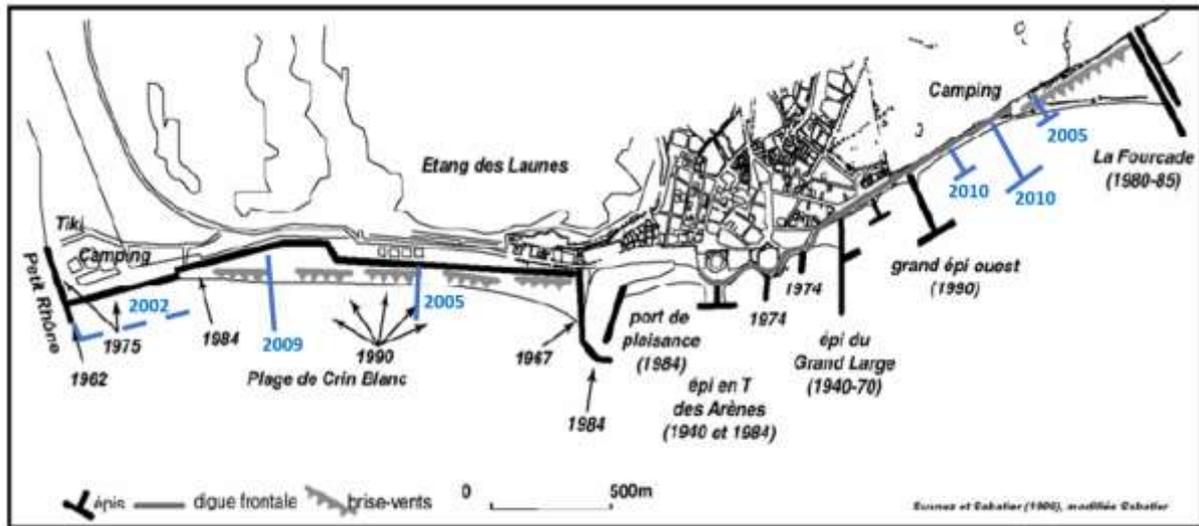


Figure 38. Dates de construction des ouvrages en enrochements sur le secteur centre-ville des Saintes Maries de la Mer (source [L007] – mise à jour Symadrem en bleu)

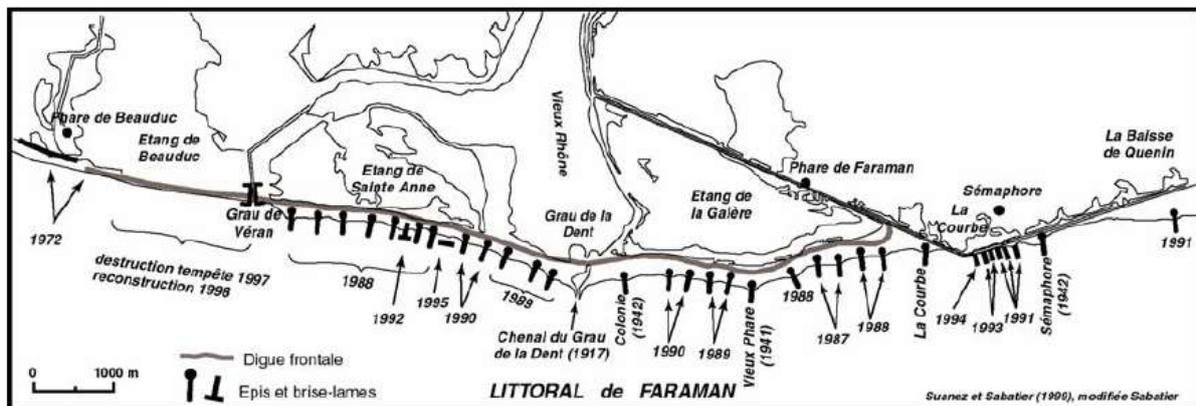


Figure 39. Dates de construction des ouvrages en enrochements sur le secteur du littoral de Faraman (source [L007])

1.7.2 Les ouvrages actuels

Ces ouvrages sont aujourd'hui au nombre de 19 au droit du village et identifiés par une lettre (de A au Clos du Rhône à S au pertuis de la Fourcade)

A	Epi Tenon clos du Rhône
B	Brise lame 1 clos du Rhône
C	Brise lame 2 clos du Rhône
D	Epi ouest de launes
E	Epi est de launes
F	Digue ouest de Port Gardian
G	
H	Epi des arènes
I	Epi Camille 1
J	Epi Camille 2
K	Grand épi est
L	Tenon du grand épi est
M	Petit brise lame Thalacap
N	Grand épi en T de Thalacap
O	Petit épi en T de la Brise
P	Grand épi en T de la Brise
Q	Petit épi en T du poste de secours 2
R	Epi est de la Fourcade
S	Epi ouest de la Fourcade

Figure 40. Liste des épis et brise lame au droit des Saintes Maries de la mer

Le G est l'Epi Est de port gardian, il est prolongé par un mur qui joue un rôle similaire ; il n'y a pas de conventionnement mais ces ouvrages jouent un rôle à la fois vis-à-vis du port (fonction principale) et des submersions marines.



Figure 41. Cartographie des épis et brise lame au droit des Saintes Maries de la mer (1/2)



Figure 42. Cartographie des épis et brise lame au droit des Saintes Maries de la mer (2/2)

1.7.3 Caractéristiques

Le principe a souvent été le même avec, du cœur vers l'extérieur, des enrochements de plus en plus imposants. Et parfois plus importants coté mer que coté ville. Ainsi les blocs les plus massifs peuvent dépasser les 10 tonnes.

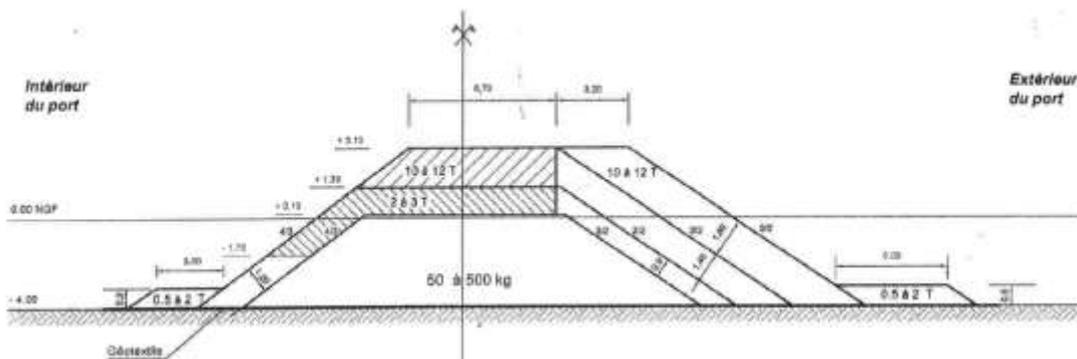


Figure 43. Coupe des confortements d'épis : exemple épi F

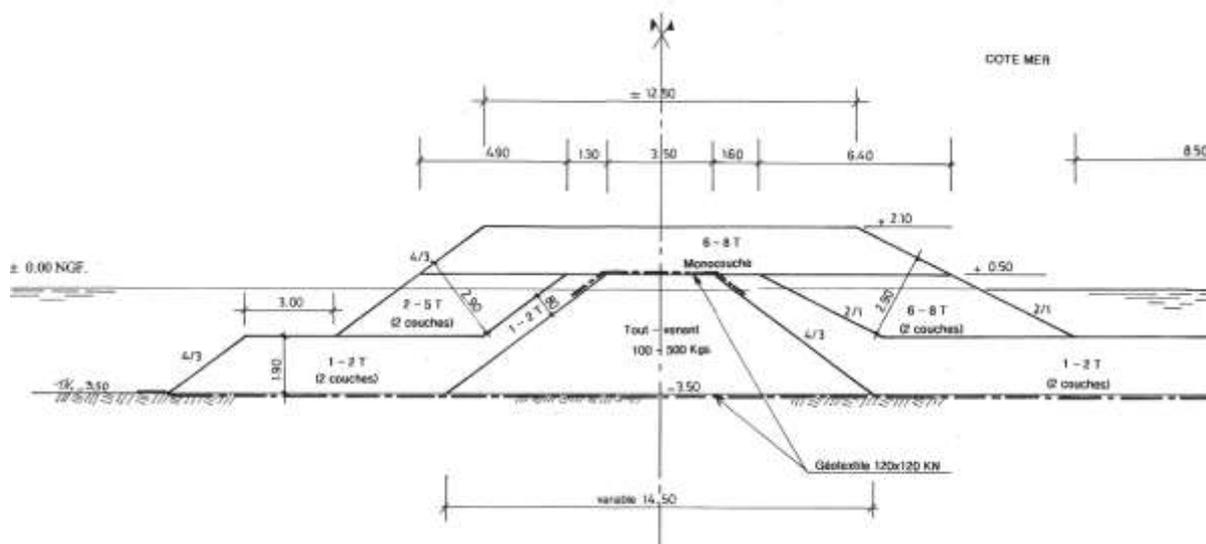


Figure 44. Coupe des créations : exemple brise-lame B

Une synthèse de la géométrie des ouvrages au droit du village des saintes maries de la mer est proposée dans le tableau ci-dessous :

Code	Nom	Longueur (m)			Cote		Hauteur (m)
		Epi	B-L	Total	fond	crête	
A	Clos du Rhône - Epi tenon	175		175	-2,6	2,3	4,9
B	Clos du Rhône - BL1		125	125	-3,5	2	5,5
C	Clos du Rhône - BL2	110	125	235	-3,5	2	5,5
D	Launes Ouest	170		170	-3	2,6	5,6
E	Launes Est	170		170	-3	2	5
F	Port Gardian Ouest	385		385	-4	3,1	7,1
G	Port Gardian Est**	330		330	-4	3,1	7,1
H	Arènes T	110	185	295	-2,1	2	4,1
I	Camille Ouest*	100		100	-3,5	2,4	5,9
I'	Camille transversal	50		50	-3,5	2,4	5,9
J	Grand épi Est	65		65	-3,5	2,4	5,9
K	Amphores	270	80	350	-3,2	2,5	5,7
M	Thalacap Petit	90	60	150	-1,5	1,8	3,3
N	Thalacap Grand	200	140	340	-3,5	1,8	5,3
O	Grand Large Petit	85	90	175	-1,5	1,8	3,3
P	Grand Large Grand	200	140	340	-3,5	1,8	5,3
Q	Poste secours	85	90	175	-1	1,8	2,8
R	Fourcade Ouest	270		270	-2	1,6	3,6
S	Fourcade Est	245		245	-2	1,6	3,6

* ouvrage en ruine et non entretenu, il ne joue plus de rôle.

** ouvrage dont l'affectation principale est portuaire, il n'y a pas de conventionnement avec le SYMADREM ; il est prolongé d'un muret qui joue le même rôle

1.8 DISPOSITIFS DE REGULATION DES ECOULEMENTS

Il existe 12 ouvrages traversant le système d'endiguement. Ils servent pour la plupart à contrôler le niveau et la salinité des étangs et marais situés au Nord de la protection.

Localisation (PR)	Nom	Caractéristiques
3.00	Thalacap	Tuyau de diamètre 63 mm, traversant digue et épi N ; alimente le centre de thalassothérapie en eau de mer
3.88	Pertuis de la Fourcade	Il y a 13 ouvertures (6 en 1.20*1.20m et 7 en 0.80*0.80m), associées chacune à une martellière coté Sud de l'ouvrage ; Il y a également une ouverture pour l'évacuation du lagunage avec un passage busé (2 cadres béton) et une vanne en recul ; Une convention SYMADREM / Commune des Saintes Maries de la mer, signée le 7/10/2010, détermine la gestion de ces organes.
8.26	Pertuis de Rousty	Il y a 5 ouvertures associées chacune à une martellière de 2m de large en bois coté Sud de l'ouvrage ; 2*3 ouvertures supplémentaires existent, elles sont également fortement envasées mais non vannées ; Les ouvertures faisaient environ 2m de haut mais elles sont comblées de limon sur 1.5m. Une convention SYMADREM / Commune des Saintes Maries de la mer, signée le 7/10/2010, détermine la gestion de ces organes.
14.07	Tampan-La Dame	Ouvrage abandonné comprenant 3 buses ; le système de vannage est détruit
14.93	Phare de la gacholle	L'ouvrage comprenait 30 ouvertures qui ont été majoritairement comblées coté mer. Il reste 2 conduites de diamètre 60cm, les plus à l'Ouest, qui ne sont plus vannées.
15.91	Pertuis de la comtesse	Il y a 14 ouvertures (8 en 1.20*1.20m et 5 en 0.80*0.80m et 1 en 2.3m*2m), associées chacune à une martellière coté Sud de l'ouvrage ; 4/ 8 et 4/ 5 sont condamnées fermées par des plaques qui sont partiellement rouillées. Une convention SYMADREM / Société Nationale de Protection de la Nature, signée le 27/09/2010, détermine la gestion de ces organes.
16.38	Vignole-Galabert	2 buses en ferraille, non vannées, de diamètre 50cm et situées environ 1.2m sous la crête
18.86	Clos Desclaux 1	Deux martellière coté mer de 1.7m de large, 1.5m de haut (pour une ouverture haute de 2.2m) ; elles sont partiellement rouillées
18.88	Clos Desclaux 3	Une martellière coté terre de 3.5m de large, 1.8m de haut (pour une ouverture de 2.6m) en parfait état

Localisation (PR)	Nom	Caractéristiques
21.25	Pertuis du Fangassier	2 passages hydrauliques de 1*2m, dans un bâti béton coulé sur place en 2015 ; il est équipé de 2 martellières coté mer qui sont en très bon état. Il y a également 2 clapets anti-retour coté zone protégée, qui n'ont pas de rôle contre les inondations. Une convention SYMADREM/PNRC/Tour du Valat/SNPN/Conservatoire du littoral, signée le 21/06/2016, détermine la gestion de ces organes.
23.47	Grand rascaillan-contre canal	Une ouverture avec martellière coté mer de 1.9 m de large, 1.1m de haut (décalée et à 40cm sous crête) ; non utilisable elle est toujours fermée et de plus en plus enlisée dans les dépôts de limon
24.85	Petit rascaillan-contre canal	Une ouverture avec martellière coté mer de 2.1m de large, 1.1m de haut (décalée et à 1m sous crête) ; peu utilisée elle souvent fermée.

Concernant le ressuage des eaux en cas d'entrées massive, les pertuis seraient sollicités. Il n'y a en revanche pas de système de pompage permanent pour le ressuage de la Camargue insulaire ; en cas de crise des pompes amovibles peuvent être mises en œuvre comme ce fut le cas en 1993. Cette inondation était due au fleuve mais le principe en cas d'inondation liée à une tempête reste identique.



Photo 18. Pompage d'urgence sur la digue à la mer - 1993

2 LES OUVRAGES PROJETES

Sans Objet

L'étude de dangers porte sur l'état actuel des ouvrages.

3 POTENTIELS DE DANGER

3.1 ÉCOULEMENTS AUTOUR DE LA ZONE PROTÉGÉE

La zone protégée du système d'endiguement maritime Camargue Insulaire a la particularité d'être encadrée à l'Est, au Nord et à l'Ouest par le Rhône et au Sud se trouve l'aléa : la mer.

Avant l'atteinte du niveau de protection, les écoulements maritimes restent en dehors de la zone protégée ; à l'exception des entrées d'eaux volontaires au droit des pertuis.

Le système d'endiguement maritime n'ayant pas de rôle face aux inondations du Rhône, lors de crues il peut y avoir des entrées d'eau dans la zone protégée ; elles ont été analysées dans le cadre de l'étude de dangers de la Camargue Insulaire fluviale.

Des entrées d'eau liées à l'impluvium local ou à des remontées de nappe ne sont pas exclues ; le système de protection étant neutre vis-à-vis de ces aléas.

3.2 IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES POTENTIELS DE DANGERS

Dans l'état actuel, les potentiels de dangers liés aux ouvrages du système d'endiguement résultent en tempête :

- D'une probabilité 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 tempête ; 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 surverse localisée ou généralisée, sans détérioration complète de l'ouvrage (cas n°2) ;
- De franchissement par paquets, localisés, sans détérioration complète de l'ouvrage (cas n°2) ;
- D'une probabilité de dysfonctionnement ou de non fermeture d'une ou plusieurs vannes d'un ouvrage hydraulique traversant (cas n°3).

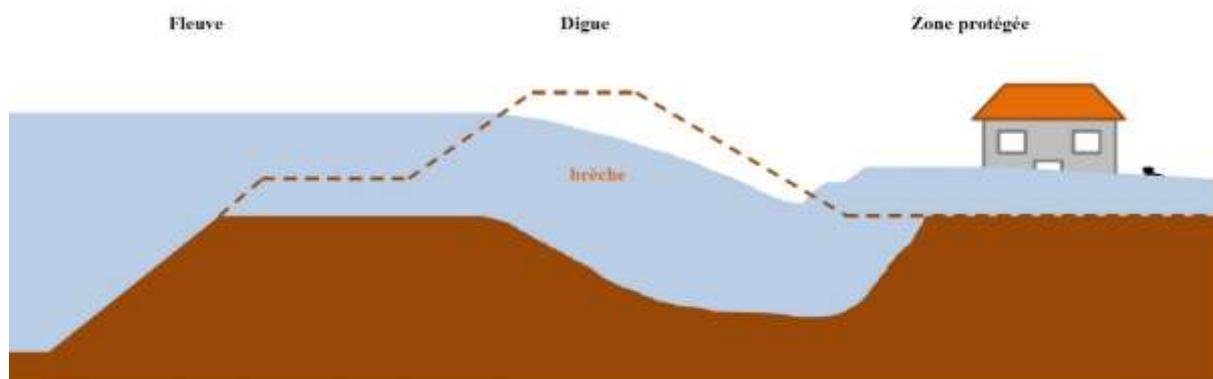


Figure 45. Cas n°1 : Inondation de la zone protégée par brèche dans la digue

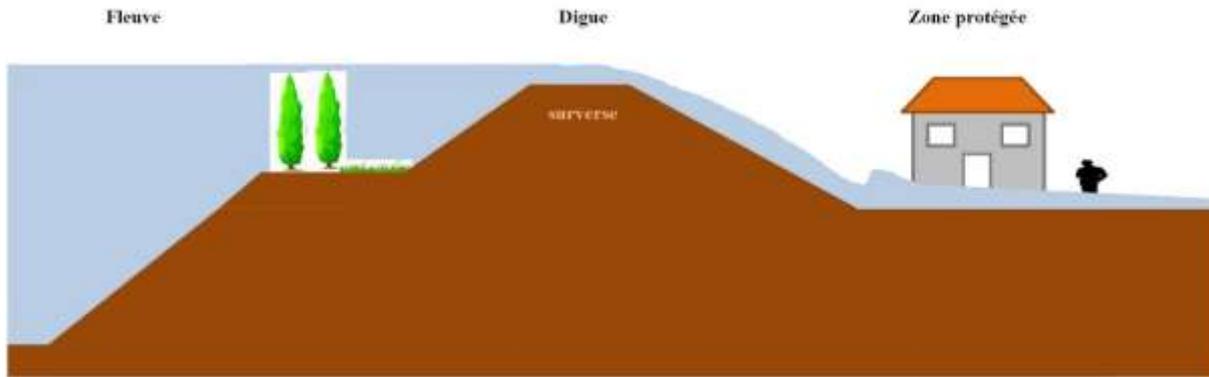


Figure 46. Cas n°2 : Inondation de la zone protégée par surverse ou par paquet (sans brèche) sur la digue

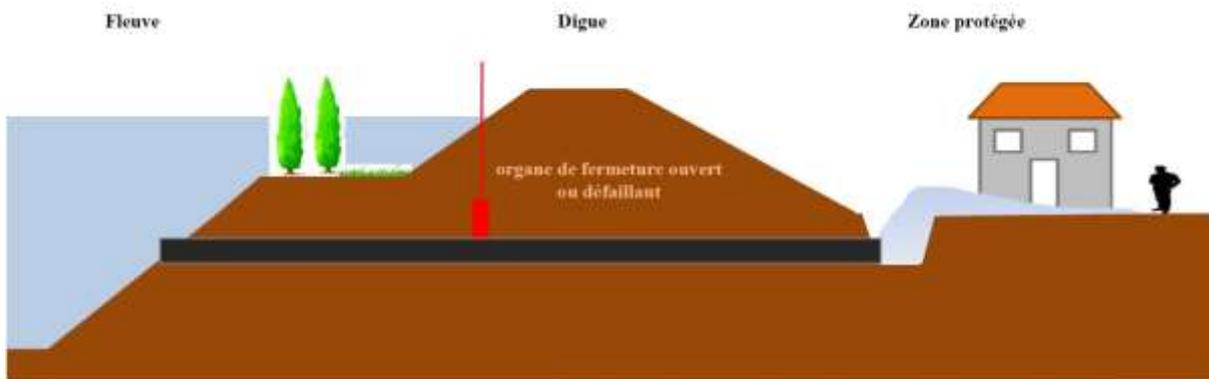


Figure 47. Cas n°3 : Inondation de la zone protégée par défaillance d'un ouvrage hydraulique traversant

3.3 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 dépendent principalement de la période de retour du niveau marin considéré et de la durée de la tempête.

Les hydrogrammes résultant de franchissement par paquet dépendent à la fois de la période de retour du niveau marin considéré, de celle de la hauteur des vagues et de la durée de la tempête.

Les hydrogrammes résultant des ruptures envisagées dépendent de plusieurs paramètres ayant une incidence directe sur leurs caractéristiques :

- niveau marin,
- durée de la tempête,
- mécanisme de rupture conduisant à la formation de la brèche,
- instant et vitesse d'ouverture de la brèche,
- largeur finale de la brèche.

3.3.1 Hydrogramme résultant d'une brèche

Les hypothèses prises en compte pour les niveaux et durées de tempête relativement aux tempêtes 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).

La localisation des brèches a été fixée après avoir étudié :

- Les retours de VTA,
- L'analyse des enjeux,
- L'analyse de la structure de l'ouvrage,
- L'analyse de l'exposition à la houle et à l'érosion côtière,
- Les levés topographiques.



Figure 48. Localisation des brèches au niveau des Saintes maries de la mer

Toutes ces brèches n'ont pas été simulées en parallèle sur l'ensemble des scénarios

Les volumes d'entrée d'eau par brèche sont importants mais le caractère plat de la zone protégée et la faible hauteur des ouvrages de protection induisent des hauteurs d'eau faibles (ou sur-hauteur pour les zones en eau en permanence).

Tableau 1. Description des brèches retenues

Nom	Localisation	Description - justification	Longitude / Latitude
B1	Clos du Rhône	<u>Digue longitudinale de fond de plage.</u> Enrochements hétérogènes et glissement de blocs observés. Les aménagements de cette zone sont particulièrement exposés du fait de l'approfondissement des fonds devant cet aménagement et du décalage du trait de côte de chaque côté du petit Rhône.	4°24'16.62"E / 43°26'53.76"N
B2	Quai des Pêcheurs (port Gardian)	<u>Mur « chasse mer » localisé entre le quai « sud » de la darse et la plage.</u> Instabilité de ce mur (affaissement, « renard » visible coté quai). Érosion de la plage ; augmentation potentielle de la houle qui arrive sur cette plage si le musoir de la digue du port est détruit. Ce musoir est en très mauvais état et une fosse d'érosion est visible.	4°25'27.88"E / 43°26'58.04"N
B3	Centre du village	Exposition directe aux houles de Sud Est et abaissement potentiel des fonds à moyenne échéance.	4°25'45.85"E / 43°26'58.51"N
B4	Plage Est	<u>Digue longitudinale à l'Est du grau de la Fourcade.</u> Renforcement d'urgence réalisé récemment. Tenue du pied de digue ? franchissements potentiellement plus importants. Le fort recul du trait de côte et abaissement des fonds ces dernières années augmentent les aléas hydrodynamiques et sédimentaires.	4°26'55.04"E / 43°27'26.33"N

Tableau 2. Caractéristiques géométriques des brèches retenues et cinétique de la défaillance

Période de retour T (ans)	Description	B1	B2	B3	B4
30	Largeur	10 m	50 m	10 m	50 m
	Début de brèche par rapport au « palier haut de la tempête »	Avec 1 à 2 heures de décalage	Rapidement de l'Ouest vers l'Est	Avec 1 à 2 h de décalage	Rapidement, d'Ouest en Est depuis les limites Ouest du renforcement.
	Cote	TN en arrière de la digue	Niveau du quai	TN en arrière de la digue	TN en arrière de la digue
100	Largeur	50 m	100 m	35 m (1)	100 m (4)
	Début de brèche par rapport au « palier haut de la tempête »	Rapidement	Rapidement	Rapidement	Rapidement
	Cote	TN en arrière de la digue	TN en arrière de la digue	TN en arrière de la digue	TN en arrière de la digue
Exceptionnel	Largeur	100 m (3)	120 m(2)	100 m (4)	100 m (4)
	Début de brèche par rapport au « palier haut de la tempête »	Rapidement	Rapidement	Rapidement	Rapidement
	Cote	TN en arrière de la digue	TN en arrière de la digue	TN en arrière de la digue	TN en arrière de la digue

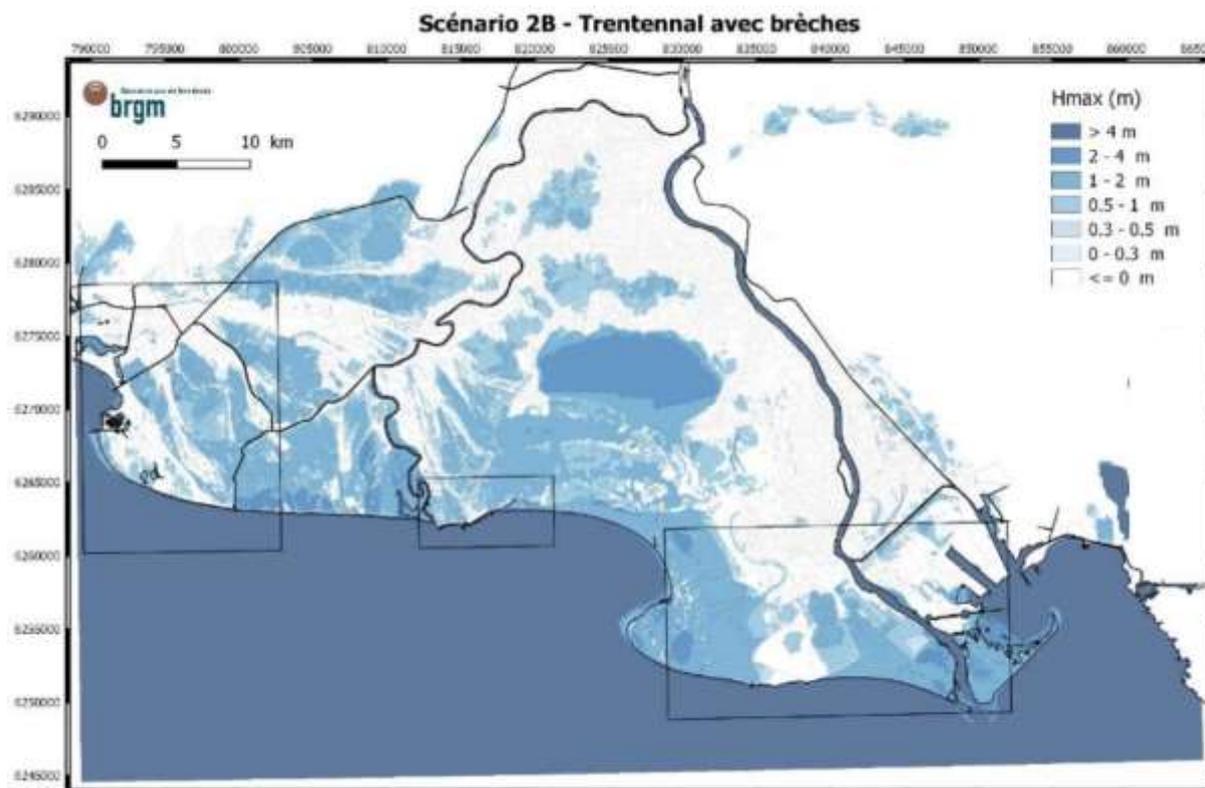


Figure 49. Inondation lors d'une tempête T1.17, avec brèche

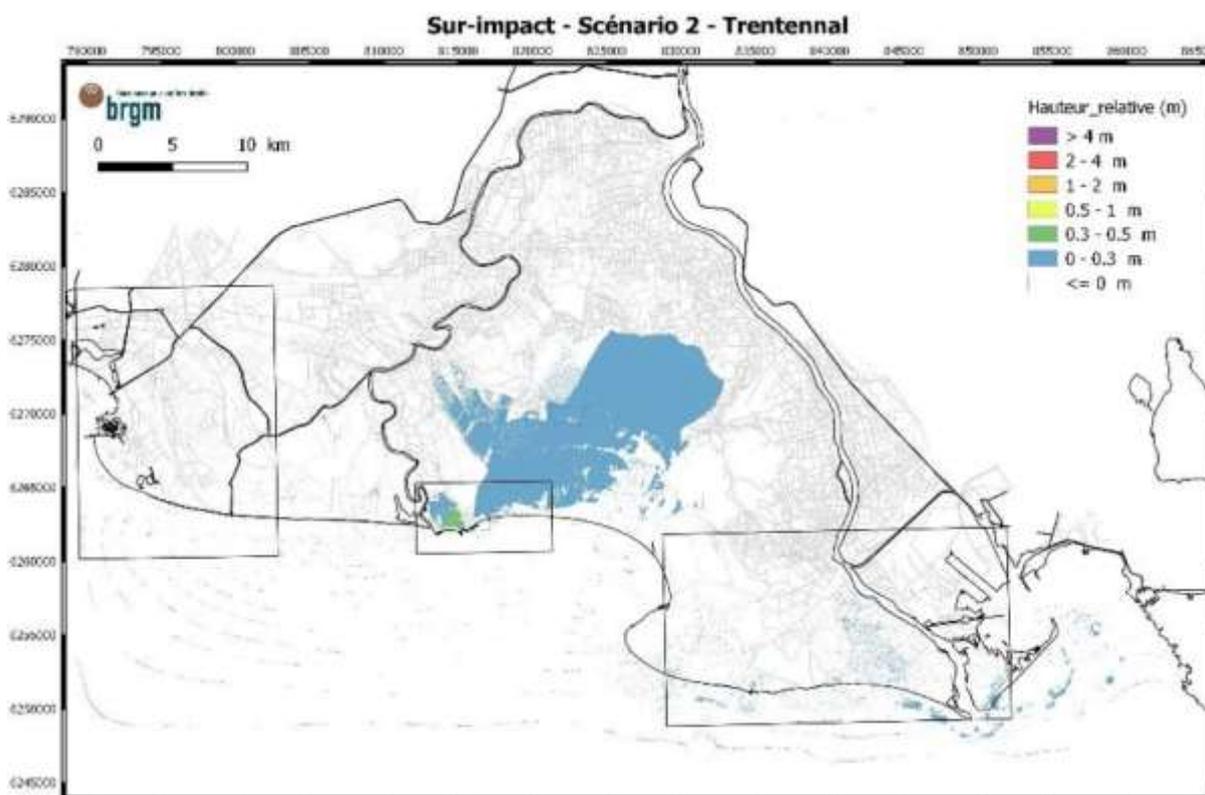


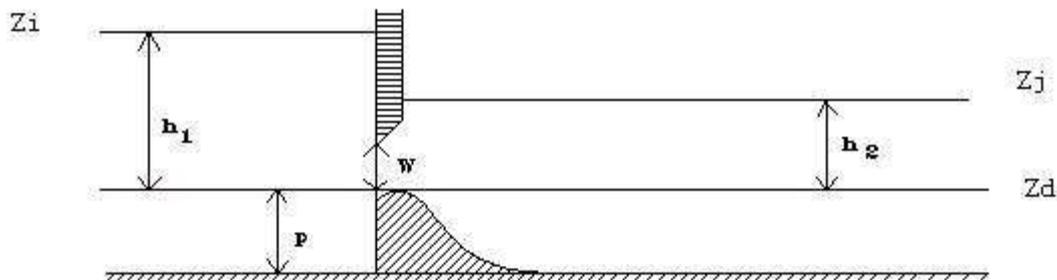
Figure 50. Sur-impact lié aux brèches lors de l'inondation d'une tempête T1.17

3.3.2 Hydrogramme résultant d'un dysfonctionnement d'un ouvrage hydraulique traversant

Dans le cas d'un dysfonctionnement des organes de fermeture d'un ouvrage hydraulique traversant, 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 ouvrages sont situés au droit de canaux, marais ou étang, il n'y a donc pas d'enjeux dans la zone de forte vitesse.

L'ouverture la plus conséquente est au niveau de l'ouvrage du Fangassier (1m*2m) ; c'est ce dernier qui est étudié.

La largeur est de 2 m. La hauteur de charge pour la tempête exceptionnelle est de 1,9 m. Le débit maximum calculé suivant une formule d'orifice en dénoyoté est estimé à 6.3 m³/s.



$$h_1 \leq W \text{ et } h_2 \leq \frac{2}{3} \cdot h_1$$

$$q = \mu \cdot L \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \left(h_1^{\frac{3}{2}} - (h_1 - W)^{\frac{3}{2}} \right)$$

La vitesse est estimée à 3.9 m/s au droit de la section de contrôle ; elle diminue ensuite rapidement.

En estimant à une journée, la durée d'entrée d'eau massive, on estime à environ 550 000 m³, le volume libéré dans la zone protégée, ce qui équivaut pour l'étang à une rehausse moyenne maximale de 15 cm sur l'étang du Fangassier (3.8 km²).

Le volume d'eau, même sans intervention humaine, et pour un événement exceptionnel est très sensiblement moindre à celui résultant d'une brèche et n'impact aucun enjeu.

3.3.3 Hydrogramme résultant d'une surverse

Lors de la modélisation des scénarios 1 à 3, dans le cadre du diagnostic réalisé par Egis en 2017, il n'y a aucune surverse.

Pour le scénario 4 il y a en revanche une surverse, d'un volume de 6,8 Mm³. Avec un approfondissement des fonds à 15 ans, ce même scénario présenterait un volume de surverse légèrement supérieur, qui atteindrait 7,2 Mm³.

Cette surverse se fait au droit des zones basses du système d'endiguement tels que Port Gardian ou un secteur de 2km entre la Fourcade et le Rousty. Plus à l'Est les points bas se situent à l'Est du Clos d'Esclaux.

3.3.4 Hydrogramme résultant de franchissement par paquet

Les franchissements par paquets ont été étudiés par petits tronçons.

Par exemple, pour le tronçon n°3, situé au clos du Rhône, entre les ouvrages B et C, les débits unitaires de franchissement au cours d'une tempête T1.30 (scénario 3) seraient les suivants :

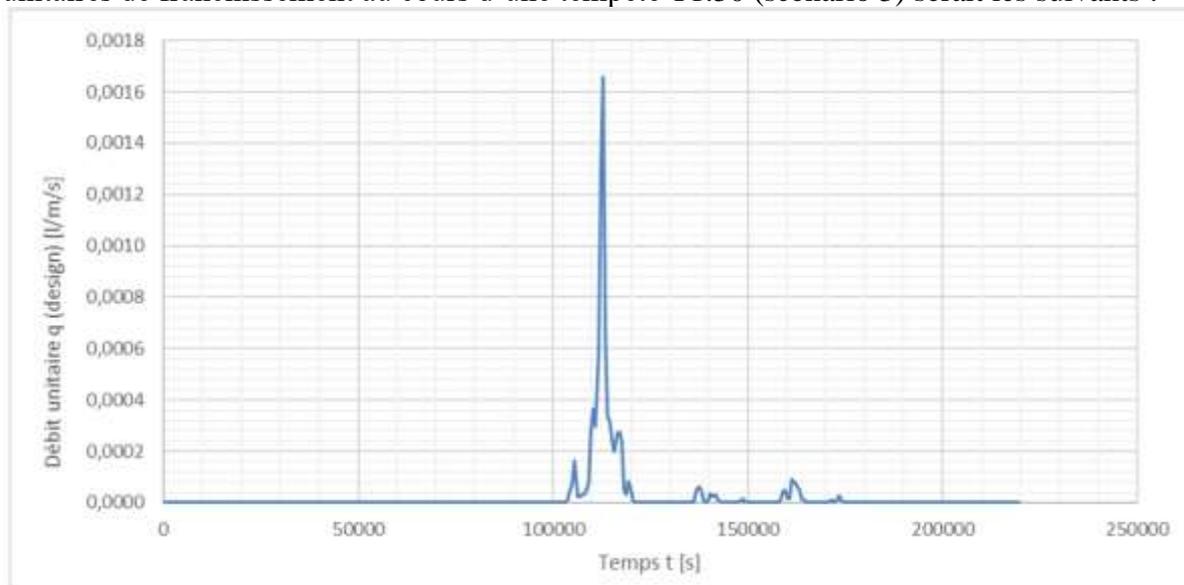


Figure 51. Débits de franchissements unitaires, lors du scénario 3, pour le tronçon 3.

Cela représente 1m^3 au cours de la tempête. Certains tronçons ne sont pas franchis et d'autres sont dépassés, laissant passer des milliers de m^3 . Au total $295\,600\text{m}^3$ d'eau franchissent la digue entre le clos du Rhône et le pertuis de Rousty dans la modélisation du scénario 3.

Ce phénomène est sensible à l'approfondissement des fonds et les mêmes scénarios de tempêtes avec les fonds actuels et à 15 ans donnent les résultats suivants :

Volumes en m^3	Franchissement par paquets		Surverse	
	Fond actuel	Fond approfondis	Fond actuel	Fond approfondis
Scénario 1	7 899	95 874	-	-
Scénario 2	53 901	371 200	-	-
Scénario 3	295 620	5 238 568	-	-
Scénario 4	7 078 174	15 787 545	6 799 413	7 167 669

Les franchissements plus à l'Est n'ont pas été étudiés mais, la digue étant en fort recul, il n'y aura pas d'impact lié à l'approfondissement du littoral proche.

3.4 ECOULEMENT POUR LES DIFFERENTS NIVEAUX DE PROTECTIONS

Etant donnée l'étendue de la zone protégée et de son système d'endiguement, les niveaux des ouvrages ont été déterminés par tronçons et des niveaux de protection variés de la zone protégée ont été définis.

Les descriptions ci-après sont basées sur les résultats issus des chapitres 7 et 8.
Le niveau est le niveau marin mesuré au pertuis de la fourcade et exprimé en m NGF.

niveau < 0.50

Jusqu'à la mise en eau des buses non vannées présentes aux alentours du pertuis de la comtesse les eaux de la mer restent à l'extérieure de la zone protégée.
L'ensemble de la zone protégée reste protégée.

0.50 < niveau < 0.85

Il peut ensuite y avoir des premières entrées d'eau par contournement de la digue via les buses qui ne sont pas vannées, les eaux restent limitées aux marais, en eau en permanence.
Les niveaux de protection des zones en noir est dépassé.

0.85 < niveau < 0.97

Des franchissements peuvent se produire en différentes zones : Clos du Rhône, village des saintes maries et à la plage Est. De plus, le niveau du remblai à l'Est du vieux Rhône, en cas de tempête de très longue durée, pourrait être localement franchi.
Les niveaux de protection des zones en rouge est dépassé.

0.97 < niveau < 1.06

Des niveaux de sûreté seront dépassés au droit du village, dans les zones où il y a déjà franchissement.
Les premiers niveaux de danger sont atteints, sur la majeure partie des ouvrages situés à l'Est du pertuis de la Fourcade.
Des entrées d'eaux par brèches, plus massives, sont alors possibles. Les eaux s'étaleront un peu plus et pourront dépasser le village.
A l'Est du pertuis de la comtesse les niveaux de submersion sont dépassés, en même temps que celui de sûreté ; si la tempête est suffisamment longue il y aura des entrées d'eau dans ce secteur.
Les niveaux de protection des zones en orange foncé est dépassé.

1.06 < niveau < 1.17

Les premiers niveaux de danger sont atteints au niveau du village (tronçon des arènes).
Des franchissements nouveaux sont attendus à Port Gardian.
A l'est les eaux continueront de s'étaler dans les marais et zones humides.
Il n'y a pas de changement de niveau de protection sur la carte.

1.17 < niveau < 1.30

Des franchissements sont attendus sur la quasi intégralité du linéaire.
Il y aura plus d'entrées d'eau mais qui resteraient dans les zones déjà potentiellement inondées.
Il n'y a pas de changement de niveau de protection sur la carte.

1.30 < niveau < 1.55

Le niveau de submersion de port Gardian est dépassé, l'inondation du village des saintes maries est à présent certain.
Les volumes de franchissement sont également importants et le risque de brèche au droit de ce secteur urbanisé est important (3km sur les 4 voient leur niveau de sûreté dépassé).
Des entrées d'eau par brèches pourraient s'étaler jusqu'à l'ouest de la Camargue insulaire.
Les niveaux de protection des zones en vert clair est dépassé.

1.55 < niveau

En cas de tempête extrêmement forte et de durée importante, les zones du Nord et de l'Est de la Camargue Insulaire pourraient finir par être en eau.

Les niveaux de protection des zones en vert foncé est dépassé.

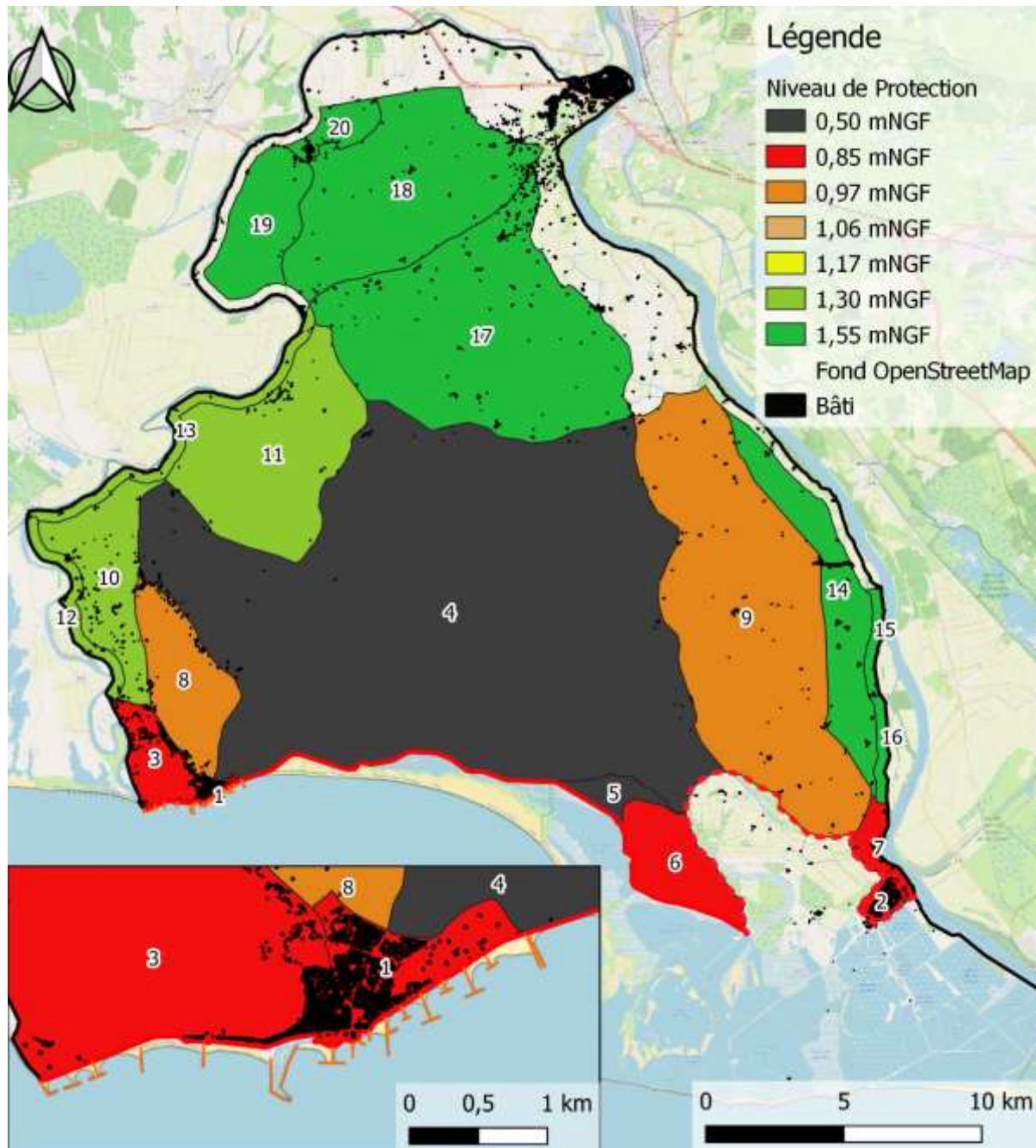


Figure 52. Niveaux de protection des sous zones protégée de la Camargue insulaire



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

ETUDE DE DANGERS

DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT MARITIME

DU DELTA DU RHONE

DOCUMENT B

**CHAPITRE N°6 : RETOUR D'EXPERIENCE CONCERNANT
LES ZONES PROTEGEES ET LES SYSTEMES D'ENDIGUEMENT**

Version	Date	Commentaires
0	27/02/2023	Version initiale
1	23/03/2023	Reprises suites à la relecture interne

SOMMAIRE

1	Retour d'expérience des ouvrages de protection maritimes	3
1.1.1	Enseignement général sur les submersions marines	3
1.1.2	Retour d'expérience sur les modes de ruptures des digues maritimes	6
2	Bilan des incidents et accidents survenus sur les ouvrages du système d'endiguement ..	10
2.1	Vigilance et système d'alerte	10
2.2	Novembre 1982	11
2.3	Novembre 2014	12
2.4	Mars 2018	15
2.5	Novembre 2019	20
2.6	Tsunami	22
2.7	Synthèse des VTA	22
2.8	Synthèse sur le retour d'expérience	23
2.8.1	Intensité de l'aléa	23
2.8.2	Caractérisation des désordres	23
2.8.3	Retour d'expérience terrain	24

1 RETOUR D'EXPERIENCE DES OUVRAGES DE PROTECTION MARITIMES

Cette partie propose un retour d'expérience des incidents et accidents sur les digues maritimes.

Il s'appuie sur les ressources suivantes :

- Guide méthodologique des plans de prévention des risques littoraux, MEDE, 2014 [14] ;
- Référentiel technique des digues fluviales et maritimes, MEDDTL, 2015 [15]

1.1.1 Enseignement général sur les submersions marines

Trois modes de submersion marine sont distingués, qui peuvent concerner le système d'endiguement :

- submersion par débordement, lorsque le niveau marin est supérieur à la cote de crête des ouvrages ou du terrain naturel



Figure 1. Submersion par débordement à Leucate le 17 décembre 1997
(Photo DREAL Languedoc-Roussillon)

- submersion par franchissements de paquets de mer liés aux vagues, lorsque après déferlement de la houle, les paquets de mer dépassent la cote de crête des ouvrages ou du terrain naturel



Figure 2. Submersions par franchissement par paquets de mer à Ault (80) le 16 mars 1914
(Source : DREAL Haut de France)

- submersion par rupture du système de protection, lorsque les terrains situés en arrière sont en dessous du niveau marin : défaillance d'un ouvrage de protection ou formation de brèche dans un cordon naturel, suite :
 - à l'attaque de la houle (énergie libérée lors du déferlement),
 - au mauvais entretien d'un ouvrage,
 - à une érosion chronique intensive,
 - au phénomène de surverse,
 - à un déséquilibre sédimentaire du cordon naturel,
 - etc.



Figure 3. Brèche dans une digue à Wissant (Source : DREAL Haut de France)

La rupture des cordons dunaires est également à mentionner. Elle est appréciée dans la mesure où le cordon dunaire est intégré en élément naturel du système de protection. Ce cordon dunaire peut être un point de faiblesse du système de protection.



Figure 4. Brèche dans la dune aux abords du barrage de la Gachère (Source INA) – Tempête Xynthia du 28 février 2010.

Il est également important de souligner que les submersions marines affectent généralement une région entière en lien avec le passage d'une tempête particulière :

- Nuit du 31 janvier au 1er février 1953 : tempête majeure en mer du Nord (Pays-Bas, Belgique, Angleterre, nord de la France) entraînant de très nombreuses submersions et ruptures de digues. Il sera dénombré plus de 1 800 morts, 160 000 hectares de terres inondées, de nombreuses têtes de bétail noyées, et beaucoup de bâtiments détruits ou endommagés. La surcote est estimée à 3 m dans l'estuaire de la Tamise.
- Tempête Xynthia dans la nuit du 27 au 28 février 2010 sur le littoral atlantique : les submersions ont entraîné la mort de 47 personnes et des dommages estimés à ~700M€ pour les inondations. La surcote est estimée à environ 1,5 m.

Les inondations peuvent s'étendre largement dans des zones basses en arrière des digues et nécessiter plusieurs jours pour le retour à la normale.

1.1.2 Retour d'expérience sur les modes de ruptures des digues maritimes

Les digues maritimes sont sujettes aux mêmes mécanismes de rupture que les digues fluviales ; avec toutefois la prévalence de certains aléas en contexte maritime.

On notera également que la prédominance de ces aléas dépend largement des actions hydrodynamiques en jeu (digue de fond de baie protégée de la houle ou en front de mer) et du type d'ouvrage.

1.1.2.1 Erosion externe du talus côté mer

L'impact de la houle et les pressions d'eau s'exerçant sur un perré ou une structure rigide sont un mécanisme majeur. Les phénomènes d'abrasion peuvent également être rencontrés.

Les mesures visant à réduire/dissiper les pressions d'eau jouent un rôle majeur (jointoiement des perrés, résistance des matériaux au lessivage).



Figure 5. Digue de Paramé à Saint-Malo – Brèche sur le talus amont lors de la tempête de 1979



Figure 6. Digue du Génie : Abrasion des pierres côté mer (les joints ciment restent en saillie) et effritement de la crête - Source Irstea

1.1.2.2 Erosion externe par affouillement du pied de talus côté mer

L'érosion externe côté mer peut se produire également par affouillement du pied de talus déchaussant la protection du talus côté mer. L'abaissement du niveau de plage a également pour effet d'augmenter les hauteurs de houle en pied d'ouvrage.



Figure 7. La digue de Wissant en 1998 (A) et en 2007 (B) :
Le niveau de sable s'est abaissé d'environ 8m ;
(C) submersion de la digue lors de la tempête de mars 2010

1.1.2.3 Erosion côté terre

L'érosion du talus côté terre peut être provoqué par surverse ou par passage de paquets de mer. L'érosion de la digue progresse vers le côté mer entraînant la formation de vides sous les ouvrages rigides et pouvant conduire à une rupture totale.

La notion de durée de surverse/franchissement peut être considérée en lien avec la marée pour apporter une capacité de résistance.

Les accès aux plages ou à l'estran constituent souvent des zones de point bas qui peuvent être des points de faiblesse.



Figure 8. Digue Ouest de Saint Clément des Baleines : Effondrement de la dalle de crête qui peut se poursuivre par un effondrement de la protection en maçonnerie du talus jusqu'à formation d'une brèche – Source DDTM 17



Figure 9. Digue du Bouin (85) : Erosion du remblai par surverse (photo côté ZP) jusqu'à apparition de vides sous les plaques qui s'affaissent (photo côté mer) – Source Irstea

1.1.2.4 Erosion interne due à un ouvrage traversant ou dans le corps de l'ouvrage

L'érosion interne peut être en lien avec la présence d'un ouvrage traversant ou autre structure enterré. Elle peut également se produire dans le remblai.

En milieu maritime, l'érosion interne se produit souvent avec un départ des matériaux vers le côté mer sous l'action répétée des marnages.



Photo a

Photo b

Figure 10. Affaissement plate-forme derrière le quai de Boyardville (photo a) Détail de l'érosion et défaut d'étanchéité du parement de la digue du Nouleau (photo b) – Source Irstea

1.1.2.5 Instabilité de talus

Les instabilités de talus par glissement ou poinçonnement sont peu documentées en retour d'expérience sur des digues maritimes.

2 BILAN DES INCIDENTS ET ACCIDENTS SURVENUS SUR LES OUVRAGES DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT

Le littoral méditerranéen et en particulier la Camargue insulaire a subi différentes tempêtes ayant menées à des entrées d'eau. Les ouvrages sont régulièrement sollicités mais il n'y a pas eu d'inondation massive par le passé.

Les ouvrages sont datés de façon très variables (de 1860 à 2010) et les sollicitations ont fortement évoluées au cours du temps : d'abord en retrait de la mer, les ouvrages du village des Saintes-Maries-de-la-Mer ont été confortés d'épis et brise-lame dès les années 1930 afin de recréer des plages dans les zones où les ouvrages devenaient en contact direct avec la mer.

La tempête de référence est celle de novembre 1982

2.1 VIGILANCE ET SYSTEME D'ALERTE

La vigilance « Alea Vagues Submersion » a été ajoutée à l'aléa météorologique météo France en novembre 2011, suite à la tempête Xynthia.

Il n'y a jamais eu d'alerte rouge depuis la mise en service.

Le département des Bouches du Rhône a été en niveau d'alerte orange au moins 4 fois, cette liste a été établie par analyse de la presse car il n'y a pas de banque de données disponibles :

- Le 24 décembre 2013
- Les 10 et 11 janvier 2016
- Le 10 décembre 2017
- Le 20 décembre 2019

Lors de ces alertes, le littoral camarguais n'a pas été impacté.

Les alertes jaunes sont plus régulières (au moins une fois par an) et n'ont pas toutes été relayées par la presse.

Elles ont été déclenchées lors des événements post 2011 cités ci-après.

En 2022 le littoral du département a été divisé en 2 sous zones pour cet aléa.

La vigilance « tsunami » est déclenchée par le préfet de département suite à une analyse du Cenalt (Centre national d'alerte aux tsunamis). L'alerte jaune est automatiquement déclenchée dès qu'un séisme notable (magnitude >5.5) se produit en Méditerranée sans pour autant qu'il y ai de risque avéré de tsunami ; l'alerte orange correspond à un risque de tsunami avec une vague inférieure à 1m et l'alerte rouge à une vague supérieure à 1m.

L'alerte jaune a été déclenchée au moins 2 fois :

- le 30 octobre 2020 suite à un séisme survenu en Turquie, les cotes françaises n'ont pas été impactées.
- Le 18 mars 2021 suite à un séisme de magnitude 6 en Algérie, il n'y a pas eu de vague sur les cotes françaises.

2.2 NOVEMBRE 1982

C'est la tempête de référence sur le secteur, elle se déroula du 6 au 9 novembre 1982.

Météo France, sur une analyse nationale de l'évènement précise :

« Vers le delta du Rhône des creux de 6 à 9 m sont observés la nuit du 7 au 8 et la matinée du 8. Sans doute une des plus grosses tempêtes de sud à sud-est, sinon la plus grosse, sur le sud-est de la France depuis un siècle. »

Pour cet évènement, les stations actuelles n'étaient pas disponibles ; les mesures de niveau marin sont celles du marégraphe, qui était géré par la compagnie des salins du midi, au Grau de la dent. Les hauteurs de vagues ont été reconstruites par le BRGM à partir d'une modélisation basée sur les vents réanalysés (Stéphanian *et al.*, 2014) et utilisant le modèle SWAN (Booij *et al.*, 2004).

Les maximums extraits sont alors de 0.98mNGF pour le niveau marin et 6.20m pour la hauteur significative des vagues au large ; ces deux valeurs sont atteintes le 7 novembre 1982.

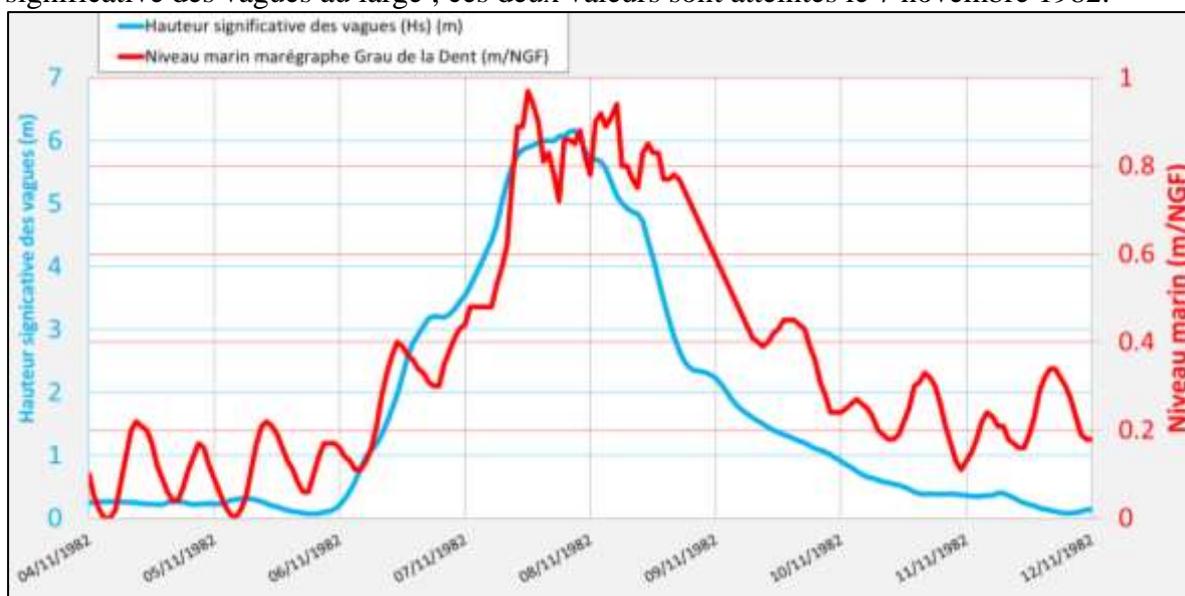


Figure 11. Niveau marin au Grau de la dent (mesuré) et hauteur significative des vagues au large (issu modélisation BRGM au point P9, sur l'isobathe 50m) du 4 au 12 novembre 1982

Les journaux de l'époque relatent qu'il y a eu une brèche et une inondation de la partie Est des Saintes-Maries-de-la-Mer. Les descriptions sont moins précises que pour les évènements plus récents mais il est relaté que la digue à la mer a subi plusieurs brèches, qu'il y a eu un affouillement très important de cette même digue. Il en a résulté un enfoncement général de la digue. De très sérieuses dégradations des terre-pleins aménagés en parkings ont été recensées.

Selon le témoignage du garde digues, qui était déjà résident du village, il y a eu des entrées d'eau par paquet sur une partie des digues du village car il n'y avait pas les épis et brise lame. Il y a ensuite eu une rupture au niveau du poste de secours n°2 (DM 3.63), qui a inondé le camping puis le village par l'Est, et une au clos du Rhône (DM 0.2) qui a créé des entrées d'eau à l'Ouest mais qui ne sont pas revenues vers le village. Il y a potentiellement eu des entrées d'eau plus à l'Est dont il n'a pas connaissance.



Figure 12. Photo depuis avenue Gilbert Leroy, devant l'hôtel « Les Amphores »

2.3 NOVEMBRE 2014

Une description de cette tempête a été faite par la DREAL Languedoc-Roussillon, les impacts sur le littoral bucco-rhodanien n'y sont en revanche pas mentionnés et c'est l'EISH réalisé par le SYMADREM qui a été utilisé.

Lors de cet événement qui a duré du 27 novembre au 1^{er} décembre, la hauteur significative des vagues a atteint 4.5m au large (bouée du Golfe du Lion) le 30 novembre 2014.

Ces hauteurs significatives de vagues ont été conjuguées à un niveau marin élevé (1.06 m au marégraphe de Port Camargue et 1 m NGF au pertuis de la Fourcade), lié à une baisse de la pression atmosphérique (entre 992 et 998 hPa).

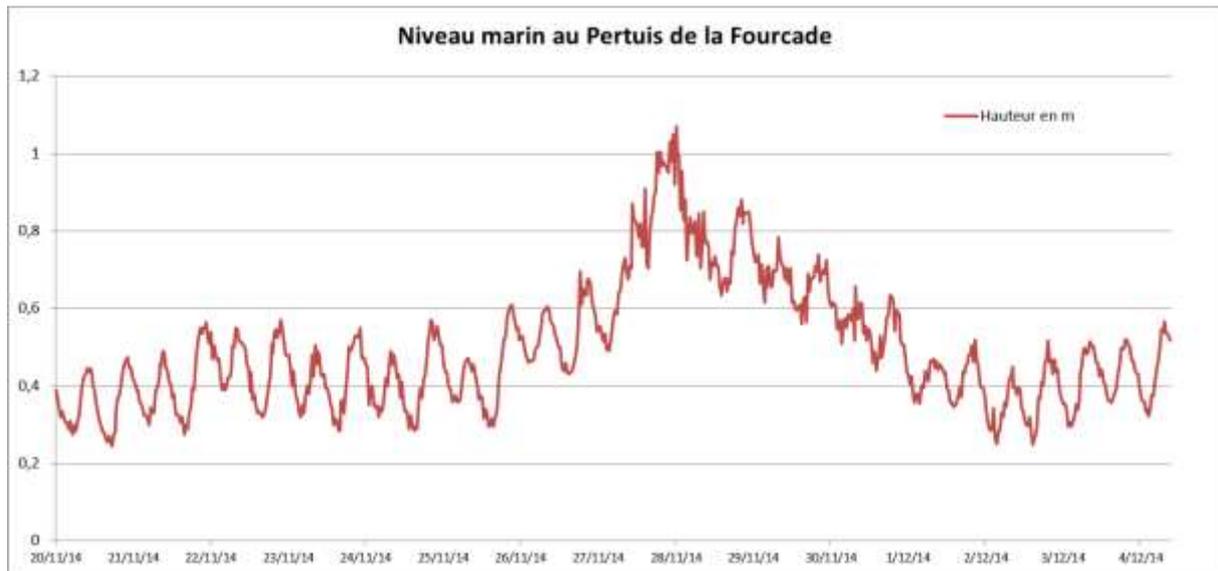


Figure 13. Données limnimétriques du niveau marin au Pertuis de la Fourcade aux Saintes-Maries-de-la-Mer

Dans le cadre de l'étude du BRGM de 2019, cet évènement a été modélisé avec :

- Niveau d'eau maximum de 0.97 mNGF (moyenne horaire max à Fos)
- Hs maximum de 4.04 et Tp de 8-9s (données modèle WW3)
- Vents de 19.58 m/s (70km/h) de direction majoritaire 130° (entre 120° et 180°)
- Débit Rhône <math>< 5000\text{m}^3/\text{s}</math>



La digue a subi des déferlements puis des érosions, en particulier au droit de la plage Est, qui avait fait l'objet d'un rechargement en galet 5 ans plus tôt :



Figure 14. Déferlements sur la digue à la mer





Figure 15. Anses d'érosion coté mer : DM4.3 et DM 20.44

2.4 MARS 2018

Un fort vent d'Est a provoqué une houle et des vagues importantes entre le 28 février et le 2 mars 2018.

Un pic est atteint le 1^{er} au matin (8h30) avec une hauteur significative de 4.3m, mesurée à la bouée de l'Espiguette.

A peu près au même moment (7h le 1^{er} mars), la hauteur maximale était atteinte au marégramme de Port Camargue : 0.95mNGF. Le marégraphe de Fos est légèrement plus faible : 0.75 mais avec une perte d'information entre 9h le 1^{er} et 6h le 2 mars. Il a été mesuré jusqu'à 1.25m au pertuis de la fourcade, le 1^{er} mars à 7h30, et dépassé 1m en moyenne horaire.

Il y a eut franchissement par paquets puis surverse au niveau de la plage Est (DM3.8-4.8). Une érosion du talus aval a alors débuté sur l'ensemble du linéaire concerné, en étant localement plus prononcée. La zone la plus érodée se trouve juste en limite d'une zone confortée peu de temps avant.

Il y a également eut un glissement du talus coté mer ; il est situé au niveau d'une zone confortée l'année précédente.

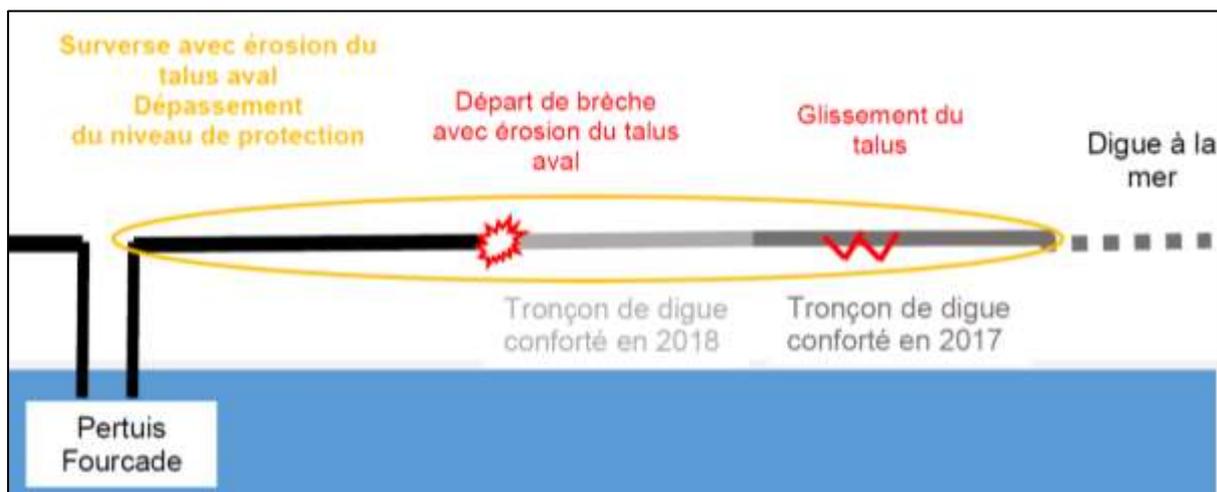


Figure 16. Schéma de principe réalisé par le SYMADREM lors de la rédaction de l'EISH



Figure 17. Déferlement et surverse à la plage Est



Figure 18. Départ de brèche par glissement du talus amont



Figure 19. Erosion du talus coté zone protégée



Figure 20. Les galets ont été projeté sur la digue, empêchant l'accès pendant la tempête. Les épis, comme celui de la fourcade, ont également été détériorés.



Figure 21. Endommagement de l'enracinement du pertuis de la Fourcade (photo post tempête)

Dans le secteur urbanisé, il y a également eu déferlement. Des GBA ont été mises en place pour renforcer le muret chasse mer, les deux structures ont été partiellement balayées par les déferlements et des petits enrochements ont été projetés sur la crête, qui sert de promenade :



Figure 22. Entrées d'eau principalement limitées à l'ouvrage de protection (flux et reflux)



Figure 23. GBA et mur chasse mer partiellement renversés



Figure 24. Débris projetés en crête d'ouvrage de protection, partiellement retenus par le mur chasse mer

2.5 NOVEMBRE 2019

De fortes houles et vagues ont été observées au niveau des Saintes-Maries-de-la-Mer entre le 23/10/2019 et le 24/10/2019, puis entre le 22/11/2019 et le 23/11/2019.

La hauteur significative des vagues commence à croître dès le 22/10/2019 dans l'après-midi pour atteindre son maximum le 23/10/2019 à 15h30.

Pour l'évènement de novembre, la hauteur significative des vagues commence à croître dans la matinée du 22/11/2019 pour atteindre son maximum le 23/11/2019 à 6h30 (4.5 m).

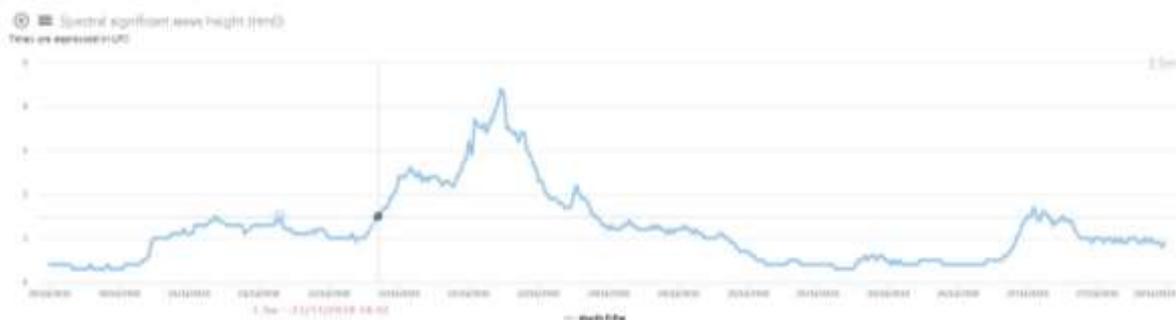


Figure 25. houle à la bouée de l'Espiguette entre le 20 et le 28 novembre 2019 : Hm0

Ces hauteurs significatives de vagues ont été conjuguées à des niveaux marins élevés avec un niveau maximum atteint de 1.02 m le 23/11/2019. Il est également mesuré à un peu plus de 1m au pertuis de la Fourcade

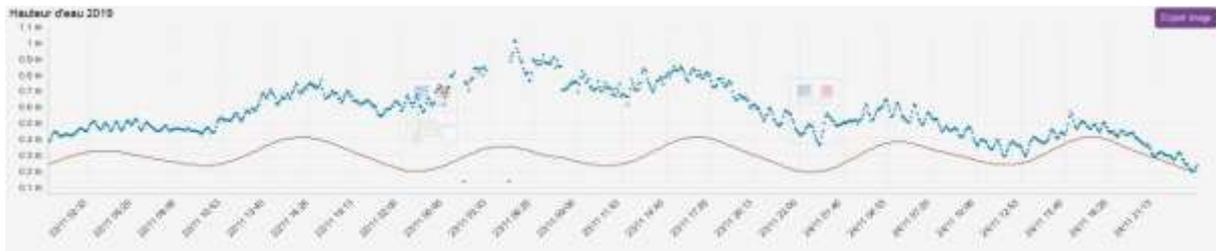


Figure 26. Niveau marin à Port Camargue entre le 21 et le 24 novembre 2019

Suite à cet événement, l'épi tenon du clos du Rhône (A) a été fortement endommagé. Un désordre apparu lors de la tempête d'octobre 2019 a été aggravé.



Figure 27. Epi A suite à la tempête de novembre 2019

Il y a également eu des désordres plus mineurs tels que du déferlement ayant entraîné un début d'érosion au niveau de la plage Est et des franchissements mettant la crête en eau au niveau du Grand Large.

2.6 TSUNAMI

Il n'y a pas de tsunami ayant sollicité les ouvrages ; un raz de marée, qui peut y être apparenté, a touché le littoral camarguais en la nuit du 5 au 6 août 1985.

Le raz-de-marée a probablement été causé par un glissement de terrain sous-marin, faisant suite à un séisme de faible magnitude, à proximité des côtes.

Les vagues ont provoqué des dégâts, pénétrant de 800 mètres dans l'intérieur des terres, faisant, 12 blessés et une victime. Ce sont principalement des campeurs, situés à Beauduc, au Sud du système d'endiguement, qui ont été victimes de l'inondation, qui a emporté tentes et caravanes ; il y a également eu des dégâts sur les bateaux de Port Gardian.

2.7 SYNTHÈSE DES VTA

Au-delà de ces événements marquants, les ouvrages sont sollicités au quotidien ou par des coups de mer de moindre ampleur.

L'analyse des VTA et VSP permet de mettre en avant les dégradations subies régulièrement par le système d'endiguement :

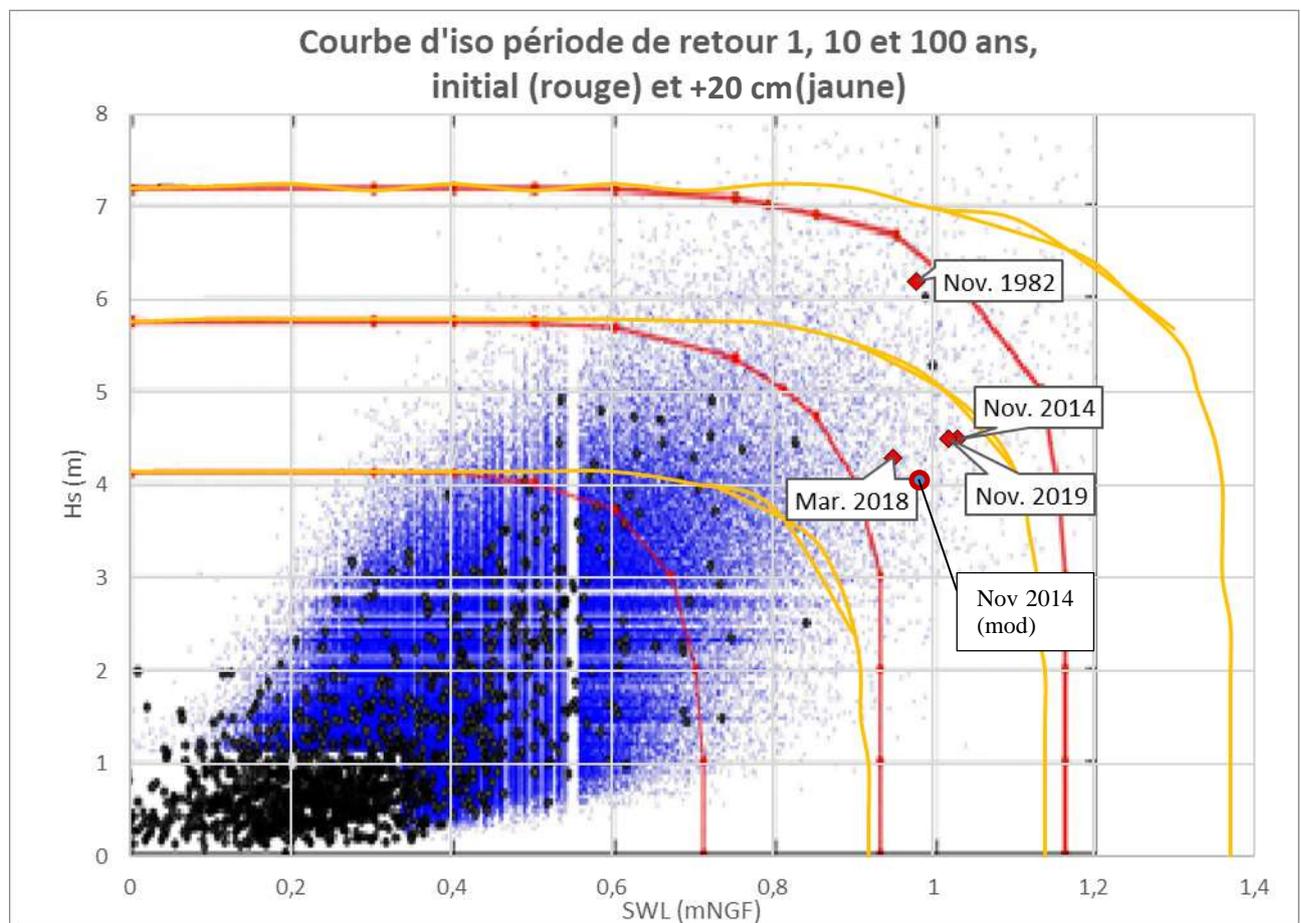
- Des mouvements de blocs sont régulièrement repérés sur les épis et brise lame, dès qu'il y a une forte houle ; cela représente plus d'un tiers des désordres sur le littoral ;
- Des érosions sont également fréquentes sur la digue à la mer à l'Est du village, le trafic (différents moyens de déplacement) crée des points bas et les pluies érodent localement le talus ;
- Des vides apparaissent parfois entre les enrochements et le corps d'ouvrage dans les secteurs équipés du centre des Saintes-Maries-de-la-Mer ;
- Les autres désordres relevés annuellement sont des nids de poule, qui portent peu préjudice à l'intégrité de l'ouvrage.

2.8 SYNTHÈSE SUR LE RETOUR D'EXPERIENCE

2.8.1 *Intensité de l'aléa*

Le tableau ci-dessous synthétise les niveaux relevés lors des tempêtes analysées, ainsi que les périodes de retour associées. Ces périodes de retour sont données, pour chaque évènement, selon les courbes calculées lors de la simulation de Monte-Carlo sur le jeu de données recalé en 2014 (Tini) et selon une période de retour prenant en compte un rehaussement de 20 cm de la mer, lié au changement climatique (Tcc).

	Date	Hs	SWL		Tini	Tcc
1982	Novembre	6,2	0,98		76,3	29,2
2014	Novembre	4,5	1,03		36,9	7,2
2014	Novembre (modèle)	4.04	0.97		18.1	3.5
2018	Mars	4,3	0,95		16,6	3,8
2019	Novembre	4,5	1,02		33,9	6,8



2.8.2 *Caractérisation des désordres*

Il apparaît que les ouvrages du système d'endiguement subissent rapidement des désordres importants mais que leur remise en état permet de ne pas atteindre la brèche sur des tempêtes

communes. La tempête de référence a en revanche menée à une inondation, incluant une partie du centre urbain.

Les épis, qui d'après le diagnostic réalisé en 2017, subissent un approfondissement des fonds sont de plus en plus sollicités.

De même les zones qui se retrouvent en front de mer subissent l'érosion du trait de côte et les assauts de vagues sont plus impactant. Ainsi la digue au droit de la plage Est subit très régulièrement des érosions du talus aval suite aux franchissement et connaît des glissements / érosion à l'amont malgré une protection plus importante que les ouvrages situés plus à l'Est.

Tableau 1. Synthèse du retour d'expérience sur les ouvrages du système d'endiguement

Tempête & Conséquences	Type désordre	Localisation
Novembre 1982		
Brèche & Inondation	Franchissement par paquet	Centre ville (et peut être autre)
	Brèche (source inconnue)	Multiples, Clos du Rhône et Est du Centre ville
	Affouillement	Non localisé
Novembre 2014		
Désordres & Franchissement	Franchissement par paquet	Plage Est
	Erosion	Plage Est
	Erosion	Digue mer - Fangassier
Mars 2018		
Désordres & Franchissement	Franchissement par paquet	Plage Est
	Erosion	Plage Est
	Glissement	Plage Est
	Glissement épi	Epis
	Détérioration crête	Centre ville
Novembre 2019		
Désordres	Glissement épi	Epis

2.8.3 Retour d'expérience terrain

Les retours du garde digues du secteur, en service depuis 25 ans, sont cohérents avec ces informations et les complètent :

- Tous les 2 ans en moyenne, des dégâts nécessitent réparation sur les épis et la plage Est, et avant son confortement c'était le cas pour la digue de l'Amarée ;
- Il y a déjà eu des entrées d'eau au niveau de points bas à l'Est de Crin Blanc (DM 1.3) et à l'Ouest de port gardian (DM 1.7) ; le muret de port gardian n'a en revanche jamais surversé ;
- A l'est du DM5, il n'y plus d'effet de houle car l'estran est trop important ;
- il y a déjà eu une quasi-surverse entre DM5.5 et 7.5, c'est-à-dire qu'il y avait 1 à 2 cm sur la crête de digue coté mer mais l'inclinaison de la crête a suffi à ne pas créer de surverse ;

- La durée des tempêtes (environ 3 jours avec une intensité maximale de 12h environ) ne permet pas de remplir les étangs se trouvant entre la mer et la digue ; cette dernière n'est alors pas sollicitée à l'Est du DM10 ;
- La majeure partie des désordres liés à la houle apparaissent en fin de tempête car le vent qui crée la houle rabat également les vagues, lorsqu'il cale les vagues se « redressent » et sont plus importantes.



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

ETUDE DE DANGERS
DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT MARITIME
CAMARGUE INSULAIRE

DOCUMENT B

**CHAPITRE N°7 : DIAGNOSTIC APPROFONDI DU SYSTEME
D'ENDIGUEMENT**

Version	Date	Commentaires
0	28/02/2022	Version initiale
1	23/03/2023	Reprises suite à la relecture interne

SOMMAIRE

1	Méthodologie	3
1.1	Modèle Source / Transfert / Cible	3
1.2	Niveaux de protection, de sûreté et de danger – définitions.....	5
1.3	Différentes étapes de l'analyse de risques incrémentaux	5
1.4	Les scénarios de brèche considérés	6
1.5	Fonctions et composants d'une digue en terre.....	7
1.6	Investigations, études et diagnostic approfondi.....	7
1.7	Les calculs des scénarios	9
2	Rappel de l'aléa.....	18
3	Présentation des résultats	19
4	Calcul	21
4.1	Secteur centre ville (DM 0 à 4)	22
4.2	La digue à la mer, du pertuis de la fourcade au pertuis de rousty (DM 4 à 8.3)	42
4.3	La digue à la mer, du pertuis de Rousty au pertuis de la comtesse (DM 8.3 à 16) ...	50
4.4	La digue à la mer, du pertuis de la comtesse à la digue des Toscans (DM 16 à 21.75)	53
4.5	La digue à la mer, de la digue des Toscans au Vieux Rhône (DM 21.75 à 26)	56
4.6	La protection à l'Est du Vieux Rhône (DM 26 à la fin)	57
4.7	Les ouvrages : épis et brise lame	58
5	Synthèse	62

1 METHODOLOGIE

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/>).

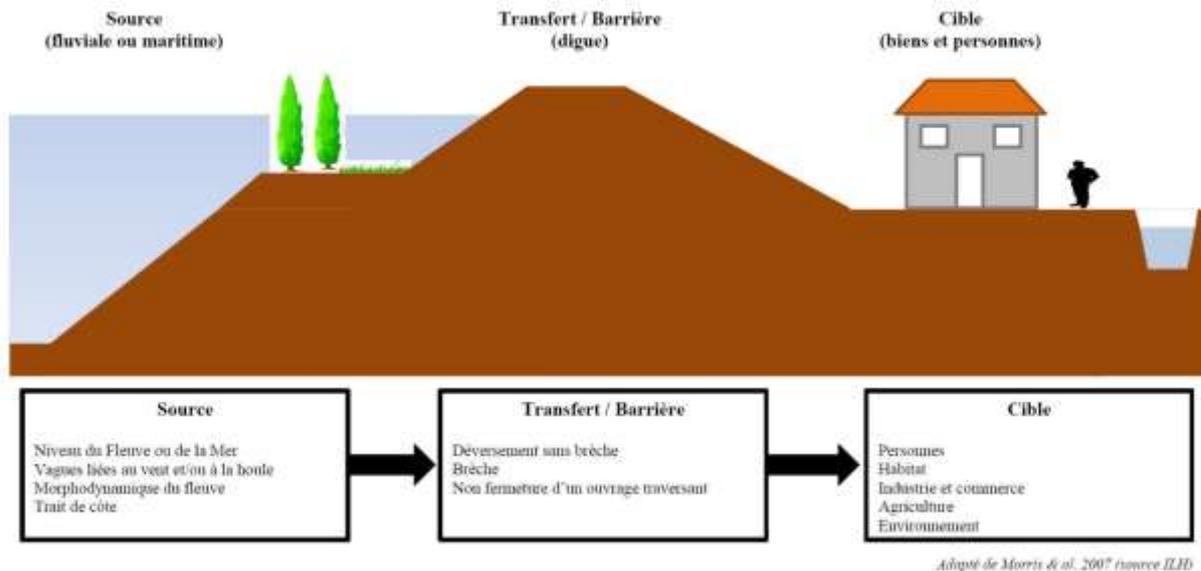


Figure 1. Modèle Source Transfert Cible (d'après Morris & al. Source ILH [X015])

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 de la Mer,
- Les vagues liées au vent et/ou la Houle,
- La 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 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.

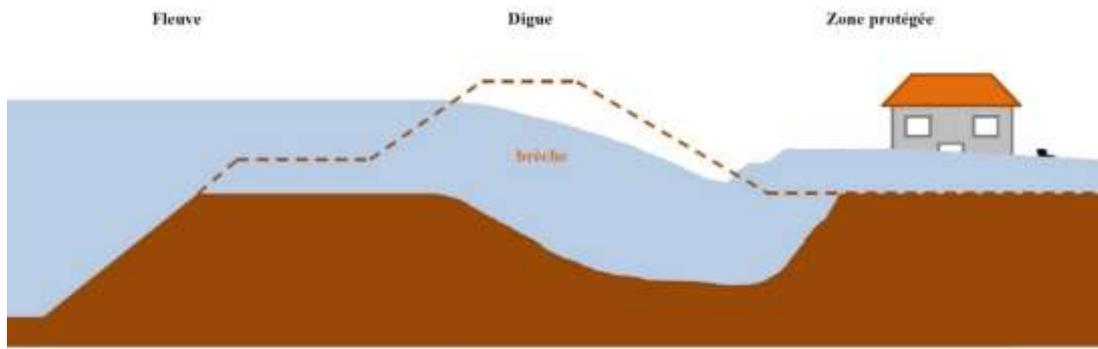


Figure 2. Cas n°1 : Brèche avant surverse

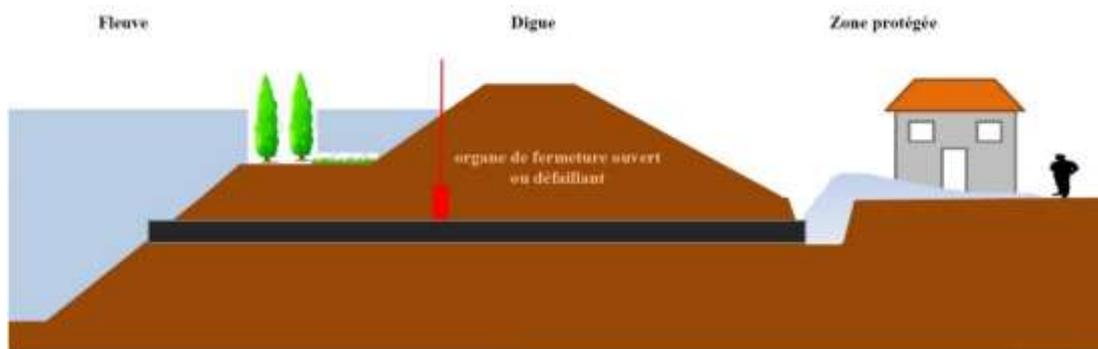


Figure 3. Cas n°2 : Défaillance d'un ouvrage hydraulique traversant

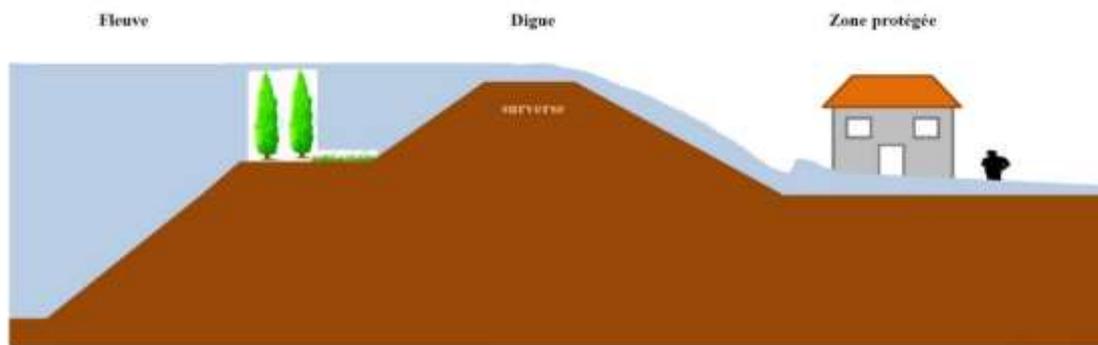


Figure 4. Cas n°3 : Surverse sans brèche

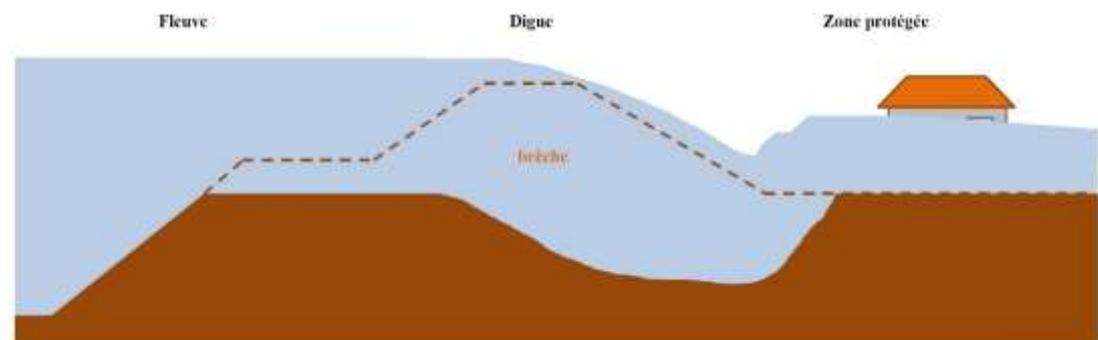


Figure 5. Cas n°4 : Brèche après surverse

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

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 ouvrages constituant le système d'endiguement.

Ce sont ces niveaux liés aux ouvrages qui sont étudiés dans le présent chapitre ; le niveau de protection de la zone protégée fera l'objet du chapitre 8 (scénario 1).

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.
Ce niveau est donc la valeur minimale entre les niveaux de sûreté, de submersion et de franchissement 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 ;
- Le niveau de submersion d'un ouvrage correspond à l'atteinte du niveau de la crête de digue
- Dans le cas des ouvrages maritimes, il y a également le niveau de franchissement, qui correspond aux seuil des entrées d'eau par paquets de mer.

1.3 DIFFERENTES ETAPES DE L'ANALYSE DE RISQUES INCREMENTAUX

La méthodologie est basée sur les étapes suivantes :

- 1) 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 ;
- 2) Détermination pour chaque scénario de brèche de lois de probabilité ;
- 3) Détermination pour chaque profil géométrique et chaque scénario de brèche (12 scénarios pris en compte) de la probabilité conditionnelle de brèche pour une sollicitation donnée (sur un panel de 4 tempêtes);
- 4) Analyse par tronçon homogène

5) Identification des potentiels de dangers (brèche, surverse et défaillance ouvrage traversant)

1.4 LES SCENARIOS DE BRECHE CONSIDERES

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.
- Le soulèvement provoqué par la traction.

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 différents scénarios de brèches considérés pour les ouvrages en terre dans la présente étude de dangers sont :

- l'érosion externe liée à la surverse ;
- l'érosion externe liée au franchissement par paquet ;
- la perte d'équilibre par glissement des talus
- la perte d'équilibre par soulèvement hydraulique
- la perte d'équilibre par glissement des enrochements
- l'érosion interne liée à un conduit ;
- l'érosion interne régressive ;
- l'érosion interne liée à la suffusion ;
- l'érosion interne de contact.

D'autres phénomènes existent mais ont été écartés. C'est le cas de la liquéfaction (liée aux séismes elle n'est pas impactée par la sollicitation tempête), du claquage hydraulique (il n'est pas considéré seul mais intervient dans les autres phénomènes), l'affouillement par batillage (en dehors des tempêtes).

A ces modes de rupture s'ajoutent les suivants qui concernent spécifiquement les ouvrages poids en béton :

- 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 ;

Ils ont été estimés à dire d'expert pour le muret de Port Gardian.

1.5 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 évacuer les 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 rejeter l'eau excédentaire à l'endroit prévu, 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.
- La 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 tempête.

1.6 INVESTIGATIONS, ETUDES ET DIAGNOSTIC APPROFONDI

Les investigations réalisées en amont de cette étude de dangers ont été les suivantes :

1. Relevé topographique des digues et de la zone protégée (Cf. réf.),
2. Relevé bathymétrique de certains étangs et du littoral proche (Cf. réf.),
3. Etude du vent (Cf. chapitre 4)

4. Réalisation annuelle des Visites Techniques Approfondies depuis 2008 (Cf. réf.)
5. Reconnaissances géotechniques (Cf. chapitre 5.0)
6. Etude historique (archives, études antérieures)
7. Etude accidentologique (Cf. chapitre 6)
8. Diagnostic des ouvrages dans le cadre de la stratégie littoral, comprenant l'étude des sollicitations en tempête
9. Connaissances des ouvrages traversants y compris le fonctionnement des organes de fermeture (REX Garde digues)

1.7 LES CALCULS DES SCENARIOS

Les différents scénarios pouvant mener à une brèche sont présentés ci-après en analysant les phénomènes d'érosion externe, de perte d'équilibre et d'érosion interne.

1.7.1 *Erosion externe au franchissement*

Suite aux franchissements, liés aux ruptures des vagues contre les ouvrages, des érosions du talus aval sont possibles. Ces dernières peuvent mener à une rupture de l'ouvrage.

Le critère de rupture est basé sur le manuel Eurotop de 2018 :

Tableau 1. Limites de franchissement pour le dimensionnement (Eurotop 2018)

Type d'aléa et origine	Débit moyen q [l/s par m]	Volume maximum V_{max} [l par m]
Enrochements frontaux ; $H_{m0} > 5m$; pas de dégâts	1	2000 – 3000
Enrochements frontaux ; $H_{m0} > 5m$; talus aval dimensionné pour le franchissement	5-10	10000 – 20000
Crête et talus aval enherbé ; couverture de bonne facture ; $H_{m0} = 1-3m$	5	2000 – 3000
Crête et talus aval enherbé ; couverture de hétérogène ; $H_{m0} = 0.5-3m$	0.1	500
Crête et talus aval enherbé ; $H_{m0} < 1m$	5-10	500
Crête et talus aval enherbé ; $H_{m0} < 0.3m$	Pas de limite	Pas de limite

Compte tenu de la bonne végétalisation des talus de la digue à la Mer et de la faible hauteur de la digue, on considère que la rupture est atteinte à partir d'un débit de 5l/s/m pour les portions de digue non protégée et de 10l/s/m pour les portions où le talus coté terre est protégé par une couverture en dur (promenade, parking, route, enrochements).

Les probabilités de rupture par franchissement retenues sont les suivantes :

- Pour une digue non protégée coté terre :
 - $q < 0.5$, probabilité de rupture = 0.001
 - $0.5 < q < 1$, probabilité de rupture = 0.01
 - $1 < q < 2$, probabilité de rupture = 0.1
 - $2 < q < 5$, probabilité de rupture = 0.5
 - $q > 5$, probabilité de rupture = 0.9
- Pour une digue protégée coté terre :
 - $q < 1$, probabilité de rupture = 0.001

- $1 < q < 2$, probabilité de rupture = 0.01
- $2 < q < 4$, probabilité de rupture = 0.1
- $4 < q < 10$, probabilité de rupture = 0.5
- $q > 10$, probabilité de rupture = 0.9

1.7.2 Erosion externe à la surverse

Une fois que le niveau moyen de la mer au droit des ouvrage dépasse la crête de ce dernier, les entrées d'eaux se font en continue, c'est alors la surverse.

Cette dernière, comme les franchissements, peut éroder le talus aval à partir du pied de l'ouvrage, où les vitesses sont les plus fortes, jusqu'à sa rupture.

Certains ouvrages du système d'endiguement ont des enrochements coté mer qui dépassent la piste de crête ; ces enrochements étant perméables, la surverse est calculée vis-à-vis de la piste de crête.

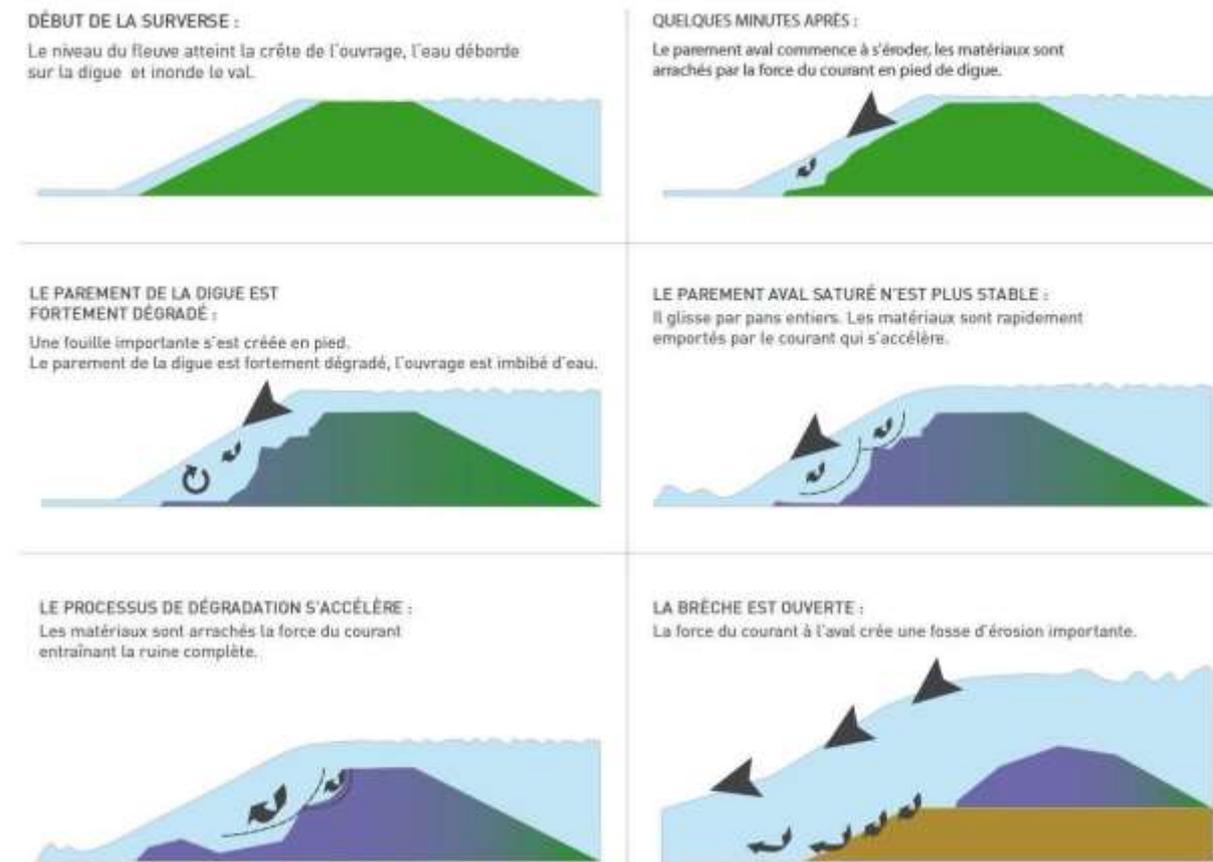


Figure 6. Erosion par surverse(Cemagref 2001 [X023])

Pour les digues non renforcées au déversement comme c'est le cas de tous les ouvrages non bétonnés, les seuils suivants sont retenus :

- - 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.

Ces valeurs correspondent, avec une marge de 20cm, à des vitesses associées d'environ 2m/s pour 10cm de revanche.

1.7.3 Perte d'équilibre par glissement

Quatre profils ont été calculés dans des zones identifiées comme potentiellement critique pour ce mode de rupture (pente raide, grande hauteur, largeur de crête réduite). Ces zones sont les suivantes :

- Profil 5 : Clos du Rhône le long du canal des Launes (PK250 - PK600)
- Profil 31 : Parking en arrière de la digue à la mer (PK2750 - PK2900)
- Profil 47 : Plage Est (PK4100 - PK4600)
- Profil 60 : Étang de l'Impérial (PK5500 - PK5700)

Les résultats de calculs montrent que les facteurs de sécurité obtenus pour les profils 31, 47 et 60 sont supérieurs à 1.00 dans le cas d'un événement millénal. Le facteur de sécurité obtenu pour le profil 5 est de 0.81 dans le cas d'une tempête centennal. Cette valeur équivaut à un facteur de sécurité de 1.22 sans coefficient partiel.

Les probabilités de rupture par glissement retenues sont les suivantes:

- $F < 0.80$, Probabilité de rupture = 0.9
- $0.80 < F < 0.90$, Probabilité de rupture = 0.5
- $0.90 < F < 1.00$, Probabilité de rupture = 0.1
- $1.00 < F < 1.10$, Probabilité de rupture = 0.01
- $1.10 < F < 1.32$, Probabilité de rupture = 0.001
- $1.32 < F < 1.44$, Probabilité de rupture = 0.0001
- $1.44 < F < 1.50$, Probabilité de rupture = 0.00001
- $1.50 < F$, Probabilité de rupture = 0.000001

Pour le glissement horizontal, les calculs de stabilité ont été menés pour les profils les plus critiques en termes de géométrie (largeur en crête et pentes et en termes de conditions géotechniques). Les facteurs de sécurité sont très largement supérieurs au minimum requis. Ce mode de rupture n'est pas considéré comme critique pour la digue à la mer.

1.7.4 Perte d'équilibre par soulèvement

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 :

$$F = Z_{bd} * \frac{\gamma' (L_1 + L_2 + L_3)}{h * \gamma_w * L_3}$$

Avec : $L_1 = \sqrt{k_f d \frac{Z_{bu}}{k_{bu}}}$

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

L_2 est la largeur de la digue (m)

L_0 correspond à la largeur du ségonnal (Si $L_1 > L_0$ alors $L_1 = L_0$)

$$L_3 = \sqrt{k_f d \frac{Z_{bd}}{k_{bd}}}$$

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)

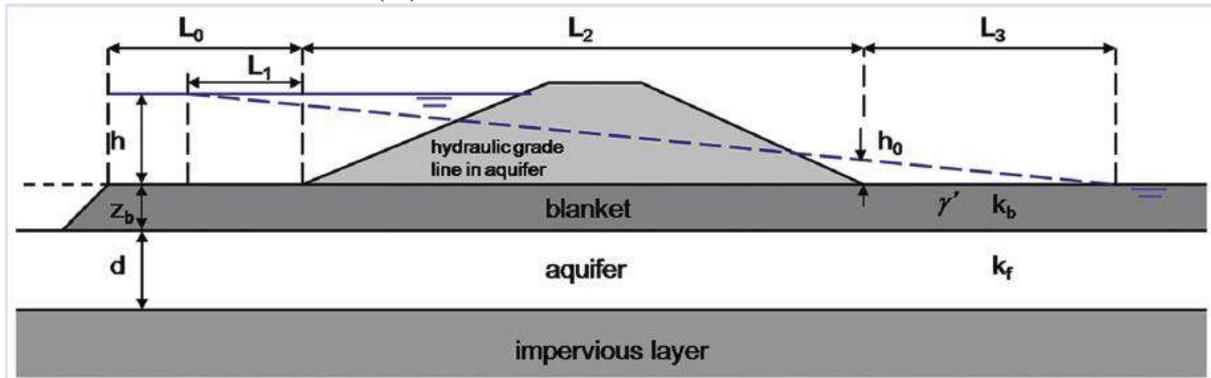


Figure 7. Schéma présentant la disposition et les paramètres utilisés par USACE (ILH [X015])

La perméabilité des matériaux sableux est estimée à partir des essais en place ainsi que la corrélation avec les courbes granulométriques en utilisant la formule de Hazen. La perméabilité des matériaux cohésif est estimée à partir de corrélation avec les courbes granulométriques basées sur le travail de Ren et Santamarina (2018). Les valeurs de perméabilité mesurées, corrélées et retenues sont présentées sur les figures ci-dessous.

On retient les valeurs suivantes :

- Sable : $k = 4.10^{-5}$ m/s
- Argile : $k = 3.10^{-9}$ m/s

Les probabilités de rupture par glissement retenues sont les suivantes:

- $F < 0.90$, Probabilité de rupture = 0.99
- $0.90 < F < 1.00$, Probabilité de rupture = 0.9
- $1.00 < F < 1.10$, Probabilité de rupture = 0.5
- $1.10 < F < 1.20$, Probabilité de rupture = 0.1
- $1.20 < F < 1.30$, Probabilité de rupture = 0.01
- $1.30 < F < 1.40$, Probabilité de rupture = 0.001
- $1.40 < F$, Probabilité de rupture = 0.0001

1.7.5 Perte d'équilibre des enrochements

Pour les secteurs concernés, c'est-à-dire qui ont une protection en enrochement, ce scénario est différent entre la protection en enrochement et l'ouvrage en enrochement

Pour une houle extrême donnée, est calculé le niveau de dommage (noté Sd) généré sur la structure.

Le niveau de dommage, Sd peut être caractérisé ainsi :

- début de dommage, correspondant à l'apparition d'un léger tassement,
- dommage intermédiaire, pouvant mener au déplacement et à la chute de blocs isolés et au reprofilage léger de la carapace,
- rupture, correspondant au reprofilage de la carapace de telle manière que la couche filtre (ou à défaut, le noyau, si l'ouvrage ne comporte pas de couche filtre) est visible.

Les seuils sur les différents niveaux de dommage dépendent principalement de l'angle du talus des ouvrages étudiés. L'ouvrage sera jugé instable si la valeur du niveau de dommage est au-delà du seuil de rupture tel que préconisé par le Rock Manual.

Tableau 2. Seuil de niveau de dommage – Rock Manual

Talus (cot α)	Niveau de dommage (Sd)		
	Début dommage	Dommage intermédiaire	Rupture
1,5	2	3-5	8
2	2	4-6	8
3	2	6-9	12
4	3	8-12	17
6	3	8-17	17

En fonction de la profondeur en pied d'ouvrage et de leurs domaines d'application, différentes formules ont été retenues : Hudson, de Van Der Meer en eau profonde, de Van Der Meer en eau peu profonde ou de Van Gant.

Les calculs sont menés en régime établi, pour Hs comme SWL, au plus proche des points de calcul le long du trait de cote et de préférence au large pour Hs.

Les probabilités de rupture de la carapace en enrochement retenues sont les suivantes :

- Pas de dommage ($Sd < 2$), probabilité de rupture = 0.001
- Début de dommage ($2 < Sd < 3$), probabilité de rupture = 0.01

- Dommage intermédiaire ($3 < S_d < 5$), probabilité de rupture = 0.1
- Dommage intermédiaire ($5 < S_d < 8$), probabilité de rupture = 0.5
- Rupture ($8 < S_d$), probabilité de rupture = 0.9

1.7.6 Erosion interne de conduit

Si un conduit traverse la digue, l'eau qui s'y infiltre peut entraîner les matériaux du corps de l'ouvrage, le conduit va alors s'élargir, pouvant mener à une rupture.

Les conduits peuvent être à l'origine : des terriers, des résidus de système racinaires suite au pourrissement et à la dégradation de celui-ci, des fissurations apparaissant par tassements différentiels ou dessiccation des argiles, des réseaux ou ouvrages traversants... Le phénomène d'érosion est possible dans un matériau qui se « tient », soit dans un remblai cohésif ou le long d'un ouvrage traversant rigide.

Entre les pk 0.0 et pk 20.0, le corps de digue est constitué principalement de matériaux granulaire donc peu propice à ce type d'érosion. Les probabilités de rupture sont bornées par la valeur de 0.0001.

Une probabilité de rupture plus élevée est considérée dans les matériaux argileux (pk20.0 à pk25.0). Des valeurs similaires sont considérées pour les linéaires touchés par les désordres identifiés lors de la VTA de types dessiccation (pK16.8 à pK18.4).

1.7.7 Erosion interne régressive

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 et créer un conduit. Si ce conduit est tenu par un « toit » cohésif ou si la perte de matière atteint la retenue amont, une brèche peut s'initier.

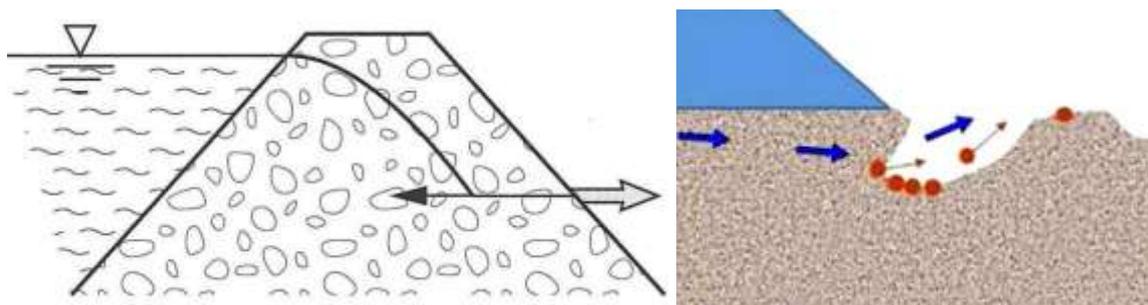


Figure 8. Erosion régressive (Bonelli and Al. 2012 [X006])

Ces différentes phases de ce scénario sont :

- Infiltration et claquage de la couche d'argile,
- Initiation de l'érosion régressive, départ des particules vers l'aval,
- Progression de l'érosion régressive de l'aval vers l'amont,
- Création de conduits reliés au plan d'eau en amont et l'élargissement des conduits,

- Rupture de la digue (brèche),
- Élargissement de la brèche.

L'initiation de l'érosion régressive a été vérifiée avec le modèle de Sellmeijer. Le détail de ce modèle est donné ci-dessous (source bulletin 64 de la CIGB) :

$$\frac{H_C}{L} = \frac{1}{c} = F_R F_S F_G$$

$$F_R = \eta \frac{\gamma'_p}{\gamma_w} \tan \vartheta \left(\frac{RD}{RD_m} \right)^{0.35} \left(\frac{U}{U_m} \right)^{0.13} \left(\frac{KAS}{KAS_m} \right)^{-0.02}$$

$$F_S = \frac{d_{70}}{\sqrt[3]{\kappa L}} \left(\frac{d_{70m}}{d_{70}} \right)^{0.6}$$

$$F_G = 0.91 \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{0.28}{2.8} + 0.04} - 1$$

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/m³))
- γ_w : Poids volumique de l'eau (kN/ m³)
- η : constante de Whites (0.25)
- ϑ : angle du frottement interne du sable (°)
- κ : perméabilité intrinsèque (m²) $\kappa = \frac{\nu}{g} * k$

Avec ν : viscosité cinématique ; g : gravité ; k : perméabilité hydraulique

On retient : $\nu = 1,3 \cdot 10^{-6}$ m²/s (à 10°C) et $g = 9.81$ m/s²

Étant donné que la digue à la mer est principalement sableuse à sablo graveleuse, la distance L est prise égale à la distance en base de digue. En effet, le pied de digue est l'endroit où les résurgences ont le plus de chance d'apparaître.

Les principaux paramètres de sol considérés dans les calculs sont les suivants :

- Angle de frottement du sable = 33 degrés
- $D_{70}=0.3\text{mm}$ (basé sur les courbes granulométriques)
- $K=4.10^{-5}\text{m/s}$ (basé sur les tests de perméabilité et sur l'interprétation des courbes granulométriques)
- Épaisseur de la couche de sable : 10m (conservatif)

Les résultats obtenus avec le modèle de Selmeijer montrent que les niveau d'eau d'une tempête millénale est inférieure au niveau critique pour tous les tronçons. Ce mode de rupture n'est pas considéré comme critique dans la suite de l'étude.

Les probabilités de rupture par érosion régressive retenues sont les suivantes (h étant la hauteur d'eau et H_c la hauteur d'eau critique d'après le modèle de Sellmeijer):

- $H_c-H < 0.0$, Probabilité de rupture = 0.99
- $0.00 < H_c-H < 0.10$, Probabilité de rupture = 0.9
- $0.10 < H_c-H < 0.30$, Probabilité de rupture = 0.5
- $0.30 < H_c-H < 0.50$, Probabilité de rupture = 0.1
- $0.50 < H_c-H < 1.00$, Probabilité de rupture = 0.01
- $1.00 < H_c-H < 1.50$, Probabilité de rupture = 0.001
- $1.50 < H_c-H$, Probabilité de rupture = 0.0001

1.7.8 Erosion interne de suffusion

Le phénomène de suffusion se caractérise par la migration des particules fines au sein du squelette grossier du sol sollicité par des écoulements. La disparition des particules fines sur une partie d'ouvrage peut générer une augmentation des contraintes inter granulaires à l'origine de ruptures au sein du squelette porteur de l'ouvrage. Ce phénomène génère un risque lorsqu'une partie importante du remblai ou de sa fondation est soumise à l'écoulement interne.

L'érosion interne par suffusion est vérifiée en vérifiant que les gradients qui se développent à l'intérieur de la digue restent inférieurs à des valeurs critiques. Cette approche reste qualitative en l'absence d'outils de vérification calculatoire.

Tableau 3. Critère de stabilité hydraulique à la suffusion

Gradient	Stabilité à la suffusion
$i < 0,3$	Stable
$0.3 < i < 0.7$	Risque modéré
$i > 0.7$	Risque avéré

Les calculs ont été réalisés en supposant une distribution linéaire du gradient dans la digue. Le gradient est inférieur dans tous les cas à 0.3.

Les tronçons de la digue à la mer sont considérés comme « stables ».

1.7.9 Erosion interne de contact

L'érosion de contact est susceptible de se produire dans le cas où les règles de filtre ne sont pas vérifiées, en particulier au niveau des protections en enrochement, à l'interface entre sous couche et carapace et entre noyau et sous couche.

Les tronçons concernés sur la digue à la mer sont équipés de géotextile placés sous la carapace de 1-2T à 2-3T.

La rupture par érosion de contact n'est donc pas considérée comme critique.

2 RAPPEL DE L'ALEA

Les scénarios modélisés utilisés pour la présente étude sont ceux du BRGM. Les périodes de retour mentionnées dans cette étude [RP-68619-FR] prennent en compte un exhaussement de 20 cm du niveau de la mer ; suivant les scénarios du Giec cette rehausse devrait être atteinte vers 2050. Les périodes de retour étant variables du fait de l'élévation du niveau marin, il n'y ait pas fait référence ici.

Concernant la bathymétrie, les fonds actuels et estimés dans 15 ans ont été analysés.

Les paramètres des tempêtes modélisées sont rappelés ci-dessous :

Tableau 4. Niveaux modélisés et périodes de retour associées

Nom du Scénario	Niveau marin modélisé [m NGF]	Hauteur de vagues associée [m]
T0.97 (Nov 2014)*	0.97	4.04
T1.06	1.06	4.70
T1.17	1.17	5.09
T1.30	1.30	5.33
T1.55	1.55	8.75

**Données issues de la modélisation ; légèrement différentes du REX, voir chapitre 6*

Il est à noter que la modélisation injecte le niveau marin *au large* alors qu'il sera mesuré à la cote (pertuis de la Fourcade) ce qui est sécuritaire car lors des tempêtes il y a un set up généré par les vagues.

La hauteur des vagues est celle issue du *point P9* de la modélisation (isobathe 50m) ; c'est la bouée de l'Espiguette (bathymétrie de 32m) qui pourra être mesurée pour classer les événements.

3 PRESENTATION DES RESULTATS

Afin de faciliter la lecture, un code couleur concernant les probabilités de rupture a été retenu ; il est utilisé à la fois pour les probabilités par scénario et pour la probabilité globale de rupture, pour un aléa donné.

Tableau 5. Code couleur des probabilités de rupture

limite basse	Mise en forme	limite haute	Seuils
0	4,00E-05	0,0001	RAS
0,0001	8,00E-04	0,001	
0,001	4,00E-03	0,01	
0,01	2,00E-02	0,05	
0,05	8,00E-02	0,1	Niveau de Sûreté dépassé
0,1	2,00E-01	0,5	
0,5	6,00E-01	1	Niveau de Danger dépassé

Pour chaque tronçon sont synthétisés les différents niveaux liés à l'ouvrage et les entrées d'eaux à prendre en compte lors des scénarios 1 et 3 (chapitre 8).

Ces données prennent en compte un approfondissement des fonds marins estimés d'ici la fin de validité de l'étude, dans 15 ans . Si cela induit des changements, ils sont précisés sous le tableau et le « OUI » est noté entre parenthèses. De même, les volumes notés sont les volumes avec la bathymétrie estimée dans 15 ans, qui se trouvent être supérieurs au calcul en état actuel.

Tableau 6. Niveaux caractéristiques du secteur XXXexempleXXX

N Submersion	N Franchissement	N Sûreté	N Protection	N Danger
T1.30	T1.06	T1.17	T1.06	T1.30

Tableau 7. Entrée d'eau considérées pour les scénarios ; secteur XXXexempleXXX

Aléa	Franchissement	Submersion	Brèche Scénario 1	Brèche Scénario 3
T0.97	non	non	-	-
T1.06	non	non	non	non
T1.17	OUI (xxx m ³)	non	non	non
T1.30	OUI (xxxx m ³)	non	(OUI)	non
T1.55	OUI (xxxx m ³)	OUI (xxx m ³)	OUI	OUI

Exemple de précision : La prise en compte de l'approfondissement des fonds augmente fortement les volumes franchissant pour les tempêtes moyennes, ce qui influe sur le niveau de sûreté.

Dan cet exemple, seuls des franchissements sont à prendre en compte pour T1.17 ; pour T1.30 la modélisation d'entrée d'eau par brèche est à prendre en compte pour le scénario 1 mais pas 3.

Remarque : pour T0.97, seule la surverse a été étudiée ; il n'a pas été mené de calcul de stabilité.

4 CALCUL

Les calculs ont été menés par tronçon homogènes, à la fois par rapport à la géométrie de l'ouvrage et par rapport au contexte géotechnique en fondation.

Ces derniers font en moyenne 270m, variant entre 40 et 1425m. Dans le tableau de calcul de chaque secteur, les PK correspondent aux points métriques ; la différence entre celui de fin et de début donne donc la longueur du tronçon.

Pour chaque phénomène, le niveau retenu est celui garanti.

Ainsi, si pour un secteur il n'y a pas de franchissement pour la modélisation T1.17 mais qu'il y en a pour T1.30, le niveau de franchissement affiché sera T1.17. Il en est de même pour les niveaux de surverse, sûreté et danger.

Si il y a dépassement du franchissement dès la modélisation T0.97, le niveau affiché sera T0.81. En effet ce niveau est atteint tous les deux ans environs et ne mènent à aucune entrée d'eau.

Si il y a dépassement des niveaux structurels (sûreté ou danger) dès la modélisation 1.06, le niveau affiché sera T0.97. En effet pour ce type d'évènement il peu y avoir franchissement et désordre mais pas de brèche d'après le retour d'expérience.

Pour le niveau de danger, si le niveau de sûreté est T1.55, il sera retenu $> T1.55$.

Le niveau de protection est le minimum entre les niveaux de franchissement, surverse et sûreté.

4.1 SECTEUR CENTRE VILLE (DM 0 A 4)

4.1.1 DM 0 à 1 (Clos du Rhône)

10 tronçons de calculs sont présents sur ce linéaire.

Les calculs menés pour la tempête T1.55 indiquent des coefficients Sd très bas sur la digue (1.3 ; 0.1, 0.2 soit inférieur au seuil des premiers dommages), les calculs n'ont alors pas été menés pour des tempêtes plus faibles.

Le niveau de sûreté est inférieure à la tempête T1.06, le risque principal étant lié à une rupture par grand glissement entre les DM 250 et 700.

Pour le risque d'érosion par surverse, il augmente également rapidement avec l'intensité des tempêtes.

Un canal est présent en arrière des ouvrages à partir du DM 0.25 ; il ne permet pas de reprendre les eaux de franchissement car pour les petits volumes issus des tempêtes T1.06 et T1.17, plus de 85% des franchissements se font entre DM0 et DM0.175.

Tableau 8. Niveaux caractéristiques du secteur Clos du Rhône

N Submersion	N Franchissement	N Sûreté	N Protection	N Danger
T1.55	< T0.97	T0.97	< T0.97	T1.17

Tableau 9. Entrée d'eau considérées pour les scénarios ; secteur Clos du Rhône

Aléa	Franchissement	Submersion	Brèche Scénario 1	Brèche Scénario 3
T0.97	OUI (500m ³)	non	-	non
T1.06	OUI (3 000m ³)	non	OUI	non
T1.17	OUI (5 800 m ³)	non	OUI	non
T1.30	OUI (13 300 m ³)	non	OUI	OUI
T1.55	OUI (450 000 m ³)	non	OUI	OUI

La prise en compte de l'approfondissement des fonds ne modifie pas ces résultats, en dehors des volumes de franchissements qui sont bien plus faibles en l'état actuel de la bathymétrie (30 ; 70 ; 360 ; 1 400 et 170 000 m³).

Tableau 10. Calculs des probabilités de rupture ; clos du Rhône

PK début		0	100	150	250	350	450	630	700	770	900
PK fin		100	150	250	350	450	630	700	770	900	1050
Zone géométrique		a1	a2	a43	b3	b44	b4	b5	c45	c6	c7
Zone géotechnique		g1	g1-g2	g1-g2	g1-g2						
Enrochements	T1.06	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-06	1E-03	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-06	1E-03	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-06	1E-03	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-06	1E-03	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
Surverse	T1.06	1E-02	1E-02	1E-03	1E-04						
	T1.17	1E-01	1E-01	1E-03	1E-04						
	T1.30	5E-01	5E-01	1E-02	1E-04						
	T1.55	9E-01	9E-01	5E-01	1E-04	1E-04	1E-03	1E-04	1E-04	1E-03	1E-04
Franchissement	T1.06	1E-02	1E-03								
	T1.17	1E-01	1E-02	1E-03							
	T1.30	1E-01	1E-02	1E-03	1E-02	1E-03	1E-02	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.55	9E-01	5E-01	1E-03	9E-01	1E-03	9E-01	1E-03	1E-03	1E-03	9E-01
Grand glissement	T1.06	1E-06	1E-06	1E-06	5E-01	5E-01	5E-01	5E-01	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06	1E-06	5E-01	5E-01	5E-01	5E-01	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06	1E-06	9E-01	9E-01	9E-01	9E-01	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06	1E-06	9E-01	9E-01	9E-01	9E-01	1E-06	1E-06	1E-06
Déplacement horizontal	T1.06	1E-06									
	T1.17	1E-06									
	T1.30	1E-06									
	T1.55	1E-06									
Soulèvement hydraulique	T1.06	1E-04									
	T1.17	1E-04									
	T1.30	1E-03	1E-03	1E-03	1E-04						
	T1.55	1E-02	1E-02	1E-02	1E-04						
Erosion régressive	T1.06	1E-04									
	T1.17	1E-04									
	T1.30	1E-04									
	T1.55	1E-04									
Erosion conduit de	T1.06	1E-04									
	T1.17	1E-04									
	T1.30	1E-04									
	T1.55	1E-04									
Aléa global de rupture	T1.06	2,1E-02	1,2E-02	3,3E-03	5,0E-01	5,0E-01	5,0E-01	5,0E-01	1,4E-03	1,4E-03	1,4E-03
	T1.17	1,9E-01	1,1E-01	3,3E-03	5,0E-01	5,0E-01	5,0E-01	5,0E-01	1,4E-03	1,4E-03	1,4E-03
	T1.30	5,5E-01	5,1E-01	1,3E-02	9,0E-01	9,0E-01	9,0E-01	9,0E-01	1,4E-03	1,4E-03	1,4E-03
	T1.55	9,9E-01	9,5E-01	5,1E-01	9,9E-01	9,0E-01	9,9E-01	9,0E-01	1,4E-03	2,3E-03	9,0E-01

4.1.2 DM 1 à 1.3 (Crin Blanc)

1 tronçon de calcul est présent sur ce linéaire.

Le tronçon est une dune qui est géométriquement surdimensionnée par rapport à l'aléa ; il n'y a pas de risque particulier sur ce tronçon, dont le niveau de protection est la tempête T1.55.

Tableau 11. Niveaux caractéristiques du secteur Crin Blanc

N Submersion	N Franchissement	N Sûreté	N Protection	N Danger
T1.55	T1.55	T1.55	T1.55	> T1.55

Tableau 12. Entrée d'eau considérées pour les scénarios ; secteur Crin Blanc

Aléa	<u>Franchissement</u>	<u>Submersion</u>	<u>Brèche Scénario 1</u>	<u>Brèche Scénario 3</u>
T0.97	non	non	non	non
T1.06	non	non	non	non
T1.17	non	non	non	non
T1.30	non	non	non	non
T1.55	non	non	non	non

La prise en compte de l'approfondissement des fonds ne modifie pas ces résultats.

Tableau 13. Calculs des probabilités de rupture ; Crin Blanc

PK début		1050
PK fin		1300
Zone géométrique		d8
Zone géotechnique		g2
Enrochements	T1.06	1E-06
	T1.17	1E-06
	T1.30	1E-06
	T1.55	1E-06
Surverse	T1.06	1E-04
	T1.17	1E-04
	T1.30	1E-04
	T1.55	1E-04
Franchissement	T1.06	1E-03
	T1.17	1E-03
	T1.30	1E-03
	T1.55	1E-03
Grand glissement	T1.06	1E-06
	T1.17	1E-06
	T1.30	1E-06
	T1.55	1E-06
Déplacement horizontal	T1.06	1E-06
	T1.17	1E-06
	T1.30	1E-06
	T1.55	1E-06
Soulèvement hydraulique	T1.06	1E-04
	T1.17	1E-04
	T1.30	1E-04
	T1.55	1E-04
Erosion régressive	T1.06	1E-04
	T1.17	1E-04
	T1.30	1E-04
	T1.55	1E-04
Erosion conduit de	T1.06	1E-04
	T1.17	1E-04
	T1.30	1E-04
	T1.55	1E-04
Aléa global de rupture	T1.06	1,4E-03
	T1.17	1,4E-03
	T1.30	1,4E-03
	T1.55	1,4E-03

4.1.3 DM 1.3 à 1.7 (Avenue aubanel)

2 tronçons de calcul sont présents sur ce linéaire.

Cet ouvrage en béton, protégé par une dune ne présente pas de risque de rupture. Il est en limite de franchissement pour T1.55.

Tableau 14. Niveaux caractéristiques du secteur Avenue aubanel

N Submersion	N Franchissement	N Sûreté	N Protection	N Danger
T1.55	T1.30	T1.55	T1.30	> T1.55

Les volumes de franchissement sont négligeables mais ont été conservés car il n'y a pas de dispositif permettant de stocker cette eau en dehors du pluvial, qui ne pourra plus s'écouler en gravitaire lors d'une tempête.

Tableau 15. Entrée d'eau considérées pour les scénarios ; secteur Avenue aubanel

Aléa	Franchissement	Submersion	Brèche Scénario 1	Brèche Scénario 3
T0.97	non	non	non	non
T1.06	non	non	non	non
T1.17	non	non	non	non
T1.30	non	non	non	non
T1.55	OUI (14 m ³)	non	non	non

La prise en compte de l'approfondissement des fonds ne modifie pas ces résultats en dehors du volume de déversement (1m³ actuellement).

Tableau 16. Calculs des probabilités de rupture ; Avenue aubanel

PK début		1300	1470
PK fin		1470	1700
Zone géométrique		e9	e10
Zone géotechnique		g2	g2
Enrochements	T1.06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06
Surverse	T1.06	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04
Franchissement	T1.06	1E-03	1E-03
	T1.17	1E-03	1E-03
	T1.30	1E-03	1E-03
	T1.55	1E-03	1E-03
Grand glissement	T1.06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06
Déplacement horizontal	T1.06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06
Soulèvement hydraulique	T1.06	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04
Erosion régressive	T1.06	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04
Erosion conduit de	T1.06	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04
Aléa global de rupture	T1.06	1,4E-03	1,4E-03
	T1.17	1,4E-03	1,4E-03
	T1.30	1,4E-03	1,4E-03
	T1.55	1,4E-03	1,4E-03

4.1.4 DM 1.7 à 2.1 (Port Gardian)

2 tronçons de calcul sont présents sur ce linéaire.

Les risques de rupture qui apparaissent dans le diagnostic sur ce tronçon sont liés à la surverse ; si l'érosion de cet ouvrage maçonné, bâti dans une zone goudronnée, semble peu probable, il y a un risque lié à la stabilité, ce dernier apparaît à la pleine charge (au-delà de T1.17) mais augmente peu car il y a rapidement un matelas d'eau coté ville ; les probabilités associées à la rupture par surverse ci-dessous sont données à dire d'expert.

La rupture n'entraînerait que peu de sur-aléa car l'inondation par franchissement et surverse est importante.

Tableau 17. Niveaux caractéristiques du secteur Port Gardian

N Submersion	N Franchissement	N Sûreté	N Protection	N Danger
T1.30	T1.06	T1.17	T1.06	T1.30

Les volumes de franchissement sont négligeables pour T1.17 mais ont été conservés car il n'y a pas de dispositif permettant de stocker cette eau en dehors du pluvial, qui ne pourra plus s'écouler en gravitaire lors d'une tempête.

Tableau 18. Entrée d'eau considérées pour les scénarios ; secteur Port Gardian

Aléa	Franchissement	Submersion	Brèche Scénario 1	Brèche Scénario 3
T0.97	non	non	non	non
T1.06	non	non	non	non
T1.17	OUI (1 m ³)	non	non	non
T1.30	OUI (3 250 m ³)	non	OUI	non
T1.55	OUI (700 000 m ³)	OUI (3 500 000 m ³)	OUI	OUI

La prise en compte de l'approfondissement des fonds à 15 ans n'a pas d'impact sur les niveaux. Pour les volumes de franchissement et surverse, ils restent du même ordre de grandeur.

Tableau 19. Calculs des probabilités de rupture ; Port Guardian

PK début		1700	1900
PK fin		1900	2150
Zone géométrique		f11	f12
Zone géotechnique		g2	g2
Enrochements	T1.06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06
Surverse	T1.06	1E-03	1E-03
	T1.17	1E-03	1E-03
	T1.30	1E-02	1E-02
	T1.55	1E-01	1E-01
Franchissement	T1.06	1E-03	1E-03
	T1.17	1E-03	1E-03
	T1.30	1E-02	1E-01
	T1.55	9E-01	9E-01
Grand glissement	T1.06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06
Déplacement horizontal	T1.06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06
Soulèvement hydraulique	T1.06	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04
Erosion régressive	T1.06	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04
Erosion conduit de	T1.06	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04
Aléa global de rupture	T1.06	2,3E-03	2,3E-03
	T1.17	2,3E-03	2,3E-03
	T1.30	2,0E-02	1,1E-01
	T1.55	9,1E-01	9,1E-01

4.1.5 DM 2.1 à 2.6 (arènes)

6 tronçons de calcul sont présents sur ce linéaire.

Les calculs menés pour la tempête T1.55 indiquent des coefficients Sd très bas sur la digue (1.2 ; 1.2, 0.6 soit inférieur au seuil des premiers dommages), les calculs n'ont alors pas été menés pour des tempêtes plus faibles.

Le risque de rupture est lié à l'érosion dû aux franchissements, qui sont conséquent dès T1.06 sur le secteur, en particulier sur 100m entre DM 2.35 et 2.45.

Tableau 20. Niveaux caractéristiques du secteur arènes

N Submersion	N Franchissement	N Sûreté	N Protection	N Danger
T1.55	< T0.97	T0.97	< T0.97	T1.06

Tableau 21. Entrée d'eau considérées pour les scénarios ; secteur arènes

Aléa	Franchissement	Submersion	Brèche Scénario 1	Brèche Scénario 3
T0.97	OUI (3 000 m ³)	non	-	non
T1.06	OUI (14 700 m ³)	non	(OUI)	non
T1.17	OUI (39 000 m ³)	non	(OUI)	(OUI)
T1.30	OUI (85 000 m ³)	non	OUI	OUI
T1.55	OUI (950 000 m ³)	non	OUI	OUI

La prise en compte de l'approfondissement des fonds à 15 ans fait passer le niveau de sûreté de T1.17 à <T1.06 et le niveau de danger de T1.17 à T1.06 ; ce sont ces derniers qui sont retenus. Cela vient du fait que les volumes de franchissement sont très fortement augmentés pour les scénarios les moins intenses (fonds actuels : 0 ; 21 m³ et 360 m³).

Tableau 22. Calculs des probabilités de rupture ; Arènes

PM début		2150	2300	2350	2420	2460	2550
PM fin		2300	2350	2420	2460	2550	2600
Zone géométrique		h13	h14	h15	h16	h17	h18
Zone géotechnique		g2	g2	g2	g2	g2	g2
Enrochements	T1.06	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.17	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.30	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.55	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03
Surverse	T1.06	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-03	1E-03	1E-03	1E-04	1E-03	1E-03
Franchissement	T1.06	1E-03	1E-03	1E-03	5E-01	1E-03	1E-03
	T1.17	1E-03	1E-03	1E-01	9E-01	1E-03	1E-03
	T1.30	1E-03	1E-03	5E-01	9E-01	1E-01	1E-03
	T1.55	9E-01	5E-01	9E-01	9E-01	9E-01	9E-01
Grand glissement	T1.06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
Déplacement horizontal	T1.06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
Soulèvement hydraulique	T1.06	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
Erosion régressive	T1.06	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
Erosion conduit de	T1.06	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
Aléa global de rupture	T1.06	2,4E-03	2,4E-03	2,4E-03	5,0E-01	2,4E-03	2,4E-03
	T1.17	2,4E-03	2,4E-03	1,0E-01	9,0E-01	2,4E-03	2,4E-03
	T1.30	2,4E-03	2,4E-03	5,0E-01	9,0E-01	1,0E-01	2,4E-03
	T1.55	9,0E-01	5,0E-01	9,0E-01	9,0E-01	9,0E-01	9,0E-01

4.1.6 *DM 2.6 à 3.05 (parking des amphores)*

5 tronçons de calcul sont présents sur ce linéaire.

Le calcul mené pour la tempête T1.55 indique un coefficient Sd très bas sur la digue (0.4 soit inférieur au seuil des premiers dommages), les calculs n'ont alors pas été menés pour des tempêtes plus faibles.

Le risque de rupture est principalement lié à l'érosion dû aux franchissements, ces derniers sont conséquents dès T1.06 sur le secteur, en particulier entre DM 2.75 et DM 2.9.

Le risque d'érosion régressive est également présent pour les plus fortes tempêtes, même si beaucoup moins significatif.

Tableau 23. Niveaux caractéristiques du secteur parking des amphores

N Submersion	N Franchissement	N Sûreté	N Protection	N Danger
T1.55	< T0.97	T0.97	< T0.97	T1.17

Tableau 24. Entrée d'eau considérées pour les scénarios ; secteur parking des amphores

Aléa	Franchissement	Submersion	Brèche Scénario 1	Brèche Scénario 3
T0.97	OUI (2 400 m ³)	non	-	non
T1.06	OUI (11 200 m ³)	non	(OUI)	non
T1.17	OUI (25 600 m ³)	non	(OUI)	non
T1.30	OUI (51 900 m ³)	non	OUI	(OUI)
T1.55	OUI (432 000 m ³)	non	OUI	OUI

La prise en compte de l'approfondissement des fonds à 15 ans fait passer le niveau de sûreté de T1.17 à <T1.06 et le niveau de danger de T1.30 à T1.17 ; ce sont ces derniers qui sont retenus. Cela est dû au fait que les franchissements sont bien plus faibles en l'état actuel de la bathymétrie (190 ; 1 500 ; 5 000 ; 14 000 et 207 000 m³).

Tableau 25. Calculs des probabilités de rupture ; Parking des amphores

PM début		2600	2650	2750	2900	3000
PM fin		2650	2750	2900	3000	3050
Zone géométrique		i46	i47	j19	j20	j48
Zone géotechnique		g2	g2	g2	g2	g2
Enrochements	T1.06	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.17	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.30	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.55	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03
Surverse	T1.06	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-03	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-03	1E-03	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-02	1E-02	1E-04	1E-04	1E-04
Franchissement	T1.06	1E-03	1E-03	1E-01	1E-03	1E-03
	T1.17	1E-03	1E-03	5E-01	1E-03	1E-03
	T1.30	1E-03	1E-03	9E-01	1E-03	1E-03
	T1.55	9E-01	9E-01	9E-01	1E-02	1E-03
Grand glissement	T1.06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
Déplacement horizontal	T1.06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
Soulèvement hydraulique	T1.06	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
Erosion régressive	T1.06	1E-04	1E-04	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.17	1E-04	1E-04	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.30	1E-04	1E-04	1E-02	1E-02	1E-02
	T1.55	1E-03	1E-03	1E-02	1E-02	1E-02
Erosion conduit de	T1.06	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
Aléa global de rupture	T1.06	2,4E-03	2,4E-03	1,0E-01	3,3E-03	3,3E-03
	T1.17	2,4E-03	3,3E-03	5,0E-01	3,3E-03	3,3E-03
	T1.30	3,3E-03	3,3E-03	9,0E-01	1,2E-02	1,2E-02
	T1.55	9,0E-01	9,0E-01	9,0E-01	2,1E-02	1,2E-02

4.1.7 DM 3.05 à 3.2 (Thalacap)

2 tronçons de calcul sont présents sur ce linéaire.

Le calcul mené pour la tempête T1.55 indique un coefficient Sd très bas sur la digue (0.1 soit inférieur au seuil des premiers dommages), les calculs n'ont alors pas été menés pour des tempêtes plus faibles.

Les premiers franchissements se font autour de T1.06. Le risque de rupture est lié à l'érosion dû à ces franchissements, à partir de la tempête T1.30.

Le risque d'érosion régressive est également présent même si beaucoup moins significatif.

Tableau 26. Niveaux caractéristiques du secteur Thalacap

N Submersion	N Franchissement	N Sûreté	N Protection	N Danger
T1.55	< T0.97	T1.17	< T0.97	T1.30

Les volumes de franchissement sont négligeables pour T1.06 mais ont été conservés car il n'y a pas de dispositif permettant de stocker cette eau en dehors du pluvial, qui ne pourra plus s'écouler en gravitaire lors d'une tempête.

Tableau 27. Entrée d'eau considérées pour les scénarios ; secteur Thalacap

Aléa	Franchissement	Submersion	Brèche Scénario 1	Brèche Scénario 3
T0.97	OUI (30 m ³)	non	non	non
T1.06	OUI (350 m ³)	non	non	non
T1.17	OUI (1 650 m ³)	non	non	non
T1.30	OUI (5 280 m ³)	non	(OUI)	non
T1.55	OUI (101 400 m ³)	non	OUI	OUI

La prise en compte de l'approfondissement des fonds à 15 ans fait passer le niveau de sûreté de T1.30 à T1.17 ; c'est ce dernier qui est retenu. De plus les volumes de franchissements sont bien plus faibles en l'état actuel de la bathymétrie (0 ; 50 ; 400 ; 2 300 et 45 000 m³).

Tableau 28. Calculs des probabilités de rupture ; Thalacap

PM début		3050	3100
PM fin		3100	3200
Zone géométrique		j49	j21
Zone géotechnique		g2	g2
Enrochements	T1.06	1E-03	1E-03
	T1.17	1E-03	1E-03
	T1.30	1E-03	1E-03
	T1.55	1E-03	1E-03
Surverse	T1.06	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04
Franchissement	T1.06	1E-03	1E-03
	T1.17	1E-03	1E-03
	T1.30	1E-03	1E-01
	T1.55	1E-03	9E-01
Grand glissement	T1.06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06
Déplacement horizontal	T1.06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06
Soulèvement hydraulique	T1.06	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04
Erosion régressive	T1.06	1E-03	1E-03
	T1.17	1E-03	1E-03
	T1.30	1E-02	1E-02
	T1.55	1E-02	1E-02
Erosion conduit de	T1.06	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04
Aléa global de rupture	T1.06	3,3E-03	3,3E-03
	T1.17	3,3E-03	3,3E-03
	T1.30	1,2E-02	1,1E-01
	T1.55	1,2E-02	9,0E-01

4.1.8 DM 3.2 à 3.6 (Parking plage Est)

5 tronçons de calcul sont présents sur ce linéaire.

Les calculs menés pour la tempête T1.55 indiquent des coefficients Sd très bas sur la digue (1.7 ; 0.1 soit inférieur au seuil des premiers dommages), les calculs n'ont alors pas été menés pour des tempêtes plus faibles.

Le risque principal sur ce tronçon est l'érosion lors de franchissements ; les glissements des enrochements et l'érosion régressive font également partie des phénomènes jouant un rôle sur le secteur.

Tableau 29. Niveaux caractéristiques du secteur Parking plage Est

N Submersion	N Franchissement	N Sûreté	N Protection	N Danger
T1.55	< T0.97	T1.06	< T0.97	T1.17

Tableau 30. Entrée d'eau considérées pour les scénarios ; secteur Parking plage Est

Aléa	Franchissement	Submersion	Brèche Scénario 1	Brèche Scénario 3
T0.97	OUI (500 m ³)	non	non	non
T1.06	OUI (5 170 m ³)	non	non	non
T1.17	OUI (27 900 m ³)	non	OUI	non
T1.30	OUI (77 500 m ³)	non	OUI	OUI
T1.55	OUI (721 000 m ³)	non	OUI	OUI

La prise en compte de l'approfondissement des fonds ne modifie pas ces résultats. Les volumes de franchissement sont augmentés mais ils restent du même ordre de grandeur.

Tableau 31. Calculs des probabilités de rupture ; Parking plage est

PM début		3200	3300	3350	3400	3450
PM fin		3300	3350	3400	3450	3600
Zone géométrique		j50	j22	j23	k51	k24
Zone géotechnique		g2	g2	g2	g2	g2
Enrochements	T1.06	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.17	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.30	1E-03	1E-02	1E-02	1E-03	1E-03
	T1.55	1E-03	1E-01	1E-01	1E-03	1E-03
Surverse	T1.06	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-03	1E-04	1E-03	1E-04	1E-04
Franchissement	T1.06	1E-03	1E-03	1E-02	1E-03	1E-03
	T1.17	1E-03	1E-01	5E-01	1E-03	1E-03
	T1.30	1E-03	5E-01	9E-01	1E-03	1E-03
	T1.55	9E-01	9E-01	9E-01	1E-03	1E-01
Grand glissement	T1.06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
Déplacement horizontal	T1.06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
Soulèvement hydraulique	T1.06	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
Erosion régressive	T1.06	1E-03	1E-03	1E-03	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-03	1E-03	1E-03	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-02	1E-02	1E-02	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-02	1E-02	1E-02	1E-03	1E-03
Erosion conduit de	T1.06	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
Aléa global de rupture	T1.06	3,3E-03	3,3E-03	1,2E-02	2,4E-03	2,4E-03
	T1.17	3,3E-03	1,0E-01	5,0E-01	2,4E-03	2,4E-03
	T1.30	1,2E-02	5,1E-01	9,0E-01	2,4E-03	2,4E-03
	T1.55	9,0E-01	9,1E-01	9,1E-01	3,3E-03	1,0E-01

4.1.9 *DM 3.6 à 3.8 (Fourcade ouest)*

2 tronçons de calcul sont présents sur ce linéaire.

Le cordon de dune enroché a été le lieu d'une brèche de 1982, néanmoins des épis et brise lame ont depuis été créés et les calculs menés ne font plus apparaître de risque particulier.

De petits franchissements peuvent être attendus pour T1.55.

Tableau 32. Niveaux caractéristiques du secteur Fourcade ouest

N Submersion	N Franchissement	N Sûreté	N Protection	N Danger
T1.55	T1.30	T1.55	T1.30	> T1.55

Les volumes de franchissement sont négligeables mais ont été conservés car il n'y a pas de dispositif permettant de stocker cette eau en dehors du pluvial, qui ne pourra plus s'écouler en gravitaire lors d'une tempête.

Tableau 33. Entrée d'eau considérées pour les scénarios ; secteur Fourcade ouest

Aléa	Franchissement	Submersion	Brèche Scénario 1	Brèche Scénario 3
T0.97	non	non	non	non
T1.06	non	non	non	non
T1.17	non	non	non	non
T1.30	non	non	non	non
T1.55	(OUI (84 m ³))	non	non	non

La prise en compte de l'approfondissement des fonds a induit le léger franchissement qui a impacté le niveau de protection.

Tableau 34. Calculs des probabilités de rupture ; Fourcade Ouest

PM début		3600	3650
PM fin		3650	3800
Zone géométrique		k52	k25
Zone géotechnique		g2	g2
Enrochements	T1.06	1E-03	1E-03
	T1.17	1E-03	1E-03
	T1.30	1E-03	1E-03
	T1.55	1E-03	1E-03
Surverse	T1.06	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04
Franchissement	T1.06	1E-03	1E-03
	T1.17	1E-03	1E-03
	T1.30	1E-03	1E-03
	T1.55	1E-03	1E-03
Grand glissement	T1.06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06
Déplacement horizontal	T1.06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06
Soulèvement hydraulique	T1.06	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04
Erosion régressive	T1.06	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-03	1E-03
Erosion conduit de	T1.06	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04
Aléa global de rupture	T1.06	2,4E-03	2,4E-03
	T1.17	2,4E-03	2,4E-03
	T1.30	2,4E-03	2,4E-03
	T1.55	3,3E-03	3,3E-03

4.1.10 DM 3.8 à 3.95 (parking)

1 tronçon de calcul est présent sur ce linéaire.

Le secteur est plus un terre plein qu'un ouvrage de digue à proprement parler ; il se comporte donc bien jusqu'à l'entrée d'eau par franchissement.

Tableau 35. Niveaux caractéristiques du secteur parking

N Submersion	N Franchissement	N Sûreté	N Protection	N Danger
T1.55	T1.17	T1.30	T1.17	T1.30

Les volumes de franchissement sont négligeables pour T1.30 mais ont été conservés car il n'y a pas de dispositif permettant de stocker cette eau en dehors du pluvial, qui ne pourra plus s'écouler en gravitaire lors d'une tempête.

Tableau 36. Entrée d'eau considérées pour les scénarios ; secteur parking

Aléa	<u>Franchissement</u>	<u>Submersion</u>	<u>Brèche Scénario 1</u>	<u>Brèche Scénario 3</u>
T0.97	non	non	non	non
T1.06	non	non	non	non
T1.17	non	non	non	non
T1.30	(OUI (118 m ³))	non	non	non
T1.55	OUI (69 500 m ³)	non	OUI	OUI

La prise en compte de l'approfondissement des fonds ne modifie pas ces résultats sauf pour le franchissement qui est nul en état futur pour T1.30.

Tableau 37. Calculs des probabilités de rupture ; Parking

PM début		3800
PM fin		3950
Zone géométrique		k26
Zone géotechnique		g2
Enrochements	T1.06	1E-03
	T1.17	1E-03
	T1.30	1E-03
	T1.55	1E-03
Surverse	T1.06	1E-03
	T1.17	1E-03
	T1.30	1E-02
	T1.55	9E-01
Franchissement	T1.06	1E-03
	T1.17	1E-03
	T1.30	1E-03
	T1.55	9E-01
Grand glissement	T1.06	1E-06
	T1.17	1E-06
	T1.30	1E-06
	T1.55	1E-06
Déplacement horizontal	T1.06	1E-06
	T1.17	1E-06
	T1.30	1E-06
	T1.55	1E-06
Soulèvement hydraulique	T1.06	1E-04
	T1.17	1E-04
	T1.30	1E-04
	T1.55	1E-04
Erosion régressive	T1.06	1E-04
	T1.17	1E-04
	T1.30	1E-04
	T1.55	1E-03
Erosion conduit de	T1.06	1E-04
	T1.17	1E-04
	T1.30	1E-04
	T1.55	1E-04
Aléa global de rupture	T1.06	3,3E-03
	T1.17	3,3E-03
	T1.30	1,2E-02
	T1.55	9,9E-01

4.2 LA DIGUE A LA MER, DU PERTUIS DE LA FOURCADE AU PERTUIS DE ROUSTY (DM 4 A 8.3)

4.2.1 DM 4 à 4.8 (Plage Est)

4 tronçons de calcul sont présents sur ce linéaire.

Aujourd'hui ce secteur est homogène jusqu'au DM4.6 environ ; avec l'approfondissement des fonds, les tronçons jusqu'au DM 4.8 se comporteront comme ce secteur.

Les calculs des coefficients Sd sur la digue indiquent qu'il y a des risques de dommages pour les tempêtes T1.06 à T1.30 (Sd=3.8 ; 4.3 et 5) et un risque de rupture pour la tempête T1.55 (Sd=7.3).

Cela a été pris en compte dans le risque de brèche.

C'est en effet le risque de rupture des enrochements, avec l'érosion due aux franchissements, qui implique un niveau de protection bas.

D'après le retour d'expérience c'est le secteur le plus sollicité du système d'endiguement.

Le pertuis de la fourcade comprend une ouverture non vannée à son extrémité ouest. Une vanne est présente en léger recul ; en cas de faible tempête une zone de 100m² environ, en eau en permanence, recueillerait les eux. Si la tempête est plus intense il y aurait débordement dans l'étang de l'impérial.

Tableau 38. Niveaux caractéristiques du secteur Plage Est

N Submersion	N Franchissement	N Sûreté	N Protection	N Danger
T1.55	< T0.97	T0.97	< T0.97	T0.97

Tableau 39. Entrée d'eau considérées pour les scénarios ; secteur Plage Est

Aléa	Franchissement	Submersion	Brèche Scénario 1	Brèche Scénario 3
T0.97	OUI (5 300 m ³)	non	-	-
T1.06	OUI (61 500 m ³)	non	OUI	(OUI)
T1.17	OUI (271 000 m ³)	non	OUI	OUI
T1.30	OUI (5 000 000 m ³)	non	OUI	OUI
T1.55	OUI (8 790 000 m ³)	non	OUI	OUI

La prise en compte de l'approfondissement des fonds à 15 ans fait passer le niveau de danger de T1.06 à <T1.06 ; c'est ce dernier qui est retenu. De plus les volumes de franchissements, même si ils sont importants, sont plus faibles en l'état actuel de la bathymétrie (30 ; 3 000 ; 30 000 ; 135 000 et 2 570 000 m³).

Tableau 40. Calculs des probabilités de rupture ; Plage Est

PM début		3950	4150	4450	4600
PM fin		4150	4450	4600	4800
Zone géométrique		l27	l28	m29	m30
Zone géotechnique		g2	g2	g2	g2
Enrochements	T1.06	1E-01	1E-01	1E-06	1E-06
	T1.17	5E-01	5E-01	1E-06	1E-06
	T1.30	5E-01	5E-01	1E-06	1E-06
	T1.55	9E-01	9E-01	1E-06	1E-06
Surverse	T1.06	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.17	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.30	1E-02	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.55	5E-01	1E-02	1E-01	1E-01
Franchissement	T1.06	9E-01	1E-03	1E-03	9E-01
	T1.17	9E-01	1E-03	1E-02	9E-01
	T1.30	9E-01	5E-01	5E-01	9E-01
	T1.55	9E-01	9E-01	9E-01	9E-01
Grand glissement	T1.06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
Déplacement horizontal	T1.06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
Soulèvement hydraulique	T1.06	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
Erosion régressive	T1.06	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
Erosion conduit de	T1.06	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
Aléa global de rupture	T1.06	9,1E-01	1,0E-01	2,3E-03	9,0E-01
	T1.17	9,5E-01	5,0E-01	1,1E-02	9,0E-01
	T1.30	9,5E-01	7,5E-01	5,0E-01	9,0E-01
	T1.55	1,0E+00	9,9E-01	9,1E-01	9,1E-01

4.2.2 DM 4.8 à 5.6 (Baisse du radeau)

3 tronçons de calcul sont présents sur ce linéaire.

Pour de fortes tempêtes des franchissements peuvent apparaître, entraînant un risque d'érosion.

Tableau 41. Niveaux caractéristiques du secteur Baisse du radeau

N Submersion	N Franchissement	N Sûreté	N Protection	N Danger
T1.55	T1.30*	T1.30	T1.30	T1.30

*les calculs indiquent des volumes de déversement non nuls mais négligeables pour T1.30 ; ces derniers vont se retrouver dans les marais, sans impact sur le niveau de ses derniers : aucun impact sur la zone protégée.

Tableau 42. Entrée d'eau considérées pour les scénarios ; secteur Baisse du radeau

Aléa	Franchissement	Submersion	Brèche Scénario 1	Brèche Scénario 3
T0.97	non	non	non	non
T1.06	non	non	non	non
T1.17	non	non	non	non
T1.30	Faible (87 m ³)	non	non	non
T1.55	OUI (732 000 m ³)	non	OUI	OUI

La prise en compte de l'approfondissement des fonds ne modifie pas ces résultats avant la tempête exceptionnelle, pour laquelle les franchissements sont bien plus importants et engendre un risque de rupture important ; les niveaux de franchissement, sûreté, protection et danger passent alors de T1.55 à T1.30.

Tableau 43. Calculs des probabilités de rupture ; Baisse du radeau

PM début		4800	5150	5400
PM fin		5150	5400	5600
Zone géométrique		n31	n32	o33
Zone géotechnique		g2	g2	g2
Enrochements	T1.06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06	1E-06
Surverse	T1.06	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.17	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.30	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.55	1E-01	1E-01	1E-01
Franchissement	T1.06	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.17	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.30	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.55	9E-01	9E-01	9E-01
Grand glissement	T1.06	1E-06	1E-06	1E-04
	T1.17	1E-06	1E-06	1E-04
	T1.30	1E-06	1E-06	1E-03
	T1.55	1E-06	1E-06	1E-03
Déplacement horizontal	T1.06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06	1E-06
Soulèvement hydraulique	T1.06	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04	1E-04
Erosion régressive	T1.06	1E-04	1E-04	1E-03
	T1.17	1E-04	1E-04	1E-03
	T1.30	1E-04	1E-04	1E-03
	T1.55	1E-04	1E-04	1E-02
Erosion conduit de	T1.06	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04	1E-04
Aléa global de rupture	T1.06	2,3E-03	2,3E-03	3,3E-03
	T1.17	2,3E-03	2,3E-03	3,3E-03
	T1.30	2,3E-03	2,3E-03	4,2E-03
	T1.55	9,1E-01	9,1E-01	9,1E-01

4.2.3 DM 5.6 à 7.55 (Zone des marais)

5 tronçons de calcul sont présents sur ce linéaire.

Ce secteur est fortement sujet au soulèvement hydraulique, qui induit le niveau de protection faible. Pour de fortes tempêtes des franchissements et surverse peuvent apparaître, entraînant un risque d'érosion.

Tableau 44. Niveaux caractéristiques du secteur Zone des marais

N Submersion	N Franchissement	N Sûreté	N Protection	N Danger
T1.30	T1.17*	T0.97	T0.97	T0.97

*les calculs indiquent des volumes de déversement non nuls mais négligeables pour T1.30 ; ces derniers vont se retrouver dans les marais, sans impact sur le niveau de ses derniers : aucun impact sur la zone protégée ; le niveau T1.17 a été conservé car l'ouvrage était en limite de surverse (voir chapitre 6) lors d'évènements de période de retour inférieure à T1.17.

Tableau 45. Entrée d'eau considérées pour les scénarios ; secteur Zone des marais

Aléa	<u>Franchissement</u>	<u>Submersion</u>	<u>Brèche</u> <u>Scénario 1</u>	<u>Brèche</u> <u>Scénario 3</u>
T0.97	non	non	-	-
T1.06	non	non	OUI	OUI
T1.17	non	non	OUI	OUI
T1.30	Faible (880 m ³)	non	OUI	OUI
T1.55	OUI (2 000 000 m ³)	OUI (3 600 000 m ³)	OUI	OUI

La prise en compte de l'approfondissement des fonds ne modifie pas ces résultats ; il en est de même pour l'ensemble des secteurs plus à l'Est, qui sont très éloignés du front de mer.

Tableau 46. Calculs des probabilités de rupture ; Zone des marais

PM début		5600	5950	6350	6700	7200
PM fin		5950	6350	6700	7200	7550
Zone géométrique		p34	p35	r36	s37	t38
Zone géotechnique		g2	g2	g2	g2	g2
Enrochements	T1.06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
Surverse	T1.06	1E-03	1E-03	1E-02	1E-03	1E-02
	T1.17	1E-02	1E-02	1E-02	1E-03	1E-02
	T1.30	1E-02	1E-01	1E-01	1E-02	1E-01
	T1.55	9E-01	9E-01	9E-01	9E-01	9E-01
Franchissement	T1.06	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.17	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.30	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-01
	T1.55	9E-01	9E-01	9E-01	9E-01	9E-01
Grand glissement	T1.06	1E-04	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-04	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-03	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-03	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
Déplacement horizontal	T1.06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-06
Soulèvement hydraulique	T1.06	1E-01	1E-01	1E-04	1E-03	5E-01
	T1.17	9E-01	9E-01	1E-04	1E-02	1E+00
	T1.30	1E+00	1E+00	1E-04	1E-01	1E+00
	T1.55	1E+00	1E+00	1E-04	9E-01	1E+00
Erosion régressive	T1.06	1E-04	1E-04	1E-03	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04	1E-03	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04	1E-03	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-03	1E-03	1E-02	1E-03	1E-04
Erosion conduit de	T1.06	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
Aléa global de rupture	T1.06	1,0E-01	1,0E-01	1,2E-02	3,2E-03	5,1E-01
	T1.17	9,0E-01	9,0E-01	1,2E-02	1,2E-02	9,9E-01
	T1.30	9,9E-01	9,9E-01	1,0E-01	1,1E-01	9,9E-01
	T1.55	1,0E+00	1,0E+00	9,9E-01	1,0E+00	1,0E+00

4.2.4 DM 7.55 à 8.35 (Mouillot-Rousty)

3 tronçons de calcul sont présents sur ce linéaire.

Ce secteur est fortement sujet au soulèvement hydraulique, qui induit le niveau de protection faible. Pour de fortes tempêtes des franchissements et surverse peuvent apparaître, entraînant un risque d'érosion.

Tableau 47. Niveaux caractéristiques du secteur Mouillot-Rousty

N Submersion	N Franchissement	N Sûreté	N Protection	N Danger
T1.55	T1.17*	T0.97	T0.97	T1.06

*les calculs indiquent des volumes de déversement non nuls mais négligeables pour T1.17 ; ces derniers vont se retrouver dans les marais, sans impact sur le niveau de ses derniers : aucun impact sur la zone protégée.

Tableau 48. Entrée d'eau considérées pour les scénarios ; secteur Mouillot-Rousty

Aléa	Franchissement	Submersion	Brèche Scénario 1	Brèche Scénario 3
T0.97	non	non	-	non
T1.06	non	non	OUI	non
T1.17	(Faible (4 m ³))	non	OUI	OUI
T1.30	(OUI (4 470 m ³))	non	OUI	OUI
T1.55	OUI (838 000 m ³)	non	OUI	OUI

Tableau 49. Calculs des probabilités de rupture ; Mouillot-Rousty

PM début		7550	7950	8050
PM fin		7950	8050	8350
Zone géométrique		u39	v40	w41
Zone géotechnique		g2	g2	g2
Enrochements	T1.06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06	1E-06
Surverse	T1.06	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.17	1E-02	1E-03	1E-03
	T1.30	1E-01	1E-02	1E-03
	T1.55	5E-01	5E-01	1E-01
Franchissement	T1.06	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.17	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.30	5E-01	1E-03	1E-03
	T1.55	9E-01	9E-01	9E-01
Grand glissement	T1.06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06	1E-06
Déplacement horizontal	T1.06	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.17	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.30	1E-06	1E-06	1E-06
	T1.55	1E-06	1E-06	1E-06
Soulèvement hydraulique	T1.06	1E-01	1E-04	1E-04
	T1.17	9E-01	5E-01	5E-01
	T1.30	1E+00	1E+00	1E+00
	T1.55	1E+00	1E+00	1E+00
Erosion régressive	T1.06	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04	1E-04
Erosion conduit de	T1.06	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.17	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.30	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-04	1E-04	1E-04
Aléa global de rupture	T1.06	1,0E-01	2,3E-03	2,3E-03
	T1.17	9,0E-01	5,0E-01	5,0E-01
	T1.30	1,0E+00	9,9E-01	9,9E-01
	T1.55	1,0E+00	1,0E+00	1,0E+00

4.3 LA DIGUE A LA MER, DU PERTUIS DE ROUSTY AU PERTUIS DE LA COMTESSE (DM 8.3 A 16)

17 tronçons de calcul sont présents sur ce linéaire.

Les risques de rupture sont principalement dus aux érosions suite au débordement, par franchissement ou surverse.

Des entrées d'eau peuvent se faire en cas de plein bord au niveau de l'ouvrage traversant Tampan-La Dame, qui n'est pas vanné ; les eaux resteraient dans la gaze du marteau.

Le point bas de ouvrages est situé vers le phare de la gacholle (DM 15), avec une crête descendant localement à 1.38 mNGF. Comme il n'y a plus d'effet des vagues de la mer mais qu'un Fetch peut se développer sur les marais, il y a du franchissement.

Tableau 50. Niveaux caractéristiques du secteur Rousty-Comtesse

N Submersion	N Franchissement	N Sûreté	N Protection	N Danger
T1.06	T0.97	T0.97	T0.50*	T0.97

* Comme mentionné au chapitre 5, il existe des ouvrages traversants non vannés sur ce secteur. Des entrées d'eau peuvent se faire en cas de plein bord au niveau de l'ouvrage traversant Tampan-La Dame, qui n'est pas vanné ; les eaux resteraient dans la gaze du marteau. Le niveau de protection retenu est alors lié au fil d'eau de ces ouvrages.

Tableau 51. Entrée d'eau considérées pour les scénarios ; secteur Rousty-Comtesse

Aléa	Franchissement	Submersion	Brèche Scénario 1	Brèche Scénario 3
T0.97	non	non	-	-
T1.06	OUI	non	OUI	OUI
T1.17	OUI	OUI	OUI	OUI
T1.30	OUI	OUI	OUI	OUI
T1.55	OUI	OUI	OUI	OUI

Tableau 52. Calculs des probabilités de rupture ; Rousty-Comtesse (1/2)

PM début		8350	8575	9125	9400	9825	10150	10675	10850	10950
PM fin		8575	9125	9400	9825	10150	10675	10850	10950	11125
Zone géométrique		x	y	z	aa	ab	ac	ad	ae	af
Zone géotechnique		g2								
Enrochements	T1.06	1E-06								
	T1.17	1E-06								
	T1.30	1E-06								
	T1.55	1E-06								
Surverse	T1.06	5E-01	1E-03	1E-02	1E-03	1E-02	1E-03	1E-02	1E-02	1E-03
	T1.17	9E-01	1E-02	1E-01	1E-02	1E-01	1E-02	1E-01	1E-01	1E-02
	T1.30	9E-01	1E-01	9E-01	1E-01	5E-01	1E-01	5E-01	9E-01	1E-01
	T1.55	9E-01								
Franchissement	T1.06	9E-01	1E-03							
	T1.17	9E-01	1E-03	9E-01	1E-03	9E-01	1E-03	9E-01	1E-03	1E-03
	T1.30	9E-01	1E-02							
	T1.55	9E-01								
Grand glissement	T1.06	1E-06								
	T1.17	1E-06								
	T1.30	1E-06								
	T1.55	1E-06								
Déplacement horizontal	T1.06	1E-06								
	T1.17	1E-06								
	T1.30	1E-06								
	T1.55	1E-06								
Soulèvement hydraulique	T1.06	1E-04								
	T1.17	1E-04								
	T1.30	1E-03								
	T1.55	1E-02								
Erosion régressive	T1.06	1E-04								
	T1.17	1E-04								
	T1.30	1E-04								
	T1.55	1E-04								
Erosion conduit de	T1.06	1E-04								
	T1.17	1E-04								
	T1.30	1E-04								
	T1.55	1E-04								
Aléa global de rupture	T1.06	1,0E+00	2,0E-03	1,0E-02	2,0E-03	1,0E-02	2,0E-03	1,0E-02	1,0E-02	2,0E-03
	T1.17	1,0E+00	1,0E-02	9,0E-01	1,0E-02	9,0E-01	1,0E-02	9,0E-01	1,0E-01	1,0E-02
	T1.30	1,0E+00	9,0E-01	1,0E+00	9,0E-01	1,0E+00	9,0E-01	1,0E+00	1,0E+00	1,0E-01
	T1.55	1,0E+00								

Tableau 53. Calculs des probabilités de rupture ; Rousty-Comtesse (2/2)

PM début		11125	11275	12250	13475	14475	14825	14975	15225
PM fin		11275	12250	13475	14475	14825	14975	15225	16075
Zone géométrique		ag	ah	ai	aj	ak	al	am	an
Zone géotechnique		g2	g2	g2	g2	g3	g3	g3	g3
Enrochements	T1.06	1E-06							
	T1.17	1E-06							
	T1.30	1E-06							
	T1.55	1E-06							
Surverse	T1.06	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-01	1E-01
	T1.17	1E-03	1E-02	1E-03	1E-02	1E-03	1E-02	9E-01	5E-01
	T1.30	1E-02	1E-01	1E-02	1E-01	1E-02	1E-01	9E-01	9E-01
	T1.55	9E-01							
Franchissement	T1.06	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-02	1E-02
	T1.17	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	9E-01	9E-01
	T1.30	1E-03	1E-02	1E-03	1E-02	1E-03	1E-02	9E-01	9E-01
	T1.55	9E-01							
Grand glissement	T1.06	1E-06							
	T1.17	1E-06							
	T1.30	1E-06							
	T1.55	1E-06							
Déplacement horizontal	T1.06	1E-06							
	T1.17	1E-06							
	T1.30	1E-06							
	T1.55	1E-06							
Soulèvement hydraulique	T1.06	1E-04							
	T1.17	1E-04							
	T1.30	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
	T1.55	1E-02	1E-02	1E-02	1E-02	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04
Erosion régressive	T1.06	1E-04							
	T1.17	1E-04							
	T1.30	1E-04							
	T1.55	1E-04							
Erosion conduit de	T1.06	1E-04							
	T1.17	1E-04							
	T1.30	1E-04							
	T1.55	1E-04							
Aléa global de rupture	T1.06	2,0E-03	2,0E-03	2,0E-03	2,0E-03	2,0E-03	2,0E-03	1,0E-01	1,0E-01
	T1.17	2,0E-03	1,0E-02	2,0E-03	1,0E-02	2,0E-03	1,0E-02	1,0E+00	1,0E+00
	T1.30	1,0E-02	1,0E-01	1,0E-02	1,0E-01	1,0E-02	1,0E-01	1,0E+00	1,0E+00
	T1.55	1,0E+00							

4.4 LA DIGUE A LA MER, DU PERTUIS DE LA COMTESSE A LA DIGUE DES TOSCANS (DM 16 A 21.75)

18 tronçons de calcul sont présents sur ce linéaire.

Les risques de rupture sont principalement dus aux érosions suite au débordement, par franchissement ou surverse.

L'érosion de conduit fait également partie des risques pour des tempêtes de grande intensité.

Il y a des points bas en dessous de 1 mNGF vers le DM20 (à l'Ouest du Fangassier) ; étant donné l'orientation de cette digue (coté mer à l'Ouest) et du vent dominant (Sud Est), le niveau de franchissement est retenu de façon similaire à la submersion.

Tableau 54. Niveaux caractéristiques du secteur Comtesse-Toscans

N Submersion	N Franchissement	N Sûreté	N Protection	N Danger
T0.97	T0.97	T0.97	T0.50	T0.97

Comme mentionné au chapitre 5, il existe des ouvrages traversants non vannés sur ce secteurs. Des entrées d'eau peuvent alors se faire ; elles seraient limitées à quelques centaines de m3 et resteraient dans le canal du Versadou pour le pertuis et dans les enfores de la vignolle pour les buses.

Le niveau de protection retenu est alors lié au fil d'eau de ces ouvrages : 0.5 mNGF.

Tableau 55. Entrée d'eau considérées pour les scénarios ; secteur Comtesse-Toscans

Aléa	Franchissement	Submersion	Brèche Scénario 1	Brèche Scénario 3
T0.97	non	non	-	-
T1.06	OUI	OUI	OUI	OUI
T1.17	OUI	OUI	OUI	OUI
T1.30	OUI	OUI	OUI	OUI
T1.55	OUI	OUI	OUI	OUI

Tableau 56. Calculs des probabilités de rupture ; Comtesse-Toscans

PM début		15225	16075	16225	16400	16700	17150	17500	17500	18925	19450	19575	19650	20050	20275	20775	20950	21450	21525
PM fin		16075	16225	16400	16700	17150	17500	18375	18925	19450	19575	19650	20050	20275	20775	20950	21450	21525	21875
Zone géométrique		an	ao	ap	aq	ar	as	at	au	av	aw	ax	ay	az	ba	bb	bc	bd	be
Zone géotechnique		g3	g3	g3	g3	g3	g3	g4	g4	g4	g5	g6							
Enrochements	T1.06	1E-06																	
	T1.17	1E-06																	
	T1.30	1E-06																	
	T1.55	1E-06																	
Surverse	T1.06	1E-01	1E-01	1E-02	1E-02	1E-01	1E-01	1E-01	1E-01	5E-01	9E-01								
	T1.17	5E-01	9E-01	1E-01	1E-01	5E-01	9E-01	9E-01	5E-01	9E-01									
	T1.30	9E-01	9E-01	9E-01	5E-01	9E-01													
	T1.55	9E-01																	
Franchissement	T1.06	1E-02	1E-02	1E-03	1E-03	1E-02	1E-02	1E-02	1E-02	9E-01									
	T1.17	9E-01	9E-01	1E-02	1E-02	9E-01													
	T1.30	9E-01																	
	T1.55	9E-01																	
Grand glissement	T1.06	1E-06																	
	T1.17	1E-06																	
	T1.30	1E-06																	
	T1.55	1E-06																	
Déplacement horizontal	T1.06	1E-06																	
	T1.17	1E-06																	
	T1.30	1E-06																	
	T1.55	1E-06																	
Soulèvement hydraulique	T1.06	1E-04																	
	T1.17	1E-04																	
	T1.30	1E-04																	

PM début		15225	16075	16225	16400	16700	17150	17500	17500	18925	19450	19575	19650	20050	20275	20775	20950	21450	21525
PM fin		16075	16225	16400	16700	17150	17500	18375	18925	19450	19575	19650	20050	20275	20775	20950	21450	21525	21875
Zone géométrique		an	ao	ap	aq	ar	as	at	au	av	aw	ax	ay	az	ba	bb	bc	bd	be
Zone géotechnique		g3	g3	g3	g3	g3	g3	g4	g4	g4	g5	g6							
Erosion régressive	T1.55	1E-04																	
	T1.06	1E-04																	
	T1.17	1E-04																	
	T1.30	1E-04																	
	T1.55	1E-04																	
Erosion conduit de	T1.06	1E-04																	
	T1.17	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-03	1E-03	1E-03	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03	1E-03
	T1.30	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-02	1E-02	1E-02	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-02	1E-02	1E-02	1E-02	1E-02	1E-02
	T1.55	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-01	1E-01	1E-01	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-04	1E-01	1E-01	1E-01	1E-01	1E-01	1E-01
Aléa global de rupture	T1.06	1,0E-1	1,0E-1	1,0E-2	1,0E-2	1,0E-1	1,0E-1	1,0E-1	1,0E-1	1,0E+0									
	T1.17	1,0E+0	1,0E+0	1,0E-1	1,0E-1	1,0E+0													
	T1.30	1,0E+0																	
	T1.55	1,0E+0																	

4.5 LA DIGUE A LA MER, DE LA DIGUE DES TOSCANS AU VIEUX RHONE (DM 21.75 A 26)

Sur cette digue-route, 2 tronçons son présents.

L'ouvrage est calé très bas, entre 1 et 1.3 mNGF entre DM21.75 et DM 25 puis inférieur à 1 mNGF sur le dernier kilomètre. Il n'y a en réalité pas de surverse ou franchissement avant 1m, d'une part du fait du fort recul mais également de part la géométrie singulière du secteur. En effet son utilisation en piste à creusé la crête, qui se retrouve en dessous du niveau des hauts de talus. Avec le fort recul et le retour d'expérience il est retenu une valeur de non franchissement et non surverse à 0.97 mNGF.

En cas de tempête de longue durée, les eaux de la mer finiront par remplir les marais et solliciter la digue. A partie de cette surcharge, l'ouvrage n'est pas en mesure de résister, les niveaux retenus sont alors bas.

Le retour d'expérience sur 40 ans du garde digues laisse néanmoins penser qu'avec le niveau marin moyen actuel il faut plus que la durée d'une tempête pour que l'ouvrage, à 6km du rivage, soit sollicité ; avec la création d'ouvertures naturelles depuis 10-15 ans, l'ouvrage va être sollicité plus rapidement.

Tableau 57. Niveaux caractéristiques du secteur Toscans-Vieux Rhône

N Submersion	N Franchissement	N Sûreté	N Protection	N Danger
T0.97	T0.97	T0.97	T0.97	T0.97

Tableau 58. Entrée d'eau considérées pour les scénarios ; secteur Toscans-Vieux Rhône

Aléa	Franchissement	Submersion	Brèche Scénario 1	Brèche Scénario 3
T0.97	non	non	-	-
T1.06	OUI	OUI	OUI	OUI
T1.17	OUI	OUI	OUI	OUI
T1.30	OUI	OUI	OUI	OUI
T1.55	OUI	OUI	OUI	OUI

4.6 LA PROTECTION A L'EST DU VIEUX RHONE (DM 26 A LA FIN)

Le remblai situé à l'Est du système d'endiguement permet de raccorder ce dernier aux digues fluviales qui sont en mesure d'absorber la surcote marine car inférieur à la surcote due aux crues.

Ce remblai est très en recul du trait de cote et n'est donc pas sujet aux franchissements.

Sa résistance est liée à sa grande largeur ; ainsi le niveau de protection est celui de submersion.

Le remblai est a minima calé à 0.85 mNGF sur plus de 10m de large, cela correspond au niveau marin de période de retour de 2 ans.

Dans les faits il n'y a pas de mise en eau aussi régulière du fait de la présence d'ouvrages or système de protection, appartenant à la compagnie des salins du midi (CSME), et du fort éloignement avec le rivage.

Sans considérer les ouvrages de la CSME et en cas de tempête de longue durée (plus de 65km² de terres à inonder avant d'arriver à la ligne de protection)

Section	type	Sd ; Fonds actuels				Sd ; Fonds +15 ans			
		T1.55	T1.30	T1.17	T1.06	T1.55	T1.30	T1.17	T1.06
A2	épi	5,6	3,3	2,8	2,5	6	2,6	2,5	2,3
A3	BL	5,1	2,9	2,5	2,1	6,3	4,1	3,9	3,3
AM	BL	13,9	8	6,9	5,6	15,8	10,2	9,7	8,3
B1	BL	5,2	2,7	2,4	2	4	2,5	2,4	2,2
BM	BL	6,9	4,2	3,5	3,1	7,5	3,2	3,1	2,8
C1	BL	4,7	2,5	2,3	1,9	4	2,3	2,2	2
CM	BL	8,5	5,2	4,4	3,8	7,5	4	3,8	3,4
D1	épi	0,3	-	-	-	0,4	-	-	-
D2	épi	2,1	1,8	-	-	2,9	1,7	-	-
DM	épi	4,9	3	2,5	2,3	3,7	3	2,3	2,1
E1	épi	0,5	-	-	-	0,8	-	-	-
EM	épi	1,9	-	-	-	2,9	2,2	2,1	1,9
F1	BL	2,9	3	2,7	2,7	4,4	3	2,6	2,4
F2	BL	9,9	6,8	6,4	5,4	8,4	5,7	5,5	5,1
F3	BL	8	4	3,5	2,9	7,5	4,8	4,4	3,5
FM	BL	17,3	17,6	16	10,5	25,5	19,9	18,3	14,8
G1	BL	1,4	-	-	-	0,9	-	-	-
GM	BL	1,5	-	-	-	1,7	-	-	-
H1	BL	4	2	-	-	3,8	2,2	2,1	1,3
H2	BL	5,1	1,8	-	-	4	1,9	-	-
HA	épi	0,1	-	-	-	0,1	-	-	-
HM	BL	6,5	3,2	2,6	2,3	6,1	3,5	3,3	2,1
I1	épi	1,3	-	-	-	0,9	-	-	-
IM	épi	1,9	-	-	-	1,3	-	-	-
J1	épi	0,5	-	-	-	0,6	-	-	-
JM	épi	1,3	-	-	-	1,2	-	-	-
K1	épi	0,9	-	-	-	0,7	-	-	-
KM	épi	1	-	-	-	0,9	-	-	-
L1	épi	51	28,9	24,5	20,7	52,5	37,6	22	19,8
L2	épi	10,7	4,4	3,1	2,7	7,7	5	4,8	4,3
L3	BL	1,3				1,4			
LM1	épi	28,7	8,4	7	5,1	20,3	13,3	12,6	11,4
LM2	BL	2,4	1,4	-	-	2,5	1,1	-	-
M1	BL	1,8	-	-	-	1,2	-	-	-
MM	BL	3,2	1,1	-	-	2,1	1,3	-	-
N1	BL	9,4	9,6	8,5	7,5	14,9	8,1	7,7	6,9
NA	épi	0,2	-	-	-	0,2	-	-	-
NM	BL	10,5	5,9	5	4,2	10,7	4,7	4,5	4
O1	BL	1,3	-	-	-	2,1	1,2	-	-
OA	épi	1,1	-	-	-	1,3	-	-	-
OM	BL	3,1	2,5	2,1	1,8	3,5	2	2	-
P1	BL	4,1	2,6	2,3	1,9	3,1	2,2	2,1	1,9

Section	type	Sd ; Fonds actuels				Sd ; Fonds +15 ans			
		T1.55	T1.30	T1.17	T1.06	T1.55	T1.30	T1.17	T1.06
PA	épi	1,3	-	-	-	1,2	-	-	-
PM	BL	3	1,8	-	-	2,2	1,5	-	-
Q1	BL	0,5	-	-	-	0,6	-	-	-
QA	épi	0,1	-	-	-	0,1	-	-	-
QM	BL	1,1	-	-	-	1,4	-	-	-

L'approfondissement des fonds à un impact sur la majeure partie des calculs, néanmoins il y a peu de changement de paliers.

Il est a noté que :

- le musoir de l'épis A passe de dommages intermédiaires à importants pour les tempêtes décennale et trentennale ; le musoir de l'épis L fait de même pour la tempête décennale(T1.07).
- Une partie de l'épis A, B, F, H et L (une section pour un évènement par épi) passe de début de dommages à dommages intermédiaires
- Une partie de l'épi C, le musoir du E et une partie du O commencent à avoir des dommages pour les tempêtes T1.06, T1.17 à T1.55 et T1.55 respectivement.

Les cinq secteurs suivants sont à risque de rupture dès la tempête décennale (T1.07), pour les fonds à 15 ans :

- BL : musoir de l'ouvrage A (pas le cas avec les fonds actuels)
- BL : musoir de l'ouvrage F
- Epi : musoir de l'ouvrage L (pas le cas avec les fonds actuels)
- Epi : coté de l'ouvrage L
- BL : coté de l'ouvrage N

Entre la tempête décennale et la centennale (T1.30) il n'y a pas de secteurs supplémentaires ; en considérant la tempête millénale (T1.55), il y en a trois d'ajoutés :

- BL : musoir de l'ouvrage C
- BL : coté de l'ouvrage F
- BL : musoir de l'ouvrage N

Parmi les ouvrages fonctionnant en épis (maintien de plage), seul l'ouvrage des amphores (L) présente des risques de dommages importants.

Parmi ceux fonctionnant en brise-lame, ils sont plus nombreux ; avec les ouvrages du clos du Rhône (A, B, C), de port gardian (F) et de Thalacap (N) qui présentent des risques de dommages a minima intermédiaires dès la tempête trentennale.

Pour ces secteurs il est à noter que le niveau de protection est T1.06 ou <T1.06 ; l'état des brises lame n'impacte donc pas le niveau de protection retenu plus haut, qui prend en compte le fonctionnement normal des épis et brise lame.

Les épis de la Fourcade (R et S) n'ont pas été analysés dans le même cadre ; la revue des retours de VTA et VSP montre que ces ouvrages ne sont pas plus sollicités que les autres épis et même bien moins que les ouvrages A et E. Or les épis, à l'exception de celui des amphores, se comportent bien. Par conséquent il n'a pas été mené d'analyse plus approfondie sur les deux ouvrages, qui semblent et sont considérés en bon état.

5 SYNTHÈSE

En dehors de points bas très localisés n'apparaissant pas dans les modélisations, il n'y a pas de surverse jusqu'à la tempête T1.30.

En revanche les franchissements apparaissent très tôt, comme ce fut le cas en 2014 (T0.97) ; ces franchissements pourraient rapidement éroder le talus aval, ce qui implique un niveau de sûreté quasiment aussi faible. Il apparaît que la tempête de 2014 est la limite basse des franchissements avec un volume total inférieur à 500 m³ ; à titre de comparaison, ce sont 95 000m³ franchissant la digue qui sont modélisés pour la tempête T1.06.

Le niveau de danger est bien plus variable.

Lorsque les entrées d'eau apparaissent avant la première modélisation, les premiers niveaux de franchissement sont arrêtés à SWL=0.85 mNGF car le retour d'expérience montre qu'une tempête aujourd'hui bi-annuelle est la limite des premiers franchissements sur la crête (pas d'eau coté zone protégée) et des premiers désordres mineurs (en général sur la plage Est ou les épis).

Tableau 60. Tableau de synthèse des niveaux caractéristiques des ouvrages

Nom	DM ini	DM fin	N Surverse	N Franchissement	N Sûreté	N Protection	N Danger
Clos du Rhône	0	1	T1.55	T0.85	T0.97	T0.85	T1.17
Crin Blanc	1	1.3	T1.55	T1.55	T1.55	T1.55	> T1.55
Av. Aubanel	1.3	1.7	T1.55	T1.30	T1.55	T1.30	> T1.55
Port Gardian	1.7	2.1	T1.30	T1.06**	T1.17	T1.06**	T1.30
Arènes	2.1	2.6	T1.55	T0.85	T0.97	T0.85	T1.06
Parking Amphores	2.6	3.05	T1.55	T0.85	T0.97	T0.85	T1.17
Thalacap	3.05	3.2	T1.55	T0.85	T1.17	T0.85	T1.30
Parking plage est	3.2	3.6	T1.55	T0.85	T1.06	T0.85	T1.17
Fourcade Ouest	3.6	3.8	T1.55	T1.30	T1.55	T1.30	> T1.55
Parking	3.8	4	T1.55	T1.17	T1.30	T1.17	T1.30

Nom	DM ini	DM fin	N Surverse	N Franchissement	N Sûreté	N Protection	N Danger
Plage Est	4	4.8	T1.55	T0.85	T0.97	T0.85	T0.97
Baisse du radeau	4.8	5.6	T1.55	T1.30	T1.30	T1.30	T1.30
Zone des marais	5.6	7.55	T1.30	T1.17	T0.97	T0.97	T0.97
Mouillot – Rousty	7.55	8.3	T1.55	T1.17	T0.97	T0.97	T1.06
Rousty – Comtesse	8.3	16	T1.06	T0.97	T0.97	T0.50*	T0.97
Comtesse – Toscans	16	21.75	T0.97	T0.97	T0.97	T0.50*	T0.97
Toscans – Vieux Rhône	21.75	26	T0.97	T0.97	T0.97	T0.97	T0.97

* A l'Est et à l'Ouest du pertuis de la comtesse il y a des buses dont les organes de fermetures sont aujourd'hui inexistantes ; des contournement du système de protection par ces ouvertures est alors possible. Ces entrées d'eaux restent limitées à la zone des marais.

La représentation cartographique des niveaux de protection des ouvrages est proposée ci-après :

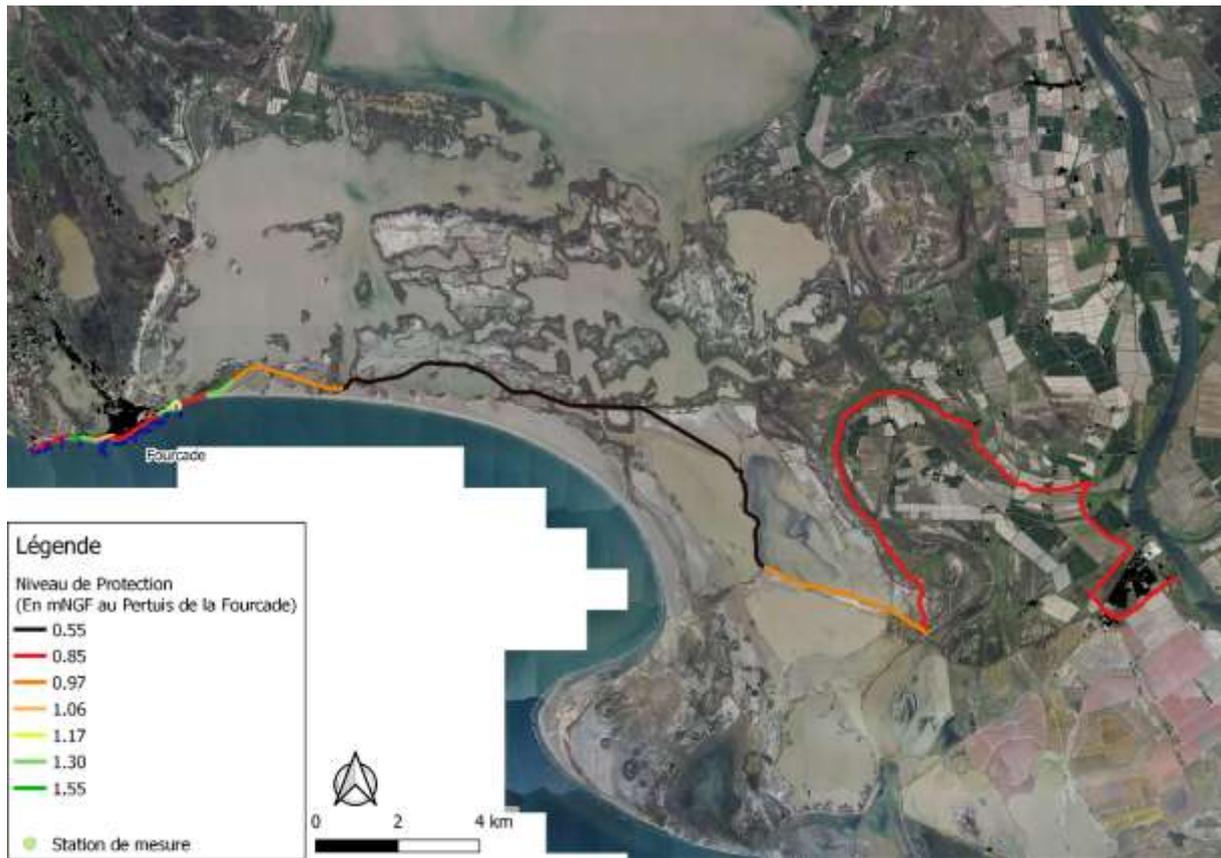


Figure 10. Niveau de protection des ouvrages



Figure 11. Niveau de protection des ouvrages – zoom sur les Saintes-Maries-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 MARITIME
CAMARGUE INSULAIRE

DOCUMENT B

**CHAPITRE N°8 : ETUDE DES RISQUES DE VENUES D'EAU,
DANS ET EN DEHORS DE LA ZONE PROTEGEE**

Version	Date	Commentaires
0	27/02/2023	Version initiale
1	23/03/2023	Reprises suite à la relecture interne

SOMMAIRE

1	Introduction.....	3
2	La modélisation des entrées d'eau	4
2.1	Modélisations sans brèche	5
2.2	Modélisations de brèche	11
2.3	Synthèse des modélisations	17
3	Fonctionnement.....	18
3.1	Niveau de protection.....	18
3.2	Limites de l'étude de dangers	18
4	Scénario 1.....	19
5	Scénario 2.....	22
6	Scénario 3.....	22

1 INTRODUCTION

La zone pouvant être inondée par des entrées d'eau via le système d'endiguement maritime « Camargue Insulaire », où en le contournant, se trouve être uniquement la zone protégée définie au chapitre 3.

Le présent chapitre présente les entrées d'eau liées aux scénarios 1 à 3.

Le **scénario 1** prend en compte les entrées d'eau par brèche à partir du moment où la probabilité de cette dernière est supérieure à **5%** et il prend en compte toutes les entrées d'eau par surverse, franchissement ou contournement.

Le **scénario 2** prend en compte les entrées d'eau liées à une **défaillance fonctionnelle** d'un organe de manœuvre ; pour le système d'endiguement considéré cela concerne les vannes d'ouvrages hydrauliques traversants.

Le **scénario 3** prend en compte les entrées d'eau par brèche à partir du moment où la probabilité de cette dernière est supérieure à **50%** et il prend en compte toutes les entrées d'eau contournant les ouvrages.

2 LA MODELISATION DES ENTREES D'EAU

En 2017, dans le cadre d'une étude commandée par la DDTM13, le BRGM a modélisé le comportement de la Camargue vis-à-vis des tempêtes [BRGM/RP-66804-FR].

Les hypothèses suivantes avaient été retenues :

- Ajout de 25 cm pour les incertitudes ;
- Ajout de 20 cm pour prendre en compte l'élévation du niveau marin ;
- Ajout de 60 cm (au lieu de 20) pour prendre en compte l'élévation du niveau marin à l'horizon 2100
- Utilisation de la tempête de 1982, normalisée et recallée sur les niveaux modélisés
- Forçage marin au Sud ; mesuré sur l'isobathe 50m
- Niveau dans les étangs égal à la hausse du niveau marin (20 ou 60 cm NGF)

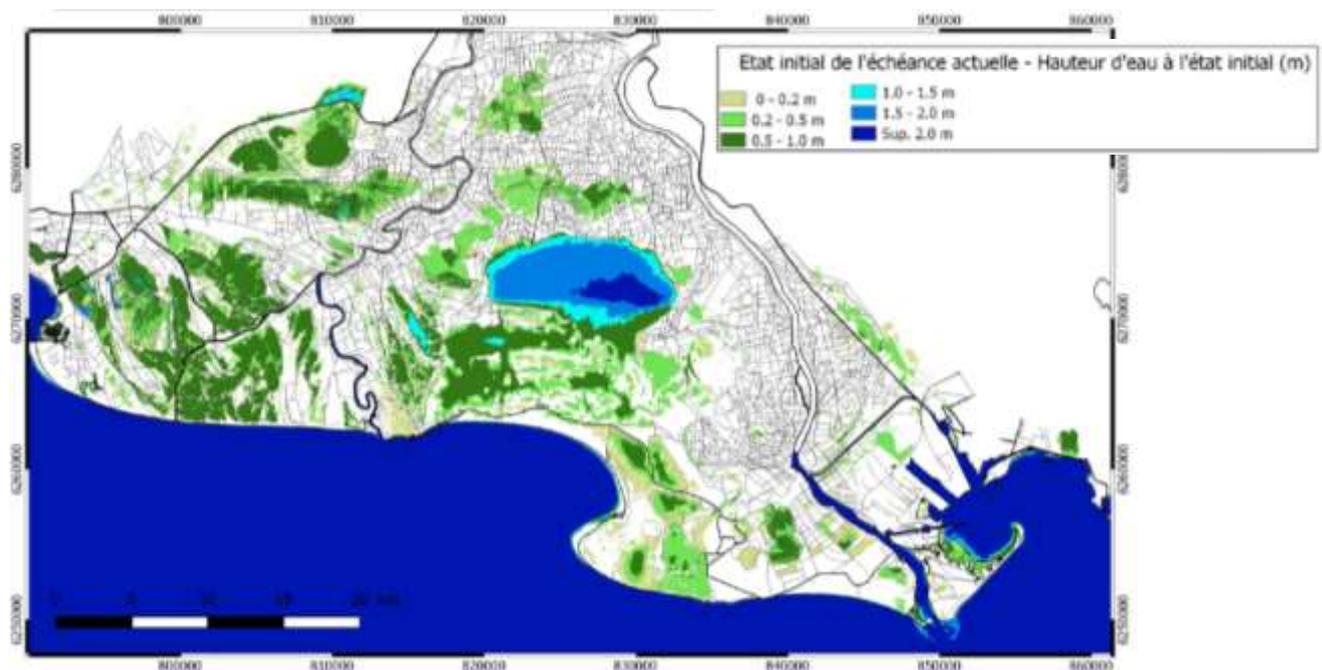


Figure 1. état initial pour les modélisations utilisées

En 2019, le SYMADREM a passé commande au près du BRGM afin de compléter ses données de modélisation [BRGM/ RP-68619-FR].

Les hypothèses retenues sont identiques à l'exception de l'incertitude qui a été supprimée.

Ce choix est du au fait que cette méthodologie est intéressante dans les zones de fort marnage mais devient dimensionnante pour des zones quasi plates et à faible marnage comme la Camargue. Son utilisation implique des modélisations d'évènements qui sont très éloignés des observations.

Comme présenté au chapitre 4, le changement climatique impacte les niveaux marins mais pas la hauteur des vagues.

La période de retour des évènements étudiés va donc varier au cours de la durée de validité de l'étude. Celles indiquées dans le nom des scénarios et sur les cartes prennent en compte 20 cm de rehausse, ce qui est sécuritaire.

Tableau 1. Niveaux modélisés

Scénario BRGM	Nom	Niveau marin modélisé [mNGF]	Hauteur de vagues associée [m]	Période au pic [s]	Direction des vagues [°N]	Vitesse du vent [m/s]	Direction du vent [°]
8 – Tempête 2014	T0.97	0.97	4.04	9.1		19.6	120-180
1 – Décennale	T1.06	1.06	4.70	9.0	155	22.4	121
2 – Trentennale	T1.17	1.17	5.09	9.2	155	23.6	121
3 – Centennale	T1.30	1.30	5.33	9.4	155	24.2	121
4 – Exceptionnelle	T1.55	1.55	8.75	11.5	155	30.0	121

2.1 MODELISATIONS SANS BRECHE

Les cartographies ci-après illustrent les surcotes relevées lors des modélisations sans brèche.

Elles représentent théoriquement les entrées d'eau par surverse mais il apparait toujours un exhaussement au Nord Ouest des étang qui est tout ou partie dû au basculement des plans d'eau avec le vent du Sud Est et ne représente pas nécessairement des entrées marines.

Au contraire les franchissements par surverse n'ont pas été analysés dans la même étude et n'apparaissent pas en cartographie ; ils sont néanmoins mentionnés après chaque carte.

2.1.1 *Tempête SWL=0,97 mNGF ; Hs=4.04 m*

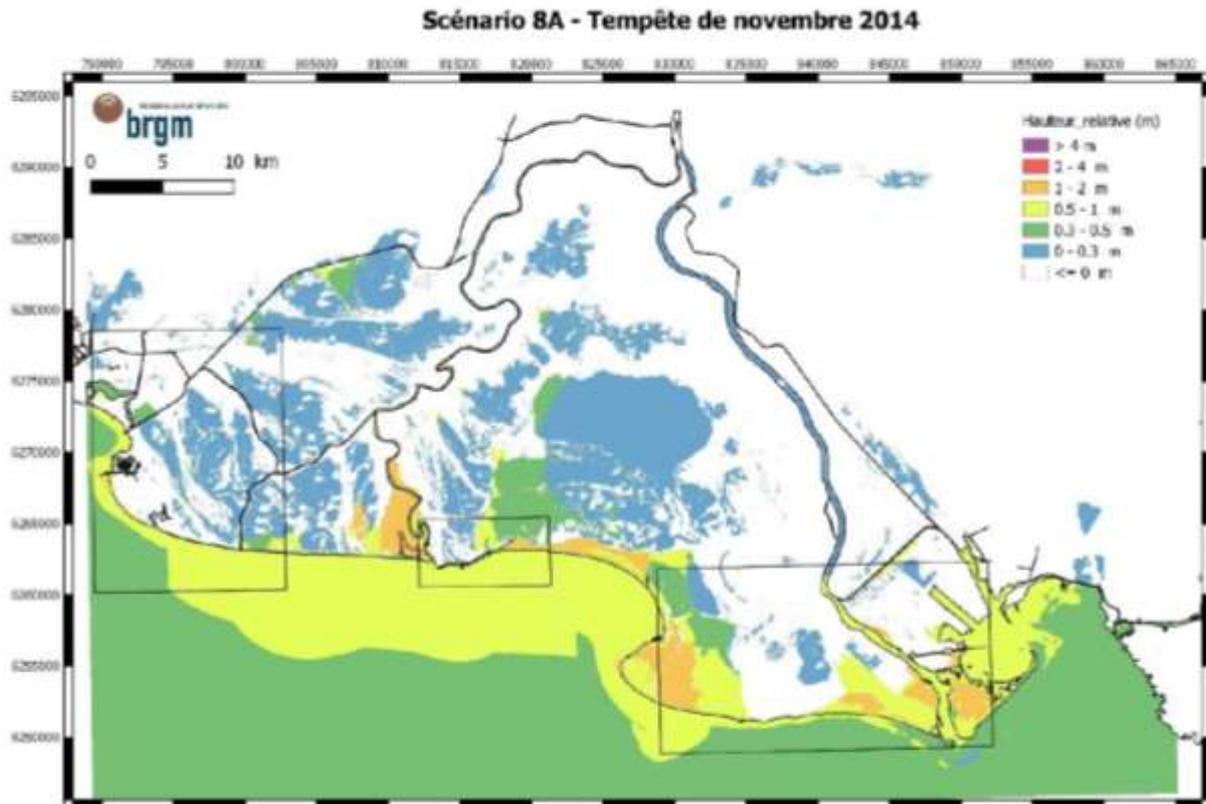


Figure 2. Carte des hauteurs d'eau relatives

Pour un évènement courant il n'y a pas d'entrée d'eau par surverse si il n'y a pas de défaillance.

Des débordements des étangs peuvent être attendus mais sont indépendant du rôle du système d'endiguement.

Au Sud Est, les eaux butent sur la digue des Salins et n'atteignent pas le système de protection.

L'analyse des franchissements par paquets montrent que moins de 500 m³ sont attendus, répartis entre le clos du Rhône et la plage Est et principalement concentrés au niveau des parkings entourant Thalacap.

2.1.2 Fréquent : Tempête SWL=1,06 mNGF ; Hs=4.70 m

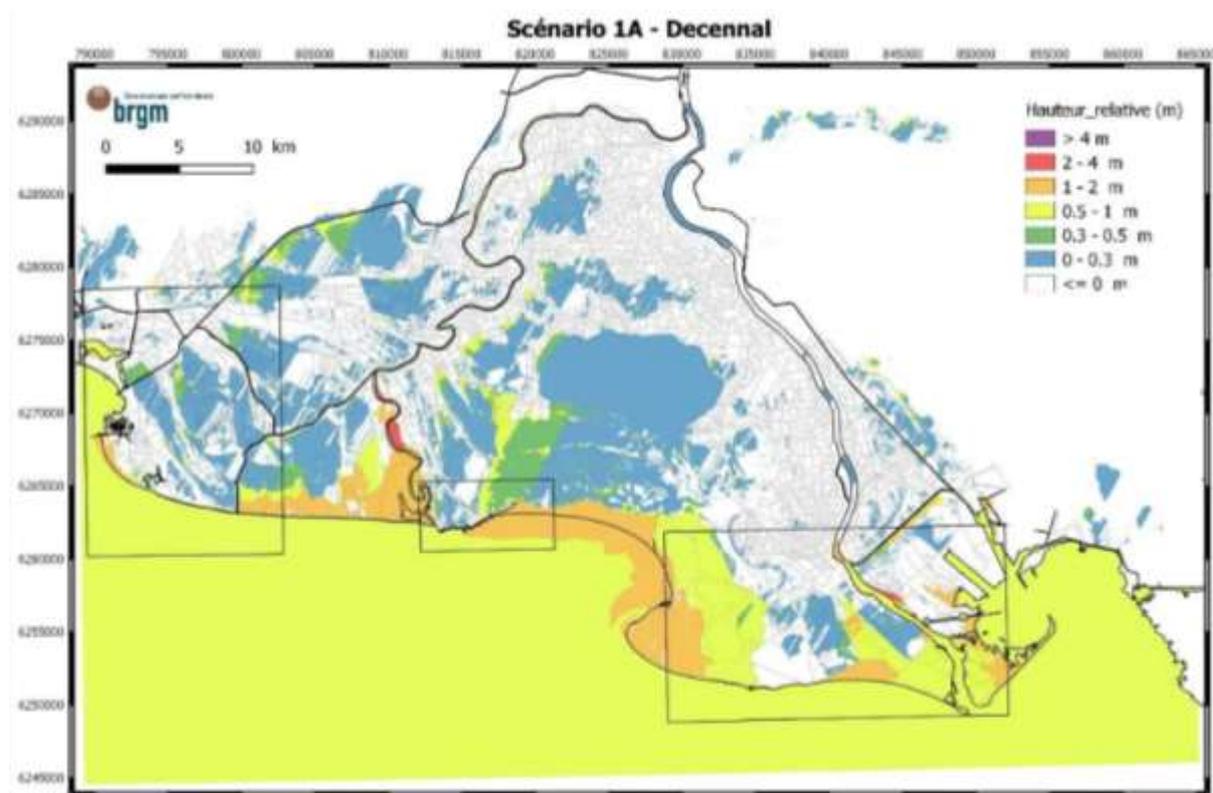


Figure 3. Carte des hauteurs d'eau relatives

Pour un évènement fréquent il n'y a pas d'entrée d'eau par surverse si il n'y a pas de défaillance.

Des débordements des étangs peuvent être attendus mais sont indépendant du rôle du système d'endiguement.

Au Sud Est, les eaux passent la digue des Salins mais n'atteignent pas le système de protection.

L'analyse des franchissements par paquets montrent qu'entre 8 000 m³ et 96 000 m³ sont attendus, en fonction de l'approfondissement des fonds marins. Les deux tiers se font au niveau de la plage Est et le reste au niveau du centre, principalement entre les arènes et le parking à l'Est de Thalacap.

2.1.3 *Tempête SWL=1,17 mNGF ; Hs=5.09 m*

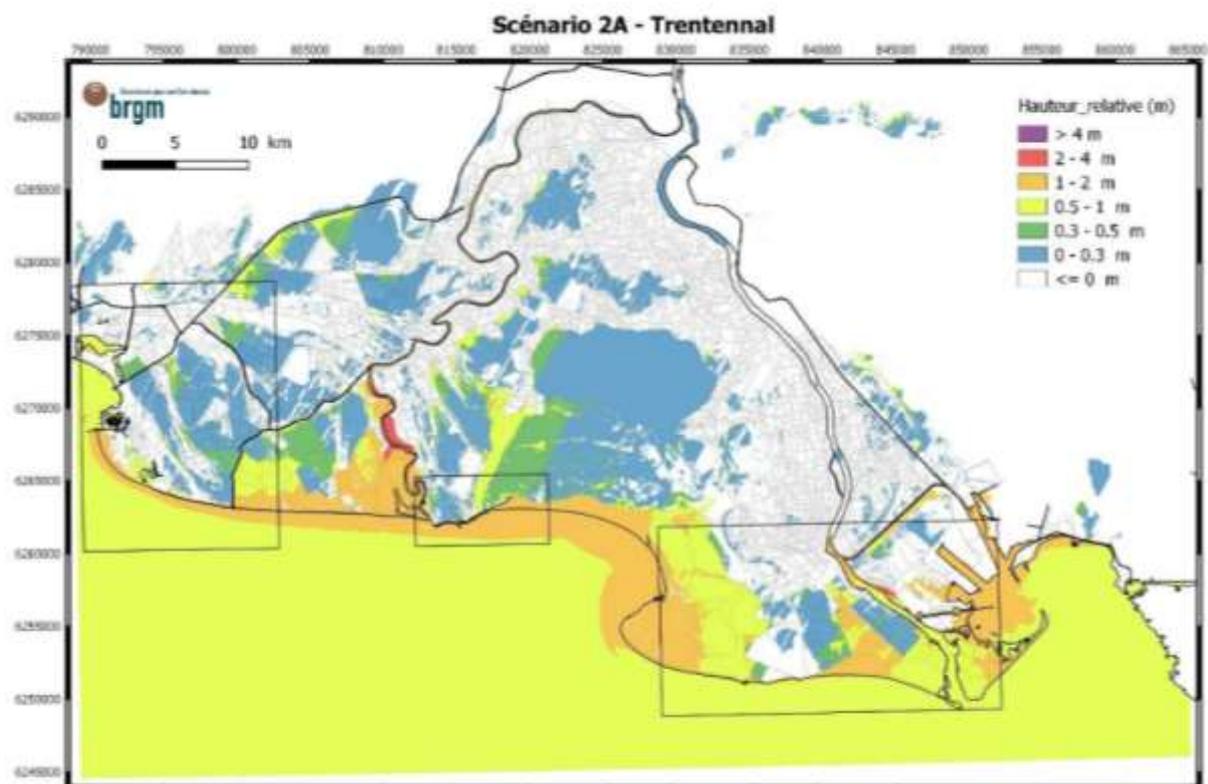


Figure 4. Carte des hauteurs d'eau relatives

Des débordements commencent à l'Est du Pertuis de la Comtesse.

Au Sud Est, les eaux passent la digue des Salins et arrivent au pied du système de protection.

L'analyse des franchissements par paquets montrent qu'entre 55 000 m³ et 370 000 m³ sont attendus, en fonction de l'approfondissement des fonds marins. Les deux tiers se font au niveau de la plage Est et le reste au niveau du centre, principalement entre les arènes et le parking à l'Est de Thalacap.

2.1.4 *Moyen : Tempête SWL=1,30 mNGF ; Hs=5.33 m*

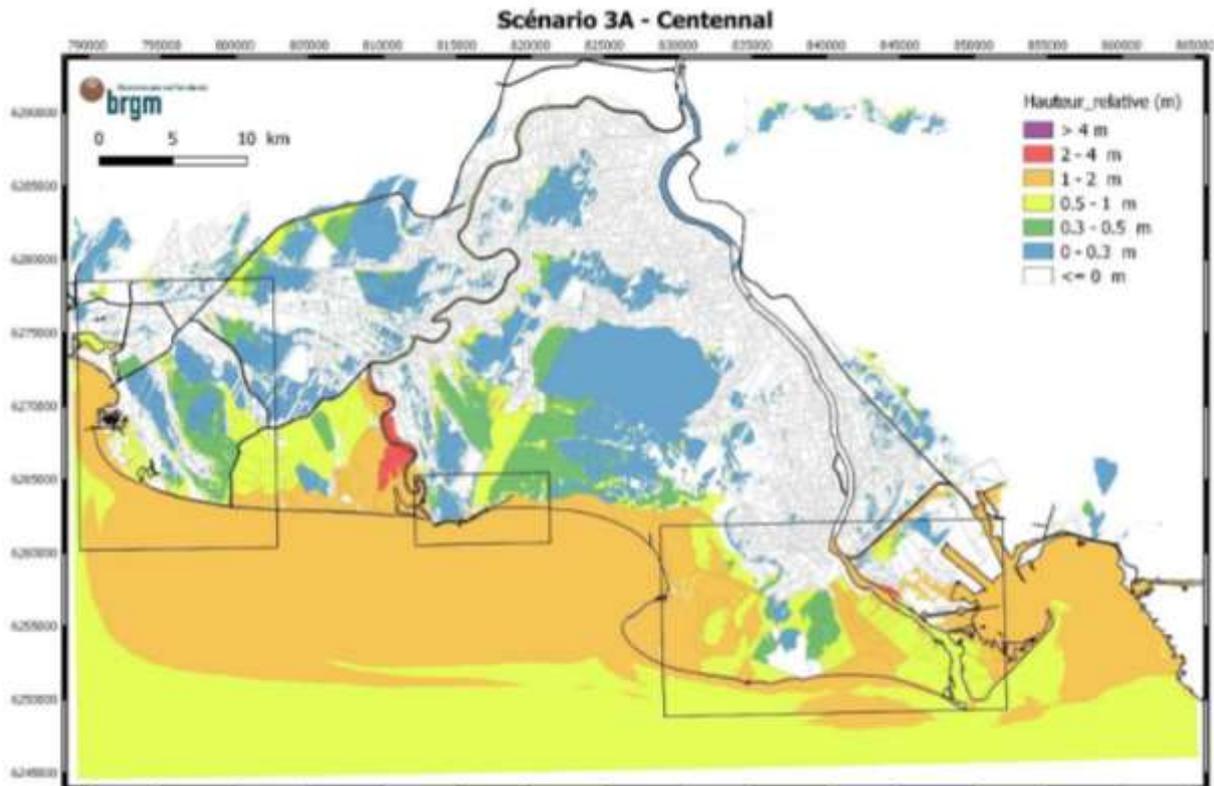


Figure 5. Carte des hauteurs d'eau relatives

Des débordements se poursuivent à l'Est du Pertuis de la Comtesse et apparaissent au niveau du village des Saintes-Maries-de-la-Mer.

Au Sud Est, les eaux passent la digue des Salins et s'étalent au pied du système de protection à Salin de Giraud.

L'analyse des franchissements par paquets montrent qu'entre 300 000 m³ et 5 000 000 m³ sont attendus, en fonction de l'approfondissement des fonds marins. La quasi intégralité se fait au niveau de la plage Est ; mais plus de 100 000 m³ franchissent au centre du village.

2.1.5 Extrême : Tempête SWL=1,55 mNGF ; Hs=8,75 m

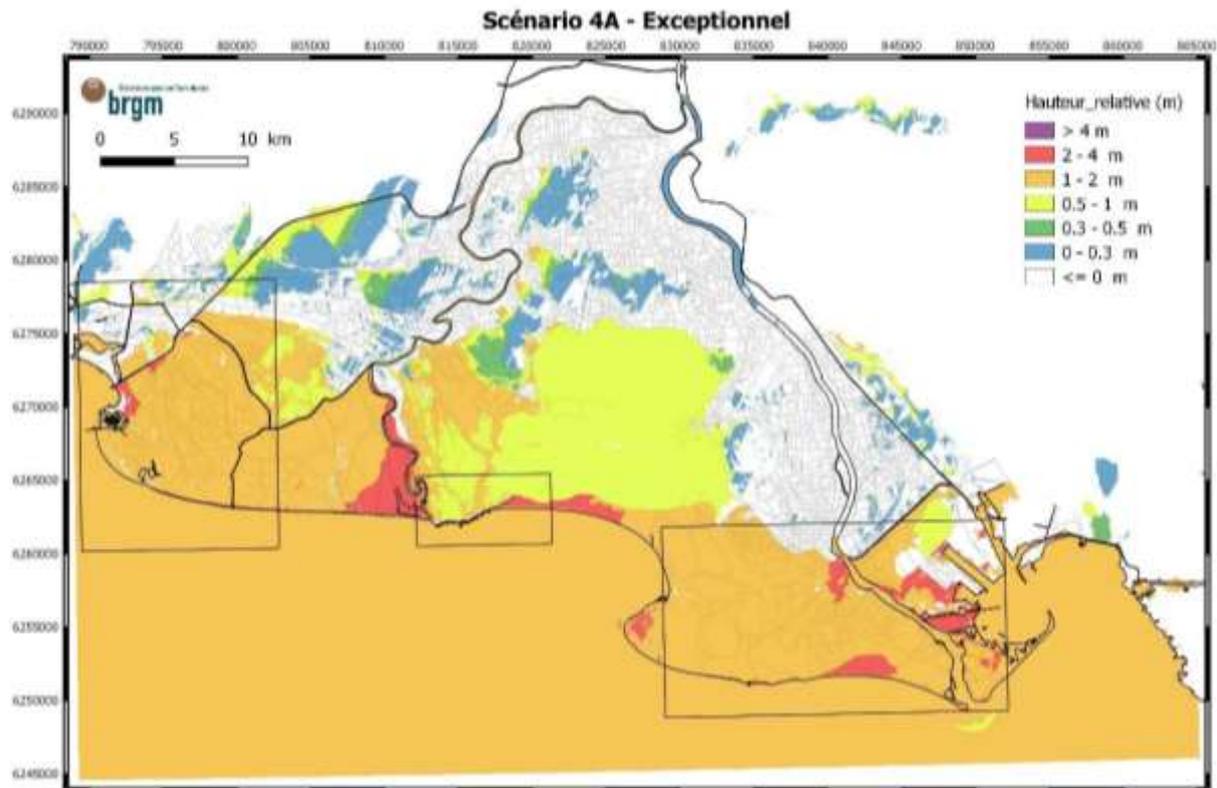


Figure 6. Carte des hauteurs d'eau relatives

Les entrées d'eau sont massives et ont un impact jusqu'à la limite Nord du Vaccarès.

Les centres urbanisés des Saintes-Maries-de-la-Mer et de Salin de Giraud sont fortement inondés, avec des hauteurs d'eau respectives de 1 à 2m et de 2 à 4m.

L'analyse des franchissements par paquets montrent qu'entre 7 000 000 m³ et 15 000 000 m³ sont attendus, en fonction de l'approfondissement des fonds marins ; en comparaison il y a 7 000 000 m³ qui franchissent les ouvrages par surverse, répartis équitablement entre Port Gardian et une zone à 1.5km à l'Est de la Fourcade. Environ la moitié des franchissements ont lieu au niveau de la plage Est ; mais environ de 3 000 000 m³ franchissent au centre du village.

2.2 MODELISATIONS DE BRECHE

4 localisations de brèches ont été retenues au droit du système d'endiguement.



Figure 7. Localisation des brèches retenues

Elles ont été retenues à dire d'expert et leurs caractéristiques sont présentées ci-dessous.

Nom	Localisation	Description - justification	Longitude / Latitude
B1	Clos du Rhône	<u>Digue longitudinale de fond de plage.</u> Enrochements hétérogènes et glissement de blocs observés. Les aménagements de cette zone sont particulièrement exposés du fait de l'approfondissement des fonds devant cet aménagement et du décalage du trait de côte de chaque côté du petit Rhône.	4°24'16.62"E / 43°26'53.76"N
B2	Quai des Pêcheurs (port Gardian)	<u>Mur « chasse mer » localisé entre le quai « sud » de la darse et la plage.</u> Instabilité de ce mur (affaissement, « renard » visible coté quai). Érosion de la plage ; augmentation potentielle de la houle qui arrive sur cette plage si le musoir de la digue du port est détruit. Ce musoir est en très mauvais état et une fosse d'érosion est visible.	4°25'27.88"E / 43°26'58.04"N
B3	Centre du village	Exposition directe aux houles de Sud Est et abaissement potentiel des fonds à moyenne échéance.	4°25'45.85"E / 43°26'58.51"N
B4	Plage Est	<u>Digue longitudinale à l'Est du grau de la Fourcade.</u> Renforcement d'urgence réalisé récemment. Tenue du pied de digue ? franchissements potentiellement plus importants. Le fort recul du trait de côte et abaissement des fonds ces dernières années augmentent les aléas hydrodynamiques et sédimentaires.	4°26'55.04"E / 43°27'26.33"N

Tableau 2. Localisation et description des brèches

Période de retour T (ans)	Description	B1	B2	B3	B4
30	Largeur	10 m	50 m	10 m	50 m
	Début de brèche par rapport au « palier haut de la tempête »	Avec 1 à 2 heures de décalage	Rapidement de l'Ouest vers l'Est	Avec 1 à 2 h de décalage	Rapidement, d'Ouest en Est depuis les limites Ouest du renforcement.
	Cote	TN en arrière de la digue	Niveau du quai	TN en arrière de la digue	TN en arrière de la digue
100	Largeur	50 m	100 m	35 m (1)	100 m (4)
	Début de brèche par rapport au « palier haut de la tempête »	Rapidement	Rapidement	Rapidement	Rapidement
	Cote	TN en arrière de la digue	TN en arrière de la digue	TN en arrière de la digue	TN en arrière de la digue
Exceptionnel	Largeur	100 m (3)	120 m(2)	100 m (4)	100 m (4)
	Début de brèche par rapport au « palier haut de la tempête »	Rapidement	Rapidement	Rapidement	Rapidement
	Cote	TN en arrière de la digue	TN en arrière de la digue	TN en arrière de la digue	TN en arrière de la digue

(1) longueur digue entre les 2 épis

(2) longueur du mur

(3) destruction brise-lames « clos du Rhône »

(4) brèche « PPRI »

Tableau 3. Caractéristiques géométriques des brèches et cinétique de défaillance

Les cartographies ci-après illustrent, pour les différentes tempêtes, les hauteurs d'eau et les surcotes relevées lors des modélisations avec brèche.

2.2.1 Tempête SWL=1,17 mNGF ; Hs=5.09 m

Les impacts des brèches sont limités et ne sont quasiment pas visibles en comparaison cartographique. L'influence se trouve donc principalement au droit des brèches ; au niveau du clos du Rhône il y a néanmoins une inondation qui n'était pas présente sans défaillance du système d'endiguement.

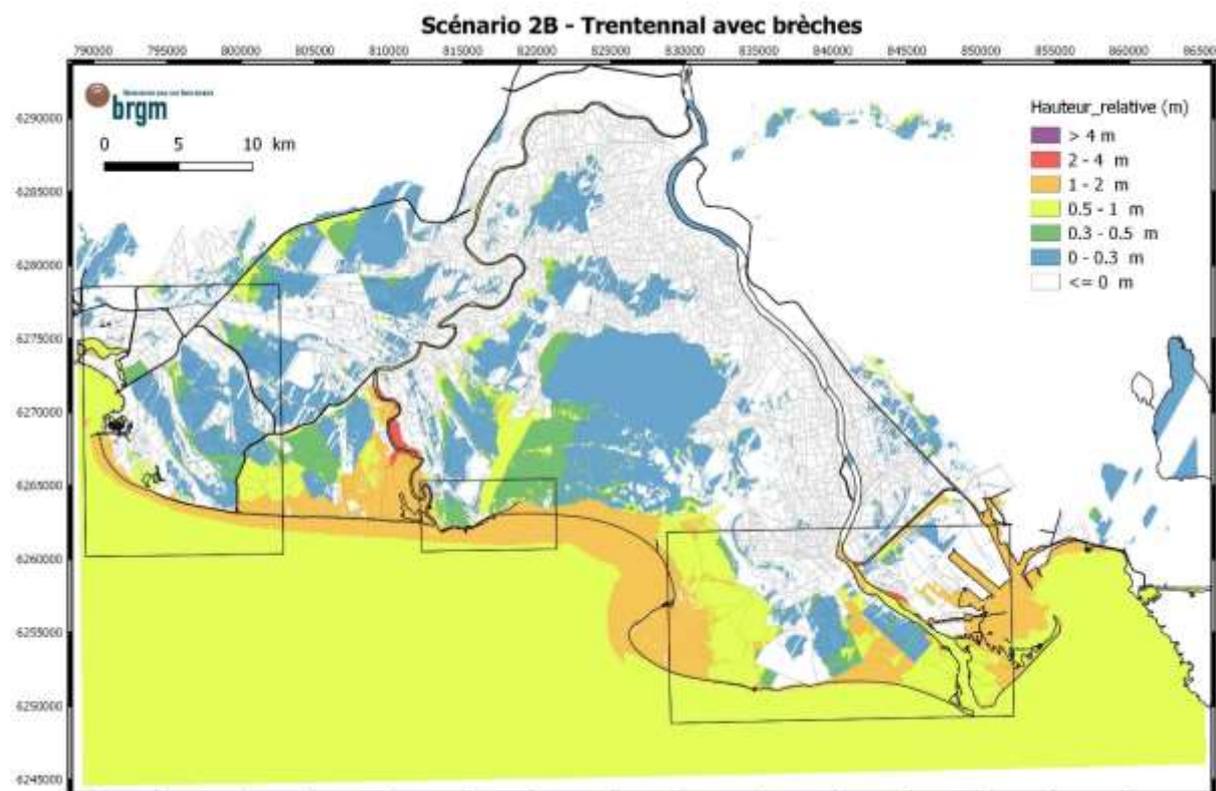


Figure 8. Carte des hauteurs d'eau relatives

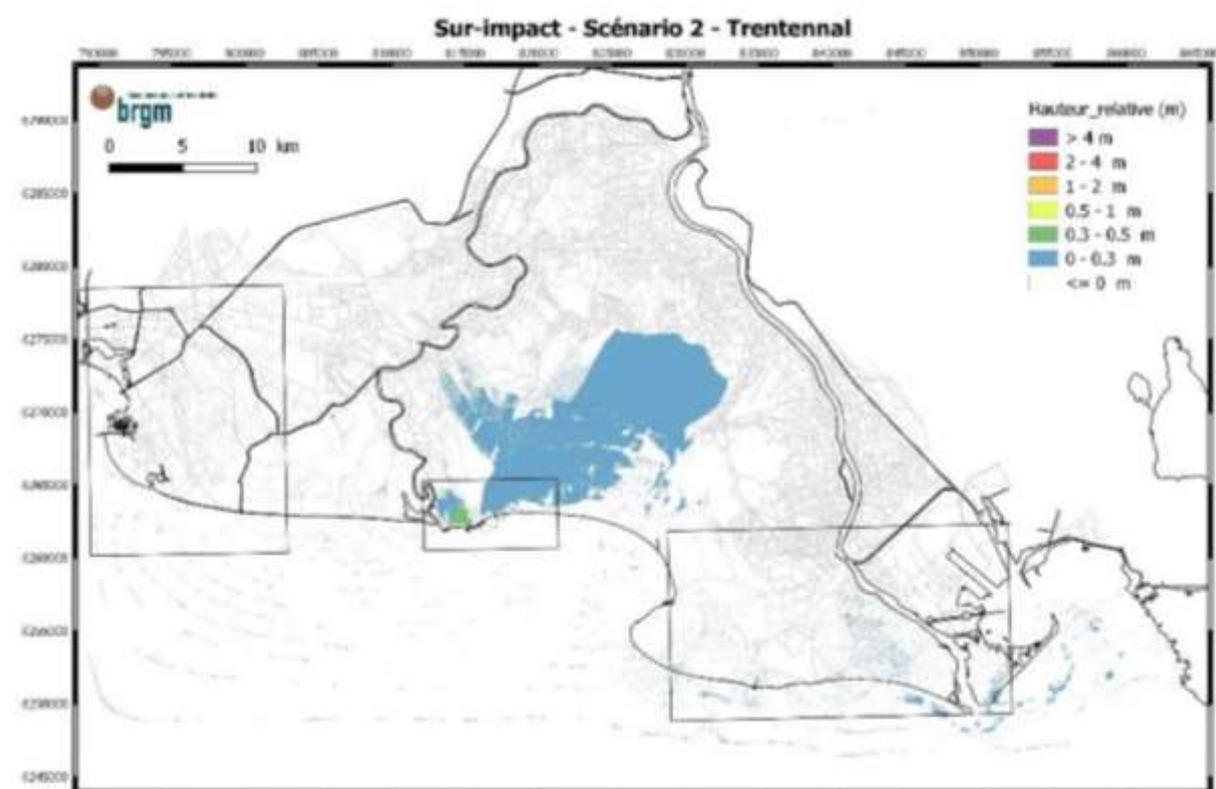


Figure 9. Carte des sur-impacts liés aux brèches

2.2.2 Moyen : Tempête SWL=1,30 mNGF ; Hs=5.33 m

Les impacts des brèches sont limités et ne sont quasiment pas visibles en comparaison cartographique.

L'influence se trouve donc principalement au droit des brèches ; au niveau du clos du Rhône il y a néanmoins une inondation qui n'était pas présente sans défaillance du système d'endiguement.

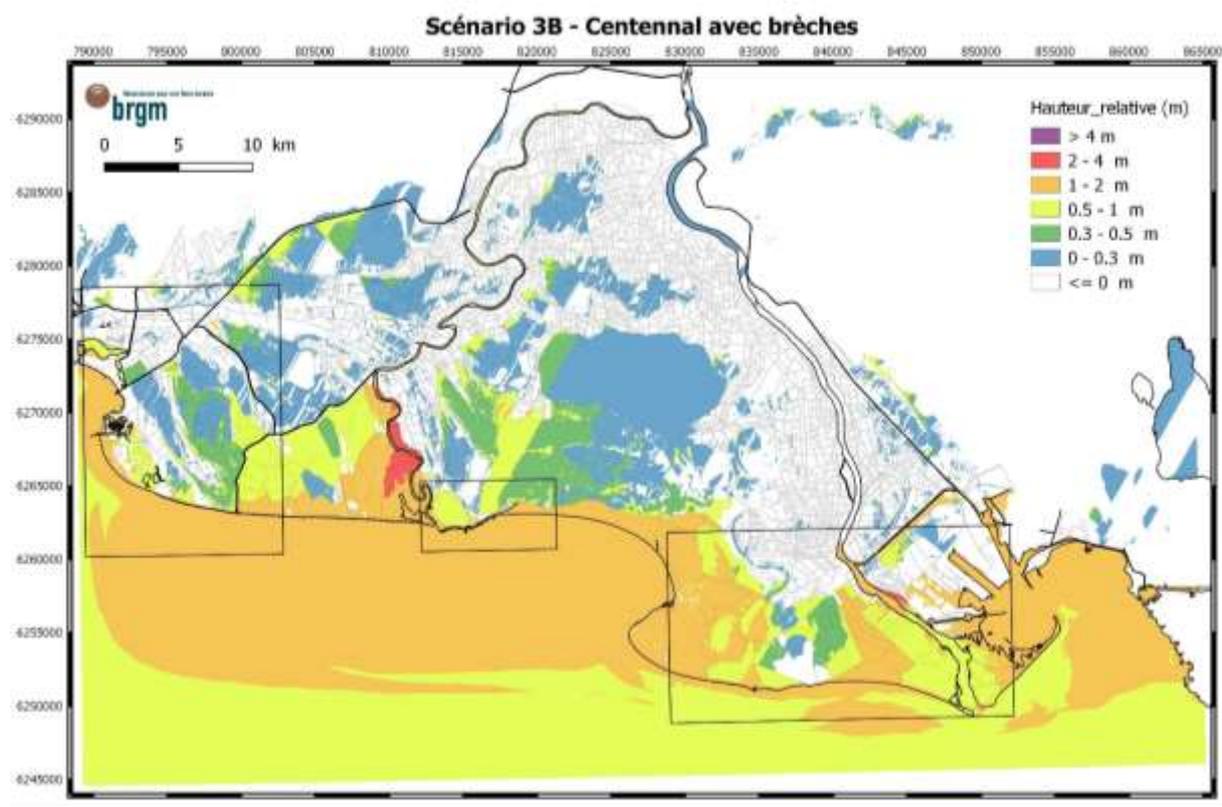


Figure 10. Carte des hauteurs d'eau relatives

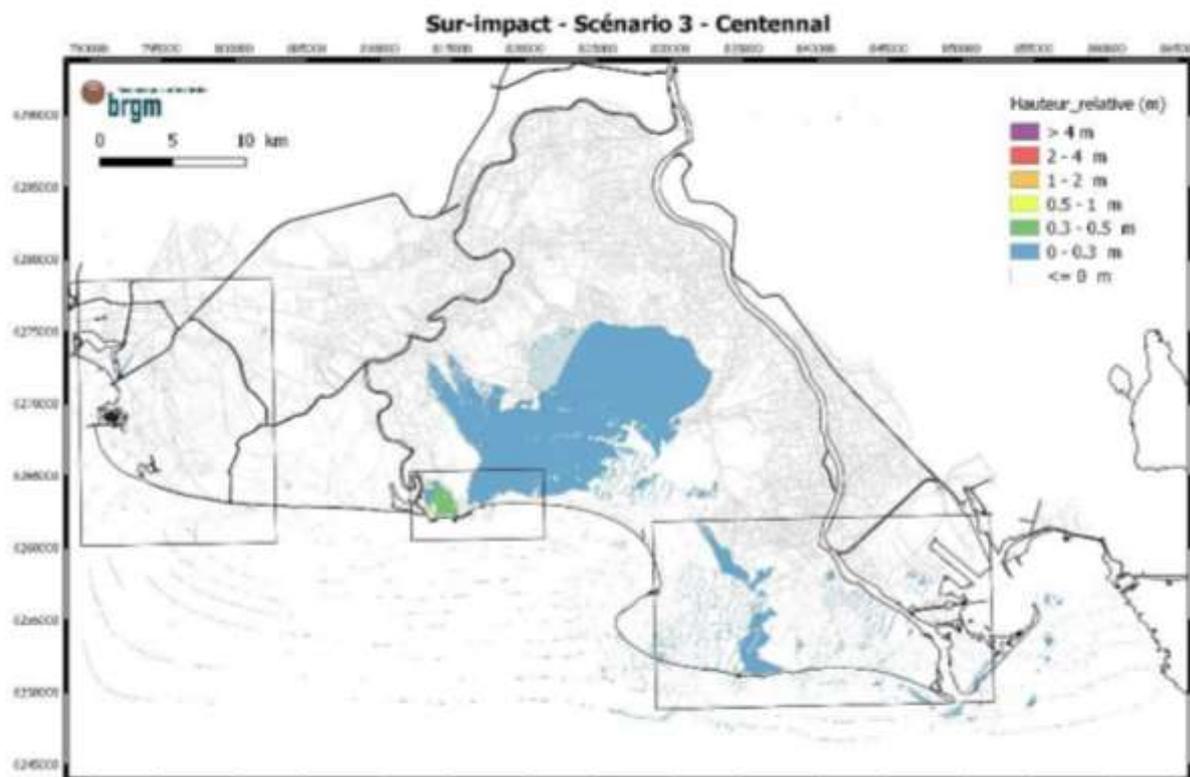


Figure 11. Carte des sur-impacts liés aux brèches

2.2.3 Extrême : Tempête $SWL=1,55\text{ mNGF}$; $H_s=8,75\text{ m}$

La présence des brèches augmente les quantités d'eau entrant à l'Ouest de la zone protégées ; il y a alors à la fois un étalement et un exhaussement des niveaux. ; ils restent néanmoins du même ordre de grandeur puisque la rehausse est globalement inférieure à 30cm pour des hauteurs de l'ordre de 1 à 2m au niveaux des zones à enjeux.

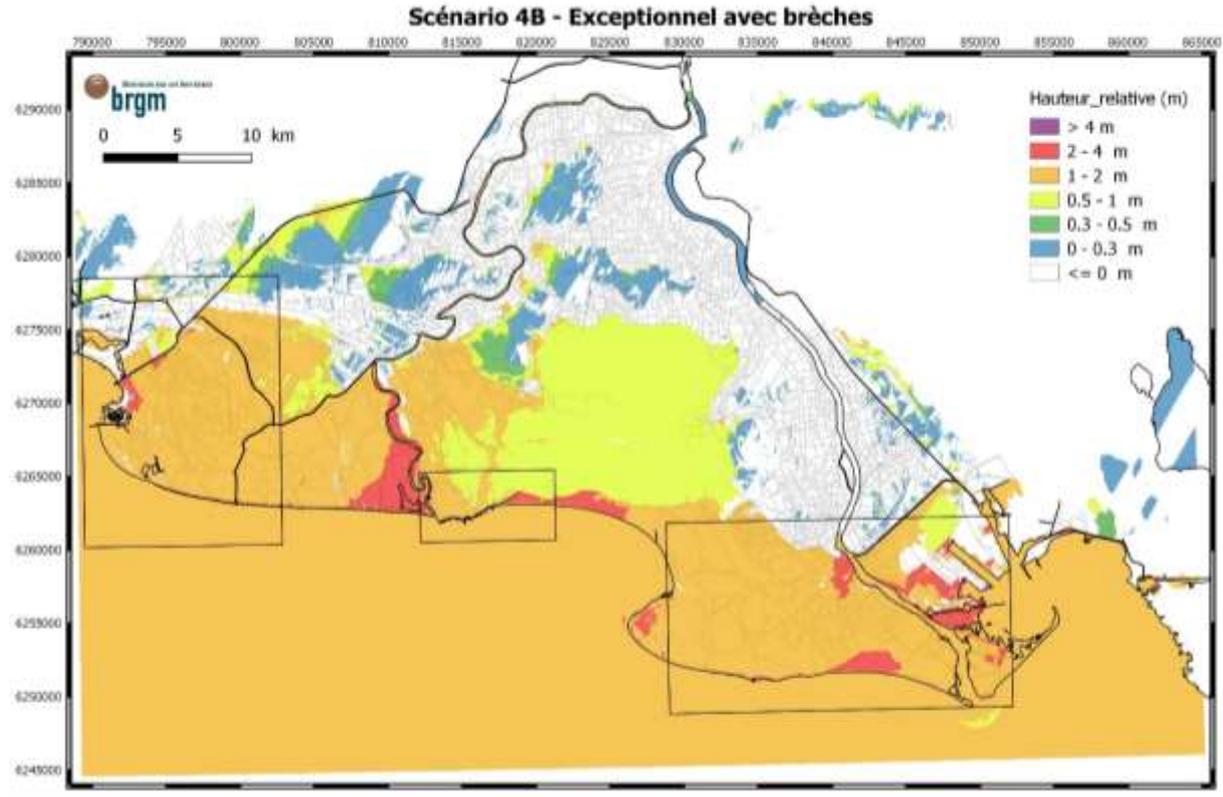


Figure 12. Carte des hauteurs d'eau relatives

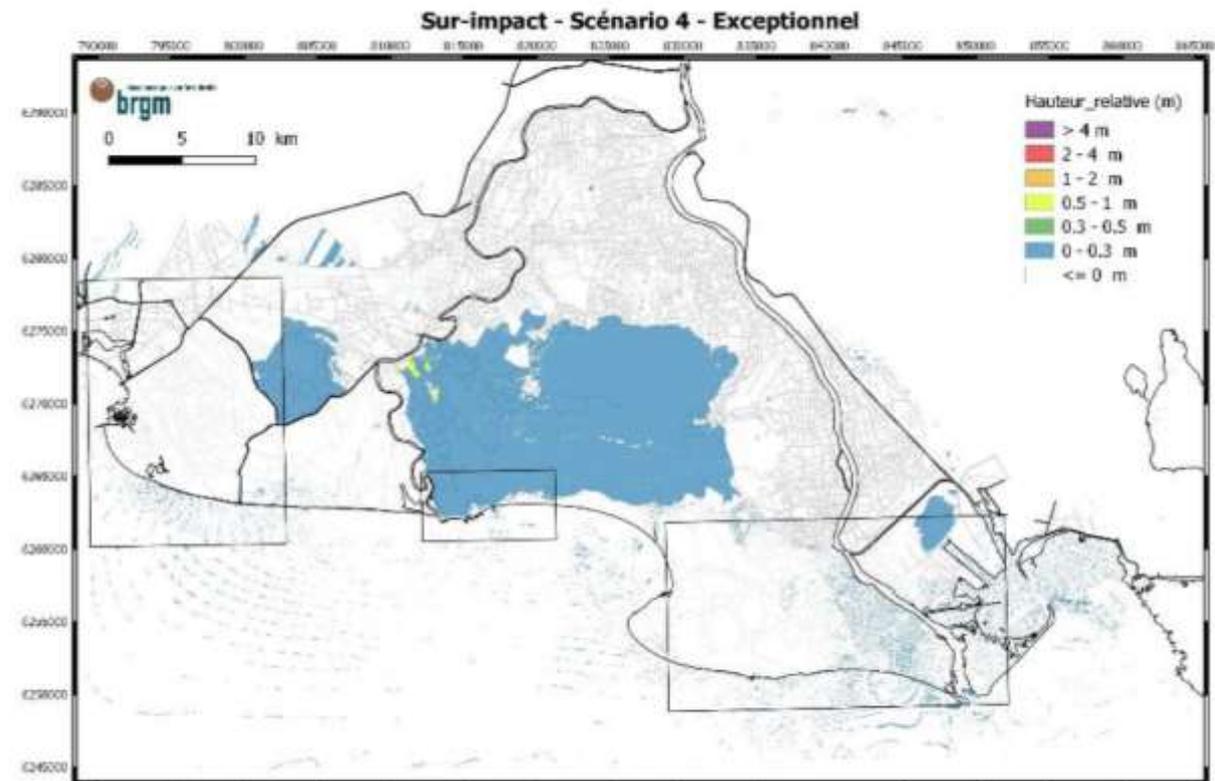


Figure 13. Carte des sur-impacts liés aux brèches

2.3 SYNTHÈSE DES MODELISATIONS

L'ensemble de ces modélisations donne plusieurs informations et comporte des limites :

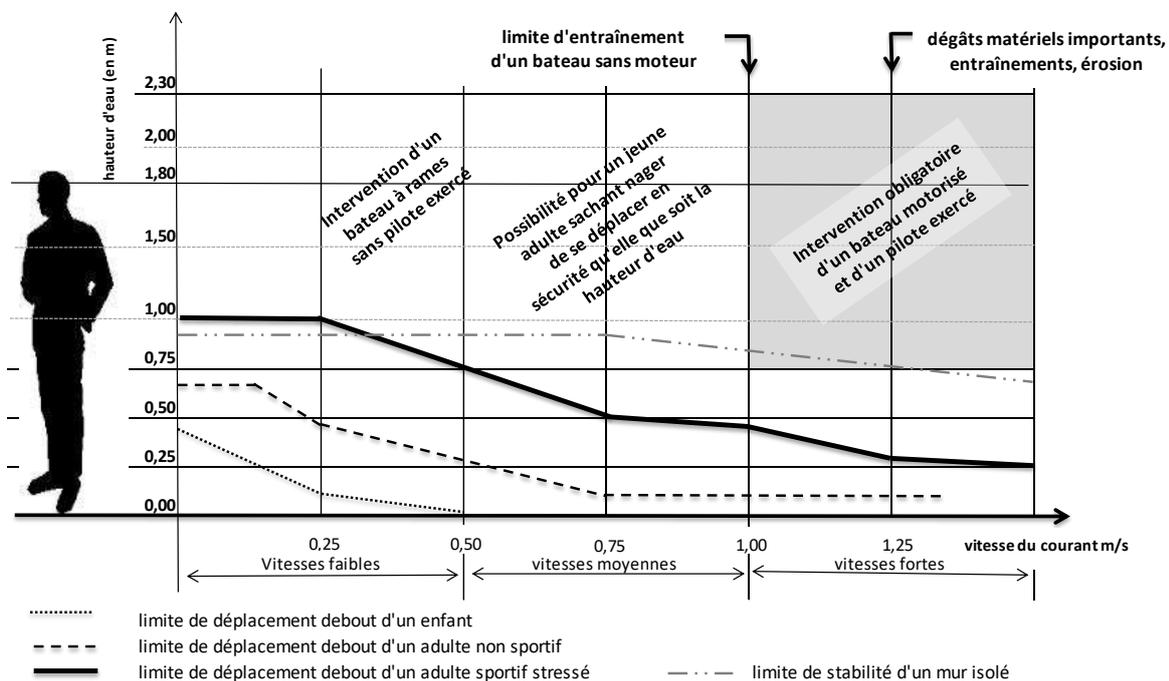
- L'expansion de l'inondation, pour un volume d'eau donné, est fortement dépendante du niveau d'eau initial dans les marais ;
- Les zones inondables en tempête sont distinctes des zones inondables par la mer lors de tempêtes, le vent pouvant entraîner des inondations liées aux marais et étangs même sans incursion marine ; le système d'endiguement ne joue pas de rôle face à ce phénomène (cf chap 3, §3.4.5) ;
- Les franchissements qui ont été estimés (chap 7) n'apparaissent pas ; ils doivent néanmoins être pris en compte pour la détermination des zones inondées, il en est de même pour les passages via les ouvrages traversants non vannés ;
- Les brèches ont été simulées dans une zone ; elles permettent néanmoins de saisir l'ampleur du sur-impact afin de l'extrapoler sur le reste du linéaire de protection.
- Jusqu'au scénario exceptionnel, les impacts des surverses comme des brèches ne vont pas au Nord de l'étang du Vaccarès.

3 FONCTIONNEMENT

3.1 NIVEAU DE PROTECTION

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 (1^{er} niveau), dangereuses (2^{ème} niveau) et très dangereuses (3^{ème} niveau).



3.2 LIMITES DE L'ETUDE DE DANGERS

Soit une tempête dont le niveau est inférieur au niveau de la protection de la digue. On considère que la tempête est contenue coté mer du système de protection.

Dans la zone protégée, certains secteurs peuvent cependant être inondés, par d'autres phénomènes que la tempête, tel que :

- remontée de nappe
- débordements de cours d'eau
- accumulation du ruissellement pluvial.

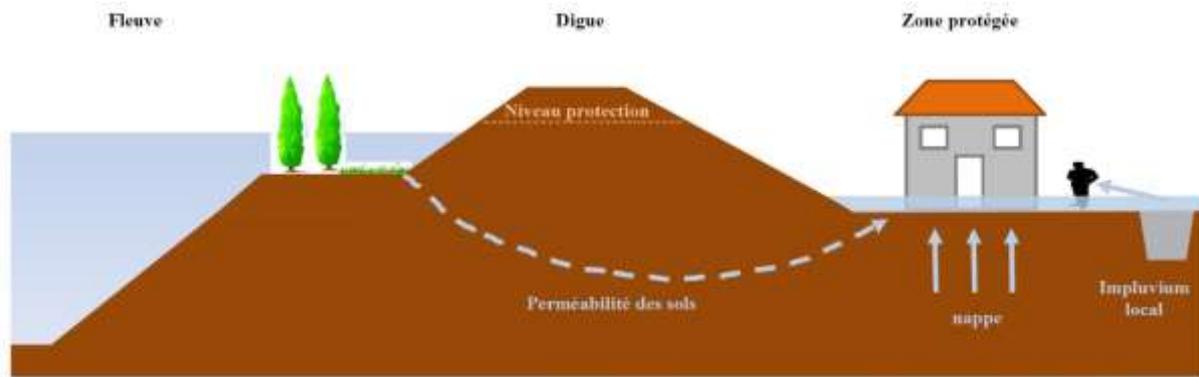


Figure 15. Zone protégée inondée et niveau de protection du système d'endiguement non atteint

4 SCENARIO 1

Les niveaux de submersion, de franchissement et de sûreté des ouvrages ont été déterminés au chapitre 7 de la présente étude et ont permis de définir les niveaux de protection des ouvrages. Le scénario 1 prend en compte des entrées d'eau une fois le niveau de protection dépassé.

Si il n'y avait qu'un niveau de protection sur l'ensemble du système d'endiguement, ce scénario ne représenterait que les écoulements en dehors de la zone protégée.

Dans le cas présent il est proposé de montrer les niveaux potentiellement atteints lors des différentes tempêtes.

Le niveau est le niveau marin mesuré au pertuis de la fourcade et exprimé en m NGF.

niveau < 0.50

Jusqu'à la mise en eau des buses non vannées présentes aux alentours du pertuis de la comtesse les eaux de la mer restent à l'extérieur de la zone protégée.

L'ensemble de la zone protégée reste protégée.

0.50 < niveau < 0.85

Il peut ensuite y avoir des premières entrées d'eau par contournement de la digue via les buses qui ne sont pas vannées, les eaux restent limitées aux marais, en eau en permanence.

Le niveau de protection des zones en noir est dépassé.

0.85 < niveau < 0.97

Des franchissements peuvent se produire en différentes zones : Clos du Rhône, village des Saintes-Maries-de-la-Mer et à la plage Est. De plus, le niveau du remblai à l'Est du vieux Rhône, en cas de tempête de très longue durée, pourrait être localement franchi.

Le niveau de protection des zones en rouge est dépassé.

0.97 < niveau < 1.06

Des niveaux de sûreté seront dépassés au droit du village, dans les zones où il y a déjà franchissement.

Les premiers niveaux de danger sont atteints, sur la majeure partie des ouvrages situés à l'Est du pertuis de la Fourcade.

Des entrées d'eaux par brèches, plus massives, sont alors possibles. Les eaux s'étaleront un peu plus et pourront dépasser le village.

A l'Est du pertuis de la comtesse les niveaux de submersion sont dépassés, en même temps que celui de sûreté ; si la tempête est suffisamment longue il y aura des entrées d'eau dans ce secteur. Le niveau de protection des zones en orange foncé est dépassé.

1.06 < niveau < 1.17

Les premiers niveaux de danger sont atteints au niveau du village (tronçon des arènes).

Des franchissements nouveaux sont attendus à Port Gardian.

A l'est les eaux continueront de s'étaler dans les marais et zones humides.

Il n'y a pas de changement de niveau de protection sur la carte.

1.17 < niveau < 1.30

Des franchissements sont attendus sur la quasi intégralité du linéaire.

Il y aura plus d'entrées d'eau mais qui resteraient dans les zones déjà potentiellement inondées.

Il n'y a pas de changement de zone protégée sur la carte.

1.30 < niveau < 1.55

Le niveau de submersion de port Gardian est dépassé, l'inondation du village des Saintes-Maries-de-la-Mer est à présent certain.

Les volumes de franchissement sont également important et le risque de brèche au droit de ce secteur urbanisé est important (3km sur les 4 voient leur niveau de sûreté dépassé).

Des entrées d'eau par brèches pourraient s'étaler jusqu'à l'ouest de la Camargue insulaire.

Les niveaux de protection des zones en vert clair est dépassé.

1.55 < niveau

En cas de tempête extrêmement forte et de durée importante, les zones du Nord et de l'Est de la Camargue Insulaire pourraient finir par être en eau.

Les niveaux de protection des zones en vert foncé est dépassé.

Tableau 4. Niveaux de protection des sous zones protégée de la Camargue insulaire

N°SZP	dénomination sous-zone protégée	Niveau de protection [m NGF]		N°SZP	dénomination sous-zone protégée	Niveau de protection [m NGF]
1	Saintes-Maries-de-la-Mer	0,85		11	Paty trinité	1,30
2	Salin de Giraud	0,85		12	Abords digue Sylvéreal Bac du Sauvage	1,30
3	Amarée Dromar	0,85		13	Abords digue Albaron Sylvéreal	1,30
4	Etang du Vaccarès	0,50		14	Armelière Sambuc Chamone	1,55
5	Vignolle	0,50		15	Abords digue Commanderie Boisverdun	1,55
6	Etang du Fangassier	0,85		16	Abords digue Boisverdun La Louisiane	1,55
7	Abords digue Salin de Giraud	0,85		17	Marais de la Grand Mar	1,55

N°SZP	dénomination sous-zone protégée	Niveau de protection [m NGF]	N°SZP	dénomination sous-zone protégée	Niveau de protection [m NGF]
8	Etang de Ginès	0,97	18	Marais du Pont de Rousty	1,55
9	Vaccarès Est	0,97	19	Marais de Saliers	1,55
10	Panperdu Etang des Launes	1,30	20	Saliers	1,55

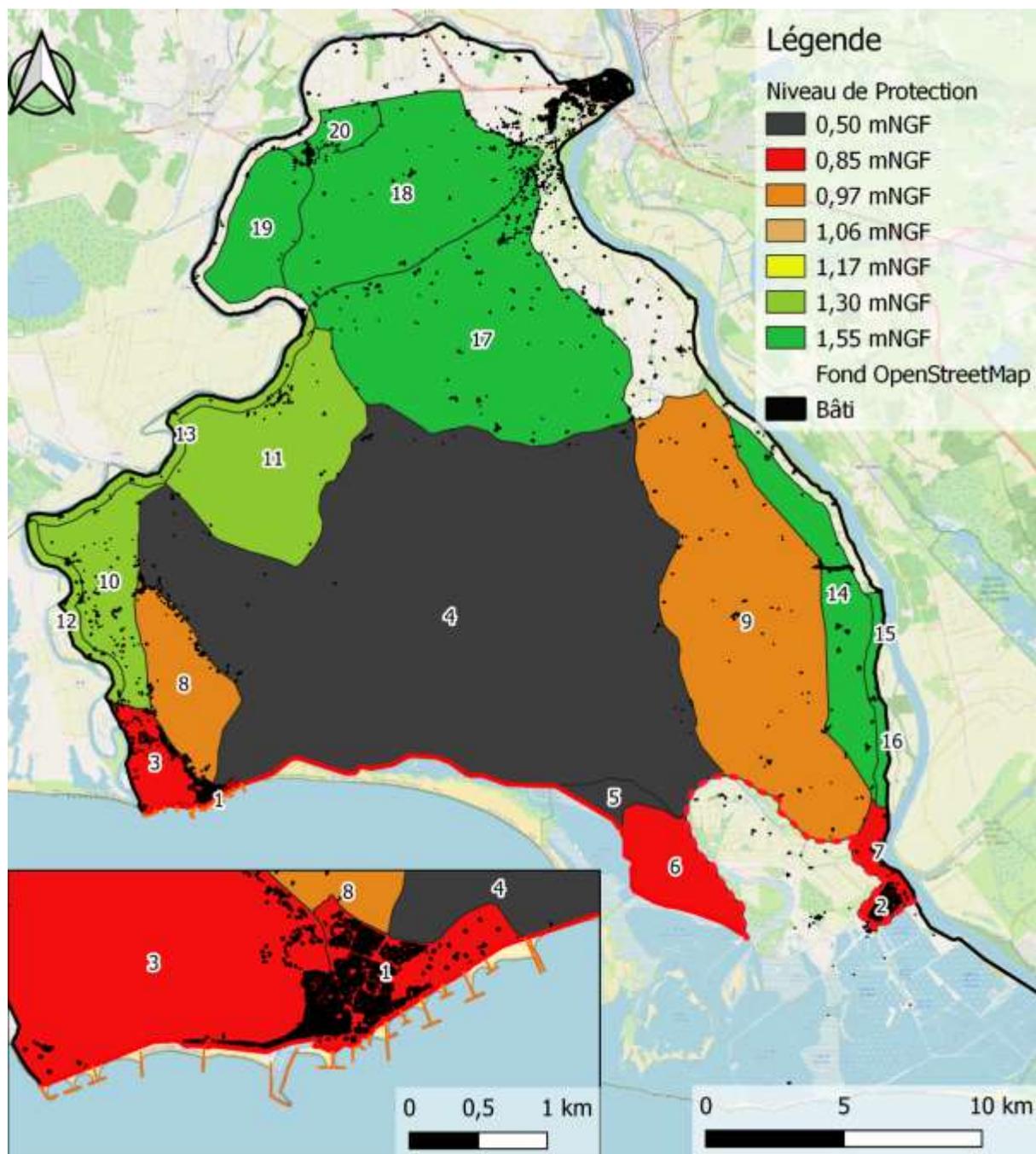


Figure 16. Niveaux de protection des sous zones protégée de la Camargue insulaire

5 SCENARIO 2

Les niveaux de protection des ouvrages ont été déterminés au chapitre 7 de la présente étude. Le scénario 2 prend en compte des entrées d'eau liées à une défaillance fonctionnelle.

Les ouvrages manipulables présents sur le système d'endiguement sont les pertuis. Ils sont manipulés au quotidien et le risque de défaillance est faible avant atteinte du niveau de protection ; celui-ci reste néanmoins non nul.

Ces ouvrages vannés protègent les mêmes secteurs que ceux inondés par les passages busés non vannés, qui ont un niveau de protection de 0.5 mNGF.

Pour ce niveau, une rupture de vanne créerait une onde dans le marais qui ne serait pas plus intense que les clapotis liés au vent. Il n'y aurait aucun enjeu impacté puisque le niveau des marais fluctue entre -0.25 et 0.65 mNGF (données 2001-2019 au Nord du pertuis de la Fourcade), c'est donc un fonctionnement normal, sans sur aléa.

6 SCENARIO 3

Les niveaux de danger des ouvrages ont également été déterminés au chapitre 7 de la présente étude.

Le scénario 3 prend en compte des entrées d'eau par contournement si le niveau de submersion ou franchissement est dépassé et par brèche une fois le niveau de danger dépassé.

Les entrées d'eau par contournement, franchissement et surverse sont identiques au scénario 1 ; les entrées d'eau sont alors similaires pour les petites tempêtes.

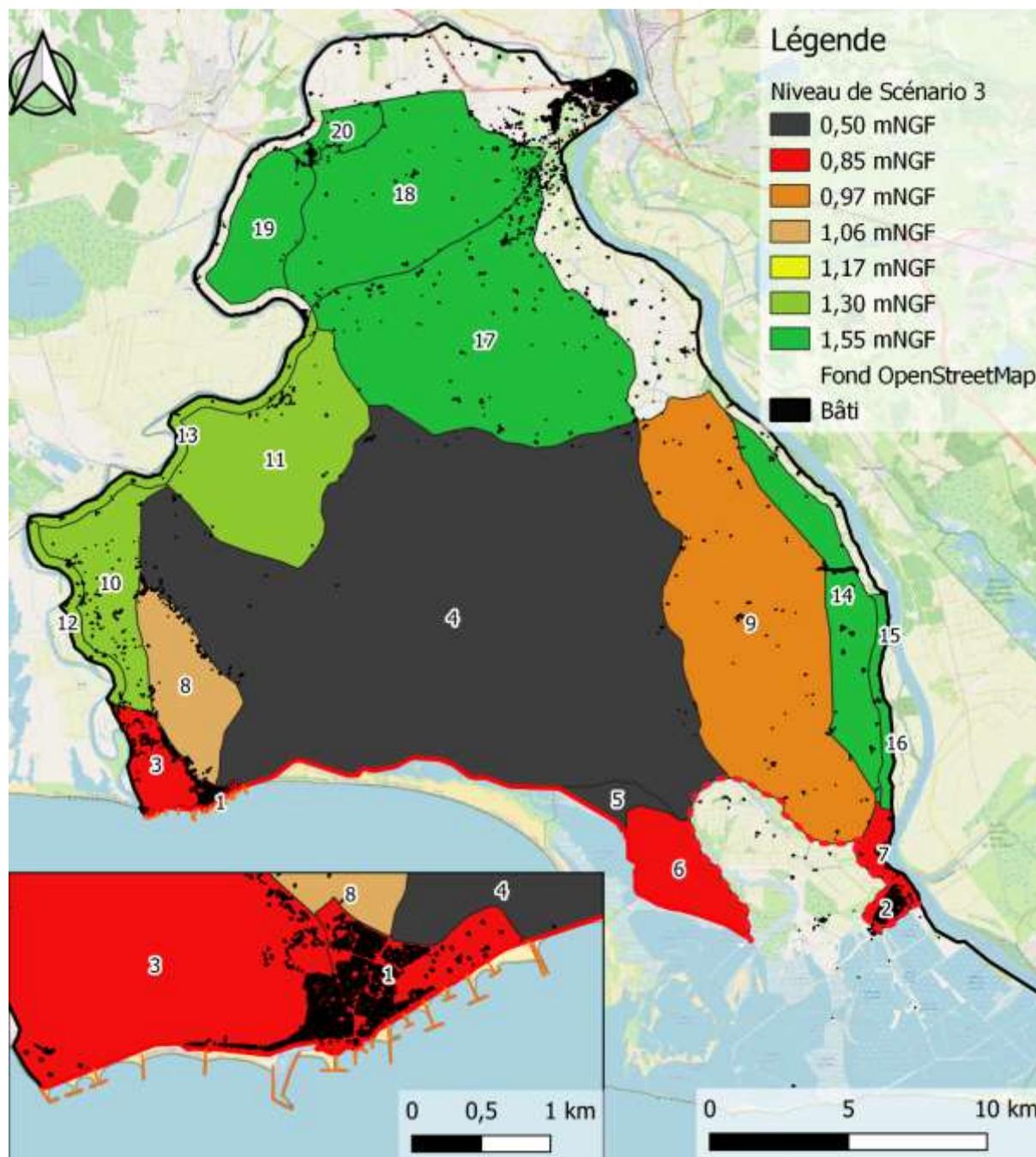
Pour les plus fortes tempêtes, les niveaux de danger et de sûreté des ouvrages sont tous deux dépassés, il y a à nouveaux des entrées d'eau similaires au scénario 1.

En revanche, au droit du village, le niveau de danger minimum (1.06 mNGF) est supérieur aux niveaux de sûreté (0.97 mNGF), les entrées d'eaux massives au droit du village et l'inondation de la zone 8 sont alors retardées.

Tableau 5. Niveaux hors d'eau pour le scénario 3 des sous zones protégée de la Camargue insulaire

N°SZP	dénomination sous-zone protégée	Niveau de Scénario 3 [m NGF]	N°SZP	dénomination sous-zone protégée	Niveau de Scénario 3 [m NGF]
1	Saintes-Maries-de-la-Mer	0,85	11	Paty trinité	1,30
2	Salin de Giraud	0,85	12	Abords digue Sylvéreal Bac du Sauvage	1,30
3	Amarée Dromar	0,85	13	Abords digue Albaron Sylvéreal	1,30
4	Etang du Vaccarès	0,50	14	Armelière Sambuc Chamone	1,55

N°SZP	dénomination sous-zone protégée	Niveau de Scénario 3 [m NGF]	N°SZP	dénomination sous-zone protégée	Niveau de Scénario 3 [m NGF]
5	Vignolle	0,50	15	Abords digue Commanderie Boisverdun	1,55
6	Etang du Fangassier	0,85	16	Abords digue Boisverdun La Louisiane	1,55
7	Abords digue Salin de Giraud	0,85	17	Marais de la Grand Mar	1,55
8	Etang de Ginès	1,06	18	Marais du Pont de Rousty	1,55
9	Vaccarès Est	0,97	19	Marais de Saliers	1,55
10	Panperdu Etang des Launes	1,30	20	Saliers	1,55





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

ETUDE DE DANGERS
DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT MARITIME
CAMARGUE INSULAIRE

DOCUMENT B

CHAPITRE N°9 : ORGANISATION MISE EN PLACE

Version	Date	Commentaires
0	27/02/2023	Version initiale
1	23/03/2023	Reprise suite à la relecture interne

SOMMAIRE

1	Informations générales.....	3
2	En situation normale	4
3	Lors d'une tempête	5

1 INFORMATIONS GENERALES

Les consignes écrites du gestionnaire sont présentées dans « 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 ».

La version en vigueur est la V2, approuvée par une délibération du Comité syndical du SYMADREM le 07/06/2021. Elle est annexée à la présente étude.

Les éléments de ce document ne sont pas repris, seuls des points d'amélioration sont mentionnés dans le présent chapitre.

Il n'y a pas de remarques concernant la présentation (§1), le contexte (§2), la gestion liée au séisme (§6), la gestion documentaire (§7) ou le contrôle qualité (§8) ; la gestion en crue n'a pas été réanalysée (§4). Sont donc concernés les paragraphes 3 et 5.

2 EN SITUATION NORMALE

Le chapitre 3, de la « 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 », traite de l'organisation en situation normale.

Les VSP et VTA sont à réaliser sur la digue à la mer de la même façon que sur les digues fluviales. Ces opérations étant réalisées dans les faits, le tableau 16 devrait simplement mentionner « digues » et le tableau 17 devrait être élargi à la digue maritime, de même le §3.3.10 devrait être complété des périodes de tempête.

Les ouvrages maritimes étant spécifiques par rapport au reste du linéaire en gestion SYMADREM, il pourrait être réalisé une fois par an une VSP avec un garde digue d'un autre secteur, ou qu'un de ces derniers participent à la VTA, afin d'augmenter la remplaçabilité du garde digue, au quotidien comme lors d'évènement tempétueux.

3 LORS D'UNE TEMPETE

Le chapitre 5, de la « 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 », traite de l'organisation en cas de tempête.

La situation de tempête est déclenchée suite à une alerte « vigilance vagues-submersion » de Météo France. L'information de météo France au SYMADREM est automatique : SMS de la préfecture ; il serait nécessaire de le préciser dans le document ou de prévoir la fréquence de consultation de Météo France hors tempête.

En absence de franchissement, l'observation est visuelle, en cheminant sur les ouvrages, à l'exception des ouvrages en mer (épis et brise lame) qui sont observés aux jumelles. Les points d'observations pourraient être précisés afin d'augmenter la remplaçabilité du garde digues.

A partir du moment où des déferlements se produisent, l'observation se fait aux jumelles depuis des points d'observation ; pour les ouvrages les plus éloignées il n'y a donc plus d'observation (la digue à la mer à l'est du DM4.8). Les points d'observations pourraient être précisés afin d'augmenter la remplaçabilité du garde digues.

Le point de coupure d'accès étant au niveau de la plage Est, un garde digue pourrait réaliser la visite de la partie, accessible sans risque, des ouvrages plus à l'Est en partant de l'Est du système d'endiguement. Il est à noter que les seuls accès sont situés au Clos d'Esclaux (DM19) et au Vieux Rhône (DM26), s'engager plus à l'Ouest est risqué. En effet, s'il y avait une défaillance de l'ouvrage, le garde pourrait se retrouver isolé. Par conséquent, cette surveillance ne sera pas à réaliser en cas de sollicitation trop importante des ouvrages.

Les états d'alerte sont définis en fonction du niveau marin au pertuis de la Fourcade et du vent. Il faudrait ajouter une pré-alerte, tant que le niveau marin est inférieur au premier seuil (0.5mNGF). Le niveau doit aujourd'hui être relevé sur site, un accès au relevé automatisé permettrait une visualisation à distance (prévu).

Le document de consigne indique un double paramétrage niveau marin / vent, chaque élément est nécessaire dans le fonctionnement actuel ; ce point est à préciser dans le document.

Concernant les ouvrages à l'Est du DM4.8, l'alerte 1 peut être déclenchée pour un fort vent du Nord ; ce dernier ne crée pas de risque de submersion marine mais peut affecter l'ouvrage du fait du basculement du plan d'eau et du Fetch développé sur les marais au nord du système d'endiguement. Ce phénomène est à sortir du cadre des tempêtes car il n'y aura pas nécessairement de vigilance vagues-submersion de la part de météo France dans ces conditions.

La levée de l'alerte est faite soit si les seuils ne sont plus atteints (§5.4) soit en fin d'alerte météo (§5.2). Cela pourrait être clarifié avec l'introduction de pré-alerte liée à la vigilance vagues-submersion de météo France.

Les niveaux de protection/danger n'étant pas connus lors de la rédaction de ce document, ils ne sont pas mentionnés. Ils seront à ajouter une fois la présente étude de dangers approuvée.

En cas de détection de désordre, voir de brèche, il est prévu une analyse sur place. Cette dernière n'est à réaliser que si l'accès n'est pas dangereux, autrement l'analyse se fera depuis les points d'observation.

Les fiches de visites post-tempête, même si similaires à celles de VTA, pourraient être annexées au document d'organisation.



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

ETUDE DE DANGERS
DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT MARITIME
CAMARGUE INSULAIRE

DOCUMENT B

CHAPITRE N°9BIS : RECOMMANDATIONS

Version	Date	Commentaires
0	28/02/2023	Version initiale
1	23/03/2023	Reprises suite à la relecture interne

SOMMAIRE

1	Validité à moyen terme	3
1.1	Erosion du trait de cote	3
1.2	Période de retour	3
2	Connaissance de l'aléa	3
3	Mesures à mettre en place	3
3.1	Gestion de la surveillance	3
3.2	Mesures organisationnelle	3
3.3	Mesures structurelles	3

1 VALIDITE A MOYEN TERME

1.1 ÉROSION DU TRAIT DE COTE

Il est à noter que l'érosion du trait de cote est un aspect impactant la validité des résultats. En particulier au droit de la plage Est, les calculs ont été menés dans l'état actuel des ouvrages et une érosion importante pourrait altérer la validité des résultats. Ainsi si une partie du système d'endiguement se trouve nouvellement en contact direct avec la mer il conviendra d'ériger une barrière telle que des enrochements afin de lutter contre l'érosion de l'ouvrage.

1.2 PERIODE DE RETOUR

Les périodes de retour n'ont pas été mentionnées car elles sont amenées à varier durant la période de validité de l'étude du fait de l'élévation du niveau marin.

2 CONNAISSANCE DE L'ALEA

Il serait possible d'affiner les résultats présentés dans l'étude de danger en réalisant de nouvelles modélisations.

C'est le cas de modélisation sans franchissement des ouvrages afin de quantifier l'effet du vent sur les étendues d'eau présentes dans la zone protégée ; ou de modélisations pour des événements moins intenses car les niveaux caractéristiques des ouvrages sont rapidement dépassés.

3 MESURES A METTRE EN PLACE

3.1 GESTION DE LA SURVEILLANCE

Les remarques faites au chapitre 9 devrait être prises en compte pour réaliser une nouvelle version du document d'organisation prenant mieux en compte les ouvrages maritimes.

3.2 MESURES ORGANISATIONNELLE

La mise en œuvre de stations limnigraphiques le long des ouvrages du SYMADREM, ou le partage de données pour les sites équipés par des tiers.

Cette action a été inscrite au projet de CPIER Plan Rhône 2015/2020. Cela permettra un accès fortement facilité au niveau à la Fourcade puisque le relevé automatisé sera accessible en ligne ; cette action donnera également une mesure de secours du niveau marin avec une sonde à l'Est du delta, dans le port de Port Saint Louis du Rhône.

3.3 MESURES STRUCTURELLES

Les niveaux de protection du système d'endiguement sont relativement bas et, du fait du changement climatique, vont être de plus en plus souvent atteints.

Un renforcement des ouvrages, un recul des ouvrages et/ou des enjeux est à prévoir.

Une étude sur la stratégie littorale est en cours ; si des travaux de protection sont planifiés, un PAPI sera alors déposé, les travaux ne pourront être réalisés qu'au terme de ces démarches.

En attendant, la présente étude est basée sur l'état actuel des ouvrages et si ces derniers sont détériorés lors de tempête ils devront être remis en état afin de conserver leur niveau de protection.



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

ETUDE DE DANGERS
DU SYSTEME D'ENDIGUEMENT MARITIME
CAMARGUE INSULAIRE

DOCUMENT B

CHAPITRE N°10 : CARTOGRAPHIE

Version	Date	Commentaires
0	28/02/2023	Version initiale
1	23/03/2023	Reprise suite à la relecture interne

SOMMAIRE

1	Cartes administratives	3
2	Cartes des venues d'eau - Actuel	10
3	Cartes des venues d'eau – Post Travaux	13
4	Cartes liées au cas du système d'endiguement nouveau au profit de territoires précédemment dépourvus de toute protection	13

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, ZOOM

5 PLANCHES

4- SYSTEME D'ENDIGUEMENT CAMARGUE INSULAIRE ET SOUS- ZONES PROTEGEES

1 PLANCHE

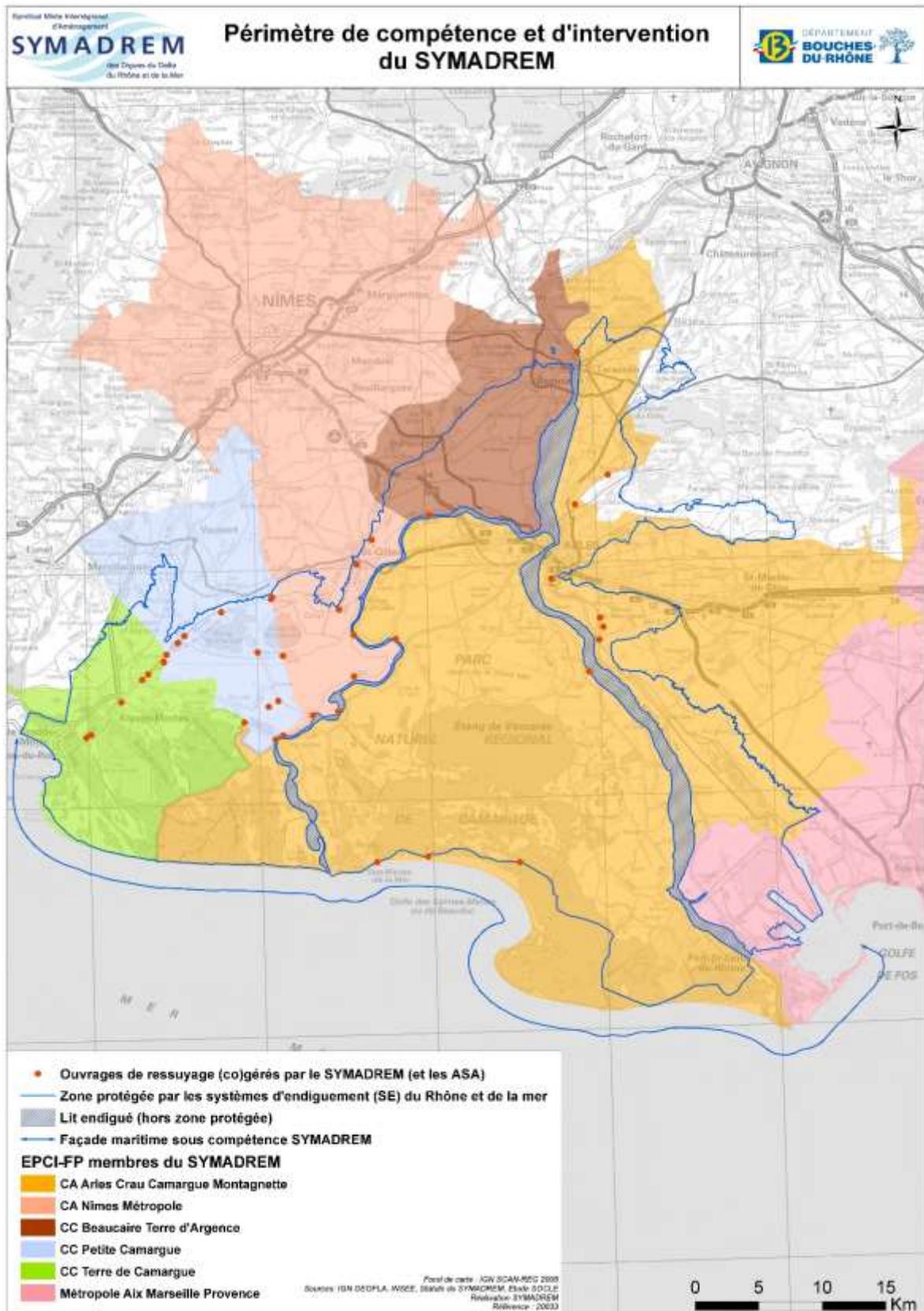


Figure 1. Périmètre de compétence du SYMADREM

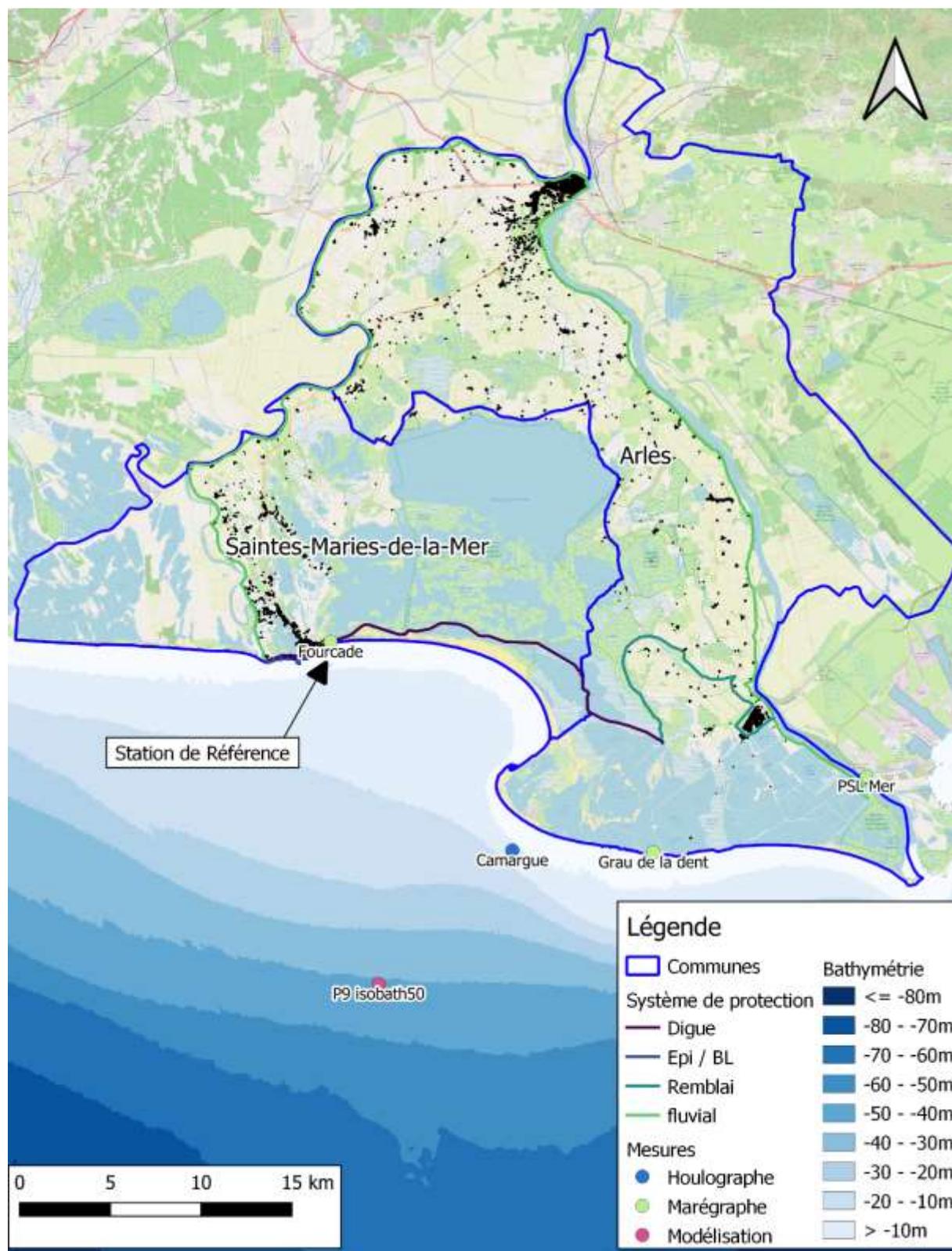


Figure 2. Système d'endiguement Camargue Insulaire maritime; limites communales et station de référence

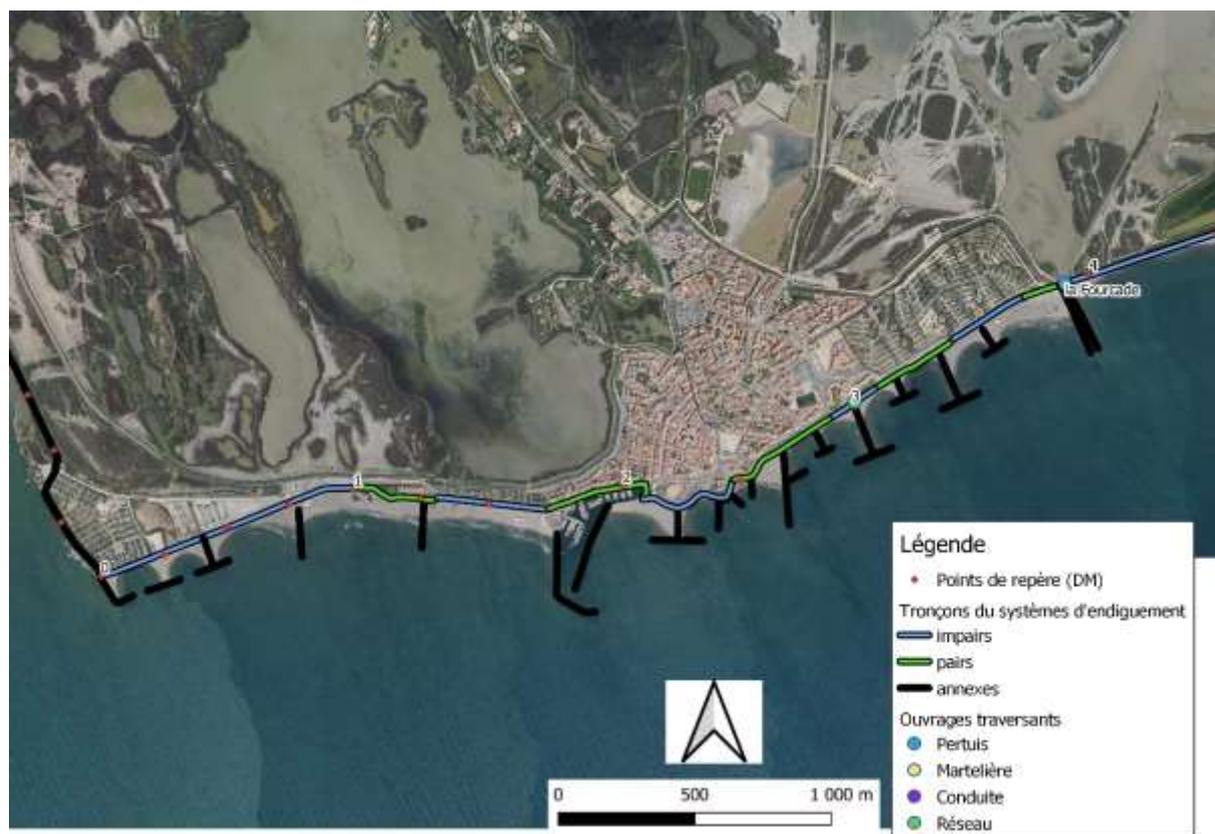


Figure 3. Système d'endiguement Camargue Insulaire maritime; zoom 1/5

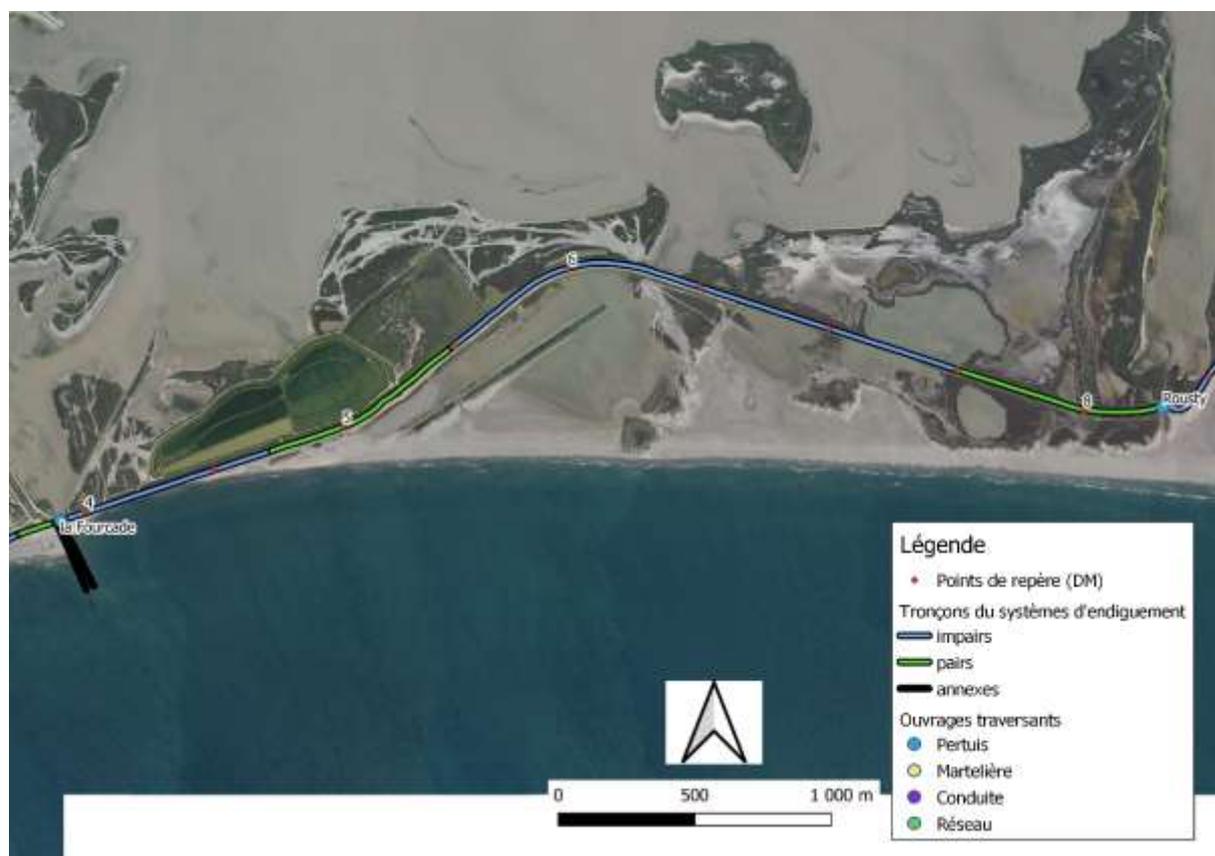


Figure 4. Système d'endiguement Camargue Insulaire maritime; zoom 2/5



Figure 5. Système d'endiguement Camargue Insulaire maritime; zoom 3/5

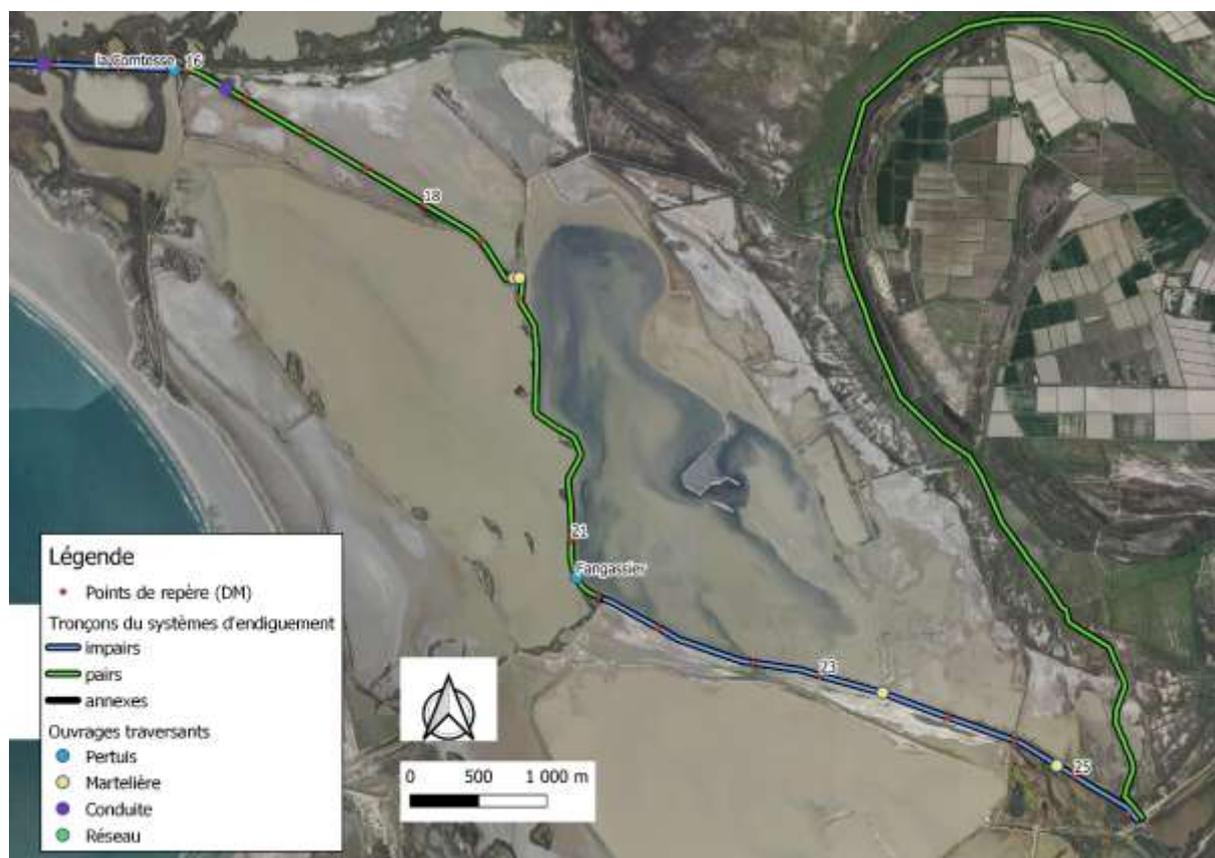


Figure 6. Système d'endiguement Camargue Insulaire maritime; zoom 4/5

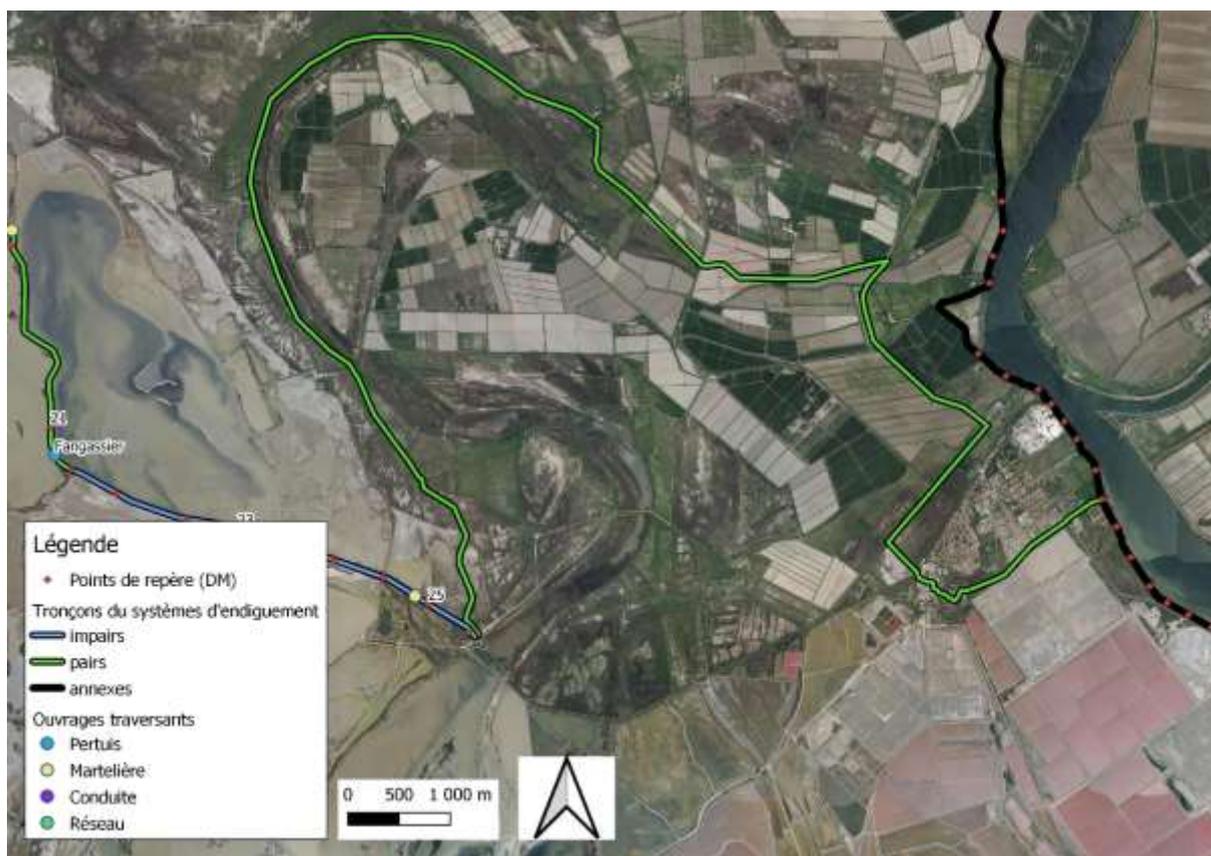


Figure 7. Système d'endiguement Camargue Insulaire maritime; zoom 5/5

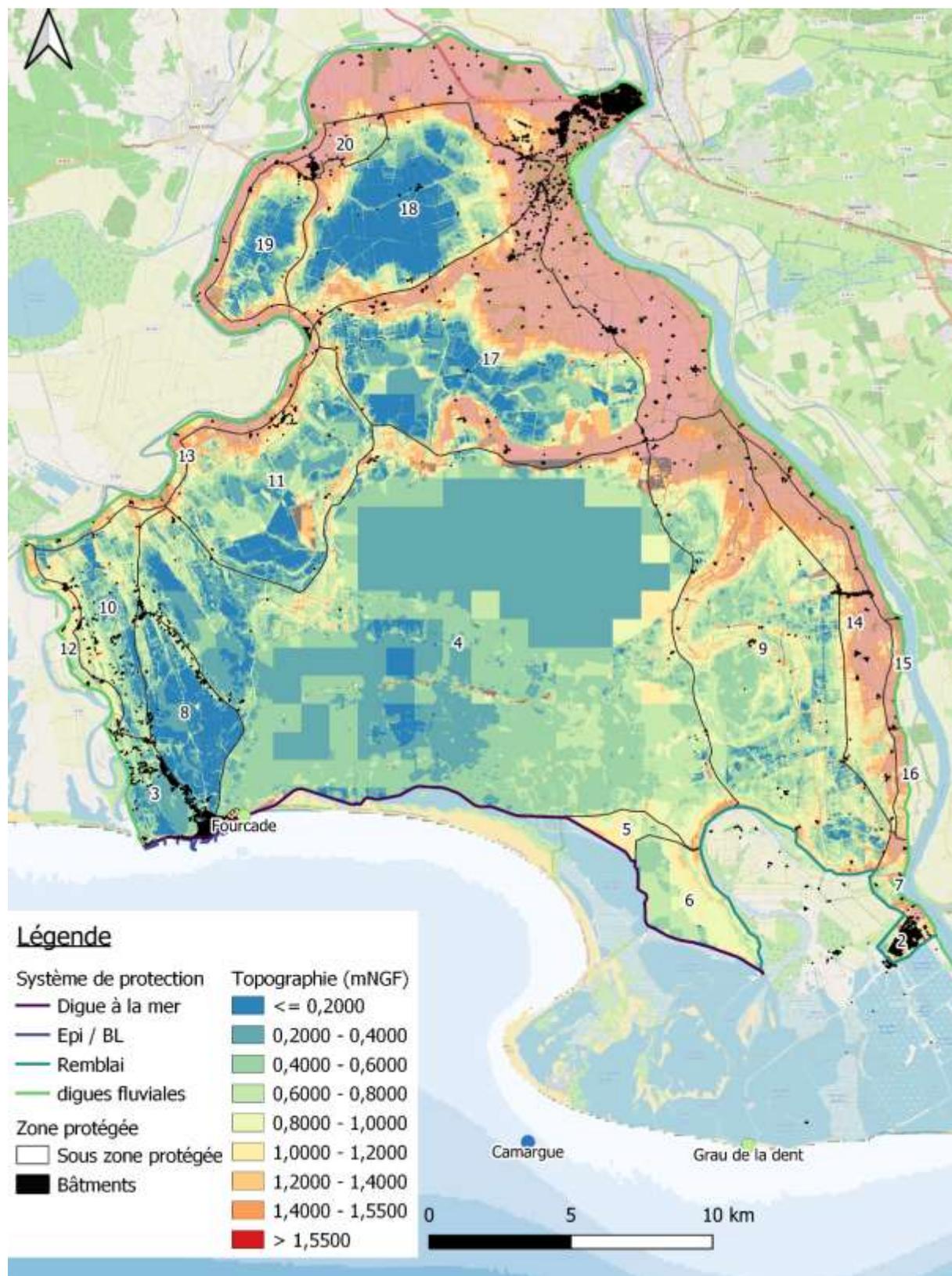


Figure 8. Système d'endiguement Camargue Insulaire et sous-zones protégées

2 CARTES DES VENUES D'EAU - ACTUEL

1- NIVEAU DE PROTECTION DES SOUS-ZONES PROTEGEES

1 PLANCHE

2- NIVEAU DU SCENARIO 3 DANS LES SOUS-ZONES PROTEGEES

1 PLANCHES

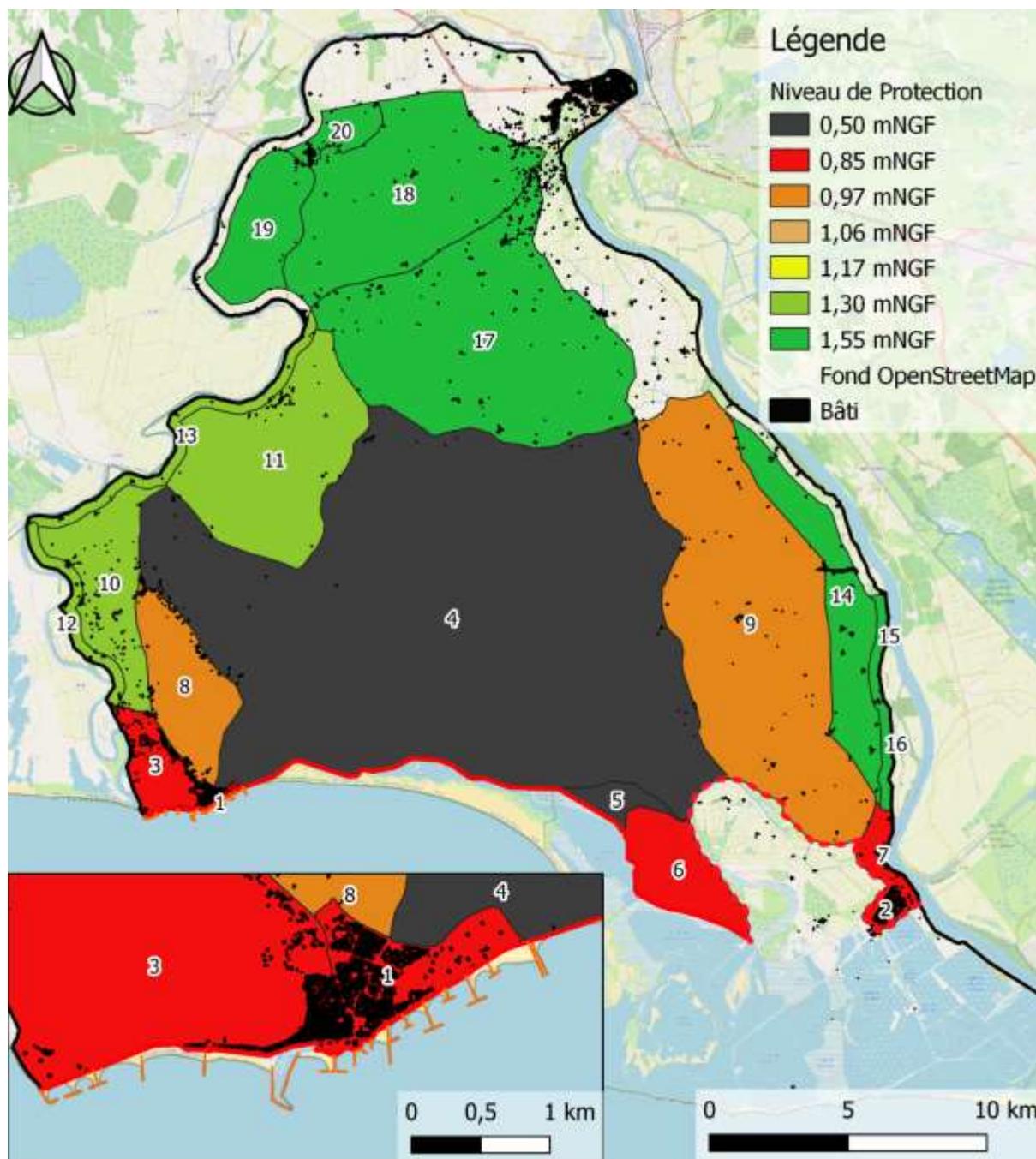


Figure 9. Niveaux de protection des sous zones protégée de la Camargue insulaire

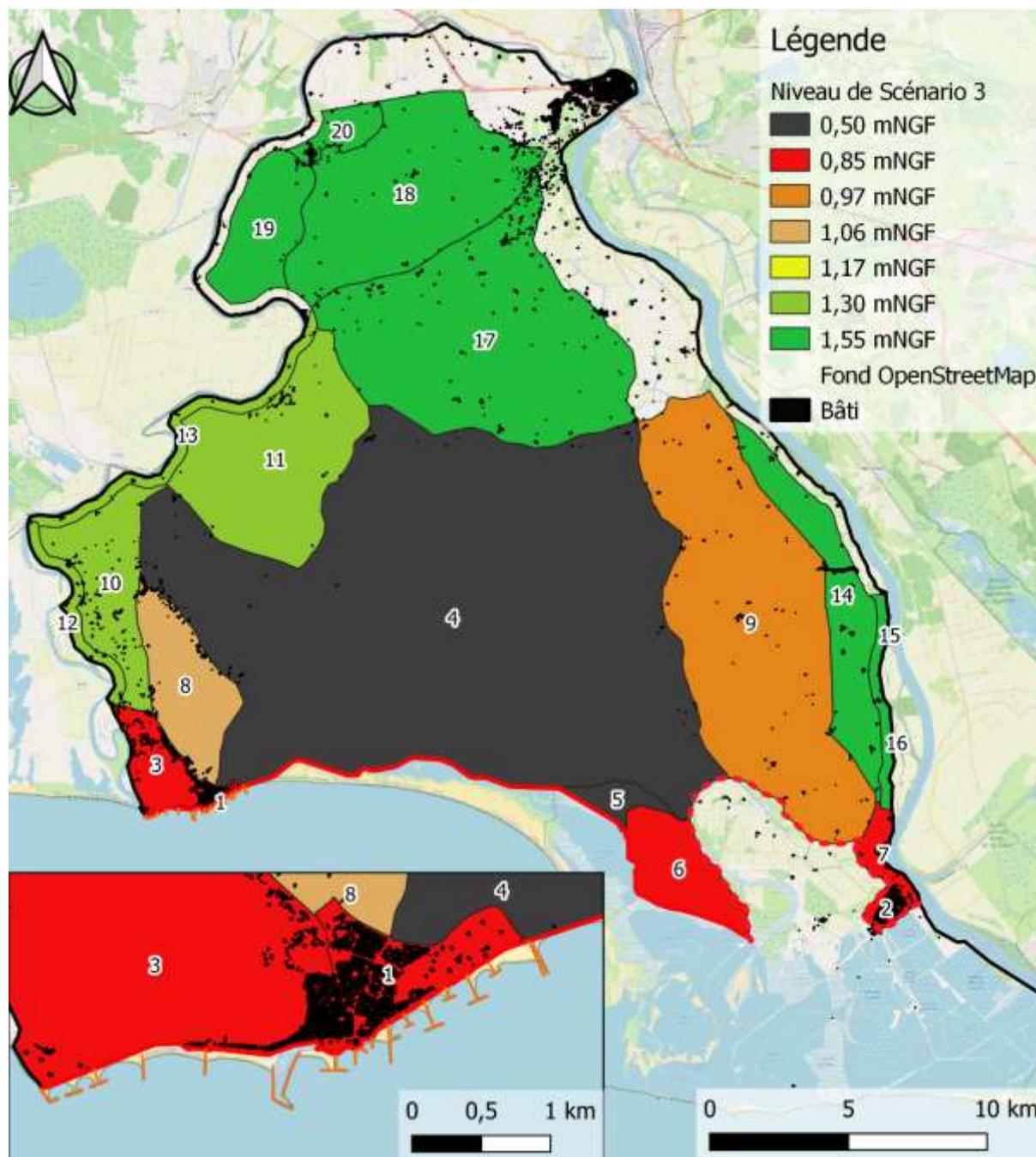


Figure 10. Niveau du Scénario 3, par sous zone protégée

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