

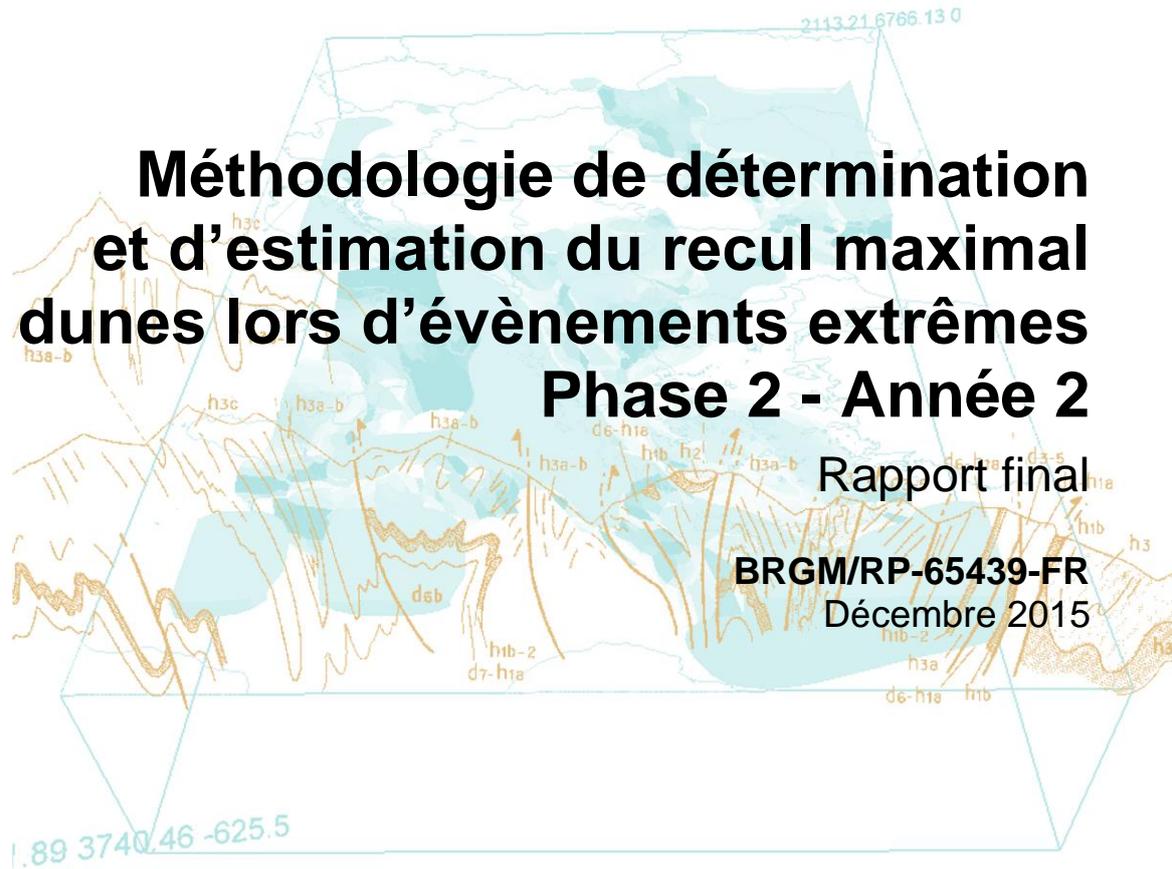


Méthodologie de détermination et d'estimation du recul maximal des dunes lors d'évènements extrêmes Phase 2 - Année 2

Rapport final

BRGM/RP-65439-FR

Décembre 2015



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Méthodologie de détermination et d'estimation du recul maximal des dunes lors d'évènements extrêmes Phase 2 - Année 2

Rapport final

BRGM/RP-65439-FR

Décembre 2015

F. Desmazes, H. Muller, A. Nicolae Lerma et T. Bulteau
Avec la collaboration de
Y. Balouin

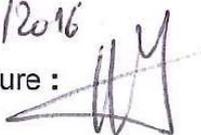
Vérificateur :

Nom : C. Oliveros

Fonction : Responsable d'unité

Date : 21/03/2016

Signature :



Approbateur :

Nom : H. FABRIOL

Fonction : Dir. Adjoint

Date : 24/03/2016

Signature :



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



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Érosion littorale, Méthodologie, Dune côtière, Modèle numérique, XBeach, Recul maximal, Séquence de tempêtes, Languedoc-Roussillon, Aquitaine.

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

Desmazes F., Muller H. Nicolae Lerma A. et Bulteau T. avec la collaboration de **Balouin Y.** (2015) - Méthodologie de détermination et d'estimation du recul maximal des dunes lors d'évènements extrêmes. Phase 2 - Année 2. Rapport final. BRGM/RP-65439-FR, 94 p., 66 ill., 1 ann.

Synthèse

Cette étude est un travail méthodologique qui se focalise sur la détermination du recul maximal des dunes (L_{max}) pour les événements extrêmes dans les environnements littoraux sableux. Pour certains littoraux sensibles, les conséquences d'une érosion dunaire brutale peuvent être désastreuses, en provoquant des dégâts matériels sur les aménagements et les infrastructures ou en amplifiant les conséquences des phénomènes de submersions marines.

Après un premier travail qui a permis de contribuer à un encart spécifique inclus dans le guide méthodologique des Plan de Prévention des Risques Littoraux (MEDDE, 2014), cette deuxième phase d'étude programmée sur deux ans est mise en œuvre dans le cadre du programme de travail établi en 2014 et en 2015 entre le BRGM et le MEDDE/DGPR. Elle vise à étudier les méthodes d'estimation du recul maximal dunaire lors des tempêtes, en explorant les possibilités de la modélisation numérique. Après une première année de travail qui a consisté à tester le modèle XBeach sur des cas simplifiés de profils perpendiculaires à la côte (phase 2/A, Desmazes *et al.*, 2014), la phase 2/B a pour objectif de mettre en œuvre le modèle pour un cas réel de plage et de dune. Cette phase était structurée en deux actions. L'action 1 traite spécifiquement de la modélisation numérique XBeach, tandis que l'action 2, complémentaire, initie une réflexion sur l'effet des séquences de tempêtes sur l'érosion dunaire.

- Action 1 : Modélisation numérique d'un cas réaliste d'érosion dunaire

En début de projet, la concertation avec l'ONF et le Conservatoire du Littoral a permis de recenser un certain nombre de sites d'études pertinents. L'inventaire et la recherche de données disponibles aisément a favorisé le tri et l'identification du Lido de l'Or et de la plage du Petit Travers (Languedoc-Roussillon, Hérault) comme cas d'étude.

La plage du Petit Travers est un secteur en érosion récurrente située dans le Golfe d'Aigues-Mortes. En novembre 2014, une sévère tempête y a provoqué un recul marqué du front dunaire et des dégâts sur les aménagements d'accès à la plage.

Pour reproduire cette tempête et ces effets érosifs, le modèle numérique XBeach 2D a été mis en œuvre sur la partie ouest de la plage, pour un secteur de 1200 m de côté et une période comprise entre le 27/11/2014 et le 30/11/2014. Des tests de sensibilité aux paramètres de réglage ont été réalisés en mode 1D. La morphologie initiale provient du MNT Litto3D issu de mesures Lidar topo-bathymétriques effectuées en 2009 et 2010. Les conditions hydrodynamiques fournies en entrée du modèle sont constituées par :

- les conditions de vagues reproduites par un emboîtement de modèles Swan en mode instationnaire, prenant en compte le vent local ;
- les niveaux d'eau issus du marégraphe de Sète.

Le paramétrage et le scénario retenus pour mettre en œuvre le modèle XBeach permettent de reproduire les conditions hydrodynamiques et l'évolution morphologique de la plage du Petit Travers durant la tempête de novembre 2014. Les résultats des simulations montrent que :

- les plus fortes évolutions morphologiques interviennent tout au long de la journée du 28 novembre, lorsque les forçages (niveau d'eau et vagues) atteignent leur pic d'intensité ;
- l'érosion du haut de plage est forte et atteint le pied de dune, mais elle n'impacte pas le front dunaire.

Pour la problématique d'estimation du recul dunaire, l'érosion générée par le modèle au niveau du front dunaire apparaît insuffisante. Pour expliquer cette insuffisance, l'hypothèse d'une sensibilité du modèle à la morphologie initiale a été vérifiée par un test pratiqué en 1D. Ce test montre que XBeach est capable de simuler l'érosion du front dunaire pour un profil initial préalablement lissé et abaissé. Ainsi, l'utilisation d'un jeu de données morphologiques initial représentant mieux l'état de la plage avant la tempête de novembre 2014 pourrait permettre d'améliorer sensiblement la simulation en 2D de l'érosion de la dune du Petit Travers par le modèle XBeach.

- Action 2 : Prise en compte des phénomènes de succession de tempête dans l'évaluation de l'érosion dunaire

Dans un premier temps, cette action complémentaire a permis de faire un point succinct sur la bibliographie scientifique internationale traitant de l'effet des séquences de tempête sur l'érosion littorale.

Dans un second temps, les phénomènes observés durant l'hiver 2013-2014 ont été décrits par rapport aux forçages rencontrés, et plus particulièrement aux fortes houles et leur période de retour. Une analyse des données Prévimer et de la base Bobwa-X a permis de proposer des cartes des façades Manche, Mer du Nord et Atlantique présentant le nombre et la répartition des événements de l'hiver 2013-2014 pour lesquels la hauteur significative des vagues était caractérisée par une période de retour supérieure à 1 an. La Bretagne a été touchée par 7 tempêtes de ce type, l'Aquitaine par 4 à 5 tempêtes. En Aquitaine, l'effet de cette séquence de tempêtes s'est traduit par une érosion dunaire quasi-généralisée et des valeurs de recul ponctuel atteignant 40 m. De telles valeurs dépassent largement les valeurs de recul précédemment analysées lors de la phase A de cette étude (Desmazes *et al.*, 2014).

Dans un troisième temps, les méthodes d'évaluation de l'érosion dunaire L_{max} présentées dans l'encart du guide PPRL sont passées en revue pour envisager leur utilisation dans les cas de séquence de tempêtes.

Les observations et les mesures sont les éléments indispensables à la connaissance du recul dunaire lié à des événements extrêmes ou aux séquences de tempête dans les bassins de risques littoraux soumis à l'aléa de recul du trait de côte sableux. Le rôle primordial des observatoires du trait de côte et des réseaux de suivi est mis en avant, ainsi que l'intérêt des technologies vidéo de suivi en continu du littoral.

Les méthodes d'estimations sont à employer avec la plus grande prudence dans le cas de succession de tempêtes. Celles basées sur des formules empiriques de profils d'équilibre ne semblent pas particulièrement pertinentes pour répondre à la question dans leur forme actuelle. Le modèle numérique XBeach peut être employé pour reproduire une séquence de tempêtes, mais il nécessite auparavant d'être correctement calibré pour le site d'étude.

Remerciements

La DREAL Languedoc-Roussillon et son service « Risques naturels et littoral » sont vivement remerciés pour avoir mis à disposition les mesures topo-bathymétriques réalisées en 2013 et 2015 sur le site du Petit Travers.

L'Office National des Forêts et le Conservatoire du Littoral sont également remerciés pour leur aide dans l'identification d'un site d'étude.

Sommaire

1. Introduction	13
2. Action 1 : Modélisation numérique XBeach sur un cas réaliste	15
2.1. IDENTIFICATION DU SITE D'ÉTUDE	15
2.1.1. Collaboration avec l'ONF	15
2.1.2. Collaboration avec le Conservatoire du Littoral	17
2.1.3. Choix du site	18
2.2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE	19
2.2.1. Généralités	19
2.2.2. Morphologie et sédimentologie	22
2.2.3. Hydrodynamique et tempêtes	30
2.3. ÉLABORATION DU SCÉNARIO	41
2.3.1. Hydrodynamique.....	41
2.3.2. Morphologie et sédimentologie	47
2.4. MISE EN ŒUVRE DU MODÈLE.....	48
2.4.1. Tests sur un profil 1D cross-shore	48
2.4.2. Modélisation XBeach 2D.....	52
2.4.3. Discussion	59
2.4.4. Tests complémentaires avec le modèle XBeach 1D	64
3. Action 2 : Prise en compte des phénomènes de succession de tempêtes	69
3.1. BIBLIOGRAPHIE	69
3.2. ANALYSE DES PHÉNOMÈNES OBSERVÉS DURANT L'HIVER 2013-2014.....	70
3.2.1. Forçages météo-marins	70
3.2.2. Impact érosif de l'hiver 2013-2014 à l'échelle de la côte Aquitaine.....	73
3.3. MÉTHODES D'ÉVALUATION DE L'ÉROSION DUNAIRE	77
3.3.1. Méthodes d'observations	77
3.3.2. Méthodes d'estimation	78
4. Conclusions.....	81
5. Bibliographie	85

Liste des figures

Illustration 1 :	Critères de robustesse du cordon dunaire en fonction de sa largeur et de son altitude. Source : Metereau, 2014.....	15
Illustration 2 :	Typologie ONF des cordons dunaires situés devant des zones basses pour les départements de Vendée et Charente-Maritime. Sources : Metereau, 2014, Cetmef, 2009.	16
Illustration 3 :	Secteurs de suivi dunaire de l'ONF et sélection de sites dunaires du Conservatoires du Littoral pour les départements de Vendée et Charente-Maritime.....	17
Illustration 4 :	Localisation du site d'étude, plage du Petit Travers, Mauguio, Hérault. Source : SHOM-IGN.....	19
Illustration 5 :	Cellule 34 (Carnon - le Petit Travers), étude du trait de côte. Carte de localisation des profils transversaux et graphique d'avancée et de recul du trait de côte au niveau des profils, normalisé par rapport à la position de 1985. Source : Raynal et Certain, 2013.	20
Illustration 6 :	Cellule 35 (le Petit Travers - la Grande Motte), étude du trait de côte. Carte de localisation des profils transversaux et graphique d'avancée et de recul du trait de côte au niveau des profils, normalisé par rapport à la position de 1985. Source : Raynal et Certain, 2013.	20
Illustration 7 :	Situation du Lido de l'Or avant les travaux de renaturation. A) Vue aérienne du Lido. B) Encombrement de la RD59 et stationnement au sommet de la dune. Source : Ingerop, 2013.....	21
Illustration 8 :	Plan des travaux de réaménagement et de renaturation du Lido de l'Or. Source : Ingerop, 2013.....	21
Illustration 9 :	Exemple d'un accès à la plage du Petit Travers. Desmazes, 09/15.	22
Illustration 10 :	Zone de fragilité de la dune « consolidée » par des casiers de ganivelles. Desmazes, 09/15.	22
Illustration 11 :	MNT Litto 3D 2009 sur la zone d'étude de la plage du Petit Travers (d'après SHOM-IGN).	23
Illustration 12 :	Vue en coupe de la plage du Petit Travers et altitude des différents indicateurs morphologiques utilisés pour décrire la zone d'étude. Source : SHOM-IGN.	24
Illustration 13 :	Morphologie de la zone d'étude et positionnement des coupes transversales caractéristiques des différents secteurs dunaire de la plage du Petit Travers. D'après Litto3D et Ortholittorale, 2011.	25
Illustration 14 :	Coupes topographiques transversales sur des profils caractéristiques des différentes morphologies de dunes de la plage du Petit Travers. a) Zones Est et Ouest b) Zone centrale et zone fragile.	26
Illustration 15 :	Évolution temporelle entre 2010 et 2015 sur la coupe topo-bathymétrique caractéristique de la zone Ouest de la plage du Petit Travers. Source : Litto3D et levés DREAL LR.	27
Illustration 16 :	Synthèse de l'évolution morphologique de la plage entre 2010 et 2015 pour les 4 profils transversaux représentatifs de la plage du Petit Travers. Les indicateurs utilisés pour quantifier le recul de la plage sont à l'altitude 0m IGN69 pour le bas de plage et l'altitude 1,25 m IGN69 pour le haut de plage.	27
Illustration 17 :	Évolution des courbes de niveau -1,5m, 0m et 1,25m entre 2009-2010 (Litto3D) et 2015 (données DREAL) pour le secteur Ouest et la zone centrale de la plage du Petit Travers.....	29
Illustration 18 :	Distribution granulométrique d'un sédiment type du nord du Golfe du Lion. Source : Barusseau, 2011.....	30

Illustration 19 : Tableau récapitulatif des différents types de tempêtes rencontrées dans le Golfe du Lion. Source : Balouin <i>et al.</i> , 2011.....	31
Illustration 20 : Carte des pressions atmosphériques de la zone Europe et Nord-Atlantique, le 07/11/1982. Source : http://www.wetterzentrale.de	32
Illustration 21 : Caractéristiques hydrodynamiques des tempêtes pour les points Espiguette et Sète. Source : Balouin <i>et al.</i> , 2011.	33
Illustration 22 : Hauteur significative des vagues et niveaux de tempêtes atteints entre septembre 2011 et décembre 2014. Sources : Candhis et De la Torre <i>et al.</i> , 2015 b.	34
Illustration 23 : Classement de tempêtes selon leur niveau atteint et leur localisation en fonction des houlographes côtiers de la région. Source : De la Torre <i>et al.</i> , 2015 b.	35
Illustration 24 : Prise de vue orientée vers l’est du Site Carnon / Petit Travers suivi par le Réseau Tempête. A) Cliché du 24/10/2011 B) Cliché du 19/10/2012. Source : Réseau Tempête Languedoc-Roussillon, http://littoral.languedocroussillon.fr/suivi-des-tempetes-et-de-leurs-impacts.html	35
Illustration 25 : Prise de vue orientée vers l’est du site Carnon/Petit Travers le 28/11/2014 à 12 h 54. Source : Réseau Tempête Languedoc-Roussillon.....	36
Illustration 26 : Érosion du front dunaire de la plage du Petit Travers sous l’impact de la tempête de novembre 2014. Falaise dunaire > 2 m. Photo du 29/11/14. Source : http://forums.infoclimat.fr	38
Illustration 27 : Érosion du front dunaire de la plage du Petit Travers. A) Désensablement des ganivelles. B) Endommagement des accès plage. Source : http://forums.infoclimat.fr	39
Illustration 28 : Action érosive des vagues sur le front de dune et son impact de destabilisation de l’aménagement d’accès à la plage. Prise de vue du 29/11/14 à 15 h 00. Source : http://forums.infoclimat.fr	39
Illustration 29 : Cartographie des mesures topographiques réalisées en 2013 et 2015 sur un secteur restreint situé à l’est du site d’étude. Les lignes de niveau sont établies par interpolations sur des MNT à 5m. Source : Dreal LR et Ortholittoral v2.	40
Illustration 30 : Ganivelle dechaussée au niveau d’une petite falaise d’érosion régularisée. Desmazes, 09/15.	40
Illustration 31 : Emprise des modèles numériques de bathymétrie des rangs 0 (à gauche) et 1 (à droite) utilisé pour SWAN. Le cadre noir (à droite) représente l’extension du domaine utilisé pour les simulations avec le code XBeach. Les points oranges représentent la localisation des extractions du modèle SWAN pour le forçage du modèle XBeach.....	42
Illustration 32 : Conditions de vagues utilisées aux limites (coin sud-est du rang 0), données issues du modèle IFREMER MEDNORD, résolution 0.5°x0.5°.....	42
Illustration 33 : Conditions de vent à Sète, données issues de la station météorologique (34200) et utilisés lors des simulations. Heures en TU. Source : Météo France.....	43
Illustration 34 : Comparaison des paramètres simulés de Hauteur significative et de Direction pic à la localisation du houlographe de Sète avec les observations disponibles. Données CANDHIS (DREAL LR/ CEREMA).....	43
Illustration 35 : Cartes des conditions de Hs au pic de la tempête (le 28/11 à 11h) au rang 0 (a) et rang 1 (b). Résultats du modèle Swan mis en place pour reproduire les conditions d’agitation de la plage du Petit Travers. Position du houlographe de Sète en bleu.....	44
Illustration 36 : Évolution des paramètres d’agitation durant la tempête de novembre 2014 aux limites SE (P1) et SW (P2) du modèle XBeach . Résultats du modèle Swan mis en place pour reproduire les conditions d’agitation de la plage du Petit Travers.....	46
Illustration 37 : Données disponibles du marégraphe de Sète (en rouge) et conditions de niveau utilisées pour les simulations Swan et XBeach (en bleu).....	47

Illustration 38 : Emprise de la zone modélisée à l'ouest de la plage du Petit Travers et données morphologiques du MNT Litto3D à 5 m employé (SHOM-IGN).	48
Illustration 39 : Recapitulatif des principaux réglages du modèle XBeach mis en œuvre pour les simulations 1D et 2D.	49
Illustration 40 : Simulation de l'effet de la tempête de novembre 2014 sur la morphologie du profil 1D Ouest de la plage du Petit Travers. Configuration XBeach de référence.	50
Illustration 41 : Simulation de l'effet de la tempête de novembre 2014 sur la morphologie du profil de plage Ouest et la dune. Configuration XBeach de référence.	50
Illustration 42 : Recapitulatif des valeurs des paramètres testées pour l'étude de sensibilité réalisée avec le modèle 1D.	51
Illustration 43 : Étude de sensibilité du modèle XBeach 1D à 6 paramètres. Simulations de l'effet de la tempête de novembre 2014 sur la morphologie du profil 1D Ouest de la plage du Petit Travers.	52
Illustration 44 : Hauteur significative moyenne des vagues sur une période de 10 minutes, modélisées avec XBeach pour les 28/11/2014 00:00TU, 28/11/2014 12:00TU et 28/11/2014 12:00TU	53
Illustration 45 : Niveaux d'eau modélisés avec XBeach les 28/11/2014 00:00TU, 28/11/2014 12:00TU et 28/11/2014 12:00TU	53
Illustration 46 : Courants modélisés avec XBeach2D a) 27/11/2014 14:00TU, b) 27/11/2014 23:20TU, c) 28/11/2014 02:20TU, d) 28/11/2014 12:00TU et e) 29/11/2014 12:00TU.	56
Illustration 47 : Évolution de la morphologie (courbes de niveau) simulée par XBeach 2D pour la tempête de novembre 2014. Zoom autour du profil représentatif du secteur ouest de la plage du Petit Travers.	57
Illustration 48 : Évolution de la morphologie simulée par XBeach 2D pour la tempête de novembre 2014. Zoom sur la barre sableuse externe.	57
Illustration 49 : Évolution de la morphologie simulée par XBeach 2D pour la tempête de novembre 2014. Zoom au niveau de la plage aérienne et de la dune.	58
Illustration 50 : Évolution temporelle du haut de plage simulée par le modèle XBeach pour la tempête de novembre 2014. Extraction du profil Ouest.	59
Illustration 51 : Cartographie de l'évolution simulée par XBeach de la ligne de niveau +1,75 m IGN69, altitude du pied de dune de la morphologie initiale. Zoom sur une partie située à l'est de l'emprise du modèle. Des valeurs de recul de la ligne de niveau +1,75 m sont indiquées ponctuellement.	60
Illustration 52 : Évolution du haut de la plage du Petit Travers simulée par XBeach 2D pour la tempête de novembre 2014. Comparaison avec les observations topo-bathymétriques DREAL 2013 et 2015. Zoom sur la partie est.	61
Illustration 53 : Évolution du bas de la plage du Petit Travers simulée par XBeach 2D pour la tempête de novembre 2014 (a) partie Est (b) partie ouest. Comparaison avec les observations topo-bathymétriques DREAL 2013 et 2015.	62
Illustration 54 : Évolution de la barre sableuse externe simulée par XBeach 2D pour la tempête de novembre 2014. Comparaison avec les observations bathymétriques DREAL d'avril 2015.	63
Illustration 55 : Exemple d'un profil initial (trait en pointillés), post-tempête mesuré (trait discontinu) et post-tempête modélisé avec XBeach (trait continu) sur la zone de Santa Rosa (États-Unis) suite au passage de l'ouragan Ivan, d'après McCall <i>et al.</i> (2010). Le large est à gauche.	63
Illustration 56 : Profils mesurés et modélisés avec XBeach au niveau Fire Island (États-Unis) suite au passage de l'ouragan Sandy, en régime (a) d'inondation et (b) de collision. Le large est à gauche. Source : De Vet <i>et al.</i> (2015).	64

Illustration 57 : Tests de 2 scénarios hydrodynamiques visant à simuler l'érosion du profil de plage et de la dune. Configuration XBeach de référence. Le scénario « Nmax + 20 cm » accentue le niveau marin de 20 cm au pic de tempête. Le scénario « 2 tempêtes » applique 2 fois les forçages de la tempête de novembre 2014.	65
Illustration 58 : Tests de 3 scénarios morphologiques pour la tempête de novembre 2014. a) Morphologies initiales b) Morphologies après simulation de la tempête. P13 et psm10 : morphologie de plage de 2013 et plage sous-marine issue du MNT Ltto3D. P13 et psm15 : morphologie de plage de 2013 et plage sous-marine issue de la bathymétrie Dreal de 2015. Profil 2015 : plage et plage sous-marine issues des données topo-bathymétrie Dreal de 2015.	67
Illustration 59 : Zoom de l'évolution du haut de plage et de la dune pour les 3 nouveaux scénarios morphologiques testés.	67
Illustration 60 : Érosion observée après la tempête de mai 2009 ayant touché la Gold Coast (Australie), entre le profil bleu (fin 2008) et le profil vert (juin 2009). En rouge, résultat de l'érosion simulée par XBeach pour la morphologie initiale de fin 2008, en pointillés noirs, enveloppe (95 %) et moyenne des simulations obtenue avec l'ensemble des bathymétries disponibles par profils. a) profil ETA52 b) profil ETA67. Source : Splinter <i>et al.</i> , 2011.	68
Illustration 61 : Hauteurs significatives des vagues observées aux stations Gascogne et dénomination des situations météorologiques tempétueuses associées. Source : Nicolae Lerma <i>et al.</i> , 2014.	72
Illustration 62 : Cartes des façades Manche, Mer du Nord et Atlantique présentant le nombre et la répartition des événements de l'hiver 2013-2014 pour lesquels la hauteur significative des vagues est caractérisée par une période de retour locale supérieure à 1 an. D'après Previmer et Bobwa-X.	73
Illustration 63 : Périodes de retour (Pr) des conditions de vague associées à chaque événement sélectionné. Source : Bulteau <i>et al.</i> , 2014 et Nicolae Lerma <i>et al.</i> , 2014.	74
Illustration 64 : Carte de synthèse de l'érosion du trait de côte entre 2013 et 2014 sur la côte sableuse présentée par cellule et sous-cellule (encadrée) sédimentaire. Des points particuliers sont présentés en bleu pour l'évolution planimétrique et en vert pour l'évolution altimétrique. (source : Bulteau <i>et al.</i> , 2014).	76
Illustration 65 : Érosions successives modélisées pour la plage de Narrowneck (Australie, Gold Coast) pendant la séquence de tempêtes de 1967. Source : Splinter <i>et al.</i> , 2014.	80
Illustration 66 : Relation entre volumes érodés (modélisés et observés) et la puissance cumulée des vagues (ΣP). Les points « 1967 » et « AR I » (Average Return Interval, périodes de retour de 1, 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans pour la plage de Surfer Paradise, Gold Coast) sont issus de tempêtes modélisées tandis que Mai 2009, Mai 1996 et 1988 sont des érosions observées. Source : Splinter <i>et al.</i> , 2014.	80

Liste des annexes

Annexe 1 : Configuration du modèle XBeach	91
---	----

1. Introduction

Contexte général

Les dunes côtières sont des corps sédimentaires caractéristiques des côtes meubles sableuses. Dans un contexte d'érosion des littoraux, l'évolution du pied de dune est souvent le marqueur privilégié du recul du trait de côte. Dans le nouveau guide méthodologique pour les plans de prévention des risques littoraux (MEDDE, 2014), les dunes côtières sont mentionnées et prises en compte au titre de la caractérisation des aléas de recul du trait de côte, de submersion marine et de migration dunaire.

La migration dunaire correspond au mouvement des dunes vers l'intérieur des terres. Cet ensablement des terrains et des biens adjacents est majoritairement dû à l'action éolienne. Cet aléa n'est pas abordé dans cette étude.

La submersion marine correspond à une inondation temporaire des zones basses côtières par la mer. Des travaux spécifiques ont été menés dans le cadre de la Mission d'Intérêt Général (MIG) « Prévention des Risques Naturels » de l'ONF (Météreau, 2014) pour évaluer cet aléa dans des secteurs situés en arrière de dunes littorales domaniales gérées par l'ONF. De façon indirecte, la présente étude peut être utile à l'évaluation de cet aléa, car l'érosion, la création de brèche ou la destruction du cordon dunaire lors d'un événement extrême peut mener à des submersions marines de l'arrière-pays.

Le recul du trait de côte est défini par le déplacement vers l'intérieur des terres de la limite entre le domaine maritime et le domaine continental. Ce recul correspond à une évolution sur le long terme du trait de côte, observable à l'échelle de plusieurs décennies. Mais, dans le cas des côtes sableuses, la variabilité interannuelle peut être forte et rendre difficile l'observation d'évolutions claires du trait de côte sur le long terme, de plus, l'impact d'un événement tempétueux majeur peut modifier considérablement les tendances locales. C'est pourquoi le nouveau guide PPRL (MEDDE, 2013) définit la largeur de la zone d'aléa à 100 ans telle que :

$$L_r = 100.T_x + L_{max} \quad \text{Équation 1}$$

Avec L_r , la largeur de la zone d'aléa ; T_x , le taux de recul moyen annuel et L_{max} , la valeur du recul du trait de côte consécutif à un événement tempétueux majeur pour le cas des côtes basses meubles.

Cette étude est un travail méthodologique qui se focalise sur la détermination du recul maximal L_{max} pour les événements extrêmes dans les environnements littoraux dunaires.

Rappel de la phase 1 de l'étude

La phase initiale d'étude méthodologique du recul maximal des dunes pour les événements de tempête (L_{max}) a été menée en 2013 pour le compte du MEDDE/DGPR (Desmazes *et al.*, 2014 ; BRGM/RP-63157-FR). Elle a permis de faire un inventaire des observations relatives à l'érosion dunaire disponibles au sein des bases de données du BRGM. Puis elle a fait le point sur la connaissance des processus hydro-sédimentaires en action lors des phénomènes d'érosion, avant de faire l'état des lieux des méthodes d'estimation des reculs dunaires. Ces méthodes estimatives sont basées sur des formules empiriques, des modèles numériques 1D, reproduisant les processus perpendiculaires à la côte ou des modèles numériques 2D plus complexes. La dernière partie de cette étude méthodologique a proposé des pistes de travail pour la réalisation des PPRL.

Ces premiers éléments de connaissance ont montré la difficulté d'obtenir des observations dans le milieu naturel et la nécessité de compléter ces données par des éléments d'estimation. Les formules empiriques constituent un moyen d'estimation relativement simple à utiliser, mais dont les résultats doivent être interprétés avec prudence en fonction du contexte littoral. L'utilisation de formules empiriques plus précises nécessiterait une mise au point fine et des adaptations en fonction des territoires étudiés. Les modèles numériques sont plus difficiles à mettre en œuvre que les formules empiriques, mais ils sont potentiellement adaptables à des environnements littoraux variés car ils permettent une meilleure prise en compte des processus côtiers.

Objectifs de la phase 2

La présente étude réalisée pour le compte du MEDDE/DGPR vise à améliorer les méthodes d'estimation du recul maximal des dunes lors des tempêtes en explorant les possibilités de la modélisation numérique. Elle s'étend sur deux années de travail. L'objectif de la première année (phase 2/A) était de tester le modèle XBeach pour des cas simplifiés perpendiculaires à la côte (1D). La seconde année (Phase 2/B) a pour but de mettre en place un modèle numérique sur un cas réel.

Rappel de la phase 2/A de l'étude

La première année d'étude (phase 2/A) a permis de mettre en œuvre le modèle XBeach pour 6 cas représentatifs de plages que l'on peut rencontrer sur les différentes façades maritimes de métropole (Manche, Atlantique, Méditerranée, Desmazes *et al.*, 2014, BRGM/RP-64184-FR). Quatre scénarios de forçages ont été testés pour chacun des 6 cas simplifiés. Les premiers résultats obtenus montrent la simulation des modalités de l'érosion des fronts dunaires sous l'effet de forçages marins très énergétiques, caractéristiques des différentes façades métropolitaines. Ces tests réalisés en mode 1D indiquent que la phase d'érosion principale de la dune intervient sur une durée de 2 à 3 h, avant que le modèle ne tende à se stabiliser vers un profil d'équilibre. Lorsque le profil d'équilibre est presque atteint et que la morphologie n'évolue plus significativement, il est possible de déterminer le recul maximal modélisé.

Déroulement de la phase 2/B

La seconde année d'étude (phase 2/B), objet de ce rapport, est constituée de 2 actions :

- **action 1 : modélisation numérique sur un cas réaliste ;**
- **action 2 : prise en compte des phénomènes de succession de tempête.**

L'action 1 vise à tester le modèle XBeach sur une morphologie de plage réaliste et tridimensionnelle, pour un événement de tempête ayant engendré un recul dunaire important. Dans un premier temps, il s'agit d'identifier et de décrire le plus précisément possible le site d'étude et l'évènement érosif. Dans un second temps, on s'attachera à définir le scénario hydrodynamique et morphologique qui permettra de reproduire l'évènement. Dans un troisième temps, les tests, la mise en œuvre du modèle et les résultats sont présentés et discutés.

L'action 2 consiste à initier une étude de l'effet des successions de tempêtes sur l'érosion extrême des milieux dunaires. La mise en place de cette action a été discutée à la fin de la phase 2/A, au regard des premiers retours d'expérience de l'hiver 2013-2014. Cette action est apparue complémentaire pour traiter de la problématique du recul maximal des dunes lors d'évènements extrêmes. Ainsi, après une rapide revue bibliographique, un point sera fait sur les tempêtes observées durant l'hiver 2013-2014 et leurs effets sur l'érosion des dunes de la côte aquitaine. Puis les méthodes d'observation et d'évaluation du recul dunaire recensées lors de la phase 1 et dans le guide PPRL (DGPR, 2014) seront passées en revue pour envisager leur utilisation pour des évènements et des scénarios de succession exceptionnelle de tempêtes.

2. Action 1 : Modélisation numérique XBeach sur un cas réaliste

2.1. IDENTIFICATION DU SITE D'ÉTUDE

Cette étape de travail a pour but d'identifier un site d'étude métropolitain où l'utilisation de Xbeach est pertinente et réalisable pour évaluer l'érosion dunaire lors d'évènements extrêmes. Pour cette phase de travail, le travail de coordination avec l'ONF et le Conservatoire du Littoral initié en 2014 (Desmazes *et al.*, 2014) a été poursuivi, afin d'établir une liste préliminaire de secteurs de travail. Différents éléments entrent en compte pour le choix motivé du site d'étude, et notamment la configuration du littoral, les tendances évolutives et l'existence de données utilisables et mobilisables.

2.1.1. Collaboration avec l'ONF

L'ONF a transmis au BRGM le rapport Météreau (2014) qui présente les résultats du travail d'identification et de qualification des dunes domaniales susceptibles de jouer un rôle d'obstacle aux submersions marines. Sur les côtes de la Manche et de l'Atlantique, l'ONF gère 434 km de zones littorales qui sont formées par près de 357,5 km de dunes, essentiellement entre le sud de la Bretagne et le Pays Basque. Dans le cadre de sa Mission d'Intérêt Générale « Prévention des Risques Naturels », l'ONF a distingué 113 km de cordons littoraux situés devant des zones basses. Les zones basses littorales sont issues des travaux du CETMEF (2009) et identifiées comme les secteurs continentaux d'altitudes inférieures aux niveaux marins statiques centennaux. Pour qualifier la robustesse de ces cordons-obstacles, deux critères géomorphologiques ont été employés pour distinguer les cordons « très robustes », dont l'altitude dépasse le niveau marin centennal + 1m sur une largeur supérieure à 20 m, et les cordons transparents (altitude strictement inférieure au niveau centennal) ou vulnérables.

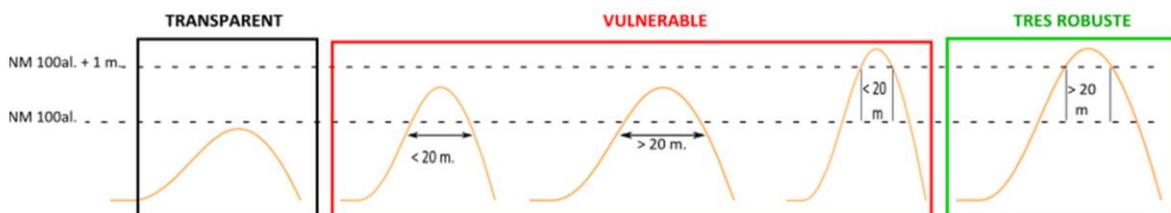


Illustration 1 : Critères de robustesse du cordon dunaire en fonction de sa largeur et de son altitude.
Source : Météreau, 2014.

Les résultats de cette étude montrent que 21,6 km de dunes sont qualifiées de vulnérables ou de transparentes, en Vendée et en Charente-Maritime (Illustration 2).

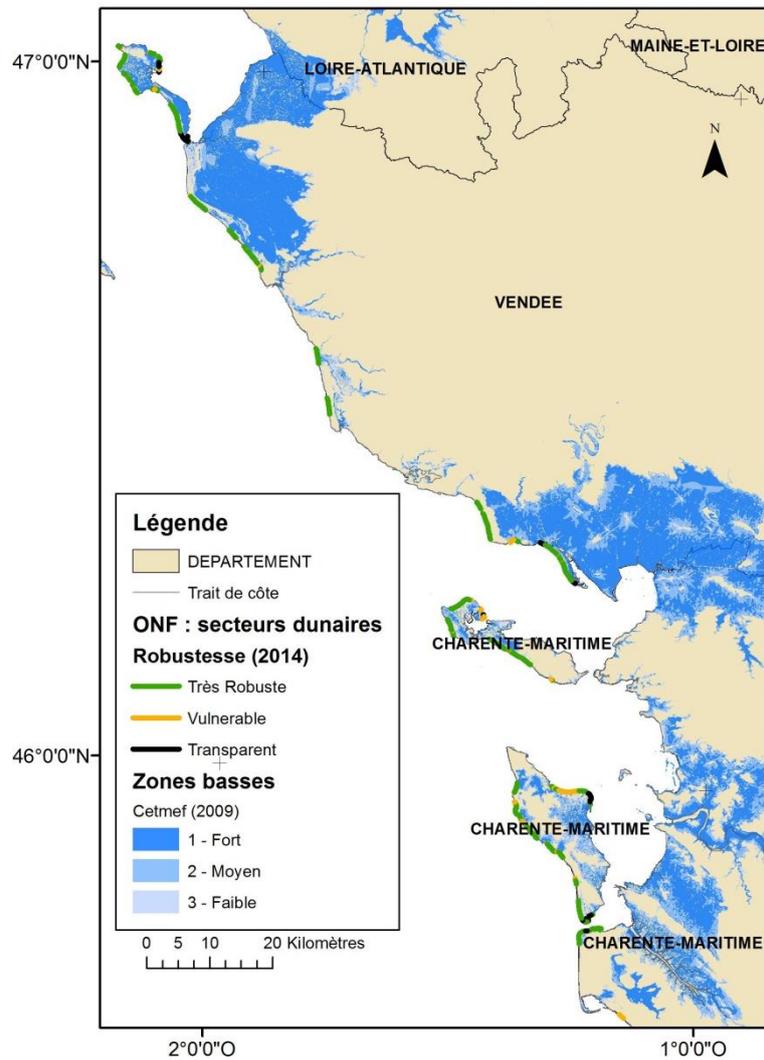


Illustration 2 : Typologie ONF des cordons dunaires situés devant des zones basses pour les départements de Vendée et Charente-Maritime. Sources : Metereau, 2014, Cetmef, 2009.

Parallèlement à cette phase de typologie et de cartographie des cordons-obstacles, l'ONF a mis en place un programme de suivi régulier des dunes littorales situées devant des zones basses. Ce suivi concerne 124 cordons dunaires situés entre Santec (Finistère) et Lit-et-Mixe (Landes). Il doit être réalisé 2 fois par an et après chaque évènement extrême pouvant modifier la morphologie de la dune. Le suivi n'est pas uniquement centré sur les secteurs « transparents » ou « vulnérable », mais est situé sur un point de fragilité potentiel de la dune. Dans le cadre de la collaboration BRGM-ONF pour les études sur la fragilité des dunes, la liste et le positionnement de ces 124 points de suivi ont été transmis par l'ONF au BRGM (Illustration 3).

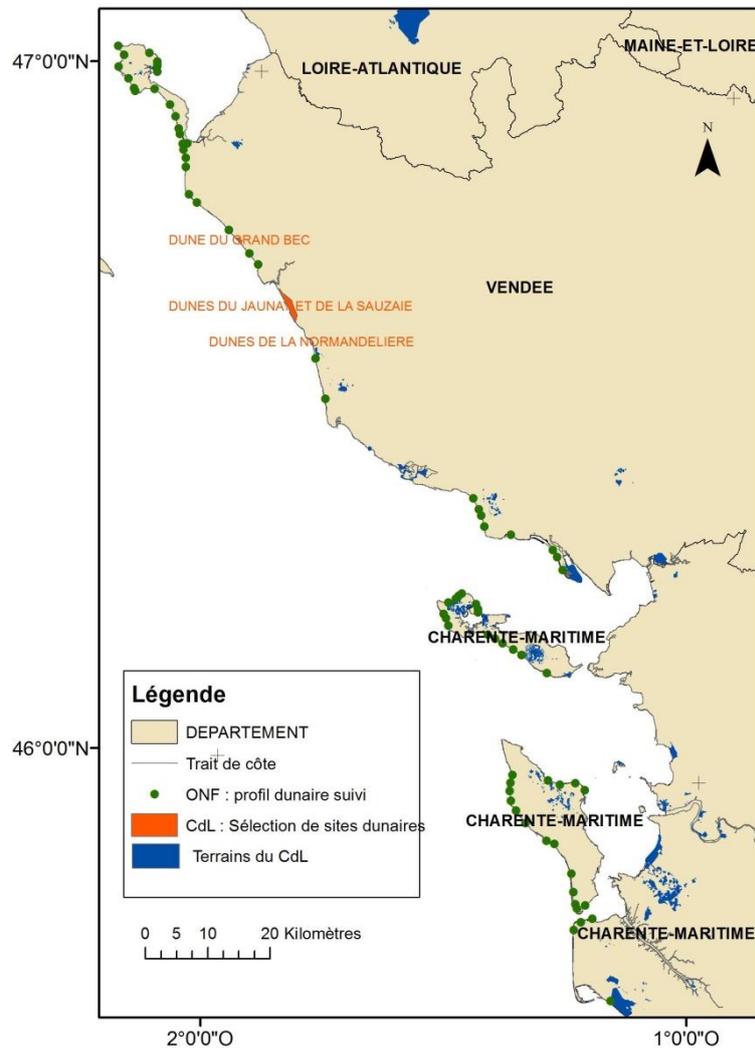


Illustration 3 : Secteurs de suivi dunaire de l'ONF et sélection de sites dunaires du Conservatoire du Littoral pour les départements de Vendée et Charente-Maritime.

2.1.2. Collaboration avec le Conservatoire du Littoral

Le domaine relevant du Conservatoire en 2015 couvre 160 000 ha répartis sur 700 sites en métropole et outremer¹. En matière de gestion du trait de côte, le Conservatoire est « aux premières loges » en tant que propriétaire de terrains littoraux et acteur des territoires littoraux. 13 % du linéaire côtier est sous sa protection, 20 % de son domaine seront potentiellement soumis à l'érosion ou à la submersion d'ici 2050 à 2100. Il est propriétaire de digues, de dunes littorales faisant office de protection et d'obstacle devant des zones basses.

Le Conservatoire du Littoral a transmis au BRGM une liste de 41 sites présentant des cordons dunaires sélectionnés pour leur emprise conséquente sur les façades Manche et Atlantique.

¹ <http://www.conservatoire-du-littoral.fr/>

2.1.3. Choix du site

Sur la base des sites dunaires recensés par la concertation avec l'ONF et le CdL, ainsi que des secteurs qui peuvent être suivis par le BRGM dans le cadre des observatoires littoraux locaux ou régionaux, un premier inventaire des données utiles à la mise en place rapide d'une modélisation morphodynamique de tempête a été réalisé pour chercher l'existence de :

- données topographiques, et notamment de Lidar, permettant une représentation et une description de la dune sur plusieurs kilomètres de long, et le repérage *a priori* des zones les plus fragiles ;
- données bathymétriques et notamment le contenu des dalles SHOM-Histolitt représentant le plus correctement possible le domaine pré littoral ;
- enregistrement de conditions d'agitation de tempête et statistiques traitant des périodes de retour des événements ;
- enregistrement des niveaux marins et statistiques de périodes de retour ;
- données sur les courants côtiers (hors vagues), en cas d'influence de courant de marée ;
- granulométrie de la plage ;
- évolution du trait de côte / pied de dune sous l'effet de tempêtes connues.

Ce premier recensement de données disponibles a conduit à restreindre la liste à 9 sites d'étude potentiels :

- Plouhinec (Bretagne) ;
- La Barre-de-Monts et Saint-Jean-de-Monts (Pays de Loire) ;
- La Tremblade et les Mathes (Poitou-Charentes) ;
- Biscarosse et Capbreton (Aquitaine) ;
- Le Canet en Roussillon et Mauguio (Languedoc-Roussillon).

Parmi cette liste restreinte, le site du Petit Travers, situé sur le lido de l'Or la commune de Mauguio dans l'Hérault est apparu comme un choix pertinent :

- c'est une zone de plage ouverte sur la mer Méditerranée, qui, aux premiers abords, ne présente pas de complexité particulière pour la modélisation des forçages ;
- le test du modèle Xbeach en 1D sur ce type de profil de plage avait fourni des résultats encourageants lors de la première années d'étude (Desmazes *et al.*, 2014) ;
- le secteur a subi une forte tempête en 2014 qui a causé le recul du pied de dune ;
- une grande partie des terrains appartiennent au Conservatoire du Littoral qui en a fait un site expérimental de son projet Ad'Apto ;
- des travaux d'aménagements et de restaurations récents réalisés par le département et un ensemble de partenaires impliqués ont été suivi par campagnes de mesures régulières depuis 2009.

Le choix du site du Petit Travers a été validé par la DGPR.

2.2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

2.2.1. Généralités

La plage du Petit Travers se situe sur la commune de Mauguio, entre les derniers épis de Carnon à l'ouest et la commune de La Grande-Motte à l'est (Illustration 4). Ce lido (Lido de l'Or) sépare le Golfe d'Aigues-Mortes de l'étang de Mauguio. Le secteur étudié n'est pas urbanisé et s'étend sur près de 2 500 m.

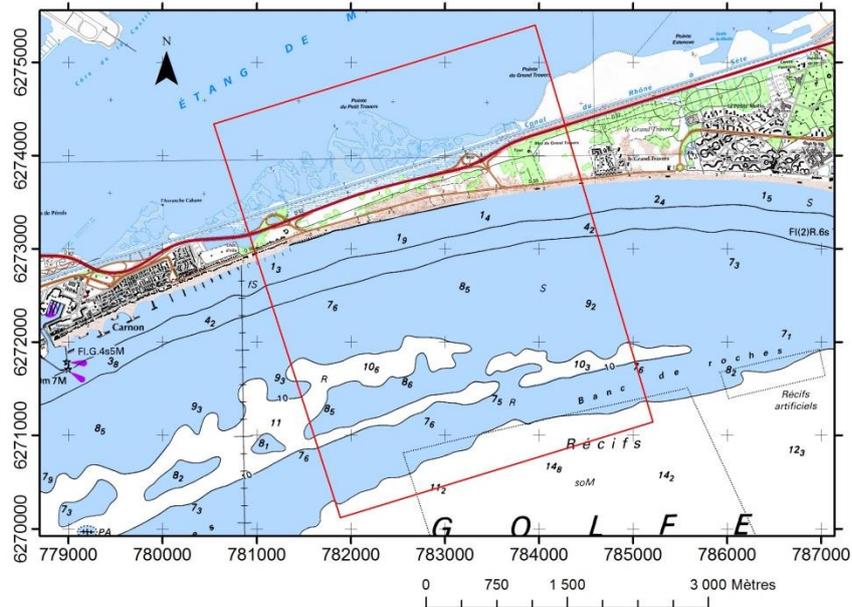


Illustration 4 : Localisation du site d'étude, plage du Petit Travers, Mauguio, Hérault.
Source : SHOM-IGN.

Évolution des cellules sédimentaires littorales

Selon les travaux réalisés dans le cadre du plan de gestion régional des sédiments, la zone d'étude du Petit Travers se situe entre 2 cellules sédimentaires situées entre Carnon et la Grande Motte (Raynal et Certain, 2013). Les deux cellules sédimentaires littorales sont définies en fonction d'un comportement globalement homogène sur le long terme, leurs frontières, justifiées par Raynal et Certain (2013), ne correspondent pas systématiquement à une limite morphologique comme une pointe rocheuse ou des aménagements.

À l'ouest de la zone d'étude, la cellule Carnon - Le Petit Travers est marquée par l'érosion récurrente des profils de la plage du Petit Travers depuis les années 70 (Illustration 5, profils 5, 6 et 7). Cette phase de recul coïncide avec la construction des brise-lames et du port de Carnon (1969-1970). Pour la période des années 90, les pertes de volumes sédimentaires se sont fortement accélérées (multipliées par 3,5 selon Raynal et Certain, 2013). Les rechargements sableux (en 2007 et 2008, 10 000m³ au niveau des profils 6 et 7) ont permis d'inverser la tendance érosive pour la période 2000-2009, sans pour autant restaurer la position du trait de côte estimée en 1895 pour les profils 6 et 7 situés dans la zone d'étude.

Trait de côte

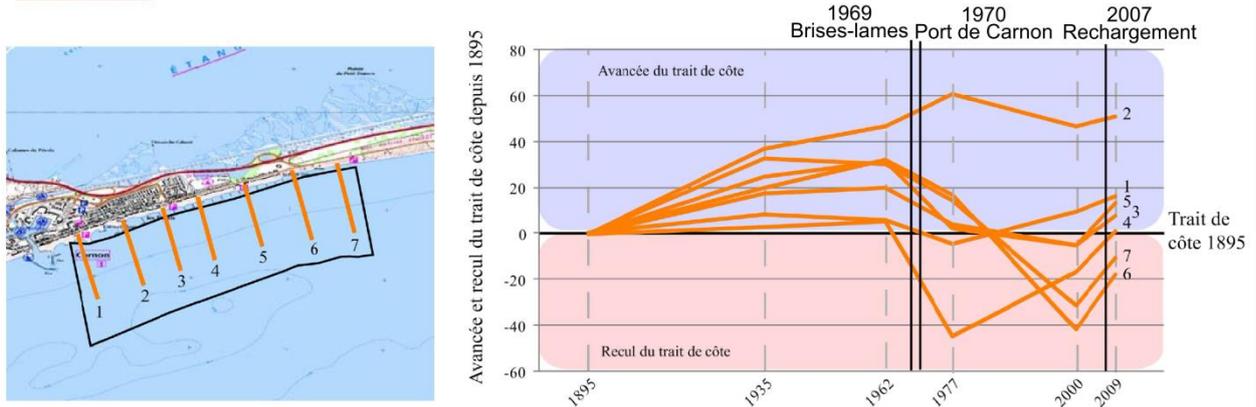


Illustration 5 : Cellule 34 (Carnon - le Petit Travers), étude du trait de côte. Carte de localisation des profils transversaux et graphique d'avancée et de recul du trait de côte au niveau des profils, normalisé par rapport à la position de 1895. Source : Raynal et Certain, 2013.

Au centre et à l'est de la zone d'étude, l'évolution de la position du trait de côte (défini ici comme la limite entre les parties immergées et émergées) de la cellule sédimentaire littorale « Le Petit Travers-La Grande Motte » suit globalement les mêmes tendances qu'à l'ouest (Illustration 6, profils 1 à 5) : après une phase d'avancée jusqu'aux années 70, le trait de côte recule rapidement jusqu'au rechargement sédimentaire massif de 400 000 m³ intervenu en 2008 (Vanroye, 2008). Le bilan d'évolution du trait de côte sur le long terme laisse apparaître que la position actuelle est avancée de 5 à 40 m par rapport à sa position estimée en 1895, d'après Raynal et Certain (2013).

Trait de côte

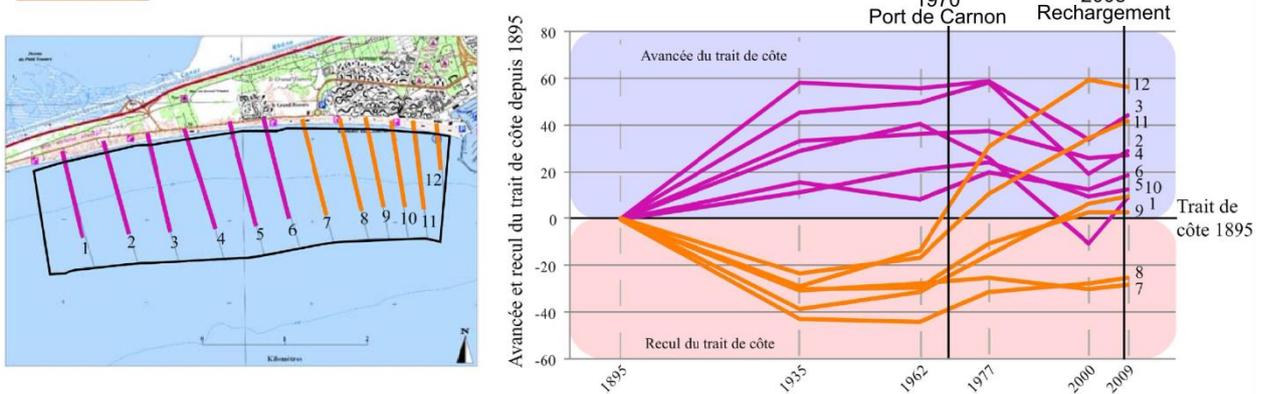


Illustration 6 : Cellule 35 (Le Petit Travers - La Grande Motte), étude du trait de côte. Carte de localisation des profils transversaux et graphique d'avancée et de recul du trait de côte au niveau des profils, normalisé par rapport à la position de 1895. Source : Raynal et Certain, 2013.

Aménagements récents de la plage du Petit Travers

Outre le rechargement massif de la plage et de l'avant-côte réalisé en 2007 et 2008, d'importants travaux ont été menés en 2014 et 2015 sur le Lido de l'Or. En effet, la dune souffrait d'une très forte fréquentation estivale et de la présence de la route RD59 directement sur la crête dunaire (Illustration 7). La présence de cette route est devenue particulièrement problématique avec l'accélération du recul du trait de côte avant les travaux de rechargement.

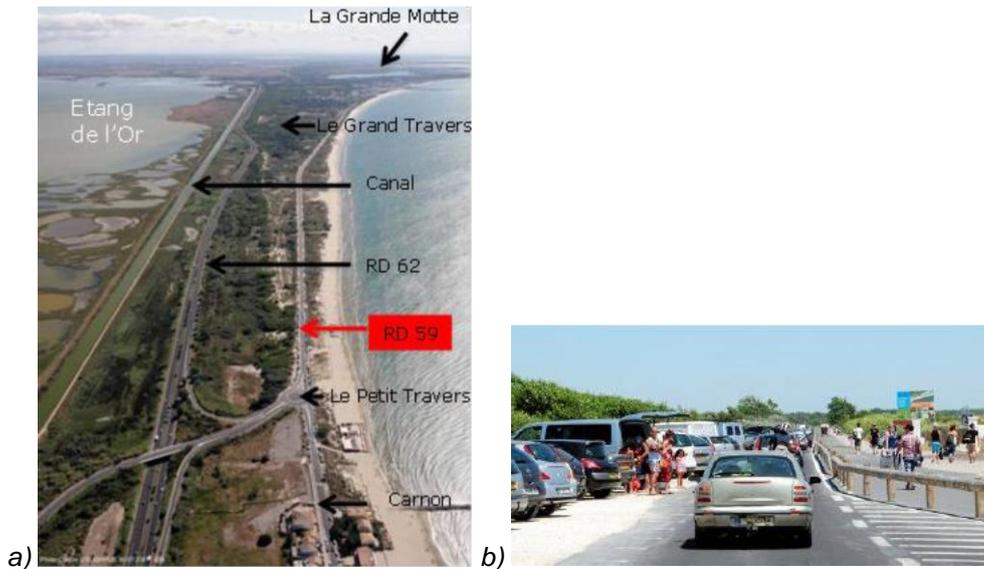


Illustration 7 : Situation du Lido de l'Or avant les travaux de renaturation. A) Vue aérienne du Lido. B) Encombrement de la RD59 et stationnement au sommet de la dune. Source : Ingerop, 2013.

Dans une perspective de développement durable et d'adaptation raisonnée aux risques d'érosion littorale, le département de l'Hérault et l'ensemble des partenaires impliqués ont conduit un programme d'aménagement et de renaturation du lido et de la dune bordière sur les sites du Petit et du Grand Travers. Les travaux ont été finalisés durant l'été 2015 (Illustration 8) :

- la route RD59 qui artificialisait la dune littorale a été supprimée et démantelée ;
- les stationnements, auparavant situés sur la route RD59, ont été déplacés en arrière du cordon dunaire, le long de la route RD62 et d'une nouvelle piste de circulation ;
- les cheminements piétonniers (au nombre de 9) permettent de rejoindre la plage depuis la piste de circulation. Balisés par des ganivelles, ces cheminements permettent de canaliser la fréquentation du site. Les accès à la plage se font par des passerelles en bois qui permettent d'éviter la dégradation du front dunaire (Illustration 9) ;
- les secteurs de fragilité de la dune sont rechargés en sable et « consolidés » par des casiers de ganivelles (Illustration 10).

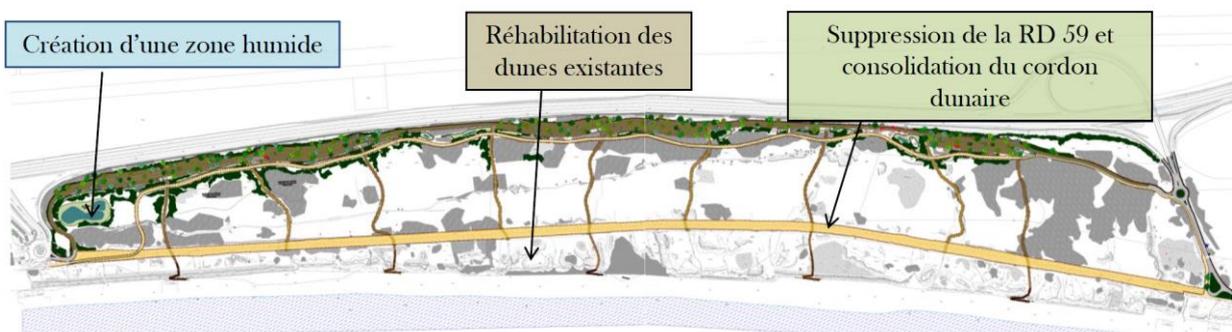


Illustration 8 : Plan des travaux de réaménagement et de renaturation du Lido de l'Or. Source : Ingerop, 2013.



Illustration 9 : Exemple d'un accès à la plage du Petit Travers. Desmazes, 09/15.



Illustration 10 : Zone de fragilité de la dune « consolidée » par des casiers de ganivelles. Desmazes, 09/15.

2.2.2. Morphologie et sédimentologie

Données topo-bathymétriques disponibles

Après les rechargements massifs de 2007 et 2008, le site a été suivi régulièrement par des mesures topo-bathymétriques.

Dans un premier temps, des levés de lidar topographique (2010) et bathymétrique (2009) ont permis à l'IGN et au SHOM de produire le MNT Litto3D qui constitue le jeu de données de référence pour ce secteur. Ces données présentent l'avantage d'être relativement homogènes et précises (Illustration 11). La partie sous-marine montre que les fonds marins sont marqués par la présence de bancs rocheux autour de 10 m de profondeur. Sur le lido, les zones hautes sont nettement visibles. Elles correspondent à des infrastructures routières (route D62) ou aux sommets des dunes littorales. En revanche, il faut garder à l'esprit que la zone située autour du 0 m IGN69 se situe à la jonction entre les deux types de levé lidar et n'est pas forcément bien couverte par les mesures, le produit Litto3D propose donc une interpolation des mesures à ce niveau.

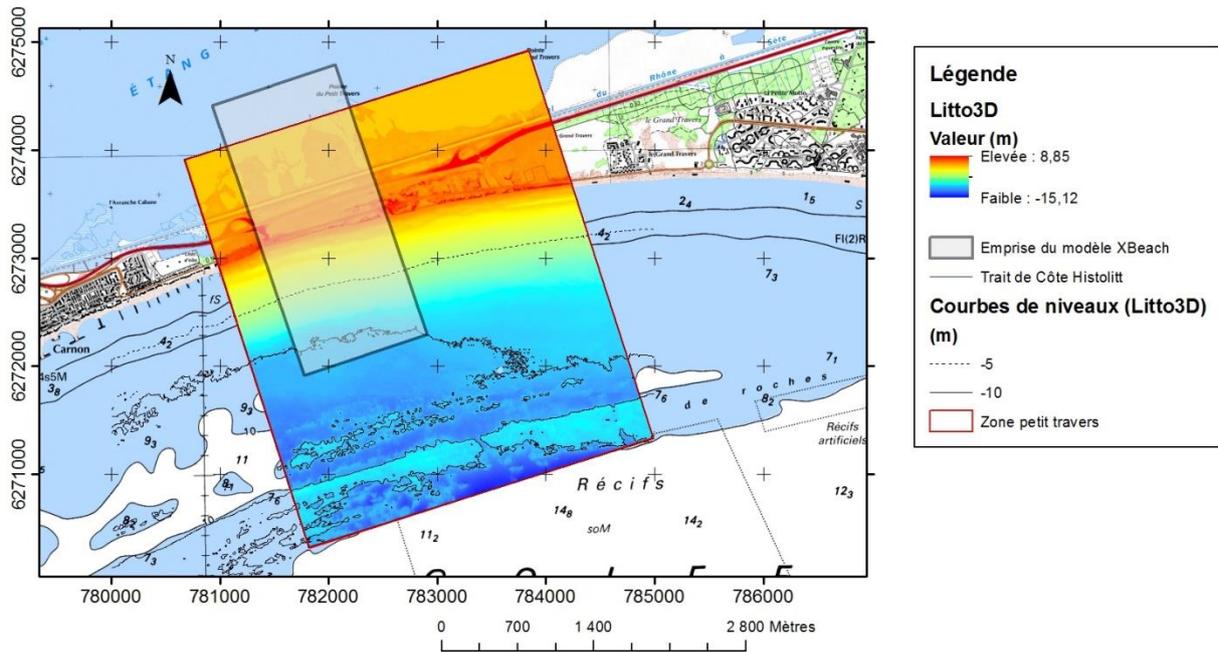


Illustration 11 : MNT Litto 3D 2009 sur la zone d'étude de la plage du Petit Travers (d'après SHOM-IGN).

Pour cette étude, la DREAL Languedoc-Roussillon a mis à la disposition du BRGM les données de topo-bathymétrie réalisés en août 2013 et avril 2015.

La carte Scan littoral (SHOM-IGN) est également utilisée pour faciliter le positionnement des éléments géographiques comme les agglomérations, les routes et le canal du Rhône à Sète situé au nord de la route D62.

L'orthophotographie « ortholittorale v2 » date de 2011 et peut également être utilisée comme fond de carte. Cette image est antérieure aux travaux récents qui ont été réalisés sur la dune pour supprimer la route RD59.

Morphologie du site d'étude

Les données Lidar Litto3D et l'image Ortholittorale permettent de détailler la zone d'étude centrée sur la plage et le secteur dunaire. L'illustration 12 présente les différents indicateurs d'altitude choisis pour faciliter l'interprétation géomorphologique de la zone d'étude. Au niveau de la plage, la ligne de niveau + 2 m marque bien la position du front dunaire et correspond à la zone de végétation ou d'implantation de ganivelles (Illustration 13).

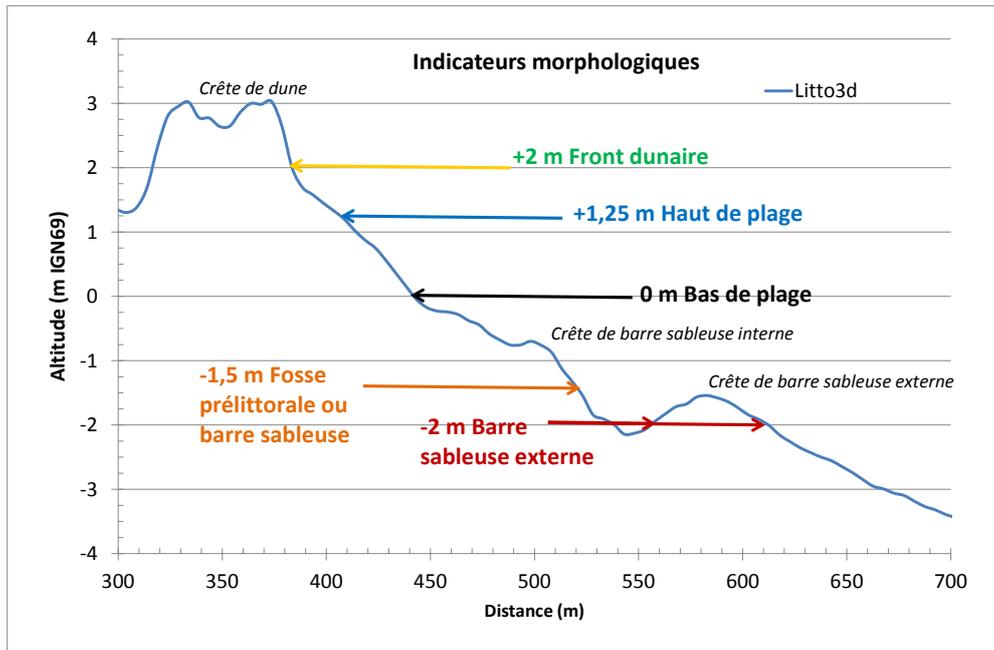


Illustration 12 : Vue en coupe de la plage du Petit Travers et altitude des différents indicateurs morphologiques utilisés pour décrire la zone d'étude. Source : SHOM-IGN.

Pour le secteur d'étude, la ligne de niveau 0 m IGN69 se situe 17,3 cm sous le niveau moyen de la mer (port de référence Sète, Shom, 2014) et 3,7 cm au-dessus du niveau des plus basses mers. Dans la suite de cette étude, nous considérerons que cette ligne de niveau 0 m IGN69 est un bon indicateur du bas de plage.

Entre l'altitude 0 m IGN69 et le front dunaire à + 2 m, les données Litto3D permettent d'évaluer la largeur de la plage, comprise entre 50 et 60 m. Dans la suite de l'étude, l'altitude + 1,25 m IGN69 sera utilisée comme indicateur du haut de plage (Illustration 13), car elle permet une comparaison des 3 jeux de mesures disponibles pour cette étude (Litto3D, Dreal 2013 et 2015).

En mer, les isolignes - 1,5 m et - 2 m présentent des sinuosités qui caractérisent les limites de barres sableuses externes sous-marines. La première barre sableuse s'observe à l'ouest, au niveau de l'isoligne - 2 m. Elle s'étend sur environ 1 000 m. La seconde barre sableuse s'observe à l'est de la zone d'étude, au niveau de l'isoligne - 1,5 m, et s'étend vers l'est en dehors du cadre de la figure. Entre la barre sableuse externe et l'isoligne 0 m IGN69, la présence d'une petite barre sableuse interne est difficile à détecter à cette échelle. Elle apparaît plus clairement sur la vue en coupe (Illustration 12).

La largeur des dunes entre les lignes de niveau + 2 m et leur altitude (jusqu'à + 6 m) permettent de séparer la zone d'étude en plusieurs zones. À l'est de la zone urbanisée (Illustration 13), le secteur ouest de la plage du Petit Travers s'étend sur 800 m. Il est marqué par une dune dont la crête n'atteint pas 4 m d'altitude. La largeur de cette dune est comprise entre 50 et 75 m. Au centre de la zone d'étude, au niveau de la pointe du Petit Travers, le secteur dunaire s'élargie pour dépasser 200 m, des points hauts qui dépassent nettement 4 m alternent avec des dépressions. Ce secteur central jouxte une zone de fragilité de 150 m de large, caractérisée par deux dépressions larges est bien marquées, situées entre des cordons dunaires dont la largeur atteint à peine 10 m par endroit. La dune du secteur est de la zone d'étude est d'une largeur similaire au cordon du secteur ouest, mais sa crête est plus haute et dépasse régulièrement 4 m d'altitude.

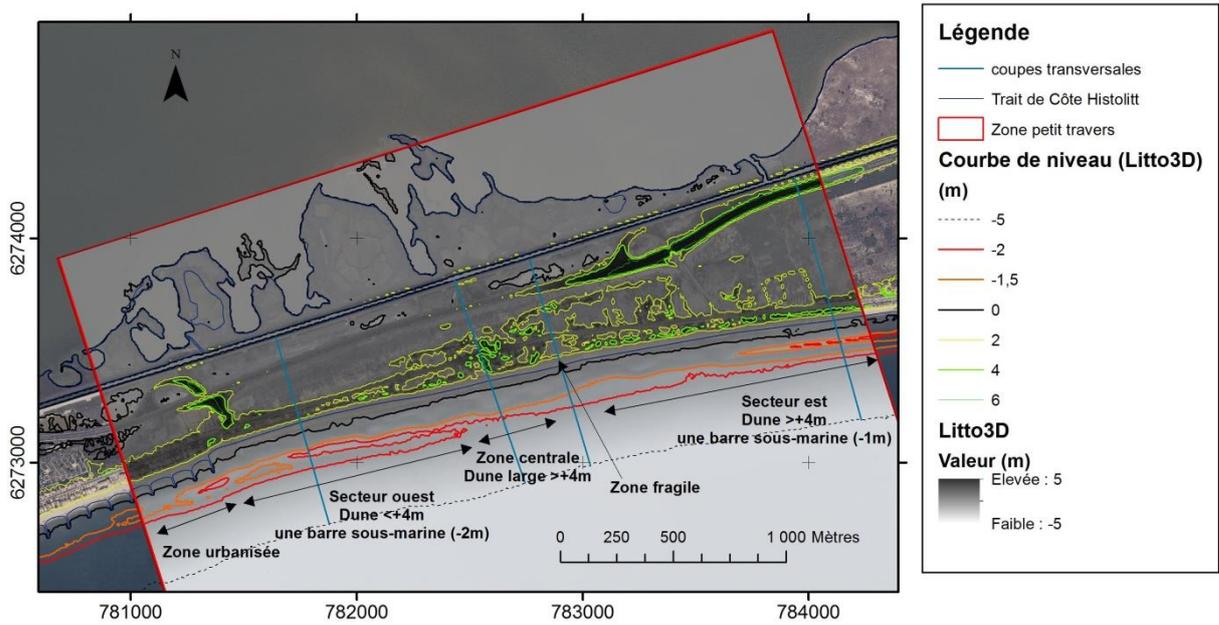
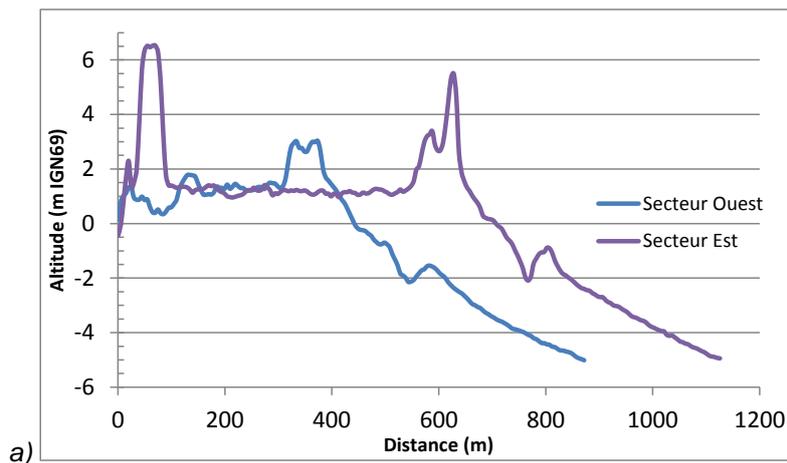


Illustration 13 : Morphologie de la zone d'étude et positionnement des coupes transversales caractéristiques des différents secteurs dunaire de la plage du Petit Travers. D'après Litto3D et Ortholittorale, 2011.

L'illustration 14 représente des coupes topographiques transversales (positionnées sur l'illustration 13) réalisées avec le MNT Litto3D entre le canal du Rhône à Sète et l'isoligne - 5 m (IGN69). Les contrastes morphologiques entre les différents secteurs de la plage du Petit Travers sont visibles. La hauteur de la dune et la largeur du lido sont plus faibles à l'ouest qu'à l'est (Illustration 14 a). Au niveau de la zone centrale, les points hauts de la dune atteignent 6 m IGN69 et la largeur du cordon contraste avec la zone de fragilité identifiée (Illustration 14 b).



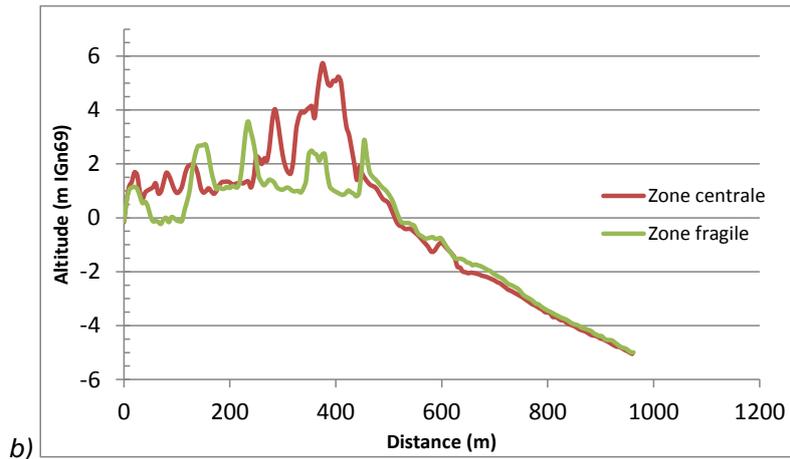


Illustration 14 : Coupes topographiques transversales sur des profils caractéristiques des différentes morphologies de dunes de la plage du Petit Travers. a) Zones Est et Ouest b) Zone centrale et zone fragile.

Évolution morphologique entre 2010 et 2015

Les données topo-bathymétriques de 2013 et 2015 mises à disposition par la DREAL LR permettent de suivre l'évolution temporelle de la plage du Petit Travers. Ces mesures de topo-bathymétrie sont majoritairement constituées de profils perpendiculaires à la côte, équidistants de 20 m. Ces profils ne sont pas superposés entre le levé de 2013 et 2015. Pour faciliter la comparaison de ces mesures entre elles et avec le MNT Litto3D, les données DREAL 2013 et 2015 ont été interpolées pour former des MNT desquels seront extraites des coupes et des courbes de niveaux.

- Coupe

La réalisation de coupes topographiques est un moyen simple d'évaluer les modifications. L'illustration 15 présente l'évolution sur la coupe transversale caractéristique du secteur ouest. En domaine sous-marin, l'abaissement des fonds est très net entre 2010 et 2015. Sur les coupes, on observe un abaissement de 50 cm de la crête de la barre sableuse externe. Entre cette barre sableuse et le bas de plage, une petite barre interne dont la crête se trouve au-dessus de l'isoligne - 1 m a migré d'environ 40 m vers la côte entre 2010 et 2015. Pour la plage subaérienne, les profils montrent également un net abaissement entre 2009 (levé lidar topographique) et 2013. Le bas de plage (ligne de niveau 0) est en recul d'environ 25 m, tandis que le front dunaire semble relativement stable. Entre 2013 et 2015, la tendance érosive liée à un abaissement de la plage se poursuit. Le front dunaire n'a pas été levé en 2015.

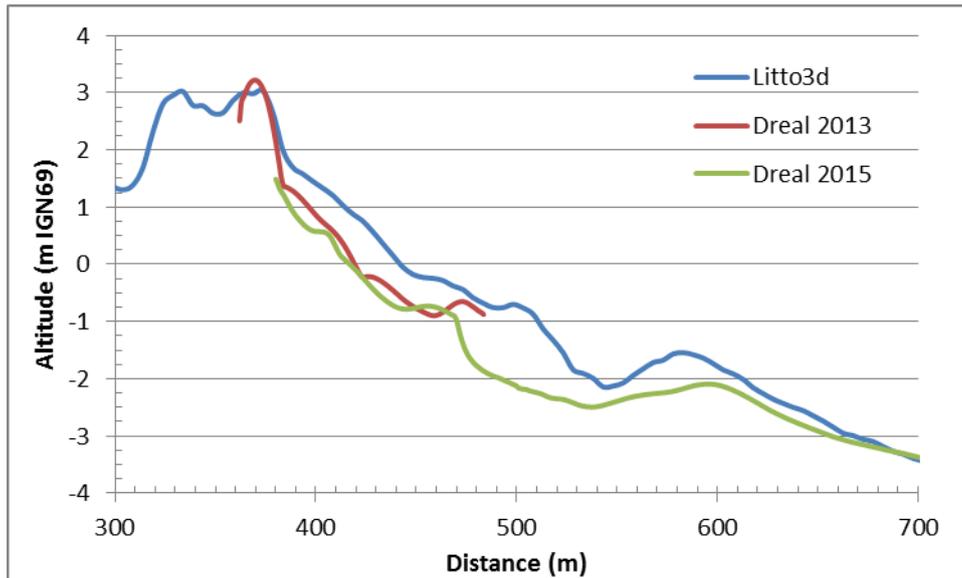


Illustration 15 : Évolution temporelle entre 2010 et 2015 sur la coupe topo-bathymétrique caractéristique de la zone Ouest de la plage du Petit Travers. Source : Litto3D et levés DREAL LR.

Pour synthétiser l'évolution et l'abaissement de la plage entre 2010 et 2015, l'isoligne 0 m IGN69 et l'altitude 1,25 m IGN69 sont extraits des 4 coupes transversales représentatives de la plage. L'altitude 1,25 m est représentative du haut de plage, elle correspond à la partie la plus haute des mesures de 2015. L'illustration 16 montre que le recul sur le profil ouest est bien plus important qu'au niveau de la zone centrale où le recul est de l'ordre de 12 m. Le secteur « fragile » est proche du profil central, mais il est marqué par un fort recul du haut de plage (19,5 m). Pour le profil est, le recul du bas de plage au niveau de l'isoligne 0 m IGN69 est très important (supérieur à 30 m) et plus rapide que celui du haut de plage, ce qui induit un net rétrécissement de la plage.

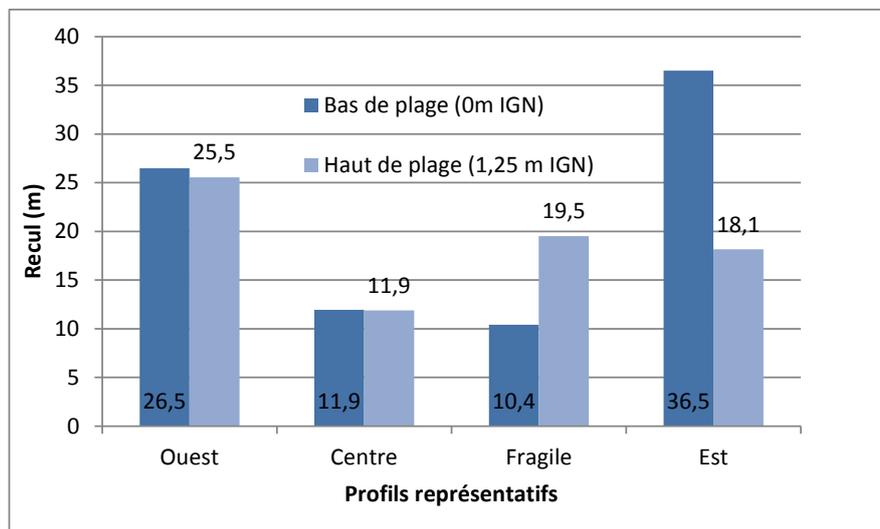


Illustration 16 : Synthèse de l'évolution morphologique de la plage entre 2010 et 2015 pour les 4 profils transversaux représentatifs de la plage du Petit Travers. Les indicateurs utilisés pour quantifier le recul de la plage sont à l'altitude 0 m IGN69 pour le bas de plage et l'altitude 1,25 m IGN69 pour le haut de plage.

- Ligne de niveau

La visualisation des lignes de niveau issues de l'interpolation permet d'étudier les tendances d'évolution pour l'ensemble de la zone d'étude. L'illustration 17 montre ces tendances pour les parties ouest et centrale de la zone d'étude, en accord avec l'analyse des profils. Les courbes de niveau m (bas de plage) et + 1,25 m (haut de plage) issues des données morphologiques de 2015 sont représentés entourés d'une zone « tampon » de 10 m qui représente un recul de 2 m/an. On constate que pour le secteur ouest, le recul du bas de plage est largement supérieur à 10 m depuis 2010 et l'isoligne 1,25 m a reculé de plus de 10 m. Plus au large, la barre sableuse externe dont la crête était visible au niveau de l'isoligne - 1,5m s'est nettement approfondie. Au niveau des zones « centrale » et « fragile », le recul du bas et du haut de plage est de l'ordre de 10 m. À l'est (Illustration 17), le recul de l'isoligne 0 m est nettement supérieur à 10 m, tandis que l'abaissement du haut de plage a provoqué un recul d'environ 10 m de la courbe de niveau 1,25 m. Pour les rares secteurs où les mesures de 2015 sont remontées au-delà du pied de dune, la courbe 2 m (IGN69) ne montre pas d'évolution significative. Au large, au niveau de la barre sableuse externe, le constat d'approfondissement à l'est est relativement similaire au secteur ouest.

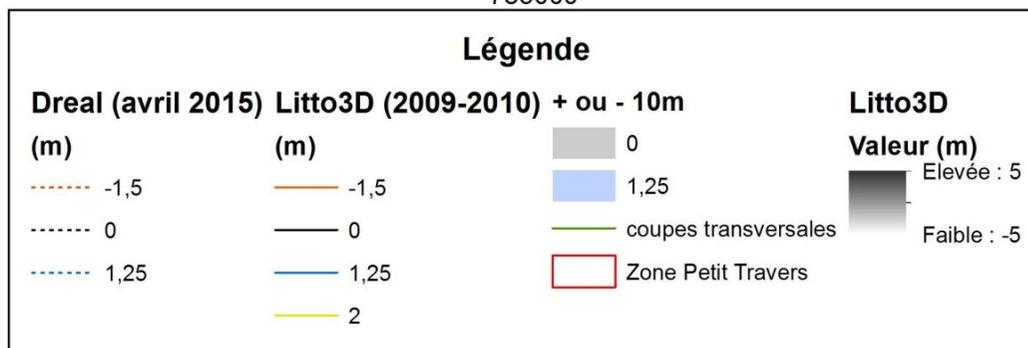
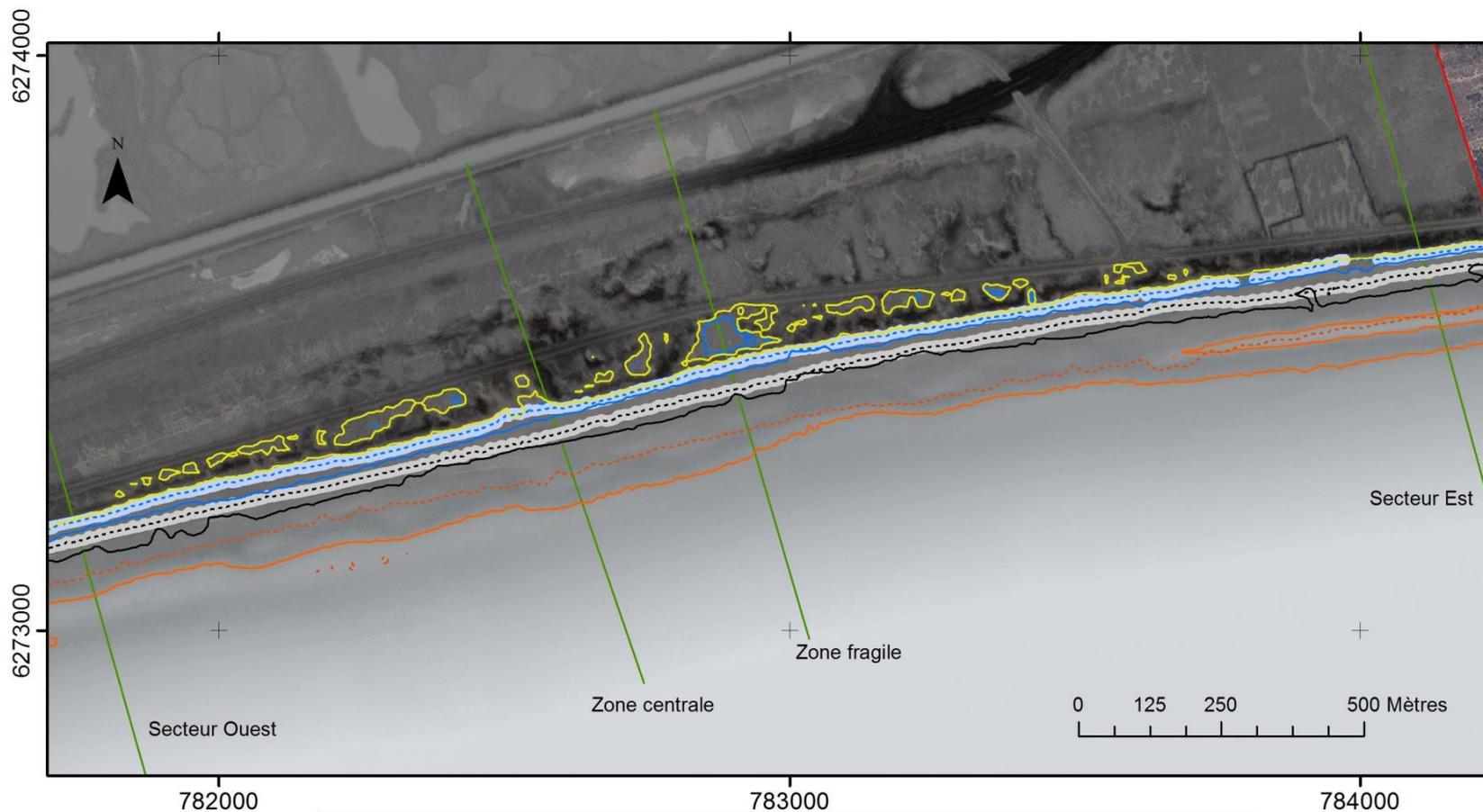


Illustration 17 : Évolution des courbes de niveau - 1,5 m, 0 m et 1,25 m entre 2009-2010 (Litto3D) et 2015 (données DREAL) pour le secteur ouest et la zone centrale de la plage du Petit Travers.

Sédimentologie

Selon Raynal et Certains (2013), la granulométrie médiane de la berme pour les cellules sédimentaires entre Carnon et la Grande Motte est de 300 μm . Mais, les cartes des répartitions granulométriques présentées par Raynal *et al.* (2015) sont plus complètes. Elles montrent que les sédiments de la berme sont sensiblement plus grossiers que pour le reste de la plage dont la médiane est plus globalement inférieure à 200 μm .

Barrusseau (2011) présente une analyse granulométrique très détaillée des sédiments littoraux du département de l'Hérault. En annexe de l'article, il propose une distribution granulométrique représentative des sédiments du nord du Golfe du Lion. Ce sédiment apparaît nettement bimodal, de moyenne 340 μm et de médiane 194 μm (Illustration 18).

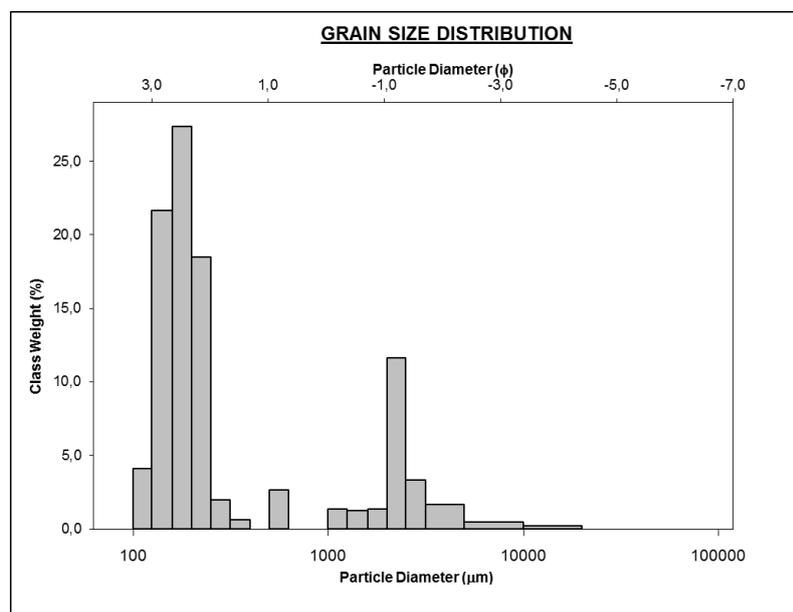


Illustration 18 : Distribution granulométrique d'un sédiment type du nord du Golfe du Lion.
Source : Barusseau, 2011.

2.2.3. Hydrodynamique et tempêtes

Conditions hydrodynamiques du Golfe du Lion

La partie nord du Golfe du Lion est caractérisée par un régime microtidal semi-diurne, dont le marnage est de l'ordre de 0,2 m et qui atteint 0,44 m en vive-eau (SHOM, 2013).

Les données de la station météo de Sète montrent que les vents de terre (Tramontane du NW ou Mistral du N) sont majoritaires (55 % des enregistrements de la station météo de Sète entre 2005 et 2009). Les vents de mer (entre le secteur sud et est) représentent environ 25 % des enregistrements. Durant l'hiver et l'automne, ces vents de mer sont plus fréquents, plus forts (ils peuvent dépasser 100 km/h) et associés aux périodes de tempêtes (Gervais *et al.*, 2012).

L'énergie des vagues dans le Golfe du Lion apparaît modérée, comparativement aux houles observées sur la façade atlantique. La hauteur moyenne significative (Hs) est de l'ordre de 0,7 m pour une période pic moyenne (Tp) de 5 s. Les vagues de tempête ont des hauteurs significatives supérieures à 3 m. Elles peuvent atteindre 7 m et une période pic moyenne de l'ordre 8 s. Elles représentent moins de 3,5 % du temps et proviennent généralement de l'ESE. Les statistiques réalisées sur le houlographe de Sète indiquent un Hs de période de retour annuelle de 4,2 m et décennale de 5,2 m².

Les évènements de tempête sont également associés à d'importantes surcotes qui peuvent localement dépasser 0,85 m. Les travaux du CETMEF (2013) basés sur l'analyse du marégraphe de Sète indiquent des surcotes qui peuvent atteindre 56 cm pour une période de retour décennale et 74 cm pour une période de retour centennale.

Caractérisation des tempêtes

Les évènements de tempêtes les plus significatifs sont associés à des conditions météorologiques qui combinent une zone dépressionnaire à l'ouest et un anticyclone à l'est. Plusieurs types de tempêtes sont distingués en fonction de la situation météorologique sur une vaste échelle spatiale (Balouin *et al.*, 2011).

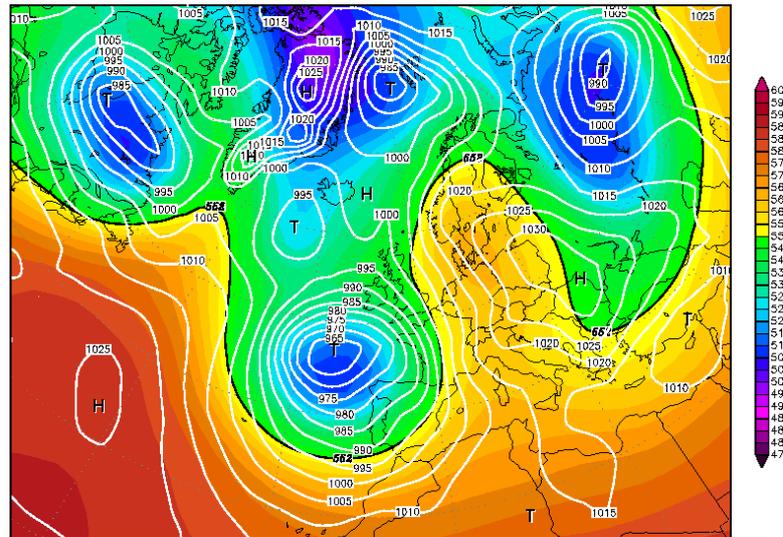
	Vents	Houle	Exemples	Caractéristiques
Tempêtes de Sud-Sud-Est	Sud-Est	Sud-Est	Novembre 1982 Décembre 1997	Dépression centrée sur le Golfe de Gascogne couplée à un anticyclone en Europe Centrale
Tempêtes d'Est	Nord-Est	Est	Décembre 2008	Système dépressionnaire sur les Baléares Vaste anticyclone sur la Sibérie
	Est à Sud-Est	Est	Novembre 1999	Dépression sur les Baléares couplées à un anticyclone sur l'Irlande
Tempêtes liées à des épisodes cévenoles	Sud à Sud-Est	Sud à Sud-Est	Décembre 2003 Octobre 2009	Dépression centrée sur l'Atlantique Flux de Sud accompagné de fortes pluies

Illustration 19 : Tableau récapitulatif des différents types de tempêtes rencontrées dans le Golfe du Lion. Source : Balouin et al., 2011.

L'illustration 20 présente la situation météorologique du 07/11/1982, caractéristique d'une tempête de sud-sud-est provoquée par une forte dépression centrée sur le Golfe de Gascogne et un anticyclone en Europe centrale. Ce type de tempête peut induire d'importants dégâts dans la zone d'étude.

² http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/publications/03404/astx_03404_2.pdf

07NOV1982 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Illustration 20 : Carte des pressions atmosphériques de la zone Europe et Nord-Atlantique, le 07/11/1982. Source : <http://www.wetterzentrale.de>.

En Méditerranée, la synthèse bibliographique réalisée par Gervais (2012) recense différents paramètres et seuils utilisés pour qualifier les tempêtes, comme les hauteurs significatives des vagues, le niveau d'eau, la force du vent. Mais les dernières 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 points d'analyse situés à Sète et à l'Espiguette « encadrent » le Golfe d'Aigues Mortes et la zone d'étude du Petit Travers. Pour ces points, respectivement 38 et 39 événements ont été recensés et décrits en fonction de la direction de la houle, de la période et de la hauteur significative au pic de la tempête, de la durée de l'évènement et de l'énergie de la houle sur la durée de la tempête (Illustration 21).

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 la zone d'étude).

Pour les points Sète et Espiguette, les directions prédominantes des houles de tempêtes sont N135 pour les plus fortes houles et N170 de façon moins fréquente.

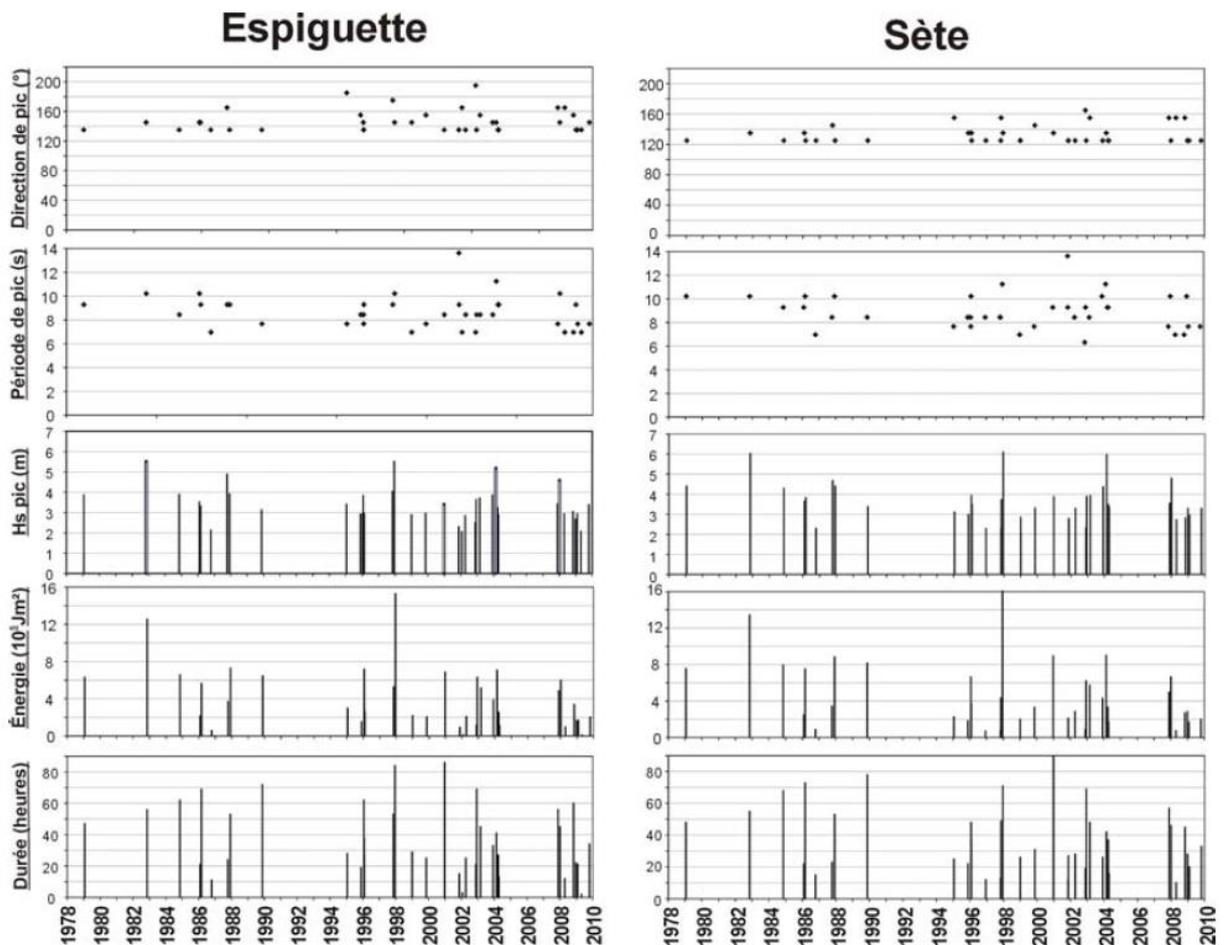


Illustration 21 : Caractéristiques hydrodynamiques des tempêtes pour les points Espiguette et Sète.
Source : Balouin et al., (2011).

En couplant chacune des tempêtes recensées depuis 1979 avec la base de données « Tempête », qui traite de l'impacts des tempêtes, le projet MICORE (Gervais *et al.*, 2012) a permis d'évaluer les seuils morphogènes et les seuils d'impact sur le littoral de la région Languedoc-Roussillon. Dans la partie nord du Golfe du Lion, ces travaux ont montré 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 Hs est utilisé pour définir des seuils d'impact des tempêtes marines (Balouin *et al.*, 2011 ; Gervais *et al.*, 2012) :

- Hs < 2,7 m : pas d'évolution majeure ;
- à partir 3 m (N1) : changement des morphologies d'avant-côtes (migration vers le large des barres sableuses) et franchissement des bermes par le jet de rive ;
- à partir de 4 m (N2) : inondation partielle ou total de la plage, érosion du pied de dune ;
- à partir de 5 m (N3) : franchissement des cordons dunaires de faible élévation (3 m NGF), des lidos et des infrastructures, brèches et destructions.

Résultats du Réseau régional « Tempêtes »

Le littoral du Languedoc-Roussillon apparaît fortement exposé aux aléas de recul du trait de côte et de submersion qui se manifestent tout particulièrement durant les tempêtes. Afin de surveiller et de suivre les impacts de ces événements, un réseau de surveillance régionale a été mis en place pour mutualiser et homogénéiser les démarches de suivi existantes (De la Torre et Balouin, 2012). Le Réseau Tempête a été mis en œuvre à partir de 2011 dans le cadre du Contrat de Projet État-Région 2007-2013. Coordonné par le BRGM, le réseau est constitué de 9 partenaires qui interviennent en fonction des alertes et des bulletins de mobilisation émis pour observer les impacts des tempêtes sur 42 sites identifiés.

Depuis 2011, le réseau d'observation a été activé 15 fois pour des tempêtes de niveau 1 (N1 Hs > 3 m), 5 fois pour des tempêtes de niveau 2 (N2 Hs > 4 m) et 2 fois pour des tempêtes de niveau 3 (N3 Hs > 5 m, Illustration 22). Le secteur d'étude, compris entre la bouée de Sète et la bouée de l'Espiguette a été concerné par 16 alertes, dont 2 de niveau 2 et une de niveau 3 (Illustration 23).

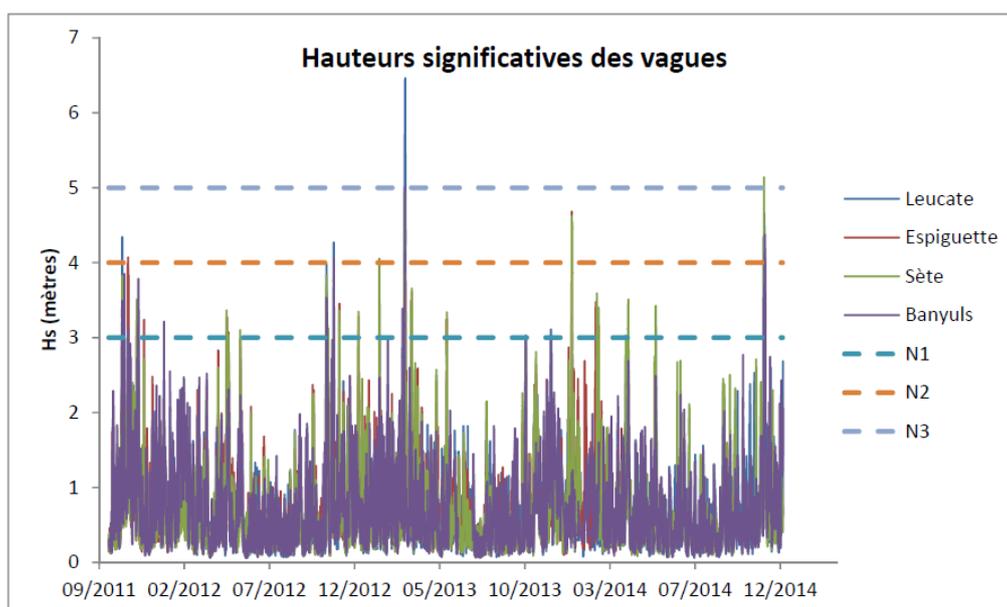


Illustration 22 : Hauteur significative des vagues et niveaux de tempêtes atteints entre septembre 2011 et décembre 2014. Sources : Candhis et De la Torre et al., 2015 b.

Nom	Date	Espiguette	Sète	Leucate	Banyuls
20111024	24-28 octobre 2011	1	1	2	1
20111103	3 novembre 2011	1		1	
20111119	19 novembre 2011		1		
20111121	21-22 novembre 2011				1
20120425	25 avril 2012		1		
20121018	18-19 octobre 2012	1	1	1	1
20121110	10 novembre 2012	1	1		
20121031	31 octobre 2012			2	1
20130119	19 janvier 2013		1		
20130301	1 mars 2013				1
20130305	5-6 mars 2013	1	2	3	2
20130316	16-17 mars 2013	1	1		
20130518	18 mai 2013	1	1		
20131224	24-25 décembre 2013	2	2		
20140205	5-10 février 2014	1	1		
20140329	29-30 mars 2014		1		
20140402	02-04 avril 2014	Pas de mesures	1	1	
20140521	21-22 mai 2014	Pas de mesures	1	1	
20141127	27-30 novembre 2014	Pas de mesures	3	2	2

Illustration 23 : Classement de tempêtes selon leur niveau atteint et leur localisation en fonction des houlographes côtiers de la région. Source : De la Torre et al., 2015 b.

Les tempêtes puissantes, susceptibles de provoquer le plus d'évolutions morphologiques sont celles de mars 2013, de décembre 2013 et de novembre 2014.

Les images et les informations collectées par le Réseau Tempête pour le site de Carnon indiquent que pour le haut de plage et la dune, les tempêtes d'octobre 2011, d'octobre 2012 (niveau 1) et mars 2013 (niveau 1 à 2) n'ont pas provoqué d'érosion du front dunaire, même si le jet de rive a atteint le pied de dune.

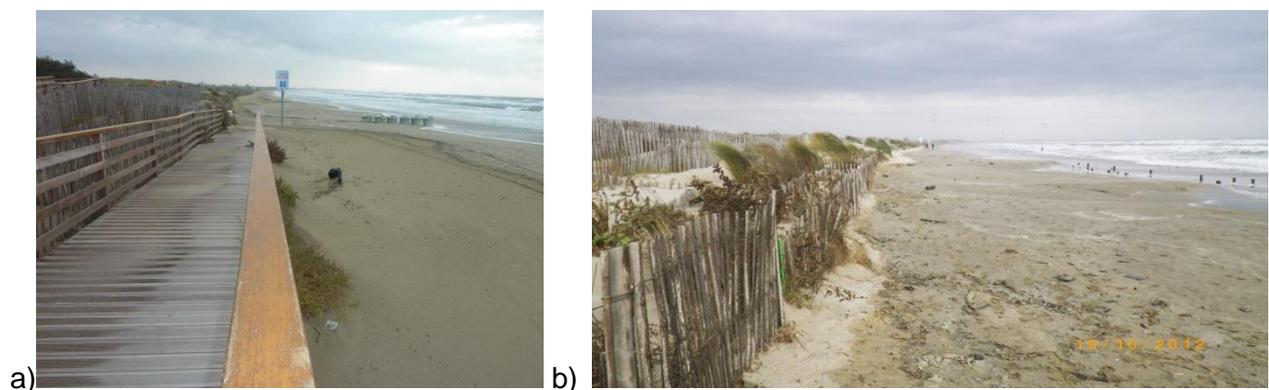


Illustration 24 : Prise de vue orientée vers l'est du Site Carnon / Petit Travers suivi par le Réseau Tempête. A) Cliché du 24/10/2011 B) Cliché du 19/10/2012. Source : Réseau Tempête Languedoc-Roussillon, <http://littoral.languedocroussillon.fr/suivi-des-tempetes-et-de-leurs-impacts.html>

Le réseau n'a pas collecté d'informations pour la tempête de Noël 2013 qui a pourtant atteint le niveau 2 pour les 2 bouées encadrant la zone d'étude. En revanche, en novembre 2014, l'image collectée par le réseau sur le site Carnon (Illustration 25) montre très clairement un phénomène d'érosion du pied de dune dans la partie ouest de la plage par l'interaction d'un haut niveau d'eau et d'un jet de rive puissant associés à cette tempête de niveau 3.



*Illustration 25 : Prise de vue orientée vers l'est du site Carnon/Petit Travers le 28/11/2014 à 12 h 54.
Source : Réseau Tempête Languedoc-Roussillon.*

La tempête de novembre 2014

Du 28 novembre au 01 décembre 2014, le Languedoc Roussillon 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 sud-est et des précipitations importantes sur le littoral et l'arrière-pays. Cet épisode particulièrement fort a fait d'objet d'une analyse des données disponibles et d'un retour d'expérience de la Dreal LR (Dreal, 2014).

Les conclusions de ce rapport indiquent que :

- pour les données météorologiques :

- les précipitations ont été importantes sur l'ensemble du littoral Languedoc-Roussillon,
- les pressions ramenées au niveau de la mer sont restées élevées (>990 hPa) avec des valeurs plus élevées au nord du Golfe du Lion qu'au sud,
- les vents ont été très forts de secteur est à sud-est .

- pour les données marines :

La même d'évolution des conditions a été constaté sur l'ensemble du Golfe du Lion avec des valeurs enregistrées plus importantes dans la partie nord.

- la houle.

Du 28 au 30 novembre les valeurs maximum des hauteurs significatives mesurées par les houlographes de la DREAL LR à Banyuls et Leucate sont légèrement inférieures (respectivement 4,19 m et 4,39 m) à celles enregistrées à Sète qui sont de 4,9 m au pic de la tempête.

L'évolution des périodes significatives est classique si on se réfère aux tempêtes de 1997, 2003, 2008, 2010 et mars 2013. On peut noter que l'évolution des périodes significatives suit celle de la houle significative.

On note que la période associée à la houle significative (valeur au pic) mesurée sur les différents sites est presque identique, comprise entre 8 et 9 secondes.

Les directions enregistrées de la houle sont essentiellement de secteur sud-est.

- le niveau marin.

Les niveaux maximum de hauteur d'eau enregistrés les 28 et 29 novembre 2014 par les marégraphes sont moins importants à Port-Vendres (0,90 m NGF) et Port-La-Nouvelle (0,99 m NGF) qu'à Port-Camargue (1,06 m NGF) et Sète (1,11 m).

Les valeurs de surcote maximales instantanées calculées pour les marégraphes de la région présentent également des valeurs plus fortes pour la station de Sète (0,752 m).

- Estimation des périodes de retour

La période de retour de cet événement ne peut être estimée qu'en analysant séparément d'une part les valeurs de houles et d'autre part les valeurs de surcote. Une estimation plus précise de la période de retour de l'évènement de tempête nécessite de disposer de probabilités conjointes (*a minima* Niveau/vague).

Si on prend en compte uniquement les valeurs de Hs, la période retour à Sète est :

- de l'ordre de 1 à 3 ans selon les statistiques proposés par le CETMEF 2012, basés sur l'analyse des données disponibles aux bouées d'observation ;
- de l'ordre d'un évènement decennal selon les statistiques ANEMOC (fiche 2809). On notera que le point d'analyse le plus proche du houlgographe de Sète est situé au large, à une vingtaine de kilomètres au sud-est.

Si on devait comparer les valeurs de surcote instantanées établies à partir des niveaux maximum de hauteur d'eau enregistrés, avec les estimations statistiques de surcote horaires extrême, (CETMEF, 2013), la période de retour à Sète (surcote estimée de 0,752 m) serait de l'ordre de 100 ans.

- Impacts de la tempête

La pression atmosphérique ramenée au niveau de la mer est restée relativement élevée sur l'ensemble du littoral Languedoc-Roussillon. Cependant l'effet conjugué de précipitations importantes, d'un vent de direction d'est à sud-est et d'une houle de secteur sud-est ont aggravé les crues en perturbant l'écoulement des rivières vers la mer. À cela s'ajoute un niveau marin et des surcotes relativement élevés.

Par ailleurs, il est à noter qu'à partir du mois de septembre 2014, le littoral Languedoc avait subi plusieurs épisodes de pluies intenses et de coups de mer comme celui du 16 au 19 septembre 2014. Tous ces éléments ont contribué à des impacts et dégâts plus ou moins importants selon les secteurs du littoral.

Suite à cet événement les communes suivantes ont été classées en état de catastrophe naturelle (CATNAT) pour les dommages causés suite aux inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues :

- du 28 novembre au 1^{er} décembre 2014 dans le département des Pyrénées-Orientales : Argelès-sur-Mer, Banyuls-sur-mer, Le Barcarès, Cerbère, Collioure, Port-Vendres et Torreilles ;
- du 27 au 29 novembre 2014 dans le département de l'Hérault : Agde, Balaruc-les-Bains, Frontignan, Mauguio, Mèze, Portiragnes, Sète, Vias, Villeneuve-les-Maguelone et la Grande-Motte.

À Carnon et sur la plage du Petit Travers, l'illustration 25 montre l'effet conjugué des vagues et de la surcote au pic de la tempête : arrachement de ganivelles et l'érosion du front dunaire.

Le forum internet Infoclimat.fr³ présente une contribution illustrée de plusieurs photos prises le 29 novembre 2014 sur la plage du Petit Travers. Ces images montrent clairement la création d'une falaise d'érosion dunaire de plus de 2 m (Illustration 26) et le recul du front dunaire matérialisé par le déchaussement ou la dégradation des ganivelles et accès à la plage (Illustration 27). Les Illustrations 27b et 28 présentent le 29/11/2014 vers 15 h montrent l'action érosive des vagues sur la dune et son impact sur les aménagements.



Illustration 26 : Érosion du front dunaire de la plage du Petit Travers sous l'impact de la tempête de novembre 2014. Falaise dunaire > 2 m. Photo du 29/11/14. Source : <http://forums.infoclimat.fr>

³ <http://forums.infoclimat.fr/topic/85370-carnon-petit-travers-submersion-et-forte-erosion-de-la-plage/>



Illustration 27 : Érosion du front dunaire de la plage du Petit Travers. A) Désensablement des ganivelles. B) Endommagement des accès plage. Source : <http://forums.infoclimat.fr>.



Illustration 28 : Action érosives des vagues sur le front de dune et son impact de destabilisation de l'aménagement d'accès à la plage. Prise de vue du 29/11/14 à 15h00. Source : <http://forums.infoclimat.fr>

À partir des données topographiques collectées par la DREAL LR en 2013 et 2015, il est difficile d'évaluer et de quantifier le recul du front dunaire qui s'étend au-dessus de 2 m IGN69, car les mesures de 2015 s'arrêtent globalement au niveau du pied de dune. Seuls quelques points du front dunaire de 2013 sont comparables car superposés ou très proches des mesures de 2015 (Illustration 29). Ces points permettent de vérifier par la mesure topographique que le front dunaire situé au-dessus de 2 m en 2013 a reculée et qu'il se trouve remplacé par le pied de dune, situé sous 1,75 m l'altitude lors du levé de 2015. L'illustration 29 montre également que l'analyse de la ligne de niveau du haut de plage (+ 1,25 m IGN69) est un bon indicateur pour observer les évolutions nettes de la morphologie. Mais au niveau du front de dune, la pente est plus forte et le positionnement de la ligne (+ 2 m), issue de l'interpolation de MNT de résolution 5 m, n'est pas suffisamment fin et précis pour évaluer des évolutions d'ordre métrique.

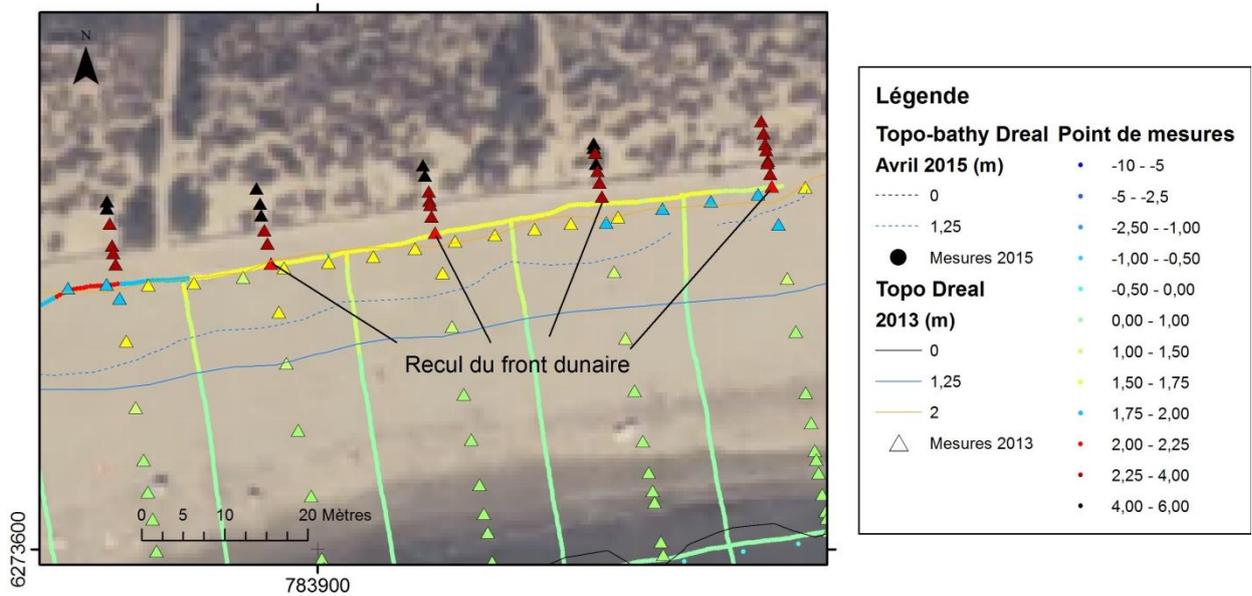


Illustration 29 : Cartographie des mesures topographiques réalisées en 2013 et 2015 sur un secteur restreint situé à l'est du site d'étude. Les lignes de niveau sont établies par interpolations sur des MNT à 5 m. Source : Dreal LR et Ortholittoral v2.

Les observations du Réseau Tempête Languedoc-Roussillon et les photographies disponibles sur le forum Internet Infoclimat.fr permettent d'estimer un recul de la dune compris entre 1 et 4 m sur la plage du Petit Travers sous l'effet de la tempête de fin novembre 2014. De plus, une visite du terrain a été réalisée en septembre 2015 pour observer les quelques indices visibles de l'érosion dunaire de l'hiver 2014-2015 (Illustration 30). Cette visite a permis de vérifier que cette estimation d'une érosion dunaire variable, comprise entre 1 et 4 m était plausible.



Illustration 30 : Ganivelle dechaussée au niveau d'une petite falaise d'érosion régularisée. Desmazes, 09/15.

2.3. ÉLABORATION DU SCÉNARIO

Cette partie a pour but de présenter et justifier le scénario hydrodynamique (forçages) et morphologique choisi pour simuler avec le modèle numérique XBeach l'effet de la tempête de novembre 2014 sur la plage du Petit Travers.

2.3.1. Hydrodynamique

Conditions d'agitation

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). Dans le cas de 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 25 km et ne sont donc pas directement transposables au niveau du site d'étude. D'autre part, la présence de hauts fonds rocheux au large du site étudié (Illustration 11) joue un rôle atténuateur de l'énergie des vagues qu'il convient de prendre en compte. Pour ces raisons, un 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'un emboîtement de 2 échelles (Illustration 31) : une échelle régionale qui représente la propagation des houles dans le Golfe d'Aigues-Mortes (R0) et une échelle locale (R1) qui englobe la Plage du Petit Travers et les hauts-fonds rocheux pré littoraux. 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.

- Données bathymétriques (Illustration 31)

La résolution du modèle régional (R0) couvrant le golfe d'Aigues-Mortes est de 50 m tandis que l'emboîtement local est à la résolution 10 m couvrant le site d'étude (R1). Les données bathymétriques utilisées pour le rang 0 sont les sondes Histolitt du SHOM, pour le R1 les données Lidar 2010 associées aux données Histolitt pour les parties les plus profondes du domaine (profondeurs supérieures à 15 m).

- Données de niveau d'eau (au plus proche du site étudié)

La modélisation d'état de mer durant la période étudiée (27 au 30 Novembre 2014) a été réalisée en conditions instationnaires. Les conditions de niveau d'eau utilisées correspondent aux observations du marégraphe de Sète, qui sont les plus proches du site étudié. Ces données sont présentées au paragraphe suivant (*Niveau d'eau*, Illustration 37). Les dates et heures de ces données sont exprimées en TU, ainsi que l'ensemble des données de forçages utilisées.

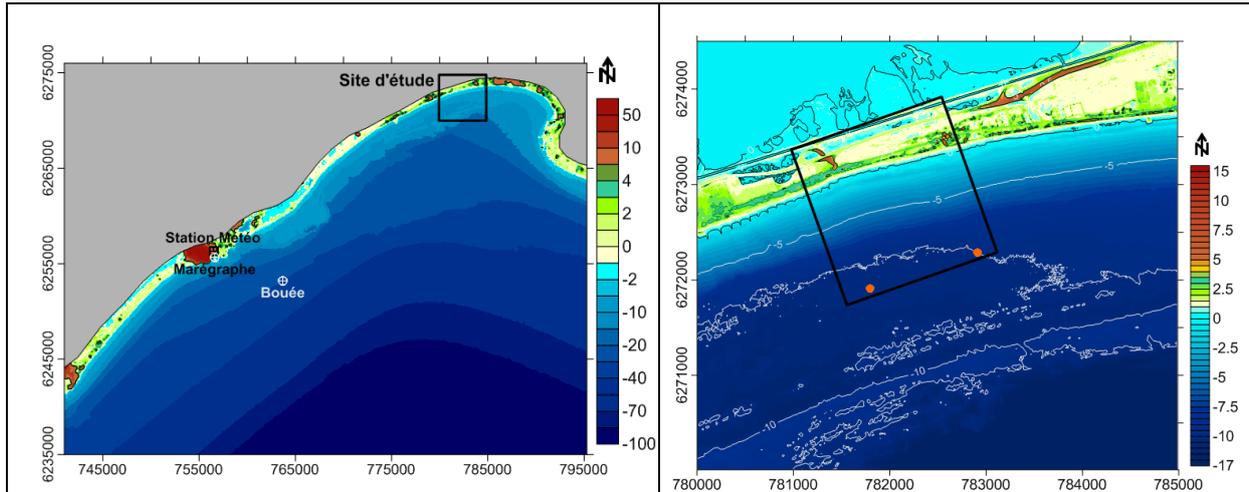


Illustration 31 : Emprise des modèles numériques de bathymétrie des rangs 0 (à gauche) et 1 (à droite) utilisé pour SWAN. Le cadre noir (à droite) représente l'extension du domaine utilisé pour les simulations avec le code XBeach. Les points oranges représentent la localisation des extractions du modèle SWAN pour le forçage du modèle XBeach.

- Conditions de vagues au large

Les conditions de vagues imposées aux limites du modèle régional (Hs, Tp, Dp, Etal) sont issues du modèle IFREMER MEDNORD, code WWIII, résolution spatiale 0,5° x 0,5° et temporelle 3 h (Illustration 32).

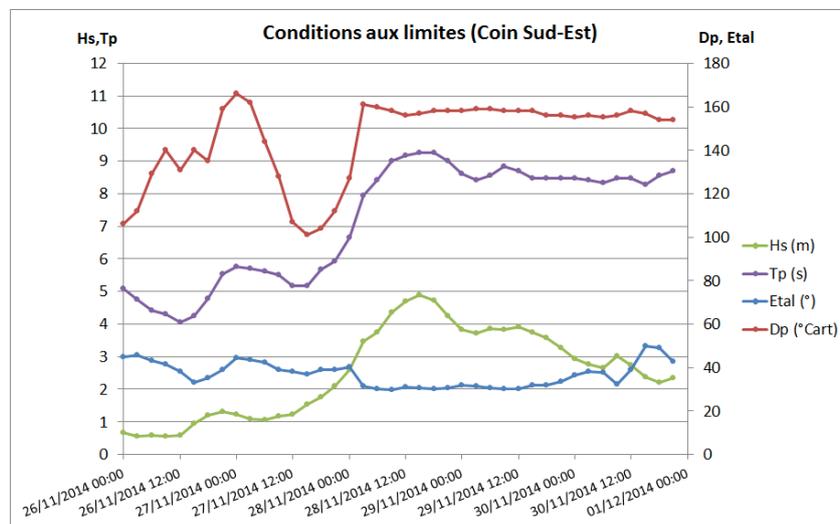


Illustration 32 : Conditions de vagues utilisées aux limites (coin sud-est du rang 0), données issues du modèle IFREMER MEDNORD, résolution 0,5° x 0,5°.

- 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 Sète (Illustration 33).

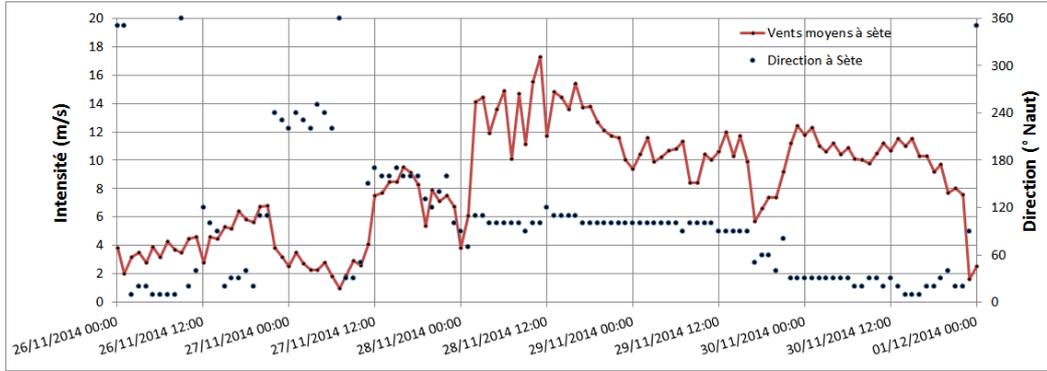


Illustration 33 : Conditions de vent à Sète, données issues de la station météorologique (34200) et utilisés lors des simulations. Heures en TU. Source : Météo France.

- Résultats

Les résultats obtenus à l'issue des modélisations d'état de mer sont des grilles de conditions Hauteur significative (H_s), de période pic (T_p), de direction au pic d'énergie spectral (D_p), d'étalement directionnel ($Etal$) sur la période du 26/11 au 01/12. Les conditions retenues pour l'introduction aux limites du modèle XBeach sont les conditions paramétriques.

Afin d'évaluer la qualité des résultats, les comparaisons entre les données modélisées et les observations d'état de mer ont été faites pour la seule station de mesure en fonctionnement durant l'évènement et comprise à l'intérieur du domaine (Bouée Sète 03404, Illustration 34).

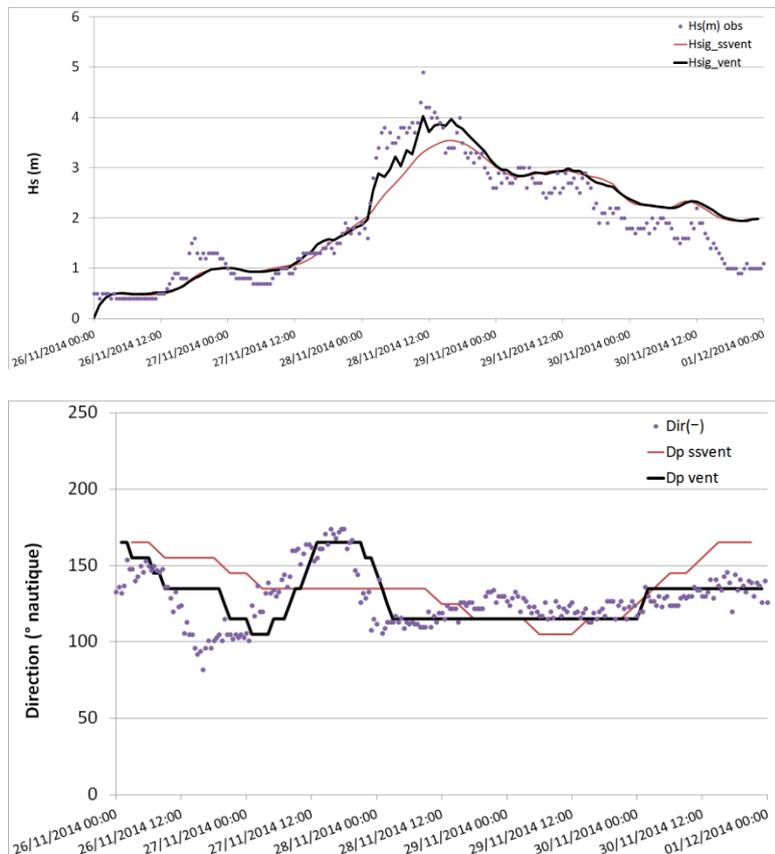


Illustration 34 : Comparaison des paramètres simulés de Hauteur significative et de Direction pic à la localisation du houlographe de Sète avec les observations disponibles. Données CANDHIS (DREAL LR/ CEREMA).

Les comparaisons montrent que les paramètres des vagues sont correctement reproduits durant l'ensemble de l'évènement lorsque les conditions de vent sont intégrées au modèle. On peut observer que la hauteur significative des vagues est sous-estimée les 6 heures avant le pic de tempête (de l'ordre de 0,5 m) mais que le pic de tempête est bien reproduit. Les hauteurs significatives sont en revanche surestimées de l'ordre de 0,2 à 0,5 lors de la fin de l'évènement.

Concernant la direction des vagues, ce paramètre est également correctement reproduit et suit les fluctuations de direction au cours de l'évènement (vagues provenant du sud-est puis du sud juste avant le pic, pour repasser en régime de sud-est durant le reste de la tempête). Ces fluctuations de directions connaissent tout de même un décalage dans le temps. Ce décalage peut potentiellement être dû à la résolution temporelle des conditions de forçage de vagues aux limites données (modèle WW3 de résolution 3 h), toutefois, il est moins nettement observé pour les conditions de Hs.

- Évolution des houles du large à la côte

Compte tenu du régime d'est à sud-est des vagues lors du pic de la tempête (Illustration 32), les résultats du modèle Swan montrent que le golfe d'Aigues-Mortes est partiellement abrité des plus fortes vagues dans ces conditions (Illustration 35a). En effet, la propagation des vagues du large à la côte est limitée par une bathymétrie généralement moins profonde qui atténue l'énergie et la hauteur significative de la houle à l'approche de la zone d'étude (de 4 m au large à moins de 2 m au fond du golfe). Le secteur du Petit Travers apparaît relativement protégé lors du pic de tempête, contrairement à ce qui est observable pour le littoral de Sète et la localisation du houlographe.

De plus, le comportement des vagues directement au large de la zone d'étude (R1) montre également une atténuation de la hauteur significative des vagues (Hs de 3 m à environ 2 m) liée à la présence des hauts-fonds rocheux (≈ 10 m de profondeur) entre 1 et 3 km de la côte (Illustration 35b).

Cette forte variabilité spatiale des conditions de vague à l'approche de la côte, illustre la nécessité de tenir compte des particularités d'exposition aux vagues du site d'étude. La modélisation SWAN des conditions d'agitation permet de disposer des conditions réalistes et adaptées à la reproduction morphodynamique de l'évènement de Novembre 2014 avec XBeach.

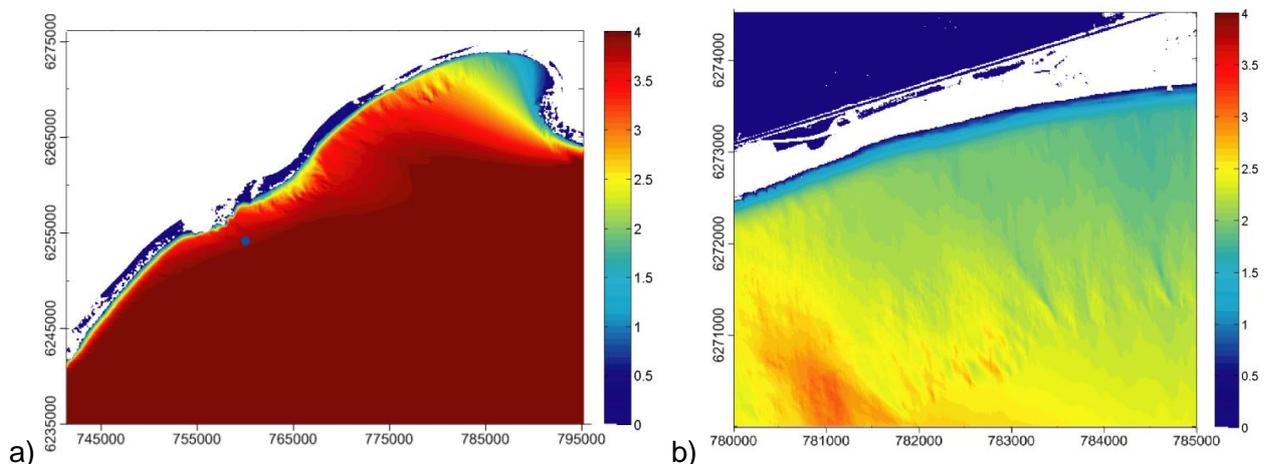


Illustration 35 : Cartes des conditions de Hs au pic de la tempête (le 28/11 à 11h) au rang 0 (a) et rang 1 (b). Résultats du modèle Swan mis en place pour reproduire les conditions d'agitation de la plage du Petit Travers. Position du houlographe de Sète en bleu.

- Conditions de vagues à la côte

Les résultats du modèle SWAN montrent que les conditions de vagues pendant l'évènement par 10 m de profondeur, aux limites du modèle XBeach (Illustration 31) sont quasiment homogènes sur la frontière sud entre le point sud-est (P1) et sud-ouest (P2, Illustration 36). Pour la plage du Petit Travers, on constate que les conditions maximum de houle interviennent lors du moment pic de surcote observée à Sète (Illustration 34), c'est-à-dire le 28/11 autour de 12 h. Durant environ 6 h les conditions de vague devant la plage du Petit Travers sont alors de $H_s \approx 2\text{ m}$; $T_p \approx 9\text{ s}$; $D_p \approx 150^\circ$ (sud /sud-est) ; Étalement directionnel $\approx 20^\circ$.

La dynamique des conditions de vagues au cours de la tempête de novembre 2014 est caractérisée par (Illustration 36) :

- du 26 au 27/11 à 12 h, des conditions de vague relativement faibles ($H_s = 0,5\text{ m}$, $T_p < 6\text{ s}$, de secteur sud-est et de faible étalement directionnel, $\approx 15^\circ$).
- du 27/11 à 12 h, jusqu'au 28/11 à 10 h, une intensification progressive des conditions de houle, H_s atteignant 2 m, T_p s'établissant à 9 s, avec un changement de secteur directionnel (plus marqué sud) et un étalement directionnel supérieur à 20° .
- le 28/11 de 10 h à 18 h des conditions de houles intenses et stables ($H_s > 2\text{ m}$, $T_p = 9\text{ s}$), marqué par un secteur sud-est et un étalement directionnel moyen $\approx 20^\circ$.

Ce moment correspond au pic de la tempête et on peut constater que durant cette période les hauts fonds rocheux diminuent de moitié la hauteur des vagues qui sont de l'ordre de 4 m au large. Toutefois, la concomitance entre des niveaux d'eau supérieurs à 1 m NGF et des conditions de houles énergétiques pour ce littoral, de surcroît orientées quasi normale à la côte, explique le potentiel érosif important de cette période sur le front de dune.

- du 28/11 18 h à la fin de l'épisode, les conditions de houle conservent le même secteur directionnel mais diminuent progressivement atteignant des valeurs de 1 m et 8 s.

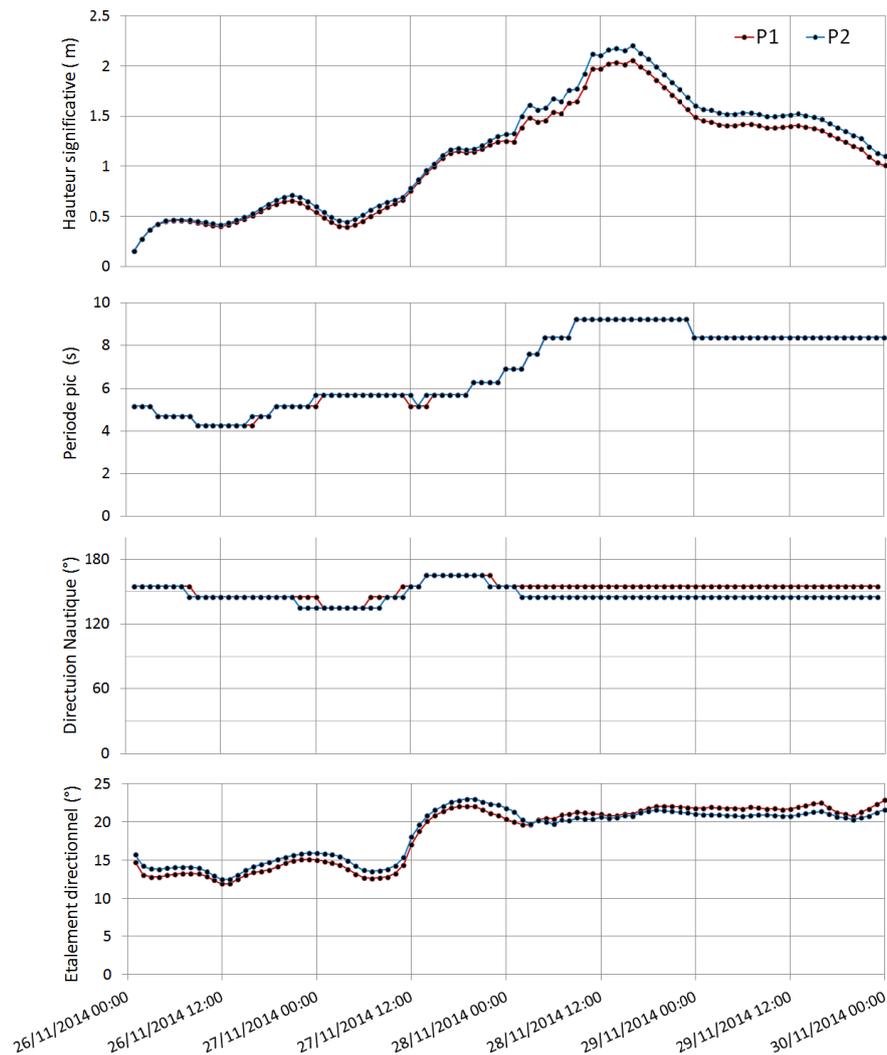


Illustration 36 : Évolution des paramètres d'agitation durant la tempête de novembre 2014 aux limites SE (P1) et SW (P2) du modèle XBeach . Résultats du modèle Swan mis en place pour reproduire les conditions d'agitation de la plage du Petit Travers.

Niveau d'eau

Les données utilisées pour les niveaux d'eau des modèles XBeach et Swan sont issues des observations du marégraphe de Sète (Illustration 37). Au moment de la collecte des données au second semestre 2015, le jeu de données validées était interrompu à partir du 29/11 à 00 h (13 h après le pic de tempête). Les données de niveau d'eau utilisées pour la fin de la période simulée sont issues d'une interpolation linéaire entre les dernières données disponibles et la première lors de la remise en service du marégraphe le 01/12 à 8 h. Cette approximation est acceptable pour cette étude car l'interruption des enregistrements intervient environ 12 h après le pic de tempête⁴.

⁴ Au début de l'année 2016, l'ensemble du jeu de données « niveau d'eau » validé était disponible. Un test réalisé avec le modèle XBeach 1D sur ce jeu complet de niveaux d'eau ne montre pas de différence significative avec les résultats obtenus à partir de niveaux d'eau interpolés.

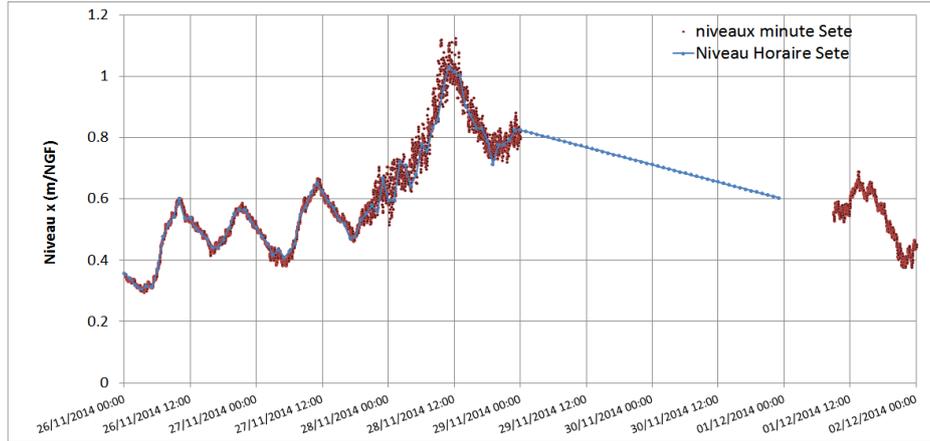


Illustration 37 : Données disponibles du marégraphe de Sète (en rouge) et conditions de niveau utilisées pour les simulations Swan et XBeach (en bleu).

2.3.2. Morphologie et sédimentologie

Le travail de modélisation morphodynamique est réalisé pour la partie ouest de la plage du Petit Travers. La zone s'étend sur une longueur de côte de 1 200 m, depuis l'accès plage situé au niveau du parking de Carnon, jusqu'aux premières crêtes de dunes relativement hautes situées dans la zone centrale (Illustration 38). Au large, la zone à modéliser s'étend sur près de 1 200 m, jusqu'à l'isoligne - 6 m. Le choix de ce secteur ouest est justifié par plusieurs éléments :

- la morphologie de la plage et de la dune est assez homogène, en comparaison avec la zone centrale plus hétérogène. Cette homogénéité limite les problèmes numériques lors du test du modèle ;
- l'érosion de la plage semble plus rapide dans ce secteur, comparativement à la zone centrale et au secteur est ;
- la dune est globalement plus basse dans la zone ouest que dans les secteurs centraux et orientaux de la plage du Petit Travers, confirmant la sensibilité potentielle de cette partie de la plage à l'érosion et aux forts évènements météo-marins.

Le MNT Litto3D (2009-2010) de résolution 5 m a été utilisé pour fournir les données topo-bathymétriques de l'état initial. Il s'agit du seul jeu de données disponible couplant topographie et bathymétrie de façon homogène en intégrant l'ensemble de la dune et du domaine pré littoral. Cependant, le recensement des tempêtes réalisés par le Réseau tempête (voir partie 2.2.3 et Illustration 23) entre 2011 et 2014 montre que plusieurs évènements forts ont pu modifier sensiblement la morphologie de la plage et de l'avant-côte. De plus, les données topographiques DREAL de 2013 (voir partie 2.2.2 et Illustration 15) tendent à valider le fait que la plage s'est érodée entre 2010 et 2013, avant la tempête étudiée. Donc les données Litto3D (2009-2010) ne correspondent pas à la morphologie initiale de la plage du Petit Travers au début de la tempête de novembre 2014. Mais en l'absence d'un jeu de données topo-bathymétriques complet et mis à jour juste avant l'évènement de novembre 2014, nous considérerons que seul le MNT Litto3D est utilisable pour ces tests de modélisation.

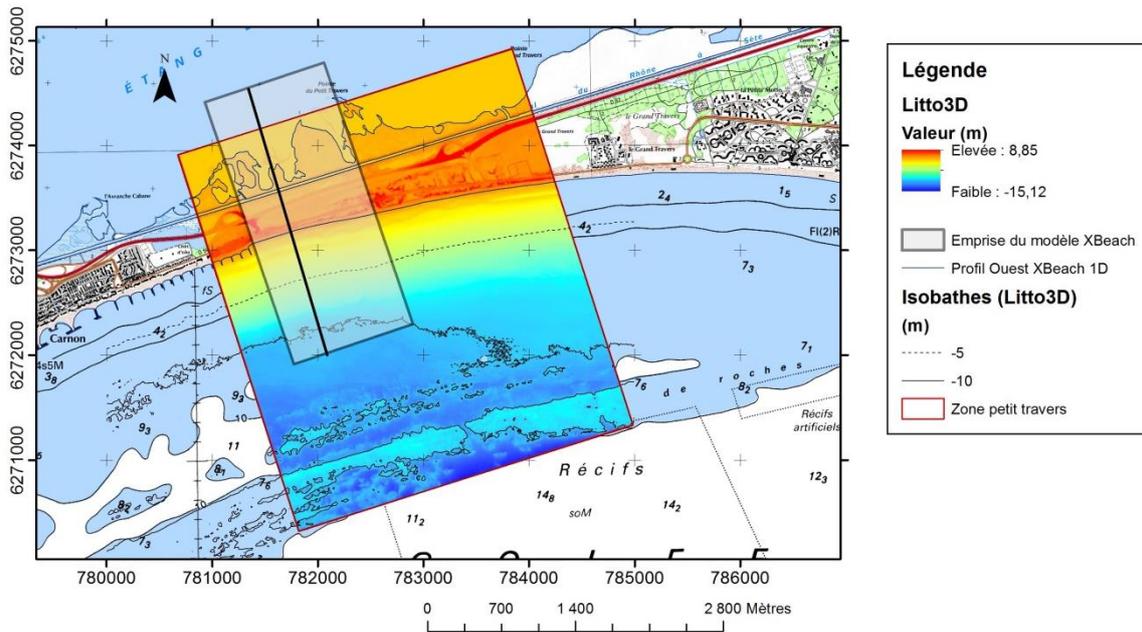


Illustration 38 : Emprise de la zone modélisée à l'ouest de la plage du Petit Travers et données morphologiques du MNT Litto3D à 5 m employé (SHOM-IGN).

La granulométrie choisie correspond à la médiane du sédiment type défini par Barousseau (2011), pour le nord du Golfe du Lion, soit 190 μm (voir partie 2.2.2 « Sédimentologie »). Elle est en accord avec les résultats de Raynal *et al.* (2015).

2.4. MISE EN ŒUVRE DU MODÈLE

Cette phase de travail a pour but de mettre en œuvre le modèle XBeach en mode 2D pour tester l'effet d'une tempête réaliste sur la morphologie et la dune de la plage du Petit Travers.

2.4.1. Tests sur un profil 1D cross-shore

- Tests préalables selon les scénarios du rapport Desmazes *et al.* (2014b)

En préalable, des tests ont été réalisés sur un profil 1D cross-shore simplifié représentatif de la zone centrale de la plage, selon la méthode présentée dans le rapport (Desmazes *et al.*, 2014b). Les quatre scénarios de forçages simples utilisés lors de la phase 2/A montrent que le modèle est 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. Ce test préalable valide la faisabilité d'un travail plus réaliste avec le modèle sur la zone du Petit Travers.

- Tests du scénario de forçage réaliste sur le profil ouest

Dans un second temps, les tests ont consisté à utiliser le scénario de forçages réalistes de la tempête de novembre 2014 (voir partie 2.3.1), sur le profil 1D issu du MNT Litto3D représentant le secteur ouest de la zone d'étude (Illustration 15 et Illustration 38). Cette configuration 1D s'appuie sur un maillage adapté aux variations de topographie de la zone. La résolution spatiale maximale est de 5 m dans les secteurs de fortes variations de topographie/bathymétrie (au niveau de la plage et de la dune) et de 20 m dans le secteur le plus au large. Les conditions d'états de mer et de niveau d'eau sont introduites à la limite offshore du profil. Les conditions de vagues issues du modèle SWAN décrites dans la partie

2.3.1 « Conditions d'agitation » sont fournies au modèle sous forme de séries temporelles d'états de mer (échantillonnage temporel horaire) en mode instationnaire. Ce mode d'introduction des vagues aux limites du modèle est adapté à la simulation d'un cas réaliste. Lors de la phase 2/A (Desmazes *et al.*, 2014b), un état de mer stationnaire basé sur des conditions de vagues associées à différentes périodes de retour, était introduit aux limites des configurations idéalisées pendant la durée de la simulation. L'étude réalisée lors de cette phase 2/B fournit des simulations réalistes avec des forçages instationnaires issus de modélisations hydrodynamiques avec le modèle SWAN. Il est à noter que le modèle XBeach permet aussi l'utilisation de séries de spectres paramétriques 2D (fréquence et direction) issus du modèle spectral de vagues SWAN comme conditions aux limites. Dans ce cas, XBeach convertit ces données spectrales en série temporelles. Cette option n'a pas été mise en œuvre dans le cadre de cette étude. Les niveaux d'eau issus du marégraphe de Sète (voir partie 2.3.1 « Niveau d'eau ») sont imposés à la limite offshore du profil avec une résolution temporelle horaire. L'ensemble des paramètres et options utilisés pour la configuration du modèle XBeach 1D sont données en annexe du présent document. Pour la simulation 1D de référence, les principaux paramètres de réglage du modèle (Illustration 39) sont décrits dans Desmazes *et al.*, (2014b).

Paramètres	Valeurs
D50 – grain médian	0,19 mm
smax – paramètre de Shields	1
cf – coefficient de friction au fond	0,005
morfac – accélération morphologique	1
form – formule de transport sédimentaire	2 (van Thiel et van Rijn)
nuhv – facteur pour la viscosité horizontale	1
facua – transport sédimentaire induit par l'asymétrie des vagues	0,1
dryslp – pente critique d'avalanche en domaine aérien	1
wetslp – pente critique d'avalanche en domaine immergé	0,3
eps – épaisseur d'eau seuil entre mailles sèches et humides	0,005 m
hmin – profondeur minimale pour le courant de retour	0,2 m
dzmax – taux d'érosion max de la dune par le phénomène d'avalanche	0,05 m ² /s
hswitch – profondeur seuil entre « dryslp » et « wetslp »	0,1 m
γ – paramètre de déferlement (formule de Roelvink)	0,55
n – puissance dans la formule de Roelvink	10

Illustration 39 : Récapitulatif des principaux réglages du modèle XBeach mis en œuvre pour les simulations 1D et 2D.

L'illustration 40 montre que pour la tempête de novembre 2014, le modèle XBeach 1D simule une forte érosion du haut de plage, lisse légèrement la petite barre sous-marine interne et n'a qu'une très faible influence érosive sur la barre sous-marine externe. C'est au niveau de la plage subaérienne et de l'interface avec le domaine sous-marin (entre - 0,25 m et + 1,75 m) que les évolutions morphologiques simulées sont les plus fortes (Illustration 41). Le recul du haut de plage est important, il est de l'ordre de 15 m à l'altitude 1,25 m IGN69. L'érosion maximale est d'environ 50 cm. En dessous d'un point d'équilibre situé à 0,5 m d'altitude, le bas de plage apparaît en accrétion et la courbe de niveau 0 m IGN69 progresse de 15 m environ. Sur le profil initial, la rupture de pente marquant le pied de dune dans la morphologie se situe à 1,75 m d'altitude. À cette altitude, le profil morphologique post-tempête simulé ne montre qu'un très faible recul (<1 m). Au-dessus, à partir de 2 m IGN69, le front dunaire n'est pas érodé.

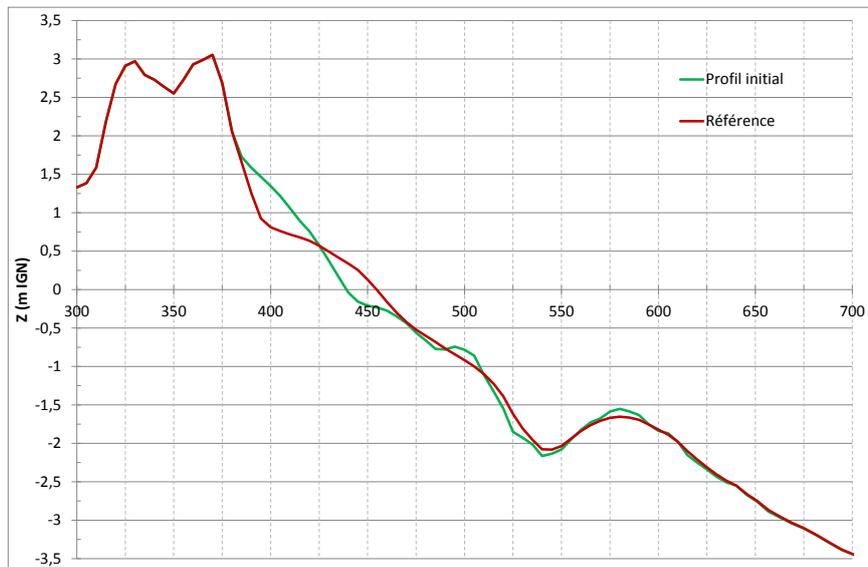


Illustration 40 : Simulation de l'effet de la tempête de novembre 2014 sur la morphologie du profil 1D ouest de la plage du Petit Travers. Configuration XBeach de référence.

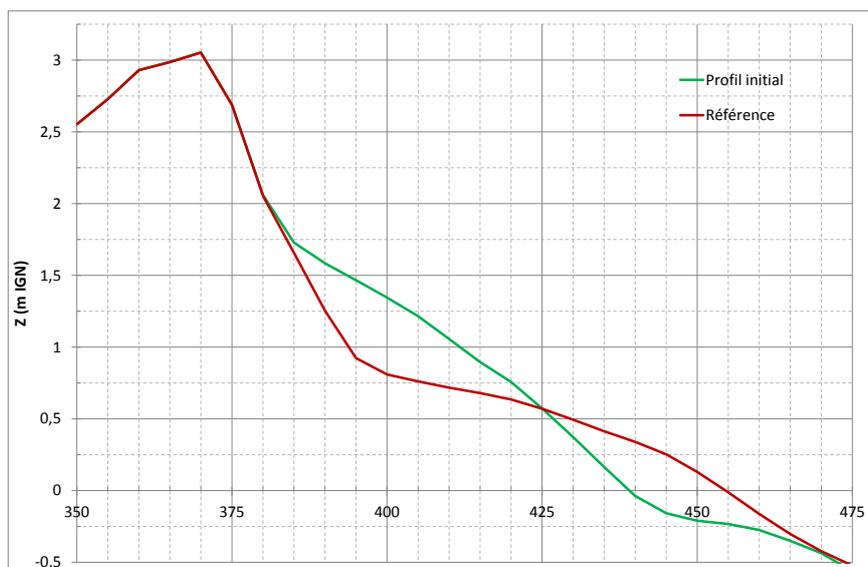


Illustration 41 : Simulation de l'effet de la tempête de novembre 2014 sur la morphologie du profil de plage ouest et la dune. Configuration XBeach de référence.

- Étude de sensibilité

Dans un troisième temps, une étude de la sensibilité du modèle aux paramètres, cf , $morfac$, γ , $wetslp$, $dryslp$ et $cmax$ a été réalisée avec le profil 1D. Pour chaque test, une seule valeur de paramètre est modifiée par rapport aux valeurs de références (Illustration 42). Le paramètre « cf » est le coefficient de frottement au fond pour l'écoulement. Diminuer ce coefficient revient à diminuer le frottement et donc à augmenter la vitesse de l'écoulement et implique par conséquent une augmentation de l'érosion. Ce coefficient est dépendant de la nature du fond. Le paramètre « $morfac$ » permet d'accélérer l'échelle de temps morphologique par rapport à l'échelle de temps hydrodynamique : cela signifie que pour une simulation de 10 minutes et un paramètre « $morfac = 5$ », on simulera l'évolution morphologique effective sur 50 minutes. Le paramètre « γ » est le rapport entre la hauteur des vagues lors du déferlement et la profondeur. Diminuer ce paramètre revient à rapprocher le déferlement de la côte. Les paramètres « $dryslp$ » et « $wetslp$ » définissent les pentes critiques respectivement au-dessus et en-dessous du niveau d'eau. Au-dessus de ces pentes le fond s'effondre et les sédiments glissent vers le bas. Les valeurs testées sont présentées dans l'illustration 42.

paramètres	Valeurs de référence	Valeurs testées
cf – coefficient de friction au fond	0,005	0,003
$morfac$ – accélération morphologique	1	5
γ – paramètre de déferlement (formule de Roelvink)	0,55	0,8
$dryslp$ – pente critique d'avalanche en domaine aérien	1	0,8
$wetslp$ - pente critique d'avalanche en domaine immergé	0,3	0,5
$cmax$ – concentration maximale en sédiment autorisée nécessaire pour calculer la concentration en sédiment totale à l'équilibre	0,1	0,3

Illustration 42 : Recapitulatif des valeurs des paramètres testées pour l'étude de sensibilité réalisée avec le modèle 1D.

Les valeurs testées pour les pentes critiques d'avalanche aérienne « $dryslp$ », sous-marine « $wetslp$ » et le paramètre « $Cmax$ », n'ont pas d'influence sur l'évolution du profil morphologique (Illustration 43).

L'effet de l'augmentation du paramètre d'accélération morphologique « $morfac$ » est faible pour ce cas d'étude. Il ne provoque qu'un léger surcreusement d'environ 20 cm au niveau du haut de plage (à environ 1 m d'altitude IGN69).

Lorsque le paramètre de déferlement γ est augmenté, les vagues simulées vont déferler dans des profondeurs plus faibles. La modification du paramètre accentue assez fortement le recul du haut de plage. Ainsi, à l'altitude 1,25m IGN69, le haut de plage recule de 5 m supplémentaire par rapport au paramétrage de référence. Le pied de dune situé à 1,75 m d'altitude recule d'environ 2,5 m (contre moins d'1 mètre pour le scénario de référence), mais le front dunaire au-dessus de 2 m IGN69 n'est pas atteint par l'érosion.

La diminution du paramètre « cf » qui représente une diminution du frottement au fond et donc une augmentation des vitesses d'écoulement au fond, accentue l'érosion de l'ensemble du haut de plage qui s'abaisse d'environ 10 cm supplémentaire, par rapport au scénario de référence. L'érosion maximale atteint 70 cm. Si la jonction entre le haut de plage et le pied de dune apparaît plus abrupte que pour le test du γ , le pied de dune situé à 1,75 m d'altitude recule moins (environ 2 m), tandis que le front dunaire (au-dessus de 2 m IGN69) n'est toujours pas atteint par l'érosion.

L'analyse de sensibilité à ces différents paramètres montre que certains paramètres peuvent influencer sur l'érosion de la plage, du haut de plage, voire sur le recul du pied de dune. Mais les tests réalisés ne permettent pas, *a priori*, d'obtenir un paramétrage du modèle XBeach favorisant la reproduction d'une érosion de l'ensemble du front dunaire sous l'effet de la tempête de novembre 2014.

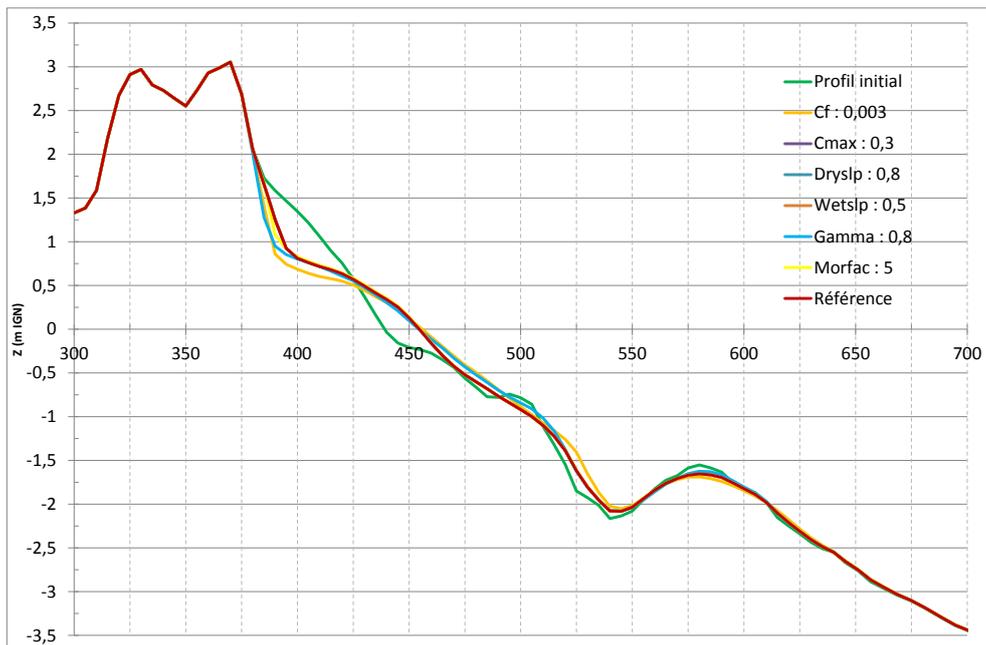


Illustration 43 : Étude de sensibilité du modèle XBeach 1D à 6 paramètres. Simulations de l'effet de la tempête de novembre 2014 sur la morphologie du profil 1D Ouest de la plage du Petit Travers.

2.4.2. Modélisation XBeach 2D

Pour cette étude, le modèle XBeach (v1.21.3657) a été mis en œuvre dans sa version 2DH. La configuration mise en place, représentée sur la figure 26 consiste en une grille de 469 x 238 mailles avec une résolution spatiale de 5 m x 5 m (extension de 2 345 m x 1 190 m) construite à partir des données de topographie/bathymétrie issues du MNT Litto3D en IGN69. Sur le serveur de calcul du BRGM, cette configuration met 6 jours à tourner en mode parallèle avec 2 nœuds de calcul larges quadri-processeurs avec 48 cœurs pour la durée de la tempête (du 27/11/14 12 h au 29/11/14 23 h). Pour cette raison, l'étude de sensibilité menée avec le modèle 1D n'a pas pu être transposée au modèle 2D.

Les paramétrisations physiques et les options utilisées pour la configuration 2D sont identiques à celles utilisées pour la configuration 1D de référence. Les conditions de vagues issues du modèle SWAN sont prescrites aux deux coins sud du modèle. Pour cela des extractions des conditions d'états de mer ont été réalisées dans le modèle SWAN au niveau des points les plus proches des extrémités sud du modèle XBeach (Illustration 31).

Hydrodynamique

- Agitation

Concernant les résultats hydrodynamiques, XBeach propage les vagues depuis les extrémités sud du modèle jusqu'à la côte. La hauteur des vagues diminue fortement entre l'isoligne - 2 m et la ligne de niveau 0 m, ce qui marque nettement la zone de déferlement pour sur les carte du 28/11 à 00 h et du 29/11 à 12 h (Illustration 44). Au cours de la tempête, la hauteur significative moyenne des vagues est la plus importante aux environs de 12:00 TU le 28/11/2014. Le déferlement des vagues s'effectue alors au niveau de la barre sableuse externe visible sur la carte grâce à l'isoligne - 2 m (Illustration 44).

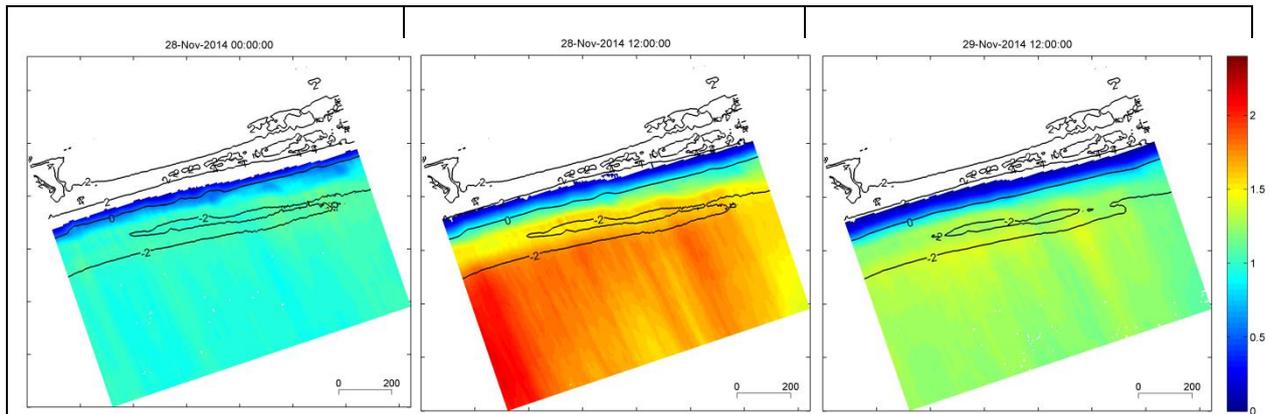


Illustration 44 : Hauteur significative moyenne des vagues sur une période de 10 minutes, modélisées avec XBeach pour les 28/11/2014 00:00 TU, 28/11/2014 12:00 TU et 28/11/2014 12:00 TU.

- Niveau d'eau

Les niveaux d'eau représentés sur l'illustration 45 tiennent compte des ondes infragravitaires induites par les groupes de vagues qui se propagent dans le domaine, ce qui explique l'aspect hétérogène des sorties produites par le modèle. Le niveau d'eau est le plus élevé le 28/11/2014 à 12:00 TU lors du pic de tempête et avoisine 1,5 m au niveau de la côte. Il est plus élevé qu'au marégraphe de Sète (1,1 m) puisqu'il intègre le setup induit par le proche déferlement des vagues et subit l'influence des ondes infragravitaires, caractérisée lors des événements de tempêtes par des oscillations de grandes périodes (30 s à 5 min) de la surface libre.

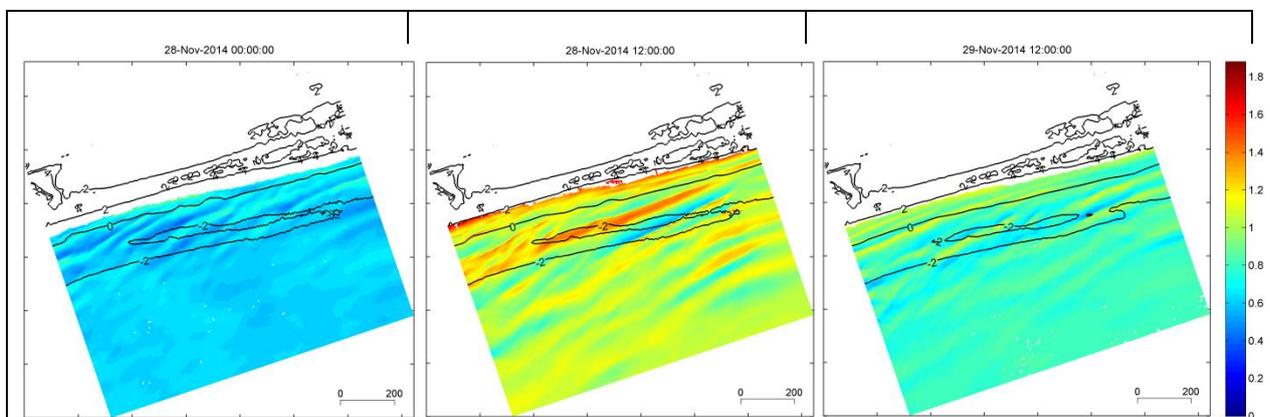


Illustration 45 : Niveaux d'eau modélisés avec XBeach les 28/11/2014 00:00 TU, 28/11/2014 12:00 TU et 28/11/2014 12:00 TU.

- Courants

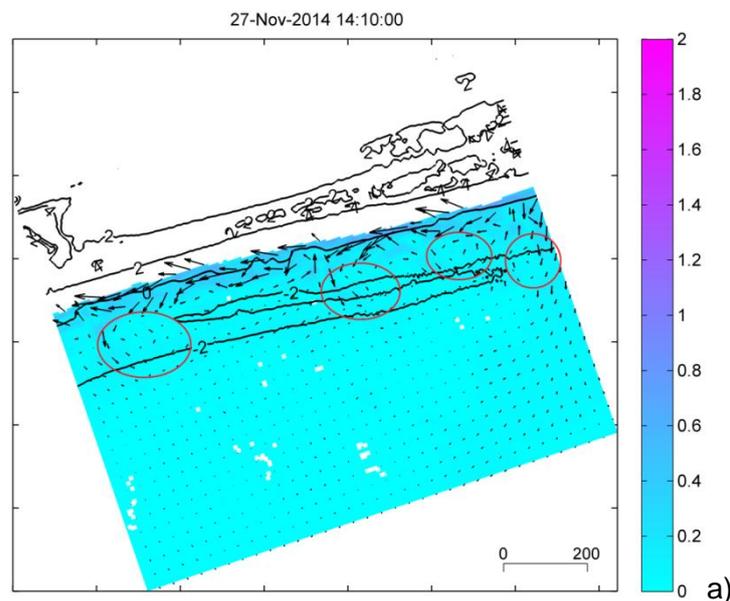
L'illustration 46 montre les courants instantanés associés aux conditions de vagues de la tempête. Une dérive littorale vers l'ouest se met en place entre - 2 m et + 1 m d'altitude et sa vitesse est maximale au pic de la tempête. Les courants atteignent au maximum 1,6 m/s le 28/11/2014 à 12:00 TU, ce qui apparaît cohérent avec des mesures réalisées sur ce type d'environnement en condition de tempête (Gervais, 2012).

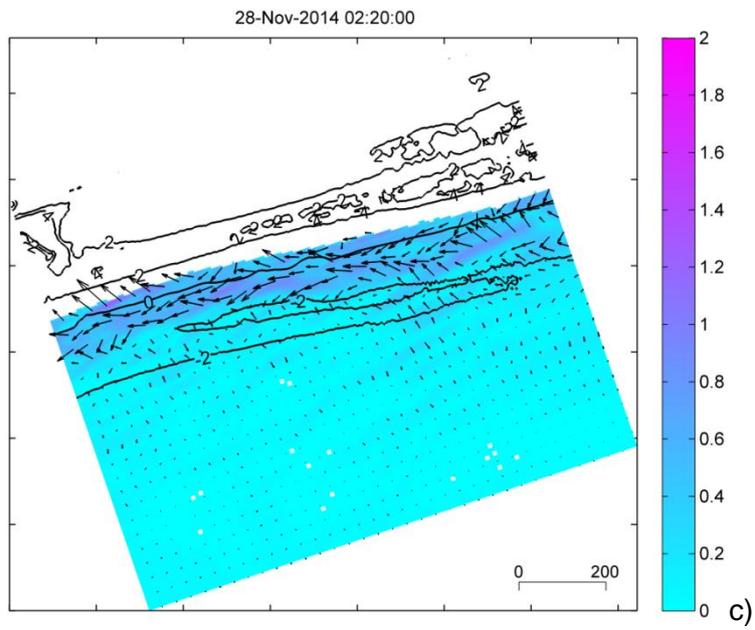
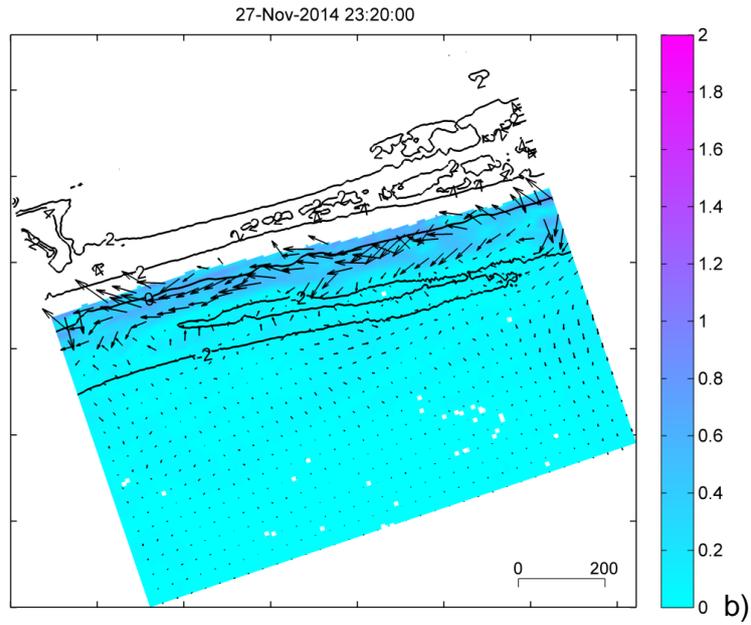
L'analyse plus détaillée des cartes de courants instantanés au cours de la tempête, issues de XBeach 2DH met en exergue les proches courants littoraux moyennés sur la verticale :

- la dérive littorale ;
- les courants d'entraînement et de retour.

Le 27 novembre à 14:10 TU, la dérive littorale est établie avec une intensité comprise entre 0,3 et 0,8 m/s. L'illustration 46a montre que le courant de dérive parallèle à la côte est orienté vers le sud-ouest, de plus, il est entrecoupé localement par des courants orientés vers le large qui forment des cellules de recirculation. Ces cellules entraînent l'eau du déferlement dans le sens de la dérive littorale, puis perpendiculairement vers le large, au-delà de la zone de déferlement (voir les zones délimitées en rouge sur la figure 46a). Le 27 novembre à 23 :20 TU, la hauteur significative des vagues a augmenté d'environ 50 cm et la dérive littorale et les courants générés par la zone de déferlement ont une intensité comprise entre 0,6 et 0,9 m/s (Illustration 46b). Trois heures après (Illustration 46c, 28 novembre, 2 :20 TU), les hauteurs significatives des vagues atteignent un nouveau palier au voisinage de 1,7 m. La dérive littorale devient plus continue et son intensité est relativement uniforme en-dessous de l'isoligne 0 m et vaut 0,6 m/s. Au moment du pic de tempête, l'illustration 46d 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 (~1,2 m/s) lorsque les vagues sont à leur maximum. Ces différents courants apparaissent convergents à proximité de la ligne de niveau 0 IGN69 sur l'illustration 46e, tout en s'orientant vers l'ouest dans le sens de la dérive littorale.

La modélisation 2D permet de 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.





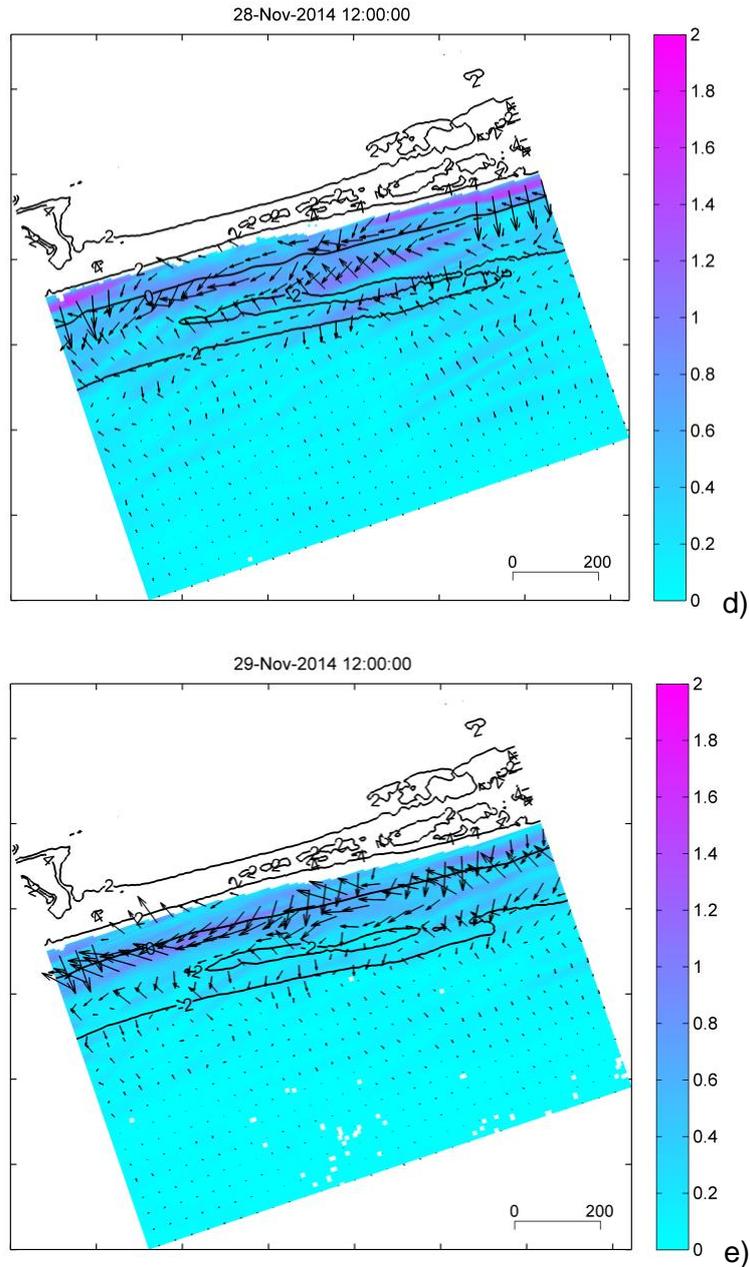


Illustration 46 : Courants modélisés avec XBeach2D a) 27/11/2014 14:00 TU, b) 27/11/2014 23:20 TU, c) 28/11/2014 02:20 TU, d) 28/11/2014 12:00 TU et e) 29/11/2014 12:00 TU.

Morphologie

La simulation de la tempête de novembre 2014 a engendré des modifications de la morphologie initiale issue du MNT Litto3D (Illustration 47). Ces modifications interviennent au-dessus de 3 m de profondeur.

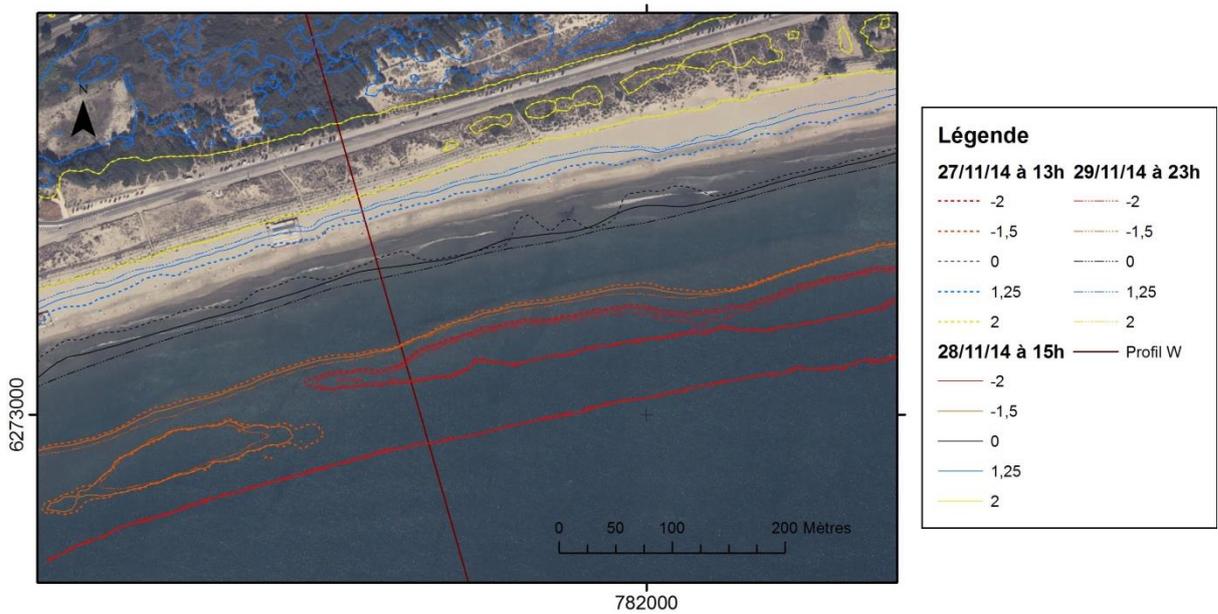


Illustration 47 : Évolution de la morphologie (courbes de niveau) simulée par XBeach 2D pour la tempête de novembre 2014. Zoom autour du profil représentatif du secteur ouest de la plage du Petit Travers.

Au niveau de la plage sous-marine, les barres pré littorales externes, matérialisées par les isolignes - 2 m et - 1,5 m, ont été légèrement modifiées, tout en restant centrées sur la même position. Le modèle tend à lisser les formes, ainsi l'illustration 48 montre que la fosse pré littorale se comble par une accretion de ces flancs, ce qui se traduit par une évolution de 70 m du contour de l'isoligne - 2 m. Parallèlement, la crête de la barre sableuse est légèrement érodée, impliquant un repli d'environ 50 m de l'isoligne - 1,5 m. La barre sableuse interne étant très peu marquée dans le secteur d'étude, l'effet d'érosion de la tempête est plus clairement visible sur une représentation en profil (voir Illustration 40).

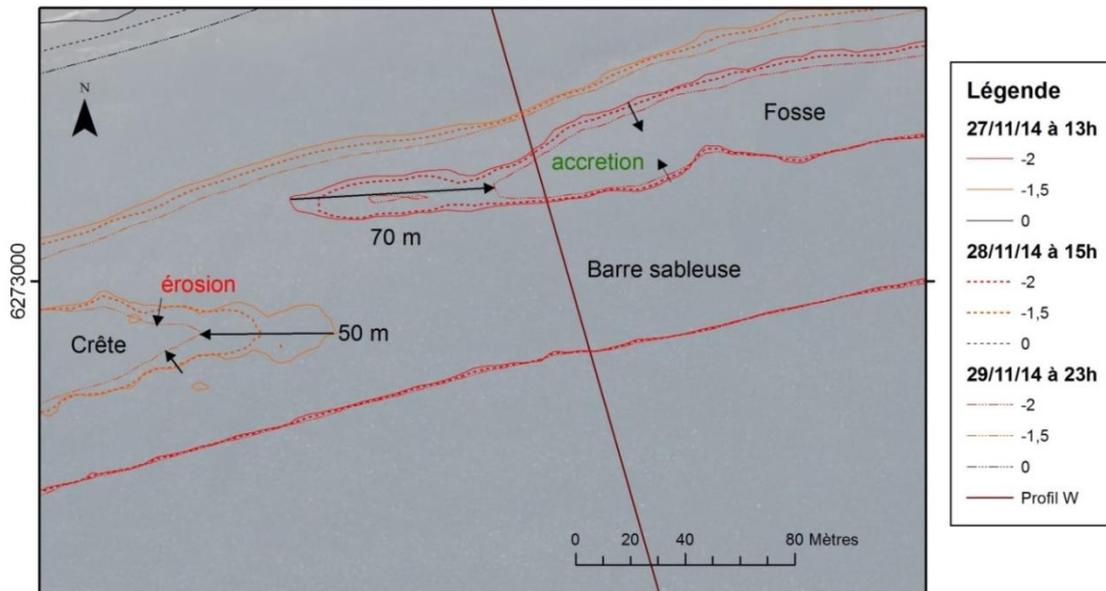


Illustration 48 : Évolution de la morphologie simulée par XBeach 2D pour la tempête de novembre 2014. Zoom sur la barre sableuse externe.

À la transition entre la zone sous-marine et la plage aérienne, la ligne de niveau du 0 IGN69, issue du MNT Litto3D, apparaît relativement irrégulière pour un secteur de plage sableuse globalement linéaire. La tempête de novembre simulée par XBeach provoque une linéarisation très nette des secteurs irréguliers, ainsi que la progradation de cette ligne de niveau. Dans les zones où la ligne de niveau initiale « 0 IGN69 » était relativement rectiligne, le modèle simule une progradation du bas de plage vers le large comprise entre 10 et 20 m (Illustration 49).

Au niveau de la plage subaérienne, la ligne de niveau +1,25 m recule d'environ 15 m, de façon globalement homogène. Localement, des variations plus fortes (jusqu'à 20 m) ou plus faibles (10 m environ) peuvent être observées (Illustration 49). En revanche, aucune modification morphologique n'a été simulée par le modèle au niveau du front dunaire, autour de la ligne de niveau + 2 m IGN69.

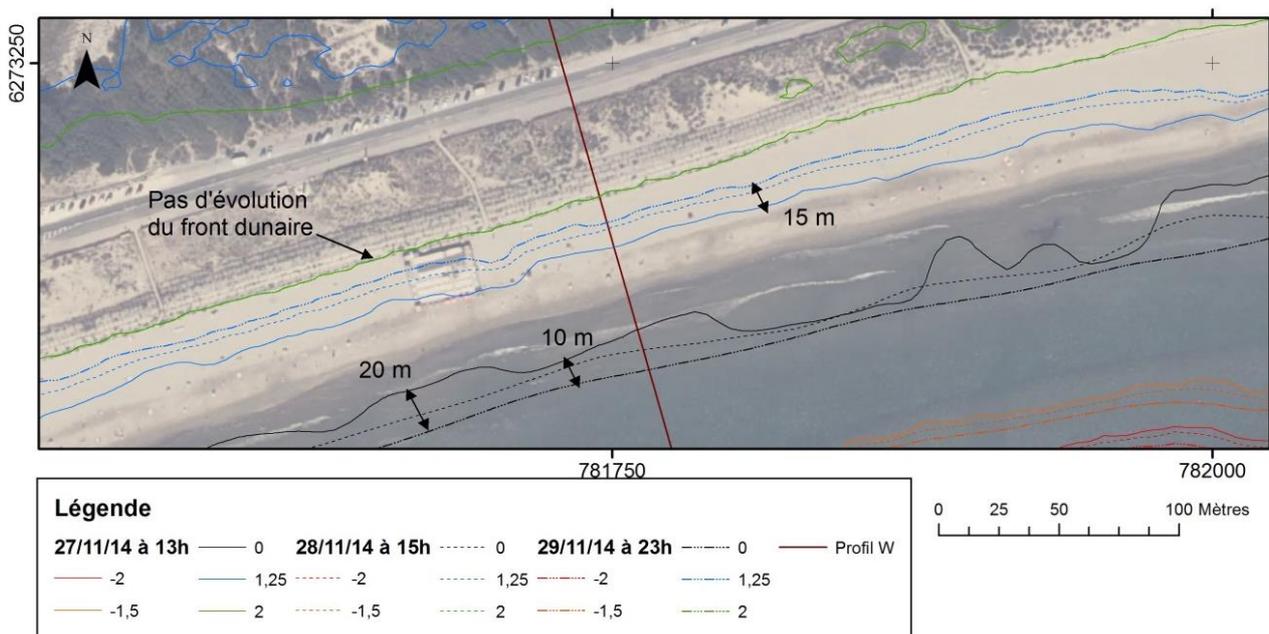


Illustration 49 : Évolution de la morphologie simulée par XBeach 2D pour la tempête de novembre 2014. Zoom au niveau de la plage aérienne et de la dune.

L'extraction d'un profil situé au niveau du profil Ouest permet de suivre l'évolution de la morphologie simulée par le modèle 2D dans le temps. L'illustration 50 présente essentiellement l'évolution temporelle du haut de plage :

Du 27/11 à midi jusqu'au 28/11 à 10 h 20, avec la montée du niveau d'eau et de la hauteur significative des vagues, l'érosion débute en bas de plage et gagne vers le haut en s'accroissant. Cette érosion se caractérise par un front d'une trentaine de centimètre de haut qui remonte vers le haut de plage en s'amortissant. La rupture de pente qui marque ce front d'érosion recule de 30 m entre le 27/11 à 18 h 20 et le 28/11 à 9 h 20.

Du 28/11 de 10 h 20 à minuit, l'érosion du haut de plage est forte durant le pic de tempête. Elle atteint 30 cm au maximum (pour $x = 400$ m), mais ne concerne pas la dune.

Au cours de la journée du 29/11, l'érosion de la plage est de l'ordre de 10 à 15 cm et ralenti fortement. À l'abscisse $x = 400$ m, l'érosion maximale entre le 27/11 et le 29/11 atteint environ 50 cm.

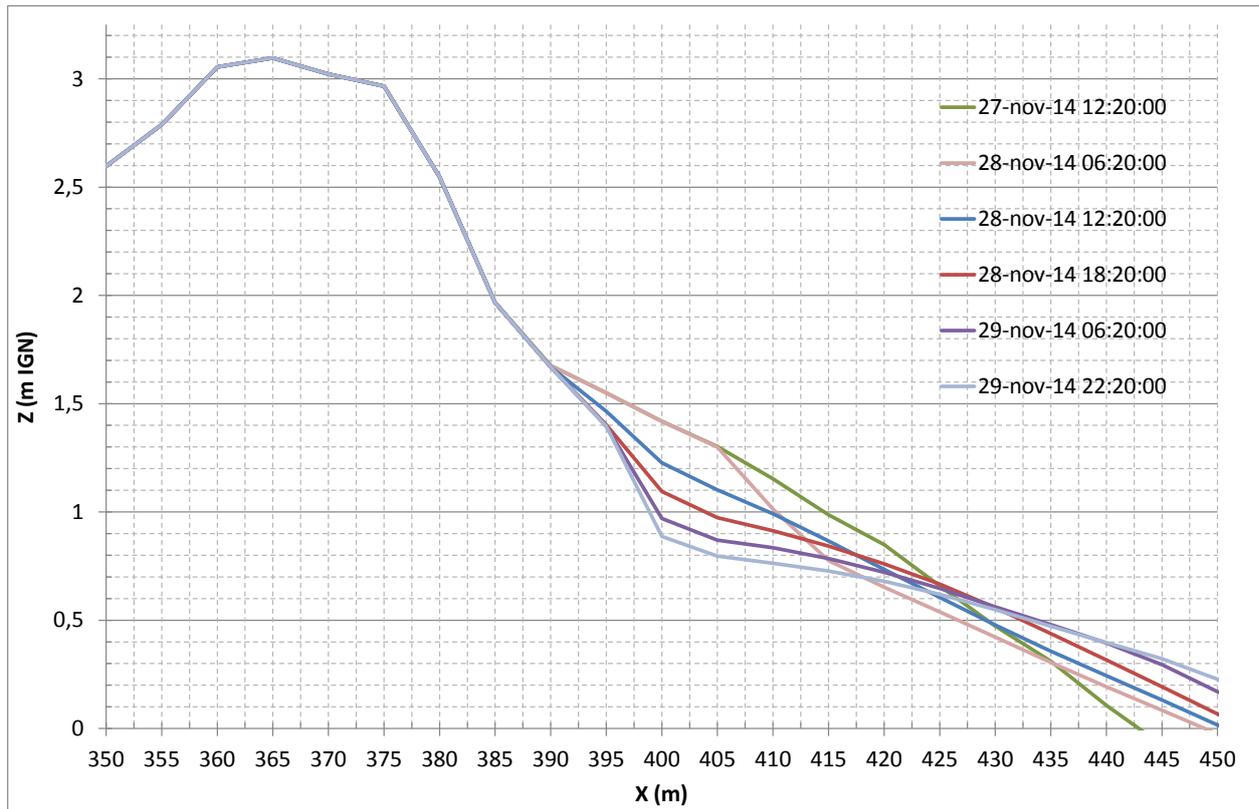


Illustration 50 : Évolution temporelle du haut de plage simulée par le modèle XBeach pour la tempête de novembre 2014. Extraction du profil ouest.

2.4.3. Discussion

Commentaires sur les résultats du modèle 2D

Cette étude a pour but de tester le modèle XBeach pour un cas de tempête ayant provoqué un recul significatif de la dune. Les données de mesures topographiques disponibles qui ont été analysées pour ce travail ne permettent pas de fournir une évaluation quantitative de ce recul. En revanche, les observations de terrain et les photos montrent un recul du front dunaire sous forme de falaise estimé entre 1 et 4 m, lors de la tempête de novembre 2014.

Or, avec le paramétrage et le scénario employés pour reproduire cette tempête sur la plage du Petit Travers, le modèle XBeach 2D ne simule pas ce type d'érosion liée à un impact direct des vagues sur le front de dune. L'illustration 49 ne montre pas d'évolution de la ligne de niveau + 2 m, choisie comme indicateur pour le front dunaire.

Dans cette étude, le pied de dune est une limite morphologique qui forme une rupture de pente entre le front dunaire et le haut de plage. Cette limite est repérable sur le MNT Litto3D à l'altitude proche de + 1,75 m IGN69, mais cette rupture de pente n'est plus visible sur la morphologie finale post-tempête simulée.

La rupture de pente formant le pied de dune est un indicateur difficile à suivre, car soumis au lissage de la plage sous l'effet (réel ou simulé) de la tempête. En revanche, si l'altitude du pied de dune avant l'évènement (+ 1,75 m) est comparé avec la morphologie finale simulée par XBeach, on constate un recul globalement inférieur à 1 m, parfois nul, ou ponctuellement supérieur à 2 m (Illustration 51). Malheureusement, il n'est pas possible de faire ce différentiel entre les topographies mesurées en 2013 et en 2015, car les données de 2015 ne remontent pas assez haut en altitude. Toutefois ces valeurs de recul simulées à 1,75 m

d'altitude sont dans l'ordre de grandeur des estimations d'érosion du front dunaire observées sous l'effet de la tempête de novembre 2014 et estimée entre 1 et 4 m. Si le paramétrage de XBeach et le scénario 2D testé dans cette étude ne permettent pas de reproduire l'érosion de l'ensemble du front dunaire (au-dessus de + 2 m IGN69), les résultats de recul obtenus à l'altitude du pied de dune initial (+ 1,75 m) sont encourageants sur la capacité du modèle XBeach à simuler l'érosion de la zone de transition entre la dune et le haut de plage sous l'effet d'une forte tempête.

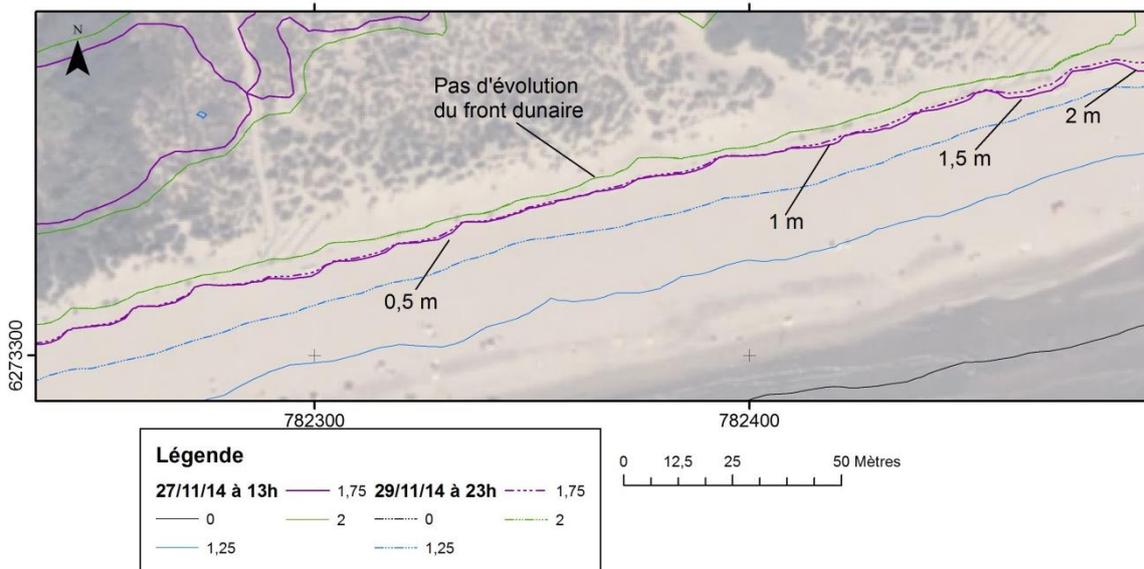


Illustration 51 : Cartographie de l'évolution simulée par XBeach de la ligne de niveau + 1,75 m IGN69, altitude du pied de dune de la morphologie initiale. Zoom sur une partie située à l'est de l'emprise du modèle. Des valeurs de recul de la ligne de niveau + 1,75 m sont indiquées ponctuellement.

Au niveau de la plage, la mesure de l'évolution morphologique d'un profil perpendiculaire (voir partie 2.2.2 et Illustration 15) a montré une nette érosion entre le levé litto3D (2009-2010) et celui de 2013, réalisé plus d'un an avant la tempête de 2014. La plage est donc en situation d'érosion significative avant la tempête de 2014. L'utilisation du MNT Litto3D pour la modélisation ne prend pas en compte cette évolution de la plage entre 2010 et 2014, ce qui peut limiter la qualité des résultats simulés en cas de forte sensibilité du modèle à la morphologie initiale.

Ainsi, en haut de plage, les mesures topographiques entre 2013 et 2015 indiquent un recul de l'isoligne + 1,25 m IGN69 de l'ordre de 5 m. Cette valeur observée est significativement inférieure aux résultats de la modélisation morphodynamique qui a simulé un recul de l'isoligne + 1,25 m compris entre 10 et 15 m (Illustration 53). En haut de plage, le modèle semble donc surestimer l'érosion. En revanche, à l'ouest de la plage, la position de l'isoligne modélisée à la fin de la tempête apparaît proche de celle observée en 2013 à l'ouest, tandis qu'à l'est, elle est identique à celle observée en 2015 (Illustration 53). Ce constat indique que la morphologie post-tempête reproduite par le modèle en haut de plage n'est pas aberrante pour le milieu. Ces résultats montrent que le modèle XBeach a la capacité de provoquer une érosion significative du haut de plage sous l'effet d'une tempête. Bien que le recul de la courbe de niveau 1,25 m IGN69 soit certainement surestimée, la morphologie initiale du MNT Litto3D utilisée dans le scénario est probablement trop différente de la morphologie pré-tempête pour envisager des comparaisons quantitatives avec l'érosion du haut de plage constatée en 2015.

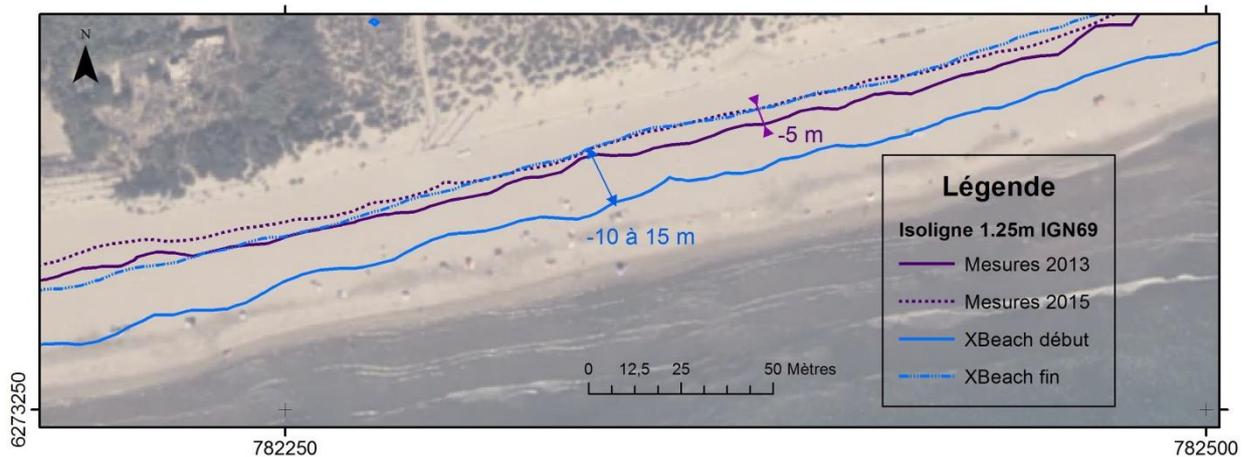


Illustration 52 : Évolution du haut de la plage du Petit Travers simulée par XBeach 2D pour la tempête de novembre 2014. Comparaison avec les observations topo-bathymétriques DREAL 2013 et 2015. Zoom sur la partie est.

En bas de plage, la vision en carte (Illustration 53) illustre un recul observé de la ligne de niveau 0 IGN69 compris entre 5 et 10 m à l'ouest de la zone d'étude. À l'est du profil ouest, la position de l'isoligne 0 m IGN69 est stable entre 2013 et 2015. Elle a même progradé dans le secteur le plus orientale de la zone d'étude. Dans la partie est de la plage (Illustration 53a), les mesures de 2013 permettent d'observer que le bas de plage aérienne est marquée par la présence de croissants de plage, structures rythmiques régulières qui se forment au niveau de la berme. Ces structures, qui sont sensibles aux coups de mer, ne sont plus détectables par les mesures de 2015.

De leur côté, les simulations XBeach ont montré une régularisation de la forme du bas de plage et une nette progradation de l'isoligne 0 m, de l'ordre de 10 à 20 m. Cette tendance à l'accrétion du bas de plage éloigne fortement la morphologie simulée des observations topo-bathymétriques post-tempête de 2015. Ainsi, l'isoligne 0 m simulée est à plus de 40 m de l'isoligne mesurée en 2015 à l'ouest, et à environ 30 m à l'est. Mais à l'est de la zone d'étude, la régularisation et le lissage des morphologies du bas de plage (croissants) apparaît plutôt en accord avec les simulations. De plus, malgré l'effet de deux fortes tempêtes qui ont agi sur la plage entre avril 2013 et 2015 (décembre 2013 et novembre 2014, voir partie « résultats du réseau régional » « tempêtes »), la position du bas de plage à l'est de la zone d'étude est restée globalement stable ou a progradé, ce qui est en accord avec la simulation XBeach pour ce secteur (Illustration 53a). Par contre, l'érosion globale de la partie ouest n'est pas correctement reproduite et les simulations montrant une accrétion généralisée du bas de plage ne correspondent pas du tout avec l'évolution observée (Illustration 53b).

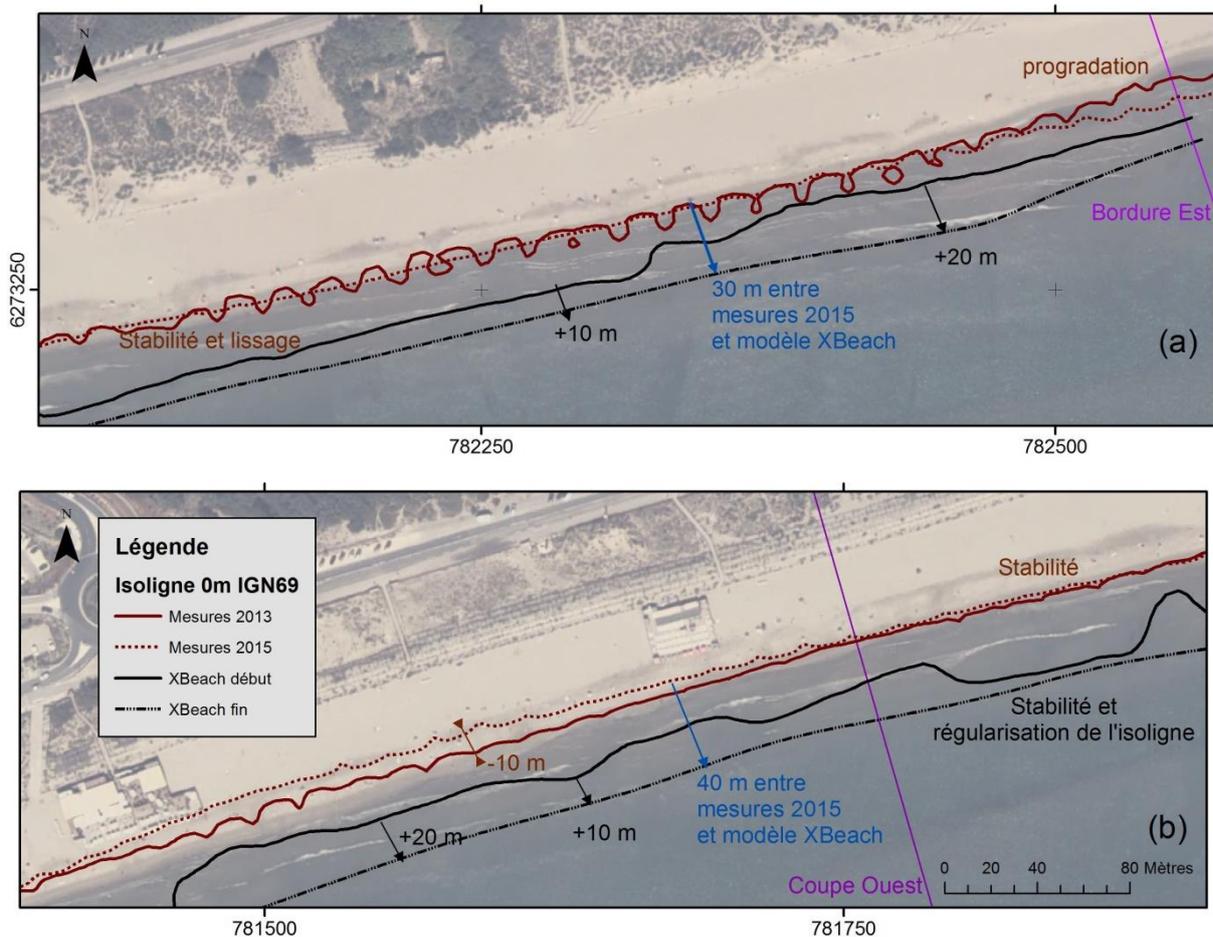


Illustration 53 : Évolution du bas de la plage du Petit Travers simulée par XBeach 2D pour la tempête de novembre 2014 (a) partie est (b) partie ouest. Comparaison avec les observations topobathymétriques DREAL 2013 et 2015.

Au niveau de la plage sous-marine et de la barre sableuse externe, les données bathymétriques de la DREAL datant d'avril 2015 montrent une érosion nettement supérieure à celle simulée par le modèle. L'isoligne - 1,5 m mesurée en 2015 a reculé de 30 m par rapport à 2010, alors que le modèle a plutôt simulé un comblement de la fosse pré littorale, qui se traduit par une progradation de 5 m de l'isoligne. Plus au large, la crête de la barre mesurée s'est déplacée vers le large d'environ 25 m, et ne dépasse plus - 1,5 m comme sur le MNT Litto3D. L'évolution de la barre sableuse simulée par XBeach montre au contraire une stabilité de la position, et une érosion très légère, bien inférieure à 50 cm. Si le modèle XBeach 2D ne semble pas avoir la capacité de reproduire les évolutions de la zone sous-marine et de la barre sableuse externe, il apparaît aussi que la morphologie initiale employée pour ces tests de simulation ne correspond probablement pas à la bathymétrie réelle qui précédait la tempête de novembre 2014.

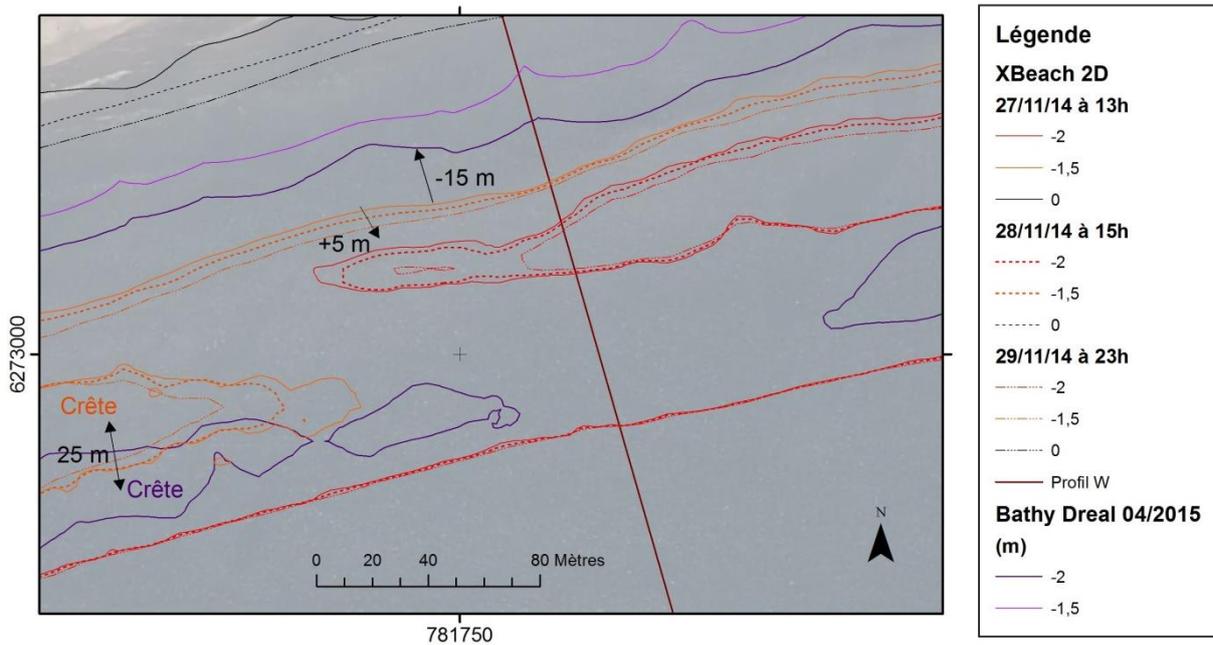


Illustration 54 : Évolution de la barre sableuse externe simulée par XBeach 2D pour la tempête de novembre 2014. Comparaison avec les observations bathymétriques DREAL d’avril 2015.

Confrontation avec des cas tirés de la bibliographie

Dans la bibliographie, le cas d’étude de Mc Call *et al.* (2010) est un exemple de modélisation XBeach sur une île-barrière de Floride (Mer des Caraïbes) ayant subi les effets de l’ouragan Ivan sur la période du 15/09/2004 au 17/09/2004. Pour ce cas, les auteurs ont bénéficié de données LIDAR de topographie-bathymétrie collectées les 15/05/2004 et 19/09/2004. Pour l’hydrodynamique, des forçages schématisés basés sur les résultats du modèle SWAN mis en œuvre sur la zone et des estimations du niveau d’eau ont été introduits aux limites du modèle.

Mc Call *et al.* (2010) obtiennent avec XBeach des résultats proches de l’état post-tempête mesuré (Illustration 55). Cet exemple montre la capacité du modèle à reproduire des tempêtes réalistes sur une île-barrière semblable au lido de Mauguio, lorsque la disponibilité de données de topographie-bathymétrie post-tempête permet le calibrage. Toutefois, il concerne un cas d’ouragan en régime d’inondation : le niveau d’eau a dépassé l’altitude de la dune, impliquant une érosion très importante (érosion des crêtes de dune : 1 à 3 m). Ce processus d’inondation et les dégâts qu’il génère sur les dunes sont beaucoup plus forts que la situation rencontrée lors de la tempête de novembre 2014 sur le lido de l’Or.

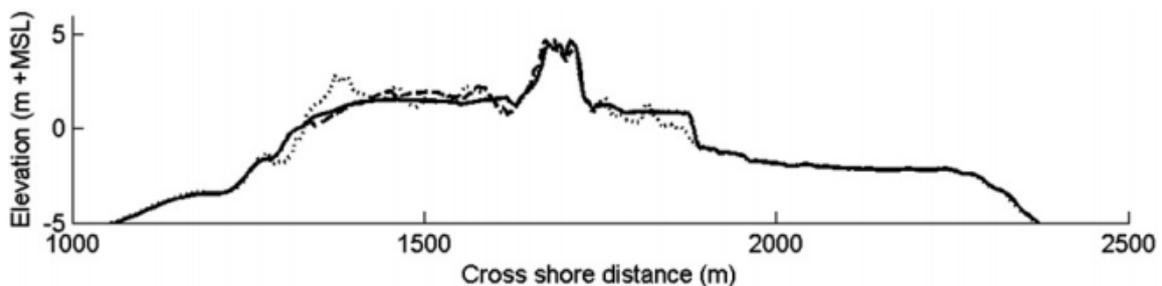


Illustration 55 : Exemple d’un profil initial (trait en pointillés), post-tempête mesuré (trait discontinu) et post-tempête modélisé avec XBeach (trait continu) sur la zone de Santa Rosa (États-Unis) suite au passage de l’ouragan Ivan, d’après McCall *et al.*,(2010). Le large est à gauche.

De Vet *et al.* (2015) ont pour leur part simulé les effets de l'ouragan Sandy (29/10/2012-31/10/2012) sur une île-barrière de la côte atlantique est-américaine. Les auteurs disposaient de topographies LIDAR pré et post tempête (20/01/2012 et 05/11/2012). Les conditions de vagues et séries temporelles de niveaux d'eau totaux prescrits aux limites du modèle ont été obtenues avec le modèle hydrodynamique Delft3D. Leur travail a consisté à étudier finement la sensibilité du modèle XBeach à la rugosité de sol (coefficient de Chézy qui permet de définir le coefficient de friction au fond pour l'écoulement « *cf* », voir Desmazes *et al.*, 2014b) et aux paramètres liés à l'asymétrie des vagues (*facua*). Grâce aux données morphologiques avant et après tempête, ils ont précisément calibré le modèle pour bien reproduire les effets érosifs de l'ouragan sur la dune, que ce soit en régime d'inondation, sous l'effet de la submersion par paquets de mer (Illustration 56a), ou dans le cas de dunes soumises à la collision des vagues (Illustration 56b). Ce régime de collision correspond au phénomène observé lors de la tempête de novembre 2014 sur la plage du Petit Travers.

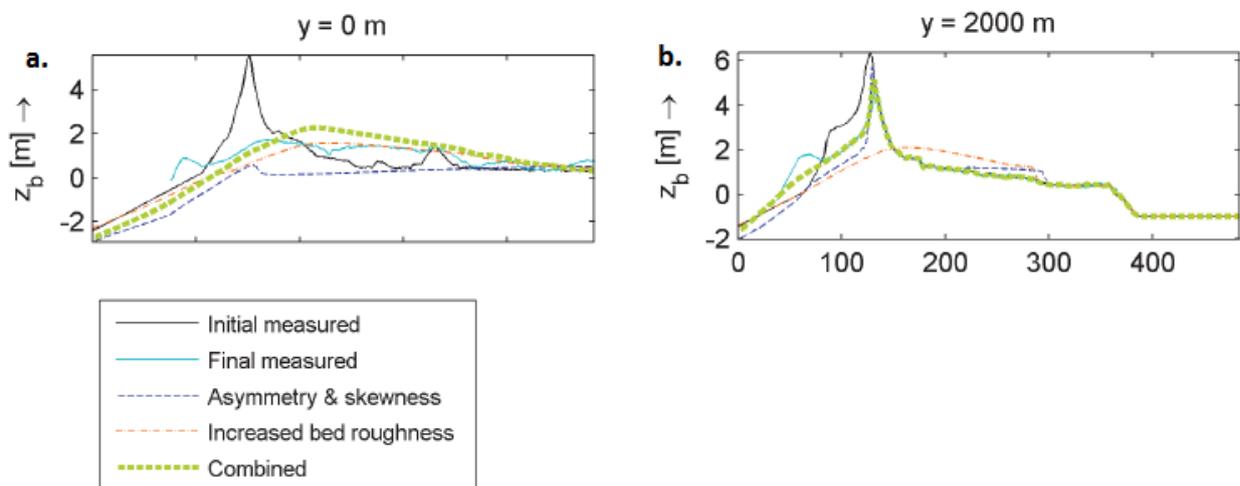


Illustration 56 : Profils mesurés et modélisés avec XBeach au niveau Fire Island (États-Unis) suite au passage de l'ouragan Sandy, en régime (a) d'inondation et (b) de collision. Le large est à gauche.
Source : De Vet *et al.*, (2015).

2.4.4. Tests complémentaires avec le modèle XBeach 1D

La discussion et la comparaison des résultats du modèle XBeach avec des observations et mesures réalisées sur la plage du Petit Travers ont montré l'intérêt de pouvoir compter à la fois sur la bonne reproduction des forçages hydrodynamiques et sur une connaissance précise des morphologies avant et après événement. Dans le but d'améliorer la modélisation de l'érosion dunaire observée durant l'évènement de novembre 2014 sur la plage du Petit Travers, des tests supplémentaires ont été réalisés avec le modèle XBeach 1D.

- Tests sur les conditions hydrodynamiques

L'illustration 25 est une photo prise lors du pic de tempête du 28 novembre 2014. Elle montre que les vagues sont arrivées directement au pied de dune pour l'éroder, puis agir sur le front dunaire. La part entre l'action du jet de rive (non pris en compte par XBeach), l'effet des ondes infragravitaires et de la surcote est très difficile à distinguer, mais il est envisageable que les données de niveau d'eau du marégraphe de Sète soient légèrement sous-estimées par rapport aux conditions subies sur la plage du Petit Travers. C'est pourquoi un scénario de niveau d'eau légèrement accentué au moment du pic de tempête a été testé (entre 10 cm et 20 cm supplémentaires entre 10 h et 13 h le 28/11/2015).

Ces modifications de niveau d'eau n'apportent aucun changement morphologique notable du profil de plage (Illustration 57). Il faut noter aussi que l'illustration 28 (présentée dans la partie « La tempête de novembre 2014 ») montre l'action d'une vague au pied de la dune le 29/11/14 à 15 h, bien après le pic de tempête. Ce phénomène n'apparaît pas bien reproduit par le modèle mis en place.

Outre le niveau d'eau ou les conditions d'agitation, la morphologie initiale est un autre élément pouvant affecter l'érosion du pied de dune, or, comme indiqué dans la partie 2.3 « Élaboration du scénario », la prise en compte du MNT Litto3D 2009-2010 pour reproduire la morphologie précédant la tempête de 2014 est un choix par défaut, du fait de l'absence de données topo-bathymétriques complètes et disponibles pour la période précédant la tempête de 2014. Le littoral a en effet clairement évolué depuis 2010 sous l'effet de l'érosion et des tempêtes, ainsi les tempêtes de mars et/ou de décembre 2013 ont pu significativement modifier la morphologie représentée par le MNT Litto3D. Afin d'évaluer l'effet de la succession de 2 tempêtes très fortes sur le profil de plage, le modèle XBeach 1D est utilisé pour établir le profil morphologique après une double application des forçages de la tempête de novembre 2014. Selon ce scénario, le haut de plage apparaît sensiblement plus érodé que pour le scénario de référence, avec un recul maximal de 5 m supplémentaire par rapport au scénario de référence à 1 tempête (Illustration 57). De plus le pied de dune (à l'altitude 1,75 m) est en recul de près de 3 m par rapport au profil initial, ce qui est plutôt concordant avec les observations. Mais cette érosion ne touche pas encore l'ensemble du front dunaire, au-dessus de l'altitude 2m IGN69.

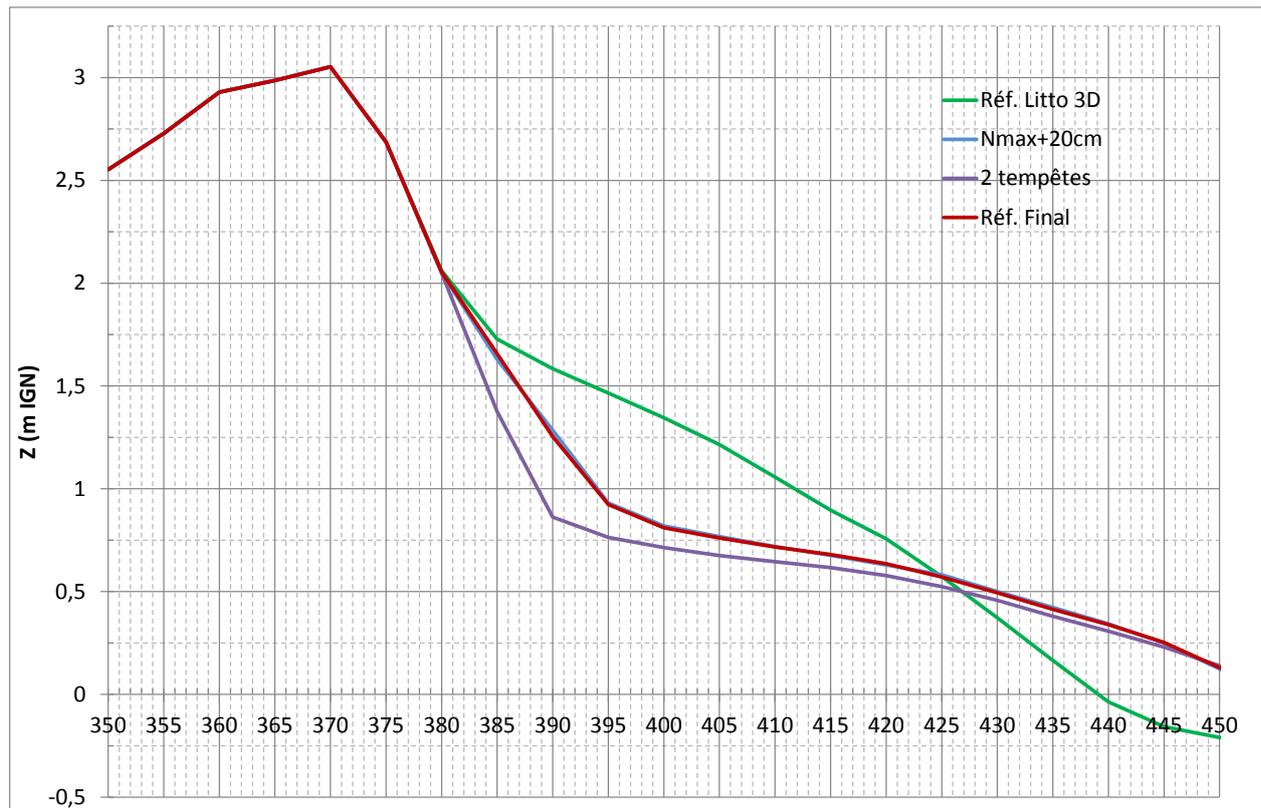


Illustration 57 : Tests de 2 scénarios hydrodynamiques visant à simuler l'érosion du profil de plage et de la dune. Configuration XBeach de référence. Le scénario « Nmax + 20 cm » accentue le niveau marin de 20 cm au pic de tempête. Le scénario « 2 tempêtes » applique 2 fois les forçages de la tempête de novembre 2014.

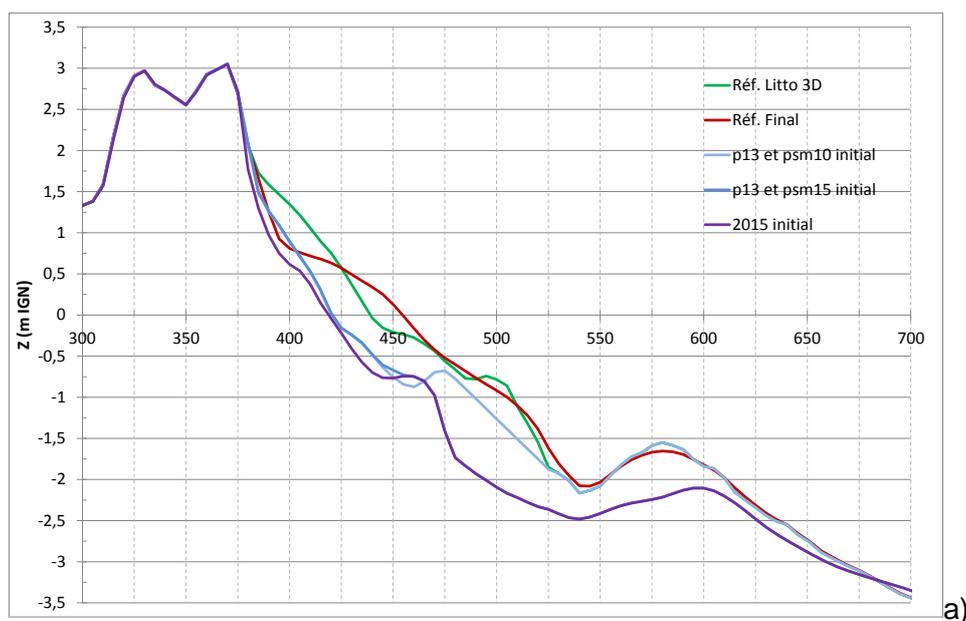
- Test sur la morphologie initiale

Le test précédant, dont le scénario consistait à répéter la tempête de novembre 2014, a montré un effet de la seconde tempête sur le pied de dune, pour un profil déjà érodé par un événement très intense. La relative simplicité de mise en œuvre du modèle en 1D peut permettre de poursuivre ces tests sur la base de scénarios morphologiques différents du profil Litto3D de référence.

Dans un premier temps (Illustration 58), le profil de plage mesuré en 2013 (sensiblement plus érodé qu'en 2009-2010) est associé à la plage sous-marine du profil de référence (scénario p13 et psm10). Puis le profil de plage mesuré en 2013 est associé avec la plage sous-marine de 2015, dont les barres sont nettement plus basse qu'en 2010 (scénario p13 et psm15). Enfin, le profil de plage et de plage sous-marine de 2015 est testé.

Les résultats des simulations montrent que :

- pour le scénario « p13 et psm10 », l'érosion de la plage dans son ensemble et du haut de plage en particulier est très nettement supérieure au scénario de référence basé sur le MNT Litto3D. Le pied de dune à 1,75 m d'altitude recule de 4 m, ce qui est plus important que pour le scénario « 2 tempêtes ». Mais de la même façon que pour le scénario « 2 tempêtes », le front dunaire au-dessus de 2 m IGN69 n'apparaît pas impacté ;
- pour le scénario « p13 et psm15 », l'érosion de la plage subaérienne est identique au scénario « p13 et psm10 » ;
- le scénario « profil 2015 » correspond à une morphologie de plage et de plage sous-marine mesurée après l'hiver 2014-2015, et donc après l'érosion provoquée par la tempête étudiée. Comparativement aux scénarios intermédiaires « p13 et psm10 » et « p13 et psm15 », l'érosion du haut de plage est plus forte et atteint le front dunaire qui recule de plus de 2 m à l'altitude de 2 m IGN69. Cette érosion touche l'ensemble du front dunaire jusqu'au sommet. Ce recul dunaire est comparable avec les observations et photographies sur la zone d'étude (novembre 2014).



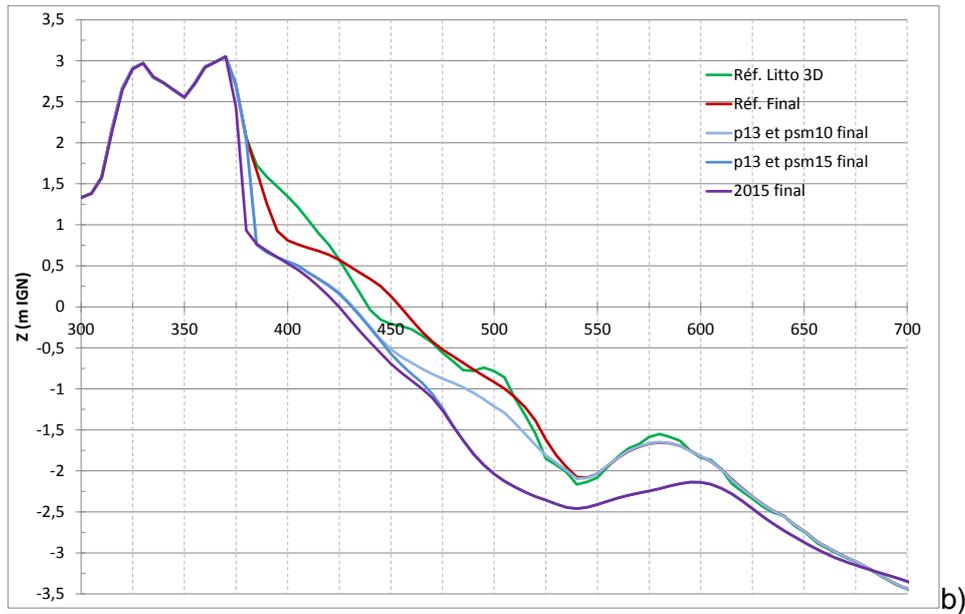


Illustration 58 : Tests de 3 scénarios morphologiques pour la tempête de novembre 2014. a) Morphologies initiales b) Morphologies après simulation de la tempête. P13 et psm10 : morphologie de plage de 2013 et plage sous-marine issue du MNT Litto3D. P13 et psm15 : morphologie de plage de 2013 et plage sous-marine issue de la bathymétrie Dreal de 2015. Profil 2015 : plage et plage sous-marine issues des données topo-bathymétrique Dreal de 2015.

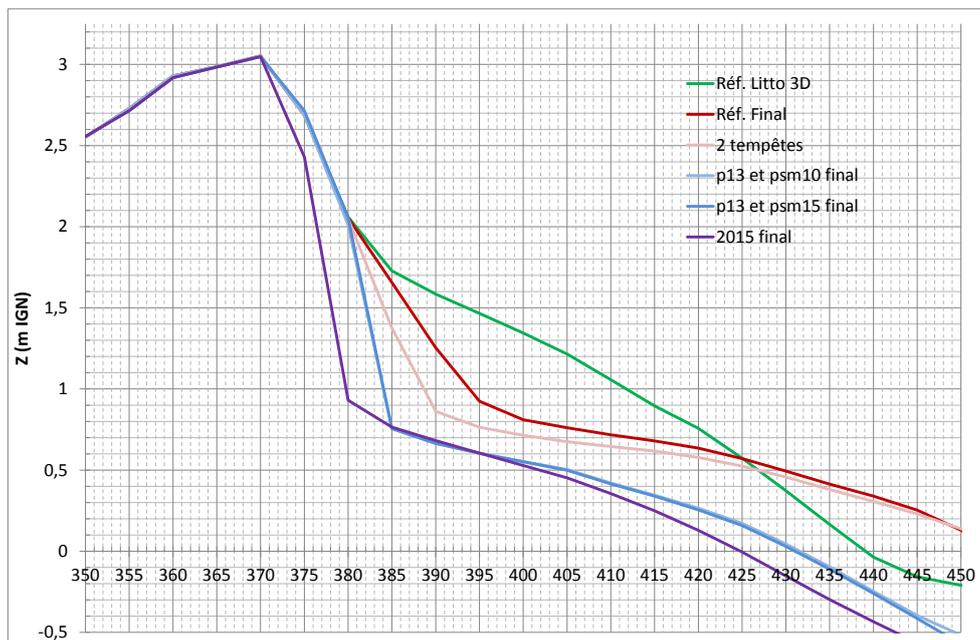


Illustration 59 : Zoom de l'évolution du haut de plage et de la dune pour les 3 nouveaux scénarios morphologiques testés.

Ces tests, basés sur un ensemble de scénarios morphologiques variés, confirment l'effet prépondérant de la morphologie initiale pour reproduire, avec le modèle XBeach 1D, une érosion du pied de dune et du front dunaire dans son ensemble. Plus précisément, il semble que la morphologie de la plage sous-marine de 2015, caractérisée par des barres sableuses nettement érodées par rapport aux données Litto3D et associée à un haut de plage pentu et préalablement érodé, rende possible la simulation d'une érosion du front dunaire de la plage du Petit Travers par le modèle XBeach 1D.

Ces constats sont en accord avec les travaux de Splinter *et al.* (2011) qui ont réalisé des tests de sensibilité du modèle XBeach à la bathymétrie initiale, à partir d'un jeu complet de données morphologiques de la Gold Coast en Australie. En revanche, les interprétations de détails divergent légèrement car Splinter *et al.* (2011) ont tendance à minimiser l'effet de la bathymétrie initiale dans les résultats. Si ces interprétations sont acceptables en terme de variations de volumes ou d'évolution de l'indicateur de bas de plage, l'examen des résultats au niveau du front dunaire (Illustration 60) montre que :

- l'effet de la morphologie initiale est effectivement faible pour le profil ETA52 à l'échelle proposée (Illustration 60a), mais la forte érosion plage-dune de la tempête y est de toute façon mal reproduite par le modèle, sous-estimant fortement le recul dunaire ;
- pour le profil ETA67 (Illustration 60b), le modèle reproduit bien l'effet érosif de la tempête sur l'avant-dune, mais les tests sur la morphologie initiale montrent un effet non négligeable de cette variation sur la simulation d'une érosion de l'ensemble du front dunaire.

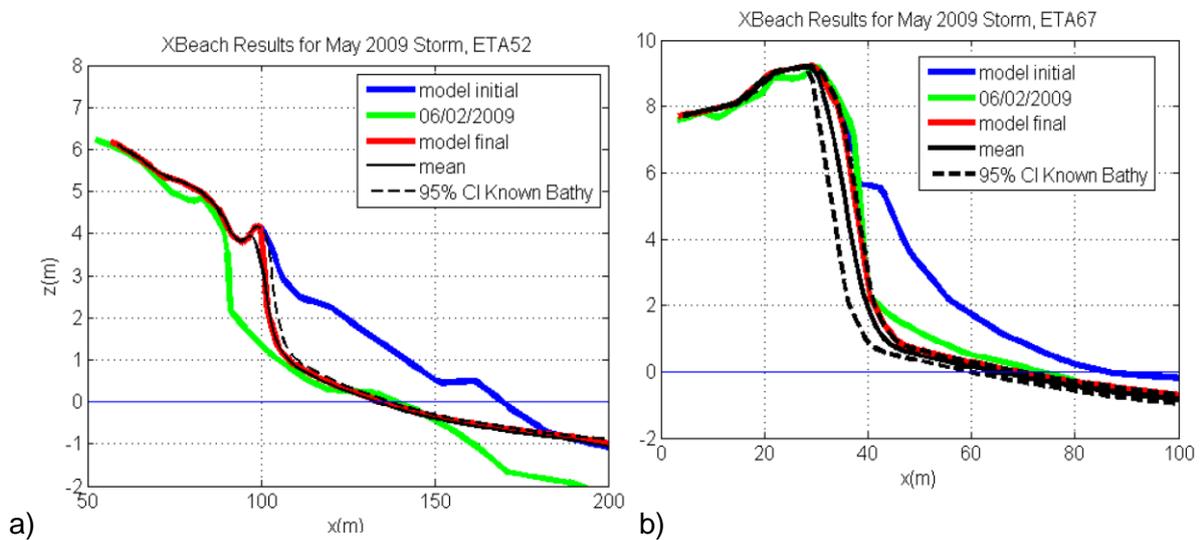


Illustration 60 : Érosion observée après la tempête de mai 2009 ayant touché la Gold Coast (Australie), entre le profil bleu (fin 2008) et le profil vert (juin 2009). En rouge, résultat de l'érosion simulée par XBeach pour la morphologie initiale de fin 2008, en pointillés noirs, enveloppe (95 %) et moyenne des simulations obtenue avec l'ensemble des bathymétries disponibles par profils.
a) profil ETA52 b) profil ETA67. Source : Splinter *et al.*, 2011.

Pour le site du Petit Travers, ces tests, menés en 1D, pourraient être mis en œuvre en 2D, afin de proposer des scénarios morphologiques alternatifs pour décrire la plage et le domaine pré-littoral avant la tempête de novembre 2014, afin de produire des scénarios de modélisation encore plus réalistes.

3. Action 2 : Prise en compte des phénomènes de succession de tempêtes

L'hiver 2013-2014 a été caractérisé par une très forte érosion du littoral sableux atlantique en raison d'une succession de tempêtes. Cet épisode questionne sur les outils et les méthodes qui permettraient d'anticiper ces situations et d'estimer les reculs du trait côte exceptionnels qu'elles peuvent provoquer sur les littoraux meubles.

3.1. BIBLIOGRAPHIE

Castelle *et al.* (2015) présentent une synthèse mise à jour de la bibliographie traitant des séquences de tempête. Se basant sur la théorie d'évolution morphodynamique d'une plage sableuse sous l'effet d'une tempête, ils indiquent qu'au début d'un évènement, la partie sous-marine de la plage évolue très rapidement du fait de l'important déséquilibre entre l'intensité des conditions hydrodynamiques de tempêtes et l'état morphologique initial de la plage. Puis progressivement, si la tempête dure un temps suffisant, la plage adopte un nouveau profil d'équilibre au terme de la tempête. Dans le cas d'une séquence de tempêtes, les évènements qui se succèdent sont ainsi de moins en moins érosifs, la situation initiale de la plage ayant déjà été façonnée pour être en équilibre avec des conditions hydrodynamiques de forte intensité. Cette approche théorique sert de base aux modèles semi-empiriques d'évolution du trait de côte dit « equilibrium-based semi-empirical shoreline models » (Miller and Dean, 2004 ; Yates *et al.*, 2009, 2011 ; Davidson *et al.*, 2010, 2013 ; Castelle *et al.*, 2014).

Récemment, ces modèles ont été appliqués sur un nombre important de plages sableuses dominées par le transport cross-shore (Splinter *et al.*, 2014). Ils fournissent en général des bons résultats dans la reproduction de l'érosion durant de fortes tempêtes et pour des séquences de tempêtes. Ces modèles ne permettent toutefois pas d'établir un rapport universel entre impact d'un évènement et impacts cumulés. En effet, la validation de ces approches doit être approfondie car les jeux de données d'observations hautes fréquences sur des littoraux sableux sont encore relativement rares et leur recueil reste aujourd'hui un challenge. De plus, les données actuellement disponibles à travers le monde (États-Unis, Australie, Pays-bas, Portugal, France...) présentent des résultats souvent complexes à interpréter et donc particulièrement difficiles à reproduire par des modèles qui simplifient les processus en jeu (Coco *et al.*, 2014).

Les données d'observation existantes montrent que dans les cas d'évènement extrême unique ou lors de séquence de tempêtes, les conséquences en termes d'érosion peuvent être considérables. De nombreuses études ont montré que l'impact cumulé de séquences de tempête pouvait générer des érosions plus importantes qu'un évènement unique de l'ordre de plusieurs dizaines d'années de temps de retour (Birkemeier *et al.*, 1999; Ferreira, 2005 ; Castelle *et al.*, 2008 ; Splinter *et al.*, 2014 ; Karunaratna *et al.*, 2014).

Dans le cas des séquences de tempête, Coco *et al.* (2014) estiment que différents facteurs comme les caractéristiques individuelles des tempêtes (trajectoires, durée...) et leur position particulière dans la séquence (e.g. séquence débutant par la tempête la plus forte), peuvent influencer les impacts résiduels subis par les sites d'études. Ainsi, Masselink et Van Heteren (2013) suggèrent que la réponse du « trait de côte » à une succession de tempête ne répond pas à un comportement linéaire du fait de phénomènes de rétroaction et d'effet de seuil. Ces effets complexes peuvent impliquer des impacts apparemment disproportionnés lors de tempêtes relativement modérées ou au contraire l'absence d'effets cumulés lors d'une succession différente de tempêtes. De plus, des phénomènes de latence ont pu être observés également, conduisant à l'absence d'érosion lors d'une tempête puis d'érosions

significatives lors des conditions de houles plus calmes suivant l'évènement (Coco *et al.*, 2014 ; Sénéchal *et al.*, 2015).

Il ressort de l'ensemble de ces travaux sur les tempêtes et leur succession dans le temps un questionnement actuel sur l'existence de seuils qui transformeraient une plage résiliente et en équilibre dynamique, en un système durablement érodé ou subissant une érosion ponctuelle extrême (Ciavola and Stive, 2012), comme celle qui a été observée sur la côte aquitaine lors de l'hiver 2013-2014.

3.2. ANALYSE DES PHÉNOMÈNES OBSERVÉS DURANT L'HIVER 2013-2014

Sous divers aspects (*i.e.* conditions météorologiques, niveaux d'eau, conditions de houle, nombre d'évènements...), la période hivernale 2013-2014 a été remarquable. La succession particulièrement rapprochée dans le temps d'évènements de conditions météo-marines intenses, a provoqué sur l'ensemble des littoraux Atlantique et de la Manche des conséquences notables voire exceptionnelles en termes d'érosion et/ou de submersion. Ce paragraphe vise à présenter une synthèse sur cette période et son effet érosif sur la côte sableuse aquitaine.

3.2.1. Forçages météo-marins

Lorsque l'on traite des aléas littoraux, les paramètres permettant de qualifier les conditions météo-marines lors d'un évènement sont le plus souvent :

- les niveaux d'eau (composés de la marée et de la surcote atmosphérique) dont la composante non déterministe découle directement des conditions météorologiques locales (vent et pression atmosphérique) ;
- les conditions de houle (hauteur significative Hs, période et direction des vagues) dont la variabilité dépend principalement des conditions météorologiques régionales et locales.

Les niveaux d'eau

Le rapport SHOM (2014) propose une analyse des niveaux d'eau mesurés aux observatoires du littoral Atlantique et de la Manche sur la période comprise entre fin octobre à début février. Parmi les observations, 7 évènements remarquables ayant affecté ces littoraux ont été sélectionnés sur des critères de hauteurs d'eau. Pour ces évènements, l'étude informe sur les valeurs de niveaux d'eau et de surcotes enregistrées aux marégraphes. Elle indique les périodes de retour associées à ces niveaux et surcotes et relie chaque évènement à des tempêtes passées connues. L'analyse des évènements présentés ne tient pas compte des conditions de houle concomitantes ou non avec les niveaux.

L'étude du SHOM s'arrêtant début février, elle n'inclut pas les tempêtes de forte intensité de la fin de l'hiver telles que : RUTH les 8-9 février 2014 ; STEPHANIE le 10 février 2014 ; ULLA le 15 février 2014 ; ANDREA le 28 février 2014 ou CHRISTINE le 3 mars. Parmi les évènements traités, seuls trois évènements sont considérés comme marquants du point de vue des hauteurs d'eau enregistrées :

- la tempête GODEHART du 03 au 06/11/2013 durant laquelle les enregistrements de hauteur d'eau sont supérieurs aux PHMA dans plusieurs observatoires de la côte Atlantique, de la Vendée à l'Aquitaine et supérieurs à une période de retour de 10 ans au Havre et à Calais ;
- la tempête XAVER du 05 au 08/12/2013 a été particulièrement remarquable sur les littoraux du nord de la Manche. Les hauteurs d'eau observées dans les observatoires du nord de la Manche (du Havre à Calais) ont été supérieures à la PHMA. Les niveaux à

Calais et Dunkerque sont les valeurs les plus fortes enregistrées depuis la mise en place de ces stations d'observations. Les niveaux ont en effet dépassé les valeurs centennales établies (SHOM et CETMEF, 2012) ;

- la tempête NADJA du 01 au 02 février 2014 (indiquée dans le rapport SHOM comme « Sans Nom ») présente des enregistrements de hauteur d'eau supérieurs à la PHMA en de nombreux observatoires de la côte Atlantique et supérieurs à des périodes de retour quinquennales en Bretagne (Le Conquet, Brest, Concarneau), en Vendée (Sable d'Olonne), en Aquitaine (Port-Bloc). Les valeurs et périodes de retour indiquées à Boucau et citées dans le rapport doivent être considérées avec précaution du fait du positionnement du marégraphe dans l'estuaire.

En termes de surcotes instantanées, les autres évènements analysés dans le rapport SHOM présentent parfois des valeurs remarquables, toutefois ces pics de surcote intervenant soit à marée basse soit lors de marée de faible coefficient, les niveaux d'eau associés restent inférieurs à des conditions de PHMA.

Les conditions de houles

• Réseau Candhis

L'analyse des observations de conditions de houles relevées par les bouées du réseau métropolitain CANDHIS a été réalisée par le CEREMA (2014). Ce rapport fait état des observations des conditions de houles pour les bouées en service lors de 8 évènements de l'hiver 2013-2014. L'analyse des observations est basée sur le dépassement d'un seuil de hauteur de vague (hauteur significative de la station) fixé par le CEREMA pour chaque station à partir des données disponibles. Parmi les évènements de l'hiver 2013-2014, les conditions de houles observées ont dépassé par huit fois les seuils établis pour au moins une station du réseau.

Les hauteurs de vagues significatives observées pour chaque station sont analysées au regard des lois de probabilité décrivant les évènements extrêmes estimées à partir des données d'observations disponibles (selon les stations de 2 à 12 ans au maximum).

Parmi ces évènements et selon les statistiques établies pour chaque station, des conditions supérieures à des périodes de retour décennales auraient été observées par 4 fois :

- 1 fois en méditerranée lors du passage de la tempête Dirk du 23 au 26/12/2013 ;
- 2 fois à la pointe bretonne lors du passage des dépressions Petra et Ulla respectivement du 04 au 06/02/2014 et du 14 au 15/02/2014 ;
- 1 fois au Pays Basque lors du passage de la tempête Christine du 02 au 04/03/2014.

Pour 4 autres évènements, Christina, Hercules, Nadja et Ruth les conditions de houles sont évaluées par le CEREMA comme comprises entre des périodes de retour de 1 à 10 ans.

• Bouée Gascogne

Les études Bulteau *et al.* (2014) et Nicolae *et al.* (2014) proposent une analyse des évènements de l'hiver 2013-2014 à partir des conditions de houles observées à la bouée Gascogne et de la base de données d'extrêmes de vague BoBWA-X (Bulteau *et al.*, 2013). La bouée Gascogne est située à environ 300 km de la côte Aquitaine et représentative des conditions rencontrées au large de ce littoral.

Pour la bouée Gascogne (Illustration 61), les observations montrent que lors de l'hiver 2013-2014, les vagues ont atteint par trois fois (tempêtes Hercules, Ruth, Christine) des valeurs proches de la plus forte valeur observée à la bouée depuis sa mise en place opérationnelle en juillet 1998, à savoir $H_s = 12$ m. Elles dépassent cette valeur lors de la tempête Petra. Les valeurs de H_s lors de la tempête Petra sont donc les plus fortes vagues mesurées à la bouée Gascogne depuis la mise en activité de la bouée. Toutefois, on rappelle que lors du passage de la tempête Klaus en Janvier 2009, évènement tout à fait exceptionnel en termes de conditions de houle, la bouée a cessé d'enregistrer durant la tempête.

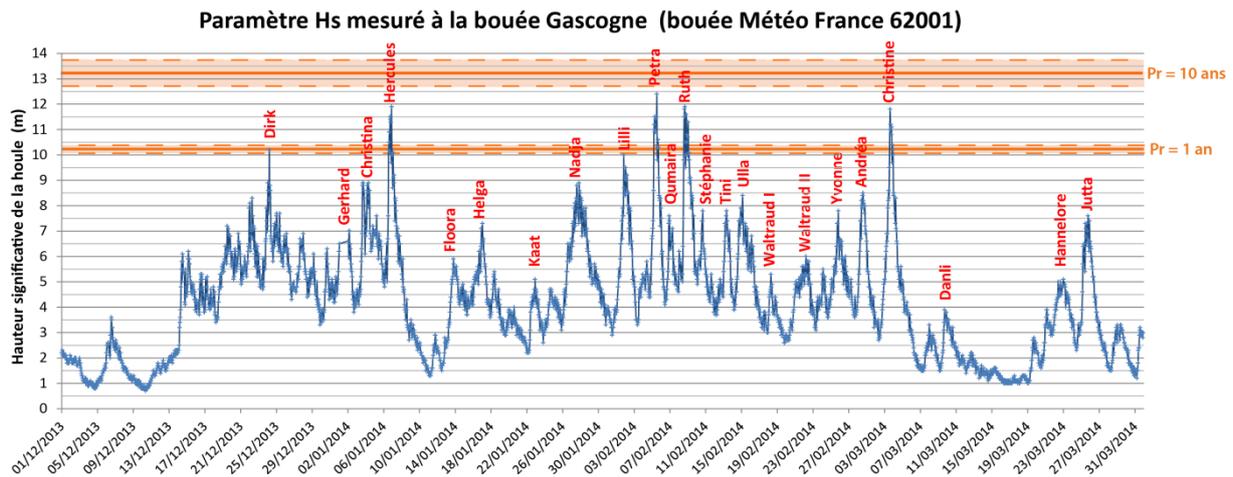


Illustration 61 : Hauteurs significatives des vagues observées aux stations Gascogne et dénomination des situations météorologiques tempétueuses associées. Source : Nicolae Lerma et al., (2014).

- **Modèle Prévimier**

Pour ce travail à l'échelle nationale, le croisement des données Previmier avec la base de données BoBWA-X permet de détecter 9 évènements durant lesquelles les conditions de houle proches des côtes ont été supérieures à une période de retour annuelle. Cette détection porte sur au moins un des 43 points d'analyse de la base de données BoBWA-X. Les évènements détectés par cette méthode sont similaires au recensement établi à partir des bouées Candhis, mis à part la dépression ANDREA du 28 février qui n'a pas été recensée dans l'étude du CEREMA (2014).

À l'échelle des façades Atlantique et Manche (Illustration 62), mise à part la partie nord du Nord-Pas-de-Calais, l'ensemble des littoraux Atlantique et Manche a été affecté par des conditions de houles de période de retour annuelle. Certaines portions du littoral ont connu des situations tout à fait remarquables, étant affectées jusqu'à 7 reprises par des conditions de houles supérieures à des conditions annuelles, c'est-à-dire qui, statistiquement, ne devraient apparaître en moyenne qu'une fois par an.

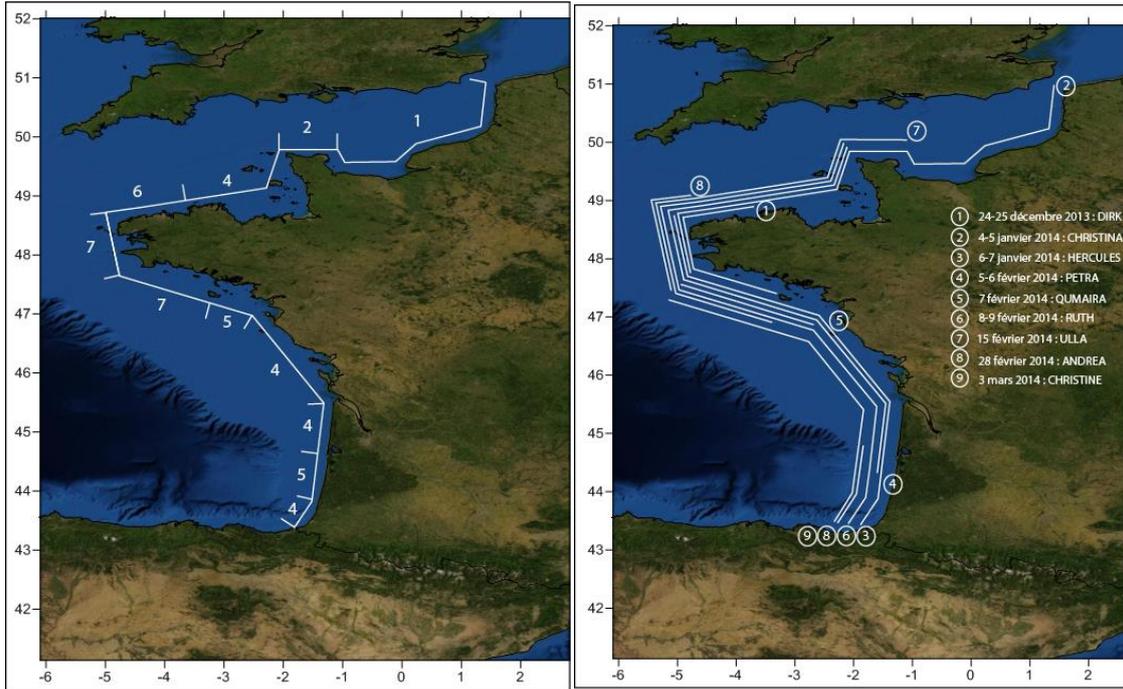


Illustration 62 : Cartes des façades Manche, Mer du Nord et Atlantique présentant le nombre et la répartition des événements de l'hiver 2013-2014 pour lesquels la hauteur significative des vagues est caractérisée par une période de retour locale supérieure à 1 an. D'après Previmer et Bobwa-X.

3.2.2. Impact érosif de l'hiver 2013-2014 à l'échelle de la côte Aquitaine

Ce document synthétise le travail réalisé par le BRGM pour l'Observatoire de la Côte Aquitaine (OCA) sur la caractérisation de l'impact des tempêtes survenues entre décembre 2013 et mars 2014 sur la côte aquitaine (Bulteau *et al.*, 2014).

Caractère exceptionnel de la séquence de tempêtes

Malgré des conditions de houle et des niveaux d'eau qui n'étaient pas particulièrement exceptionnels lorsque considérés individuellement (période de retour maximale identifiée de 20 ans pour la hauteur significative des vagues lors de la tempête Hercules - 6 janvier, à la bouée Cap-Ferret), la succession rapprochée dans le temps des tempêtes a provoqué sur l'ensemble de la côte aquitaine, des conséquences notables voire exceptionnelles en termes d'érosion et/ou de submersion.

Le caractère exceptionnel des tempêtes de l'hiver 2013-2014 provient essentiellement de la durée cumulée des fortes houles. En effet, sur la période étudiée, près de 5 % des hauteurs significatives des vagues a dépassé le seuil de tempête déterminé dans l'étude (5,86 m à la bouée Cap-Ferret), ce qui est plus du double des proportions calculées les hivers passés (mesures bouée Cap-Ferret pour les hivers 2008-2009, 2011-2012, 2012-2013 et base de données BoBWA pour les hivers de la période 1958-2002). D'autre part, la puissance de la houle, estimée au cours de l'hiver 2013-2014 à 200 kW par unité de longueur de crête, est très nettement supérieure aux données historiques (plus du double de la puissance de la plupart des hivers précédents). En revanche la direction de la composante énergétique de la houle est homogène avec celle des autres hivers (entre 277°N et 287°N). Au total, huit tempêtes ont été identifiées à partir des conditions de houle enregistrées au large (bouée Gascogne) et à la côte (bouée Cap-Ferret). À la bouée Cap-Ferret (Illustration 63), trois événements (Petra, Ruth et Christine) présentent des valeurs de hauteur significative de vague remarquables équivalentes ou légèrement supérieures à H_{s10ans} . Un événement

(Hercules) est très nettement supérieur à cette valeur (+ 0,59 m). En faisant l'hypothèse que l'occurrence des événements suit une loi de Poisson, la probabilité d'observer 4 événements pour lesquels les hauteurs de vague dépassent $H_{s_{10ans}}$ en 1 an est environ 4.10^{-6} (Nicolae Lerma *et al.*, 2014). Cette probabilité très faible souligne le caractère exceptionnel de la séquence de tempêtes de l'hiver 2013-2014.

Numéro	Événement	Gascogne		Cap Ferret	
		Hs (m)	Pr (BoBWA-X)	Hs (m)	Pr (BoBWA-X) années
1	Dirk	10,2	1 an	6,06	< 1 an
2	Christina	8,9	< 1 an	6,47	< 1 an
3	Hercules	11,5	1-2 ans	9,39	≈ 20 ans
4	Nadja	8,9	< 1 an	5,9	< 1 an
5	Petra	12,4	4-5 ans	8,6	≈ 10 ans
6	Ruth	11,9	2-3 ans	8,8	≈ 10 ans
7	Andrea	8,5	< 1 an	6,8	1 an
8	Christine	11,8	2-3 ans	8,8	≈ 10 ans

Illustration 63 : Périodes de retour (Pr) des conditions de vague associés à chaque événement sélectionné. Source : Bulteau *et al.*, 2014 et Nicolae Lerma *et al.*, (2014).

En ce qui concerne les niveaux d'eau, l'analyse des observations marégraphiques des ports de Port-Bloc, Arcachon Eyrac, Boucau-Bayonne et Socoa met en évidence que les tempêtes de l'hiver 2013-2014 n'ont pas générées de niveaux particulièrement exceptionnels sur la côte aquitaine. Les tempêtes Christina (3-4 janvier) et Christine (3 mars) indiquent toutefois des valeurs notablement supérieures aux autres événements avec une période de retour maximale d'environ 12 ans observée au marégraphe de Port-Bloc pour Christine. Notons enfin que la durée des 8 tempêtes est très variable et peut s'étendre sur une durée de 1 à 3 jours.

Érosion et recul du trait de côte en Aquitaine

L'analyse sur les impacts des tempêtes a été effectuée à partir d'une comparaison diachronique des campagnes annuelles de suivi géomorphologique du littoral.

D'une manière générale, l'ensemble de la côte sableuse aquitaine a été fortement érodé durant l'hiver 2013-2014. Le recul du trait de côte dépasse 20 m sur de nombreux sites. Les plages se sont fortement abaissées et aplanies, limitant ainsi leur résistance aux assauts successifs de l'océan.

Sur le littoral du département de la Gironde (Illustration 64), l'érosion marine a été la plus forte. On note un recul du trait de côte dépassant souvent 20 m et atteignant par endroits 30 à 40 m. Au droit des profils, le contact plage/dune et la plage ont également vu leur altitude baisser. Une généralisation de falaises vives de grande hauteur et de très forte pente a été constatée. La tendance avant l'hiver 2013-2014 était déjà à l'érosion dans le nord, entre Le Verdon-sur-Mer et Hourtin, tandis qu'on pouvait constater une relative stabilité, voire une tendance à l'accrétion, au sud. Sur l'ensemble des profils suivis, seuls les secteurs G18 (Cap-Ferret) et G20 (Wharf de la Salie) ne présentent pas de signe d'érosion particulière au moment des levés en avril 2014. Le secteur des Passes du Bassin d'Arcachon a cependant été fortement impacté avec des déstabilisations de l'enrochement de la Pointe du Cap-Ferret et des brèches de la flèche sableuse du Mimbeau qui ont fait l'objet de confortement et de restauration d'urgence. De même, le nord de la Dune du Pilat à proximité du musoir de la Corniche a subi un recul du trait de côte atteignant 8 m mais en partie compensé à l'issue de l'hiver par des apports naturels de sable depuis le haut de la Dune.

Dans les Landes (Illustration 64), l'érosion est globalement plus modérée que dans le Médoc. Les reculs du trait de côte y sont naturellement plus faibles. Au cours de l'hiver 2013-2014, ils sont toutefois importants par rapport aux années précédentes, de l'ordre de 10 à 15 m et par endroits, ils peuvent atteindre 25 m (e.g. profil L3 à Biscarrosse). On constate également un abaissement du niveau des plages ainsi que la formation de falaises vives entaillant le cordon dunaire sur une grande partie du département. Le nord du département (de Biscarrosse à Contis) présente une érosion plus forte que le sud qui, dans l'ensemble, montre des zones moins érodées au niveau du pied de dune, marquées seulement par un abaissement du niveau de la plage. Toutefois, certains secteurs du sud présentent également un recul important du trait de côte, comme les profils L14 (Soustons-Plage) ou L18.1 (Les Colonies), ainsi que d'autres secteurs ou fronts de mer qui ne font pas l'objet de suivi dans le cadre de l'OCA tels que Messanges, Ondres, etc. La tendance pluriannuelle d'évolution du trait de côte était globalement à la stabilité dans les Landes, à l'exception de certains secteurs en érosion chronique comme Biscarrosse et Capbreton (L17 et L17.1). À l'issue de l'hiver 2013-2014, l'érosion est quasiment généralisée.

La situation en 2014 n'est pas systématiquement la plus érosive sur tous les secteurs. On constate en effet une érosion marquée lors du levé de 2010, avec des épisodes érosifs qui ont provoqué un recul plus important du trait de côte et/ou une perte de sable plus grande sur la plage sur certaines zones en Gironde et dans les Landes (G11.1 – Lacanau-Océan Zone Urbaine, L4 - Bains Sainte-Eulalie, L5 - Mimizan Nord, L10 - La Limite, L13 - La Semis et L19 - L'aérodrome).

En conclusion, les tempêtes de l'hiver 2013-2014 se caractérisent par leur nombre et le cumul d'énergie générée par les vagues sur une période de temps courte. Les conséquences sont notables sur l'érosion côtière.

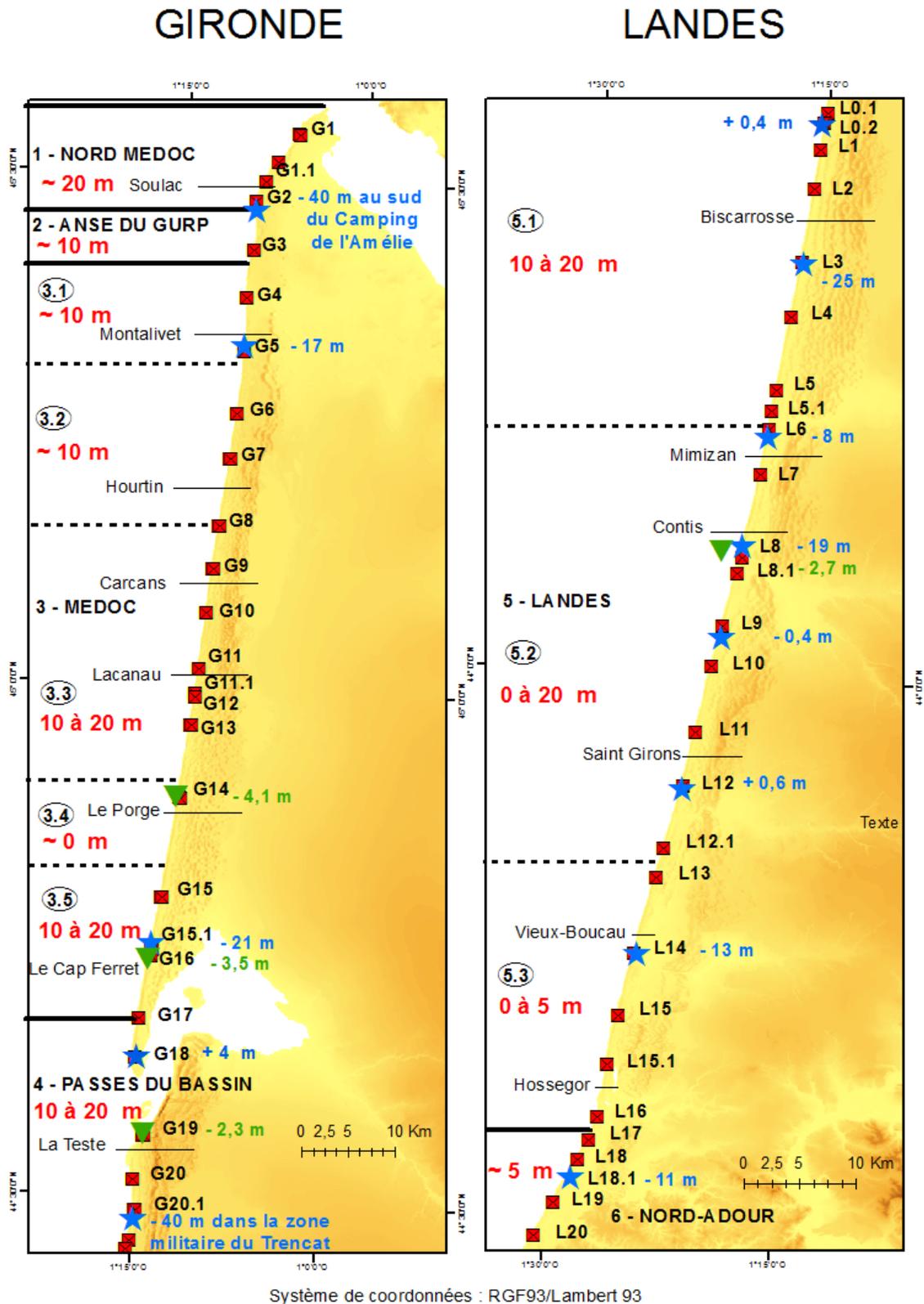


Illustration 64 : Carte de synthèse de l'érosion du trait de côte entre 2013 et 2014 sur la côte sableuse présentée par cellule et sous-cellule (encerclée) sédimentaire. Des points particuliers sont présentés en bleu pour l'évolution planimétrique et en vert pour l'évolution altimétrique. (source : Bulteau et al., 2014).

3.3. MÉTHODES D'ÉVALUATION DE L'ÉROSION DUNAIRE

Le guide méthodologique PPRL (DGPR, 2104) présente un certain nombre de méthodes permettant d'évaluer le recul maximal des dunes lors d'évènements extrêmes. Ces méthodes sont détaillées dans le rapport Desmazes *et al.* (2014a) issu de la première phase de l'étude. Cette partie a pour objectif de déterminer si les approches et outils recensés lors de la première phase peuvent être employés dans le cas de succession de tempêtes.

3.3.1. Méthodes d'observations

Observatoires du littoral

Le rapport Desmazes *et al.* (2014a) présente différents moyens mis en œuvre par le BRGM pour observer l'évolution du trait de côte. Ces suivis sont réalisés dans le cadre d'observatoires du littoral comme l'OCA (Observatoire de la Côte Aquitaine), l'OLPM (Observatoire Littoral des Pays de Monts) et le ROL Corse (Réseau d'Observation du Littoral Corse).

Ces observatoires procèdent à des levés d'indicateurs du trait de côte lors de suivi de terrain annuel ou semestriel, de numérisation d'orthophotographie ou images satellite et de mesures topographiques. Ce type de mesures permet de réaliser des bilans annuels ou saisonniers comme celui présenté dans la partie 3.2.2 « Érosion et recul du trait de cote en Aquitaine » ou la partie 2.2.2 « Évolution morphologique entre 201 et 2015 » pour le site du lido de l'Or. Le bilan d'une séquence de tempêtes ou d'un évènement isolé exceptionnel peut être dressé grâce à ces données, mais elles ne détaillent pas précisément les différents stades d'évolutions avant, pendant et après les évènements.

Pour compléter les séries de suivi du trait de côte sur le long terme, il peut être intéressant que les observatoires locaux ou régionaux aient la capacité d'intervenir pour procéder à des observations, des mesures ou des expertises après un évènement majeur, comme l'ont fait le BRGM et l'université de Perpignan dans le cadre du projet MICORE (Gervais *et al.*, 2012) ou l'OCA (Bulteau *et al.*, 2014), l'université de Bordeaux 1 (Castelle *et al.*, 2015), l'IUEM (Blaise *et al.*, 2015) lors de l'hiver 2013-2014.

Réseau tempête

L'organisation des capacités d'observation des phénomènes à l'échelle régionale permet la collecte d'informations précieuses pour comprendre et observer l'impact des tempêtes les plus fortes sur le littoral. Les travaux de ce réseau régional en Languedoc Roussillon ont été pleinement employés pour documenter l'effet des tempêtes sur le site du Petit Travers et plus particulièrement la tempête de novembre 2014 (voir partie 2.2.3. « Résultats du réseau régional « tempêtes »). Ce type de réseau permet une mise à disposition d'informations qualitatives, sans mesures spécifiques, mais l'organisation de ce type de réseau dans d'autres régions permettrait de mieux connaître l'effet des évènements extrêmes et des séquences de tempête.

Suivi en continu

Le rapport Desmazes *et al.* (2014a) citait le site atelier de Sète pour lequel le BRGM exploite un système Argus de suivi vidéo en continu du littoral. Ce type d'instrument est dédié à la recherche et à la surveillance de l'évolution du trait de côte et de la plage dans son ensemble. Il fournit de bonnes indications sur l'évolution des barres sableuses, l'érosion ou

l'accrétion du trait de côte ou du pied de dune sur des distances qui peuvent atteindre quelques kilomètres.

À l'échelle nationale, plusieurs sites sont équipés de ce type de système. Ainsi, l'Obscat (Observatoire de la côte Sableuse Catalane, opéré par le BRGM) s'est très récemment doté d'un système vidéo VM4GIS (Casagec Ingénierie) pour suivre le site du Barcarès (De la Torre *et al.*, 2015). Ce type de système VM4GIS équipe aussi les secteurs de Biarritz, Capbreton, Valras et Carnon (Le Grand Travers). À noter : les données vidéo de la station de Carnon, mise en place par le Conseil général de l'Hérault depuis 2011, n'ont pas été exploitées dans le cadre de l'étude de la tempête de novembre 2014 (Action 1) mais pourraient être utiles pour évaluer la position des barres sableuse et du trait de côte avant, pendant et après cette tempête.

À Biscarosse, un système de vidéo CamEra (développé par le National Institute of Water and Atmospheric Research, Nouvelle Zélande) est utilisé à des fins de recherche et de suivi de la plage. Ce système a permis notamment de documenter l'effet des tempêtes et l'évolution saisonnière de la plage de Biscarosse entre 2007 et 2009 (Senechal *et al.*, 2015).

3.3.2. Méthodes d'estimation

L'encart du guide PPRL (MEDDE, 2014) indique que lorsque les mesures et les observations de terrain n'existent pas ou sont trop lacunaires pour être interprétables, des méthodes d'estimation (formules empiriques ou modèles) peuvent être mises en œuvre, à condition d'être utilisées avec précaution et discutées avec soin.

Formules empiriques

Trois formules sont citées dans le guide (DGPR, 2014) : FEMA, DUROS+ et Kriebel et Dean 1993 (KD93).

Ces formules sont basées sur la mise en place d'un profil d'équilibre de la plage en fonction des conditions environnementales. Ainsi, plus les conditions hydrodynamiques sont fortes, plus le profil de plage et la dune sont érodés.

La formule DUROS+ a été conçue pour reproduire une tempête historique sur les côtes des Pays-Bas. En France, les estimations de recul seront probablement meilleures pour des secteurs de côte ayant des caractéristiques proches des Pays-Bas. Les premiers tests menés à partir de forçages théoriques sur des profils de plages aquitaines et corses par Desmazes *et al.* (2014a) ne permettent pas de conclure sur sa précision pour des cas de tempêtes réelles dont la période de retour est annuelle ou décennale. Mais dans le cadre d'une succession d'événements, il apparaît très probable que le profil final dépendra majoritairement de l'événement le plus intense subi par la plage au cours de la séquence de tempêtes. Et cette intensité devrait surtout dépendre du niveau d'eau qui est particulièrement important pour cette méthode, car il est déterminant pour positionner le point « d'attaque » de la dune.

Sur le même principe, Kriebel et Dean (1993) prennent en compte la durée de la tempête pour établir un profil d'équilibre théorique de la plage. On peut donc penser qu'une succession d'événements modestes, mais cumulant un temps d'action suffisamment long, puisse permettre d'atteindre des valeurs d'érosion non négligeables associées avec un profil d'équilibre en condition de tempête. Toutefois, si les tempêtes restent modestes, le profil d'équilibre sera aisément atteint et restera nettement moins marqué que pour un événement unique extrême. Cette méthode, issue d'une approche théorique, n'a pas encore été testée sur des cas réels français dans le cadre de ces études.

La formule FEMA est plus simple à mettre en œuvre que DUROS+ ou KD93. Elle fait un lien entre un stock de sédiments dans le cordon sableux et un niveau d'eau extrême lors d'une tempête. Ainsi, c'est le niveau d'eau et sa période de retour qui déterminent l'érosion potentielle maximale de la dune. Cette formule n'est pas spécifiquement conçue pour estimer un recul dunaire, mais plutôt pour évaluer si un cordon de la côte est-américaine sera résistant ou non à un événement extrême. Toutefois, elle a été testée sur plusieurs cas français dans l'étude de Desmazes *et al.* (2014a) et montre des résultats qui peuvent être assez cohérents avec des observations effectuées en Corse ou en Aquitaine. Elle présente l'avantage d'imposer un volume érodé à un événement, sans calculer un profil d'équilibre en lien avec les conditions (comme c'est le cas de DUROS et KD93). Mais la qualité de l'évaluation est entièrement dépendante d'une formulation empirique bâtie à partir d'observations réalisées sur la côte est-américaine.

Ainsi, si la relation entre volumes érodés et périodes de retour du niveau d'eau de la formule FEMA apparaît correcte pour un site d'étude français, des tests pourraient être envisagés pour traiter une séquence de tempêtes. Il s'agirait d'additionner l'érosion « FEMA » des tempêtes de la séquence dans le profil de plage. Cependant, en additionnant des volumes d'érosion maximisés et relativement incertains, il faut prévoir que l'erreur d'évaluation finale soit très importante.

Modèles numériques

L'encart du guide PPRL mentionne l'existence de modèles numériques permettant d'estimer les modifications morphologiques des plages et des dunes provoquées par les tempêtes. Parmi ces outils, le modèle XBeach est testé dans le cadre de la présente étude pour reproduire les effets d'une tempête unique sur la dune d'un lido languedocien. Pour le travail mené sur la plage du Petit Travers (Hérault, Action 1), des tests complémentaires ont été menés sur un profil 1D en appliquant 2 fois le scénario de la tempête de novembre 2014. Ce test (Illustration 57) montre que l'érosion de la plage et du pied de dune s'accroît respectivement de 5 m et 2 m après cette seconde tempête.

Très récemment, d'autres auteurs ont utilisé le modèle XBeach pour mieux comprendre l'effet d'une succession de tempêtes et notamment celle de l'hiver 2013-2014. Ainsi, Dissanayake *et al.* (2015) ont étudié l'érosion d'une plage de la baie de Liverpool (Angleterre) sous l'effet de 7 tempêtes successives comprises entre décembre 2013 et janvier 2014. Le modèle a été calibré grâce à des mesures réalisées juste après la première tempête de décembre 2013, puis Dissanayake *et al.* (2015) ont testé la sensibilité du modèle à la bathymétrie initiale (entre chaque tempête). Mais l'absence de mesures entre chaque événement et après la séquence de tempêtes ne permet malheureusement pas de vérifier la capacité du modèle XBeach à reproduire précisément les effets érosifs des événements de l'hiver 2013-2014 sur la plage et la dune du site d'étude de la baie de Liverpool.

Sur la Gold Coast australienne, l'année 1967 a marqué les esprits car une succession de cyclones et de tempêtes durant 6 mois a provoqué une érosion très forte du littoral sableux. Dans cette région, c'est d'ailleurs cet événement qui sert de référence pour concevoir les aménagements côtiers de protection contre l'érosion. Splinter *et al.* (2014) ont tenté de reproduire les effets de cette séquence d'événements grâce au modèle XBeach (v18) pour la plage de Narrowneck. Malgré une série d'hypothèses simplificatrices pour établir les scénarios, les résultats du modèle sont bons, car le profil de plage aérienne et l'érosion de la dune sont relativement bien reproduits (erreurs de 10 % pour le recul du trait de côte et de 21 % pour le volume érodé, Illustration 65).

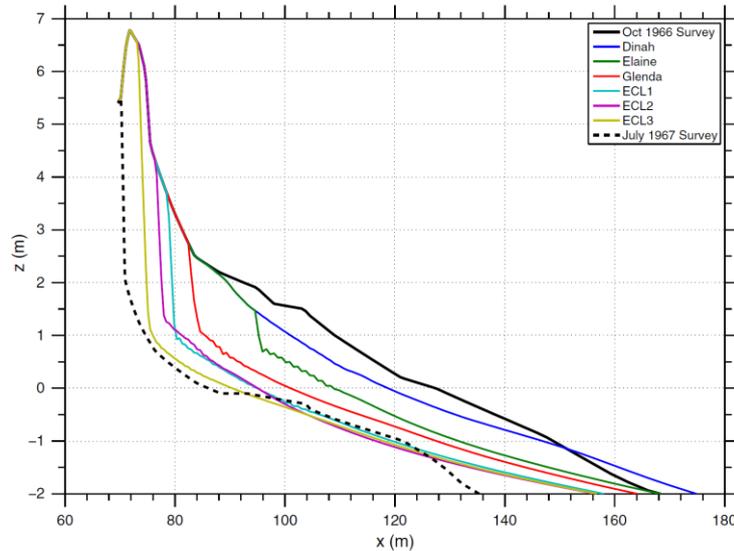


Illustration 65 : Érosions successives modélisées pour la plage de Narrowneck (Australie, Gold Coast) pendant la séquence de tempêtes de 1967. Source : Splinter et al., (2014).

De plus, les auteurs utilisent les résultats du modèle pour établir une relation simple (loi de puissance) entre la somme d'énergie (ou de puissance) des vagues et le volume érodé de la plage aérienne. Cette relation, relativement semblable à celle qui guide la formule FEMA, s'applique également à des tempêtes isolées extrêmes qui ont provoqué des érosions mesurées sur la plage de Narrowneck.

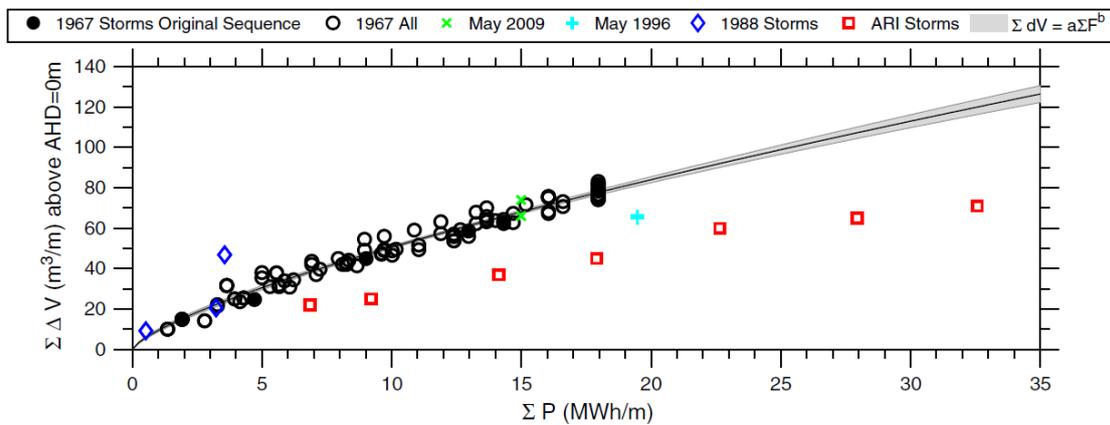


Illustration 66 : Relation entre volumes érodés (modélisés et observés) et la puissance cumulée des vagues (ΣP). Les points "1967" et "ARI" (Average Return Interval, périodes de retour de 1, 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans pour la plage de Surfer Paradise, Gold Coast) sont issus de tempêtes modélisées tandis que Mai 2009, Mai 1996 et 1988 sont des érosions observées. Source : Splinter et al., (2014).

4. Conclusions

La phase 2/B de cette étude méthodologique traitant de la détermination et de l'estimation du recul maximal des dunes lors d'évènements extrêmes était structurée en deux actions.

- Action 1 : Modélisation numérique d'un cas réaliste d'érosion dunaire

En début de projet, la concertation avec l'ONF et le Conservatoire du Littoral a permis de recenser un certain nombre de sites d'études pertinents. L'inventaire et la recherche de données disponibles aisément a favorisé le tri et l'identification du Lido de l'Or et de la plage du Petit Travers (Languedoc-Roussillon, Hérault) comme cas d'étude.

La plage du Petit Travers est située dans le Golfe d'Aigues-Mortes. C'est un secteur en érosion récurrente qui a fait l'objet d'un rechargement sableux artificiel et massif en 2007-2008 puis de travaux de renaturation de la dune en 2014-2015. Entre 2011 et 2014, le travail réalisé par le réseau régional de suivi des tempêtes a recensé 3 tempêtes fortes et potentiellement érosives. Parmi ces 3 évènements, la tempête de novembre 2014 a provoqué un recul du front dunaire du site du Petit Travers et des dégâts sur les aménagements d'accès à la plage.

Pour tenter de 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 la partie ouest de la plage, pour un secteur de 1 200 m de côté et une période comprise entre le 27/11/2014 et le 30/11/2014. L'existence d'une base de données morphologiques acquise régulièrement sur la zone d'étude a été un facteur déterminant dans le choix du site, car la connaissance de l'état avant tempête est un élément essentiel aux travaux de modélisation morphodynamique. Malheureusement, dans la base disponible, les données de 2013 ont été obtenues avant la forte tempête de décembre 2013, potentiellement impactante, de plus, la répartition des profils bathymétriques ne permet pas une bonne représentation de la morphologie pré-littorale dans un MNT. Par défaut, la morphologie initiale provient donc du MNT Litto3D issu de mesures Lidar topo-bathymétriques effectuées en 2009 et 2010. Malgré les qualités intrinsèques du MNT, il ne représente pas la situation morphologiques avant la tempête et ne permet donc pas la mise en place d'un scénario morphodynamique parfaitement réaliste pour XBeach.

Les conditions hydrodynamiques fournies en entrée du modèle ont été optimisées pour reproduire précisément les vagues. Elles sont constituées par :

- les conditions de vagues reproduites par un emboîtement de modèles Swan en mode instationnaire, prenant en compte le vent local ;
- les niveaux d'eau issus du marégraphe de Sète.

Une fois le scénario défini, des tests de sensibilité aux paramètres de réglage du modèle XBeach ont été réalisés en mode 1D. Ces tests ont montré que le modèle ne simulait pas l'érosion de l'ensemble du front dunaire avec le scénario mis en œuvre. De plus, pour répondre à ce problème particulier de simulation d'érosion de l'ensemble du front dunaire, XBeach n'est pas sensible au paramétrage pour le scénario défini. En revanche, l'érosion du haut de plage, voire du pied de dune, peut être sensible au paramètre de déferlement (γ) ou au coefficient de friction au fond (Cf).

En mode 2D, le paramétrage et le scénario retenus pour mettre en œuvre le modèle XBeach permettent de reproduire les conditions hydrodynamiques et une évolution morphologique de la plage du Petit Travers durant la tempête de novembre 2014. Les résultats des simulations montrent :

- une faible évolution relative du domaine sous-marin au niveau de la barre sableuse externe ;
- une avancée du bas de plage (isoligne 0 m IGN69) ;
- une forte érosion du haut de plage atteignant le pied de dune, mais qui n'impacte pas le front dunaire, contrairement aux observations réalisées au moment de la tempête ;
- les plus fortes évolutions morphologiques interviennent tout au long de la journée du 28 novembre, au cours de laquelle les forçages (niveau d'eau et vagues) atteignent leur pic d'intensité.

En l'absence d'un jeu de données morphologiques suffisamment complet et rapproché de l'évènement, il est difficile de qualifier précisément les résultats du modèle. Mais pour la problématique d'estimation du recul dunaire, l'érosion générée par le modèle 2D au niveau du front dunaire apparaît insuffisante, comme pour le modèle 1D. Pour expliquer cette insuffisance, l'hypothèse d'une sensibilité du modèle à la morphologie initiale a été vérifiée par d'autres tests pratiqués en 1D. Ces tests montrent que XBeach est capable de simuler l'érosion du front dunaire pour un profil initial issu de mesures réalisées en 2015, qui apparaît nettement plus érodé que le profil du MNT Litto3D (réalisé après la phase de rechargement sableux artificiel). Pour le cas du Petit Travers, ils permettent de conclure sur la sensibilité du modèle XBeach à la morphologie initiale pour évaluer le recul du front dunaire. Les travaux de Splinter *et al.* (2011) sont concordants sur ce point pour l'un des profils suivi depuis 1985 en Australie. Ainsi, la mise en place d'un jeu de données morphologiques initial représentant mieux l'état de la plage avant la tempête de novembre 2014 pourrait permettre d'améliorer sensiblement la simulation en 2D de l'érosion de la dune du Petit Travers par le modèle XBeach.

- Action 2 : Prise en compte des phénomènes de succession de tempête dans l'évaluation de l'érosion dunaire

Dans un premier temps, cette action complémentaire a permis de faire un point succinct sur la bibliographie scientifique internationale traitant de l'effet des séquences de tempête sur l'érosion littorale.

Dans un second temps, les phénomènes observés durant l'hiver 2013-2014 ont été décrits par rapport aux forçages, et plus particulièrement aux fortes houles et leur période de retour. Une analyse des données Prévimer et de la base Bobwa-X a permis de proposer des cartes des façades Manche, Mer du Nord et Atlantique présentant le nombre et la répartition des évènements de l'hiver 2013-2014 pour lesquels la hauteur significative des vagues était caractérisée par une période de retour supérieure à 1 an. La Bretagne a été touchée par 7 tempêtes de ce type, les Landes par 5 tempêtes. En Aquitaine, l'effet de cette séquence de tempêtes s'est traduit par une érosion dunaire quasi-généralisée et des valeurs de recul ponctuel atteignant 40 m. De telles valeurs dépassent largement les valeurs de recul précédemment observées par l'Observatoire de la Côte Aquitaine et recensées dans le rapport Desmazes *et al.* (2014a).

Dans un troisième temps, les méthodes d'évaluation de l'érosion dunaire L_{max} présentées dans l'encart du guide PPRL sont passées en revue pour envisager leur utilisation dans les cas de séquence de tempêtes. Les observations et les mesures sont les éléments indispensables à la connaissance du recul dunaire lié à des événements extrêmes ou aux séquences de tempêtes dans les bassins de risques littoraux soumis à l'aléa de recul du trait de côte sableux. Le rôle primordial des observatoires du trait de côte et des réseaux de suivi est mis en avant, ainsi que l'intérêt des technologies vidéo de suivi continu du littoral.

Les méthodes d'estimations sont à employer avec la plus grande prudence dans le cas de succession de tempêtes. Celles basées sur des formules empiriques de profils d'équilibre ne semblent pas particulièrement pertinentes pour répondre à la question et nécessiteraient d'être testées, puis éventuellement modifiées. La méthode FEMA, telle que présentée dans le rapport Desmazes *et al.* (2014a), peut répondre à la question en imposant un recul maximisé pour chaque tempête. Mais il conviendrait auparavant de s'assurer du réalisme de la formule qui relie l'érosion dunaire avec la période de retour de chaque tempête. Le modèle XBeach peut être employé pour reproduire une séquence de tempêtes mais il nécessite auparavant d'être correctement calibré pour le site d'étude. Dans le cas d'une plage australienne de la Gold Coast, en mode 1D, il apparaît capable de reproduire convenablement l'érosion du haut de plage et de la dune survenu au cours de l'année 1967 (Splinter *et al.*, 2014).

5. Bibliographie

- 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. Rapport BRGM/RP-59516-FR. 65 p.
- Barousseau J. P.** (2011) - Influence of mixtures of grain-size populations on the parametric and modal characteristics of coastal sands (Herault, Mediterranean Sea, France). *Journal of Sedimentary Research*, 81, p. 611-629.
- Birkemeier W. A., Nicholls R. J. et Lee G.** (1999) - Storms, storm groups and nearshore morphologic change. . Proc. Coastal Sediments '99. ASCE, New York. pp.1109-1122.
- Blaise E., Suanez, S., Stéphan, P., Fichaut, B., David, L., Cuq, V., Autret, R., Houron, J., Rouan, M., Floc'h, F., Ardhuin, F., Cancouët, R., Davidson, R., Costa, S. et Delacourt, C.** (2015) - Bilan des tempêtes de l'hiver 2013-2014 sur la dynamique de recul du trait de côte en Bretagne. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 21, (3), p. 267-292.
- Bulteau T., A. Nicolae Lerma, S. Lecacheux** (2013) - Projet Climats de houle - Phase 2 : Analyse des valeurs extrêmes de vagues le long de la côte Atlantique et en Manche. Rapport final. BRGM/RP-62730-FR, 49p., 26fig., 3 ann.
- Bulteau T., Mugica J., Mallet C., Garnier C., Rosebery D., Maugard F., Nicolae Lerma A., Nahon A., avec la collaboration de Millescamps B.** (2014) - Évaluation de l'impact des tempêtes de l'hiver 2013-2014 sur la morphologie de la Côte Aquitaine. Rapport final. BRGM/RP-63797-FR, 179 p., 135 fig., 8 tab., 2 ann.
- Castelle B., Le Corre Y. et Tomlinson R. B.** (2008) - Can the Gold Coast beaches withstand extreme events. *Geo-Marine Letters*, 28, p.p. 23-30.
- Castelle B., Marieu V., Bujan S., Ferreira S., Parisot J. P., Capo S., Senechal N. et Chouzenoux T.** (2014) - Equilibrium shoreline modelling of a high-energy meso-macrotidal multiple-barred beach. . *Marine Geology*, 347, p. 85-94.
- Castelle B., Marieu V., Bujan S., Splinter K. D., Robinet A., Sénéchal N. et Ferreira S.** (2015) - Winter 2013-2014 European windstorm clustering impact on a sandy coast: beach and dune retreat and erosive megacusps. *Geomorphology*, 238, p.135-148.
- CETMEF** (2013) - Analyse des surcotes extrême le long des côtes métropolitaines. 128 p.
- CEREMA** (2014) - CANDHIS - Observations des états de mer. Analyse des tempêtes sur le littoral métropolitain. Automne-hiver 2013-2014, 74 p.
- CETMEF, CETE Méditerranée et CETE de l'Ouest** (2009) - Vulnérabilité du territoire National aux risques littoraux. France métropolitaine. Rapport CETMEF/DELCE. 163 p.
- Ciavola P. et Stive M. J. F.** (2012) - Thresholds for storm impacts along European coastlines: introduction. *Geomorphology* 143 -144, p.1-2.
- Coco G., Senechal N., Rejas A., Bryan K. R., Capo S., Parisot J. P., Brown J. A. et MacMahan J. H. M.** (2014) - Beach response to a sequence of storms. *Geomorphology* 204, p. 493-501.

Davidson M. A., Splinter, K. D., Turner, I. L., (2013.) - A simple equilibrium model for predicting shoreline change. *Coastal Engineering*, 73, p. 191-202.

Davidson M. A., Lewis R. P. et Turner I. L. (2010) - Forecasting seasonal to multi-year shoreline change. *Coastal Engineering* 57, p.p. 620-629.

De la Torre Y. et Balouin Y. (2012) - Mise en oeuvre opérationnelle du « Réseau Tempête » sur le littoral du Languedoc-Roussillon, BRGM/RP-60694-FR. 97p, 15 ill. 5 ann.

De la Torre Y., Balouin Y., Mouroux X., Belon R. avec la collaboration de Maldan F. , Longueville F., Sibert V., Dailoux D. et Sabarich, L. (2015 a) - Observatoire de la côte sableuse catalane – OBSCAT : rapport technique d'année 2. Rapport final. BRGM/RP-64945-FR. 140 p.

De la Torre Y., Belon R., Balouin Y. et Bodéré G. (2015 b) – « Réseau Tempête » Languedoc-Roussillon 2013-2014. Rapport final. BRGM/RP-64178-FR. 35 p.

De Vet P. L. W., McCall R. T., Den Bieman J. P., Stive M. J. F. et Van Ormondt M. (2015) - Modelling dune erosion, overwash and breaching at Fire Island (NY) during Hurricane Sandy. *Proceedings Coastal Sediments (San Diego, CA)*. 10 p.

Desmazes F., Muller H., Garcin M., Belon R., Baudouin V. avec la collaboration de Nicolae Lerma A. (2014 a) - Méthodologie de détermination du recul maximal des dunes pour les événements extrêmes BRGM/RP-63157-FR. 131 p., 97 fig., 13 tabl.

Desmazes F., Muller H. et Nicolae Lerma A. (2014 b) - Méthodologie de détermination du recul maximal des dunes pour les événements extrêmes. Phase 2/A. BRGM/RP-64184-FR. 58 p., 33 fig., 8 tabl.

DGPR (2014) - Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux. 169 p.

Dissanayake P., Brown J. et Karunarathna H. (2014) - Modelling storm-induced beach/dune evolution: Sefton coast, Liverpool Bay, UK. *Marine Geology*, 357, p. 225-242.

DREAL Languedoc-Roussillon (2014) - Analyse de la tempête marine sur le littoral Languedoc-Roussillon du 28 novembre au 1er décembre 2014. 52 p.

Ferreira O. (2005) - Storm groups versus extreme single storms: predicted erosion and management consequences. *Journal of Coastal Research* SI 42, p. 221-227.

Gervais M. (2012) - Impacts morphologiques des surcotes et vagues de tempêtes sur le littoral méditerranéen. Perpignan, Université Perpignan. 401 p.

Gervais M., Balouin Y. et Belon R. (2012) - Morphological response and coastal dynamics associated with major storm events along the Gulf of Lions Coastline, France. *Geomorphology*, 143-144, p. 69-80.

INGEROP (2013) - Lido du Petit et du Grand Travers à Mauguio-Carnon. Aménagement et renaturation d'un site naturel remarquable. *IDRRIM*.

Karunarathna H., Pender D., Ranasinghe R., Short A. D. et Reeve D. E. (2014) - The effect of storm clustering on beach profile variability. *Marine Geology* 348, p. p103-112.

Kriebel D. L. et Dean R. G. (1993) - Convolution method for timedependent beach-profile response. *J. Waterw., Port, Coastal, Ocean Eng.*, 119, (2), p. 204-226.

Masselink G. et van Heteren S. (2013) - Response of wave-dominated and mixed-energy barriers to storms. *Marine Geology*, 352, p.p 321-347.

McCall R. T., Van Thiel de Vries J., Plant N., Van Dongeren A., Roelvink J., Thompson D. et Reniers A. (2010) - Two-dimensional time dependent hurricane overwash and erosion modeling at Santa Rosa Island. *Coastal Engineering*, 57, p. 668-683.

Météreau V. (2014) - Identification et qualification des dunes domaniales susceptibles de jouer un rôle d'obstacle aux submersions marines. ONF. 106 p.

Miller J. K. et Dean R. G. (2004) - A simple new shoreline change model. *Coastal Engineering* 51, p.p. 531-556.

Nicolae Lerma A., Bulteau T. avec la collaboration de Mugica J. (2014) - Caractérisation des événements de tempête de l'hiver 2013-2014 pour la côte aquitaine. Rapport BRGM/RP-64020-FR.

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

Raynal O. et Certain R. (2013) - Plan de gestion des sédiments du Languedoc-Roussillon. Elaboration des éléments sédimentologiques de référence du PGSLR : Evaluation du bilan sédimentaire et proposition de gestion des sédiments par cellule sédimentaire. UPVD et DREAL LR. 56 p.

Raynal O., Certain R., Brunel C., Aleman N., Robin N., Guerinel B. et Montel L. (2015) - LITTOSIS, Analyse volumétrique et granulométrique du prisme sableux littoral du Languedoc-Roussillon. Cefrem, Dreal LR. 46 p.

Senechal N., Coco G., Castelle B. et Marieu V. (2015) - Storm impact on the seasonal shoreline dynamics of a meso- to macrotidal open sandy beach (Biscarrosse, France). *Geomorphology*, 228, p. 448-461.

SHOM (2014) - Référence Altimétrique Maritime, 114 p.

SHOM (2014) - Caractérisation de 7 événements de tempête de l'automne-hiver 2013-2014 à partir des données disponibles au SHOM, N° 001/2014, 31 p.

SHOM, CETMEF (2012) - Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantiques). 160 p.

Splinter K. D., Strauss D. et Tomlinson R. B. (2011) - Can we reliably estimate dune erosion without knowing pre-storm bathymetry ? 20th Australian Coastal and Ocean Engineering Conference, Coasts and Ports 2011. P. C. Pattiaratch. Engineers Australia.

Splinter K. D., Carley J. T., Golshani A. et Tomlinson R. (2014) - A relationship to describe the cumulative impact of storm clusters on beach erosion. *Coastal Engineering*, 83, p. 49-55.

Vanroye C. (2008) - La protection du littoral du Golfe d'Aigues-Mortes. Xèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil Sophia Antipolis, Paralia. 303-312 p.

Yates M. L., Guza R. T. et O'Reilly W. C. (2009) - Equilibrium shoreline response: Observations and modeling. . *Journal of Geophysical Research*, 114, p. C09014.

Yates M. L., Guza R. T., O'Reilly W. C., Hansen J. E. et Barnard P. L. (2011) - Equilibrium shoreline response of a high wave energy beach. *Journal of Geophysical Research*, 116, p. C04014.

Annexe 1

Configuration du modèle XBeach


```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% XBeach parameter settings input file
%%%
%%%
%%%
%%% date:      29-Jan-2014 10:49:55
%%%
%%% function:  xb_write_params
%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% General
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Grid parameters
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
depfile      = bathy_art2.dep
posdwn      = -1
nx          = 468
ny          = 237
vardx      = 1
xfile       = x_art.dep
yfile       = y_art.dep
xori        = 782914.30
yori        = 6272287.12
alfa        =    108.77
thetamin    = 0
thetamax    = 180
dtheta      = 10
%%% Model time
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Morphology parameters
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
morfac      = 1
morstart    = 100
%%% Tide boundary conditions
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%% Wave boundary condition parameters
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%% Wave-spectrum boundary condition parameters
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

front      = 1
left       = 0
right      = 0
back       = 0
ARC        = 1
order      = 2
break      = 3

```

```
wci      = 0
roller   = 1
beta     = 0.15
gamma    = 0.55
gammamax = 2.
alpha    = 1.
delta    = 0.0
n        = 10.
D50      = 0.00019

tstop = 212400
taper = 100
tstart = 1200
tintg = 600
tintp = 1
tintm = 600
instat = 41
nspectrumloc = 2
bcfile = loclist_real_v1.txt
random = 1
rt = 7200
dtbc = 0.5
tideloc      = 2
zs0file      = total_level_real_v1.txt
paulrevere = 1
cf = 0.005
smax = 1
%% Output variables
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

outputformat = netcdf
tunits = seconds since 2014-11-27 12:00:00

nglobalvar      = 9
H
zs
zs0
zb
u
v
ue
ve
sedero

nmeanvar = 2
H
zs
```



Centre scientifique et technique
Direction Risques et Prévention
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr