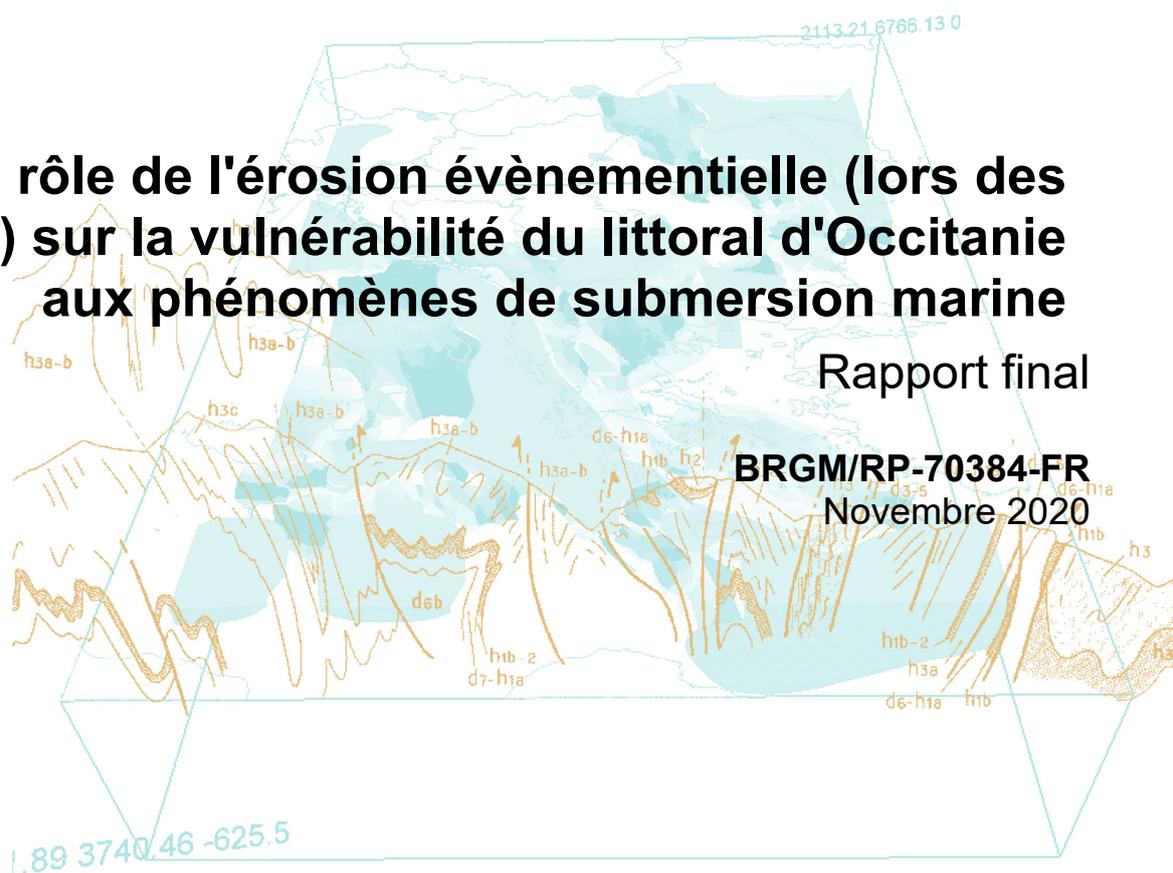


Étude du rôle de l'érosion événementielle (lors des tempêtes) sur la vulnérabilité du littoral d'Occitanie aux phénomènes de submersion marine

Rapport final

BRGM/RP-70384-FR
Novembre 2020



Étude du rôle de l'érosion événementielle (lors des tempêtes) sur la vulnérabilité du littoral d'Occitanie aux phénomènes de submersion marine

Rapport final

BRGM/RP-70384-FR
Novembre 2020

Étude réalisée dans le cadre des projets de service public du BRGM 2020
AP19MPL021

N. Valentini, Y. Balouin

Vérificateur :

Nom : Alexandre Nicolae Lerma

Fonction : Ingénieur Risques littoraux

Date : 01/02/2021

Signature :



Approbateur :

Nom : Ariane Blum

Fonction Responsable d'Unité

Date : 01/02/2021

Signature :



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

Mots clés : érosion événementielle, submersion marine, vulnérabilité régionale, Xbeach

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

Valentini N. et Balouin Y. (2020) – Amélioration des connaissances et sensibilisation à la vulnérabilité du littoral d’Occitanie - Étude du rôle de l’érosion événementielle sur la vulnérabilité du littoral aux phénomènes de submersion marine. BRGM/RP-70384-FR, 115 p.

© BRGM, 2020, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l’autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans l'objectif d'évaluer l'aléa de submersion marine sur le littoral de la région Occitanie, en prenant en compte la complexité des phénomènes hydrodynamiques et morphodynamiques, et la difficulté d'une approche intégrée, le Secrétariat Général pour les Affaires Régionales de la Préfecture de la région Occitanie et le BRGM ont décidé de réaliser une étude visant à investiguer le rôle de l'érosion événementielle sur la submersion marine. En effet, dans certaines circonstances, les événements tempétueux sur les environnements littoraux sableux déjà fragilisés par un déficit sédimentaire chronique, peuvent générer de fortes érosions du système plage-dune, accentuant les phénomènes de submersions marines et les dégâts matériels sur les aménagements et les infrastructures.

Pour analyser cette accentuation de l'aléa par l'érosion, un recensement des données disponibles sur la région a été effectué et une méthode d'estimation de la vulnérabilité des systèmes dunaires à une échelle régionale a été définie. Afin d'identifier les niveaux de vulnérabilité des systèmes dunaires, une analyse de classification et agrégation a été mise en place. Quatre principales classes de paramètres ont été prise en compte et assemblées pour construire un indice de vulnérabilité global. Ces classes incluent des variables liées à la résilience géomorphologique, à l'état de la végétation, à l'influence anthropique et l'influence marine. L'analyse des 81 secteurs a permis de définir deux grands groupes, et six clusters secondaires, répartis de manière hétérogène dans l'espace géographique. La production de cartes régionales de distribution de la vulnérabilité globale ou partielle a été réalisée et montre qu'à l'échelle régionale 35% des cordons littoraux ont une vulnérabilité globale élevée.

Après cette phase initiale du projet, la concertation avec le comité Littoral 21 (regroupant la DREAL et la Région Occitanie) a permis de recenser un certain nombre de sites d'études pertinents pour la réalisation de modélisation des effets de l'érosion sur la submersion marine. En s'appuyant sur l'indice régional de vulnérabilité et sur la disponibilité des données nécessaires à la phase de modélisation, les sites de Canet-en-Roussillon (Nord) et de Frontignan-plage ont été retenus pour la suite des analyses.

La méthode numérique choisie pour analyser les effets de l'érosion sur l'ampleur des submersions sur les deux secteurs d'étude est basée premièrement sur une évaluation des performances du modèle morphodynamique Xbeach, en 2D-H. Sa mise en place, faite en deux temps, a consisté d'abord en la calibration du modèle à l'aide de données disponibles lors d'un événement historique. Des tests de sensibilité aux paramètres de réglage ont été réalisés. Cette mise en place a permis d'identifier les processus conduisant à la submersion marine lors de ces événements. Dans un deuxième temps, la modélisation a été utilisée pour simuler un événement de tempête fictif de période de retour cinquantennale (sur les hauteurs de vagues) en prenant ou pas les effets de l'érosion sur les conditions hydrodynamiques et la submersion.

Les difficultés que soulèvent les méthodes et le travail préparatoire des données nécessaires pour la réalisation de la modélisation sont illustrées. Différentes sources de données ont été exploitées, parmi les informations issues de la base de données des tempêtes historiques, les données topobathymétriques, morphologiques, sédimentologiques et météo marines.

Deux scénarios, un par site d'étude, ont été mis en place pour reproduire les conditions hydrodynamiques et l'évolution morphologique des plages et qui ont permis de calibrer le paramétrage du modèle. Il s'agit de la tempête Gloria (janvier 2020) pour Canet-en-Roussillon, et les tempête d'Octobre 2016 pour Frontignan-plage.

Les résultats des simulations de l'événement fictif cinquantennal mettent en évidence l'importance de phénomènes d'érosion sur l'ampleur de la submersion marine. Des évolutions morphologiques fortes sont simulées (érosion du front dunaire, formation de brèches), accentuant la submersion par franchissements de paquets de mer sur les deux sites d'étude. La submersion calculée, pour le scénario qui inclue les évolutions morphodynamiques durant la tempête, entraîne le doublement des surfaces submergées, sur le secteur de Frontignan-plage. Pour la plage du Sardinal, à Canet-en-Roussillon Nord, en liaison avec l'embouchure de la Têt, les surfaces peuvent être multipliées par 7 à 8 fois. Les effets de la formation de brèches, qu'on a pu simuler, dans un contexte du cordon dunaire très urbanisé et fragilisé de Frontignan ont permis d'évaluer les impacts considérables sur les franchissements et sur les dépôts de sédiments en arrière-dune par franchissements.

Une analyse de sensibilité sur les différences d'impacts en fonction de directions de provenance des vagues a été illustrée. Les limites du modèle et des méthodes ont été enfin discutées.

Un visualisateur pédagogique a été réalisé pour sensibiliser les acteurs du littoral à cette accentuation potentielle de la submersion lors des tempêtes les plus énergétiques.

Sommaire

1. Introduction	15
1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS	15
1.2. EFFETS DE L'ÉROSION SUR LA SUBMERSION MARINE	15
2. Recensement des données disponibles et méthodes utilisées	20
2.1. LOCALISATION ET CARACTERISTIQUES GEOMORPHOLOGIQUES DU LITTORAL 20	
2.1.1. Contexte climatique.....	20
2.1.2. Impacts morphologiques liés aux tempêtes et sensibilité à la submersion	20
2.2. DONNEES UTILISEES	23
2.2.1. Données météo-marines.....	23
2.2.2. Données issues de la BD-Tempêtes.....	24
2.2.3. Données topographiques et bathymétriques	24
2.2.4. Données issues des études stratégiques sur les risques littoraux.....	25
2.2.5. Données sédimentologiques.....	26
2.3. STRATEGIES UTILISEES POUR LA DETERMINATION DE LA VULNERABILITE A L'ÉROSION ET LA SIMULATION DES PROCESSUS D'ÉROSION ET DE SUBMERSION	26
2.3.1. Estimation de la vulnérabilité à l'échelle régionale.....	26
2.3.2. Simulation des phénomènes.....	27
3. Analyse de vulnérabilité aux phénomènes d'érosion événementielle à l'échelle régionale	30
3.1. INDICE DE VULNERABILITE DES SYSTEMES DUNE-PLAGE	30
3.1.1. Variables considérées.....	31
3.1.2. Analyse des données.....	34
3.1.3. Discussions sur la méthodologie des calculs de vulnérabilité.....	37
3.2. DONNEES ET ANALYSES POST-TEMPETE	44
3.3. CHOIX DES SITES A MODELISER ET LEUR DESCRIPTION	49
3.3.1. Canet Nord.....	49
3.3.2. Le Lido de Frontignan	55
4. Architecture et mise en place de la modélisation.....	59
4.1. CAS DE CANET NORD	59
4.1.1. Données topobathymétriques et traitements nécessaires pour la modélisation	

4.1.2. Hydrodynamique	68
4.1.3. Grille du modèle et emprise.....	72
4.2. CAS DE FRONTIGNAN – MODELISATION	73
4.2.1. Données topobathymétriques et traitements nécessaires pour la modélisation 75	
4.2.2. Hydrodynamique	77
4.2.3. Grille du modèle et emprises.....	78
5. Résultats de la modélisation et discussions.....	80
5.1. PHASE DE VALIDATION DES MODELES	80
5.1.1. Canet Nord : Calibration de XBeach pendant la tempête Gloria	80
5.1.2. Frontignan : Calibration pendant la tempête 2016	90
5.2. SCENARIO D'UN EVENEMENT DE TYPE CINQUANTENNAL.....	96
5.2.1. Canet Nord : scénario cinquantennal	97
5.2.2. Frontignan : scénario cinquantennal	103
5.3. DISCUSSION ET LIMITES.....	109
5.3.1. Sensibilité des risques induits par les tempêtes au changement de direction des tempêtes.....	110
5.3.2. Limites et recommandations de la modélisation.....	114
6. Conclusion.....	116
7. Bibliographie	118

Liste des figures

Figure 1. Définition des paramètres utilisés pour évaluer l'échelle d'impact des tempêtes de Sallenger (2000). Modifié d'après Stockdon et al. (2006). La ligne pointillée représente l'excursion maximale de l'impact de la tempête (runup R_2) par rapport au niveau de setup des vagues (ligne continue).	17
Figure 2. Illustrations schématiques des systèmes dunaires sous les quatre régimes de tempête de Sallenger (2000). Les conditions topographiques et hydrologiques nécessaires pour entrer dans ces régimes ainsi que les principaux impacts impliqués par chacun d'eux sont résumés. R_{low} , R_{High} , D_{low} , D_{High} se réfèrent aux paramètres définis dans la Fig. 1. (d'après Goslin et Clemmensen, 2017)	19
Figure 4. Submersion à Frontignan, lors de la tempête de 1997 (à haut) Submersions historiques : Zones submergées lors des tempêtes de 1997 et 2003 (observations SMNLR).22	
Figure 3. Érosion du cordon dunaire lors de la tempête de décembre 2003 (à gauche); franchissement sur le lido à l'Est d'Agde lors de la tempête de décembre 2002 (à droite); submersion marine sur le lido de Sète à Marseillan lors de la tempête de novembre 1982 (en bas). Après Balouin et al., 2011.	23
Figure 5. Description générale des processus de vagues pertinents. Source : XBeach manual (2018).....	29
Figure 6 Discrétisation de la variable CRETE_MAX, hauteur maximale des crêtes des cordons, dans les quatre principales classes de vulnérabilité, de 0 (zéro vulnérabilité) à 3 (plus haute vulnérabilité).....	31
Figure 7. Définition schématique avec illustration des trois habitats dunaires sélectionnés, d'après EID Méditerranée (2015).	32
Figure 8. Planimétrie large du Golfe du Lion couvrant tous les secteurs analysés dans la région. Zoom en exemple de la zone de Sainte-Marie et Canet-en-Roussillon, dans le Roussillon. La couche BDS_cordons est présentée sous forme de buffer des secteurs, pour favoriser la lecture. La couche des transects Nmax_Run50 issue de la base des données des études stratégiques est visualisée. Les maximales sont prises en compte pour chaque secteur.....	37
Figure 9. Dendrogramme généré par la classification hiérarchique basée sur la distance euclidienne de 84 sites. Deux grands groupes sont distingués (Z_1 et Z_2), et 6 autres petits clusters sont générés (couleurs différentes). Exemples d'abréviations : conditions géomorphologiques du système plage dunaire (GCD), conditions de la végétation (VC), l'effet anthropique (AE) et l'influence marine (MI).	39
Figure 10. Cartographie de l'indice de vulnérabilité partiel, donné par les conditions géomorphologiques du système plage dunaire (GCD), à l'échelle régionale. ...	43
Figure 11. Exemples d'impacts de la tempête du 28 février au 2 mars 2018 sur différents secteurs de l'ObsCat. Source: Palvadeau et al., 2018.....	45
Figure 12. Exemples d'impacts de la tempête Gloria du 20 au 24 janvier 2020 sur différents secteurs du Roussillon.....	47
Figure 13 Exemples d'interprétation sismique de la base et du toit de l'USU. Notons la présence d'un multiple, marque ici en pointillés. (B) - Schéma de détermination du volume de l'USU en m^3 par mètre linéaire (m^3/ml). Source : Raynal et al., 2015.	51
Figure 14. La cellule hydro-sédimentaire n.7 de l'ObsCat est présentée (en haut). Les secteurs, de la cellule 7, suivis par l'ObsCat, à proximité géographique de la zone du site d'étude de Canet nord (rouge) sont aussi montrés (en bas). Le TdC de référence, daté 2017 est présenté. L'orthophoto de la dernière campagne de l'ObsCat, datée d'octobre 2020, est superposée au fond de carte.	52

Figure 15. Carte du volume de l'USU par profil. Cette carte présente les résultats, profil par profil, à l'échelle du Roussillon, secteur de Canet. Source : Raynal et al., 2015.	53
Figure 16. (a) Carte des traits de côte entre octobre 2013 et avril 2019 pour le secteur de Canet Nord. (b) Bilans sédimentaires cumulés zone complète (topobathymétrie) et zone émergée entre octobre 2013 et avril 2019 pour le secteur. Source : Christmann et al., 2017.	54
Figure 17. Localisation du site d'étude de Frontignan, de l'houlographe et le marégraphe de Sète. Le TdC de référence, daté 2017 est présenté.	55
Figure 18. Morphologie des barres d'avant-côte (A), profils bathymétriques en bleu (D) et roses de houles (C) pour le secteur de Frontignan. D'après Kulling, B. (2017).	56
Figure 19. A gauche, date de construction des épis et principaux directions de la dérive littoral. A droite la localisation des travaux récents sur le lido de Frontignan. Source : Artelia (2013) et Sabatier et al. (2009).	57
Figure 20. Carte du volume de l'USU par profil. Cette carte présente les résultats, profil par profil, à l'échelle du Languedoc, secteur de Frontignan. Source : Raynal et al., 2015. .	57
Figure 21. Tempête Gloria. Enregistrements de la bouée de Banyuls.	60
Figure 22. Différentiel entre DSM Post-tempete Gloria et DSM Autumn 2019 montré dans le secteur de Canet Nord. Variations altimétriques sur les profils, de 1 à 6, du Sud au Nord, le long du secteur.	62
Figure 23. Carte du secteur, avec une superposition des points des prises de vue des photos. Photos des Impacts de la Tempete Gloria. (a) et (d) Prise de vue sur Phare - Nord. (b) et (c) Prise de vue sur Phare - Sud, respectivement. Source : http://fichetempete.brgm.fr/pages/observation.jsf?oid=46009	63
Figure 24. Zone d'étude de Canet Nord. Au milieu, nuage de points Sol non filtrés dans le logiciel Cloud Compare. A droite, (a) Nuage des points Sol filtré par l'algorithme CSF (b) Points représentatif des zones plus hautes du terrain, supprimées par l'algorithme.	65
Figure 25. Illustration des sources des données intégrées au Litto3D, représentant respectivement la (a). Bathymétrie de la partie au nord de la digue ; (b) Bathymétrie de l'embouchure de la Têt et (3) Topographie du système dune-plage.	65
Figure 26. Illustration de la méthode d'intégration du bâti de la BD Topo de l'IGN, pour la modélisation à haute résolution. En haut à gauche, levé Lidar, à droite couche bâti de la BD Topo, et en bas réintégration du bâti sur le sol « nettoyé ».	67
Figure 27. Emprise du modèle numérique SWAN utilisé, superposé à la hauteur significative moyenne des vagues sur une période de 3 heures, issue du modèle des vagues MARC i.e. pour le 20/01/2020 09:00 TU. La bouée de Canet utilisée pour valider le modèle est localisée, ainsi que les deux points de sortie du modèle MARC. En bas les sorties de SWAN, en termes de hauteur significative et périodes de pic, et de direction de pic, sont comparées à la bouée de Canet durant la tempête Gloria.	69
Figure 28. Conditions de vent à Perpignan, données issues de la station météorologique et utilisées lors des simulations. Les heures sont en UTC. Source : Météociel, Meteo France.	70
Figure 29. Données disponibles du marégraphe de Port-la-Nouvelle, utilisées comme conditions de niveau pour les simulations en Swan et XBeach.	71
Figure 30. À gauche débits journaliers moyens (m ³ /s) des fleuves Têt (station partielle à Perpignan), Agly (Station Rivesaltes) et le Tech au Bouclu, depuis Janvier 2013. À droite, données disponibles de débit horaires pendant la tempête Gloria a la Têt, utilisées comme conditions de décharge pour les simulations en XBeach. Les heures sont en UTC. Source des données : SPC Méditerranée Ouest.	71

Figure 31. Grille topobathymétrique de calcul sur fond de Google Map. En bas, les résolutions spatiales, selon la direction parallèle (alongshore) et perpendiculaire (cross-shore), sont montrées.	73
Figure 32. Tempête d'octobre 2016. Enregistrements de la bouée de Sète.....	74
Figure 33. Carte du secteur de Frontignan, à gauche, avec une superposition des emplacements des prises de vue des photos. Photos des Impacts de la Tempête d'octobre 2016. (a), (b) et (c) Plage Frontignan Est, quartier du Grau (point 3 en rouge). (d) Prise de vue de l'avenue Ferdinand de Lesseps, coté l'étang d'Ingril (partie sud, point 2 en jaune). (e) et (f) Cordon de galets à Frontignan Est (point 1 en vert). Sources : http://fichetempete.brgm.fr/pages/observation.jsf?oid=45886 et www.francetvinfo.fr	75
Figure 34. Secteur de Frontignan. Sur l'arrière-plan le MNT utilisé comme base topobathymétrique, composé par Litto3d+Lidar2009. Les singularités hydrauliques sont montrées, ainsi que les couches bâties, ouvrages statiques, roches, front urbain non érodable, inclus dans le MNT final.	77
Figure 35. Données disponibles du marégraphe de Sète, utilisées comme conditions de niveau pour les simulations en XBeach. En bas, les conditions de vent à Sète, données issues de la station météorologique. Les heures sont en UTC. Source : Météociel, Meteo France, Data Shom.	78
Figure 36. Grille de calcul générée avec l'outil Delft3D-RGFGRID, superposée à l'isoligne 0 m NGF. En bas, les résolutions spatiales, selon les directions parallèle et perpendiculaire a la cote.....	79
Figure 37. Validation de XBeach avec les mesures du MNS post tempête des changements morphologiques apparus. Indicateurs de performance morphologique calculée : BSS (gauche), biais relatif (au milieu) et 'index de scattering (Scatter Index, à droite), tous calculés sur une fenêtre mobile de 6x6 mailles dans la zone d'intérêt.	85
Figure 38. MNS calculé, sorti de XBeach à l'heure zéro de la simulation. Comparaison entre les profils de plage mesures après-tempête et calculés avec XBeach à la fin de la tempête. Performance BSS et Biais moyennés sur les profils.	86
Figure 39. MNS post-tempête dans la zone de l'embouchure de la Têt (à gauche), résultat de l'évolution de l'embouchure calculé par XBeach à la fin de la simulation.	87
Figure 40. Courants simulés, moyennés sur la profondeur. Les sorties de XBeach à un pas de temps de 1 hr sont utilisé pour faire la moyenne des vitesses des courants (moyennées sur la verticale) pendant quatre principales périodes de la simulation, à partir du début de la simulation et du haut vers le bas : P1 (1-7 heure) , P2 (32-38 heures), P3 (80-85 heures), P4 (100-106 heures).....	90
Figure 41. Carte bathymétrique du secteur de Frontignan. Les profils utilisés pour l'évaluation des évolutions morphologiques sont montrés. Trois points d'extraction du jet de rive calculé par le modèle sont présentés sur carte, ainsi que le point où une estimation a été faite de débordement par l'étang. Au milieu, les séries temporelles du jet de rive calculées sur les trois points sont montrées, avec leurs valeurs maximales. Pour l'exhaustivité, le niveau d'eau et hauteur Hs sont présentés. En bas, la série temporelle de la hauteur d'eau sur le point d'estimation, coté étang, est présentée.	91
Figure 42. Cartographie des submersions lors de la tempête d'octobre 2016 (au pic). Trois zones ont été définies, Frontignan, au sud du port (Zo-A), du nord du port jusqu'au camping Les Tamaris (Zo-B), enfin la partie plus naturelle, jusqu'à la plage des Arésquières (Zo-C). La série temporelle des volumes de submersion calculés par franchissements et débordements des étangs est présentée.	93
Figure 43. Comparaison visuelle entre les profils de plage calculés avec XBeach au début et à la fin de la tempête simulée.	94

Figure 44. Carte d'érosion/accrétion des sédiments cumulative dans la zone Zo-C, calculée avec XBeach à la fin de la tempête d'octobre 2016.....	95
Figure 45. Cinétique de la tempête, durée de 72 heures, avec une condition de pic instaurée pour 12 h. Scénario avec période de retour 50 ans.....	96
Figure 46. Simulation de l'érosion/accrétion cumulée pour le scénario S_{c0_m1} . a) 2h avant le pic de l'évènement (t_0+29h), c) au pic central de l'évènement (t_0+36h), c) a la fin de l'évènement (t_0+73h).....	99
Figure 47. Comparaison entre les profils de plage (jusqu'à -1 m NGF) à l'heure zéro (t_0) de la simulation et à la fin de la tempête, calculés avec XBeach.....	100
Figure 48. Variation des volumes d'érosion/accrétion cumulés calculée pour le scénario S_{c0_m1} au cours du temps et pour les trois zones investiguées. À droite, la variation des volumes de recouvrements (overwash) de sédiments calculés pour le même scénario en fonction du temps de simulation, le seuil de 0.02 m est utilisé pour exploiter les séries chronologiques.....	100
Figure 49. Simulation des submersions pour le scénario S_{c0_m1} . a) 2h avant le pic de l'évènement (t_0+29h), b) au pic de l'évènement (t_0+36h), c) 10h après le pic (t_0+46h). Les conditions marines associées à chaque situation sont présentées dans le Tableau 4. En bas, la variation des surfaces de submersion calculée par XBeach pour les deux scénarios S_{c0_m1} et S_{c0_mo} , au cours du temps et pour les trois zones investiguées. L'axe Y est logarithmique.	102
Figure 50. Comparaison entre les profils de plage (jusqu'à -2 m NGF) à l'heure zéro (t_0) de la simulation et à la fin de la tempête, calculés avec XBeach.....	105
Figure 51. Simulation de l'érosion/accrétion pour le scénario S_{f0_m1} , au pic de la tempête (t_0+36h). a) Zo-A, b) Zo-B, c) Zo-C.	106
Figure 52. Variation des volumes d'érosion/ accrétion cumulés calculée pour le scénario S_{f0_m1} au cours du temps et pour les trois zones investiguées. À droite, la variation des volumes de recouvrements (overwash) de sédiments calculés pour le même scénario en fonction du temps de simulation et pour les trois zones. Le seuil de 0.01 m est utilisé pour exploiter les séries chronologiques.	107
Figure 53. Simulation des submersions pour le scénario S_{f0_m1} au pic de la submersion (t_0+42h), pour les trois différent zones a) Zo-A, b) Zo-B et c) Zo-C. En bas, la variation des surfaces de submersion calculée en XBeach pour les deux scénarios S_{f0_m1} et S_{f0_mo} , au cours du temps. Le seuil utilisé pour les calculs est de 0.02m.....	109
Figure 54. Rose des vagues à la bouée de Leucate : houles moyennées sur 7 années d'observations. Source des données : CANDHIS (Cerema-DREAL Occitanie).111	
Figure 55. Rose des vagues à la bouée de Sète: houles moyennées sur 7 années d'observations. Source des données : CANDHIS (Cerema-DREAL Occitanie).....	113

Liste des tableaux

Tableau 1. Variables prises en compte dans la procédure de classification de la vulnérabilité des systèmes dune-plages. Classes de vulnérabilité de chaque variable varie de 0 (absence de vulnérabilité) à 3 (très grande vulnérabilité).	33
Tableau 2. Valeurs moyennes (\pm écart type) des indices de vulnérabilité partielle et globale des systèmes plage-dune méditerranéenne (MDVI) calculées pour chaque groupe (cluster) défini par l'analyse de classification hiérarchique.....	36

Tableau 3. Paramètres de calibrage. Gamme de valeurs testées et configuration finale des paramètres.....	82
Tableau 4. Conditions au large associées aux illustrations lors de l'événement de type cinquantennal.....	99
Tableau 5. Canet Nord : Résultats des volumes de recouvrements et submersion maximale au cours de l'évènement pour les tests de sensibilité sur les directions de tempête.....	112
Tableau 6. Frontignan : Résultats des volumes de recouvrements et submersion maximale au cours de l'évènement pour les tests de sensibilité sur les directions de tempête.....	113
Tableau 9. Tableau de secteurs étudiés et valeurs des indices de vulnérabilités partielles et global.....	122

1. Introduction

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Le littoral d'Occitanie est un littoral de basses plaines particulièrement exposé aux aléas côtiers d'érosion et de submersion marine. Chaque année, le littoral du Golfe du Lion est soumis à plusieurs épisodes de tempêtes marines, qui génèrent des impacts plus ou moins importants sur la côte (Balouin, 2019). La caractérisation de ces phénomènes a fait l'objet de plusieurs études visant à améliorer la connaissance de la submersion marine et de sa cinétique, l'anticipation des impacts attendus, et la capitalisation des informations disponibles en appui à la gestion de crise. On peut citer par exemple l'Atlas des zones inondables par submersion marines de la DREAL, la caractérisation de la submersion marine (Balouin et Belon, 2012), la dynamique et cinétique de submersion (Pedreros et al., 2016, Nicolae-Lerma et al., 2017)

Le rôle de l'érosion côtière événementielle reste toutefois peu abordé dans ces démarches et l'effet potentiellement aggravant des phénomènes tels que les franchissements, les brèches ou le potentiel de résistance d'un cordon dunaire sont rarement pris en compte dans l'analyse de vulnérabilité du littoral aux submersions.

La quasi-totalité des outils de prévision de la submersion simule des inondations sur des fonds fixes, sous-estimant potentiellement le risque encouru lors des tempêtes.

L'objectif de cette étude, initiée en octobre 2019, à l'initiative de la préfecture Occitanie et du BRGM, vise à améliorer la connaissance des effets de l'érosion événementielle sur les phénomènes de submersion marine lors des tempêtes et à produire des outils de sensibilisation à ces phénomènes par le biais de :

- L'identification des secteurs concernés par ces effets aggravants ;
- La démonstration de ces effets sur deux secteurs pilotes.

Cette étude s'organise de la manière suivante. Après un court rappel des régimes des impacts qui peuvent caractériser les événements de tempête, le rapport présente un inventaire des données disponibles sur le littoral de la région. Une analyse à l'échelle régionale est amenée pour définir la vulnérabilité morphologique afin de regrouper les secteurs aux caractéristiques morphologiques, d'exposition aux conditions de forçages et aux vulnérabilités similaires. A l'échelle locale, les caractéristiques des deux sites d'étude où les simulations ont pu être réalisées sont présentées. Puis les caractéristiques des événements météo-marins utilisés comme scénarios de modélisation sont détaillées, on présente ensuite l'architecture de la modélisation mise en place avec les données et les étapes de préparation pour la réalisation d'une modélisation adaptée aux effets de l'érosion sur la submersion marine. Enfin, les résultats pour les scénarios envisagés précèdent une discussion sur les limites associées.

1.2. EFFETS DE L'EROSION SUR LA SUBMERSION MARINE

Pendant les tempêtes, les plages, les dunes et les zones d'arrière-dune évoluent sous l'action de processus hydrodynamiques plus intenses. Ces processus météo-marins, les vagues, le vent, la pluie, la marée et la pression atmosphérique, agissent directement et/ou indirectement, de

manière combinée ou pas, sur la morphologie des dunes littorales en influençant le transport sédimentaire.

Les vagues jouent un rôle très important dans les processus à l'origine de l'érosion événementielle et des submersions. En plus des ondes gravitaires, on peut distinguer les infra-gravitaires : phénomènes liés à l'organisation des houles venant du large sous forme de groupes d'ondes, dont la période est plus importante. Au niveau du haut de plage, ce phénomène se matérialise notamment dans le jet de rive (Stockdon et al., 2006), par l'apparition régulière (dans l'espace et le temps) d'ondes plus fortes, capables d'une excursion sur la plage beaucoup plus importante que la moyenne des autres vagues. La combinaison d'une surcote et d'un maximum d'énergie dans les ondes infra-gravitaires peut permettre la montée du jet de rive sur la dune, favoriser les fortes érosions et les débordements par paquet de mer (Desmazes et al., 2014). Dans ce rapport, on utilisera plusieurs paramètres descriptifs des caractéristiques des vagues et ces abréviations, communément utilisées dans les études sur les risques côtiers, sont ici employés :

- **H_s (m)** : Hauteur significative des vagues exprimée en mètres, correspondant à la moyenne du tiers des plus fortes vagues. Cette mesure statistique de la hauteur des vagues est le paramètre conventionnellement utilisé pour les études en océanographie littorale, notamment les études de submersion ou d'érosion, mesurée en mètres;
- **T_p (s)** : Période de pic des vagues, qui correspond à la durée entre deux crêtes de vagues dominantes, c'est-à-dire pour laquelle la densité spectrale est maximale, mesuré en secondes;
- **L_o (m)** : Longueur d'onde des vagues, correspondant à la distance séparant deux crêtes ou deux creux successifs de vagues, en mètres;
- **D_p (°)** : Direction pic de provenance des vagues correspondant à la direction en degrés au moment du maximum d'énergie spectral. L'angle est compté positivement, suivant le sens horaire par rapport au Nord géographique (convention nautique).

Une brève présentation des méthodologies utilisées pour caractériser les risques associés aux événements extrêmes de tempête est donnée ci-après. La description détaillée de tous les paramètres contrôlant les impacts des vagues de tempête sur les plages et les systèmes dunaires ne rentre pas dans le cadre de cette étude et le lecteur est invité à se référer aux études de Masselink et van Heteren (2014), Desmazes et al. (2014), et Donnelly et al. (2006) pour des synthèses plus complètes et détaillées. De manière schématique, pour un événement donné, le type d'impacts morphologiques subit par une dune côtière dépendra de la hauteur du pied et de la crête de la dune par rapport à l'élévation maximale atteinte par le niveau d'eau (Sallenger, 2000).

Le niveau des eaux de tempête qui est ici pris en compte est la somme de la marée astronomique, de la surcote, du setup¹ η et jet de rive (run-up, R_2) des vagues (Figure 1, Stockdon et al., 2006).

¹ Le terme anglais setup fait référence à la surélévation du niveau marin à la côte sous l'effet du déferlement des vagues.

Sallenger, (2000) propose une échelle des impacts érosifs des tempêtes (*Storm Impact Scale*) sur les cordons dunaires littoraux (Figure 1). Cette échelle d'évaluation a l'avantage de prendre en compte à la fois le niveau d'eau et la morphologie des dunes. Elle met en avant le fait qu'une même tempête n'aura pas le même impact érosif et potentiellement le même niveau de submersion selon le type de cordon dunaire préexistant. Deux types d'environnements sont pris en exemple par l'auteur : un secteur de dunes bien établies (Duck, Caroline du Nord), et une autre zone d'îles sableuses très basses (Iles Dernières, Louisiane), formées de cordons sableux aisément submersibles, plus ou moins comparables à certains secteurs situés en Occitanie (Desmazes et al., 2014).

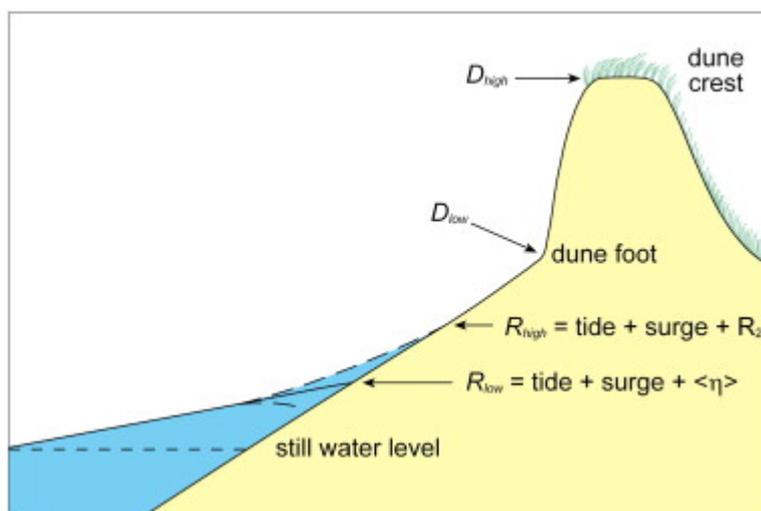


Figure 1. Définition des paramètres utilisés pour évaluer l'échelle d'impact des tempêtes de Sallenger (2000). Modifié d'après Stockdon et al. (2006). La ligne pointillée représente l'excursion maximale de l'impact de la tempête (runup R_2) par rapport au niveau de setup des vagues (ligne continue).

Dans Sallenger (2000), les types d'impacts causés par les vagues de tempête sur une barrière peuvent se répartir en quatre régimes principaux (Figure 2), chacun d'entre eux pouvant favoriser soit l'érosion soit le dépôt. Ces quatre régimes ont récemment été décrits en détail par Masselink et van Heteren (2014):

- (i) Le "régime du jet de rive" (swash regime, Fig. 2a) est caractérisé par une élévation du jet de rive restant en dessous de l'élévation du pied de la dune. Cela implique que les processus induits par la tempête soient confinés au domaine de la plage (inférieur au pied de dune). Il provoque généralement une érosion du profil de la plage mais peut également favoriser la mise en place de bermes sur le haut de plage.
- (ii)
- (iii) Le "régime de collision" (Figure 2b) se produit lorsque le jet de rive atteint le pied de la dune. Une conséquence typique du régime de collision est que l'action des vagues et des courants induits entraînent la formation d'une falaise d'érosion.
- (iv) Le "régime de overwash" (Figure 2c) se produit lorsqu'un talus de plage ou, le cas échéant, une dune est dépassée par franchissement par paquets de mer. La dissipation de l'énergie est alors principalement réalisée par ces franchissements au-dessus de la dune, aplatissant le profil de la crête de dune et déposant les matériaux d'origine marine sur la zone de l'arrière-dune. Le volume de sédiments déposé par le

moyen de ce phénomène est défini, dans le contexte du rapport, comme volume d'overwash. Ces phénomènes de submersion ponctuels et locaux peuvent favoriser l'ouverture d'une brèche lorsque qu'ils sont particulièrement intenses ou répétés.

- (v) Le "régime d'inondation" (Figure 2d) décrit la condition où le niveau de la tempête est si élevé que l'eau submerge complètement la dune ou quand une brèche est générée dans le cordon. Une inondation généralisée de la dune et des basses terres d'arrière-cordon peut alors se produire, ce qui peut entraîner le dépôt d'une quantité importante de matériaux sédimentaires sur les zones étendues de la dune et de l'arrière dune. Le "régime d'inondation" est également responsable de l'apport de volumes massifs d'eau salée dans les marais ou les lagunes d'eau douce à saumâtre.

Les différents paramètres de ces régimes de submersion peuvent être obtenus par des formules empiriques. La plus couramment utilisée est celle de Stockdon et al. (2006) qui permet d'estimer l'altitude atteinte par le jet de rive (run-up) sur les côtes sableuses (en absence d'ouvrages de défense).

Il est important souligner que la gamme d'impacts de l'action des vagues de tempête sur les dunes est beaucoup plus complexe que ce qui peut être résumé par les quatre régimes ci-dessus. La façon dont un système dunaire est affecté par une tempête et l'ampleur de cet impact dépendent fortement des interactions entre de nombreux facteurs de forçage et sont donc très variables dans le temps et l'espace (Masselink et van Heteren, 2014). Les différents régimes peuvent également se succéder dans le temps ou être observés simultanément en différents endroits d'un même cordon dunaire.

Ce modèle conceptuel de Sallenger et al. (2000) souligne l'importance de deux groupes de facteurs prédominants. Un premier groupe de facteurs caractérise la tempête elle-même ; direction(s) du vent, vitesse moyenne du vent, vitesse des rafales, direction de provenance de la tempête par rapport à l'orientation du littoral, vitesse de déplacement de la tempête, variation de la pression atmosphérique et moment de la tempête par rapport au cycle des marées. Le deuxième groupe de facteurs concerne l'emplacement et la configuration du site (par exemple, l'emplacement du site par rapport à la trajectoire de la tempête, la distance du *fetch*², l'orientation par rapport aux vents et aux vagues de la tempête) et ses caractéristiques morpho-sédimentaires (e.g. topographie de la plage et de l'avant-côte, disponibilité des sédiments, texture des sédiments, couverture végétale). Aux impacts morphologiques visibles et observables sur le littoral, il est essentiel d'ajouter les impacts affectant les barres sédimentaires d'avant côte. Ces dernières, présentes sous de faibles profondeurs (2 à 3 m), constituent une barrière naturelle de protection du littoral mais également un important stock sédimentaire sableux. Durant un événement de forte intensité, la barre externe peut migrer vers le large, augmentant ainsi la vulnérabilité de la plage. Dans la majorité des cas, le système retrouve sa configuration initiale. Mais, lors d'événements extrêmes, le système ne peut pas toujours être régénéré, les barres peuvent alors disparaître (Balouin et al., 2011), ce qui aura pour conséquence d'augmenter la vulnérabilité du littoral lors des événements tempétueux suivants.

² Le Fetch est la distance sur laquelle le vent agit sur l'océan. De cette distance dépend la formation de la houle.

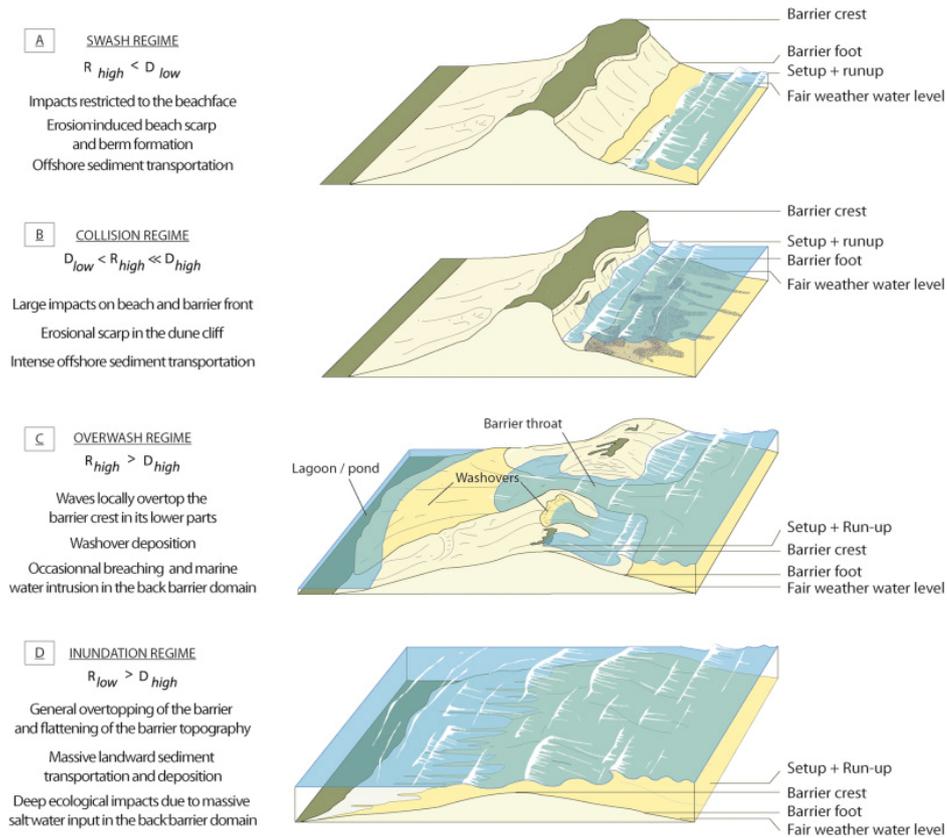


Figure 2. Illustrations schématiques des systèmes dunaires sous les quatre régimes de tempête de Sallenger (2000). Les conditions topographiques et hydrologiques nécessaires pour entrer dans ces régimes ainsi que les principaux impacts impliqués par chacun d'eux sont résumés. R_{low} , R_{High} , D_{low} , D_{high} se réfèrent aux paramètres définis dans la Fig. 1. (d'après Goslin et Clemmensen, 2017)

2. Recensement des données disponibles et méthodes utilisées

2.1. LOCALISATION ET CARACTERISTIQUES GEOMORPHOLOGIQUES DU LITTORAL

Le littoral d'Occitanie, localisé dans le golfe du Lion, se présente sous la forme d'un linéaire côtier d'environ 200 km constitué principalement de côtes basses sableuses entrecoupées par quelques caps rocheux. Les conditions d'agitation sur ce littoral de faibles à peu énergétiques (0,8 m de H_s moyenne) et la marée de type microtidal (marnage entre 0,2 et 0,4 m) en fait un environnement dont les évolutions morphologiques sont dominées par l'action des vagues.

2.1.1. Contexte climatique

Le Golfe du Lion est soumis à un climat de type méditerranéen tant par sa position géographique que par la présence de la mer. La méditerranée occidentale constitue un des secteurs de cyclogenèse active du bassin méditerranéen, ce qui explique que le littoral Languedocien ne soit pas exempt des phénomènes violents que sont les tempêtes marines (Tabeaud, 1995). Globalement, la saison estivale, de mai à septembre, constitue la phase habituelle d'absence de tempêtes compte tenu du caractère anticyclonique du champ de pression. Quelques événements tempétueux peuvent toutefois survenir en été plusieurs fois par décennie et le plus souvent avec violence. C'est malgré tout en hiver que les tempêtes sont les plus nombreuses en raison d'un champ de pression beaucoup plus dépressionnaire à cette saison (Balouin et al., 2011).

Les épisodes de tempêtes interviennent en fonction de conditions météorologiques à grande échelle déterminant la direction des vents et de la houle. Pour cela, dans le Golfe du Lion, une distinction entre trois (3) différents types de tempêtes, est envisageable (Balouin et al., 2011). La direction de provenance des vents et de la houle permette une distinction entre les différents types de tempêtes :

- Tempête de *Sud-Est*, par exemple la tempête du 06 au 11/11/1982 qui a balayé la région du Languedoc-Roussillon et qui fit de nombreux dégâts. Cet événement est considéré parmi les plus forts et destructeurs de ces 50 dernières années (Balouin et al., 2011).
- Tempête d'Est, affectent particulièrement la partie sud du Golfe du Lion, dont le littoral est globalement orienté Nord-Sud.
- *Les épisodes cévenols*, sont généralement de basse intensité mais avec des impacts générés sur le littoral potentiellement amplifié, car synchronisés avec fortes précipitations, qui peuvent amplifier les submersions, en particulier en zone d'embouchure ou de lagunes.

2.1.2. Impacts morphologiques liés aux tempêtes et sensibilité à la submersion

En fonction des conditions climatiques initiales et du secteur concerné, les phénomènes de tempêtes marines ont de nombreux impacts morphologiques sur le littoral occitan. Parmi ces

impacts, on peut observer l'érosion de la plage et du cordon dunaire, les phénomènes de franchissement ainsi que la submersion des zones côtières basses (Figure 4).

Des études menées par le BRGM se sont concentrées sur la connaissance des vagues pour mieux décrire les événements passés. Des modélisations rétrospectives ont permis d'estimer les conditions d'agitation des tempêtes ayant affecté le littoral du Golfe du Lion depuis 1979 (Balouin et al., 2011). Les tempêtes de décembre 1997 et de novembre 1982 apparaissent comme les plus violentes avec une valeur maximum de H_s estimée à 6,09 m à Sète le 16/12/1997. L'énergie des tempêtes est un indicateur intéressant, car il intègre à la fois les caractéristiques de la houle (H_s et T_p) et la durée de l'évènement. On peut ainsi distinguer l'évènement de 1997 de celui de 1982 par une énergie bien plus importante, du fait de la durée de la tempête de 1997 (proche de 90 h).

Dans le cadre du projet MICORE (Gervais et al., 2012) ont combiné chacune des tempêtes recensées depuis 1979 avec la base de données « Tempête », qui traite des impacts des tempêtes, ce qui a permis d'évaluer les *seuils morphogènes* et les seuils d'impact sur le littoral de la région Occitanie. Ces travaux ont permis de souligner que parmi les différents descripteurs de tempête (hauteur de vagues, énergie, durée, surcote), la hauteur significative des vagues reste le critère le mieux corrélé aux impacts. Ce paramètre H_s est utilisé pour définir des seuils d'impact des tempêtes marines (Balouin et al., 2011 ; Gervais et al., 2012) :

- $H_s > 2,3$ m : impacts attendus se concentrent sur la basse plage. Si présentes, les bermes sont susceptibles de disparaître;
- $H_s \geq 3$ m (N1) : impacts sur les morphologies d'avant-côtes (migration vers le large des barres sableuses), risque de décaissement et d'abaissement du niveau de la plage. Franchissement des bermes par le jet de rive ;
- $H_s \geq 4$ m (N2) : le haut de plage subit les assauts des vagues et des reculs importants du trait de côte sont possibles. Inondation partielle ou totale de la plage;
- $H_s \geq 5$ m (N3) : le pied de dune est atteint et des reculs importants du trait de côte sont à prévoir, ainsi que des phénomènes de franchissement des cordons dunaires de faible élévation (3 m NGF), des lidos et des infrastructures, brèches et destructions.

Cette étude est à l'origine du développement du Réseau de suivi des tempêtes marines et de leurs impacts sur le littoral en 2010 (<http://www.littoral-occitanie.fr/Le-reseau-tempetes>). Le réseau s'appuie notamment sur ces seuils morphogènes pour capitaliser les observations réalisées par les différents acteurs régionaux lors de ces événements.

Les impacts morphologiques lors d'épisodes tempétueux ne sont néanmoins pas uniquement dépendants des caractéristiques de la tempête telles la hauteur des vagues ou la surcote. La morphologie du cordon dunaire ainsi que son élévation constituent également des paramètres majeurs. Le cordon littoral représente à cet égard la première ligne de défense naturelle. En effet, il est évident que des portions de littoral ne présentant pas de dunes ou des dunes faiblement développées seront plus vulnérables à la submersion que des portions de littoral présentant des dunes évoluées (Section 1).

Enfin, l'aléa de submersion marine est d'autant plus important que l'urbanisation est massive, que les échanges de masse d'eau entre la mer et la lagune en arrière sont contraints et que les parties internes des lidos sont souvent topographiquement très basses (Figure 3).



Figure 3. Submersion à Frontgnan, lors de la tempête de 1997 (à haut) Submersions historiques : Zones submergées lors des tempêtes de 1997 et 2003 (observations SMNLR).

2.2. DONNEES UTILISEES

2.2.1. Données météo-marines

Afin de caractériser les conditions météo-marines qui sont analysées dans cette étude, plusieurs jeux de données sont utilisés. Il s'agit :

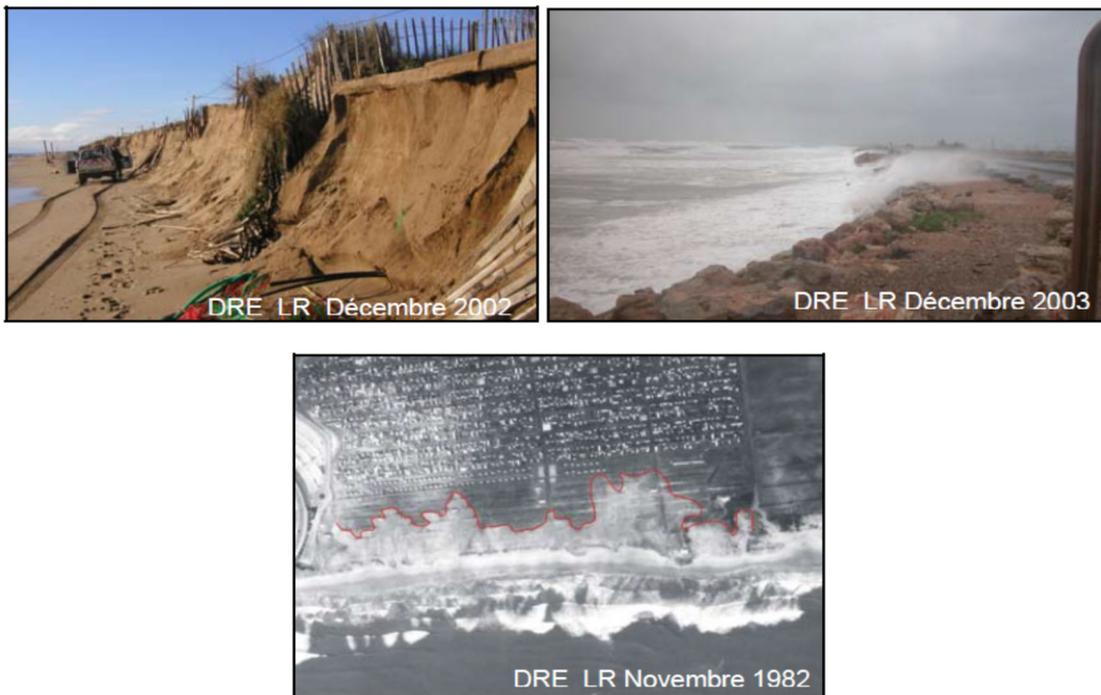


Figure 4. Érosion du cordon dunaire lors de la tempête de décembre 2003 (à gauche); franchissement sur le lido à l'Est d'Agde lors de la tempête de décembre 2002 (à droite); submersion marine sur le lido de Sète à Marseillan lors de la tempête de novembre 1982 (en bas). Après Balouin et al., 2011.

- Des données issues des houlographes de Leucate et Sète, propriétés de la DREAL Occitanie, mises à dispositions via le réseau CANDHIS (Cerema) ;
- Des données de prévision des vagues MARC WaveWatch III, modèle ROUSSILLON-200M, produit par l'Ifremer, ayant une résolution spatiale et temporel de 200 m et 3 h, respectivement.
- Des données issues des marégraphes de Port-la-Nouvelle et de Sète mises à disposition via le Réseau REFMAR-SHOM ;
- Des données anémométriques de l'aérodrome de Perpignan et du sémaphore de Sète mise à disposition via le site www.Meteociel.com ;
- Des données de débits fluviaux de la Têt, issues de la Banque de données Hydro et propriété du Service de Prévision des Crues Méditerranée Ouest.

2.2.2. Données issues de la BD-Tempêtes

La *BD_Tempêtes* a été développée par le BRGM en 2008 et permet un accès simplifié à l'ensemble des informations disponibles dans la région Occitanie, sur les événements actuels et passés de tempêtes marines. Elle contient à la fois les informations relatives à l'événement (hauteur de vagues, direction et vitesse du vent, surcote observée, etc.) mais également des informations disponibles sur les impacts. Cette base de données comportant plus de 250 enregistrements permet de retrouver par date et par commune les impacts générés par les tempêtes sur une période s'échelonnant de 1940 à aujourd'hui. La partie historique de la base se compose d'un ensemble d'éléments provenant de sources variées telles que des sites Internet, des rapports de bureau d'étude, des thèses, des articles, des données de mairies et des données de la DREAL du Languedoc-Roussillon (Tirard et Balouin, 2011). Depuis 2010, le Réseau de suivi des tempêtes et de leurs impacts sur le littoral d'Occitanie associe via une convention de partenariat un groupe d'observateurs qui alimente la BD-tempête.

2.2.3. Données topographiques et bathymétriques

Pour appréhender la géomorphologie du littoral du Golfe du Lion, différentes sources des données ont été considérées dans la rédaction du présent rapport.

La DREAL du Languedoc-Roussillon a pu mettre à notre disposition la base de données sur les cordons littoraux du Languedoc-Roussillon, construite par la DREAL-LR et l'EID-Méditerranée en 2015. Cette base comprend :

- Une couche d'information SIG (format MapInfo et QGis) décrivant les cordons ;
- Une couche d'information SIG (format MapInfo et QGis) décrivant les ouvrages ;
- Une couche d'information SIG (format MapInfo et QGis) décrivant les brèches ;
- Un tableur Excel récapitulant tous les éléments de méthode couche par couche ;
- Un atlas des cordons, également visualisable sous SIG, à partir des objets de la couche cordon.

Une table principale définit les cordons et regroupe en tout 38 champs. Les champs sont regroupés en quatre catégories : situation générale, morphologie, écologie, contexte anthropique et vulnérabilité. 81 cordons différents sont recensés : 6 dans le Gard, 39 dans l'Hérault, 16 dans l'Aude et 20 dans les Pyrénées-Orientales.

Les limites des cordons ont été fixées coté littoral, leur étendue en arrière du littoral n'étant pas représentative. Les limites identifiées correspondent soit à une coupure franche (embouchure, port, cap) soit à un changement de milieu, c'est-à-dire le passage brutal d'un milieu naturel à un milieu artificialisé, ou inversement. Il peut également s'agir du passage d'un cordon dunaire dégradé à un cordon dunaire restauré (EID-Méditerranée, 2015).

Les données topographiques et bathymétriques, produites dans le contexte de l'observatoire de la côte sableuse catalane (ObsCat), ont été aussi largement utilisées. Dans l'observatoire, des levés topographiques, bathymétriques, photogrammétriques par drone et/ou autogire, vidéos par caméra sont acquis. Des levés ponctuels ont également lieu après un événement météo-marin de forte intensité afin de réaliser un suivi quantitatif et qualitatif post-tempête. Ces relevés, plutôt de type photogrammétrique (en raison de la rapidité de mise en œuvre), ayant pour objectif d'acquérir des orthophotographies et de produire des modèles numériques de surface (MNS) afin de représenter la géomorphologie des secteurs affectés. Ces dernières années, la technique

LiDAR (Light Detection And Ranging) aérotransporté a également été utilisée pour ces suivis post-tempêtes.

Les données topographiques, ici utilisées, incluent la topographie de la plage basée sur levés DGPS (GNSS). Les relevés sont effectués avec l'antenne DGPS fixée sur un quad. La précision de ces données est de l'ordre de ± 10 cm en planimétrie et en vertical. Les levés bathymétriques, sont réalisés sur une embarcation semi-rigide, combinent l'utilisation du GPS $\text{\textcircled{R}}\text{Trimble R6}$ et celle du sondeur monofaisceau $\text{\textcircled{R}}\text{Tritech PA500}$. Dans ce cas, la précision est inférieure de l'ordre de ± 20 cm en coordonnées horizontale (x,y) et vertical (z) (Bossennec et Palvadeau, 2018).

Par ailleurs, les données du LiDAR, Litto3D, ont été utilisées sous forme MNT (Modèles Numériques de Terrain). Litto3D $\text{\textcircled{R}}$ Languedoc-Roussillon 2014-2015 est un produit intermédiaire du produit Litto3D contenant uniquement des données marines. C'est une base de données terre-mer unique et continue qui peut fournir des modèles 3D. Ces données maritimes et terrestres, proviennent de relevés obtenus à l'aide de technologies LiDAR bathymétriques ou d'échosondeurs multifaisceaux pour les relevés maritimes et de levés topographiques LiDAR aéroportés pour les relevés terrestres, avec un chevauchement de 300 m (SHOM, 2012). Le modèle numérique Litto3D utilisé est sous le format de points 3D avec un maillage qualifié du terrain. Les données du levé LiDAR de 2009 ont également été utilisées pour combler des secteurs non-couverts en 2014-15.

2.2.4. Données issues des études stratégiques sur les risques littoraux

Dans le cadre des études inscrites dans « Études stratégiques et prospectives sur l'évolution des risques littoraux » du volet « Gérer durablement le littoral » du Contrat de Projet Etat-Région 2007-2013 du Languedoc-Roussillon, une caractérisation de la submersion marine pour des tempêtes ayant des périodes de retour annuelle, décennale et cinquantiennale a été réalisée.

L'étude en question repose sur la synthèse des événements historiques de submersion marine dans la région Languedoc-Roussillon et le développement d'une méthodologie de cartographie à l'échelle régionale. La méthodologie retenue pour l'évaluation de la submersion marine est basée sur le croisement de la topographie avec les niveaux d'eaux extrêmes obtenus par la combinaison de modèles physiques et analytiques (Balouin et Belon, 2012).

La reconstitution des conditions météo-marines lors de certains événements historiques sélectionnés a été effectuée. Ces informations ont été propagées à la côte et ont permis de calculer à l'aide de modèles analytiques les surélévations dues au déferlement (*set-up*) et au jet de rive (*run-up*). Cette approche est réalisée sur des profils perpendiculaires au trait de côte et espacés de 50 m sur tout le littoral régional. Puis, un calcul des niveaux extrêmes pour des scénarios de référence des tempêtes annuelle, décennale et cinquantiennale a été généré. Les conditions hydrodynamiques utilisées dans ce contexte sont issues d'une analyse fréquentielle des données de houle réalisée en 1998 par le CETMEF sur la bouée de Sète, et complétée par une ré-analyse des vagues sur les trois dernières décennies (Tirard et Balouin, 2011).

La méthodologie mise en place pour l'évaluation de la submersion marine a permis d'obtenir deux informations complémentaires :

- L'extension de la zone inondée ;
- La hauteur d'eau dans la zone inondée.

Ces informations ont été déduites des niveaux d'eau maximaux calculés appliqués à la topographie LIDAR. Le niveau statique pendant la tempête a été appliqué sur le modèle topographique en considérant que ce niveau sera atteint dès lors que l'écoulement depuis la mer est possible. Il a été donc reporté également sur les côtes des lagunes ayant une connexion avec la mer. Le niveau d'eau instantané (jet de rive) a été propagé depuis le niveau statique jusqu'au premier obstacle topographique susceptible de bloquer significativement l'écoulement (Balouin et Belon, 2012).

Bien que l'approche utilisant des niveaux statiques et sans prise en compte de l'évolution morphologique, les informations des projections en terme de set-up, runup, niveau maximal, réparties sur des profils cross-shore espacés de 50 m sur tout le littoral régional, constituent une banque de données importante sur l'hydrodynamique pour des tempêtes de différentes périodes de retour qui a été utilisée dans la présente étude.

2.2.5. Données sédimentologiques

Dans le contexte du projet *LITTOSIS*, une analyse volumétrique et granulométrique du prisme sableux littoral a été effectuée par le laboratoire CEFREM pour la DREAL. Les campagnes d'acquisition LITTOSIS ont été lancées en 2012 et 2013. Les données de sismique réflexion très haute résolution recueillies s'étendent sur l'ensemble du littoral, soit sur plus de 200 km, alors que les données étaient jusqu'alors localisées sur de petites zones ponctuelles.

Des campagnes d'acquisition, un échantillonnage exhaustif du prisme sableux littoral ont également été réalisés en vue d'une analyse granulométrique de surface complète. Les résultats sont fournis en deux parties : (i) les principales caractéristiques du prisme sableux littoral, notamment son volume et (ii) l'analyse granulométrique de surface de ce prisme (Raynal et al., 2015). Ces résultats ont été utilisés dans cette étude pour caractériser les sédiments disponibles potentiellement mobilisés pendant une tempête et évaluer les caractéristiques granulométriques des sites pilotes.

Des données plus localisées ont également été obtenues dans le cadre du schéma directeur pour la Protection du Littoral entre la Têt et de l'Agly (Sogreah et Artelia, 2007). Il s'agit de 18 prélèvements réalisés en six postes le long du littoral en Janvier 2007, sur la plage sèche, le long du trait de côte, sur le milieu de plage, en pied de dune, qui sont particulièrement intéressantes pour le site-pilote de Canet Nord.

Ces informations liées à la granulométrie ont été exploitées dans ce projet.

2.3. STRATEGIES UTILISEES POUR LA DETERMINATION DE LA VULNERABILITE A L'ÉROSION ET LA SIMULATION DES PROCESSUS D'ÉROSION ET DE SUBMERSION

2.3.1. Estimation de la vulnérabilité à l'échelle régionale

Dans la littérature, la vulnérabilité d'un système (i.e. dune côtière) est un indicateur (ou est fonction) de l'exposition et de la sensibilité d'un système à des aléas (ici érosion côtière et submersion marine) et la capacité du système à faire face, s'adapter ou se remettre des effets de ces aléas. Un système peut être vulnérable à certaines perturbations et non à d'autres. La nature multi-échelle des perturbations et les perturbations multiples qui sont souvent en interaction rendent l'évaluation de l'exposition de ces systèmes difficile. Par ailleurs, le concept de

vulnérabilité est aussi associé à la tendance ou la prédisposition à être affecté négativement par des facteurs humains (GIEC, 2014).

Il découle de cette définition que l'adaptation est l'un des moyens d'actions pour réduire la vulnérabilité. Bien que des approches très variées sur l'adaptation existent (Ciccarelli et al, 2017), le principal objectif de l'évaluation de la vulnérabilité est de fournir des informations pour guider le processus d'adaptation de la société. Afin d'évaluer la vulnérabilité d'un site à un ou plusieurs aléas, la définition d'indicateur de synthèse est nécessaire. Cette démarche permet d'une part d'intégrer différentes dimensions et interactions conduisant à cette vulnérabilité (milieu physique, forçages, facteurs anthropiques, etc.). D'autre part elle offre au gestionnaire une grille de lecture permettant de faciliter les processus de prise de décision, de capacité à agir.

La vulnérabilité des côtes est affectée par une série de paramètres:

- Les forçages du milieu marin (vent, marée et vagues) ;
- les transferts de sédiments, par des processus de type éolien, de transport au fond ou en suspension;
- la végétation et son état de conservation écologique ;
- les facteurs humains et leurs pressions (qui agissent en synergie avec les facteurs environnementaux).

Dans la présente étude, un premier objectif, lié à la définition des critères d'analyse et l'identification des secteurs sensibles de la côte, a conduit à développer un indice de vulnérabilité simplifié des systèmes dune-plage pour les côtes sableuses d'Occitanie (VIG). Cet indice s'appuie sur des indices élaborés dans la bibliographie sur la côte océanique espagnole (DVI, Garcia-Mora et al., 2001) et méditerranéen italien (MDVI, Ciccarelli et al., 2017).

2.3.2. Simulation des phénomènes

L'évaluation précise de l'ampleur, de la localisation et de l'extension des effets des mécanismes physiques côtiers (incluant les transports sédimentaires) devient un élément essentiel de la gestion des risques, et dans ce sens, l'utilisation de modèles décrivant les processus physiques pour prévoir les changements morphodynamiques induits par les tempêtes, sous des scénarios historiques ou de projection, est très importante.

Dans cette étude, cette simulation numérique des processus physiques est réalisée sur deux sites pilotes à l'aide du modèle morphodynamique *XBeach* (eXtreme Beach behavior), pour modéliser les évolutions morphologiques et la submersion résultante, et dans un second temps produire des outils graphiques de sensibilisation pour des scénarios de tempêtes prédéterminés.

Le modèle *XBeach* est actuellement un modèle très avancé pour résoudre les processus physiques dominant le comportement des systèmes plage/dune en période de tempête (Roelvink et al., 2009). Ce modèle permet de simuler ces principaux processus côtiers sur des secteurs dont l'extension est de quelques kilomètres, avec une résolution jusqu'à l'ordre de quelques décimètres. *XBeach* est un modèle *open source* qui a été développé suite à l'ouragan Katrina, grâce aux fonds et au soutien de l'US Army Corps of Engineers et d'un consortium regroupant l'UNESCO-IHE, Deltares (Delft Hydraulics), l'Université de Technologie de Delft et l'Université de Miami pour pouvoir évaluer les impacts des ouragans sur les plages de sable. Au-delà des côtes sableuses, le modèle a été appliqué aux récifs coralliens et d'atolls. A la demande de l'U.S. Office

of Naval Research, le modèle inclut maintenant également les effets de dissipation par la végétation ou autres écosystèmes naturels.

XBeach a été développé à l'origine comme un modèle de résolution de groupes de vagues courtes, permettant de résoudre les variations d'ondes courtes à l'échelle des groupes de vagues et les ondes longues qui leur sont associées (Figure 5). En mode 2DV (prise en compte de processus parallèles à la côte et des processus verticaux intégrés sur la verticale), il résout principalement l'équation d'action des vagues, une équation de transport de sédiment et une équation d'évolution du fond. Sa particularité réside dans l'amélioration de la modélisation du jet de rive qui prend en compte les effets des ondes infra-gravitaires. Les courants associés à la propagation et le déferlement des vagues, ainsi que données par l'action du vent, sont également calculés par le modèle ce qui lui permet d'évaluer le transport sédimentaire et les évolutions morphologiques : érosion, ensablement, submersion de dunes ou de récifs au cours d'événements météorologiques intenses. Les phénomènes pris en compte dans l'équation d'onde des vagues appelée aussi équation d'équilibre d'action des ondes courtes, sont la propagation des vagues, la réfraction bathymétrique, la réfraction due aux courants et le déferlement (Desmazes et al., 2014). Depuis l'article original de Roelvink et al. (2009), un certain nombre d'options supplémentaires de modèle ont été mises en œuvre, permettant ainsi aux utilisateurs de définir les processus pris en compte et différentes modalités lors des simulations de choisir les échelles de temps à résoudre. Ainsi il existe plusieurs modes :

- (i) Mode stationnaire, résolvant les équations de la moyenne des vagues, mais négligeant les ondes infra-gravitaires;
- (ii) Mode *surfbeat* (non-stationnaire) où les variations des ondes courtes à l'échelle du groupe des vagues (enveloppe des ondes courtes) et les vagues longues qui leur sont associées sont résolues ;
- (iii) Mode *non-hydrostatique*, où une combinaison des équations non-linéaires de vagues avec un terme de correction de la pression est appliquée, permettant de modéliser la propagation et la décroissance des vagues individuelles.

Dans le contexte de ce projet, le mode *surfbeat* a été employé. Les avantages de ce mode sont liés à la possibilité d'utiliser de résolutions spatiales de l'ordre du mètre avec capacités de calcul beaucoup plus performant si comparé au mode non-hydrostatique. En revanche, le phénomène du jet-de-rive à l'échelle de la vague individuelle n'est pas résolu.

Pour ce qui est de l'évolution de la morphologie, le phénomène d'avalanche des grains de sable est pris en compte au cours des épisodes d'érosion de dune engendrés par les tempêtes. De plus, XBeach permet de traiter différentes classes sédimentaires et de définir des zones non érodables. Il offre la possibilité de considérer les processus liés à la nappe phréatique; ce qui permet de tenir compte des phénomènes d'infiltration et d'exfiltration qui jouent un rôle dans l'intensification ou la réduction des courants dans la zone de jet de rive (Desmazes et al., 2014). Ce type de modèle permet donc un travail spécifique de simulation de l'érosion du système plage-dune, particulièrement en période de tempête, et calcule des volumes de submersion potentielle, qui peuvent être produits.

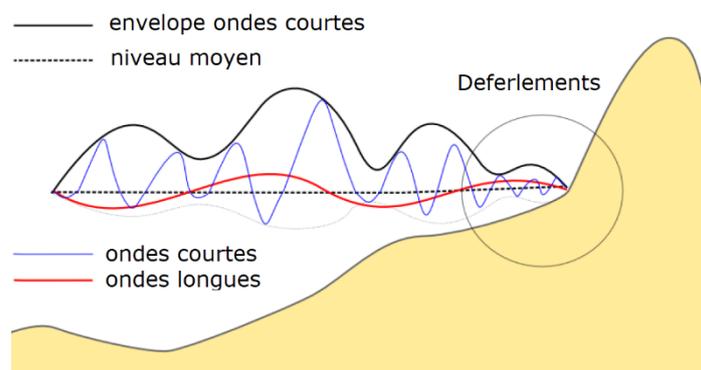


Figure 5. Description générale des processus de vagues pertinents. Source : XBeach manual (2018).

Ce modèle numérique est par conséquent un outil permettant la simulation des effets de l'érosion événementielle sur l'extension de la submersion marine. Afin de permettre une représentation réaliste de la submersion, le modèle permet de reproduire les différents processus à l'origine des submersions : circulations d'eau entre la mer et la zone lagunaire, variations du niveau d'eau marin, action des vagues, processus de franchissement. Pour les zones urbanisées et aménagées à des degrés différents, la modélisation permet d'intégrer le type d'occupation du sol, les obstacles, donc les vecteurs à la propagation des écoulements. Puis, le modèle est capable de suivre des orientations particulières des cotes avec la possibilité de définir une grille de calcul variable à maillage irrégulier et/ou curviligne, afin d'éviter une potentielle dégradation des résultats et/ou des importantes augmentations de temps des calculs. Dans le chapitre de 4 à 5, la mise en place des outils de modélisation, l'analyse des résultats et une discussion sur les forçages, les scénarios et limites de la méthode sont présentés.

3. Analyse de vulnérabilité aux phénomènes d'érosion événementielle à l'échelle régionale

3.1. INDICE DE VULNERABILITE DES SYSTEMES DUNE-PLAGE

La première étape de cette partie de l'étude a consisté à évaluer la vulnérabilité des systèmes dunes-plages côtiers le long du littoral d'Occitanie en adoptant une méthodologie multidisciplinaire. Un indicateur simple et reproductible a été développé, qui peut-être un soutien pour la gestion de la zone côtière. Différentes variables ont été exploitées pour mieux investiguer leur influence sur le milieu, sur la base d'une adaptation du protocole proposé par García-Mora et al. (2001) et intégré par Idier et al. (2013).

Quatre groupes de variables ont été étudiés : conditions géomorphologiques du système plage dunaire (*GCD*), l'état de la végétation (*VC*), l'effet anthropique (*AE*) et l'influence marine (*MI*). Les analyses sont faites à l'échelle spatiale des systèmes cordon-plage pré-identifiés dans l'étude EID-DREAL de 2015, soient 81 secteurs au total : 6 dans le Gard, 39 dans l'Hérault, 16 dans l'Aude et 20 dans les Pyrénées-Orientales (paragraphe 2.2.3). Les limites identifiées correspondent soit à une coupure franche (embouchure, port, cap) soit à un changement de milieu, c'est-à-dire le passage brutal d'un milieu naturel à un milieu artificialisé, ou inversement. Il peut également s'agir du passage d'un cordon dunaire dégradé à un cordon dunaire restauré

Dans notre étude, 17 variables, comprenant à la fois des paramètres quantitatifs et qualitatifs, ont été prises en compte dans la procédure de classification de la vulnérabilité, 8 variables concernant le *GCD*, 4 les *VC* et *AE* et 1 variable de synthèse pour *MI* (cf. tableau 1). Ces variables sur les systèmes dunaires ont été obtenus à partir de plusieurs sources, principalement sur la base des données disponibles issues d'études stratégiques sur les risques littoraux étudiants les cordons littoraux du Languedoc-Roussillon fournis par DREAL-Eid-Méditerranée (paragraphe 2.2.3 et 2.2.4). Les différentes variables n'ont pas été pondérées pour éviter une hiérarchisation complexe et trop subjective. Chaque variable sélectionnée a été associée à une échelle mobile de quatre points allant de 0 (absence de vulnérabilité) à 3 (très grande vulnérabilité), comme illustré dans le tableau 1.

Afin d'avoir des indices représentatifs de toute la région et bien repartis, la méthode de discrétisation des données dans les quatre (4) classes est importante. Une méthode linéaire classique de subdivision nous a apporté une non-homogénéité des valeurs dans les classes. Donc après avoir testé différentes approches, la démarche utilisée pour définir les limites entre chaque classe de vulnérabilité, pour une variable donnée, est basée sur une discrétisation des valeurs auquel est appliquée une loi logarithmique (base 10), en ajoutant une constante, définie par le moyen de l'attribut considéré (permettant d'éviter des valeurs nulles). Ces discrétisations ont été aussi évaluées par les agents du BRGM pour prendre en compte les connaissances locales du littoral.

La Figure 6 présente un exemple de la mise en œuvre de cette méthode pour la variable de la hauteur maximale des crêtes des cordons (paragraphe 3.1.1). On obtient pour cet exemple une classe de niveau 3 correspondant à l'absence de dune, une classe de niveau 2 pour les crêtes inférieures à 4 m, une classe de niveau 1 pour les crêtes comprises entre 4 et 6 m et une classe de niveau 0 pour les crêtes supérieures à 6 m.

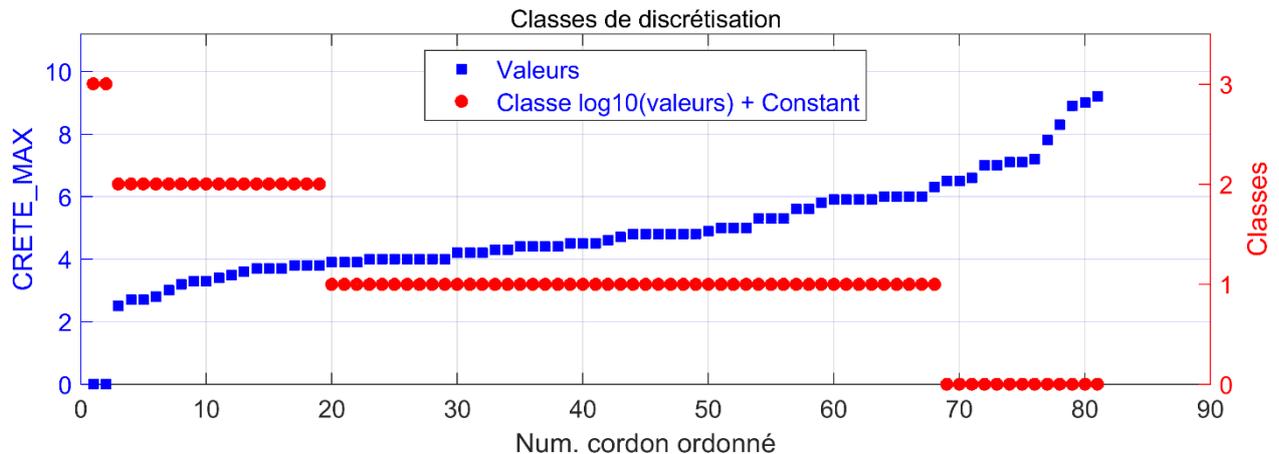


Figure 6 Discretisation de la variable CRETE_MAX, hauteur maximale des crêtes des cordons, dans les quatre principales classes de vulnérabilité, de 0 (zéro vulnérabilité) à 3 (plus haute vulnérabilité).

3.1.1. Variables considérées

Dans le système de variables représentatives de conditions géomorphologiques du système (GCD), qui peuvent donner une indication sur la vulnérabilité du système cordon-plage, les variables suivantes, à l'échelle de chaque secteur, sont considérées:

1. **MIN-2.4MC** : Épaisseur minimale du système plage-dune à +2.4m NGF. Cette côte de 2,4 m NGF est celle prise en compte dans le guide de référence des PPR littoraux en Languedoc-Roussillon. Mesure grâce aux couches d'altitude Litto3D. La marge d'erreur est de ± 5 m ;
2. **MAX-2.4MC** : Épaisseur maximale système plage-dune à +2.4m NGF. Plus cette portion est large, plus le cordon semblera être préservé du risque de submersion marine. La marge d'erreur est la même que pour MIN_2_4MC.
3. **CRETE - MIN** : Altitude minimale de crête de dune. La crête de dune est définie à partir de tous les points, les plus hauts du cordon, rejoints entre eux. Dans le cas d'un cordon naturel, elle est obtenue en suivant la crête naturelle de la dune sans décaler le vecteur en arrière-dune pour trouver des altitudes plus hautes. Mesurée sur des profils longitudinaux tirés du Litto3D (EID-Méditerranée, 2015). La marge d'erreur est de ± 0.3 m ;
4. **CRETE-MAX** : Altitude maximale de crête de dune. La marge d'erreur est la même que pour CRETE_MIN.
5. **PLAGE-MIN** : Largeur minimale de la plage émergée du trait de côte au pied de dune. Mesurée sur SIG. La marge d'erreur est de ± 5 m ;
6. **PLAGE-MAX** : Largeur maximale de la plage émergée du trait de côte au pied de dune. La marge d'erreur est la même que pour PLAGE_MIN ;
7. **N-BRECHES** : nombre des brèches sur le cordon. Certains cordons sont caractérisés par la présence de cette forme de dégradation que l'on considère être un gros point de faiblesse du cordon.
8. **EVO-TDC** : Les limites de classes sont similaires à celle de l'étude CPER - 2011 - Actualisation de l'aléa érosion en Languedoc-Roussillon – BRGM. Le taux d'érosion par

cordon est calculé à partir des estimations du taux d'évolution annuel (m/an) sur une période de 30 ans (1977-2009), dans l'étude EID-Méditerranée (2015).

Parmi les variables représentatives de conditions de végétation (VC), qui peuvent influencer la vulnérabilité du cordon (Figure 7), les variables suivantes, à l'échelle de chaque cordon, sont considérées:

1. **CSERV-ECOL** : L'état de conservation écologique. Indicateur qui prend en compte, entre autres, la fragmentation des habitats dunaires, la dynamique de la végétation, la présence excessive d'espèces exotiques envahissantes. Les sources des données utilisées dans EID-Méditerranée, 2015 sont Ortho-photo 2011, Connaissance du terrain. Pour une description détaillée, voir EID-Méditerranée (2015).
2. **D-EMBRY** : Dune embryonnaire. Présence ou absence.
3. **D-VIVE** : Dune vive. Présence ou absence.
4. **D-FIXEE** : Dune fixée. Présence ou absence.

Coupe schématique du système littoral sableux en Languedoc-Roussillon

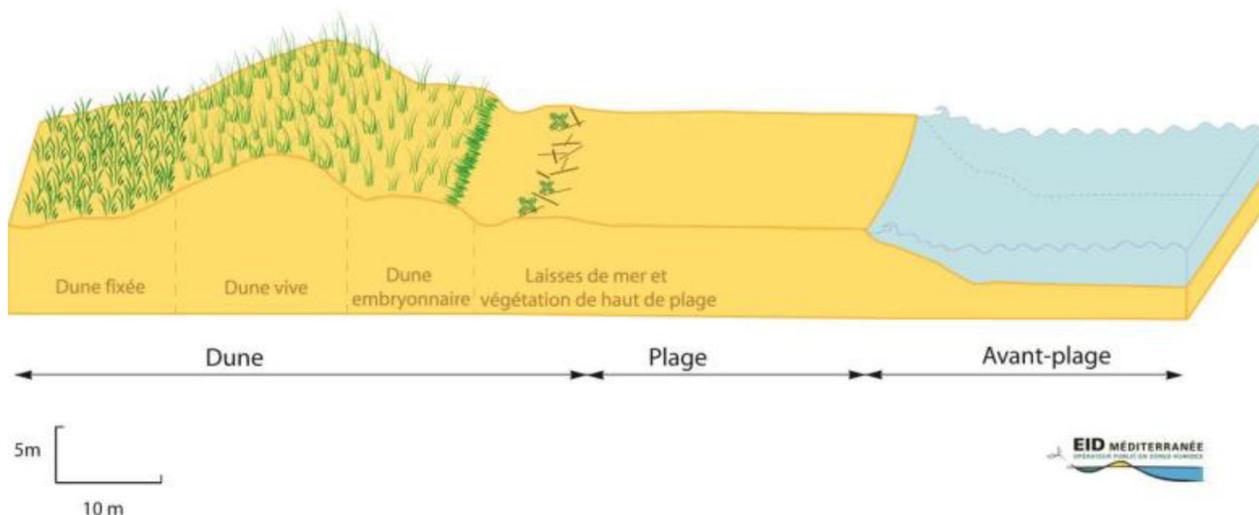


Figure 7. Définition schématique avec illustration des trois habitats dunaires sélectionnés, d'après EID Méditerranée (2015).

Les variables choisies pour représenter la vulnérabilité du cordon issue du contexte anthropique incluent les accès à la plage, très présents sur le littoral de la région, soit de nature artificielle soit semi-naturelle, qui ont un rôle structurant sur le cordon et les occupations du sol. Cela représente des surfaces/points qui fragilisent le cordon et peu favoriser la création de brèche ou des franchissements localisés.

1. **OUV-STAT** : Ouvrages statiques. Les ouvrages pris en compte en tant qu'ouvrages statiques sont les suivants : épis, brise-lames, ouvrages « en T », enrochements frontaux, butées de pied et bourrelets de galets.
2. **ACCES-PUB** : Nombre accès publics. Il s'agit des accès à la plage depuis un lieu public (route, parking, etc.), la plupart des cas matérialisés (au minimum leur point de départ) par la collectivité (ganivelles, escaliers, etc.). Toutefois, il arrive qu'ils ne le soient pas lorsqu'ils sont en contact direct avec la plage.

3. **ACCES-PRIV** : Nombre accès privés. Selon EID-Méditerranée (2015), il s'agit des accès mis en place et matérialisés par des acteurs privés, la plupart du temps de campings qui ont aménagé des accès pour leurs clients. Des clôtures, des ganivelles, des escaliers ou des échelles sont utilisés.
4. **OCC-SOL-MAJ** : Occupation du sol majoritaire. Il s'agit de structures, hébergements légers et autres, installés sur la plage, qui peuvent augmenter la vulnérabilité.

Afin de pouvoir condenser les informations liées à l'influence marine sur la vulnérabilité globale, les résultats des études stratégiques sur les risques littoraux (paragraphe [2.2.4](#)) sont utilisés :

1. **Nmax-Run50**: Valeur maximale du jet de rive (runup $R_{2\%}$) + surcote pour période de retour de 50 ans.

Ce niveau marin instantané maximal, potentiellement atteint au pic d'une tempête cinquantennale, est dérivé d'un calcul des 2% les plus haut atteint par le jet de rive ($R_{2\%}$). Cette estimation est réalisée l'aide d'un modèle empirique communément utilisé, celui de Stockdon et al. (2006). Dans cette quantification, deux caractéristiques morphologiques des secteurs considérés sont prises en compte, la pente de l'avant-côte et de la plage émergée. La pente de la plage émergée a été estimée dans Balouin et Belon (2012) entre les courbes de niveau 0,3 et 1,5 m NGF contours altimétriques qui correspondent en moyenne à la limite supérieure de la zone de jet de rive par beau temps et à la crête de la berme, respectivement. Pour la pente d'avant-côte, en considérant l'importante variabilité morphologique des systèmes en jeu (barres sableuses parallèles, uniques, croissant, etc.), le calcul a été adapté en fonction de la morphologie de l'avant-côte, afin que la pente calculée soit représentative de la zone de déferlement sur lequel est généré le *set-up*. Les deux calculs, ont été réalisé dans Balouin et Belon, (2012), utilisant les levés Lidar et à l'aide de l'extension DSAS (Digital Shoreline Analysis System) sur ©ESRI ArcGis.

Ces résultats ont été obtenus sur des profils perpendiculaires à la plage, avec un espacement de 50 m (paragraphe [2.2.4](#)). La valeur représentative à l'échelle du cordon, Nmax-Run50, qui ici est exploité, a été évalué comme la valeur maximale parmi tous les profils qui intéressent la surface du secteur.

Tableau 1. Variables prises en compte dans la procédure de classification de la vulnérabilité des systèmes dune-plages. Classes de vulnérabilité de chaque variable varie de 0 (absence de vulnérabilité) à 3 (très grande vulnérabilité).

Variables		Vulnérabilité classes			
	1. GCD	0	1	2	3
1	MIN-2.4MC	>26	<26	<14	<5.4
2	MAX-2.4MC	>128	<128	<47	<14.0
3	CRETE-MIN	>4	<4	>2	<1
4	CRETE-MAX	>6	<6	>4	<2

5	PLAGE-MIN	>74	<74	>31	<10
6	PLAGE-MAX	>256	<256	>92	<29
7	N-BRECHES	<2	>=1	>3	>6
8	EVO-TDC	>0	<0	<-0.5	<-1
	2. VC	0	1	2	3
1	CSERV-ECOL	Bon	Moyen	Faible	Aucun/ Mauvais
2	D-EMBRY	Absence	-		Présence
3	D-VIVE	Absence	-	-	Présence
4	D-FIXEE	Absence	-	-	Présence
	3. AE	0	1	2	3
1	OUV-STAT	Absence	-	-	Présence
2	ACCES-PUB	<5	<12	<22	>22
3	ACCES-PRIV	<3	<7	<12	>18
4	OCC-SOL-MAJ	Espaces naturels	Infrastructures/ Activités	Hébergements légers	Hébergements en dur
	4. MAR	0	1	2	3
1	Nmax-Run50	<1	>1	>2.8	>=8

3.1.2. Analyse des données

Des indices de vulnérabilité partielle et totale ont été calculés pour chaque secteur sélectionné. Pour chaque groupe de vulnérabilité (*GCD, MI, VC, AE*), la somme des variables classées et normalisées, donc divisée par la somme des classements maximale possible au sein de chaque groupe, a donné lieu à un indice de vulnérabilité exprimé en pourcentage. L'indice de vulnérabilité global (*VIG*) est la moyenne non pondérée des quatre indices de vulnérabilité partielle par l'équation suivant :

$$VIG = (GCD + MI + VC + AE) / 4$$

L'indice global *VIG* se situe entre 0 et 1, et à mesure que l'indice augmente, la capacité d'un système de résister à l'aléa diminue.

Une matrice de 17 variables pour 81 secteurs, couvrant la région entière, a été soumise à une méthode de *classification hiérarchique ascendante* (Ogier, 2020) afin de créer des groupes de secteurs homogènes à partir de la matrice de similarité des variables des secteurs. Cette classification est définie comme ascendante car elle part d'une situation où tous les individus sont seuls dans une classe, puis sont rassemblés en classes de plus en plus grandes. Le qualificatif hiérarchique vient du fait qu'elle produit une hiérarchie H , pour l'ensemble des classes à toutes les étapes de l'algorithme. La méthode suppose qu'on dispose d'une mesure de dissimilarité entre les individus; dans ce cas un espace euclidien est considéré, on peut utiliser donc la distance euclidienne comme mesure de discrétisation entre chaque secteur. Le dendrogramme généré par la classification hiérarchique basée sur la distance euclidienne de 81 secteurs est présentée dans la Figure 9.

Résultats

L'indice de vulnérabilité global VIG varie selon les secteurs : de 0.235 au Petit Travers à 0.75 aux Chalets de Gruissan. Lorsque cet indicateur est décomposé, l'état géomorphologique du système dunaire (GCD) et l'état de la végétation (VC) montrent les valeurs les plus vulnérables au Grau d'Agde (0.70) et Sainte-Marie Sud (1). La valeur moyenne de l'indice GCD est de 0.51, indiquant une sensibilité médiocre des secteurs à l'état géomorphologique. L'indicateur de synthèse concernant les conditions marines (MI) est en moyenne de 0.62, VC moyen égal à 0.39, enfin l'indice d'influence anthropique moyen est égal à 0.27.

L'analyse des 81 secteurs a permis de définir deux grands groupes, Z_1 et Z_2 , et six clusters secondaires (illustrés avec des couleurs différentes,) qui ne sont pas liés la localisation géographiques des sites, mais a une classification similaire des valeurs des indices partiels. L'analyse de variance a révélé des différences statistiquement significatives dans les valeurs des indices de vulnérabilité VC et de l'AE entre les groupes Z_1 et Z_2 . Les sites du groupe Z_1 sont globalement caractérisés par une mauvaise préservation de la végétation dunaire et une forte artificialisation, alors que dans le cas des sites du groupe Z_2 , ces facteurs ne jouent pas un rôle prédominant.

Parmi les sites du groupe Z_1 , le sous-groupe principal (Z_{13}) compte différents secteurs côtiers qui montrent les valeurs significatives maximales de l'indice partiel VC. Ce groupe inclut des secteurs artificialisés, avec un état de conservation écologique faible ou nul, une dégradation de la végétation de tous types, à la fois complètement absente (i.e. Sainte-Marie Centre, etc.) à la fois présente que dans sa composante embryonnaire (i.e. Frontignan Est, Grau d'Agde, Les Ayguades) ou fixe (Vias Ouest). La géomorphologie (indice GCD) dans ce groupe est très variable, et il comprend des secteurs comme Argelès-sur-Mer qui est caractérisé d'une largeur de plage maximale de 110 mètres et un système dunaire bien formé, sans brèches, mais qui comporte des hébergements en dur, et secteurs comme le Grau d'Agde ou Frontignan, plage ouest, qui sont caractérisés par une largeur du système plage-dune très faible, sinon absent, hauteur maximale de la crête dunaire faible (3.5 m pour Frontignan), présence de brèches dans le système (4 brèches au Grau d'Agde), et TdC en fort recul.

L'indice AE est aussi fortement variable, on passe d'une absence de vulnérabilité à Mateille, à des valeurs moyennes, à Palavas rive droite et encore au Grau d'Agde (AE = 0.47 pour les deux).

Les deux clusters (Z_{11} et Z_{12}) constituent deux sous-groupes indépendants qui correspondent à des plages particulières : la plage des Coussoules à Leucate (Z_{11}) et la crique de l'Anau à Sète (Z_{12}). Le sous-groupe Z_{11} est caractérisé par une plage très large et très basse avec une absence d'exploitation touristique (AE = 0), la présence d'un cordon naturel moyen, une évolution positive du TdC, l'absence des brèches (VC, GCD relativement faible), et assez peu de végétation (VC élevé). Le deuxième, Z_{12} , Crique de l'Anau, est caractérisé par un indice GCD haut,

correspondant à une plage très étroite bordée par une falaise calcaire sur laquelle sont présents immeubles et habitations. Sur ces secteurs on note que l'évolution du TDC est stable, la végétation absente (VC haut) et que l'indice MI est très faible du fait de la présence d'une plage très plate (surmontée par une falaise dans le cas de Sète).

Le Groupe Z2 présente lui un indice global globalement dominé par les conditions géomorphologiques et par les conditions marines. Il est divisé en 3 sous-groupes :

- Le groupe Z₂₁ englobe les secteurs caractérisés par un effet MI de 0.67, ce qui correspond une vulnérabilité aux conditions marines importante. Par ailleurs les autres indices présentent des valeurs moyennes. Dans cette classe on trouve par exemple les secteurs de Valras Ouest, Saint Cyprien Nord ou Marseillan plage sud. La particularité du cluster Z₂₂ est de présenter une relativement forte vulnérabilité liées aux implantations urbaines alors que par ailleurs, les indices MI et VC sont relativement faibles, respectivement inférieurs à 0.33 et 0.25. On trouve ici 5 secteurs au total, dont le plus exposé est Carnon Est, 0.73. Dans le groupe Z₂₃, le cluster qui englobe le plus des secteurs, la situation est très hétérogène pour tous les indices, à l'exception de MI, qui est caractérisé par une incidence de la vulnérabilité à la submersion plutôt élevée (en moyenne la valeur maximale du jet de rive (runup $R_{2\%}$ + surcote > 2.8 m NGF). On trouve différents secteurs avec des valeurs de GCD les plus élevées, comme pour l'Ancien Grau du Libron (la valeur maximale, 0.7), Les Aresquiers, Bourdigou (0.66), mais aussi très importantes dans les secteurs comme Maguelone, Canet plage Nord (0.55).

Au-delà de cette forte disparité entre les différents groupes obtenus dans l'analyse, il ressort que l'indice de vulnérabilité globale est élevé (valeur supérieure à 0.5) pour un linéaire important du littoral régional. Cela représente environ 35% des côtes qui présenteraient une vulnérabilité accrue à la submersion marine de par leur sensibilité à l'érosion côtière événementielle.

Pour mieux visualiser la distribution des valeurs des indices de vulnérabilité, en particulier le global VIG et partiel GCD, des cartes ont été produites et sont présentées dans les **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et Figure 10. Dans les annexes, les cartes des indices liées aux effets anthropiques, AE, la végétation, VC et l'influence marine (MI) sont aussi présentées.

Tableau 2. Valeurs moyennes (\pm écart type) des indices de vulnérabilité partielle et globale des systèmes plage-dune méditerranéenne (MDVI) calculées pour chaque groupe (cluster) défini par l'analyse de classification hiérarchique.

Cluster	Z ₁₁	Z ₁₂	Z ₁₃	Z ₂₁	Z ₂₂	Z ₂₃
GCD	0.42 ± 0.0	0.58 ± 0.0	0.55 ± 0.1	0.56 ± 0.10	0.55 ± 0.05	0.48 ± 0.10
VC	1.00 ± 0.0	1.00 ± 0.0	0.93 ± 0.12	0.40 ± 0.15	0.23 ± 0.04	0.16 ± 0.11
MI	0.33 ± 0.0	0.00 ± 0.0	0.70 ± 0.1	0.67 ± 0.00	0.33 ± 0.00	0.64 ± 0.10
AE	0.00 ± 0.0	0.40 ± 0.0	0.39 ± 0.15	0.47 ± 0.08	0.52 ± 0.14	0.17 ± 0.14
VIG	0.44 ± 0.0	0.50 ± 0.0	0.64 ± 0.06	0.52 ± 0.03	0.41 ± 0.03	0.36 ± 0.06

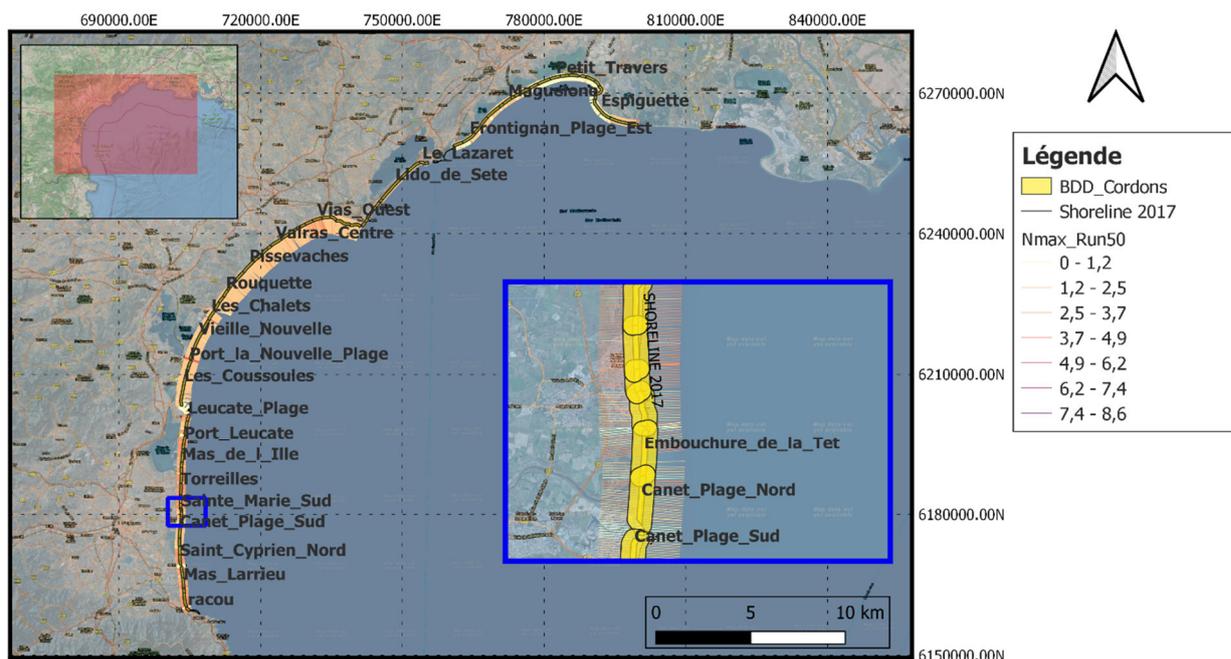


Figure 8. Planimétrie large du Golfe du Lion couvrant tous les secteurs analysés dans la région. **Zoom** en exemple de la zone de Sainte-Marie et Canet-en-Roussillon, dans le Roussillon. La couche BDS_cordons est présentée sous forme de buffer des secteurs, pour favoriser la lecture. La couche des transects Nmax_Run50 issue de la base des données des études stratégiques est visualisée. Les maximales sont prises en compte pour chaque secteur.

3.1.3. Discussions sur la méthodologie des calculs de vulnérabilité

Dans le cadre de la définition d'un indice de vulnérabilité des systèmes dune-plage à l'échelle régionale, ce travail repose sur la valorisation des études, notamment du BRGM et de l'EID en collaboration avec la DREAL, conduites afin d'évaluer d'une partie les caractéristiques des cordons, leur état, etc., de l'autre les aléas marins majeurs sur le littoral. L'indice de vulnérabilité côtière produit, visant à simplifier un certain nombre de paramètres en interaction, est d'autant plus pertinent sur un littoral qui a été fortement remodelé par les activités humaines. De plus, la nature multi-source de l'indice est une caractéristique très importante. Les conditions géomorphologiques, marines, les caractéristiques de la végétation et les effets anthropiques ont été pris en compte. On considère que l'évaluation différée dans le temps (2011 pour les conditions marines et 2015 pour la géomorphologie) des variables utilisées n'a pas d'impact significatif sur le calcul de l'indice global en raison de l'utilisation des données du LiDAR 2009, dans les deux.

La vulnérabilité est fortement affectée, et de manière plutôt homogène, par les variables géomorphologiques.

Une discussion peut être ouverte sur les simplifications nécessaires pour l'élaboration d'indice partiels. Tout d'abord, on souligne que l'indice partiel lié aux effets éoliens n'est pas pris en compte, comme c'est le cas dans certaines études (Ciccarelli et al., 2017). Les données nécessaires pour la mise en place d'un tel indicateur, n'étant pas disponibles. Par ailleurs, ce type d'indicateur étant souvent peu fiables à échelle globale du fait de la complexité des processus éoliens, le choix a été fait de ne pas retenir ce type d'indicateur.

Les données liées au potentiel approvisionnement en sable, les creux de déflation en pourcentage du cordon entier, etc. peuvent représenter des sources d'information complémentaires au calcul de la vulnérabilité globale, dans de prochaines études, mais demeurent aujourd'hui trop partielles à l'échelle régionale.

Dans l'indice partiel de l'influence marine, les potentiels effets de la marée n'ont pas été inclus dans le calcul, car considérés négligeables. Puis, dans l'idée de produire un indice simplifié, les paramètres corrélés à p. ex. l'orientation de la côte, la granulométrie des sédiments, la fréquence ou la durée des tempêtes, qui peuvent influencer les résultats n'ont pas fait l'objet d'analyses spécifiques.

Enfin, il est important de souligner que depuis 2015, certains secteurs ont pu évoluer du fait des aménagements ou des évolutions naturelles, ce qui peut avoir une incidence sur les valeurs d'indices présentées ici. Dans ce contexte, une actualisation de ces données à une fréquence qui reste à déterminer s'avère nécessaire pour assurer la pertinence des indices de vulnérabilité produits.

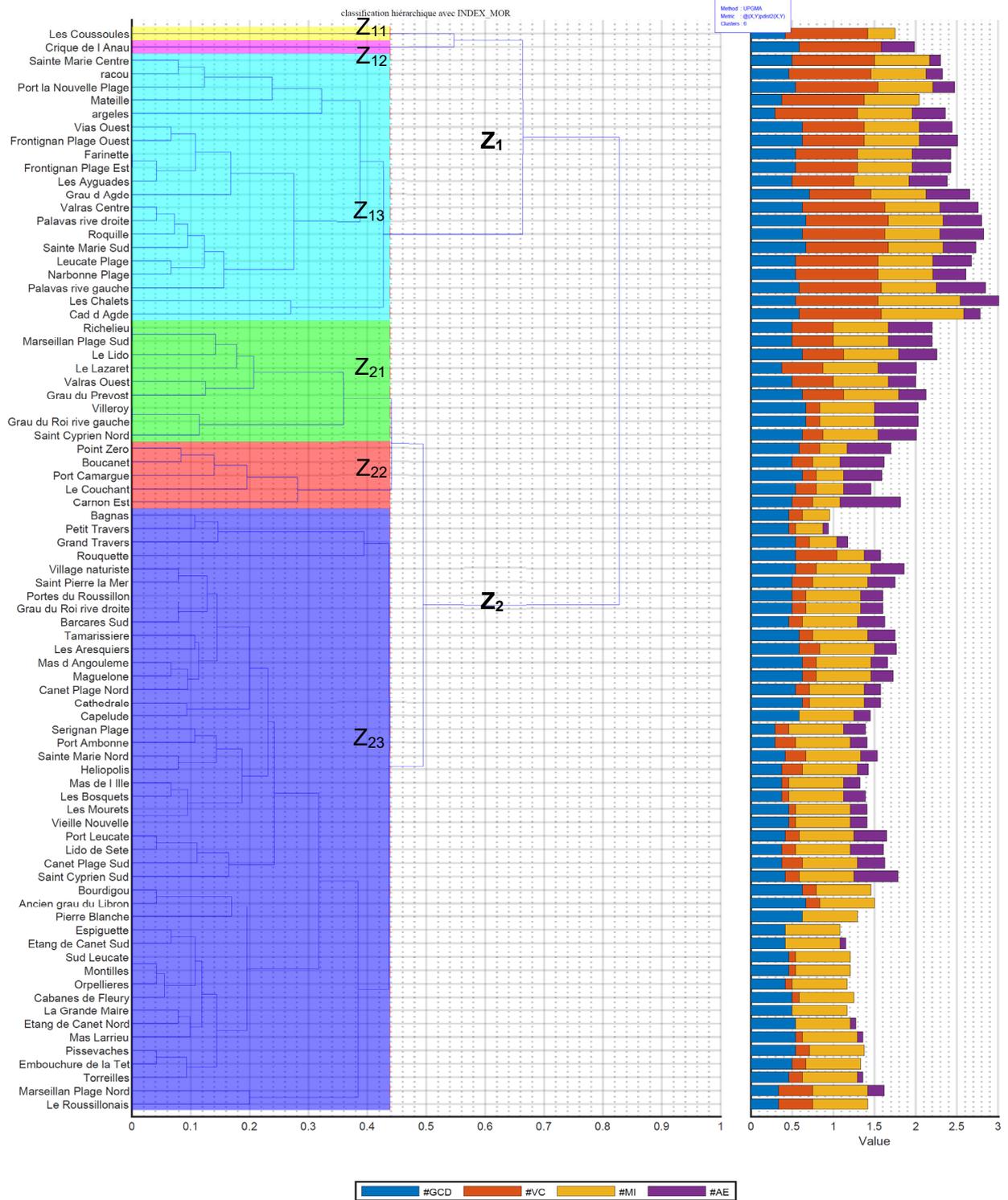


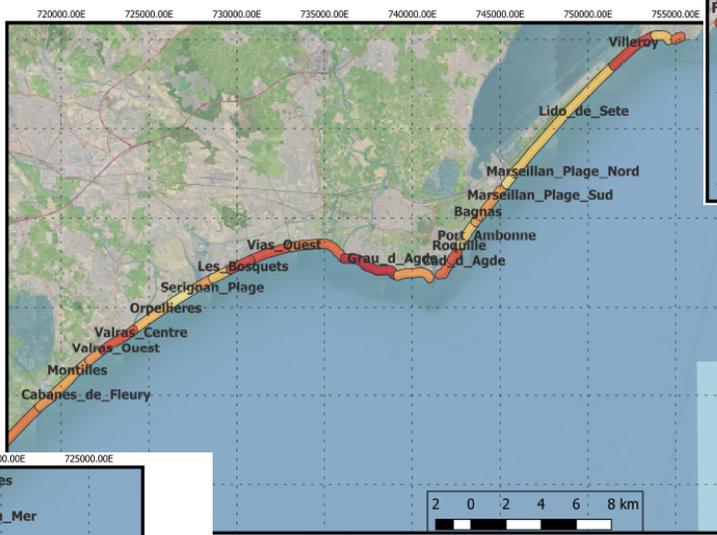
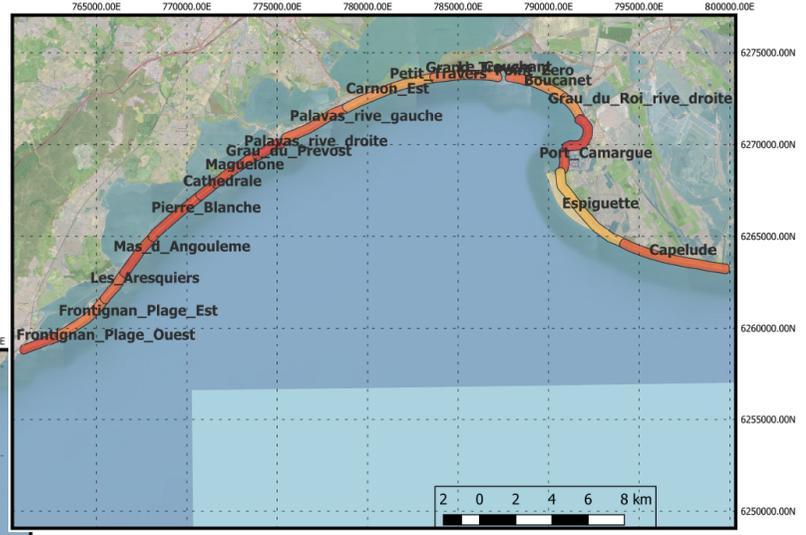
Figure 9. Dendrogramme généré par la classification hiérarchique basée sur la distance euclidienne de 84 sites. Deux grands groupes sont distingués (Z₁ et Z₂), et 6 autres petits clusters sont générés (couleurs différentes). Exemples d'abréviations : conditions géomorphologiques du système plage dunaire (GCD), conditions de la végétation (VC), l'effet anthropique (AE) et l'influence marine (MI).

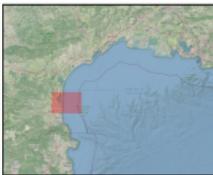
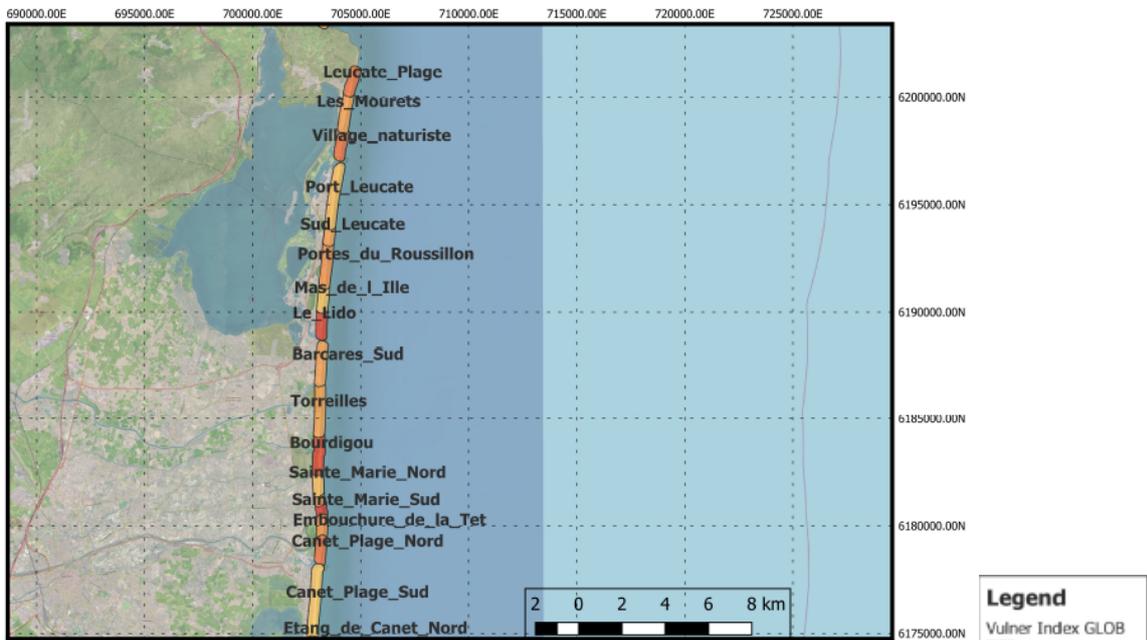
Legend

Vulner Index GLOB

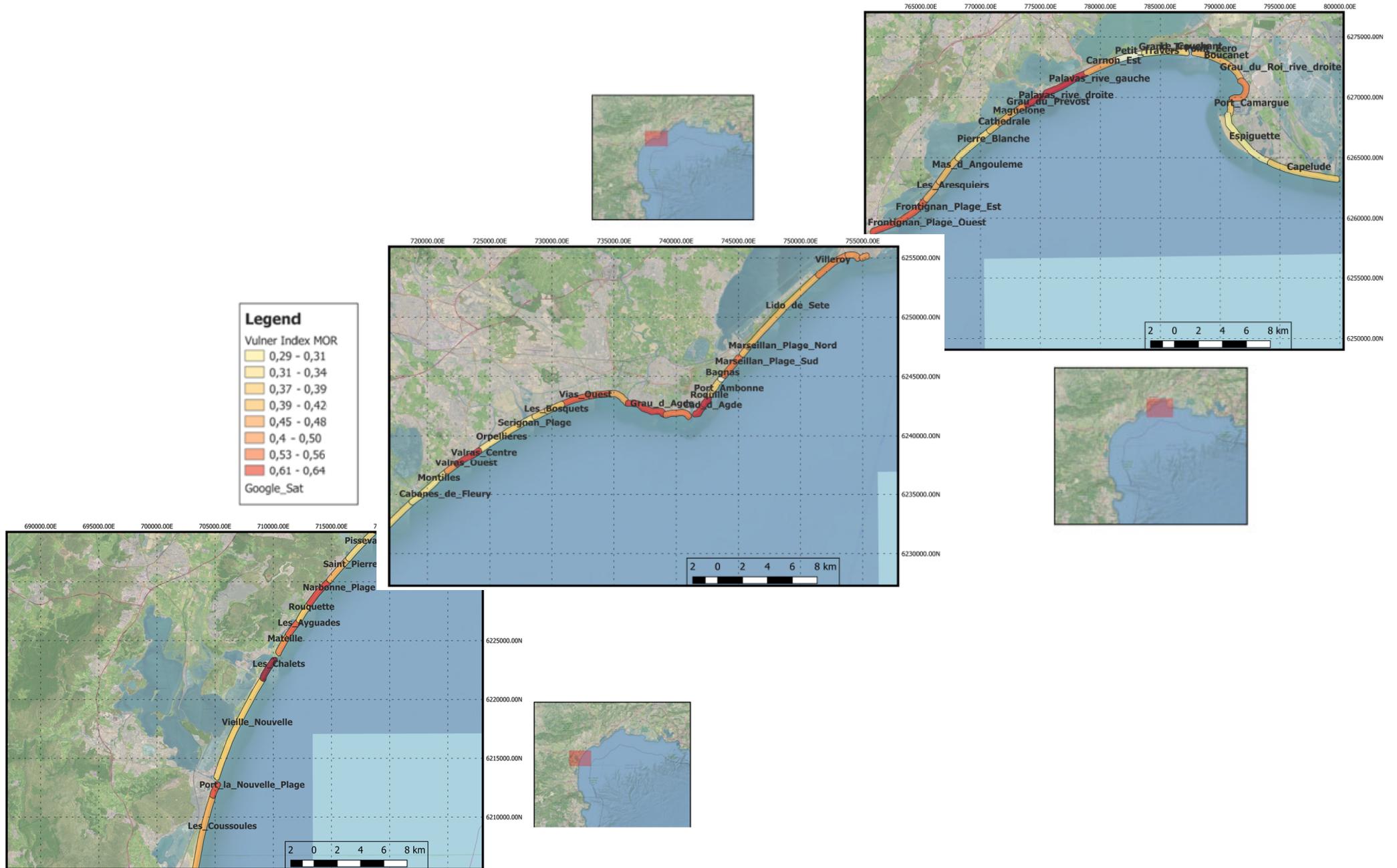
0 - 0,26
0,26 - 0,29
0,29 - 0,31
0,31 - 0,34
0,34 - 0,37
0,37 - 0,39
0,39 - 0,42
0,42 - 0,45
0,45 - 0,48
0,50 - 0,53
0,58 - 0,61
0,61 - 0,64
0,69 - 0,72

Google_Sat





RP-70384-FR – Effet de l'érosion événementielle sur la submersion marine



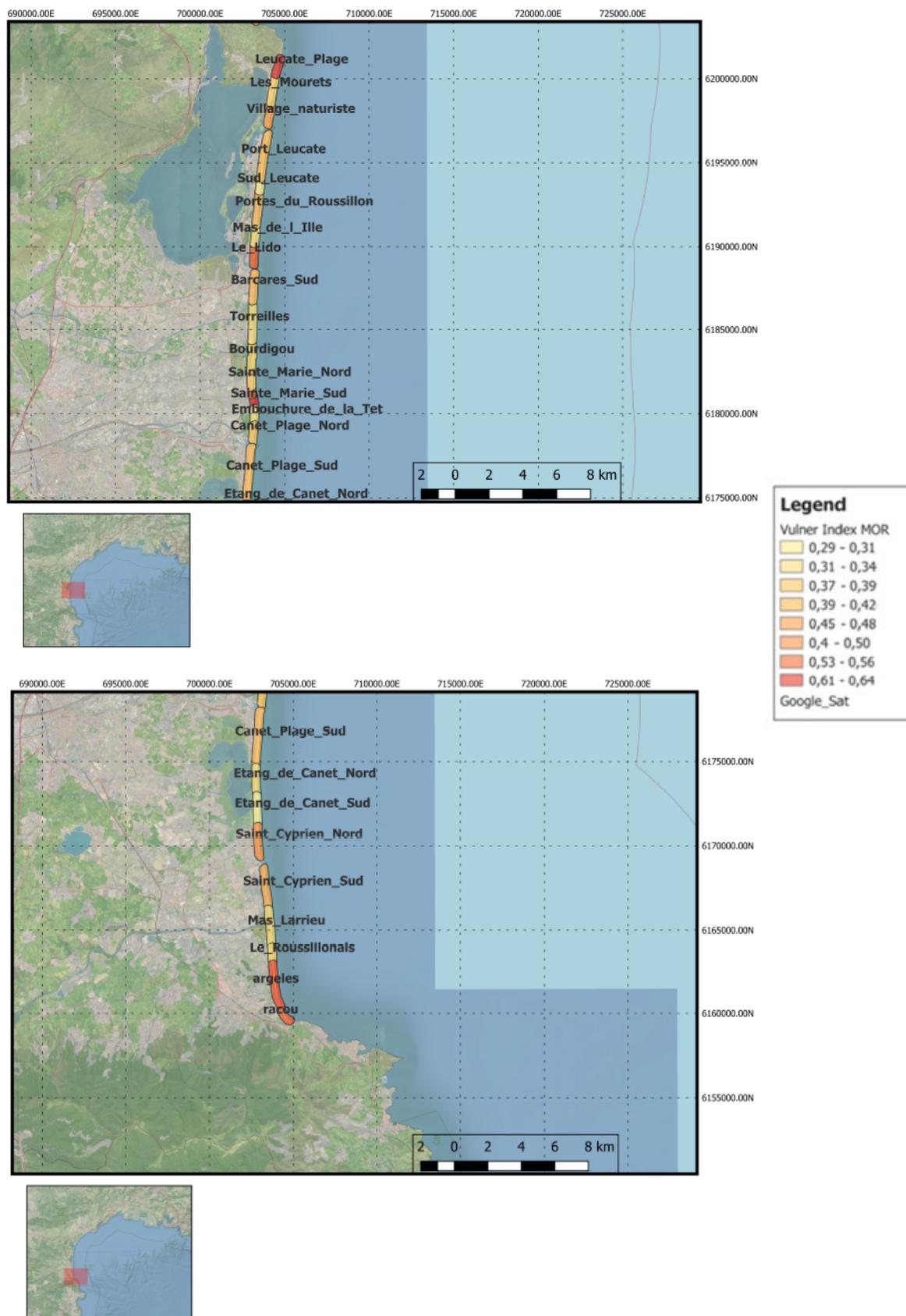


Figure 10. Cartographie de l'indice de vulnérabilité partiel, donné par les conditions géomorphologiques du système plage dunaire (GCD), à l'échelle régionale.

3.2. DONNEES ET ANALYSES POST-TEMPETE

Les données avant et après un événement de tempête sont indispensables pour bien comprendre les mécanismes en jeu et bien pouvoir attribuer les dégâts observés à un événement donné. Ces données sont toutefois relativement rares. Des initiatives de structuration de Réseau régionaux dédiés à la collecte, l'analyse et la bancarisation d'informations relatives aux tempêtes et à leurs impacts permettent toutefois de disposer de plus en plus de données quantifiées. Parmi les précurseurs à l'échelle nationale, le Réseau Régional de Suivi des tempêtes en Occitanie est structuré depuis 2010 pour capitaliser l'information disponible et favoriser les observations de terrain pendant les événements les plus importants.

Le réseau tempête, décrit dans paragraphe 2.2.2, se concentre notamment sur la collecte d'informations très importantes pour comprendre les impacts morphologiques et les potentiels points de submersion pendant et après une tempête. Ces informations collectées lors de visite de terrain, restent localisées aux sites les plus touchés, les plus vulnérables, ou à un certain nombre de sites prédéterminés ce qui ne permet pas de disposer d'information complètement exhaustive à l'échelle régionale.

Dans le cadre de l'ObsCat, des levés photogrammétriques spécifiques post-tempête ont été réalisés en Mars 2018 et Janvier 2020, sur l'ensemble du périmètre de l'ObsCat. Deux de ces suivis sont utilisés ici. Le premier a été effectué suite à la tempête qu'a subi le littoral sableux catalan du 28/02/2018 au 01/03/2018. Il a été mis en œuvre par la société ECOCEANODRONE le 6 mars 2018 (Paragraphe 2.2.3). Le second a été mis en œuvre le 25 janvier 2020, juste après la tempête Gloria, entre le 20/01/2020 et 24/01/2020.

Ces types de levés ont permis de cartographier par photo-interprétation les impacts le long du linéaire côtier. Ces impacts ont été divisés en 4 catégories principales (Bossennec et Palvadeau, 2018), cf. fig. 11 :

- Franchissements/recouvrements dunaires : ils se manifestent par des recouvrements partiels, parfois complets, de la végétation dunaire par du sédiment révélant une atteinte par les vagues, par franchissement de la dune par le jet de rive. Ils ont été repérés par une atteinte manifeste de la végétation (salinisation) ou son recouvrement par le sable sur les cordons dunaires ou par la présence de laisses de mer sur les dunes ;
- Percées dunaires : zones où la mer a traversé le cordon dunaire empruntant le plus souvent les chemins d'accès aux plages, aménagés ou spontanés, qui constituent des zones de faiblesses altimétriques. Il ne s'agit pas à proprement parler de brèches, la mer n'ayant fait qu'emprunter ces zones préexistantes sans les créer ou les recreuser par action mécanique. Il en résulte en arrière dune la présence de dépôts sableux sous forme d'éventails et/ou de laisse de mer constituée de bois flottants et de déchets ;

- Secteurs submergés en arrière-dune : zones anormalement humides ou inondées. Elles ont été repérées par comparaison de l'orthophotographie post-tempête avec des images satellites précédentes. On retrouve aussi sur ces secteurs des laisses de mer ;
- Dégâts urbains : zones submergées en front de mer, présence de laisses de mers, dépôt de sable : dégâts encore visibles sur les zones urbanisées, routes, places, zones piétonnes.

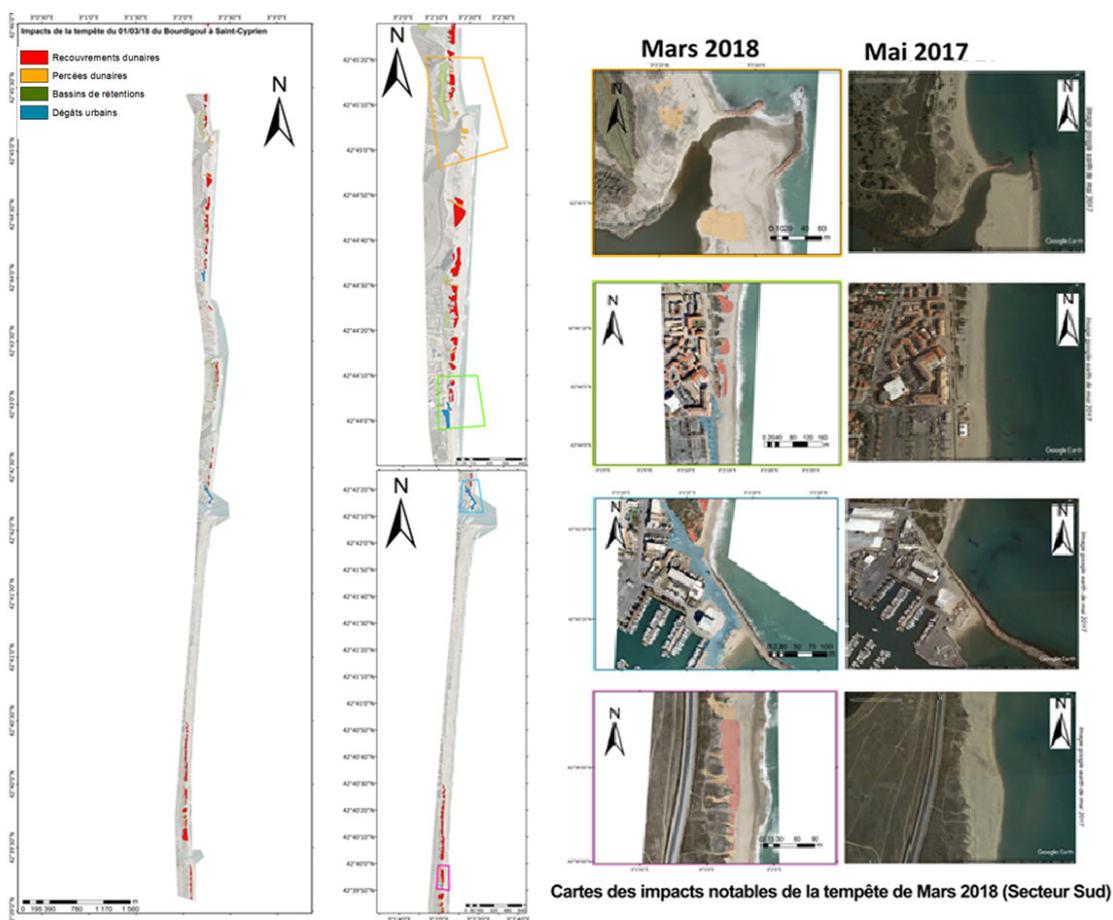


Figure 11. Exemples d'impacts de la tempête du 28 février au 2 mars 2018 sur différents secteurs de l'ObsCat. Source: Palvadeau et al., 2018.

La tempête Gloria, du 20 au 24 janvier 2020, caractérisée par une direction de provenance Est a impacté le littoral du Roussillon, et pour exemple une carte d'impacts de la tempête sur différents secteurs du Roussillon est présentée sur la Figure 12.

Afin de mieux comprendre les dégâts observés, une comparaison en utilisant le Modèle numérique de surface (MNS) du levé post-tempête Gloria avec celui de la campagne ObsCat précédente (Octobre 2019) a été menée dans les secteurs choisis (définis plus bas), et présentée dans le chapitre 4, afin d'investiguer plus dans le détail l'évolution des paramètres morphologiques pour la validation de la modélisation numérique.

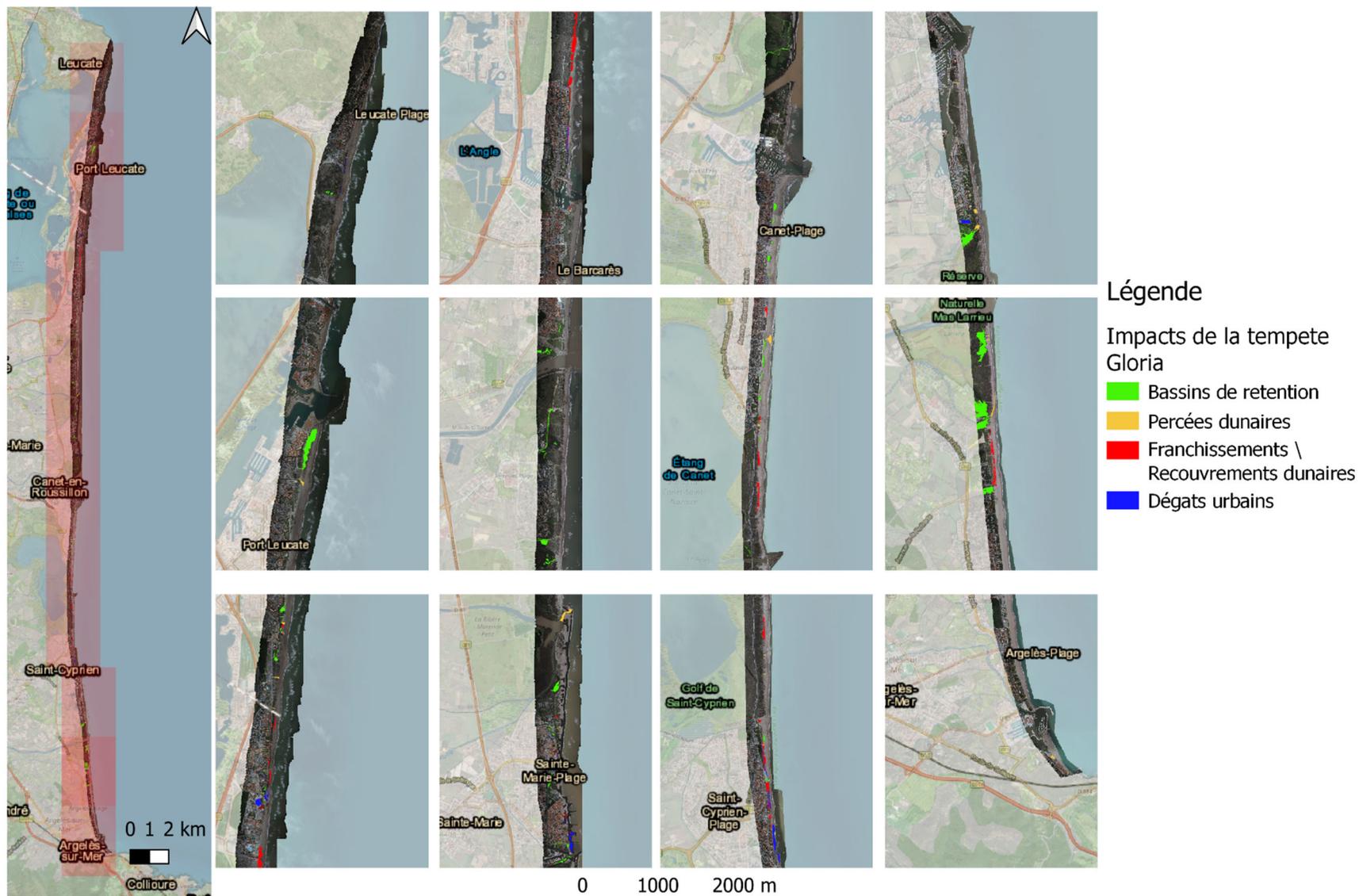


Figure 12. Exemples d'impacts de la tempête Gloria du 20 au 24 janvier 2020 sur différents secteurs du Roussillon.

3.3. CHOIX DES SITES A MODELISER ET LEUR DESCRIPTION

Plusieurs sites ont été sélectionnés pour un travail approfondi de modélisation des relations entre aléa érosion et submersion. Le choix a été fait en concertation avec le comité littoral 21.

Afin de sélectionner ces sites, plusieurs critères ont été utilisés :

- Une forte vulnérabilité caractérisée par les indices de vulnérabilité et notamment un GCD supérieur à 0,5.
- Disponibilité des données topographiques, et notamment de Lidar, permettant une représentation et une description du système plage-dune sur plusieurs kilomètres de long, et le repérage *a priori* des zones les plus fragiles ;
- Disponibilité des données bathymétriques détaillées et notamment le contenu des dalles SHOM représentant le plus correctement possible le domaine ;
- Disponibilité des données de forçages de tempête et statistiques traitant des périodes de retour des événements ;
- Disponibilité des données de niveaux marins et statistiques de périodes de retour ;
- Disponibilité des données granulométriques et sur la sédimentologie de la plage ;
- Disponibilité des données d'évolution du trait de côte / pied de dune / points de submersions sous l'effet de tempêtes connues

En se basant sur ces critères les sites retenus conjointement avec la DREAL, après concertation, sont les sites de Canet Nord et Frontignan.

:

3.3.1. Canet Nord

Le secteur de Canet Nord est situé au nord de la jetée portuaire de Canet-en-Roussillon, jusqu'à l'embouchure de la Têt (Figure 14). Le trait de côte (TdC) du secteur possède une orientation N-S et l'avant-côte présente un système de doubles barres festonnées. La dérive littorale dominante est dirigée vers le Nord. À 1 km au Nord du port se présente l'embouchure du fleuve Têt puis le port de Sainte Marie-Plage situé sur un ancien débouché du fleuve.

Le secteur rentre dans la cellule hydro sédimentaire n.7 (secteur N10, Figure 14), suivi par le réseau ObsCat. Le littoral de cette cellule est caractérisé par des sables grossiers (diamètre en moyen supérieur à 0,6 mm) et des plages de faible largeur qui s'élargissent à l'approche de l'embouchure du Bourdigou (AERMC, 2000). L'avant-côte du secteur est caractérisée par une barre externe située entre 500 et 550 m de la côte, entre -6 et -7 m de profondeur environ (Christmann et al., 2017). Le système de barres internes est plus complexe et évolutif. On retrouve ainsi 1 à 2 barres internes selon les époques de l'année et les différentes observations existantes.

En général, la cellule sédimentaire présente plusieurs niveaux d'urbanisation, mais le nord du port de Canet reste faiblement artificialisé. Des reprofilages, des rechargements en sable (27 800

m³ en 2018, PMM), et des opérations de restauration dunaire y sont réalisées en fonction des besoins. Les jetées portuaires de Canet-en-Roussillon, perturbent le transit sédimentaire longitudinal qui s'opère naturellement du sud vers le nord, en le bloquant au sud de la jetée. En conséquence, au nord du port de Canet, la plage du Sardinal présente un déficit chronique en sable. À l'inverse, les zones situées au sud de ces ouvrages sont des zones d'accumulation sédimentaire (Christmann et al., 2017).

La plage est étroite et relativement pentue selon les périodes et les zones, des entailles d'érosion sont souvent constatées à la fin des périodes hivernales. Les reprofilages réalisés régulièrement peinent à maintenir une largeur de plage suffisante dans la partie sud du secteur. Il en est de même un peu plus au nord au niveau du phare où le pied de dune est régulièrement érodé au cours de l'hiver. Ces constatations sont les signes d'un déficit chronique en sable de la plage émergée en lien avec la perturbation sédimentaire créée par les digues du port de Canet.

Juste au nord, l'embouchure de la Têt est caractérisée par une forte variabilité morphologique spatiale et temporelle, contrôlée à la fois par des dynamiques alluviales et marines. Cette embouchure, contrairement à l'Agly et au Bourdigou, n'est ni chenalisée ni endiguée, ce qui entraîne d'importants déplacements annuels et/ou saisonniers (Balouin, 2019). Pour donner une indication de la grande variabilité de l'embouchure et de ces flèches sableuses, Christmann et al. (2017) a évalué qu'entre septembre 2017 et avril 2018, l'embouchure s'est déplacée de 60 m vers le sud, et entre septembre 2014 et avril 2015, d'environ 200 m vers le sud à nouveau. Ces migrations entraînent la fermeture saisonnière de l'embouchure par une flèche sableuse, généralement détruite en hiver par la concomitance de crues et de tempêtes marines (Balouin, 2019).

Durant ces dernières années, le recul du trait de côte s'est accéléré au sud du secteur, dans les 100 premiers mètres au nord de la jetée du port de Canet (-17 m entre avril 2015 et avril 2018), selon le rapport d'ObsCat de Christmann et al. (2017).

Sédimentologie

Les analyses des volumes faites dans le contexte du projet *LITTOSIS* (paragraphe 2.2.5) ont permis de définir l'Unité sableuse supérieure (Upper Sediment Unit, USU), qui correspond aux sables mobilisables naturellement par les houles et la dérive littorale à l'échelle d'un événement de tempête jusqu'à l'échelle séculaire. L'interprétation fine des profils sismiques, réalisés sur les différentes unités sédimentaires, à l'aide des *réflecteurs* (marqueurs des contrastes d'impédance acoustique) qui constituent, notamment les discontinuités sédimentaires majeures, avait comme but de déterminer précisément la base et le toit de l'USU du prisme littoral (Raynal et al., 2015).

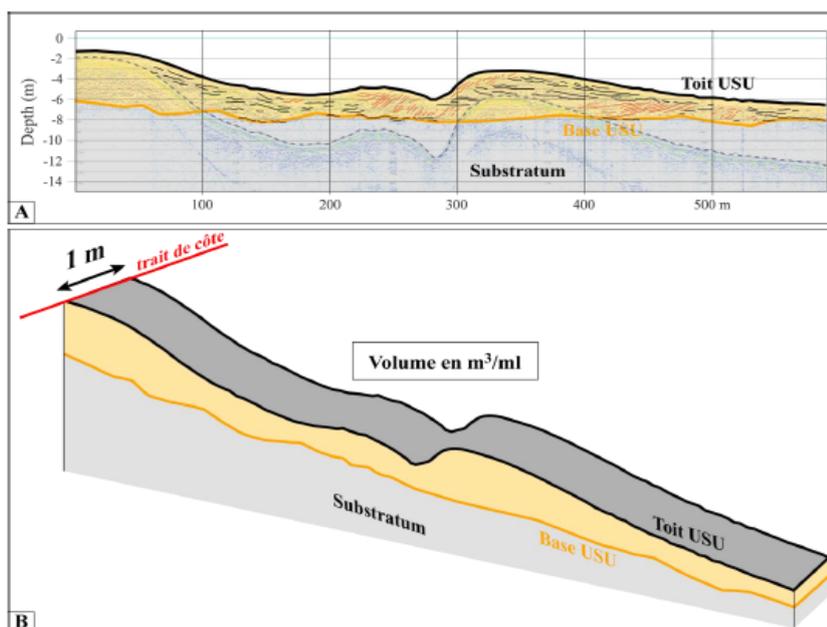


Figure 13 Exemples d'interprétation sismique de la base et du toit de l'USU. Notons la présence de multiple reflections, marque ici en pointillés. (B) - Schéma de détermination du volume de l'USU en m^3 par mètre linéaire (m^3/ml). Source : Raynal et al., 2015.

À partir de la détermination de la base et du toit de l'USU, le volume de cette unité est calculé en extrapolant son aire, sur le profil, sur une longueur de côte de 1 mètre (Figure 13). Le volume de l'USU en m^3 par mètre linéaire (m^3/ml) est obtenu. Le profil débute à 50-100 m du trait de côte (en fonction de la bathymétrie et des conditions de houle qui permettent ou pas d'approcher au plus près de la plage) et finit à environ 800 m au large, donc une longueur approximative de 700 m.

Le volume de l'USU dans le secteur de Canet, ici considéré, est de l'ordre de 2000-2500 m^3/ml au nord du Port et entre 750 et 1250 m^3/ml au nord de l'embouchure de la Têt, ce qui fait de ce secteur l'un des mieux dotés en sable dans la Région (Raynal et al., 2015). D'après ces auteurs, l'USU repose sur une surface dont « la compaction et la cimentation (...) ne font aucun doute » sans qu'il soit possible d'identifier clairement la nature de ce substratum. Il semble toutefois qu'au niveau des embouchures, des lits de galets forment la base de l'USU.

D'après les observations faites dans le contexte de l'ObsCat, un bilan sédimentaire depuis 2013

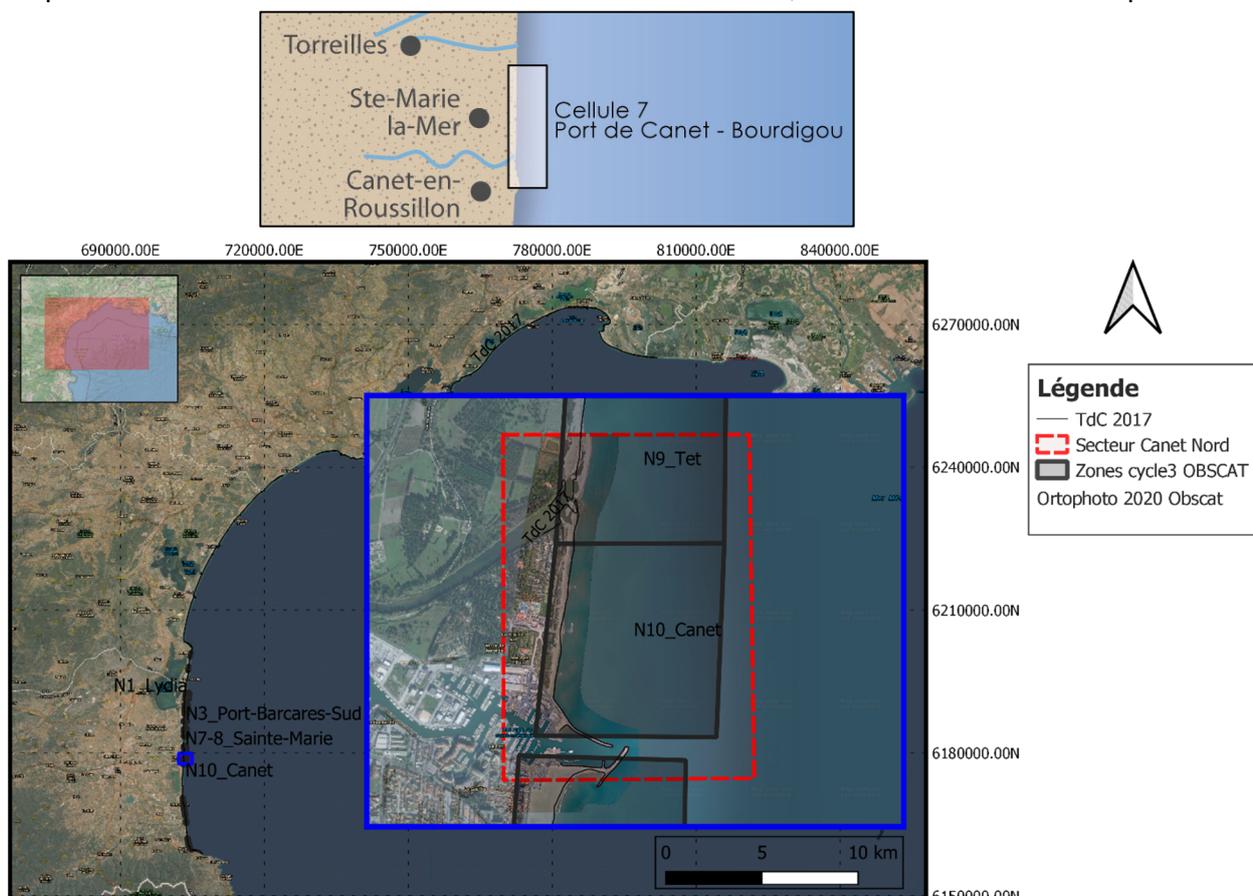


Figure 14. La cellule hydro-sédimentaire n.7 de l'ObsCat est présentée (en haut). Les secteurs, de la cellule 7, suivis par l'ObsCat, à proximité géographique de la zone du site d'étude de Canet nord (rouge) sont aussi montrés (en bas). Le TdC de référence, daté 2017 est présenté. L'orthophoto de la dernière campagne de l'ObsCat, datée d'octobre 2020, est superposée au fond de carte.

est disponible sur le secteur. L'évolution topo-bathymétrique, depuis 2013 sur la zone (secteur ObsCat, Figure 14) montre globalement en forte accréation jusqu'à l'automne 2015 (+149 717 m³) puis une stabilité jusqu'à l'automne 2016. Mais, à partir d'avril 2017, le secteur enregistre une baisse de son bilan sédimentaire, en fin de période hivernale 2017/2018 le bilan cumulé au printemps 2018 est de 93 614 m³, soit une baisse de 56 103 m³ depuis septembre 2016 (Palvadeau et Fabre, 2020). Au printemps 2019, ce bilan repart à la hausse consécutivement au transfert et à l'étalement sur la proche avant-côte d'une partie des volumes de sable rechargés en mai/juin 2018 sur la plage émergée. Le bilan sédimentaire de la zone émergée du secteur est très instable. La plage a enregistré des baisses importantes de son bilan comme lors de la période de mars 2016 à avril 2017. Le rechargement réalisé sur la plage du Sardinale en mai/juin 2018 a permis une hausse importante du bilan. Même si une partie du volume rechargé a été perdu au cours de l'hiver 2018-2019 il reste disponible dans les petits fonds. La plage émergée restant très étroite dans la moitié sud du secteur, et étant située dans une zone de perturbation du transit sédimentaire, le secteur reste malgré tout très vulnérable.

Un recul accéléré du trait de côte au sud du secteur est enregistré, en particulier dans les 100 premiers mètres au nord de la jetée du port de Canet (-17 m entre avril 2015 et avril 2017, cf. Figure 16). Le rechargement réalisé en mai/juin 2018 a semble-t-il contenu ce phénomène même

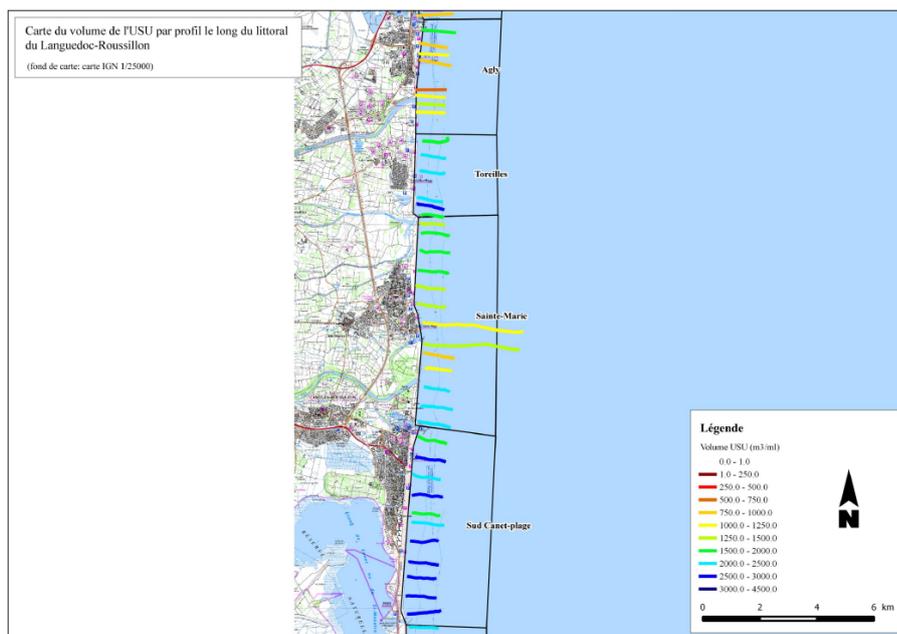


Figure 15. Carte du volume de l'USU par profil. Cette carte présente les résultats, profil par profil, à l'échelle du Roussillon, secteur de Canet. Source : Raynal et al., 2015.

si le trait de côte après l'hiver 2018-2019 occupe approximativement la position qu'il avait avant ce rechargement.

Un rechargement en sable a été réalisé en mai / juin 2018 par PMM sur ce secteur avec des sédiments de dragage de l'avant-port de Canet-en-Roussillon. Les données ObsCat disponibles permettent d'apprécier la position du trait de côte avant ce rechargement (avril 2018), quelques mois après en octobre 2019, puis après l'hiver suivant en avril 2019. On constate ainsi que l'élargissement de la plage par ce rechargement entre le parking de la plage au nord et la digue portuaire au sud a quasiment été totalement perdu au cours de l'hiver 2018-2019, le trait de côte en avril 2019 étant sensiblement à la même position qu'avant le rechargement en avril 2018. Seule la courte portion entre l'encoche de la concession du Swim-Club et le parking de la plage, ainsi que les derniers 60 m de la plage au sud continuent de profiter des bénéfices de ce rechargement en termes de largeur de plage (Palvadeau et Fabre, 2020).

D'autre part, les modifications du trait de côte dans la période 2013-2019, dans la zone de l'embouchure de la Têt, sont parmi les plus importantes de tout le linéaire de l'ObsCat en raison du caractère encore naturel du site. Les migrations de l'embouchure de la Têt contrôlent fortement les mouvements du trait de côte. D'après Christmann et al. (2017), entre septembre 2014 et septembre 2017, la migration vers le sud de l'embouchure a fait reculer de 34 m la position du trait de côte, au nord, et inversement a engendré une avancée du même ordre de grandeur sur la partie sud. Au cours de la période octobre 2018 – avril 2019 la migration de l'embouchure vers le sud, jusqu'au niveau du nord de la plage du Brasilia est une première depuis le début des suivis de l'ObsCat en septembre 2014.

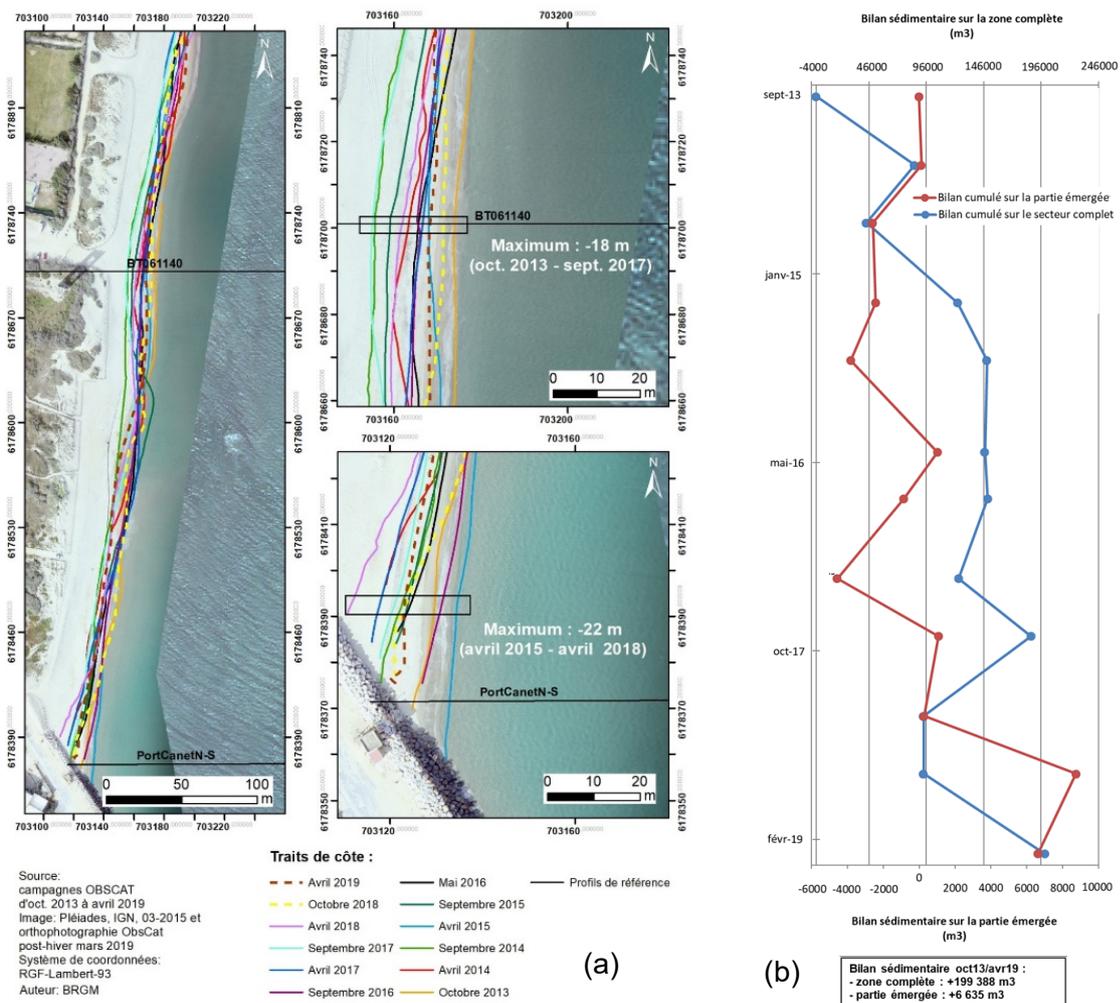


Figure 16. (a) Carte des traits de côte entre octobre 2013 et avril 2019 pour le secteur de Canet Nord. (b) Bilans sédimentaires cumulés zone complète (topobathymétrie) et zone émergée entre octobre 2013 et avril 2019 pour le secteur. Source : Christmann et al., 2017.

3.3.2. Le Lido de Frontignan

Le secteur de Frontignan est situé au nord de la jetée portuaire de Sète, jusqu'aux Aresquiers (Figure 17). Ce cordon littoral de moins de 10 kilomètres sépare la mer d'une succession d'étangs

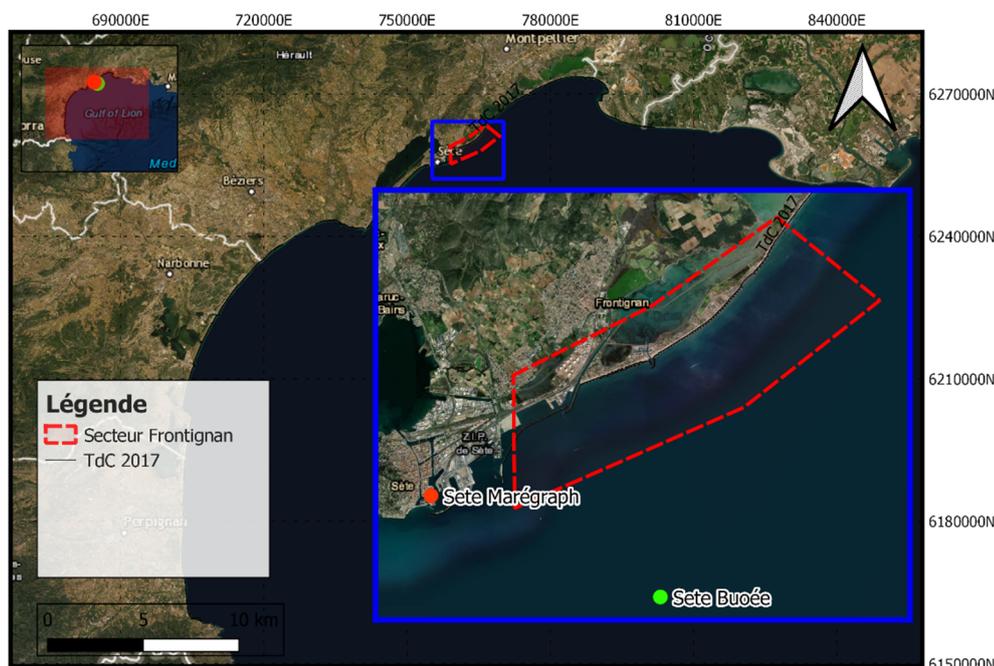


Figure 17. Localisation du site d'étude de Frontignan, de l'houlographe et le marégraphe de Sète. Le TdC de référence, daté 2017 est présenté.

accolés les uns aux autres : Mouettes, Ingril, Vic et connectés d'un point de vue hydraulique. Au large des Aresquiers, un platier rocheux (grès de plage) d'origine Pliocène affleure entre les isobathes 5 m et 10 m. Le littoral est légèrement convexe avec un prolongement en mer caractérisé par des isobathes qui délimitent une plate-forme de haut-fond rocheux à environ 10 m de profondeur d'eau. Au niveau de l'agglomération de Frontignan, à l'Est du port (Figure 17), plus de 4 km de plage sont équipés d'épis espacés en moyenne de 100 m. Ces ouvrages ont été construits en plusieurs étapes, à partir de le 1948, mais principalement dans les années 1970. Dans la zone des épis, la plage s'étend sur une largeur de 30 à 50 m entre le rivage et le pied de la dune (ou ce qu'il en reste), étant constituée de sables et de galets issus de la plate-forme rocheuse du haut-fond (Raynal et al. 2009). En revanche, la plage sans épis est beaucoup plus étroite, avec une largeur variant entre 10 et 30 m. Entre Frontignan et les Aresquiers, la plage sous-marine peut comporter jusqu'à deux barres longitudinales. Lorsqu'elle est présente, la barre externe prend la forme d'un bourrelet de faible hauteur. La barre interne, nettement mieux formée, apparaît asymétrique avec une face interne plutôt verticale au regard de la face externe (Kulling, 2017). Cette barre interne est le plus souvent accolée aux ouvrages perpendiculaires au rivage, voire pénètre entre ceux-ci au point d'être légèrement festonné, comme c'est le cas à l'ouest de Frontignan. Dans les profils bathymétriques de la Figure 18, le sommet est situé autour de -2 m IGN69, tandis que le fond de la fosse interne est à environ -3 m IGN69.

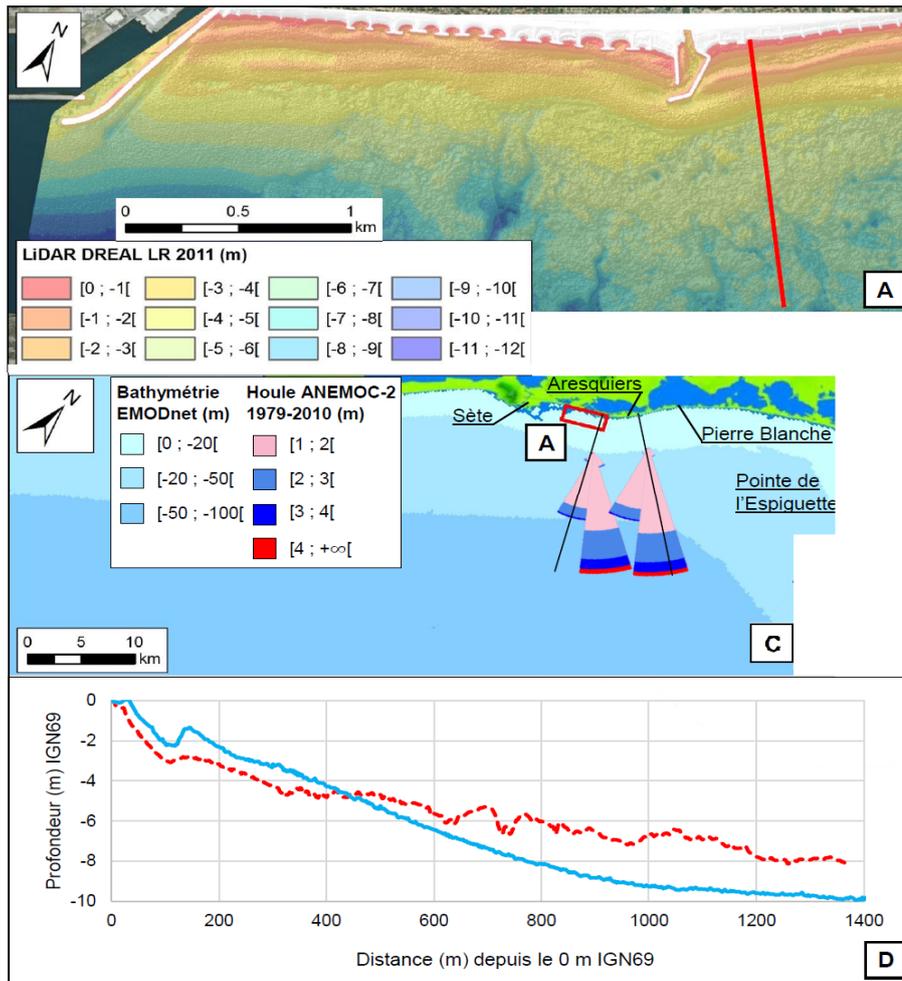


Figure 18. Morphologie des barres d'avant-côte (A), profils bathymétriques en bleu (D) et roses de houles (C) pour le secteur de Frontignan. D'après Kulling, B. (2017).

Les sédiments sur ce littoral sont fins avec quelques zones de galets. Les plages sont très étroites (inférieures à 50 m) (Durand, 1999). Les dunes sont peu développées ou fortement dégradées du fait de l'urbanisation et de l'action des vents du Nord qui repousse les sables vers le bas de plage. Le profil est quasiment rectiligne du haut de plage au bas de plage. En raison de l'orientation moyenne des houles, la dérive littorale dominante est divergente sur ce site : vers l'ouest à l'extrémité ouest du site et vers le Nord-Est sur la majeure partie du site.

Le lido de Frontignan est soumis à la fois à des problématiques d'érosion chronique de ses plages et de ses petits fonds et de submersion marine lors d'évènements tempétueux violents.

Le volume de l'USU est le plus faible de tout le Languedoc-Roussillon, inférieur à 250 m³/ml seulement (Raynal et al., 2015). La granulométrie la barre interne présente un D₅₀ est à 0,2 mm en moyenne (Aleman, 2013; Raynal et al., 2015) mais l'estran comporte des graviers et des galets.

Le Lido, déjà très fortement urbanisé a subi d'importants travaux en 2014 et 2015 pour un projet de protection, entre le canal du port de pêche et conchylicole de Sète à l'Ouest jusqu'aux Aresquiers à l'Est (Artelia, 2013). Ces travaux ont consisté en la réhabilitation des structures côtières de défense, et la construction de nouveaux épis : la réfection des 5 épis à l'Est immédiat du port de pêche, et la construction des 3 nouveaux épis aux Aréquiers, puis allongement et/ou raccourcissement d'autres épis dans la zone de la Dent Creuse, enfin la création d'un cordon

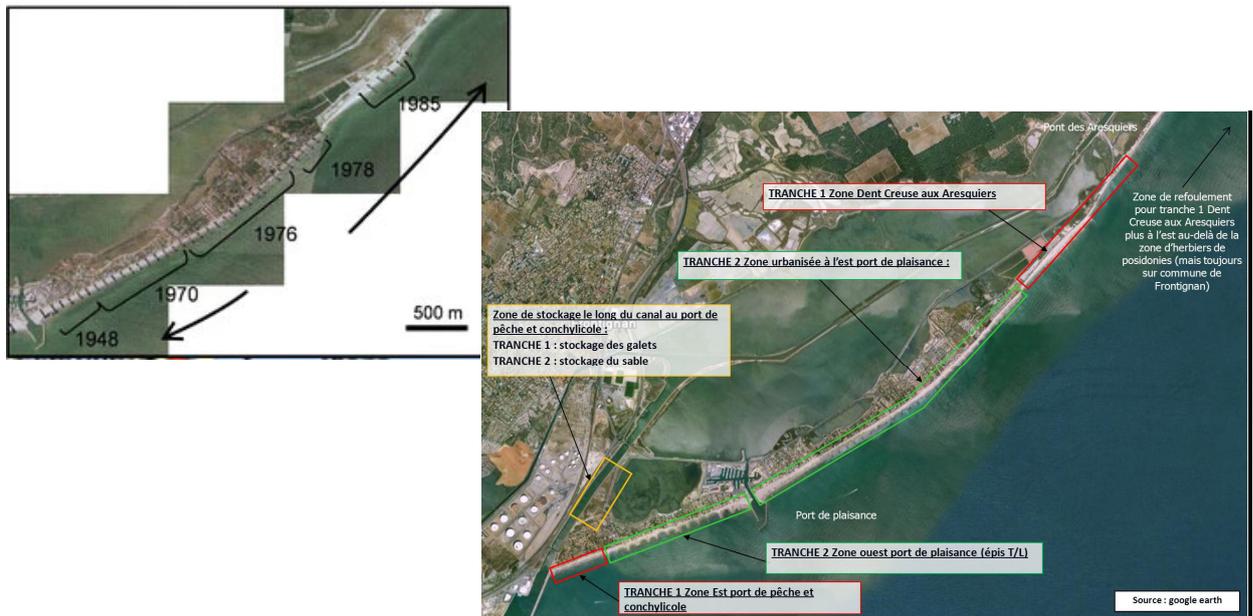


Figure 19. A gauche, date de construction des épis et principales directions de la dérive littoral. A droite la localisation des travaux récents sur le lido de Frontignan. Source : Artelia (2013) et Sabatier et al. (2009).

d'arrière-plage et soubassement en galets au niveau des Aresquiers (Figure 21). Le rechargement en sable des plages a été fait, et un stock de galets a été placé en attente pour des recharges futures.

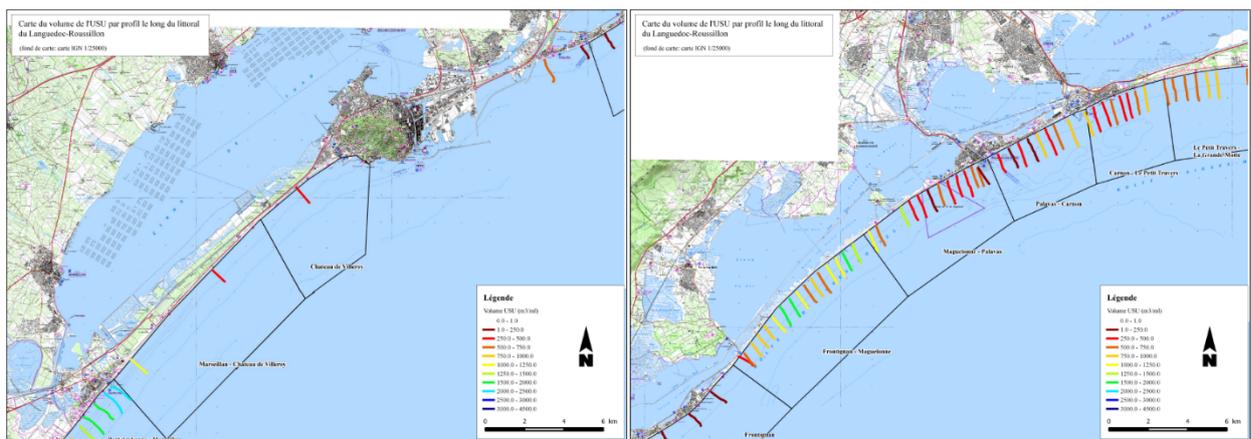


Figure 20. Carte du volume de l'USU par profil. Cette carte présente les résultats, profil par profil, à l'échelle du Languedoc, secteur de Frontignan. Source : Raynal et al., 2015.

4. Architecture et mise en place de la modélisation

L'érosion événementielle pendant une tempête et la submersion marine associée au phénomène ont été simulées pour un événement historique (validation de la modélisation) et pour un scénario extrême. Cette partie a pour but de présenter les scénarios hydrodynamiques (forçages) choisis pour simuler avec le modèle numérique XBeach, en 2D, les effets de deux tempêtes, pour valider le modèle afin de pouvoir l'utiliser pour un scénario plus énergétique de période de retour cinquantennale (chapitre 5).

La mise en œuvre du modèle sur les plages de Canet Nord et Frontignan est ainsi présenté.

4.1. CAS DE CANET NORD

Sur la base des données présentées dans le chapitre 2 et la description faite dans le paragraphe 3.3.1, le scénario hydrodynamique choisi afin d'effectuer la calibration du modèle sur un cas réaliste est la tempête Gloria, survenue en Janvier 2020.

La tempête Gloria

Du 20 au 24 janvier 2020, le Golfe du Lion a subi un épisode météorologique marquant avec une baisse du champ de pression, des vents très forts de flux d'est à sud-est, des vagues de secteur Est et des précipitations très importantes sur le littoral et l'arrière-pays. L'équivalent de 4 à 5 mois de pluies est tombé, en 72 heures, sur le Roussillon (Météo France, 2020), provoquant des crues exceptionnelles dans les départements de l'Aude et des Pyrénées-Orientales. Cet épisode particulièrement fort a fait d'objet d'un recueil et analyse des données disponibles et d'un retour d'expérience du BRGM dans le cadre du réseau tempête (Balouin, 2019) et du bilan annuel de l'ObsCat (Palvadeau et Fabre, 2020).

- Les conditions de vagues

À partir du début, le 20/01/2020 à 06:00 jusqu'à la fin de la tempête : 24/01/2020 à 23:30 Janvier, les valeurs maximums des hauteurs significatives mesurées par les houlographes de la DREAL LR à Leucate et Banyuls sont supérieures (respectivement 4.85 m et 5.92 m) à celles enregistrées à Sète qui sont de 3,45 m au pic de la tempête et à l'Espiquette, de 3.07 m. La période associée à la houle significative (notamment la valeur au pic) mesurée sur les différents sites est variable, comprise entre 7.6 à l'Espiquette et 10.1 secondes à Banyuls.

Dans la Figure 21 sont présentées les séries temporelles des évolutions de la hauteur significative H_s , période T_p et direction du pic au cours de la tempête Gloria, enregistrées par la bouée de Banyuls.

Les directions enregistrées de la houle sont essentiellement de provenance secteur Est, Est-Sud-Est pour les deux bouées du Roussillon, et Sud-Sud-Est pour celles en Languedoc.

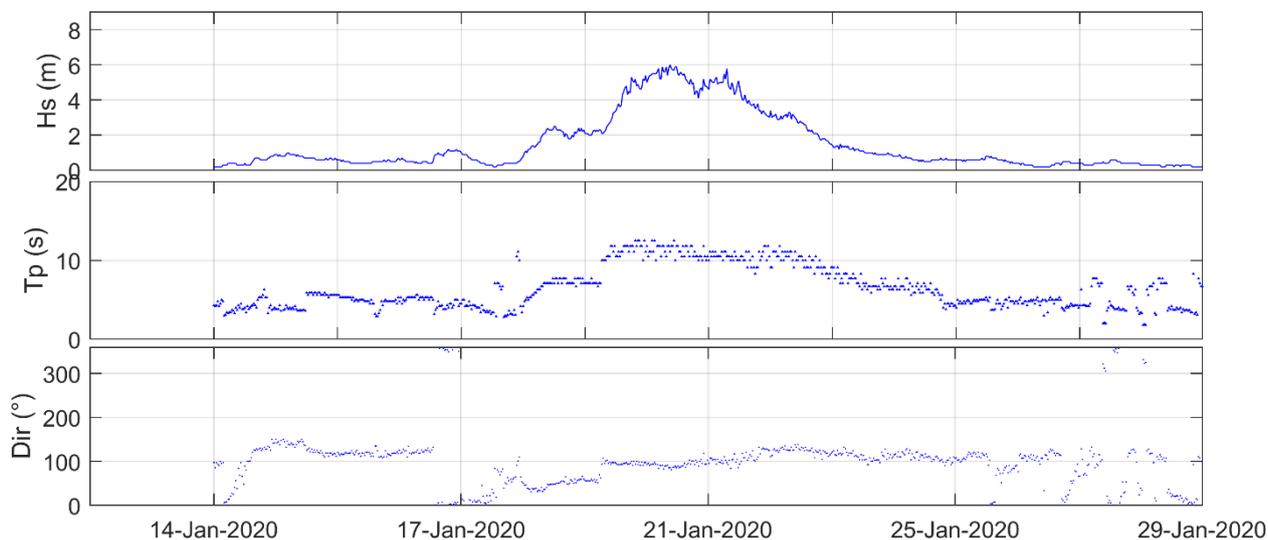


Figure 21. Tempête Gloria. Enregistrements de la bouée de Banyuls.

- Le niveau marin

Les niveaux maximums de hauteur d'eau ont été enregistrés dans la journée du 22 Janvier 2020 par les marégraphes et ne sont pas très élevés, et surtout moins importants à Port-Camargue (0.46 m NGF) et Sète (0.41 m) qu'à Port-Vendres (0.56 m NGF) et Port-La-Nouvelle (0.5 m NGF).

Les valeurs de surcote maximales instantanées calculées pour les marégraphes de la région sont donc modérées et présentent également les valeurs plus fortes pour la station de Port-Vendres (0.4 m) et Port La Nouvelle (0.39 m) (datashom.fr).

Impacts de la tempête Gloria sur Canet Nord

La Figure 22 illustre les impacts post-tempête observés sur les ortho photos du levé ObsCat. L'effet conjugué de précipitations importantes, d'un vent de direction Est à Sud-Est et d'une houle de secteur Est ont aggravé les crues en perturbant l'écoulement des rivières vers la mer. À cela s'ajoute le niveau marin et la surcote, même si leurs valeurs restent modérées.

Selon les infos recueillis juste après tempête (ObsCat), sur Canet nord, la plage du Sardinal présente une falaise d'érosion sur le haut de plage sur un linéaire important. Toutefois, lors de Gloria le bourrelet sableux installé suite à la brèche formée en 2018 (tempête du 01/03/2018) a résisté et a contribué à la protection du pôle nautique. Cette dune artificielle tout comme le cordon dunaire originel a tout de même été largement sapée par les houles de tempête. Selon les informations du Réseau Tempête, une brèche a été colmatée pendant la tempête avec du sable au Nord, au niveau de l'enracinement de la digue. Le pied de dune a été impacté, des micros falaises d'érosion apparaissent. Les ganivelles ont été arrachées sur plusieurs secteurs. Quelques déchets et bois flottés ont été déposés au nord de la Têt. La plage centrale de Canet a été entièrement submergée sans dégât apparent. Des photos prises pendant et après la tempête sont présentées dans la Figure 23, pour illustrer les dégâts subis par le secteur durant l'épisode.

À partir des données topographiques collectées par l'ObsCat en 2020, en post tempête, il est possible d'évaluer et de quantifier le recul du pied de dune, les volumes mobilisés, etc. Une analyse a été menée, en utilisant le différentiel calculé entre le MNS post-tempête, daté 25 janvier 2020 et celui de la campagne Osbcats 2019. Les deux ont été traités en utilisant une résolution très élevée (20 cm) donc permettant des calculs suffisamment fins et précis pour évaluer les évolutions. En croisant les observations faites sur les ortho photos (paragraphe 3.2) et le différentiel mentionné, il est possible d'observer les évolutions morphologiques du système plage-dune, sur des zones données. Puis, sur des profils perpendiculaires à la cote, distribués sur le secteur d'étude, on peut apprécier plus dans le détail les différences altimétriques entre les deux MNS.

La Figure 22 présente le différentiel altimétrique. Une subdivision par classes des impacts le long du linéaire côtier est cartographiée de façon visuelle, par photo-interprétation. Ces impacts sont décrits selon les 4 catégories présentées dans le paragraphe 3.2, plus une classe représentative des bois flottés. Les volumes des sédiments déplacés ont été calculés. On note une perte de sédiments la plus importante, équivalent à 900 m³, au nord de la digue portuaire. Des dépôts de quelques dizaines de m³ sur le secteur central, où des recouvrements ont potentiellement eu lieu, pendant Gloria, mais aussi potentiellement pendant la période entre les deux relevés.

Les profils perpendiculaires extraits permettent d'évaluer les variations altimétriques le long de la plage. Sur le profil 1 (en violet), juste au Nord de la digue, une érosion très forte est constatée, avec un pic de -2.2 m sur le pied de dune et le haut de la plage. C'est la zone plus impactée pendant la tempête. La zone centrale du secteur est également caractérisée par des baisses importantes de la plage, avec des valeurs maximales de -0.70 m pour les profils 2 et 4. Le profil 5 montre une érosion sur le bas de plage avec un abaissement atteignant -1.2 m. Enfin, le profil 6, juste au sud de l'embouchure du fleuve est caractérisé par une accrétion, probablement à mettre en relation avec le débit important de la Têt.

Les impacts sont visibles sur toute la plage et le pied de dune au sud. L'arrière-dune n'est pas touchée (pas de franchissements ou débordements constatés), ce qui est dû aux niveaux marins relativement bas pendant cet événement.

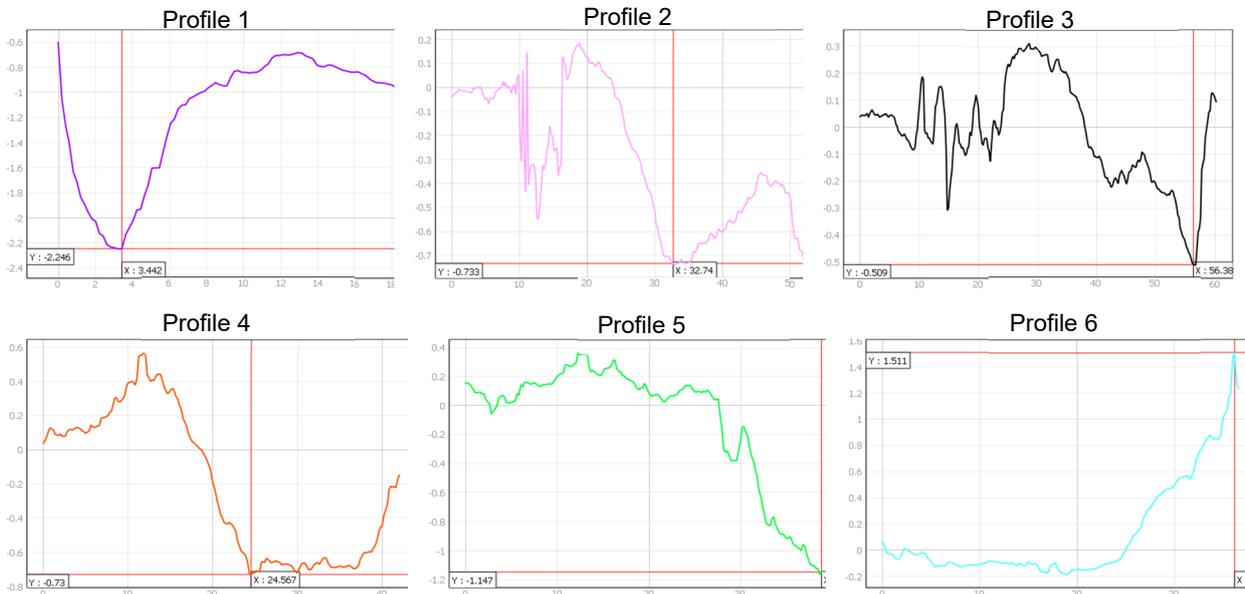
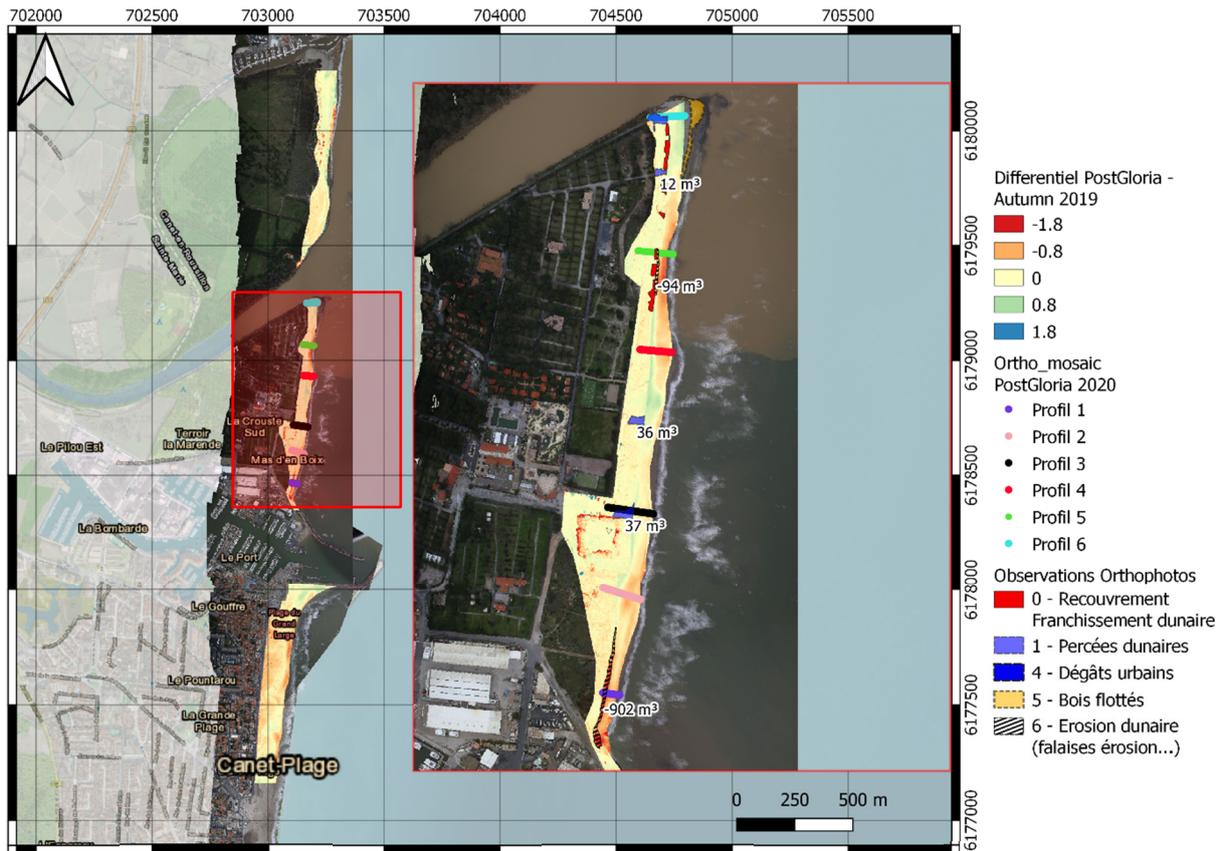


Figure 22. Différentiel entre DSM Post-tempête Gloria et DSM Autumn 2019 montré dans le secteur de Canet Nord. Variations altimétriques sur les profils, de 1 à 6, du Sud au Nord, le long du secteur.

4.1.1. Données topobathymétriques et traitements nécessaires pour la modélisation

La mise en place d'une modélisation à haute résolution de l'érosion et la submersion marine nécessite une représentation détaillée de la bathymétrie et de la topographie du secteur d'étude afin d'assurer un continuum terre-mer. Un travail important de collecte et de traitement de données est nécessaire afin de représenter avec précision ces éléments du site d'étude (parties terrestres, lagune et passes, port, proche côtier, haute mer).

La donnée Litto3D© à haute résolution, levée dans le secteur d'Argelès-sur-Mer à Port-la-Nouvelle en octobre 2014 (SHOM-IGN), constitue le socle des données utilisées pour constituer



Figure 23. Carte du secteur, avec une superposition des points des prises de vue des photos. Photos des Impacts de la Tempête Gloria. (a) et (d) Prise de vue sur Phare - Nord. (b) et (c) Prise de vue sur Phare - Sud, respectivement. Source : <http://fichetempete.brgm.fr/pages/observation.jsf?oid=46009>.

le modèle numérique pour la modélisation. L'intégration des données bathymétriques plus récentes, afin de mieux représenter le fond juste avant la tempête Gloria, a été réalisée. Pour cela, les données bathymétriques acquises durant la campagne ObsCat d'octobre 2019 ont été utilisées. Par ailleurs, une bonne représentation de la topographie pré-tempête de la plage émergée et du système dunaire est très importante pour évaluer la réponse morphologique de la tempête. Pour cette raison un Modèle Numérique de Surface (MNS) obtenu par technique de photogrammétrie, issu de la même campagne d'ObsCat a été exploité. Enfin, pour l'inclusion de la morphologie de l'embouchure de la Têt, un levé drone topobathymétrique a été utilisé (ObsCat), daté octobre 2019.

Cette donnée ne couvre que la partie terrestre et la bathymétrie externe du front de mer jusqu'à une profondeur d'environ 10 m. Les dalles bathymétriques du SHOM pour le large (profondeurs supérieures à 10 m) ont été aussi utilisées pour le traitement nécessaire à la construction du modèle topobathymétrique.

Traitement des données topobathymétriques

Dans un premier temps, la partie terrestre de la donnée Litto3D© a été traitée pour être mieux adaptée à la modélisation. De manière générale, la donnée est disponible sous deux formes, un semi de points, au format ASCII (xyz) (*Sol* et *SurSol*) et sous forme d'un modèle numérique de surface (MNS appelé MNT), au format Arc ASCII Grid (ASC). L'altitude des données points est connue avec une précision ayant une moyenne quadratique inférieure à 30 cm en terrain plat et sans végétation (Nicolae Lerma et al., 2017).

L'analyse des données *Sol* des dalles, qui doivent représenter l'altitude du terrain sans inclusion de la végétation, a permis d'identifier des zones où la végétation dunaire dense était partiellement comprise.

De plus, pour améliorer la représentation du bâti, un filtrage des données a été nécessaire. On supprime les surfaces de bâtiments du levé Lidar, puis on réinsère ces bâtiments plus finement à l'aide de la données BD_bati de l'IGN. Ces traitements ont été réalisés avec le logiciel libre Cloud-compare, notamment à l'aide de filtres de simulation de tissu CSF (Zhang et al, 2016).

La Figure 24 présente un exemple de comparaison entre le nuage de points *Sol* (original) des dalles Litto3D et le nuage après application du filtre CSF.

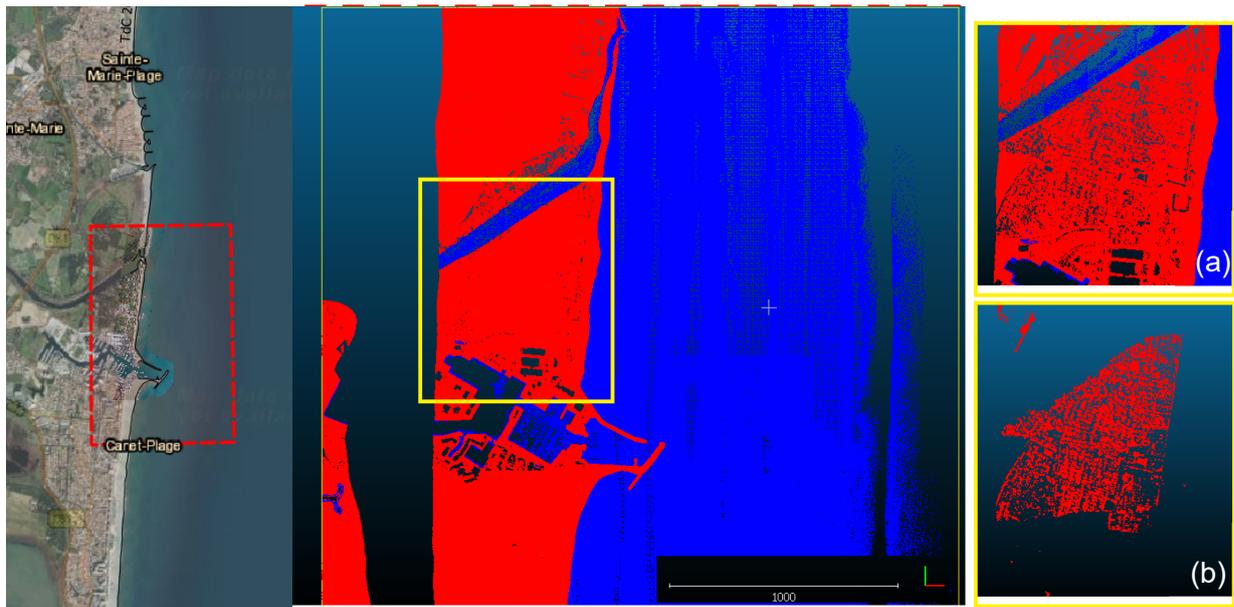


Figure 24. Zone d'étude de Canet Nord. Au milieu, nuage de points Sol non filtrés dans le logiciel Cloud Compare. A droite, (a) Nuage des points Sol filtré par l'algorithme CSF (b) Points représentatif des zones plus hautes du terrain, supprimées par l'algorithme.

L'intégration des données MNS, de la bathymétrie interne de l'embouchure et, de la zone au nord du port de Canet et la topographie du système plage dunaire, a été effectué avec le logiciel Matlab. Une fonction interpolateur a été créée afin d'inclure toutes les coordonnées, car les trois sources de données ont été obtenues avec des systèmes différents, et ont une résolution différente.



Figure 25. Illustration des sources des données intégrées au Litto3D, représentant respectivement la (a). Bathymétrie de la partie au nord de la digue ; (b) Bathymétrie de l'embouchure de la Tét et (3) Topographie du système dune-plage.

Un MNT, dérivé de la fusion des différentes sources de données, a été réalisé avec une résolution de 1 m comme base topobathymétrique de la modélisation.

Données d'occupation du sol - frottement

La représentation de l'occupation du sol est un paramètre important à prendre en compte dans les modèles afin d'assurer une bonne représentation des écoulements. Normalement dans la modélisation numérique de la submersion, à une échelle spatiale grossière (de l'ordre de 10m ou plus) cette occupation du sol doit être prise en compte dans les modèles via un coefficient de frottement variable en fonction des différents types de matériaux (sable, terre, ciment, goudron) ainsi que le type d'urbanisation en fonction de sa densité (Pedreros et al., 2016). Une approche possible consiste à utiliser une classification de l'occupation des sols issue des données Corine Land Cover de 2006. Toutefois, ces données ont une résolution plutôt basse, 100 m x 100 m (la plus haute), ce qui entraîne un post-traitement important pour la correction et le réajustement des limites des secteurs de rugosité différenciés à partir d'autres types de données, photographies aériennes, satellites, etc. Pour une modélisation à une résolution plus fine, de l'ordre de 1 à 5 m, en milieu urbain, la méthode privilégiée est de reproduire les bâtiments de manière explicite (Pedreros et al., 2016).

Pour le site de Canet nord, seules deux types d'occupation du sol sont présents et l'évaluation des rugosités de surface repose essentiellement sur les différences significatives entre le frottement dans le domaine mobile (sable et dune non végétalisée,) et un domaine constitué par la dune végétalisée, l'arrière-dune et la partie urbaine non-mobile, intégrant donc les différents types de couverture ().

La formulation de la rugosité de Manning a été utilisée dans cette modélisation. Une valeur du coefficient de Manning de 0.025 pour les zones de sable et dune non végétalisée domaine d1. Afin de prendre en compte la présence de la végétation au sommet de la dune, et des espaces arborés de la partie terrestre et d'arrière-dune (d2), la rugosité utilisée est augmentée pour réduire les vitesses d'écoulement à ces endroits. Une valeur de 0,045 pour le coefficient de Manning (Chow, 1959) est appliquée dans ce domaine.

Intégration du bâti

Afin de pouvoir localiser précisément et le modéliser directement, le milieu urbain a été pris en compte de manière explicite (c'est-à-dire que les bâtiments sont considérés comme des blocs imperméables). Pour ce faire un MNE adapté pour la modélisation a été réalisé en exploitant les données Litto3D© 1m. Les principales étapes de cette construction sont représentées sur la Figure 26.

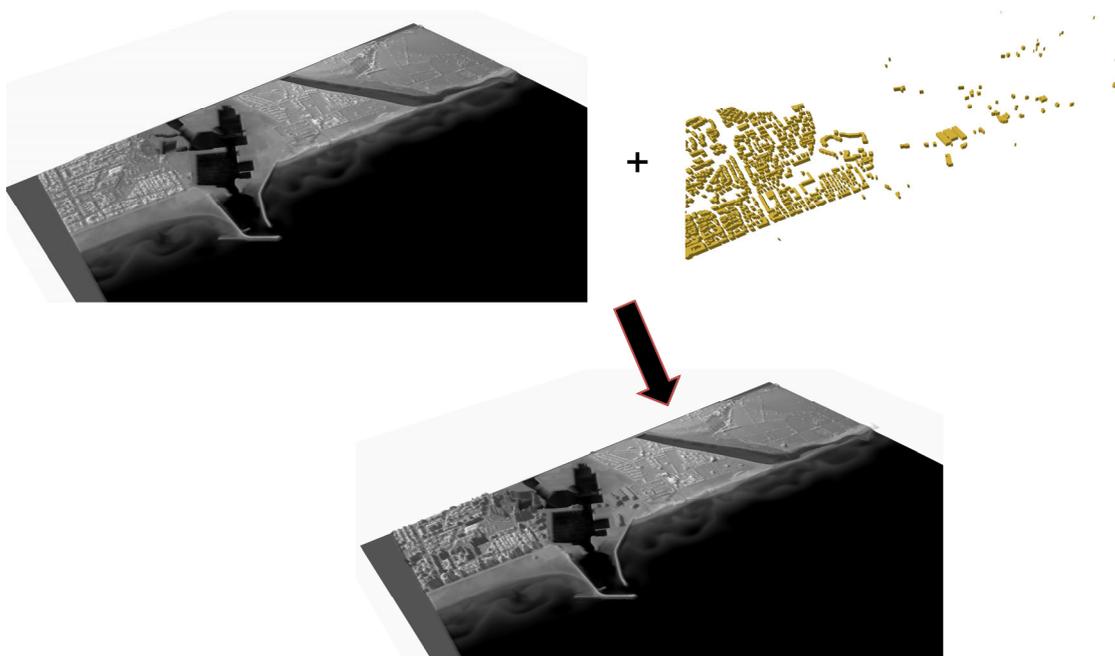


Figure 26. Illustration de la méthode d'intégration du bâti de la BD Topo de l'IGN, pour la modélisation à haute résolution. En haut à gauche, levé Lidar, à droite couche bâti de la BD Topo, et en bas réintégration du bâti sur le sol « nettoyé ».

À partir du MNE « brut » relevé par le LiDAR qui intègre à la fois les caractéristiques du sol et de tout ce qui le recouvre (arbres et végétation, bâtie, mais aussi véhicules, aménagements temporaires...) une extraction des zones bâties est réalisée. La délimitation des zones bâties est issue de la couche « bâti » (bâti indifférencié, industriel et remarquable) de la BD Topo de l'IGN. N'ont été retenues ici que les surfaces $>5 \text{ m}^2$. Cette extraction qui constitue une couche « bâti » a été fusionnée avec le MNT 1 m ayant subi les traitements précédents.

Sédimentologie et structures côtières

Le modèle permet d'inclure dans le traitement les sédiments mobilisables, la granulométrie de ces sédiments et les structures côtières rigides.

Le stock sédimentaire mobile est défini grâce au volume de l'USU sur les profils de la zone de Canet Nord. La valeur plus basse, $2000 \text{ m}^3/\text{ml}$, a été considérée, ce qui pour une distance d'environ 700 m, permet de définir la hauteur maximale des sédiments pouvant être mobilisés comme 2.6 m. Cette valeur a été utilisée sur tout le secteur modélisé.

La granulométrie choisie correspond à celle des sédiments types définis par *Artelia* (2013), soit un D_{50} de $680 \mu\text{m}$ et un D_{90} de $900 \mu\text{m}$, ce qui est en accord avec les résultats de Raynal et al. (2015).

Les structures côtières, comme les digues, ou les épis, puis la partie urbaine derrière l'arrière-dune qui inclut bâtiments, structures, routes, etc. ont été considérées comme non érodables.

4.1.2. Hydrodynamique

Selon les applications (élaboration de scénario, analyse de l'impact de conditions extrêmes, reproduction d'évènements historiques...), la méthode requise pour disposer de conditions d'agitation pertinentes au large du site d'étude est différente (Desmazes et al., 2014). Pour la reproduction d'un évènement passé, il convient de disposer de conditions de vagues représentatives de celles observables à la côte lors de l'évènement étudié. Ici, les données observées disponibles les plus proches du site d'étude se situent à environ 23 km et ne sont donc pas directement transposables au niveau du site d'étude. Pour ces raisons, un simple modèle d'état de mer a été mis en place avec le code SWAN (Booij et al., 1999) afin de fournir les conditions de vagues en entrée du modèle XBeach. Le modèle d'agitation est constitué d'une seule échelle qui permet de la propagation et des houles depuis le large, la Plage de Canet Nord est au milieu de cette grille (Figure 27). Afin de procéder à cette modélisation d'évolution des conditions d'état de mer du large à la côte, il est nécessaire de disposer de données de natures différentes : bathymétrie, niveau d'eau, houle au large, vent. La bathymétrie vient du traitement décrit précédemment.

Les conditions de vagues imposées aux limites du modèle (H_s , T_p , D_p , α_{dir}) sont issues du modèle de prévision IFREMER MARC, code WWIII, configuration MÉDIT qui a une résolution spatiale de 6 minutes (~11.6 km) et temporelle de 3 heures. Sur la Figure 27 les points du modèle MARC, choisi pour le forçage de la grille de SWAN sont présentés.

La modélisation d'état de mer pendant la période d'étude (17/01/2020 à 12:00 au 25/01/2020 à 12:30) a été réalisée en conditions instationnaires. Les conditions de niveau d'eau utilisées correspondent aux observations du marégraphe de Port-la-Nouvelle, qui sont les plus proches du site étudié. Ces données sont présentées au paragraphe suivant (niveau d'eau, Figure 29). Les dates et heures de ces données sont exprimées en UTC, ainsi que l'ensemble des données de forçages utilisées.

Les résultats obtenus à l'issue des modélisations d'état de mer avec SWAN sont des grilles de conditions Hauteur significative (H_s), de période pic (T_p), de direction au pic d'énergie spectral

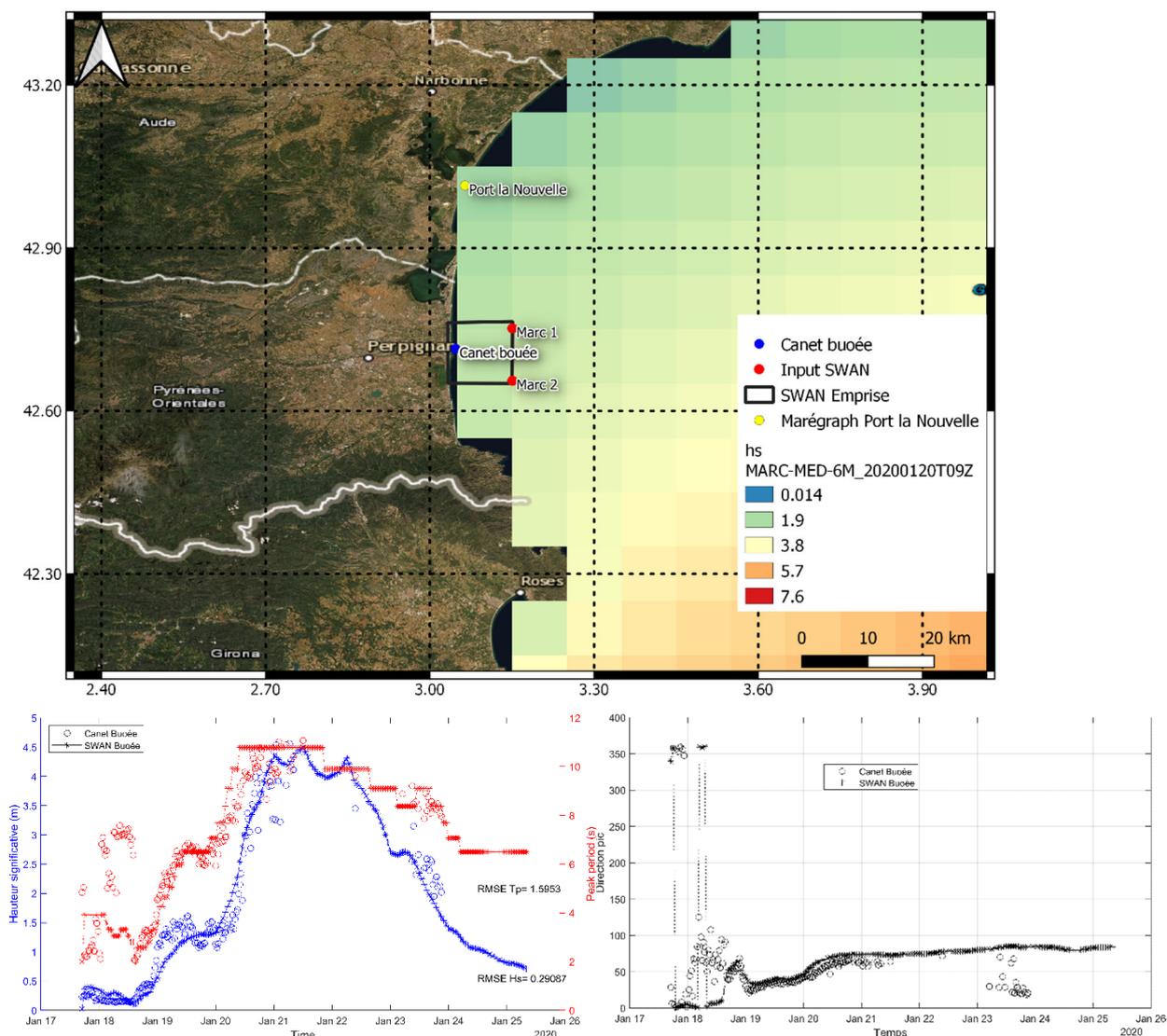


Figure 27. Emprise du modèle numérique SWAN utilisé, superposé à la hauteur significative moyenne des vagues sur une période de 3 heures, issue du modèle des vagues MARC i.e. pour le 20/01/2020 09:00 TU. La bouée de Canet utilisée pour valider le modèle est localisée, ainsi que les deux points de sortie du modèle MARC. En bas les sorties de SWAN, en termes de hauteur significative et périodes de pic, et de direction de pic, sont comparées à la bouée de Canet durant la tempête Gloria.

(Dir_p), d'étalement directionnel (α_{dir}) sur la période du 18/01 au 25/01. Les conditions retenues pour l'introduction aux limites du modèle XBeach sont les conditions, issue du modèle SWAN, sous forme paramétrique.

Afin d'évaluer la bonne reproduction des contours de forçage une comparaison des données modélisées et d'observations de la bouée de Canet Nord, installée juste en face de l'embouchure (Figure 27, en bas) et comprise dans le domaine de SWAN. La bouée de Canet est un AWAC 1 MHz ADCP, qui mesure les profils de courant et les vagues directionnelles pour les eaux peu profondes. Cet appareil a connu des dysfonctionnements pendant la tempête, mais des données sont disponibles lors de la première partie de l'événement.

Les comparaisons montrent que les paramètres des vagues sont correctement reproduits pendant l'ensemble de l'évènement. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) est calculée pour les conditions paramétriques des vagues (cf. figure 27). Elle est de 30 cm pour la hauteur significative, en raison de mouvements de la bouée pendant la tempête, mais ce paramètre reste bien reproduit. La période est légèrement surestimée en début de tempête, mais bien reproduite au pic et à la fin de l'évènement. La direction est bien reproduite.

Conditions de vent

Des conditions de vent homogènes ont été imposées sur l'étendue du domaine à partir des observations de vents moyens horaires obtenues à la station météorologique de Perpignan (Figure 28).

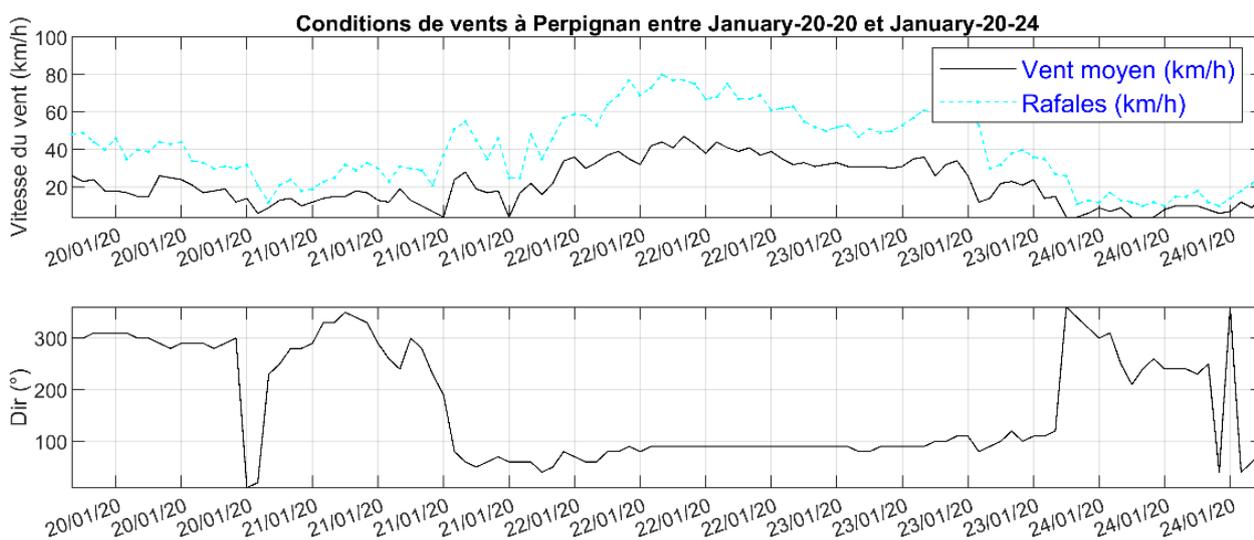


Figure 28. Conditions de vent à Perpignan, données issues de la station météorologique et utilisées lors des simulations. Les heures sont en UTC. Source : Météociel, Meteo France.

Données de niveau d'eau

Les données utilisées pour les niveaux d'eau des modèles SWAN et XBeach sont issues des observations du marégraphe de Port-la-Nouvelle, distant d'environ 30 km.

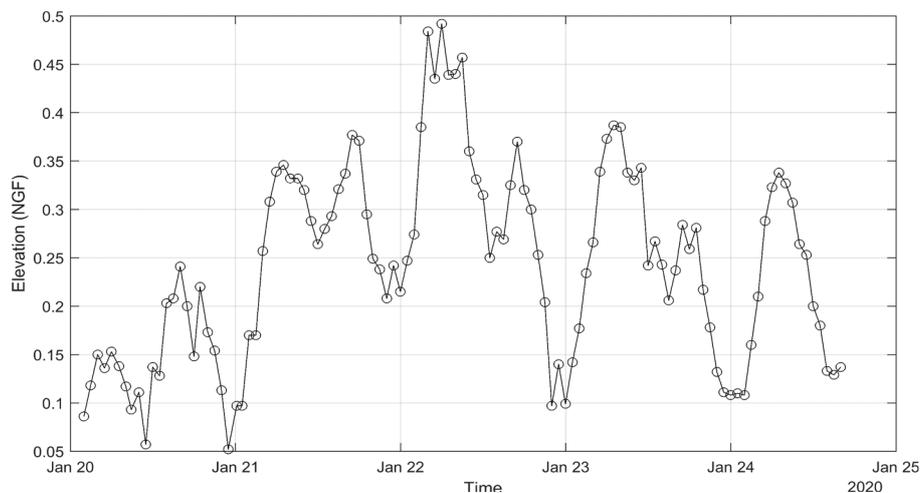


Figure 29. Données disponibles du marégraphe de Port-la-Nouvelle, utilisées comme conditions de niveau pour les simulations en Swan et XBeach.

Débit de la Têt

Les épisodes de crues peuvent être à l'origine d'un apport sédimentaire très important au sein du système littoral. Ils peuvent également provoquer une surélévation locale du plan d'eau lorsqu'elles sont synchronisées à une tempête, la surcote marine ne permettant pas l'évacuation des eaux fluviales et pouvant conduire à des inondations de la plaine littorale.

Les débits fluviaux pendant la tempête Gloria ont atteint des valeurs exceptionnelles, très supérieures aux débits fluviaux des dernières années (de 2013 à 2020, cf. figure 30) sur les trois fleuves majeurs du Roussillon (Figure 30). On peut observer sur la Figure 30, à gauche des valeurs de pic de débit journalier moyen d'autour 700 m³/s pour l'Agly et 750 pour la Têt (crue pendant Gloria).

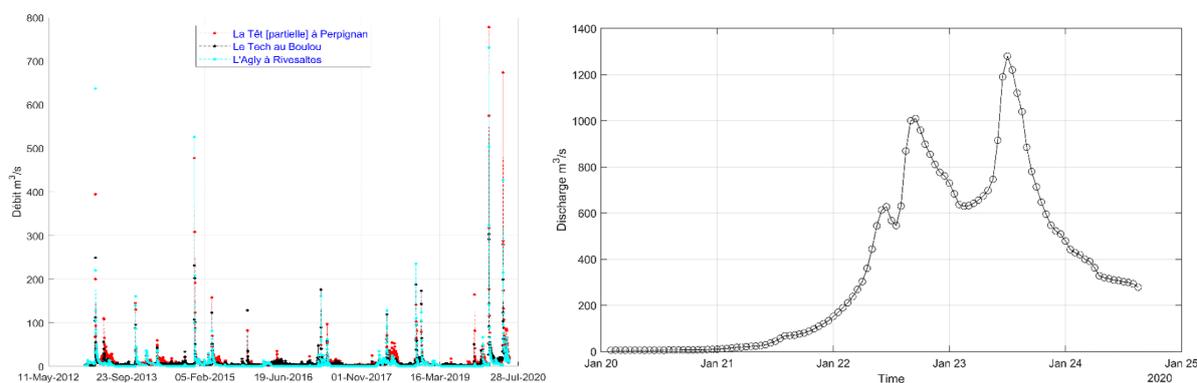


Figure 30. À gauche débits journaliers moyens (m³/s) des fleuves Têt (station partielle à Perpignan), Agly (Station Rivesaltes) et le Tech au Bouclou, depuis Janvier 2013. À droite, données disponibles de débit horaires pendant la tempête Gloria à la Têt, utilisées comme conditions de décharge pour les simulations en XBeach. Les heures sont en UTC. Source des données : SPC Méditerranée Ouest.

Dans la modélisation, les valeurs des débits horaires ont été considérées (Figure 30, à droite), avec un pic à plus de 1300 m³/s le 24 janvier. Les débits solides en provenance du fleuve ne sont pas pris en compte par le modèle, ce qui peut avoir un impact sur la modélisation dans la zone d'embouchure.

4.1.3. Grille du modèle et emprise

La grille mise en place et l'emprise du modèle XBeach en mode bidimensionnel consistent en une grille rectiligne, de 347 x 524 mailles (extension de 2 400 m x 1 900 m) avec une résolution spatiale variable. La résolution moyenne des mailles dans l'axe perpendiculaire aux plages est de 35 m à la limite au large, descendant à 3 m au niveau des plages, afin d'assurer une reproduction des processus associés à la propagation des vagues en zone de déferlement. La résolution longitudinale est de 20 m sur les façades latérales jusqu'à à 3 m sur la partie interne, dans le secteur principal de la plage de Canet Nord (Figure 31).

Face à l'embouchure de la Têt, où les plus grands gradients longitudinaux peuvent être générés, la résolution spatiale a été définie de 3 m.

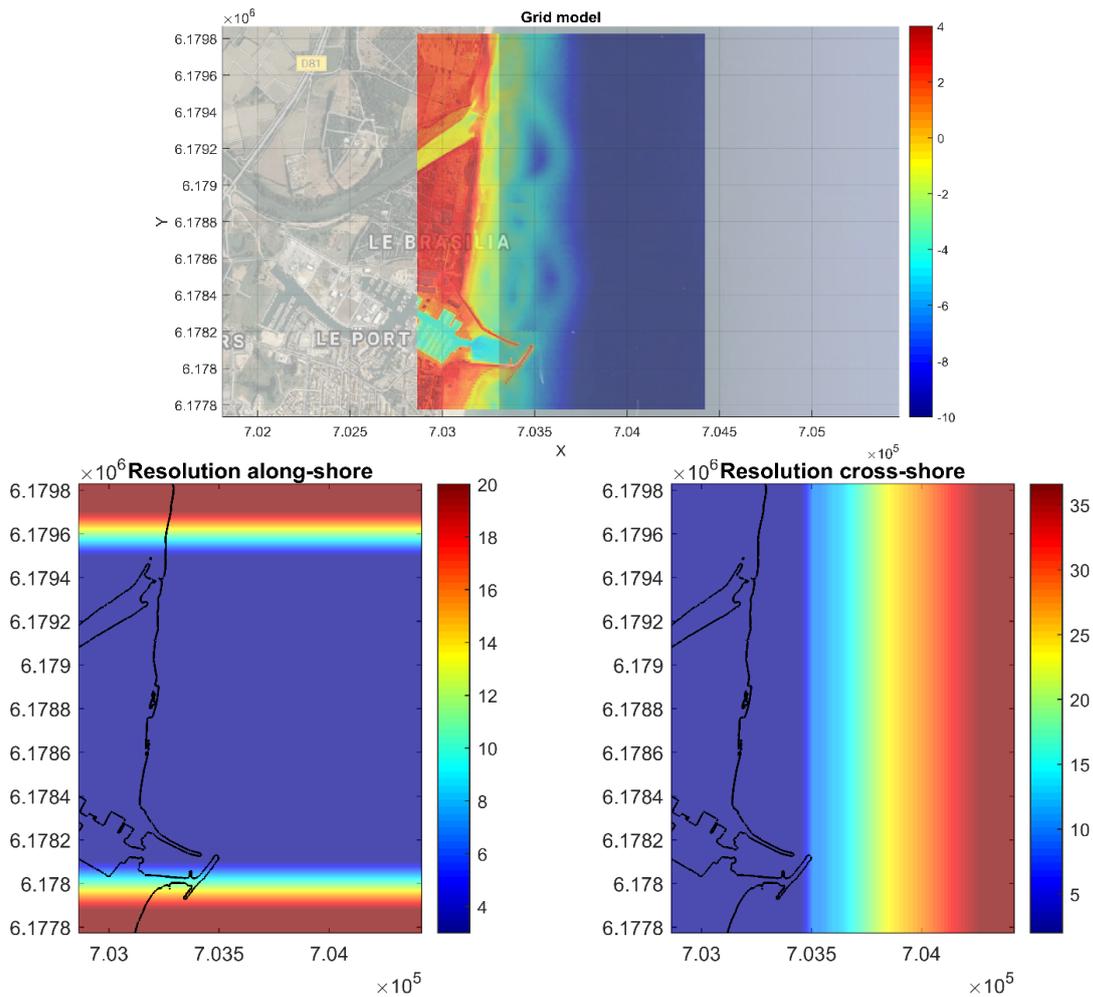


Figure 31. Grille topobathymétrique de calcul sur fond de Google Map. En bas, les résolutions spatiales, selon la direction parallèle (alongshore) et perpendiculaire (cross-shore), sont montrées.

4.2. CAS DE FRONTIGNAN – MODELISATION

Sur la base des données que le BRGM a pu acquérir dans le secteur de Frontignan et la description faite dans le paragraphe 3.3.1, le scénario hydrodynamique choisi afin d'effectuer la calibration du modèle sur un cas réaliste est la tempête d'octobre 2016.

La tempête d'octobre 2016

Du 13 au 14 octobre 2016, un épisode météorologique de 36 heures très important a affecté le Languedoc-Roussillon a marquant avec un champ de pression de 1000 hPa, mesurée à Leucate (SYNOP), des vents très forts de provenance d'est-sud-est, des vagues de secteur est ou est-sud-est et des précipitations très importantes, surtout sur le littoral. Montpellier-Fréjorgues enregistre un record de 116.2 mm, Cap Béar de 182.8 mm et Leucate de 70.6 mm. La durée de cet épisode est beaucoup plus courte que celle de Gloria.

- Les houles

À partir du début, le 13/10/2016 à 00:00 jusqu'à la fin de la tempête : 14/10/2016 à 12:00, les valeurs maximums des hauteurs significatives mesurées par les houlographes de la DREAL LR à Sète et Leucate sont supérieures (respectivement 5.40 m et 5.30 m) à celui enregistré à Banyuls qui est de 4,90 m au pic de la tempête. La période associée à la houle significative (notamment la valeur au pic) mesurée sur les différents sites est comparable, comprise entre 7.0 et 8.5 secondes, à Banyuls et Leucate, respectivement.

La série temporelle des évolutions de la hauteur significative, période et direction du pic au cours de la tempête d'octobre, enregistrée par la bouée de Sète (Figure 17), est présentée sur la Figure 32.

Les directions enregistrées de la houle sont essentiellement de provenance secteur Est pour les deux bouées du Roussillon, et Est-Sud-Est pour la bouée de Sète.

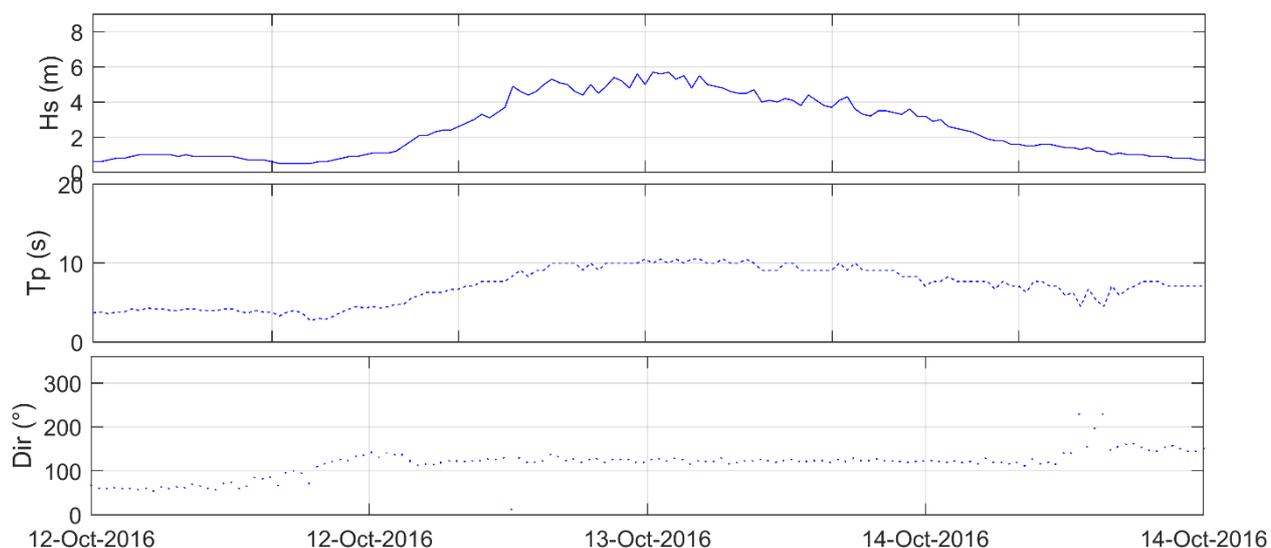


Figure 32. Tempête d'octobre 2016. Enregistrements de la bouée de Sète.

- Le niveau marin

Le niveau maximal de hauteur d'eau enregistré dans la journée du 13 octobre 2016 par les marégraphes est très élevé, et surtout plus important à Sète (0.903 m) et Port-la-Nouvelle (0.97m NGF) qu'à Port-Vendres (0.859 NGF).

La période de retour de cet événement peut être estimée en analysant conjointement les valeurs de houles et les valeurs du niveau d'eau au niveau des points de mesures. Une estimation précise de la période de retour de l'évènement est envisageable avec la méthode *Joint Exceedance Contour* (JEC), utilisé dans (Nicolae Lerma et al., 2017) au niveau de la bouée de Sète. En utilisant les courbes d'iso contours de période de retour de dépassement conjoint des deux variables niveaux d'eau et hauteur significative des vagues (période considérée de 1 an, 10 ans et 100 ans), la période de retour de cet évènement est estimée de l'ordre de 5 ans.

Impacts de la tempête sur Frontignan

Différentes situations d'importants phénomènes d'érosion et submersion ont été recensées. Si dans le Gard, aucune érosion n'a été constatée et que les vagues n'ont pas dépassé les hauts de plages, l'érosion dans l'Hérault s'est caractérisée par un recul parfois marqué du front dunaire

et une perte d'épaisseur des plages. La submersion s'est traduite par franchissements sur les fronts de mer urbains (notamment Carnon, Palavas les flots, Agde...).

Frontignan a été impacté, très fortement comme d'autres secteurs de l'Hérault, par cette tempête. La superposition de fortes pluies et des vagues intenses ont généré de la submersion, à la fois par les niveaux très élevés des étangs, et par des phénomènes de franchissements par paquets

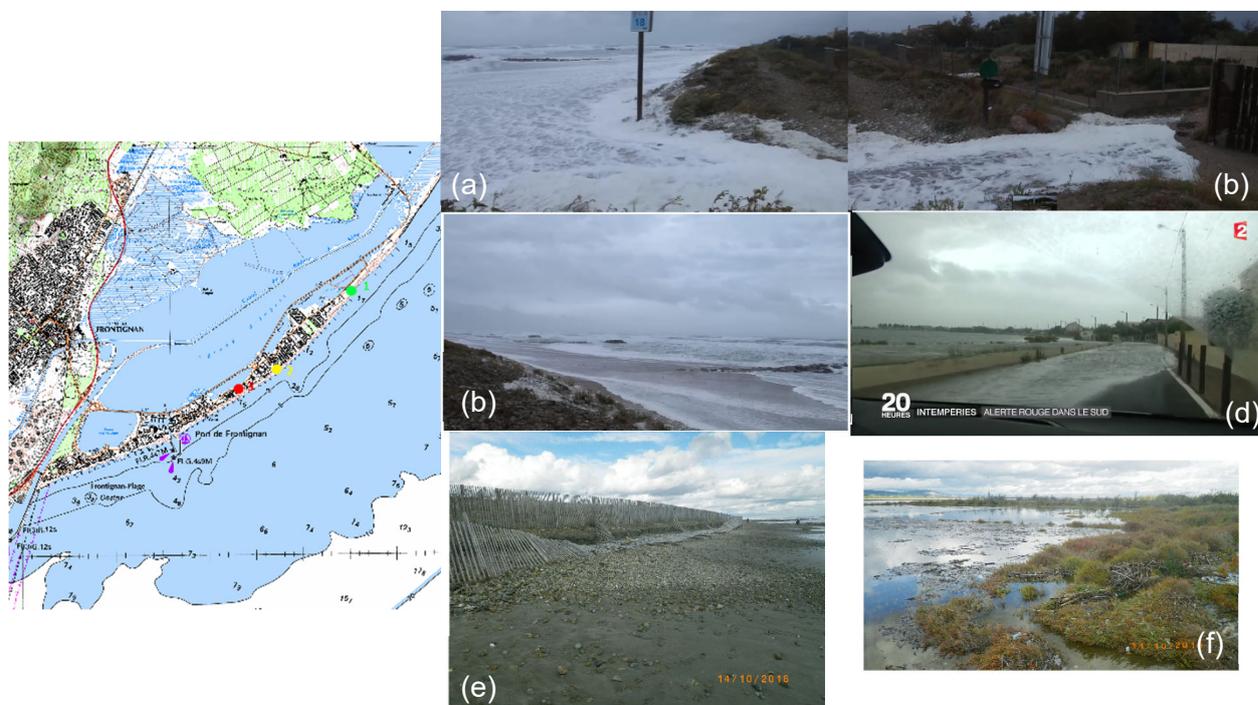


Figure 33. Carte du secteur de Frontignan, à gauche, avec une superposition des emplacements des prises de vue des photos. Photos des Impacts de la Tempête d'octobre 2016. (a), (b) et (c) Plage Frontignan Est, quartier du Grau (point 3 en rouge). (d) Prise de vue de l'avenue Ferdinand de Lesseps, coté l'étang d'Ingril (partie sud, point 2 en jaune). (e) et (f) Cordon de galets à Frontignan Est (point 1 en vert). Sources : <http://fichetempete.brgm.fr/pages/observation.jsf?oid=45886> et www.francetvinfo.fr.

de mer, sur le système dunaire très fragilisé et artificialisé (paragraphe 3.3.2).

Sur Frontignan-Est le cordon dunaire et les ganivelles ont été atteints par la mer (Réseau tempête). Des mesures des hauteurs maximales atteintes par le jet de rive ont été relevées (laises de mer). Des valeurs de 2,40 m sur le cordon en galets ont été recensées. Sur le secteur de Villeneuve les Maguelones Ouest, aux endroits où le bourrelet naturel de front de mer en galets est le plus bas, des débordements ont eu lieu (laisse de mer dans l'étang).

Enfin, une valeur autour de 0.4 m de hauteur d'eau en submersion a été évaluée sur l'Avenue de Lesseps, sur la photo (d) de la Figure 33, en fonction de la hauteur du muret à gauche.

4.2.1. Données topobathymétriques et traitements nécessaires pour la modélisation

De même que pour Canet, la donnée Litto3D© (SHOM-IGN) à haute résolution, levée dans le secteur qui va de Sète à Port Camargue en Septembre 2015, constitue le socle des données utilisées pour construire le modèle numérique pour la modélisation.

Cette donnée ne couvre que la partie terrestre et la bathymétrie externe du front de mer jusqu'à une profondeur d'environ 10 m. Un certain nombre de données a donc dû être ajouté pour disposer d'une topobathymétrie complète (Figure 34) :

- Dalles bathymétriques du SHOM pour le large (supérieures à 10 m)
- Lidar 2009 SHOM pour la zone terrestre non couverte du Litto3d (inférieure à 10 m)
- Levées mono faisceaux des étangs palavasiens (DREAL).

Traitement des données topobathymétriques

Les traitements de les données topographiques ont été faites en appliquant les mêmes routines et procédures décrites et détaillées pour le secteur de Canet Nord (paragraphe 4.1.1).

Données d'occupation du sol et Intégration du bâti

La même procédure décrite pour Canet Nord a été appliqué pour la modélisation à Frontignan, et les valeurs de frottement utilisées sont identiques.

Sédimentologie et structures côtières

Au niveau de volume des sédiments mobilisables, la présence d'un plateau de roches recensé dans la couche du SHOM représentative des sédiments mondiaux (carte avec une résolution de 5') a été incluse et donc considérée comme non érodable. Une valeur moyenne de l'USU sur les profils du secteur a été considérée de 250 m³/ml, qui, pour une distance d'environ 700 m de profils, entraînerait à 0.35 m d'épaisseur mobilisable en moyenne. Mais, en considérant la grosse surface du plateau rocheux mentionné (présente dans les relevés en Raynal et al., 2015), on considère dans le domaine de sable une hauteur mobilisable jusqu'à 2 m.

D'autre part, la granulométrie choisie correspond à celle de Raynal et al. (2015), pour le lido de Frontignan, soit un D₅₀ de 200 µm et un D₉₀ de 350 µm.

Frontignan, comme mentionné dans la description du site, montre une plus grande présence de structures de défense côtière, qui sont considérées non érodables dans la modélisation.

La présence d'ouvrages hydrauliques de tous types (pont-cadre, écluse, buses...) peut jouer un rôle important dans la dynamique des écoulements. Une simulation réaliste de la submersion marine passerait par une localisation précise et donc caractérisation (géométrie, fonctionnement) de ces ouvrages. La dimension de ces ouvrages est, dans plusieurs cas, inférieure à la taille des mailles de calcul et les régimes d'écoulement potentiel nécessitent d'intégrer ces éléments au sein du modèle comme des singularités hydrauliques (Nicolae Lerma et al. 2017). En absence de ce type de source de données, dans le but de simplifier la continuité hydraulique des lagunes entre elles, des singularités ont été intégrées au sein du MNT sous forme chenaux. Ces chenaux, caractérisés par une largeur de autour 8 mètres, ont une profondeur déterminée par interpolation de données de profondeurs des étangs reliés. .

La Figure 34 montre, sur l'arrière-plan, le MNT utilisé comme base topo bathymétrique, composé par l'assemblage du Litto3d et Lidar2009. Les singularités hydrauliques sont montrées, ainsi que les couches bâties, ouvrages statiques, roches, front urbain non érodable, inclus dans le MNT final.

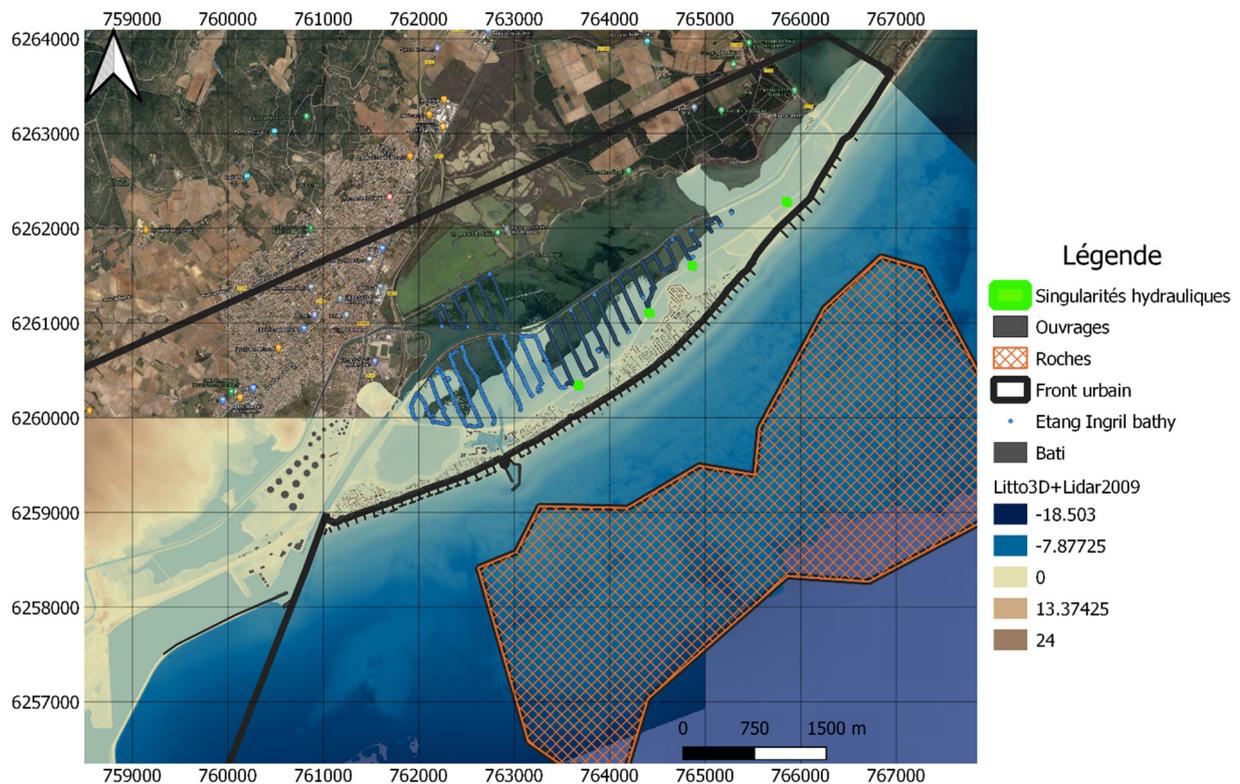


Figure 34. Secteur de Frontignan. Sur l'arrière-plan le MNT utilisé comme base topobathymétrique, composé par Litto3d+Lidar2009. Les singularités hydrauliques sont montrées, ainsi que les couches bâties, ouvrages statiques, roches, front urbain non érodable, inclus dans le MNT final.

4.2.2. Hydrodynamique

Dans ce secteur, les données disponibles les plus proches du site d'étude se situent à environ 1 km (bouée de Sète) et sont directement exploitées pour les simulations au niveau du site d'étude. Les conditions de forçage dû aux vagues utilisées dans le modèle sont donc directement les conditions paramétriques statistiques des vagues, acquises par la bouée de Sète, présentées en Figure 32.

Conditions de vent

Des conditions de vent homogènes ont été imposées sur l'étendue du domaine XBeach à partir des observations de vents moyens horaires obtenues à la station météorologique de Sète (Figure 35).

Données de niveau d'eau

Les données utilisées pour les niveaux d'eau (Figure 35) dans le modèle XBeach sont issues des observations du marégraphe de Sète (montré en Figure 17).

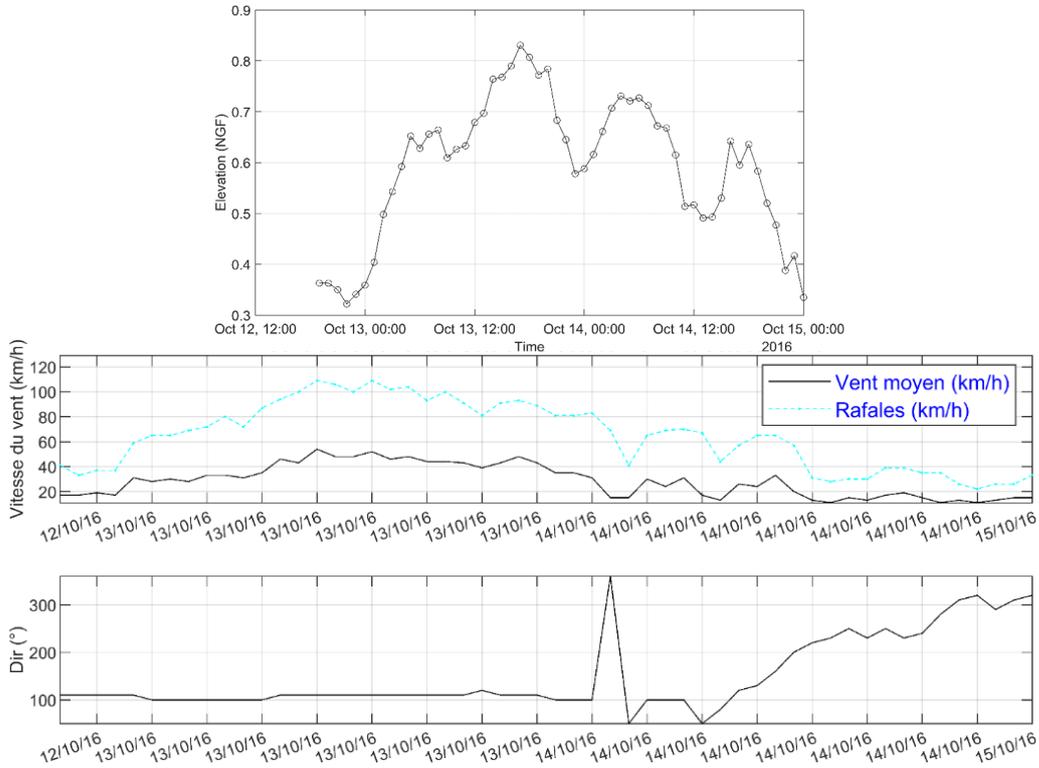


Figure 35. Données disponibles du marégraphe de Sète, utilisées comme conditions de niveau pour les simulations en XBeach. En bas, les conditions de vent à Sète, données issues de la station météorologique. Les heures sont en UTC. Source : Météociel, Météo France, Data Shom.

4.2.3. Grille du modèle et emprises

Le modèle a été mis en œuvre en utilisant une grille curviligne, pour suivre la convexité du littoral localement et afin d'optimiser le nombre des mailles de la grille de calcul. La taille des mailles est variable dans les deux directions, longitudinale et transversale (voir Figure 36). L'extension de la grille est d'environ 3380 m dans la direction perpendiculaire (cross-shore), avec une taille de maille allant de 20-25 m (maximum de 32.7 m) à la limite au large (offshore, ~15 m de profondeur) à 2-3 m (minimum de 1.9 m) dans la zone de jet de rive.

Dans la direction longitudinale, parallèle à la cote, le modèle a une extension de 11600 m environ et la taille des mailles varie de 25 m aux limites latérales, jusqu'à 5 m, dans la zone centrale. La grille a été obtenue au moyen du module Delft3D-RGFGRID, imposant une variation maximale consécutive de mailles autour de ~5-10% pour assurer un bon lissage, tout en maintenant une orthogonalisation valable (les mailles doivent se rencontrer à angle droit). Le résultat final est une grille de 669 * 568 mailles.

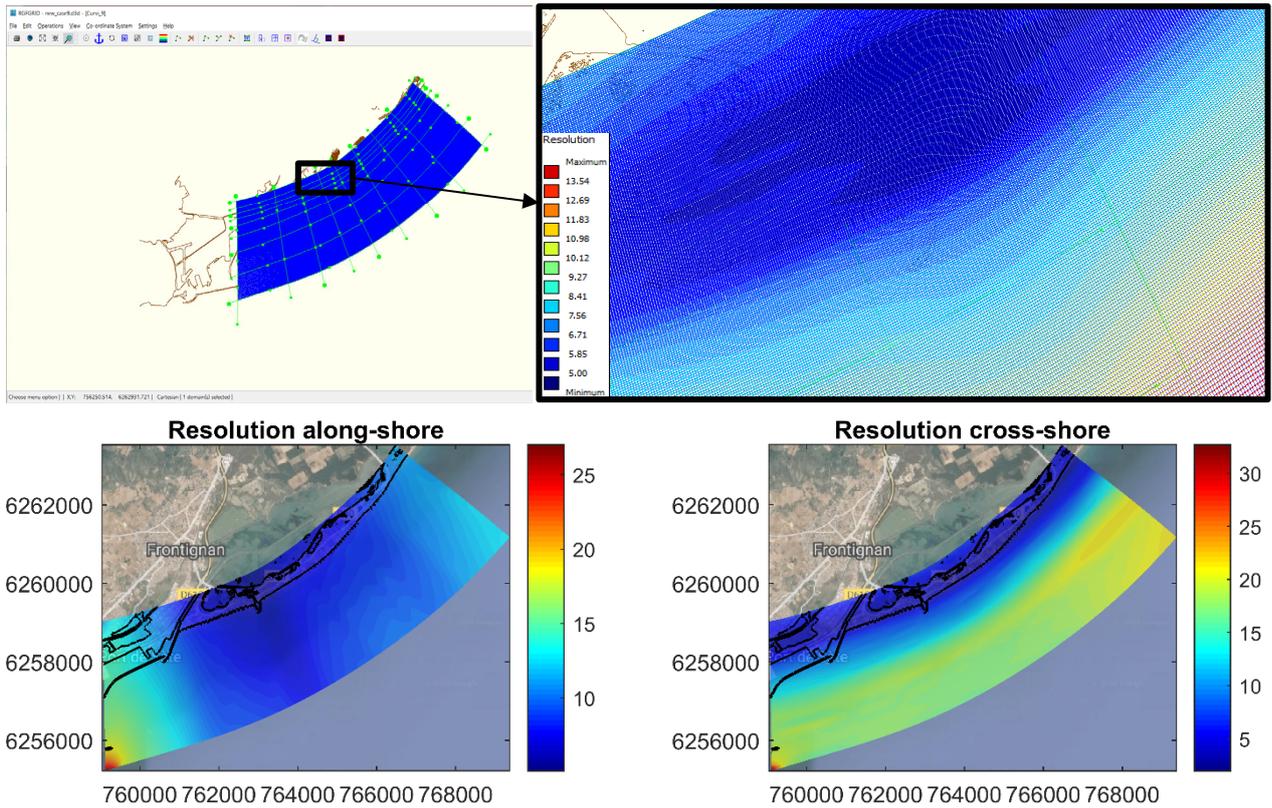


Figure 36. Grille de calcul générée avec l'outil Delft3D-RGFGRID, superposée à l'isoligne 0 m NGF. En bas, les résolutions spatiales, selon les directions parallèle et perpendiculaire à la côte.

Une capture d'écran de l'outil Delft3D-RGFGRID avec l'emprise de la grille de calcul générée est montrée en Figure 36, superposée à l'iso ligne du MNT de 0 m NGF. Les résolutions spatiales, selon la direction parallèle et perpendiculaire à la côte, respectivement, sont ainsi présentées.

5. Résultats de la modélisation et discussions

Cette section a le but de présenter les résultats des modèles mis en place pour les deux sites d'étude pour les deux tempêtes considérées. La seconde partie présente un scénario cinquantennale et les différences dans les réponses hydrodynamiques dans les deux cas : avec et sans l'activation du module de calcul morphodynamique du modèle.

Pour les deux sites d'étude, les variables utilisées pour caractériser les changements morphodynamiques et la submersion notamment pour le scénario cinquantennale sont basées sur des analyses de volumes d'érosion (m^3) par profils cross-shore ou par surface, de volumes d'eau franchissant et/ou débordant et de volumes de dépôts de sédiments par overwash), si présents. Les volumes d'érosion sont calculés à partir de la partie subaérienne de la plage jusqu'au niveau -3 m NGF, qui détermine approximativement la profondeur de l'eau où se produisent les principaux changements. Toutes les variables sont calculées sur les secteurs à partir des sorties grillées de XBeach, et les valeurs moyennes de chaque secteur ainsi que les écarts types en sont dérivés. Les volumes de recouvrements sont calculés comme des volumes de sédiments déposés sur le système dunaire et de l'arrière-dune où une accumulation verticale est détectée.

5.1. PHASE DE VALIDATION DES MODELES

Une des difficultés pour évaluer la fiabilité de la modélisation de l'érosion et la submersion marine est le manque de données précises juste après l'évènement permettant de définir l'évolution du fonds (topo et bathymétrie) dans les différents secteurs impactés, et à terre les limites maximales d'inondation plutôt que les hauteurs d'eau, la vitesse des écoulements ou la temporalité des inondations. Des moyens indirects permettent toutefois de s'assurer de manière semi-quantitative de la pertinence des résultats de simulations.

L'ampleur des risques induits par les tempêtes a été quantifiée dans des zones de contrôle différent le long des secteurs d'étude afin d'identifier les principaux facteurs susceptibles d'influencer la réponse du système dune-plage.

Sur le site de Canet Nord, la réponse morphodynamique pour la tempête historique a été analysée dans le secteur de la plage du Sardinial en particulier: le long du littoral au sud de l'embouchure du fleuve, jusqu'à la digue nord du port, secteur pour lequel des données post-tempête existent. Le secteur de Frontignan s'étend de la digue du port à Sète jusqu'au la partie moins urbanisée au début de la plage des Aresquiers.

5.1.1. Canet Nord : Calibration de XBeach pendant la tempête Gloria

Mise en place du modèle

Comme évoqué précédemment (4.1), la modélisation réaliste dans le sens où elle intègre l'ensemble des processus physiques pouvant provoquer de l'érosion du système plage-dune, ainsi que percées dunaire, brèches et les submersions avec les écoulements à terre, a exigé de mettre en place un couplage de modèle SWAN/Xbeach, le modèle SWAN permettant de simuler

les conditions de vagues depuis le large jusqu'à la côte (zone d'emprise de la simulation Xbeach). La réalisation des calculs est effectuée un modèle après l'autre et n'est pas caractérisé par de calculs simultanés.

Pour cette étude, la version 1.23. XBeachX, release BETA, daté 2018 du modèle XBeach a été utilisée. Des scénarios de forçages simples et stationnaires, en forme de tests ont montré que le modèle était capable de reproduire une érosion du haut de plage pour les scénarios les moins forts et une érosion du pied de dune pour les scénarios les plus extrêmes. Ces tests préalables ont validé la faisabilité d'un travail plus réaliste avec le modèle sur la zone de Canet Nord, à partir de la digue sud du port, jusqu'au nord de l'embouchure de la Têt, en incluant la zone la plus évolutive lors des dernières années.

Le modèle a été donc mis en œuvre dans sa version 2DH. L'approche finalement adoptée a été d'utiliser le module hydrodynamique *surf-beat*. La grille mise en place est présentée dans le paragraphe 4.1.3. Sur le serveur de calcul du BRGM, cette configuration met 5.5 heures à tourner en mode parallèle (en utilisant la méthode Message Passing Interface, MPI) avec 2 nœuds de calcul larges quadriprocesseurs avec 48 cœurs au total, pour la durée de la tempête.

Les conditions aux limites des vagues du modèle sont les caractéristiques des vagues le long de toute la façade offshore, avec un pas de temps de 1 h, qui est la même résolution temporelle que les données originales en sortie de SWAN. Les simulations XBeach (hydrodynamique et morphodynamique) sont effectuées avec une résolution temporelle de 1 s ($dtbc = 1$), mais adaptable en fonction du numéro de Courant.

Paramétrisation et Calibration du modèle

La calibration du modèle a été réalisée en adoptant une double approche : (i) en optimisant le Brier Skill Score (BSS), qui quantifie la performance du modèle en comparant les résultats du modèle à la réalité, donc le DSM post-tempête de la plage émergée. Le BSS quantifie la performance d'une prédiction par rapport à une prédiction de base. Le BSS calcule l'écart quadratique moyen entre une prévision et l'observation avec l'écart quadratique moyen entre la prévision de base (au temps zéro) et l'observation.

Le score BSS est donné par :

$$BSS = 1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_{b,c} - z_{b,m})^2}{\sum_{i=1}^N (z_{b,0} - z_{b,m})^2}$$

où $z_{b,c}$ est la valeur de la hauteur du fond calculé, $z_{b,m}$ est la valeur de la hauteur du fond mesuré et $z_{b,0}$ est la valeur de base (au début de la simulation). Les variables sont extraites à chaque coordonnée i du modèle.

Un accord parfait donne un score BSS de 1, si la prédiction du modèle est plus éloignée de la condition finale mesurée que la prédiction de base, le score de compétence est négatif. Il est possible de rajouter dans l'équation mentionnée un terme lié à la marge d'erreur de la mesure, donc du DSM, qui dans cette étude, n'était pas disponible (Palvadeau et Fabre, 2020).

Selon Sutherland et al. (2004), la classification des performances des modèles basés sur le score BSS peuvent être considérée comme très bonnes pour les valeurs supérieures à 0.4 et excellentes pour les valeurs supérieures à 0.5 - 0.6. Comme l'évaluation du BSS ne peut être effectuée que pour le profil émergé (où des données topographiques avant et après la tempête

existent), une évaluation qualitative du profil submergé modélisé a également été réalisée. À cette fin, une analyse qualitative de la forme finale du profil immergé modélisé en tenant compte de la réponse morphodynamique typique attendue dans des conditions de tempête a été conduite. Par ailleurs la qualité des résultats est également analysée en effectuant une évaluation qualitative des descripteurs modélisés, tels que les variations longitudinales et transversales des changements de la morphologie, l'ampleur, et la localisation des recouvrements et de l'extension de l'inondation en fonction des informations qualitatives sur l'événement (Réseau Tempête).

Des combinaisons différentes de certains paramètres du modèle ont abouti à des scores BSS, calculés sur six profils cross-shore, inférieurs à 0.3, puis l'évaluation qualitative a mis en évidence que certaines d'entre elles produisaient de gros volumes de dépôt sur la partie immergée. Les paramètres de configuration définitifs, qui ont conduit à un BSS supérieur à 0.4 (mesurées sur 4 profils sur 6, voir Figure 38) et une évaluation qualitative de la partie submergé du profil calculé plausible, sont présentés dans le Tableau 3, ainsi que les valeurs testées et ceux de défaut dans le modèle.

Cette étude de la sensibilité du modèle a été effectuée sur les paramètres *morfac*, *gamma*, *delta*, *wetslp*, *sedcal*, *gwflow* pour le modèle 2D. Le test est conduit en modifiant une seule valeur des paramètres par rapport aux valeurs de références.

Un paramètre qui joue un rôle important est le coefficient de frottement au fond (cf paragraphe 3.3.2). Diminuer ce coefficient revient à diminuer le frottement et donc à augmenter potentiellement l'érosion donnée par une vitesse de l'écoulement supérieure. Ce paramètre, dépendant de la nature du fond, a été déduit de la littérature par rapport à la granulométrie, et n'a été pas modifié pour éviter trop de variabilité dans le modèle.

Tableau 3. Paramètres de calibrage. Gamme de valeurs testées et configuration finale des paramètres.

Paramètre	Valeurs testées	Default	Valeur finale
gamma	0.4-0.7 (tous le 0.1)	0.55	0.55
delta	0-0.3	0	0.1
facua	0.1-0.4	0.1	0.22
sedcal	0-0.5	0	0
wetslp	0.3-0.5	0.3	0.4
gwflow	0 et 1	0	0
morfac	2 - 20	1	10

Source : Données des simulations XBeach effectuées

Les implications des valeurs sélectionnées suite aux tests de sensibilité sont les suivantes.

Une augmentation des facteurs qui représentent les effets des vagues sur la cote peuvent améliorer le comportement du modèle en termes de reproduction de l'overwash (*gamma* et *delta*). *Gamma* est le paramètre de déferlement dans la formulation de défaut (formulation de Baldock et

Roelvink) et *delta*, la fraction de la hauteur de vagues à rajouter à la profondeur dans la formulation du déferlement des vagues. Ici, les valeurs par défaut ont été utilisées.

Deuxièmement, le *facua* a été défini essentiel parmi les paramètres de configuration du modèle. Il s'agit du paramètre qui contrôle la non-linéarité du transport sédimentaire afin de prévenir la surestimation d'érosion, pendant les tempêtes. Deux raisons physiques sont identifiées pour ces surestimations dans Elsayed et Oumeraci, (2017): (i) l'effet de la non-linéarité des vagues sur le transport des sédiments, qui est décrit dans XBeach par ce facteur, *facua* en fonction de l'asymétrie et de l'inclinaison des vagues appliquée au flux moyen et (ii) l'excès considérable de la force de cisaillement au fond réel nécessaire pour amorcer le mouvement des sédiments par rapport à celle prévue par la courbe de Shields. Les analyses ont montré qu'un *facua* de 0.22 donne un résultat morphologique précis pour l'étude sur la plage de Canet Nord.

Troisièmement, la contribution des avalanches aux changements de niveau du fond a été limitée, compte tenu de la pente du site. Le paramètre *wetslp* qui définit la pente critique au-delà de laquelle le fond s'effondre et les sédiments glissent vers le bas a été fixé ici à 0.4.

Des tests ont été effectués sur le paramètre *Sedcal* qui est un coefficient de calibration du transport des sédiments par type de granulométrie. La sensibilité à la variation de ce paramètre n'a toutefois pas pu être déterminée du fait de trop grandes instabilités numériques.

Le processus d'infiltration (paramètre *gwcal*) est plus important dans les sédiments grossiers des environnements, comme l'embouchure de la Têt, où la taille est proche à celle du gravier. Les tests ont toutefois pas montré de modification significative en activent ce paramètre qui n'a donc été pas modifié.

Le *morfac* est un paramètre d'accélération des processus morphodynamiques, une méthode numérique régulièrement utilisée pour réduire le temps de calcul. L'idée générale est que chaque étape d'évolution morphologique est appliquée plusieurs fois, dans la même étape hydrodynamique. Bien que cette approche ne soit pas physiquement correcte, elle permet un gain de temps de simulation considérable et permet d'obtenir des résultats très intéressants comme en atteste la bibliographie (REF XXX). Dans nos simulations, en appliquant le *morfac*, la réponse morphologique et donc l'érosion du système est légèrement surestimée, surestimation qui augmente lorsqu'on applique des valeurs plus élevées pour ce paramètre. Sur le site d'étude, la surestimation pour les *morfac* 3, 6 et 10 est respectivement de 1,9%, 2,3% et 6,5% (similaire en Nederhoff et al., 2015). La réponse morphodynamique, du transport des sédiments et des vitesses est plus ou moins similaire lorsqu'on compare les différentes valeurs du paramètre. Le *morfac* est utilisé pour réaliser des temps de calcul acceptables (6 heures au lieu de 60). L'idée générale est que les avantages de *morfac* = 10 en termes d'accélération sont plus importants que les inconvénients.

Résultats obtenus

Les résultats des changements morphologiques induits par la tempête simulée avec l'ensemble des coefficients ajustés du modèle sont présentés dans la Figure 37. On peut observer de manière générale que les changements mesurés sur la plage au sud de l'embouchure du fleuve sont reproduits correctement par le modèle, lorsqu'on considère l'ensemble de la zone. Les indicateurs de performance morphologique sont montrés, le BSS à gauche, le biais relatif (au milieu) et l'index de scattering (Scatter Index, à droite), tous calculés sur une fenêtre mobile de 6x6 mailles dans la zone d'intérêt.

La figure montre les deux topographies, modélisées et mesurées, respectivement. Sur tout l'ensemble du secteur, les zones qui montrent le plus de variabilité sont les premiers 150 m au sud de l'embouchure et le 100 m au nord de la digue de Canet. Si on considère l'erreur systématique (Bias) sur tout le secteur, on obtient une différence moyenne de -0.35 m. La différence quadratique moyenne globale est de 0.57 m. Une érosion très accentuée est modélisée sur la zone nord, coté embouchure (-2.3 m par rapport aux observations), résultant vraisemblablement de l'absence dans XBeach de l'apport fluvial en sédiments, qui a été très important pendant la crue.

Sur la partie sud, où une falaise d'érosion a été observée (paragraphe 3.3.1), le modèle n'est pas capable de reproduire parfaitement cette forme d'érosion. On peut observer une faible sous-estimation (valeurs positives de biais), avec un pic de différence de 1.3 m. L'utilisation du BSS permet d'évaluer la performance du modèle dans les calculs d'évolution morphologique : dans la zone sud, des valeurs correctes, positives ($\approx +0.4$) sont estimées, en revanche la partie nord présente des valeurs négatives, résultant de la forte érosion mentionnée, produite dans le modèle.

La partie centrale du secteur est mieux modélisée avec des biais entre -0.3 et 0.4 m. Si on considère le BSS, on retrouve des valeurs positives, ainsi que des valeurs négatives.

Les faibles zones de recouvrements dunaires, qui sont observées sur le MNS post-tempête, identifiées comme résultants des effets de la tempête Gloria, ne sont pas reproduites. En considérant un niveau d'eau mesuré peu important pendant la tempête (max. autour de 0.5 m NGF), les valeurs du niveau à la côte, données par la transformation des vagues (setup), ne permettent pas de modéliser un régime de franchissement. Enfin, le modèle ne calcule aucune zone de submersion, ce qui correspond aux observations faites par le Réseau Tempête. Seulement deux franchissements ponctuels ont lieu sur la partie nord de l'embouchure, avec des volumes franchissant négligeables.

L'évaluation de la performance du modèle pour le choix final des paramètres a été effectuée sur les six profils (cf. Figure 38). Sur les profils 1 et 2, dans la zone sud, on calcule un BSS majeur de 0.40 qui indique une reproduction correcte de la réponse morphodynamique. Les deux profils suivent les observations, à l'exception du haut de plage, où on mesure des différences de reculs évalués entre les niveaux 2 et 3 m NGF, d'autour 3.5 m max.

Le profil central (3) présente une valeur négative. Les profils 4 et 5 ont en moyenne un BSS de 0.5, donc une performance optimale et enfin, comme déjà discuté, sur le profil proche de l'embouchure (6) donne une valeur négative.

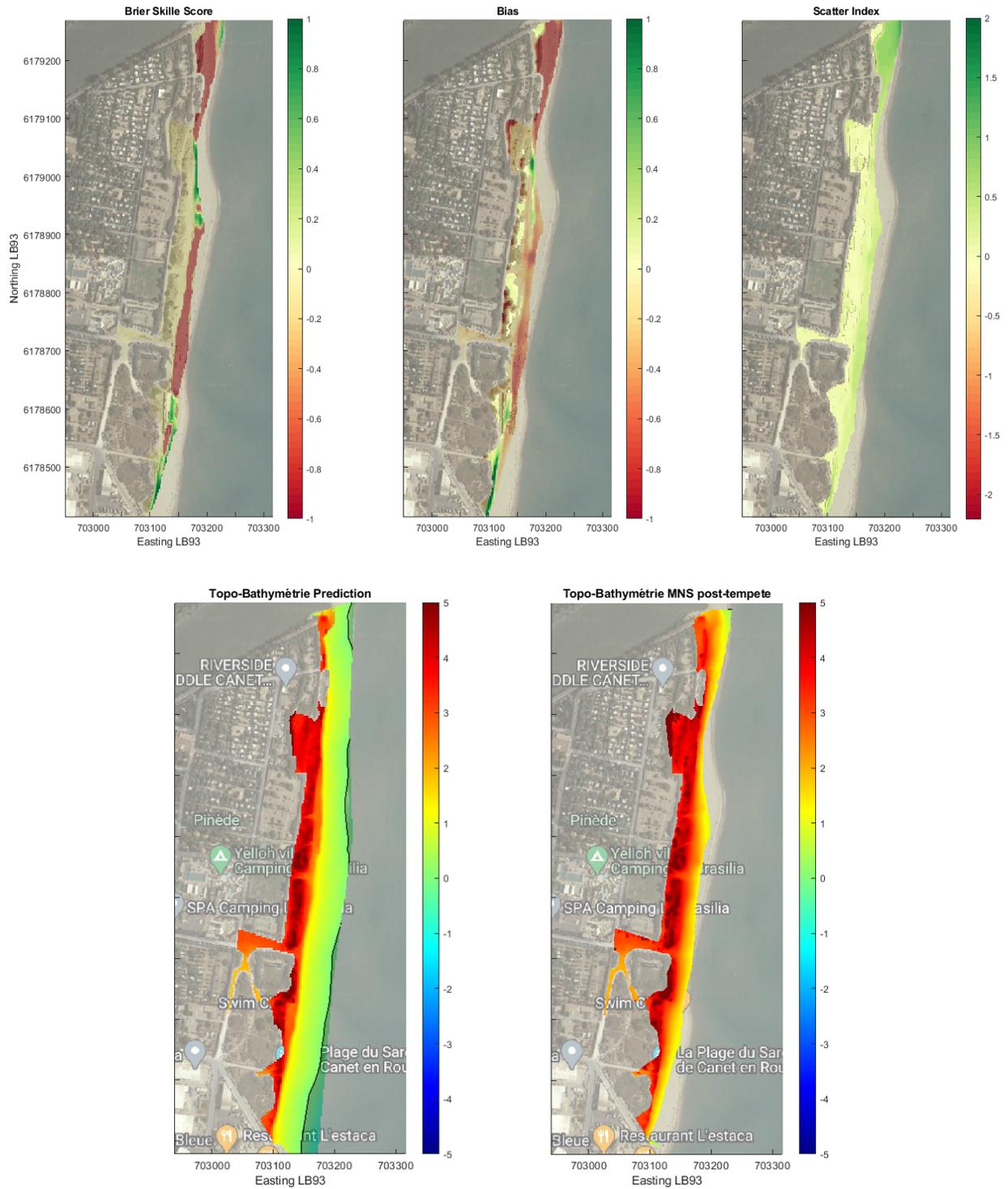


Figure 37. Validation de XBeach avec les mesures du MNS post tempête des changements morphologiques apparus. Indicateurs de performance morphologique calculée : BSS (gauche), biais relatif (au milieu) et l'index de scattering (Scatter Index, à droite), tous calculés sur une fenêtre mobile de 6x6 mailles dans la zone d'intérêt.

La comparaison des résultats de modélisation et des observations disponibles (MNS post-tempête) montre que les modèles représentent de manière satisfaisante l'érosion du point de vue de l'extension des zones et des valeurs, avec toutefois des secteurs où les évolutions restent mal représentées par le modèle , .

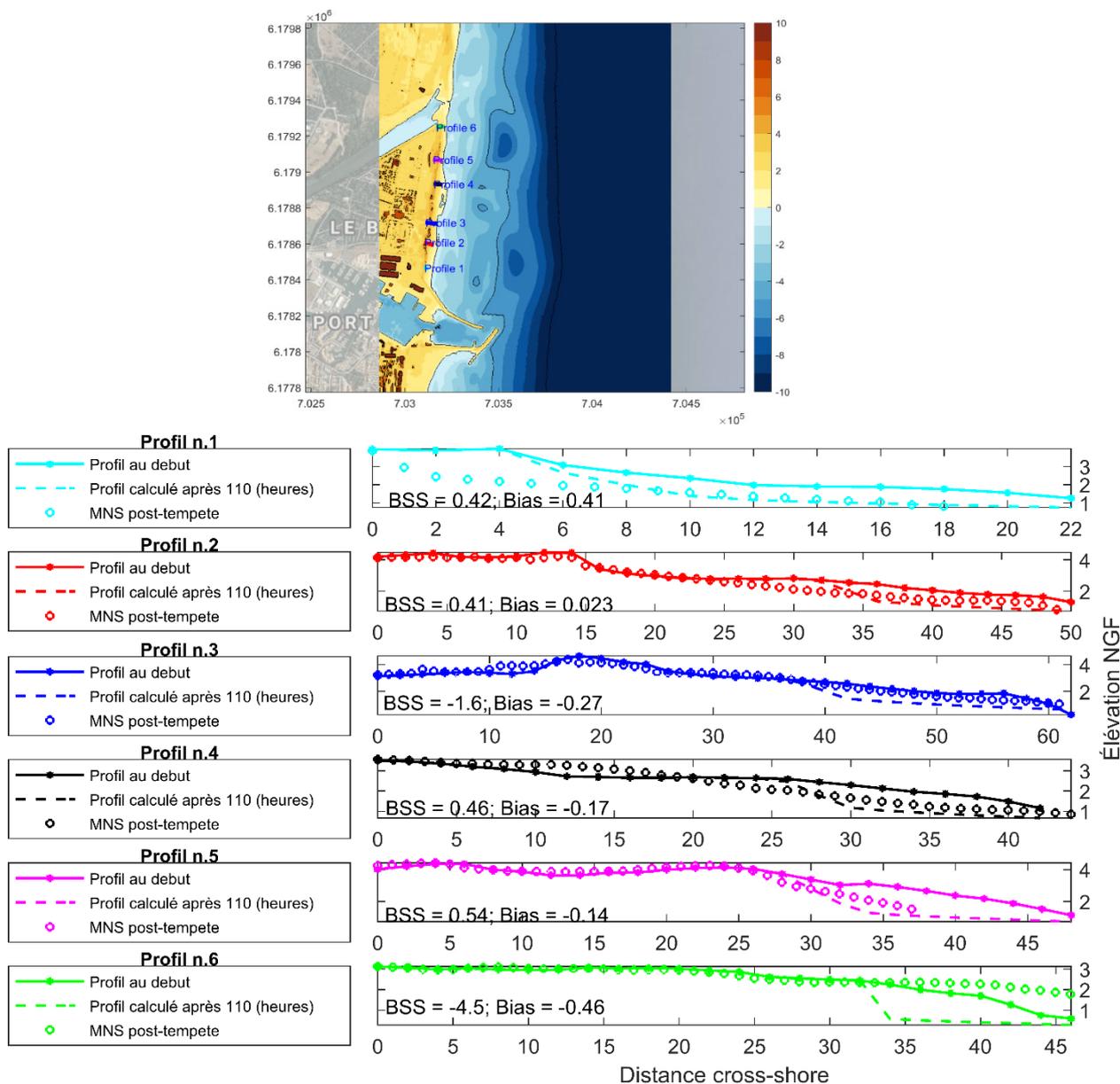


Figure 38. MNS calculé, sorti de XBeach à l'heure zéro de la simulation. Comparaison entre les profils de plage mesurés après-tempête et calculés avec XBeach à la fin de la tempête. Performance BSS et Biases moyennés sur les profiles.

L'évolution morphologique de l'embouchure a été évaluée en analysant les cartes topographiques, MNS observé et simulé après la tempête, à gauche et à droite, respectivement, sur la Figure 39. Une érosion très importante a été observée, avec une rupture complète de la flèche sableuse de la Têt, côté embouchure. Cette modification importante est complètement corrélée avec l'épisode de crue prolongé présenté en Figure 30. Ces évolutions sont correctement simulées par le modèle celui-ci reproduisant correctement la morphologie finale de l'environnement. Malheureusement, les mesures de profondeur du fleuve après Gloria n'étant pas disponibles, une évaluation quantitative des évolutions bathymétriques n'a pas pu être réalisée.

Malgré une bonne reproduction générale, on peut mentionner deux différences principales :

- On observe une partie de faible accumulation de sédiments dans le MNT modélisé, à l'intérieur du fleuve, qui est associée à des perturbation générées par l'introduction du débit dans cette zone. Elles ne sont toutefois pas de nature à perturber la qualité de la modélisation au niveau de l'embouchure. On peut noter également sur les deux MNS une

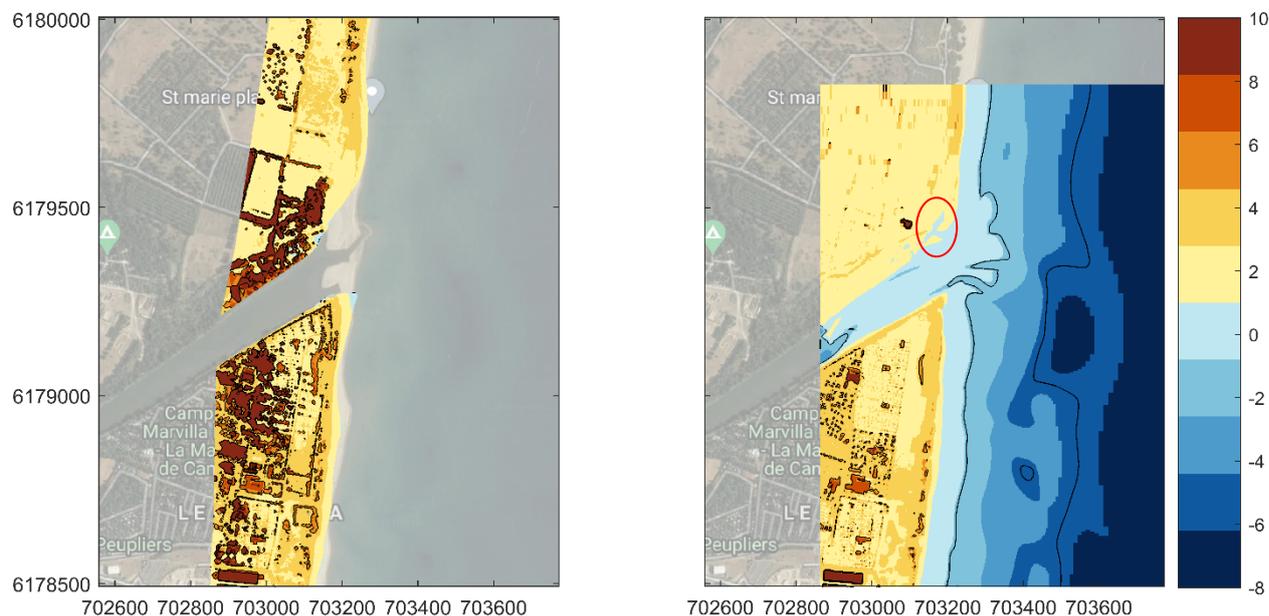


Figure 39. MNS post-tempête dans la zone de l'embouchure de la Têt (à gauche), résultat de l'évolution de l'embouchure calculé par XBeach à la fin de la simulation.

différence dans l'importante érosion observée au nord de l'embouchure correspondant à une phase de creusement d'un chenal, qui n'est pas complètement reproduite par la modélisation, où on observe deux petites flèches (en rouge dans la Figure 30).

La modélisation 2D permet de bien reproduire la non-uniformité de la dérive littorale en lien avec l'hétérogénéité de la topographie de la zone. Elle permet ainsi une meilleure reproduction des phénomènes en jeu dans l'érosion côtière.

La Figure 40 montre la circulation modélisée, moyennée sur la profondeur, induite par les vagues au début, au pic de la hauteur des vagues, au pic du débit du fleuve et dans la phase finale de la tempête, où on peut observer des flux de circulation différents en face de la plage et à l'embouchure du fleuve. Les sorties de XBeach à un pas de temps de 1 h sont utilisées pour faire la moyenne des vitesses des courants (moyennées sur la verticale) pendant les quatre principales périodes de la simulation, définies à partir du début :

- Les premières 7 heures (20/01/2020 02:00 - 09:00);
- 32-7 heures à partir du début, représentative du pic maximum de l'événement (21/01/2020 10:00 - 17:00) ;
- 80-85 heures, représentatives du pic de l'événement de crue (21/01/2020 10:00 - 17:00) ;
- 102-108 heures, donc la fin de l'évènement (24/01/2020 08:00 - 16:00)

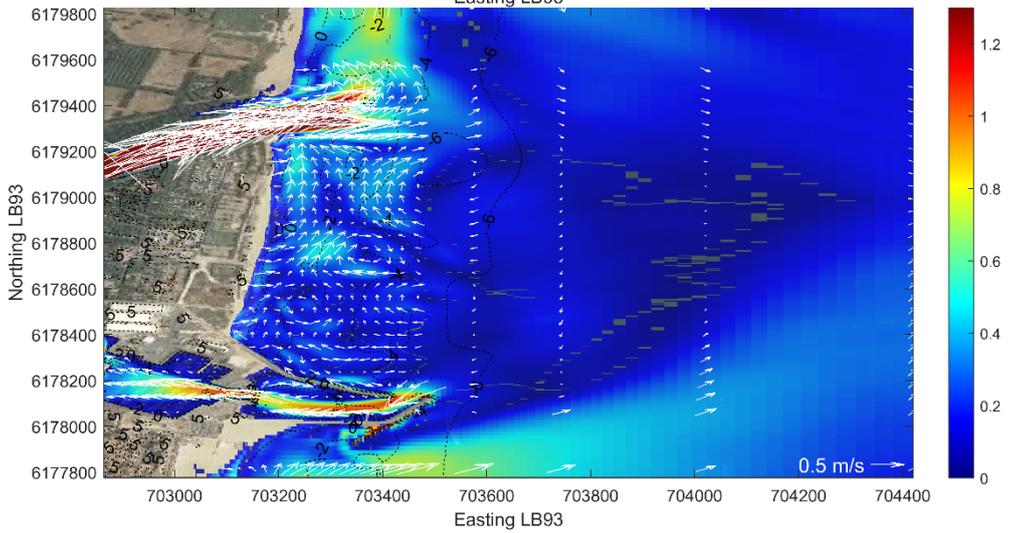
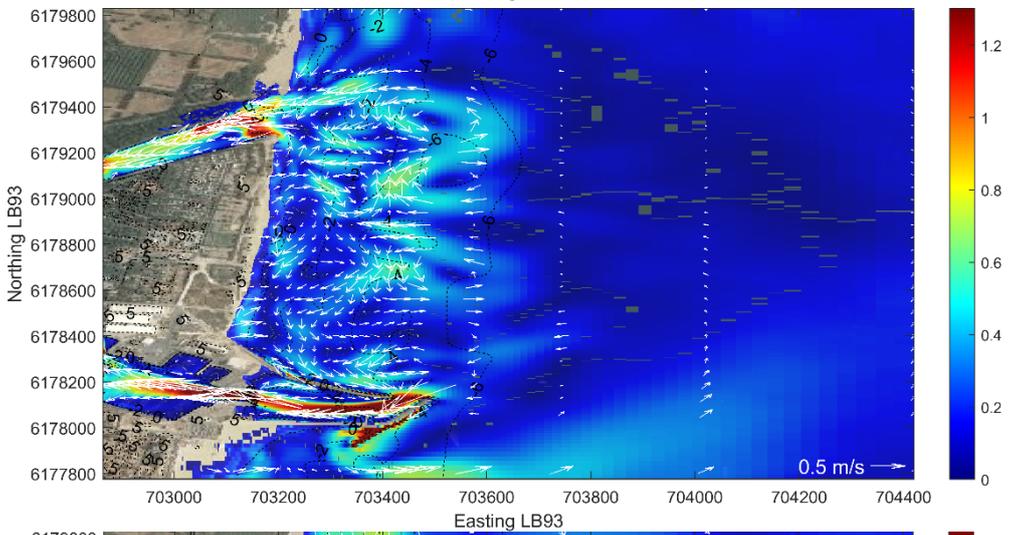
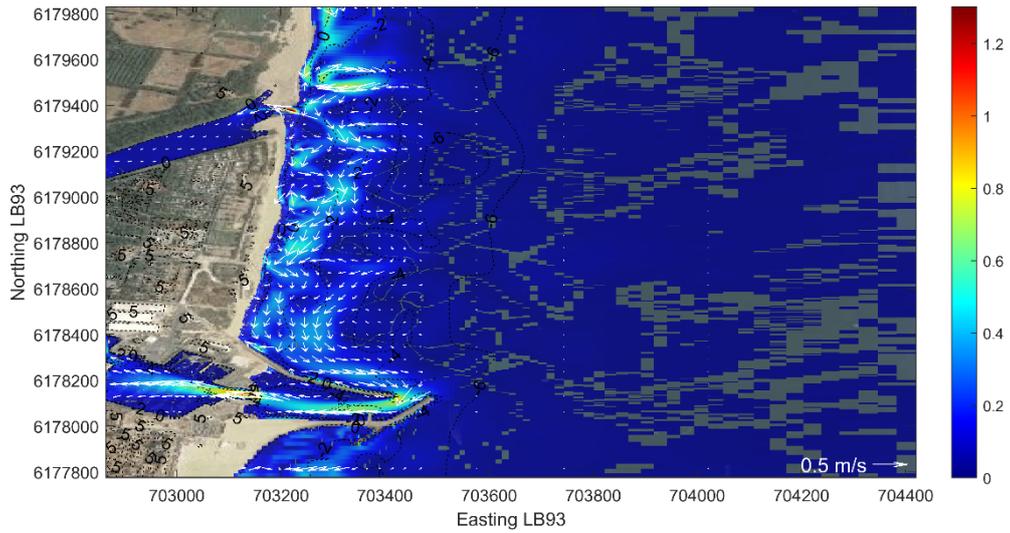
Le début est caractérisé par une dérive littorale établie avec une intensité comprise entre 0,3 et 0,6 m/s. La hauteur significative des vagues est caractérisée par des valeurs entre 1.5 et 2 m (Figure 27). On peut observer que le courant de dérive parallèle à la côte est orienté vers le sud, en raison d'une direction de provenance NE au début de la tempête et est entrecoupé localement par des courants orientés vers le large qui forment des cellules de recirculation, due aux caractéristiques morphologiques de l'avant-côte. Ces cellules entraînent l'eau du déferlement

dans le sens de la dérive littorale, puis perpendiculairement vers le large, au-delà des zones de déferlement, notamment sur les barres d'avant-cote. On peut observer des valeurs très élevées, jusqu'à 1 m/s en face du fleuve, la morphologie de l'embouchure de la Têt étant alors caractérisée par deux flèches sableuses.

Au moment du pic de tempête, la Figure 40 montre à la fois des courants d'entraînement dans le sens de propagation de la houle, et des courants de retour (vers le large) au niveau de la frange littorale. Ces courants de retour s'intensifient (~ 0.6 m/s) lorsque les vagues sont à leur maximum.

Cette phase est caractérisée par de fortes valeurs de flux dans l'embouchure. La direction de ce flux s'inverse dans la troisième phase, où le débit fluvial atteint son pic (1200 m³/s, Figure 30), et des vitesses de 2.4 m/s sont atteintes.

Enfin, dans la quatrième phase une dérive orientée nord-est bien visible, et des courants soutenus à l'embouchure de la rivière sont observables.



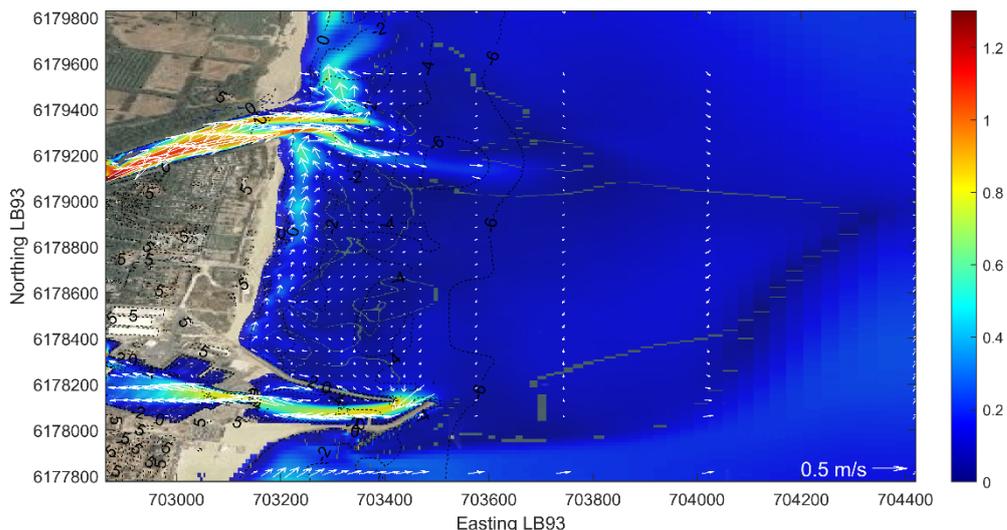


Figure 40. Courants simulés, moyennés sur la profondeur. Les sorties de XBeach à un pas de temps de 1 hr sont utilisé pour faire la moyenne des vitesses des courants (moyennées sur la verticale) pendant quatre principales périodes de la simulation, à partir du début de la simulation et du haut vers le bas : P1 (1-7 heure) , P2 (32-38 heures), P3 (80-85 heures), P4 (100-106 heures).

5.1.2. Frontignan : Calibration pendant la tempête 2016

Sur le site de Frontignan la même version de XBeach, que pour Canet Nord, a été utilisé. Le modèle a été donc mis en œuvre dans sa version 2DH. La simulation de la tempête va du 12/10/2016 19.00 au 15/10/2016 à 00.00.

Les simulations avec XBeach (c'est-à-dire l'hydrodynamique et la morphodynamique) sont effectuées avec une résolution temporelle de 1 s (dtbc = 1), réglable.

La calibration du modèle dans ce cas, en absence de mesures morphodynamiques après tempête, a été réalisée en adoptant une approche basée sur une évaluation qualitative des descripteurs modélisés, tels que les variations longitudinales et transversales des changements de la morphologie, et la localisation et l'ampleur de la portée de la submersion en fonction des informations quantitatives sur l'événement (Réseau Tempête).

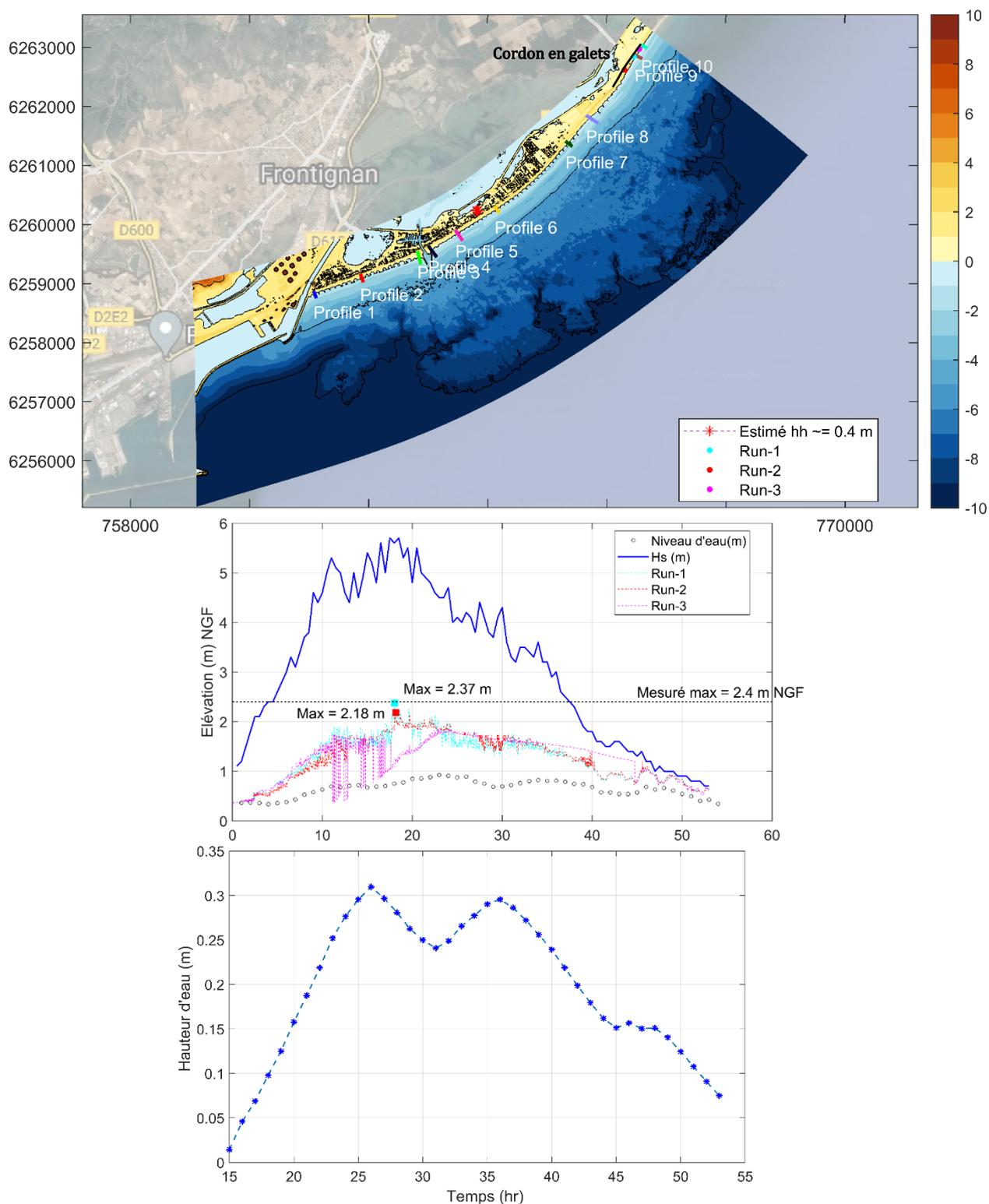


Figure 41. Carte bathymétrique du secteur de Frontignan. Les profils utilisés pour l'évaluation des évolutions morphologiques sont montrés. Trois points d'extraction du jet de rive calculé par le modèle sont présentés sur carte, ainsi que le point où une estimation a été faite de débordement par l'étang. Au milieu, les séries temporelles du jet de rive calculées sur les trois points sont montrées, avec leurs valeurs maximales. Pour l'exhaustivité, le niveau d'eau et hauteur Hs sont présentés. En bas, la série temporelle de la hauteur d'eau sur le point d'estimation, coté étang, est présentée.

Concernant la configuration des paramètres, les valeurs des paramètres modifiées, par rapport

aux valeurs de default, sont $morfac=10$, $facua=0.2$. Puis, la condition des frontières latérale a été aussi modifiée, car la condition classique de Neumann, pour lequel le gradient along-shore de l'élévation et vitesse est fixé à zéro, crée des zones d'ombre dans le champ de propagation des groupes de vagues. En conséquence, la condition *wavecrest*, pour laquelle le gradient de l'énergie des vagues le long des crêtes est à zéro, a été choisi.

Si on considère 0h le début de la tempête, le pic de H_s , de 5.7 m survient T0+18.5h on a, et le pic du niveau d'eau, de 0.84 m NGF à T0+24h. La Figure 41 présente la localisation de trois points autour desquels le jet de rive a été calculé par le modèle et le point où une estimation a été faite pour le débordement de l'étang d'après photos, superposées sur la carte bathymétrique du secteur.

Le jet de rive maximal atteint sur le cordon en galets, par lecture de laisse de mer, est de 2.4 m NGF (paragraphe 3.3.2). La série temporelle du jet de rive calculée par le modèle donne une valeur maximale du jet de rive au point Run-2 localisé en face de la partie finale du cordon en galet, de 2.37 m. La représentation des processus hydrodynamiques semble donc correcte. Autour du point Run-1, plus à l'est, la valeur maximale (2.18 m), est légèrement plus basse mais les estimations sont correctes.

Les hauteurs d'eau induites par le débordement de l'étang d'Ingril dans l'Avenue de Lesseps, fournies par le modèle, sont présentées sur la figure 41 (en bas). Elles indiquent un pic de 0.32 m qui survient 2 h après le pic du niveau marin. Cette valeur est concordante avec les estimations visuelles qui étaient de 0.4 m.

La série temporelle des volumes de submersions (exprimé en hauteur d'eau au-dessus du fond) est présentée sur la figure 42. Dans la simulation, des franchissements sont produits au pic de la tempête notamment, mais le modèle indique que les volumes les plus importants sont liés à la montée du niveau côté étang. Trois zones ont été distinguées, les deux zones plus urbanisées, à partir de la digue du port de Sète jusqu'au port de Frontignan, sud (Zo-A), du nord du port jusqu'au camping Les Tamaris (Zo-B) et enfin la partie plus naturelle et le secteur plus au Sud, jusqu'au début de la plage des Aresquiers (Zo-C). On peut observer que les volumes de la zone Zo-C sont beaucoup plus importants. Pour les hauteurs d'eau calculée supérieures à 0.5 m, le modèle donne un pic de volume d'environ 10,000 m³, donc les zones basses sont complètement submergées. Au contraire, les volumes calculés pour les deux autres secteurs urbanisés sont moins sévères. En prenant en compte les hauteurs d'eau ≥ 0.05 m, le pic dans la Zo-A est de moins 2,300 m³ et pour la Zo-B est de 4,000 m³.

Enfin, d'un point de vue morphologique, une analyse par profils cross-shore pour l'évaluation des évolutions a été conduite. Les profils sont montrés dans la Figure 41 et les résultats de ces évolutions sont présentés dans la Figure 43. Les profils de 1 à 3 sont représentatifs de la Zo-A, entre 4 et 7 la zone représentée est Zo-B, enfin la Zo-C est décrite par les profils 8 à 10. Dans Zo-A, en considérant l'iso ligne 1 NGF, sur le profil 1, on peut observer les variations les plus significatives : un recul maximal de l'ordre de 15 m, générant une falaise d'érosion du pied de dune. Un dépôt du même ordre de grandeur en termes de volume est calculé à l'iso ligne 0 NGF. Le profil 2, situé sur la partie centrale de la plage (dans les épis), présente une plus faible érosion et un dépôt du même ordre que le profil 1, probablement lié à la faible distance entre les épis dans ce secteur qui induit une très grande atténuation de l'énergie de vagues.

Dans la zone Zo-B, le profil 4, situé juste à côté de la digue nord du port de Frontignan, est très linéaire à la fin de la simulation, avec une accrétion de 2 m sur l'iso ligne 1 m NGF. Le profil 6 montre une très forte érosion, avec la formation d'une falaise d'érosion à partir d'une élévation de 2 m NGF, et une inversion de tendance autour de 0 m NGF. Les volumes mobilisés sur le profil 6 de l'ordre de 35-40 m³/m sont ainsi quasi complètement préservés sur le profil. Les deux

profils (5-6) présentent des barres d'avant-côte bien formées, qui sont légèrement impactées par les vagues plus hautes.

Sur le secteur Zo-C, les profils 8 et 9 sont complètement lissés, avec un recul de 13 m du pied de dune sur le profil 9. Le dernier profil (10), situé juste à côté du cordon en galets exhibe une évolution caractérisée par un fort abaissement de la berme (0.80 m). Le sable érodé est transporté vers le large et à terre. La Figure 44 met en évidence les phénomènes liés aux franchissements et la création de lobes d'*overwash* dans cette zone, au début de la plage des Aresquiers, avec la formation donc de dépôts de sédiments sur l'arrière-dune.

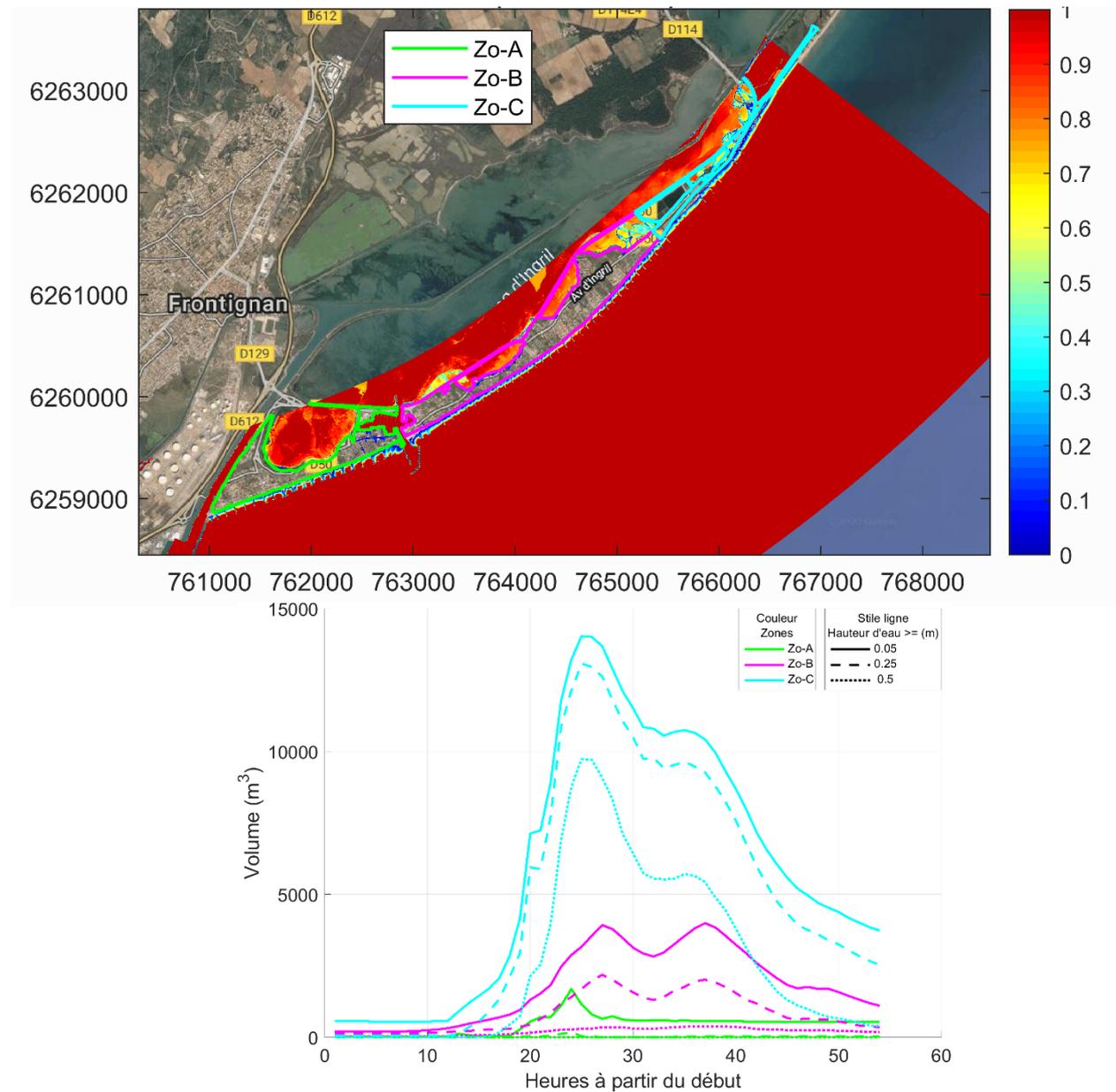


Figure 42. Cartographie des submersions lors de la tempête d'octobre 2016 (au pic). Trois zones ont été définies, Frontignan, au sud du port (Zo-A), du nord du port jusqu'au camping Les Tamaris (Zo-B), enfin la partie plus naturelle, jusqu'à la plage des Aresquiers (Zo-C). La série temporelle des volumes de submersion calculés par franchissements et débordements des étangs est présentée.

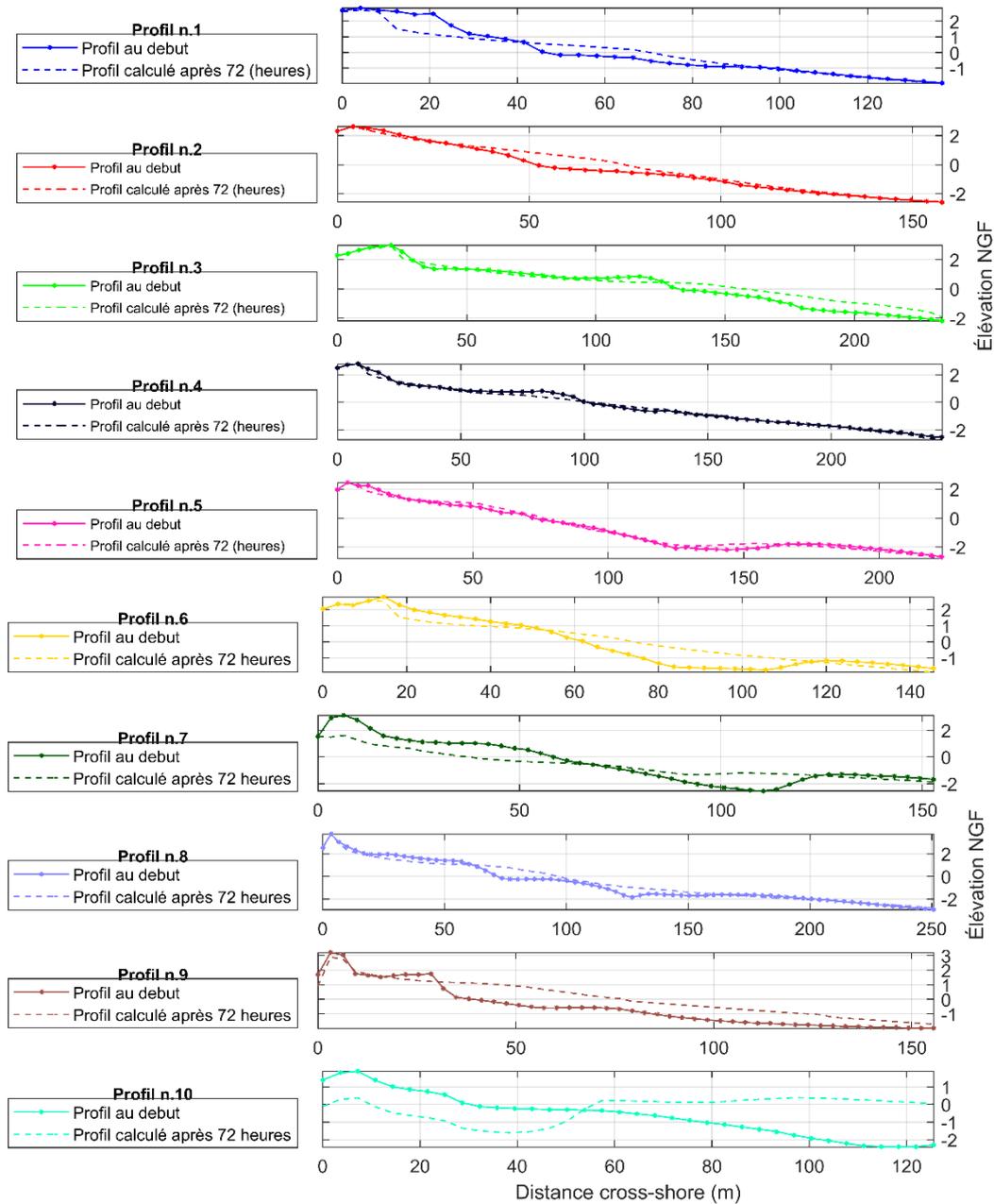


Figure 43. Comparaison visuelle entre les profils de plage calculés avec XBeach au début et à la fin de la tempête simulée.

Compte tenu des informations disponibles, on peut considérer que les simulations de l'érosion et la submersion réalisées avec XBeach reproduisent correctement l'évènement d'octobre 2016, notamment les zones simulées comme inondées étant conformes aux observations. Une légère sous-estimation de la submersion sur les zones potentiellement affectées par débordement des

étangs peut affecter les résultats, mais reste difficile à le vérifier quantitativement sans mesure in-situ.

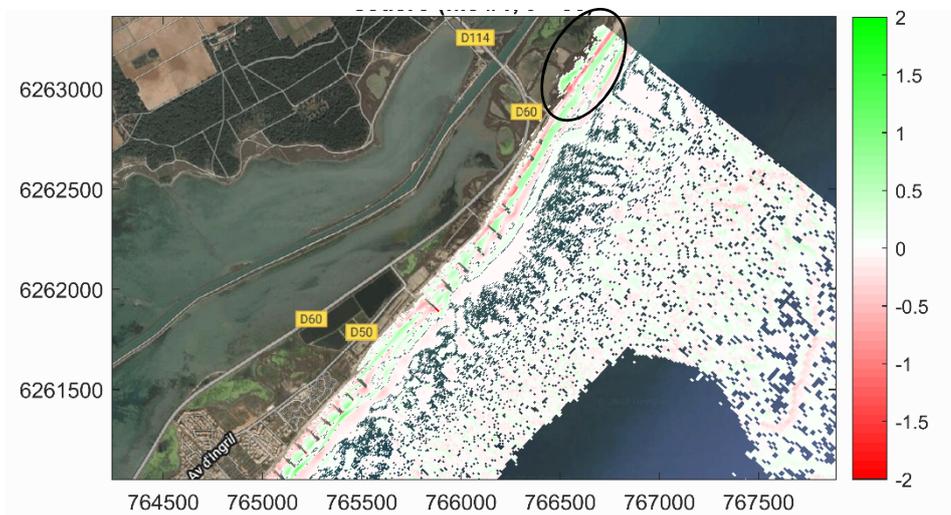


Figure 44. Carte d'érosion/accrétion des sédiments cumulative dans la zone Zo-C, calculée avec XBeach à la fin de la tempête d'octobre 2016.

5.2. SCENARIO D'UN EVENEMENT DE TYPE CINQUANTENNAL

Une fois les modèles validés pour les deux sites, afin de vérifier l'influence de l'érosion événementielle sur les calculs de la submersion, un scénario de tempête extrême a été mise en place. Le scénario hydrodynamique retenu est présenté dans cette partie, ainsi que l'analyse des résultats de submersion pour les deux cas incluant ou non l'évolution morphologique pendant la tempête. Dans le premier cas, le module de calcul du transport de sédiments et l'évolution morphologique sont actifs (*sedtrans* et *morphology* dans XBeach égaux à 1), et dans le second, ils sont désactivés.

Comme évoqué précédemment, le choix fait pour l'élaboration du scénario extrême est plutôt maximisant. En effet, il est caractérisé par les conditions marines de période de retour de 50 ans avec un prévisionnel des pics de niveau d'eau synchronisé avec le pic d'intensité des vagues. Les valeurs des pics choisis sont dérivées de l'analyse en Balouin et Belon (2012), discutés dans le paragraphe 2.2.4. Ce scénario de référence est caractérisé par une direction de provenance frontale des vagues par rapport à la direction du trait de côte, soit de 90°N

Le scénario de l'événement prévoit un temps de simulation de 72 h de conditions de tempête. Cette durée correspond à la durée régulièrement observée pour les plus grosses tempêtes dans la région. Pour ce scénario, la dynamique du niveau moyen et des vagues aux limites des modèles a été calquée sur l'évolution des conditions en maximisant potentiellement les impacts et prévoit donc une concomitance des pics de niveaux et d'intensité des vagues pour autour 12h (Figure 45). Ce choix est maximisant en ce sens qu'il prévoit un pic simultané pour les deux variables ce qui n'est pas nécessairement le cas lors de tempêtes observées et utilisées pour validation de modèles, Gloria et la tempête d'octobre 2016. L'évolution des conditions au cours de l'évènement est illustrée dans la Figure.

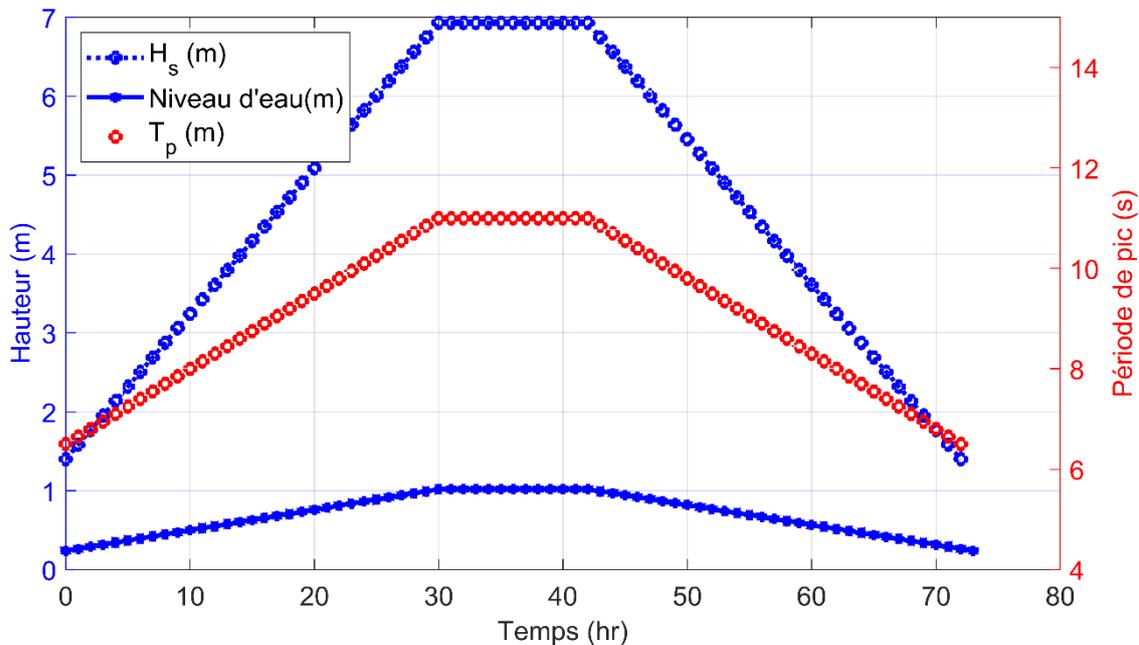


Figure 45. Cinétique de la tempête, durée de 72 heures, avec une condition de pic instaurée pour 12 h. Scénario avec période de retour 50 ans.

Pour différentes zones définies dans les deux secteurs d'étude, quatre variables sont en particulier utilisées pour caractériser les changements morphodynamiques de la plage et l'évaluation des inondations: volume d'érosion (m^3/m), volume de débordement (m^3/m), recul maximum (m) et surface de submersion (m^3/m). Comme mentionné dans le début du chapitre, les variables volumétriques sont calculées à partir des sorties de XBeach, moyennées sur les zones. Les volumes d'érosion sont calculés à partir de la plage subaérienne, au pied de dune, jusqu'au niveau -4 m NGF, qui détermine approximativement la profondeur d'eau où se produisent les principaux changements de profil. Les volumes (absolus), définis d'overwash, sont calculés comme des dépôts de sédiments qui impactent le système dunaire et l'arrière-dune, données par les phénomènes de franchissements et débordement. Ces volumes sont calculés par mètre linéaire de largeur de plage. Le recul sur différents profils cross-shore est mesuré à différentes altitudes sur la plage, au-dessus du niveau NGF.

5.2.1. Canet Nord : scénario cinquantennal

Dans le secteur de Canet Nord, la modélisation a été mise en place selon le scénario décrit précédemment, caractérisée par une direction frontale des vagues (90° N).. Le scénario avec module de morphodynamique activé est S_{c0m1} , inversement S_{c0mo} .

Les évolutions morphodynamiques simulées pour le scénario S_{c0m1} sont montrées dans la Figure 46, sur trois zones du secteur d'étude, tandis que la variation des variables de contrôle pour chaque zone est présentée dans les Figure 47, Figure 48 et Figure 49 pour la morphodynamique et l'évolution de la submersion respectivement.

Une très forte érosion de la plage émergée est déjà visible 2 heures avant le pic de l'évènement. On peut observer :

- 1) des pics de 1 m d'érosion sur la plage du Sardinal (Ca-B), notamment au sud ;
- 2) l'ouverture de l'embouchure avec les flèches qui se déplacent dans le fleuve, et la formation d'un dépôt sur la rive nord ;
- 3) une importante perte de sédiments sur la rive sud de l'embouchure, avec une baisse jusqu'à 1.5 m ;
- 4) la plage de la Jeté de Canet, au sud, est moins impacté ;
- 5) des chenaux d'érosion se forment à l'entrée du port ;
- 6) à l'embouchure, on constate, par les dépôts, la transition d'un régime de collision à celui de franchissements. Sur certaines zones, des recouvrements sont déjà observables.

En général, en considérant le régime de Sallenger (2000), dans cette phase on est dans un régime de collision, où le jet de rive qui atteint le pied de la dune provoque la formation des falaises d'érosion.

L'observation au pic de l'évènement à t_0+36h , des évolutions morphologiques subies par le système permettent de constater que :

- 1) la transition entre le régime de collision et les franchissements est rejointe sur les trois zones du secteur ;
- 2) une extension de l'ampleur et la hauteur d'érosion sur la plage du Sardinal, jusqu'à - 1.7 m d'abaissement dans la rive sud de l'embouchure et dans la partie sud, à l'enrochement ;
- 3) l'embouchure qui est complètement érodée montre l'accrétion du dépôt sur la rive nord, qui devient important, en hauteur jusqu'à 1.5 m au-dessus du niveau initial.

Ce régime de franchissement par paquets de mer produit des déferlements des vagues au-delà de la dune. Des recouvrements de sédiments sur la zone de l'arrière-dune sont observés sur tout le secteur, principalement au nord de l'embouchure, mais ils atteignent également la zone de la plage du Sardinal, au niveau notamment des points bas de la dune (cercles noirs sur Figure 46).

À la fin de la simulation, on peut observer qu'une intensification des impacts des phénomènes décrits par avant a eu lieu. Les recouvrements sont plus importants, et touchent aussi la plage de la Jetée de Canet. Les conditions hydrodynamiques pour cette période sont illustrées dans le Tableau 4.

Le modèle indique également une érosion significative des barres sableuses, et on peut observer une mobilisation jusqu'à la profondeur de fermeture (autour de -4m NGF) mais surtout une migration vers le large, d'environ 30 m. La modélisation du système de barres représente parfois une limitation pour XBeach, car ce modèle est aussi connu, dans certains cas de littérature, pour reproduire une linéarisation des formes complexes d'avant-côte.

Dans la Figure 47, une comparaison entre les profils de plage (jusqu'à -1 m NGF) à l'heure zéro de la simulation et à la fin de la tempête, calculés avec XBeach, est présentée. Comme fréquemment observé après les grosses tempêtes sur les plages sableuses du Roussillon, on peut observer la création d'une rupture de pente très nette qui marque la limite entre de petites falaises d'érosion dunaire, jusqu'à environ 2 m NGF et la plage. La comparaison visuelle des différents profils générés par le modèle pour ce scénario montre des reculs importants. En considérant les reculs à la hauteur de 1.75 m NGF, qui sont les plus importants, les valeurs atteignent jusqu'à 18-20 mètres au maximum. Sur les profils 3 et 4, en particulier, dans la zone centrale de la plage du Sardinal, on peut observer un abaissement de la dune, évolution qui correspond à un phénomène de forte érosion. Le sable érodé est transporté partiellement vers le large, mais en partie sur l'arrière-dune, comme souligné par les recouvrements montrés de la Figure 46, à droite, représentatives de la fin de la simulation.

Les données d'évolution des recouvrements sont montrées dans la Figure 48. Parmi les trois zones investiguées, le nord de l'embouchure et la plage du Sardinal sont les plus affectées, avec des pics d'autour 0.11 m³/m. Ces recouvrements commencent à se produire à 30h+t0 et se développent pendant la période du pic de la tempête. Pour la zone Ca-B, ce processus se poursuit jusqu'à 60h+t0, nettement prédominant sur le chenal créé au milieu de la plage (profile 3) par l'abaissement de la dune et dans la partie sud, à côté de la digue.

Les estimations des volumes d'érosion cumulés le long du littoral jusqu'à une profondeur de -4 m NGF indiquent des déplacements de sédiments vers le sud. Le transport s'effectue dans la direction perpendiculaire à la plage, et reste limité dans la direction parallèle. Les valeurs calculées restent assez limitées avec un pic négatif de -0.4 m³/m, peu significatif en raison de la présence de l'embouchure, et dans les autres zones restent légèrement positives. Il y a donc pas de perte sédimentaire pour le système

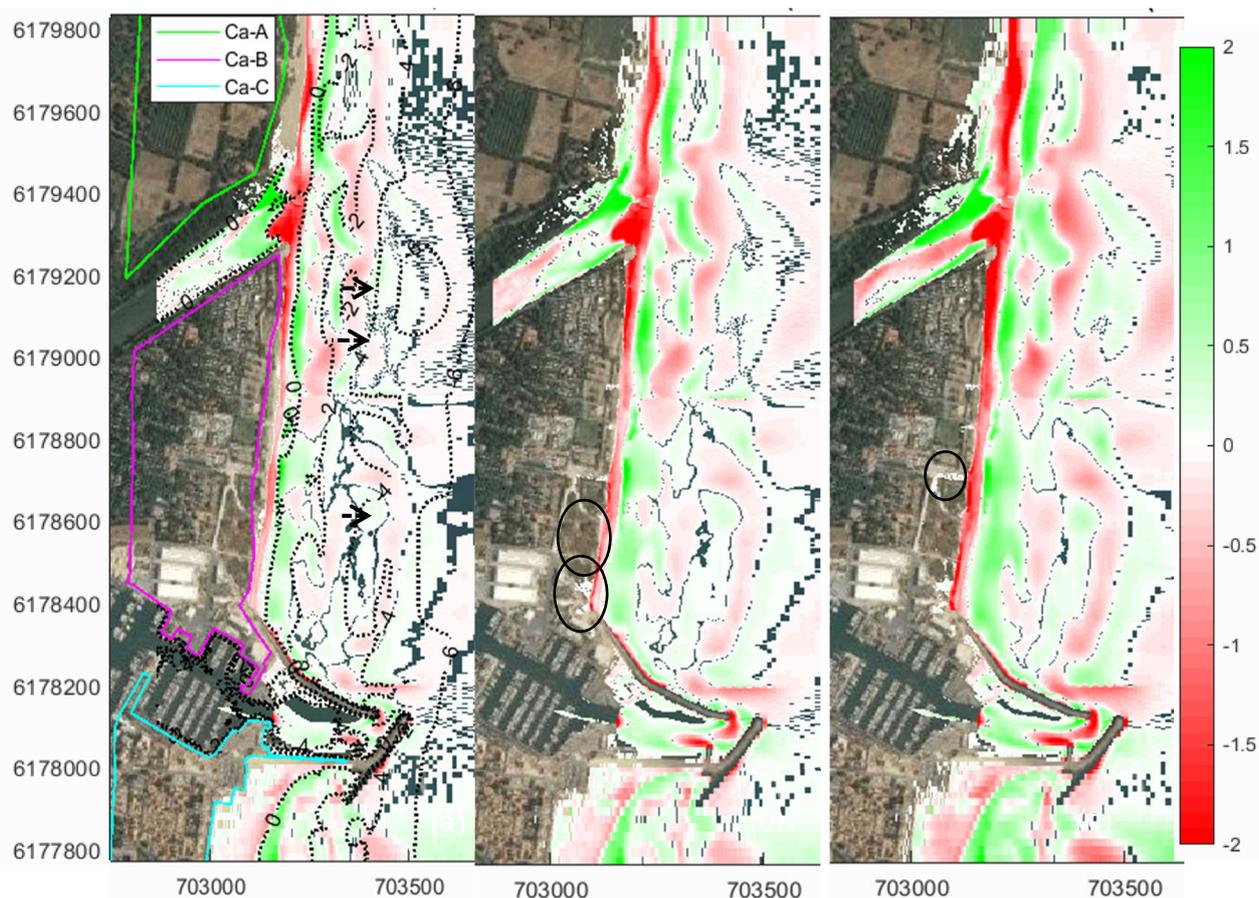


Figure 46. Simulation de l'érosion/accrétion cumulée pour le scénario S_{c0_m1} . a) 2h avant le pic de l'évènement (t_0+29h), b) au pic central de l'évènement (t_0+36h), c) à la fin de l'évènement (t_0+73h).

Tableau 4. Conditions au large associées aux illustrations lors de l'évènement de type cinquantennal.

	Niveaux (m/NGF)	H_s (m)	T_p (s)	D_p (°)
Situation 1 (2h avant le pic)	0.96	6.5	10.86	90
Situation 2 (au pic de l'évènement, $t_0+ 36h$)	1.02	6.93	11	90
Situation 3 (10h après le pic, t_0+46h)	0.94	6.37	10.55	90
Situation 4 (fin de l'évènement)	0.24	1.4	6.5	90

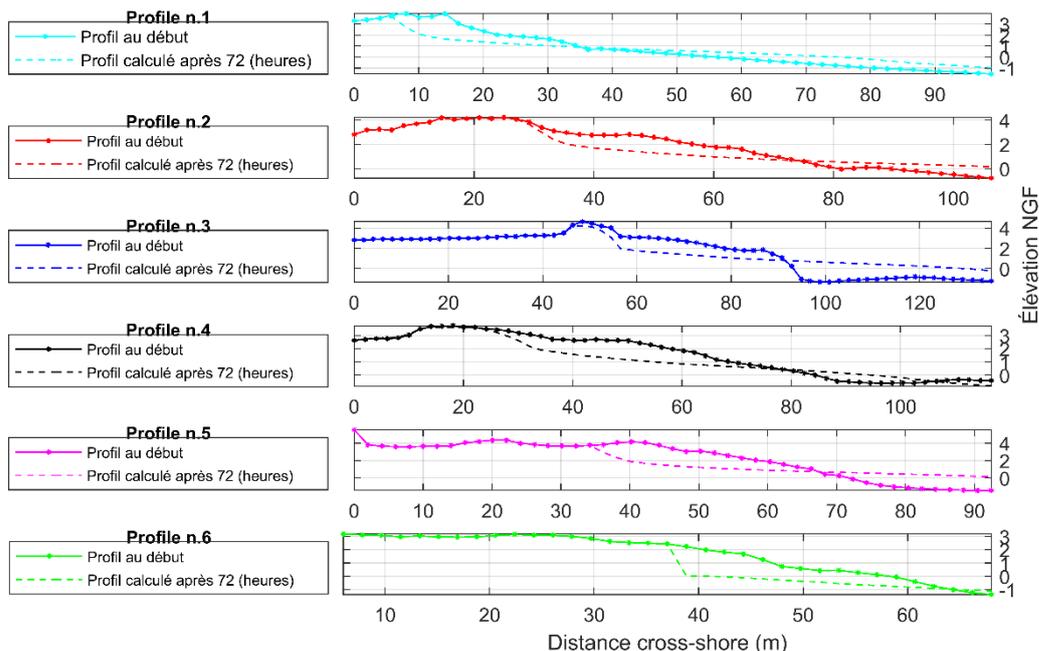


Figure 47. Comparaison entre les profils de plage (jusqu'à -1 m NGF) à l'heure zéro (t_0) de la simulation et à la fin de la tempête, calculés avec XBeach.

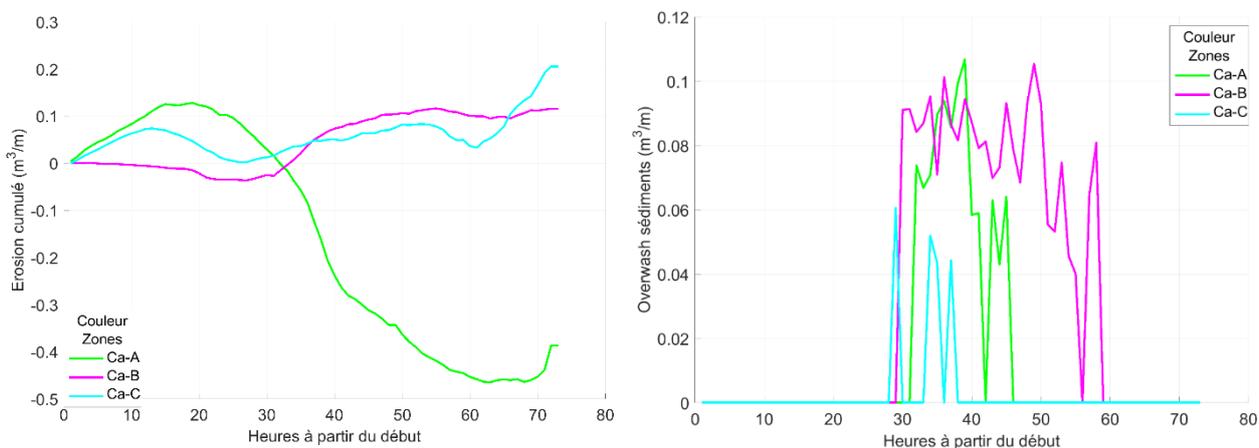


Figure 48. Variation des volumes d'érosion/accrétion cumulés calculée pour le scénario S_{c0_m1} au cours du temps et pour les trois zones investiguées. À droite, la variation des volumes de recouvrements (overwash) de sédiments calculés pour le même scénario en fonction du temps de simulation, le seuil de 0.02 m est utilisé pour exploiter les séries chronologiques.

La cinématique de la submersion dans le secteur de Canet Nord permet d'illustrer le caractère évolutif des zones affectées durant la tempête, ainsi que d'apprécier l'ampleur des submersions pouvant résulter de phénomènes de franchissements persistants (Figure 49).

En effet, sur ce site différentes sources sont à l'origine des submersions qui affectent l'ensemble du secteur :

- 1) des franchissements importants dès le début de l'évènement au Nord de l'embouchure qui produisent des écoulements importants vers la zone naturelle, topographiquement plus basse,
- 2) au pic de la tempête des franchissements importants et le remplissage d'un fossé artificiel creusé pour évacuer l'eau de la zone 1 vers la zone naturelle,
- 3) des franchissements importants au Sud de la plage du Sardinal, au niveau de la digue nord, très impactée par une importante érosion;
- 4) des franchissements lors du pic de la tempête en deux points bas du cordon dunaire (accès plage, points de fragilité du cordon dunaire) et à la rive sud de l'embouchure ;
- 5) des franchissements importants au pic de la tempête dans la partie nord de la plage de la jetée de Canet, qui provoquent jusqu'à 50 cm de submersion ;
- 6) les surfaces bordant le port sont affectées par une dizaine de centimètres d'eau

Les calculs des volumes pour estimer l'ampleur de submersion sont présentés dans la série temporelle de la Figure 49. Dans ce cas, les deux scénarios avec la morphodynamique activée (S_{c0_m1}) ou non (S_{c0_mo}), sont présentés. On peut observer, dans les trois zones investiguées, que les effets de l'érosion sont très remarquables sur les différences de surface de submersion calculées pour les deux scénarios. Le seuil utilisé pour les calculs est de 0.02m de hauteur d'eau. Le pic de submersion dans la zone Ca-A, au nord, est d'environ 75000 m² pour le S_{c0_m1} , à T0+40h, mais n'atteint que 14 500 m² pour le S_{c0_mo} , à T0+46h. Les effets d'un important déplacement de sédiments à l'embouchure peuvent surement expliquer cette différence.

Dans la zone Ca-B, de la plage du Sardinal, le pic de submersion calculé est de 9 300 m² pour S_{c0_m1} , à T0+37h, alors qu'il n'est que de 4 500 m² pour le S_{c0_mo} . Enfin la zone Ca-C est caractérisée pour un pic de submersion calculé de 12 500 m² avec module de morphodynamique activé, la valeur descendant à 11 200 m² pour le scénario S_{c0_mo} .

Il faut mentionner que les analyses ont été élargies pour l'évènement cinquantennal dans le secteur nord de l'embouchure de la Têt et au sud de la digue sont plus large que dans la zone centrale, ce qui peut expliquer les valeurs beaucoup plus importantes

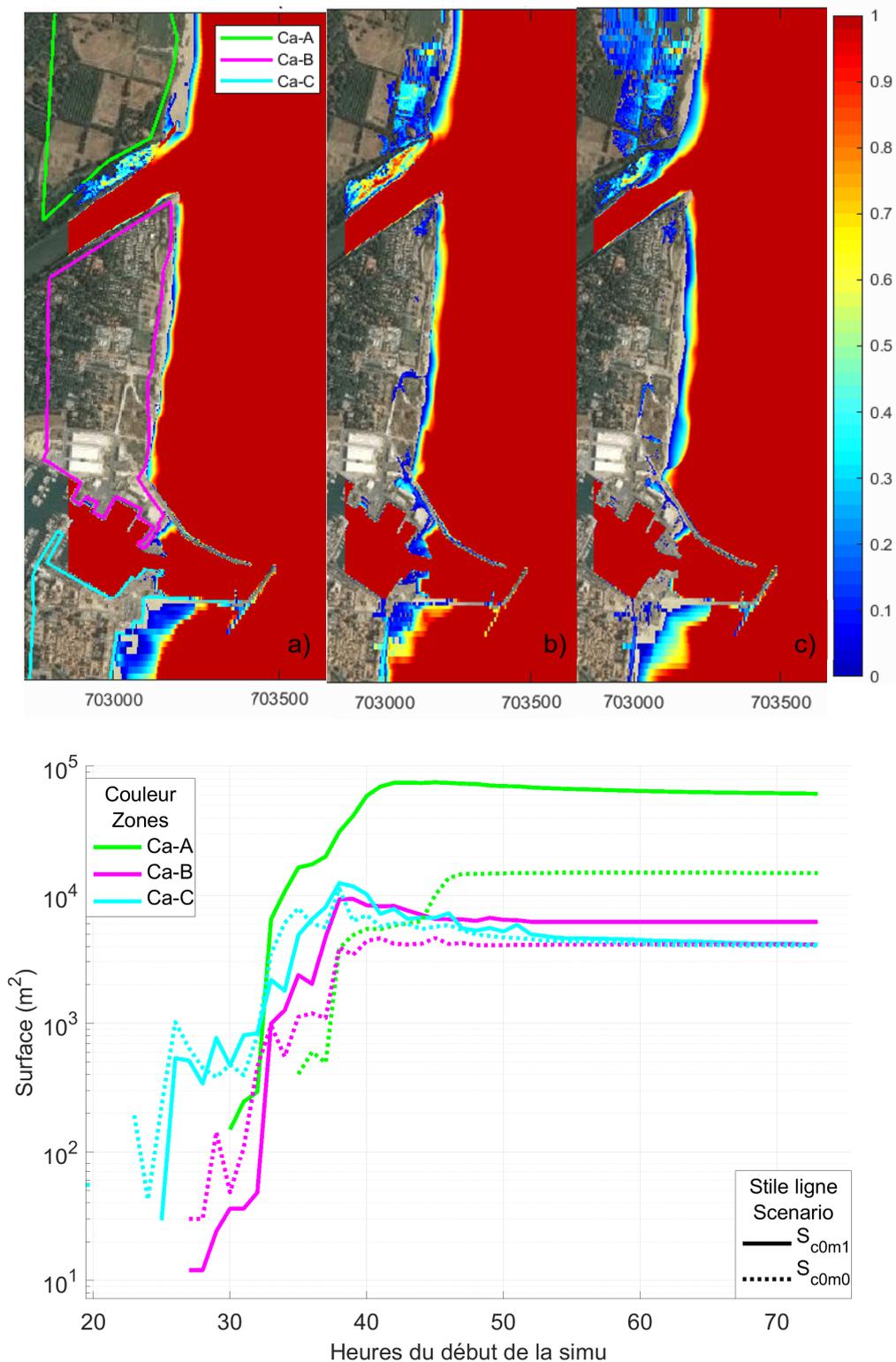


Figure 49. Simulation des submersions pour le scénario S_{c0_m1} . a) 2h avant le pic de l'évènement (t_0+29h), b) au pic de l'évènement (t_0+36h), c) 10h après le pic (t_0+46h). Les conditions marines associées à chaque situation sont présentées dans le Tableau 4. En bas, la variation des surfaces de submersion calculée par XBeach pour les deux scénarios S_{c0_m1} et S_{c0_m0} , au cours du temps et pour les trois zones investiguées. L'axe Y est logarithmique.

5.2.2. Frontignan : scénario cinquantennal

Dans le secteur de Frontignan, la modélisation prévoit pour le scénario de référence une direction de provenance frontale de vagues par rapport à la direction du trait de côte, soit de 147°N , nommé S_{f0} . Le scénario avec le module de morphodynamique activé est S_{f0_m1} , inversement S_{f0_m0} .

Evolutions morphologiques

Les évolutions morphodynamiques simulées pour le scénario S_{f0_m1} sur les profils cross-shore, présentés pour ce secteur dans le paragraphe 5.1.2, sont montrées dans la Figure 50, sur trois zones investiguées dans le secteur d'étude, tandis que la variation des variables de contrôle pour chaque zone sont présentées dans la Figure 52. Un instantané du niveau d'accrétion/érosion au pic de la tempête est illustré dans la Figure 51.

On peut observer que les effets sur le transport sédimentaire sur les trois zones d'études sont assez différents. Les reculs au niveau de 1.75 m NGF dans la zone proche de la jetée de Sète, Zo-A, sont caractérisés par des valeurs faibles en moyenne (1-2 m), à l'exception du profil 1 qui présente jusqu'à 8 m de recul maximal. Au pic de la tempête, cette évolution est plus claire (cf. Figure 50). Les caractéristiques des courants locaux ont des effets importants sur la dynamique de cette zone. Un lissage marqué des profils est visible, avec la formation de falaises d'érosion sur le haut de plage et l'abaissement des profils submergés. L'efficacité de protection des épis sur l'ampleur de l'érosion est modérée.

Dans la zone Zo-B, les profils 4 et 6, face à la zone plus urbanisée, sont susceptibles d'évoluer de manière similaire à celles de la zone Zo-A et donnent des valeurs basses de recul, avec un pic de 10 m d'érosion pour le 6. Le profil 7 est fortement érodé, et la dune, déjà de faible hauteur, s'abaisse considérablement, perdant autour de 1.5 m en élévation, donc un volume important de sédiments est déplacé vers le large. Le profil est localisé en face du camping Sandaya, où on peut observer d'importants recouvrements de sédiments, au pic de la tempête, Figure 51b, qui atteignent 0.6 m dans les zones basses d'arrière cordon.

Enfin, pour la zone Zo-C, la Figure 50 montre une régularisation marquée de la forme du bas de plage, et notamment les profils 8 et 9, correspondants au cordon en galets, qui présentent une nette progradation de l'isoligne 0 m NGF, de l'ordre de 10 à 20 m. Le profil 10 est caractérisé par une très forte perte de sédiments, il s'éloigne d'une évolution morphologique fiable. Ce constat indique que la morphologie post-tempête reproduite par le modèle en frontière de la grille de calcul est probablement aberrante.

La transition entre la phase de collision et le régime de franchissement par paquets de mer est atteinte juste avant le pic de la tempête et se poursuit pendant au pic de l'évènement. On peut observer des volumes de recouvrements significatifs sur la Figure 51, l'ouverture de 5 points de brèches, face aux derniers épis. La largeur maximale parmi les trois est de 30 mètres, avec des abaissements atteignant 1.5 m (profil 7). On constate d'importants franchissements et pendant les 11h de pic de la tempête, un régime d'inondation est instauré, et des volumes importants d'eau pénètrent dans l'arrière dune.

La variation des volumes d'érosion/accrétion cumulée calculée pour le scénario S_{f0_m1} au cours du temps est présentée dans la Figure 52 et met en évidence une mobilisation prédominante dans la direction cross-shore qui reste dans la limite de la profondeur de -4 m NGF. La morphologie post-tempête reproduite par le modèle dans la zone plus naturelle au début de la plage des Aresquiers est caractérisée par un cumul positif, qui provient partiellement par la zone adjacente (B). Cela confirme la faible fiabilité des résultats en bordure de la grille de calcul.

La variation des volumes de recouvrements (cf. Figure 52, à droite) calculés pour le même scénario au cours du temps de la simulation avec un seuil de 0.01 m utilisé pour exploiter les séries chronologiques indique que les recouvrements le plus importants sont calculés dans la zone Zo-C, phénomène qui commence avant T0+20h. L'évolution temporelle montre un pic de 0.62 m³/m à T0+20h. Ces dépôts de sédiments sont bien visibles au pic de la tempête sur la figure 51. Dans les deux autres zones, le taux de recouvrements potentiels calculé est plus élevé, avec des valeurs de 0.28 et 0.22, dans la Zo-A et Zo-B. Les volumes les plus considérables sont produits après les ouvertures des brèches dans le cordon, qui sont localisés dans la partie terminale de la série d'épis (cf. figure 51).

Submersion marine

Les mécanismes de submersion associés à ce scénario cinquantennal S_{f0_m1} est très différent de celui de Canet. En effet, le secteur de Frontignan est également affecté par la surverse des étangs, ayant pour conséquence une extension drastique des secteurs submergés. Les volumes de surverse des étangs sont du même ordre de grandeur que les volumes obtenus par franchissement sur la façade maritime.

Ainsi, pour le scénario S_{f0_m1} (cf. Figure 53), on note:

- 1) la zone Zo-A de Frontignan plage est affectée par des franchissements conduisant à des hauteurs d'eau variables mais pouvant dépasser 0.75 m, notamment dans la partie sud,
- 2) la zone Zo-B est fortement affectée et l'eau circule de manière continue entre l'étang et la plage, avec des hauteurs d'eau dans les points plus bas atteignant 1 m,
- 3) la zone naturelle au début de la plage des Aresquiers est complètement submergée par plus de 1 m d'eau,
- 4) les quartiers bordant le port sont affectés par une dizaine de centimètres d'eau.

Les calculs d'évaluation du volume, de l'ampleur et la sévérité de la submersion sont présentés dans la série temporelle de la Figure 53 (en bas). Les deux scénarios avec la morphodynamique activée (S_{c0_m1}) et non active (S_{c0_m0}), sont présentés. On peut observer, dans les trois zones investiguées, que l'impact de l'érosion dunaire sur la surface submergée est très importante. Le seuil utilisé pour les calculs est de 0.02 m de hauteur d'eau. La seule zone qui montre le même niveau d'impact est la Zo-A, le pic rejoint pendant la tempête pour les deux scénarios est d'environ 175,000 m². Il est nécessaire de mentionner que le pic et en général les processus de franchissements se produisent plus tôt (2-3 h) dans le scénario S_{c0_m1}. On peut spéculer qu'avec un pic de tempête plus bas et une durée inférieure, dans le S_{c0_m0}, les franchissements ne pourraient pas avoir eu lieu dans la même intensité.

Dans la zone centrale, qui est la plus impactée, presque 420,000 m² d'eau atteignent la ville, dans le S_{c0_m1} à son pic, à environ T0+41h, quantité qui n'atteint que 320,000 m² pour le S_{c0_m0}, à T0+ 46 h. Les effets des surverses des étangs sont très importants comme mentionné, et la différence est donnée par un apport inférieur des franchissements. La présence de plusieurs zones basses dans le secteur facilite l'augmentation de la surface inondée (Figure 53).

Enfin, la zone des Aresquiers, Zo-C, est caractérisée par un pic de submersion calculé de 90,000 m² avec le module de morphodynamique activé, valeur qui descend à 48,000 m² pour le scénario S_{c0_m0}. Dans le scénario S_{c0_m1}, on constate un début des phénomènes de submersion par franchissements, assez précoce, autour de T0+20h. La hauteur significative (Figure 45) est à ce moment de l'événement d'environ 5 m.

Il faut mentionner que le résultat des analyses de submersion, dans le secteur des Aresquiers, est probablement légèrement surestimé en raison de grille du modèle plus large dans ce secteur.

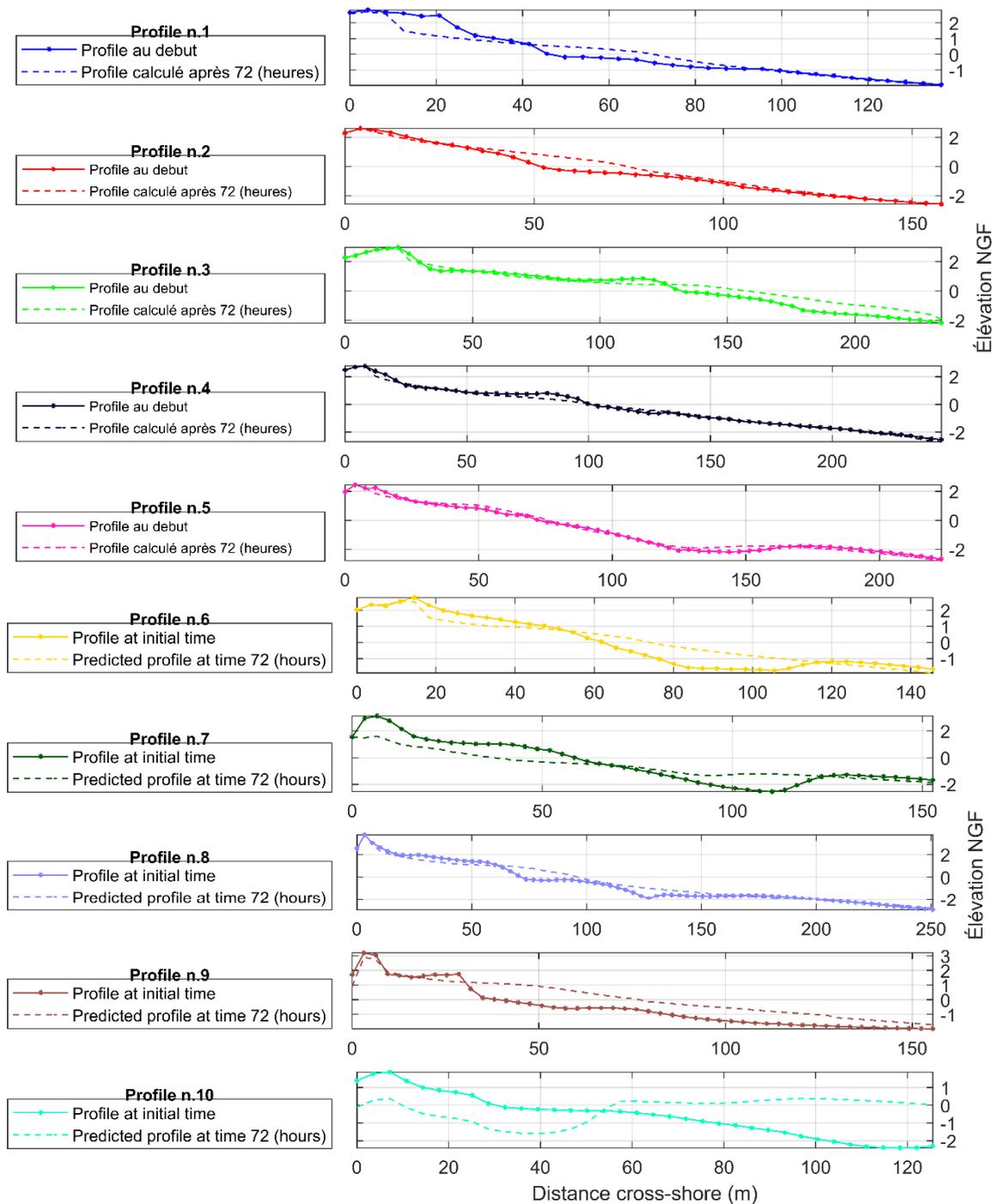


Figure 50. Comparaison entre les profils de plage (jusqu'à -2 m NGF) à l'heure zéro (t_0) de la simulation et à la fin de la tempête, calculés avec XBeach.

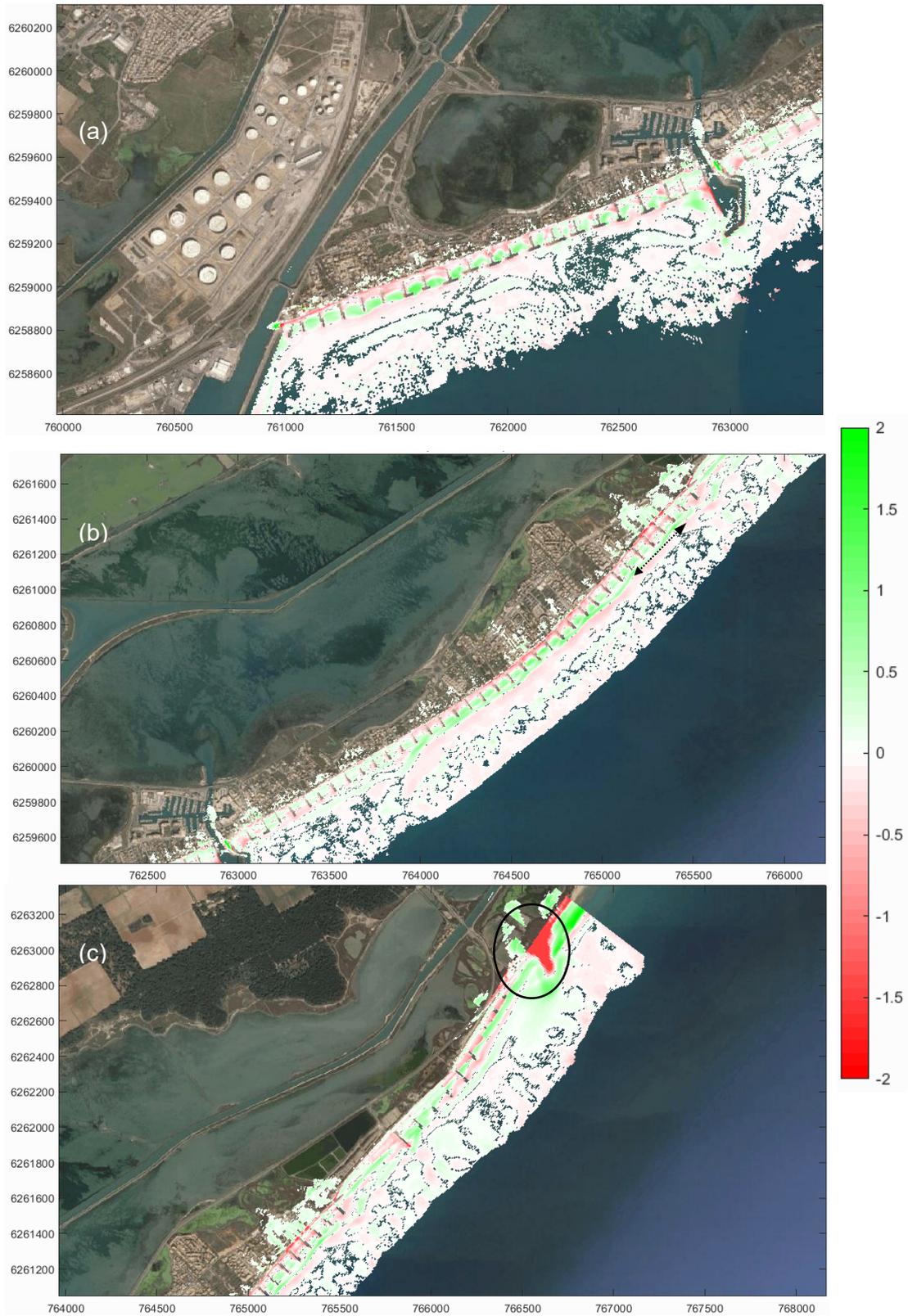


Figure 51. Simulation de l'érosion/accrétion pour le scénario S_{f0_m1} , au pic de la tempête ($t0+36h$). a) Zo-A, b) Zo-B, c) Zo-C.

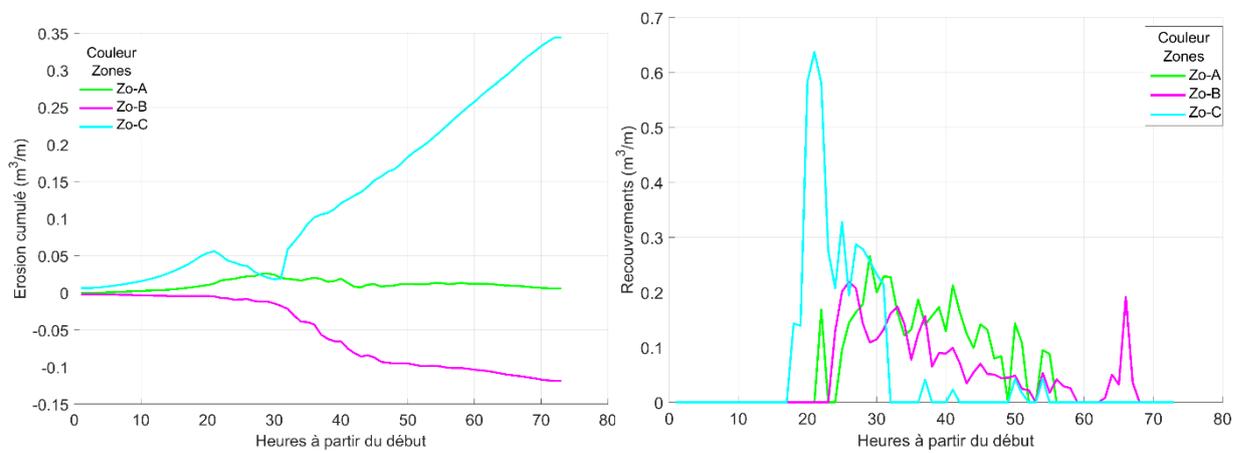


Figure 52. Variation des volumes d'érosion/ accréation cumulés calculée pour le scénario S_{f0_m1} au cours du temps et pour les trois zones investiguées. À droite, la variation des volumes de recouvrements (overwash) de sédiments calculés pour le même scénario en fonction du temps de simulation et pour les trois zones. Le seuil de 0.01 m est utilisé pour exploiter les séries chronologiques.

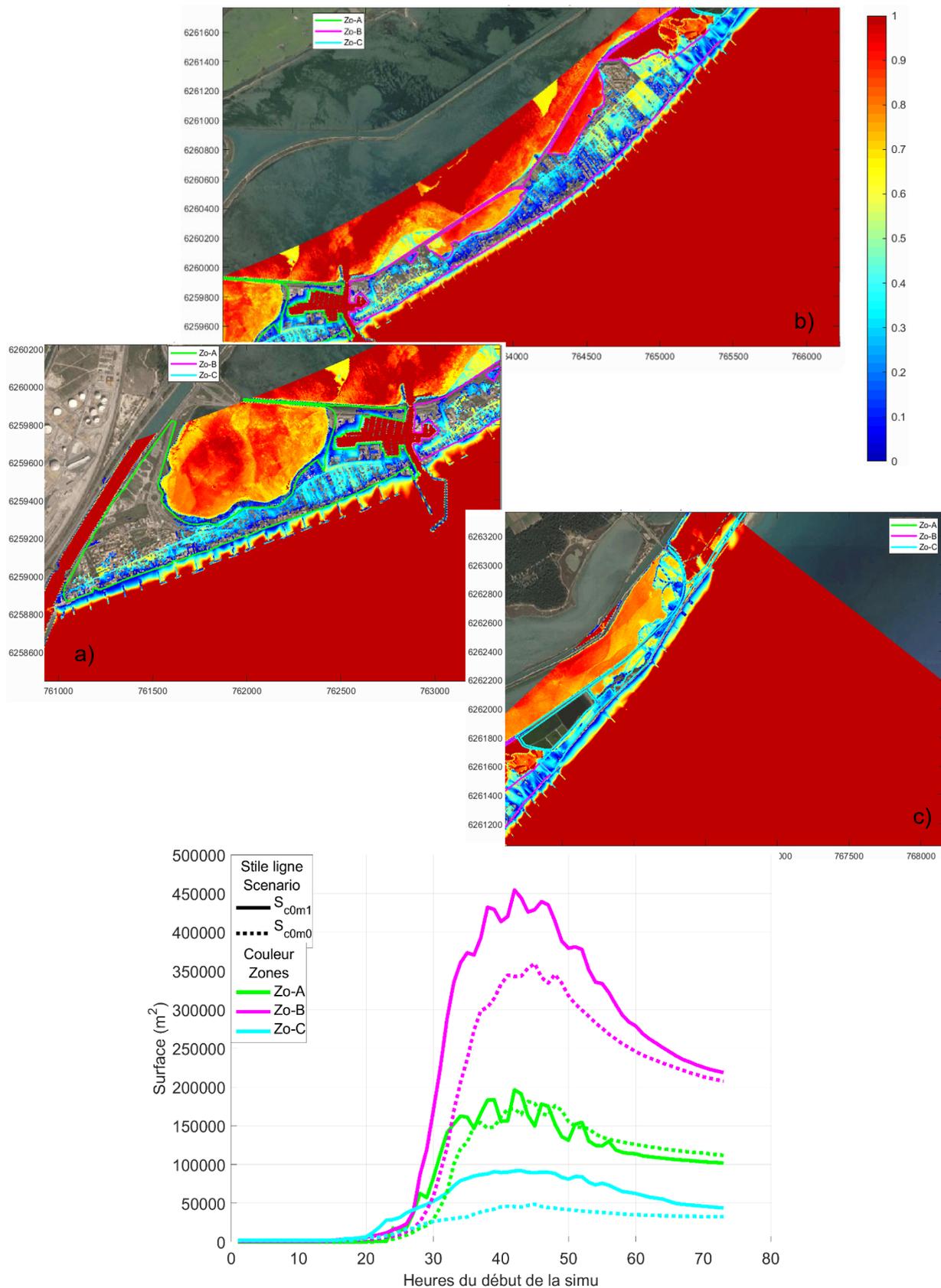


Figure 53. Simulation des submersions pour le scénario S_{f0_m1} au pic de la submersion (t_0+42h), pour les trois différentes zones a) Zo-A, b) Zo-B et c) Zo-C. En bas, la variation des surfaces de submersion calculée en XBeach pour les deux scénarios S_{f0_m1} et S_{f0_m0} , au cours du temps. Le seuil utilisé pour les calculs est de 0.02m.

5.3. DISCUSSION ET LIMITES

La modélisation de l'érosion et la submersion marine est nécessairement un travail de simplification et conduit à définir des hypothèses de travail pour décrire avec un degré de précision adapté les conséquences à terre de conditions de forçage en mer. Comme nous l'avons vu, une modélisation réaliste permet d'évaluer les volumes de sédiments mobilisés, les volumes de sédiments déposés par overwash et enfin les surfaces ou volumes de submersion.

Toutefois, un certain nombre de limites existe et leurs prises en compte doivent permettre de mettre en perspective la pertinence des résultats.

On revient ici sur la question déjà évoquée, à savoir, le manque de disponibilité de données précises des évolutions morphologiques pendant une tempête (à terre et en mer), des hauteurs d'eau (en mer, sur le littoral, dans les ports ou à terre), des limites maximales d'inondations, des vitesses des écoulements ou d'encore la temporalité des inondations lors d'évènements historiques.

À partir d'un travail important de recueil et de prétraitement de données, nous avons pu analyser un nombre conséquent d'informations valorisables afin de procéder à la validation des modèles. Toutefois, ces informations demeurent indirectes et l'analyse de la pertinence des modèles bénéficierait grandement d'informations complémentaires, notamment les niveaux d'eau dans le port pouvant conduire à des débordements. En effet, l'absence de marégraphe ou autre système de mesure permettant d'enregistrer localement les variations du niveau d'eau ne permet pas de validation directe. Ce type de données est nécessaire pour compléter l'analyse des résultats de modélisation ou améliorer les analyses statistiques.

Par ailleurs, concernant les volumes franchissant et les secteurs inondés par ce type de processus, des informations ont pu être collectées sur les secteurs urbanisés grâce aux témoignages des riverains (photos). En revanche, il existe peu d'informations sur des secteurs plus isolés fortement sensibles à ce type de phénomène de submersion (p. ex. nord de l'embouchure de la Têt). Il apparaît nécessaire lors de tempêtes d'avoir des protocoles de mesures se basant sur l'exploitation de données vidéos, par exemple pour les observations des reculs du trait de côte et pour le niveau d'eau, ou sur des campagnes pré et post évènement, comme l'exemple des campagnes de l'ObsCat dans le Roussillon, afin de recueillir des informations plus précises et ainsi développer et poursuivre l'amélioration des méthodes.

5.3.1. Sensibilité des risques induits par les tempêtes au changement de direction des tempêtes.

Comme indiqué précédemment, une fois les modèles morphodynamiques calibrés, ils ont été utilisés pour analyser la sensibilité des secteurs aux changements de direction des vagues lors des impacts des tempêtes. L'hypothèse à vérifier est la suivante : l'angle d'incidence des vagues lors des tempêtes est-il important à prendre en compte pour l'évaluation des aléas érosion et submersion sur les sites étudiés ? L'évènement cinquantennal simulé (paragraphe 5.2), qui a les caractéristiques d'une tempête frontale, a été utilisé comme scénario de base (S_0). D'autres scénarios supplémentaires ont été définis pour tester l'effet différentes directions de provenance des vagues lors des tempêtes pour les deux sites d'étude.

La procédure a consisté à simuler exactement la même série chronologique de vagues que celle de l'évènement cinquantennal (en gardant les mêmes H_s , T_p et la même valeur d'étalement) et en ne changeant que la direction moyenne de vagues. Une analyse sur les conditions de houle, et en particulier sur les directions récurrentes et les directions caractérisées par les hauteurs maximales qui impactent les sites d'études a été réalisé afin de définir des scénarios.

Après simulation avec ces nouvelles conditions de direction, les différences sont principalement évaluées en termes de volume de recouvrements maximaux (m^3/m) et de surface de submersion maximale (m^2), pendant la durée de l'évènement.

- **Secteur de Canet Nord**

Une analyse sur les conditions de la houle sur la bouée de Leucate (la plus proche, même si distante environ de 23 km du site d'étude) permet d'analyser les directions prédominantes et les plus énergétiques, même en utilisant que la hauteur significative comme paramètre de référence. La Figure 54 montre la rose de vagues en utilisant les données entre 2013 et 2020. Le trait de côte à Canet est orienté N-S. Les houles prédominantes enregistrées à la bouée de Leucate en termes de direction et d'énergie restent classiquement du quart Sud-Est (Figure 54). Les houles

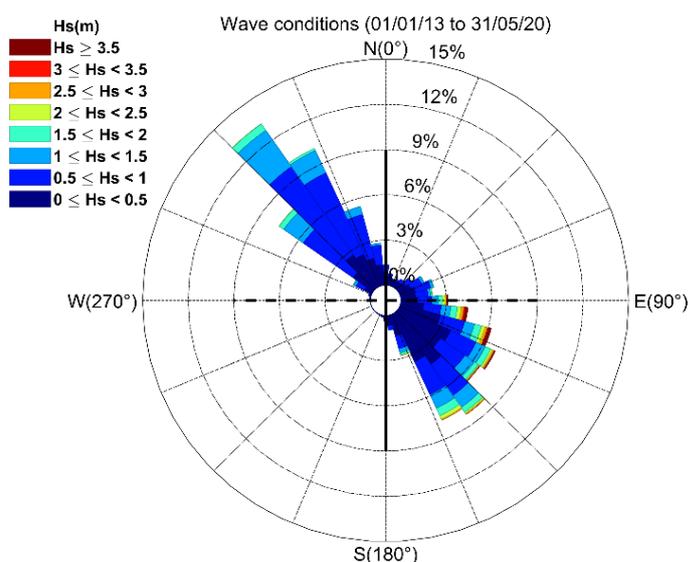


Figure 54. Rose des vagues à la bouée de Leucate : houles moyennées sur 7 années d'observations. Source des données : CANDHIS (Cerema-DREAL Occitanie).

de tramontane (nord-ouest) générées entre la côte et la bouée située à 5 km au large sont fortement représentées mais de faible énergie (hauteurs significatives - H_s - généralement inférieures à 1,5 m). La condition choisit pour le scénario, S_{c1_m1} est caractérisée par une direction des vagues décalée de 45° au sud par rapport à la direction du scénario S_{c0_m1} , de référence, donc avec une direction de provenance de 135° , nommé S_{c135} .

Le Tableau 5 montre les différences en termes d'estimation de volumes maximaux de dépôts de sédiments par overwash (m^3/m) et des surfaces de submersion maximale (m^2) atteints pendant la tempête. À l'exception de la zone centrale du secteur de la plage du Sardinal, on peut observer que les impacts sont égaux ou légèrement inférieurs pour les deux indicateurs. Par rapport à la submersion, notamment sur la plage du Sardinal une différence considérable dans la surface maximale est calculée sur la zone : la submersion passe de 9 000 à 600 m^2 , une différence significative qui s'explique par l'orientation de la digue de Canet Nord par rapport à l'endroit plus impacté de cette plage, situé au sud. Cette configuration peut justifier cet écart, le taux des franchissements est surement réduit dans la zone Ca-B avec l'orientation 135° .

Alors que la zone de l'embouchure est peu touchée par le changement de direction des vagues, la zone au sud du port présente un volume de de sédiments déposé par overwash légèrement supérieur par mètre linéaire (environ 15 % en plus).

On peut déduire que, pour le site d'étude de Canet, la direction de provenance des vagues pour la plage du Sardinial est très importante et conditionne fortement le volume de submersion. Le scénario de référence caractérisé par une tempête de direction frontale représente sans aucun doute le scénario plus impactant pour ce site.

Tableau 5. Canet Nord : Résultats des volumes de recouvrements et submersion maximale au cours de l'évènement pour les tests de sensibilité sur les directions de tempête.

	Volume recouvrements maximaux (m ³ /m) durant la tempête			Surface submersion maximale (m ²) durant la tempête		
	Ca-A	Ca-B	Ca-C	Ca-A	Ca-B	Ca-C
S_{c0_m1} – ref	0.11	0.107	0.06	75 000	9 300	12 500
S_{c135_m1}	0.08	0.093	0.07	63 000	600	12 500

- **Secteur de Frontignan**

Les conditions de la houle sur la bouée de Sète (la plus proche, à environ 1 km du site d'étude de Frontignan) permet d'analyser les directions prédominantes et les plus énergétiques. La Figure 55 montre la rose de vagues en utilisant les données entre 2013 et 2020. L'orientation du trait de côte à Frontignan est de 240° N. Les houles prédominantes enregistrées à la bouée en termes de direction et d'énergie sont classiquement du quart sud-sud-est, avec des composantes peu énergétiques du secteur Ouest-Sud-Ouest (hauteurs significatives - H_s - généralement inférieures à 1m). Les houles de Nord-Ouest (situation de Mistral) sont présentes mais très limitées (moins de 10% des fréquences cumulées sur le secteur Ouest Nord-Ouest).

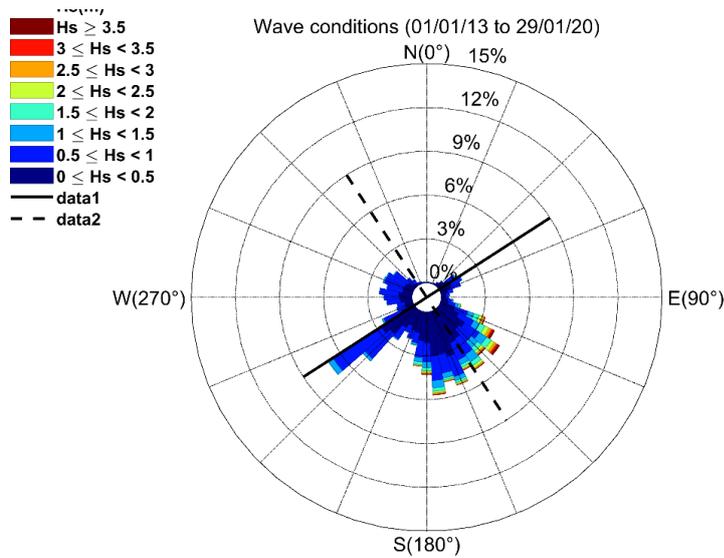


Figure 55. Rose des vagues à la bouée de Sète: houles moyennées sur 7 années d'observations. Source des données : CANDHIS (Cerema-DREAL Occitanie).

Les scénarios S_{f175_m1} et S_{f125_m1} , avec directions de 175 et 125, respectivement ont été choisis en complément au scénario de base (S_{f0_m1-ref}), car liées aux conditions des vagues locales les plus fréquentes. Dans le Tableau 6, les différences en termes de volumes de recouvrements maximaux (m^3/m) et des surfaces de submersion maximale (m^2) sont présentées. En considérant les variables de contrôle introduites, on peut observer une réduction des effets de submersion et recouvrements par une direction de 175°. Nous supposons qu'un effet de protection de la digue au nord de Sète, phénomène similaire à celui mentionné à Canet soit envisageable. Un effet qui permet de réduire d'environ trois fois la surface de submersion dans la zone urbanisée de Frontignan (Zo-A).

Dans les autres zones, les effets sont inférieurs. Des différences notables dans les recouvrements ne ressortent pas des simulations avec XBeach. On peut déduire que pour le site d'étude de Frontignan la direction de provenance des vagues ne joue un rôle sur les impacts que dans la zone au sud du secteur d'étude.

Tableau 6. Frontignan : Résultats des volumes de recouvrements et submersion maximale au cours de l'évènement pour les tests de sensibilité sur les directions de tempête.

	Volume recouvrements maximaux (m^3/m) durant la tempête			Surface submersion maximale (m^2) durant la tempête		
	Zo-A	Zo-B	Zo-C	Zo-A	Zo-B	Zo-C
$S_{f0_m1} - ref$	0.26	0.21	0.63	195,000	450,000	90,000

S_{f175_m1}	0.21	0.26	0.51	200,000	400,000	70,000
S_{f125_m1}	0.33	0.205	0.55	75000	390000	95000

On peut conclure à partir de ces tests que la direction de provenance des vagues peut jouer un rôle essentiel dans les volumes d'eau franchissant, surtout du fait de l'orientation des structures de défense.

5.3.2. Limites et recommandations de la modélisation

En ce qui concerne les limitations et inconvénients de la modélisation mise en place, Il est important de préciser les éléments qui peuvent avoir affecté la modélisation et les facteurs contingents qui n'ont pas été pris en compte et/ou pour lesquels des hypothèses a priori ont été faite.

La validation sur le site du Canet, et donc le calage des paramètres de XBeach, a été faite en utilisant un évènement historique récent caractérisé par la concomitance d'une tempête marine avec une forte crue, dont les pics ne sont pas simultanés. Comme souligné dans le paragraphe 4.1, la crue de la Têt enregistrée par la station de Perpignan est un des évènements parmi les plus intenses des dernières années, qui a pu contribuer en termes d'apport de sédiments au bilan du secteur et donc affecter les performances du modèle mesurées sur les profils. Cette configuration a été donc adoptée pour le scénario cinquantennale, qui ne considère pas le débit solide. Il serait donc intéressant, parmi les recommandations de futurs projets sur le secteur, d'évaluer les performances du modèle en croisant les valeurs extrêmes des distributions statistiques et les périodes de retour des évènements de tempête marine et crue à terre.

Le modèle XBeach, résout, comme mentionné, les ondes d'infra-gravitaires et il est bien capable de décrire l'érosion et le phénomène d'overwash mais il est moins bien validé pour le comportement des barres littorales (Roelvink et Costas, 2019), surtout si elles sont caractérisées par de formes complexes, comme dans le cas du site de Canet Nord.

Les diamètres des sédiments utilisés dans les simulations XBeach, dans les deux cas d'études, sont un D_{50} de 680 (Canet) et 300 μm (Frontignan). En réalité, sur le plage les sédiments ne sont pas tout à fait homogènes. Les rechargements en sables, historique et récents comme discuté dans le paragraphe 3.3 peuvent potentiellement modifier la répartition des diamètres de sédiments, en fonction de l'approvisionnement (puisque souvent des sédiments grossiers ou plus fins (de l'ordre de 100 μm) sont utilisés. Une étude granulométrique afin de connaître la variabilité du diamètre des sédiments et leur distribution sur le secteur, serait souhaitable afin d'en étudier les effets sur les différents régimes d'impact (collision, overwash, etc.).

À partir d'un travail important de recueil de données et de mesures de terrain, nous avons pu analyser un nombre conséquent d'informations valorisables afin de procéder à la validation des modèles. Toutefois, ces informations demeurent indirectes et l'analyse de la pertinence des modèles bénéficierait grandement d'informations complémentaires notamment, les niveaux d'eau dans le port pouvant conduire à des débordements. En effet, l'absence de marégraphe ou autre système de mesure permettant d'enregistrer localement les variations du niveau d'eau ne permet pas d'effectuer une validation directe. Ce type de données est nécessaire pour compléter l'analyse des résultats de modélisation ou améliorer les analyses statistiques sur les surfaces de

submersion. Le choix fait pour le site de Frontignan de ne pas englober complètement les surfaces des étangs dans le grille de simulation est partiellement justifiée par l'absence de données de validation utiles afin de pouvoir justifier un élargissement de la grille vers la terre et une augmentation conséquente du temps de calcul.

Par ailleurs, les éléments de validation indirects, tels que les témoignages des riverains, concernent essentiellement les zones urbanisées et il existe peu d'informations sur des secteurs plus isolés qui peuvent pourtant être fortement sensibles à ce type de phénomène de submersion.

Le modèle XBeach permet, depuis les développements des dernières années, de modéliser la présence de la végétation aquatique, dans la zone de propagation ou des déferlements des vagues qui entraînent un mécanisme de dissipation supplémentaire, notamment pour les vagues courtes. En particulier sur le site du Lido de Frontignan, où la présence de la Posidonie est recensée, la présence de cette végétation n'est pas prise en compte dans la modélisation.

À partir de travaux de modélisation, Leredde et al. (2016) suggèrent que les herbiers de Posidonie présents entre 8 et 15 m de fond peuvent contribuer à atténuer les hauteurs de houle de 5 à 10 % lorsque la longueur d'onde des vagues dépasse 3 m, c'est-à-dire durant les tempêtes mais aussi pendant les houles de beau temps. Ces effets n'ont pas été pris en compte dans la modélisation Xbeach permet de simuler ces effets d'amortissements des vagues, mais nécessite toutefois des informations précises sur les propriétés des herbiers qui ne sont pas disponibles.

Le coefficient de frottement des sédiments au fond, paramètre utilisé à la fois dans le module d'écoulement et dans le module de transport des sédiments, est actuellement calculé dans XBeach avec l'utilisation des coefficients de Chezy, de Manning ou de Colebrook-White. L'utilisation du coefficient de Manning, utilisé dans ce contexte, comme dans De Vet (2014), est choisi, car considéré le coefficient théorique plus robuste et avec la possibilité d'appliquer des tableaux des coefficients par défaut. Une amélioration potentielle de la modélisation de la rugosité dans ce type de contexte, serait d'analyser l'application des indicateurs de rugosité basés i.e. sur le LiDAR (i.e. issues des récentes campagnes ObsCat) comme dans Smith et al. (2014).

Une amélioration possible dans XBeach peut consister à faire varier la rugosité du fond dans la direction verticale, ce qui permet de modéliser pour exemple la formation et évolution des brèches de matière plus réaliste. L'inconvénient de ces modifications est la nécessité d'intégrer plus d'informations avant la modélisation et un processus de calibration supplémentaire.

Pour conclure, il convient de clarifier que les conditions testées n'ont pas été conçues pour être utilisées en tant qu'éléments des projections induits par le changement climatique, car cela nécessite une prévision correcte des conditions régionales de vagues sous un scénario de projection. Ces analyses doivent être envisagées dans la perspective de gestion des risques, qui consiste à analyser un ensemble de conditions possibles pour caractériser la vulnérabilité et la résilience des côtes et pouvoir prendre en compte les incertitudes dans les stratégies de gestion.

6. Conclusion

Cette étude est un travail méthodologique qui se focalise sur la détermination des effets de l'érosion sur la submersion marine pendant les événements extrêmes dans les environnements littoraux sableux. Pour certains littoraux sensibles, les conséquences d'une érosion du système plage-dune peuvent être désastreuses, en provoquant des dégâts matériels sur les aménagements et les infrastructures ou en amplifiant les conséquences des phénomènes de submersions marines. La première phase de cette étude méthodologique traite d'un recensement des données disponibles sur la région, historiques et plus récentes, pour évaluer les secteurs potentiellement éligibles à une analyse numérique plus détaillée. Cette phase a permis de réaliser une étude sur la vulnérabilité des systèmes dunaire à l'échelle régionale, afin d'évaluer les variables les plus importantes à prendre en compte et de classer et regrouper les secteurs dans des clusters de vulnérabilité similaire.

Les résultats indiquent que le 35% du littoral régional est susceptible d'être affecté par ces phénomènes, qui sont par conséquent important à prendre en compte dans l'anticipation des risques de submersion marine.

La concertation avec le comité Littoral 21 a permis de recenser un certain nombre de sites d'études pertinents. L'inventaire et la recherche de données disponibles aisément a favorisé le choix de Canet Nord (Pyrénées orientales) et le lido de Frontignan (Hérault) comme cas d'étude.

La plage de Canet Nord, située dans le Roussillon, est un secteur en érosion récurrente qui a fait l'objet de rechargements sableux artificiels souvent après les tempêtes. Parmi les différents événements ayant affecté ce secteur, la tempête de janvier 2020, Gloria a provoqué des falaises d'érosion et une importante érosion de la plage. Les suivis post-tempêtes réalisés par l'ObsCat fournissent une base de données inédite sur les évolutions morphologiques de la partie émergée de la plage et un jeu de données très utile pour la validation des modélisations.

Pour reproduire cette tempête et ses effets morphodynamiques, de la façon la plus réaliste possible, le modèle numérique XBeach 2D a été mis en œuvre, sur un site de 3 km de long et pour une période comprise entre le 21/01/2020 et le 25/01/2020. Les données disponibles d'Octobre 2019 (avant la tempête) et les profils bathymétriques permettent une bonne représentation de la morphologie pré-littorale dans un MNT, couplé avec le MNT Litto3d, issu de mesures Lidar topo bathymétriques effectuées en 2014 et 2015.

Pour le secteur de Frontignan, le modèle numérique a été mis en œuvre pour une tempête majeure, celle d'octobre 2016. Cette tempête a été choisie, car il s'agit du premier événement avec une hauteur significative importante (pic de $H_s \sim 6$ m) suite au relevé du Litto3D. Par défaut, la morphologie initiale pour ce secteur provient du MNT Litto3D. Malgré les qualités intrinsèques du MNT, un prétraitement a été mise en place pour permettre un filtrage sur le nuage des points terrain, afin de supprimer partie de la végétation dunaire plus dense qui représenterait un obstacle pour les écoulements. Les jeux de données disponibles ont permis de valider quantitativement et qualitativement les simulations numériques.

La performance du modèle sur le site de Canet a été évaluée positivement ($BSS > 0.4$) pour la partie centrale et sud du site d'étude, une surestimation de l'érosion fournie par les simulations au niveau de l'embouchure, a toutefois été observée. A Frontignan, la valeur du jet de rive et d'un niveau d'eau sur la route, estimé par photos, ont permis de valider la modélisation.

L'utilisation de ces modèles pour des scénarios fictifs plus énergétiques a été effectuée. Une tempête fictive de 3 jours, ayant des caractéristiques cinquantennales en terme de houle et de niveau d'eau a été définie. Ce scénario est maximisant dans le sens où les 2 composantes houle et niveau d'eau sont cinquantennal, et par le choix d'une direction de vagues frontale susceptible de générer les plus forts impacts.

Les simulations de ce scénarios fictifs ont été réalisées avec et sans la modélisation de l'évolution du fond (et notamment de l'érosion événementielle) pour évaluer le rôle de cette composante dans l'ampleur de la submersion marine résultante.

Les résultats indiquent que pour le cas de Canet, la prise en compte de l'érosion augmente l'extension de la submersion dans la plage centrale du Sardinal de 50%, et dans la zone nord de l'embouchure jusqu'à 6 fois, suite à l'évolution morphologique de la Têt par l'effet de vagues. Pour le site de Frontignan, la sévérité de la submersion dans la zone urbaine à l'est du port augmente d'environ 30%. Dans la partie à l'ouest, le pic des débits franchissant démarre quelques heures plus tôt en raison de l'érosion. La zone centrale du site, étant plus vulnérable, a vu la formation d'une série de brèches et donc l'instauration d'un bref régime d'inondation.

Les limites de l'approche numérique sont explicitées, ainsi que les pistes éventuelles d'amélioration qui dépendent en grande partie des données disponibles.

Les simulations numériques réalisées ont permis de mettre en place un visualisateur pour aider à la sensibilisation sur le rôle de l'érosion dans l'importance de la submersion marine. Les résultats obtenus présentent une avancée importante dans le prise en compte de ces phénomènes dans les cartographies de prévention des risques.

7. Bibliographie

Artelia (2013). Opération de protection et de mise en valeur du lido de Frontignan. Sous-dossier 3a - étude d'impact valant document d'incidence loi sur l'eau au titre des article l.124-1 a l.124-6 du code de l'environnement & document d'évaluation des incidences nature 2000 au titre des articles l.414-4 a l.414-7 du code de l'environnement.

AERMC (2000). Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse. Définition et cartographie des unités sédimentaires du littoral méditerranéen français, synthèse bibliographique

Balouin Y., (2019). Réseau tempête Occitanie 2018-2019. Rapport BRGM-69365-FR.

Balouin Y., De la torre Y. et Tirard E. (2011). Les tempêtes marines sur le littoral du Languedoc-Roussillon - Caractérisation et faisabilité d'un réseau de surveillance des tempêtes et de leurs impacts. Phase 2/A. Rapport BRGM-59516-FR.

Balouin, Y. et Belon, R. (2012). Évaluation des submersions marines lors des tempêtes en Languedoc-Roussillon – Atlas cartographique. Rapport BRGM/RP-61306-FR ; 124 p

Bertin, X., Li, K., Roland, A.; Zhang, Y.J., Breilh, J.F., Chaumillon, E. (2014). A modeling-based analysis of the flooding associated with Xynthia, central Bay of Biscay, Coastal Engineering 94, 80–89.

Bossennec G. et Palvadeau E. (2018). Observatoire de la côte sableuse catalane – ObsCat : rapport technique d'année 4. Rapport final. BRGM/BRGM/RP-68515-FR.

Ciccarelli, D., Pinna, M. S., Alquini, F., Cogoni, D., Ruocco, M., Bacchetta, G., ... & Fenu, G. (2017). Development of a coastal dune vulnerability index for Mediterranean ecosystems: A useful tool for coastal managers? Estuarine, Coastal and Shelf Science, 187, 84-95.

Christmann H., Palvadeau E. et Stépanian A., coll. Bodéré G., Bouvier C., Hureau S., Maldan F., Maurice B., Portal A., Dailloux D., Sabarich L. et Sibert V. (2017) – Observatoire de la côte sableuse catalane – OBSCAT : rapport technique d'année 4 Rapport final. BRGM/RP-67386-FR, 185 p., 163 ill.

Desmazes F., Muller H., Garcin M., Belon R. et Baudouin V. avec la collaboration de Nicolae Lerma A. (2014). Méthodologie de détermination du recul maximal des dunes pour les événements extrêmes. BRGM/RP-63157-FR, 132 p., 97 fig., 14 tabl.

Donnelly, C., Kraus, N., Larson, M. (2006). State of knowledge on measurement and modeling of coastal overwash J. Coast. Res., 224, pp. 965-991, 10.2112/04-0431.1.

EID-Méditerranée (2015). Rapport de phase 2 – Novembre 2015. Synthèse de la méthode employée, les possibilités d'évolution et détermination de grandes tendances à l'échelle régionale. 25 p.

Elsayed, S. M., & Oumeraci, H. (2017). Effect of beach slope and grain-stabilization on coastal sediment transport: An attempt to overcome the erosion overestimation by XBeach. *Coastal Engineering*, 121, 179-196.

García-Mora, M.R., Gallego-Fernandez, J.B., Williams, A.T., García-Novo, F., (2001). A coastal dune vulnerability classification. A case study of the SW Iberian Peninsula. *J. Coast. Res.* 17, 802-811.

GIEC (2014): Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. GIEC, Genève, Suisse, 161 p.

Goslin, J., & Clemmensen, L. B. (2017). Proxy records of Holocene storm events in coastal barrier systems: Storm-wave induced markers. *Quaternary Science Reviews*, 174, 80-119.

Idier, D., Castelle, B., Poumadère, M., Balouin, Y., Bohn Bertoldo, R., Bouchette, F., Boulahya, F., Brivois, O., Calvete, D., Capo, S., Certain, R., Charles, E., hateauminois, E., Delvallée, E., Falquès, A., Fattal, P., Garcin, M., Garnier, R., Hequette, A., Larroude, P., Lecacheux, S., Le Cozannet, G., Maanan, M., Mallet, C., Maspataud, A., Oliveros, C., Paillart, M., Parisot, J.P., Pedreros, R., Robin, N., Robin, M., Romieu, E., Ruz, M.H., Thiebot, J., Vinchon, C. (2013). Vulnerability of sand coasts to climate variability. *Climate Research* 57, 19-44.

Kulling, B. (2017). Déformation du rivage et dérive littorale des plages du Golfe du Lion. Doctoral dissertation, Aix-Marseille.

Masselink, G. S. van Heteren. (2014). Response of wave-dominated and mixed-energy barriers to storms *Marine Geology*, 352, pp. 321-347, 10.1016/j.margeo.2013.11.004

Nederhoff, C. M., Lodder, Q. J., Boers, M., Den Bieman, J. P., & Miller, J. K. (2015). Modeling the effects of hard structures on dune erosion and overwash: A case study of the impact of Hurricane Sandy on the New Jersey coast. In *The Proceedings of the Coastal Sediments 2015*.

Nicolae Lerma, A., Pedreros R., Balouin Y. et Bulteau, T. (2017). Cinétique de la submersion marine : Comparaison des méthodes de détermination de la submersion marine par modélisation numérique. BRGM/RP-67361-FR, 76 p.

Ogier E. (2020). Hierarchical clustering (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/56844-hierarchical-clustering>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved November 19, 2020.

Palvadeau E. et *Fabre N.* (2020) – Observatoire de la Côte sableuse Catalane – rapport technique année 6. Rapport final. BRGM/RP-69911-FR, 254 p.

Pedreros R., *Balouin Y.*, *Paris F.* et *Lecacheux S.* (2016) – Etat des connaissances sur la dynamique et la cinétique de la submersion marine et des méthodologies d'évaluation. Rapport final. BRGM/RP-66197-FR, 63 p.

Raynal, O., Certain, R., Brunel, C., Aleman, N., Robin, N., Guérinel, B. et Montel, L. (2015). LITTOSIS - Analyse volumétrique et granulométrique du prisme sableux littoral du Languedoc-Roussillon. Rapport final LITTOSIS, pp. 46.

Roelvink, D. A. Reniers, A. van Dongeren, J. van Thiel de Vries, R. McCall, J. Lescinski. (2009) Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. Coastal Engineering 56, 1133–1152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>.

Roelvink, D., et Costas, S. (2019). Coupling nearshore and aeolian processes: XBeach and Duna process-based models. Environmental Modelling & Software, 115, 98-112.

Sabatier, F., Samat, O., Brunel, C., Heurtefeux H., & Delanghe-Sabatier D. (2009). Determination of set-back lines on eroding coasts. Example of the beaches of the Gulf of Lions (French Mediterranean Coast). J Coast Conserv 13, 57

Sallenger A.H. Jr. (2000). Storm impact scale for barrier island, Journal of Coastal Research, 16 (3), pp. 890-895.

SHOM (2012). Litto3D®: Spécifications techniques.
http://diffusion.shom.fr/media/wysiwyg/pdf/Readme-Produit-maritime-LR2014-15_V20160326_YMT.pdf

Smith, M. J., Asal, F. F. F., & Priestnall, G. (2004). The use of photogrammetry and lidar for landscape roughness estimation in hydrodynamic studies. ISPRS, XXXB, part B, 3, 714-719.

Sogreah, Artelia (2007). Phase I. BILAN DE L'EVOLUTION DU TRAIT DE COTE. Rapport. Communauté d'Agglomération Perpignan-Méditerranée. Protection du littoral de la Têt à l'Agly. N°1711612 R1.

Sutherland, J.; Peet, A.H.; Soulsby, R.L. (2004). Evaluating the performance of morphological models. Coastal Engineering, 51, 917–939.

Tabeaud, M., (1995). Les tempêtes sur les côtes méditerranéennes françaises. In: Annales de Géographie. 1995, t. 104, n°584. pp. 389-401.

Tirard, E. et Balouin, Y. (2011). Évaluation des submersions marines lors des tempêtes en Languedoc-Roussillon – Validation de la méthodologie. Rapport BRGM/RP-60196-FR ; 44p.

XBeach manual. (2018). XBeach Documentation.
https://XBeach.readthedocs.io/en/latest/user_manual.html

Zhang W, Qi J, Wan P, Wang H, Xie D, Wang X, Yan G. (2016). An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. Remote Sensing. 8(6):501.

Annexe

Annexe 1. Tableau de secteurs étudiés et valeurs des indices de vulnérabilités partielles et global

Tableau 7. Tableau de secteurs étudiés et valeurs des indices de vulnérabilités partielles et global.

fid	NOM_CORDON	GCD	VC	AE	MI	VIG
1	Sainte_Marie_Sud	0,67	1,00	0,40	0,67	0,68
2	Sainte_Marie_Centre	0,50	1,00	0,13	0,67	0,58
3	Orpellières	0,42	0,08	0,00	0,67	0,29
4	Serignan_Plage	0,29	0,17	0,27	0,67	0,35
5	Sainte_Marie_Nord	0,42	0,25	0,20	0,67	0,38
6	Bourdigou	0,63	0,17	0,00	0,67	0,36
7	Torreilles	0,46	0,17	0,07	0,67	0,34
8	Barcares_Sud	0,46	0,17	0,33	0,67	0,41
9	Le_Lido	0,63	0,50	0,47	0,67	0,56
10	Mas_de_l_Ille	0,38	0,08	0,20	0,67	0,33
11	Portes_du_Roussillon	0,50	0,17	0,27	0,67	0,40
12	Sud_Leucate	0,46	0,08	0,00	0,67	0,30
13	Port_Leucate	0,42	0,17	0,40	0,67	0,41
14	Village_naturiste	0,54	0,25	0,40	0,67	0,46
15	Les_Mourets	0,46	0,08	0,20	0,67	0,35
16	Leucate_Plage	0,54	1,00	0,47	0,67	0,67
17	Les_Coussoules	0,42	1,00	0,00	0,33	0,44
18	Port_la_Nouvelle_Plage	0,54	1,00	0,27	0,67	0,62
19	Vieille_Nouvelle	0,46	0,08	0,20	0,67	0,35
20	Les_Chalets	0,54	1,00	0,47	1,00	0,75
21	Mateille	0,38	1,00	0,00	0,67	0,51
22	Les_Ayguades	0,50	0,75	0,47	0,67	0,60
23	Rouquette	0,54	0,50	0,20	0,33	0,39
24	Narbonne_Plage	0,54	1,00	0,40	0,67	0,65
25	Saint_Pierre_la_Mer	0,50	0,25	0,33	0,67	0,44
26	Pissevaches	0,54	0,17	0,00	0,67	0,34
27	Cabanes_de_Fleury	0,50	0,08	0,00	0,67	0,31
28	Montilles	0,46	0,08	0,00	0,67	0,30
29	Valras_Ouest	0,50	0,50	0,33	0,67	0,50
30	Valras_Centre	0,63	1,00	0,47	0,67	0,69
31	La_Grande_Maire	0,50	0,00	0,00	0,67	0,29
32	Les_Bosquets	0,38	0,08	0,27	0,67	0,35
33	Vias_Ouest	0,63	0,75	0,40	0,67	0,61
34	Ancien_grau_du_Libron	0,67	0,17	0,00	0,67	0,38
35	Farinette	0,54	0,75	0,47	0,67	0,61
36	Tamarissière	0,58	0,17	0,33	0,67	0,44
37	Grau_d_Agde	0,71	0,75	0,53	0,67	0,66
38	Richelieu	0,50	0,50	0,53	0,67	0,55
39	Cad_d_Agde	0,58	1,00	0,20	1,00	0,70
40	Roquille	0,63	1,00	0,53	0,67	0,71
41	Port_Ambonne	0,29	0,25	0,20	0,67	0,35

fid	NOM_CORDON	GCD	VC	AE	MI	VIG
42	Heliopolis	0,38	0,25	0,13	0,67	0,36
43	Bagnas	0,46	0,17	0,00	0,33	0,24
44	Marseillan_Plage_Sud	0,50	0,50	0,53	0,67	0,55
45	Marseillan_Plage_Nord	0,33	0,42	0,20	0,67	0,40
46	Lido_de_Sete	0,38	0,17	0,40	0,67	0,40
47	Villeroy	0,67	0,17	0,53	0,67	0,51
48	Le_Lazaret	0,38	0,50	0,47	0,67	0,50
49	Crique_de_l_Anau	0,58	1,00	0,40	0,00	0,50
50	Frontignan_Plage_Ouest	0,63	0,75	0,47	0,67	0,63
51	Frontignan_Plage_Est	0,54	0,75	0,47	0,67	0,61
52	Les_Aresquiers	0,58	0,25	0,27	0,67	0,44
53	Mas_d_Angouleme	0,63	0,17	0,20	0,67	0,41
54	Pierre_Blanche	0,63	0,00	0,00	0,67	0,32
55	Cathedrale	0,63	0,08	0,20	0,67	0,39
56	Maguelone	0,63	0,17	0,27	0,67	0,43
57	Grau_du_Prevost	0,63	0,50	0,33	0,67	0,53
58	Palavas_rive_droite	0,67	1,00	0,47	0,67	0,70
59	Palavas_rive_gauche	0,58	1,00	0,60	0,67	0,71
60	Carnon_Est	0,50	0,25	0,73	0,33	0,45
61	Petit_Travers	0,46	0,08	0,07	0,33	0,24
62	Grand_Travers	0,54	0,17	0,13	0,33	0,29
63	Le_Couchant	0,54	0,25	0,33	0,33	0,36
64	Point_Zero	0,58	0,25	0,53	0,33	0,43
65	Boucanet	0,50	0,25	0,53	0,33	0,40
66	Grau_du_Roi_rive_droite	0,50	0,17	0,27	0,67	0,40
67	Grau_du_Roi_rive_gauche	0,67	0,17	0,53	0,67	0,51
68	Port_Camargue	0,63	0,17	0,47	0,33	0,40
69	Espiguette	0,42	0,00	0,00	0,67	0,27
70	Capelude	0,58	0,00	0,20	0,67	0,36
71	Embouchure_de_la_Tet	0,50	0,17	0,00	0,67	0,33
72	Canet_Plage_Nord	0,54	0,17	0,20	0,67	0,39
73	Canet_Plage_Sud	0,38	0,25	0,33	0,67	0,41
74	Etang_de_Canet_Nord	0,54	0,00	0,07	0,67	0,32
75	Etang_de_Canet_Sud	0,42	0,00	0,07	0,67	0,29
76	Saint_Cyprien_Nord	0,63	0,25	0,47	0,67	0,50
77	Saint_Cyprien_Sud	0,42	0,17	0,53	0,67	0,45
78	Mas_Larrieu	0,54	0,08	0,07	0,67	0,34
79	Le_Roussillonnais	0,33	0,42	0,00	0,67	0,35
80	argeles	0,29	1,00	0,40	0,67	0,59
81	racou	0,46	1,00	0,20	0,67	0,58



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

BRGM Occitanie
1039, rue de Pinville
34000 Montpellier – France
Tél. : 04 67 15 79 80