



Méthodologie de détermination et d'estimation du recul maximal des dunes lors d'évènements extrêmes

Phase 2/A.

Rapport final
BRGM/RP-64184-FR
décembre 2014


Méthodologie de détermination et d'estimation du recul maximal des dunes lors d'évènements extrêmes Phase 2/A.

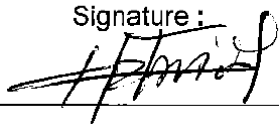
Rapport final

BRGM/RP-64184-FR
Septembre 2014

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM convention MEDDE/DGPR 2014

F. Desmazes, H. Muller et A. Nicolae Lerma

<p>Vérificateur :</p> <p>Nom : D. Idier</p> <p>Fonction : RSP RIS 24</p> <p>Date : 11/02/2015</p> <p>Signature : </p>

<p>Approbateur :</p> <p>Nom : H. Foucher H. FABRIOL</p> <p>Fonction : Directeur DRP - Adjoint</p> <p>Date : 10/03/15</p> <p>Signature : </p>

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

Mots-clés : Érosion littoral, Méthodologie, Dune côtière, Recul maximal.

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

Desmazes F., Muller H. et Nicolae Lerma A. (2014) – Méthodologie de détermination et d'estimation du recul maximal des dunes lors d'évènements extrêmes, Phase 2/A. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-64184-FR, 58 p., 33 fig., 8 tabl.

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.

Une première phase de travail menée en 2013 pour le compte du MEDDE/DGPR a montré que les mesures et les quantifications *in situ* de ces reculs exceptionnels sont rares et ponctuelles. C'est pourquoi il est indispensable de développer des méthodes estimatives complémentaires aux observations de terrain et aux mesures historiques. Cette deuxième phase de travail programmée sur deux ans est mise en œuvre dans le cadre de la convention de partenariat établi en 2014 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. Le présent rapport porte sur la phase A qui consiste à tester le modèle XBeach sur des cas simplifiés de profils perpendiculaires à la côte (1D). La phase B aura pour objectif de tester le modèle pour un cas réel de dune.

La première année d'étude (phase A) est constituée de 4 actions :

- action 1 : Contribution à la mise en cohérence des actions menées sur les dunes ;
- action 2 : Bibliographie portant sur les résultats du modèle Xbeach pour l'érosion dunaire ;
- action 3 : Inventaire des outils de modélisation pertinents pour qualifier les conditions hydrodynamiques impactant les dunes ;
- action 4 : Simulation numérique XBeach d'érosion dunaire pour des cas idéalisés.

Action 1

L'action 1 participe à la mise en cohérence des actions menées sur les dunes par les différents organismes intervenant à l'échelle nationale. Elle a permis d'initier des échanges entre le BRGM, l'ONF, le CEREMA et le Conservatoire du Littoral. Ces échanges se sont formalisés au cours de deux réunions tenues en 2014.

Action 2

Le modèle XBeach (eXtreme Beach behavior) est un outil de modélisation numérique morphodynamique de la zone littorale. La synthèse bibliographique a montré que ses caractéristiques lui permettent de reproduire certains des phénomènes se déroulant pendant les tempêtes, et notamment l'érosion dunaire. Sa particularité réside dans l'amélioration de la modélisation du jet de rive qui prend en compte les effets des ondes infra-gravitaires. Le modèle profite d'un développement rapide et suscite actuellement l'engouement de la communauté scientifique. Les projets de recherche ambitieux comme le projet européen FP7 MICORE l'ont utilisé pour le tester sur des sites littoraux européens, calibrer précisément les nombreux paramètres de réglage et tenter de développer des systèmes opérationnels de suivi de l'impact des tempêtes.

Action 3

La détermination des conditions hydrodynamiques prises en compte pour simuler l'érosion dunaire est une étape importante avant la mise en œuvre du modèle. Les conditions d'agitation et le niveau de la mer sont les deux forçages primordiaux à connaître. Plusieurs approches ont été présentées pour décrire les forçages. Dans la méthode testée pour estimer le recul maximal avec XBeach, les forçages marins sont introduits sous forme de niveaux d'eau et de conditions de vague au large de période de retour d'occurrence comprise entre 1 an et 100 ans. En faisant l'hypothèse que les pics d'intensité interviennent simultanément, la méthode utilisée propose des conditions de forçage maximisantes. Elle a donc vocation à observer l'impact de conditions marines extrêmes sur les cordons dunaires.

Action 4

La présente étude a permis de mettre en œuvre le modèle XBeach pour 6 cas simplifiés représentant des plages que l'on peut rencontrer sur les différentes façades maritimes de métropole (Manche, Atlantique, Méditerranée). Pour ces 6 cas, les paramètres du modèle n'ont pas été modifiés afin de tester simplement le fonctionnement « par défaut » du modèle sur une série de cas diversifiés.

Les conditions de forçages de vagues et de niveau d'eau ont été estimées selon la méthode définie par l'action 3. Quatre scénarios de forçages sont testés pour chacun des 6 cas simplifiés. Les premiers résultats remplissent les objectifs initiaux de l'étude qui consistaient à tester la mise en place du modèle XBeach sur différents types de morphologies et à observer 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 montrent 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.

Avec ces scénarios et paramétrisations par défaut de XBeach, les reculs de dunes atteignent quelques mètres et apparaissent qualitativement réalistes. Pour une application à des cas réels, objet de la phase B ce projet, l'étape suivante consiste à calibrer les paramètres de XBeach à partir de données et d'observations *in situ*.

Remerciements

Pour ce travail, la mise en œuvre des dernières évolutions du modèle XBeach a été facilitée par les conseils avisés de l'équipe hollandaise de DELTARES, en charge du développement du modèle. Cette équipe est vivement remerciée par les auteurs.

De plus, M. Héquette et le Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences de l'université du Littoral Côte d'Opale sont également remerciés pour la mise à disposition de données topographiques.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Contribution à une mise en cohérence des actions menées sur les dunes.....	13
2.1. RÉUNION BRGM-ONF DU 13/02/2014	13
2.2. RÉUNION « RISQUES LITTORAUX ET CORDONS DUNAIRES » ORGANISÉE PAR LA DGPR LE 16/05/2014.....	13
3. Utilisation du modèle Xbeach.....	15
3.1. PRÉSENTATION DU MODÈLE	15
3.2. APPLICATIONS RÉCENTES.....	16
3.2.1. Côte Adriatique	16
3.2.2. Mer d'Irlande.....	17
3.2.3. Côte hollandaise	18
3.3. BILAN	20
4. Conditions hydrodynamiques de tempête.....	21
4.1. LES FACTEURS DE FORÇAGE.....	21
4.2. MÉTHODE DE DÉTERMINATION DES FORÇAGES.....	22
4.3. MÉTHODES D'ESTIMATION DES PARAMÈTRES HYDRODYNAMIQUES.....	23
4.3.1. Prise en compte des niveaux d'eau (marée prédite + surcote).....	23
4.3.2. Prise en compte des vagues au large	25
4.3.3. Prise en compte des vagues à la côte.....	26
4.4. BILAN	27
5. Simulations numériques d'érosion dunaire avec le modèle Xbeach 1D	29
5.1. MISE EN ŒUVRE DE XBEACH	29
5.2. PRÉSENTATION DES CAS SIMPLIFIÉS	31
5.3. CAS NORD MÉDOC.....	32
5.4. CAS LANDES	35
5.5. CAS CORSE ORIENTALE.....	38
5.6. CAS LANGUEDOC.....	40
5.7. CAS PERTUIS CHARENTAIS	44
5.8. CAS NORD-PAS-DE-CALAIS.....	48

5.9. BILAN	52
6. Conclusion.....	55
7. Bibliographie	57

Liste des illustrations

Figure 1 : Exemple de simulations de reculs de dune confrontées aux levés de terrain post-tempête sur la côte Adriatique Italienne. À gauche, recul simulé sous l'effet d'une forte surcote, à droite sous l'effet de fortes vagues. Source : Armaroli <i>et al.</i> , (2013).	16
Figure 2 : Comparaisons entre les profils perpendiculaires à la côte mesurés et prédits par Xbeach 2D (en bleu : profils post-tempête mesurés, en rouge : profils post-tempête modélisés et en noir profils initial). Source : Dissanayake <i>et al.</i> , (2014).	18
Figure 3 : Comparaisons entre les profils post-tempêtes issus du Système Cosmos (en bleu) avec les observations post-tempête (en rouge) de la tempête du 3/01/1976 à (a) Julianadorp, (b) Bergen aan Zee et (c) Bloemendaal. Source : Van der Werff <i>et al.</i> , (2011).	19
Figure 4 : Volumes érodés pour l'ensemble de la zone Egmond en fonction de la distance le long de la côte, au cours de la tempête du 3 janvier 2012 pour différentes valeurs du paramètre synthétique DS (d'après de Winter <i>et al.</i> , 2014).	20
Figure 5 : Carte des niveaux d'eau (m/IGN69) de périodes de retour 10 ans pour la côte Aquitaine. Source : SHOM/CETMEF (2012).	24
Figure 6 : Variations des paramètres de niveau d'eau, Hrms (moyenne quadratique des hauteurs de vague) et Qb (pourcentage de vagues déferlées) modélisé par XBeach du large à la côte. Cas Landes.	26
Figure 7 : Carte de présentation des cas idéalisés étudiés et profils topobathymétriques perpendiculaires de la plage et des dunes associées.	31
Figure 8 : Carte de synthèse pour des conditions de période de retour : Niveau d'eaux 10 ans, Hs 10 ans à partir des données disponibles (source : SHOM/CETMEF 2012, CETMEF 2013, Bulteau <i>et al.</i> (2013), Morellato et Benoit, 2010).	32
Figure 9 : Profil topo-bathymétrique initial du cas Nord-Médoc et cote de la surface libre modélisée par XBeach intégrant les ondes infragravitaires.	33
Figure 10 : Exemple de séries temporelles de niveaux d'eau pour la côte Aquitaine (Nord Médoc). La courbe bleu correspond à un signal de marée de coefficient 115. Les autres courbes correspondent à une marée de coefficient 100, dont la valeur maximale de niveau d'eau est respectivement de période de retour 10, 50 et 100 ans. Source : SHOM/CETMEF (2012).	33
Figure 11 : Profils topographiques simulés par le modèle XBeach 1D pour les 5 scénarios du cas Nord Médoc.	34
Figure 12 : Érosion dunaire simulées par le modèle XBeach 1D pour le cas Nord Médoc.	35
Figure 13 : Profil topo-bathymétrique initial du cas Landes et cote de la surface libre modélisée par XBeach.	36
Figure 14 : Profils topographiques simulés par le modèle XBeach 1D pour les 4 scénarios du cas Landes.....	37
Figure 15 : Érosion dunaire simulées par le modèle XBeach 1D pour le cas Landes.....	37

Figure 16 : Profil topo-bathymétrique initial du cas Corse orientale et cote de la surface libre modélisée par XBeach.....	38
Figure 17 : Profils topographiques simulés par le modèle XBeach 1D pour les 4 scénarios du cas Corse orientale.....	39
Figure 18 : Érosion de la plage et de la dune, simulés par le modèle XBeach 1D pour les 4 scénarios du cas Corse orientale.....	40
Figure 19 : Profil topo-bathymétrique initial du cas Languedoc et cote de la surface libre modélisée par XBeach.....	41
Figure 20 : Profils topographiques simulés par le modèle XBeach 1D pour les 4 scénarios du cas Languedoc.....	42
Figure 21 : Évolution temporelle simulée par XBeach pour le profil « Languedoc » scénario 4.	43
Figure 22 : Évolution de la plage émergée dans la zone sud du Lido de Sète avec les tempêtes T1 à T8. Pour chaque tempête (vignette), les flèches montrent les changements verticaux opérés entre la situation initiale (en gris) et la situation finale post-tempête (en noir). (Le sigle « BF » signifie beachface – bas de plage). Source : Gervais, 2012.	44
Figure 23 : Profil topo-bathymétrique initial du cas Pertuis charentais et cote de la surface libre modélisée par XBeach.....	45
Figure 24 : Carte des hauteurs significatives aux abords et dans la zone des Pertuis charentais, simulées par le modèle Swan. On distingue dans l'encart en haut à droite la variabilité dans le temps des conditions de niveaux d'eau et de Hs pour trois points du domaine. ...	46
Figure 25 : Profils topographiques de la plage et de la dune, simulés par le modèle XBeach 1D pour les 4 scénarios du cas Pertuis charentais.....	47
Figure 26 : Évolution temporelle simulée par XBeach pour le profil « Pertuis Charentais » et le scénario 4.....	47
Figure 27 : Arasement du cordon dunaire provoqué par le débordement. Photo prise après le passage de Xynthia. Source : Cayatte, 2010.....	48
Figure 28 : Profil topo-bathymétrique initial du cas Nord-Pas-de-Calais et cote de la surface libre modélisée par XBeach.....	49
Figure 29 : Profils topographiques simulés par le modèle XBeach 1D pour les 4 scénarios du cas Nord-Pas-de-Calais.....	50
Figure 30 : Érosion dunaire simulées par le modèle XBeach 1D pour le cas Nord-Pas-de-Calais.....	50
Figure 31 : Évolution temporelle du pied de dune (en haut) et de la plage (en bas) simulée par XBeach pour le profil « Nord-Pas-de-Calais » et le scénario 4.	51
Figure 32 : Profils topographiques réalisés avant/après la tempête de mars 2007 sur le site de la Dune Dewulf. Source : Maspataud (2011).....	52
Figure 33 : Profils topographiques réalisés avant/après le coup de vent de mars 2008 sur le site de la Dune Dewulf. Source : Maspataud (2011).	52

Liste des Tableaux

Tableau 1 :	Récapitulatif des principaux réglages du modèle XBeach mis en œuvre pour les cas simplifiés.	30
Tableau 2 :	Conditions de forçages hydrodynamiques retenues pour les simulations.	32
Tableau 3 :	Scénarios mis en place pour le cas Nord Médoc et indicateurs de l'évolution de la dune simulés par XBeach.....	34
Tableau 4 :	Scénarios mis en place pour le cas Landes et indicateurs de l'évolution de la dune simulée par XBeach.	36
Tableau 5 :	Scénarios mis en place pour le cas Corse orientale et indicateurs de l'évolution de la dune simulée par XBeach.	39
Tableau 6 :	Scénarios mis en place pour le cas Languedoc et indicateurs des évolutions de la dune et de la berme simulées par XBeach.	41
Tableau 7 :	Scénarios mis en place pour le cas Pertuis charentais et indicateurs de l'évolution de la dune simulée par XBeach.	45
Tableau 8 :	Scénarios mis en place pour le cas Nord-Pas-de-Calais et indicateurs de l'évolution de la dune simulés par XBeach.....	49

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, 2013), 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.

L'aléa de submersion marine correspond à une inondation temporaire des zones basses côtières par la mer. Les milieux dunaires et les cordons littoraux peuvent être affectés par les trois modes de submersions : submersion par débordement au-dessus du cordon dunaire, submersion par franchissement de paquets de mer liés aux vagues et enfin submersion de l'arrière-pays en cas de rupture de la dune. Actuellement, des travaux spécifiques sont menés par l'ONF et le CEREMA pour évaluer cet aléa sur les zones domaniales gérées par l'ONF. Ces travaux sont réalisés dans le cadre de la Mission d'Intérêt Général (MIG) Risques de l'ONF. Ils visent à identifier et à cartographier les secteurs d'arrière-dunes sensibles à la submersion et les cordons dunaires domaniaux qualifiés de « peu robustes » face aux événements météo-marins. Ces travaux ont fait l'objet d'échanges et d'informations inter-organismes au cours de l'année 2014 pour coordonner les approches retenues avec le travail méthodologique mené par le BRGM dans le cadre de la présente étude.

L'aléa de 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 numérique 1D, reproduisant les processus perpendiculaires à la côte ou des modèles numériques 2D plus complexes. La dernière partie de cette étude méthodologique avait pour but de proposer des pistes de travail pour la réalisation des PPRL. La première piste de travail consiste à établir une grille d'évaluation initiale de l'environnement dunaire, établissant un premier niveau de sensibilité à l'érosion. Différentes étapes de travail sont ensuite proposées pour établir le recul dunaire maximal L_{max} dans le cadre d'un 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 A) est de tester le modèle XBeach pour des cas simplifiés perpendiculaires à la côte (1D). La seconde année (Phase B) aura pour but de mettre en place un modèle numérique pertinent sur un cas réel.

La première année d'étude (phase A), objet de ce rapport, est constituée de 4 actions :

- action 1 : Contribution à la mise en cohérence des actions menées sur les dunes ;
- action 2 : Bibliographie portant sur les résultats du modèle Xbeach pour l'érosion dunaire ;
- action 3 : Inventaire des outils de modélisation pertinents pour qualifier les conditions hydrodynamiques impactant les dunes ;
- action 4 : Simulation numérique XBeach d'érosion dunaire pour des cas idéalisés.

Après un bilan succinct de l'action 1 dans le deuxième chapitre, le modèle et ces applications récentes pour l'érosion dunaire seront rapidement présentés dans un chapitre de synthèse bibliographique. Le quatrième chapitre sera consacré à la description des conditions hydrodynamiques qui sont utilisées par le modèle pour simuler le recul dunaire. Ensuite, les résultats des simulations numériques réalisées pour 6 cas simplifiés de plages seront présentés. Ces cas simplifiés ne sont pas strictement représentatifs de façades maritimes ou de territoires, mais correspondent à des plages rencontrées en Méditerranée, Atlantique et Manche-Mer du Nord.

2. Contribution à une mise en cohérence des actions menées sur les dunes

Actuellement, des travaux sont menés par différents établissements publics sur la question des risques naturels associés aux côtes basses sableuses dunaires. Le BRGM travaille sur la problématique des processus hydrosédimentaires et du recul L_{max} (guide PPRL), l'ONF intervient sur la question des risques de submersion des zones basses d'arrière-dunes dans le cadre de la Mission d'Intérêt Général (MIG) « Prévention des Risques Naturels » et le CEREMA est sollicité par la DGPR pour produire un état de l'art synthétique sur le fonctionnement des cordons dunaires et leurs rôles dans la prévention des risques et le maintien du trait de côte. Afin d'harmoniser les approches, de coordonner les tâches et de faire des propositions concertées à la DGPR pour les actions futures, Il est apparu nécessaire de procéder à des échanges techniques tout au long de cette étude.

2.1. RÉUNION BRGM-ONF DU 13/02/2014

En 2014, les premiers échanges ont eu lieu entre le BRGM et l'ONF lors d'une rencontre organisée le 13/02/14 dans les locaux du BRGM à Pessac (33) dans le cadre d'échanges régulièrement organisés entre les partenaires de l'Observatoire de la Côte Aquitaine (OCA). La réunion a permis à l'ONF de présenter l'avancement des travaux menés sur le domaine patrimonial dunaire qu'il gère. Ces travaux ont permis de repérer et de cartographier les cordons dunaires qui sont susceptibles de s'opposer à une submersion marine. Ces « cordons-obstacles » sont situés entre le trait de côte et une zone littorale « basse ». Ensuite, un seuil lié à la largeur et à l'altitude du cordon permet de distinguer les cordons « très robustes » de 4 classes de cordons plus sensibles (dits « robuste », « peu robuste », « très peu robuste » et « faible »). Les cordons dits « faibles » ont une altitude maximale inférieure au niveau d'eau centennal. Des tests cartographiques préalables réalisés à partir de données Lidar (IGN) ont permis à l'ONF d'estimer que sur l'ensemble de son domaine patrimonial, 79 % des cordons-obstacles étaient « très robustes » et 10 % étaient « faibles ».

À cette occasion, le BRGM a présenté les travaux menés en 2013 pour le compte de la DGPR lors de la première phase de l'étude méthodologique pour la détermination et l'estimation du recul maximal des dunes lors d'évènements extrêmes (Desmazes *et al.*, 2014).

Ces échanges ont montré les convergences entre les travaux de l'ONF et du BRGM sur la question de la résistance des cordons dunaires aux évènements extrêmes. Ainsi, l'estimation du recul maximal lors d'un évènement extrême est un élément d'information qui pourrait intervenir dans la définition du seuil de robustesse utilisé par l'ONF dans la cartographie des classes de cordons-obstacles.

2.2. RÉUNION « RISQUES LITTORAUX ET CORDONS DUNAIRES » ORGANISÉE PAR LA DGPR LE 16/05/2014

Les échanges techniques se sont poursuivis en mai 2014 à l'occasion d'une réunion organisée à Paris par la DGPR entre les différents organismes travaillant pour le compte du MEDDE sur le sujet des cordons dunaires littoraux : BRGM, CEREMA, Conservatoire du Littoral et ONF.

Cette rencontre a permis au BRGM de présenter l'étude méthodologique menée en 2013 sur le recul maximal des dunes lors d'évènements extrêmes (Desmazes *et al.*, 2014).

L'ONF a ensuite présenté l'avancement des travaux menés dans le cadre de la MIG « Prévention des Risques Naturels » sur les « cordons dunaires-obstacles ». La typologie employée pour qualifier les dunes a été légèrement modifiée depuis la réunion du 13/02/14 en distinguant les cordons « très robustes », dont l'altitude dépasse le niveau marin centennal + 1 m sur une largeur supérieure à 20 m, les cordons « transparents », dont l'altitude est inférieure au niveau marin centennal, et les autres cas, regroupés dans la classe « cordons vulnérables ». Parallèlement à cette phase de typologie et de cartographie des cordons-obstacles, l'ONF souhaitait mettre en place un programme de suivi de ces dunes et commençait à réfléchir au protocole à employer.

En 2013, le CEREMA a apporté son soutien à l'ONF en fournissant des données géographiques sur les zones littorales basses. De plus, dans le cadre de la production d'une base de données sur les brèches côtières affectant les ouvrages de protection, les événements recensés touchant les cordons dunaires ont été distingués. En 2014, le CEREMA a prévu de réaliser une étude traitant des cordons dunaires et de leur rôle dans la prévention des risques côtiers.

Le Conservatoire du Littoral, pour sa part, doit gérer un certain nombre de terrains littoraux bordés par des cordons dunaires. Comme l'ONF, il constate que ces environnements naturels contribuent à la prévention des risques littoraux. Il indique que les environnements naturels ne sont ni des ouvrages, ni des infrastructures et qu'à ce titre, ils ne sont pas clairement pris en compte par la loi GEMAPI. C'est pourquoi le Conservatoire du Littoral propose un complément au décret d'application en cours d'élaboration, dans l'article traitant des systèmes d'endiguement et de protection contre les inondations.

Cette réunion a mis en avant l'intérêt partagé par ces quatre organismes aux problématiques de submersions marines pour les côtes basses sableuses. Dans les secteurs dunaires, la connaissance de l'aléa d'érosion est aussi un élément à prendre en compte dans l'estimation des risques de submersion. L'identification des sites sensibles et/ou mal connus par les gestionnaires de littoraux dunaires patrimoniaux est un élément à prévoir en vue de la seconde phase de cette étude qui vise à traiter un cas réel.

3. Utilisation du modèle Xbeach

3.1. PRÉSENTATION DU MODÈLE

Le modèle XBEACH (eXtreme Beach behavior) est un outil de modélisation numérique morphodynamique de la zone littorale. Ses caractéristiques lui permettent de reproduire certains des phénomènes se déroulant pendant les tempêtes, et en particulier l'érosion dunaire. XBeach est un modèle ouvert et gratuit. Le code source, documents et cas tests sont disponibles sur le site www.xbeach.org. Il a été développé grâce aux fonds et au soutien de l'US Army Corps of Engineers et d'un consortium regroupant l'UNESCO-IHE, Deltares (Delft Hydraulics), l'Université de Technologie de Delft et l'Université de Miami.

Le développement de cet outil est apparu nécessaire aux américains après le passage destructeur de l'ouragan Ivan (2004). L'objectif était de mieux prévoir les effets des événements de tempête sur les côtes sableuses et les cordons dunaires. C'est un outil en progrès constants qui est utilisé par une communauté croissante d'utilisateurs et un groupe de développeurs dynamiques. Il simule les processus physiques qui dominent le comportement des systèmes plage/dune en période de tempête (Roelvink *et al.*, 2009). Ce modèle permet de traiter des phénomènes côtiers pour des zones dont l'extension maximale est de quelques centaines de mètres, avec une résolution minimale de l'ordre du mètre.

Le modèle peut être utilisé en 1D, c'est-à-dire selon un profil cross-shore, perpendiculaire au trait de côte. Mais il est surtout conçu pour reproduire les phénomènes en mode 2DH (prise en compte de processus parallèles à la côte et des processus verticaux intégrés sur la verticale). Il résout les équations de propagation des vagues, de Saint-Venant instationnaire, de transport et de conservation du sédiment (évolution du fond). Ces équations peuvent être couplées de différentes manières

Sa particularité réside entre autres dans l'amélioration de la modélisation du jet de rive qui prend en compte les effets des ondes infra-gravitaires. La circulation littorale dans la frange côtière est calculée par le modèle ce qui permet d'évaluer le transport sédimentaire et les évolutions morphologiques : érosion, ensablement, submersion de dunes ou de récifs au cours d'événements météorologiques intenses. Les phénomènes pris en compte dans l'équation d'onde des vagues appelée aussi équation d'équilibre d'action des ondes courtes, sont la propagation des vagues, la réfraction bathymétrique, la réfraction due aux courants et le déferlement. La diffraction n'est pas résolue.

Pour ce qui est de l'évolution de la morphologie, le phénomène d'avalanche des grains de sable est pris en compte au cours des épisodes d'érosion de dune engendrés par les tempêtes. De plus, XBeach permet de traiter différentes classes sédimentaires et de définir des zones non érodables. Il offre la possibilité de considérer les processus liés à la nappe phréatique; ce qui permet de tenir compte des phénomènes d'infiltration et d'exfiltration qui jouent un rôle dans l'intensification ou la réduction des courants dans la zone de jet de rive.

Ce type de modèle reste un code de recherche en développement et en phase d'amélioration, mais il permet cependant un travail spécifique de simulation de l'érosion de la dune en période de tempête.

3.2. APPLICATIONS RÉCENTES

Plusieurs études de modélisations morphodynamiques des plages et des dunes soumises à des événements de tempêtes ont été réalisées sur différents cas réels avec Xbeach depuis son premier cas d'application : l'île de Santa Rossa en Floride pendant l'ouragan Ivan en 2004 (McCall *et al.*, 2010).

3.2.1. Côte Adriatique

Parmi les plus récentes, on peut citer le travail d'Armaroli *et al.*, (2013) qui a permis d'évaluer la capacité du modèle Xbeach à reproduire la réponse aux tempêtes d'un système plages/dune sur la côte adriatique au Nord de l'Italie (Emilia-Romagna). Pour ce travail, Xbeach a été mis en œuvre dans sa version 1D pour simuler le passage de deux tempêtes en décembre 2008 et Mars 2010, respectivement associées à des périodes de retour de 1 an et 5 ans.

Un effort de calibration de plusieurs paramètres a été mené en lien avec les développeurs du modèle. Ces paramètres sont :

- les pentes critiques d'avalanche en domaine aérien (*dryslp*) et sous l'eau (*wetslp*). Lorsque ces pentes sont dépassées, l'érosion est accentuée dans le modèle par l'effet d'avalanches gravitaires (Roelvink *et al.*, 2009) ;
- l'épaisseur d'eau (*eps*) qui définit le seuil entre les mailles sèches en domaine aérien et les mailles mouillées pour lesquels les processus hydrosédimentaires sont en œuvre.

Les résultats des modélisations ont montré que le travail de calibrage des paramètres clés cités précédemment, permet à XBeach de prédire l'érosion de la dune de manière satisfaisante (Figure 1). Néanmoins, l'étude souligne l'importance que peut avoir le rôle de la végétation dans la stabilisation de la dune, processus qui n'est pas pris en compte dans le modèle pour le moment.

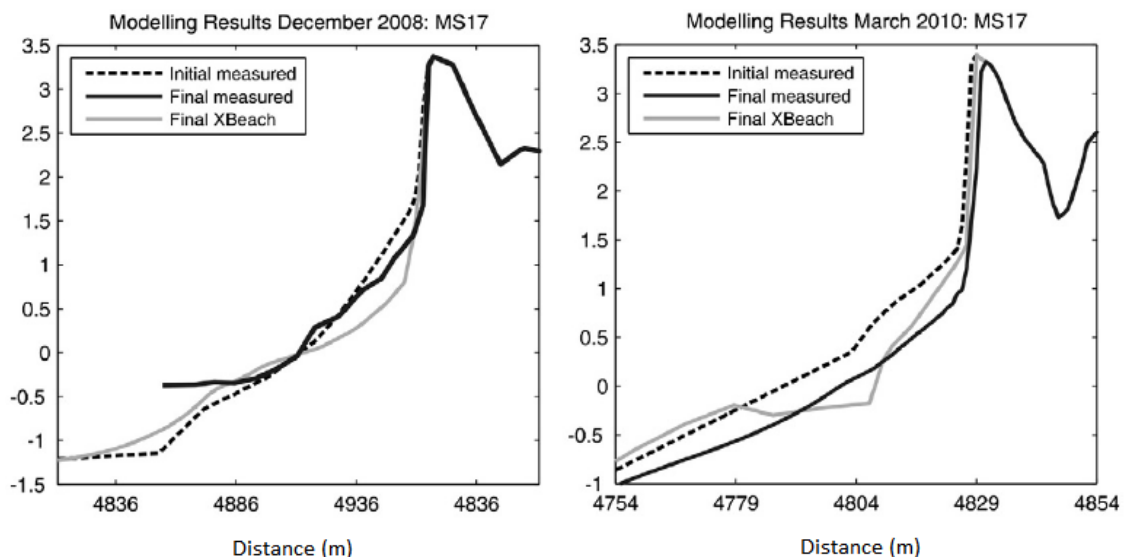


Figure 1 : Exemple de simulations de reculs de dune confrontées aux levés de terrain post-tempête sur la côte Adriatique Italienne. À gauche, recul simulé sous l'effet d'une forte surcote, à droite sous l'effet de fortes vagues. Source : Armaroli *et al.*, (2013).

3.2.2. Mer d'Irlande

Le projet MICORE (Ciavola et Jimenez, 2011 ; Williams *et al.*, 2011) s'est intéressé à l'érosion dunaire engendrée par les tempêtes et à la potentielle submersion associée sur la côte de Sefton, dans la baie de Liverpool. Ils ont utilisé le modèle XBeach en 1D et 2D avec des conditions de vagues stationnaires (qui ne varient pas au cours d'un cycle de marée). L'utilisation de ce type de forçages simplifiés a conduit à une surestimation des changements morphodynamiques du système plage/dune.

Pour améliorer ces résultats, Dissanayake *et al.*, (2014) ont réalisé des simulations à partir d'un emboîtement de modèles hydrodynamiques et morphodynamiques. Ils ont modélisé l'évolution du système plage/dune de la côte sableuse de Sefton pour reproduire le passage d'une tempête survenue en mars 2009.

Le modèle hydrodynamique Delft3D a été utilisé pour produire les variations temporelles et spatiales du niveau d'eau à l'approche de la côte. La propagation des vagues a été réalisée avec le modèle SWAN. Le couplage des modèles hydrodynamiques (Delft3D) et de vagues (SWAN) a permis d'améliorer la précision des conditions aux limites de vagues et de niveau d'eau fournies au modèle morphodynamique XBeach. Celui-ci a été mis en œuvre en mode 2D sur le système plage/dune de Sefton.

Des tests en 1D ont permis de calibrer les paramètres clés de XBeach. Par rapport aux tests réalisés par Armaroli *et al.*, (2013), six paramètres supplémentaires de XBeach ont été étudiés :

- *smax* : valeur maximale du paramètre de Shields pour les conditions de transport en couche mince immédiatement au-dessus du fond (sheet flow) ;
- *form* : formule de transport sédimentaire utilisée (Soulsby-Van Rijn (Soulsby, 1997) ou Van Thiesel-Van Rijn (Van Thiel de Vries *et al.*, 2008)) ;
- *nuhv* : facteur multiplicatif de la viscosité horizontale qui affecte le courant longshore ;
- *morfac* : paramètre d'accélération morphologique, il permet d'accélérer la modification morphologique par rapport aux phénomènes hydrodynamiques ;
- *C* : le coefficient friction (coefficient de Chezy) ;
- *facua* : paramètre qui influence le transport sédimentaire induit par l'asymétrie des vagues.

Au final, seuls les paramètres « *smax* » et « *form* » ont été modifiés par rapport aux paramètres par défaut du modèle. Les comparaisons statistiques entre les prédictions du modèle Xbeach et des profils topographiques mesurés après le passage de la tempête ont montré que globalement le modèle Xbeach 2D reproduit correctement les changements induits sur la plage le long de la côte de Sefton (Figure 2).

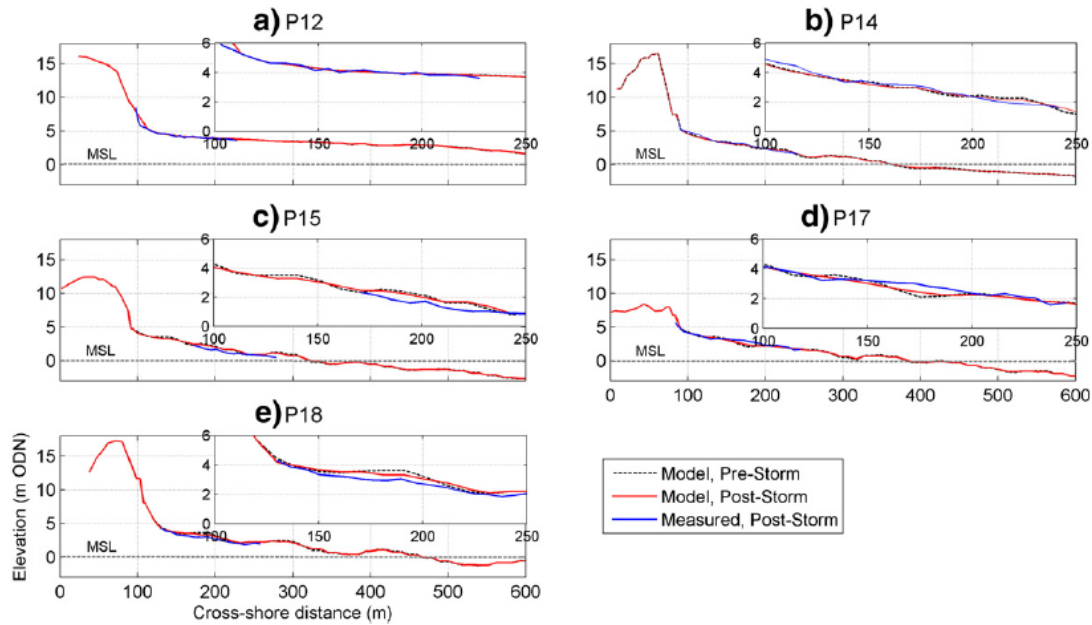


Figure 2 : Comparaisons entre les profils perpendiculaires à la côte mesurés et prédits par Xbeach 2D (en bleu : profils post-tempête mesurés, en rouge : profils post-tempête modélisés et en noir profils initial). Source : Dissanayake et al., (2014).

3.2.3. Côte hollandaise

Hormis les études de modélisation rétrospective de l'érosion des systèmes plage/dune, un effort est également mené pour développer des systèmes opérationnels de modélisation prévisionnelle de l'impact des événements énergétiques sur les côtes sableuses. Le système CoSMos s'appuie notamment sur le modèle XBeach mis en œuvre avec son jeu de paramètres par défaut. L'objectif de ce système est de réaliser des prédictions à haute résolution (~1 m) de la submersion marine et de l'érosion induites par les tempêtes sur des zones étendues (~100 km). Le système doit fournir des informations sur les risques liés aux tempêtes à l'ensemble des intervenants d'urgence et aux gestionnaires du littoral. Il repose sur un emboîtement de modèles hydrodynamiques et de vagues qui permet de fournir les conditions aux limites à une série de modèles Xbeach 1D (cross-shore). Le système CoSMos est utilisé en Californie par l'USGS (http://walrus.wr.usgs.gov/coastal_processes/cosmos/, Barnard *et al.*, 2014). Au Pays-Bas, le système a été validé sur des profils perpendiculaires de la côte hollandaise. Les profils de plage issus de CoSMos ont été comparés aux observations réalisées après la tempête du 3/01/1976 à Julianadorp, Bergen aan Zee et Bloemendaal (Van der Werff *et al.*, 2011). Les comparaisons ont donné des résultats satisfaisants (Figure 3).

Dans un autre domaine, le modèle XBeach a récemment été utilisé pour prédire les variations morphologiques possibles de systèmes plage/dune hollandais en réponse au changement climatique (prise en compte de la montée du niveau de la mer et de la modification de l'incidence des vagues) (De Winter, en préparation / 2014). Pour ce travail, les paramètres hydrodynamiques et morphologiques ont été calibrés séparément. La comparaison des hauteurs de vagues significatives modélisées par XBeach avec les observations collectées pendant l'automne 2011 ont permis de s'assurer que les valeurs par défaut des paramètres clés du module de dissipation des vagues (paramètre de déferlement « γ » et puissance dans le modèle de dissipation de Roelvink « n ») étaient adaptés à l'étude. Pour ce qui est des paramètres morphologiques, les paramètres liés à l'algorithme d'avalanche (« ϵ » profondeur seuil pour les mailles sèches/mouillées, « h_{min} » profondeur d'eau seuil pour le courant de retour, « d_{zmax} » le taux d'érosion maximale pour la dune et

« h_{switch} » la profondeur d'eau de l'interface pente mouillée/pente sèche) ont été calibrés au travers du paramètre adimensionnel DS, appelé échelle de profondeur par de Winter *et al.*, (2014), est utilisé. Il est fixé à 0,67 par de Winter *et al.*, (2014), qui ont conclu que le modèle XBeach estimait correctement les variations longshore des volumes érodés en termes d'intensité et de répartition spatiale (Figure 4). De manière plus précise, les auteurs ont montré que XBeach surestimait les volumes érodés dans les zones où les dunes escarpées se forment et les sous-estimait là où la dune s'effondre avec des séries de glissements. Différents scénarios d'atténuation des effets du changement climatique (basées sur du rechargement de sable des côtes) ont été testés. Ce travail a permis d'estimer les effets du changement climatique sur un évènement extrême associé à une période de retour de 10 000 ans le long de la côte hollandaise. Les résultats montrent des différences significatives dans l'érosion et l'impact des tempêtes sur les dunes, du fait de la montée prévisible du niveau marin et du changement des conditions de forçage.

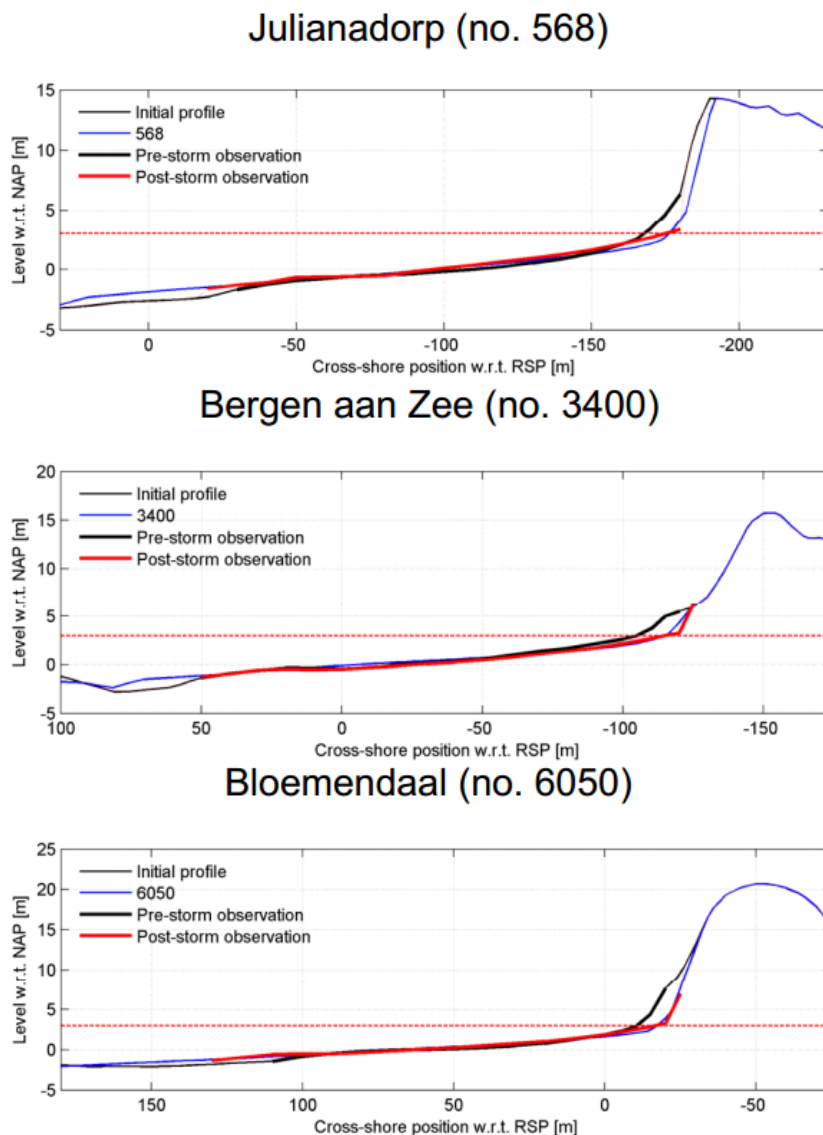


Figure 3 : Comparaisons entre les profils post-tempêtes issus du Système Cosmos (en bleu) avec les observations post-tempête (en rouge) de la tempête du 3/01/1976 à (a) Julianadorp, (b) Bergen aan Zee et (c) Bloemendaal. Source : Van der Werff *et al.*, (2011).

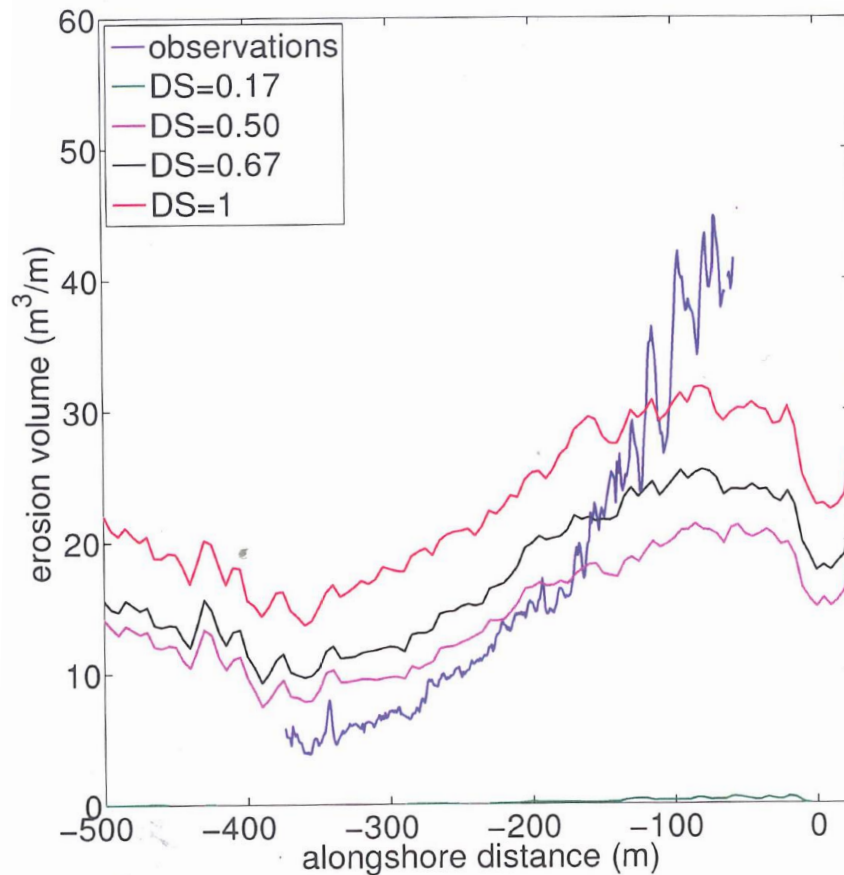


Figure 4 : Volumes érodés pour l'ensemble de la zone Egmond en fonction de la distance le long de la côte, au cours de la tempête du 3 janvier 2012 pour différentes valeurs du paramètre synthétique DS (d'après de Winter et al., 2014).

3.3. BILAN

Basé sur des études publiées très récemment, ce chapitre illustre les capacités du modèle XBeach à reproduire les évolutions morphologiques du haut de plage et de la dune sous l'effet des tempêtes. Le modèle peut être utilisé en 1D (perpendiculairement à la côte) ou pour des cas plus complexes en 2D. L'état de l'art des différentes applications d'XBeach à des cas réels montre la nécessité de disposer de données de calibration et validation relatives à la fois aux conditions hydrodynamiques et aux évolutions morphologiques de la zone étudiée. De plus, la qualité des données de forçages hydrodynamiques en entrée du modèle est également un facteur fondamental pour les simulations morphodynamiques, c'est pourquoi le modèle XBeach peut être couplé à d'autres outils de modélisation complémentaires. La suite de ce rapport présente l'approche suivie pour décrire les forçages des différents cas étudiés.

4. Conditions hydrodynamiques de tempête

4.1. LES FACTEURS DE FORÇAGE

La phase 1 de l'étude (Desmazes *et al.*, 2014) a permis de faire le point sur les processus de transport sédimentaires qui participent à la modification des dunes pendant les tempêtes. Les effets du vent, des vagues et du niveau d'eau ont été illustrés par la description d'impacts sur la morphologie des dunes. Au cours de certaines tempêtes, les niveaux d'intensité et d'énergie de ces trois principaux forçages sont tels qu'ils peuvent provoquer l'érosion du haut de plage et des dunes.

Ainsi, la suite de ce travail considère des événements météo-marins de tempête dont l'intensité est susceptible de provoquer l'érosion du haut de plage et/ou de la dune. Toutefois, l'impact du transport éolien sur les dunes lors des tempêtes n'est pas abordé dans cette étude. On se concentrera ici sur les phénomènes liés à l'hydrodynamique sédimentaire et les potentialités du modèle XBeach à reproduire pour partie l'effet des vagues et du niveau d'eau sur le transport sédimentaire et la morphologie de la côte.

Ainsi, la partie hydrodynamique du modèle Xbeach permet de simuler :

- la propagation des vagues du large à la côte ;
- les phénomènes de réfraction bathymétrique et celle due aux courants ;
- le déferlement des vagues ;
- la surcote due aux vagues (wave set-up) ;
- le jet de rive prenant en compte les effets des ondes infra-gravitaires ;
- les courants littoraux induits par la transformation des vagues.

Afin de reproduire ces phénomènes, les données hydrodynamiques à fournir au modèle sont :

- les niveaux d'eau associés à la marée et à la surcote atmosphérique. Le paramètre « niveaux d'eau » est toujours associé à un référentiel ou datum. Ici, c'est le référentiel terrestre IGN69 qui a été retenu ;
- les caractéristiques des vagues au large :
 - **Hs (m)** : « *Hauteur significative des vagues* » exprimée en mètres, correspondant à la moyenne du tiers des plus fortes vagues. Cette mesure statistique de la hauteur des vagues est le paramètre conventionnellement utilisé pour les études en océanographie littorale, notamment les études de submersion ou d'érosion,
 - **Tp (s)** : « *Période pic des vagues* », correspondant à la durée en secondes entre deux crêtes de vagues dominantes c'est-à-dire pour laquelle la densité spectrale est maximale. Ce paramètre est également conventionnellement utilisé dans les études littorales,
 - **Dp (°)** : « *Direction pic de provenance des vagues* » correspondant à la direction en degrés au moment du maximum d'énergie spectral. L'angle est compté positivement, suivant le sens des aiguilles par rapport au Nord géographique (convention nautique),
 - **Etal (°)** : « *Étalement directionnel des vagues* » caractérise l'étalement directionnel de l'énergie autour de la direction moyenne au pic (fonction de répartition angulaire de l'énergie associée à la fréquence de pic du spectre d'énergie).

Il faut noter que les conditions de vagues peuvent également être introduites dans le modèle XBeach sous forme de spectre. Cette solution n'a pas été utilisée pour les cas simplifiés de cette phase du projet.

Ces forçages évoluent au cours d'une tempête. À l'échelle d'un évènement, les phénomènes (marée, surcote, vague au large, vague à la côte) obéissent à des dynamiques différentes, plus ou moins corrélées. Ces paramètres sont donc introduits dans le modèle sous forme de séries temporelles en gardant à l'esprit que la simultanéité des maximums d'intensité et la durée de ces différents paramètres conditionnent les impacts sur les plages et les cordons dunaires.

Ce chapitre a pour but de présenter la méthode retenue pour déterminer les forçages hydrodynamiques qui seront utilisés pour mettre en œuvre le modèle sur les différents cas simplifiés, dans l'optique d'estimer un recul de la dune.

4.2. MÉTHODE DE DÉTERMINATION DES FORÇAGES

Afin de définir les forçages qui seront utilisés pour modéliser l'érosion dunaire, trois solutions peuvent être envisagées :

- i) reproduire des évènements de tempête observés afin de tenir compte de la « cinématique » réelle de la tempête (évolution dans le temps des conditions de marée, surcote, vagues) ;

Cette méthode permet de proposer des forçages de tempête réalistes et est prioritairement utilisée pour des procédures de calibration et validation des modèles numériques. En revanche, elle nécessite un jeu de données préalable de bonne qualité et les cas connus de tempêtes observées ne sont pas forcément associés à une érosion extrême de la dune. Pour ce type d'approche, on cherchera à reproduire au mieux les conditions marines et leurs évolutions du large à la côte. Ainsi, soit de manière indépendante (Vinchon *et al.*, 2014), soit de manière couplée (Pedreros *et al.*, 2014)), on utilisera d'une part un modèle numérique hydrodynamique capable de reproduire les niveaux d'eau à la côte (marée prédite et surcote atmosphérique provoquée par l'action des vents et de la pression atmosphérique sur la surface), d'autre part un modèle spectral de vague (propagation des conditions de vague depuis le large jusqu'au point d'intérêt).

- ii) déterminer des conditions de niveaux d'eau (marée + surcote atmosphérique) et de vagues (le plus souvent correspondant à des conditions de périodes de retour statistique) et faire des hypothèses fortes sur la concomitance des maximums d'intensité ;

L'utilisation de période de retour d'un évènement est une approche couramment utilisée pour l'étude des risques naturels. L'élaboration de scénario associant plusieurs variables (niveaux d'eau, vagues, vents...) est également régulièrement utilisée dans le cadre d'études préliminaires ou d'approches maximisantes (Garcin *et al.*, 2012), pour des secteurs à forts enjeux, des secteurs hautement sensibles aux aléas, ou des études à échelle régionale... Dans ce cas, l'hypothèse sous-jacente considère chaque forçages comme indépendants, ce qui est susceptible de proposer des résultats maximisant.

- iii) établir des probabilités conjointes niveaux/vagues permettant de prendre en compte simultanément ces deux paramètres pour une période de retour donnée.

L'utilisation de probabilités conjointes permet une approche statistique des relations de dépendance entre les variables considérées. Elle permet ainsi de déterminer des combinaisons de période de retour attendu (pour 2 variables ou plus). Ce type d'étude statistique s'avère exigeante en termes de données nécessaires (bases de données de qualité homogènes, étendue dans le temps et pendant une période commune entre les

variables étudiées (par exemple ici niveaux d'eau et conditions de vagues). Elle est ainsi plus complexe à mettre en œuvre et fournit des résultats spécifiques aux sites étudiés.

Des trois méthodes évoquées, on retient la méthode (ii) pour ce travail de tests préalables du modèle XBeach. En effet, il n'est pas envisagé à ce stade, de reproduire avec exactitude un événement de tempête passé (méthode i), ces forçages hydrodynamiques et les impacts sur la morphologie. Par ailleurs, l'analyse de la concomitance des maximums d'intensité des facteurs de forçage et la mise en place de probabilités conjointes (méthode iii) sortent du cadre de cette étude. La méthode utilisée est une approche simplifiée qui sera donc plutôt susceptible de proposer des résultats maximisant compte-tenu des hypothèses envisagées. Toutefois, cette approche apparaît bien adaptée à une étude préliminaire. Son application s'appuiera sur les bases de données existantes à l'échelle nationale métropolitaine.

Dans cette étude, le choix est fait d'associer des données de niveaux d'eau (marée prédite + surcote atmosphérique) et des caractéristiques de vague (H_s , T_p , D_p , E_{tal}) au large dont les périodes de retour sont annuelles, décennales, cinquanteennes et centennales (i.e. ayant par exemple pour un événement décennal 1 chance sur 10 de se produire au cours d'une année). Sur cette base, quatre scénarios peuvent être définis pour mettre en œuvre le modèle :

- le scénario 1 (S1) correspond à un niveau d'eau annuel (ou coefficient de marée 115) et des vagues dont la hauteur significative a une période de retour de 1 an ;
- le scénario 2 (S2) correspond à un niveau d'eau décennal et des vagues dont la hauteur significative a une période de retour de 10 ans ;
- le scénario 3 (S3) correspond à un niveau d'eau cinquanteennal et des vagues dont la hauteur significative a une période de retour de 50 ans ;
- le scénario 4 (S4) correspond à un niveau d'eau centennal et des vagues dont la hauteur significative a une période de retour de 100 ans.

Il est essentiel de rappeler que les conditions de forçages ainsi traitées (par exemple : croisement de valeurs de retour décennales pour les niveaux d'eau et les vagues) représentent une situation théorique de période de retour de dépassement conjoint très largement supérieur à un événement de période de retour de dépassement conjoint décennale.

4.3. MÉTHODES D'ESTIMATION DES PARAMÈTRES HYDRODYNAMIQUES

Le paragraphe suivant présente les éléments, données et méthodes, qui ont permis de déterminer les paramètres de forçages hydrodynamiques utilisés dans la suite de l'étude.

4.3.1. Prise en compte des niveaux d'eau (marée prédite + surcote)

Les données de niveaux de marée et surcotes ont été déterminées selon deux modalités en fonction des façades marines. En effet, il n'existe pas de documents de référence traitant de ces conditions à l'échelle nationale.

Concernant la zone Manche-Atlantique, le rapport SHOM/CETMEF (2012) traite la question de niveaux d'eau extrêmes (niveau de marée + surcote de pleine mer) pour l'ensemble des côtes françaises hors Méditerranée. Ce document permet ainsi d'obtenir les valeurs de niveaux d'eau pour des périodes de retour statistique de 10 à 100 ans pour toute la façade Atlantique (Figure 5) et Manche-Mer du Nord.

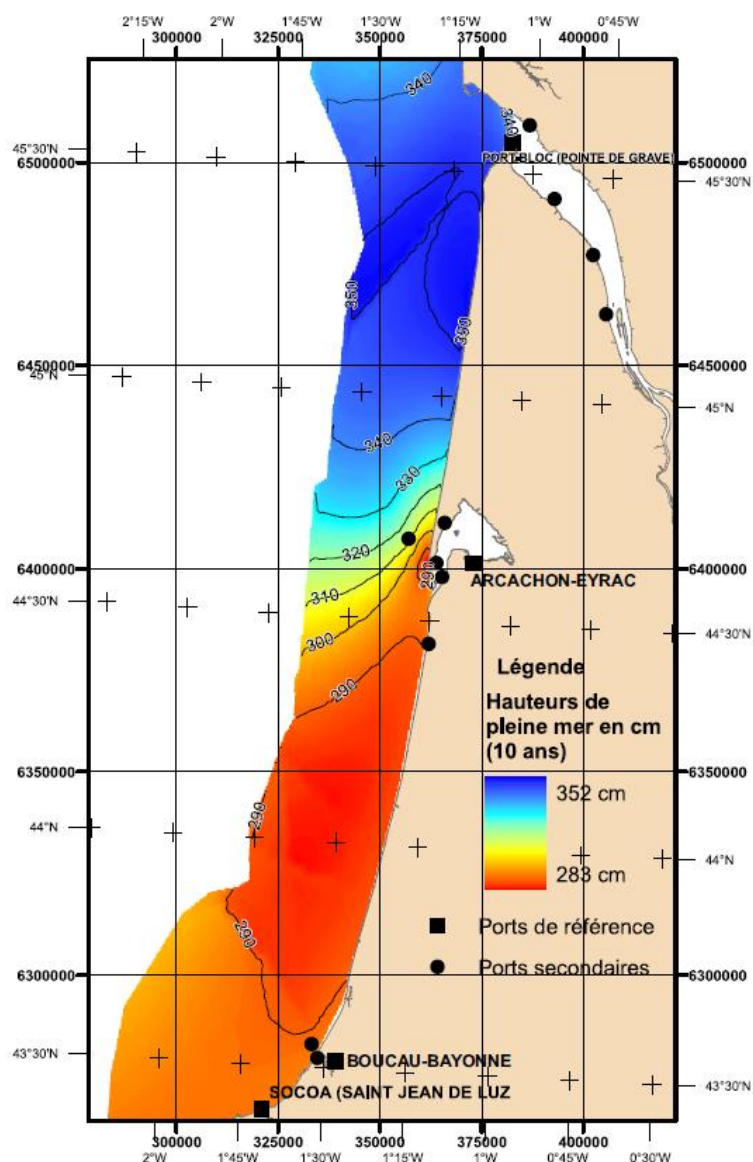


Figure 5 : Carte des niveaux d'eau (m/IGN69) de périodes de retour 10 ans pour la côte Aquitaine. Source : SHOM/CETMEF (2012).

Pour les côtes méditerranéennes, le document de référence utilisé est le rapport CETMEF (2013) qui réunit les analyses statistiques des surcotes instantanées pour les ports méditerranéens disposant de plus de 10 ans de données. Ainsi, compte tenu des faibles marnages, les niveaux d'eau pris en compte correspondent à l'addition du niveau d'eau de PHMA aux surcotes instantanées établies pour des périodes de retour de 10 à 100 ans.

On note que pour la façade Atlantique les valeurs de niveaux d'eau sont présentées sous forme de cartes interpolées (Figure 5) et permettent donc de disposer de l'information au plus près d'un site d'étude. Dans notre cas, ce sont les niveaux au plus proche des cas étudiés qui ont été retenues. En revanche, pour les côtes méditerranéennes et la Corse les estimations retenues sont celles des ports le plus proches, faute d'autres données disponibles.

Par ailleurs, pour les cas de la façade Atlantique et Manche-Mer du Nord traités dans cette étude, afin de tenir compte de la variabilité du niveau d'eau au cours d'un événement, le signal de niveau d'eau est intégré au modèle sous la forme d'une série temporelle de marée probable. Pour les scénarios d'événements de temps de retour annuel, la courbe de marée

correspond à une marée de coefficient 115, soit une grande marée observée une à deux fois par an (source : <http://www.shom.fr/les-services-en-ligne/>). Pour les périodes de retour 10, 50 et 100 ans la série est constituée à partir :

- d'une série temporelle de marée astronomique de coefficient 100 pour le port le plus proche de la zone d'étude et de son niveau maximal (nmc100) ;
- de la valeur maximale de niveau d'eau de période de retour indiquée localement pour un temps de retour donnée (nmx).

Le signal de marée est ensuite normalisé en fonction de son niveau maximal (nmc100), puis multiplié par la valeur extrême de niveau d'eau (nmx) afin de constituer une série temporelle atteignant la valeur de niveau d'eau maximal au moment de la pleine mer.

Pour les cas méditerranéens, compte tenu des faibles marnages, on fait l'hypothèse d'un niveau constant pendant la durée de simulation (7 heures).

Pour les cas de fond de baie, il faut savoir que le niveau d'eau local peut-être affecté par l'action des vagues déferlantes sur le site étudié, mais également aux approches de la baie (wave set up, Pedreros et Paris, 2012 ; Garcin *et al.*, 2012). Dans ces environnements particuliers, il faudra vérifier que les données de niveau d'eau utilisées prennent correctement en compte ces effets. Ainsi, lorsque les niveaux d'eau utilisés pour réaliser les scénarios de forçage sont issues de données marégraphiques (reproduction d'évènement historiques ou statistiques de niveau extrême), les mesures peuvent intégrer une part de *wave setup* dont l'expression (dans le port à l'emplacement du marégraphe) peut être équivalente ou varier par rapport aux conditions sur la côte étudiée. Par ailleurs, la part de *wave setup* peut être variable d'un évènement à l'autre en fonction des caractéristiques des vagues associées à la tempête (hauteur, longueur d'onde, angle d'incidence) et des niveaux d'eau lors du pic d'intensité des vagues. Bien que cette méthode puisse conduire à intégrer une part d'incertitude, l'hypothèse de l'équivalence des niveaux d'eau observés à l'intérieur et à l'extérieur du port est très couramment retenue.

4.3.2. Prise en compte des vagues au large

Les conditions de houles sont extraites de deux bases de données différentes. Pour les côtes Manche et Atlantique la base de données BoBWA-X a été préférée à la base de données ANEMOC dont les valeurs surestiment les hauteurs de vague (H_s) (Bulteau *et al.*, 2013). La base de données BoBWA-X permet de disposer de valeurs de H_s extrêmes pour des périodes de retour comprises entre 1 et 100 ans, localisées environ tous les 50 km le long des côtes Atlantique et de Manche-Mer du Nord.

Pour les conditions extrêmes de vague en Méditerranée c'est la base de données ANEMOC-Medit (Morellato et Benoit, 2010) qui a été utilisée. Cette base de données constituée de points d'analyse pour les littoraux méditerranéens a permis de disposer des conditions de H_s pour les points d'analyses les plus proches des secteurs étudiés et pour des périodes de retour de 1 à 100 ans.

Les valeurs de période et de directions des vagues associés aux périodes de retour étudiées ont été déterminées par l'analyse des diagrammes de période pic et de direction de chaque point et correspondent :

- pour les périodes, à l'ordre de grandeur des plus fortes périodes observées ;
- pour les directions, aux provenances lors des plus fortes valeurs de H_s observées.

Dans le cadre des tests mis en place pour cette étude, les séries temporelles de vagues sont considérées stationnaires à la limite au large du modèle.

4.3.3. Prise en compte des vagues à la côte

Comme évoqué précédemment, les vagues changent de forme lors de leur approche à la côte et subissent de nombreux phénomènes d'interaction (avec la forme de la côte, la bathymétrie, les courants, interaction vagues/vagues...). Ces phénomènes doivent être pris en compte correctement afin de réaliser des simulations correspondant à des conditions de forçage à la côte plausibles (au niveau du trait de côte et de la dune). Selon les cas étudiés, deux approches ont été utilisées.

- Littoral ouvert

Dans le cas où les littoraux sont ouverts (i.e. directement exposés aux vagues provenant du large), le modèle XBeach 1D peut être utilisé pour reproduire la transformation des vagues depuis le large (à une profondeur de 50 m) jusqu'à la côte. Les conditions de forçage sont introduites au niveau de la limite offshore (au large) d'un profil topo-bathymétrique 1D continue de 50 m de profondeur jusqu'à la côte. Cette méthode employé dans Dissanayake *et al.*, 2014 et recommandée par les développeurs du modèle (équipe XBeach de Deltares) permet de générer correctement les conditions de forçage à la côte à partir de leurs caractéristiques au large. La Figure 6 illustre la propagation des vagues sur un profil simplifié de plage landaise. Les modifications les plus importantes de la houle se situent entre les points C2 et C3, positionnés de part et d'autre d'une barre sableuse subtidale simplifiée, ce qui apparaît qualitativement correct.

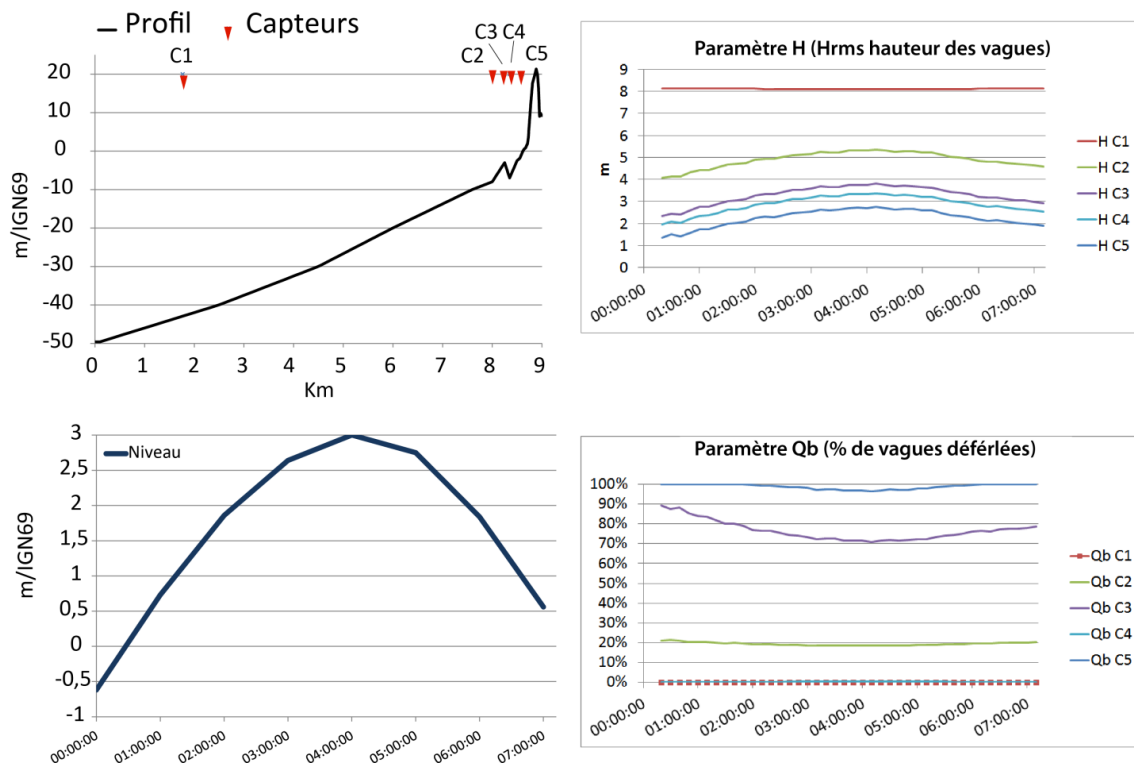


Figure 6 : Variations des paramètres de niveau d'eau, Hrms (moyenne quadratique des hauteurs de vague) et Qb (pourcentage de vagues déferlées) modélisé par XBeach du large à la côte. Cas Landes.

- Fond de baie

Dans les cas situés en fond de baie (exemple : Pertuis Charentais), la propagation 1D du modèle XBeach ne peut pas être appliquée car elle ne permet pas de tenir compte des phénomènes d'interaction complexes entre les vagues et la morphologie du littoral qui ont lieu en 2D. Par ailleurs, la mise en place du modèle XBeach en 2D n'est possible que sur des domaines de taille réduite du fait des temps de calcul nécessaires. Afin de propager les conditions de vague et tenir compte de l'évolution de leurs caractéristiques à mesure de leur progression dans la baie, on peut procéder à une simulation 2D, par exemple avec le code de modélisation spectrale en domaine côtier SWAN (Booij *et al.*, 1999).

La mise en place de ce type de modèle peut permettre également d'évaluer la contribution locale des vagues à la surélévation du niveau d'eau (wave setup), comme indiqué précédemment dans la partie 4.3.1.

Par ailleurs, les caractéristiques des vagues dans les zones de petits fonds étant fortement dépendantes du niveau d'eau, la modélisation de la propagation des vagues doit être réalisée en mode instationnaire (i.e. le niveau d'eau est variable au cours de la simulation).

4.4. BILAN

La présente étude a pour objectif d'améliorer les méthodes d'estimation du recul maximal des dunes lors des tempêtes en explorant les potentialités de la modélisation numérique et en mettant en œuvre l'outil XBeach sur plusieurs cas simplifiés. À ce niveau, il n'est pas envisagé de reproduire avec exactitude un événement de tempête passé, ces forçages hydrodynamiques et les impacts sur la morphologie. De plus, l'analyse de la concomitance des maximums d'intensité des facteurs de forçage et la mise en place de probabilités conjointes sortent du cadre de cette étude. Les forçages marins sont donc introduits sous forme de niveaux d'eau et de conditions de vague au large dont la période de retour a une occurrence comprise entre 1 an et 100 ans. En faisant l'hypothèse que les pics d'intensité interviennent simultanément, la méthode développée ici propose des conditions de forçage maximisées. L'utilisation de tels forçages a vocation à estimer l'impact de conditions marines extrêmes sur les cordons dunaires de différentes façades de France métropolitaines et d'en déduire des estimations de recul maximal des dunes.

5. Simulations numériques d'érosion dunaire avec le modèle Xbeach 1D

5.1. MISE EN ŒUVRE DE XBEACH

Le travail de tests du modèle numérique XBeach est initié par une série de simulations réalisées pour des profils de plage simplifiés. Pour chacun des exemples, le profil de plage est construit à partir d'un assemblage de données topographiques et bathymétriques. Les données sont simplifiées pour prendre en compte les structures morphologiques principales. Il ne s'agit donc pas de cas réels composés de données morphologiques homogènes et mesurées avec une précision maximale. Toutefois, les cas testés doivent permettre d'illustrer la diversité des milieux littoraux meubles qui se rencontrent en Métropole.

Ce travail de modélisation apparaît comme une approche préalable à des travaux plus approfondis pour estimer le recul dunaire maximal L_{max} . Dans un premier temps, on fait l'hypothèse que XBeach permet de reproduire relativement correctement l'érosion du haut de plage et de la dune en condition de tempête pour les processus cross-shore. Dans cette approche simplificatrice, il manque la prise en compte des processus parallèles à la côte qui peuvent avoir des effets dominants selon les milieux côtiers étudiés. De plus, le travail sur des environnements littoraux simplifiés ne permet pas de calibrer finement XBeach en ajustant les différents paramètres du modèle à un jeu de données et d'observations réelles. En revanche, il faut noter que la mise en œuvre de ce type de modèle pour des cas réels nécessite une phase de calibration, basée sur des données topo-bathymétriques et hydro-sédimentaires collectées avant, après (voire pendant) un ou des événements de tempête.

Le travail mise en place dans cette étude utilise la version la plus récente d'XBeach (XBeach_v1.21.3657_Groundhog_Day) distribuée en février 2014. Cette dernière version prend en compte une nouvelle formulation pour les conditions aux limites de vagues et a aussi permis de résoudre certains problèmes concernant le flux entrant induit par les ondes longues suivant l'orientation de la grille pour le modèle. Cette version a été mise en œuvre sur le calculateur du BRGM en mode parallèle de façon à optimiser les temps de calcul.

Pour les tests méthodologiques, le choix d'utiliser les mêmes réglages internes du modèle pour les différents profils de plages schématisés a été fait. En première approche, XBeach est donc utilisé sans calibration, avec ses valeurs par défaut ou avec celles préconisées par la communauté XBeach de Deltares (Tableau 1).

Certains paramètres présentés précédemment (voir partie 3.2) ont été définis spécifiquement pour cette série de tests :

- la valeur maximale du paramètre de Shields (s_{max}) a été définie à 1, à partir des études référencées avec Xbeach et suite à des échanges avec la communauté Xbeach de Deltares ;
- le coefficient de friction au fond pour l'écoulement (cf) a été fixé à 0,005, ce qui se traduit par un coefficient de Chézy de $\sqrt{\frac{g}{cf}}$ soit $44,3 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$;
- le paramètre d'accélération morphologique ($morfac$) considéré est de 1, de façon à ce que l'évolution du fond soit calculée à chaque de pas de temps de calcul hydrodynamique.

La taille médiane des grains (D_{50}) est fixée à 0,2 mm pour chaque cas. Pour chaque simulation un temps d'initialisation du modèle est nécessaire, il est ici de 20 minutes. Au cours de cette phase de démarrage, les valeurs assignées aux diverses variables du modèle

changent graduellement sous l'action des processus physiques inclus dans le modèle pour atteindre les valeurs typiques de la zone étudiée. Cette période n'est pas prise en compte dans les analyses proposées. Une fois la période d'initialisation passée, les sorties du modèle sont fixées à un pas de temps de 10 minutes.

Paramètres	valeurs
D50 – grain médian	0,2 mm
smax – paramètre de Shields	1
cf – coefficient de friction au fond	44,3 $m^{1/2}/s$
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

Tableau 1 : Récapitulatif des principaux réglages du modèle XBeach mis en œuvre pour les cas simplifiés.

Les résolutions spatiales des profils topo-bathymétriques sont adaptées à chaque cas et ne sont pas régulières. Plus précisément, le maillage du modèle est raffiné par l'outil de prétraitement du package XBeach, là où les variations de topographie sont importantes. La résolution spatiale maximale est de 1 m dans les secteurs de fortes variations de topographie/bathymétrie, au niveau de la dune et de la plage. Chaque profil débute au large, dans les profondeurs d'eau pour lesquelles les conditions de houles sont définies dans la partie 4.3.2. « Prise en compte des vagues au large ».

5.2. PRÉSENTATION DES CAS SIMPLIFIÉS

La suite de cette partie présente les simulations réalisées pour les différents profils de plage simplifiés. Ils représentent certaines caractéristiques des plages du Nord-Pas-de-Calais, Pertuis Charentais, Médoc, Landes, Languedoc et Corse orientale (Figure 7).

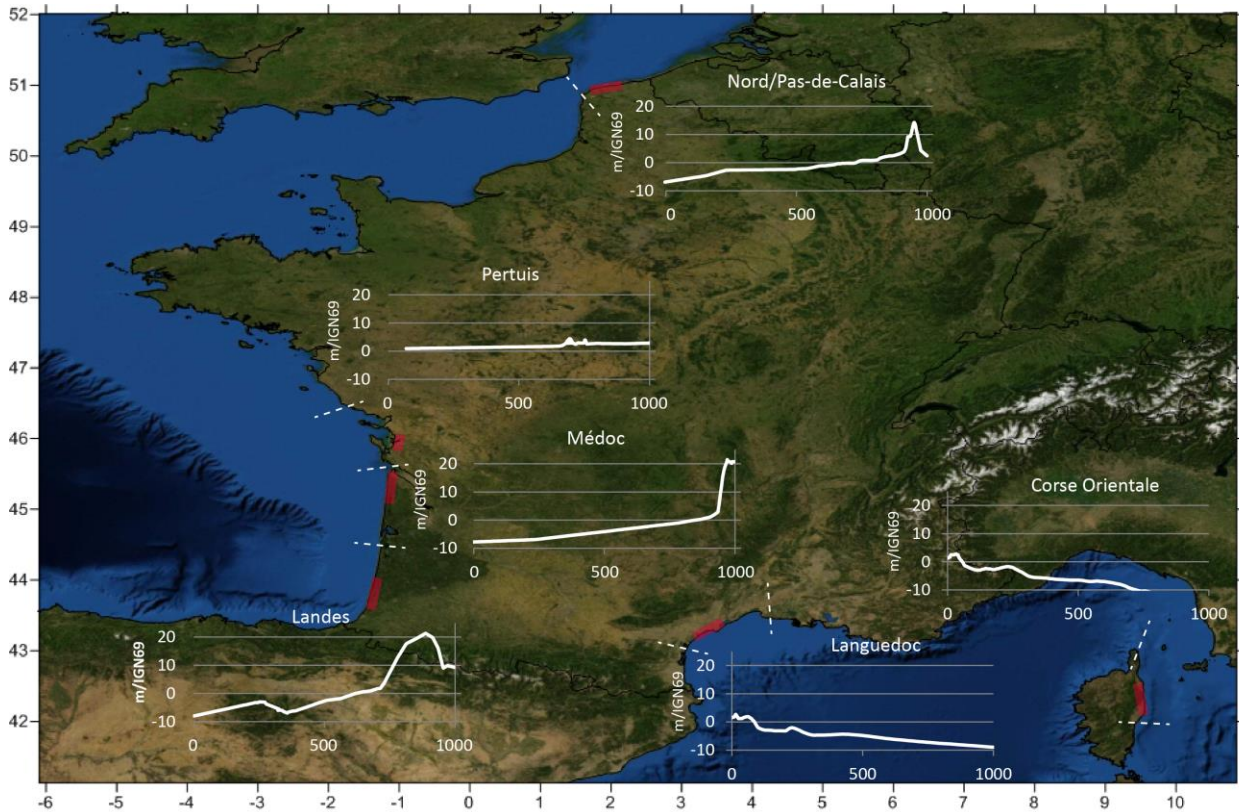


Figure 7 : Carte de présentation des cas idéalisés étudiés et profils topobathymétriques perpendiculaires de la plage et des dunes associées.

Pour chaque cas simplifié, les conditions de forçage sont définies selon la méthodologie décrite dans le Chapitre 4. Sur cette base et pour rappel, les quatre scénarios qui ont été définis pour mettre en œuvre le modèle (partie 4.2) sont :

- le scénario 1 (S1) correspond à un niveau d'eau annuel (ou coefficient de marée 115) et des vagues dont la hauteur significative a une période de retour de 1 an ;
- le scénario 2 (S2) correspond à un niveau d'eau décennal et des vagues dont la hauteur significative a une période de retour de 10 ans ;
- le scénario 3 (S3) correspond à un niveau d'eau cinquantennal et des vagues dont la hauteur significative a une période de retour de 50 ans ;
- le scénario 4 (S4) correspond à un niveau d'eau centennal et des vagues dont la hauteur significative a une période de retour de 100 ans.

Les conditions de forçage sont résumées ici sous forme de carte (Figure 8, exemple pour une période de retour 10 ans pour les niveaux d'eau et 10 ans pour les vagues) et sous forme de tableau (Tableau 2) résumant l'ensemble des conditions de forçage considérés selon les cas étudiés.

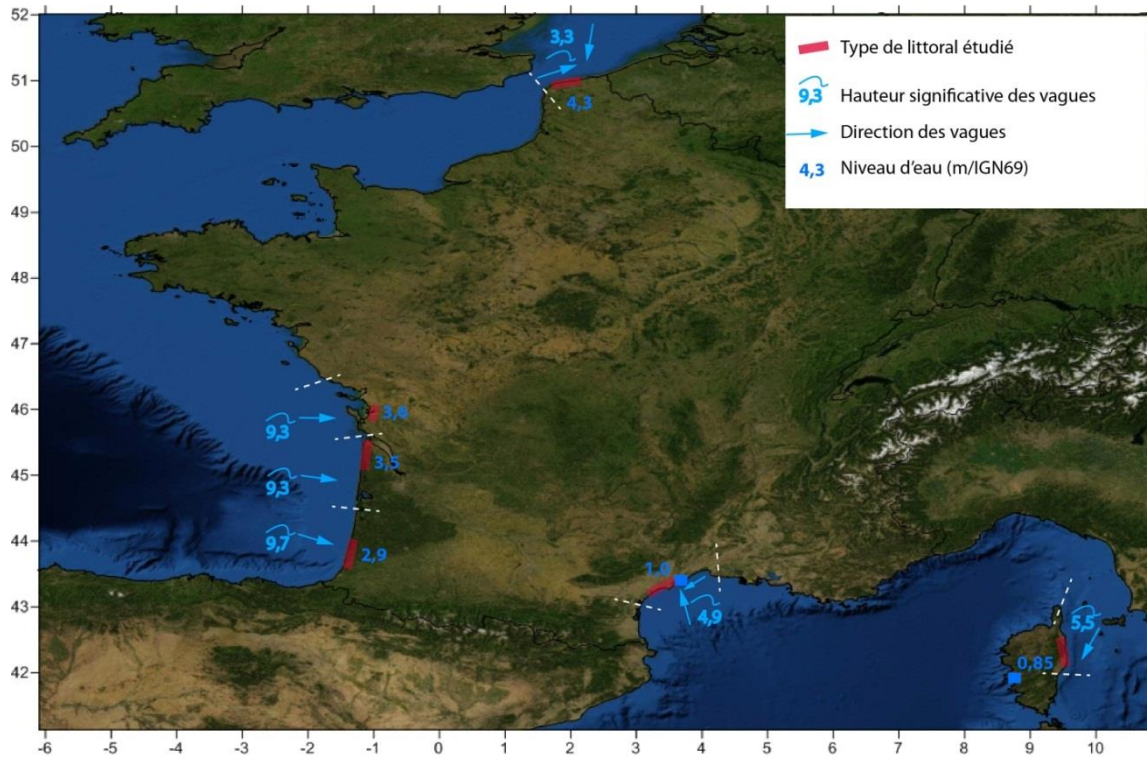


Figure 8 : Carte de synthèse pour des conditions de période de retour : Niveau d'eaux 10 ans, Hs 10 ans à partir des données disponibles (source : SHOM/CETMEF 2012, CETMEF 2013, Bulteau et al., 2013, Morellato et Benoit, 2010).

Type de profil	Hs1 (m)	Hs10 (m)	Hs50 (m)	Hs100 (m)	Tp (s)	Dp (°N)	source	PHMA (m/IGN)	Coef 115 (m/IGN)	niv 10 (m/IGN)	niv 50 (m/IGN)	niv 100 (m/IGN)	source
Nord Médoc	7,3	9,3	10,3	10,7	18	285	BoBWA Gasc_08	3,1	2,4	3,5	3,6	3,7	SHOM 2012
Landes	7,4	9,7	11,0	11,4	18	295	BoBWA Gasc_13	2,3	2,4	2,9	2,9	3,0	SHOM 2012
Corse Orientale	3,7	5,5	6,4	6,9	12	30	ANEMOC 7722	0,3	0,6	0,8	1,0	1,1	CETMEF 2013
Languedoc	3,6	4,9	6,1	6,8	12	150 et 45	ANEMOC 2809	0,5	0,9	1,0	1,1	1,2	CETMEF 2013
Pertuis	7,4	9,3	10,2	10,5	18	270	BoBWA Gasc_05	3,3	3,1	3,6	3,8	3,9	SHOM 2012
Pas-de-Calais	2,5	3,3	3,9	4,1	12	20	BoBWA Manche_02	3,8	3,4	4,3	4,5	4,7	SHOM 2012

Tableau 2 : Conditions de forçages hydrodynamiques retenues pour les simulations.

Pour chaque cas, le cadre morphologique est rapidement décrit, puis les conditions de forçages utilisées en entrée du modèle sont rappelées. Les simulations d'évolution morphologique de la dune selon les scénarios envisagés sont ensuite présentées et analysées.

5.3. CAS NORD MÉDOC

- Profil topo-bathymétrique initial

Le profil topo-bathymétrique utilisé pour le cas Nord-Médoc (Figure 9) est caractérisé depuis le large jusqu'à 20 m de profondeur par une pente constante et faible (0,1 %). À partir de 12 m de profondeur, un large banc pré-littoral estuarien s'étend sur près de 4 km. Son sommet est situé à environ 1 600 m du trait de côte, sous 1 m d'eau lors des plus basses mers. À la côte, le profil de plage prend une forme parabolique et ne présente pas de structures sédimentaires. Le pied de dune est marqué par une rupture de pente très nette entre le haut de plage et la falaise dunaire qui dépasse 20 m NGF. La morphologie du haut

de plage correspond à l'exemple AQI1 et au profil OCA G2 suivi annuellement par le BRGM et présenté dans le rapport Desmazes *et al.*, (2014).

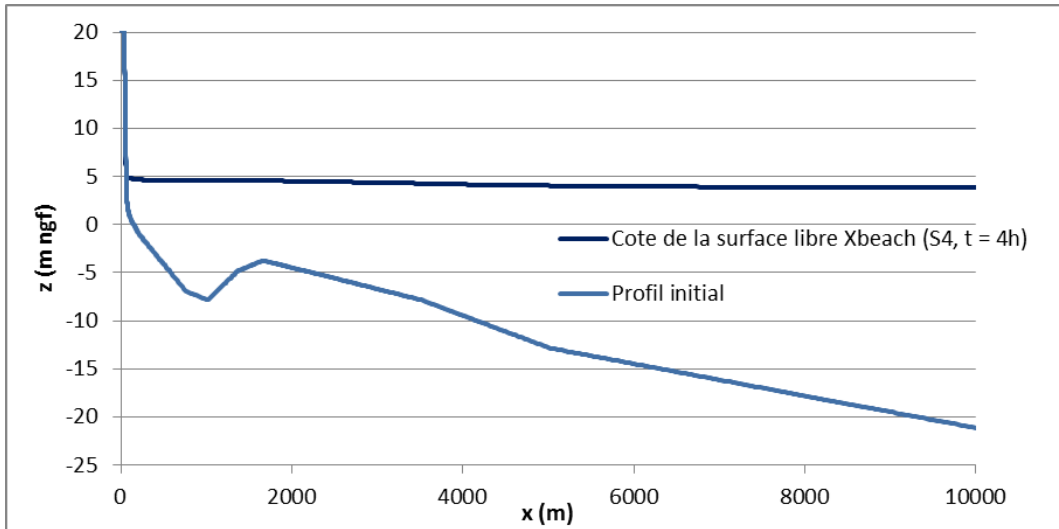


Figure 9 : Profil topo-bathymétrique initial du cas Nord-Médoc et cote de la surface libre modélisée par XBeach intégrant les ondes infragravitaires.

- Caractérisation des scénarios hydrodynamiques

Pour les 4 scénarios testés les niveaux d'eau varient au cours d'un cycle de marée, comme indiqué dans la partie 4.3.1. (Figure 10). La durée simulée avec le modèle XBeach a été fixée à 7 heures. Elle est centrée sur la marée haute et prend en compte la fin du flot pendant 4 h, puis le début du jusant durant 3 h. Les 20 premières minutes permettent l'initialisation du modèle.

Les forçages utilisés sont rappelés dans le Tableau 4.

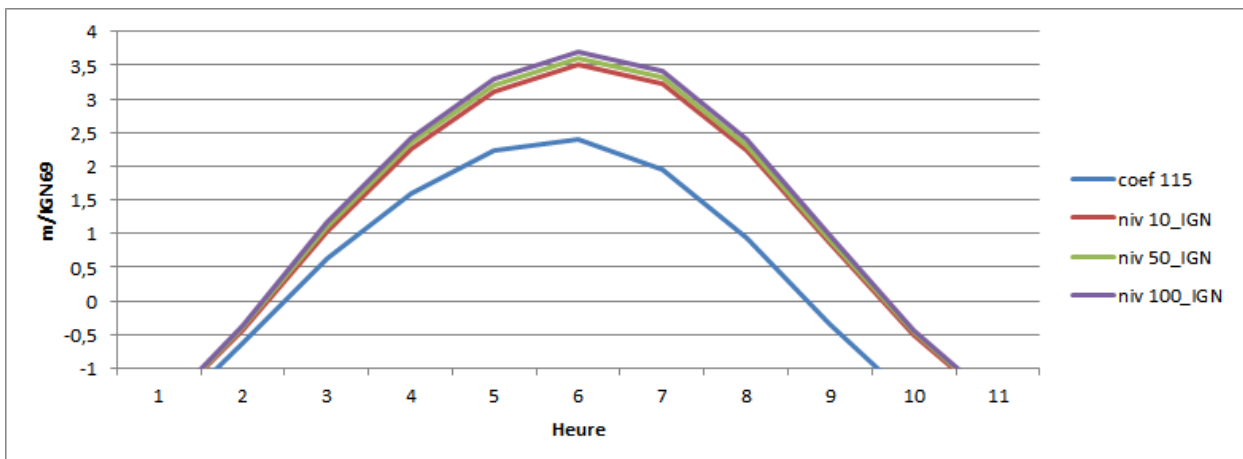


Figure 10 : Exemple de séries temporelles de niveaux d'eau pour la côte Aquitaine (Nord Médoc). La courbe bleu correspond à un signal de marée de coefficient 115. Les autres courbes correspondent à une marée de coefficient 100, dont la valeur maximale de niveau d'eau est respectivement de période de retour 10, 50 et 100 ans. Source SHOM/CETMEF (2012).

Nord Médoc	scénario 1	scénario 2	scénario 3	scénario 4
Niveau d'eau (m IGN69)	2,4	3,5	3,6	3,7
Période de retour (an)	PMVE 115	10	50	100
Vagues Hs (m)	7,3	9,3	10,3	10,7
Période de retour (an)	1	10	50	100
Recul max face (m)	2	2,5	2,5	3
Altitude max face (m)	7	12	12	13

Tableau 3 : Scénarios mis en place pour le cas Nord Médoc et indicateurs de l'évolution de la dune simulés par XBeach.

- Résultats

La Figure 11 présente les résultats des profils de plage établis par le modèle XBeach pour les 5 scénarios de forçage. La Figure 12 est centrée sur la zone dont la morphologie est la plus mobile, située au niveau de la dune et du haut de plage. La morphologie calculée par le modèle montre l'érosion d'une partie de la face dunaire, tandis que les volumes érodés sont déposés à proximité immédiate, au niveau du haut de plage. Pour les scénarios 2, 3 et 4, cet engraissement et la forme parabolique du profil en haut de plage masquent la position du pied de dune qui n'apparaît pas comme un indicateur pertinent pour quantifier ce recul. C'est pourquoi les scénarios sont comparés en fonction du recul maximal horizontal de la face dunaire et de l'altitude maximale de la partie érodée du front de dune (Tableau 3).

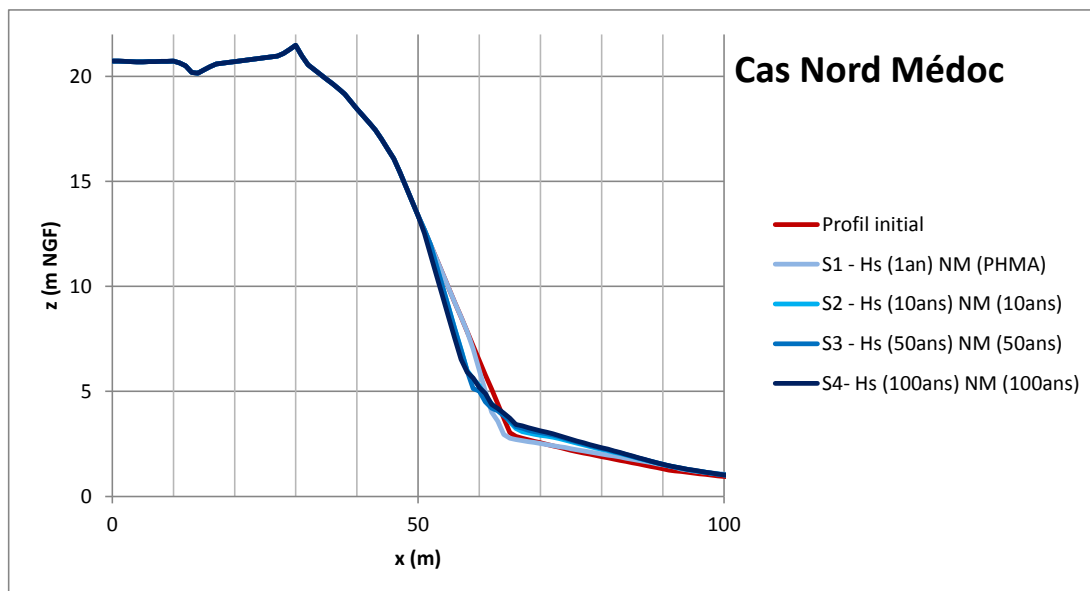


Figure 11 : Profils topographiques simulés par le modèle XBeach 1D pour les 5 scénarios du cas Nord Médoc.

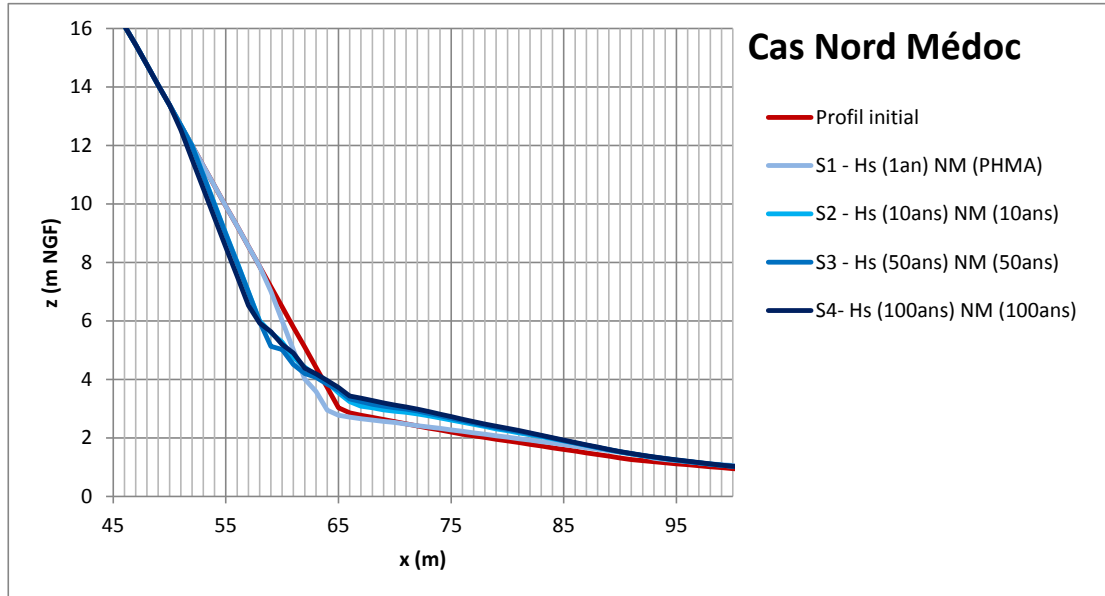


Figure 12 : Érosion dunaire simulées par le modèle XBeach 1D pour le cas Nord Médoc.

Dans les cas de niveaux d'eau qui varient selon la marée, le recul maximal modélisé par XBeach est de 3 m pour le scénario 4. La morphologie de la face dunaire est affectée jusqu'à une altitude de 7 m IGN69 pour le scénario 1 et 13 m IGN69 pour le scénario 4, ce qui représente des falaises érosives dont la hauteur est comprise entre 4 et 9 m. Il faut remarquer l'homogénéité des résultats pour les scénarios 2, 3 et 4 qui donnent des reculs très proches. Pour ces scénarios, l'évolution de la dune intervient essentiellement au moment de la marée haute, entre 3 h et 4 h simulées. En relatif, les variations les plus importantes interviennent entre les scénarios 1 et 2. Le scénario 1 (niveau d'eau PHMA et houle annuelle) affecte un volume de dune bien moins important que les forçages plus puissants pris en compte par les autres scénarios.

Pour ce cas Nord Médoc, le modèle a donc estimé un recul maximal de 2 à 3,5 m de la face dunaire, et la formation d'une falaise d'érosion vive comprise entre 4 et 9 m de hauteur selon les scénarios. Nous pouvons qualifier cette érosion de « modérée » car elle n'atteint pas le sommet de la falaise initiale située au-dessus de 20 m IGN69. Pour ce cas, des éléments de comparaison proviennent de la première phase de l'étude (Desmazes *et al.*, 2014). Ainsi, les observations pratiquées sur le terrain par l'Observatoire de la Côte Aquitaine indiquent un recul maximal annuel observé de 6 m sur l'ensemble de la face dunaire. Si l'ordre de grandeur du recul simulé semble correct, il est possible que le modèle sous-estime l'érosion pour les scénarios les plus forts.

5.4. CAS LANDES

- Profil topo-bathymétrique initial

Le profil topo-bathymétrique utilisé pour illustrer le cas Landes (Figure 13) est caractérisé du large jusqu'à 10 m de profondeur par une pente modérée (comprise entre 0,4 et 0,7 %). Une barre sableuse pré-littorale est représentée de façon très simplifiée. Le sommet de cette barre est situé à environ 500 m du trait de côte par 2 m de profondeur. La pente de plage est moyenne à forte, comprise entre 1 et 3 %. La zone intertidale ne présente pas de structure sédimentaire pour cet exemple simplifié. Le pied de dune est marqué par une rupture de pente nette entre le haut de plage et la face dunaire qui présente un profil régulier dépassant 21 m NGF. La morphologie du haut de plage correspond à l'exemple AQI2 profil OCA L13 présenté dans le rapport Desmazes *et al.*, (2014).

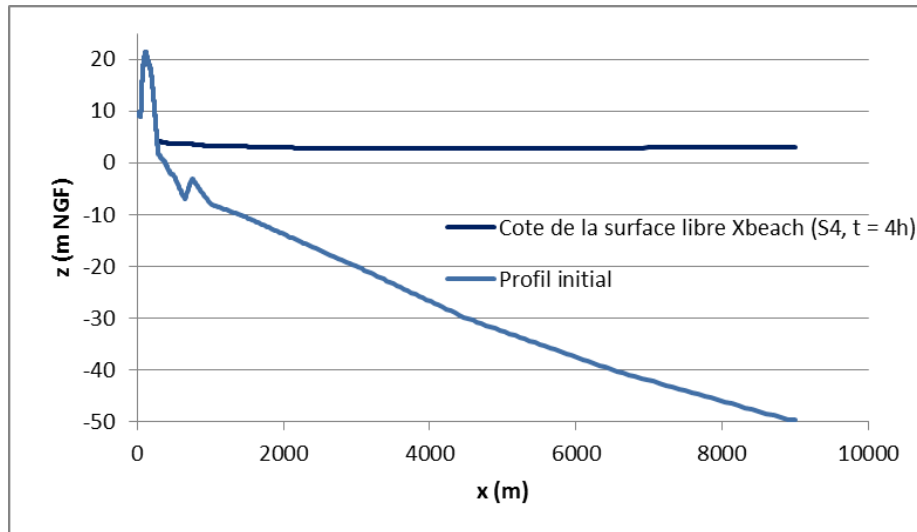


Figure 13 : Profil topo-bathymétrique initial du cas Landes et cote de la surface libre modélisée par XBeach.

- Caractérisation des scénarios hydrodynamiques

Pour les 4 scénarios testés les niveaux d'eau varient au cours d'un cycle de marée, comme indiqué dans la partie 4.3.1. Les forçages utilisés sont rappelés dans le Tableau 4.

Landes	scénario 1	scénario 2	scénario 3	scénario 4
Niveau d'eau (m IGN69)	2,4	2,9	2,9	3,0
Période de retour (an)	PMVE 115	10	50	100
Vagues Hs (m)	7,4	9,7	11,0	11,4
Période de retour (an)	1	10	50	100
Recul max face (m)	4,5	5	5	5
Altitude max face (m)	4,25	5	5,25	5,5

Tableau 4 : Scénarios mis en place pour le cas Landes et indicateurs de l'évolution de la dune simulée par XBeach.

- Résultats

Les quatre scénarios définis dans la partie 5.2 ont été utilisés pour simuler l'évolution du haut de plage et de la dune sous l'effet de conditions tempétueuses. Le niveau d'eau varie sous l'effet de la marée. Les niveaux d'eau maximaux et Hs des vagues sont rappelés dans le Tableau 4. La Figure 14 est centrée sur le haut de plage et la dune. Elle présente les résultats des profils de plage estimés par le modèle XBeach pour les 4 scénarios de forçage. La morphologie calculée par le modèle indique que l'érosion est limitée au bas de la face dunaire. La Figure 15 précise la zone en érosion et montre que les volumes érodés sont déposés sur un replat du haut de plage qui marquait initialement le pied de dune. Pour les scénarios 2, 3 et 4, la forme parabolique du profil ne permet pas d'observer de rupture de pente précise au niveau du pied de dune qui n'apparaît pas comme un indicateur pertinent pour quantifier ce recul. Les scénarios sont comparés en fonction des mêmes indicateurs que pour le cas Nord Médoc : le recul maximal de la face dunaire et le niveau maximal atteint par l'érosion (Tableau 4).

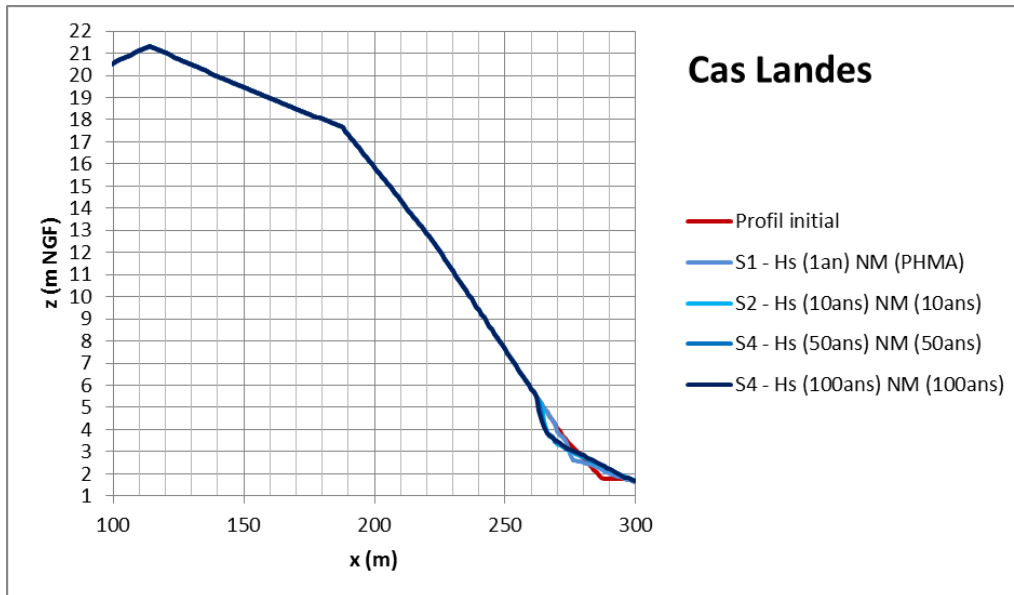


Figure 14 : Profils topographiques simulés par le modèle XBeach 1D pour les 4 scénarios du cas Landes

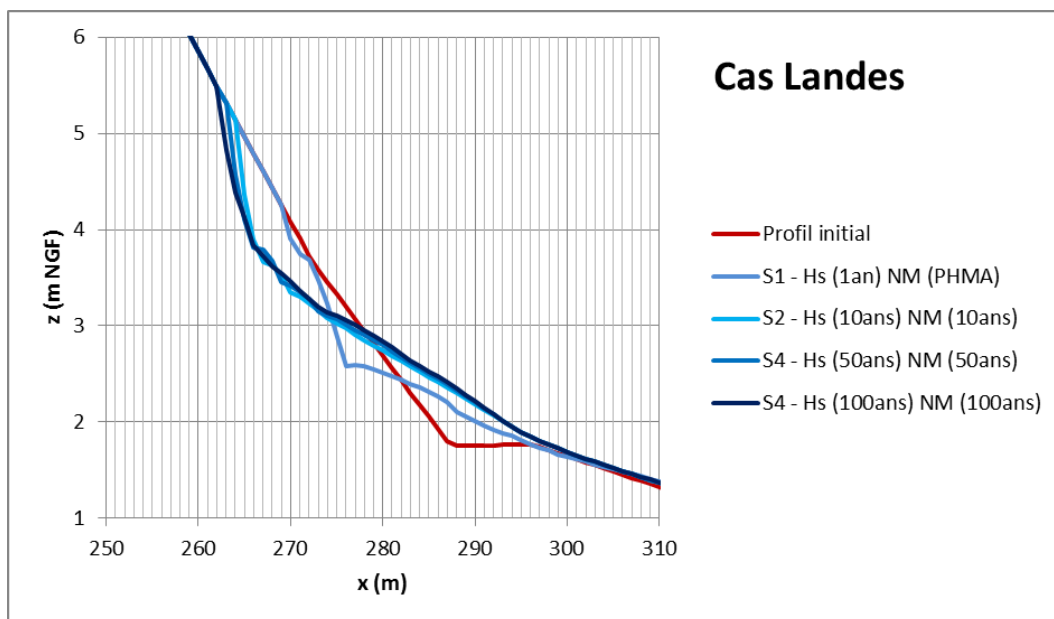


Figure 15 : Érosion dunaire simulées par le modèle XBeach 1D pour le cas Landes.

Le recul maximal de la face dunaire modélisée par XBeach est compris entre 5 m et 5,5 m pour les scénarios 2, 3 et 4. Les profils plage-dune générés pour ces 3 scénarios ont des formes paraboliques très proches, ce qui s'explique probablement par un niveau d'eau presque constant entre les scénarios. En revanche, l'altitude maximale affectée par l'érosion croît régulièrement avec l'augmentation des vagues, sans créer toutefois de très fortes différences de volumes érodés ou de grandes variations de la taille de falaise dunaire (comprise entre 3,2 et 3,5 m pour ces 3 scénarios). Le profil généré par le scénario 1 diffère par une altitude d'érosion atteinte moins élevée et la présence d'une rupture de pente nette qui marque le pied de dune et une falaise d'érosion de 1,6 m. Il faut noter qu'en comparant la position initiale du pied de dune avec celle du scénario 1 (en abscisse), la valeur du recul horizontal estimée est accrue et atteint 9 m.

Pour le cas Landes, le modèle a estimé un recul de l'ordre de 5 m et la formation d'une falaise d'érosion vive qui dépasse 3 m de hauteur. Nous pouvons qualifier cette érosion de « faible » car elle n'atteint que le pied de la dune initiale dont la face s'étend sur près de 180 m et dont la crête dépasse 21 m IGN69. Pour ce cas, des éléments de comparaison proviennent de la première phase de l'étude (BRGM/RP-63157-FR) qui montre qu'un recul annuel du pied de dune de 10 m ou plus n'est pas rare dans les Landes. De plus, l'érosion peut atteindre le milieu de la face dunaire (autour de 10 m NGF) et y provoquer des reculs de l'ordre de 5 m. En revanche, la crête de dune n'est atteinte par l'érosion dans les Landes que pour des configurations particulières (Capbreton par exemple). En bilan, le même constat que pour le cas Nord Médoc peut être dressé : si l'ordre de grandeur du recul semble relativement correct pour ce cas simplifié, il est possible que le modèle sous-estime l'érosion pour les scénarios les plus forts.

5.5. CAS CORSE ORIENTALE

- Profil topo-bathymétrique initial

Le profil topo-bathymétrique utilisé pour illustrer le cas Corse orientale (Figure 16) est caractérisé du large jusqu'à 20 m de profondeur par une pente relativement forte (de l'ordre de 1 %). La pente s'amortie fortement à environ 600 m du trait de côte, puis un système de 2 barres sableuses pré-littorales prend place entre 100 et 200 m du trait de côte. La largeur de la plage est réduite car la pente y est très forte, comprise entre 4 et 10 %. Le profil initial utilisé ne laisse pas apparaître de rupture de pente nette entre la plage et la dune, dont le pied se situe à environ 1,5 m d'altitude. Le sommet de la dune atteint 2,66 m tandis que sa largeur ne dépasse pas une cinquantaine de mètres. La morphologie du profil topo-bathymétrique correspond à l'exemple Corse 2 issu du profil ROL de Tavignano ; situé sur la plaine orientale Corse et présenté dans le rapport Desmazes *et al.*, (2014).

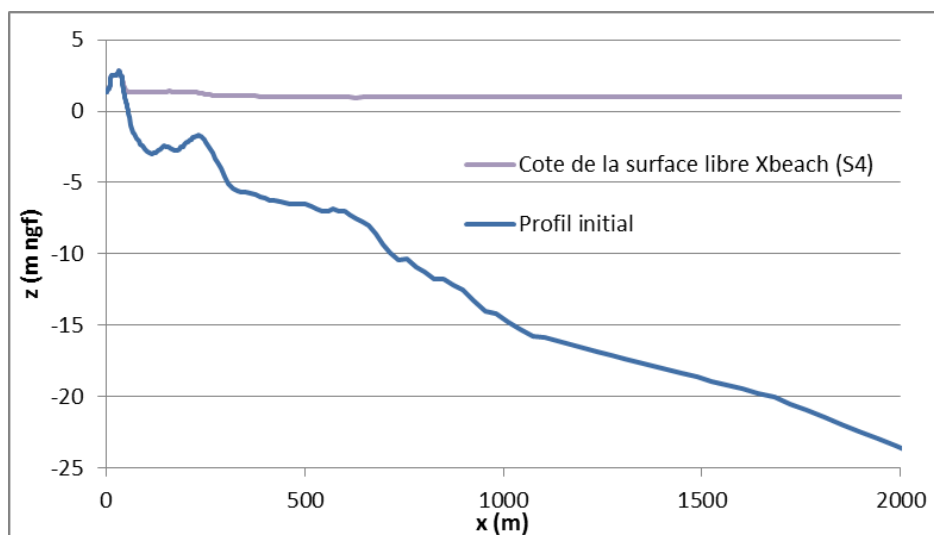


Figure 16 : Profil topo-bathymétrique initial du cas Corse orientale et cote de la surface libre modélisée par XBeach.

- Caractérisation des scénarios hydrodynamiques

Les quatre scénarios définis dans la partie 5.2 ont été utilisés pour simuler l'évolution du haut de plage et de la dune sous l'effet de conditions extrêmes. Le niveau moyen de l'eau reste stable pendant les 7 heures de simulation. Les niveaux d'eau maximaux et Hs des vagues sont rappelés dans le Tableau 5.

Corse orientale	scénario 1	scénario 2	scénario 3	scénario 4
Niveau d'eau (m IGN72)	0,6	0,8	1,0	1,1
Période de retour (an)	1	10	50	100
Vagues Hs (m)	3,7	5,5	6,4	6,9
Période de retour (an)	1	10	50	100
Recul max face (m)	2	2	2	2
Altitude max face (m)	2,2	2,4	2,4	2,4

Tableau 5 : Scénarios mis en place pour le cas Corse orientale et indicateurs de l'évolution de la dune simulée par XBeach.

- Résultats

La Figure 17 présente les résultats des profils de plage estimés par le modèle Xbeach pour les 4 scénarios de forçage. D'une façon générale, le modèle simule une faible érosion de la dune, une érosion plus forte du haut de plage subaérienne, tandis que le bas de la plage et la pente de plage sous-marine sont engraisés. La Figure 18 est centrée sur le haut de plage et la dune. Elle montre que le profil initial ne présentait pas de rupture de pente nette entre la plage et la dune, mais que le modèle en crée une en haut de plage sous l'effet des forçages de tempête.

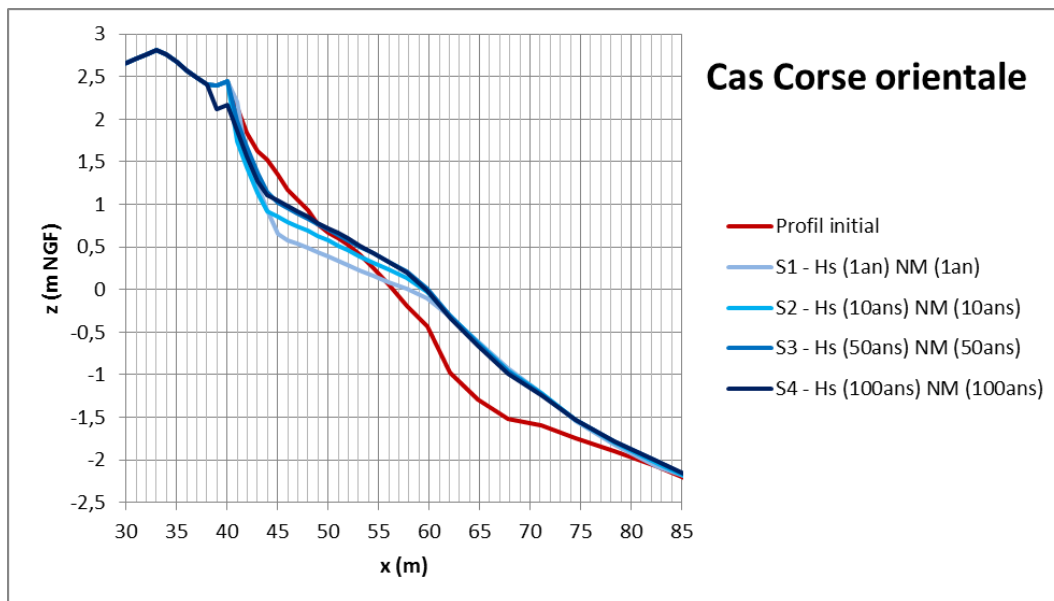


Figure 17 : Profils topographiques simulés par le modèle XBeach 1D pour les 4 scénarios du cas Corse orientale.

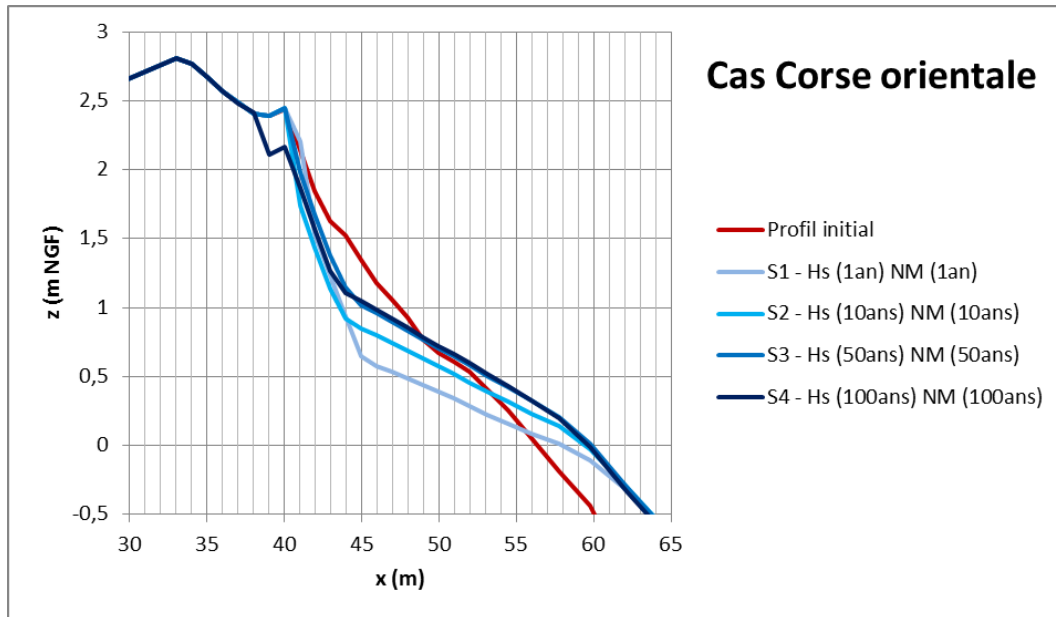


Figure 18 : Érosion de la plage et de la dune, simulés par le modèle XBeach 1D pour les 4 scénarios du cas Corse orientale.

L'indicateur de recul dunaire est donc estimé sur l'horizontale située entre le profil initial et le pied de dune post-tempête. Pour ce test, le recul de la face dunaire est identique pour l'ensemble des scénarios. Le seul élément qui distingue le scénario le plus fort avec les autres est lié à l'érosion d'une trentaine de centimètres d'une petite crête secondaire située à 2,5 m d'altitude, mais qui n'est pas pris en compte dans les indicateurs synthétiques proposés dans le Tableau 5.

Pour le cas Corse orientale, le modèle a estimé un recul maximal de la face dunaire de 2 m et la formation d'une falaise d'érosion vive inférieure à 1,5 m de hauteur. Nous pouvons qualifier cette érosion de « modérée » car elle n'atteint pas le sommet de la dune situé à 2,80 m IGN72. Pour ce cas, des éléments de comparaison proviennent de la première phase de l'étude (Desmazes *et al.*, 2014). Les observations pratiquées sur le terrain par le Réseau d'Observation du Littoral Corse indiquent un recul maximal annuel observé de 13 m.

Pour ce cas, il apparaît que les résultats de XBeach 1D sans calibration ne sont pas concordants avec les informations et les tests de la première phase d'étude. De nouveaux éléments d'observation, de contexte et d'analyse sont nécessaires pour faire progresser l'évaluation du Lmax pour ce cas. De plus, la prise en compte de la morphologie tridimensionnelle de la plage sous-marine dans une configuration 2D du modèle XBeach pourrait permettre d'améliorer les résultats des modélisations numériques.

5.6. CAS LANGUEDOC

- Profil topo-bathymétrique initial

Le profil topo-bathymétrique utilisé pour illustrer le cas Languedoc (Figure 19) est caractérisé au large et jusqu'à 10 m de profondeur par une pente relativement faible (comprise entre 0,2 et 0,5 %). Au-dessus de 10 m de profondeur, la pente augmente et la plage sous-marine est caractérisée par 2 barres sableuses situées entre 100 et 400 m du trait de côte. La crête de la barre externe se situe à 4,5 m de profondeur, tandis que la barre interne, de forme plus marquée, atteint 2 m de profondeur. La pente de plage est très forte et dépasse 10 % jusqu'au sommet d'une berme qui est très marqué sur ce profil. La berme forme une réelle barrière entre la mer et la dune. D'ailleurs, le haut de plage se trouve à environ 50 cm en

contrebas de la berme. Les dimensions de la dune sont modestes. Sa largeur est de l'ordre de 20 m et sa crête culmine à 2,7 m. Ce profil topo-bathymétrique simplifié correspond à un cas étudié au niveau de la plage de Sète (Gervais, 2012), dans le cadre du projet européen MICORE.

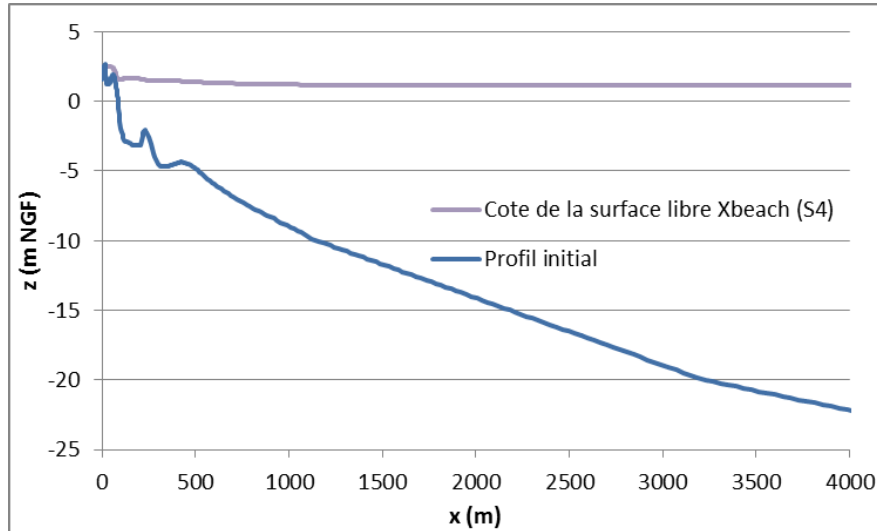


Figure 19 : Profil topo-bathymétrique initial du cas Languedoc et cote de la surface libre modélisée par XBeach.

- Caractérisation des scénarios hydrodynamiques

Les quatre scénarios définis dans la partie 5.2 ont été utilisés pour simuler l'évolution du haut de plage et de la dune sous l'effet de conditions extrêmes. Le niveau moyen de l'eau reste stable pendant les 7 heures de simulation. Les niveaux d'eau maximaux et Hs des vagues sont rappelés dans le Tableau 6.

Languedoc	scénario 1	scénario 2	scénario 3	scénario 4
Niveau d'eau (m IGN69)	environ 0,85	1,0	1,1	1,2
Période de retour (an)	1	10	50	100
Vagues Hs (m)	3,6	4,9	6,1	6,8
Période de retour (an)	1	10	50	100
Berme érosion crête (m)	0,3	0,35	0,35	0,4
Recul max face (m)	2	3,75	5,5	
Altitude max face (m)	2,25	2,5		
Recul crête (m)			2	4
Dune érosion crête (m)			0,3	0,75

Tableau 6 : Scénarios mis en place pour le cas Languedoc et indicateurs des évolutions de la dune et de la berme simulées par XBeach.

- Résultats

La Figure 20 est centrée sur la berme, le haut de plage et la dune. Elle présente les résultats des profils de plage estimés par le modèle XBeach pour les 4 scénarios de forçage. La présence d'une berme très marquée distingue ce profil des autres cas présentés jusqu'à présent. Les profils modélisés montrent que la berme est fortement érodée, quel que soit le scénario de forçage. En revanche, l'érosion de la dune varie très fortement selon les scénarios.

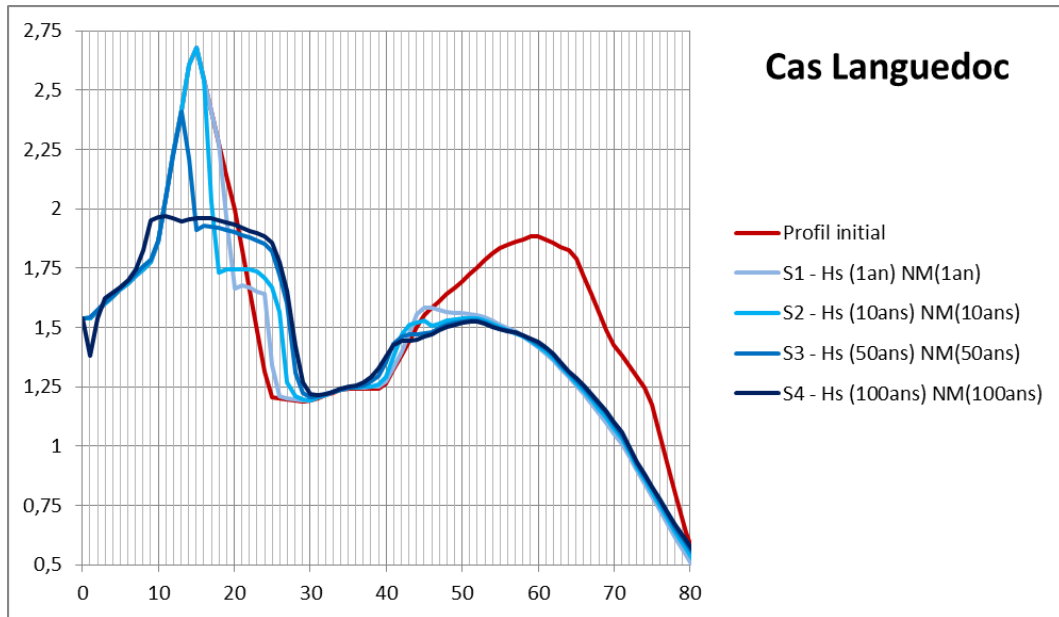


Figure 20 : Profils topographiques simulés par le modèle XBeach 1D pour les 4 scénarios du cas Languedoc

Pour ce cas, plusieurs indicateurs complémentaires sont utilisés pour décrire l'évolution de la dune. L'érosion de la berme est également prise en compte, mais on constate une érosion très proche pour les 4 scénarios. L'indicateur de recul de la face dunaire est utilisé pour quantifier l'érosion au niveau d'une rupture de pente très nette simulée par le modèle. Sous cette rupture de pente, la face dunaire est en accrétion. Au-dessus de la rupture de pente, la falaise dunaire mesure entre 40 cm et 80 cm. La valeur du recul est comprise entre 2,25 m pour le scénario 1 et 5,5 m pour le scénario 3. Pour les scénarios 1 et 2, l'altitude maximale atteinte par l'érosion peut être évaluée mais cet indicateur ne peut être maintenu pour le scénario 3 qui voit l'ensemble de la dune érodée, la crête s'abaisser de 30 cm et reculer de 2 m. La transformation de la dune pour le scénario 4 est encore plus forte. La forme initiale de la dune est effacée au profit d'une zone basse (inférieure à 2 m NGF), mais dont la face est plus épaisse de 5 m.

Le tracé des résultats heure par heure (scénario de 7 h consécutives) (Figure 21) montre que les évolutions du profil dune-plage modélisées deviennent beaucoup plus faibles après 4 h environ.

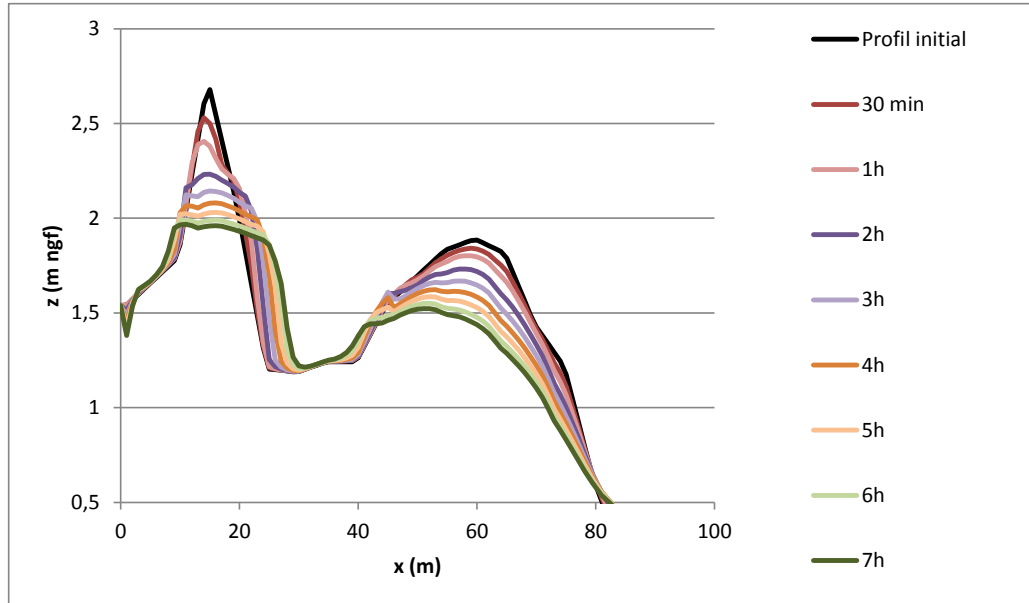


Figure 21 : Évolution temporelle simulée par XBeach pour le profil «Languedoc» scénario 4.

Pour le cas Languedoc, le modèle a estimé une érosion importante de la berme et de la dune. Pour les scénarios 1 et 2, la face dunaire recule de 2 à 3,75 m. Pour le scénario 3, la face dunaire recule de 5 m et la crête est érodée de 30 cm. Pour le scénario 4, l'ensemble de la dune est impactée car la crête recule de 5 m et est érodée de 75 cm. Pour les scénarios 1 et 2, l'érosion est modérée car elle n'atteint pas la crête de dune. Pour le scénario 3, cette érosion est forte, et pour le scénario 4, les modifications morphologiques simulées par XBeach sont très fortes.

Des éléments de comparaison proviennent des travaux de Gervais (2012) dont les méthodes d'acquisition de données sur le terrain ont été présentées dans le rapport (Desmazes *et al.*, 2014). Ces travaux sont menés sur la plage de Sète, dont la partie sud a servi pour établir le profil du cas simplifié. Au cours de l'étude menée dans le cadre du projet européen MICORE, huit événements énergétiques ont été identifiés à partir de hauteurs significatives supérieures à 3 m, sans pour autant dépasser 4,5 m. La Figure 22 présente les évolutions morphologiques observées sur le terrain après les événements de tempête. Les tempêtes 1, 4, 7 et 8 présentent des érosions faibles à modérées de la face dunaire ; équivalentes au scénario 1 ou 2 reproduit par XBeach. Les tempêtes 3, 4 et 7 érodent sensiblement la berme, mais moins fortement que sur les profils modélisés (Figure 20). Les tempêtes 1, 7 et 8 sont marquées par des dépôts sableux situés sur le flanc interne de la berme et dans la dépression qui relie le pied de dune et la berme. XBeach reproduit ces phénomènes pour les scénarios traités, en accentuant plutôt les dépôts sur le pied de dune.

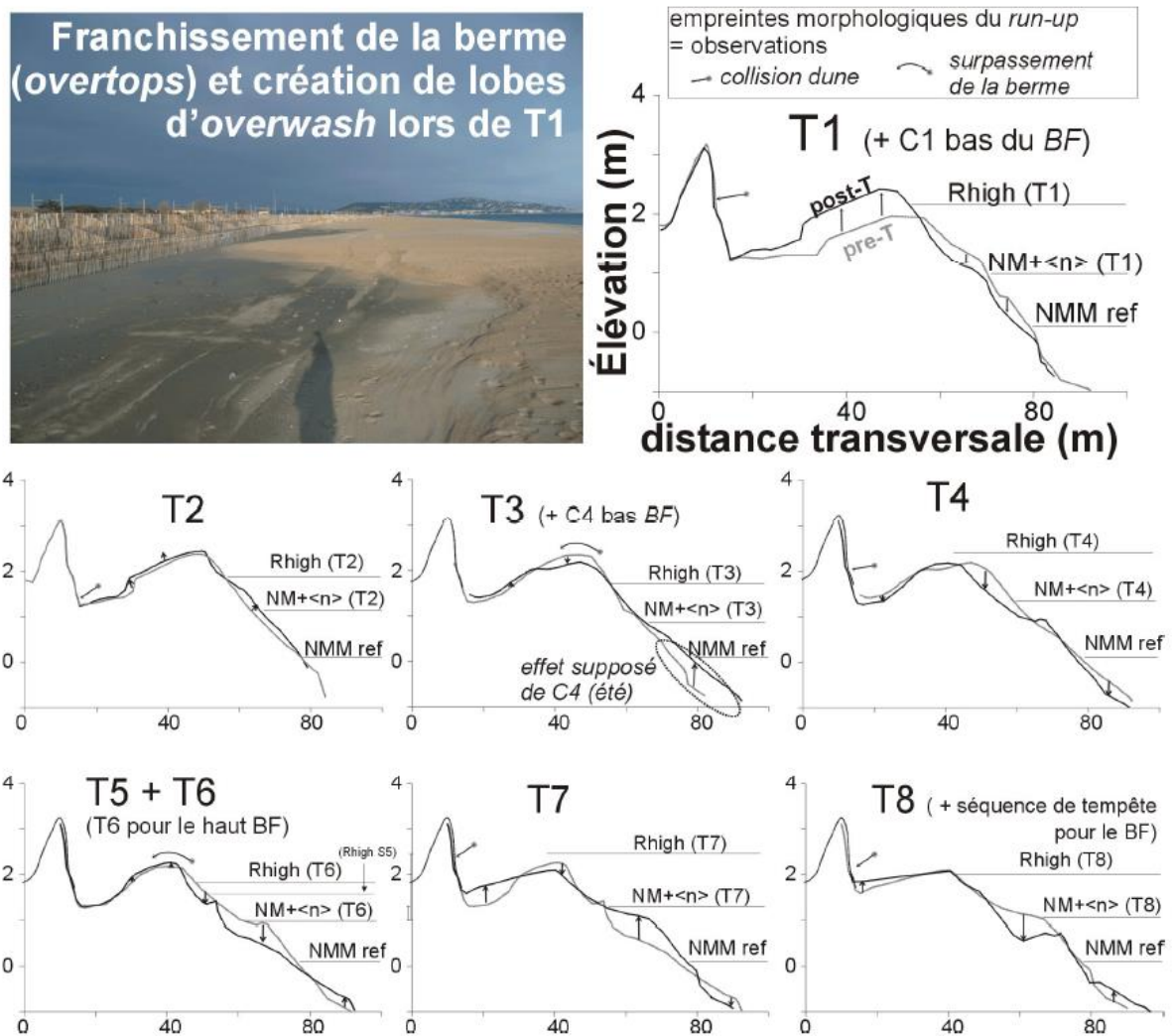


Figure 22 : Évolution de la plage émergée dans la zone sud du Lido de Sète avec les tempêtes T1 à T8. Pour chaque tempête (vignette), les flèches montrent les changements verticaux opérés entre la situation initiale (en gris) et la situation finale post-tempête (en noir). (Le sigle « BF » signifie beachface – bas de plage). Source : Gervais, 2012.

Pour ce cas, les profils morphologiques simulés par XBeach pour les scénarios 1 ou 2 sont relativement cohérents avec les observations réalisées sur la dune et le haut de plage dans le cadre des travaux de Gervais (2012). Le fait que les scénarios 3 et 4 représentent bien les impacts croissants des conditions énergétiques sur la forme de la dune et de la plage apparaît cohérent.

5.7. CAS PERTUIS CHARENTAIS

- Profil topo-bathymétrique initial

Le profil topo-bathymétrique utilisé pour illustrer le cas Pertuis charentais (Figure 23) diffère des précédents profils car il ne débute pas dans des fonds de 50 m. Ce profil simplifié est situé au fond d'une baie, dans un secteur de faibles profondeurs. Il est caractérisé par une pente faible (0,1 %) et constante qui s'étend de - 3 m IGN69 à jusqu'à + 2 m IGN69 sur environ 2 500 m. Cette altitude de 2 m ING69 est marquée par une rupture de pente qui forme le pied de dune. Le premier cordon dunaire a une largeur d'environ 40 m et atteint 4,3 m NGF. Une seconde crête plus basse (4 m) est située 60 m derrière. Le profil de plage

subaérienne a été défini à partir de données Lidar (RGE Alti IGN) utilisés dans le cadre des travaux de thèse de André (2013).

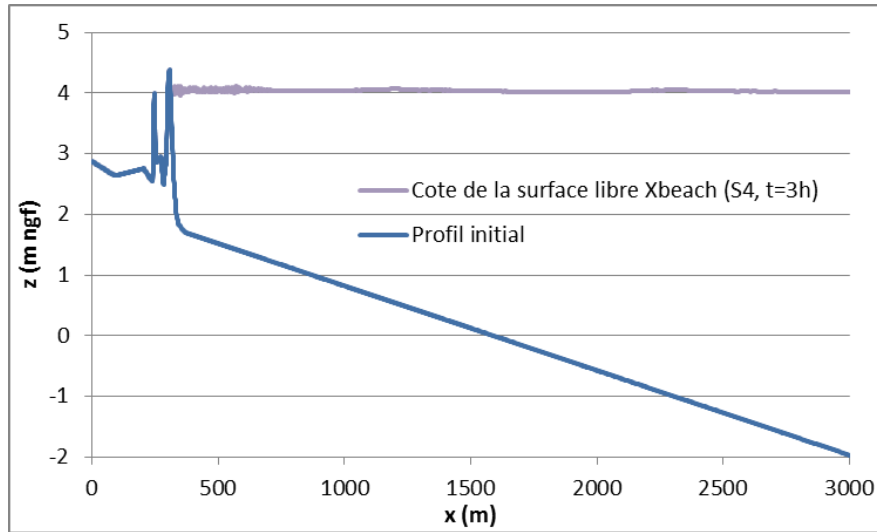


Figure 23 : Profil topo-bathymétrique initial du cas Pertuis charentais et cote de la surface libre modélisée par XBeach.

- Caractérisation des scénarios hydrodynamiques

Les quatre scénarios définis dans la partie 5.2 ont été utilisés pour simuler l'évolution du haut de plage et de la dune sous l'effet de conditions tempétueuses. Le niveau d'eau varie sous l'effet de la marée. Les niveaux d'eau maximaux et Hs des vagues au large sont rappelés dans le Tableau 7.

Pertuis	scénario 1	scénario 2	scénario 3	scénario 4
Niveau d'eau (m IGN69)	3,1	3,6	3,8	3,9
Période de retour (an)	PMVE 115	10	50	100
Vagues Hs (m)	7,4	9,3	10,2	10,5
Période de retour (an)	1	10	50	100
Recul max face (m)	3,5	4	5	5
Altitude max face (m)	3,8	4,2	4,3	4,3
Recul crête (m)			0	1
Erosion crête (m)			0	0,05

Tableau 7 : Scénarios mis en place pour le cas Pertuis charentais et indicateurs de l'évolution de la dune simulée par XBeach.

De plus, comme indiqué dans la partie 4.3.3, les caractéristiques des vagues au large sont fixes, mais elles sont propagées dans la baie grâce au modèle Swan pour créer une série temporelle de vagues qui varient en fonction du niveau d'eau et de la profondeur.

Ces simulations préalables sont réalisées en se basant sur les données bathymétriques obtenues à partir des sondes HISTOLITT-SHOM. La présentation détaillée de ces données bathymétriques peut être consultée dans le rapport Garcin *et al.*, 2012. Le niveau de marée y est identique sur l'ensemble du domaine modélisé et correspond à une courbe de marée de coefficient 100 atteignant comme niveau maximal la valeur de niveau extrême du scénario retenu (période de retour 1, 10, 50, 100 ans). Dans cette configuration, les niveaux d'eau extrêmes du site sont issus de la publication SHOM-CETMEF (2012) et apparaissent équivalents à ceux calculés pour le port de la Rochelle qui bénéficie d'observations marégraphiques. Pour ce cas simplifié, on considèrera que les niveaux dans la publication

Shom-Cetmef (2012), équivalant à ceux du port de la Rochelle, intègrent le *wave setup* environnant présenté dans la partie 4.3.1. Les conditions de vague sont introduites dans le modèle Swan sous forme d'une série temporelle stationnaire aux limites marines du domaine, également pour des périodes de retour 1, 10, 50, 100 ans.

La Figure 24 illustre en carte et en graphique la modification très sensible des caractéristiques des vagues depuis le large, jusqu'au fond du Pertuis d'Antioche.

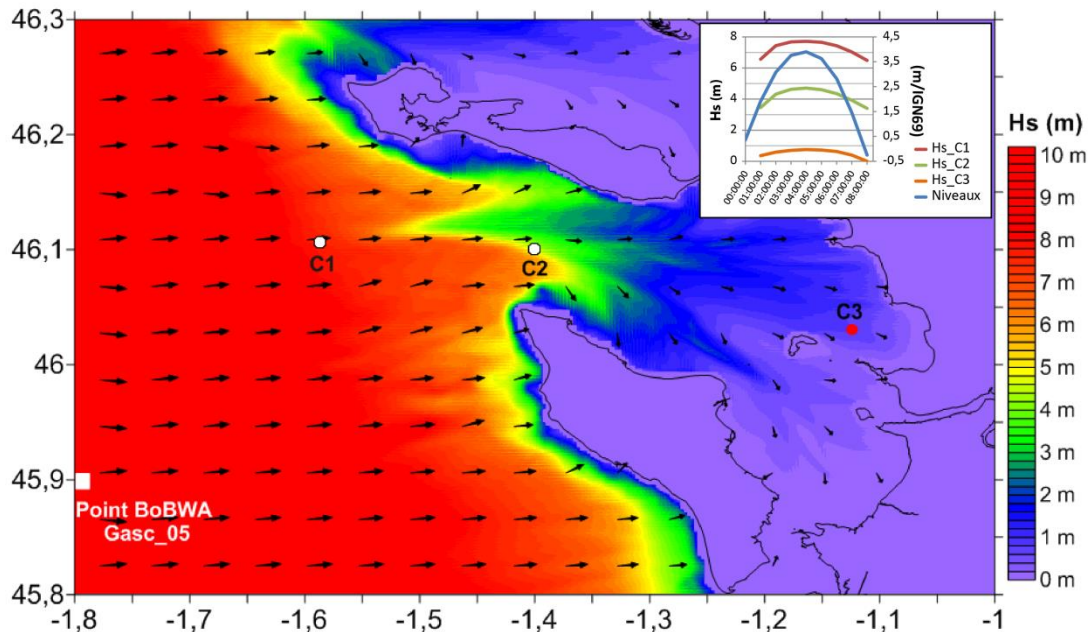


Figure 24 : Carte des hauteurs significatives aux abords et dans la zone des Pertuis charentais, simulées par le modèle Swan. On distingue dans l'encart en haut à droite la variabilité dans le temps des conditions de niveaux d'eau et de Hs pour trois points du domaine.

- Résultats

La Figure 25 est centrée sur le haut de plage et la dune. Elle présente les résultats des profils de plage estimés par le modèle XBeach pour les 4 scénarios de forçage. Comme pour certains scénarios du cas Languedoc, on observe la création d'une rupture de pente très nette qui marque la limite entre une petite falaise d'érosion dunaire d'environ 60 cm et la plage. La comparaison visuelle des profils générés par le modèle pour les 4 scénarios montre des volumes érodés relativement similaires entre les scénarios, tandis que l'altitude de la rupture de pente augmente significativement avec la période de retour du niveau d'eau.

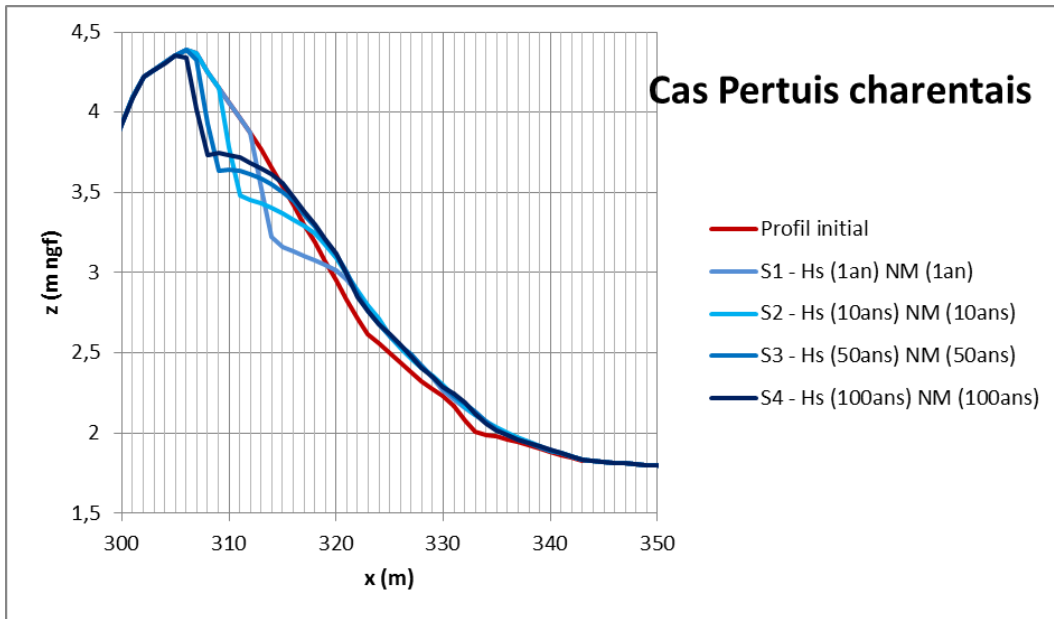


Figure 25 : Profils topographiques de la plage et de la dune, simulés par le modèle XBeach 1D pour les 4 scénarios du cas Pertuis charentais.

Les indicateurs de recul de la face dunaire utilisés jusqu'à présent sont valables dans ce cas. Le recul maximal constaté est compris entre 3,5 m pour le scénario 1 et 5 m pour les scénarios 3 et 4. L'érosion atteint la crête de dune pour les scénarios 3 et 4. La crête est même érodée très légèrement et recule d'environ 1 m pour le scénario 4. Ces érosions dunaires très franches sont compensées par une légère accrétion de la plage entre 2 et 3 m d'altitude.

Concernant l'évolution dans le temps du profil (Figure 26), on constate que l'érosion se fait principalement au moment de l'étalement de la pleine mer, ce qui pourrait expliquer l'altitude croissante des zones d'érosion constatée entre les différents scénarios (Figure 25).

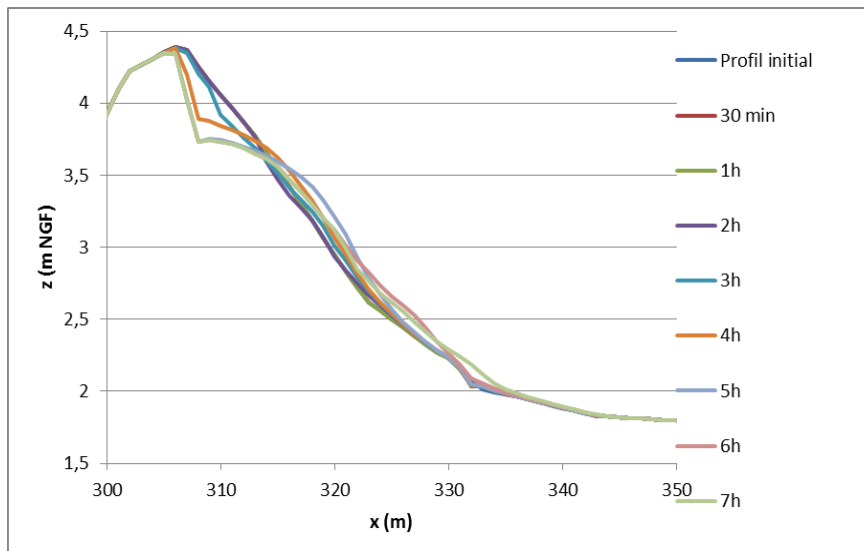


Figure 26 : Evolution temporelle simulée par XBeach pour le profil « Pertuis Charentais » et le scénario 4.

Pour le cas Pertuis charentais, le modèle XBeach a estimé un recul compris entre 3,5 et 5 m et la formation d'une falaise d'érosion vive de 70 cm de hauteur. Nous pouvons qualifier cette érosion de « modérée à forte » car, elle atteint la crête de dune pour les scénarios 3 et

4, bien que le volume total érodé soit relativement limité. Pour ce cas, des éléments de comparaison proviennent des travaux menés sur les dégâts de la tempête Xynthia dans le cadre de la thèse de André (2013) et d'un rapport émanant de la réserve naturelle du Marais d'Yves (Cayatte, 2010) qui décrivent la submersion du secteur des Boucholeurs et la création de brèches dans la dune bordant le marais d'Yves (Figure 27). Dans le secteur où la dune a subi des brèches lors de la tempête Xynthia, le LMax atteint la largeur de la dune avant l'évènement. La modélisation 1D testée sur un profil simplifié similaire à ceux du marais d'Yves n'a pas permis d'éroder complètement la dune. Parmi les 4 scénarios choisis, aucun n'ont provoqué de débordement au-dessus de la dune. Ce résultat est toutefois cohérent avec l'état des connaissances sur les niveaux d'eau et les conditions de vagues dans ce secteur lors du passage de la tempête Xynthia. En effet, les résultats obtenues par Pedreros et Paris 2012, montrent que les niveaux au maximum de la tempête était compris entre 4,8 et 5 m/IGN69 soit 1 m au-dessus des niveaux centennaux utilisés. On ajoutera que devant le marais d'Yves, les conditions maximales de vagues présentées dans le rapport Pedreros et Paris (2012, Hs \approx 2 m) sont également nettement supérieures au scénario centennal proposé ici (Hs \approx 1 m). Il est donc tout à fait logique que les scénarios envisagés ici produisent des érosions moins importantes que celle observées suite à l'évènement Xynthia.

Les tests simplifiés mis en place ont permis de simuler de très fortes érosions pour les scénarios 3 et 4. Ces résultats sont encourageants même si la capacité du modèle à reproduire des évènements extrêmes réels dans ce type d'environnement nécessite d'être testée à partir d'éléments d'observation et d'analyses supplémentaires. Ainsi, des analyses complémentaires pourraient être réalisées afin d'améliorer la reproduction des niveaux (par exemple : couplages de modèles hydrodynamique et de vague) et des vagues au fond des Pertuis (introduction des conditions vents).



*Figure 27 : Arasement du cordon dunaire provoqué par le débordement.
Photo prise après le passage de Xynthia. Source : Cayatte, 2010.*

5.8. CAS NORD-PAS-DE-CALAIS

- Profil topo-bathymétrique initial

Le profil topo-bathymétrique utilisé pour illustrer le cas Nord-Pas-de-Calais (Figure 28) est marqué par la présence d'un large banc tidal situé entre 2 et 5 km du trait de côte, dont la crête atteint - 2,4 m IGN69. Le flanc interne du banc est raide et descend jusqu'à - 12 m vers un chenal pré littoral d'environ 500 m de large. Puis une pente irrégulière (1 % en moyenne) permet aux fonds de remonter rapidement jusqu'à - 3 m. La plage intertidale se compose ensuite d'une succession de barres sableuses et de bâches (petite dépression entre les

barres). Au-dessus de 3 m IGN69, le premier cordon dunaire s'étend sur environ 100 m de large. L'altitude de la crête dépasse 13,5 m. Le profil de plage a été défini à partir de données topographiques collectées par le laboratoire LOG de l'université de la Côte d'Opale et utilisé dans le cadre du projet ANR Vulsaco et de la thèse de Maspataud (2011).

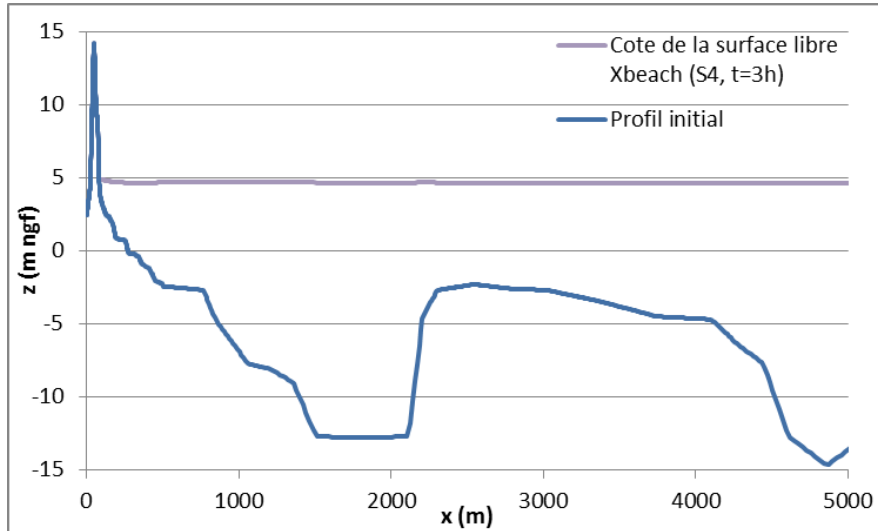


Figure 28 : Profil topo-bathymétrique initial du cas Nord-Pas-de-Calais et cote de la surface libre modélisée par XBeach.

- Caractérisation des scénarios hydrodynamiques

Les quatre scénarios définis dans la partie 5.2 ont été utilisés pour simuler l'évolution du haut de plage et de la dune sous l'effet de conditions tempétueuses. Le niveau d'eau varie sous l'effet de la marée. Les niveaux d'eau maximaux et Hs des vagues au large sont rappelés dans le Tableau 8.

Nord Pas de Calais	scénario 1	scénario 2	scénario 3	scénario 4
Niveau d'eau (m IGN69)	3,4	4,3	4,5	4,7
Période de retour (an)	PMVE 115	10	50	100
Vagues Hs (m)	2,5	3,3	3,9	4,1
Période de retour (an)	1	10	50	100
Recul max face (m)	3,5	3,5	3	3
Altitude max face (m)	3,9	5,2	6	6,5

Tableau 8 : Scénarios mis en place pour le cas Nord-Pas-de-Calais et indicateurs de l'évolution de la dune simulés par XBeach.

- Résultats

La Figure 29 est centrée sur le haut de plage et la dune. Elle présente les résultats des profils de plage estimés par le modèle XBeach pour les 4 scénarios de forçage et montre que seule une petite partie du bas de la dune est érodée. La Figure 30 montre plus précisément les érosions simulées par le modèle. Comme pour le cas Landes, le profil généré par le scénario 1 est différent des scénarios 2, 3 et 4 qui se ressemblent fortement. Ainsi, le scénario 1 génère une érosion très légère qui affecte la zone de transition entre le haut de plage et la dune. Les scénarios 2, 3 et 4 en revanche provoquent un recul plus sensible du pied de dune et la création de petites falaises d'érosion de 1 à 1,7 m de hauteur.

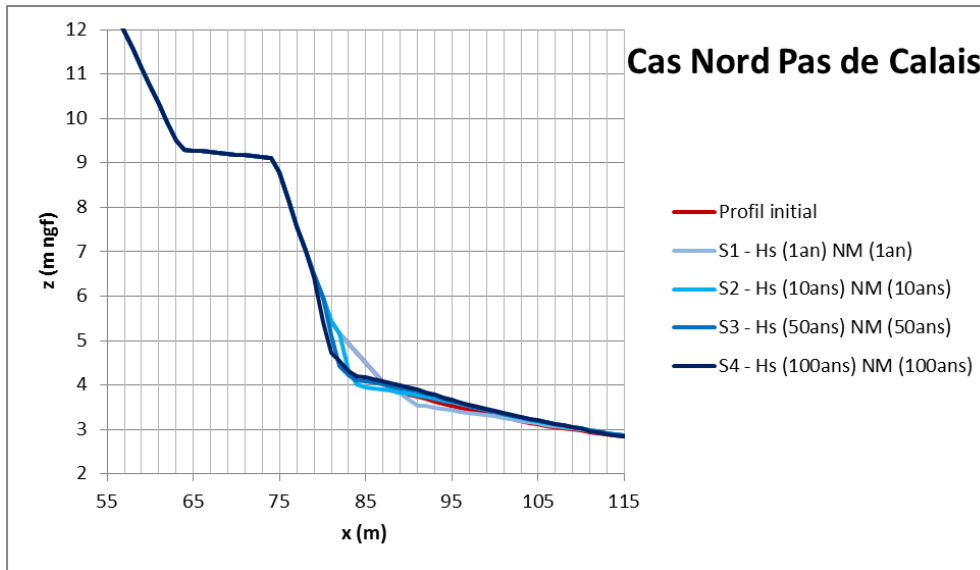


Figure 29 : Profils topographiques simulés par le modèle XBeach 1D pour les 4 scénarios du cas Nord-Pas-de-Calais

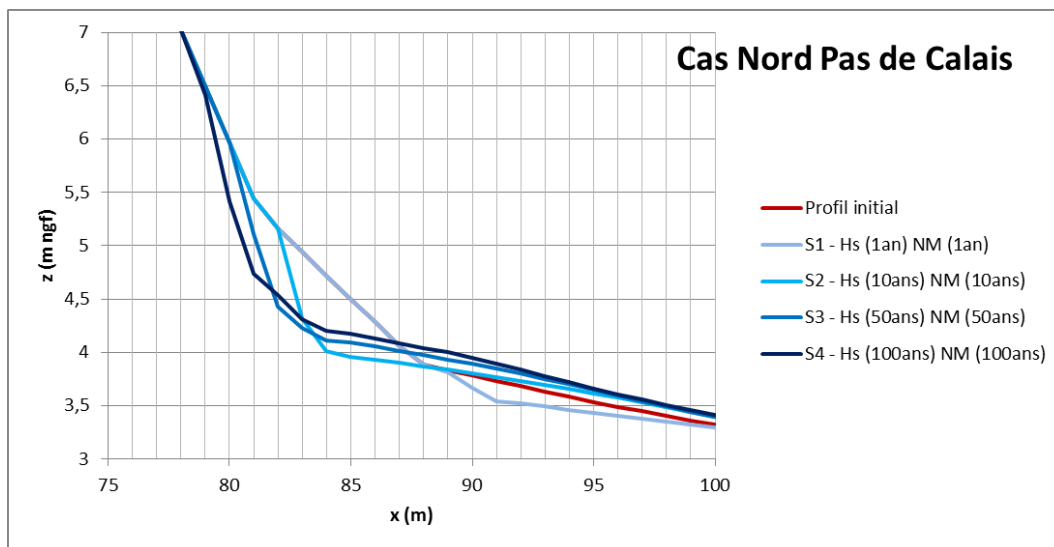


Figure 30 : Erosion dunaire simulées par le modèle XBeach 1D pour le cas Nord-Pas-de-Calais

Les indicateurs utilisés pour décrire l'érosion de la face dunaire fournissent des informations comparables aux cas Landes, Corse ou Nord Médoc, avec des reculs maximaux constants, voir même légèrement moins forts pour des scénarios plus intenses. L'indicateur des altitudes maximales atteintes par l'érosion concorde mieux avec l'intensité croissante des différents scénarios. Pour les scénarios 1 à 4, cette altitude est comprise entre 3,9 et 6,5 m IGN69.

Concernant l'évolution du profil dans le temps, les modifications les plus nettes se produisent entre 3 h et 5 h (Figure 31). Le constat pour cet essai est identique aux autres cas à marées testés, dans cette configuration, la période d'étales de haute mer semble la plus favorable pour permettre une attaque érosive de la plage. Ce cas montre aussi assez clairement que, dans la configuration retenue pour ces tests, le modèle ne reproduit pas d'érosion significative pour les barres sableuses de la plage intertidale.

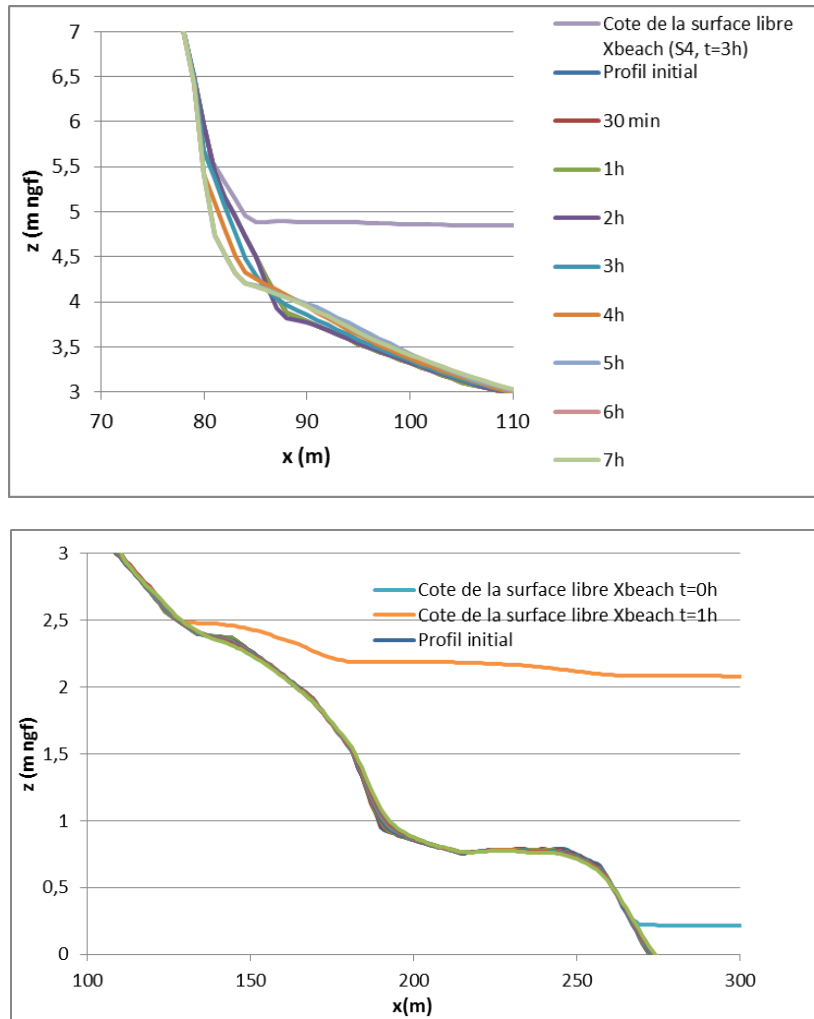


Figure 31 : Evolution temporelle du pied de dune (en haut) et de la plage (en bas) simulée par XBeach pour le profil « Nord-Pas-de-Calais » et le scénario 4.

Pour le cas Nord-Pas-de-Calais, le modèle a estimé un recul de l'ordre de 3,5 m et la formation d'une falaise d'érosion vive comprise entre 1 et 2 m de hauteur. Nous pouvons qualifier cette érosion de « faible » car elle n'atteint que le pied de la dune et ne dépasse pas la première rupture de pente de la face située à 9 m d'altitude.

Des éléments de comparaison proviennent des travaux de Maspataud (2011) menés dans le cadre du projet ANR Vulsaco (Idier et *al.*, 2010). La dune Dewulf traitée dans ces travaux a servie de base pour établir le profil simplifié Nord-Pas-de-Calais. Sept événements énergétiques ont été suivis pendant 3 ans, avec des conditions de vagues au large comprises entre 4 m et 4,5 m et des hauteurs d'eau allant de 2,96 à 4,15 m IGN69. Pour ces conditions, le plus fort recul mesuré est de 4 m pour la tempête de mars 2007. Cette valeur est comparable aux simulations XBeach, mais la Figure 32 montre bien que ce recul observé concerne le profil dunaire jusqu'à la première rupture de pente, ce qui n'a pas été reproduit par le modèle XBeach qui n'érode que le pied de dune. Il faut noter que ce site est caractérisé par un transport éolien longshore, ainsi que de forts courants de marée, qui ne sont pas pris en compte par le modèle XBeach 1D. Cependant, pour les événements moins impactant, les observations montrent une érosion du pied de dune assez similaire au profil simulé pour le scénario 1 (Figure 33).

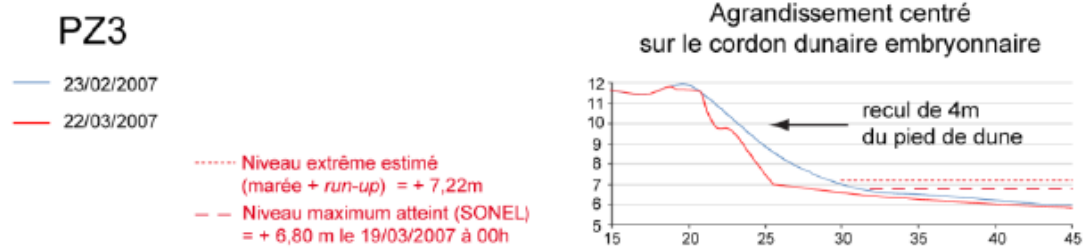


Figure 32 : Profils topographiques réalisés avant/après la tempête de mars 2007 sur le site de la Dune Dewulf. Source : Maspataud (2011).

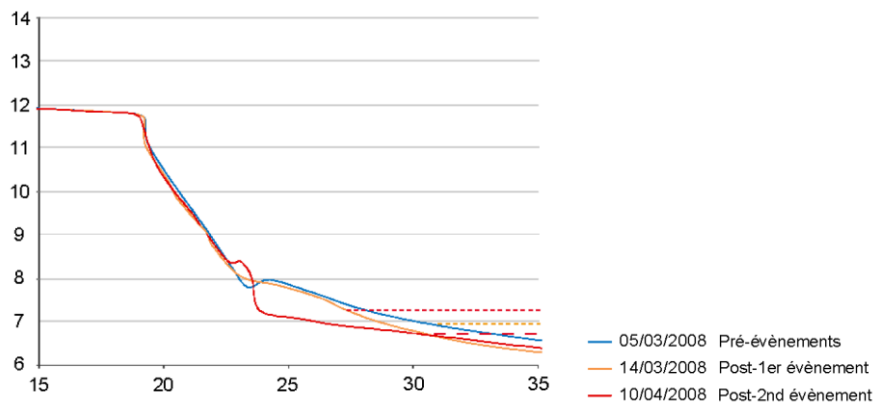


Figure 33 : Profils topographiques réalisés avant/après le coup de vent de mars 2008 sur le site de la Dune Dewulf. Source : Maspataud (2011).

5.9. BILAN

Le modèle XBeach a été testé dans une configuration 1D prédéfinie pour six cas simplifiés illustrant des profils de plages variés et caractéristiques de certaines côtes métropolitaines. Les forçages simplifiés au large ont été décrits dans ce chapitre, sur la base des éléments méthodologique du chapitre 4. Quatre scénarios ont été définis pour prendre en considération des intensités croissantes de conditions énergétiques, depuis le scénario 1 (niveaux d'eau et vagues annuels) jusqu'au scénario 4 (niveaux d'eau et vagues centennaux). L'évolution du niveau d'eau est prise en compte pour les côtes à marée durant 7 h autour de la pleine mer (Nord-Pas-de-Calais, Pertuis, Médoc, Landes). Pour les côtes sans marée, le niveau est fixe durant 7 h (Languedoc et Corse orientale). Pour l'ensemble des cas, les conditions de houles au large sont fixes pendant 7 h. En revanche, pour le cas Pertuis situé en fond de baie, les vagues sont propagées dans la baie au cours de la marée grâce au modèle Swan qui fournit une série temporelle de vagues.

Les premiers résultats remplissent les objectifs initiaux de l'étude qui consistaient à tester la mise en place du modèle XBeach sur différents types de morphologies et à observer la simulation des modalités de l'érosion des fronts dunaires sous l'effet de forçages marins très énergétiques, caractéristiques des différentes façades métropolitaines.

Le modèle XBeach utilisé en mode 1D permet de reproduire des phases d'érosion dunaire pour des cas simplifiés de métropole. Ces tests réalisés sans phase de calibrage du modèle montrent que la phase d'érosion principale intervient sur une durée de 2 à 3 h, avant que le modèle ne se stabilise sur un profil d'équilibre morphodynamique. Lorsque le profil d'équilibre est atteint et que la morphologie n'évolue plus significativement, il est possible de déterminer le recul maximal modélisé.

Les résultats montrent une possible sous-estimation de l'érosion pour 4 cas tests (Nord Médoc, Landes, Corse, Nord-Pas-de-Calais). Toutefois, le manque de données « terrain » concernant l'érosion provoquée par différentes conditions hydrodynamiques de tempête ne permet pas de conclure. Ce constat pointe l'intérêt de procéder au calibrage du modèle pour les différents sites tests, sur la base de mesures et d'observations précises. De plus, l'impact de la morphologie tridimensionnelle et des processus longshore pourrait expliquer la sous-estimation probable des érosions modélisées. La prise en compte de ces phénomènes est possible avec le modèle XBeach, elle nécessite de mettre en place des configurations plus complexes en 2D.

6. Conclusion

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.

Les mesures et les quantifications in situ de ces reculs exceptionnels sont rares et ponctuelles. C'est pourquoi il est indispensable de développer des méthodes estimatives complémentaires aux observations de terrain et aux mesures historiques. Cette phase de travail en deux ans vise donc à étudier les méthodes d'estimation du recul maximal dunaire lors des tempêtes en explorant les possibilités de la modélisation numérique. La première année d'étude consiste à tester le modèle XBeach sur des cas simplifiés de profils perpendiculaires à la côte. Dans un premier temps, le travail avait pour objectif de présenter rapidement le modèle et ses applications pour l'érosion dunaire, à partir d'une bibliographie récente. Puis l'étude s'est consacrée à la description d'une méthode de détermination des données hydrodynamiques de tempête à fournir au modèle. Une fois les conditions de forçages estimées, des simulations numériques d'évolution de la plage et de la dune en conditions extrêmes ont été mises en œuvre pour 6 cas simplifiés de profils de plage. Ces cas simplifiés ne sont pas strictement représentatifs de façades maritimes ou de territoires, mais correspondent à des plages rencontrées en Méditerranée (Languedoc et Corse orientale), Atlantique (Pertuis charentais, Nord Médoc et Landes) et Manche-Mer du Nord (Nord-Pas-de-Calais).

Bibliographie

Le modèle XBEACH (eXtreme Beach behavior) est un outil de modélisation numérique morphodynamique de la zone littorale. Ses caractéristiques lui permettent de reproduire certains des phénomènes se déroulant pendant les tempêtes, et en particulier l'érosion dunaire. Sa particularité réside, entre autres, dans l'amélioration de la modélisation du jet de rive qui prend en compte les effets des ondes infra-gravitaires. Le modèle profite d'un développement rapide et suscite actuellement l'engouement de la communauté scientifique. Les projets de recherche ambitieux comme le projet européen FP7 MICORE l'ont utilisé pour le tester sur des sites littoraux européens, calibrer précisément les nombreux paramètres de réglage et tenter de développer des systèmes opérationnels de suivi de l'impact des tempêtes.

Méthode de détermination des conditions de forçage

La détermination des conditions hydrodynamiques prises en compte pour simuler l'érosion dunaire est une étape importante avant la mise en œuvre du modèle. Les conditions d'agitation et le niveau de la mer sont les deux forçages primordiaux à connaître. Plusieurs approches ont été présentées pour décrire les forçages. La méthode retenue pour ces tests simplifiés consiste à déterminer des conditions de niveaux d'eau (marée + surcote atmosphérique) et de vagues au large (correspondant à des conditions de périodes de retour statistique) à partir d'hypothèses fortes sur la concomitance des maximums d'intensité. Les forçages marins sont donc introduits sous forme de niveaux d'eau et de conditions de vague au large de période de retour d'occurrence comprise entre 1 an et 100 ans. En faisant l'hypothèse que les pics d'intensité interviennent simultanément, la méthode utilisée propose des conditions de forçage maximisées. Quatre scénarios ont été employés :

- le scénario 1 (S1) correspond à un niveau d'eau annuel (ou coefficient de marée 115) et des vagues dont la hauteur significative a une période de retour de 1 an ;
- le scénario 2 (S2) correspond à un niveau d'eau décennal et des vagues dont la hauteur significative a une période de retour de 10 ans ;
- le scénario 3 (S3) correspond à un niveau d'eau cinquantennal et des vagues dont la hauteur significative a une période de retour de 50 ans ;
- le scénario 4 (S4) correspond à un niveau d'eau centennal et des vagues dont la hauteur significative a une période de retour de 100 ans.

Dans les zones de marée réduite (cas Languedoc et Corse orientale), le niveau d'eau extrême est considéré constant au cours de la simulation. Pour les zones à marée, la modélisation utilise un niveau d'eau qui varie durant 7 h autour de la pleine mer qui atteint alors le niveau d'eau extrême défini.

Simulation numérique d'érosion dunaire avec le modèle XBeach 1D

Cette étude a permis de mettre en œuvre le modèle XBeach pour 6 cas simplifiés représentant des plages du Nord-Pas-de-Calais, Pertuis charentais, Nord Médoc, Landes, Languedoc et Corse orientale. Pour ces 6 cas, les paramètres de réglage du modèle n'ont pas été modifiés afin de tester simplement le fonctionnement « par défaut » du modèle sur une série de cas diversifiés.

Les premiers résultats remplissent les objectifs initiaux de l'étude qui consistaient à tester la mise en place du modèle XBeach sur différents types de morphologies et à observer 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 montrent 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.

Pour les cas Languedoc et Pertuis Charentais, les résultats de simulation d'érosions maximales sont encourageants car ils montrent des reculs très significatifs sur des cordons réputés particulièrement fragiles. Pour les cas simplifiés Nord-Médoc et Landes, les reculs maximaux simulés en 1D sont de l'ordre de grandeur des observations, mais restent inférieurs aux observations de terrain. Pour les cas Landes et Nord-Pas-de-Calais, la hauteur de la falaise d'érosion semble également sous-estimée, notamment du fait de l'absence de prise en compte des phénomènes longshore.

L'analyse de ces premiers tests montre l'intérêt de procéder à une étape de travail plus proche du terrain, qui vise à collecter ou à exploiter des données complémentaires issues de suivis événementiels de tempête. Outre la connaissance de reculs réels liés à des tempêtes connues, ce travail doit permettre de faire progresser les estimations de recul dunaire en rendant possible la phase de calibration du modèle XBeach. Ainsi, si le modèle reproduit très correctement l'effet érosif de tempêtes « courantes » réalistes, il est envisageable de penser qu'il reproduira mieux les effets de phénomènes plus extrêmes sur les cas simplifiés. De plus, la prise en compte des phénomènes hydro-sédimentaires longshore semble primordiale pour un certain nombre de sites littoraux. L'application du modèle XBeach en 2D pour un site réel et la comparaison quantitative des simulations avec des observations existantes font partie des objectifs de la phase B ce projet.

7. Bibliographie

André C. (2013) - Analyse des dommages liés aux submersions marines et évaluation des coûts induits aux habitations à partir de données d'assurance. Thèse de l'UBO. 301 p.

Armaroli, C., Grottoli, E., Harley, M.D., Ciavola, P. (2013) - Beach morphodynamics and types of foredune erosion generated by storms along the Emilia-Romagna coastline, Italy. *GEOMORPHOLOGY*, vol. 199, p. 22-35

Barnard, P.L., van Ormondt, M., Erikson, L.H., Eshleman, J., Hapke, C., Ruggiero, P., Adams, P.N. and Foxgrover, A.C. (2014) - Development of the Coastal Storm Modeling System (CoSMoS) for predicting the impact of storms on high-energy, active-margin coasts. *Natural Hazards*.

Booij, N., Ris, R. C. and Holthuijsen, L. H. (1999), - A third-generation wave model for coastal regions, Part I: Model description and validation, *J. Geophys. Res.* Vol. 104, C4, pp.7649-7666.

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, 48 p., 27 fig., 2 ann.

Cayatte, M.L. (2010) - Bilan de l'état des dunes et de la digue SACOM suite à la tempête XYNTHIA (28 février 2010), Réserve naturelle nationale du marais d'Yves. Rapport LPO/RNN Marais d'Yves. 11 p.

CETMEF (2013) - Analyse des surcotes extrêmes le long des côtes métropolitaines – Avril, 128 p.

Ciavola P., J.A. Jimenez (2011) - The Record of Marine Storminess Along European Coastlines, *NHESS -Special Issue*.

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

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

De Winter R.C., Ruessink B. G., - Sensitivity analysis of dune erosion along the Dutch coast under climate-change related conditions. En preparation.

De Winter R.C. (2014) - Dune erosion under climate change. PhD Utrecht studies in earth sciences. ISSN. 2211-4335. 110 p.

Garcin M., Nicolae Lerma A., Pedreros R. avec la collaboration de F. Paris. (2012) - Evaluation de la submersion marine maximale à l'échelle régionale. Rapport final. BRGM/RP-62259-FR, 97 p., 40 fig., 9 tabl., 4 ann.

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

Idier, D., Bouchette F., Brivois O., Castelle B., Certain R., Chateauminos E., Delvallée E., Héquette A., Larroudé P., Maanan M., Maspataud A., Parisot J.P., Pedreros R., Robin N., Romieu E., Ruz M., Thiébot J. (2010) - Projet VULSACO. Vulnérabilité de plages sableuses face au changement climatique et aux pressions anthropiques. Module 3.2 : Modélisation de la dynamique actuelle des plages et scénarios. Rapport final, BRGM/RP-58919-FR, 125 p.

McCall, R.T., van Thiel de Vries, J., Plant, N.G, van Dongeren, A., Roelvink, J.A., Thompson, D.M. and Reniers, A.J.H.M., (2010) - Twodimensional time dependent hurricane overwash and erosion modeling at Santa Rosa Island. *Coastal Engineering*, 57, 668-683.

Morellato D., Benoit M. (2010) - Constitution d'une base de données d'états de mer le long des côtes françaises méditerranéennes par simulations rétrospectives couvrant la période 1979-2008. *Revue Paralia*, Vol. 3, pp 5.1–5.12.

Maspataud, A. (2011) - Impacts des tempêtes sur la morphodynamique du profil côtier en milieu macrotidal. Thèse de l'université du Littoral Côte d'Opale. 470 p.

Pedreros R., S. Lecacheux, F. Paris, J. Lambert, S. Le Roy, M. Garcin (2014) - OURAGAN 1928 : Modélisation numérique de la submersion dans l'agglomération Pointoise. Rapport final. BRGM/RP-63706-FR.

Pedreros R. et F. Paris, (2012) - Expertise Xynthia. BRGM/RP-61078-FR, 70 p., 46 fig., 8 Tabl.

Roelvink D., Reniers A., van Dongeren A., van Thiel de Vries J., McCall R. et Lescinski J. (2009) - Modelling storm impacts on beaches dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56, (11-12), p. 1133-1152.

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

Soulsby, R. (1997) - Dynamics of Marine Sands: A Manual for Practical Applications, Thomas Telford.

Van der Werff J., R. van Santen, M. van Ormondt, C. Briere et A.R. van Dongeren (2011) - Operational model to simulate storm impact along the Holland Coast. *Proceedings Coastal Sediments*.

Van Thiel de Vries, J.S.M., van Gent, M.R.A., Walstra, D.J.R., Reniers, A.J.H.M. (2008) - Analysis of dune erosion processes in large-scale flume experiments. *Coast. Eng.* 55 (12).

Van Thiel de Vries et van Dongeren A.R (2011) - Validation of dune impact models using European field data. FP7 MICORE, WP4 final report. 101 p.

Vinchon C., C. André, C. Meur-Ferec, S. Le Roy, D. Monfort-Climent, M. Bouzit et R. Pedreros (2014) - Projet JOHANNA : Analyse des processus de dommages liés aux submersions marines et aux effets des vagues. Application aux tempêtes Johanna et Xynthia Rapport final du projet. Rapport BRGM/RP-62997-FR, 53 p., 19 fig., 4 tab.

Williams J. J., J. Brown, L.S. Esteves, A. Souza (2011) - MICORE WP4 Modelling Coastal Erosion and Flooding Along the Sefton Coast NW UK, Final Report (<http://www.micore.eu>).



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