

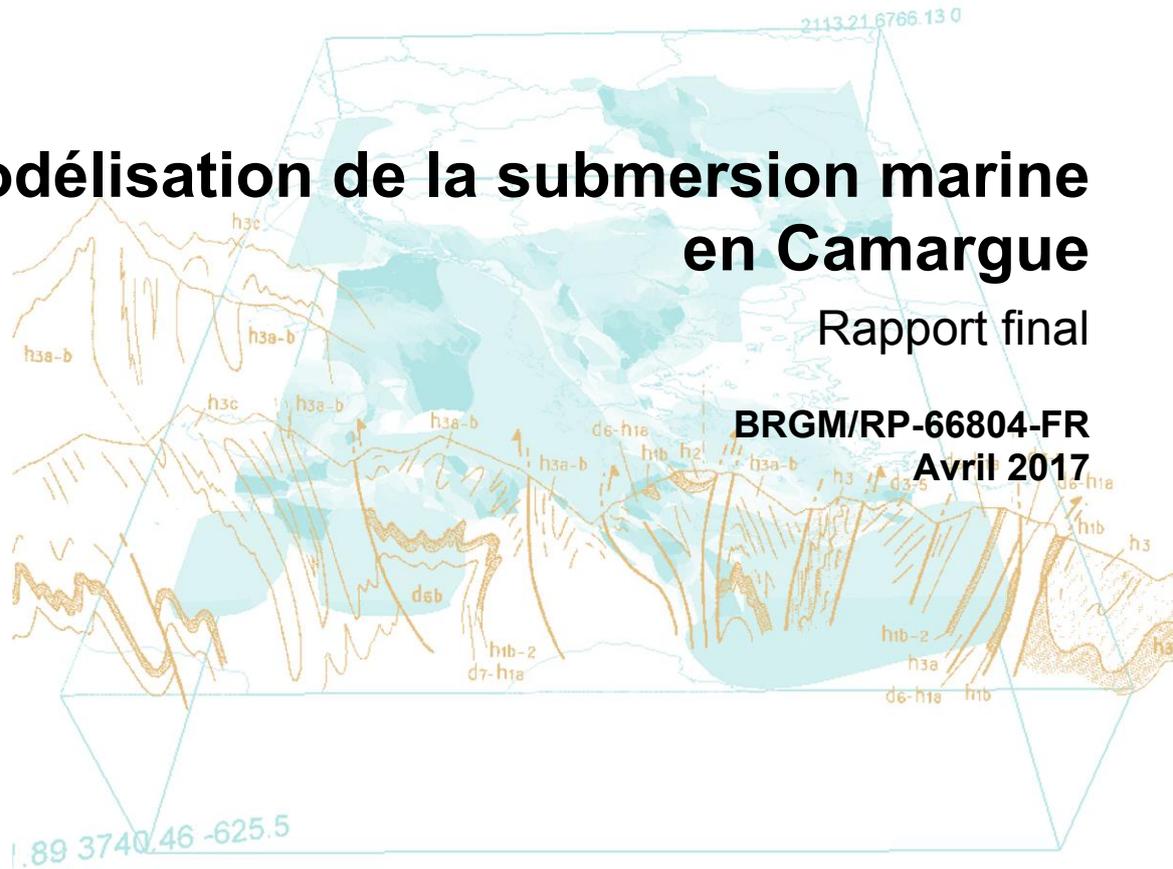


# Modélisation de la submersion marine en Camargue

Rapport final

BRGM/RP-66804-FR

Avril 2017



PRÉFET DES  
BOUCHES-DU-RHÔNE  
Direction départementale  
des Territoires et de la Mer



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**



# Modélisation de la submersion marine en Camargue

Rapport final

**BRGM/RP-66804-FR**

Avril 2017

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Service public du BRGM 2014-RIS-24

**F. Paris, R. Pedreros, A. Stépanian, T. Bulteau, et S. Lecacheux**

**Vérificateur :**

Nom : Carlos Oliveros  
Fonction : Responsable d'unité  
Original signé le 22/05/2018

**Approbateur :**

Nom : Jean-Louis Lambeaux  
Fonction : Directeur  
Original signé le 20/08/2018

Le système de management de la qualité et de l'environnement  
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.



PRÉFET DES  
BOUCHES-DU-RHÔNE  
Direction départementale  
des Territoires et de la Mer



**Mots-clés** : Submersion marine, Évènement de référence, Défaillances, Niveau marin, Surcotes, Vagues, Effet du vent, Milieu littoral, Modélisation dynamique, Camargue, Petite-Camargue, Provence-Alpes-Côte d'Azur

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Paris F., Pedreros R., Stépanian A., Bulteau T., et Lecacheux S.** (2017) - Modélisation de la submersion marine en Camargue. Rapport final. BRGM/RP-66804-FR, 176 p., 128 fig., 23 tabl., 2 ann.

## Synthèse

Le littoral de la Camargue est un territoire particulièrement vulnérable en ce qui concerne les risques côtiers, érosion côtière et submersion marine, et son évolution morphologique future va être fortement dépendante de l'élévation du niveau de la mer attendue au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle. C'est également un territoire où les questionnements et initiatives sont nombreux et nécessitent une action coordonnée des acteurs publics, en termes de gestion de la bande littorale et d'exposition au risque d'érosion des plages et de submersion marine.

La présente étude a pour objectif de développer un modèle numérique, pour la réalisation de simulations dynamiques du phénomène de submersion marine, en conséquence de tempêtes impactant le littoral camarguais. Le modèle doit apporter des éléments d'aide à la décision à la DDTM13 en termes d'évaluation précise de l'extension de la submersion marine sur les surfaces terrestres de la Camargue et du golfe de Fos-sur-Mer, pour des échéances actuelles, et futures en prenant en compte une remontée du niveau marin liée au changement climatique global. Il doit également permettre de tester différents scénarios d'aménagements (abandon ou construction de digues) pour la gestion du risque de submersion marine en Camargue.

Le modèle a été construit à partir de la collecte des données bathymétriques et topographiques précises les plus à même de représenter le milieu spécifique de la Camargue, zone basse avec des points topographiques hauts au niveau des digues et des routes. Cela a particulièrement nécessité le développement de nouveaux outils et algorithmes pour reconstituer les caractéristiques topographiques et les prendre en compte dans les simulations sur une grande échelle spatiale.

Une définition des évènements de forçages météo-marins a été réalisée sur la base d'une analyse statistique conjointe des caractéristiques de vagues et des niveaux marins, conformément aux recommandations du guide d'élaboration des PPRL (MEDDE, 2014). Cette analyse a conduit à la définition de 5 combinaisons de hauteurs significatives des vagues et de niveaux d'eau et de leurs paramètres associés pour caractériser des évènements de période de retour centennale.

La chaîne de modélisation implantée pour représenter l'ensemble des processus hydrodynamiques comprend la modélisation des vagues, des niveaux d'eau, des courants et de la submersion marine sur le territoire étudié. Des tests de sensibilité du modèle ont été réalisés sur l'évènement de tempête du 6 au 10 novembre 1982 sur la base d'observations relevées lors de cet évènement et des mesures des niveaux d'eau dans le système d'étangs du Vaccarès. Les résultats montrent que le modèle est pertinent à l'échelle de la Camargue, par une représentation satisfaisante des phénomènes, mais qu'il reste perfectible sur les secteurs où le franchissement de paquets de mer constitue le mode dominant des processus de submersion.

Une fois la stratégie de modélisation validée, plusieurs simulations ont été réalisées pour des évènements de différentes périodes de retour :

- évènements d'occurrence fréquente, moyenne et extrême pour l'échéance actuelle avec un niveau marin en prenant en compte une élévation de + 20 cm (MEDDE (2014) ;
- évènements d'occurrence moyenne à l'horizon 2100 en prenant en compte une élévation du niveau de mer de + 60 cm en 2100.

Sur les Saintes-Maries-de-la-Mer, une approche spécifique sur les franchissements de paquets de mer a été menée pour étudier l'impact de ces phénomènes de submersion sur les volumes d'eau de la submersion marine, qui est particulièrement significatif notamment pour

les événements Fréquent et Moyen Actuel. En effet, dans le cas des événements Moyen 2100 et Extrême, la submersion marine est principalement contrôlée par le débordement, les franchissements par paquets de mer peuvent alors être négligés. Ces différentes simulations ont permis une nouvelle évaluation des niveaux côtiers pour ces différentes périodes de retour.

Des scénarios complémentaires avec des défaillances d'ouvrages de défense contre la mer ont été simulés en divers points du territoire. Ils ont été réalisés, à partir des forçages de l'évènement Moyen Actuel et au niveau de zones potentielles de fragilité, ceci dans le but d'évaluer l'impact de brèches sur les hauteurs d'eau et les surfaces inondées.

Ces simulations réalisées dans un objectif de cartographie et de gestion des risques montrent l'utilité de disposer de simulations dynamiques qui permettent de discriminer précisément les zones vulnérables et d'intégrer des notions d'effets de seuils topographiques sur les écoulements.

Enfin, une simulation avec la prise en compte du tracé futur de la Digue à la Mer permet une première approche pour tester son efficacité pour protéger le territoire contre les submersions marines. Cette chaîne de modélisation est ainsi opérationnelle pour tester différents scénarios de gestion des ouvrages de protection contre la mer en fonction des différentes stratégies portées par les différents acteurs locaux de la gestion du littoral et des risques côtiers.

# Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>17</b>
1.1. CONTEXTE .....	17
1.2. RAPPELS THÉORIQUES .....	19
1.3. DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE .....	21
1.3.1. Objectifs .....	21
1.3.2. Caractéristiques du modèle .....	21
1.3.3. Phasage de l'étude et contenu du rapport .....	22
<b>2. Collecte des données .....</b>	<b>23</b>
2.1. TOPOGRAPHIE - BATHYMÉTRIE .....	23
2.1.1. Inventaire des données collectées .....	23
2.1.2. Données topographiques complémentaires de la digue à la mer et de routes .....	24
2.2. OCCUPATION DU SOL .....	28
2.3. DONNÉES HYDRODYNAMIQUES .....	29
2.3.1. Données de vagues .....	29
2.3.2. Données de niveau marin .....	30
2.3.3. Données de vent .....	30
2.3.4. Données de niveau d'eau dans les étangs et salins .....	30
2.3.5. Données du Rhône .....	31
2.4. OUVRAGES ET CONNEXIONS HYDRAULIQUES .....	32
2.4.1. Ouvrages existants .....	32
2.4.2. Ouvrages en projet .....	35
<b>3. Détermination des évènements de forçage et de l'évènement de référence .....</b>	<b>37</b>
3.1. DESCRIPTION DES DONNÉES .....	38
3.1.1. Niveaux d'eau .....	38
3.1.2. Vagues .....	39
3.2. ANALYSE EN VALEURS EXTRÊMES BIVARIÉE .....	40
3.2.1. Préparation des données .....	40
3.2.2. Distributions de probabilité marginales .....	41
3.2.3. Analyse bivariée : simulation de Monte-Carlo et détermination des probabilités de dépassement conjoint d'événements Extrêmes .....	46
3.3. COVARIABLES .....	47
3.3.1. Direction pic $D_p$ des vagues .....	47
3.3.2. Période pic $T_p$ des vagues .....	48

3.3.3. Vent : vitesse et direction .....	49
3.4. SÉLECTION DES COMBINAISONS CENTENNALES .....	51
3.5. INCERTITUDES .....	52
3.6. PRISE EN COMPTE DU PHÉNOMÈNE DE SUBSIDENCE .....	53
3.7. PRISE EN COMPTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE .....	53
3.8. DÉTERMINATION DE LA CHRONOLOGIE DE LA TEMPÊTE DE RÉFÉRENCE .....	53
3.8.1. Forçages marins (niveaux et vagues) .....	53
3.8.2. Forçage fluvial .....	54
3.9. MÉTHODOLOGIE DE DÉFINITION DES FORÇAGES DES ÉVÈNEMENTS .....	55
3.9.1. Évènements fréquents .....	56
3.9.2. Évènements Moyen Actuel et Moyen 2100 .....	57
3.9.3. Évènement Extrême .....	58
<b>4. Élaboration du modèle de submersion .....</b>	<b>61</b>
4.1. PLATEFORME DE MODÉLISATION .....	61
4.1.1. Modèle hydrodynamique et de submersion par débordement .....	61
4.1.2. MARS-2DH (version 9.06) : modèle hydrodynamique de niveaux et courants .....	63
4.1.3. WW3 (version 4.18) : modèle de propagation des vagues .....	64
4.2. EMPRISE ET RÉOLUTION SPATIALE .....	66
4.3. ÉLABORATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN : DESCRIPTION DE LA TOPOGRAPHIE ET REPRÉSENTATION DES ÉLÉMENTS STRUCTURANTS .....	67
4.3.1. Méthode de construction du MNT : Retouches des éléments structurants .....	67
4.3.2. Contrôles des retouches effectuées sur les éléments structurants .....	71
4.4. MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN FINAL .....	73
4.5. ÉLABORATION DE LA CARTE DE FROTTEMENT SUR LE FOND .....	75
4.6. PRISE EN COMPTE DES CONNEXIONS HYDRAULIQUES .....	77
4.7. CONDITIONS AUX LIMITES ET CONDITIONS INITIALES .....	78
4.7.1. Conditions aux limites en niveau .....	78
4.7.2. Conditions aux limites en vagues .....	79
4.7.3. Forçages en vent .....	79
4.7.4. Apport fluvial du Rhône .....	80
4.7.5. État initial des étangs .....	80
<b>5. Validation du modèle de vagues et tests de sensibilité .....</b>	<b>81</b>
5.1. VALIDATION DU MODÈLE DE VAGUES .....	81
5.1.1. Validation sur des tempêtes historiques .....	81

5.1.2. Validation à partir de valeurs statistiques de référence .....	85
5.2. SENSIBILITÉ DES VAGUES CÔTIÈRES AUX FORÇAGES .....	86
5.3. INFLUENCE DU VENT SUR LES NIVEAUX CÔTIERS ET SUR LES ÉTANGS .....	88
5.3.1. Secteur des Saintes-Maries-de-la-Mer .....	88
5.3.2. Secteur du Golfe de Fos .....	89
5.3.3. Secteur de l'étang du Vaccarès .....	89
5.3.4. Secteur de l'étang dit l'Impérial .....	91
<b>6. Reproduction des processus conduisant à la submersion et validation de la chaîne de modélisation .....</b>	<b>93</b>
6.1. CONDITIONS DE FORÇAGES .....	93
6.1.1. Conditions aux limites en niveau .....	93
6.1.2. Conditions aux limites en vagues .....	94
6.1.3. Forçages en vent .....	94
6.1.4. Apport fluvial du Rhône .....	94
6.1.5. État initial des étangs .....	94
6.2. SURCOTE LIÉE AU DÉFERLEMENT DES VAGUES .....	95
6.3. ÉLÉMENTS DE VALIDATION DE LA MODÉLISATION .....	96
6.3.1. Influence du vent sur les étangs .....	96
6.3.2. Validation du niveau marin côtier .....	98
6.3.3. Validation de la submersion en zone côtière .....	100
6.3.4. Dynamique de la submersion .....	102
<b>7. Simulations et résultats .....</b>	<b>105</b>
7.1. SIMULATIONS DES ÉVÈNEMENTS DE RÉFÉRENCE RELATIFS À LA SUBMERSION MARINE .....	105
7.1.1. Définitions et caractéristiques des événements de référence pour la caractérisation de la submersion marine .....	105
7.1.2. Cartographie de l'état initial en mer et dans les étangs .....	107
7.1.3. Prise en compte des structures de protection et des ouvrages hydrauliques dans les simulations de référence .....	110
7.1.4. Détermination de la combinaison de l'évènement Moyen Actuel .....	110
7.1.5. Synthèse des niveaux marins maximaux au rivage .....	114
7.1.6. Détermination des volumes franchissants aux Saintes-Maries-de-la-Mer .....	116
7.1.7. Dynamique de la submersion .....	121
7.1.8. Cartographie des événements fréquents .....	130
7.1.9. Cartographie événement Moyen Actuel .....	135
7.1.10. Cartographie événement Moyen 2100 .....	137
7.1.11. Cartographie événement Extrême .....	140
7.2. SIMULATIONS DES SCÉNARIOS COMPLÉMENTAIRES .....	142

7.2.1. Présentation des scénarios.....	142
7.2.2. Résultats des simulations complémentaires.....	143
<b>7.3. ANALYSE DES IMPACTS EN TERMES DE SURFACES INONDÉES ET DE CLASSES DE HAUTEURS D'EAU PAR SECTEUR DU TERRITOIRE.....</b>	<b>155</b>
7.3.1. Définition des secteurs de territoire.....	155
7.3.2. Méthode d'analyse.....	156
7.3.3. État initial, surface en eau et élévation du niveau de la mer.....	156
7.3.4. Analyse des surfaces inondées par secteur.....	157
7.3.5. Analyse des défaillances.....	159
<b>8. Conclusions.....</b>	<b>161</b>
8.1. CONSTRUCTION DU MODÈLE ET DES ÉVÈNEMENTS DE RÉFÉRENCE.....	161
8.2. SIMULATIONS DES ÉVÈNEMENTS DE RÉFÉRENCE ET DES SCÉNARIOS COMPLÉMENTAIRES.....	162
8.2.1. Résultats et données produites.....	162
8.2.2. Evènements de référence.....	162
8.2.3. Simulations complémentaires.....	163
8.3. PERSPECTIVES.....	163
<b>9. Bibliographie.....</b>	<b>165</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Principe de cartographie des zones soumises à la submersion marine dans les Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) et dans le cadre de la mise en place de la Directive Inondation sur les Territoires à Risques d'inondation (TRI). Source : MEDDE, 2014.....	17
Figure 2 : Linéaire côtier (trait jaune) de Camargue concerné par la modélisation de la submersion marine. L'élaboration du modèle s'étend de la pointe de l'Espiguette à l'ouest jusqu'au Golfe de Fos à l'est. La limite Est du modèle est le canal de Caronte qui relie l'étang de Berre à la Mer Méditerranée.....	18
Figure 3 : Schéma des différentes contributions au niveau du plan d'eau lors d'une tempête (surcotes) jusqu'au rivage.....	20
Figure 4 : Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer / dégradation des ouvrages / débordement, ©BRGM).....	21
Figure 5 : Schéma de principe de la méthodologie employée pour la propagation de la submersion marine par modélisation dynamique. Le niveau marin de référence (bleu continu) n'est pas simplement projeté sur la topographie (bleu pointillé) mais bien propagé suivant une dynamique de submersion (vert).....	22
Figure 6 : Données topobathymétriques rassemblées.....	25
Figure 7 : Levé DGS RTK (Real Time Kinematics) le long de la digue à la mer (29 et 30 juillet 2015).....	26
Figure 8 : Linéaire mesuré par DGPS centimétrique (points topographiques) sur les digues et routes de Camargue les 29 et 30 juillet 2015 (fond IGN-SCAN25®).....	27

Figure 9 : Profil en long de la digue à la mer - Comparaison mesures DGPS et Litto3D (MNT 1 m de résolution). .....	28
Figure 10 : Carte de l'occupation du sol du parc naturel de Camargue 2011 (source <a href="http://www.parc-camargue.fr">www.parc-camargue.fr</a> ) .....	29
Figure 11 : Localisation des points d'extraction des données de vagues (point P9 situé sur l'isobathe 50 m) et de niveaux d'eau (marégraphe du Grau de la Dent). .....	30
Figure 12 : Réseau de limnigraphes géré par la Réserve Naturelle Nationale de Camargue - SNPN (Cheiron, 2015). .....	31
Figure 13 : Connexions hydrauliques entre la mer et le système du Vaccarés via la digue à la mer (d'après CCE&C, 2015 - source : SYMADREM). .....	33
Figure 14 : Exemple de préconisation de gestion pour le pertuis de la Fourcade (Source : compte rendu de la CEDE du 19 février 2015). .....	34
Figure 15 : Avant-Projet de restructuration des digues du Rhône et de la digue à la mer sur le secteur de Salins de Giraud (Délibération du comité syndical du SYMADREM du 30 juin 2015). .....	35
Figure 16 : Série temporelle brute issue de la numérisation des marégrammes du Grau de la Dent. La série affichée correspond à la moyenne journalière du signal papier numérisé. ....	38
Figure 17 : Exemple de marégramme papier au Grau de la Dent (source wikhydro). L'enveloppe du signal enregistré constitue le maximum et le minimum de la série temporelle numérisée. ....	39
Figure 18 : Rose des vagues. La valeur de Hs se lit sur l'axe radial. L'enveloppe des points de la série temporelle est représentée par la ligne noire en pointillés. La fréquence d'occurrence des couples (Hs,Dp) est représentée par l'échelle de couleur (min=0,02‰) avec une discrétisation de 10° pour Dp et 5 cm pour Hs. Dp est en convention nautique (i.e. indique la provenance des vagues). .....	40
Figure 19 : Diagramme bivarié (Tp,Hs). Même symbologie que la Figure 18. Pour la fréquence d'occurrence, Tp est discrétisée toutes les 0,5 s et Hs tous les 5 cm. ....	40
Figure 20 : Méthodologie de sélection des événements sur une chronique de Hs et SWL. ....	41
Figure 21: Loi exponentielle ajustée à la série complète du Grau de la Dent sur la période a) 1960-1995 - seuil de la loi fixé à 0,55 m NGF/IGN69 et b) 1979-1995 - seuil de la loi fixé à 0,55 m NGF/IGN69. Le paramètre de la loi est estimé par la méthode du maximum de vraisemblance. ....	43
Figure 22 : Comparaison des lois exponentielles ajustées aux données de niveau d'eau du Grau de la Dent. En rouge: période commune aux données de vague (1979-1995) ; en bleu, période complète (1960-1995). .....	44
Figure 23 : Loi GPD ajustée aux données de Hs. Seuil de la loi fixé à 3,13 m. Les paramètres de la loi sont estimés par la méthode des moments pondérés. La couleur d'un point indique la direction pic correspondante au Hs. ....	45
Figure 24 : Contours d'iso période de retour de dépassement conjoint pour les valeurs 1 an, 10 ans et 100 ans (courbes rouges). Les points noirs représentent les données initiales (après sélection des événements indépendants). Points bleus : données simulés par la méthode Monte-Carlo. ....	47
Figure 25 : Résultat de la simulation de Monte Carlo pour les couples (Hs,Tp). Points noirs : données initiales. Points bleus : données simulées. En rouge : courbe des médianes de Tp en fonction de Hs calculée à partir des données simulées. ....	48
Figure 26 : Vitesse du vent U en fonction de Hs pour le point d'extraction de la base CFSR de coordonnées 43,5°N / 4,5°E. La droite noire représente la régression linéaire calculée à partir des données. L'échelle de couleur représente la direction associée aux valeurs de U. ....	49
Figure 27 : A) localisation des points d'extraction (rectangle rouge et bleu) des vents de la base de donnée CFSR (résolution 0.5°x0.5°). B) diagramme quantile-quantile des vitesses de vents	

	des 2 points extraits. C) comparaison des chroniques de vent extraites de la base CFSR (courbes rouge et bleue) avec les observations dans les stations météo les plus proches. ....	50
Figure 28 :	Vitesse du vent U en fonction de Hs pour le point d'extraction de la base CFSR de coordonnées 43°N / 4,5°E. La droite noire représente la régression polynomiale calculée à partir des données. L'échelle de couleur représente la direction associée aux valeurs de U. ....	51
Figure 29 :	Chroniques des paramètres de niveau de la mer au Grau de la Dent (rouge), de hauteur significative des vagues (point au large P9 issu des modélisations de vagues) (bleu) du 4 au 12 novembre 1982. ....	54
Figure 30 :	Normalisation du niveau marin (rouge) et de la hauteur significative des vagues (bleu). ....	54
Figure 31 :	Hydrogramme de la crue de janvier 2014 (station de Beaucaire Tarascon, SPC Grand Delta). ....	55
Figure 32 :	Points d'injection des débits du Rhône dans le modèle. ....	55
Figure 33 :	Choix de la combinaison niveau/vague pour l'évènement fréquent (période de retour de dépassement conjoint 10 ans) et répartition des directions moyennes de vagues par classes de Hs (m) : les 2 directions principales sont indiquées. ....	56
Figure 34 :	Loi exponentielle des niveaux marins Extrêmes ajustée à la série complète du Grau de la Dent sur la période 1979-1995 (seuil de la loi fixé à 0,55 m NGF/IGN69). Le paramètre de la loi est estimé par la méthode du maximum de vraisemblance. ....	58
Figure 35 :	Loi GPD ajustée aux données de Hs. Seuil de la loi fixé à 3,13 m. Les paramètres de la loi sont estimés par la méthode des moments pondérés. La couleur d'un point indique la direction pic correspondante au Hs. ....	58
Figure 36 :	Schématisation de stratégie de modélisation utilisée. ....	62
Figure 37 :	Illustration schématique du modèle Camargue : les forçages météo (flèches vertes), marins (traits bleus) et fluvial (linéaire « bleu ciel » du Rhône et du petit-Rhône), le linéaire côtier (trait noir) et les phénomènes de submersion représentés (flèches bleues pour les débordements et cercle mauve pour les franchissements). ....	62
Figure 38 :	Schéma de principe de la méthodologie employée pour la propagation de la submersion marine : le niveau marin de référence (bleu continu) n'est pas simplement projeté sur la topographie (bleu pointillé) mais bien propagé suivant une dynamique de submersion (vert). ....	63
Figure 39 :	Construction du maillage non structuré utilisé par WW3. ....	65
Figure 40 :	Éléments linéaires structurants issus de la couche « route » de la BDtopo©IGN. ....	68
Figure 41 :	Éléments linéaires structurants pris en compte pour les « retouches » altimétriques. ....	68
Figure 42 :	Schéma de principe de la retouche des éléments structurants pris en compte. ....	69
Figure 43 :	Illustration des retouches effectuées sur les différents éléments structurants sur une extraction du MNT ; (en haut) orthophotographie littorale du secteur des Saintes-Maries-de-la-Mer et superposition des routes, digues, chemins à retoucher, (au milieu) MNT 20 m retouché, (en bas) MNT 20 m moyenné sans retouche. ....	70
Figure 44 :	Contrôle des retouches du MNT sur le profil nord-sud à l'est des Saintes-Maries-de-la-Mer. ....	71
Figure 45 :	Rôle des éléments structurants : reconstruction de la digue à la mer. <u>À gauche</u> : extension de l'inondation pour 2 instants de la submersion espacés de 18h ; la digue à la mer (rouge) n'est pas retouchée sur ses sommets ; <u>à droite</u> : la digue à la mer est reconstruite, l'inondation est bloquée. ....	72
Figure 46 :	MNT final obtenu après intégration des différentes sources de données topographiques et bathymétriques et retouches des éléments structurants. ....	74
Figure 47 :	Carte de la typologie simplifiée pour l'établissement de la carte de rugosité. ....	76
Figure 48 :	Exemple de différentes conditions d'écoulement prises en compte dans la modélisation. ....	78

Figure 49 : Évolutions temporelles du niveau marin (cote m / NGF) pour les 7 combinaisons pour l'évènement Moyen Actuel.....	78
Figure 50 : Évolutions temporelles de la hauteur significative des vagues pour les 7 combinaisons pour l'évènement Moyen Actuel.....	79
Figure 51 : Évolutions temporelles de la vitesse du vent moyen (m/s) pour les 7 combinaisons.....	79
Figure 52 : Configurations initiales des altitudes des plans d'eau et du niveau moyen de la mer au début des simulations pour les échéances actuelle (Fréquent, Moyen Actuel, Extrême) et à 100 ans (Moyen 2100). ....	80
Figure 53 : Isobathes principales de l'emprise du modèle de vagues ; localisation du point P9 de forçage des conditions aux limites ; et localisation des 2 bouées côtières du réseau CANDHIS. ....	81
Figure 54 : Cartographie des hauteurs significatives de vagues atteintes au pic de la tempête de novembre 2000. ....	82
Figure 55 : Comparaison des simulations (trait bleu) et des observations (points noirs) pour les caractéristiques de vagues (Hs, Tp, Dp) à la bouée Camargue lors de la tempête de novembre 2000. ....	82
Figure 56 : Cartographie des hauteurs significatives de vagues atteintes lors du 1 <sup>er</sup> pic de la tempête d'octobre 2003. ....	83
Figure 57 : Comparaison des simulations (trait bleu) et des observations (points noirs) pour les caractéristiques de vagues (Hs, Tp, Dp) à la bouée Camargue lors de la tempête d'octobre 2003 .....	83
Figure 58 : Cartographie des hauteurs significatives de vagues atteintes lors du 1 <sup>er</sup> pic de la tempête de février 2009.....	84
Figure 59 : Comparaison des simulations (trait bleu) et des observations (points noirs) pour les caractéristiques de vagues (Hs, Tp, Dp) à la bouée Espiguette lors de la tempête de février 2009. ....	84
Figure 60 : Simulation de vagues pour des conditions décennale et quinquennale.....	85
Figure 61 : Ajustement statistique des Extrêmes des hauteurs significatives de vagues sur les observations des bouées Espiguette et Camargue (CETMEF, 2012).....	86
Figure 62 : Simulation de vagues pour les « tests de sensibilité » n°1,2 et 4.....	87
Figure 63 : Surcote établie liée au vent pour des vents constants (intensité/direction) au bout de 24h.....	89
Figure 64 : Surcotes établies liées au vent pour des vents constants (9 scénarios d'intensité et direction) au bout de 24 h dans le Golfe de Fos.....	90
Figure 65 : Localisation des points sur les rives de l'étang Vaccarès (rouge) et celui dit l'Impérial (vert) pour évaluer la bascule liée au vent. ....	91
Figure 66 : Surcotes (et décotes) établies liées au vent pour des vents constants (9 scénarios d'intensité et direction) au bout de 24 h sur le pourtour (numéro des points) des rives de l'étang du Vaccarès.....	91
Figure 67 : Surcotes établies liées au vent pour des vents constants (9 scénarios d'intensité et direction) au bout de 24 h sur le pourtour (numéro des points) des rives de l'étang dit l'Impérial.....	92
Figure 68 : Chroniques observées des niveaux marégraphiques et débit moyen journalier du Rhône à la station de Beaucaire lors de la tempête des 6, 7, 8, 9 et 10 novembre 1982. ....	94
Figure 69 : Propagation des vagues lors de la tempête de novembre 1982 (modèle WW3). Les flèches informent de la hauteur significative des vagues (couleur) et de leurs directions. Les périodes pic des vagues sont illustrées en couleur sur le fond de carte (ici comprises entre 9 et 10s). ....	95

Figure 70 : Surcote associée au déferlement des vagues en zone littorale lors de la tempête de novembre 1982 (wave set-up). Zooms sur les Saintes Maries de la Mer (en haut) et sur le Golfe de Fos (en bas). Les flèches informent de la hauteur significative des vagues (couleur) et de leurs directions. La surcote liée au déferlement des vagues est illustrée en couleur sur le fond de carte. ....	96
Figure 71 : Effet du vent sur les niveaux des étangs lors de la tempête de novembre 1982. ....	97
Figure 72 : Comparaison des surcotes liées au vent dans les étangs modélisées (rouge) et observées (courbes bleues : minimum, moyenne, barycentre et maximum des enregistrements NUMIEAU du CETE, 2007, 2010 ).....	98
Figure 73 : Comparaison des niveaux modélisés au Grau de la Dent avec (rouge) et sans (bleu) la contribution relative de surcote liée au déferlement des vagues avec les observations (points noirs en gras et enveloppes des minimas et maximas. ....	99
Figure 74 : Comparaison des niveaux modélisés au niveau de Fourcade Sud avec (rouge) et sans (bleu) la contribution relative de surcote liée au déferlement des vagues avec les observations (points noirs en gras et enveloppes des minimas et maximas.....	99
Figure 75 : Comparaison des niveaux modélisés à Port-Saint-Louis-du-Rhône avec (rouge) et sans (bleu) la contribution relative de surcote liée au déferlement des vagues avec les observations (points noirs en gras et enveloppes des minimas et maximas). ....	99
Figure 76 : Localisation des observations ponctuelles (étoiles rouges) à l'échelle de la Camargue .....	100
Figure 77 : Extension de la zone inondée modélisée (bleu) lors de la tempête de novembre 1982 et localisation des observations ponctuelles (étoiles rouges) sur le secteur du Grau-du-Roi et la petite Camargue.....	101
Figure 78 : Extension de la zone inondée modélisée (bleu) lors de la tempête de novembre 1982 et localisation des observations ponctuelles (étoiles rouges) sur le linéaire côtier du Petit-Rhône, des Saintes Maries de la mer et de la digue à la mer. ....	101
Figure 79 : Extension de la zone inondée modélisée (bleu) lors de la tempête de novembre 1982 et localisation des observations ponctuelles (étoiles rouges) au niveau de l'embouchure du Rhône et du Golfe de Fos. ....	102
Figure 80 : Illustration de la dynamique de submersion les 7 et 8 novembre 1982. La digue à la mer est figurée en trait continu rouge. Des flèches précisent les entrées d'eau préférentielles. ...	103
Figure 81 : Cartographie des hauteurs d'eau à l'état initial de l'échéance actuelle des événements fréquents, Moyen Actuel et Extrême.....	108
Figure 82 : Cartographie des hauteurs d'eau à l'état initial de l'évènement Moyen 2100. ....	109
Figure 83 : Localisation du linéaire des digues du Rhône (trait rouge) qui ont été réhaussées « virtuellement » dans le modèle pour empêcher les débordements. La digue à la mer est ici figurée en vert. La flèche bleue correspond au point d'injection du débit du Rhône dans le modèle.....	110
Figure 84 : cartographie du numéro de combinaison donnant le maximum de niveau marin ou d'altitude du plan d'eau à terre parmi les 7 combinaisons simulées. ....	111
Figure 85 : Niveaux marins côtiers maximaux pour chacune des 7 combinaisons le <u>long du rivage</u> entre la pointe de l'Espiguette et la pointe de Beauduc.....	113
Figure 86 : Niveaux marins côtiers maximaux pour chacune des 7 combinaisons le <u>long du rivage</u> entre la pointe de Beauduc et le Golfe de Fos. ....	113
Figure 87 : Localisation des 21 segments pour le calcul des volumes franchissants. Les points rouges correspondent aux points d'extractions des conditions des vagues et de niveaux d'eau associés à chacun des tronçons.....	117
Figure 88 : Exemple de plan d'un secteur de la digue à la mer fourni par le SYMADREM.....	118

Figure 89 : Évolution des volumes franchissants (m <sup>3</sup> par intervalles de 15 minutes) sur l'ensemble du linéaire côtier au cours des événements Fréquent (FREQ_S) et Moyen Actuel. ....	120
Figure 90 : Volumes franchissants cumulés sur 42,75 h par segment pour les 2 événements traités (Fréquent FREQ_S et Moyen Actuel). ....	120
Figure 91 : Instant A correspondant à la journée n° 4 à 6h 00 de la chronologie de la submersion simulée au cours de l'évènement Moyen Actuel. La courbe bleue en dessous représente l'évolution du niveau marin au large. ....	124
Figure 92 : Instant B correspondant à la journée n° 4 à 14 h 00 de la chronologie de la submersion simulée au cours de l'évènement Moyen Actuel. La courbe bleue en dessous représente l'évolution du niveau marin au large. ....	124
Figure 93 : Instant C correspondant à la journée n° 5 à 2 h 00 de la chronologie de la submersion simulée au cours de l'évènement Moyen Actuel. La courbe bleue en dessous représente l'évolution du niveau marin au large. ....	125
Figure 94 : Instant D correspondant à la journée n° 5 à 18 h 00 de la chronologie de la submersion simulée au cours de l'évènement Moyen Actuel. La courbe bleue en dessous représente l'évolution du niveau marin au large. ....	125
Figure 95 : Évolutions temporelles des niveaux marins (niveau moyen du plan d'eau) et altitude maximales du plan d'eau (m NGF/IGN69) au Grau de la Dent (n° 97) pour les événements fréquents 1 et 2 (bleu foncé et clair), Moyen Actuel (noir), Moyen 2100 (rouge) et Extrême (vert) ; et des hauteurs d'eau(m) pour les événements Moyen Actuel (bâton bleu ciel) et Moyen 2100 (bâton rouge) sur 3 autres points sur les secteurs du They Sainte-Ursule (44), de l'étang Faraman (n° 41) et de l'étang Rascailln(n° 35). ....	127
Figure 96 : Valeurs maximales et évolutions temporelles des altitudes du plan d'eau des étangs (m NGF/IGN69) pour les événements fréquents 1 et 2 (bleu foncé et clair), Moyen Actuel (noir), Moyen 2100 (rouge) et Extrême (vert) des étangs Tampan (n° 54 ), Galabert (n° 33), Lion (n° 32), Vaccarès Sud (59). ....	128
Figure 97 : Évolutions temporelles des niveaux marins et valeurs maximales de l'altitude du plan d'eau (m NGF/IGN69) à l'embouchure du Rhône Vif (n° 92) pour les événements fréquents 1 et 2 (bleu foncé et clair), Moyen Actuel (noir), Moyen 2100 (rouge) et Extrême (vert) ; et des hauteurs d'eau (m) pour les événements Moyen Actuel (bâton bleu ciel) et Moyen 2100 (bâton rouge) sur les secteurs des étangs du Fer (n° 10), de Rolland (n° 8) et de Brasol (n° 12). ....	129
Figure 98 : Cartographie des niveaux marins maximaux et des altitudes maximales des plans d'eau atteints en cote NGF/IGN69 pour l'évènement fréquent FREQ_SE. ....	131
Figure 99 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales atteintes pour l'évènement fréquent FREQ_SE. ....	132
Figure 100 : Cartographie des niveaux marins maximaux et des altitudes maximales des plans d'eau atteints en cote NGF/IGN69 pour l'évènement fréquent FREQ_S. ....	133
Figure 101 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales atteintes pour l'évènement fréquent FREQ_S – zoom sur le secteur des Saintes-Maries-de-la-Mer avec prise en compte des franchissements de paquets de mer. ....	134
Figure 102 : Cartographie des niveaux marins maximaux et des altitudes maximales des plans d'eau atteints en cote NGF/IGN69 pour l'évènement Moyen Actuel. ....	135
Figure 103 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales atteintes pour l'évènement Moyen Actuel. Zoom sur le secteur des Saintes-Maries-de-la-Mer avec prise en compte des franchissements de paquets de mer. ....	136
Figure 104 : Cartographie des niveaux marins maximaux et des altitudes maximales des plans d'eau atteints en cote NGF/IGN69 pour l'évènement Moyen 2100 . ....	137
Figure 105 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales atteintes pour l'évènement Moyen 2100. ....	138

Figure 106 : Cartographie de la différence (A-B) des hauteurs d'eau maximales atteintes entre les évènements moyen « 2100 » (A) et moyen « actuel » (B). .....	139
Figure 107 : Cartographie des niveaux marins maximaux et des altitudes maximales des plans d'eau atteints en cote NGF/IGN69 pour l'évènement Extrême. ....	140
Figure 108 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales atteintes pour l'évènement Extrême. ....	141
Figure 109 : Localisation des brèches (étoiles jaunes) pour les scénarios de défaillances ; du tracé actuel de la digue à la mer (ligne verte) et du nouveau tracé (ligne pointillée noir-jaune). ..	143
Figure 110 : Cartographie des niveaux marins maximaux et des altitudes maximales des plans d'eau atteints en cote NGF/IGN69 pour le scénario de défaillance D1 = évènement Moyen Actuel avec une brèche sur le secteur de la plage est des Saintes-Maries-de-la-mer. ....	144
Figure 111 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales atteintes pour le scénario de défaillance D1 = évènement Moyen Actuel avec une brèche sur le secteur de la plage est des Saintes-Maries-de-la-mer. ....	145
Figure 112 : Cartographie de l'impact (différence) sur les hauteurs d'eau maximales atteintes pour le scénario de défaillance D1 = évènement Moyen Actuel avec une brèche sur le secteur de la plage est des Saintes-Maries-de-la-mer. ....	146
Figure 113 : Cartographie des niveaux marins maximaux et des altitudes maximales des plans d'eau atteints en cote NGF/IGN69 pour le scénario de défaillance D2 = évènement Moyen Actuel avec 2 brèches localisées sur la digue de l'Amarée (embouchure du Petit-Rhône) et sur la digue à la mer secteur de la pointe de la Courbe. ....	147
Figure 114 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales atteintes pour le scénario de défaillance D2 = évènement Moyen Actuel avec 2 brèches localisées sur la digue de l'Amarée (embouchure du Petit-Rhône) et sur la digue à la mer secteur de la pointe de la Courbe. .	148
Figure 115 : Cartographie de l'impact (différence) sur les hauteurs d'eau maximales atteintes pour le scénario de défaillance D2 = évènement Moyen Actuel avec 2 brèches localisées sur la digue de l'Amarée (embouchure du Petit-Rhône) et sur la digue à la mer secteur de la pointe de la Courbe.....	149
Figure 116 : Cartographie des niveaux marins maximaux et des altitudes maximales des plans d'eau atteints en cote NGF/IGN69 pour le scénario de défaillance D3 = évènement Moyen Actuel avec une brèche sur le front de mer des Saintes-Maries-de-la-mer. ....	150
Figure 117 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales atteintes pour le scénario de défaillance D3 = évènement Moyen Actuel avec une brèche sur le front de mer des Saintes-Maries-de-la-mer.....	151
Figure 118 : Cartographie de l'impact (différence) sur les hauteurs d'eau maximales atteintes pour le scénario de défaillance D3 = évènement Moyen Actuel avec une brèche sur le front de mer des Saintes-Maries-de-la-mer. ....	152
Figure 119 : Cartographie des niveaux marins maximaux et des altitudes maximales des plans d'eau atteints en cote NGF/IGN69 pour le scénario « nouveau tracé digue à la mer infinie » = évènement Moyen 2100 avec une altitude « infinie » du nouveau tracé de la digue à la mer. ....	153
Figure 120 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales atteintes pour le scénario « nouveau tracé Digue à la mer infinie » = évènement Moyen 2100 avec une altitude « infinie » du nouveau tracé de la digue à la mer.....	154
Figure 121 : Cartographie du découpage en secteurs d'impact potentiel des inondations sur le territoire de la Camargue, et schématisation des entrées préférentielles des types d'inondation (flèches).....	156
Figure 122 : Schéma explicatif d'un contour environnemental d'iso-période de retour. ....	169

Figure 123 : Contours environnementaux pour les périodes de retour 1 an, 10 ans et 100 ans. Les points noirs représentent les données initiales (après sélection des événements indépendants).	170
Figure 124 : Schéma explicatif des différences entre les 2 types de résultats (CE et CDC).	171
Figure 125 : Arborescence du projet SIG	173
Figure 126 : Exemple de raster « résultat de simulation »	173
Figure 127 : Aperçu de la visualisation sous GoogleEarth© des chroniques s'affichant suite à un « clic » sur les punaises.	174
Figure 128 : Coordonnées des points d'extraction des séries temporelles d'inondation.	176

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Données topo-bathymétriques collectées sur le territoire camarguais.	23
Tableau 2 : Synthèse des valeurs statistiques d'extrême des forçages Hs et SWL pour les différentes périodes de retour indépendante.	45
Tableau 3 : Fréquence normalisée des directions pics par tranche de Hs. La valeur de Dp la plus observée par tranche de Hs est la case la plus colorée.	48
Tableau 4 : Combinaisons issues de la discrétisation du contour CDC centennal.	52
Tableau 5 : Synthèse des conditions de forçages retenus pour les 2 événements Fréquentss. La surélévation de +0.2 m liée au changement climatique n'est ici pas prise en compte dans le forçage « niveau marin».	56
Tableau 6 : Synthèse des conditions de forçages retenus pour les 7 combinaisons correspondantes à l'événement Moyen Actuel au large. Les valeurs de niveau marin - SWL dans le tableau n'intègrent pas les surélévations de + 0,20 m pour l'échéance actuelle et de + 0,6 m pour l'échéance 2100, liée au changement climatique.	57
Tableau 7 : Synthèse des conditions de forçage retenus pour l'évènement Extrême. La surélévation de + 0,2 m pour l'échéance actuelle liée au changement climatique n'est ici pas prise en compte dans le forçage « niveau marin ».	59
Tableau 8 : Typologie brute de l'OCS et regroupement de la typologie adaptée à la submersion.	75
Tableau 9 : Coefficients de Strickler attribués en fonction de la typologie simplifiée d'occupation du sol.	77
Tableau 10 : Comparaison des valeurs de statistique des extrêmes sur les observations des bouées côtières, et des valeurs issues des modélisations.	86
Tableau 11 : Conditions de forçages en vagues et vent injectées dans le modèle WW3 pour les 5 scénarios de sensibilité et résultats aux bouées « Espiguette » et « Camargue ».	86
Tableau 12 : Couples direction/vitesse du vent retenus pour les tests de sensibilité des conditions de vents sur les niveaux à la côte et dans les étangs.	88
Tableau 13 : Synthèse des 5 événements de simulation retenus pour la cartographie de la submersion marine.	105
Tableau 14 : Conditions de forçages au large pour les événements Fréquent (sud-est et sud), Moyen Actuel, Moyen 2100 et Extrême.	106
Tableau 15 : Synthèse des niveaux marins maximaux atteints au rivage pour les événements Fréquents, Moyen Actuel, Moyen 2100 et Extrême ; et des conditions de forçages météo-marins associées au large. (Les franchissements de paquets de mer sont pris en compte uniquement sur le secteur des Saintes-Maries-de-la-Mer pour les événements MOYEN ACTUEL et FREQ2_SUD).	115

Tableau 16 : Synthèse des caractéristiques des différents segments définis sur le front de mer des Saintes-Maries-de-la-Mer. ....	119
Tableau 17 : Bilan des volumes franchissants pour les 2 événements traités (Fréquent FREQ_S et Moyen Actuel). ....	121
Tableau 18 : Caractéristiques des trois scénarios de défaillance des digues de protection envisagés. ...	142
Tableau 19 : Synthèse des surfaces totales et inondées (en ha) par évènement et scénario simulé pour les 14 secteurs identifiés. ....	158
Tableau 20 : Répartition (%) des surfaces inondées par évènement de référence et scénario de défaillances (D1,D2, D3) simulé pour les 14 secteurs identifiés. ....	158
Tableau 21 : Répartition (%) des surfaces inondées par classe de hauteur d'eau maximale atteinte pour l'évènement Moyen Actuel et l'état initial associé pour les 14 secteurs identifiés. ....	159
Tableau 22 : Synthèse des impacts des scénarios de défaillance. ....	159
Tableau 23 : Combinaisons issues de la discrétisation du contour CE centennal (cf. Figure 11). ....	172

## Liste des annexes

Annexe 1 - Analyse par probabilités conjointes - deuxième méthode .....	169
Annexe 2 - Dossier cartographique et données de modélisation.....	173

# 1. Introduction

## 1.1. CONTEXTE

Le littoral de la Camargue est un territoire particulièrement vulnérable en ce qui concerne les risques côtiers (érosion et submersion marine), et son évolution morphologique future va être fortement dépendante de l'élévation du niveau de la mer prévisible au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle.

C'est également un territoire où les questionnements et initiatives sont nombreux et nécessitent une action coordonnée des acteurs publics, en termes de gestion de la bande littorale et d'exposition au risque d'érosion des plages et de submersion marine (Chassain, 2010).

En complément des démarches en cours sur la caractérisation de l'aléa submersion marine sur ce territoire (cartographie des TRI au titre de la Directive Inondation<sup>1</sup>, PPR Littoral sur les communes d'Arles, Saintes-Maries-de-la-Mer et Port-Saint-Louis-du-Rhône<sup>2</sup>), la DDTM13 souhaite disposer d'un modèle numérique permettant de simuler de manière précise les phénomènes de submersion marine le long du littoral de la Camargue.

Les précédentes démarches de cartographie s'appuient sur une approche statique : les zones soumises à un aléa submersion marine sont celles dont l'altitude est inférieure au niveau marin de référence. La Figure 1 illustre ainsi la méthode de détermination des niveaux marins à prendre en compte pour la détermination de l'aléa de référence, actuel ou à échéance 2100 avec prise en compte de l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique global.

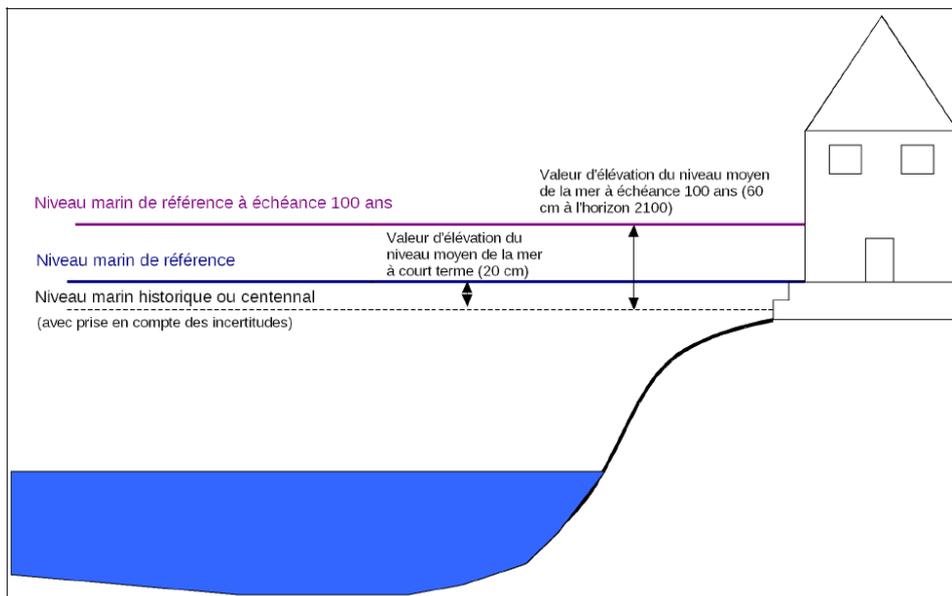


Figure 1 : Principe de cartographie des zones soumises à la submersion marine dans les Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) et dans le cadre de la mise en place de la Directive Inondation sur les Territoires à Risques d'inondation (TRI). Source : MEDDE, 2014.

<sup>1</sup> <http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/gestion/inondations/cartes/delta-du-rhone.php>

<sup>2</sup> <http://www.bouches-du-rhone.gouv.fr/Media/Images/PPRI3>

Or, en raison de la complexité du territoire camarguais (surfaces planes, réseau hydraulique de drainage, digues-routes, salines, cordon littoral naturel ou artificiel, ...), il est nécessaire de mettre en œuvre des modèles dynamiques pour simuler de manière adéquate les processus de submersion marine (extension de l'inondation, hauteur d'eau, vitesse des écoulements) avec la propagation des écoulements sur les surfaces terrestres. Dans de tels environnements, la surimposition directe de niveaux marins de référence à la côte sur des modèles topographiques (MNT) et leur projection à l'intérieur des terres selon le seul critère du relief entraîne l'inondation de surfaces qui se trouveraient sous les niveaux de référence même si elles sont en position très éloignée du rivage.

Dans cette étude, le BRGM propose d'élaborer un modèle numérique de propagation de la submersion marine à l'échelle globale du territoire de la Camargue. Les secteurs concernés par ce travail se trouvent sur les communes des Saintes-Maries-de-la-Mer, Arles, Port-Saint-Louis-du-Rhône, et Fos/mer (Figure 2). L'extension de la zone d'étude à l'ouest à la Camargue gardoise (communes d'Aigues-Mortes et du Grau-du-Roi) permet de prendre en compte l'ensemble du système de la plaine deltaïque.



Figure 2 : Linéaire côtier (trait jaune) de Camargue concerné par la modélisation de la submersion marine. L'élaboration du modèle s'étend de la pointe de l'Espiguette à l'ouest jusqu'au Golfe de Fos à l'est. La limite Est du modèle est le canal de Caronte qui relie l'étang de Berre à la Mer Méditerranée.

La méthodologie générale de l'étude menée sur la Camargue s'appuie sur les recommandations méthodologiques du MEDDE pour l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Littoraux (circulaire du MEDDE du 27 juillet 2011 ; Guide d'élaboration des Plans de Prévention des Risques Littoraux, MEDDE 2014), en particulier en ce qui concerne la prise en compte du changement climatique.

## 1.2. RAPPELS THÉORIQUES

« Les submersions marines sont des inondations temporaires de la zone côtière par la mer lors de conditions météorologiques et océaniques défavorables (basses pressions atmosphériques et fort vent d'afflux agissant, pour les mers à marée, lors d'une pleine mer) ; elles peuvent durer de quelques heures à quelques jours » (Guide méthodologique, MEDDE, mai 2014).

Elles sont le plus souvent associées à des surélévations temporaires du niveau <sup>(3)</sup> de la mer (ou niveau marin) lors de tempêtes ou de cyclones, voire de tsunamis. En dehors des tsunamis, les surcotes marines sont contrôlées par deux processus principaux (Figure 3) :

- **la surcote atmosphérique** : le passage d'un important système dépressionnaire (cyclone, tempête) est caractérisé par des variations du niveau marin selon deux mécanismes :
  - o la chute de pression atmosphérique entraîne une surélévation du niveau du plan d'eau. C'est le phénomène de *baromètre inverse* : une diminution d'1 hPa équivaut à une élévation d'1 cm du plan d'eau (valeurs pour une situation théorique d'un plan d'eau infini et d'une pression atmosphérique uniforme),
  - o à cela s'ajoute l'effet du vent, qui en fonction de son intensité et de sa direction est susceptible de provoquer des accumulations d'eau sur la bande littorale.

La surélévation du plan d'eau provoquée par la chute de pression et l'action du vent correspond à la surcote atmosphérique (ou météorologique). La combinaison de la marée et de cette surcote atmosphérique génère le niveau de la mer « au repos » ;

- **la surcote liée aux vagues (wave Setup)** : à l'approche de la côte, les vagues générées au large déferlent en transférant leur énergie sur la colonne d'eau, dont une partie provoque une surélévation du niveau moyen du plan d'eau (le « *wave Setup* » ou surcote liée aux vagues) qui peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres. On peut distinguer 2 types de setup : « local » ou « environnant/régional ». Le premier, le plus commun, concerne les secteurs à proximité immédiate des zones de déferlement (plages exposées aux vagues par exemple). Le setup « environnant ou régional » affecte des milieux abrités semi-fermés (ports, Golfe de Fos, etc.) où le déferlement se produit à proximité de l'entrée de ces milieux à cause de la présence de haut-fonds (plateaux rocheux, bancs de sable, etc.) générant ainsi un setup qui se propage ensuite à l'intérieur de ces environnements (Garcin *et al.*, 2012 ; Bertin *et al.*, 2015).

Le **niveau moyen du plan d'eau** (ou niveau statique) lors d'une tempête ou d'un cyclone résulte de la contribution de la surcote atmosphérique, de la surcote des vagues et de la marée (Figure 3). La marée est de type semi-diurne en France métropolitaine (2 cycles de pleine mer et basse mer par jour). Le littoral méditerranéen est exposé à un contexte microtidal. Sur le secteur étudié le marnage maximal est de l'ordre de 0,56 m à Fos-sur-Mer (SHOM, 2014, 2016)

Enfin, le niveau instantané du plan d'eau dépendra du jet-de-rive (swash), c'est-à-dire le flux et le reflux des vagues sur l'estran. On appelle run-up la cote maximale atteinte par la mer au-dessus d'un niveau de référence (ex. le zéro hydrographique).

---

<sup>3</sup> Dans le rapport, on utilisera indistinctement les deux appellations pour désigner la même variable.

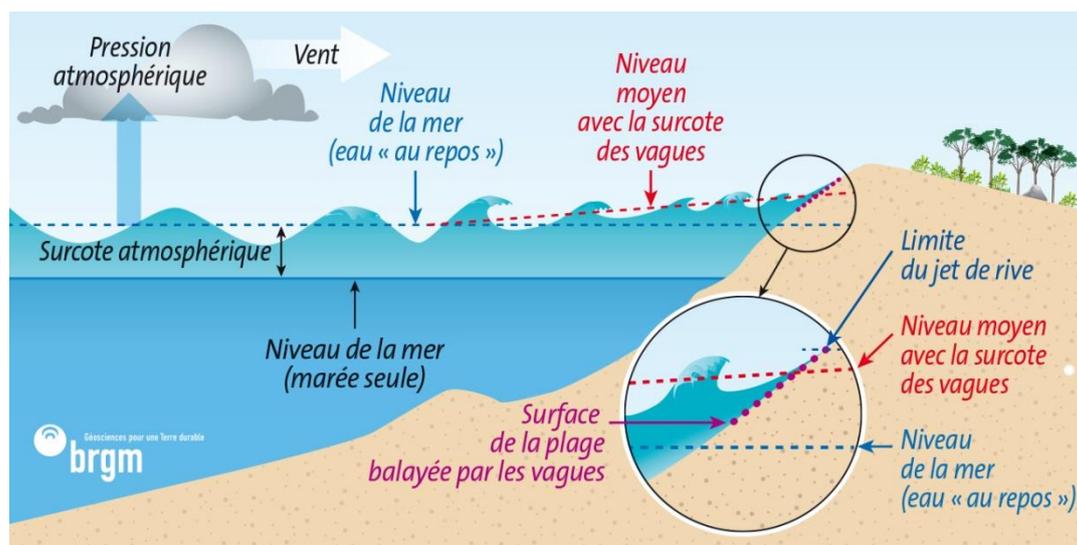


Figure 3 : Schéma des différentes contributions au niveau du plan d'eau lors d'une tempête (surcotes) jusqu'au rivage.

La submersion peut se manifester sous trois formes différentes, soit (Figure 4) :

- par **franchissement** de paquets de mer, qui correspond au passage des vagues par-dessus les défenses côtières (naturelles ou artificielles), l'accumulation d'eau résultante peut s'avérer importante selon l'ampleur des franchissements, sa durée et le linéaire concerné ; le franchissement est conditionné essentiellement par la position du plan d'eau (niveau statique) par rapport à la cote maximale du terrain naturel ou des ouvrages de protection, et par les caractéristiques locales des vagues (hauteurs et périodes) ;
- par **débordement**, qui correspond à une élévation du niveau d'eau statique au-dessus de la cote maximale du terrain naturel ou des ouvrages de protection ; il entraîne un déversement direct d'importantes quantités d'eau à terre ; les volumes d'eau mis en jeu dépendent de l'écart entre le niveau d'eau et celui de la cote maximale du terrain naturel ou des ouvrages de protection, la durée du débordement et de la vitesse de l'écoulement ;
- par **rupture** de structures de protection est causée par l'action répétée des vagues et/ou la surverse. Les structures de protection peuvent être alors endommagées progressivement ou brutalement, et des brèches ou une défaillance généralisée peuvent se produire, provoquant le passage à un régime de débordement. Le déversement de l'eau en arrière des ouvrages est également de nature à dégrader fortement le rôle de protection de ces derniers.

Un épisode de submersion peut résulter de la succession de ces différents processus, voire de leur occurrence simultanée, en des endroits différents. Lors de tempêtes, on assiste généralement à une montée progressive du niveau moyen (ou statique) et à un renforcement de l'intensité des vagues (temps 1). Au-delà d'une certaine intensité, il peut y avoir franchissements par paquets de mer, la submersion associée restant en général limitée (temps 2). Si le niveau statique continue à s'élever et dépasse la cote maximale des défenses côtières, la submersion passe alors en régime de débordement (temps 3A). Lorsque le niveau statique diminue du fait de la marée et/ou de la baisse de la surcote, on peut observer, suivant la configuration, une « vidange » partielle de l'eau accumulée à terre vers la mer ou de nouveaux franchissements jusqu'à ce que les conditions de mer diminuent (temps 3B). En cas de rupture d'un ouvrage de protection, il peut y avoir submersion par débordement alors que le niveau statique ne dépasse pas la cote maximale de l'ouvrage avant rupture (temps 3C).

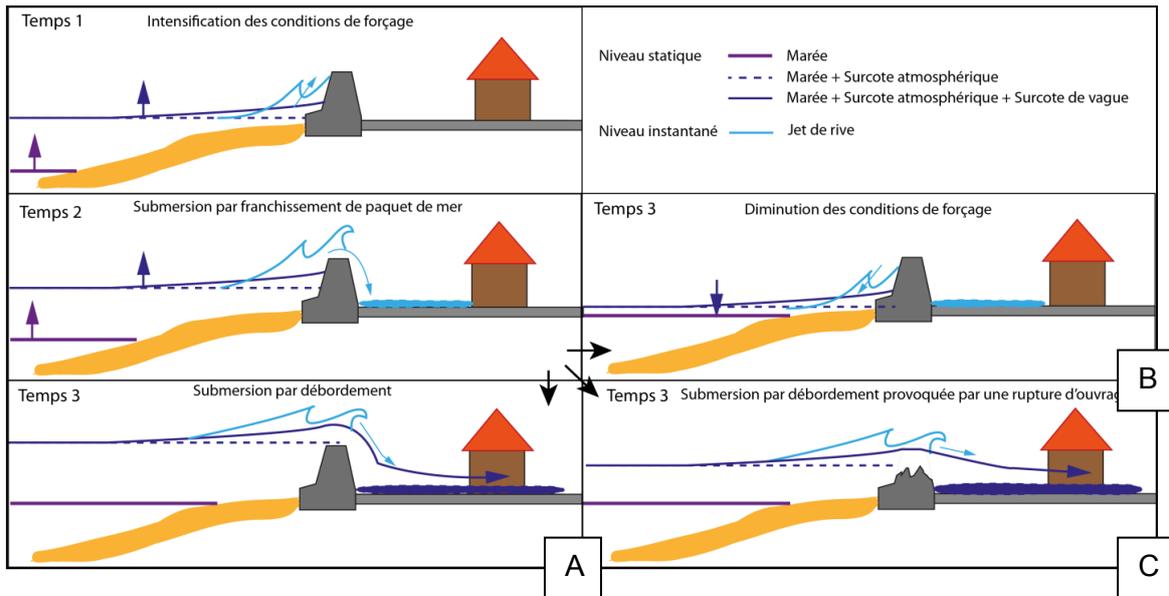


Figure 4 : Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer / dégradation des ouvrages / débordement, ©BRGM).

### 1.3. DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE

#### 1.3.1. Objectifs

Le modèle développé doit permettre la réalisation de simulations dynamiques du phénomène de submersion marine, en conséquence de conditions de tempêtes au large.

Les phénomènes considérés ne concernent pas l'inondation fluviale par le Rhône ou une submersion liée à une concomitance entre une inondation fluviale et une tempête marine.

Le modèle doit répondre à deux objectifs :

- apporter des éléments d'aide à la décision à la DDTM13 en termes d'évaluation précise de l'extension de la submersion marine sur les surfaces terrestres de la Camargue pour des échéances actuelle, et future en prenant en compte une remontée du niveau marin liée au changement climatique global ;
- permettre de tester différents scénarios d'aménagements (abandon ou construction de digues) pour la gestion du risque submersion marine en Camargue.

#### 1.3.2. Caractéristiques du modèle

La modélisation numérique proposée prendra en considération l'influence de l'occupation du sol (ouvrages, zones agricoles, forêts, prairies, quartiers urbanisés, réseaux de transport, etc.) à partir d'une carte d'occupation du sol qui sera traduite en termes de coefficient de rugosité pour reproduire le frottement sur les écoulements (Figure 5).

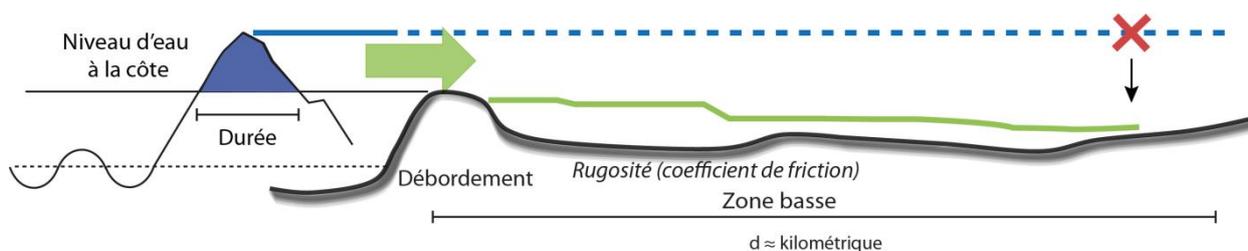


Figure 5 : Schéma de principe de la méthodologie employée pour la propagation de la submersion marine par modélisation dynamique. Le niveau marin de référence (bleu continu) n'est pas simplement projeté sur la topographie (bleu pointillé) mais bien propagé suivant une dynamique de submersion (vert).

Dans un premier temps, l'approche « dynamique » sera réalisée sur l'ensemble de l'emprise du modèle en considérant fonctionnels tous les ouvrages de protection contre la submersion marine. Sont considérés comme ouvrages de protection contre la submersion marine, les ouvrages surélevés par rapport au terrain naturel situé à l'arrière et qui font obstacle à l'écoulement des eaux (digues, routes, murets de rehaussement des perrés par exemple). La digue à la mer qui ceinture la Camargue côté mer répond à cette définition, à l'inverse des ouvrages longitudinaux, de type perrés et enrochements non surélevés par rapport au terrain naturel situé à l'arrière, qui sont considérés comme des ouvrages de fixation du trait de côte.

Le modèle implémenté permettra de simuler des événements de tempête à échéance actuelle et future (2100), avec des modifications sur les ouvrages de protection (ruine généralisée, brèches, ...) déterminées en concertation avec la DDTM13.

### 1.3.3. Phasage de l'étude et contenu du rapport

Le présent rapport fait état des travaux réalisés au cours du projet qui s'est déroulé en étapes :

- phase 1 :
  - collecte des données nécessaires à l'élaboration du modèle,
  - analyses probabilistes des forçages vagues et niveau marin pour la détermination de l'évènement de référence,
  - construction et implémentation de la chaîne de modélisation,
  - tests de sensibilité du modèle à partir des données de forçage relatives à la tempête de novembre 1982 à l'origine d'un évènement de submersion marine majeur pour le territoire ;
- phase 2 :
  - simulations de l'évènement de référence,
  - Simulation des différents scénarios d'aménagement en concertation avec la DDTM13 et les acteurs de la gestion du littoral camarguais.

Ce rapport rassemble les informations et les données produites dans l'ensemble du projet.

## 2. Collecte des données

### 2.1. TOPOGRAPHIE - BATHYMÉTRIE

Les données topographiques et bathymétriques ont été recueillies et rassemblées pour constituer un Modèle Numérique de Terrain nécessaire à la simulation dynamique des phénomènes de submersion marine.

#### 2.1.1. Inventaire des données collectées

Les informations sur les données collectées sont rassemblées dans le Tableau 1.

Données	Fournisseur	Format	Commentaires
Litto3D®	IGN/SHOM	MNT maille de 1m x 1m	Précision de 15-20 cm sur domaine terrestre Précision de 50 cm domaine marin
BDT Rhône	IGN via DDTM13	MNT maille de 5m x 5m	Précision de 15-20 cm sur domaine terrestre (lidar)
Histolitt®	SHOM	semis de points MNT maille de 50m x 50m	Précision de 30 cm en moyenne sur le domaine marin
Bathymétrie étangs Vaccarès, Fangassier	Reserve Nationale de Camargue -SNPN	Points de sonde	
Bathymétrie Golfe de Fos, structure portuaires	Grand Port Maritime de Marseille	MNT maille de 10m x 10m	Levés SMF <sup>4</sup>

Tableau 1 : Données topo-bathymétriques collectées sur le territoire camarguais.

La synthèse cartographique des données rassemblées est représentée sur la Figure 6.

Le modèle numérique altimétrique Litto3D®, est constitué de dalles de 1 km x 1 km à la résolution de 1m. Ces données sont nettoyées de l'occupation du sol (bâtiments, végétation, véhicules, ...). L'ensemble de ce jeu de données couvre quasiment l'intégralité du domaine de l'étude et propose notamment une description fine et continue de l'interface terre-mer.

La BDT Rhône est une compilation de données topographiques en particulier lidar (MNT au pas de 5m sur l'ensemble de la Camargue), qui comprend également des profils bathymétriques du Rhône et du Petit-Rhône.

Des levés bathymétriques de 2013-2014-2015 (MNT de 10 m de résolution) dans le Golfe de Fos ont été fournis par le Grand Port Maritime de Marseille (GPM).

<sup>4</sup> SMF : Sondeur Multi-faisceaux

Les données issues de mesures LIDAR (Litto3D et BDT Rhône) constituent le socle de base des informations disponibles. La large extension des levés et la grande densité de points permet d'avoir une représentation satisfaisante du territoire pour la réalisation du modèle numérique de submersion. Les données collectées auprès d'autres organismes (RNC-SNPN, GPMM) ont permis de compléter les secteurs où le lidar est inopérant (étangs, embouchures, Golfe de Fos).

Pour avoir des précisions topographiques sur des secteurs clefs (digue à la mer par exemple), les organismes en charge de leur gestion ont été contactés :

- les levés Lidar fournis par le SYMADREM sur le secteur de l'embouchure du Rhône sont inclus dans la BDT-Rhône ;
- la Fondation de la Tour de Valat a fourni des éléments (points topographiques) sur les étangs et terrains aujourd'hui propriétés du Conservatoire du Littoral ;
- sur les terrains appartenant à la Compagnie des Salins du Midi (Groupe Salins), nous n'avons pas obtenu de données topographiques malgré plusieurs demandes.

À l'issue des entretiens avec l'ensemble des acteurs locaux (propriétaires, gestionnaires), il est apparu que la digue à la mer n'a pas fait l'objet d'un relevé topographique complet de l'ensemble de son linéaire. Ceci a conduit à la réalisation d'un levé complémentaire dans le cadre de ce projet.

### **2.1.2. Données topographiques complémentaires de la digue à la mer et de routes**

Ce relevé topographique par DGPS centimétrique a été réalisé le long de la digue à la mer pour évaluer la fiabilité des MNT issus des données Lidar sur des surfaces plutôt planes avec des digues surélevées qui constituent les principaux obstacles à l'écoulement des eaux, et qui doivent donc être bien définies en termes de niveau topographique.

#### ***Acquisition***

L'acquisition des données a eu lieu les 29 et 30 juillet 2015. Elle s'est focalisée sur le linéaire de la digue à la mer gérée par le SYMADREM et par la Compagnie Salins. Des levés de routes ont également été réalisés.

Les levés DGPS ont été réalisés avec un DGPS TRIMBLE R6 de précision centimétrique, en mode continu et corrigés en temps-réel RTK (Figure 7). Il a été installé sur les véhicules avec un enregistrement de mesure toutes les 2 secondes.

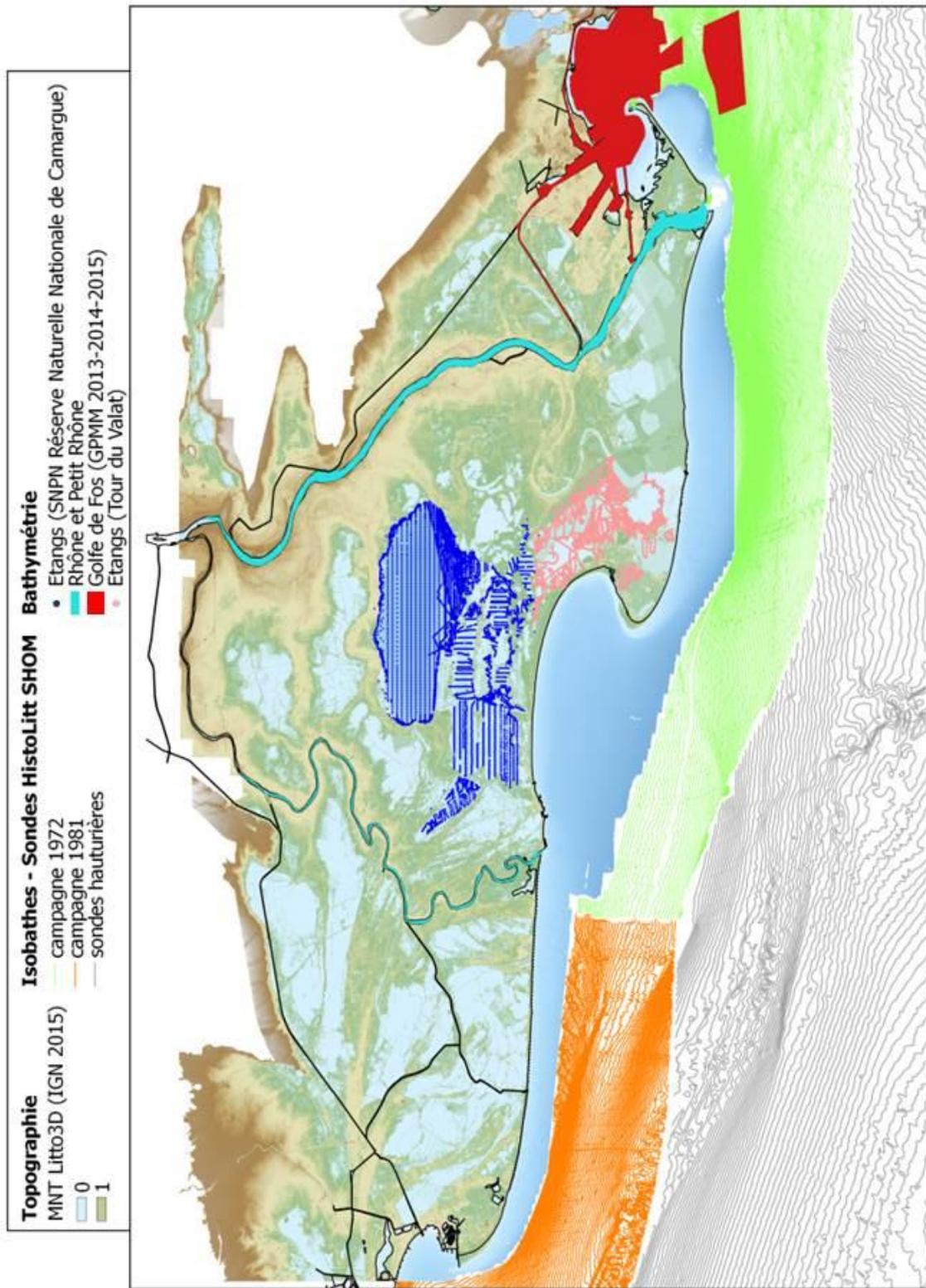


Figure 6 : Données topobathymétriques rassemblées.



Figure 7 : Levé DGS RTK (Real Time Kinematics) le long de la digue à la mer (29 et 30 juillet 2015).

### **Résultats**

4 563 points topographiques ont ainsi été mesurés le long des digues et des routes de Camargue (Figure 8).

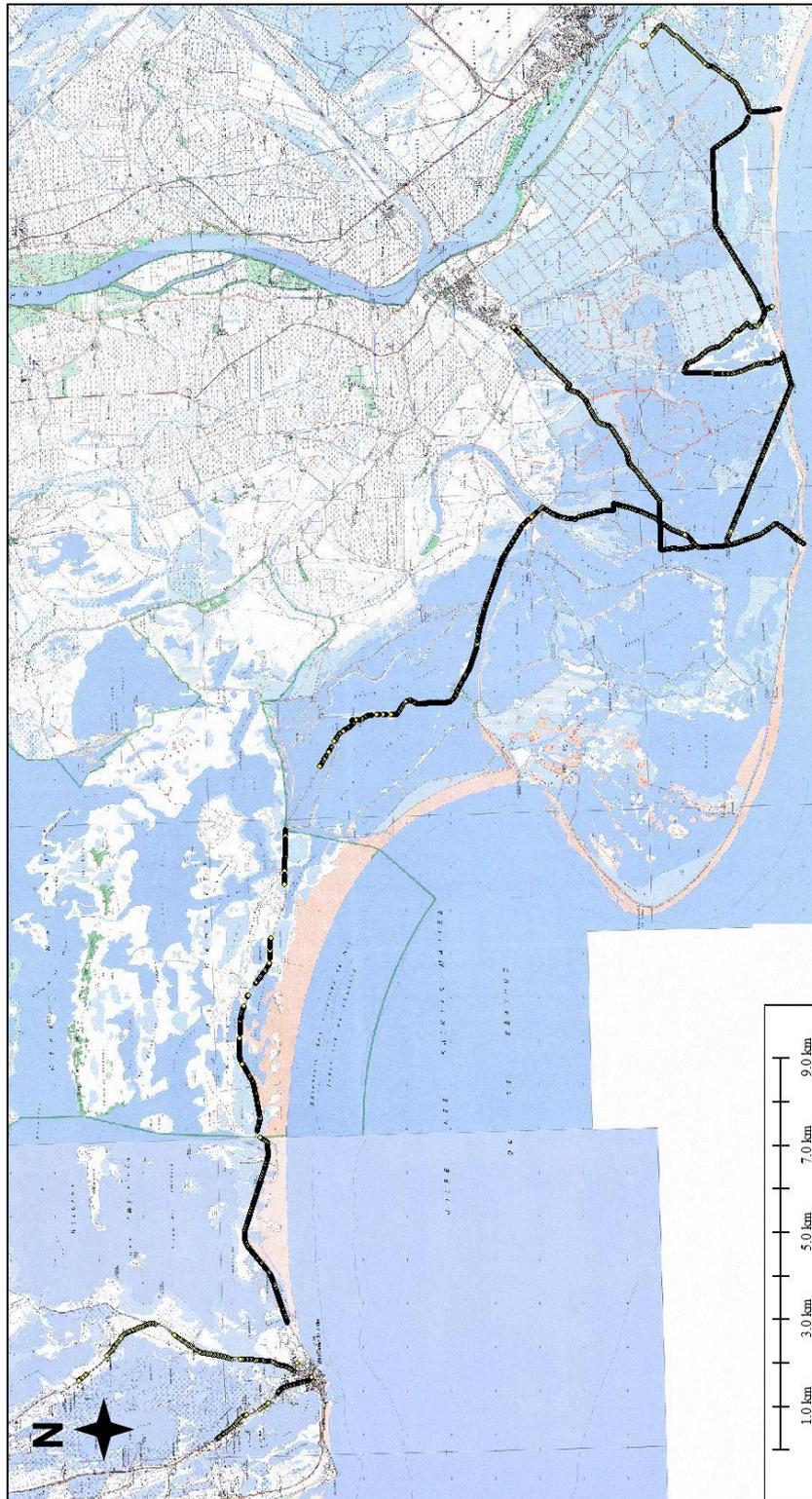


Figure 8 : Linéaire mesuré par DGPS centimétrique (points topographiques) sur les digues et routes de Camargue les 29 et 30 juillet 2015 (fond IGN-SCAN25®).

La comparaison de ces données avec les levés lidar sur la digue à la mer (Figure 9) montre que les données DGPS sont situées quasi-systématiquement environ 20 cm au-dessous des données Litto3D. Les données Litto3D utilisées sont issues du MNT à 1 m de résolution, et les calculs d'interpolation pour produire ces MNT tendent probablement à sous-estimer les points

hauts (digues et routes, par rapport aux terrains agricoles). Sur ces points hauts, les valeurs restent dans l'incertitude affichée dans les spécifications techniques de Litto3D (15-20 cm à 95 %).

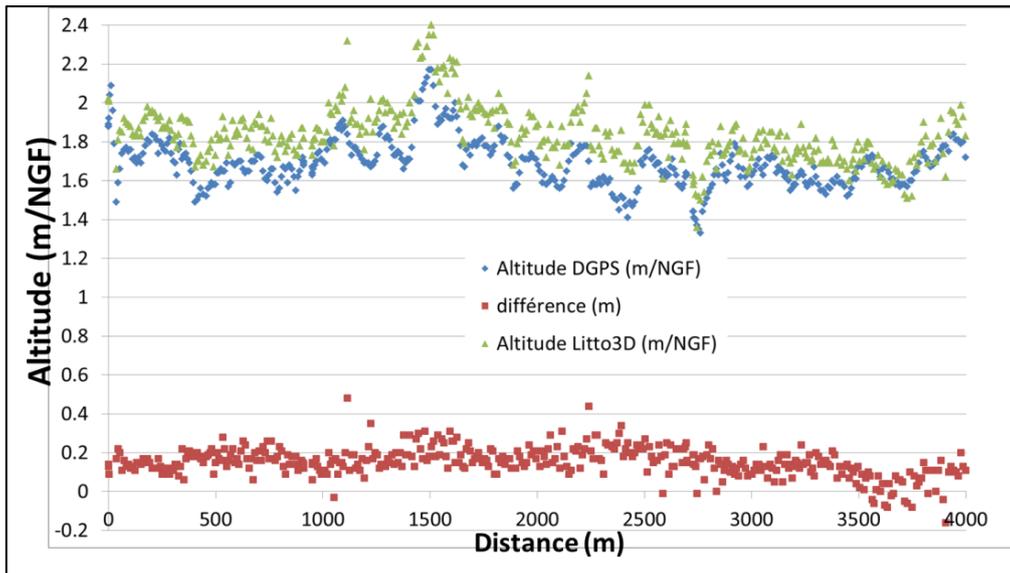


Figure 9 : Profil en long de la digue à la mer - Comparaison mesures DGPS et Litto3D (MNT 1 m de résolution).

Bien que les données Litto3D soient fiables et puissent être utilisées de manière extensive sur le territoire pour la réalisation des simulations numériques, le décalage des valeurs topographiques constaté sur les points hauts (digues, routes), incite à favoriser l'intégration d'une marge d'incertitude à prendre en compte.

Cela est d'ailleurs envisagé dans l'élaboration des PPRL (MEDDE, 2014) : le guide prévoit en effet l'intégration d'une valeur de + 0,25 m sur les niveaux d'eaux de manière forfaitaire pour prendre en compte les différentes incertitudes (niveaux marins, topographies, ...) dans la mesure où toutes les sources d'incertitude ne sont pas quantifiables individuellement.

## 2.2. OCCUPATION DU SOL

L'influence de l'occupation du sol sur la propagation de la submersion est prise en compte à partir d'une carte d'occupation du sol traduite en termes de coefficient de rugosité du sol pour reproduire le frottement sur les écoulements.

Une typologie simplifiée a été élaborée à partir d'une compilation des typologies détaillées des différentes cartes d'occupations à disposition :

- carte de l'occupation du sol 2011 réalisée par le Parc Naturel Régional de Camargue (Figure 10) ;
- carte de l'occupation du sol PACA 2006 réalisée par le CRIGE-PACA<sup>5</sup> ;
- carte de l'occupation du sol de la région Languedoc-Roussillon (données 2006)<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> <http://www.crige-paca.org/>

<sup>6</sup> <http://amigo.siglr.org/>



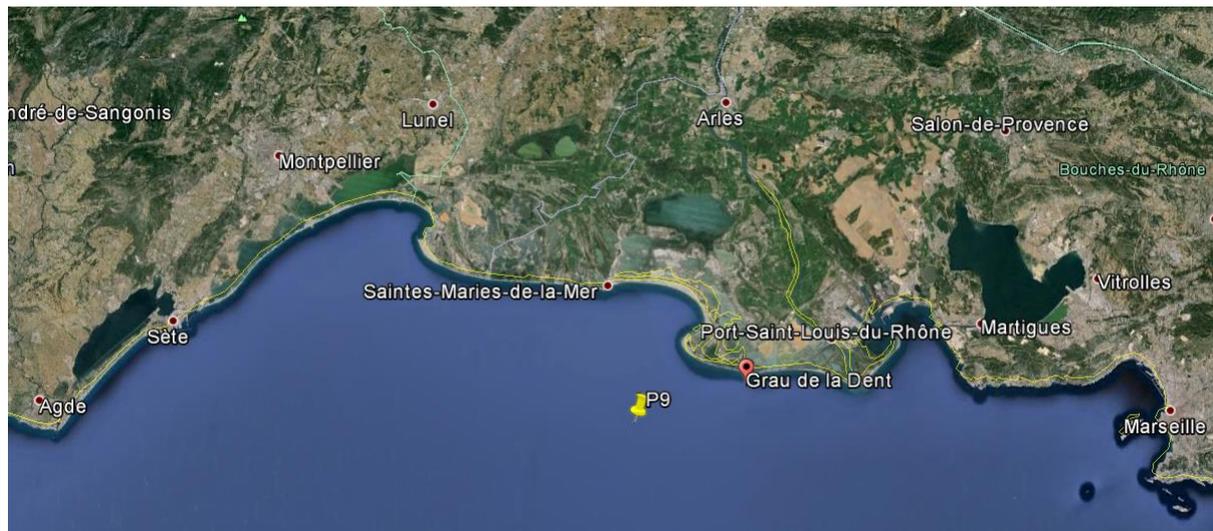


Figure 11 : Localisation des points d'extraction des données de vagues (point P9 situé sur l'isobathe 50 m) et de niveaux d'eau (marégraphe du Grau de la Dent).

### 2.3.2. Données de niveau marin

Les données de niveau marin nécessaires à la définition des phénomènes de submersion marine ont été inventoriées par le CETE (2007, 2010), dont les données marégraphiques le long du littoral de la Camargue, et en particulier celles du Grau-de-la-dent (marégraphe géré par la Compagnie des Salins du Midi) (Figure 12).

Elles ont été mises à disposition de cette étude. C'est un jeu de données de 32 ans de données exploitables, 1960-1983, et 1986-1995). Il est détaillé dans le chapitre 3.1.1.

### 2.3.3. Données de vent

Les données de vent sont celles utilisées pour générer la base de données rétrospectives des conditions de vagues. Elles sont issues de simulations rétrospectives de données climatiques à partir d'un modèle couplé atmosphère - océan - continent - banquise et d'une assimilation de données satellitaires. Il s'agit des données CFSR<sup>7</sup> de NCEP (National Center for Environmental Prediction) qui est la référence internationale actuelle en termes de durée, précision et résolution temporelle et spatiale. Elles sont disponibles sur une période de 31 ans (1979 à 2009) avec une résolution horaire et une résolution spatiale d'environ 0,5°x0,5°.

### 2.3.4. Données de niveau d'eau dans les étangs et salins

Pour les simulations de l'écoulement des eaux marines sur les surfaces terrestres, il est nécessaire d'avoir en données d'entrée des informations sur les niveaux d'eau dans les étangs, et les salines, sur les parties terrestres.

La Réserve Naturelle Nationale de Camargue (SNPN) a ainsi mis à disposition les mesures de niveau des étangs qu'elle réalise sur les étangs qu'elle gère (Figure 12).

<sup>7</sup> (Climate Forecast System Reanalysis, <http://nomads.ncdc.noaa.gov/data.php?name=access#cfsr>, Saha et al. 2010)

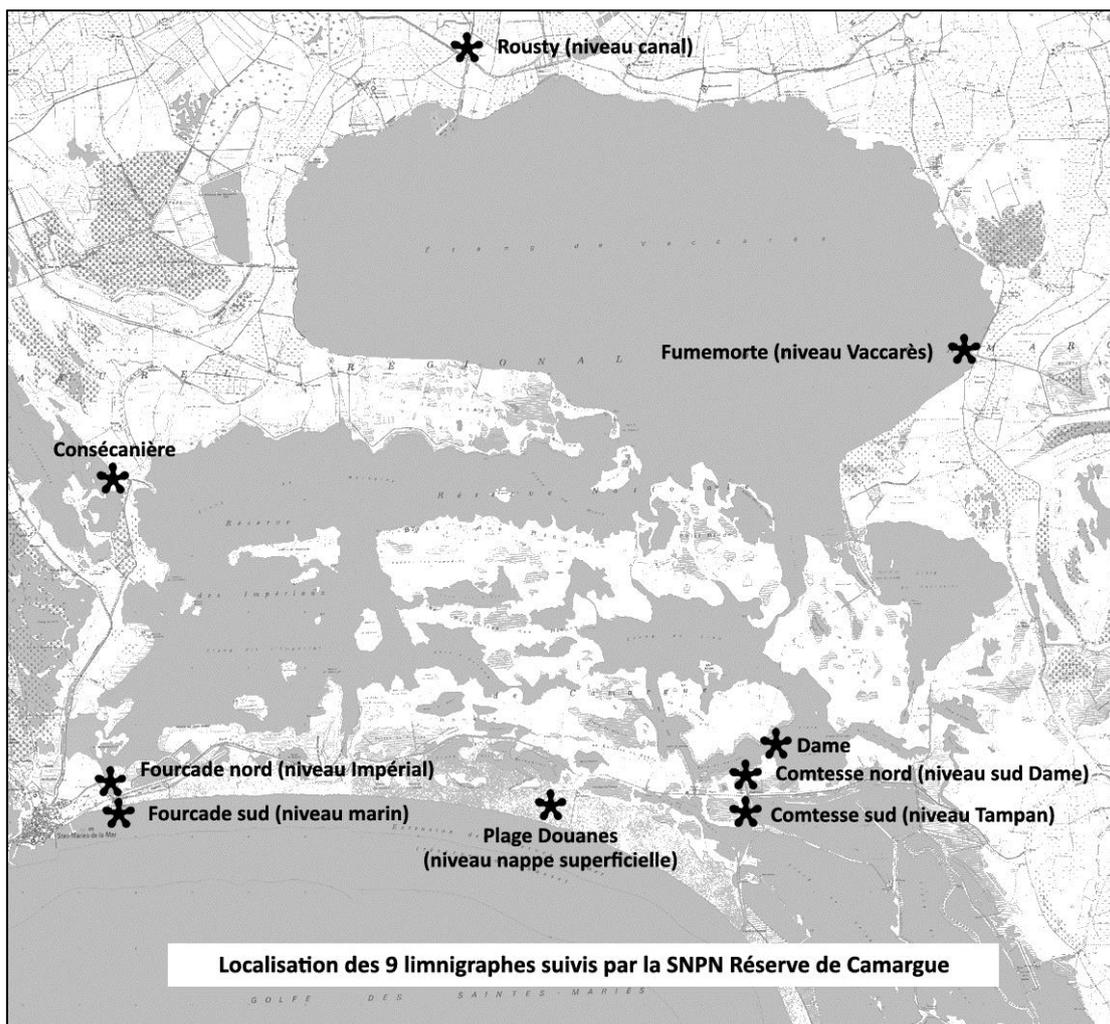


Figure 12 : Réseau de limnigraphes géré par la Réserve Naturelle Nationale de Camargue - SNPN (Cheiron, 2015).

Le début des suivis disponibles sur le système Vaccarès et les étangs limitrophes) datent de 1976 à 1982 pour la plupart, 2008 pour Dame, 2010 pour Consécanière (Cheiron, 2015). Les mesures sont continues (une mesure tous les  $\frac{1}{4}$  d'heure ou toutes les 5' pour Fourcade sud). Sur ce réseau de 9 limnigraphes à flotteurs, les données de niveau (en m NGF/IGN69) sont enregistrées électroniquement (Thalimèdes de marque Ott). Ces valeurs, après relevé mensuel, sont ramenées à des moyennes journalières, décadaires et mensuelles.

### 2.3.5. Données du Rhône

Les données utilisées (débits moyens journaliers) sont issues de la Banque Hydro au niveau de la station de Beaucaire en amont d'Arles<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> <http://www.rdbmrc.com/hydroreel2/station.php?codestation=777>

## **2.4. OUVRAGES ET CONNEXIONS HYDRAULIQUES**

L'aménagement de la plaine de la Camargue au cours du temps pour le développement d'activités agricoles et industrielles (production de sel) a abouti en un morcellement du territoire en une multitude de bassins et d'étangs délimités par des digues en terre. La bonne circulation des eaux (météoriques et/ou marines) et la gestion des niveaux y constituent une des préoccupations constantes des gestionnaires. Ainsi, par exemple, une Commission Exécutive de l'Eau CEDE, (sous animation de la DDTM13) a été mise en place pour permettre de gérer de manière dynamique les niveaux d'eau des étangs du Vaccarès au niveau du Pertuis de la Fourcade.

Pour une modélisation des écoulements de submersion marine sur les surfaces terrestres, il est donc nécessaire d'avoir un état des lieux des ouvrages et connexions hydrauliques. Le modèle mis en œuvre dans cette étude permet l'intégration d'ouvrages hydrauliques dans la dynamique des écoulements (cf. paragraphe 4.6).

L'utilisation de ces informations est essentielle pour la modélisation des différents scénarios, dont certains seront joués en prenant en compte :

- la destruction totale ou partielle des ouvrages ou partie d'ouvrages (digue par exemple) ;
- le caractère ouvert et/ou fermé des connexions hydrauliques (martelières, pertuis).

Les services techniques des organismes gestionnaires (Parc Naturel de Camargue, Réserve Naturelle de Camargue, Conservatoire du Littoral, SYMADREM) ont donc été consultés pour avoir des informations concernant les ouvrages existants et ceux en projet sur le territoire de Camargue.

### **2.4.1. Ouvrages existants**

- **Système Vaccarès-mer**

Le système des étangs du Vaccarès, qui draine la majeure partie des terres de la Camargue insulaire dispose de trois exutoires « naturels » ou gravitaires avec la mer, classés ci-après par capacité hydraulique décroissante (Figure 13) :

- Pertuis de la Fourcade (au droit des Saintes-Marie-de-la Mer) ;
- Pertuis de la Comtesse (au droit de Beauduc) ;
- l'ouvrage du Rousty (entre les Saintes et Beauduc).

	Ouvrage de la Fourcade	Ouvrage du Rousty	Pertuis de la Comtesse
Photo			
Section hydraulique	- 6 ouvertures de 1.2x1.2 m - 7 ouvertures de 1 x1.2m * Section totale : 17 m <sup>2</sup>	9 ouvertures de 1.9 x ? m **	8 Ouvertures de 1.5 x1.75 m 5 Ouvertures de 2.35x2.35 m
Etat des ouvrages	L'ouvrage de la Fourcade fait l'objet de plusieurs désordres importants, ne remettant pas en question ses fonctionnalités mais nécessitant une intervention de réhabilitation dans les années à venir	L'ouvrage du Rousty est en assez bon état, il a fait l'objet d'une réhabilitation dans les années 80.	Les ouvrages du pertuis de la comtesse sont en fin de vie et nécessitent une réhabilitation/remplacement rapide
Ensalement	L'ouvrage de la Fourcade est le seul ouvrage dont les abords ne se sont pas ensablés, cela peut venir de plusieurs raisons : - Son exutoire est situé dans une zone moins propice à l'accrétion de la bande littorale - Il est resté fonctionnel et est fréquemment utilisé pour l'évacuation de gros débits vers la mer, ce qui permet un transport solide suffisant pour	L'ouvrage du Rousty est ensablé en amont et en aval direct de l'ouvrage, cet état vient probablement du fait que cet ouvrage n'est plus utilisé à sa capacité nominale	Le pertuis de la comtesse est ensablé dans sa partie amont, notamment le chenal de liaison avec l'étang de la dame dont la section hydraulique est limitée. En aval direct de l'ouvrage l'ensablement est moins prononcé. Cependant, le comblement du grau de la comtesse impose un contrôle aval sur l'ouvrage et limite sa capacité.

Figure 13 : Connexions hydrauliques entre la mer et le système du Vaccarès via la digue à la mer (d'après CCE&C, 2015 - source : SYMADREM).

Ces ouvrages ont plusieurs fonctions dont les principales sont :

- prévenir la montée du niveau des étangs et assurer le ressuyage des crues en cas d'inondation ;
- assurer la continuité écologique entre les étangs du système Vaccarès et la mer ;
- réguler la salinité des étangs ;
- ressuyer les terres agricoles, lorsque le niveau de l'étang est assez bas pour maintenir un exutoire aux différents réseaux de drainage.

Le Pertuis de la Fourcade rassemble les principaux échanges hydrauliques entre la mer et les étangs. Ceux-ci sont gérés par le Parc Naturel de Camargue après décision de la CEDE (Commission Exécutive de l'Eau) qui au vu des conditions météorologiques les jours précédents émet des préconisations de gestion des niveaux pour maintenir les échanges écologiques entre la mer et les étangs (Figure 14).

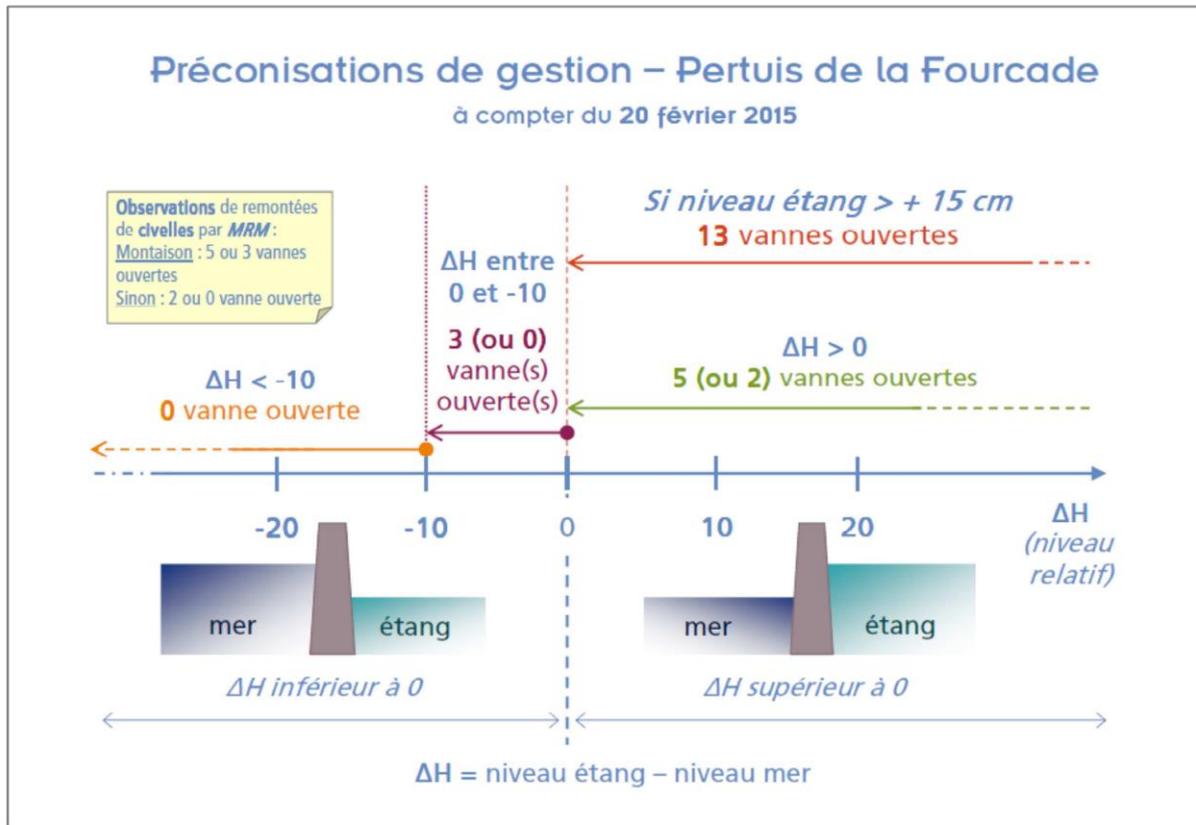


Figure 14 : Exemple de préconisation de gestion pour le pertuis de la Fourcade (Source : compte-rendu de la CEDE du 19 février 2015).

Les pertuis de la comtesse et du Rousty ne sont plus actuellement opérationnels mais il existe des projets de remise en état de ces connexions. Aujourd'hui ils sont ouverts.

Au regard des préconisations, il est probable que lors d'un évènement de tempête marine avec une forte surcote du niveau de la mer associée, les pertuis seront en situation fermée. En revanche, la défaillance des pertuis peut être également envisagée (destruction, ou entrave au bon fonctionnement) et donc ils pourront être considérés comme ouverts lors des différents scénarios spécifiques.

- **Ouvrages de la Gacholle**

Au niveau de la Gacholle, des buses en béton (diamètre 800 mm) ont été identifiées par le SYMADREM. Ces ouvrages sont généralement à l'état de ruine mais ils assurent la transparence entre les étangs de :

- Tapan et l'Enfores du Pebre ;
- Le phare et le Pertuis de la Comtesse ;
- Enfores de Vignoles et du Galabert ;

Pour l'ensemble de ces ouvrages, on dispose des dimensions et des cotes à prendre en compte pour les simulations.

## 2.4.2. Ouvrages en projet

- **Réfection de la digue à la mer sur le secteur Est (Salins de Giraud)**

Sous Maitrise d'ouvrage du SYMADREM, des travaux sont prévus sur la partie de Salins de Giraud avec renforcement des digues du grand Rhône et création d'une digue au Sud de Salins de Giraud (Figure 15).

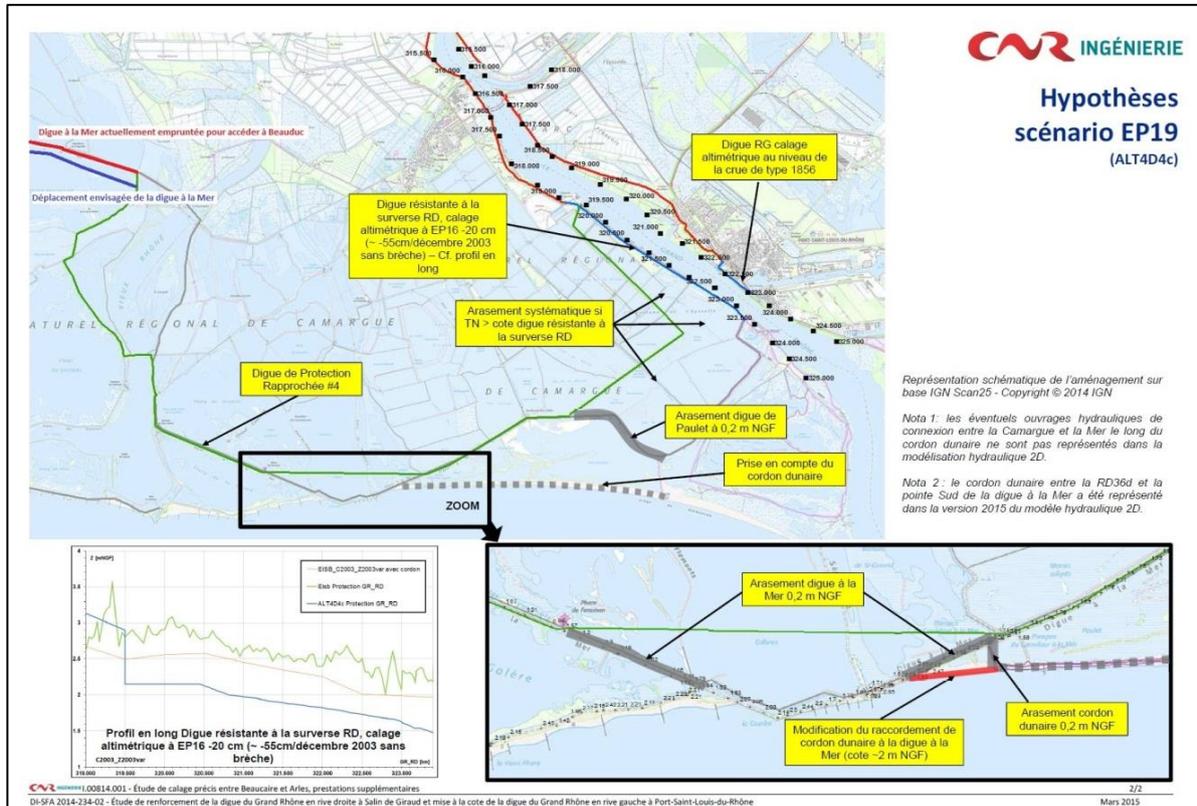


Figure 15 : Avant-Projet de restructuration des digues du Rhône et de la digue à la mer sur le secteur de Salins de Giraud (Délibération du comité syndical du SYMADREM du 30 juin 2015).

- **Projets d'aménagements hydrauliques dans le cadre d'un programme européen LIFE+ mc-SALT**

Ce projet porté par le Parc Naturel de Camargue vise à l'élaboration de pertuis pour améliorer la circulation hydraulique entre les étangs :

- du Galabert et du Fangassier ;
- du Pourtour-Rascaillon 2 et du Galabert ;
- du Vaisseau et de Beauduc.

Les plans masses et les cotes des ouvrages sont rassemblés dans le rapport d'EGIS (2013).



### 3. Détermination des événements de forçage et de l'évènement de référence

Sur la base des données recueillies, une analyse statistique des conditions de forçages, vagues et niveaux marins, est réalisée pour déterminer les événements de référence, conformément au Guide d'élaboration des PPRL (MEDDE, 2014), pour la caractérisation de l'aléa submersion. En effet, une submersion se produisant sous l'effet de plusieurs agents dynamiques partiellement liés (vagues, niveaux d'eau - marée et surcote atmosphérique), l'analyse de la période de retour d'un seul agent n'est pas représentative de la période de retour du niveau marin au rivage. Il est nécessaire d'analyser la période de retour conjointe en prenant en compte la dépendance entre les agents. Dans ce but, l'analyse repose sur la méthode statistique développée par HR Wallingford et l'université de Lancaster à l'aide du logiciel JOIN-SEA (Hawkes, 1998 ; Hawkes *et al.*, 2002).

JOIN-SEA est utilisé pour déterminer la probabilité que les deux conditions de mer  $H_s$  (hauteur significative des vagues) et  $SWL$  (*Still Water Level*, niveau d'eau au large incluant la marée et la surcote atmosphérique) dépassent conjointement des valeurs spécifiées. Un ensemble de couples de valeurs ( $H_s$  ;  $SWL$ ) associés à une **période de retour dite de « dépassement conjoint »** (ici 100 ans) est ainsi déterminé. A chacun de ces couples, une valeur de période de pic des vagues  $T_p$  est calculée à partir de la relation entre  $H_s$  et  $T_p$  avec la cambrure des vagues  $S$ . Le choix a été fait de considérer la médiane des périodes de pic des vagues simulées avec JOIN-SEA pour chacune des hauteurs significatives des vagues  $H_s$ . Concernant la direction pic des vagues  $D_p$ , une valeur unique a été évaluée pour chaque couple ( $H_s$  ;  $SWL$ ) : ces deux aspects sont présentés plus en détails par la suite.

Les paragraphes suivants précisent les détails des étapes de l'analyse :

- **description et préparation du jeu de données** ;
- **ajustement des lois de probabilités dites « marginales »** pour chaque variable ;
- **ajustement des modèles de dépendance** ;
- **simulation par méthode Monte-Carlo**, à l'aide des lois marginales et des modèles de dépendance, constitution d'un très grand nombre de triplets ( $H_s$  ;  $SWL$  ;  $T_p$ ) possédant les mêmes caractéristiques statistiques que les données observées ;
- **analyse bivariée des Extrêmes qui permet de déterminer des couples ( $H_s$  ;  $SWL$ ) d'iso-période de retour de dépassement conjoint de 100 ans.**

Une sélection de 5 combinaisons de hauteurs significatives des vagues et des niveaux d'eau avec leurs paramètres associés sera retenue pour caractériser des événements de période de retour centennale. Ces combinaisons seront imposées comme conditions au large des modèles hydrodynamiques et propagées vers le rivage permettant ainsi de calculer les niveaux marins totaux en intégrant les processus locaux liés à l'effet des vagues et la géomorphologie.

Les données de niveau d'eau utilisées sont issues du marégraphe du Grau de la Dent (cf. § 2.3.2).

Les données de vagues sont des sorties de modèle (cf. § 2.3.1).

La localisation relativement proche des différents points d'analyse (vagues vs niveaux d'eau, Figure 11) a permis une analyse en probabilités conjointes afin d'identifier les combinaisons de forçages de période de retour centennale.

### 3.1. DESCRIPTION DES DONNÉES

#### 3.1.1. Niveaux d'eau

Différents jeux de données de niveau d'eau nous ont été fournis par le CEREMA sur le littoral camarguais. Parmi ces jeux, seul celui du marégraphe du Grau de la Dent est exploitable à des fins d'analyse statistique.

Il s'agit en effet de la seule série disposant de plus de 10 ans d'observations cumulées (32,6 ans exactement). Le rapport du CETE de 2007 précise d'ailleurs que pour estimer des niveaux Extrêmes (centennaux par exemple) sur le littoral camarguais, il est nécessaire de travailler sur la série du Grau de la Dent sous forme horaire (CETE, 2007).

La série marégraphique disponible présente deux périodes disjointes de 1960 à 1983 et 1986 à 1995 (CETE, 2010). Cette série présente deux niveaux de référence différents entre la première et la deuxième période (Figure 16). Le CETE Méditerranée a procédé au recalage de la série avec un bon degré de confiance sur la période 1986-1995. La période antérieure est plus délicate à caler avec une possible sous-estimation des niveaux Extrêmes liée à l'envasement du marégraphe (CETE, 2010).

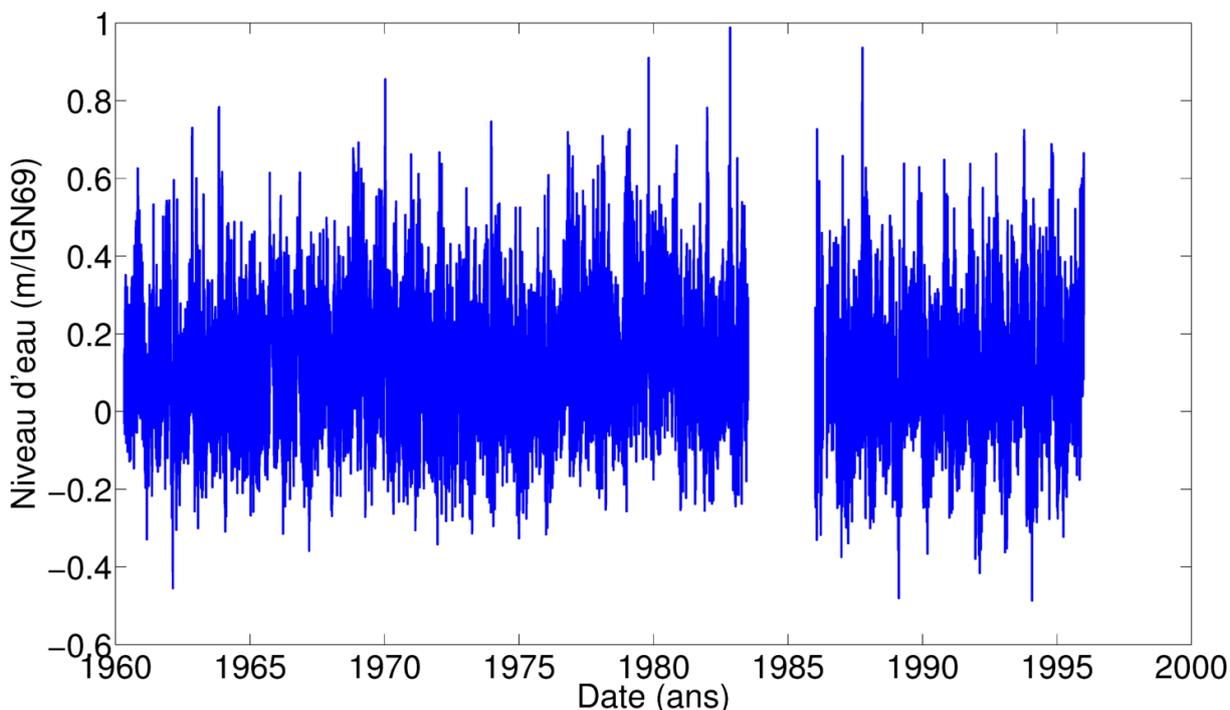


Figure 16 : Série temporelle brute issue de la numérisation des marégrammes du Grau de la Dent. La série affichée correspond à la moyenne journalière du signal papier numérisé.

La série disponible est le produit d'une numérisation de marégrammes papiers avec le logiciel NUNIEAU développé par le CETE Méditerranée. Par conséquent, on dispose à chaque pas de temps d'un minimum, d'un maximum, de la moyenne et du barycentre (Figure 17). Tandis que les max et min représentent le niveau instantané du plan d'eau, la moyenne s'apparente plus aux enregistrements des marégraphes numériques récents. En outre, la moyenne permet de s'affranchir autant que possible des effets de seiches spécifiques aux zones portuaires ou au golfe et qui ne sont donc pas représentatifs de la variation du plan d'eau à l'échelle du littoral camarguais.

Dans la suite de l'étude, c'est donc le niveau moyen de la série temporelle qui sera utilisé. Le fichier fourni présente un pas de temps horaire.

Au total, les données représentent un peu plus de 32,6 années effectives.

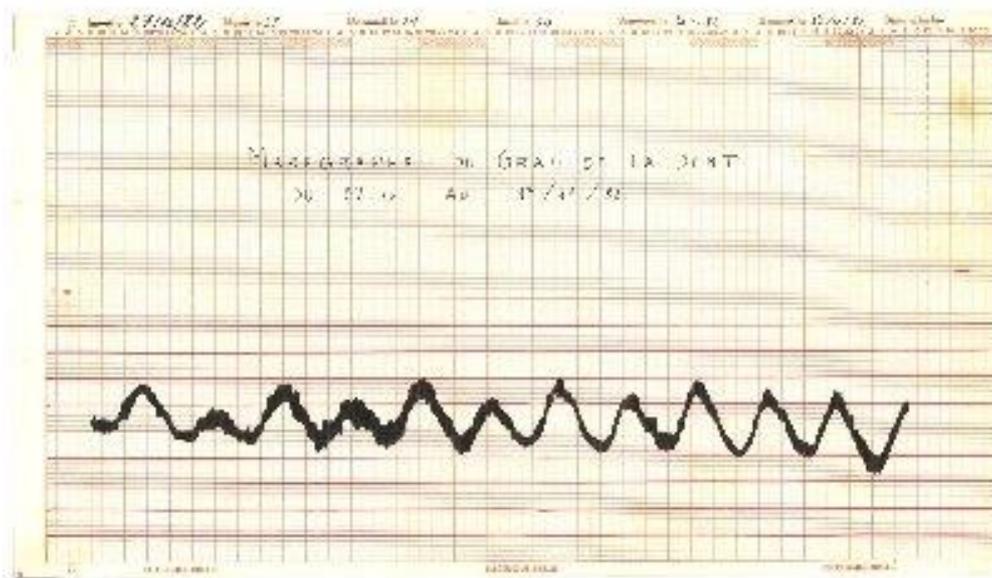


Figure 17 : Exemple de marégramme papier au Grau de la Dent (source wikhydro). L'enveloppe du signal enregistré constitue le maximum et le minimum de la série temporelle numérisée.

### 3.1.2. Vagues

Les données de vagues sont issues d'une régionalisation dynamique des simulations NOAA-CFSR-med\_10m effectuée avec le modèle SWAN (Booij *et al.*, 2004) sur une grille méditerranéenne (42°N-44°N/2°E-8°E) avec une résolution de l'ordre du kilomètre. Le point d'extraction a été choisi sur l'isobathe 50m au plus proche du point d'analyse des niveaux d'eau (point P9 : 43,2851°N-4,4732°E). La série temporelle couvre 31 ans (période 1979-2009) au pas de temps horaire.

L'analyse des données brutes de vagues indique deux directions privilégiées de provenance des vagues : le nord-ouest et le sud/sud-est (Figure 18). Le secteur sud/sud-est est également le secteur générant les hauteurs de vague significatives les plus élevées. Comme le site d'étude se situe au nord du point d'analyse des vagues, seules les vagues en provenance du secteur sud/sud-est sont conservées (secteur directionnel 100°-210°).

La Figure 19 illustre la relation hétéroscédastique entre  $H_s$  et  $T_p$  : plus les  $H_s$  sont élevées, moins la dispersion des périodes pics est grande. Ainsi, pour les vagues les plus fortes, les périodes pics se situent entre 9 et 13 s.

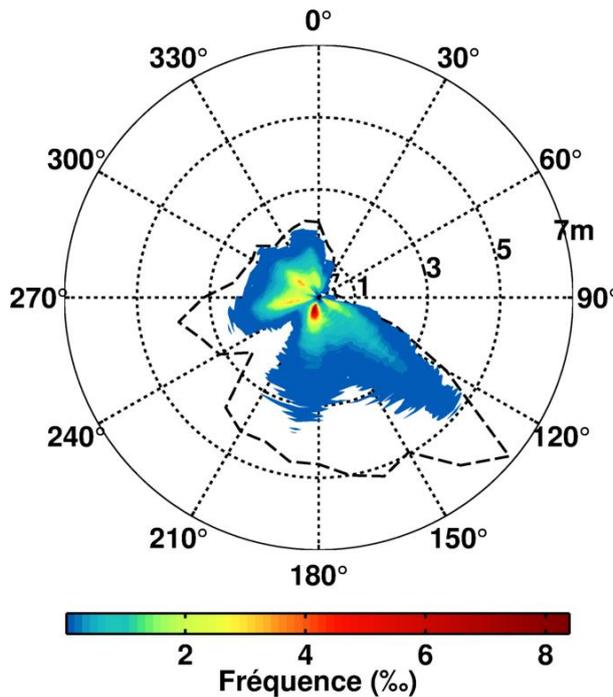


Figure 18 : Rose des vagues. La valeur de  $H_s$  se lit sur l'axe radial. L'enveloppe des points de la série temporelle est représentée par la ligne noire en pointillés. La fréquence d'occurrence des couples  $(H_s, D_p)$  est représentée par l'échelle de couleur ( $\text{min}=0,02\%$ ) avec une discrétisation de  $10^\circ$  pour  $D_p$  et 5 cm pour  $H_s$ .  $D_p$  est en convention nautique (i.e. indique la provenance des vagues).

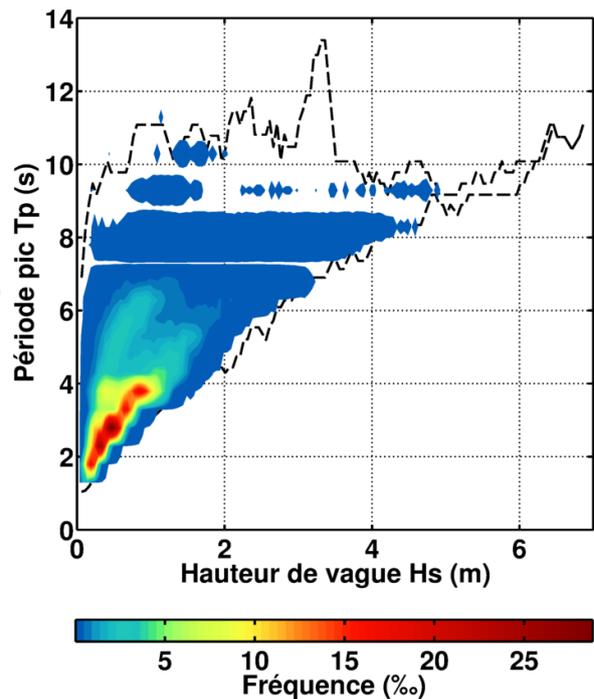


Figure 19 : Diagramme bivarié  $(T_p, H_s)$ . Même symbologie que la Figure 18. Pour la fréquence d'occurrence,  $T_p$  est discrétisée toutes les 0,5 s et  $H_s$  tous les 5 cm.

### 3.2. ANALYSE EN VALEURS EXTRÊMES BIVARIÉE

#### 3.2.1. Préparation des données

Les variables d'intérêt pour le problème posé sont : le niveau d'eau au repos (SWL), la hauteur de vague significative ( $H_s$ ), la période pic des vagues ( $T_p$ ) et la direction pic des vagues ( $D_p$ ). La variable  $T_p$  peut être transformée en la variable  $St$  (cambrure des vagues) selon la formule suivante :

$$St = \frac{2\pi H_s}{g T_p^2}$$

La cambrure a tendance à tendre vers une constante pour de fortes valeurs de  $H_s$ . Ainsi on peut considérer  $St$  comme une variable source non Extrême. Similairement,  $D_p$  n'est pas considérée comme une variable Extrême. L'analyse en valeurs Extrêmes se réduit donc aux deux variables SWL et  $H_s$ . Les co-variables  $T_p$  et  $D_p$  seront traitées au § 3.3.

Pour pouvoir utiliser les données de niveau d'eau SWL, il est nécessaire d'éliminer la tendance linéaire long-terme d'augmentation du niveau de la mer. La série a donc tout d'abord été modifiée pour prendre en compte l'élévation du niveau moyen de la mer au cours du temps. Comme indiqué dans le rapport du CETE (2010), il convient de traiter séparément les deux

périodes de la série temporelle, i.e. de 1960 à 1983 et de 1986 à 1995. La tendance linéaire sur chaque période a été retirée des données puis la série a été calée sur un niveau moyen de référence. Le niveau moyen de la dernière année hydrologique enregistrée (1<sup>er</sup> août 1994-31 juillet 1995) est de + 0,098 m /NGF. On pourrait recalculer la série par rapport à ce niveau moyen mais il n'est probablement plus d'actualité en 2015. Il a donc été décidé de rattacher la série au niveau moyen officiel le plus proche du site d'étude à savoir celui calculé par le SHOM au marégraphe de Fos-sur-Mer : + 0,136 m /NGF (SHOM, 2014).

L'analyse bivariable a été réalisée à l'aide du logiciel JOIN-SEA (HR Wallingford and Lancaster University, 1998). La méthode est décrite en détails dans l'article de Bulteau *et al.* (2012) et appliquée en Méditerranée dans l'article d'Idier *et al.* (2013) et rappelée ci-dessous (Figure 20) :

- la première étape consiste à sélectionner des événements (Hs, SWL) indépendants. Le choix a été fait de sélectionner les valeurs maximales de Hs par bloc de 3 jours avec une durée de séparation minimale de 1,5 jours entre chaque pic pour assurer leur indépendance ;
- puis, pour chaque valeur de pic de Hs, le maximum de SWL est recherché dans une fenêtre de 12 heures centrée sur le pic de Hs. A chaque valeur de Hs sont associées la période pic Tp et la direction pic Dp correspondantes ;
- on sélectionne ainsi un nombre de quadruplets (Hs, Tp, Dp, SWL) correspondant à 14 ans environ de données communes avec en moyenne 98 événements/an<sup>9</sup>.

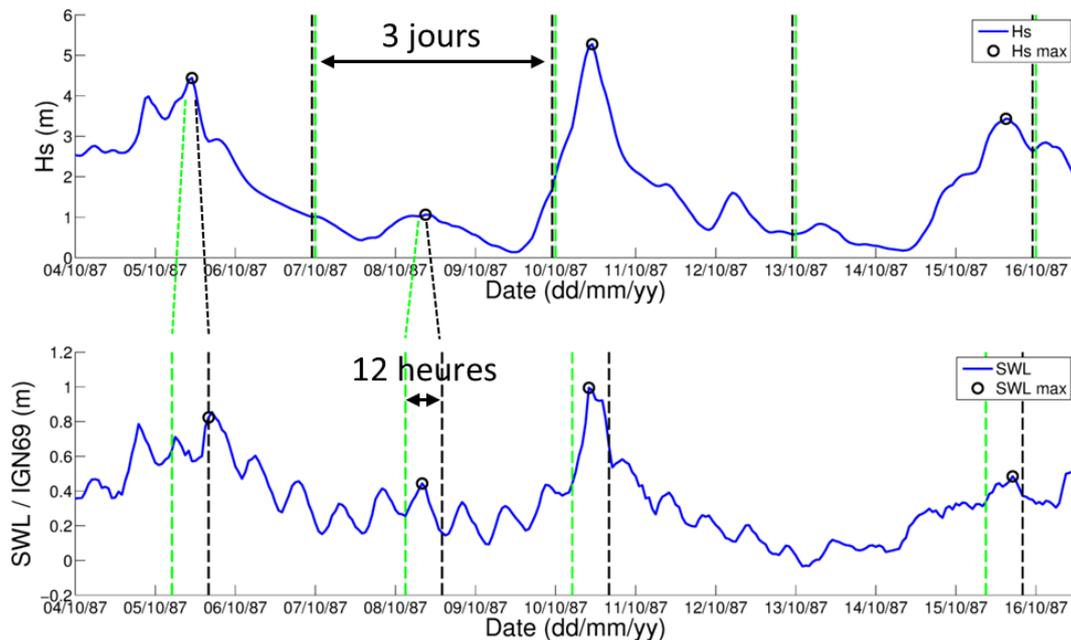


Figure 20 : Méthodologie de sélection des événements sur une chronique de Hs et SWL.

### 3.2.2. Distributions de probabilité marginales

Cette étape consiste à analyser et à ajuster la distribution individuelle (marginale) des variables suivantes : hauteur significative des vagues *Hs* et niveau d'eau *SWL*. Le modèle statistique utilisé est la loi Pareto Généralisée GPD (*Generalized Pareto Distribution*).

<sup>9</sup> Pour mémoire, seules les vagues du secteur 100°-210° sont conservées pour l'analyse.

## **Niveaux d'eau**

Il existe deux grandes familles de méthodes d'analyse en valeurs Extrêmes de niveaux d'eau, les méthodes dites directes - on traite directement le signal de niveau d'eau, et les méthodes dites indirectes - on retire la partie déterministe (marée) du signal de niveau d'eau, on traite le signal de surcote résultant puis on procède à une convolution marée-surcote pour obtenir la loi statistique finale de niveau d'eau. De manière générale, il est préférable d'utiliser une méthode indirecte lorsque c'est possible, en particulier pour les sites à fort marnage où le risque de submersion n'existe qu'à marée haute et lorsque l'on peut considérer que les surcotes de pleine mer et les pics de marée sont indépendants, car cela permet de prendre en compte dans l'analyse des combinaisons (surcotes de pleine mer-pics de marée) qui n'ont pas forcément été observées dans les données.

Le littoral camarguais est soumis à un régime microtidal qui ne justifie pas l'utilisation d'une méthode indirecte pour calculer les niveaux d'eau Extrêmes (Haigh *et al.*, 2010 ; CETMEF, 2013). Une méthode directe d'analyse en valeurs Extrêmes du signal a donc été employée.

Le calcul de la distribution marginale de SWL a été effectué à partir de la série complète du Grau de la Dent, soit 32,6 ans environ.

La loi de probabilité retenue est la loi GPD (*Generalized Pareto Distribution*). La série temporelle est d'abord ré-échantillonnée en prenant le maximum du niveau d'eau par bloc de 3 jours puis un seuil statistique est choisi au-delà duquel la loi GPD est ajustée aux données.

Le choix du seuil est effectué à l'aide de plusieurs techniques basées sur l'appréciation visuelle de graphes quantile-quantile, de « *mean residual life plots* », de « *modified scale and shape parameters plots* » et de tests statistiques tels que le test  $\chi^2$  et le test de Kolmogorov-Smirnov. Lorsque le paramètre de forme de la loi est égal à 0, la loi GPD devient la loi exponentielle.

Le paramètre de forme de la loi GPD ayant été estimé proche de 0 par trois méthodes d'ajustement (maximum de vraisemblance ML, méthode des moments MOM, méthode des moments pondérés PWM), il a été décidé de le fixer à 0 afin d'ajuster également une loi exponentielle.

Le choix du meilleur ajustement (GPD ML, GPD MOM, GPD PWM ou EXP ML) a ensuite été fait à partir de tests visuels et statistiques (Bulteau *et al.*, 2013 ; Nicolae Lerma *et al.*, 2015). Pour la variable SWL, l'ajustement retenu est la loi exponentielle (Figure 21).

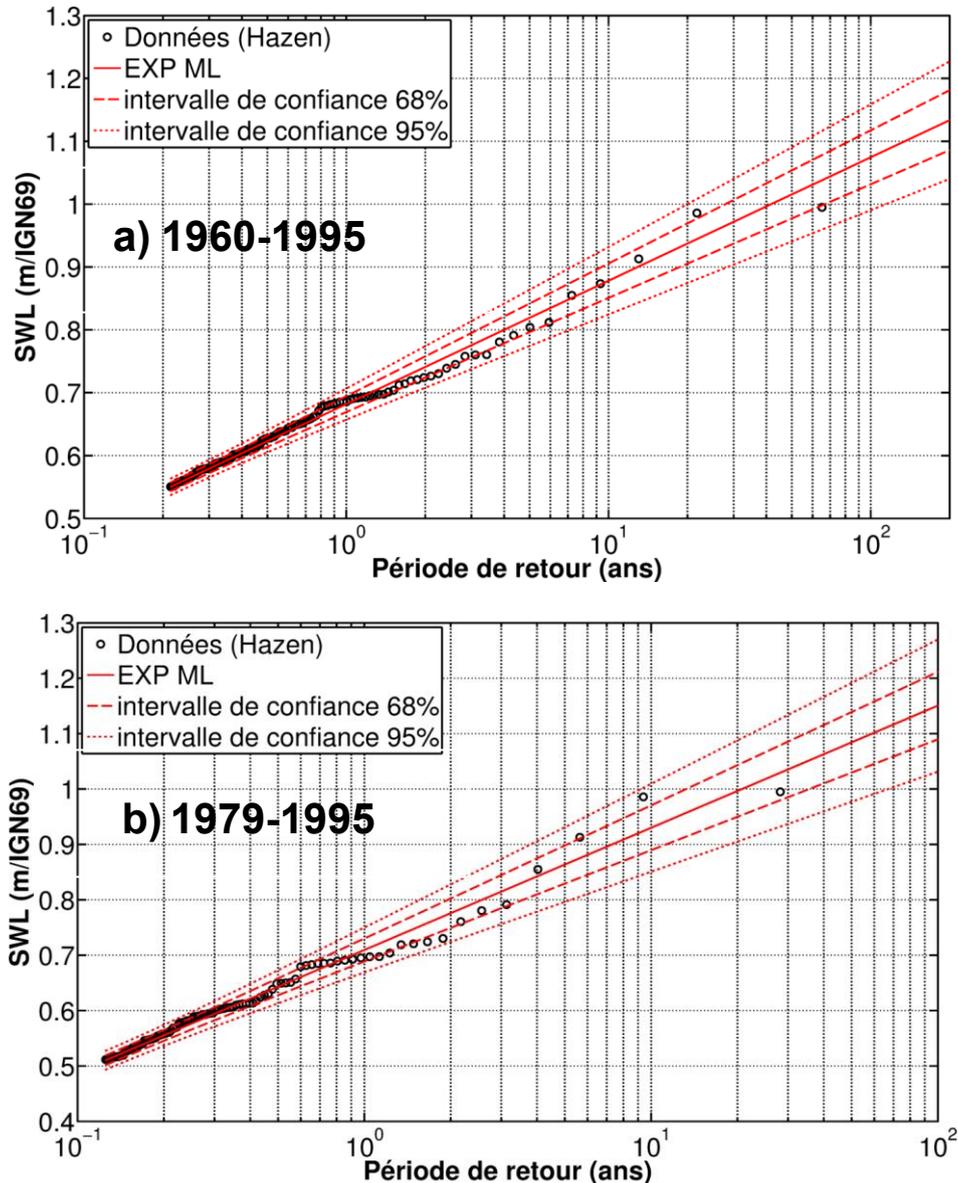


Figure 21: Loi exponentielle ajustée à la série complète du Grau de la Dent sur la période  
 a) 1960-1995 - seuil de la loi fixé à 0,55 m NGF/IGN69 et b) 1979-1995 - seuil de la loi fixé à  
 0,55 m NGF/IGN69. Le paramètre de la loi est estimé par la méthode du maximum de vraisemblance.

Les valeurs Extrêmes de SWL calculées à partir de la série complète du Grau de la Dent (1960-1995 - Figure 21a) sont inférieures à celles calculées à partir de la période commune aux données de vague (1979-1995 - Figure 21b).

La Figure 22 illustre ce résultat. Cela est dû au fait que sur la période 1960-1979, aucune valeur Extrême n'a été enregistrée (i.e. les 3 valeurs les plus fortes se sont produites pendant la période 1979-1995), ce qui peut être le reflet du caractère aléatoire du phénomène étudié ou d'une erreur de mesure.

Étant donné la mise en garde du CETE (2010) sur la première partie de la série (1960-1983), il est en effet possible que la mesure du marégraphe sur cette période soit faussée.

**Afin de ne pas sous-estimer le risque, il a été décidé de travailler avec la loi de probabilité ajustée à la période commune aux données de vague (1979-1995).**

La durée réduite de la série génère des incertitudes sur l'estimation des niveaux d'eau de période de retour élevée mais cette incertitude est considérée plus acceptable que celle générée par l'utilisation probable d'une série temporelle non homogène.

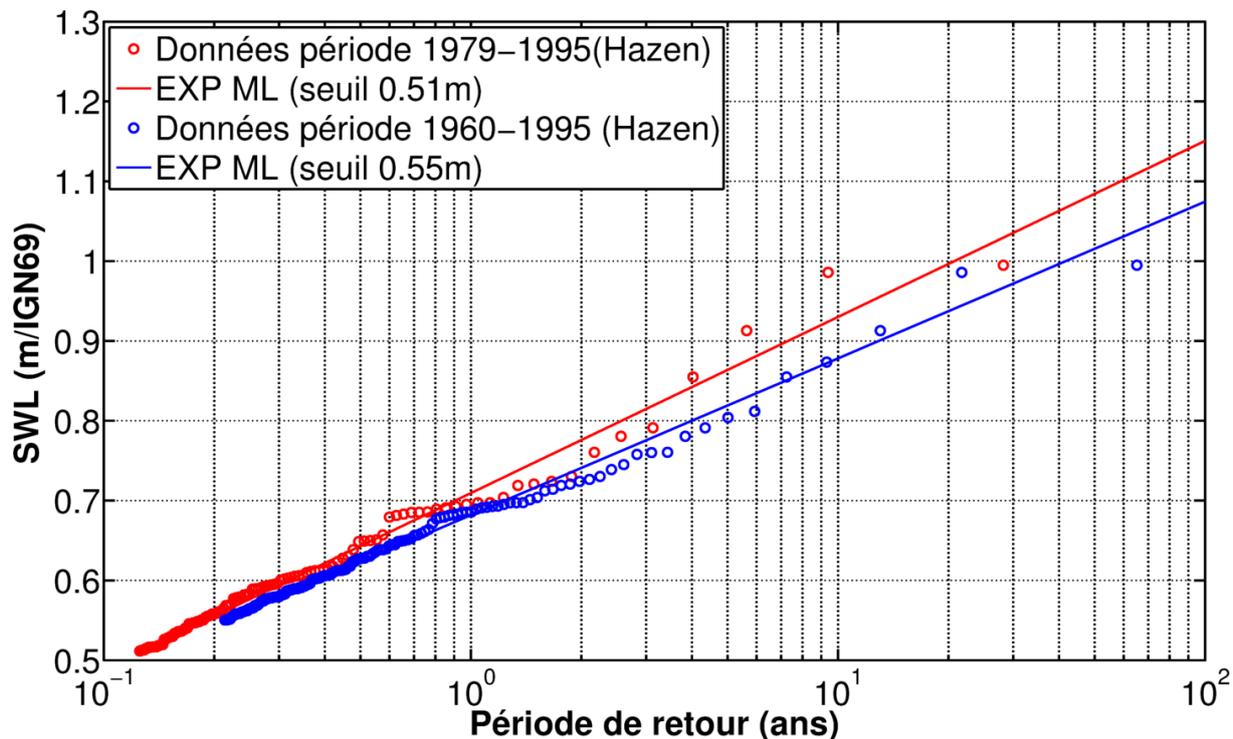


Figure 22 : Comparaison des lois exponentielles ajustées aux données de niveau d'eau du Grau de la Dent. En rouge: période commune aux données de vague (1979-1995) ; en bleu, période complète (1960-1995).

### Hauteurs significatives des vagues

Le calcul de la distribution marginale de  $H_s$  a été effectué à partir de la série complète extraite du point P9, soit 31 ans environ. Similairement au traitement des niveaux d'eau, la loi de probabilité retenue est la loi GPD (*Generalized Pareto Distribution*). La série temporelle est d'abord ré-échantillonnée en prenant le maximum de  $H_s$  par bloc de 3 jours puis un seuil statistique est choisi au-delà duquel la loi GPD est ajustée aux données. Une fois le seuil déterminé, l'ajustement de la loi GPD est réalisé selon 3 méthodes différentes (maximum de vraisemblance ML, méthode des moments MOM, méthode des moments pondérés PWM). Le paramètre de forme de la loi GPD ayant été estimé proche de 0 par trois méthodes d'ajustement, il a été décidé de le fixer à 0 afin d'ajuster également une loi exponentielle.

Le choix du meilleur ajustement (GPD ML, GPD MOM, GPD PWM ou EXP ML) a ensuite été fait à partir de tests visuels et statistiques (Bulteau *et al.*, 2013 ; Nicolae Lerma *et al.*, 2015). Pour la variable  $H_s$ , l'ajustement retenu est la loi GPD PWM (Figure 23).

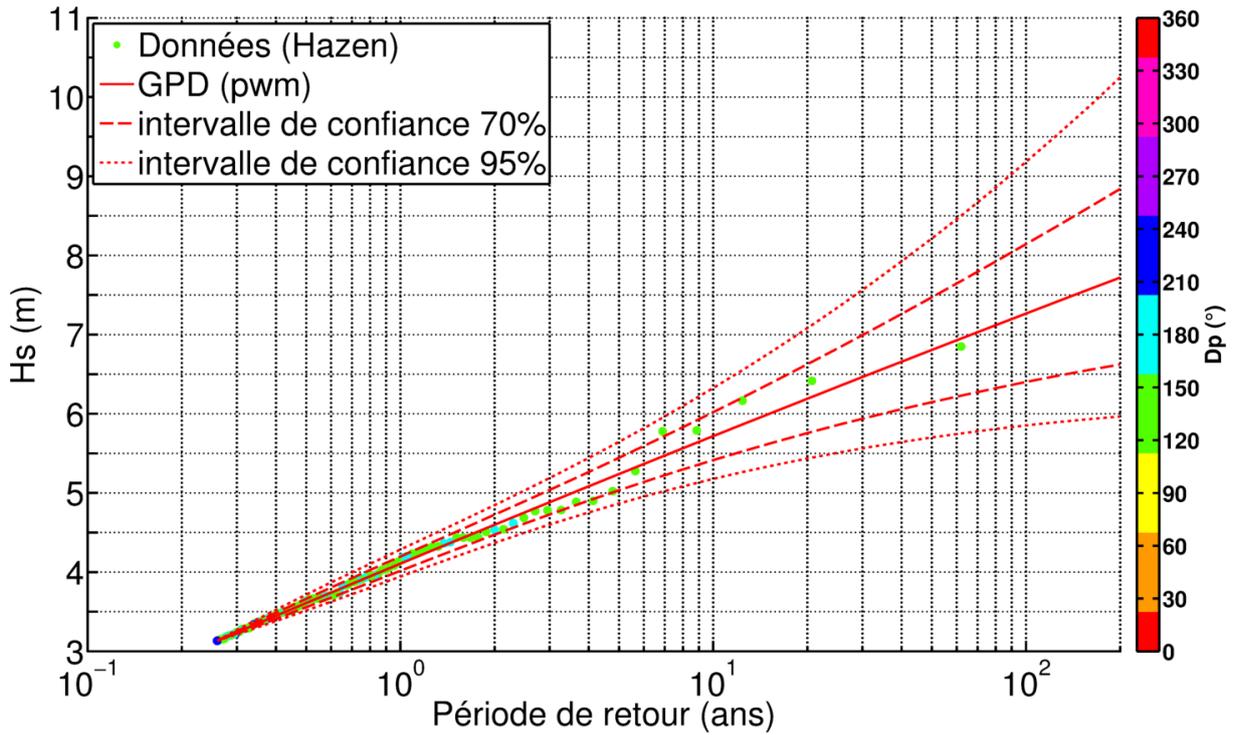


Figure 23 : Loi GPD ajustée aux données de Hs. Seuil de la loi fixé à 3,13 m. Les paramètres de la loi sont estimés par la méthode des moments pondérés. La couleur d'un point indique la direction pic correspondante au Hs.

**Synthèse des lois marginales**

Le tableau suivant (Tableau 2) rassemble les différentes valeurs remarquables des forçages Hs (hauteur significative des vagues au large) et SWL (niveau marin statique à la côte au niveau du Grau de la dent) pris de manière indépendante (ie : non conjointe) pour les périodes de retour 1 an, 10 ans et 100 ans issues des ajustements statistiques des lois marginales propre à chaque variable.

	Hs (m)	Intervalle à 95 %	SWL (m NGF/IGN69)	Intervalle à 95 %
<b>1 an</b>	4.11	3.94 - 4.28	0.71	0.67 - 0.75
<b>10 ans</b>	5.72	5.18 - 6.32	0.93	0.85 - 1.01
<b>100 ans</b>	7.27	5.85 - 9.18	1.15	1.03 - 1.27

Tableau 2 : Synthèse des valeurs statistiques d'extreme des forçages Hs et SWL pour les différentes périodes de retour indépendante.

Pour rappel, les cartographies élaborées sur les Territoires à Risques d'Inondation (TRI), prennent en compte :

- un évènement Fréquent défini par une période de retour de l'ordre de 10 à 30 ans ;
- un évènement Moyen défini par une période de retour de l'ordre de 100 à 300 ans ;
- un évènement Extrême défini par une période de retour de 1 000 à 3 000 ans.

La longueur des séries de données utilisées (de l'ordre de 30 ans) pour les ajustements ne permet pas de qualifier l'évènement Extrême de manière suffisamment précise. Ainsi, pour les hauteurs de vague significative, on observe déjà un grand intervalle de confiance à 95% pour la période de retour 100 ans.

### 3.2.3. Analyse bivariée : simulation de Monte-Carlo et détermination des probabilités de dépassement conjoint d'évènements Extrêmes

Afin d'estimer la probabilité conjointe des évènements Extrêmes (couples Hs-SWL), il est nécessaire de connaître la distribution statistique des valeurs Extrêmes des variables. Les observations sont cependant limitées et insuffisantes pour analyser cette distribution. Une approche possible repose sur la méthode Monte-Carlo qui permet de générer aléatoirement à partir des lois marginales et des modèles de dépendance un grand nombre d'observations fictives dont les caractéristiques statistiques sont identiques aux observations réelles.

La relation de dépendance entre Hs et SWL a été représentée par une copule de Gauss au-delà d'un certain seuil. Exprimé en probabilité de non dépassement, ce seuil est fixé à 0,70 pour chaque variable. Une fois les paramètres de la relation estimés, une période fictive statistique de 10 000 ans a été simulée par une méthode Monte Carlo. Deux résultats sont alors possibles : les **contours d'iso période de retour de dépassement conjoint (CDC)** et les **contours environnementaux d'iso période de retour (CE)**.

La description et les résultats relatifs à cette 2<sup>ème</sup> méthode sont présentés à titre d'information en Annexe 1.

Les contours d'iso période de retour de dépassement conjoint (dénotés CDC par la suite) sont des courbes (x,y) dans l'espace (SWL, Hs) où chaque point de la courbe a la même probabilité de dépassement conjoint :

$$P(SWL > x, Hs > y) = \frac{1}{\lambda T}$$

Avec  $\lambda$  le nombre moyen d'évènements par an (dans notre cas  $\lambda = 98$ ) et  $T$  la période de retour considérée en années. On peut ainsi identifier des couples (SWL, Hs) de période de retour de dépassement conjoint centennale (Figure 24).

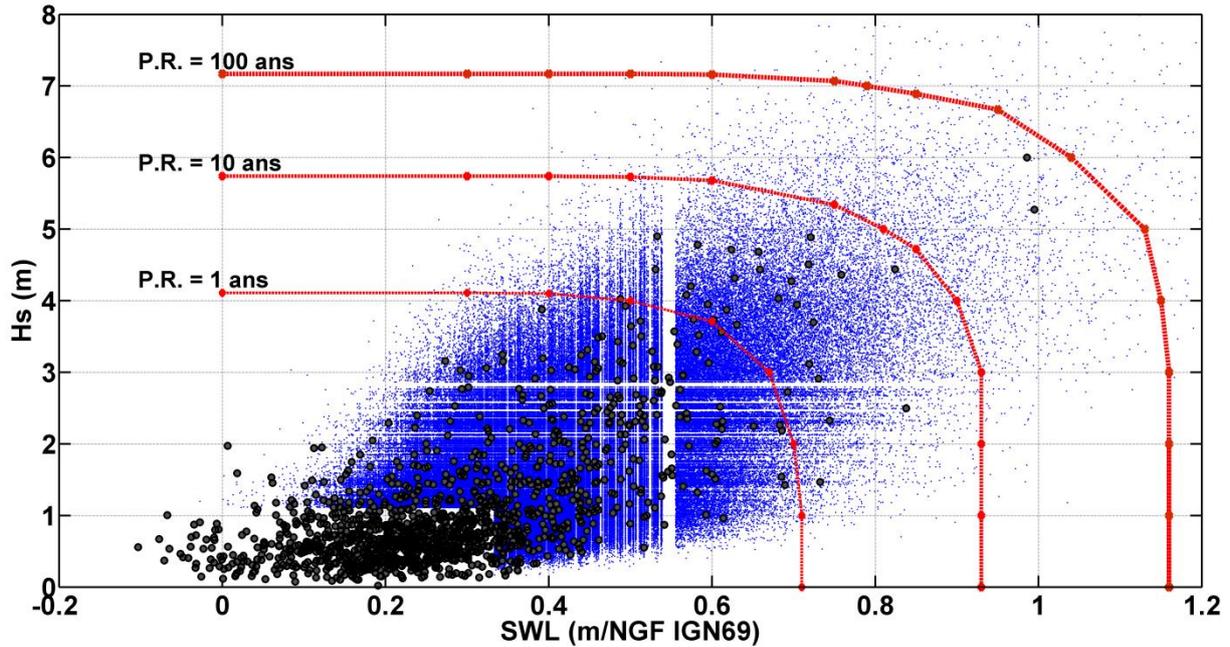


Figure 24 : Contours d'iso période de retour de dépassement conjoint pour les valeurs 1 an, 10 ans et 100 ans (courbes rouges). Les points noirs représentent les données initiales (après sélection des évènements indépendants). Points bleus : données simulés par la méthode Monte-Carlo.

Une fois identifiée le CDC centennal par exemple, il faut trouver quelle combinaison (Hs, SWL) sur la courbe génère le plus d'impacts à terre (submersion marine). Pour cela, la courbe est discrétisée en un nombre fini de combinaisons qui seront ensuite propagées à la côte à l'aide d'un modèle hydrodynamique.

### 3.3. COVARIABLES

Une fois les combinaisons hauteur significative des vagues / niveau marin (Hs, SWL) identifiées sur le contour CDC, il faut associer à chaque hauteur significative des vagues Hs, une valeur de direction pic et de période pic. Une troisième covariable doit également être considérée, il s'agit du vent, défini par sa vitesse U et sa direction (convention nautique).

#### 3.3.1. Direction pic Dp des vagues

Dans cette étude, seules les vagues du secteur directionnel 100°-210° ont été conservées. Le Tableau 3 montre la fréquence normalisée des directions pics observées par tranche de Hs dans la série complète des pics de Hs (i.e. l'échantillon qui a servi à ajuster la loi GPD sur les Hs).

		Hs (m)																									
		0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	3.75	4.00	4.25	4.50	4.75	5.00	5.25	5.50	6.00	6.25	>6.50
Dp (°)	100	0.26	0.08	0.06	0.07	0.08	0.06	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	110	0.14	0.06	0.07	0.10	0.12	0.14	0.13	0.13	0.04	0.05	0.05	0.06	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	120	0.05	0.03	0.04	0.07	0.09	0.12	0.19	0.14	0.22	0.21	0.33	0.37	0.41	0.34	0.63	0.42	0.33	0.70	0.20	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	130	0.01	0.03	0.03	0.04	0.07	0.07	0.13	0.19	0.21	0.17	0.07	0.20	0.24	0.14	0.08	0.25	0.22	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	140	0.01	0.02	0.02	0.07	0.07	0.07	0.02	0.05	0.04	0.09	0.10	0.03	0.02	0.07	0.00	0.00	0.22	0.10	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	150	0.01	0.04	0.05	0.05	0.06	0.08	0.06	0.06	0.10	0.01	0.02	0.03	0.04	0.07	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
	160	0.05	0.03	0.06	0.11	0.09	0.08	0.02	0.04	0.04	0.04	0.02	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	170	0.03	0.10	0.12	0.13	0.13	0.14	0.13	0.10	0.12	0.12	0.17	0.06	0.04	0.10	0.04	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	180	0.13	0.19	0.18	0.20	0.15	0.13	0.16	0.11	0.13	0.21	0.12	0.14	0.13	0.17	0.08	0.33	0.22	0.10	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	190	0.18	0.23	0.23	0.10	0.10	0.11	0.09	0.13	0.10	0.05	0.05	0.09	0.00	0.03	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	200	0.12	0.19	0.14	0.06	0.03	0.03	0.02	0.00	0.03	0.08	0.00	0.07	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	210	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tableau 3 : Fréquence normalisée des directions pics par tranche de Hs. La valeur de Dp la plus observée par tranche de Hs est la case la plus colorée.

On remarque que pour les fortes valeurs de Hs (> 4,75), la direction pic la plus probable est généralement 125°. C'est donc cette valeur que l'on retiendra pour les futures simulations. Néanmoins, plus les valeurs de Hs sont faibles, plus la dispersion sur les Dp augmente.

En fonction des valeurs de Hs des combinaisons issues des CE et CDC, on pourra donc être amené à tester d'autres directions pics (e.g. 185° pour 4,50<Hs<4,75).

### 3.3.2. Période pic Tp des vagues

La période pic est calculée dans JOIN-SEA à travers une relation de dépendance entre Hs et la cambrure St (cf. § 3.1). Le choix a été fait de prendre la médiane des périodes simulées par JOIN-SEA pour chacune des hauteurs significatives considérées (Figure 25).

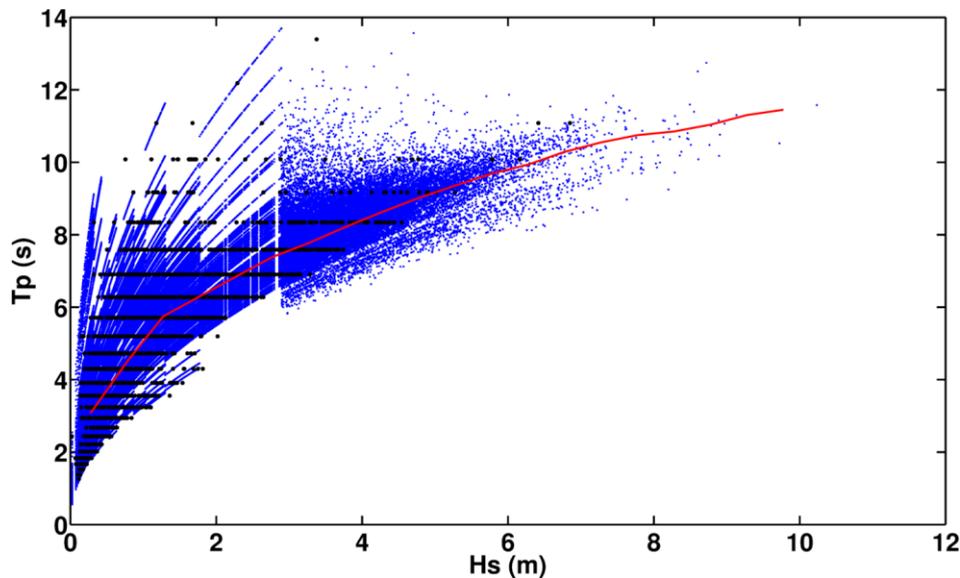


Figure 25 : Résultat de la simulation de Monte Carlo pour les couples (Hs, Tp). Points noirs : données initiales. Points bleus : données simulées. En rouge : courbe des médianes de Tp en fonction de Hs calculée à partir des données simulées.

### 3.3.3. Vent : vitesse et direction

Le vent est la dernière covariable à considérer. Plus précisément, il faut associer à chaque valeur de hauteur significative des vagues  $H_s$ , une valeur de vitesse et de direction de vent.

La Figure 26 représente les vitesses de vent en fonction de  $H_s$  pour les pics de  $H_s$  issus de la série de vague initiale<sup>10</sup>. Il s'agit de l'échantillon qui a servi pour ajuster la loi marginale de  $H_s$  (cf. § 3.2.2). Une régression linéaire a été effectuée permettant d'attribuer une valeur de vitesse de vent pour une valeur de  $H_s$  donnée.

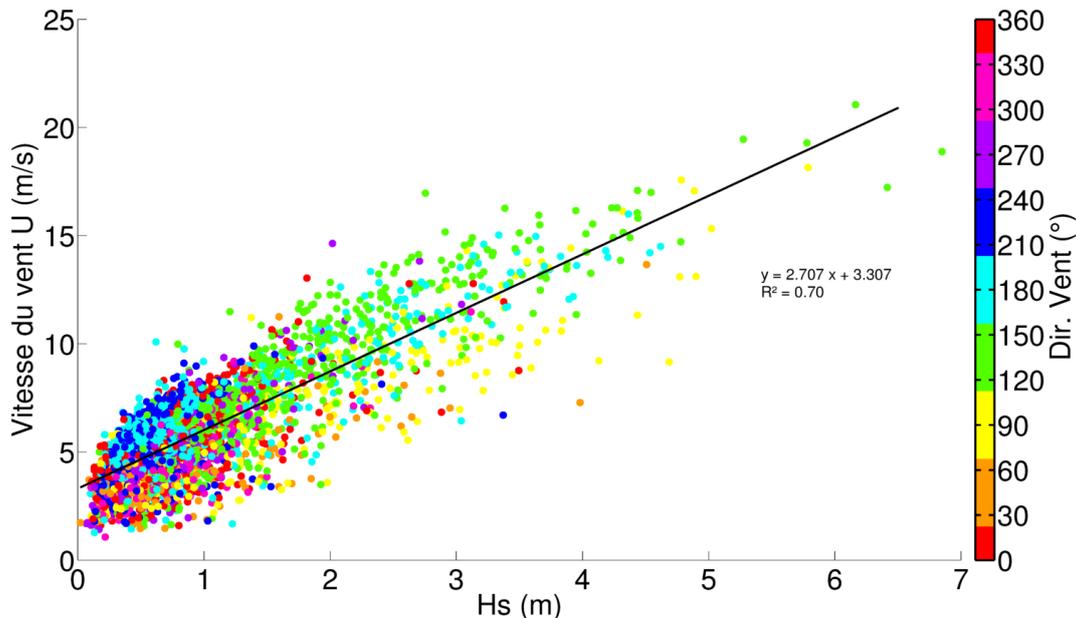


Figure 26 : Vitesse du vent  $U$  en fonction de  $H_s$  pour le point d'extraction de la base CFSR de coordonnées  $43,5^\circ\text{N} / 4,5^\circ\text{E}$ . La droite noire représente la régression linéaire calculée à partir des données. L'échelle de couleur représente la direction associée aux valeurs de  $U$ .

En outre, la Figure 26 représente également les directions associées aux valeurs de vitesse de vent. On peut ainsi voir que le secteur directionnel  $112,5^\circ$ - $157,5^\circ$  semble être celui qui couvre la plus grande plage de valeurs de  $H_s$  ; en particulier, ce secteur est associé aux plus fortes valeurs de  $H_s$  et de  $U$ . On associera donc à chaque valeur de  $U$ , la même valeur de direction que celle déterminée pour les vagues, à savoir  $125^\circ\text{N}$ .

En première approche, les vitesses du vent avaient été extraites sur le nœud de la base de données CFSR (résolution de  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ ) le plus proche du point P9 utilisé pour les vagues (Figure 27). Les coordonnées du « pixel » le plus proche étaient de  $43,5^\circ\text{N} / 4,5^\circ\text{E}$ .

Une analyse complémentaire d'un point de la base CFSR situé plus au sud par  $43^\circ\text{N} / 4,5^\circ\text{E}$  a montré que, sur la période couverte (1979-2009), les vitesses de vent étaient significativement plus fortes pour le point plus au sud. Par ailleurs, afin de valider les données de vent utilisées, elles ont été confrontées aux observations des vitesses de vent mesurées lors de la tempête de novembre 1982. La chronique des vents situés plus au sud (« pixel » rouge) est plus représentative des vitesses de vent mesurées lors des tempêtes.

<sup>10</sup> La sélection des vitesses de vent a été effectuée de la même manière que la sélection des niveaux d'eau : sélection du maximum de  $U$  dans une fenêtre temporelle de 12h centrée sur chaque pic de  $H_s$ .

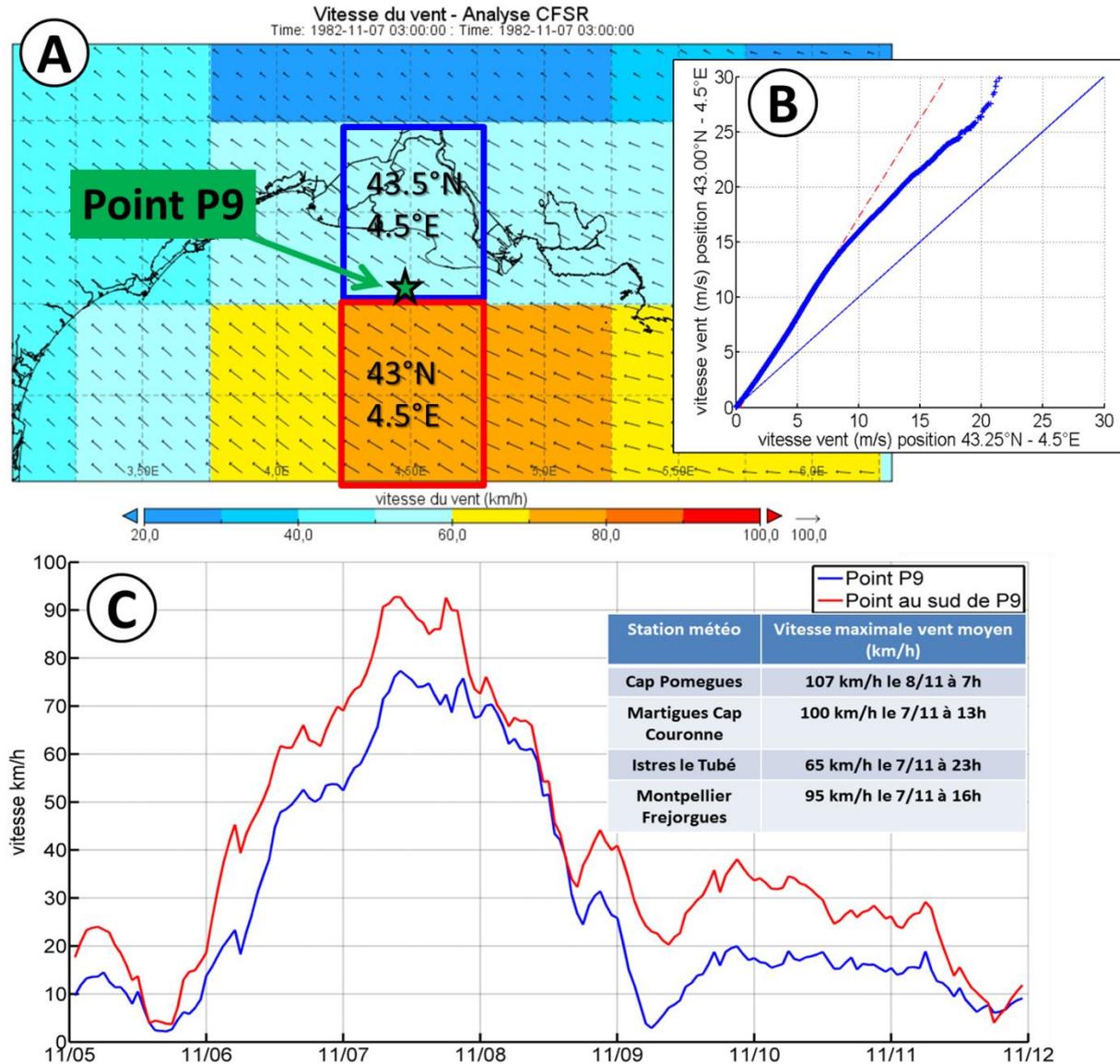


Figure 27 : A) localisation des points d'extraction (rectangle rouge et bleu) des vents de la base de donnée CFJR (résolution 0.5°x0.5°). B) diagramme quantile-quantile des vitesses de vents des 2 points extraits. C) comparaison des chroniques de vent extraites de la base CFJR (courbes rouge et bleue) avec les observations dans les stations météo les plus proches.

Cette analyse a conduit à une réévaluation de la relation entre les vitesses du vent ( $U$ ) et les hauteurs significatives des vagues ( $H_s$ ). Seules les directions de vents dont les hauteurs significatives de vagues associées sont supérieures à 4 m ont été considérées : soit les directions de vent comprises entre 67,5°N et 202,5°N

La Figure 28 représente les vitesses de vent ( $U$ ) en fonction des hauteurs significatives ( $H_s$ ) des vagues pour les pics de  $H_s$  issus de la série de vague initiale. La relation entre la vitesse du vent et la hauteur significative des vagues n'est plus linéaire : **une loi polynomiale d'ordre 3 a ici été préférée et est retenue pour définir la covariable « vitesse du vent » qui sera associée aux combinaisons hauteur de vague / niveau marin. La direction des vents retenue correspond à la moyenne des directions de vent pour les vagues supérieures à 4,5 m soit une direction de 121°N.**

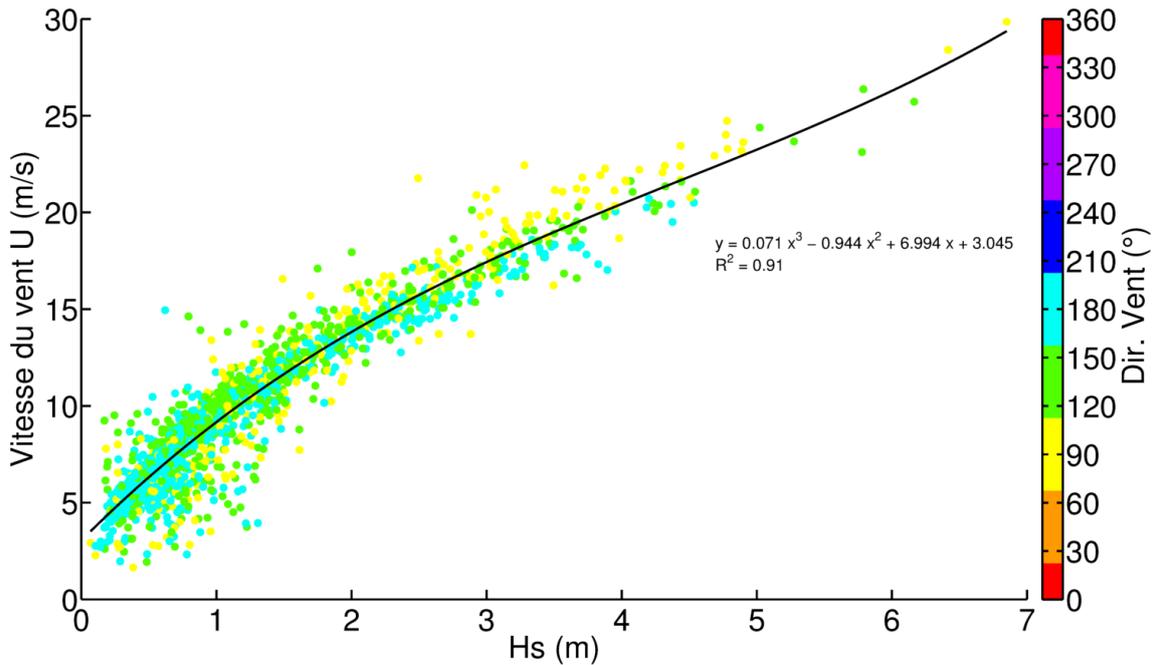


Figure 28 : Vitesse du vent  $U$  en fonction de  $H_s$  pour le point d'extraction de la base CFSR de coordonnées  $43^\circ\text{N} / 4,5^\circ\text{E}$ . La droite noire représente la régression polynomiale calculée à partir des données. L'échelle de couleur représente la direction associée aux valeurs de  $U$ .

### 3.4. SÉLECTION DES COMBINAISONS CENTENNALES

À l'issue de la détermination des courbes d'iso période de dépassement conjoint (CDC), 5 couples ( $H_s$  ; SWL) sont sélectionnées sur le contour de période de retour 100 ans. Cette sélection a été effectuée de manière à ce que les couples soient représentatifs de l'ensemble des événements naturels susceptibles de générer un niveau marin Extrême au rivage sans pour autant que les variables  $H_s$  et SWL prises individuellement soient Extrêmes. En effet, par comparaison avec les analyses statistiques mono-variables (cf. 0 loi marginales) (Tableau 2), la valeur individuelle de chaque paramètre  $H_s$  et SWL est inférieure à la valeur de référence centennale. C'est bien la combinaison de ces deux forçages qui correspond à un événement de période de retour centennale

À chacune de ces combinaisons sont associées les covariables ( $T_p$ ,  $D_p$ ,  $U$ ,  $Dir$ ) :

- une période pic des vagues ( $T_p$ ) et une intensité de vent ( $U$ ) respectivement déterminées grâce à la courbe des médianes de la cambrure des vagues (Figure 25) et à l'ajustement d'une loi entre les hauteurs significatives de vagues et les vitesses du vent (Figure 28) ;
- une direction de vent ( $Dir$ ), fixée à  $121^\circ\text{N}$  correspondant à la moyenne des directions de vent pour les vagues supérieures à  $4,5\text{ m}$  ;
- une direction pic des vagues ( $D_p$ ) égale à  $125^\circ\text{N}$  (secteur sud-est) correspondant à la direction pic la plus probable pour les  $H_s > 4,5\text{ m}$ . Par ailleurs, une analyse plus détaillée de la répartition de la fréquence des directions pic par classes de  $H_s$  (Tableau 3) amène à retenir 2 autres directions possibles de secteurs sud-sud-est ( $155^\circ\text{N}$ ) et sud ( $180^\circ$ ) qui seront simulées pour les combinaisons 4 et 5.

Dans le Tableau 4, les 7 combinaisons de forçages météo-marines ( $H_s$ ,  $T_p$ ,  $D_p$ , SWL,  $U$ ,  $Dir$ ) sont synthétisées ( 7 = 5 couples ( $H_s$  ; SWL) + 2 supplémentaires pour des directions de vagues orientées plus Sud). Ici, le niveau marin SWL est exprimé en référence au zéro NGF sans prise en compte ni de l'élévation du niveau de la mer, ni des incertitudes.

		N° combinaison - Discretisation du Contour de Dépassement Conjoint (CDC) de période de retour 100 ans						
Forçages		1	2	3	4	7 ["4 bis"]	5	6 ["5 bis"]
Vagues	Hauteur significative - Hs (m)	6.81	6.52	6.00	5.33	5.33	4.50	4.50
	Période pic - Tp (s)	10.3	10.1	9.8	9.4	9.4	8.8	8.8
	Direction pic - Dp (°N)	125 (Sud-Est)	125 (Sud-Est)	125 (Sud-Est)	125 (Sud-Est)	155 (Sud-Sud-Est)	125 (Sud-Est)	180 (Sud)
Niveau	Niveau marin - SWL (m/NGF)	0.89	0.97	1.04	1.10	1.10	1.14	1.14
Vent	Vitesse - U (m/s)	29.2	28.1	26.3	24.2	24.2	21.8	21.8
	Vitesse - U (km/h)	105	101	95	87	87	78	78
	Direction (°N)	121	121	121	121	121	121	121

Tableau 4 : Combinaisons issues de la discrétisation du contour CDC centennal.

Remarque : le terme de combinaison centennale employée pour le sextuplet (Hs, SWL, Tp, Dp, U, Dir) correspond à une liberté de formulation prise pour une raison pratique dans le texte. La période de retour conjointe de 100 ans a été calculée uniquement pour le couple (Hs, SWL) auquel sont associées la période pic et la direction des vagues, la direction et l'intensité du vent.

### 3.5. INCERTITUDES

Les incertitudes pesant sur les différents paramètres de l'analyse statistique doivent être prises en considération. Elles sont principalement liées à l'analyse des périodes de retour des niveaux d'eau et des vagues :

- l'amplitude de l'intervalle de confiance (95 %) pour des niveaux centennaux est de l'ordre de 10 à 15 cm (Figure 21) ;
- pour les vagues, la variabilité des valeurs de Hs centennale est de l'ordre de 6 à 9 m (Figure 23), avec des conséquences en termes de variabilité du *wave setup* de l'ordre de la dizaine de centimètres également.

L'analyse probabiliste intègre également une incertitude sans qu'il soit possible de la déterminer précisément.

De plus, la comparaison des données topographiques (Lidar et DGPS) réalisée précédemment montre que les données Lidar surestiment de 20 cm environ les valeurs mesurées par DGPS centimétrique, au niveau de la digue à la mer et par extension sur les points hauts du territoire, (digue et routes).

Au regard de ces éléments, il apparaît nécessaire d'introduire une marge de sécurité sur les niveaux marins de référence pour les événements qui seront joués. Le guide d'élaboration des PPRL (MEDDE, 2014) précise que les diverses sources d'incertitude à intégrer doivent être détaillées, sinon, à défaut, une marge de sécurité de + 0,25 m sera intégrée sur les niveaux marins obtenus.

En raison de la difficulté de déterminer précisément les incertitudes sur les niveaux et les vagues, la prise en compte d'un **forfait de + 0,25 m sur les niveaux**, comme marge de sécurité, apparaît la meilleure solution pour les simulations des différents événements.

### 3.6. PRISE EN COMPTE DU PHÉNOMÈNE DE SUBSIDENCE

En Camargue, l'amplitude de la subsidence a été estimée de l'ordre de 1,1 mm/an, à partir de données marégraphiques (11 cm en 100 ans, Sabatier & Suanez, 2003). Cette amplitude, dont les effets commencent à être significatif à échéance 2100, reste cependant très en deçà des incertitudes des référentiels topographiques des données lidar utilisées (Litto3D). Elle reste également subordonnée à l'incertitude pesant sur l'évaluation des niveaux d'eau par modélisation numérique.

Aussi, il est considéré que ce phénomène difficile à percevoir à l'échelle du territoire et à appréhender dans une perspective long-terme est intégré dans l'évaluation des incertitudes totales avec un forfait de + 0,25 m sur les niveaux retenus (MEDDE, 2014, cf. 2.1.2).

### 3.7. PRISE EN COMPTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Au-delà des incertitudes liées aux données disponibles, le guide d'élaboration des PPRL (MEDDE, 2014) préconise également l'incorporation de forfaits au niveau de l'aléa de référence pour prendre en compte l'élévation du niveau marin liée au réchauffement climatique global.

Ces forfaits définis par l'ONERC (2010) et repris dans le guide PPRL sont de :

- **+ 20 cm** pour la situation actuelle ;
- **+ 60 cm** pour la situation à échéance 2100.

Ces valeurs seront prises en compte dans les simulations des différents scénarios et pour chaque évènement défini.

### 3.8. DÉTERMINATION DE LA CHRONOLOGIE DE LA TEMPÊTE DE RÉFÉRENCE

#### 3.8.1. Forçages marins (niveaux et vagues)

Pour chacun des évènements qui seront simulés, il convient d'établir une chronologie de référence caractéristique d'une tempête. Cette chronologie doit être constituée d'une phase « pré-tempête » avec des conditions météo-marines « normales » (i.e. : sans agitation), puis une phase de tempête avec une accentuation des conditions sévères des forçages météo-marins et enfin d'une phase « post-tempête » de retour à la normale.

La tempête des 6, 7, 8 et 9 novembre 1982 servira de référence pour modéliser la chronologie des forçages météo-marins. Les enregistrements marégraphiques de la station du Grau de la dent et les modélisations de vagues (point P9) (cf. paragraphe 2.3) seront utilisés pour créer les forçages marins : L'évolution des paramètres de niveau marin, de hauteur significative des vagues, et de vitesse du vent ont été normalisés. **Ces chroniques normalisées seront ensuite multipliées par les valeurs des évènements de référence.**

L'intégration de l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique sera effectuée par addition du forfait (respectivement + 0,2 m et + 0,6 m aux échéances actuelle et 100 ans) à l'ensemble du signal.

La durée des simulations sera de 8 jours sur la base de la chronologie de la tempête de novembre 1982 (Figure 29) :

- les journées J1 et J2 (4 et 5 novembre) constituent la phase « pré-tempête » ;

- les journées J3, J4, J5 et J6 (6,7,8 et 9 novembre) sont les 4 jours de la tempête ;
- les journées J7 et J8 (10 et 11 novembre), sont les journées « post-tempête ».

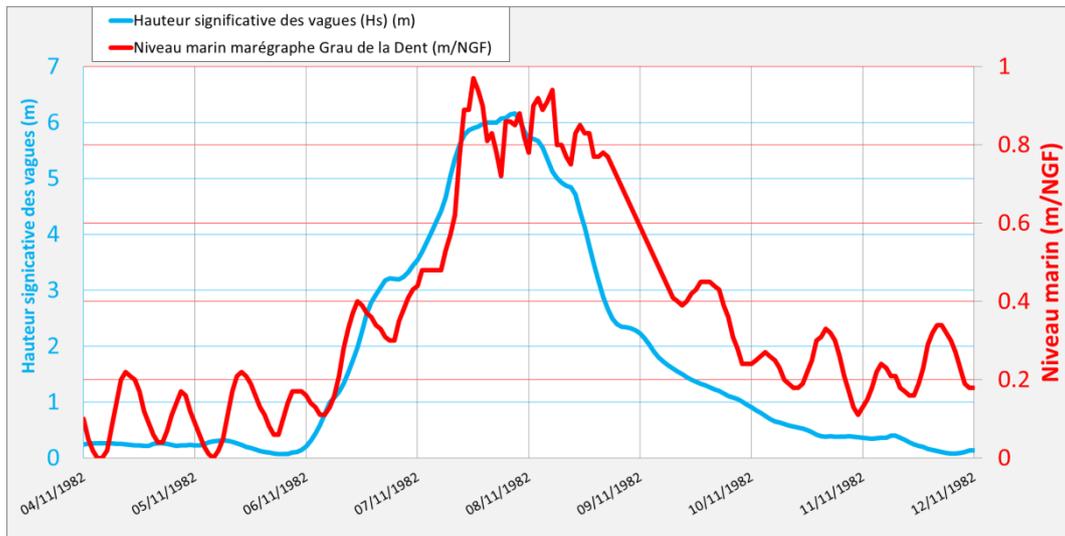


Figure 29 : Chroniques des paramètres de niveau de la mer au Grau de la Dent (rouge), de hauteur significative des vagues (point au large P9 issu des modélisations de vagues) (bleu) du 4 au 12 novembre 1982.

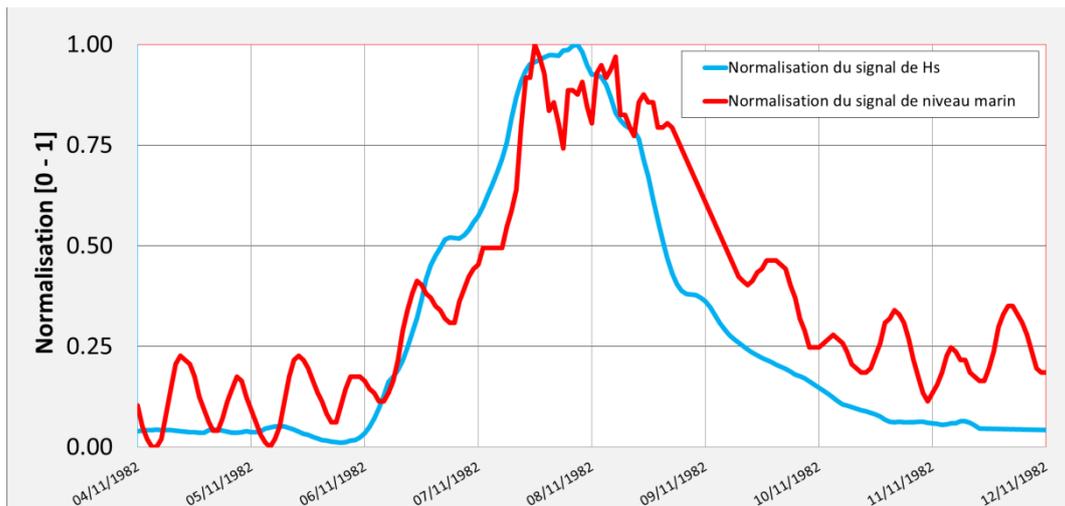


Figure 30 : Normalisation du niveau marin (rouge) et de la hauteur significative des vagues (bleu).

Par ailleurs, lors de la phase de validation du modèle, les chroniques des conditions météorologiques (vagues, vents) de la tempête du 6 au 11 novembre 1982 seront également utilisées pour forcer les modèles.

### 3.8.2. Forçage fluvial

Afin de garantir un écoulement du Rhône et du Petit-Rhône lors de la simulation, une chronologie d'une crue caractéristique avec un débit maximum proche des 5 000 m<sup>3</sup>/s a été retenue. Cette valeur de 5 000-6 000 m<sup>3</sup>/s à la station de Beaucaire-Tarascon correspond aux premiers débordements observables au niveau de l'embouchure du Rhône, et donc au déclenchement du seuil vigilance Jaune. [Source SPCGD *Service de Prévision des Crues Grand Delta*]. L'hydrogramme utilisé correspond à la crue du 5 au 8 janvier 2014 enregistrée à la station de Beaucaire-Tarascon (Figure 31).

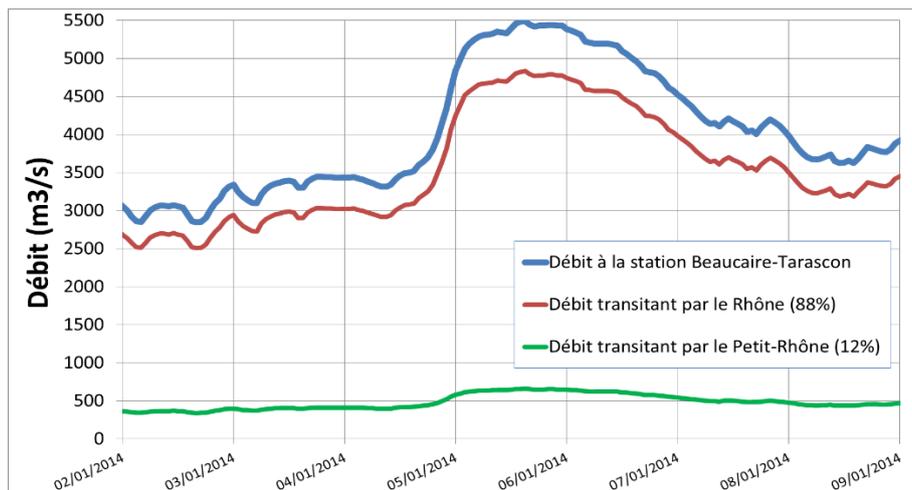


Figure 31 : Hydrogramme de la crue de janvier 2014 (station de Beaucaire Tarascon, SPC Grand Delta).

La répartition à la diffluence au niveau de la ville d'Arles est de 12 % pour le Petit-Rhône et de 88 % pour le Rhône (Figure 32). La répartition des débits sera injectée dans le modèle sur la partie terminale aval proche des embouchures respectives du Rhône et du Petit-Rhône. Lors des simulations, le pic de la crue sera mis en phase avec les forçages marins (niveau/vagues).

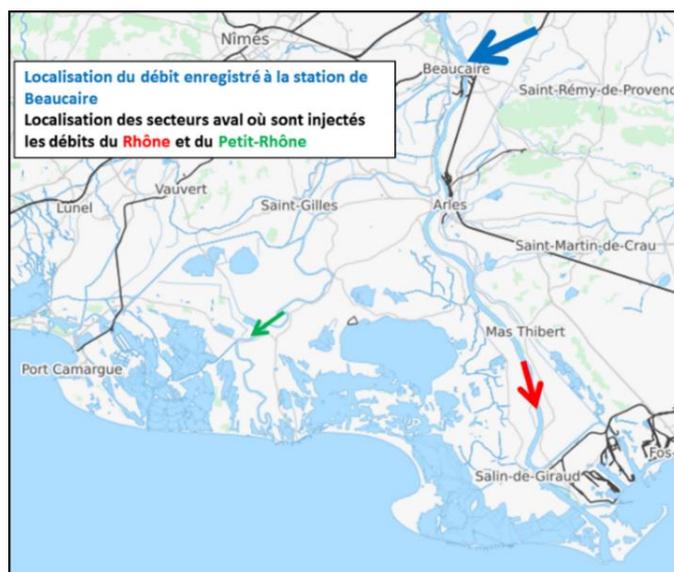


Figure 32 : Points d'injection des débits du Rhône dans le modèle.

### 3.9. MÉTHODOLOGIE DE DÉFINITION DES FORÇAGES DES ÉVÈNEMENTS

Les paragraphes suivants rapportent comment seront définies les conditions retenues pour chacun des événements Fréquent, Moyen et Extrême.

Dans les paragraphes suivants, il s'agit de présenter les valeurs de référence des forçages retenus pour les vagues, niveaux et vents qui seront ensuite multipliés par les chroniques normalisées de référence établies au 3.8.1.

*Remarque* : dans les tableaux ci-dessous, les valeurs du forçage « niveau marin » intègrent bien les + 25 cm liés aux incertitudes mais n'intègrent pas la surélévation du niveau de la mer sous l'effet du changement climatique (respectivement de + 20 cm et + 60 cm pour les échéances actuelle et 2100). En effet, la valeur du forçage « niveau marin » sera multiplié par

la chronologie du marégramme normalisé (cf. 3.8.1), et l'intégration de l'élévation du niveau de la mer sera ensuite effectuée par l'addition de la surélévation (de + 20 cm ou + 60 cm) à l'ensemble du signal.

### 3.9.1. Évènements fréquents

À partir du contour d'iso-période de retour de dépassement conjoint (CDC) pour la période de retour 10 ans (Figure 33), le point d'inflexion de la courbe a été retenue en privilégiant l'intensité des hauteurs de vagues (Hs) par rapport au niveau marin (SWL) ; soit le point de coordonnées Hs = 4,7 m et SWL = 0,86 m NGF/IGN69 (sans prise en compte des incertitudes).

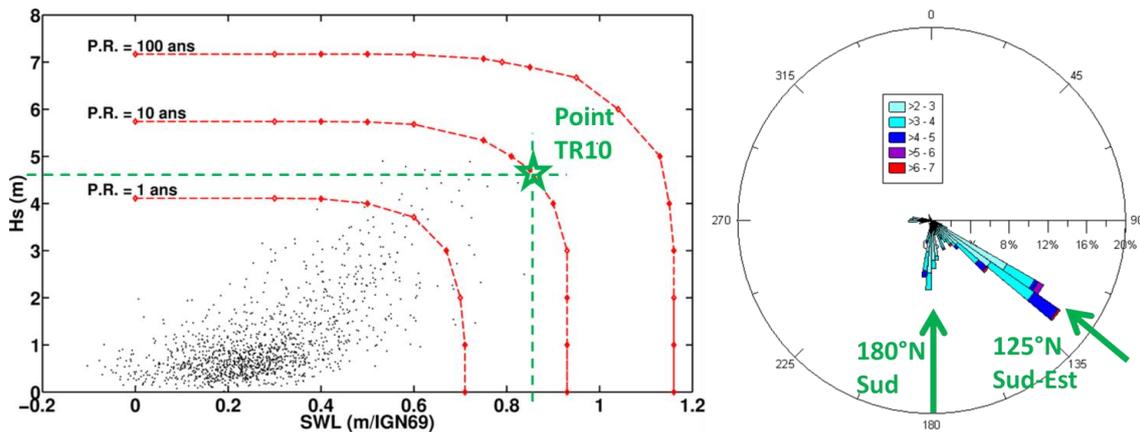


Figure 33 : Choix de la combinaison niveau/vague pour l'évènement fréquent (période de retour de dépassement conjoint 10 ans) et répartition des directions moyennes de vagues par classes de Hs (m) : les 2 directions principales sont indiquées.

L'analyse de la répartition de la direction moyenne des vagues par classes de Hs maximal lors des événements de tempêtes a permis de définir 2 directions possibles pour les 2 événements fréquents (ie : 1 évènement fréquent dupliqué avec 2 orientations des vagues) : (1) de provenance de secteur sud-est (125°N) et (2) de provenance de secteur sud (180°N).

Les valeurs retenues sont synthétisées dans le tableau ci-dessous (Tableau 5) :

		N° combinaison - Discrétisation du Contour de Dépassement Conjoint (CDC) de période de retour 10 ans	
Forçages		1	2
Vagues	Hauteur significative - Hs (m)	4.70	4.70
	Période pic - Tp (s)	9	9
	Direction pic - Dp (°N)	125 (Sud-Est)	180 (Sud)
Niveau	Niveau marin - SWL (m/NGF)	0.86	0.86
	Niveau marin - SWL (m/NGF) + incertitudes (25 cm)	1.11	1.11
Vent	Vitesse - U (m/s)	22.4	22.4
	Vitesse - U (km/h)	81	81
	Direction (°N)	121	121

Tableau 5 : Synthèse des conditions de forçages retenus pour les 2 évènements Fréquents. La surélévation de +0.2 m liée au changement climatique n'est ici pas prise en compte dans le forçage « niveau marin ».

**Remarque :** une surélévation de + 20 cm du niveau moyen de la mer sera intégrée pour une première prise en compte du changement climatique (à titre indicatif le niveau au large sera de 1,11+0,20 = 1,31 m NGF/IGN69).

### 3.9.2. Évènements Moyen Actuel et Moyen 2100

- **Évènement Moyen Actuel**

L'évènement Moyen Actuel au large du territoire de la Camargue sera **caractérisé par 7 combinaisons de forçages météo-marins** et qui sont représentatives de l'ensemble des évènements centennaux (Tableau 6).

À l'issue de la propagation de ces combinaisons depuis le large jusqu'à la submersion, la combinaison la plus impactante en terme d'inondation sera retenue comme l'évènement Moyen Actuel (dit de référence). Il sera démontré dans la suite du rapport (cf. partie 7) que la combinaison C7 est la combinaison la plus impactante.

Remarque : les niveaux marins des 7 combinaisons prendront en compte une surélévation de + 20 cm du niveau moyen de la mer pour une première prise en compte du changement climatique (*à titre indicatif le niveau au large pour la combinaison n° 7 sera ainsi de  $1,35 + 0,20 = 1,55$  m NGF/IGN69*).

- **Évènement Moyen 2100**

Les forçages de la combinaison la plus impactante déterminés pour l'évènement Moyen Actuel seront utilisés pour la définition de l'évènement Moyen 2100.

Remarque : une surélévation de + 60 cm du niveau moyen de la mer sera intégrée pour une prise en compte du changement climatique à l'horizon 2100 (*à titre indicatif, le niveau au large pour la combinaison n° 7 sera donc de  $1,35 + 0,60 = 1,95$  m NGF/IGN69*).

Forçages		N° combinaison - Discrétisation du Contour de Dépassement Conjoint (CDC) de période de retour 100 ans						
		1	2	3	4	7 ["4 bis"]	5	6 ["5 bis"]
Vagues	Hauteur significative - Hs (m)	6.81	6.52	6.00	5.33	5.33	4.50	4.50
	Période pic - Tp (s)	10.3	10.1	9.8	9.4	9.4	8.8	8.8
	Direction pic - Dp (°N)	125 (Sud-Est)	125 (Sud-Est)	125 (Sud-Est)	125 (Sud-Est)	155 (Sud-Sud-Est)	125 (Sud-Est)	180 (Sud)
Niveau	Niveau marin - SWL (m/NGF)	0.89	0.97	1.04	1.10	1.10	1.14	1.14
	Niveau marin - SWL (m/NGF) + incertitudes (25 cm)	<b>1.14</b>	<b>1.22</b>	<b>1.29</b>	<b>1.35</b>	<b>1.35</b>	<b>1.39</b>	<b>1.39</b>
Vent	Vitesse - U (m/s)	29.2	28.1	26.3	24.2	24.2	21.8	21.8
	Vitesse - U (km/h)	105	101	95	87	87	78	78
	Direction (°N)	121	121	121	121	121	121	121

Tableau 6 : Synthèse des conditions de forçages retenus pour les 7 combinaisons correspondantes à l'évènement Moyen Actuel au large. Les valeurs de niveau marin - SWL dans le tableau n'intègrent pas les surélévations de + 0,20 m pour l'échéance actuelle et de + 0,6 m pour l'échéance 2100, liée au changement climatique.

### 3.9.3. Évènement Extrême

La définition de l'évènement Extrême est basée sur les analyses statistiques des variables hauteur significative des vagues et niveau marin prise de manière indépendante.

Pour être en cohérence avec les hypothèses prises à l'échelle de la façade méditerranéenne lors de la cartographie de la submersion marine dans le cadre de la Directive Inondation (DREAL LR et CETE, 2013), les valeurs retenues sont les bornes supérieures des intervalles de confiance à 70 % correspondant à la période de retour 1 000 ans sont extraites des lois marginales pour la hauteur significative des vagues et le niveau marin établies ci-dessous (Figure 34 et Figure 35).

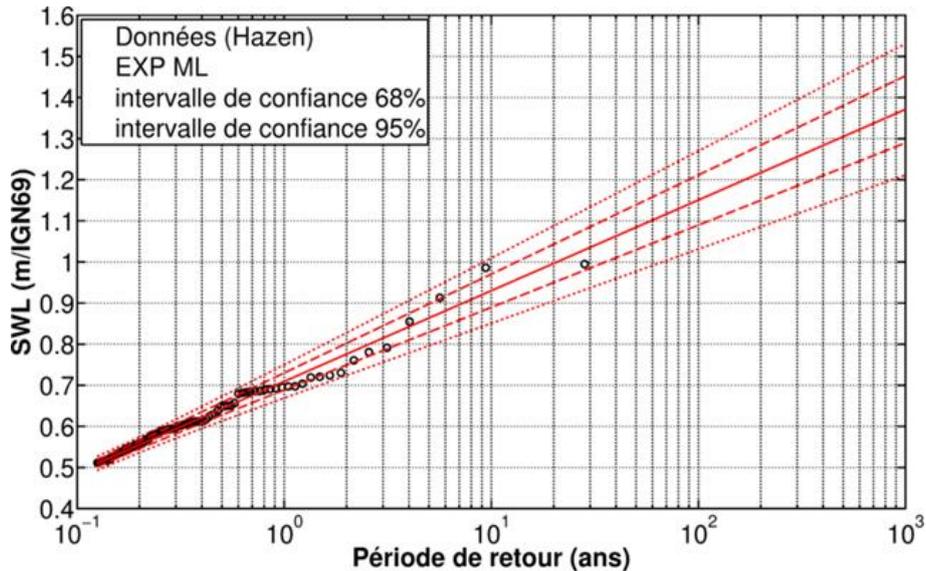


Figure 34 : Loi exponentielle des niveaux marins Extrêmes ajustée à la série complète du Grau de la Dent sur la période 1979-1995 (seuil de la loi fixé à 0,55 m NGF/IGN69). Le paramètre de la loi est estimé par la méthode du maximum de vraisemblance.

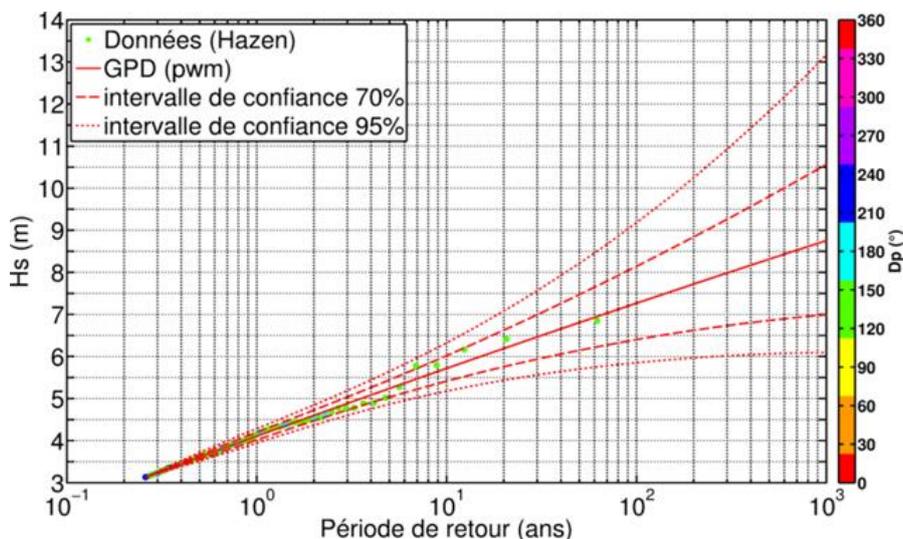


Figure 35 : Loi GPD ajustée aux données de Hs. Seuil de la loi fixé à 3,13 m. Les paramètres de la loi sont estimés par la méthode des moments pondérés. La couleur d'un point indique la direction pic correspondante au Hs.

Concernant la vitesse du vent, il s'agit d'une valeur « Extrême » extrapolée de la loi polynomiale établie dans le paragraphe 0.

Remarque : une surélévation de + 20 cm du niveau moyen de la mer sera intégrée pour une première prise en compte du changement climatique. Cette prise en compte de + 20 cm est conforme aux recommandations de la définition de l'évènement « Extrême » ou « exceptionnel » dans le cadre de la réalisation des TRI ( à titre indicatif le niveau au large sera de  $1,70 + 0,20 = 1,90$  m NGF/IGN69).

Les valeurs retenues pour l'évènement Extrême sont synthétisées dans le tableau ci-dessous :

Forçages		Valeurs des bornes supérieures des intervalles de confiance à 70% des lois marginales (Hs et SWL) pour une période de retour de 1000 ans
		<b>1</b>
Vagues	Hauteur significative - Hs (m)	10.50
	Période pic - Tp (s)	11.5
	Direction pic - Dp (°N)	125 (Sud-Est)
Niveau	Niveau marin - SWL (m/NGF)	1.45
	Niveau marin - SWL (m/NGF) + incertitudes (25 cm)	<b>1.70</b>
Vent	Vitesse - U (m/s)	40
	Vitesse - U (km/h)	144
	Direction (°N)	121

Tableau 7 : Synthèse des conditions de forçage retenus pour l'évènement Extrême. La surélévation de + 0,2 m pour l'échéance actuelle liée au changement climatique n'est ici pas prise en compte dans le forçage « niveau marin ».



## 4. Élaboration du modèle de submersion

Une plateforme de modélisation reposant sur l'exploitation de codes numériques de vagues et de niveaux d'eau-courants a été mise en place afin de représenter la **propagation des événements de référence et des scénarios associés** depuis le large jusqu'à terre et obtenir ainsi la dynamique de la submersion marine :

- **par débordement** (principal type de submersion intervenant sur le littoral camarguais) ;
- **par rupture d'ouvrage** (avec une prise en compte du comportement des ouvrages de protection côtière et hydraulique) ;
- **par franchissement de paquets de mer** au niveau du front de mer des Saintes-Maries-de-la-Mer.

### 4.1. PLATEFORME DE MODÉLISATION

#### 4.1.1. Modèle hydrodynamique et de submersion par débordement

Une modélisation chaînée (Figure 36, Figure 37 et Figure 38) du modèle de vagues WW3 et du modèle hydrodynamique MARS-2DH est mise en place avec une résolution d'environ 20 m proche du rivage et à terre pour simuler la submersion marine.

Ce chainage **MARS-2DH/WW3** permet :

- ⇒ de calculer les niveaux d'eau et les courants sur l'ensemble du domaine et plus spécifiquement à la côte de prendre en compte les interactions vagues-niveaux-courants et de calculer la surcote induite par le déferlement des vagues (*wave setup*) et les courants associés aux vagues ;
- ⇒ de prendre en compte l'influence du vent sur les niveaux côtiers et sur étangs ;
- ⇒ de prendre en compte le débit entrant du Rhône ;
- ⇒ de calculer la submersion par débordement ;
- ⇒ d'intégrer les débits entrants issus des volumes d'eau franchissant (paquets de mer) calculés par le module de franchissement implanté sur le secteur des Saintes-Maries-de-la-Mer.

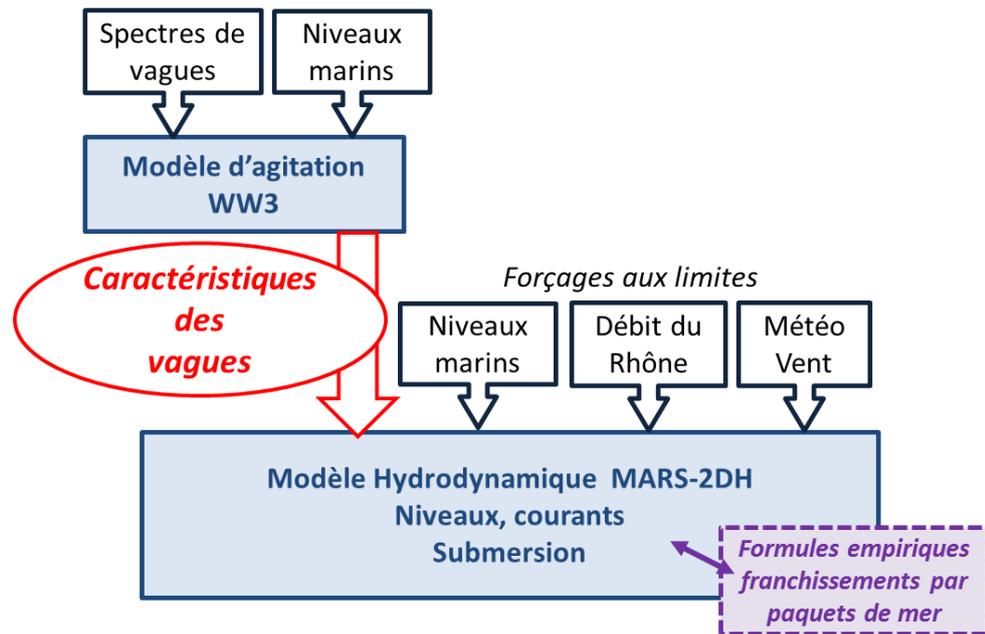


Figure 36 : Schématisation de stratégie de modélisation utilisée.

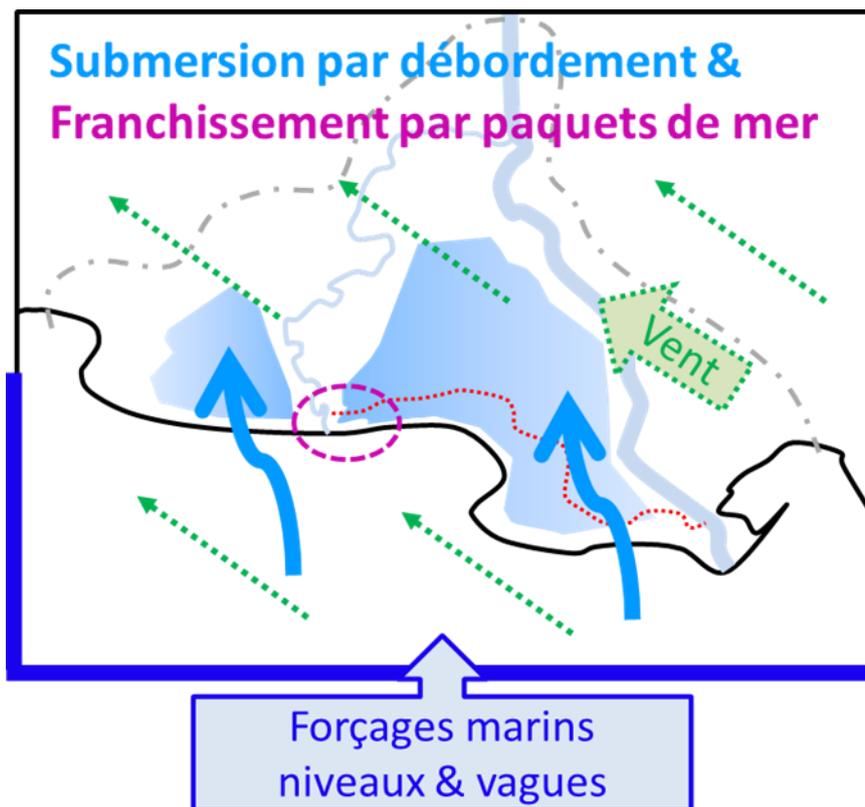


Figure 37 : Illustration schématique du modèle Camargue : les forçages météo (flèches vertes), marins (traits bleus) et fluvial (linéaire « bleu ciel » du Rhône et du petit-Rhône), le linéaire côtier (trait noir) et les phénomènes de submersion représentés (flèches bleues pour les débordements et cercle mauve pour les franchissements).

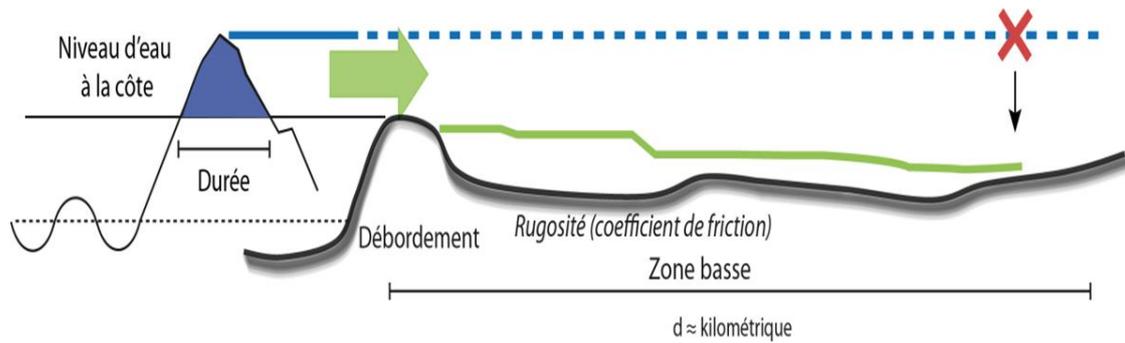


Figure 38 : Schéma de principe de la méthodologie employée pour la propagation de la submersion marine : le niveau marin de référence (bleu continu) n'est pas simplement projeté sur la topographie (bleu pointillé) mais bien propagé suivant une dynamique de submersion (vert).

#### 4.1.2. MARS-2DH (version 9.06) : modèle hydrodynamique de niveaux et courants

Le code de calcul MARS (Lazure et Dumas, 2007) permet de modéliser l'hydrodynamique (niveau, courants) à l'échelle régionale à partir de composantes de marée et de données de météorologie. Les processus représentés par le modèle sont uniquement liés aux ondes longues (marée et surcote atmosphérique), les ondes courtes (houle et clapot) ne sont pas représentées.

Le modèle est utilisé dans sa version 2DH. Il résout les équations de Saint-Venant qui régissent les écoulements à surface libre en deux dimensions sur le plan horizontal, après une intégration verticale des équations de Navier Stokes.

Le modèle MARS-2DH, chaîné au modèle de vagues WW3, permet de prendre en compte les interactions vagues-niveaux-courants et de calculer la surcote induite par le déferlement des vagues (*wave setup*).

MARS-2DH calcule donc, en chaque point du maillage du domaine d'étude (espace) et à chaque instant de la simulation (temps), la vitesse et la direction de courants moyennés sur la verticale, ainsi que les hauteurs d'eau. Ces grandeurs sont calculées en fonction :

- de conditions aux limites imposées au bord du domaine de calcul (frontières). Ces conditions aux limites peuvent contenir les effets de la marée et de la météorologie ;
- de conditions de forçages météorologiques (vent et pression) appliquées en chaque nœud du modèle.

La résolution des équations se fait :

- par discrétisation spatiale selon une méthode aux différences finies. Ceci revient à calculer sur un domaine les grandeurs physiques en chaque point d'un maillage régulier en longitude et latitude ;
- par discrétisation temporelle : les variables (niveau d'eau et vitesse/direction du courant) sont calculées à chaque pas de temps du modèle.

En ce qui concerne plus particulièrement la modélisation de la submersion par débordement, MARS -2DH prend en compte :

- la gestion des bancs découvrants (recouvrement/découvrement du sol par l'eau) ;
- du frottement spatialisé sur le fond ;
- les débits entrants (rivières, fleuves)

Le BRGM a utilisé et développé dans MARS-2DH de nouvelles fonctionnalités capables de :

- simuler les écoulements torrentiels suite à des ruptures de digue avec formation de brèches ;
- prendre en compte le fonctionnement des structures hydrauliques (buses, seuils hydrauliques, écluses) par le biais de lois hydrauliques intégrées dans le modèle ;
- considérer les débits entrants suite à des franchissements de paquets de mer.

#### 4.1.3. WW3 (version 4.18) : modèle de propagation des vagues

Le code WW3 résout l'équation de conservation de la densité d'action des vagues suivant des grilles de calculs structurées (différences finies) ou non structurées (éléments finis). Il est capable de reproduire les différents processus liés aux vagues depuis le large jusqu'au rivage comme la génération par le vent, la propagation dans l'espace (réfraction, interactions avec les courants, ...) et la dissipation (frottement au fond, déferlement, etc.).

Dans cette étude, WW3 a été utilisé pour propager les vagues depuis une profondeur d'environ 50 m, jusqu'au rivage (profondeur supérieure à 0,3 m). La contrainte principale pour ce modèle est de reproduire correctement les caractéristiques des vagues dans la zone de déferlement afin d'assurer le bon calcul du *wave setup* (effectué dans un 2<sup>ème</sup> temps dans MARS-2DH).

Cela implique l'utilisation d'un maillage fin (au maximum 20 m de résolution spatiale) dans cette zone de déferlement. Vue l'étendue du domaine d'étude, il a été décidé d'utiliser WW3 avec un maillage non structuré (Figure 39) avec une longueur maximale des côtés des triangles allant de 2 km au large, à une centaine de mètres aux environs de 7 m de profondeur et un raffinement local pour les secteurs à forte pente (par exemple au large du delta du Rhône) et pour la zone de déferlement (~20 m de côté pour les profondeurs inférieures à 7 m). Au final, cela représente 255 799 nœuds et 511 596 éléments (triangles).

Le modèle a été paramétré suivant la configuration décrite dans Ardhuin *et al.* (2010), le spectre des vagues étant discrétisé en 24 directions (pas de 15°) et en 30 fréquences (correspondant à des périodes de vagues allant de 1,6 à 20 secondes). Le frottement au fond et le déferlement des vagues ont été activés.

Le modèle utilise en entrée (cf. Figure 36) :

- le niveau du plan d'eau uniforme et instationnaire (variable dans le temps),
- des spectres directionnels de vagues : ceux-ci sont construits à partir des caractéristiques des vagues (hauteur significative, période et direction pic), avec la boîte à outil WAFO (Brodtkorb *et al.*, 2000) ainsi que des routines développées pour l'étude.

En sortie, WW3 fournit à MARS-2DH les données de vagues (Hs, Tp, Dp, tensions de radiation,...) au pas de temps horaire.

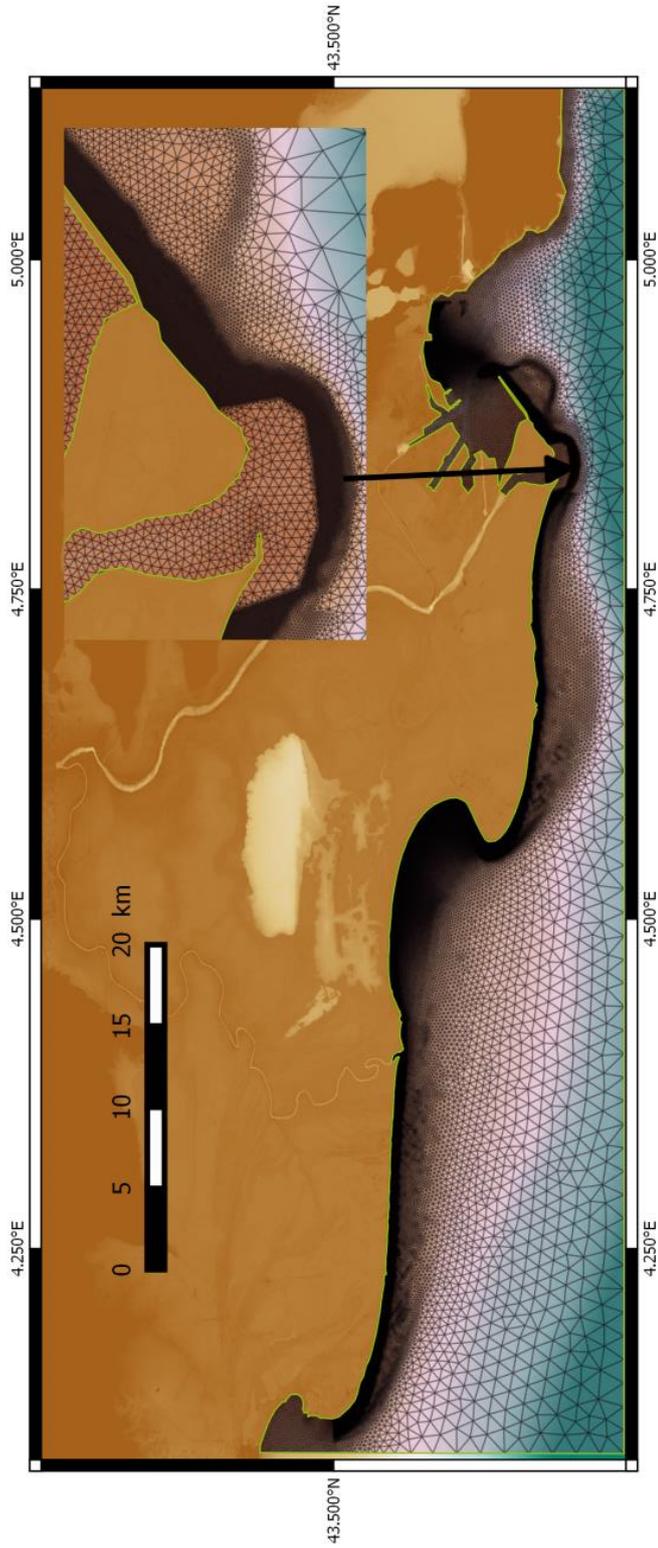


Figure 39 : Construction du maillage non structuré utilisé par WW3.

## 4.2. EMPRISE ET RÉOLUTION SPATIALE

L'emprise du modèle est le territoire potentiellement exposé à la submersion marine. Il s'étend depuis la pointe de l'Espiguette jusqu'au Golfe de Fos-sur-Mer. Une partie de la Camargue gardoise est ainsi incluse dans le périmètre. Le modèle ne prend pas en compte la zone de Port-Camargue au nord de l'Espiguette ainsi que la zone des étangs entre le Grau-du-Roi et Aigues-Mortes.

Le modèle s'étend au large, dans la partie marine, jusqu' à des profondeurs proches de 50 m. Cette extension correspond à la position du point choisi pour les données de vagues utilisé dans la détermination des événements de référence.

L'extension à l'intérieur des terres du modèle est définie en fonction de la limite d'inondation statique maximale, déterminée par la surimposition directe de niveaux marins de référence à la côte (actuel et futur) sur le modèle topographique terrestre (propagation à l'infini de la submersion).

Les niveaux retenus lors de la mise en œuvre de la Directive Inondation (cartographie des TRI notamment), peuvent être retenus à priori comme enveloppe maximale d'inondation : + 2 m NGF/IGN69 pour l'évènement moyen et + 2,4 m NGF/IGN69 avec élévation du niveau de la mer dû au changement climatique en 2100.

En raison de sa large emprise, un maillage régulier avec une résolution de l'ordre de 20 m a été retenu pour le modèle hydrodynamique. Cette taille de maille est à la fois un compromis entre une bonne représentation du relief et des contraintes de calcul numérique, mais aussi, comme précisé ci-dessus (cf. 4.1.3), c'est une contrainte géométrique minimale pour s'assurer de la reproduction de la surcote liée au déferlement des vagues sur toute la bande côtière.

L'espace géographique est donc discrétisé suivant une grille structurée en maillage régulier (20 m) constituée de 11 983 695 éléments (2 305 mailles verticales x 5199 mailles horizontales).

Le modèle s'étend du nord (43.7087°N) au sud (43.2946°N), et d'ouest (4.1003°E) en est (5.0345°E).

Avec une telle résolution, les particularités topographiques telles que les digues, les routes, les remblais, ne sont pas forcément bien représentées, or ces éléments topographiques peuvent contraindre ou même bloquer les écoulements lors de la propagation de la submersion. Ainsi il convient de représenter fidèlement les altitudes des sommets de ces ouvrages. Des retouches seront donc effectuées sur le MNT afin de reconstruire les sommets des ouvrages. Un algorithme spécifique, développé par le BRGM, sera employé pour reconnaître de manière automatique les sommets topographiques des ouvrages et les intégrer au modèle numérique de terrain comme ligne de contrainte.

### 4.3. ÉLABORATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN : DESCRIPTION DE LA TOPOGRAPHIE ET REPRÉSENTATION DES ÉLÉMENTS STRUCTURANTS

#### 4.3.1. Méthode de construction du MNT : Retouches des éléments structurants

Un premier MNT a été réalisé à partir des données topographiques terrestres Litto3D à 1 m ré-échantillonnées à 20 m. Ce ré-échantillonnage conduit à un lissage altimétrique de certaines particularités topographiques telles que les digues, les routes, les remblais, ou autres éléments structurants dont la taille caractéristique est inférieure à la résolution du maillage. Il convient alors de représenter fidèlement les hauteurs de crêtes de ces éléments.

Ces éléments structurants ont été récupérés à partir de la couche « route » SIG de la BD-Topo©IGN. La localisation de ces éléments est présentée sur la Figure 40.

Une simplification des éléments structurants (une réduction de 40 000 éléments à environ 15 000) a été effectuée à partir de la couche « route ». La sélection basée sur le critère d'altitude de crête a permis de repérer les éléments qui auront réellement une influence sur le comportement hydraulique de l'inondation. L'ensemble des éléments structurants qui seront retouchés est présenté sur la Figure 41.

Au vu du nombre d'éléments à rectifier (~15 000 éléments), il n'était pas envisageable de retoucher manuellement l'ensemble des altitudes du MNT. Aussi le développement d'un algorithme spécifique a permis de retoucher de manière automatique les crêtes des éléments et de les intégrer au modèle numérique (Figure 41).

Il se base sur l'utilisation conjointe d'un jeu de 3 MNTs (moyenne, maximum minimum) et des éléments structurants que l'on souhaite retoucher. Un schéma de principe de l'algorithme est présenté sur la Figure 42.

- un MNT (résolution 20 m) de maximums locaux est construit à partir des dalles Litto3D 1 m sur lesquelles est appliqué un filtrage (recherche) du maximum local dans un voisinage de 10 m ; puis un ré-échantillonnage à 20 m est effectué ;
- un MNT similaire de minimums locaux est aussi réalisé pour la reconstruction des cours d'eau, rivières, canaux, etc. ;
- un MNT moyenne issu d'un ré-échantillonnage des dalles Litto3D à 1 m à la résolution 20 m. Ce MNT servira de base pour les retouches à effectuer ;
- l'algorithme parcourt l'ensemble des éléments structurants et reconstitue de proche en proche les altitudes des crêtes des ouvrages à partir du MNT de maximas ;
- un travail similaire est effectué pour reconstruire le lit des cours d'eau, chenaux, rivières, etc., à partir du MNT de minimas et de la couche SIG « réseau hydrographique » de la BDtopo©IGN.

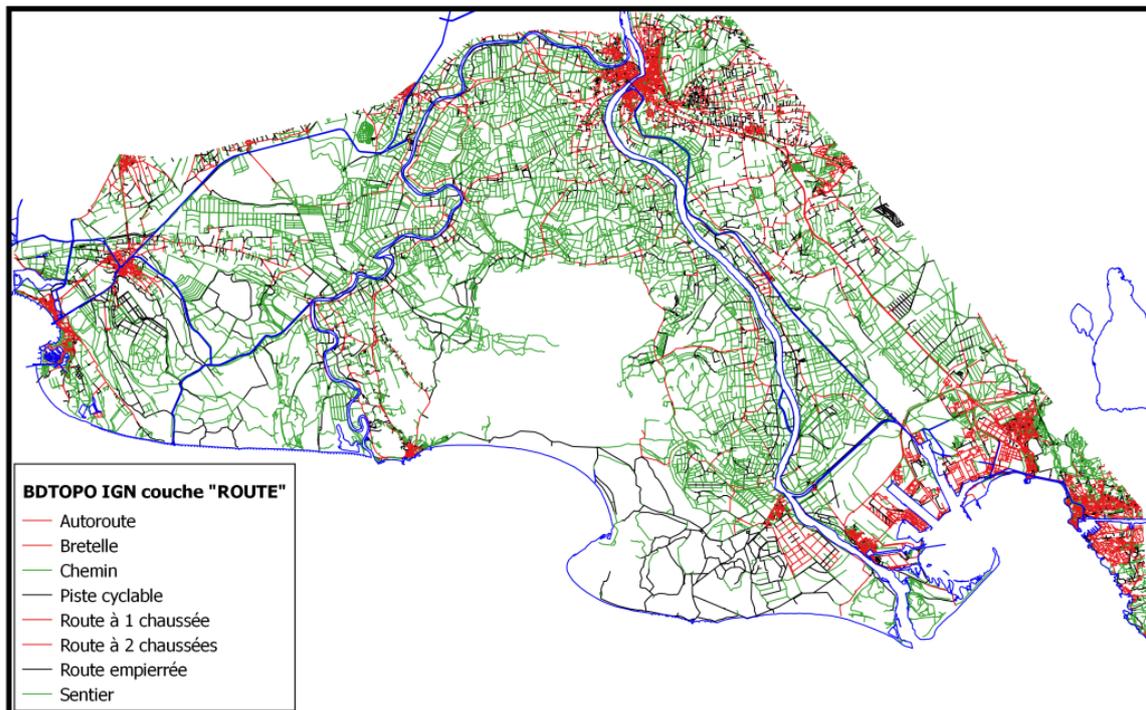


Figure 40 : Éléments linéaires structurants issus de la couche « route » de la BDtopo@IGN.

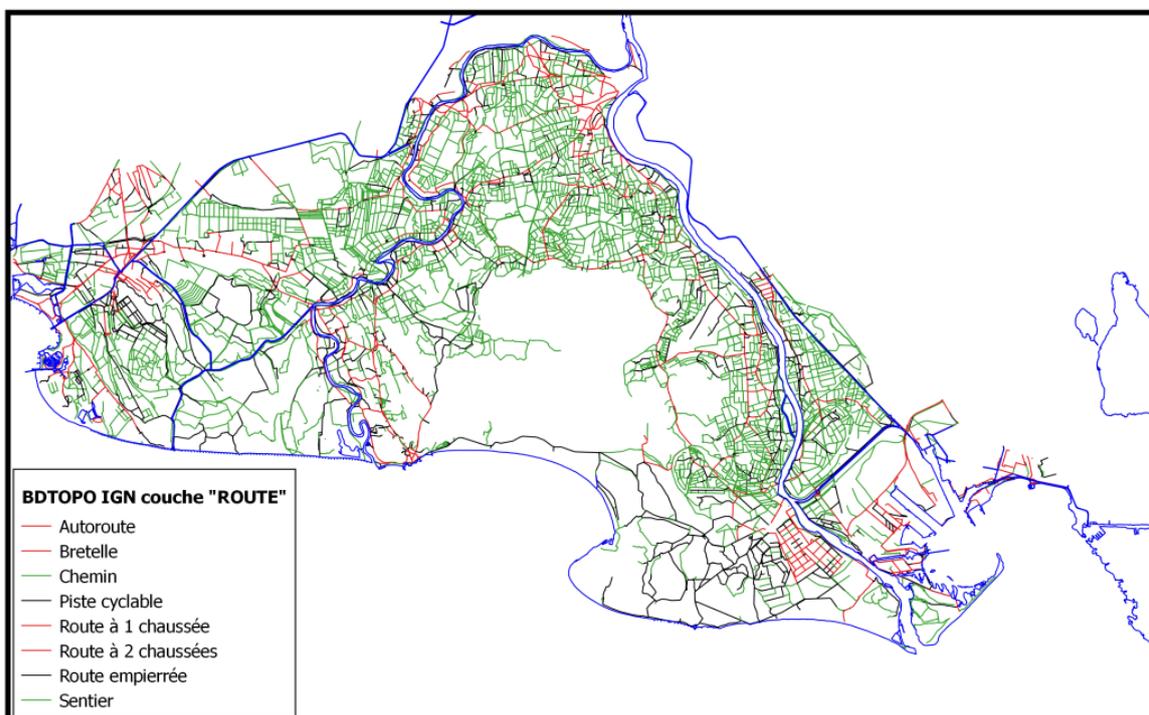


Figure 41 : Éléments linéaires structurants pris en compte pour les « retouches » altimétriques.

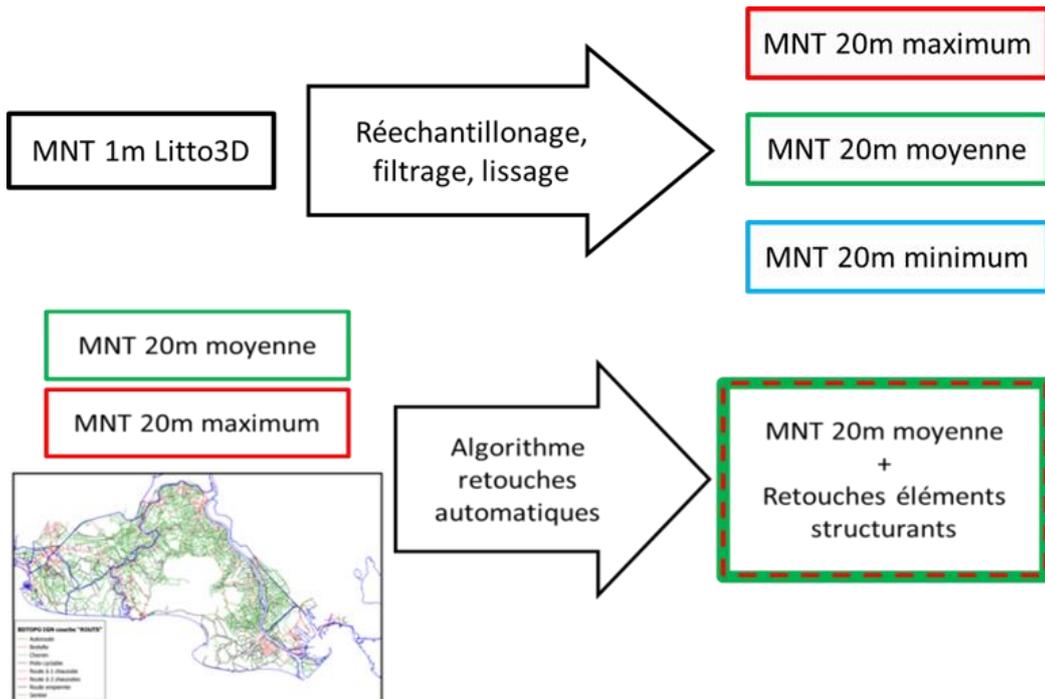


Figure 42 : Schéma de principe de la retouche des éléments structurants pris en compte.

Une illustration des retouches effectuées sur le secteur des Saintes Maries est présentée sur la Figure 43.

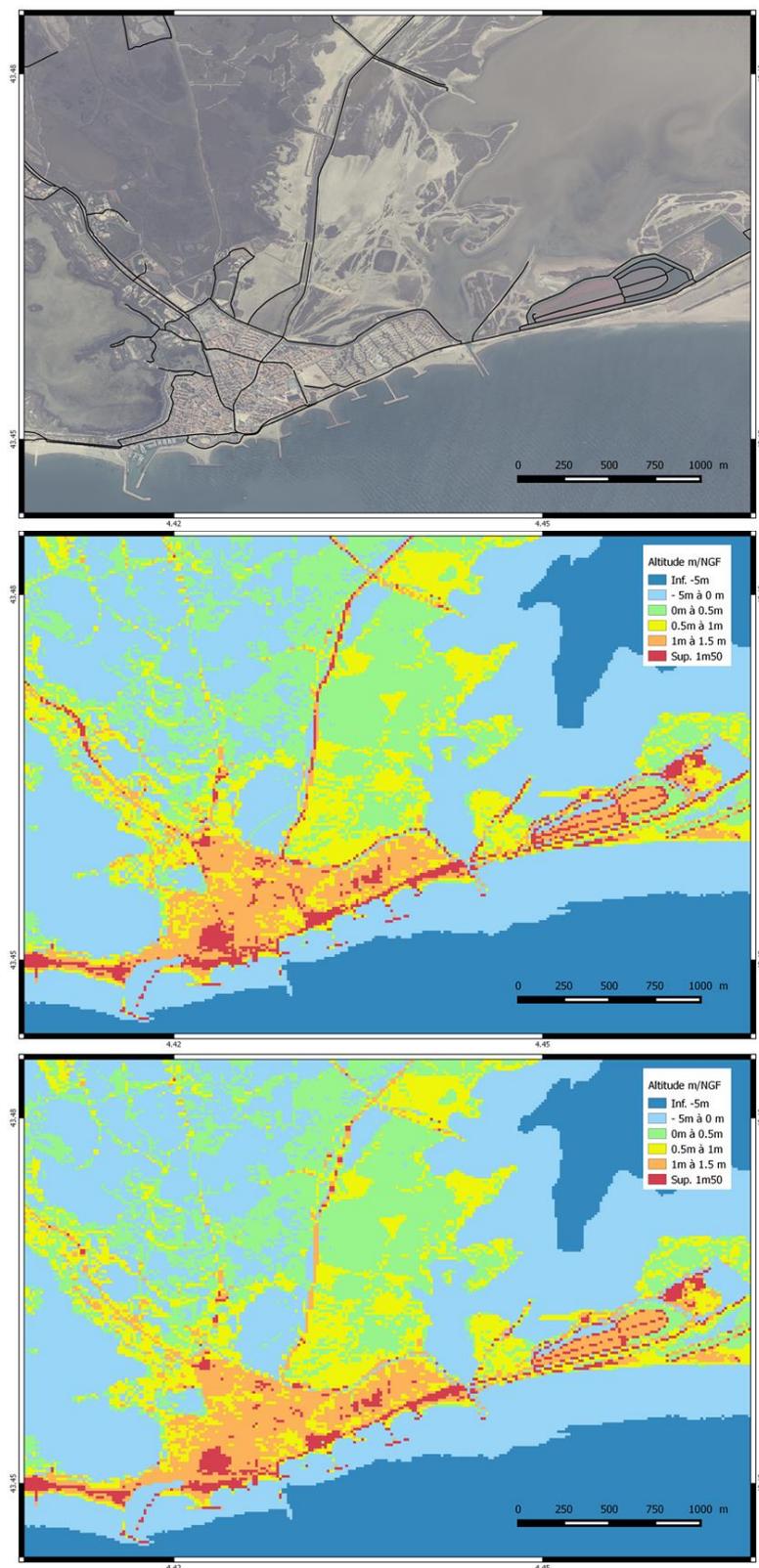


Figure 43 : Illustration des retouches effectuées sur les différents éléments structurants sur une extraction du MNT ; (en haut) orthophotographie littorale du secteur des Saintes Maries de la Mer et superposition des routes, digues, chemins à retoucher, (au milieu) MNT 20 m retouché, (en bas) MNT 20 m moyenné sans retouche.

#### 4.3.2. Contrôles des retouches effectuées sur les éléments structurants

Un premier contrôle de la bonne reconstruction des éléments structurants est ensuite effectué sur des profils topographiques. À titre d'exemple, ce contrôle est illustré sur la Figure 44 selon un profil en travers depuis le cordon littoral. Ce profil localisé à l'est des Saintes-Maries-de-la-Mer passe par différentes rangées d'ouvrages et notamment la digue à la mer.

Il permet de constater que :

- les différents « points hauts » du cordon dunaire, des digues et de la digue à la mer ne sont pas à la bonne altitude dans le MNT moyenné ;
- le MNT final après retouches a bien reconstruit ces éléments.

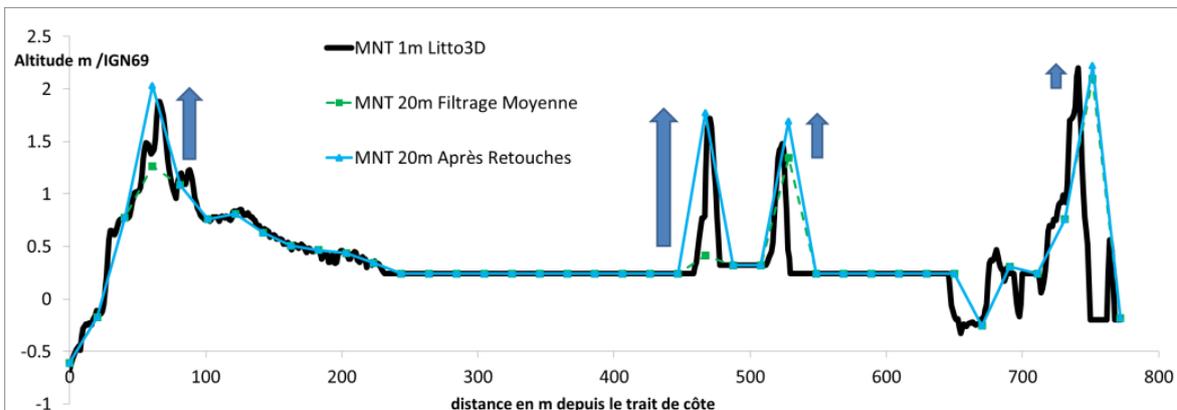
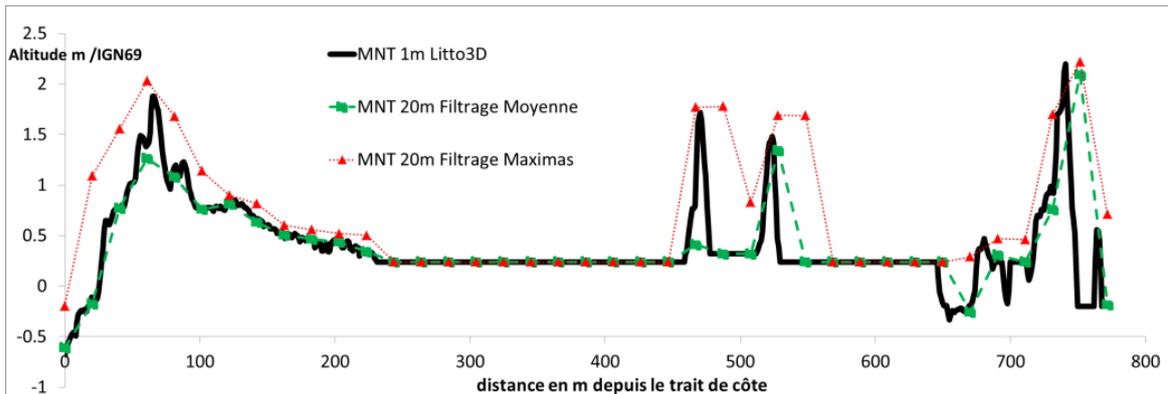


Figure 44 : Contrôle des retouches du MNT sur le profil nord-sud à l'est des Saintes-Maries-de- la-Mer.

Une illustration de la dynamique de la submersion et du rôle des éléments structurants (ici digue à la mer *en rouge*) est présentée sur la Figure 45. Elle met en avant l'importance de la reconstruction des sommets des digues.

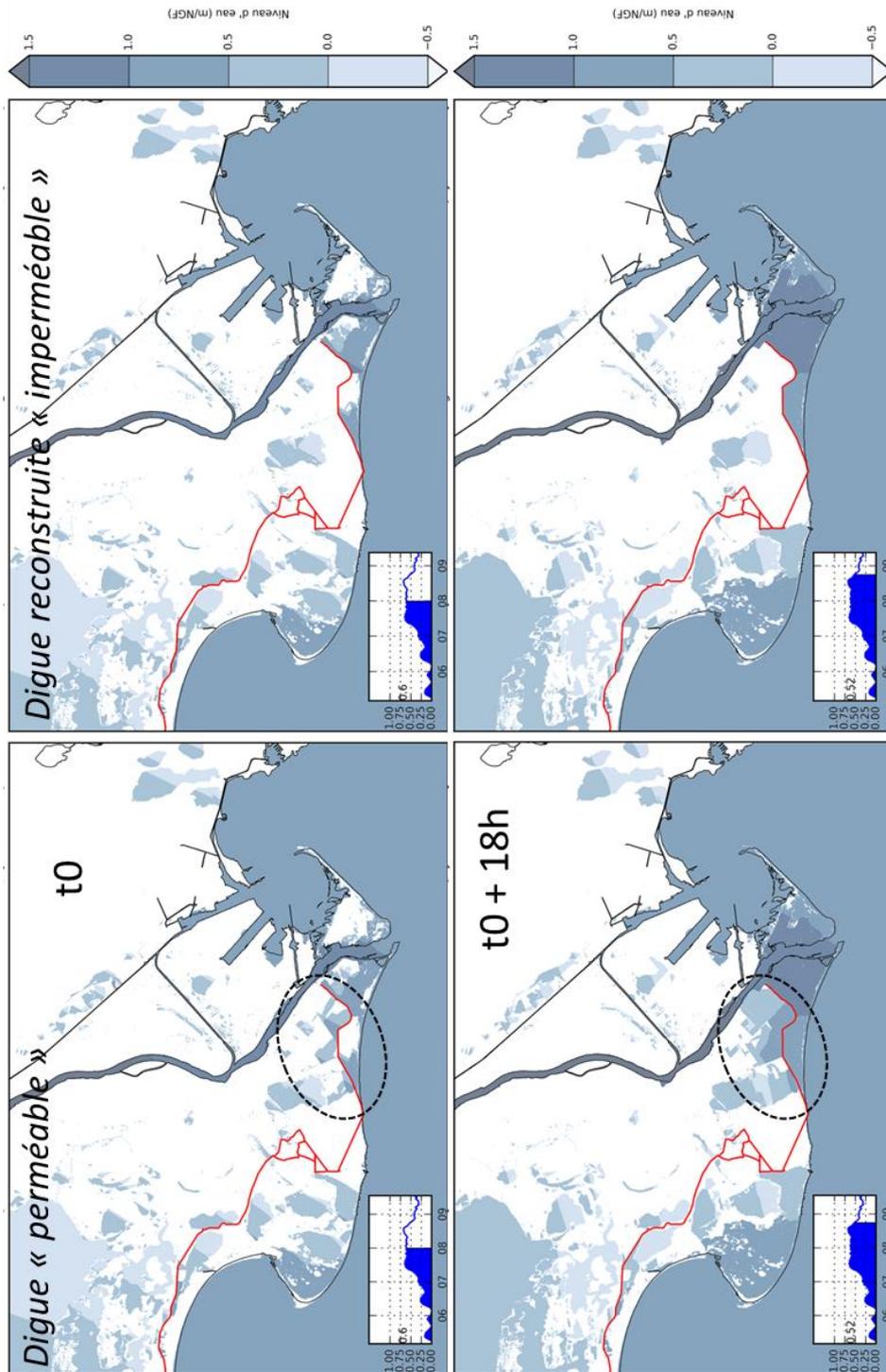


Figure 45 : Rôle des éléments structurants : reconstruction de la digue à la mer. À gauche : extension de l'inondation pour 2 instants de la submersion espacés de 18h ; la digue à la mer (rouge) n'est pas retouchée sur ses sommets ; à droite : la digue à la mer est reconstruite, l'inondation est bloquée.

#### **4.4. MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN FINAL**

Le premier MNT avec la prise en compte des éléments structurants est ensuite fusionné avec les données bathymétriques (Golfe de Fos, Rhône, Étangs) et topographiques recueillies.

En effet, les points du MNT Litto3D au niveau des surfaces en eau (étangs, Rhône et Petit-Rhône) sont aux altitudes du plan d'eau et non aux altitudes du fond du lit du cours d'eau ou de l'étang. Ainsi, les interpolations des données bathymétriques des étangs, des cours d'eau, du Golfe de Fos et de la partie maritime (Figure 6 et Tableau 1) ont été fusionnées au MNT retouchés précédemment.

Le MNT final ainsi établi est présenté sur la Figure 46.

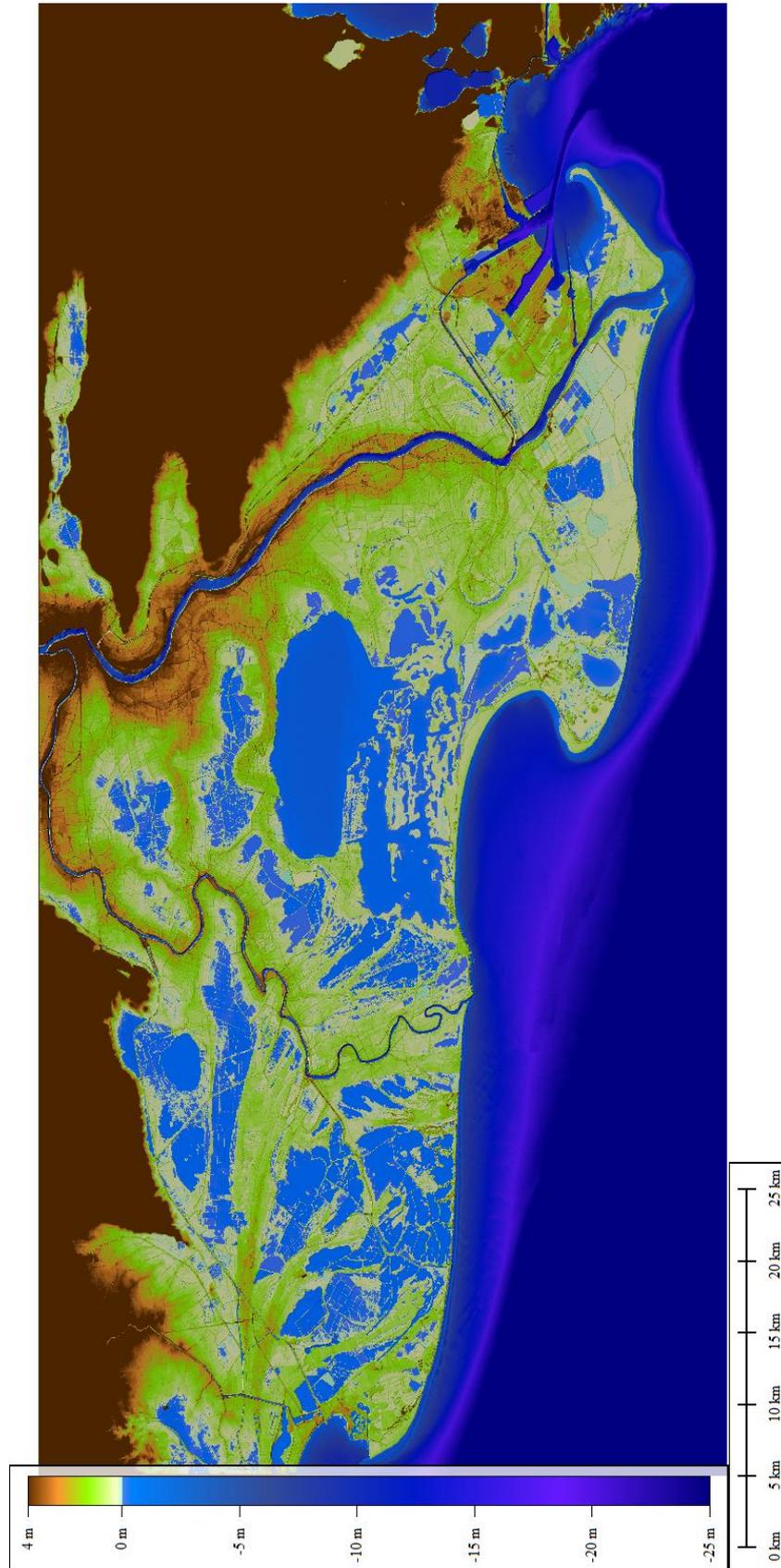


Figure 46 : MNT final obtenu après intégration des différentes sources de données topographiques et bathymétriques et retouches des éléments structurants.

#### 4.5. ÉLABORATION DE LA CARTE DE FROTTEMENT SUR LE FOND

L'utilisation d'un modèle numérique d'inondation permet de tenir compte des obstacles à l'écoulement (représenté par la topographie) et du frottement sur le fond fonction de la typologie d'occupation des sols (type de relief, nature et densité de la végétation et des zones urbanisées). Le frottement sur le fond est pris en compte par la formule de Strickler. Il dépend du type de relief, de la nature et de la densité de la végétation.

Dans cette étude, une représentation spatialisée de la rugosité a été obtenue à partir d'une classification synthétique de l'occupation des sols issue des cartes d'occupation des sols (OCS) qui a été interprétée en termes de valeurs du coefficient de Strickler, préconisées par différentes sources (Bunya *et al.* 2010 ; Brown *et al.*, 2007, Goutx et Ladreyt 2001).

Le regroupement des typologies brutes OCS en une typologie adaptée à la modélisation de la submersion s'est fait selon le tableau suivant (Tableau 8).

Typologie brute OCS	Typologie simplifiée
Tissu urbain continu	Tissu urbain dense
Bati diffus	Tissu urbain
Tissu urbain discontinu	
Forêts de conifères	Forêts
Forêts de feuillus	
Forêts mélangées	
Forêt et végétation arbustive en mutation	Milieux à végétation arbustive et ou herbacée
Vergers et petits fruits	
Vignobles	
Cultures annuelles associées aux cultures permanentes	Terres cultivées
Oliveraies	
Rizières	
Systèmes culturaux et parcellaires complexes	
Terres arables hors périmètres d'irrigation	
Territoires principalement occupés par l'agriculture avec présence de végétation naturelle	
Zones à forte densité de serres	
Chantiers	Urbain, industries
Équipements sportifs et de loisirs	
Espaces verts urbains	
Extraction de matériaux	
Zones industrielles ou commerciales	
Zones portuaires	Milieux ouverts avec peu ou pas de végétation
Pelouses et pâturages naturels	
Plages, dunes, sable	
Prairies	Marais salants
Végétation clairsemée	
Marais salants	Mers et océans
Mers et océans	
Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés	Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés
Maquis et garrigues	Zones humides
Marais intérieurs et tourbières	
Marais maritimes	
Lagunes littorales	
Roches nues	
Zones humides indifférenciées	Zones humides, rivières et plans d'eau
Cours et voies d'eau	
Plans d'eau	

Tableau 8 : Typologie brute de l'OCS et regroupement de la typologie adaptée à la submersion.

La cartographie résultante de la typologie retenue d'occupation du sol pour la modélisation de la submersion pour l'ensemble du périmètre d'étude est représentée sur la Figure 47.

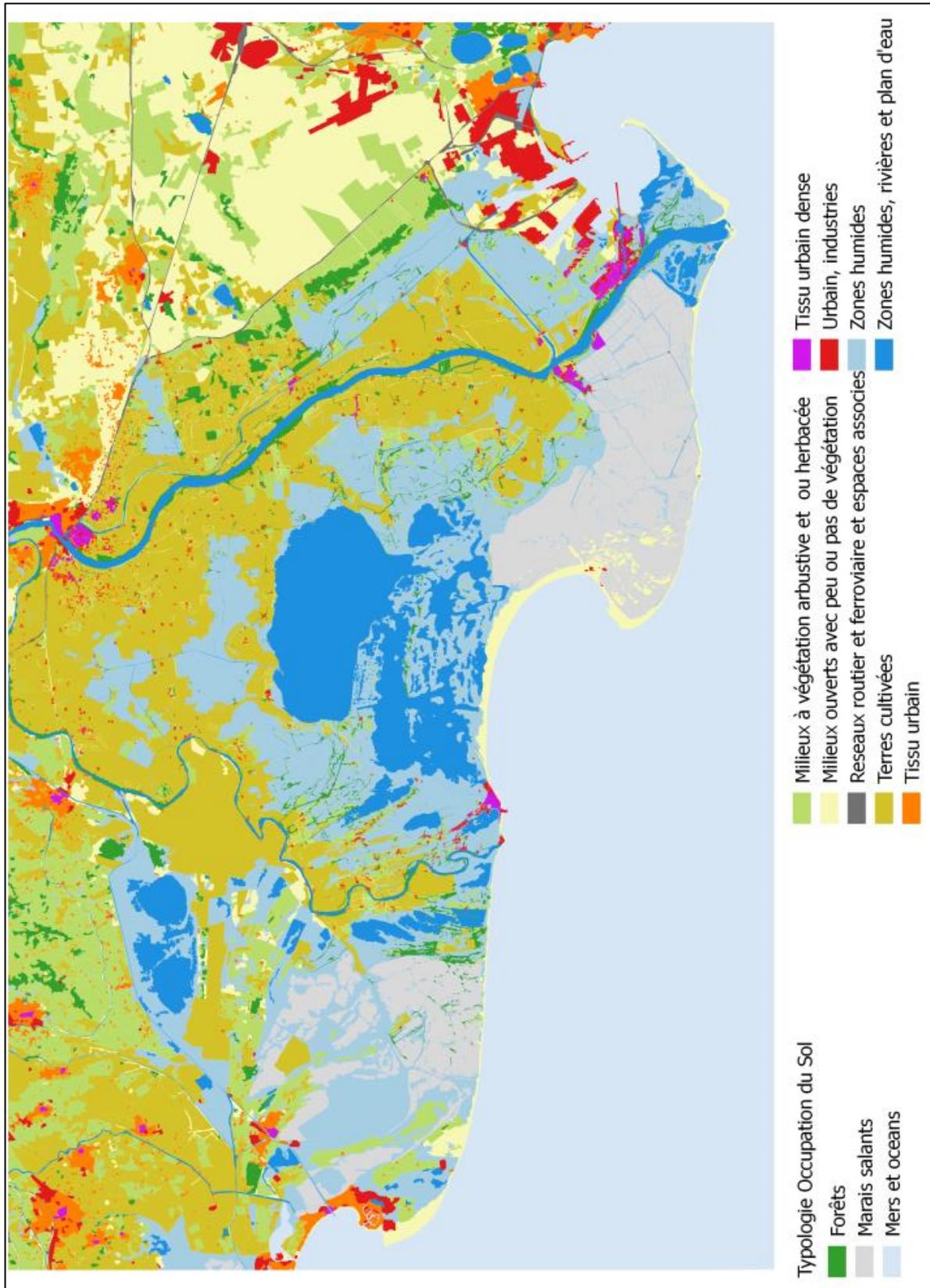


Figure 47 : Carte de la typologie simplifiée pour l'établissement de la carte de rugosité.

La correspondance entre la typologie simplifiée d'occupation du sol et les coefficients de Strickler associés est détaillée dans le Tableau 9 :

- les valeurs prises dans les différentes simulations varient de  $5 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$  dans les zones de fort frottement (zone urbanisée dense) à jusque  $40 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$  pour les zones à faible frottement (fond marin, rivières, ...)
- en milieu urbain, la valeur de rugosité peut être rehaussée et a pour objectif de tenir compte implicitement d'un fond relativement accidenté et de la densité du bâti.

Typologie simplifiée	Coefficient de Strickler $Ks1$ ( $\text{m}^{1/3} / \text{s}$ )
Tissu urbain dense	5
Tissu urbain	10
Forêts	15
Milieux à végétation arbustive et ou herbacée	15
Terres cultivées	20
Urbain, industries	25
Milieux ouverts avec peu ou pas de végétation	30
Marais salants	35
Mers et océans	40
Reseaux routier et ferroviaire et espaces associés	40
Zones humides	40
Zones humides, rivières et plan d'eau	40

Tableau 9 : Coefficients de Strickler attribués en fonction de la typologie simplifiée d'occupation du sol.

#### 4.6. PRISE EN COMPTE DES CONNEXIONS HYDRAULIQUES

Le modèle permet l'intégration d'ouvrages hydrauliques dans la dynamique des écoulements (pont cadre, écluse motorisée ou non, buse, canalisation avec ou sans clapet).

Ces petits ouvrages hydrauliques (dimension inférieure à la maille de référence et dont les écoulements sont contraints par des relations hauteur/pente/débit et ne répondant pas à des écoulements « classiques » à surface libre) sont pris en compte dans le modèle sous la forme de lois hydrauliques spécifiques.

Quatre régimes hydrauliques différents sont pris en compte en fonction de la caractéristique géométrique des ouvrages (largeur, hauteur, section, cotes aux 2 extrémités), ainsi que des niveaux d'eau amont et aval : (1) seuil dénoyé ou (2) seuil dénoyé, (3) orifice dénoyé ou (4) orifice noyé (Figure 48).

Dans le modèle, numériquement, le débit calculé est prélevé en amont et réinjecté en aval.

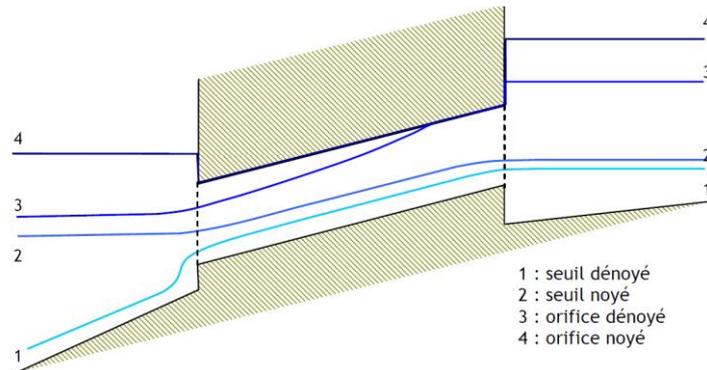


Figure 48 : Exemple de différentes conditions d'écoulement prises en compte dans la modélisation.

Les localisations et les modalités de prise en compte des ouvrages (mode de fonctionnement selon le scénario de l'évènement simulé, e.g. écluses fermées ou ouvertes) seront à définir en concertation avec les services techniques gestionnaires des ouvrages.

## 4.7. CONDITIONS AUX LIMITES ET CONDITIONS INITIALES

### 4.7.1. Conditions aux limites en niveau

Les variations du niveau d'eau au cours du temps sont imposées sur les limites marines sud, ouest et est du modèle hydrodynamique MARS-2DH et du modèle spectral WW3 (Figure 37).

Pour les évènements fréquent, moyen et Extrême, les séries temporelles de niveau marin imposées aux limites des modèles sont basées sur la chronologie de la tempête de référence (cf. 3.8).

À partir des niveaux marins définis au paragraphe 3.9.2 et de la chronologie de référence définie au paragraphe 3.8.1, l'évolution des niveaux marins au large des 7 combinaisons définissant l'évènement Moyen Actuel avec prise en compte de la surélévation de + 20 cm liée au changement climatique sont présentées ci-dessous (

Figure 49) :

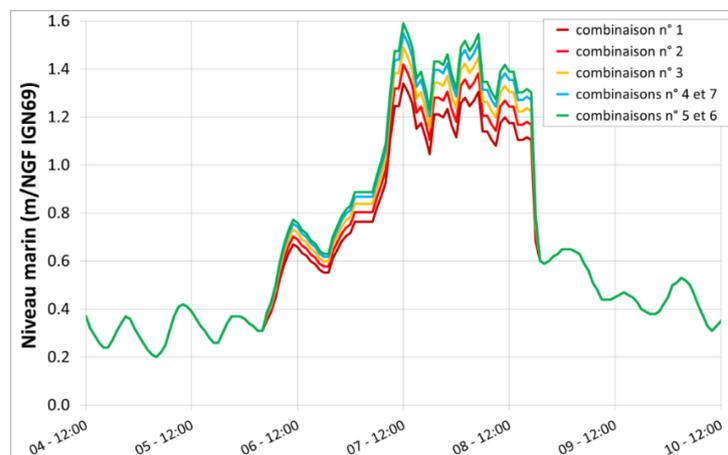


Figure 49 : Évolutions temporelles du niveau marin (cote m / NGF) pour les 7 combinaisons pour l'évènement Moyen Actuel.

#### 4.7.2. Conditions aux limites en vagues

Pour les événements Fréquent, Moyen et Extrême, les spectres de vagues imposées aux limites du modèle sont basés sur la chronologie de la tempête de référence (cf. paragraphe 3.8).

À partir des hauteurs significatives des vagues (et des périodes pic et direction pic associées) définies au paragraphe 3.9.2 et de la chronologie de référence définie au paragraphe 3.8.1, l'évolution de la hauteur significative des vagues (pour chacune des combinaisons) au large pour l'évènement moyen sont présentées ci-dessous (Figure 50) :

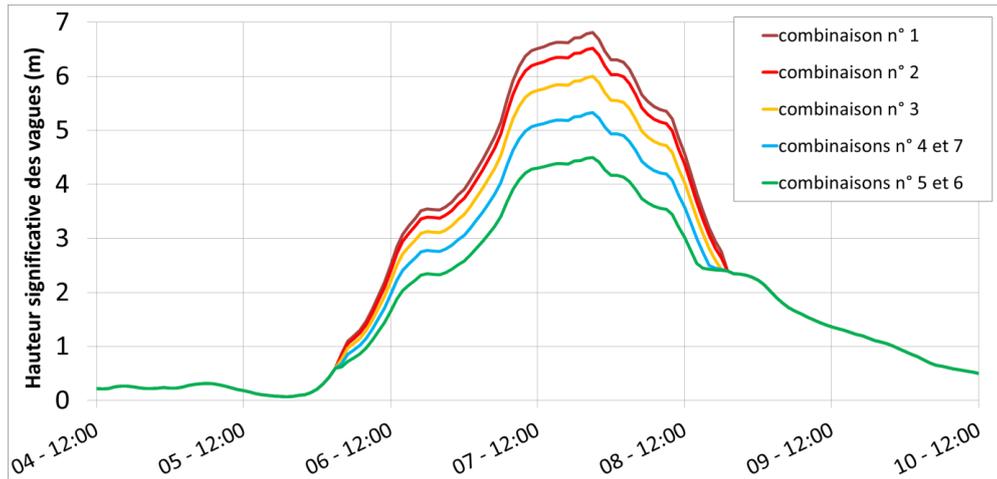


Figure 50 : Évolutions temporelles de la hauteur significative des vagues pour les 7 combinaisons pour l'évènement Moyen Actuel.

#### 4.7.3. Forçages en vent

Pour les événements Fréquent, Moyen et Extrême, les séries temporelles de vitesse du vent imposées sur toute la grille de calcul (mer et étangs) sont basées sur la chronologie de la tempête de référence (cf. paragraphe 3.8). À partir des vitesses de vent (et de la direction de provenance) définies au paragraphe 3.9.2 et de la chronologie de référence définie au paragraphe 3.8.1, l'évolution de la vitesse du vent (pour chacune des combinaisons) au large pour l'évènement Moyen (sont présentées ci-dessous (

Figure 51) :

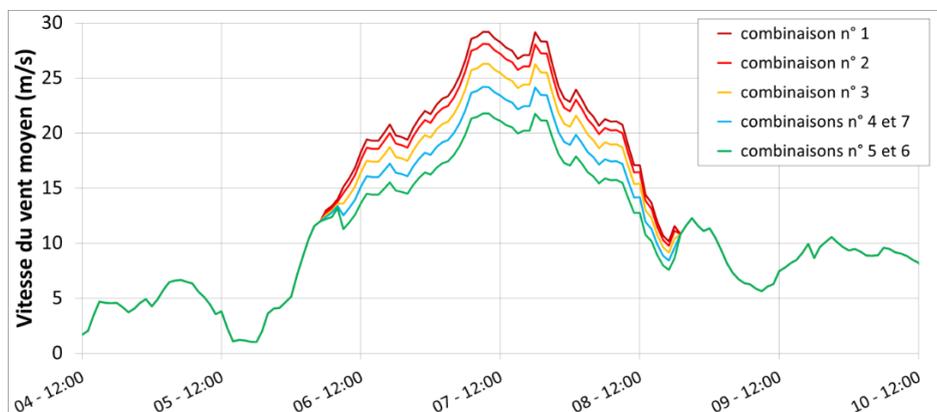


Figure 51 : Évolutions temporelles de la vitesse du vent moyen (m/s) pour les 7 combinaisons.

#### 4.7.4. Apport fluvial du Rhône

Pour les évènements Fréquent, Moyen et Extrême, un hydrogramme (débit) d'une crue caractéristique est imposé sur les parties aval du Rhône et du Petit-Rhône (cf. paragraphe 3.8.2 pour le choix de la crue).

#### 4.7.5. État initial des étangs

Les conditions initiales à terre sont telles que les étangs soient en eau au démarrage de la simulation avec un niveau de 0m NGF/IGN69. Pour tous les évènements avec prise en compte de l'élévation du niveau moyen de la mer (+ 20 cm et + 60 cm à l'horizon 2100), le niveau des étangs sera rehaussé de la même surélévation que celle appliquée en mer (Figure 52).

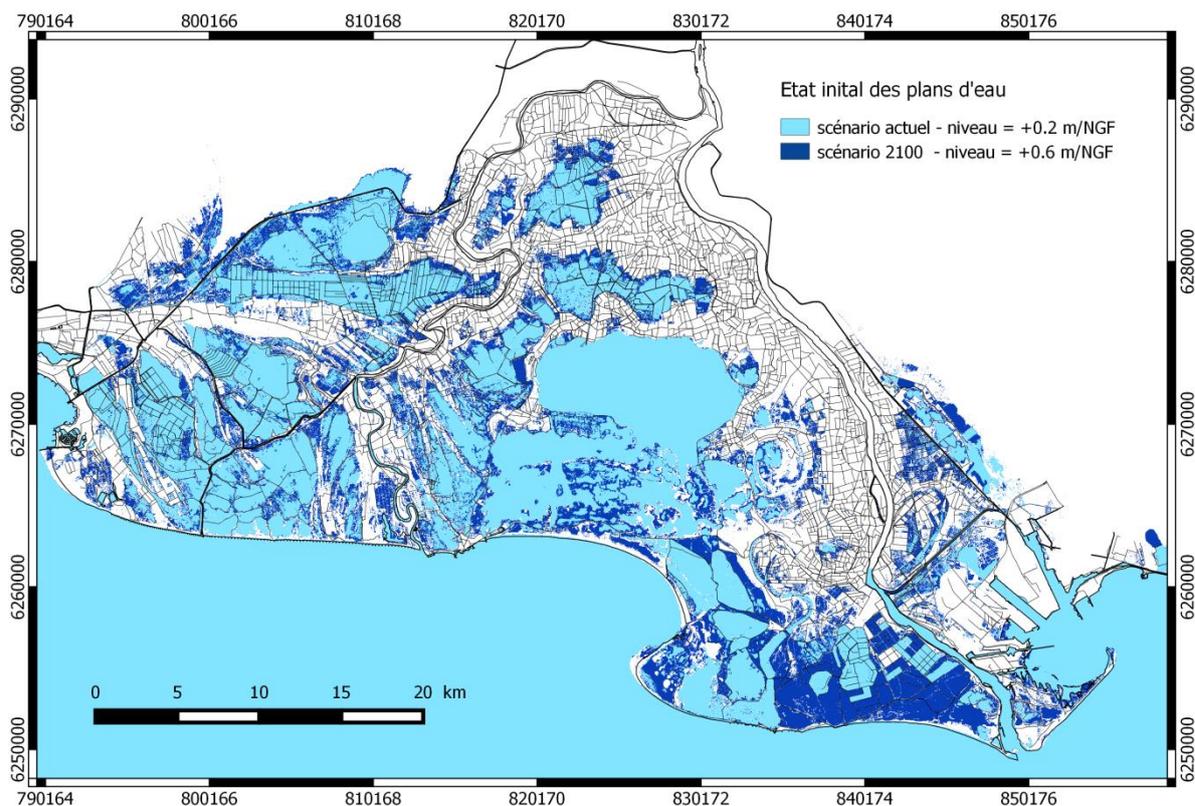


Figure 52 : Configurations initiales des altitudes des plans d'eau et du niveau moyen de la mer au début des simulations pour les échéances actuelle (Fréquent, Moyen Actuel, Extrême) et à 100 ans (Moyen 2100).

## 5. Validation du modèle de vagues et tests de sensibilité

### 5.1. VALIDATION DU MODÈLE DE VAGUES

#### 5.1.1. Validation sur des tempêtes historiques

Afin d'évaluer la qualité des vagues modélisées, 3 tempêtes historiques ont été simulées et les résultats ont été comparés avec les observations des bouées côtières.

Les 2 bouées disponibles sur la zone d'étude (Figure 53) sont les suivantes :

- la bouée Espiguette (CANDHIS 03001) avec une durée d'observation de plus de 5 ans comprise entre août 2008 et décembre 2015, située au large de la pointe de l'Espiguette par 32 m de fond ;
- la bouée Camargue (CANDHIS 01301) avec une durée d'observation d'environ 3 ans comprise entre juillet 1999 et janvier 2004, située au sud-est de la pointe de Beauduc par 17 m de fond.

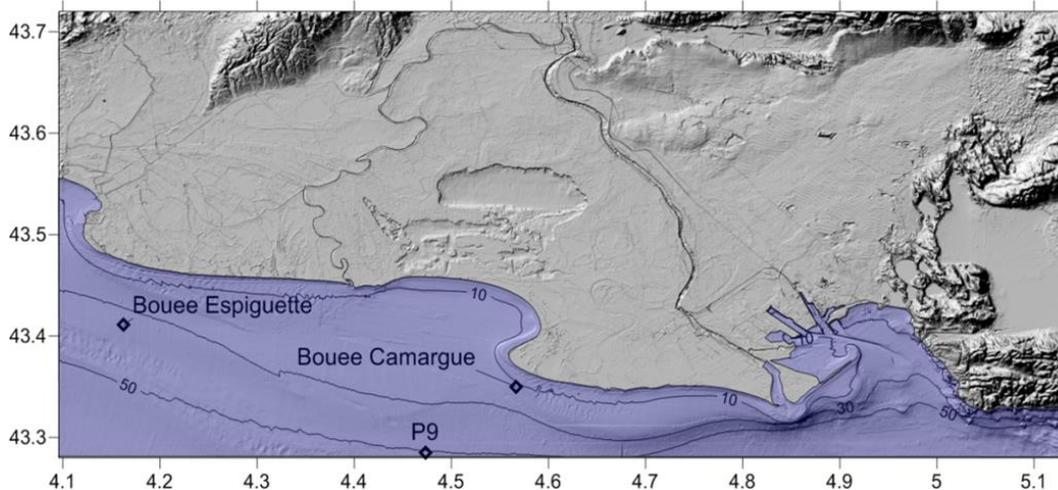


Figure 53 : Isobathes principales de l'emprise du modèle de vagues ; localisation du point P9 de forçage des conditions aux limites ; et localisation des 2 bouées côtières du réseau CANDHIS.

Les simulations « historiques » ont été réalisées en utilisant comme forçages :

- les caractéristiques des vagues extraites de la base de données de vagues extraites au point P9 (cf. paragraphes 2.3.1 et 3.1.2) ;
- les vitesses du vent sur toute l'emprise modélisée pour tenir compte de la génération de vagues par l'action du vent entre le large et la zone côtière.

- **Tempête de novembre 2000**

La Figure 54 présente une cartographie des hauteurs significatives de vagues (Hs) au moment du pic de la tempête (6 novembre 2000 à 5h) : les vagues d'orientation de secteur sud sont comprises entre des valeurs de Hs de 5 à 6m au large. Au niveau de la bouée Camargue (Figure

55), les résultats de la simulation montrent une bonne reproduction des Hs sur toute la durée de la tempête et notamment le pic de la tempête ( $H_s = 4\text{m}$ ), la période pic des vagues (comprise entre 4 et 9 secondes) est bien reproduite avec une légère sous-estimation sur 2<sup>ème</sup> partie de la tempête lorsque les conditions diminuent. La direction pic des vagues est elle aussi bien reproduite compte tenu de l'étalement directionnel utilisé dans le modèle ( $\pm 15^\circ$ ).

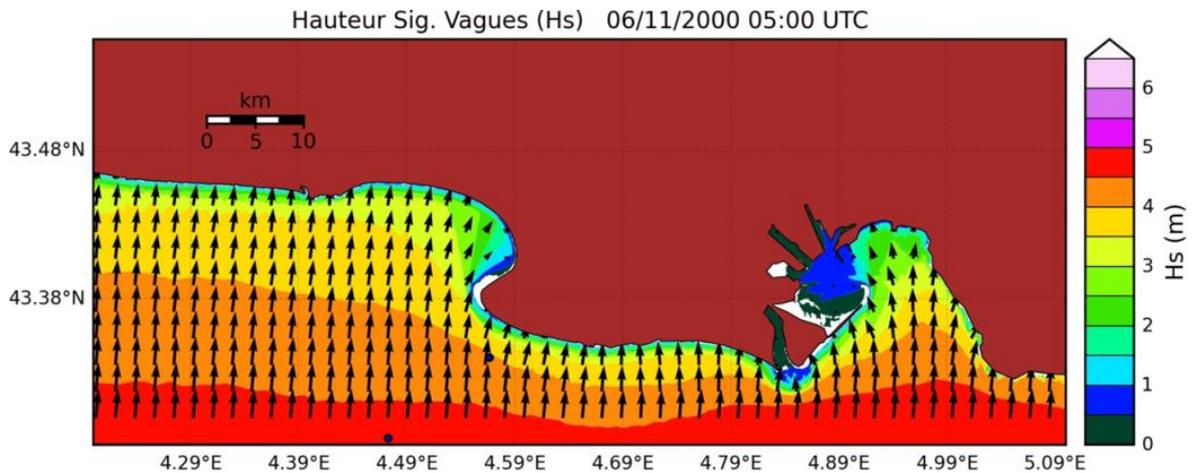


Figure 54 : Cartographie des hauteurs significatives de vagues atteintes au pic de la tempête de novembre 2000.

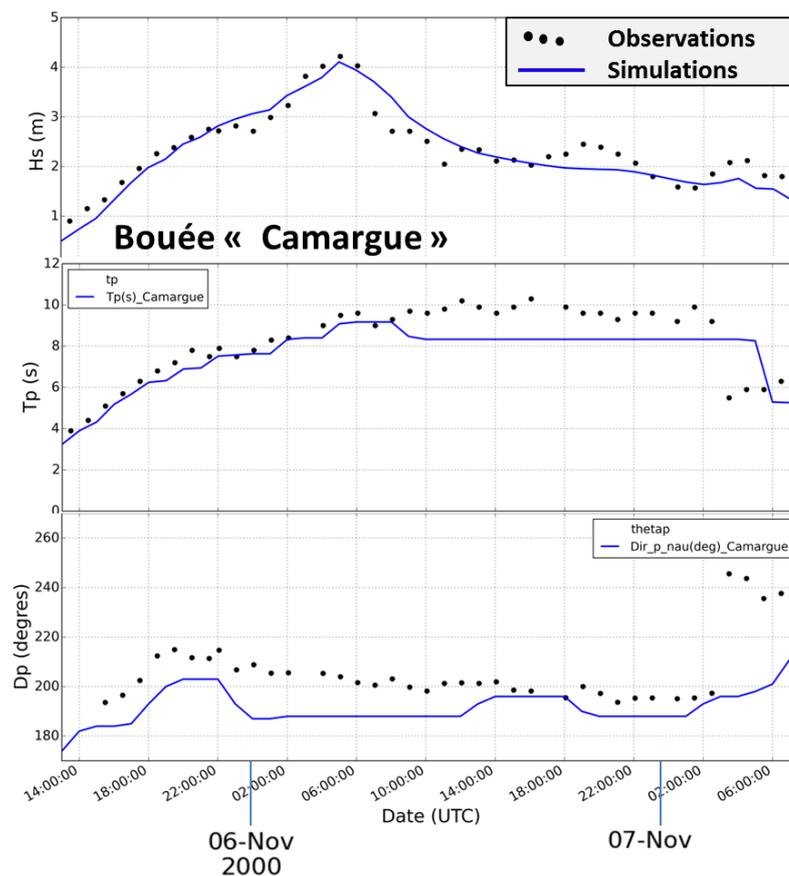


Figure 55 : Comparaison des simulations (trait bleu) et des observations (points noirs) pour les caractéristiques de vagues ( $H_s$ ,  $T_p$ ,  $D_p$ ) à la bouée Camargue lors de la tempête de novembre 2000.

• **Tempête d'octobre 2003**

La Figure 56 présente une cartographie des hauteurs significatives de vagues ( $H_s$ ) au moment du 1<sup>er</sup> pic de la tempête (31 octobre 2003 à 9h) : les vagues sont orientées de secteur sud et ont des valeurs de  $H_s$  proche de 4 m au large. Au niveau de la bouée Camargue (Figure 57), les résultats de la simulation montrent globalement une bonne corrélation avec les observations. Dans le détail les 2 pics de la tempête en termes de  $H_s$  sont sous-estimés d'environ 1 m, ce qui pourrait s'expliquer par des vents locaux eux aussi sous-estimés.

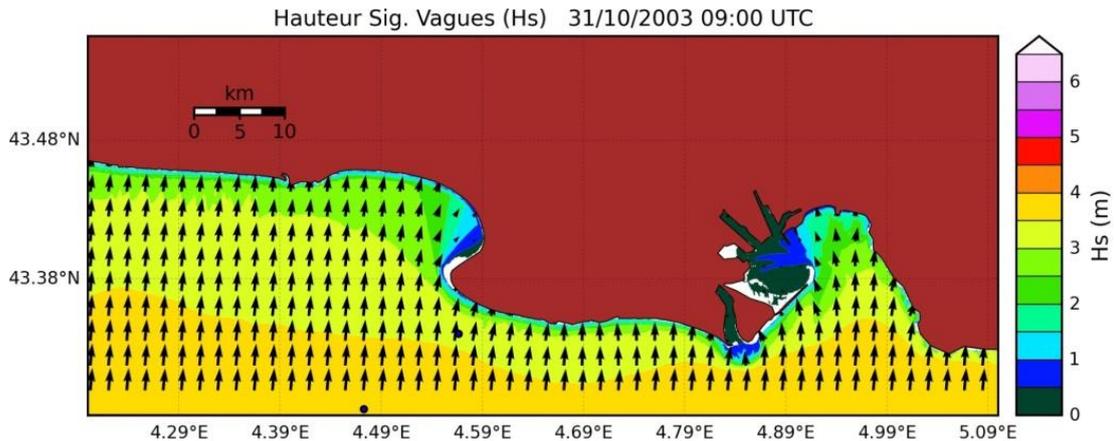


Figure 56 : Cartographie des hauteurs significatives de vagues atteintes lors du 1<sup>er</sup> pic de la tempête d'octobre 2003.

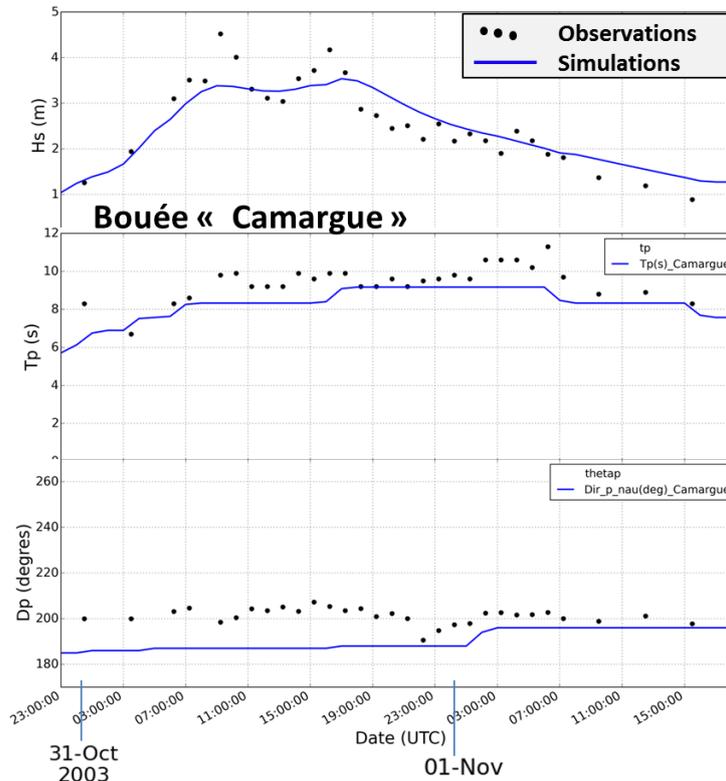


Figure 57 : Comparaison des simulations (trait bleu) et des observations (points noirs) pour les caractéristiques de vagues ( $H_s$ ,  $T_p$ ,  $D_p$ ) à la bouée Camargue lors de la tempête d'octobre 2003

- **Tempête de février 2009**

La Figure 58 présente une cartographie des hauteurs significatives de vagues ( $H_s$ ) au moment du pic de la tempête (1<sup>er</sup> février 2009 à 23h) : les vagues sont orientées de secteur sud-est et ont des valeurs de  $H_s$  proche de 3 m au large. Au niveau de la bouée Espiguette (Figure 59), les hauteurs significatives, périodes et directions pic des vagues sont correctement reproduites sur toute la durée de la tempête. Concernant les  $H_s$ , elles sont légèrement sous-estimées d'environ 50 centimètres.

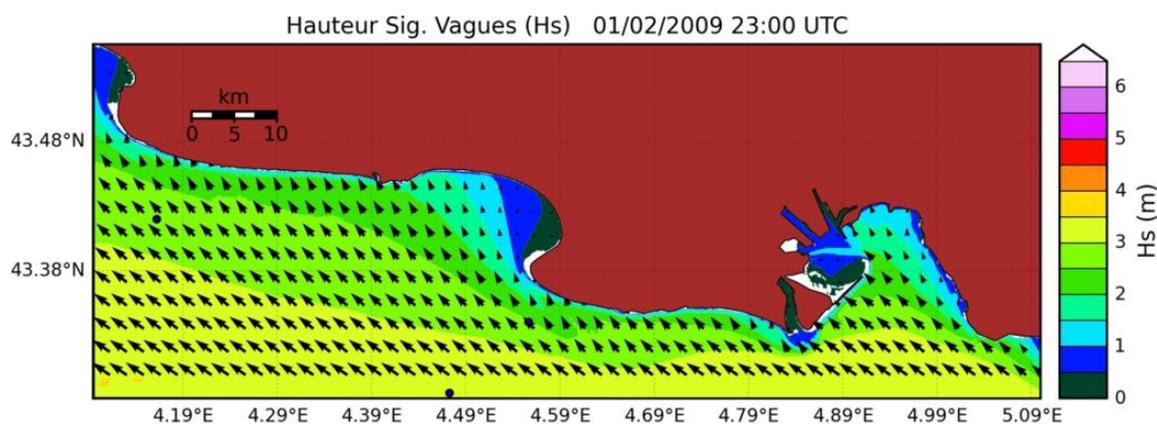


Figure 58 : Cartographie des hauteurs significatives de vagues atteintes lors du 1<sup>er</sup> pic de la tempête de février 2009.

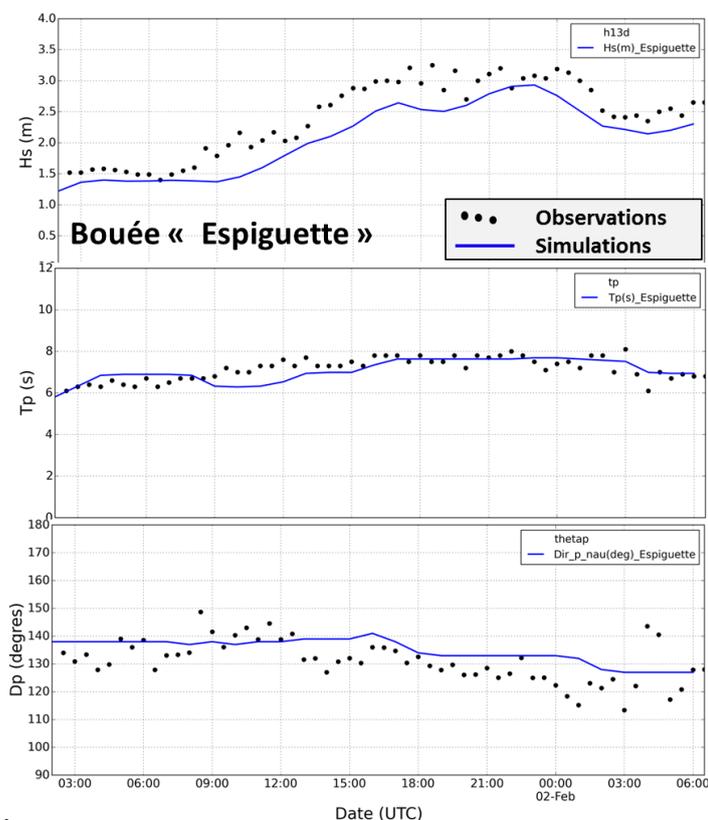


Figure 59 : Comparaison des simulations (trait bleu) et des observations (points noirs) pour les caractéristiques de vagues ( $H_s$ ,  $T_p$ ,  $D_p$ ) à la bouée Espiguette lors de la tempête de février 2009.

### 5.1.2. Validation à partir de valeurs statistiques de référence

Afin de compléter la validation, des simulations de conditions de vagues décennale ( $Tr = 10$  ans) et quinquennale ( $Tr = 5$  ans) (cf. Figure 23 et Tableau 2) au large ont été réalisées (cartes de la Figure 60). (1) Les caractéristiques de vagues définies pour ces 2 périodes de retour à partir des caractéristiques des vagues extraites au point P9 (cf. paragraphes 2.3.1, 3.1.2 et 3.2.2 « *distribution marginales des hauteurs de vagues* ») sont injectées dans le modèle de propagation et de génération de vagues, puis (2) les valeurs des vagues modélisées au niveau des bouées sont comparées aux ajustements statistiques des Extrêmes calculés par le CETMEF (2012) sur les bouées de la base CANDHIS (Figure 61 et Tableau 10).

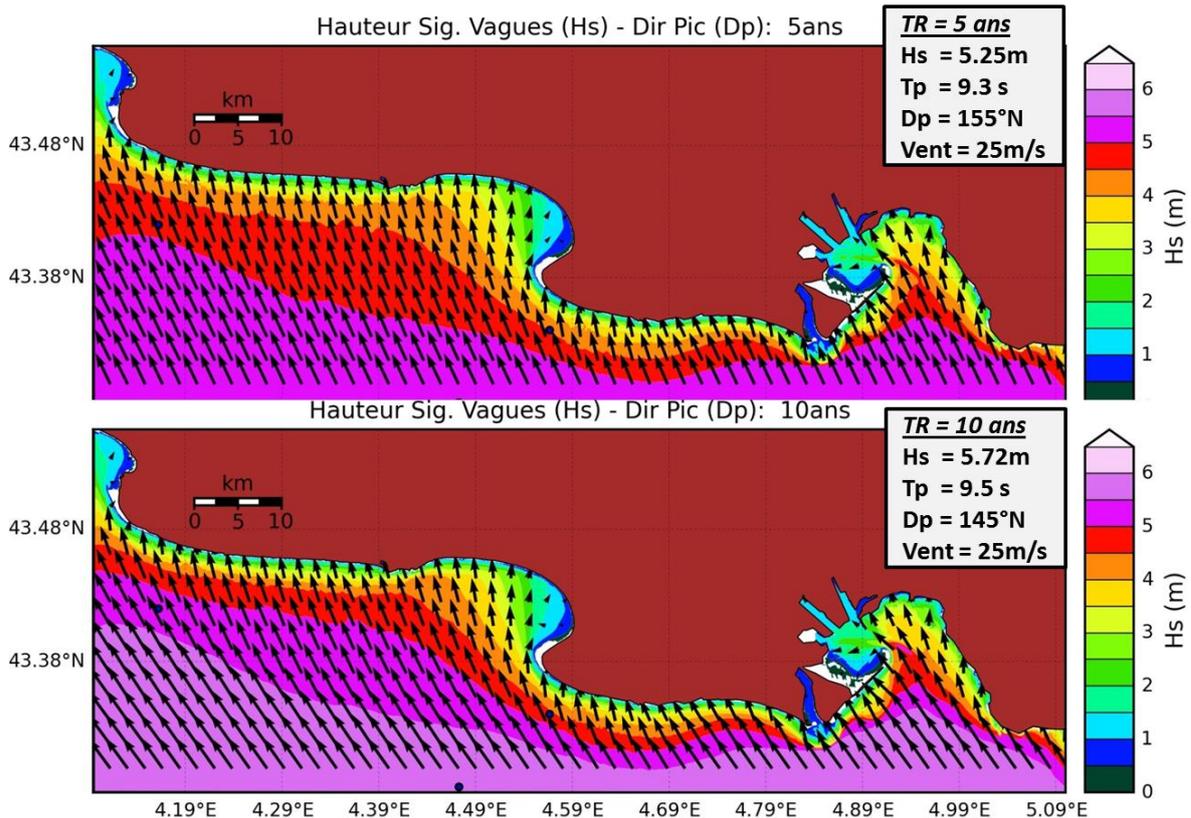


Figure 60 : Simulation de vagues pour des conditions décennale et quinquennale.

Concernant la bouée Camargue, les valeurs des  $H_s$  simulées sont comprises dans les intervalles de confiance des lois marginales des Extrêmes (Figure 61). Pour la bouée Espiguette, les valeurs modélisées sont légèrement supérieures aux bornes à 95 % des intervalles de confiance des ajustements statistiques.

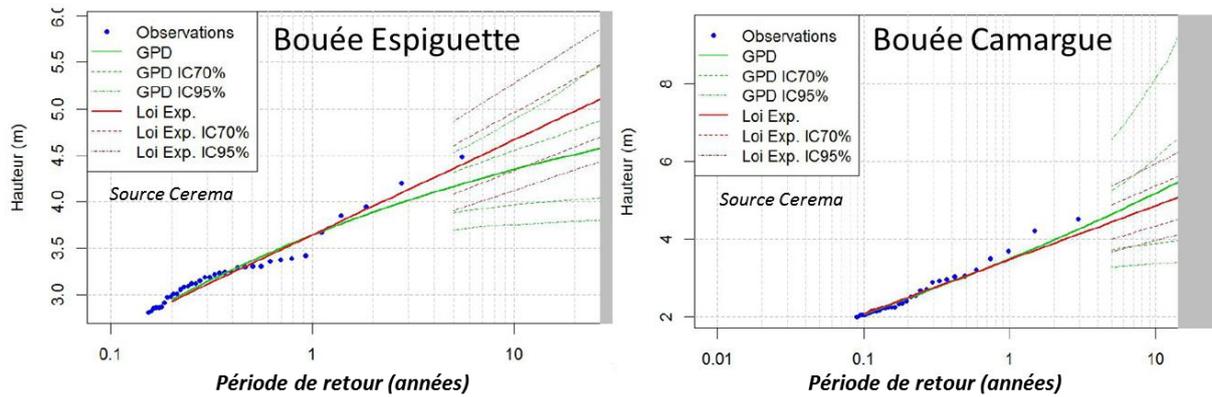


Figure 61 : Ajustement statistique des Extrêmes des hauteurs significatives de vagues sur les observations des bouées Espiguette et Camargue (CETMEF, 2012).

		Analyse des extrêmes de vagues Hs - Observations (CETMEF)		Simulation BRGM
		Période de retour	GPD - Hs(m)	
Espiguette	5 ans	<b>4.16</b> (IC 95% : 3.70 à 4.53)	<b>4.36</b> (IC 95% : 3.90 à 4.87)	<b>4.91</b>
	10 ans	<b>4.35</b> (IC 95% : 3.76 à 4.88)	<b>4.67</b> (IC 95% : 4.12 à 5.27)	<b>5.29</b>
Camargue	5 ans	<b>4.65</b> (IC 95% : 3.29 à 6.57)	<b>4.45</b> (IC 95% : 3.69 à 5.37)	<b>4.91</b>
	10 ans	<b>5.19</b> (IC 95% : 3.37 à 8.14)	<b>4.87</b> (IC 95% : 3.97 à 5.95)	<b>5.29</b>

Tableau 10 : Comparaison des valeurs de statistique des extrêmes sur les observations des bouées côtières, et des valeurs issues des modélisations.

## 5.2. SENSIBILITÉ DES VAGUES CÔTIÈRES AUX FORÇAGES

Afin de tester la sensibilité des vagues côtières aux conditions de forçages injectées au large du modèle de vagues WW3, 5 combinaisons de hauteur (Hs) et direction (Dp) de vagues ont été simulées et les résultats sont analysés au niveau des bouées côtières (Tableau 11 et Figure 62). [ Remarque : lors de la réalisation de ces tests, le modèle WW3 fonctionne en mode stationnaire (sans marée) et sans vent. ]

Scénario	Vagues			Vent		Espiguette			Camargue		
	Hs (m)	Tp (s)	Dp (deg)	Vit (m/s)	Dir (deg)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (deg)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (deg)
1	4	8	125	20.5	121	3.85	8	138	3.11	8	150
2	4	8	185	20.5	121	3.71	8	180	3.60	8	188
3	6	10	125	26.4	121	5.34	10	144	4.38	10	155
4	6	10	135	26.4	121	5.52	10	149	4.65	10	159
5	8	11	125	35	121	6.93	11	147	5.68	11	157

Tableau 11 : Conditions de forçages en vagues et vent injectées dans le modèle WW3 pour les 5 scénarios de sensibilité et résultats aux bouées « Espiguette » et « Camargue ».

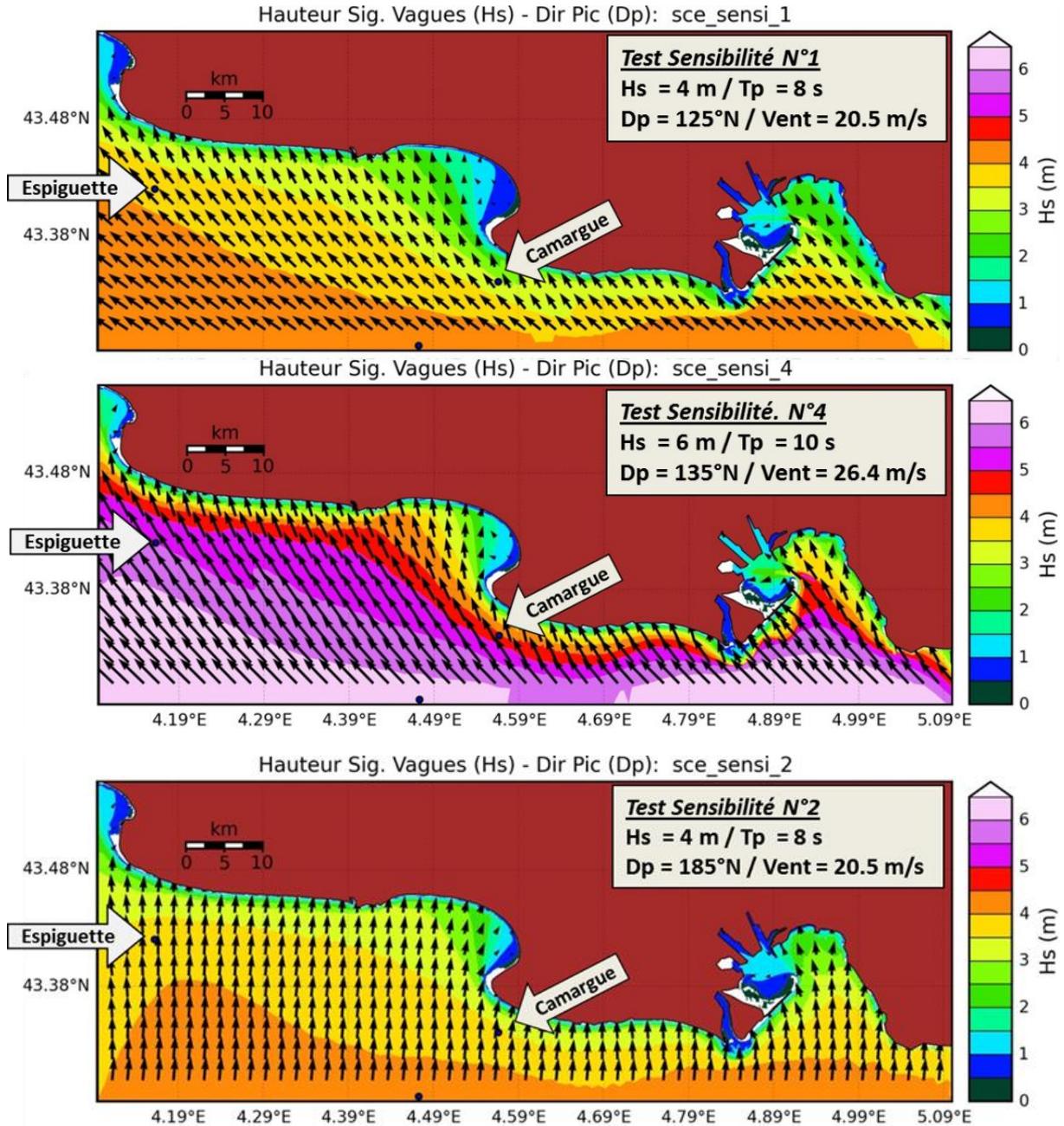


Figure 62 : Simulation de vagues pour les « tests de sensibilité » n°1,2 et 4.

Les « tests de sensibilité » n°1 et 2 (Tableau 11 et Figure 62) permettent d'évaluer la sensibilité des conditions de mer côtières aux directions de provenance des vagues. En effet, des vagues orientées de secteur sud sont moins atténuées dans le Golfe de Beauduc que celle de secteur sud-est. Il en est de même au niveau de la pointe de Beauduc, à la bouée Camargue, avec des vagues de secteur sud (test n° 2) :  $Hs_{[n^{\circ}2]} = 3,60 \text{ m}$  vs  $Hs_{[n^{\circ}1]} = 3,11 \text{ m}$ .

### 5.3. INFLUENCE DU VENT SUR LES NIVEAUX CÔTIERS ET SUR LES ÉTANGS

Afin de tester la sensibilité des niveaux côtiers et dans les étangs aux conditions de vent (vitesse et direction) imposées sur l'ensemble de l'emprise modélisée, 9 combinaisons d'intensité (Uvent) et de direction (Dir\_vent) de vent ont été simulées et les résultats sont analysés à la côte et dans les étangs.

*(Remarque : lors de la réalisation de ces tests, le modèle hydrodynamique MARS-2DH fonctionne en mode stationnaire (vent constant en intensité et direction), sans marée et sans agitation du plan d'eau (ie : sans vagues) avec pour condition initiale un plan d'eau (mer et étangs) au niveau 0 m NGF/IGN69. Les simulations durent environ 24 heures, ce qui permet l'établissement de la surcote liée au vent et les bascules dans les étangs.)*

Les 9 couples « de sensibilité » sont présentées dans le tableau ci-dessous (Tableau 12) :

		Direction des vents (°N)		
		102.5°N	125°N	147.5°N
Vitesse du vent	20 m/s (72 km/h)	x	x	x
	25 m/s (90 km/h)	x	x	x
	30 m/s (108 km/h)	x	x	x

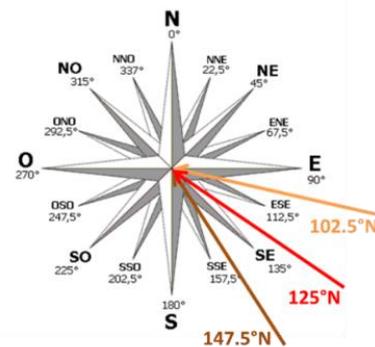


Tableau 12 : Couples direction/vitesse du vent retenus pour les tests de sensibilité des conditions de vents sur les niveaux à la côte et dans les étangs.

L'analyse de sensibilité est effectuée autour du couple vitesse / direction du vent initialement retenue (25 m/s / 125°N) lors de la définition de la covariable « Vent » (cf. paragraphe 0). Concernant la vitesse du vent une plage de valeur centrée autour de valeur moyenne 25m/s est retenue. Concernant les directions, un étalement directionnel de 45° autour de la direction moyenne de 125°N a été choisie. Dans la suite, les directions de provenance du vent 102,5°N ; 125°N et 147,5°N seront dénommées par les directions est-sud-est ; sud-est et sud-sud-est.

#### 5.3.1. Secteur des Saintes-Maries-de-la-Mer

Les surcotes établies au bout de 24 h sont analysées au rivage des Saintes-Maries-de-la-Mer (bathymétrie 10 m de fond) (Figure 63). Les surcotes prennent des valeurs comprises entre 7 cm et 23 cm en fonction de l'intensité et de la direction des vents. Les vents de secteur sud-sud-est (147,5°N) sont les plus pénalisants avec des surcotes de plus de 20 cm pour des vents forts supérieurs à 100 km/h.

L'analyse de sensibilité des surcotes aux vitesses du vent conduit à la conclusion qu'une augmentation de la vitesse du vent de 20 m/s (72 km/h) à 30 m/s (108 km/h) (pour une direction de secteur sud-est) se traduit par une augmentation de la surcote de 9 cm à 21 cm, soit approximativement au double.

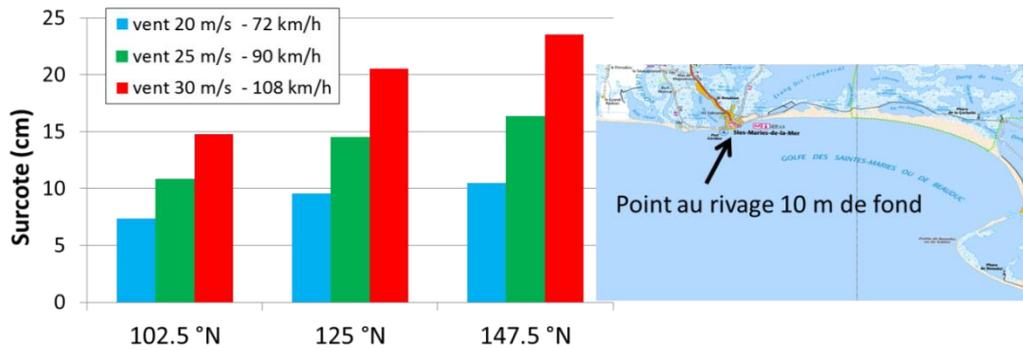


Figure 63 : Surcote établie liée au vent pour des vents constants (intensité/direction) au bout de 24h.

### 5.3.2. Secteur du Golfe de Fos

Dans le Golfe de Fos, les surcotes des 9 tests de sensibilité (établies au bout de 24 h) liées au vent sont comparées sur 15 points répartis le long du rivage (Figure 64). Au fond du Golfe, dans la partie ouest (points n° 2 à 6) et dans la partie centrale (points n° 9 et 10), les surcotes atteignent des valeurs supérieures à 20 cm pour des vents d'intensité de 108 km/h pour les 3 directions testées.

Les différences relatives en termes de surcote induite par des vents soufflants à 72 km/h et à 108 km/h sont de l'ordre de 10 à 20 cm au niveau du rivage. Dans la partie ouest (points n° 1 à 4), les vents de secteur est-sud-est (102,5°N) sont les plus pénalisants, alors que dans la partie centrale (n° 9 à 14) ce sont les orientations sud-sud-est (147,5°N) qui conduisent aux surcotes les plus fortes.

### 5.3.3. Secteur de l'étang du Vaccarès

Dans l'étang du Vaccarès, il s'agit de s'intéresser à la bascule du plan d'eau liée au vent. Les surcotes liées au vent sont comparées sur 25 points situés sur les rives de l'étang (Figure 65).

Sur le rivage ouest à nord-ouest (n° 1 à 8), on observe une bascule avec des surcotes de l'ordre de + 5 cm (pour de vents d'intensité 72 km/h) à + 15 cm (pour des vents d'intensité 108 km/h). Les directions les plus pénalisantes sont celles de secteurs sud-sud-est à sud-est.

Sur les rives est à sud-est (n° 12 à 18), la bascule du plan d'eau génère des décotes comprises entre -2 cm (vent de secteur sud-est avec des vitesses de 72 km/h) et -10 cm (vent de secteur sud-sud-est avec des vitesses de 108 km/h) (Figure 66).

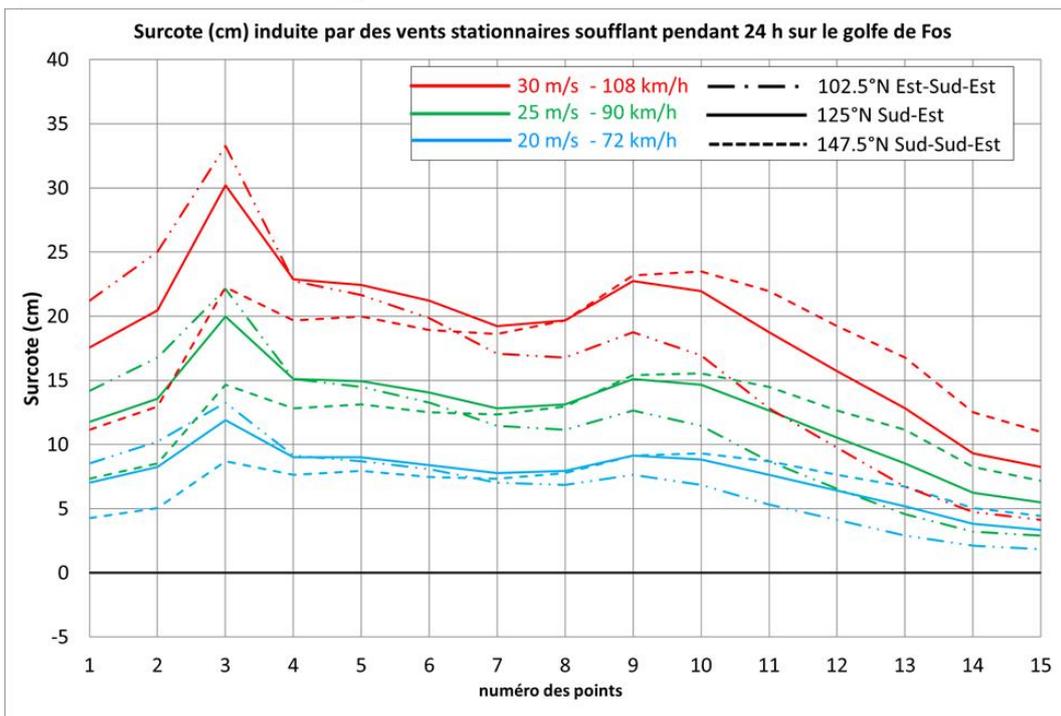
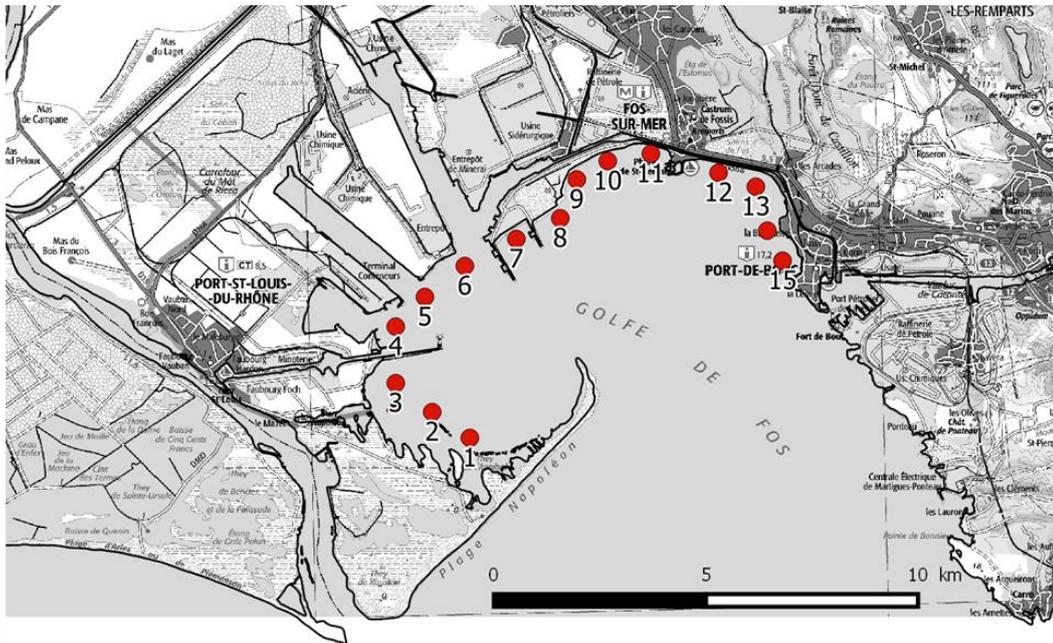


Figure 64 : Surcotes établies liées au vent pour des vents constants (9 scénarios d'intensité et direction) au bout de 24 h dans le Golfe de Fos.

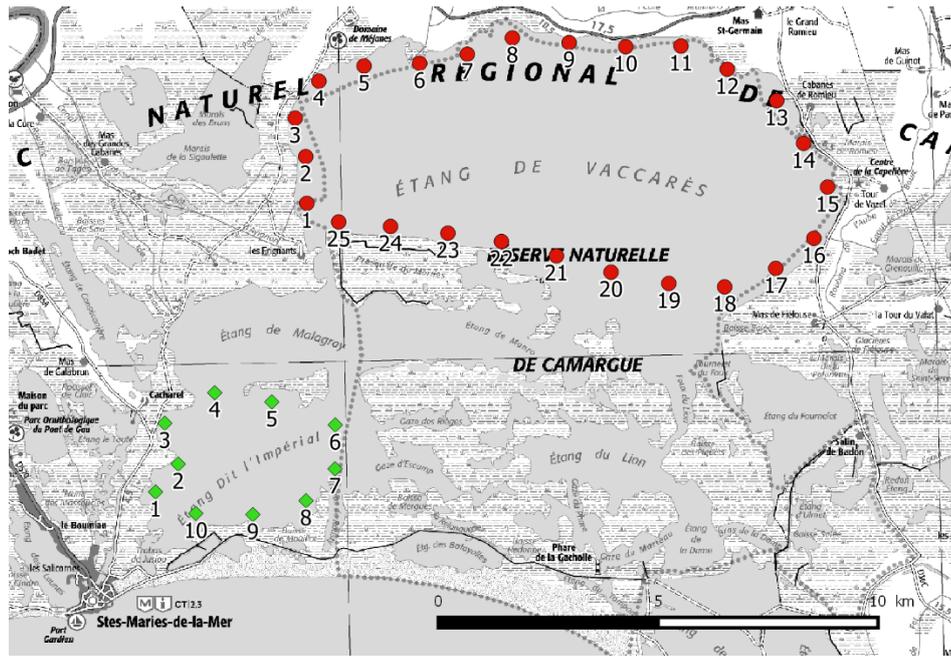


Figure 65 : Localisation des points sur les rives de l'étang Vaccarès (rouge) et celui dit l'Impérial (vert) pour évaluer la bascule liée au vent.

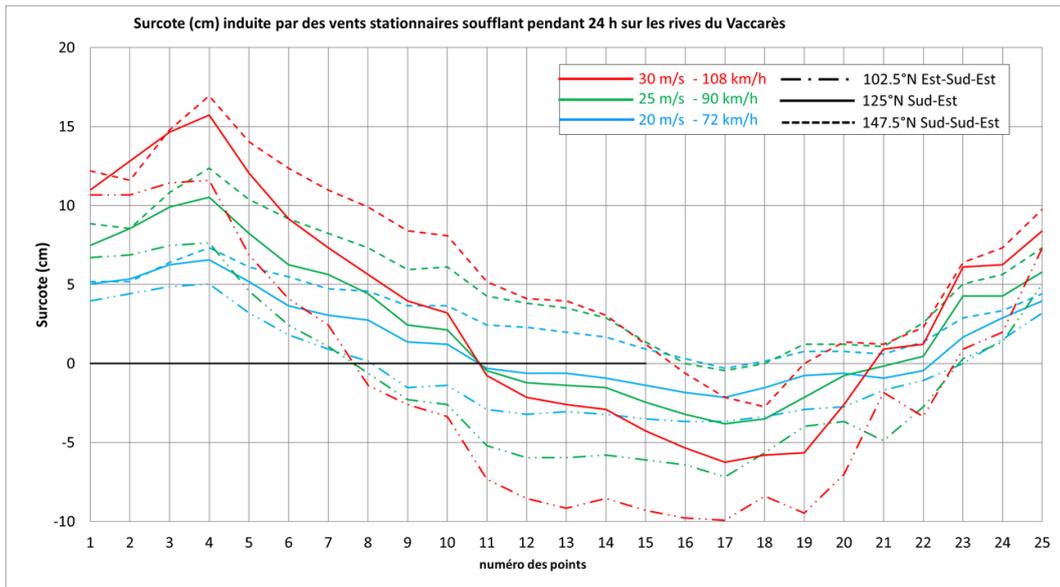


Figure 66 : Surcotes (et décotes) établies liées au vent pour des vents constants (9 scénarios d'intensité et direction) au bout de 24 h sur le pourtour (numéro des points) des rives de l'étang du Vaccarès.

### 5.3.4. Secteur de l'étang dit l'Impérial

Dans l'étang dit l'Impérial, il s'agit de s'intéresser à la bascule du plan d'eau liée au vent. Les surcotes liées au vent sont comparées sur 10 points situés sur le pourtour de l'étang (points verts sur Figure 65). Les surcotes les plus importantes sont observées pour des vents d'intensité 108 km/h avec des directions de secteur est-sud-est sur le rivage ouest à nord-ouest (pont n°1 à 4) avec des surcotes de plus de 30 cm.

Les différences relatives en termes de surcote induite (sur la partie nord-ouest de l'étang) par des vents soufflants à 72 km/h et à 108 km/h sont comprises entre ~10 et 20 cm en fonction des orientations des vents (Figure 67).

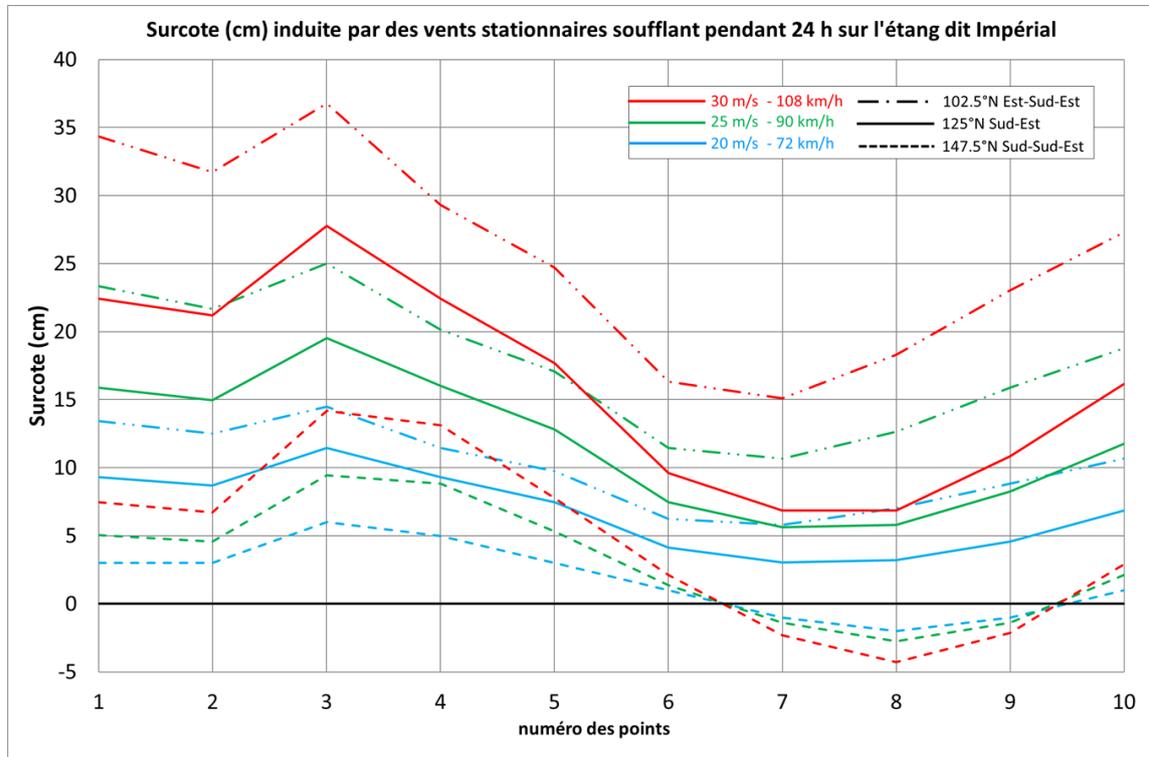


Figure 67 : Surcotes établies liées au vent pour des vents constants (9 scénarios d'intensité et direction) au bout de 24 h sur le pourtour (numéro des points) des rives de l'étang dit l'Impérial.

## **6. Reproduction des processus conduisant à la submersion et validation de la chaîne de modélisation**

La tempête de novembre 1982 a été retenue pour réaliser une validation du modèle et des tests de sensibilité du système de modélisation mis en place. Des éléments de calage (observations) ont été utilisés pour s'assurer de la bonne reproduction des différents processus. Cet évènement historique de tempête couvre un large spectre de conditions de tempête en termes de hauteurs de vagues, de niveaux marins et de leurs périodes de retour associées ce qui permet de tester que le modèle est apte à reproduire l'ensemble de l'éventail des conditions hydrodynamiques locales.

### **6.1. CONDITIONS DE FORÇAGES**

Lors de la phase de calage/validation et de mise en place des modèles d'agitation (WW3) et hydrodynamique (MARS-2DH), les niveaux enregistrés (observés), les vagues et les vents modélisés lors de la tempête du 6 au 10 novembre 1982 ont été utilisés.

#### **6.1.1. Conditions aux limites en niveau**

Les enregistrements du marégraphe de Port-de-Bouc (courbe points bleus - Figure 68 ) lors de la tempête du 6 au 10 novembre 1982 ont été utilisés et imposés sur les limites marines sud, ouest et est des modèles. Le marégraphe de Port-de-Bouc de par sa situation géographique dans la partie est du Golfe de Fos est protégé des conditions d'agitation et de la pénétration éventuelle des vagues et du déferlement associé à l'intérieur du port.

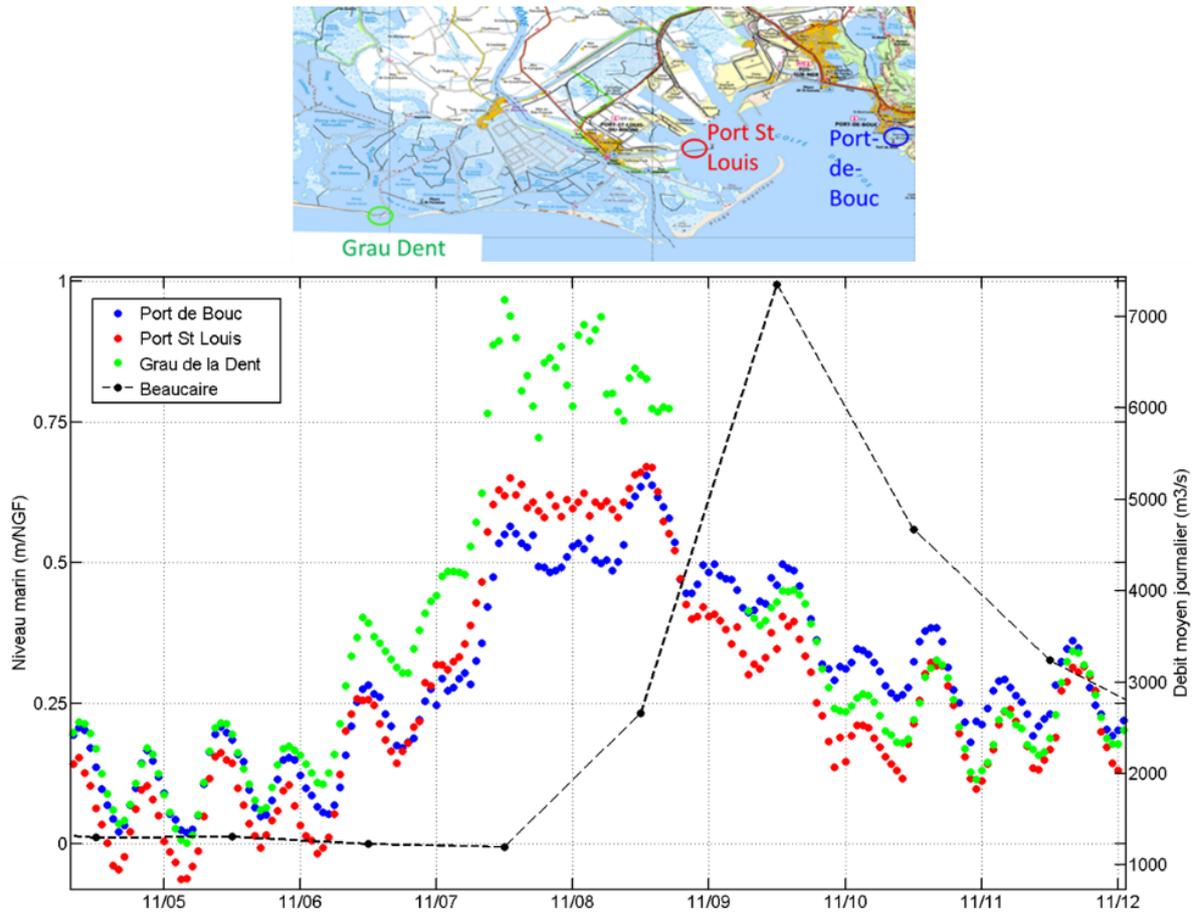


Figure 68 : Chroniques observées des niveaux marégraphiques et débit moyen journalier du Rhône à la station de Beaucaire lors de la tempête des 6, 7, 8, 9 et 10 novembre 1982.

### 6.1.2. Conditions aux limites en vagues

À partir de la chronologie des paramètres de vagues caractéristiques sur la période du 6 au 10 novembre 1982 (cf. paragraphe 3.8.1 et Figure 29), des spectres de vagues sont générés et imposés aux limites marines du modèle d'agitation.

### 6.1.3. Forçages en vent

Les données de la ré-analyse de vent CFSR permettent de simuler sur l'ensemble de la Camargue les caractéristiques de vent (*de manière hétérogène et instationnaire*) durant la tempête de novembre 1982 (cf. paragraphe 0 et Figure 27).

### 6.1.4. Apport fluvial du Rhône

À la limite nord du modèle, un hydrogramme du Rhône est imposé pour prendre en compte l'écoulement du Rhône. Lors de la phase de validation du modèle, les débits moyens journaliers (QMJ) enregistrés à Beaucaire ont été utilisés sur la période du 6 au 10 novembre 1982 (courbe noire - Figure 68).

### 6.1.5. État initial des étangs

Les conditions initiales à terre sont telles que les étangs soient en eau au démarrage de la simulation avec un niveau de 0 m NGF/IGN69.

## 6.2. SURCOTE LIÉE AU DÉFERLEMENT DES VAGUES

L'évolution des caractéristiques des vagues simulées depuis le large jusqu'à la côte est présentée sur la Figure 69. Les hauteurs significatives des vagues varient de 6 m au large pour atteindre des valeurs comprises entre 2 et 3 m en proche côtier avant déferlement. Les périodes pic sont comprises entre 6 et 10 secondes correspondant à des périodes de houle. Enfin les vagues au large proviennent du secteur sud-est.

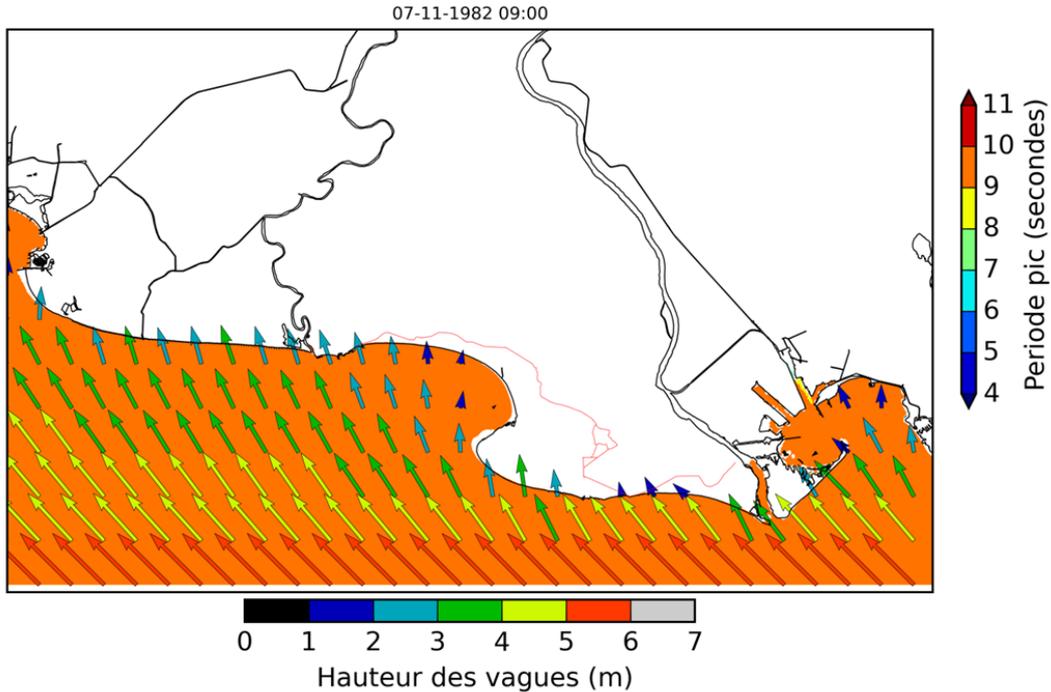
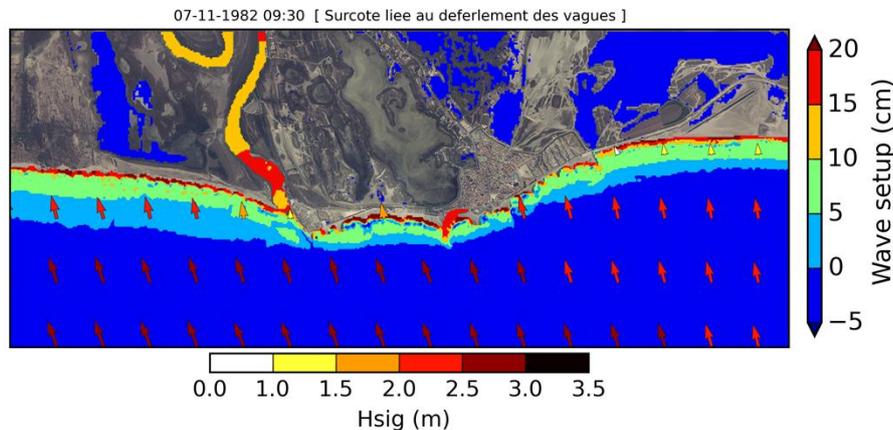


Figure 69 : Propagation des vagues lors de la tempête de novembre 1982 (modèle WW3).  
 Les flèches informent de la hauteur significative des vagues (couleur) et de leurs directions.  
 Les périodes pic des vagues sont illustrées en couleur sur le fond de carte (ici comprises entre 9 et 10s).

À l'approche de la côte, les vagues générées au large sont modifiées par la bathymétrie (interaction avec le fond). Du fait de l'interaction croissante entre les vagues et le fond, une partie de l'énergie des vagues est transférée sur la verticale. On observe alors une surélévation moyenne du niveau de la mer (*wave setup*, ou surcote liée aux vagues) liée à l'action des vagues et dont l'ampleur dépend des caractéristiques des vagues et de la bathymétrie (Figure 70).



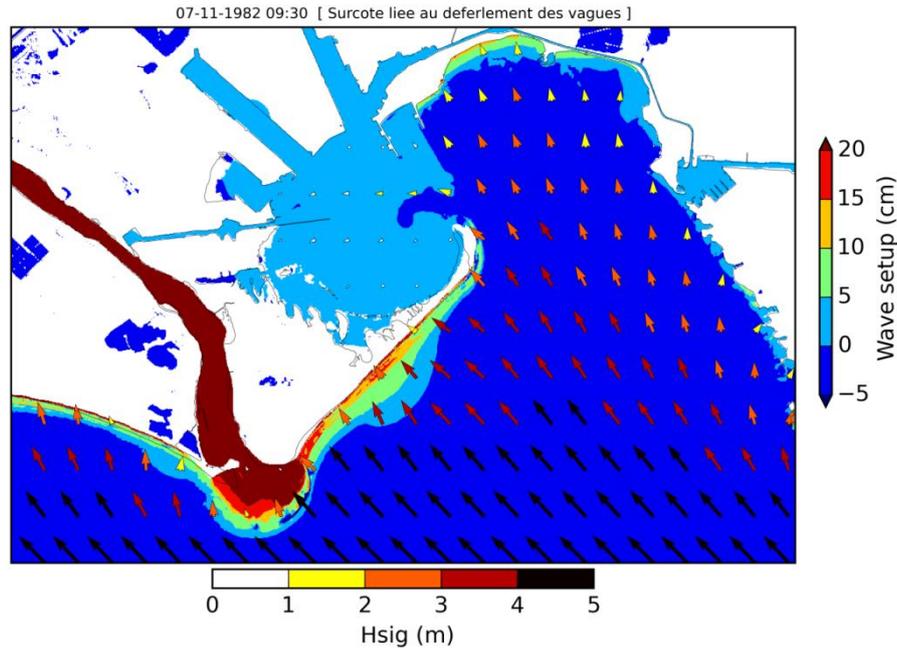


Figure 70 : Surcote associée au déferlement des vagues en zone littorale lors de la tempête de novembre 1982 (wave set-up). Zooms sur les Saintes Maries de la Mer (en haut) et sur le Golfe de Fos (en bas). Les flèches informent de la hauteur significative des vagues (couleur) et de leurs directions. La surcote liée au déferlement des vagues est illustrée en couleur sur le fond de carte.

### 6.3. ÉLÉMENTS DE VALIDATION DE LA MODÉLISATION

Sur la base des niveaux observés et des observations relevées lors de la tempête de novembre 1982, le modèle a été paramétré pour reproduire au mieux les secteurs inondés par débordement.

#### 6.3.1. Influence du vent sur les étangs

Lors de la tempête de novembre 1982, des vents de secteur sud-est ( $135^{\circ}$ N) ont soufflé avec des vitesses moyennes de 100 km/h. Ces vents ont poussé les masses d'eau en surface dans les étangs et induit un basculement des plans d'eau. Une simulation a été réalisée avec pour condition initiale une cote de 0 m NGF/IGN69 dans les étangs (Figure 71). Le modèle reproduit bien la surcote/décote liée au basculement des plans d'eau. La surcote peut atteindre des valeurs comprises entre +10 et +30 cm au nord-ouest des étangs du système Vaccarès.

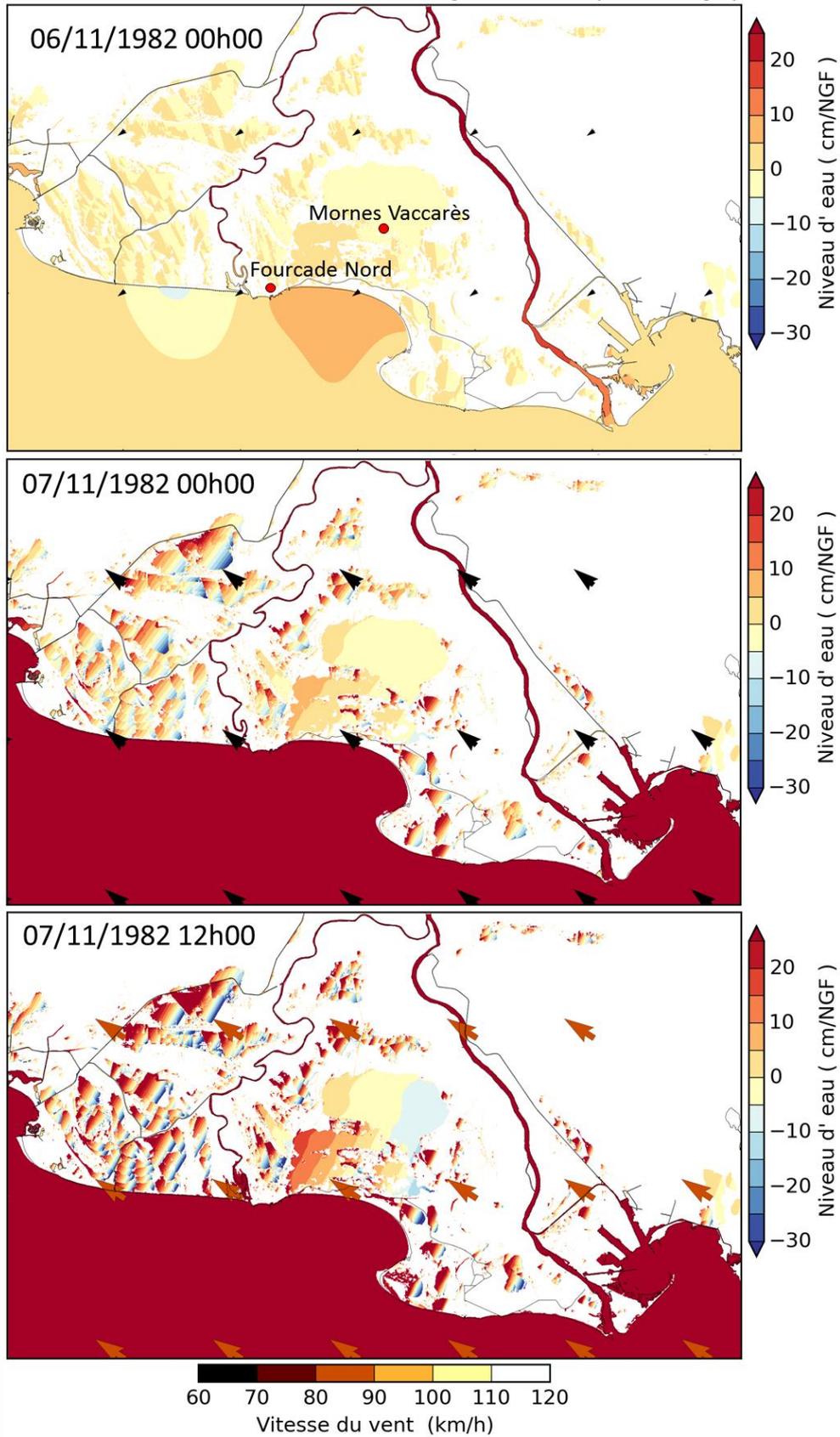


Figure 71 : Effet du vent sur les niveaux des étangs lors de la tempête de novembre 1982.

Les surcotes/décotes liées au vent dans les étangs ont été comparées avec celles enregistrées lors de la tempête de 1982 (Figure 72).

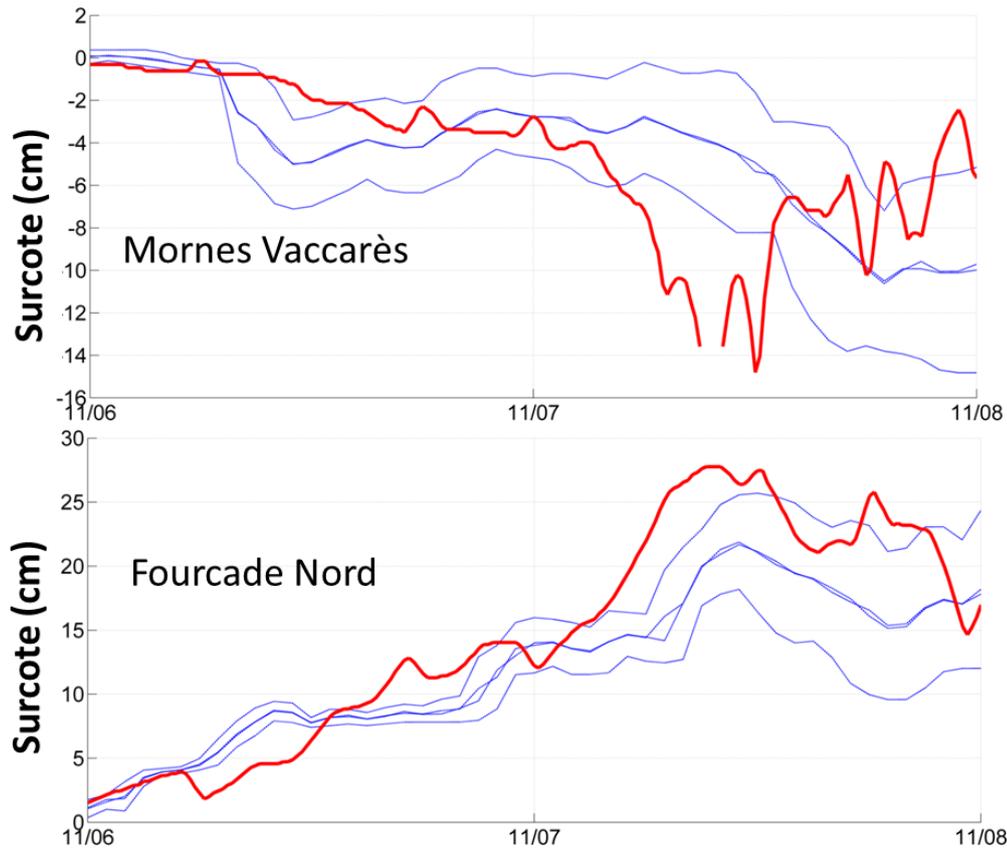


Figure 72 : Comparaison des surcotes liées au vent dans les étangs modélisées (rouge) et observées (courbes bleues : minimum, moyenne, barycentre et maximum des enregistrements NUMIEAU du CETE, 2007, 2010 ).

### 6.3.2. Validation du niveau marin côtier

Pour évaluer la qualité des résultats en termes de reproduction de niveau marin total, les niveaux modélisés avec et sans contribution des vagues sont comparés avec les mesures (valeurs moyennes horaires) :

- au niveau du marégraphe du Grau-de-la-Dent (Figure 73) ;
- du pertuis de Fourcade Sud (Figure 74) ;
- et au niveau du marégraphe à Port-Saint-Louis-Rhône (Figure 75).

Cette comparaison permet de s'assurer d'une reproduction satisfaisante du niveau marin et de l'importance de la surcote liée au déferlement des vagues à l'échelle de la zone d'étude ; compte-tenu des incertitudes liées à la variabilité des données de vents (données de modèle CSFR), et de l'utilisation d'un forçage homogène à la frontière du modèle.

Les écarts plus importants, de l'ordre de 10 à 20 cm entre le niveau observé et modélisé, constatés au niveau du pertuis de la Fourcade résultent probablement d'effets locaux liés à la position interne du marégraphe et aux perturbations par les écoulements au sein du pertuis lors de la tempête.

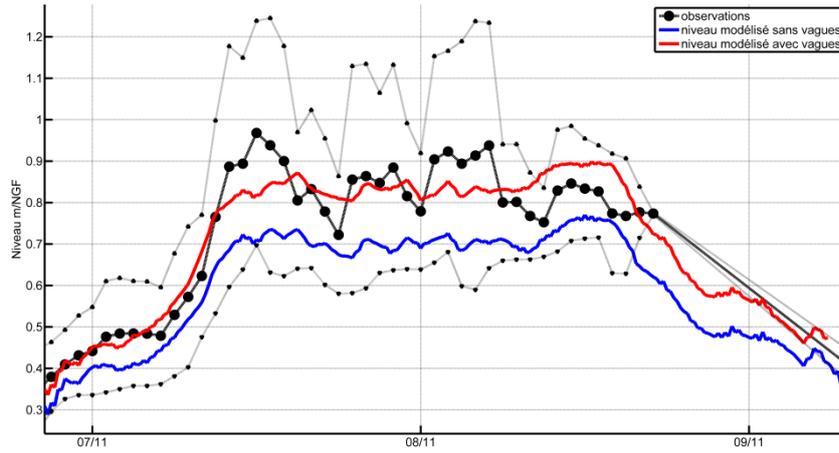


Figure 73 : Comparaison des niveaux modélisés au Grau de la Dent avec (rouge) et sans (bleu) la contribution relative de surcote liée au déferlement des vagues avec les observations (points noirs en gras et enveloppes des minimas et maximas).

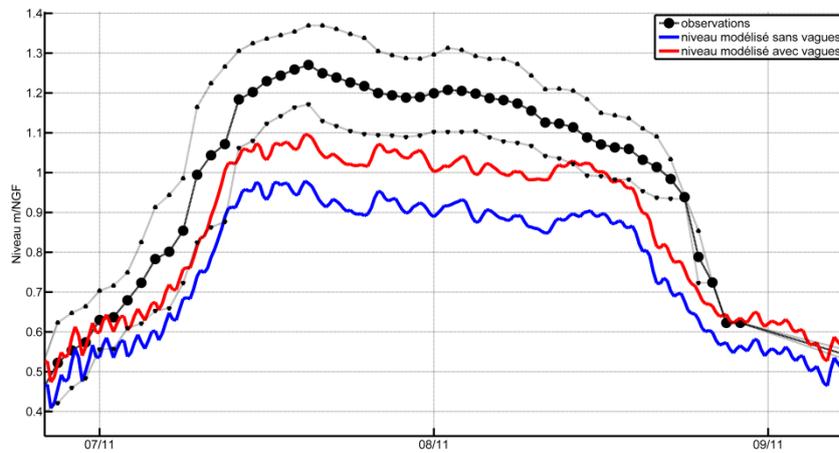


Figure 74 : Comparaison des niveaux modélisés au niveau de Fourcade Sud avec (rouge) et sans (bleu) la contribution relative de surcote liée au déferlement des vagues avec les observations (points noirs en gras et enveloppes des minimas et maximas).

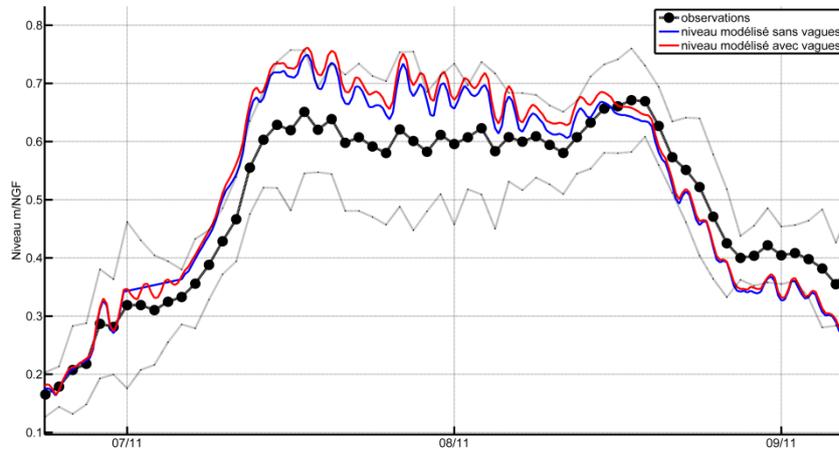


Figure 75 : Comparaison des niveaux modélisés à Port-Saint-Louis-du-Rhône avec (rouge) et sans (bleu) la contribution relative de surcote liée au déferlement des vagues avec les observations (points noirs en gras et enveloppes des minimas et maximas).

### 6.3.3. Validation de la submersion en zone côtière

Les résultats de la simulation ont été comparés en termes de submersion avec les observations ponctuelles inventoriées par le CETE (2007, 2010) sur les secteurs de la Camargue qui ont été inondés lors de la tempête de novembre 1982 (Figure 76).

Certains de ces relevés donnent des informations sur la localisation des secteurs inondés avec des témoignages (presse, CR, photos, ...) sur le déroulé de l'inondation, d'autres des informations sur les hauteurs d'eau atteintes (essentiellement sur le secteur des Saintes-Maries-de-la-Mer) et d'autres encore sur la formation de brèches, d'effondrements, des travaux de confortement réalisés suite à la tempête. Exemple : extrait de la revue de presse détaille la formation de brèches au niveau de l'embouchure du Petit Rhône et des zones inondées :

*« Dans la nuit de dimanche à lundi, la mer démontée brisait la digue Ouest cette fois, et ce en plusieurs points. La partie Ouest de la commune vers le Tiki et les manades Aubanel et Raynaud ont été complètement inondées. De 40 à 100 cm d'eau par endroits »* Le Méridional du 9 novembre 1982.

Du fait des évolutions morphologiques de la frange côtière, des différents aménagements côtiers réalisés depuis 1982, de la non prise en compte de l'étude des brèches dans les digues, la validation par rapport à un événement historique ne peut être que partielle. Toutefois, les observations disponibles peuvent être utilisées pour s'assurer du réalisme des zones inondées par débordement.

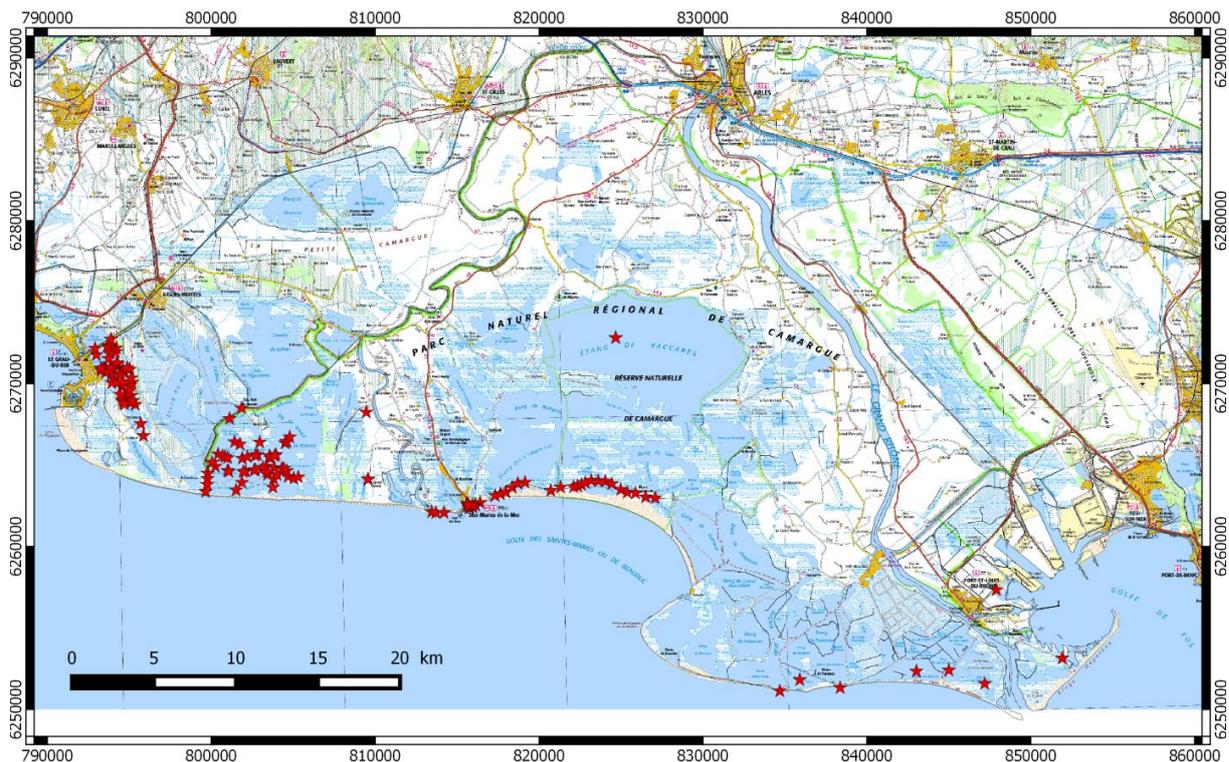


Figure 76 : Localisation des observations ponctuelles (étoiles rouges) à l'échelle de la Camargue



Dans le secteur de l'embouchure du Rhône et du Golfe de Fos (Figure 79), les différents points d'observation localisant les zones inondées ont été atteints par la modélisation de la submersion.

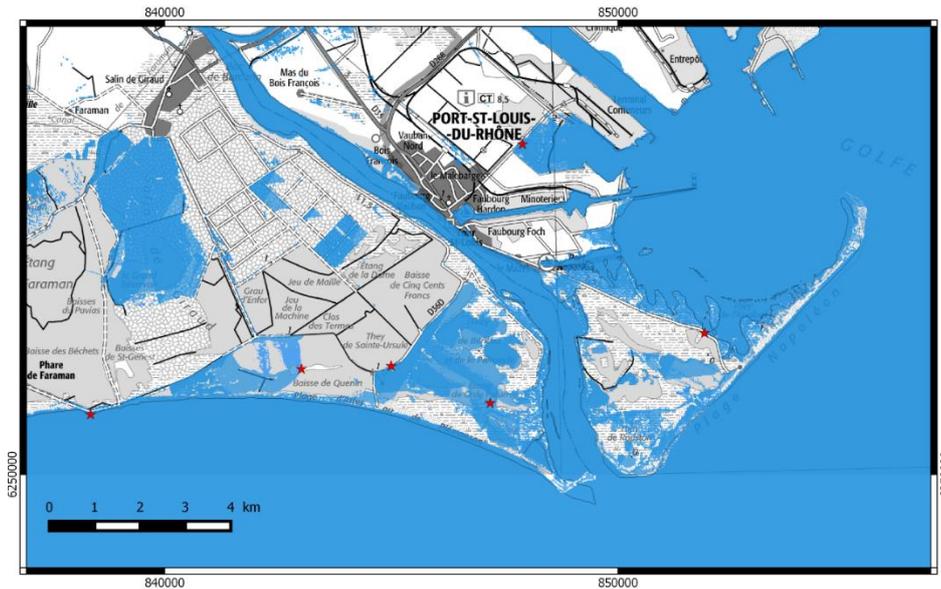


Figure 79 : Extension de la zone inondée modélisée (bleu) lors de la tempête de novembre 1982 et localisation des observations ponctuelles (étoiles rouges) au niveau de l'embouchure du Rhône et du Golfe de Fos.

#### 6.3.4. Dynamique de la submersion

Une illustration de la dynamique de la submersion est présentée sur la Figure 80. La propagation de l'inondation entre les 7 novembre 1982 12h00 et le 8 novembre 1982 18H00 montre en différents instants les entrées d'eau préférentielles le long du littoral et la dynamique des écoulements.

Cette vision de la dynamique de la submersion est ici possible car le modèle permet d'obtenir en chaque point du maillage du domaine d'étude (espace) et à chaque instant de la simulation (temps), les séries de données de hauteur d'eau et des vitesses horizontales moyennées sur la verticale (intensité et direction).

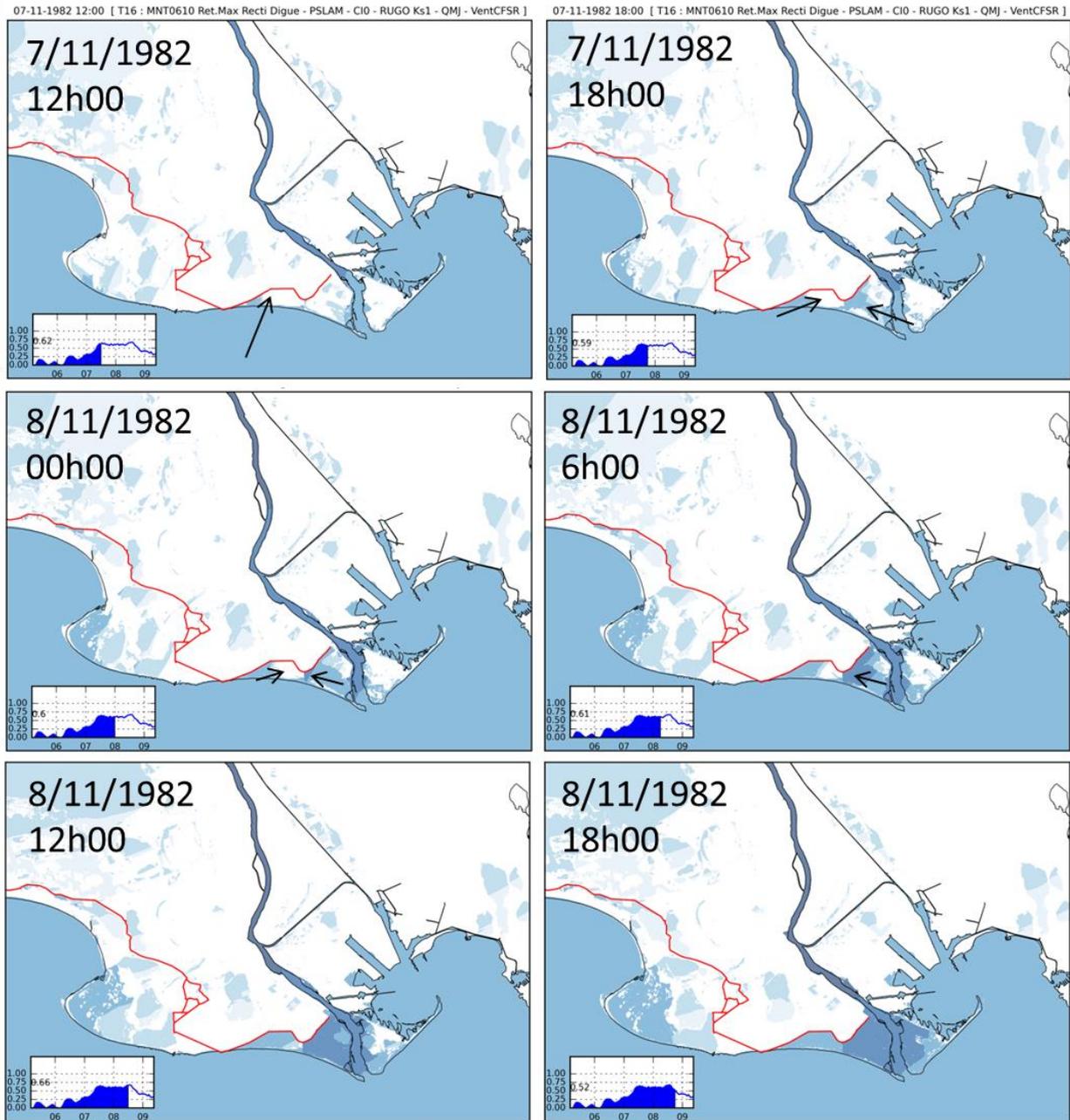


Figure 80 : Illustration de la dynamique de submersion les 7 et 8 novembre 1982. La digue à la mer est figurée en trait continu rouge. Des flèches précisent les entrées d'eau préférentielles.



## 7. Simulations et résultats

Dans cette section, les résultats des simulations sont présentés sous différentes formes : cartographies de l'extension des submersions, de l'altitude du plan d'eau, des hauteurs d'eau ; des tableaux de synthèse des niveaux marins côtiers, des hauteurs d'eau à terre ; des séries temporelles rendant compte de la dynamique de la submersion.

Les résultats sont présentés dans le rapport sous la forme de cartographie à l'échelle de la Camargue. Les données SIG produites sont décrites en Annexe 2.

### 7.1. SIMULATIONS DES ÉVÈNEMENTS DE RÉFÉRENCE RELATIFS À LA SUBMERSION MARINE

#### 7.1.1. Définitions et caractéristiques des événements de référence pour la caractérisation de la submersion marine

La cartographie des phénomènes de submersion marine sur le territoire de la Camargue est réalisée pour 3 événements d'occurrence fréquente, moyenne et extrême déclinés selon des échéances actuelle et future :

- à l'échéance actuelle, 2 événements d'occurrence fréquente (période de retour ~10 ans), un événement d'occurrence moyenne (période de retour ~100 ans) et un événement d'occurrence extrême (période de retour ~1 000 ans) sont considérés. Pour cette échéance, une surélévation de + 20 cm du niveau moyen de la mer est à prendre en compte ;
- à l'échéance 2100, l'évènement d'occurrence moyenne (période de retour ~100 ans) est à considérer avec une surélévation de + 60 cm du niveau moyen de la mer à prendre en compte.

Les 5 événements retenus avec les échéances d'application sont présentés dans le tableau ci-dessous (Tableau 13) :

Evènement	Période de retour	Echéance actuelle	Echéance à 100 ans (2100)
2 FREQUENTS	~10 ans	FREQ_SE (vagues de secteur SUD-EST) FREQ_S (vagues de secteur SUD)	-
2 MOYENS	~100 ans	MOYEN ACTUEL	MOYEN 2100 (ou à échéance 100 ans)
1 EXTREME	~1000 ans	EXTREME	-

Tableau 13 : Synthèse des 5 événements de simulation retenus pour la cartographie de la submersion marine.

Les valeurs des conditions de forçages retenues (niveau marin, vagues, débit du fleuve, vent, incertitudes et changement climatique) pour chaque événement sont précisées au paragraphe 3.9 et sont rappelées et synthétisées dans le Tableau 14.

		Evènement	FREQ1 SUD-EST	FREQ2 SUD	MOYEN ACTUEL	MOYEN 2100	EXTREME
Conditions de forçages météo-marins au large	Vagues	Hs (m)	4,7	4,7	5,33	5,33	10,5
		Tp (s)	9	9	9,4	9,4	11,5
		Dp (°N)	125	180	155	155	125
	Niveau marin (m NGF): SWL + incertitudes + élévation du niveau de la mer		1,31	1,31	1,55	1,95	1,9
	Vent	Vitesse (km/h)	81	81	87	87	144
		Direction (°N)	121	121	121	121	121

Tableau 14 : Conditions de forçages au large pour les évènements Fréquent (sud-est et sud), Moyen Actuel, Moyen 2100 et Extrême.

### Évènements « Fréquents »

Deux évènements « fréquent » sont simulés avec des directions de provenance des vagues de secteur Sud et Sud-Est pour un horizon temporel actuel : **FREQ1\_SUD (ou FREQ\_S)** et **FREQ2\_SUD\_EST (ou FREQ\_SE)**.

### Évènement Moyen Actuel

Une sélection de 7 combinaisons « centennales » ont été définies au paragraphe 3.9 comme représentative de l'ensemble des évènements susceptibles de générer un niveau marin « centennal » au rivage:

- 5 combinaisons hauteurs de vagues / niveau marin et leurs variables associées : combinaisons n° C1 à C5 ;
- 2 combinaisons parmi les 5 sont redéfinies avec des directions de provenance des vagues de secteur Sud-Sud-Est : combinaisons n° C7 et C6.

Ces 7 combinaisons ont donc été simulées dans un premier temps afin d'identifier selon les secteurs la combinaison centennale la plus pénalisante en termes de submersion marine : les critères de sélection se sont basés sur une analyse des hauteurs d'eau à terre, de l'emprise inondée, des niveaux marins au rivage et des altitudes du plan d'eau. Les simulations sont effectuées pour un horizon temporel actuel.

À l'issue de cette première série de 7 simulations, la **combinaison C7** est retenue comme étant la plus défavorable en termes de submersion marine à terre.

Ce choix a été fait entre le BRGM et la DDTM13 à partir de l'analyse de l'ensemble des résultats des 7 simulations. La **combinaison C7** est ainsi retenue pour caractériser l'évènement moyen noté **MOYEN\_ACTUEL**.

### Évènement Moyen 2100

La combinaison C7 est retenue pour cet évènement avec un horizon temporel à 100 ans.

Cet évènement est dénommé **MOYEN\_2100**.

## Évènement Extrême

À cette échelle de temps, le BRGM ne préconise pas la sélection d'un événement concomitant vagues/niveaux. En concertation avec la DDTM13 et pour être en cohérence avec les hypothèses retenues dans la mise en place de la Directive Inondation sur le TRI Delta du Rhône<sup>11</sup> (DREAL LR et CETE, 2013), les valeurs des variables Hs et SWL retenues pour ces occurrences sont les valeurs des bornes supérieures des intervalles de confiance à 70% des lois marginales des variables indépendantes. L'évènement Extrême est simulé pour un horizon temporel actuel.

Cet évènement est nommé **EXTRÊME**.

### 7.1.2. Cartographie de l'état initial en mer et dans les étangs

Pour rappel (cf. *paragraphe 4.7.5* - Figure 52), les conditions initiales à terre sont telles que les étangs soient en eau au démarrage de la simulation avec un niveau moyen de + 0 m NGF/IGN69 en mer et dans les étangs.

Pour la prise en compte de l'élévation du niveau moyen de la mer du fait du changement climatique, le niveau moyen de la mer et l'altitude du plan d'eau dans les étangs seront rehaussés de + 20 cm pour les évènements « actuel » (FREQ1\_SUD, FREQ2\_SUD\_EST, MOYEN\_ACTUEL et EXTREME) ou de + 60 cm pour l'évènement MOYEN\_2100.

Les hauteurs d'eau initiales pour les états Actuel et 2100 sont affichées ci-dessous :

- pour les évènements Actuel, tous les étangs ne sont pas en « eau » et certains affichent de faibles hauteurs d'eau inférieures à 20 cm (étangs au sud de la digue à la mer et ceux des Salins de Giraud) ;
- concernant l'évènement Moyen 2100, une grande partie des étangs est en « eau » avec des hauteurs d'eau en grande partie supérieures à 50 cm.

Par ailleurs, les étangs apparaissent ici hydrauliquement déconnectés les uns des autres, et pourront subir différentes évolutions en fonction des forçages météo-marins :

- (1) soit une augmentation du niveau d'eau (inondation) par surverses successives d'étang en étang depuis la submersion en provenance de la mer ;
- (2) soit une inondation liée à une bascule du plan d'eau liée au vent (certaines parties d'étang pourraient alors s'assécher) ;
- (3) soit une inondation par surverses des étangs voisins.

Aussi l'inondation d'un étang peut être liée soit à la submersion marine, soit à l'inondation en provenance d'une bascule du plan d'eau des étangs voisins, soit à la combinaison des deux précédents.

<sup>11</sup> <http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/gestion/inondations/cartes/delta-du-rhone.php>

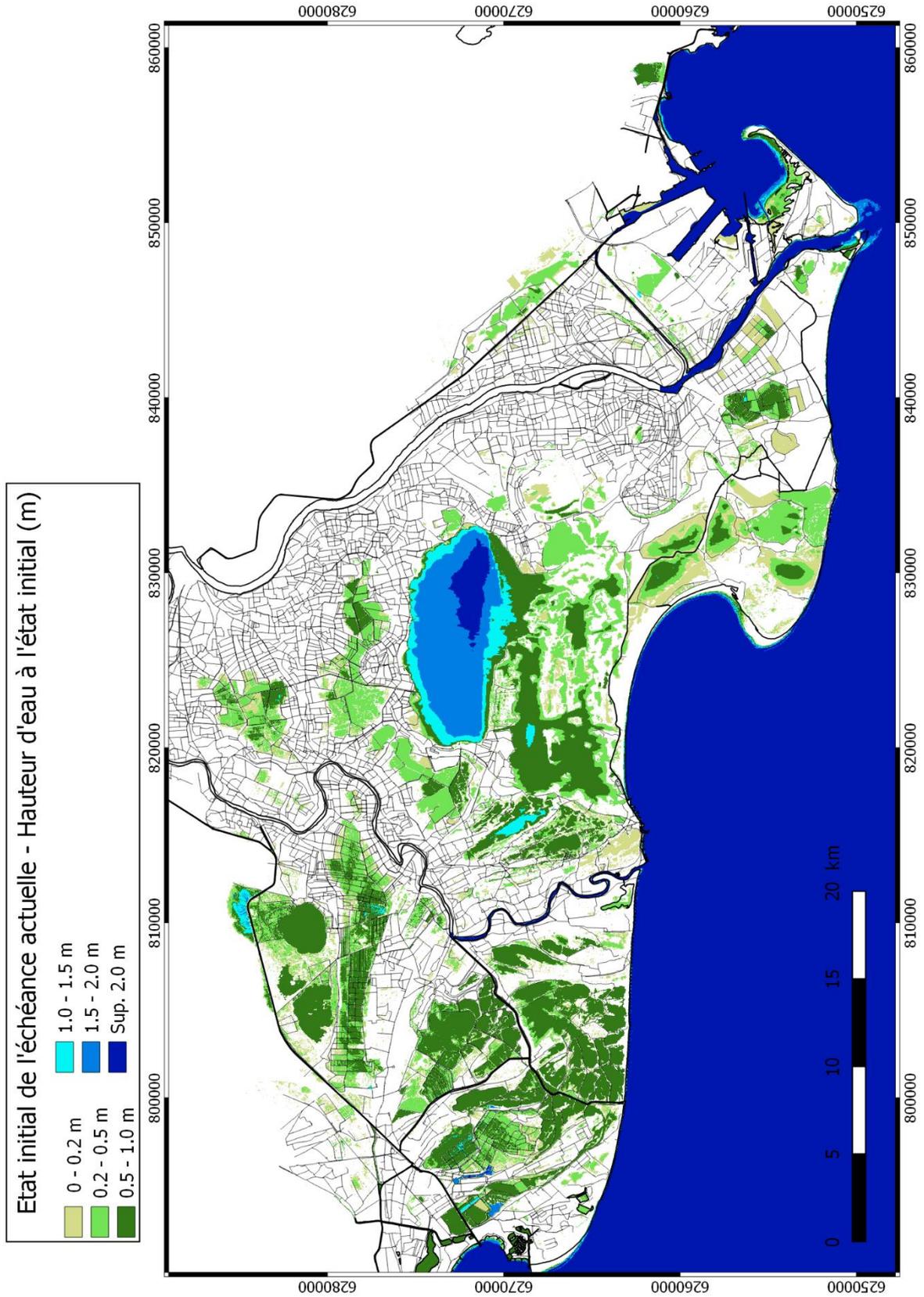


Figure 81 : Cartographie des hauteurs d'eau à l'état initial de l'échéance actuelle des événements fréquents, Moyen Actuel et Extrême.

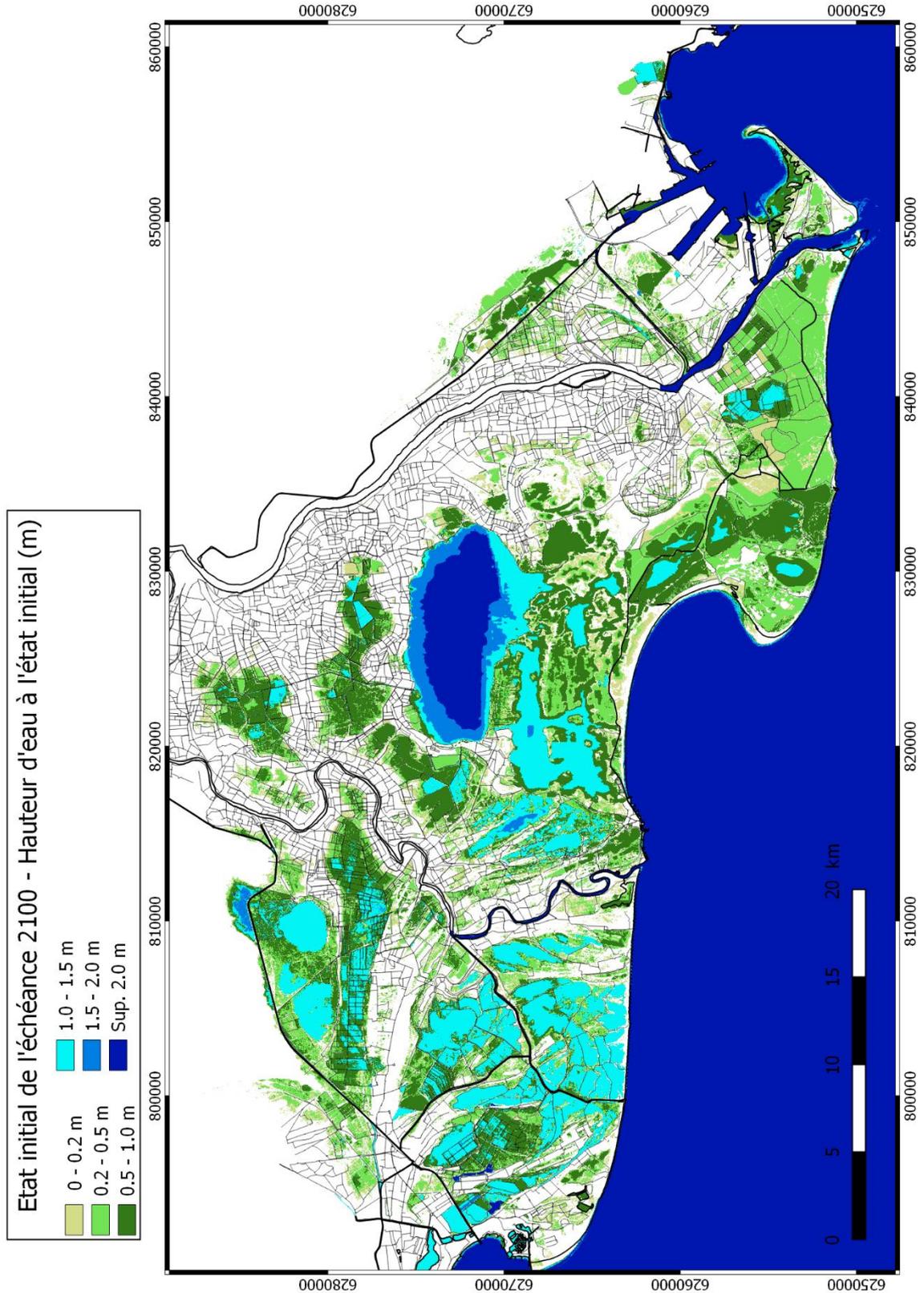


Figure 82 : Cartographie des hauteurs d'eau à l'état initial de l'évènement Moyen 2100.

### 7.1.3. Prise en compte des structures de protection et des ouvrages hydrauliques dans les simulations de référence

Dans les simulations des événements de référence, les structures de protection contre les inondations et/ou submersions (digue à la mer, digues maçonnées, enrochements, remblai, cordons naturels, etc.) sont considérées comme fonctionnelles et résistantes aux événements simulés (i.e. : aucune hypothèse de défaillances, de brèches ou de ruines n'a été considérée). De la même manière, les ouvrages hydrauliques qui mettent en relation la mer avec les étangs (pertuis, buses, vannes, etc.) ont été considérés fermés.

Concernant les digues du Rhône, le modèle n'autorise pas les débordements (*digues d'altitude dite « infinie »*) sur les rives droite et gauche du tronçon de digue compris entre Salin de Giraud (lieu-dit Ronsard, point d'injection du débit dans le modèle) et l'embranchement avec la digue à la mer en aval de Port-Saint-Louis du Rhône (Figure 83).

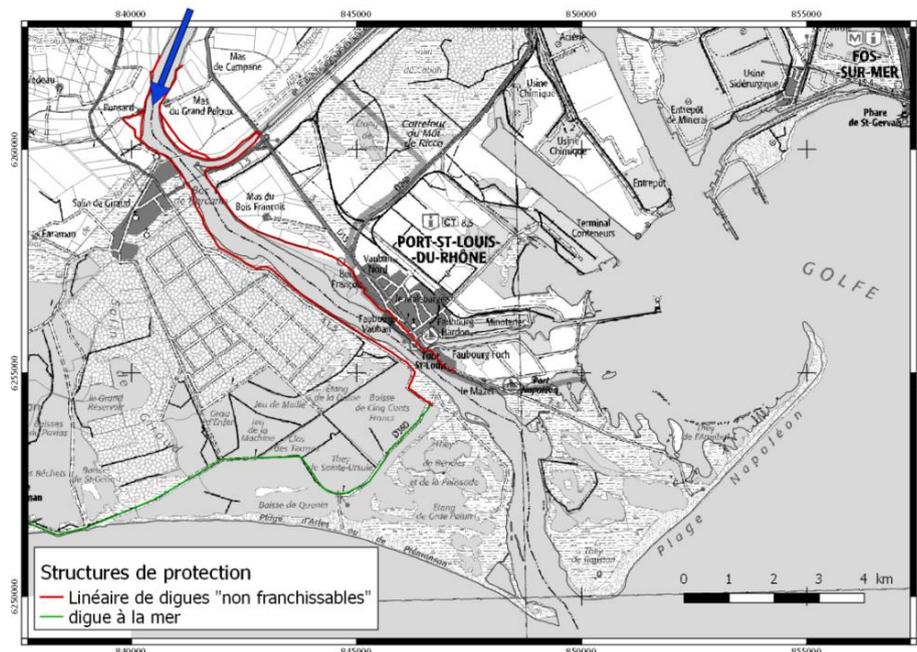


Figure 83 : Localisation du linéaire des digues du Rhône (trait rouge) qui ont été réhaussées « virtuellement » dans le modèle pour empêcher les débordements. La digue à la mer est ici figurée en vert. La flèche bleue correspond au point d'injection du débit du Rhône dans le modèle.

### 7.1.4. Détermination de la combinaison de l'évènement Moyen Actuel

Les résultats des 7 combinaisons « centennales » (Tableau 6 - paragraphe 3.9.2) ont été analysés pour déterminer la combinaison conduisant à l'inondation la plus défavorable en termes de niveaux marins au rivage, de hauteurs d'eau à terre et de surfaces inondées.

Une première analyse a été menée en cartographiant le numéro de scénario dont l'altitude du plan d'eau est maximale (Figure 84). Cette carte met en évidence plusieurs secteurs impactés par des combinaisons différentes :

- les zones inondées sur le secteur de littoral compris entre la pointe de l'Espiguette et le Golfe de Beauduc sont globalement dues à la combinaison C7, et localement aux combinaisons C5 et C6 dans le Golfe de Beauduc ;
- le secteur de littoral compris entre la pointe de Beauduc et le Golfe de Fos est majoritairement inondé par la combinaison C6.

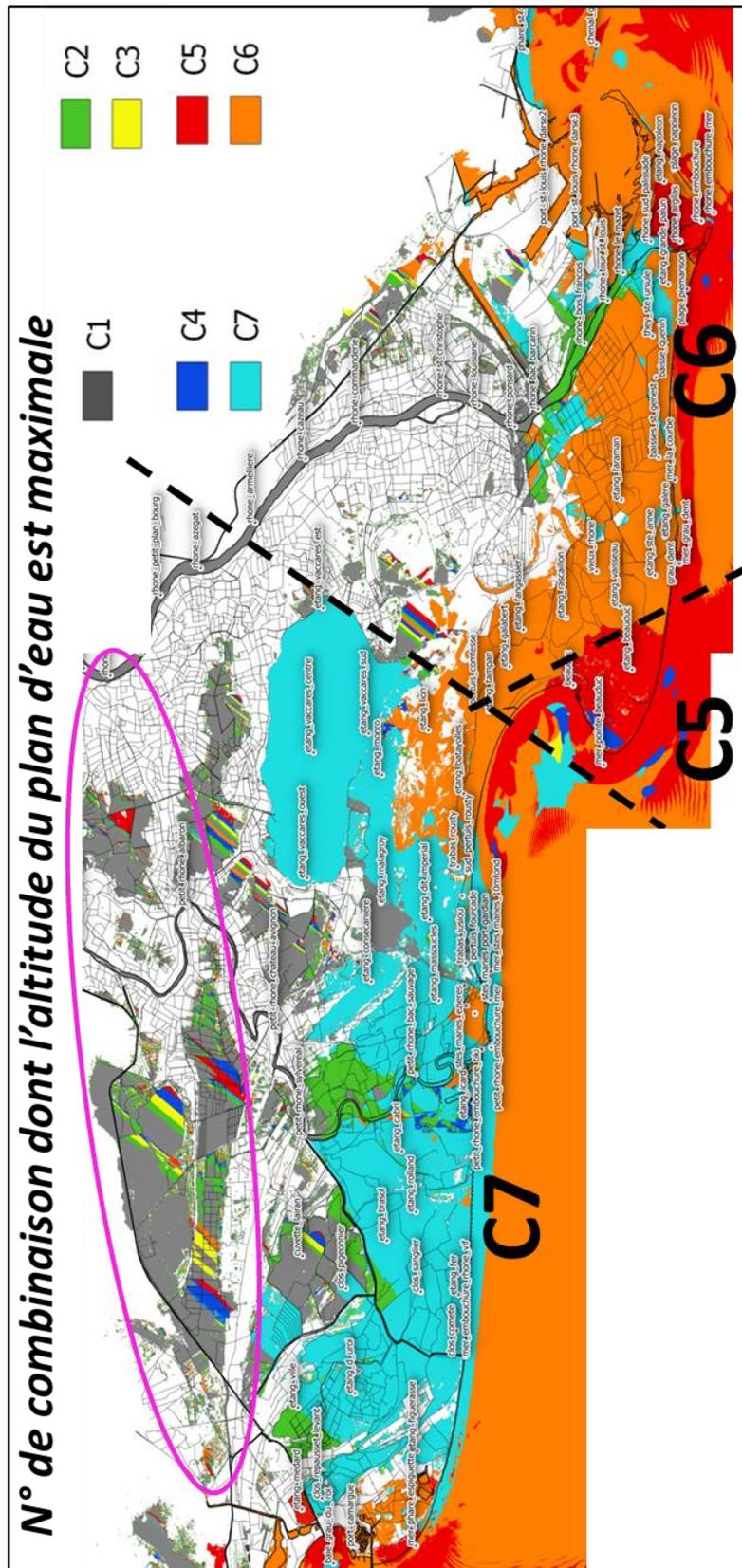


Figure 84 : cartographie du numéro de combinaison donnant le maximum de niveau marin ou d'altitude du plan d'eau à terre parmi les 7 combinaisons simulées.

La comparaison des niveaux marins maximums au rivage permet d'affiner l'analyse et de relativiser les écarts entre les combinaisons :

- sur le linéaire côtier compris entre les points « rolland » et « batayolles » (cf. Figure 85), les niveaux marins au rivage localisés sont les plus élevés pour la combinaison C7 (compris entre ~ 1,8 m NGF/IGN69 « rolland » et ~ 2,15 m NGF/IGN69 « stes maries ») ;
- dans le golfe de Beauduc, les points représentatifs (ie : « galabert » et « beauduc ») (Figure 85) donnent des niveaux maximums similaires proches de 1,95 m NGF/IGN69 à +/- 2 cm pour les 3 combinaisons C5, C6 et C7. Cependant les écarts restent très faibles ;
- sur la pointe de Beauduc (Figure 86), les niveaux marins maximums sont atteints pour la combinaison C5 avec des valeurs comprises entre 1,96 m NGF/IGN69 à « pointe beauduc » et 2,05 m NGF/IGN69 à « sainte-Anne ». Les combinaisons C4, C6 et C7 donnent des valeurs similaires inférieures de quelques centimètres ;
- le linéaire côtier compris entre le sud de la pointe de Beauduc et l'embouchure du Rhône (Figure 86) affichent des niveaux marins compris entre 1,90 m NGF/IGN69 et 2,10 m NGF/IGN69 pour les combinaisons C6 et C7 avec des écarts de +/- 1 à 2 cm entre les 2 combinaisons ;
- sur le secteur côtier compris entre « Rhône est » et la « pointe Napoléon », les niveaux maximums sont atteints pour la combinaison C6 avec des valeurs proches de 1,85 – 1,90 m NGF/IGN69 ;
- dans le Golfe de Fos, le niveau marin maximal est atteint par la combinaison C7 (1,75 m NGF/IGN69).

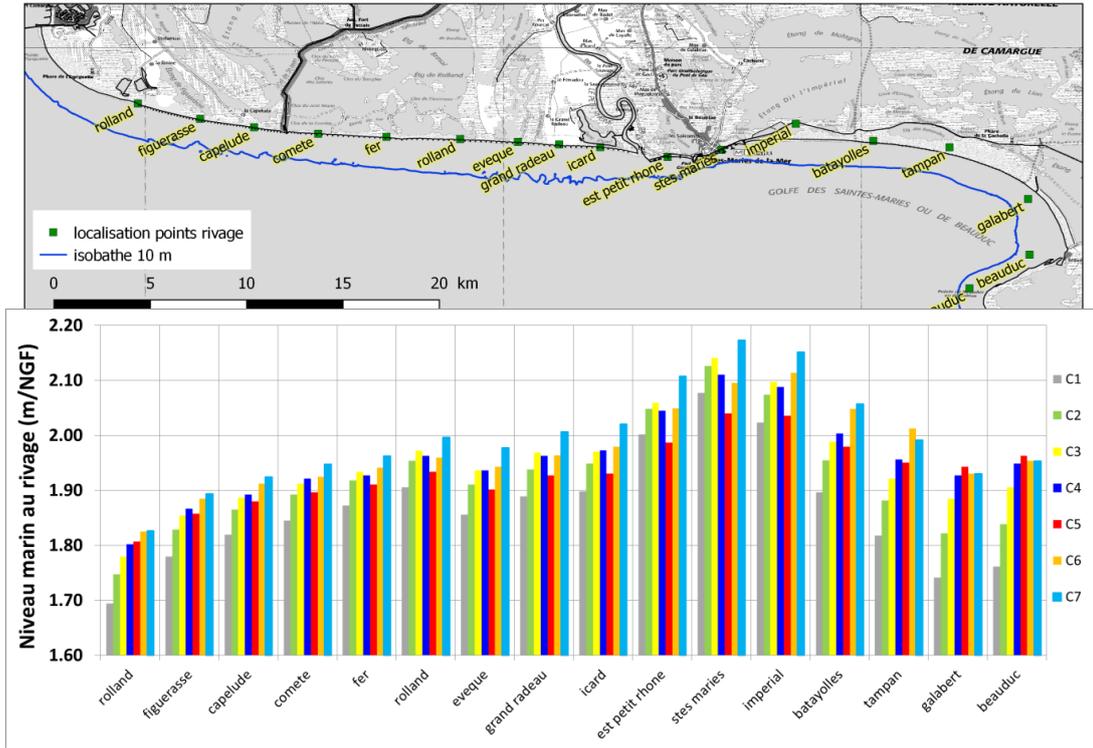


Figure 85 : Niveaux marins côtiers maximaux pour chacune des 7 combinaisons le long du rivage entre la pointe de l'Espiguette et la pointe de Beauduc.

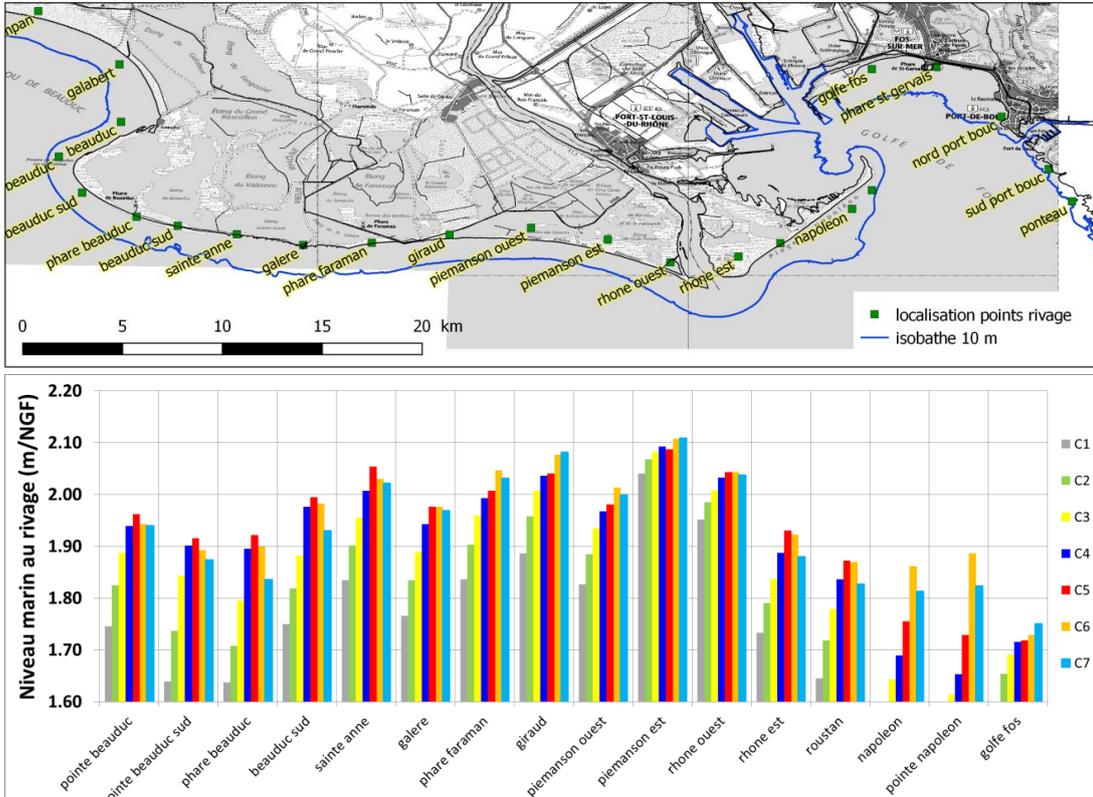


Figure 86 : Niveaux marins côtiers maximaux pour chacune des 7 combinaisons le long du rivage entre la pointe de Beauduc et le Golfe de Fos.

Les différences (de niveaux) observées (spatialement) entre les combinaisons maximisantes s'expliquent notamment par l'exposition des segments côtiers à l'influence des vagues, à ce titre le linéaire compris entre la pointe de Beauduc et l'embouchure du Rhône est davantage affecté par des vagues orientées de secteur sud (C6) que de secteur sud-est (C5 ou C7) ; quant au linéaire compris entre l'Espiguette et le Golfe de Beauduc, il est davantage exposé aux vagues de sud-sud-est (C7) que de sud-est (C4).

**En concertation avec la DDTM13, sur la base de ces éléments d'analyse, la combinaison C7 a été retenue pour caractériser l'évènement MOYEN ACTUEL.**

#### **7.1.5. Synthèse des niveaux marins maximaux au rivage**

Les niveaux marins maximaux au rivage pour les 5 évènements (Fréquent **FREQ1\_SE** et **FREQ2\_S** ; Moyen Actuel et Moyen 2100 ; Extrême) sont présentés dans le tableau ci-dessous (Tableau 15).

Les conditions météo-marines au large sont rappelées dans l'entête du tableau. La localisation des sites (proche du trait de côte) est présentée sur la Figure 85 et la Figure 86.

- pour les évènements fréquents (**FREQ\_S** et **FREQ\_SE**), les niveaux sont compris entre **+ 1,36 et + 1,92 m NGF/IGN69** avec une valeur moyenne de + 1,68 m NGF/IGN69 ;
- pour l'évènement Moyen Actuel, les niveaux sont compris entre **+ 1,61 et + 2,17 m NGF/IGN69** avec une valeur moyenne de + 1,94 m NGF/IGN69 ;
- pour l'évènement Moyen 2100, les niveaux sont compris entre **+ 2,00 et + 2,51 m NGF/IGN69** avec une valeur moyenne de 2,28 m NGF/IGN69 ;
- pour l'évènement Extrême, les niveaux marins au rivage sont compris entre **+ 2,03 et + 2,70 m NGF/IGN69** avec une valeur moyenne de + 2,34 m NGF/IGN69.

À noter que pour les évènements Extrême et Moyen 2100, tels qu'ils ont été définis dans cette étude, les niveaux maximaux (en valeur moyenne) sont similaires.

		Evènement	FREQ1 SUD-EST	FREQ2 SUD	MOYEN ACTUEL	MOYEN 2100	EXTREME
Conditions de forçages météo-marins au large	Vagues	Hs (m)	4.7	4.7	5.33	5.33	10.5
		Tp (s)	9	9	9.4	9.4	11.5
		Dp (°N)	125	180	155	155	125
	Niveau marin (m NGF): SWL + incertitudes + élévation du niveau de la mer		1.31	1.31	1.55	1.95	1.9
	Vent	Vitesse (km/h)	81	81	87	87	144
Direction (°N)		121	121	121	121	121	
<b>Niveaux marins maximaux atteints au rivage (m NGF)</b>							
		Evènement	FREQ1 SUD	FREQ2 SUD-EST	MOYEN ACTUEL	MOYEN 2100	EXTREME
Nom du site proche du trait de côte (Ouest en Est)		rolland	1.56	1.58	1.83	2.18	2.28
		figuerasse	1.62	1.65	1.90	2.25	2.41
		capelude	1.65	1.69	1.93	2.27	2.46
		comete	1.65	1.61	1.95	2.30	2.44
		fer	1.68	1.71	1.97	2.32	2.51
		rolland	1.70	1.74	2.01	2.37	2.54
		eveque	1.69	1.74	2.01	2.37	2.50
		grand radeau	1.70	1.75	2.02	2.36	2.51
		icard	1.70	1.76	2.03	2.36	2.49
		est petit rhone	1.75	1.84	2.11	2.42	2.65
		stes maries	1.80	1.87	2.17	2.51	2.70
		imperial	1.79	1.88	2.15	2.43	2.50
		batayolles	1.73	1.80	2.05	2.37	2.47
		tampan	1.70	1.74	1.98	2.30	2.33
		galabert	1.67	1.67	1.93	2.29	2.19
		beauduc	1.70	1.69	1.95	2.32	2.26
		pointe beauduc	1.69	1.67	1.94	2.34	2.26
		pointe beauduc sud	1.67	1.65	1.87	2.16	2.04
		phare beauduc	1.67	1.65	1.83	2.14	2.07
		beauduc sud	1.74	1.71	1.93	2.27	2.22
		sainte anne	1.79	1.77	2.02	2.38	2.36
		galere	1.72	1.74	1.96	2.29	2.17
		phare faraman	1.74	1.80	2.03	2.39	2.39
		giraud	1.78	1.82	2.08	2.38	2.41
		piemanson ouest	1.76	1.81	2.00	2.27	2.22
		piemanson est	1.91	1.92	2.11	2.42	2.56
		rhone ouest	1.85	1.85	2.04	2.38	2.45
		rhone est	1.70	1.70	1.88	2.25	2.34
		roustan	1.62	1.63	1.83	2.19	2.30
		napoleon	1.48	1.59	1.82	2.19	2.13
		pointe napoleon	1.42	1.60	1.81	2.18	2.09
	golfe fos	1.44	1.47	1.75	2.14	2.37	
	phare st gervais	1.47	1.49	1.77	2.15	2.34	
	nord port bouc	1.36	1.37	1.62	2.01	2.03	
	sud port bouc	1.36	1.36	1.61	2.00	2.04	

Tableau 15 : Synthèse des niveaux marins maximaux atteints au rivage pour les événements Fréquents, Moyen Actuel, Moyen 2100 et Extrême ; et des conditions de forçages météo-marins associées au large. (Les franchissements de paquets de mer sont pris en compte uniquement sur le secteur des Saintes-Maries-de-la-Mer pour les événements MOYEN ACTUEL et FREQ2\_SUD).

### 7.1.6. Détermination des volumes franchissants aux Saintes-Maries-de-la-Mer

Les Saintes-Maries-de-la-Mer sont soumises à des franchissements de paquets de mer qui peuvent impacter grandement la submersion marine notamment pour les événements Fréquents, et Moyen Actuel. Dans le cas des autres événements (Moyen 2100 et Extrême), la submersion marine est principalement contrôlée par le débordement, les franchissements par paquets de mer peuvent alors être négligés.

La méthode retenue pour le calcul des volumes entrants par franchissements pour les événements Fréquent<sup>12</sup> et Moyen Actuel repose sur l'application d'une formule empirique adaptée aux structures de défense côtière (dont digue à la mer) qui constituent le front de mer de la zone urbaine des Saintes-Maries-de-la-Mer (Figure 87).

Il s'agit de la formule 5,11 ou 6,5 du guide Eurotop (2016)<sup>13</sup> qui est valable pour des structures de protection d'une pente maximale de 75 %. Elle se présente sous la forme suivante :

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0.09 \cdot \exp \left[ - \left( 1.5 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma^*} \right)^{1.3} \right]$$

avec :

- $q$  : le débit franchissant moyen ( $m^3/ml/s$ ) ;
- $H_{m0}$  : la hauteur significative des vagues à proximité du pied de la structure (m) ;
- $g$  : l'accélération terrestre ( $9.81 m \cdot s^{-2}$ ) ;
- $R_c$  : la revanche de l'ouvrage correspondant à la différence d'altitude entre la crête de l'ouvrage et le plan d'eau (m) ;
- $\gamma_{f,\beta,*}$  : facteurs d'influence :
  - $\gamma_f$  : facteur de forme ou rugosité de surface de l'ouvrage ;
  - $\gamma_\beta$  : tient en compte de l'incidence des vagues ;
  - $\gamma^*$  : autres facteurs d'influence (présence de murs verticaux, présence d'une promenade, etc.).

Les différentes étapes de l'implantation de la méthode de calcul des volumes franchissants sont décrites ci-après :

- 1- découpage du front de mer en segments homogènes selon des critères d'altitude de la crête de la structure de défense, d'exposition aux vagues et du type de défense. Ainsi, 21 segments ont été définis couvrant au total un linéaire côtier de 1 775 m (cf. Figure 87) en exploitant les données Litto3D (maillage à 1m) ;

<sup>12</sup> Seul le scénario Fréquent Sud (FREQ\_S) est traité car il est plus impactant que le Fréquent Sud-Est (FREQ\_SE)

<sup>13</sup> <http://www.overtopping-manual.com/docs/EurOtop%2011%202016%20Pre-release%20October%202016.pdf>



Figure 87 : Localisation des 21 segments pour le calcul des volumes franchissants. Les points rouges correspondent aux points d'extractions des conditions des vagues et de niveaux d'eau associés à chacun des tronçons.

- 2- extraction pour chacun des segments des caractéristiques des vagues et de niveaux d'eaux issues respectivement des modèles WW3 et MARS-2DH pour les événements Fréquent et Moyen Actuel (localisation : points rouges Figure 87). Les séries temporelles ainsi obtenues couvrent le pic de la tempête sur une durée de 42,75 heures et sont interpolées suivant un pas de 15 minutes afin d'être intégrées dans la formule de débit. Les hauteurs de vagues sont directement intégrées à la formule et les niveaux d'eau servent à calculer la revanche  $R_c$  au cours du temps. Comme les vagues sont extraites à proximité du rivage, celles-ci présentent une incidence qui est généralement normale à la côte sous l'effet de la réfraction. Dans ces cas, la valeur de  $\gamma_\beta$  peut être fixée à 1 d'après le guide Eurotop 2016 ;
- 3- détermination de la rugosité de surface  $\gamma_f$  des structures en exploitant notamment les plans des portions de la digue à la mer fournis par le SYMADREM (voir par exemple Figure 88). Ceux-ci montrent que l'ouvrage est protégé par une couche de blocs sur un fond imperméable (géotextile). Dans ces cas, la valeur de  $\gamma_f$  est de 0.6 (voir table 6.2 du guide Eurotop 2016). Pour le segment 10 correspondant à une cale de mise en eau dépourvue d'enrochements,  $\gamma_f$  est égal à 1.

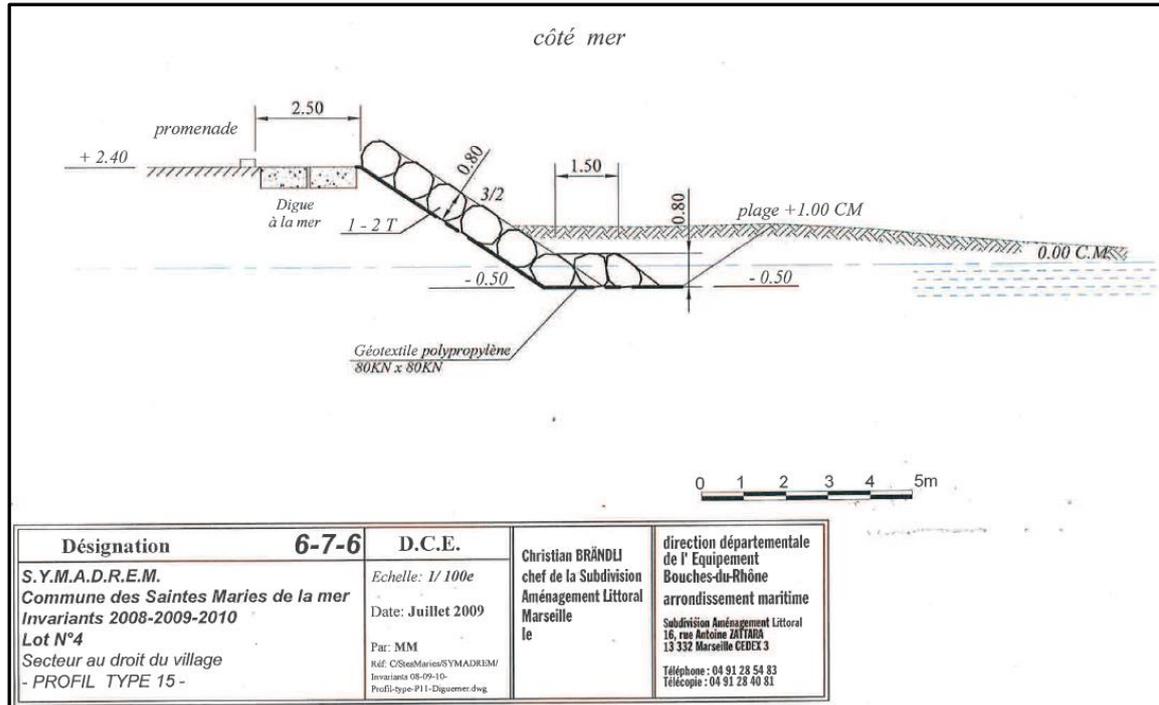


Figure 88 : Exemple de plan d'un secteur de la digue à la mer fourni par le SYMADREM.

La valeur de  $\gamma_f$  est également à moduler en fonction du type de déferlement des vagues qui peut être défini par le paramètre d'Iribarren  $\xi_{m-1,0}$  qui dépend de la pente de la structure ( $\alpha$ ), de la hauteur des vagues ( $H_{m0}$ ) ainsi que de leurs longueurs d'onde en eau profonde ( $L_{m-1,0}$ ) suivant la relation ci-dessous :

$$\xi_{m-1,0} = \tan\alpha / (H_{m0}/L_{m-1,0})^{1/2}$$

$L_{m-1,0}$  peut alors être approchée par  $gT_{m-1,0}^2/2\pi$ , avec  $T_{m-1,0}$ , période des vagues en s.

Les caractéristiques des vagues (hauteur et période) et  $\alpha$  sont obtenus respectivement à partir des simulations WW3 et des plans du SYMADREM ou bien du Litto3D. Si  $\xi_{m-1,0} > 5$ , alors il faut appliquer la correction suivante à  $\gamma_f$  (guide Eurotop 2016) :

$$\gamma_{f \text{ mod}} = \gamma_f + (\xi_{m-1,0} - 5) * (1 - \gamma_f) / 5.0$$

- 4- Détermination de  $\gamma^*$  qui dans le cas du front de mer des Saintes-Maries-de-la-Mer équivaut  $\gamma_{prom}$  c'est-à-dire l'influence de la largeur de la promenade ( $G_c$  en mètres) suivant la relation (source guide Eurotop 2016) :

$$\gamma_{prom} = 1 - 0.47 \frac{G_c}{L_{m-1,0}}$$

$G_c$  a pu être déterminé à partir des orthophotographies s. Les valeurs varient de 3 m à 26 m.

- 5- Détermination du débit franchissant entrant ( $q_e$ ) dans les terres en corrigeant  $q$  de l'influence de largeur de la crête ( $L_c$ ) des enrochements, exprimée par la relation suivante de  $C_r$  (source guide Eurotop 2016) :

$$C_r = 3.06 \exp(-1.5L_c/H_{m0})$$

$q_e$  équivaut alors à :  $q_e = q C_r$

$L_c$  a été estimé à des valeurs variant de 0.8m à 1.6 m (1 à 2 diamètres des blocs).

Le Tableau 16 récapitule les caractéristiques des 21 segments établis sur le front de mer des Saintes-Maries-de-la-Mer.

N° Segment	Altitude en m (IGN69)	Pente (en %)	Largeur crête (m)	$\gamma_f$ (rugosité de surface)	Longueur segment (m)
1	3	66%	0.8	0.6	69.1
2	2.8	66%	0.8	0.6	65.7
3	2.8	66%	0.8	0.6	66.0
4	2.8	66%	0.8	0.6	55.7
5	3	66%	0.8	0.6	44.0
6	2.8	66%	0.8	0.6	53.0
7	2.8	66%	0.8	0.6	73.0
8	2.8	66%	0.8	0.6	67.5
9	2.8	66%	0.8	0.6	46.8
10	2.2	20%	0.8	1	19.1
11	3.2	66%	0.8	0.6	77.7
12	3.3	66%	0.8	0.6	58.7
13	3.3	66%	0.8	0.6	77.4
14	3.5	66%	0.8	0.6	56.5
15	3.5	65%	0.8	0.6	194.4
16	3.3	40%	0.8	0.6	116.0
17	2.7	40%	0.8	0.6	125.2
18	3.3	40%	0.8	0.6	119.9
19	3.5	70%	1.6	0.6	129.1
20	3.6	40%	0.8	0.6	139.9
21	2.3	40%	0.8	0.6	120.1

Tableau 16 : Synthèse des caractéristiques des différents segments définis sur le front de mer des Saintes-Maries-de-la-Mer.

La Figure 89 montre l'évolution des volumes franchissants entrant sur l'ensemble du linéaire côtier considéré au cours des ~ 43 heures des maximums des événements Fréquent et Moyen Actuel. On distingue 3 pics principaux vers 12h, 20h et 26h, les volumes entrants pour l'événement Moyen Actuel étant environ 4 fois supérieurs à ceux de l'événement Fréquent.

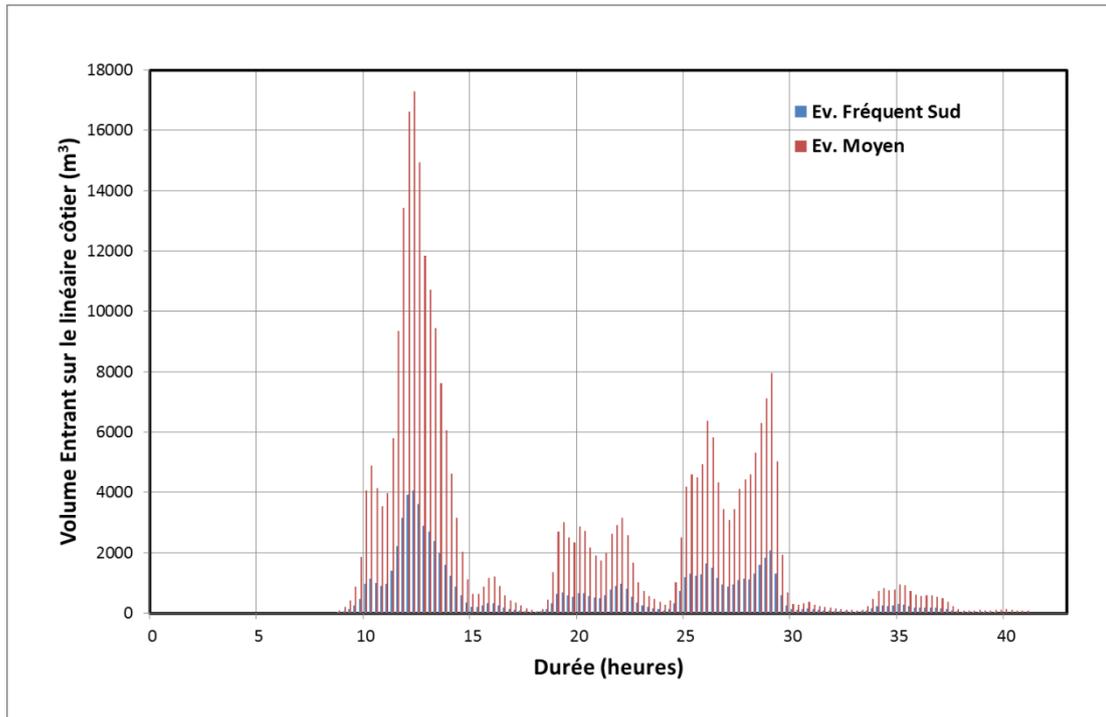


Figure 89 : Évolution des volumes franchissants ( $m^3$  par intervalles de 15 minutes) sur l'ensemble du linéaire côtier au cours des événements Fréquent (FREQ\_S) et Moyen Actuel.

La Figure 90 nous renseigne sur les volumes entrants cumulés sur la période calculée en fonction des segments. On note que les volumes sont nuls ou quasi nuls sur les segments 1, 2, 9, 10 et 19 à 21 caractérisés par la présence de plages sableuses de largeur importante. L'essentiel des volumes transite par les segments 3, 5, 7, 12 et 17 aussi bien pour l'événement Fréquent que Moyen Actuel.

Le Tableau 17 fournit les volumes et les débits entrants sur le front de mer des Saintes-Maries-de-la-Mer, soit un volume total cumulé sur la durée considérée de 83 208  $m^3$  et de 318 445  $m^3$  respectivement pour l'événement Fréquent et Moyen Actuel. Ce qui équivaut à des débits moyens de 0,30 l/ml/s et de 1,17 l/ml/s pour ces 2 événements.

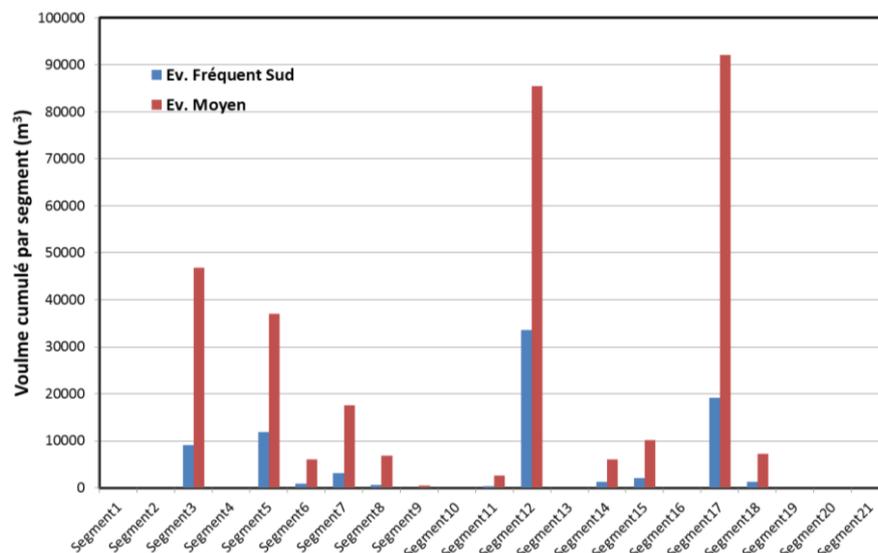


Figure 90 : Volumes franchissants cumulés sur 42,75 h par segment pour les 2 événements traités (Fréquent FREQ\_S et Moyen Actuel).

	Ev. Fréquent Sud	Ev. Moyen
<b>Volume Franchissant total (m<sup>3</sup>)</b> (sur un linéaire de 1775 m et sur une durée de 42.75 heures)	83 208	318 445
<b>Débit Franchissant moyen par mètre linéaire (m<sup>3</sup>/ml)</b> (durée de 42.75 heures)	46.89	179.45
<b>Débit Franchissant moyen par mètre linéaire et par seconde (m<sup>3</sup>/ml/s)</b>	0.0003	0.0012
<b>Débit Franchissant moyen (litres) par mètre linéaire et par seconde (l/s/ml)</b>	0.30	1.17

Tableau 17 : Bilan des volumes franchissants pour les 2 événements traités (Fréquent *FREQ\_S* et Moyen *Actuel*).

Il est à noter que l'utilisation des **formules empiriques ne permet d'accéder qu'à une première estimation des volumes franchissants.**

Les travaux de Suzuki *et al.* (2014) montrent par exemple que dans un milieu contrôlé (laboratoire) et pour un ouvrage de défense plus simple que ceux présents sur les Saintes-Maries-de-la-Mer, les formules d'Eurotop pouvaient sous-estimer ou bien surestimer d'un facteur ~ 1,8 les valeurs mesurées. Ces mêmes travaux montrent que l'utilisation de la modélisation numérique conduit à des erreurs nettement plus faibles (sous-estimation de 7 % à 40 % des observations).

Une quantification plus précise des volumes franchissants sur ces secteurs urbanisés passerait par l'utilisation de techniques de modélisation numérique haute-résolution, mais étant donnée la complexité du site, avec la présence de nombreux brise-lames et épis, cela dépasse le cadre de ce travail.

#### 7.1.7. Dynamique de la submersion

Une vision de la dynamique de la submersion est possible car le modèle permet d'obtenir en chaque point du maillage (résolution spatiale 20 m) et à chaque instant (résolution temporelle 15 minutes) de la simulation des informations :

- sur les altitudes du plan d'eau ;
- sur les hauteurs d'eau ;
- et sur les vitesses des écoulements.

Aussi des cartes permettent de visualiser l'évolution spatiale des inondations depuis les premiers débordements au niveau du trait de côte, les entrées d'eau préférentielles, les surverses par-dessus les digues successives conduisant au remplissage progressif des étangs et le ressuyage lorsque les conditions de forçages marins diminuent en fin de tempête.

- **Analyse « spatiale » de la dynamique de submersion de l'évènement Moyen Actuel**

Les résultats de la simulation de l'évènement Moyen Actuel sont présentés en termes de cotes altimétriques (m NGF/IGN69) sur les planches suivantes (Figure 91, Figure 92, Figure 93, Figure 94) pour 4 instants choisis pour analyser la chronologie de la submersion à l'échelle de la Camargue.

Instant (A) : journée n° 4 de la simulation à 6 h (Figure 91) :

Les conditions météo-marines au large (hauteur significative des vagues ~ 3 m, niveau marin au large ~ + 1 m NGF/IGN69 et vitesse du vent ~ 60 km/h) sont telles qu'elles conduisent à des niveaux marins au rivage compris entre + 1,20 et + 1,40 m NGF/IGN69.

On distingue différents secteurs :

- dans le secteur de la Petite Camargue, les premières entrées d'eau et débordements commencent dans les étangs voisins du trait de côte et le lit majeur du Petit-Rhône ;
- sur le tronçon de littoral compris entre les Pertuis de la Fourcade et celui de la Comtesse, la mer pénètre jusqu'au pied de la digue à la mer (DAM) qui contient les eaux marines ;
- au niveau de l'embouchure du Rhône, des débordements du fleuve (débit de 3 900 m<sup>3</sup>/s à la station Beaucaire-Tarascon) conjugués à la submersion marine conduisent à l'inondation du domaine de la réserve du Grau de Piémanson ;
- dans les étangs, la bascule du plan d'eau est déjà effective sous l'effet du vent avec des surélévations de l'ordre de +20 à +40 cm dans leurs parties nord-ouest et est d'autant plus importante que la hauteur d'eau est faible.

Instant (B) : journée n°4 de la simulation à 14 h (Figure 92) :

À 14h, les conditions météo-marines au large sont à leur maxima (hauteur de vagues > 5m, niveau au large proche de +1,50 m NGF/IGN69 et vitesse du vent ~80 km/h) et conduisent à des niveaux côtiers compris entre + 1,80 et +2,10 m NGF/IGN69 :

- sur le secteur de la petite Camargue, le cordon dunaire compris entre le Rhône Vif et le Petit-Rhône est largement submergé et conduit à l'inondation des étangs d'Icard, du Fer et de la Comète (hauteur d'eau ~2m) ;
- sur la grande partie de son linéaire compris entre le pertuis de la Fourcade et celui de la Comtesse, la cote de la DAM n'est pas dépassée (pas de surverse), seul un tronçon proche de pertuis de la Comtesse est localement affecté (entrées d'eau au sud de l'étang du Lion) ;
- sur la pointe de Beauduc, les étangs sont inondés avec des hauteurs d'eau comprises entre 1 m et 1,50 m. Le tronçon de la DAM le plus à l'ouest proche de la rive droite du Rhône est dépassé (surverse effective) conduisant à une inondation des étangs des Salins de Giraud (+ 1 m 50 d'eau dans la They de Sainte-Ursule) ;
- sur les grands étangs de Vaccarès, Malagroy et L'impérial, le vent induit une surélévation de l'ordre de +30 à +50 cm dans la partie nord-ouest des plans d'eau ;
- dans le Golfe de Fos, des premiers débordements sont constatés au fond des darses de Port-Saint-Louis du Rhône et du port de Fos vers les marais, au nord des complexes portuaires.

Instant (C) : journée n°5 de la simulation à 2h (Figure 93) :

Les forçages météo-marins au large sont maintenus à des valeurs sévères similaires à celles de l'instant B. Les niveaux marins au rivage sont compris entre environ +1,80 à + 2 m NGF/IGN69. La submersion se poursuit dans les différents secteurs décrits en B :

- dans la petite Camargue, l'inondation atteint les digues du Rhône Vif au nord et à l'ouest, et est contrôlée à l'est par les digues de la rive gauche du petit Rhône ;
- la Pointe de Beauduc, composée des étangs de Beauduc, du Vaisseau, de Rascaillon, du Fangassier et du Galabert, est inondée avec des hauteurs d'eau comprises entre 1,50 m et 2 m ;

- le secteur des marais et salins de Giraud (compris entre le vieux Rhône et les digues rive droite du Rhône) est inondé par des débordements de proche et proche des marais salants ;
- concernant le système des étangs du Vaccarès, des entrées d'eau par-dessus la digue à la mer depuis les étangs du Galabert et du Fangassier alimentent les étangs situés au nord de la digue à la mer (étang du Lion) contribuant à l'élévation du plan d'eau des étangs de la réserve Vaccarès.

Instant (D) : journée n°5 de la simulation à 18h (Figure 94) :

Les conditions météo-marines se sont atténuées (hauteur de vagues ~ 2 m, niveau marin au large ~ + 0,7 m NGF/IGN69 et vitesse du vent ~ 30 km/h).

L'inondation se poursuit sur certains secteurs du territoire les plus éloignés du rivage plusieurs heures après le pic de la tempête :

- sur la partie à l'ouest de la petite Camargue, l'inondation a gagné les étangs et marais salants au sud de Grau-du-Roi et d'Aigues-Mortes, les zones inondées sur la Petite Camargue sont contrôlées par les digues du Rhône-Vif au nord et à l'est par celles du Petit-Rhône ;
- à l'est, sur les territoires de la pointe de Beauduc jusqu'au marais et salins de Giraud, l'inondation atteint une cote altimétrique du plan d'eau homogène comprise entre + 1,40 et + 1,60 m NGF/IGN69 ;
- la réserve naturelle du système Vaccarès est atteinte avec des niveaux du plan d'eau compris entre + 0,6 et 0,8 m NGF/IGN69.

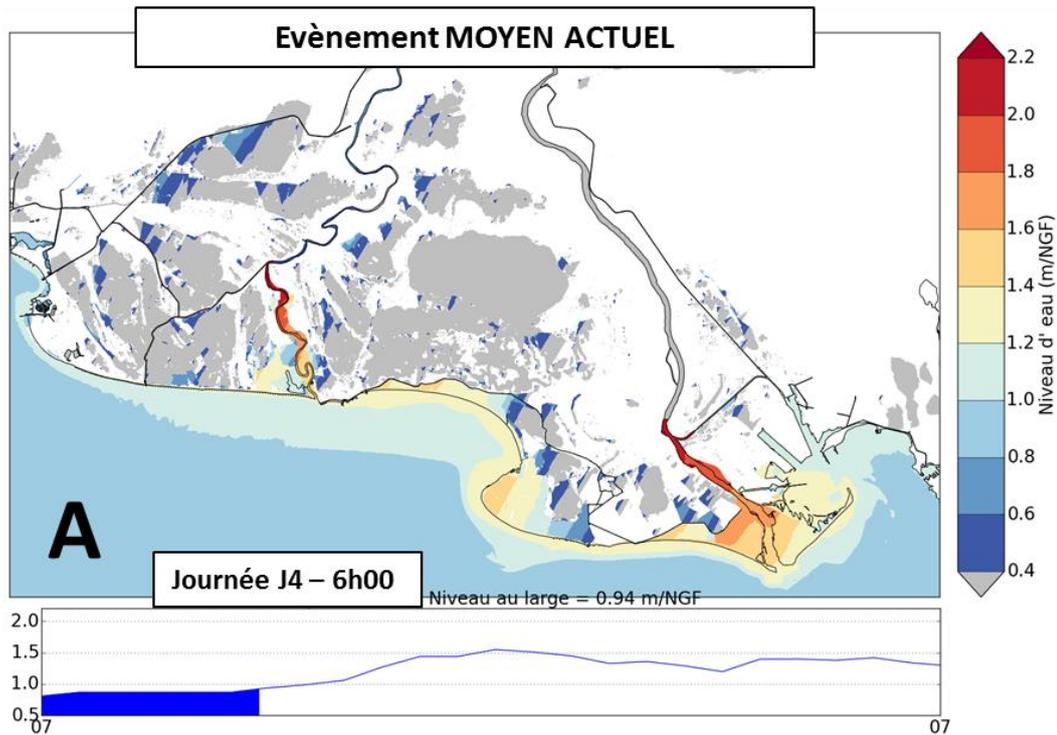


Figure 91 : Instant A correspondant à la journée n° 4 à 6h 00 de la chronologie de la submersion simulée au cours de l'évènement Moyen Actuel. La courbe bleue en dessous représente l'évolution du niveau marin au large.

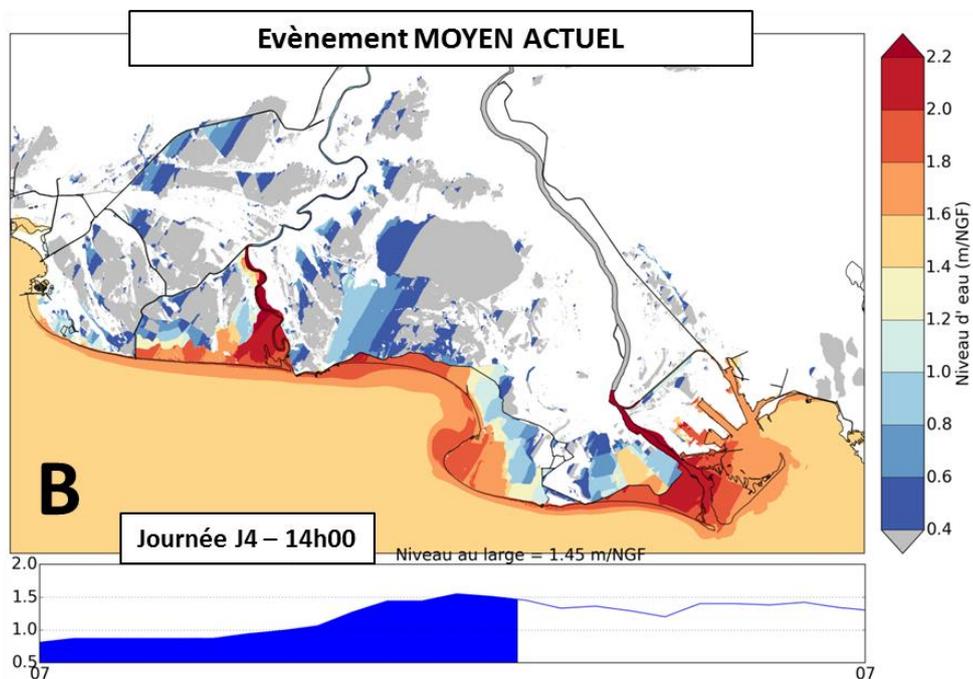


Figure 92 : Instant B correspondant à la journée n° 4 à 14 h 00 de la chronologie de la submersion simulée au cours de l'évènement Moyen Actuel. La courbe bleue en dessous représente l'évolution du niveau marin au large.

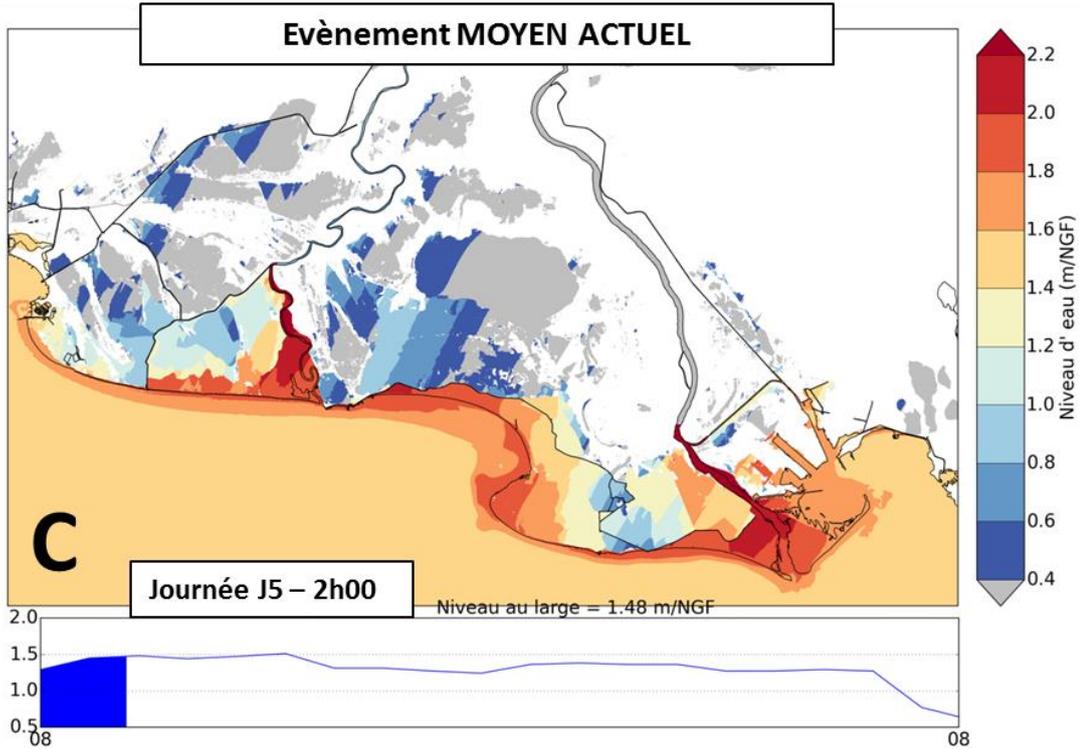


Figure 93 : Instant C correspondant à la journée n° 5 à 2 h 00 de la chronologie de la submersion simulée au cours de l'évènement Moyen Actuel. La courbe bleue en dessous représente l'évolution du niveau marin au large.

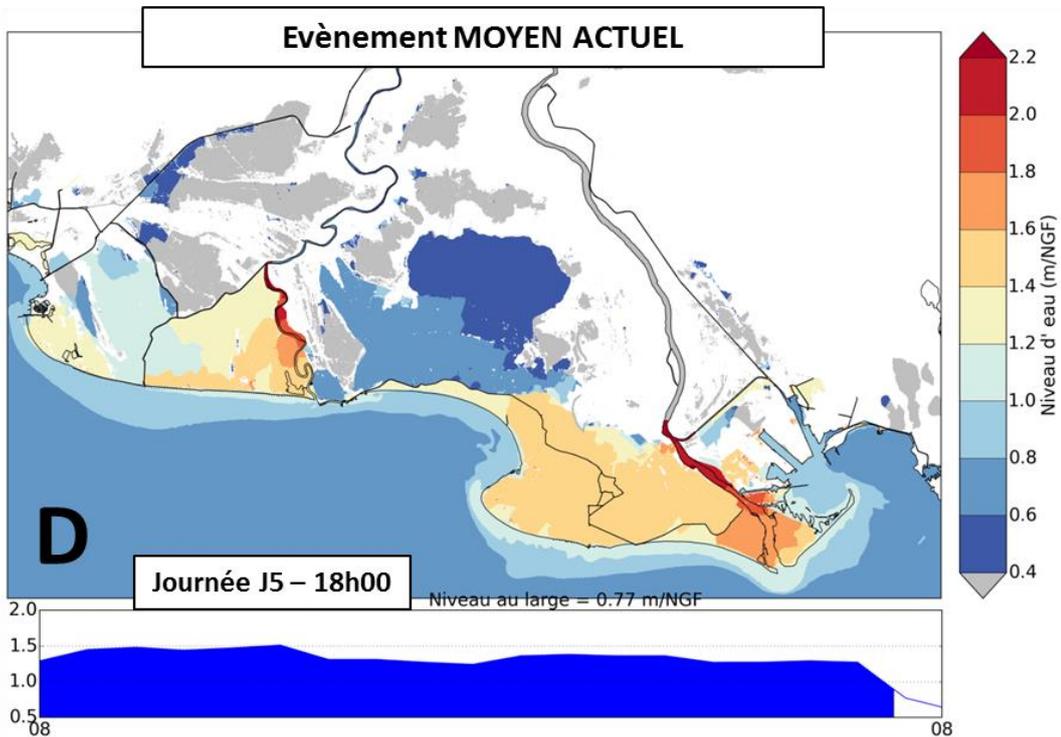


Figure 94 : Instant D correspondant à la journée n° 5 à 18 h 00 de la chronologie de la submersion simulée au cours de l'évènement Moyen Actuel. La courbe bleue en dessous représente l'évolution du niveau marin au large.

- **Analyse de la cinétique**

Outre ces cartes, des séries temporelles sont disponibles et donnent une vision plus précise de la cinétique locale.

En effet, des chroniques des niveaux marins ou altitudes du plan d'eau (en m NGF/IGN69) sont présentées pour 3 secteurs du territoire (Figure 95 à Figure 97) pour les événements :

- Fréquent n°1 (bleu foncé) ;
- Fréquent n°2 (bleu clair) ;
- Moyen Actuel (noir) ;
- Moyen 2100 (rouge) ;
- Extrême (vert foncé).

Elles sont associées à l'évolution des hauteurs d'eau pour les événements Moyen Actuel (bâtons bleu ciel) et Moyen 2100 (bâtons rouge).

### **Évènement Moyen Actuel**

Sur la partie est du modèle, comprenant la pointe de Beauduc, les étangs des salins et l'embouchure du Rhône, la simulation montre des premiers débordements à partir du jour J4 vers 8 h - 10 h (instant A - Figure 91) dans la They Sainte Ursule au Sud des Salins de Giraud jusqu'au maximum de niveau marin atteint au Grau de la Dent le jour J4 vers 12 h – 14 h (début du pic de la tempête) (Figure 95). Les hauteurs d'eau atteignent rapidement environ 1,5 m.

L'inondation se poursuit et atteint les étangs Faraman et Rascaillon quelques heures plus tard (instants B et C - Figure 92 et Figure 93). Le niveau du plan d'eau dans l'étang de Rascaillon grimpe de +0,5 m NGF/IGN69 à environ +2 m NGF/IGN69 en moins de 20 heures (Figure 95).

Sur la partie ouest concernant la Petite Camargue (Figure 97), les entrées d'eau commencent bien avant le pic de la tempête (avant l'instant A - Figure 91) notamment dans l'étang du Fer, l'inondation atteint ensuite l'étang Rolland puis celui de Brasol une dizaine d'heures plus tard (entre les instants B et C - Figure 92 et Figure 93). Les hauteurs d'eau dans les étangs (étang du Fer, Rolland, Brasol, etc.) de la petite Camargue atteignent les +2 m NGF/IGN69 (état initial de l'ordre de + 0,5 m). Par ailleurs dans l'étang Rolland, on observe une bascule du plan d'eau avec baisse du niveau du plan d'eau de l'ordre d'une vingtaine de centimètre entre le jour J3 (le 6 à 6 h) et le jour J4 (le 7 à 10 h).

Concernant le système des étangs du Vaccarès (Figure 96), les chroniques d'évolution du plan d'eau des différents étangs permettent d'apprécier la cinétique de l'inondation. En effet dans les étangs du système Vaccarès (« Vaccarès sud », « Lion »), on note entre les instants C et D (Figure 93 et Figure 94), une nette évolution du plan d'eau (de l'ordre de + 20 à + 40 cm) et relative à des entrées d'eau depuis les étangs de Galabert et du Fangassier qui étaient jusqu'alors soumis uniquement à une bascule liée au vent. L'altitude du plan d'eau dans l'étang du Galabert grimpe de + 0,25 m NGF/IGN69 à environ + 1,65 m NGF/IGN69 entre les instants A et C.

### **Évènement Moyen 2100**

Il n'existe pas de linéarité entre les hauteurs d'eau à terre et les niveaux marins au large et au rivage (cf. *courbe verte de la différence entre les événements Moyen 2100 et Moyen Actuel sur les graphes des hauteurs d'eau – Figure 95*) : les hauteurs d'eau Moyen 2100 peuvent être supérieures de bien plus de 40 cm par rapport à celles de Moyen Actuel (*cartographie globale Figure 106*). En effet, les débordements surviennent globalement plus tôt, durent plus longtemps, et les volumes déversés sont donc plus importants. Les écoulements sont soumis à des effets de

seuils topographiques inondant davantage certaines zones basses épargnés par l'échéance actuelle, ainsi :

- les hauteurs d'eau peuvent être augmentées de plus de 40 cm (+ 1 m, voire + 2 m) dans les zones basses qui étaient faiblement inondées pour l'échéance actuelle ;
- les zones de débordement proches du trait de côte sont les seules où les hauteurs d'eau ne seront augmentées que de 40 cm ;
- enfin, les secteurs qui n'étaient pas inondés par l'évènement actuel peuvent être affectés par de faibles hauteurs d'eau.

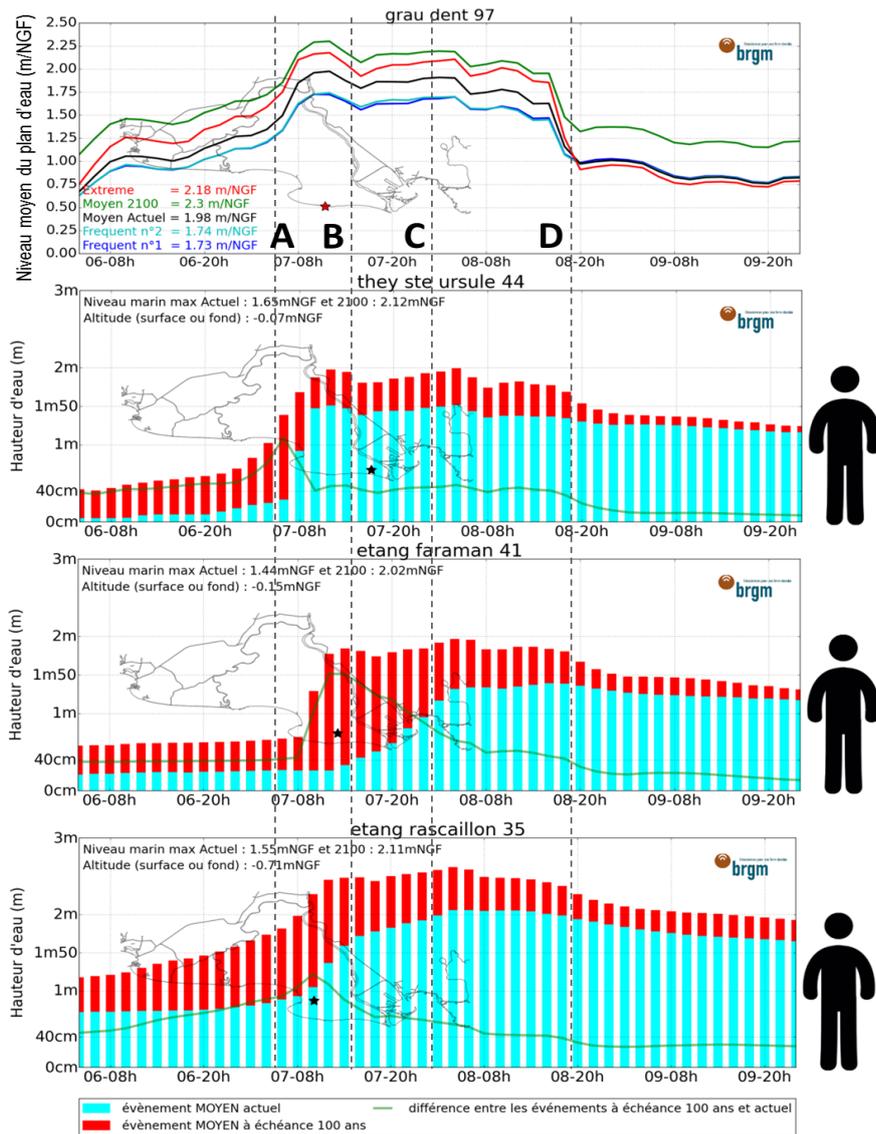


Figure 95 : Évolutions temporelles des niveaux marins (niveau moyen du plan d'eau) et altitude maximales du plan d'eau (m NGF/IGN69) au Grau de la Dent (n° 97) pour les évènements fréquents 1 et 2 (bleu foncé et clair), Moyen Actuel (noir), Moyen 2100 (rouge) et Extrême (vert) ; et des hauteurs d'eau (m) pour les évènements Moyen Actuel (bâton bleu ciel) et Moyen 2100 (bâton rouge) sur 3 autres points sur les secteurs du They Sainte-Ursule (44), de l'étang Faraman (n° 41) et de l'étang Rascaillon (n° 35).

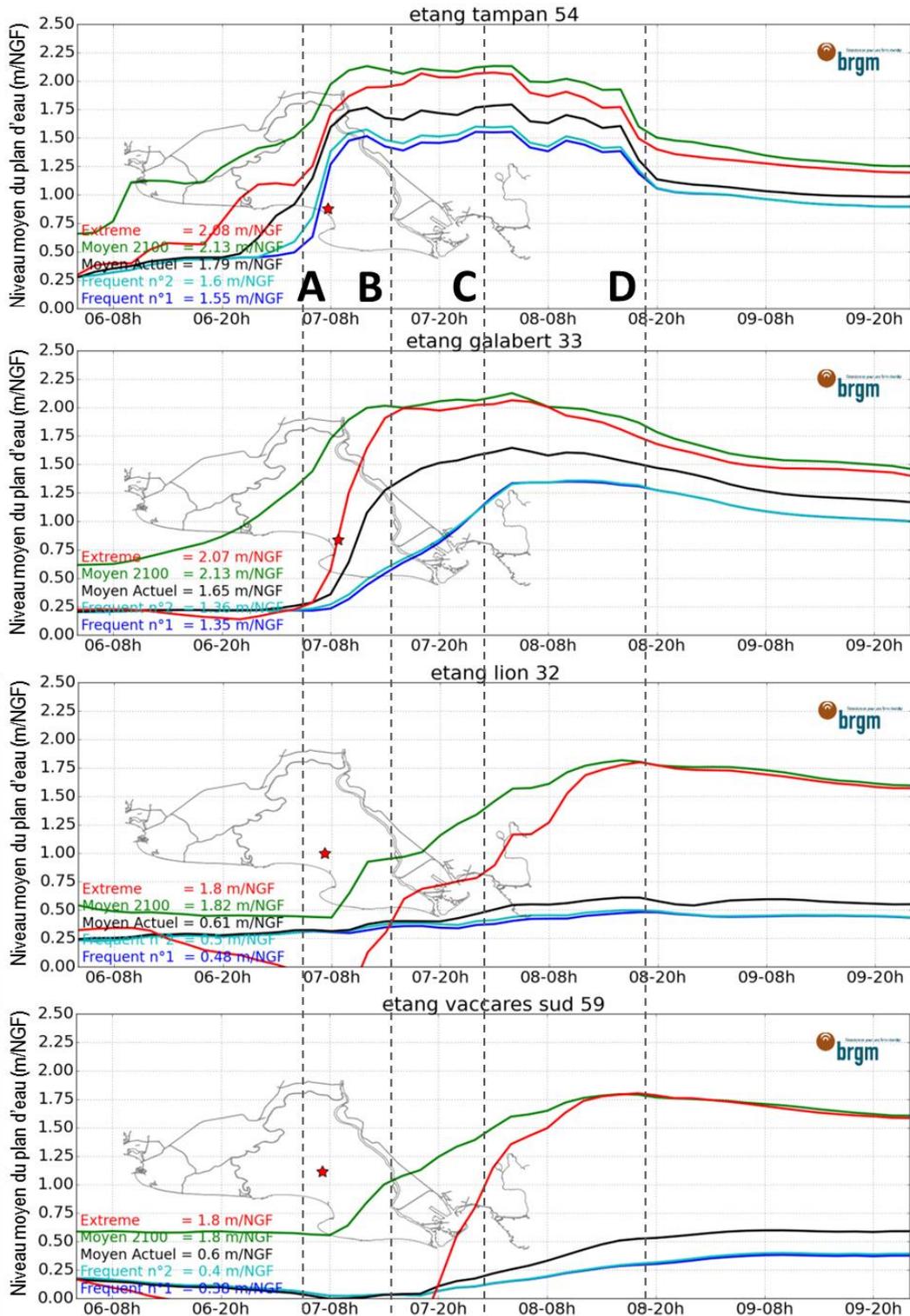


Figure 96 : Valeurs maximales et évolutions temporelles des altitudes du plan d'eau des étangs (m NGF/IGN69) pour les évènements fréquents 1 et 2 (bleu foncé et clair), Moyen Actuel (noir), Moyen 2100 (rouge) et Extrême (vert) des étangs Tampan (n° 54), Galabert (n°33), Lion (n°32), Vaccarès Sud (59).

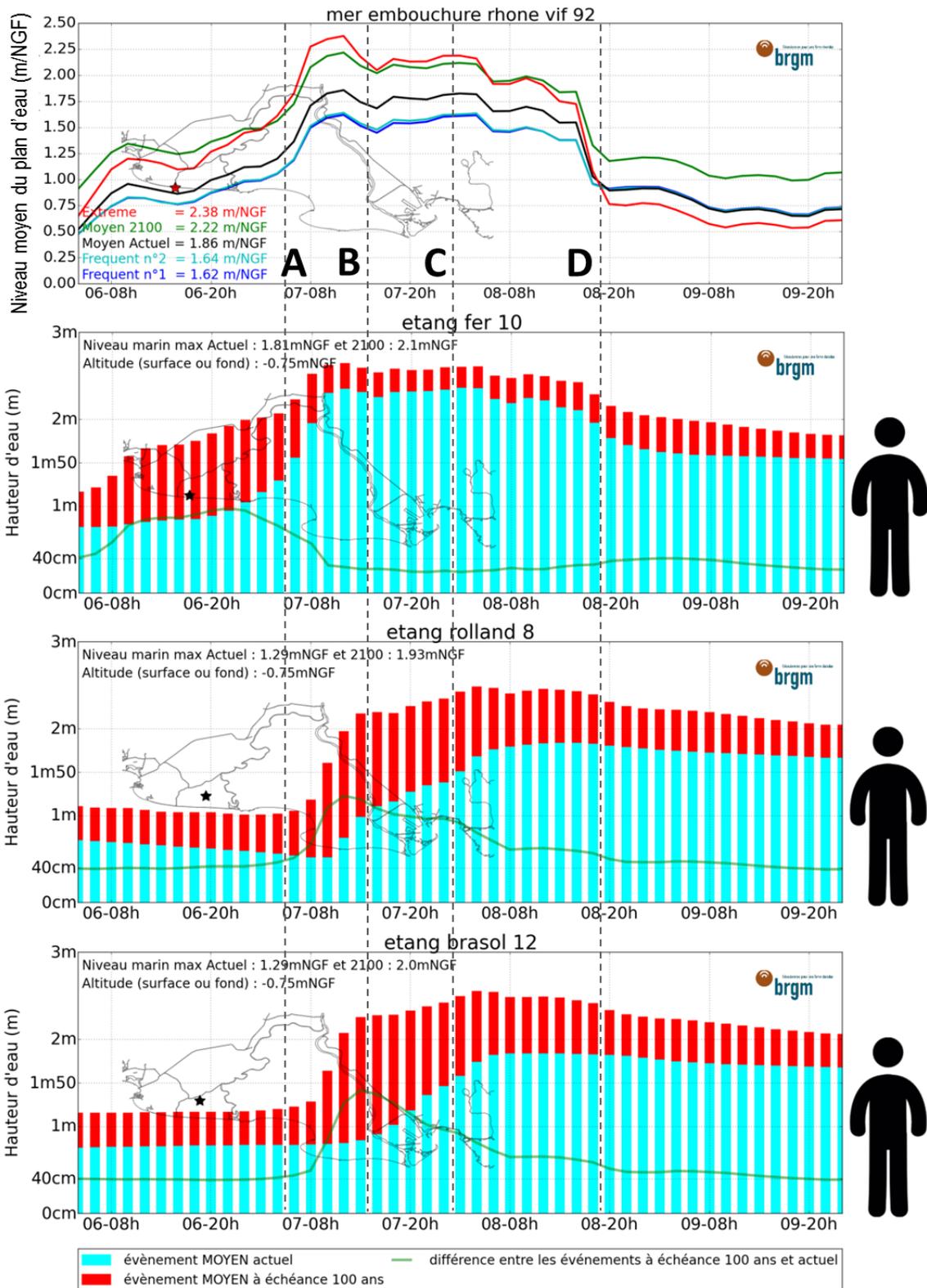


Figure 97 : Évolutions temporelles des niveaux marins et valeurs maximales de l'altitude du plan d'eau (m NGF/IGN69) à l'embouchure du Rhône Vif (n° 92) pour les évènements fréquents 1 et 2 (bleu foncé et clair), Moyen Actuel (noir), Moyen 2100 (rouge) et Extrême (vert) ; et des hauteurs d'eau (m) pour les évènements Moyen Actuel (bâton bleu ciel) et Moyen 2100 (bâton rouge) sur les secteurs des étangs du Fer (n° 10), de Rolland (n° 8) et de Brasol (n° 12).

### **7.1.8. Cartographie des évènements fréquents**

Les cartographies des altitudes maximales du plan d'eau et des hauteurs d'eau maximales atteintes en mer et dans les étangs sont présentées ci-dessous pour les évènements fréquents.

a) Évènement Fréquent n° 1 - Vagues de secteur sud-est (FREQ\_SE)

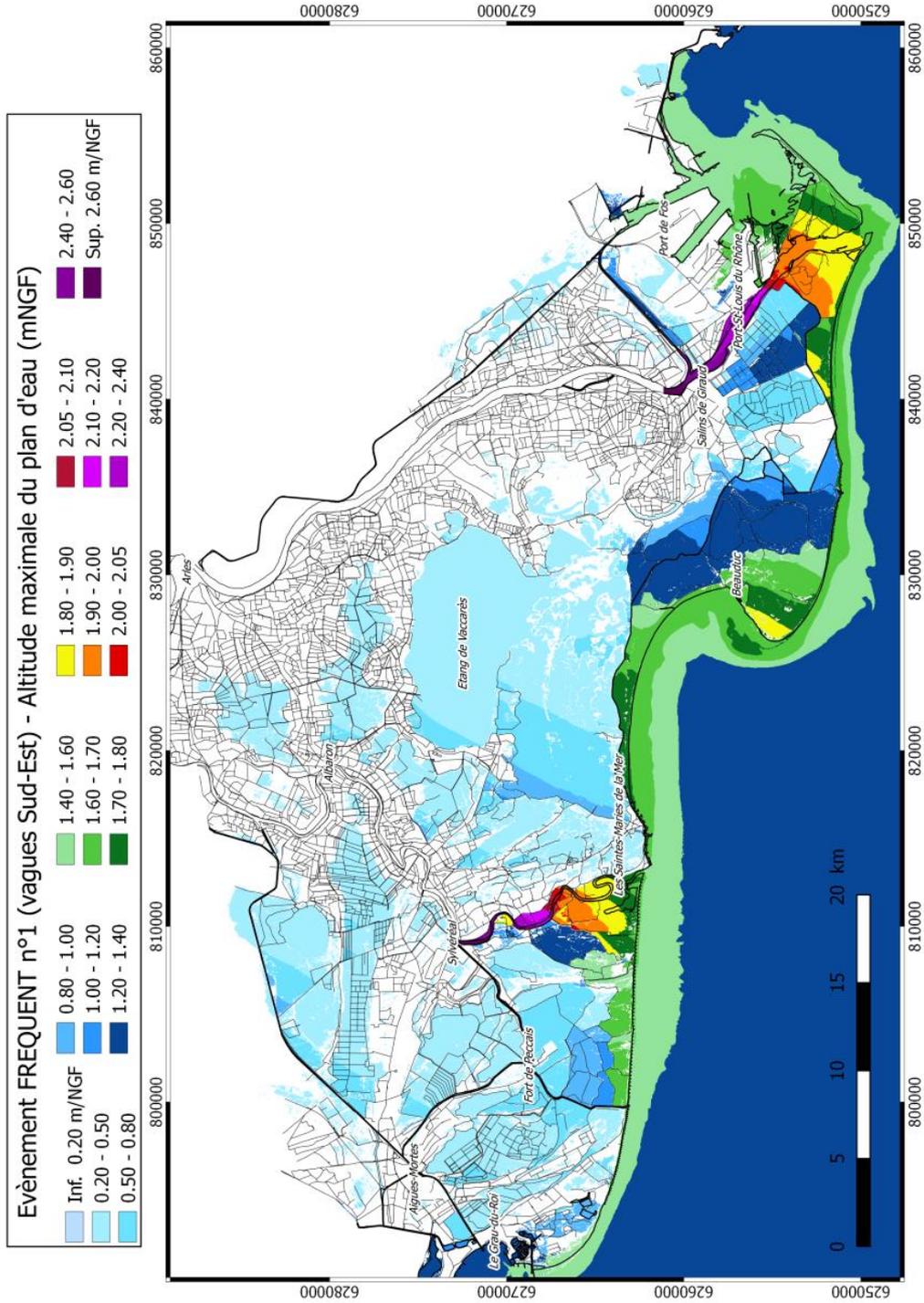


Figure 98 : Cartographie des niveaux marins maximaux et des altitudes maximales des plans d'eau atteints en cote NGF/IGN69 pour l'évènement fréquent FREQ\_SE.

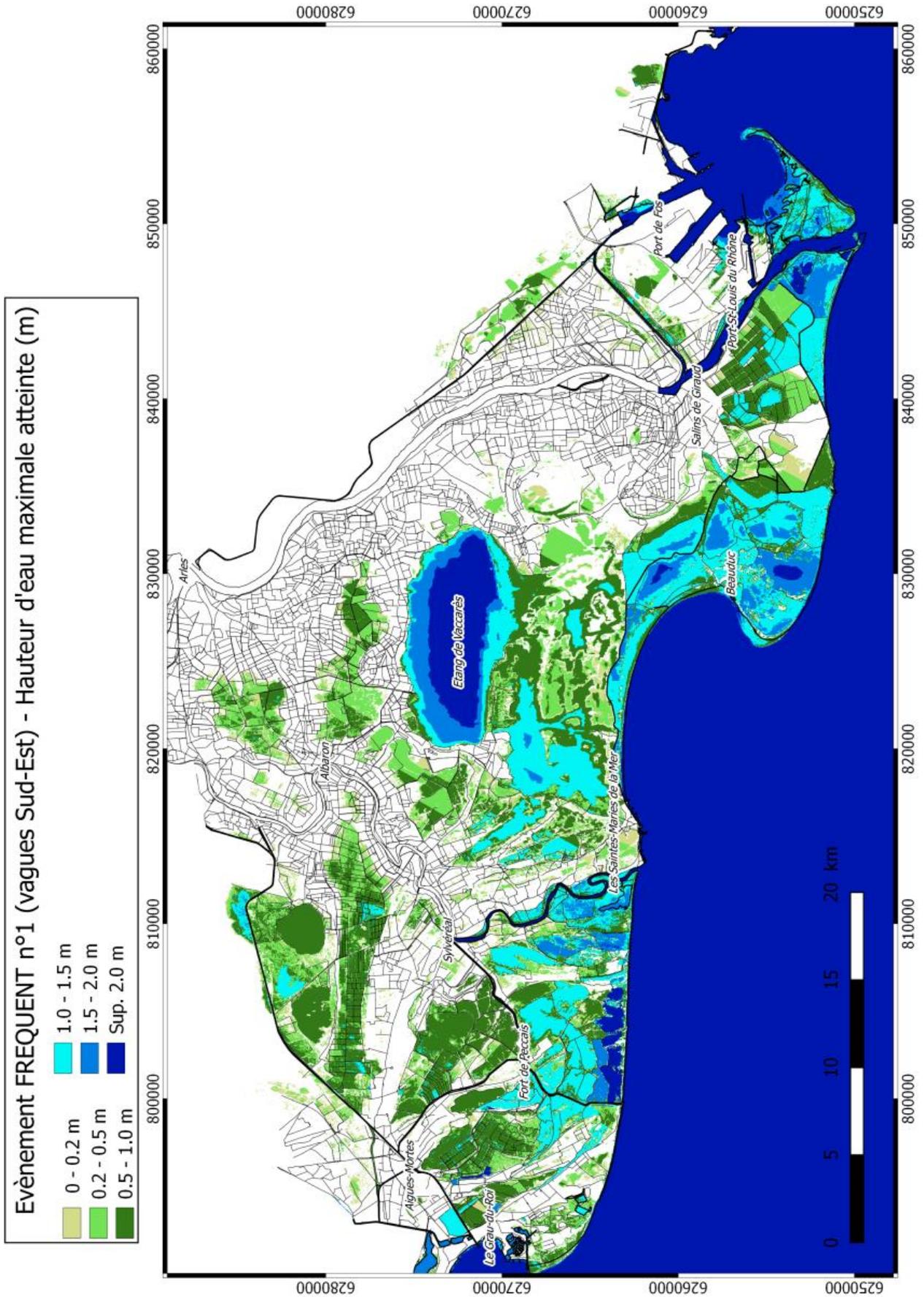
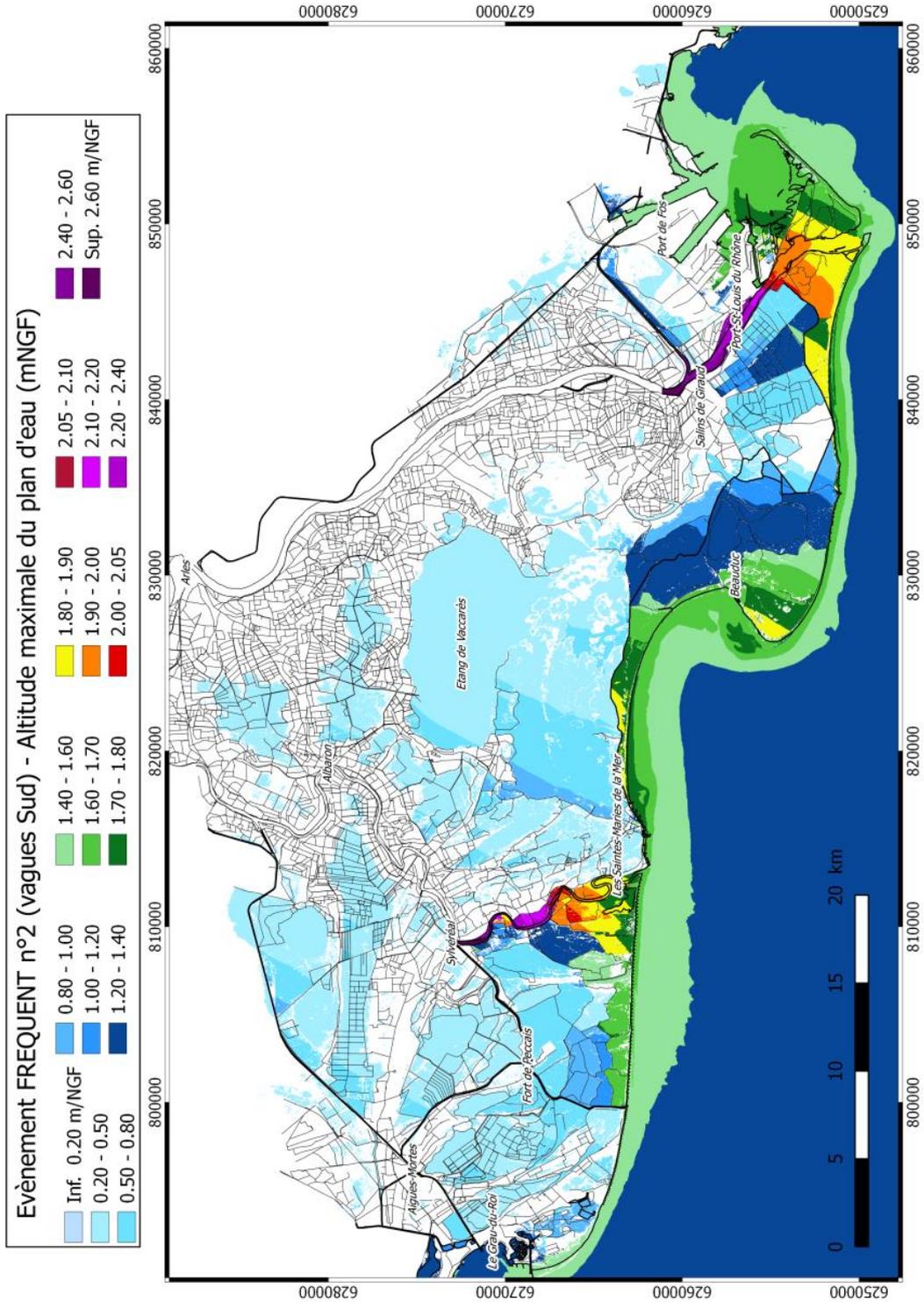


Figure 99 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales atteintes pour l'évènement fréquent FREQ\_SE.

**b) Évènement Fréquent n °2 - Vagues de secteur sud (FREQ\_S)**

Pour rappel, dans la simulation de l'évènement fréquent FREQ\_S, les Saintes-Maries-de-la-Mer sont soumises à des franchissements de paquets de mer qui peuvent impacter la submersion marine



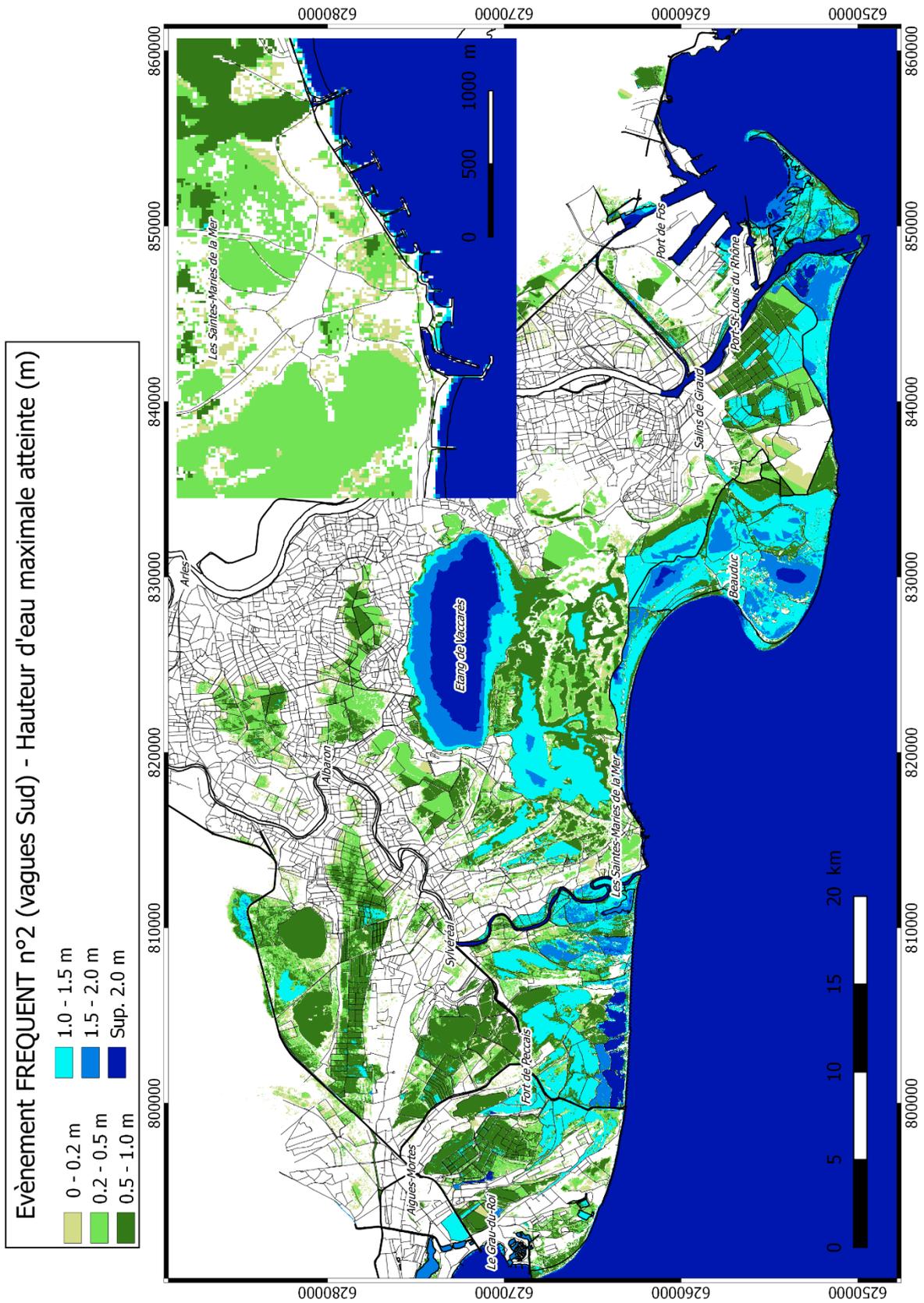


Figure 101 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales atteintes pour l'évènement fréquent FREQ\_S – zoom sur le secteur des Saintes-Maries-de-la-Mer avec prise en compte des franchissements de paquets de mer.

### 7.1.9. Cartographie évènement Moyen Actuel

Les cartographies des hauteurs d'eau maximales et des altitudes maximales du plan d'eau atteintes en mer et dans les étangs sont présentées pour l'évènement Moyen Actuel. Pour rappel, dans la simulation de l'évènement Moyen Actuel, les Saintes-Maries-de-la-Mer sont soumises à des franchissements de paquets de mer qui peuvent impacter grandement la submersion marine.

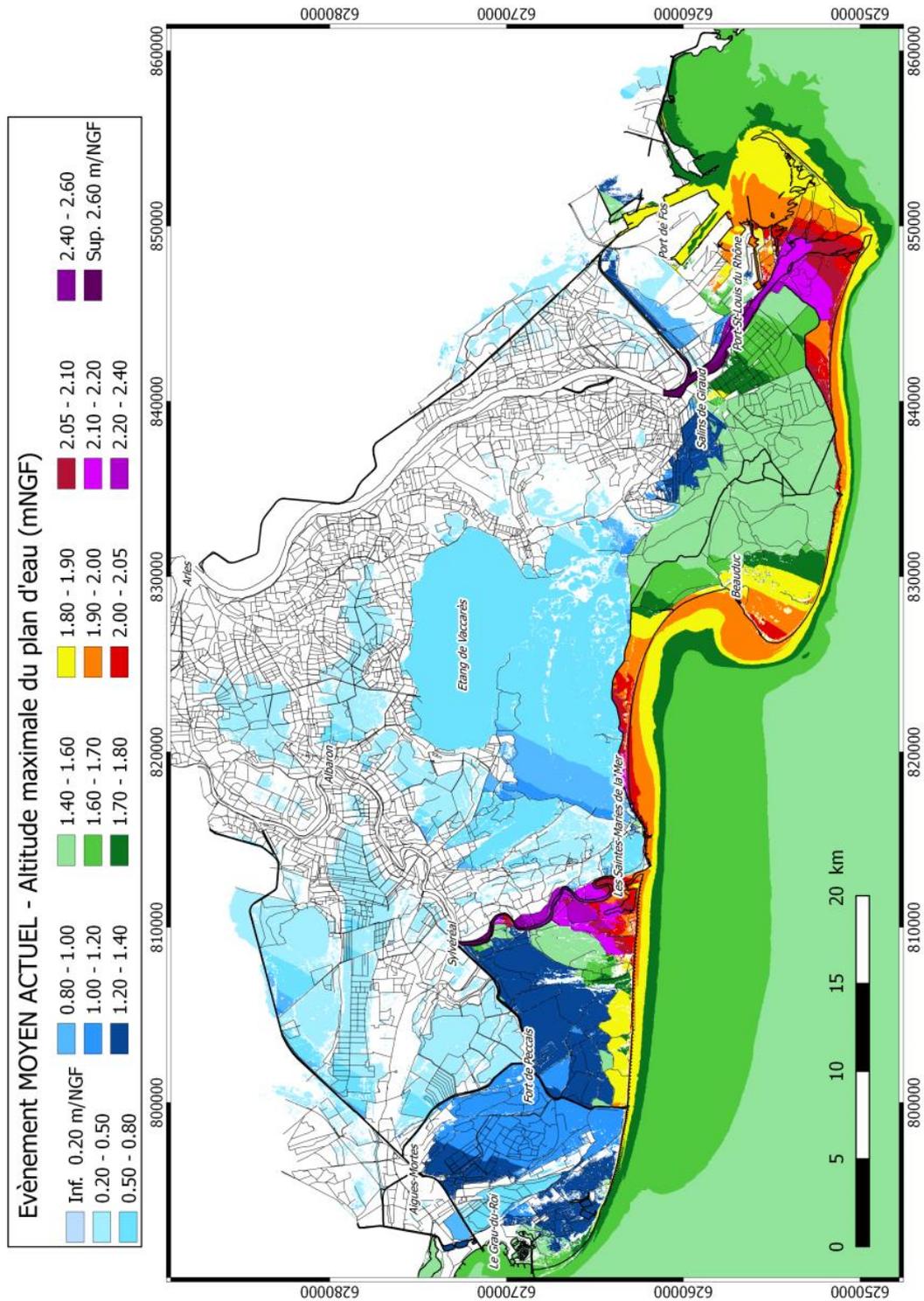


Figure 102 : Cartographie des niveaux marins maximaux et des altitudes maximales des plans d'eau atteints en cote NGF/IGN69 pour l'évènement Moyen Actuel.

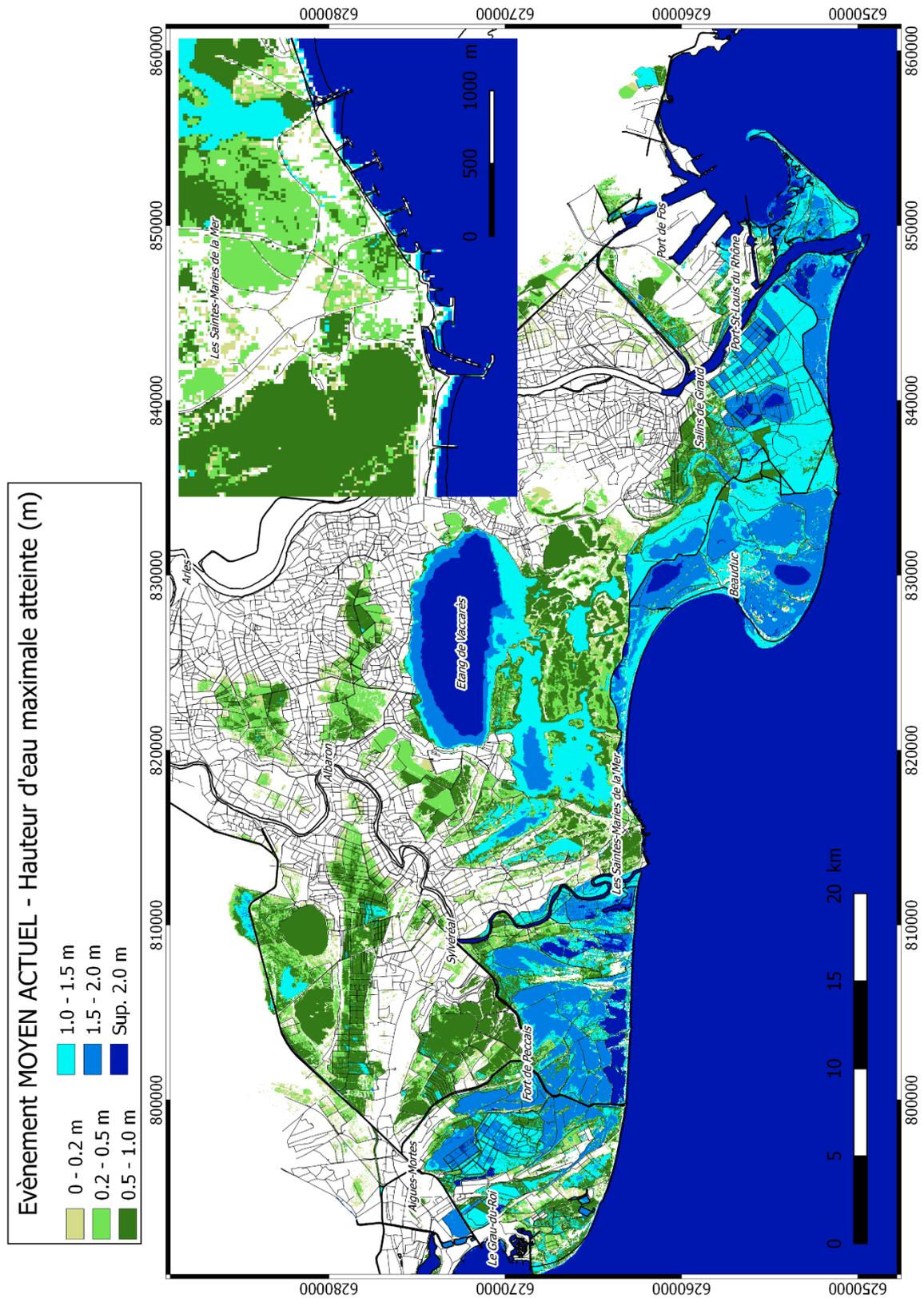


Figure 103 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales atteintes pour l'événement Moyen Actuel. Zoom sur le secteur des Saintes-Maries-de-la-Mer avec prise en compte des franchissements de paquets de mer.

7.1.10. Cartographie évènement Moyen 2100

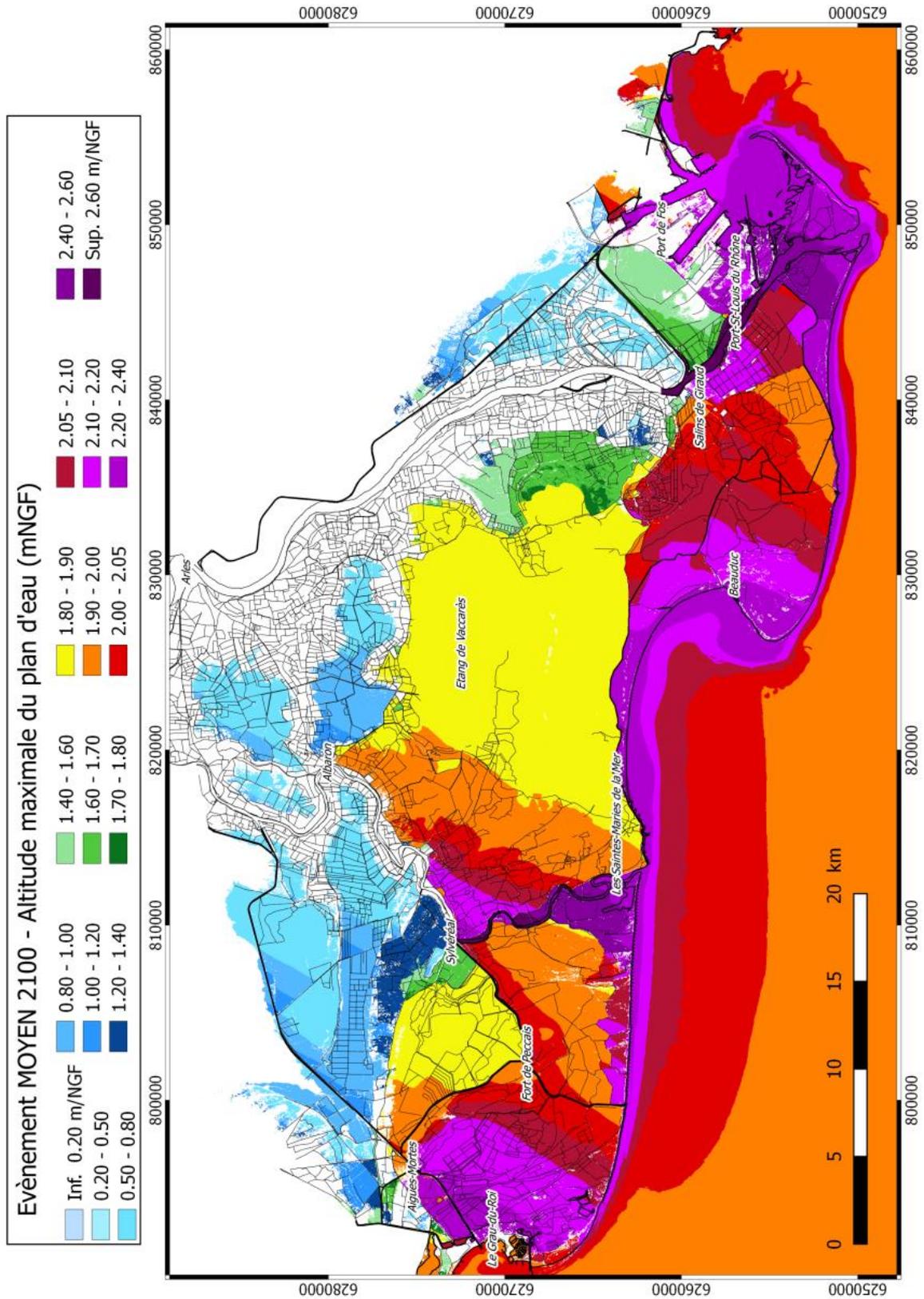


Figure 104 : Cartographie des niveaux marins maximaux et des altitudes maximales des plans d'eau atteints en cote NGF/IGN69 pour l'évènement Moyen 2100 .

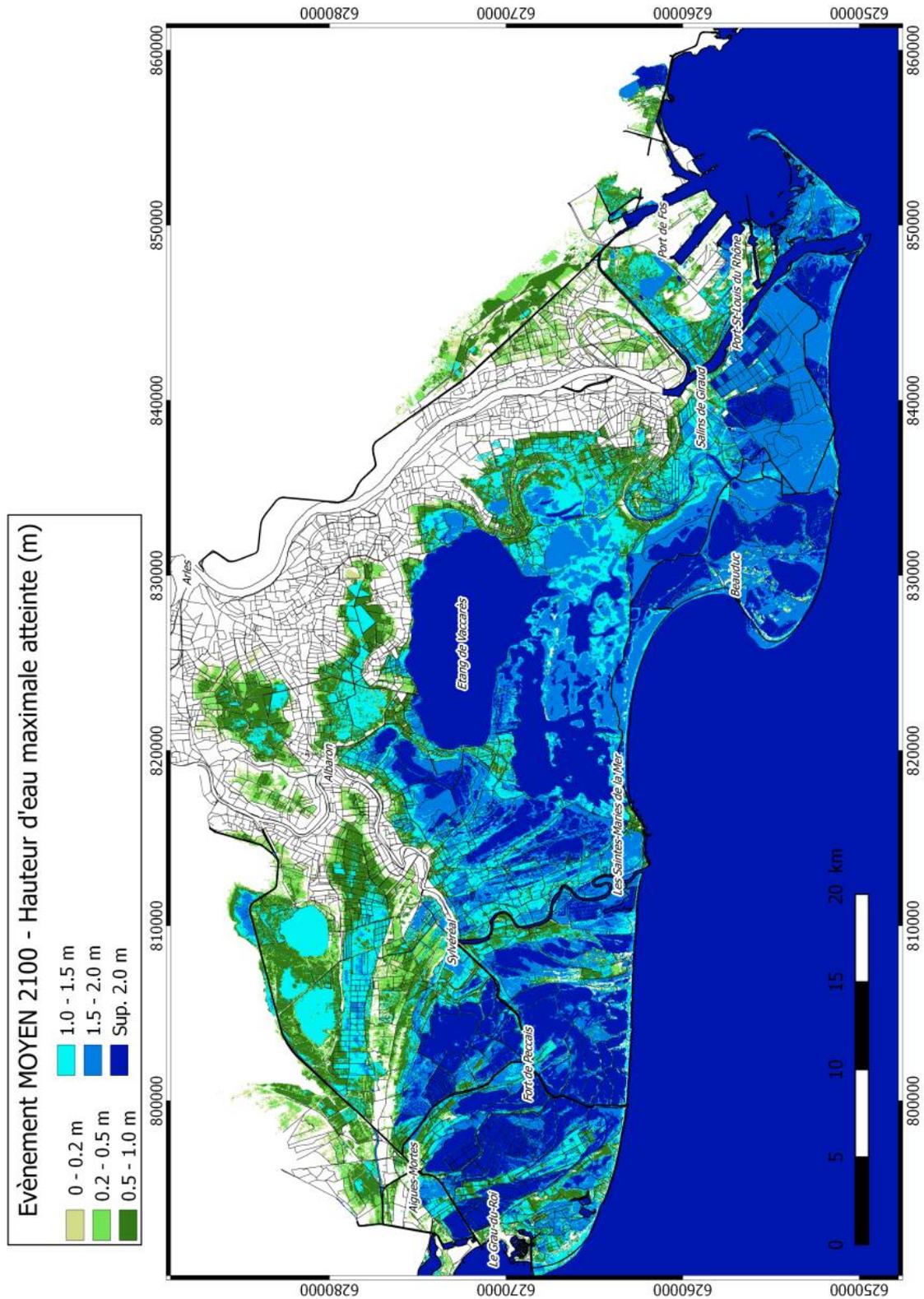


Figure 105 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales atteintes pour l'évènement MOYEN 2100.

**c) Différence entre évènement Moyen Actuel et Moyen 2100**

La Figure 106 ci-dessous montre les différences des hauteurs d'eau obtenues pour les deux scénarios Moyen Actuel et Moyen 2100. Elle illustre ainsi les conséquences de l'élévation du niveau de la mer en lien avec le changement climatique sur le territoire pour un évènement de période de retour centennale.

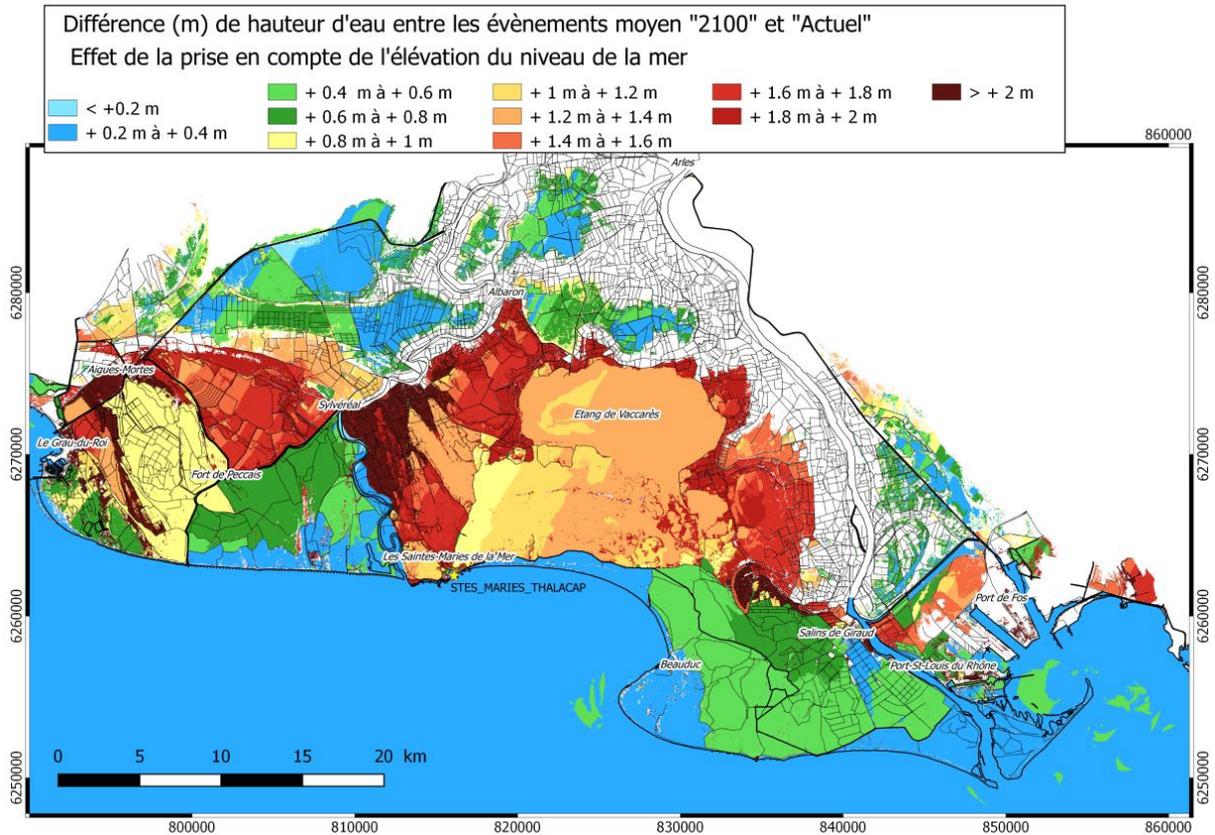


Figure 106 : Cartographie de la différence (A-B) des hauteurs d'eau maximales atteintes entre les évènements moyen « 2100 » (A) et moyen « actuel » (B).

À la différence d'une approche purement statique, qui augmenterait les hauteurs d'eau de + 40 cm sur l'ensemble du territoire, la modélisation dynamique de la submersion permet de montrer qu'il existe des effets de seuils/cuvettes qui se traduisent par des zones inondées qui seront « surexposées » en 2100, en particulier la zone centrale de l'étang du Vaccarès et en petite Camargue gardoise.

### 7.1.11. Cartographie évènement Extrême

Les cartographies des hauteurs d'eau maximales et des altitudes maximales du plan d'eau atteintes en mer et dans les étangs sont présentées pour l'évènement Extrême dans les figures suivantes (Figure 107 et Figure 108) .

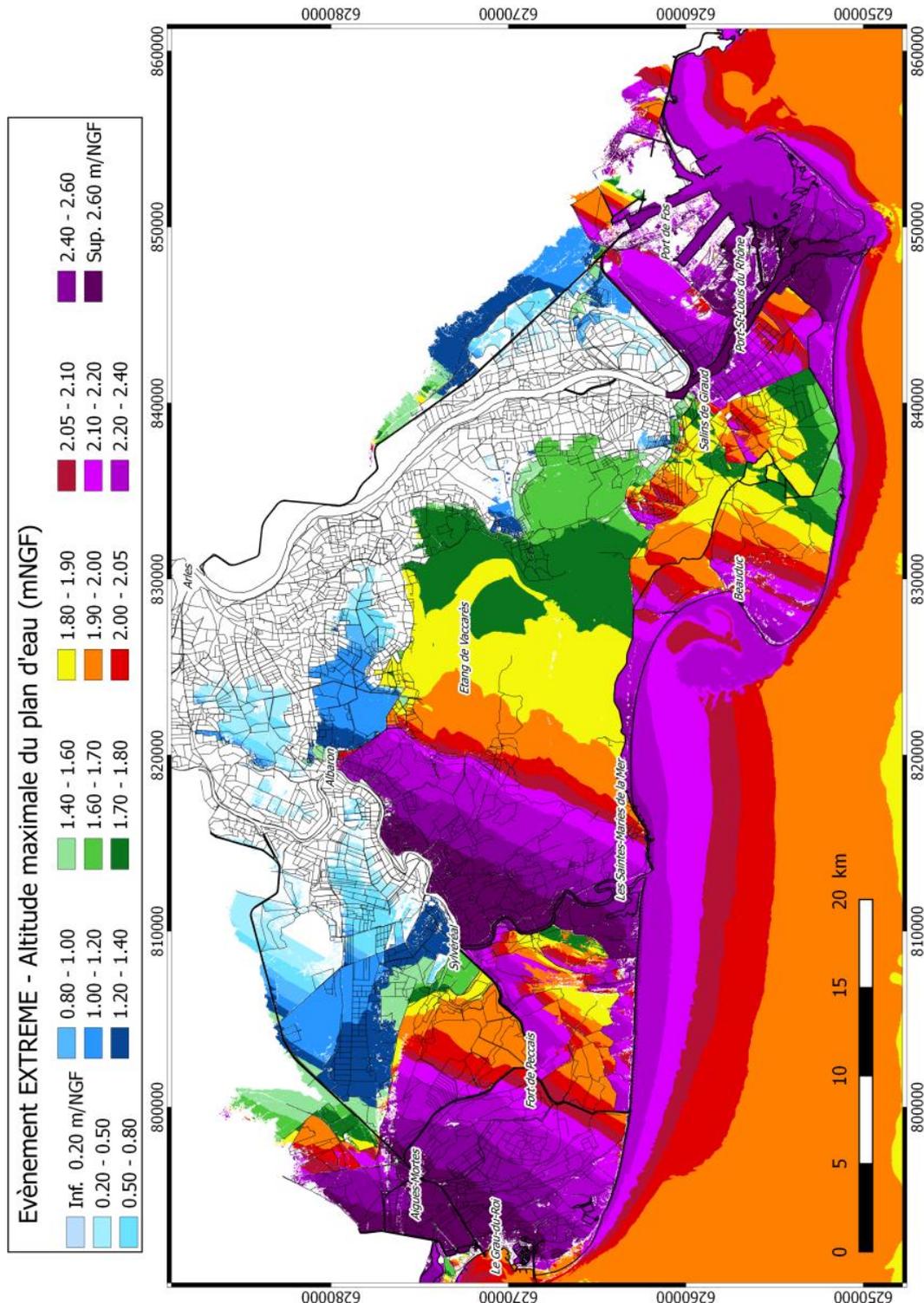


Figure 107 : Cartographie des niveaux marins maximaux et des altitudes maximales des plans d'eau atteints en cote NGF/IGN69 pour l'évènement Extrême.

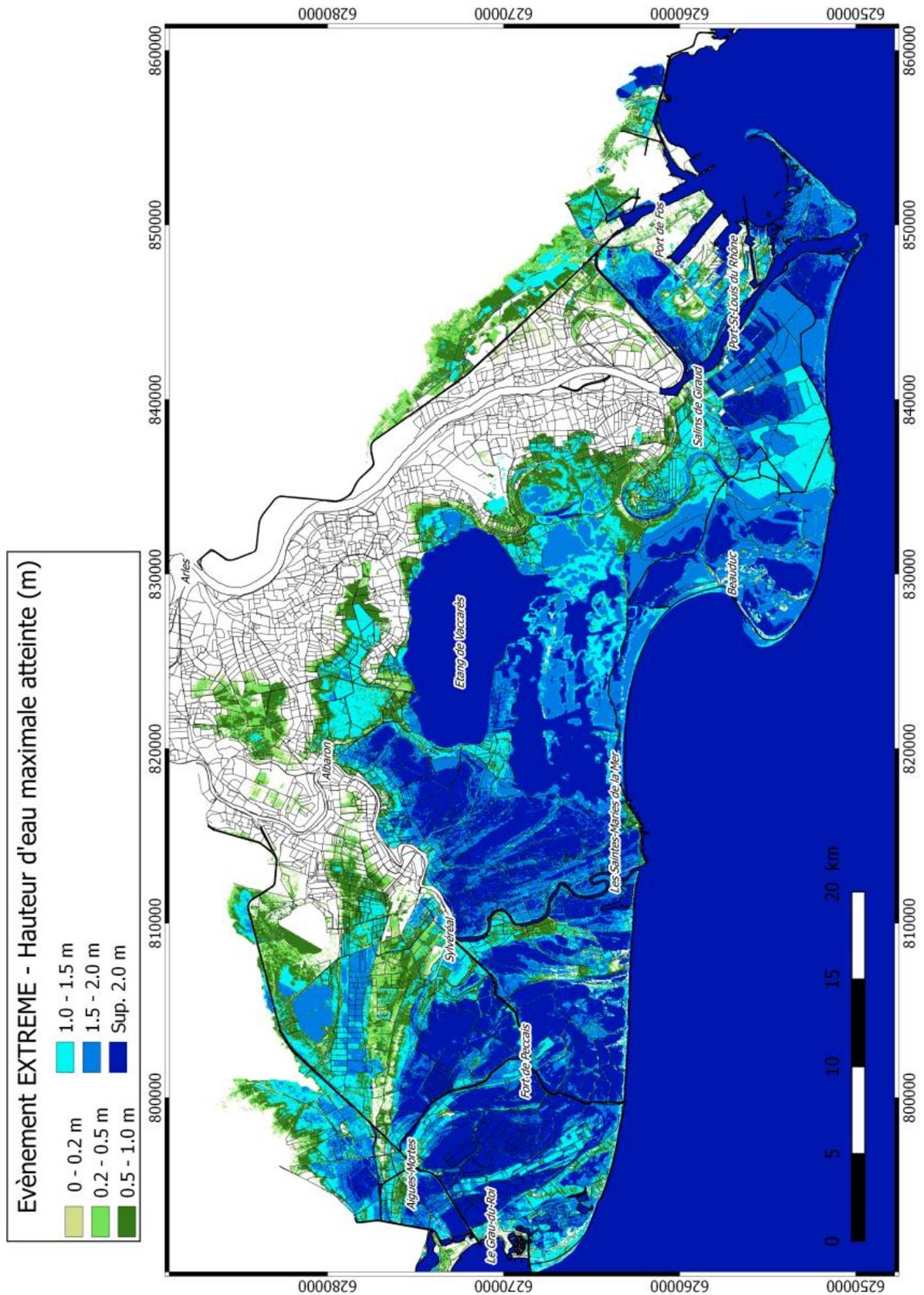


Figure 108 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales atteintes pour l'évènement Extrême.

## 7.2. SIMULATIONS DES SCÉNARIOS COMPLÉMENTAIRES

### 7.2.1. Présentation des scénarios

Quatre scénarios complémentaires (Figure 109) ont été simulés en prenant en compte des défaillances dans les ouvrages de protection contre la mer (scénario D1, D2 et D3) et un scénario d'aménagement de la digue à la mer (scénario DAM) sur le littoral camarguais :

- 3 scénarios de défaillances survenant pour un évènement Moyen Actuel pour fournir une aide à la décision pour la gestion du risque de submersion marine sur le territoire ;
- un scénario « nouveau tracé DAM » a été modélisé pour l'évènement moyen 2100 pour simuler l'effet sur la propagation de la submersion marine d'un nouveau tracé de la digue à la mer en projet.

#### a) Scénarios pour l'évènement Moyen Actuel

Le Tableau 18 renvoie les différentes caractéristiques des scénarios de défaillance des digues envisagés en termes de localisation (Figure 109) et largeur de la brèche et de l'évolution de celle-ci au cours de la tempête.

Scénario	Localisation et zone de défaillance	Largeur de la brèche	Cinétique
D1	Sur la plage à l'Est des Saintes-Maries de la Mer; défaillance de la digue à la mer à proximité du pertuis de la Fourcade	100 m	Ouverture instantanée sur 5 m puis 95 m en 2 heures. La rupture se produit au moment du pic de la tempête. L'arasement s'effectue sur la hauteur de la digue jusqu'au terrain naturel aval.
D2	Défaillance sur la digue de l'Amarée au niveau de l'embouchure du Petit-Rhône ( <i>au droit du départ de brèche en 2014</i> )	100 m	Ouverture instantanée sur 5 m puis 95 m en 2 heures. La rupture se produit au moment du pic de la tempête. L'arasement s'effectue sur la hauteur de la digue jusqu'au Terrain naturel aval.
	Défaillance de la digue à la mer sur la pointe de la "Courbe" au sud des salins de Giraud	100 m	Ouverture instantanée sur 5 m puis 95 m en 2 heures. La rupture se produit au moment du pic de la tempête. L'arasement s'effectue sur la hauteur de la digue jusqu'au terrain naturel aval.
D3	Défaillance des ouvrages de front de mer sur les Saintes-Maries de la Mer (centre-ville proche de "Thalacap")	50 m	Au pic de la tempête, la largeur de la brèche est de 10m puis elle s'élargit de 40m en 4h. L'arasement s'effectue sur la hauteur de la digue jusqu'au terrain naturel aval.

Tableau 18 : Caractéristiques des trois scénarios de défaillance des digues de protection envisagés.

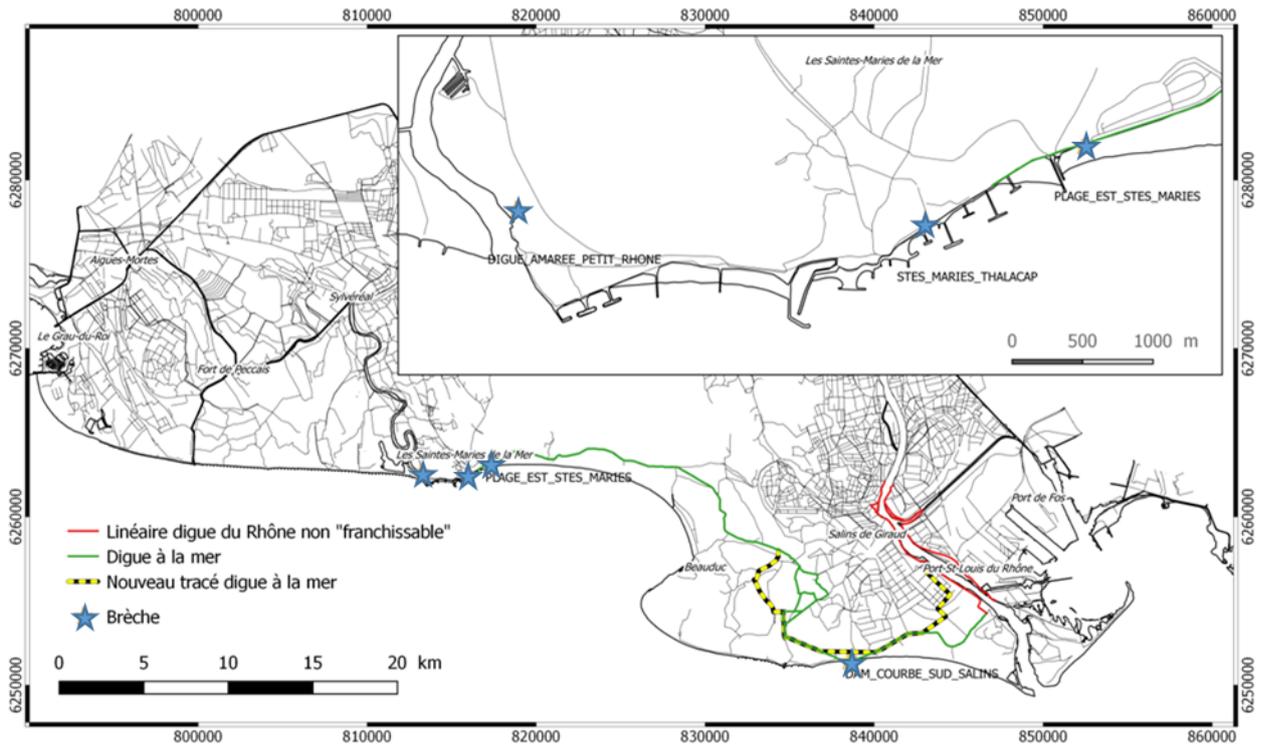


Figure 109 : Localisation des brèches (étoiles jaunes) pour les scénarios de défaillances ; du tracé actuel de la digue à la mer (ligne verte) et du nouveau tracé (ligne pointillée noir-jaune).

**b) Scénario « nouveau tracé digue à la mer infinie » pour l'évènement Moyen 2100**

Dans le cadre de ce scénario, l'évènement Moyen 2100 a été rejoué en modifiant le linéaire de la digue à la mer à partir du nouveau tracé :

- l'altitude du nouveau tracé a été rehaussée à des cotes dites « infinies » n'autorisant pas les débordements (tout comme les digues du Rhône) ;
- les digues sont considérées comme résistantes et aucune défaillance n'est prise en compte.

**7.2.2. Résultats des simulations complémentaires**

Les cartographies résultantes (altitude maximale du plan d'eau et hauteurs d'eau maximales des simulations sont présentées dans les figures suivantes.

a) Cartographie scénario D1

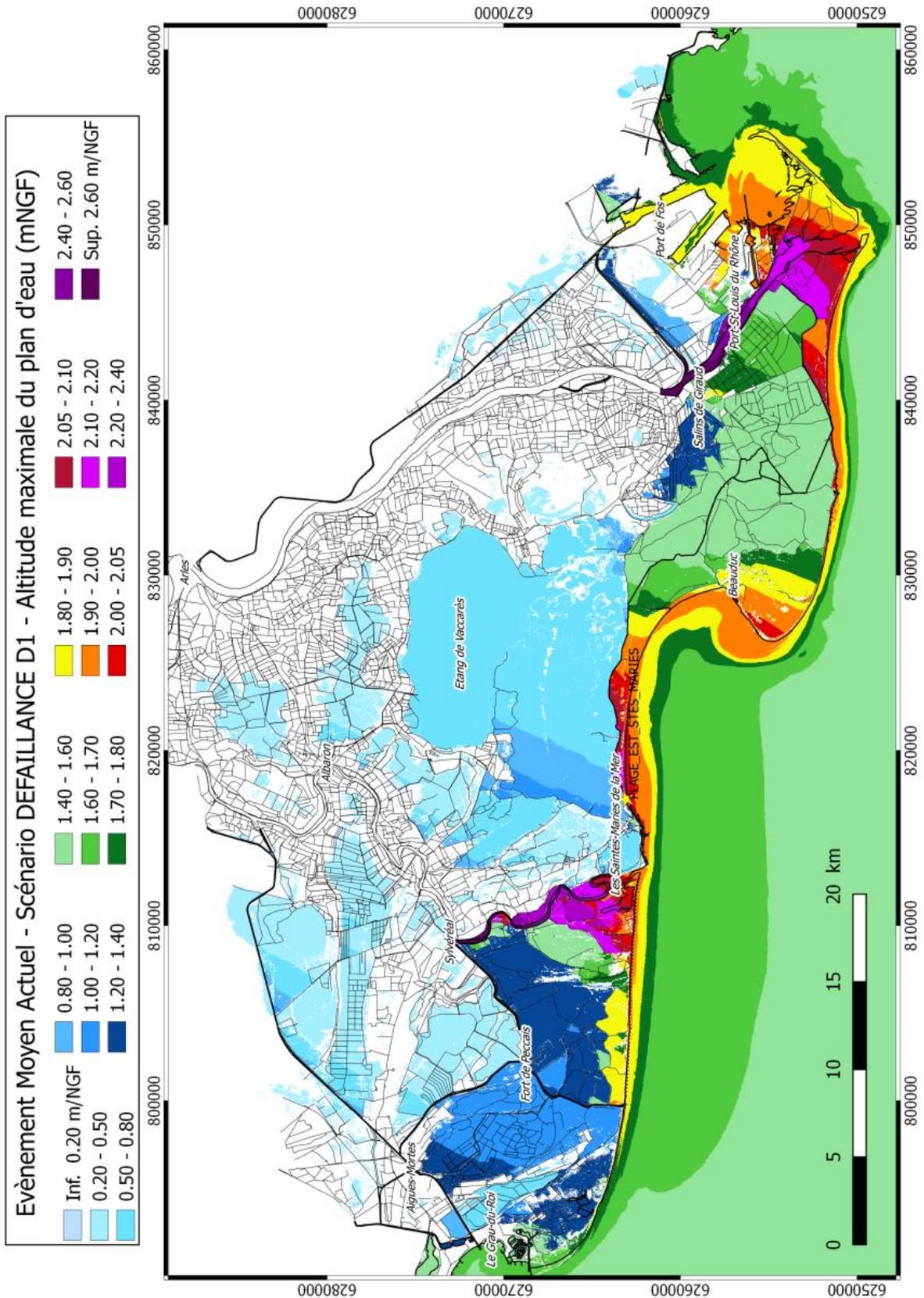


Figure 110 : Cartographie des niveaux marins maximaux et des altitudes maximales des plans d'eau atteints en cote NGF/IGN69 pour le scénario de défaillance D1 = évènement Moyen Actuel avec une brèche sur le secteur de la plage est des Saintes-Maries-de-la-mer.

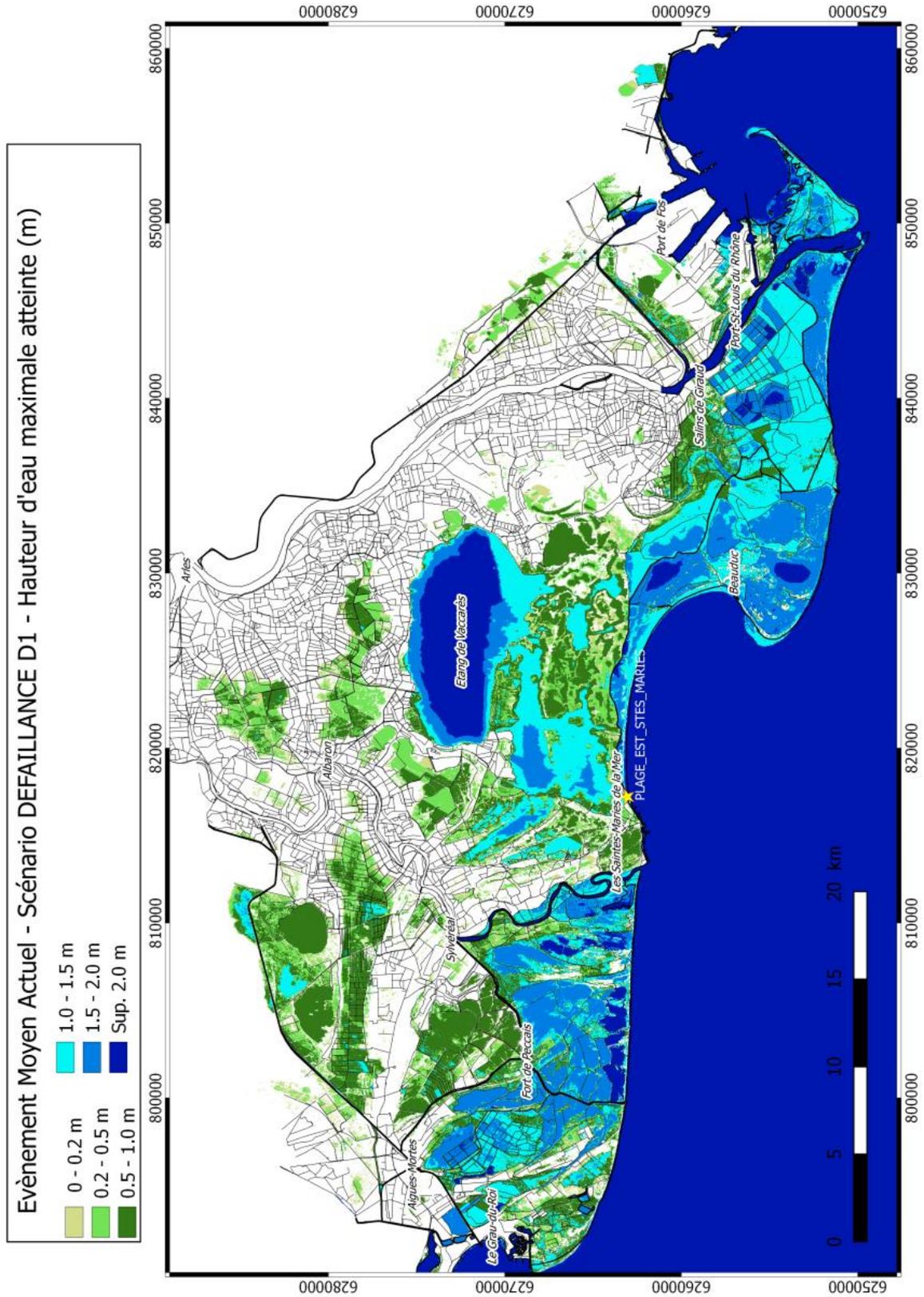


Figure 111 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales atteintes pour le scénario de défaillance D1 = évènement Moyen Actuel avec une brèche sur le secteur de la plage est des Saintes-Maries-de-la-mer.

Pour appréhender les effets des défaillances des digues par rapport à un scénario sans défaillance, une carte comparative est produite (Figure 112).

Dans le cas du scénario D1, les conséquences de la défaillance de la digue au niveau du Pertuis de la Fourcade se concentrent sur le secteur du système des étangs Vaccarès (étangs Vaccarès, dit Impérial, Consécanière), et très localement au niveau de la brèche envisagée.

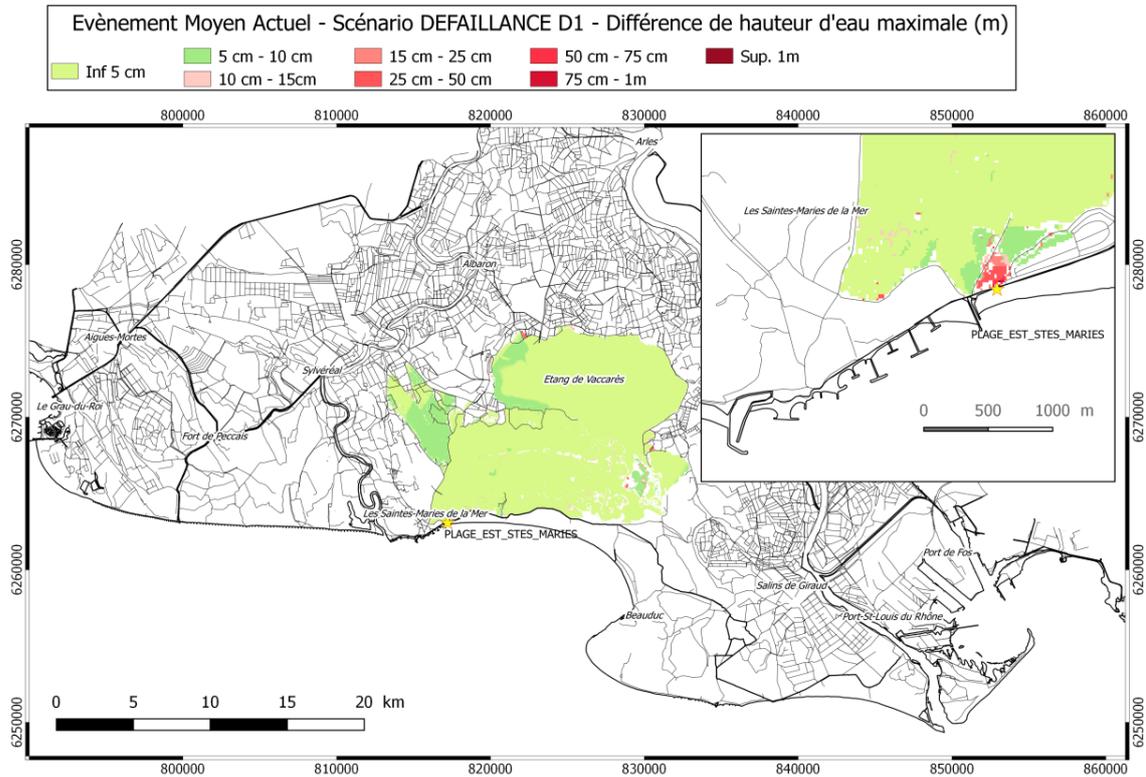


Figure 112 : Cartographie de l'impact (différence) sur les hauteurs d'eau maximales atteintes pour le scénario de défaillance D1 = événement Moyen Actuel avec une brèche sur le secteur de la plage est des Saintes-Maries-de-la-mer.

**b) Cartographie scénario D2**

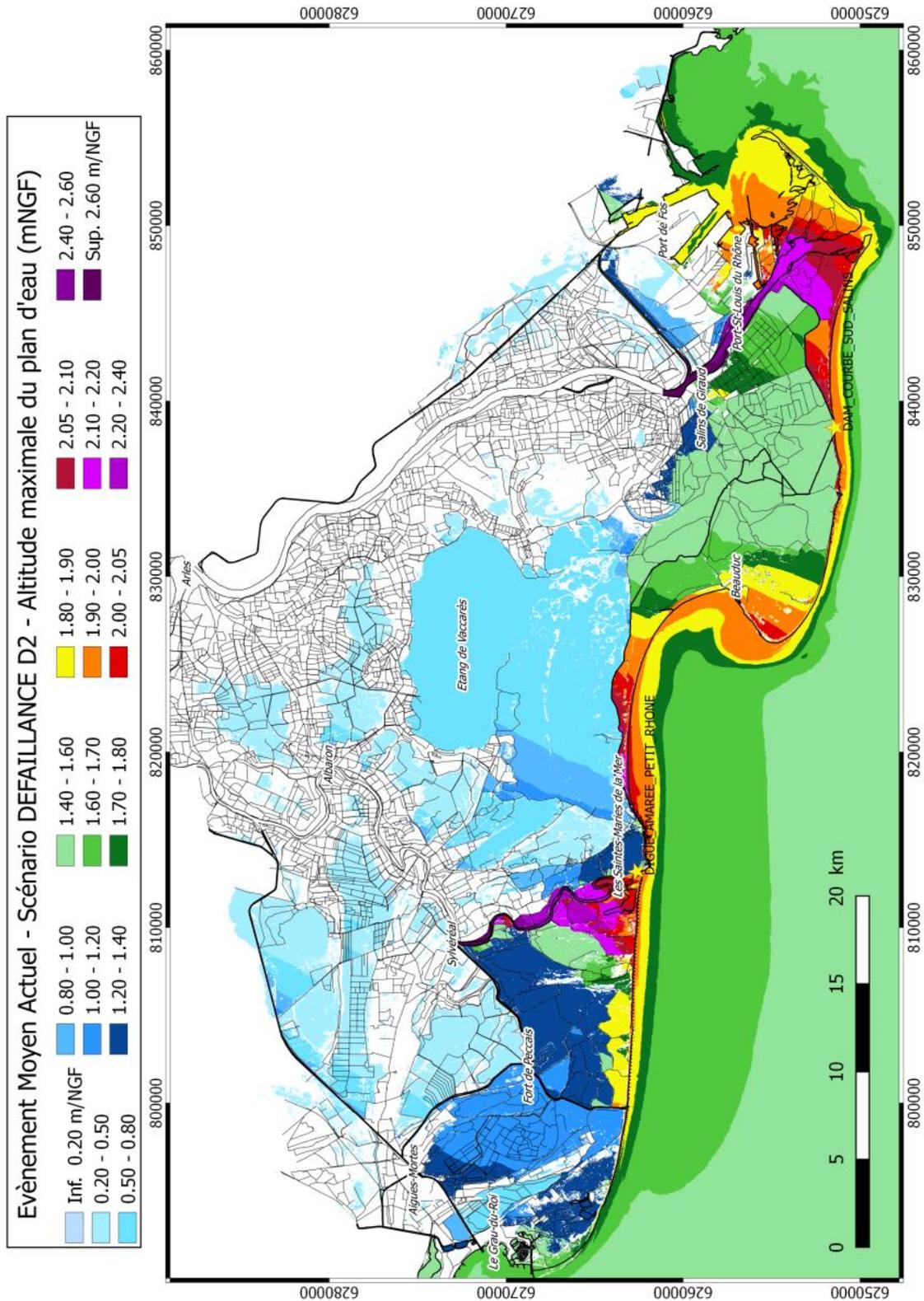


Figure 113 : Cartographie des niveaux marins maximaux et des altitudes maximales des plans d'eau atteints en cote NGF/IGN69 pour le scénario de défaillance D2 = évènement Moyen Actuel avec 2 brèches localisées sur la digue de l'Amarée (embouchure du Petit-Rhône) et sur la digue à la mer secteur de la pointe de la Courbe.

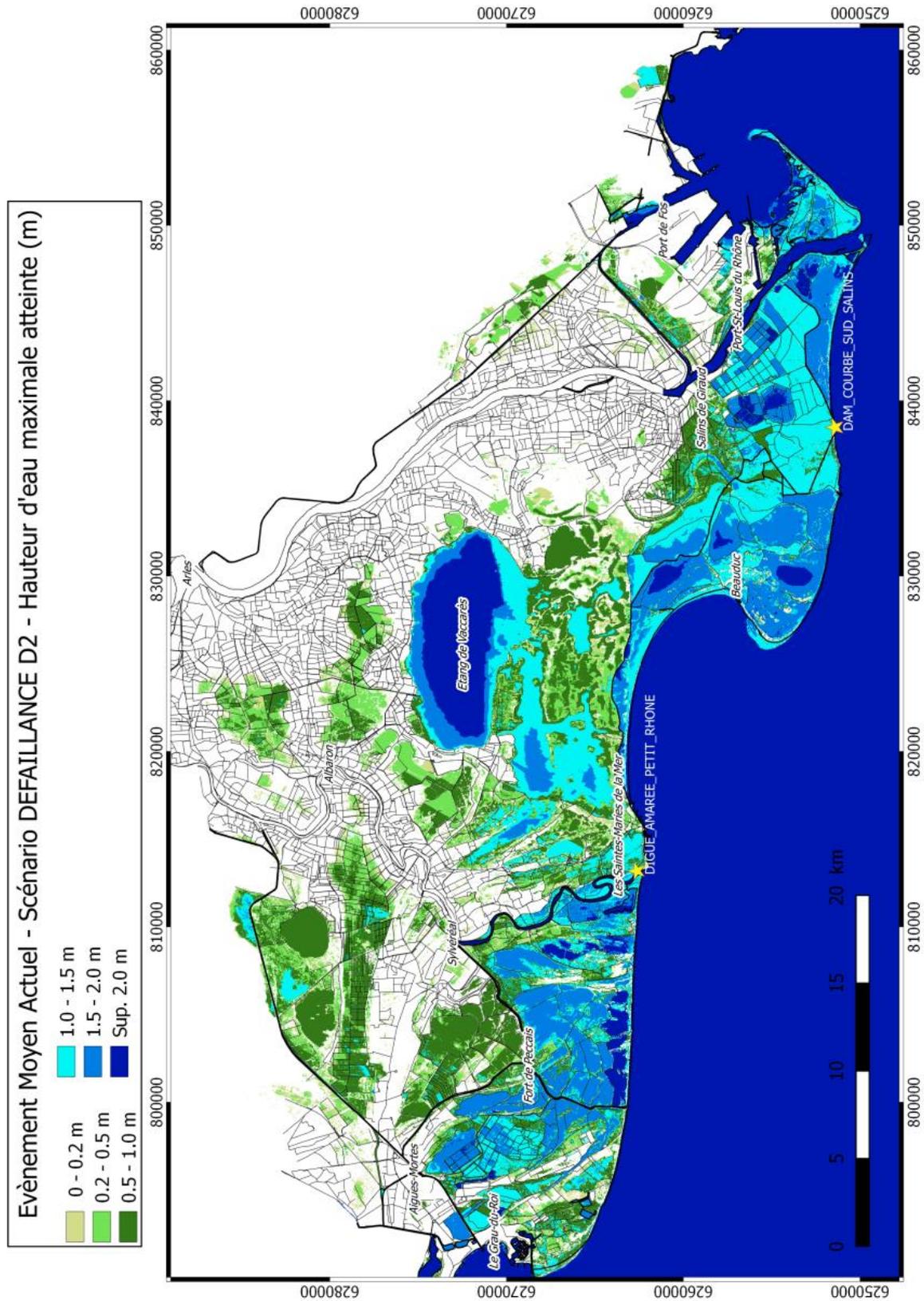


Figure 114 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales atteintes pour le scénario de défaillance D2 = évènement Moyen Actuel avec 2 brèches localisées sur la digue de l'Amarée (embouchure du Petit-Rhône) et sur la digue à la mer secteur de la pointe de la Courbe.

Dans le cas du scénario D2 (Figure 115), la brèche dans la digue du Petit-Rhône produit une très forte augmentation (environ + 0,70 à + 1 m) des hauteurs d'eau à l'ouest des Saintes-Maries-de-la-Mer et sur le secteur urbanisé. Sur la partie est du territoire de la Camargue, la brèche au niveau de la Pointe de la Courbe a des conséquences plus limitées (+ 5 à + 10 cm) en termes de hauteurs.

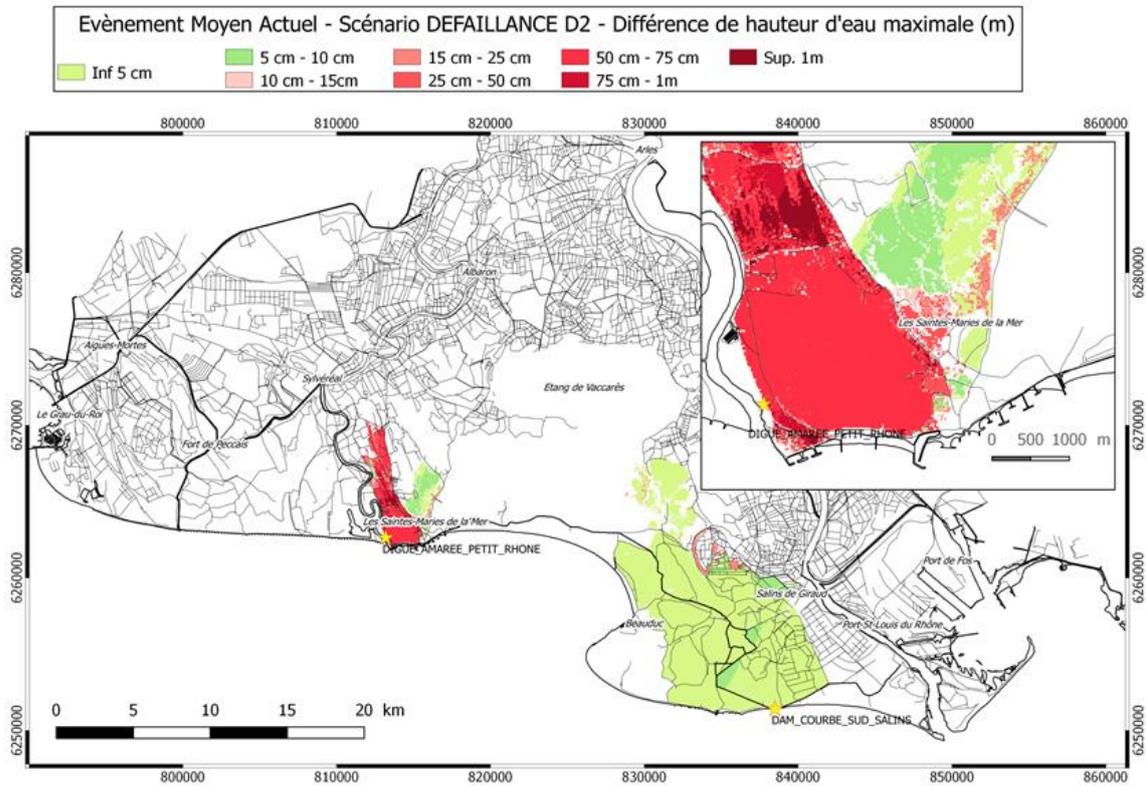
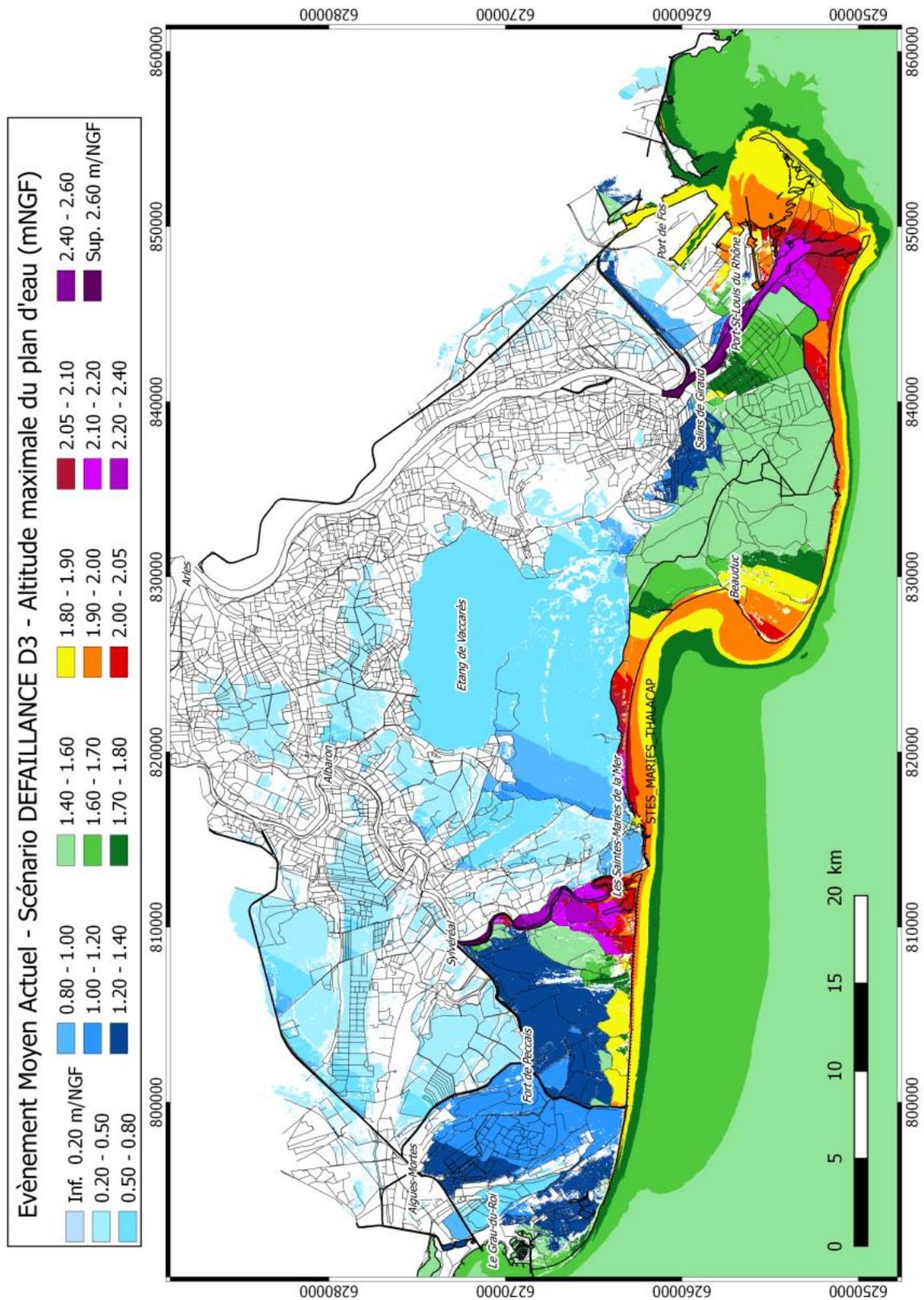


Figure 115 : Cartographie de l'impact (différence) sur les hauteurs d'eau maximales atteintes pour le scénario de défaillance D2 = événement Moyen Actuel avec 2 brèches localisées sur la digue de l'Amarée (embouchure du Petit-Rhône) et sur la digue à la mer secteur de la pointe de la Courbe.

c) Cartographie scénario D3



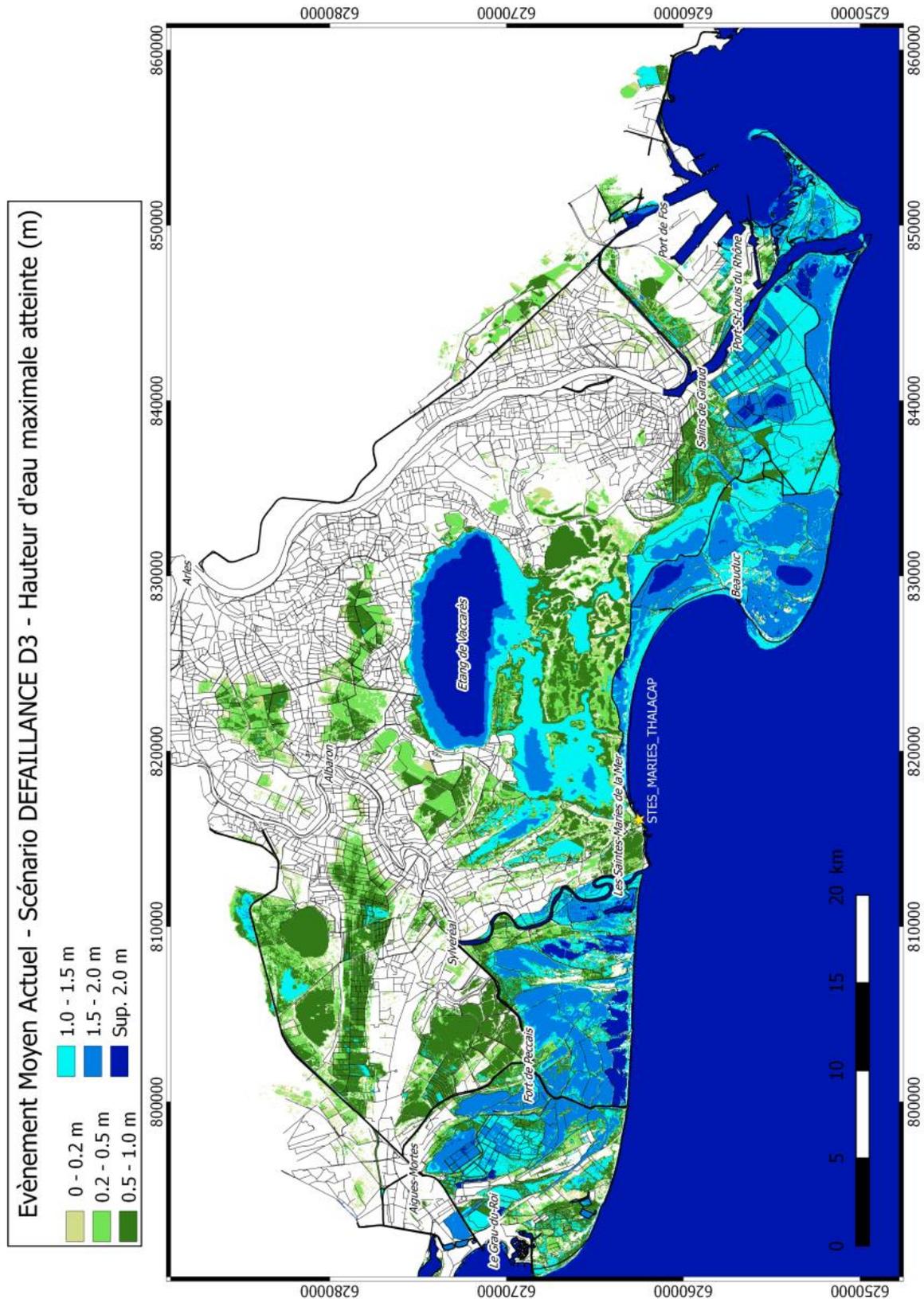


Figure 117 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales atteintes pour le scénario de défaillance D3 = évènement Moyen Actuel avec une brèche sur le front de mer des Saintes-Maries-de-la-mer.

Le scénario de brèche dans le front de mer des Saintes-Maries-de-la-Mer est illustré sur la Figure 118. La brèche dans le front de mer des Saintes-Maries-de-la-Mer génère une augmentation de 15 à 25 cm des hauteurs d'eau sur le quartier de centre-ville en arrière de la brèche. L'inondation se poursuit dans les étangs de partie nord-ouest de la ville (étang des Launes).

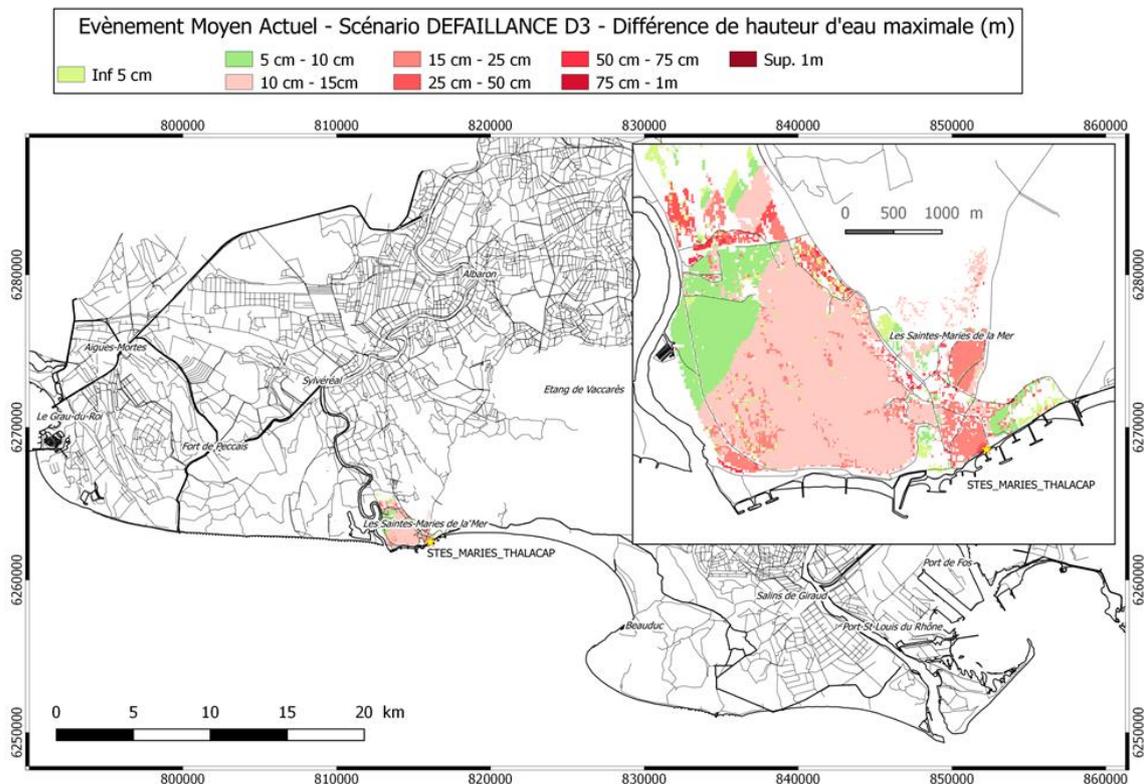


Figure 118 : Cartographie de l'impact (différence) sur les hauteurs d'eau maximales atteintes pour le scénario de défaillance D3 = évènement Moyen Actuel avec une brèche sur le front de mer des Saintes-Maries-de-la-mer.



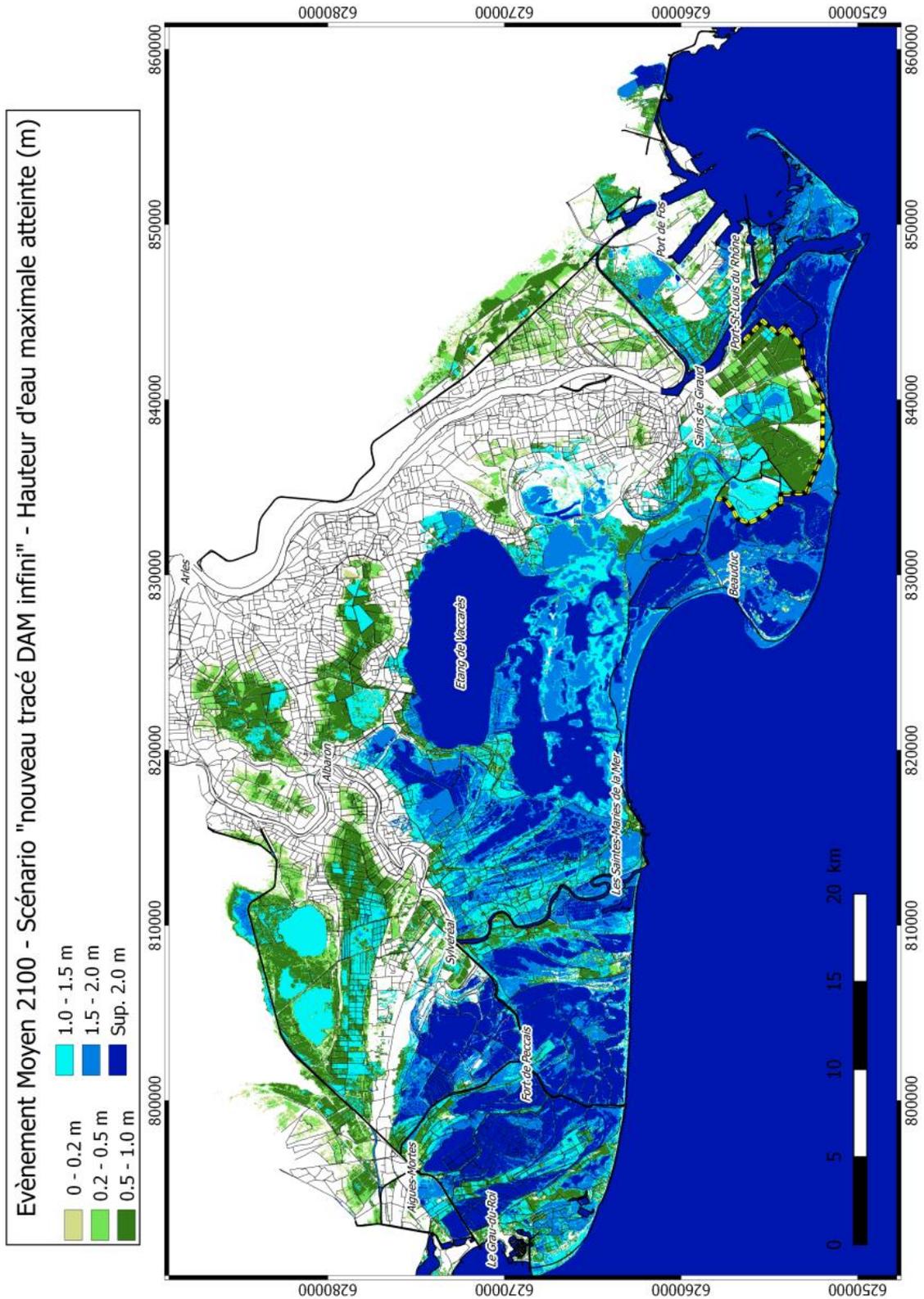


Figure 120 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales atteintes pour le scénario « nouveau tracé Digue à la mer infinie » = évènement Moyen 2100 avec une altitude « infinie » du nouveau tracé de la digue à la mer.

### **7.3. ANALYSE DES IMPACTS EN TERMES DE SURFACES INONDÉES ET DE CLASSES DE HAUTEURS D'EAU PAR SECTEUR DU TERRITOIRE**

Pour permettre une analyse comparative des différents résultats des simulations, une méthodologie d'analyse est ici proposée.

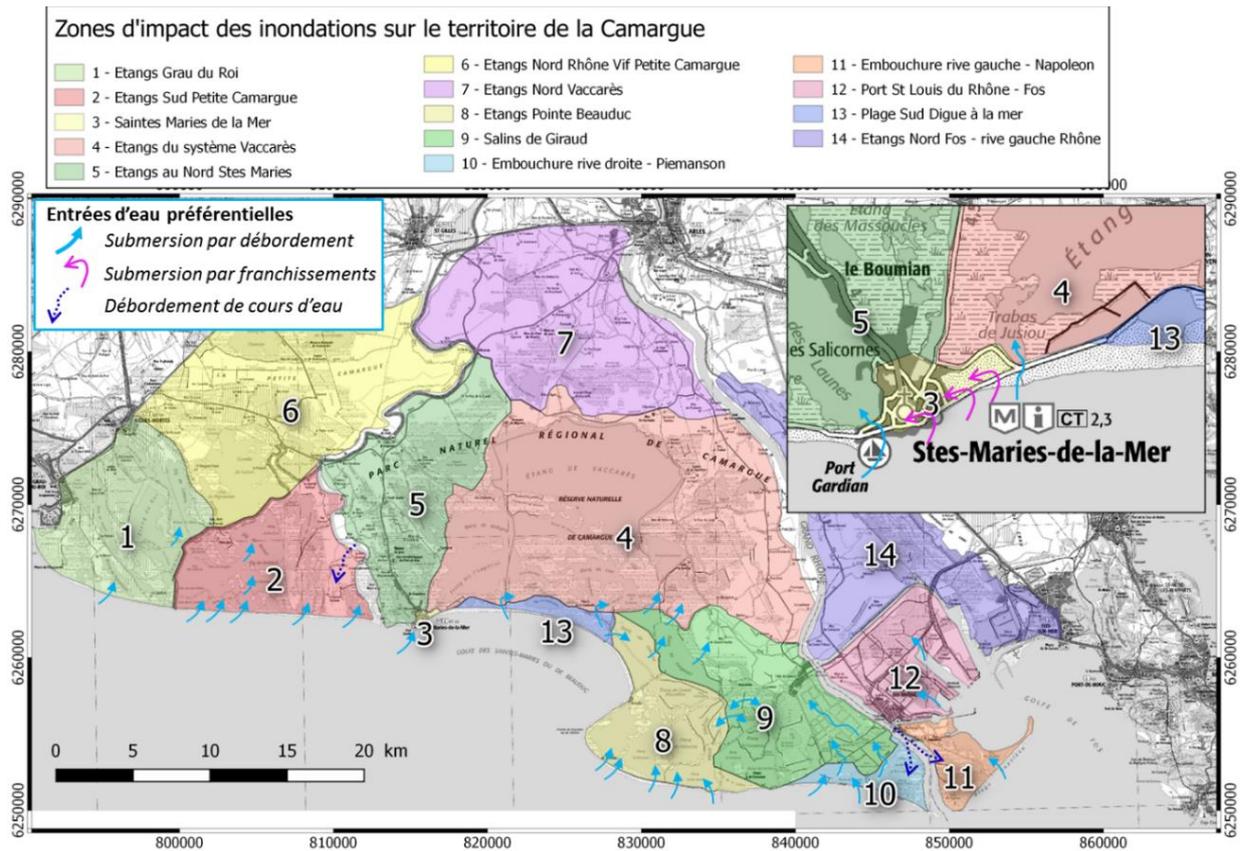
Elle est basée sur un découpage en grands secteurs du littoral camarguais, et pour chaque secteur, une analyse statistique relative des surfaces inondées et des emprises des différentes zones de classe de hauteur d'eau est réalisée.

Cette représentation permet de retranscrire les impacts relatifs des différents évènements et scénarios.

#### **7.3.1. Définition des secteurs de territoire**

Un découpage des secteurs potentiellement impactés par les submersions a été effectué suivant des critères géomorphologiques et hydrauliques à l'aide des éléments « structurants » du territoire (Figure 121).

Les délimitations suivent les digues, les routes et remblais, la digue à la mer, les plages, les systèmes hydrauliques cohérents des étangs, les cours d'eau tels que le Rhône, le Petit-Rhône, le Rhône et les principaux canaux, etc.



### 7.3.2. Méthode d'analyse

À partir de ces zones identifiées, une analyse chiffrée des surfaces inondées a été menée : Le Tableau 19 et le Tableau 20 présentent ainsi :

- les surfaces totales (terre + eau) (en hectare) ;
- et les surfaces inondées (en ha) associée à la fraction (%) de territoire inondé pour chaque évènement et scénario simulé.

### 7.3.3. État initial, surface en eau et élévation du niveau de la mer

En premier lieu, il convient de rappeler que la différence entre l'état initial « actuel » et « 2100 » est associée à un élévation de +40 cm des plans d'eau et du niveau moyen de la mer (cf. 4.7.5 - rubrique état initial des étangs).

À titre d'exemple, à l'état initial « actuel », la moitié (48 %, soit ~13 400 ha) du territoire du système Vaccarès (secteur n° 4) est inondée, en comparaison avec l'échéance à 100 ans pour laquelle les étangs occupent 61 % des surfaces en eau (~16 800 ha).

#### 7.3.4. Analyse des surfaces inondées par secteur

Les secteurs de l'embouchure du Rhône (n° 10 et 11), des plages au sud de la digue à mer (n° 13), de la pointe de Beauduc (n° 8), et des étangs de la petite-Camargue (n° 2) sont inondés à hauteur de 90 % de leur surface totale à partir d'un évènement d'occurrence fréquente. Ces zones dont le linéaire côtier est affecté par des entrées d'eau préférentielles, sont les premières à être inondées lors d'un épisode de submersion marine. Concernant la répartition des hauteurs d'eau maximales atteintes pour l'évènement Moyen Actuel, la classe des hauteurs d'eau supérieures à 1m représente entre 70 % et 90 % des surfaces inondées (cf. Tableau 21). À titre d'exemple, le territoire des étangs « sud petite Camargue » (n° 2, ~7 700 ha) est inondée à l'état initial à 47 % (~ 3 600 ha) avec une répartition des classes de hauteur d'eau comme suit : 11 % (h < 50 cm) et 36 % (h compris entre 50 cm et 1m) ; en comparaison avec la répartition de l'évènement Moyen Actuel : 8 % (h < 50 cm), 15 % (h compris entre 50 cm et 1m) et 68 % (h > 1 m), soit un total de 91 % de l'étendue inondée du territoire.

Les étangs du Grau du Roi (n° 1, ~ 8 700 ha), du système Vaccarès (n° 4, ~ 27 700 ha) et des salins de Giraud (n° 9, ~9 700 ha) sont affectés progressivement (niveau de gravité des inondations) par les évènements d'occurrence fréquent, moyen et Extrême. À titre d'exemple, la fraction de surface inondée de la zone « étangs Grau du Roi » (n° 1) grimpe respectivement de 43 %, 54 %, 76 %, 96 % pour les évènements « état initial », Fréquent, Moyen et Extrême (Tableau 21).

En fonction de la répartition hypsométrique (relation altitude/surface) des secteurs, la répartition des hauteurs d'eau maximales atteintes peut différer : en effet, les salins de Giraud (n° 9, ~ 9 700 ha) sont inondés à l'état initial à hauteur de 23 % (~ 2 200 ha) avec la répartition des classes de hauteur d'eau suivante : 18 % [h < 50 cm] et 5 % [h > 50 cm et h < 1 m] et évolue pour l'évènement Moyen Actuel vers la répartition suivante : 7 % [h < 50 cm], 16 % [h > 50 cm et h < 1 m] et 60 % [h > 1 m], soit un total de 83 % de l'étendue inondés du territoire.

Le secteur des Saintes-Maries-de-la-Mer (n° 3, ~92 ha) est essentiellement affecté par des franchissements par paquets de mer sur le front de mer (*uniquement pour les évènements Moyen Actuel et Fréquent*), et des entrées d'eau depuis le port Gardian qui conduisent à des surfaces inondées de superficie de l'ordre de 5 ha, 32 ha, 43 ha pour l'état initial et les évènements Fréquent, Moyen Actuel respectivement. À l'état initial, 5 % de la superficie est inondée et correspond à la classe de hauteur d'eau [h < 50 cm] pour l'état initial et évolue pour l'évènement Moyen Actuel vers la répartition suivante : 35 % [h < 50 cm], 11 % [h > 50 cm et h < 1 m] et 1 % [h > 1m], soit un total de 47 % de la surface totale du secteur des Stes Maries. Les surfaces inondées sont donc majoritairement constituées de faibles hauteurs d'eau liées à la répartition des volumes franchissants.

À l'échéance 2100, les étendues d'eau sur le secteur des Saintes Maries de la Mer (n° 3, ~ 92 ha) représente ~ 7 % (6 ha) de la superficie totale, et augmente pour l'évènement Moyen 2100 avec une surface inondée de 84 ha, soit 91 % de l'étendue du territoire. L'évènement Extrême conduit à une surface inondée de 85 ha (92 %).

Pour ces 2 évènements, la submersion est causée par des débordements importants.

		Surfaces immergées (ha) par évènement et scénario									
Nom du secteur	Superficie totale du secteur (ha) (terre + eau)	Etat initial "actuel"	Frequent n°2	Evènement Moyen Actuel				Extreme	Etat initial à 2100	Moyen 2100	
				Moyen Réf.	Scénario de défaillances						
					D1	D2	D3				
1	Etangs Grau du Roi	8 688	3 712	4 711	6 636	6 636	6 636	6 636	8 364	5 049	8 321
2	Etangs Sud Petite Camargue	7 711	3 643	6 397	6 998	6 998	6 998	6 998	7 340	5 123	7 349
3	Saintes Maries de la Mer	92	5	32	43	44	51	50	85	6	84
4	Etangs du système Vaccarès	27 673	13 391	15 078	16 038	16 167	16 095	16 041	21 811	16 787	22 716
5	Etangs au Nord Sainte Maries	9 827	3 507	4 157	4 562	4 613	5 057	4 608	9 537	5 606	9 247
6	Etangs Nord Rhône-Vif (Petite Camargue)	17 894	8 210	9 191	9 290	9 168	9 168	9 168	13 216	11 509	14 447
7	Etangs Nord Vaccarès	15 363	2 997	3 309	3 340	3 329	3 329	3 329	4 348	4 816	5 255
8	Etangs Pointe Beauduc	6 003	3 317	5 588	5 676	5 676	5 676	5 676	5 747	5 085	5 791
9	Salins de Giraud	9 713	2 219	5 253	8 049	8 047	8 107	8 048	9 088	6 272	9 141
10	Embouchure Rhône rive droite - Piemanson	1 445	204	1 391	1 394	1 395	1 395	1 395	1 405	1 064	1 408
11	Embouchure Rhône rive gauche - Napoleon	1 942	403	1 702	1 786	1 788	1 788	1 788	1 821	906	1 845
12	Port St Louis du Rhône - Fos-sur-mer	4 948	447	1 060	1 517	1 515	1 517	1 517	3 510	1 094	2 960
13	Plages Sud de la digue à la mer	918	175	859	864	865	864	864	880	501	879
14	Etangs au Nord Fos - rive gauche Rhône	12 921	1 022	1 316	1 455	1 441	1 442	1 442	5 072	2 674	3 922
<b>Global</b>		<b>125 138</b>	<b>43 253</b>	<b>60 044</b>	<b>67 646</b>	<b>67 684</b>	<b>68 123</b>	<b>67 561</b>	<b>92 224</b>	<b>66 492</b>	<b>93 364</b>

Tableau 19 : Synthèse des surfaces totales et inondées (en ha) par évènement et scénario simulé pour les 14 secteurs identifiés.

		Surfaces immergées (%) par évènement et scénario									
Nom du secteur	Superficie totale du secteur (ha) [terre + eau]	Etat initial "actuel"	Frequent n°2	Evènement Moyen Actuel				Extreme	Etat initial à 2100	Moyen 2100	
				Moyen Réf.	Scénario de défaillances						
					D1	D2	D3				
1	Etangs Grau du Roi	8 688	43	54	76	76	76	76	96	58	96
2	Etangs Sud Petite Camargue	7 711	47	83	91	91	91	91	95	66	95
3	Saintes Maries de la Mer	92	5	34	47	48	55	55	92	7	91
4	Etangs du système Vaccarès	27 673	48	54	58	58	58	58	79	61	82
5	Etangs au Nord Sainte Maries	9 827	36	42	46	47	51	47	97	57	94
6	Etangs Nord Rhône-Vif (Petite Camargue)	17 894	46	51	52	51	51	51	74	64	81
7	Etangs Nord Vaccarès	15 363	20	22	22	22	22	22	28	31	34
8	Etangs Pointe Beauduc	6 003	55	93	95	95	95	95	96	85	96
9	Salins de Giraud	9 713	23	54	83	83	83	83	94	65	94
10	Embouchure Rhône rive droite - Piemanson	1 445	14	96	96	97	97	97	97	74	97
11	Embouchure Rhône rive gauche - Napoleon	1 942	21	88	92	92	92	92	94	47	95
12	Port St Louis du Rhône - Fos-sur-mer	4 948	9	21	31	31	31	31	71	22	60
13	Plages Sud de la digue à la mer	918	19	94	94	94	94	94	96	55	96
14	Etangs au Nord Fos - rive gauche Rhône	12 921	8	10	11	11	11	11	39	21	30
<b>Global</b>		<b>125 138</b>	<b>35</b>	<b>48</b>	<b>54</b>	<b>54</b>	<b>54</b>	<b>54</b>	<b>74</b>	<b>53</b>	<b>75</b>

Tableau 20 : Répartition (%) des surfaces inondées par évènement de référence et scénario de défaillances (D1, D2, D3) simulé pour les 14 secteurs identifiés.

Surfaces immergées (%) par classe de hauteur d'eau (Hmax)										
Nom du morceau de territoire	Surface totale du secteur (ha)	Etat initial				Evènement Moyen Actuel				
		Global	Classes de Hmax			Global	Classes de Hmax			
			Inf. < 50cm	50 cm à 1 m	Sup. > 1 m		Inf. < 50cm	50 cm à 1 m	Sup. > 1 m	
1	Etangs Grau du Roi	8 688	43	17	24	2	76	13	20	43
2	Etangs Sud Petite Camargue	7 711	47	11	36	0	91	8	15	68
3	Saintes Maries de la Mer	92	5	5	0	0	47	35	11	1
4	Etangs du système Vaccarès	27 673	48	15	14	19	58	11	14	33
5	Etangs au Nord Sainte Maries	9 827	36	22	13	1	46	23	14	8
6	Etangs Nord Rhône-Vif (Petite Camargue)	17 894	46	22	24	0	52	20	30	2
7	Etangs Nord Vaccarès	15 363	20	16	3	0	22	15	6	0
8	Etangs Pointe Beauduc	6 003	55	47	8	0	95	1	5	88
9	Salins de Giraud	9 713	23	18	5	0	83	7	16	60
10	Embouchure Rhône rive droite - Piemanson	1 445	14	11	3	0	96	0	2	94
11	Embouchure Rhône rive gauche - Napoleon	1 942	21	19	2	0	92	4	8	80
12	Port St Louis du Rhône - Fos-sur-mer	4 948	9	9	0	0	31	12	12	7
13	Plages Sud de la digue à la mer	918	19	19	0	0	94	0	4	90
14	Etangs au Nord Fos - rive gauche Rhône	12 921	8	8	0	0	11	9	2	0
<b>Global</b>		<b>125 138</b>	<b>35</b>	<b>17</b>	<b>13</b>	<b>4</b>	<b>54</b>	<b>12</b>	<b>14</b>	<b>28</b>

Tableau 21 : Répartition (%) des surfaces inondées par classe de hauteur d'eau maximale atteinte pour l'évènement Moyen Actuel et l'état initial associé pour les 14 secteurs identifiés.

### 7.3.5. Analyse des défaillances

Afin d'évaluer l'impact des scénarios de défaillances, le ratio volume d'eau / surface inondée a été calculé pour les secteurs identifiés (ceux proches des brèches). Cette grandeur physique correspond intuitivement à une « lame d'eau moyenne » (exprimée ici en cm) qui serait uniformément répartie sur la superficie des surfaces en eau en considérant un fond plat.

Dans le Tableau 22, la lame d'eau moyenne est calculée pour l'état initial de l'évènement moyen (par exemple de 18 cm pour le secteur n°3 des Saintes Maries), les augmentations de l'épaisseur moyenne de ce cette lame d'eau sont ensuite calculées pour l'évènement moyen de référence et les 3 scénarios de défaillances associés.

Ratio volume / surface (cm)		Augmentation de l'épaisseur de la lame d'eau moyenne				
Nom du secteur	Lame d'eau moyenne = ratio Volume / Surface Etat initial (cm)	Evènement Moyen Actuel				
		Moyen Réf.	Scénario de défaillances			
			D1 (Brèche DAM Fourcade)	D2 (Brèches Amarée + pointe Courbe)	D3 (Brèche front mer Stes Maries)	
3	Saintes Maries de la Mer	18	+ 24	+ 24	+ 29	+ 33
4	Etangs du système Vaccarès	99	+ 25	+ 28	+ 25	+ 25
5	Etangs au Nord Sainte Maries	49	+ 11	+ 12	+ 19	+ 12
8	Etangs Pointe Beauduc	32	+ 121	+ 121	+ 122	+ 121
9	Salins de Giraud	35	+ 83	+ 83	+ 85	+ 83

Tableau 22 : Synthèse des impacts des scénarios de défaillance.

### Scénario D1

Concernant le scénario D1, la brèche sur la digue à la mer localisée à proximité du pertuis de la Fourcade induit une élévation de + 3 cm de la lame d'eau moyenne (augmentation de + 25 cm à + 28 cm) sur l'ensemble des étangs du système Vaccarès. Cette valeur est ici dans l'ordre de grandeur de l'impact attendue sur le secteur n° 4 qui correspond à un découpage réaliste des plans d'eau impactés par la brèche (cf. Figure 112).

### Scénario D2

Le scénario D2, dans lequel 2 brèches sont représentées sur (1) la digue de l'Amarée proche de l'embouchure du petit Rhône et (2) sur la digue à la mer au niveau de la pointe de la Courbe, impacte ces 2 secteurs :

- (1) les marais des salins de Giraud (secteur n° 9) et les étangs de la pointe de Beauduc (secteur n° 8) avec des augmentations de la lame d'eau moyenne de respectivement +2 cm et +1 cm ;
- (2) les étangs compris entre le Petit-Rhône et les Saintes-Maries-de-la-Mer (secteur n° 5) sont affectées par une élévation de + 7 cm (passage de + 11 cm à + 19 cm) et une partie du secteur des Saintes-Maries (n° 3) avec une élévation moyenne de + 5 cm (passage de + 24 cm à + 29 cm).

Dans ce dernier cas, les valeurs annoncées ne sont pas représentatives de la surface des zones impactées par la brèche qui seront localement plus élevées de l'ordre de +10 cm à +50 cm (cf. Figure 115).

### Scénario D3

Le scénario D3 simule une brèche sur le front de mer des Saintes Maries de la mer. L'impact en terme de lame d'eau moyenne est de + 9 cm (passage de + 24 cm à + 33 cm) sur le secteur n° 3 et de + 1 cm sur le secteur n° 5 (cette valeur n'est pas représentative des élévations locales).

## 8. Conclusions

Cette étude a pour objectif de développer un modèle numérique de la submersion marine en Camargue afin de répondre aux préoccupations des différents acteurs en charge de la gestion de ce territoire. L'extension spatiale du modèle va du Golfe de Fos-sur-Mer jusqu'à la pointe de l'Espiguette.

La stratégie de modélisation retenue est une approche de simulation de la propagation de la submersion marine de manière dynamique sur les surfaces terrestres, à l'inverse des approches classiques, basées sur la propagation à l'infini d'un niveau marin.

Le modèle a été construit à partir de la collecte des données bathymétriques et topographiques précises les plus à même de représenter le milieu spécifique de la Camargue, zone basse avec des points topographiques hauts sur les digues et les routes. Des traitements spécifiques ont été appliqués au modèle numérique de terrain pour reconstituer au mieux les caractéristiques topographiques et les prendre en compte dans les simulations.

### 8.1. CONSTRUCTION DU MODÈLE ET DES ÉVÈNEMENTS DE RÉFÉRENCE

Une définition des scénarios de forçages météo-marins a été réalisée sur la base d'une analyse statistique conjointe des caractéristiques de vagues et des niveaux marins, conformément au guide d'élaboration des Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL). Cette analyse a conduit à la définition de 7 combinaisons de hauteurs significatives des vagues et de niveaux d'eau et de leurs paramètres associés (direction et intensité du vent) pour caractériser des événements de période de retour centennale.

Par ailleurs, l'analyse des incertitudes sur les données topographiques et hydrodynamiques utilisées, et également des intervalles de confiance liés aux méthodes probabilistes employées, montre qu'il est préférable d'incorporer une marge de + 0,25 m sur les niveaux d'eau de référence, conformément aux préconisations du MEDDE (2014) pour l'élaboration des PPRL.

La chaîne de modélisation implantée pour représenter l'ensemble des processus hydrodynamiques comprend la modélisation des vagues, des niveaux d'eau, des courants et de la submersion marine sur le territoire de la Camargue.

Une validation des modèles a été réalisée à partir des données de forçages de la tempête du 6 au 10 novembre 1982 et les résultats ont été comparés aux observations historiques réalisées lors de cet événement, rassemblées par le CETE (2007, 2010), et aux mesures des niveaux d'eau dans le système d'étangs du Vaccarès. Les résultats de ces tests montrent qu'à l'échelle de la Camargue :

- la représentativité des écoulements de l'inondation à terre est satisfaisante,
- les zones inondées observées sont correctement représentées par le modèle,
- le modèle reproduit bien le basculement du plan d'eau dans les étangs sous l'effet du vent.

Par ailleurs, de tests de sensibilité sur les paramètres de forçages météo-marins ont été réalisés afin d'évaluer :

- la sensibilité des vagues côtières aux conditions imposées au large du modèle ;

- et l'influence des vents sur les niveaux marins côtiers et les bascules des plans d'eau des étangs.

Le modèle construit est ainsi opérationnel et apte à simuler les différents évènements et scénarios envisagés.

## **8.2. SIMULATIONS DES ÉVÈNEMENTS DE RÉFÉRENCE ET DES SCÉNARIOS COMPLÉMENTAIRES**

### **8.2.1. Résultats et données produites**

Les résultats des différents scénarios des simulations sont présentés dans le rapport sous la forme de cartographie à l'échelle de la Camargue. Les données SIG produites sont décrites en Annexe 2.

### **8.2.2. Evènements de référence**

Les simulations ont été réalisées pour différentes périodes de retour d'évènements référentes :

- évènements d'occurrence fréquents, moyenne et Extrême pour l'échéance actuelle (niveau marin en prenant en compte une élévation de + 20 cm) ;
- évènement Moyen 2100, basé sur l'évènement Moyen Actuel, en prenant en compte une élévation du niveau de mer de + 60 cm en 2100 (soit + 40 cm par rapport à Moyen Actuel).

Sur les Saintes-Maries-de-la-Mer, une approche spécifique sur les franchissements de paquets a été menée. Ces phénomènes peuvent impacter grandement la submersion marine notamment pour les évènements Fréquent et Moyen Actuel. Dans le cas des autres évènements (Moyen 2100 et Extrême), la submersion marine est principalement contrôlée par le débordement, les franchissements par paquets de mer peuvent alors être négligés.

Ces différentes simulations ont permis une nouvelle évaluation des niveaux côtiers pour différentes périodes de retour :

- pour les évènements Fréquents, les niveaux marins au rivage sont compris entre **+ 1,36 et + 1,92 m NGF/IGN69** avec une valeur moyenne de + 1,68 m NGF/IGN69 ;
- pour l'évènement Moyen Actuel, les niveaux marins au rivage sont compris entre **+ 1,61 et + 2,17 m NGF/IGN69** avec une valeur moyenne de + 1,94 m NGF/IGN69 ;
- pour l'évènement Extrême, les niveaux marins au rivage sont compris entre **+ 2,03 et + 2,70 m NGF/IGN69** avec une valeur moyenne de + 2,34 m NGF/IGN69 ;
- pour l'évènement Moyen 2100, les niveaux marins au rivage sont compris entre **+ 2,00 et + 2,51 m NGF/IGN69** avec une valeur moyenne de + 2,28 m NGF/IGN69.

À noter que pour les évènements Extrême et Moyen 2100, les niveaux marins au rivage sont similaires. Cette similitude se retrouve également en termes de surfaces inondées par ces deux évènements.

### 8.2.3. Simulations complémentaires

Des simulations complémentaires ont été réalisées pour étudier les conséquences en termes de submersion marine de défaillances d'ouvrages de défense contre la mer, défaillances qui peuvent se produire en divers points du territoire. Ces simulations réalisées dans un objectif de gestion des risques reprennent les forçages de l'évènement Moyen Actuel, et les localisations des défaillances ont été définies en concertation avec les acteurs locaux et en particulier le SYMADREM au niveau de zones potentielles de fragilité, et ceci dans le but d'évaluer l'impact de brèches sur les hauteurs d'eau et les surfaces inondées.

Ces simulations montrent l'utilité de disposer de simulations dynamiques qui permettent, d'intégrer l'effet de seuils topographiques et d'obstacles sur les écoulements, et ainsi de discriminer précisément les zones les plus exposées.

Enfin, une simulation avec prise en compte du futur tracé de la Digue à la Mer permet une première approche pour tester son efficacité pour protéger le territoire contre les submersions marines.

## 8.3. PERSPECTIVES

La chaîne de modélisation implantée pour représenter l'ensemble des processus hydrodynamiques comprend la modélisation des vagues, des niveaux d'eau, des vitesses des courants et de la submersion marine sur le territoire camarguais.

Cette stratégie a montré sa pertinence pour cartographier à haute-résolution (20 m de maille) les submersions marines sur un territoire étendu à la géographie complexe comme celui de la Camargue à l'altitude basse (70 % du territoire de Camargue est à une altitude inférieure à + 1 m NGF/IGN69), et avec des contraintes topographiques linéaires (digues et /ou routes comme points hauts).

Cette chaîne de modélisation est ainsi opérationnelle pour tester différentes configurations d'ouvrages de protection contre la mer en fonction des différentes stratégies définies par les acteurs locaux (SYMADREM, Conservatoire du Littoral), en lien avec les services de l'État et les collectivités.



## 9. Bibliographie

- Ardhuin F., E. Rogers, A. Babanin, J.-F. Filipot, R. Magne, A. Roland, A. van der Westhuysen, P. Queffelec, J.-M. Lefevre, L. Aouf, & F. Collard (2010).** Semi-empirical dissipation source functions for wind-wave models: part I, definition, calibration and validation. *J. Phys. Oceanogr.*, 40(9):1917–1941, 2010.
- Arnicol G., Le Traon P.Y., Ayoub N., & De Mey P. (1995).** Mean sea level and surface circulation variability of the Mediterranean Sea from 2 years of TOPEX/POSEIDON altimetry. *J. of Geophys. Res.*, 100(C12), 25, p. 163-25, 177.
- Brown J. D., Spencer T., and Moeller I. (2007)** - Modelling storm surge flooding of an urban area with particular reference to modelling uncertainties: a case study of Canvey Island, United Kingdom, *Water Resour. Res.*, 43, W06402, doi:10.1029/2005WR004597, 2007.
- Goutx D. et Ladreyt S. (2001)** - Hydraulique des cours d'eau. La théorie et sa mise en pratique, CETMEF (CEREMA) NR25.
- Bertin X., Li K., Roland A., and Bidlot J.R. (2015).** The contributions of short-waves in storm surges: two case studies in the Bay of Biscay. *Continental Shelf Research*, 96, 1-15.
- Booij N., Haagsma Ij.G., Holthuijsen L.H., Kieftenburg At.M.M, Ris R.C., Van Der Westhuysen A.J., & Zijlema M. (2004).** Swan Cycle III version 40.41, User's Manual, 115 p.
- Bouffard J., Vignudelli S., Herrmann M., Lyard F., Marsaleix P., Ménard Y & Cipollini P. (2008).** Comparison of Ocean Dynamics with a Regional Circulation Model and Improved Altimetry in the North-Western Mediterranean. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, Vol. 19, No. 1-2, p. 117-133, doi: 10.3319/TAO.2008.19.1-2.117(SA).
- Brodtkorb, P.A., Johannesson, P., Lindgren, G., Rychlik, I., Rydan, J. & Sjaaf, E. (2000).** "WAFO - a Matlab toolbox for analysis of random waves and loads", Proceedings of the 10th International Offshore and Polar Engineering conference, Seattle, Vol III, pp. 343-350.
- Bunya, S., Dietrich, J.C., Westerink, J.J., Ebersole, B.A., Smith, J.M., Atkinson, J.H., et al., (2010).** A high resolution coupled riverine flow, tide, wind, wind wave and storm surge model for southern Louisiana and Mississippi: Part I — model development and validation. *Monthly Weather Review* 138, 345–377.
- Bulteau T., Delvallee E., Thiebot J., Pedreros R. (2012).** Retour d'expérience sur l'utilisation des probabilités conjointes pour la caractérisation de niveaux marins à la côte. XII<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Cherbourg, 12-14 juin 2012, DOI:10.5150/jngccg.2012.001-B.
- Bulteau, T., Nicolae Lerma, A., et Lecacheux, S (2013).** Projet Climats de Houle – Phase 2 : Analyse des valeurs extrêmes de vagues le long de la côte Atlantique et en Manche. Rapport final. BRGM/RP-62730-FR, 49 p., 26 fig., 3 ann., Orléans.
- Chassain, R. (2010).** Pour un plan de gestion du littoral camarguais. Rapport de mission parlementaire, Ed. MEDDEM, 39 p. <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/104000651/index.shtml>
- Cheiron A. (Coord.), 2015.** Bilan annuel d'activités 2014. Société nationale de protection de la nature – Réserve Naturelle Nationale de Camargue. 151 p.
- CETE Méditerranée (2007).** Elaboration d'un Plan de Prévention des Risques Submersions marines en Camargue. Etat des lieux des données existantes. 81 p + Ann.

**CETE Méditerranée (2010).** Elaboration d'un Plan de Prévention des Risques Submersions marines en Camargue. Acquisition de données complémentaire. 21 p + Ann.

**CETMEF (2013).** Analyse statistique des niveaux d'eau extrêmes – Environnements maritime et estuarien.

**CETMEF (2012).** Fiches synthétiques de mesures des états de mer.

**CETMEF (2001).** Goutx et Ladreyt 2001, Hydraulique des cours d'eau. La théorie et sa mise en pratique

**CCE&C (2015).** Etudes diagnostic et avant-projet pour la réhabilitation des pertuis de la Comtesse et de la Gacholle. Plan Rhône – Pré Schéma su, ressuyage des terres inondées. Diagnostic, Rapport provisoire aout 2015. Client : SYMADREM, 60 p.

Circulaire du 16 juillet 2012 relative à la mise en œuvre de la phase « cartographie » de la directive européenne relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation. NOR : DEVP1228419C.

**DREAL LR et CETE (2013).** *Note de définition de l'événement extrême sur le bassin Rhône-Méditerranée.* Note technique DREAL Languedoc-Roussillon – CETE Méditerranée, 11 p.

**EGIS (2013).** Assistance à maîtrise d'ouvrage pour la réalisation d'aménagements hydrauliques dans le cadre d'un programme européen LIFE+ mc-SALT. Dossier de plans, 5 p.

**EurOtop (2016).** Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B., [www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com).

**Garcin M., Nicolae Lerma A., et Pedreros R. (2013).** Evaluation de la submersion marine maximale, Rapport BRGM/RP-62259-FR.

**Haigh, I. D., Nicholls, R., Wells, & N. (2010).** A comparison of the main methods for estimating probabilities of extreme still water levels, *Coast. Eng.*, 57, 838–849.

**HR Wallingford and Lancaster University (1998).** The Joint Probability of Waves and Water Levels : JOIN-SEA – A rigorous but practical new approach. Report SR537, November 1998 (Re-issued with minor amendments May 2000).

**Huseby, A.B., Vanem, E., & Natvig, B. (2013).** A new approach to environmental contours for ocean engineering applications based on direct Monte Carlo simulations, *Ocean Eng.*, 60, 124-135.

**Huseby, A.B., Vanem, E., & Natvig, B. (2015).** Alternative environmental contours for structural reliability analysis, *Structural Safety*, 54, 32-45.

**Idier D., Rohmer J., Bulteau T., & Delvallée, E. (2013).** Development of an inverse method for coastal risk management, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 999–1013.

**Lazure P., & Dumas F. (2007).** An external–internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in Water Resources*. doi:10.1016/j.advwatres.2007.06.010.

**Mazas, F., & Hamm, L. (2011).** A multi-distribution approach to POT methods for determining extreme wave heights, *Coast. Eng.*, 58, 385-394.

**MEDDE (2014).** Guide méthodologique : plan de prévention des risques littoraux. MEDDE/DGPR, 169 p.

**Nicolae Lerma, A., Bulteau, T., Lecacheux, S., & Idier, D. (2015).** Spatial variability of extreme wave height along the Atlantic and channel French coast, *Ocean Eng.*, 97, 175-185.

**Sabatier F., & Suanez .S. (2003).** Evolution of the Rhône delta coast since the end of the 19<sup>th</sup> century. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 47, 283-300.

**Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y.-T., Chuang, H.-Y., Juang, H.-M.H., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., Van Delst, P., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., Van Den Dool, H., Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J.-K., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C.-Z., Liu, Q., Chen, Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, R.W., Rutledge, G., Goldberg, M (2010).** The NCEP climate fore-cast system reanalysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 91, 1015-1057.

**SHOM (2014).** Références Altimétriques Maritimes, Ports de France métropolitaine et d'outre-mer, Edition 2014.

**SHOM (2016)** - Références Altimétriques Maritimes, Ports de France métropolitaine et d'outre-mer, Edition 2016.

**Stépanian A., Lecacheux S., Nicolae-Lerma A., et Pedreros R. (2014).** Evaluation des Risques Naturels Littoraux sur le territoire du SCoT Provence-Méditerranée – Caractérisation de l'aléa submersion marine. Rapport final. BRGM/RP-63949-FR, 119 p., 65 ill., 5 ann., 1 CD.

**Suzuki, T., Altomare, C., Verwaest, T., Trouw, K. and Zijlema, M. (2014).** Two-dimensional wave overtopping calculation over a dike in shallow foreshore by SWASH. *Proc. ICCE, ASCE*. Doi : <http://dx.doi.org/10.9753/icce.v34.structures.3>



## Annexe 1

### Analyse par probabilités conjointes - deuxième méthode

#### Contours environnementaux d'iso période de retour

Le contour environnemental (dénoté CE par la suite) d'iso période de retour  $T$  est un contour de l'espace délimitant une surface convexe  $B$  et tel qu'en chaque point du contour, l'espace  $B^+$  délimité par la tangente au contour et ne contenant pas la surface convexe, possède une période de retour  $T$  (Figure 122). Autrement dit, la probabilité qu'un couple  $(H_s, SWL)$  se situe dans l'espace  $B^+$  est :

$$P((H_s, SWL) \in B^+) = \frac{1}{\lambda T}$$

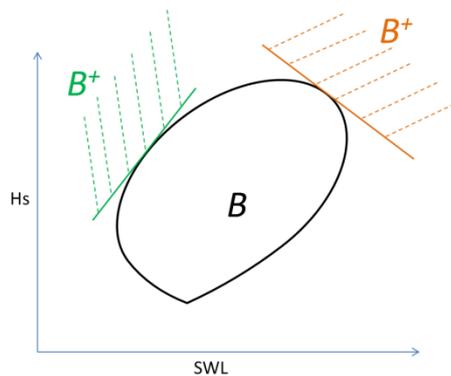


Figure 122 : Schéma explicatif d'un contour environnemental d'iso-période de retour.

L'idée fondatrice de la méthode des contours environnementaux réside dans l'approximation linéaire de la limite de la zone d'échec (l'espace  $B^+$ ). La zone d'échec se définit en relation avec la fonction de réponse (parfois appelée également fonction de structure). Dans notre cas, la fonction de réponse est le modèle de propagation hydrodynamique.

Une fois identifié le CE de période de retour centennale par exemple, il faut identifier quelle combinaison  $(H_s, SWL)$  du contour mène à la plus forte réponse. On procède alors de la même manière que pour les CDC (i.e. discrétisation du contour et propagation des combinaisons sélectionnées à l'aide d'un modèle hydrodynamique).

Les CE de période de retour 1 an, 10 ans et 100 ans ont été calculés par la méthode de Huseby *et al.* (2013, 2015). Les résultats sont représentés sur la Figure 123.

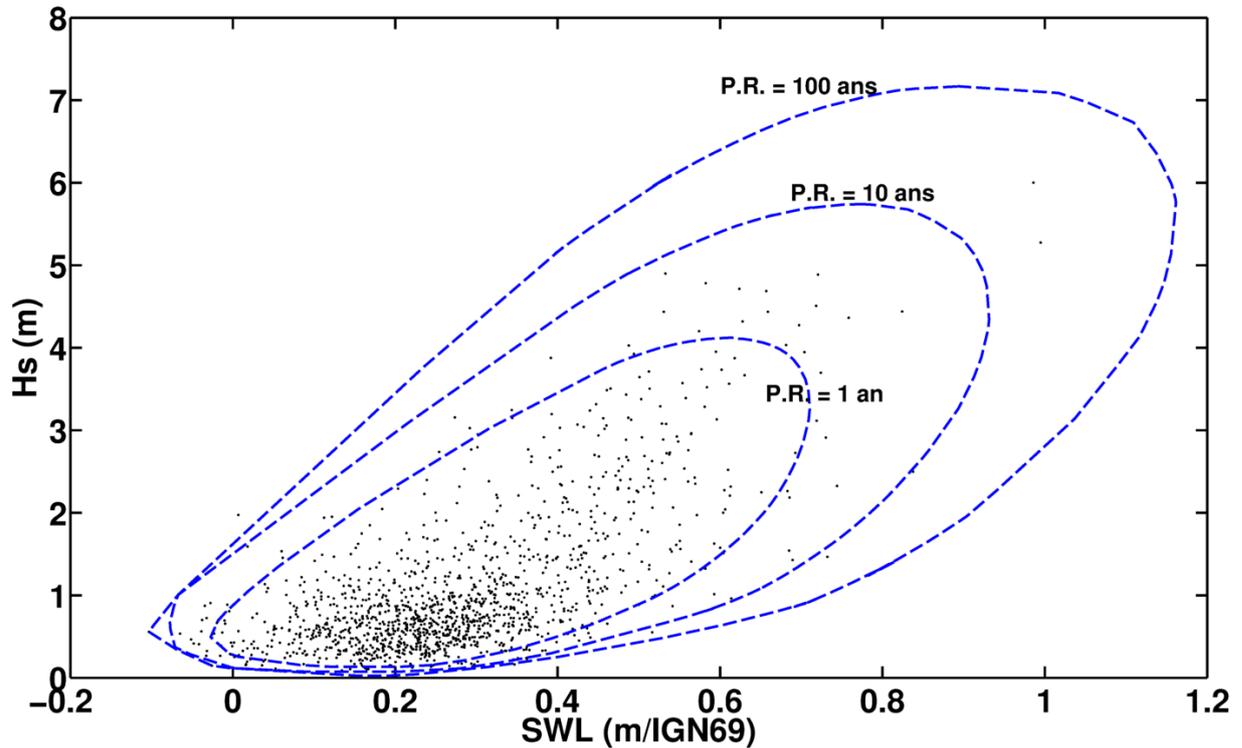


Figure 123 : Contours environnementaux pour les périodes de retour 1 an, 10 ans et 100 ans. Les points noirs représentent les données initiales (après sélection des évènements indépendants).

## Discussion

Il est important de souligner que la période de retour dans le cas multivarié n'a pas de définition unique. Celle-ci varie en fonction de la caractérisation de l'évènement conjoint. Dans le cas univarié, l'évènement est systématiquement caractérisé par  $X > x$  et rechercher la période de retour associée à la valeur  $x$  revient à calculer la probabilité de cet évènement. Dans le cas bivarié, l'évènement peut être caractérisé par  $X > x \cap Y > y$ , auquel cas la période de retour associée est la période de retour de dépassement conjoint (cf §3.3.1). Mais l'évènement peut tout aussi bien se caractériser par  $(H_s, SWL) \in B^+$  en utilisant les notations du §3.3.2, auquel cas la période de retour associée est la période de retour environnementale (cf §3.3.2). On pourrait utiliser d'autres définitions de l'évènement ce qui amènerait à des périodes de retour encore différentes. Il convient donc de s'interroger sur ce qu'on souhaite caractériser *in fine*.

Dans cette étude, l'objectif est de déterminer l'aléa submersion marine de période de retour centennale. Nous nous intéressons donc à caractériser ce qui se passe à terre alors que l'étude statistique en probabilités conjointes se fait au large à partir des séries temporelles des forçages marins (vagues et niveaux d'eau). Comme indiqué plus haut, la propagation à l'aide d'un modèle hydrodynamique des combinaisons issues de la discrétisation des CE ou CDC va nous permettre d'identifier la combinaison la plus impactante et d'associer la période de retour 100 ans à la submersion résultante. Cette association entre la période de retour de la combinaison de forçage et la submersion résultante est une approximation. Mais l'utilisation des deux types de résultat (CE et CDC) va nous permettre d'encadrer cette approximation.

En effet, les deux types de résultats (CE et CDC) sont complémentaires : alors que le CDC surestime la période de retour de la réponse (i.e. de l'aléa submersion dans notre cas), le CE

tend à la sous-estimer<sup>14</sup> (cf. Figure 12). On voit en effet sur le schéma de la Figure 12 que la probabilité de se situer dans la zone hachurée en rouge (zone de calcul pour les CDC) est plus faible que la probabilité de se situer dans la zone hachurée en bleu (zone d'échec, cf. § 3.3.2), elle-même plus faible que la probabilité de se situer dans la zone hachurée en vert (zone de calcul pour les CE). Ainsi, pour une période de retour fixée  $T$  de la combinaison  $(H_s, SWL)$ , la submersion maximale résultante du CDC de période de retour  $T$  aura une période de retour réelle probablement plus faible tandis que celle résultante du CE de période de retour  $T$  aura une période de retour probablement plus élevée.

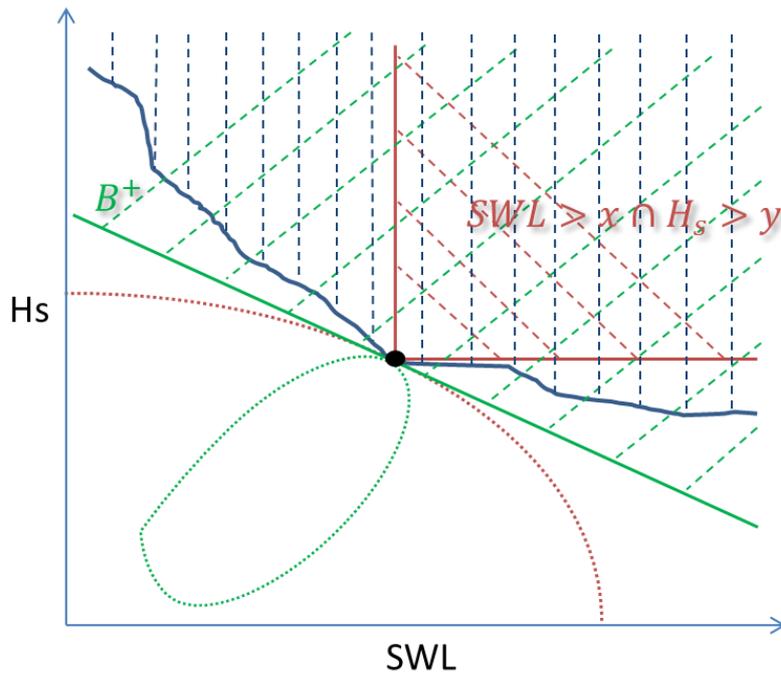


Figure 124 : Schéma explicatif des différences entre les 2 types de résultats (CE et CDC).

Sur la Figure 124, la courbe bleue est la courbe réelle d'iso « submersion », i.e. tous les couples  $(H_s, SWL)$  dans la zone hachurée en bleu mènent à un degré de submersion supérieur à celui identifié par la courbe bleue. La zone hachurée en bleu est donc la zone d'échec (cf. § 3.3.2). La zone hachurée en rouge est le domaine de calcul des dépassements conjoints (CDC). La zone hachurée en vert est le domaine de calcul des contours environnementaux (CE). Un CE est représenté en pointillés verts tandis qu'un CDC est représenté en pointillés rouges. Le point noir est la combinaison  $(H_s, SWL)$  située sur le CE ou le CDC la plus impactante en terme de submersion. La période de retour associée au CE est plus faible que celle du CDC.

<sup>14</sup> On fait en effet l'hypothèse que le contour délimitant la zone d'échec (courbe bleue sur la Figure 12) se situe toujours entre la droite verte et les deux droites rouges. Cette hypothèse est souvent vérifiée (voir par exemple Idier *et al.*, 2013).

**Résultats**

	N° combinaison				
	6	7	8	9	10
<b>Hs (m)</b>	7.13	6.98	6.73	6.36	5.75
<b>Tp (s)</b>	10.5	10.4	10.3	10.0	9.7
<b>Dp (°)</b>	125	125	125	125	125
<b>SWL (m) NGF/IGN69)</b>	0.96	1.05	1.11	1.14	1.16
<b>U (m/s)</b>	22.6	22.2	21.5	20.5	18.9
<b>Dir (°)</b>	125	125	125	125	125

*Tableau 23 : Combinaisons issues de la discrétisation du contour CE centennal (cf. Figure 11).*

## Annexe 2

### Dossier cartographique et données de modélisation

#### Cartographie numérique SIG

Afin de faciliter la diffusion des nombreux résultats des simulations, un projet SIG exploitable avec le logiciel QGIS a été créé. Il contient des dossiers cartographiques pour les événements et scénarios modélisés.

Chaque dossier contient des cartes au format **raster TIF** (grille régulière avec une résolution de 20 m x 20 m) en **RGF93 Lambert 93** :

- Hauteur d'eau (m) ;
- Altitude des surfaces en eau (cote NGF / NGF) ;
- Différences de hauteurs d'eau entre scénarios.

Un répertoire « annexes » contenant des fichiers au format shape (.shp) des éléments cartographiques de référence (tracé du trait de côte, de la digue à la mer, nouveau tracé de la digue à la mer), la localisation des points d'extraction des données et les palettes de couleurs utilisées pour la réalisation des cartes.

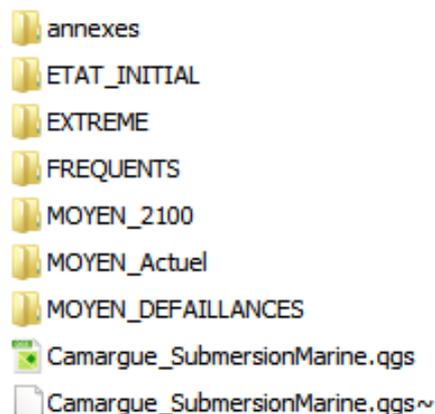


Figure 125 : Arborescence du projet SIG

Difference_Hmax_MOYEN_avec_sans_franchissementvaguesStesMaries_L93.tif	Image TIFF
Difference_Hmax_MOYEN_avec_sans_franchissementvaguesStesMaries_L93.tif.aux.xml	Document XML
Final_Camargue_AltitudeMaxPlanEauNGF_MOYEN_FranchissementVaguesStesMaries_L93.tif	Image TIFF
Final_Camargue_AltitudeMaxPlanEauNGF_MOYEN_FranchissementVaguesStesMaries_L93.tif.aux.xml	Document XML
Final_Camargue_HauteurMax_MOYEN_FranchissementVaguesStesMaries_L93.tif	Image TIFF
Final_Camargue_HauteurMax_MOYEN_FranchissementVaguesStesMaries_L93.tif.aux.xml	Document XML

Figure 126 : Exemple de raster « résultat de simulation ».

### Chroniques temporelles

Un fichier « Camargue.kmz » exploitable sur le logiciel GoogleEarth© permet de visualiser les séries temporelles des hauteurs d'eau, des niveaux marins et des altitudes du plan d'eau disponibles sur l'ensemble de l'emprise de la Camargue (Figure 127).

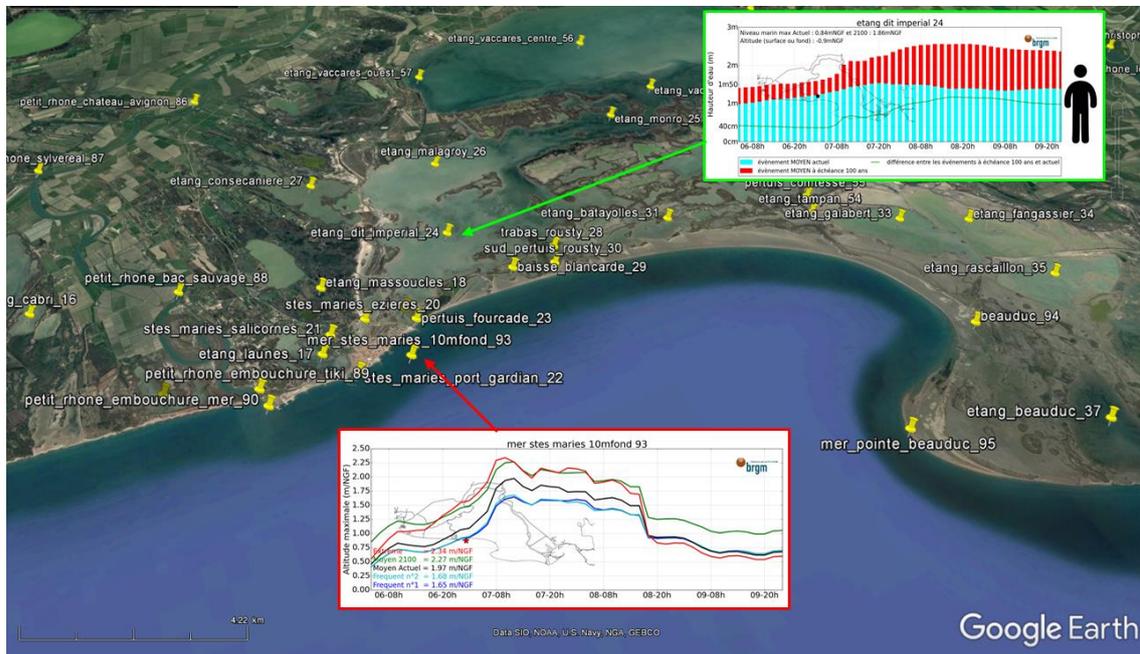


Figure 127 : Aperçu de la visualisation sous GoogleEarth© des chroniques s'affichant suite à un « clic » sur les punaises.

Une série de 99 points d'extraction de ces données temporelles est répartie sur l'ensemble de l'emprise. Les coordonnées des points sont dans répertoriées dans le tableau ci-dessous (Figure 128).

N°	Nom	longitude	latitude	Profondeur (m NGF)
1	baie_grau_du_roi_1	4.118945711	43.53083727	-7.05
2	port_camargue_2	4.128124187	43.51894403	-0.50
3	clos_repausset_levant_3	4.154172959	43.53710707	-0.50
4	etang_medard_4	4.148108209	43.54782159	-0.52
5	etang_ville_5	4.203193868	43.54992476	-0.50
6	etang_d_uroi_6	4.21096871	43.51935093	-0.22
7	etang_figuerasse_7	4.179697153	43.48585081	-0.23
8	etang_rolland_8	4.309032925	43.4866054	-0.50
9	clos_comete_9	4.244804042	43.46477683	-0.50
10	etang_fer_10	4.264305132	43.46362931	-0.50
11	clos_sanglier_11	4.265837343	43.48395763	-0.50
12	etang_brasol_12	4.293465797	43.50213448	-0.50
13	cuvette_lairan_13	4.285254247	43.54753552	-0.50
14	clos_pigeonnier_14	4.267592868	43.52414268	-0.50
15	etang_icard_15	4.372606837	43.45846439	-0.13
16	etang_cabri_16	4.341819215	43.49414469	-0.50
17	etang_launes_17	4.416312758	43.4548666	0.00
18	etang_massoucles_18	4.423287381	43.47423814	-0.65
19	trabas_jusiou_19	4.443606234	43.45995253	-0.16
20	stes_maries_ezieres_20	4.431450219	43.46070151	-0.09
21	stes_maries_salicornes_21	4.420512418	43.45950622	0.00
22	stes_maries_port_gardian_22	4.423627498	43.44671338	-3.59
23	pertuis_fourcade_23	4.445313824	43.45596428	-0.07
24	etang_dit_imperial_24	4.467118018	43.47916696	-6.55
25	etang_monro_25	4.545374659	43.50474584	-4.51
26	etang_malagroy_26	4.476209257	43.50535207	-7.43
27	etang_consecaniere_27	4.4336533	43.51056556	-8.55
28	trabas_rousty_28	4.495658855	43.46401582	-2.15
29	baisse_blancarde_29	4.479866358	43.46159881	-0.19
30	sud_pertuis_rousty_30	4.492748298	43.45892231	0.50
31	etang_batayolles_31	4.535210994	43.46100761	-0.18
32	etang_lion_32	4.569473738	43.47989128	-6.92
33	etang_galabert_33	4.603981635	43.43642632	-0.63
34	etang_fangassier_34	4.624272938	43.42898148	-0.42
35	etang_rascaillon_35	4.630644346	43.40597035	-0.46
36	etang_vaisseau_36	4.636928185	43.37718715	-0.26
37	etang_beauduc_37	4.602310649	43.37056297	-0.55
38	etang_ste_anne_38	4.653684255	43.35830309	-0.08
39	etang_galere_39	4.67473931	43.35303921	0.36
40	vieux_rhone_40	4.655810124	43.38969661	0.10
41	etang_faraman_41	4.694509119	43.37630098	0.10
42	etang_grande_palun_42	4.811383298	43.35122457	0.36
43	baisse_quenin_43	4.760931403	43.35771192	0.29
44	they_ste_ursule_44	4.78326086	43.35966749	0.18
45	baisses_st_genest_45	4.71749644	43.35638644	0.31
46	plage_piemanson_46	4.808623952	43.34127133	-0.89
47	plage_napoleon_47	4.873577256	43.34814162	0.83
48	etang_napoleon_48	4.866854106	43.35334694	0.36
49	chenal_golfe_fos_49	4.941128878	43.38986712	-24.17
50	port_st_louis_rhone_darse2_50	4.843679693	43.41549906	-17.08

N°	Nom	longitude	latitude	Profondeur (m NGF)
51	phare_st_gervais_51	4.937370349	43.42734616	-4.11
52	port_de_bouc_52	4.988246646	43.39996469	-12.21
53	port_st_louis_rhone_darse3_53	4.841995431	43.39859326	-11.64
54	etang_tampan_54	4.57980727	43.44767384	0.00
55	pertuis_comtesse_55	4.583413064	43.45327573	-0.06
56	etang_vaccares_centre_56	4.557492744	43.54152204	-18.26
57	etang_vaccares_ouest_57	4.489666028	43.54497417	-10.40
58	etang_vaccares_est_58	4.635906549	43.53655878	-10.70
59	etang_vaccares_sud_59	4.567814532	43.51196842	-6.92
60	rhone_fourques_60	4.616864939	43.70596592	-3.76
61	rhone_arles_61	4.625064051	43.6796795	-12.72
62	rhone_passerons_62	4.603074818	43.66479564	-5.41
63	rhone_fleurs_eau_63	4.599072974	43.65068637	-9.00
64	rhone_le_barret_64	4.611566123	43.63430983	-6.93
65	rhone_petit_plan_bourg_65	4.643063644	43.62371825	-7.09
66	rhone_azegat_66	4.657517867	43.60212776	-4.30
67	rhone_armelliere_67	4.682219842	43.57293623	-7.95
68	rhone_cazeau_68	4.716616148	43.54584843	-6.23
69	rhone_commanderie_69	4.736031492	43.51672849	-8.46
70	rhone_st_christophe_70	4.750670643	43.47101552	-8.23
71	rhone_louisiane_71	4.745536021	43.45264578	-8.57
72	rhone_ponsard_72	4.734174977	43.43354261	-9.86
73	rhone_bac_barcarin_73	4.743845005	43.42112569	-4.67
74	rhone_bois_francois_74	4.779087047	43.39620782	-8.39
75	rhone_tour_st_louis_75	4.802446116	43.38361942	-9.58
76	rhone_le_mazet_76	4.817447286	43.37539265	-8.12
77	rhone_sud_palissade_77	4.834393779	43.36049416	-6.05
78	rhone_argilas_78	4.834546813	43.34480778	-4.24
79	rhone_embouchure_79	4.845435097	43.33337318	-3.75
80	rhone_embouchure_mer_80	4.84995168	43.32674879	-2.82
81	petit_rhone_pont_suspendu_81	4.614732962	43.68947366	-3.00
82	petit_rhone_autoroute_82	4.531657095	43.7060208	-3.56
83	petit_rhone_st_gilles_83	4.453756023	43.66626897	-3.62
84	petit_rhone_albaron_84	4.474837892	43.60937932	-3.32
84	petit_rhone_albaron_85	4.474837892	43.60937932	-3.32
86	petit_rhone_chateau_avignon_86	4.407472333	43.56043132	-3.95
87	petit_rhone_sylveréal_87	4.350379377	43.54677852	-8.40
88	petit_rhone_bac_sauvage_88	4.383606169	43.48677636	-6.93
89	petit_rhone_embouchure_tiki_89	4.396984527	43.45127242	-4.16
90	petit_rhone_embouchure_mer_90	4.397883873	43.44619714	-5.24
91	mer_phare_espiguettes_91	4.128415588	43.48658976	-0.71
92	mer_embouchure_rhone_vif_92	4.230932905	43.46008759	-2.66
93	mer_stes_maries_10mfond_93	4.43921168	43.44648399	-10.14
94	beauduc_94	4.593954698	43.40220715	0.38
95	mer_pointe_beauduc_95	4.550972527	43.38577771	-0.91
96	mer_grau_dent_96	4.660014709	43.34504454	-5.92
97	grau_dent_97	4.660224295	43.34706953	-0.16
98	mer_la_courbe_98	4.705389141	43.34767772	-3.64
99	mer_offshore40mfond_99	4.409930986	43.31653024	-40.30

Figure 128 : Coordonnées des points d'extraction des séries temporelles d'inondation.



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009

45060 - Orléans Cedex 2 - France

Tél. : 02 38 64 34 34 - [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

**Direction régionale Provence-Alpes-Côte d'Azur**

117 avenue de Luminy  
BP.168

13276 - Marseille Cedex 9 - France

Tél. : 04 91 14 74 77