

Méthodologie de détermination du recul maximal des dunes pour les événements extrêmes

Rapport final

BRGM/RP-63157-FR

Janvier 2014

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2013

F. Desmazes, H. Muller, M. Garcin, R. Belon et V. Baudouin
avec la collaboration de
A. Nicolae Lerma

Vérificateur :
Nom : *O. OUVÉROS*
Date : *11/06/2015*
Signature : 

Approbateur :
Nom : *H. FABRIOL*
Date : *16/07/15*
Signature : 

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

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

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

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

Synthèse

A lors que les cordons dunaires jouent un rôle de protection contre les submersions marines et le recul du trait de côte, ils peuvent être affectés par des reculs significatifs ou des dégradations importantes au cours d'événements extrêmes. Dans certains cas, ces reculs ou les dégradations causées par les tempêtes peuvent compromettre la fonction protectrice de la dune. Pour décrire et estimer ce phénomène, la méthode recommandée par le Guide Méthodologique pour l'établissement des Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) consiste à prendre en compte le recul « régulier » du trait de côte, mais aussi un recul maximal lié à un événement tempétueux majeur nommé « Lmax ». Ces deux éléments chiffrés sont utilisés pour le zonage de l'aléa « recul du trait de côte ». Plusieurs méthodes de détermination de Lmax existent. Mais les outils et méthodes de détermination de « Lmax » n'ont pas été développés ou validés dans le cas de dunes et de systèmes côtiers de France métropolitaine. Dans la perspective de réaliser des PPRL dans des zones dunaires, ce projet, mené dans le cadre du programme de travail DGPR-BRGM 2013 et financé par une décision attributive de subvention pour charges de service public (SCSP), a pour objectif :

- de dresser un état de l'art exhaustif des méthodes et outils pour l'évaluation du Lmax ;
- d'émettre des recommandations pour permettre aux futurs PPRL d'adopter les méthodes les plus adaptées dans les différents environnements dunaires rencontrés en Métropole.

Dans un premier temps, des mesures et des observations de recul dunaire ont été collectées dans les bases de données des Observatoires et des zones d'études du BRGM. Les profils de plage de l'OCA (Observatoire de la Côte Aquitaine) et du ROL (Réseau d'Observation du Littoral Corse) ont montré différentes formes de recul dunaire : recul de l'ensemble de la falaise dunaire, érosion de l'avant-dune et recul du pied de dune, translation de la dune vers les terres. Les profils permettent une observation fiable et précise de ces évolutions, qui atteignent 15 à 20 m dans les Landes et 10 m en Corse. Mais la répétitivité annuelle de ces mesures apparaît relativement insuffisante pour rattacher ces reculs à un événement unique de tempête. De plus, la variabilité spatiale de l'évolution des dunes n'est pas accessible par l'étude de profils perpendiculaires isolés.

Pour estimer la variabilité du recul dunaire tout au long du littoral, les orthophotographies aériennes et les suivis GPS du pied de dune sont aussi des outils précieux. Dans le cadre de l'Observatoire Littoral des Pays de Monts (OLPM), le recul du pied de dune a été cartographié après la tempête Xynthia de 2010 sur un linéaire côtier de près de 20 km à partir d'orthophotographies. Les résultats montrent la variabilité spatiale des valeurs d'érosion, celle-ci apparaît majoritairement supérieure à 5 m, fréquemment de l'ordre de 10 m, et peut atteindre 20 m très ponctuellement. L'intérêt de ces données sur une grande emprise spatiale est certain, mais la précision des résultats doit être vérifiée par un travail de terrain. Ainsi, le suivi de terrain post-tempête pratiqué par l'OLPM a permis d'estimer la taille des falaises d'érosion créées par Xynthia, généralement comprise entre 1 m et 3 m, elles atteignent 5 m dans les secteurs en érosion récurrente. Un suivi du littoral après la tempête Xynthia a également été mené par le BRGM sur le littoral du sud de la Vendée et des Charentes-Maritimes. Un recul du trait de côte a été identifié sur 52 points d'observation. La valeur moyenne du recul constaté est de l'ordre de 11 m, 4 reculs sont estimés supérieurs à 16 m, dont une observation atteignant 30 m.

Dans le Languedoc-Roussillon, les campagnes de suivi du littoral après tempête se sont systématisées grâce à l'organisation d'un « réseau tempête » qui intervient sur le terrain en fonction de condition de tempête rencontrées. De plus, le dispositif de suivi topobathymétrique et d'imagerie vidéo déployé sur le site atelier du Lido de Sète est présenté pour montrer les moyens et les solutions techniques à mettre en œuvre pour améliorer la compréhension de l'impact des tempêtes sur les plages et les cordons sableux.

Dans un second temps pour compléter le chapitre initial sur les techniques d'observation *in situ* de l'évolution morphologique des dunes, un inventaire des méthodes d'estimation du recul dunaire a été réalisé. Ces méthodes d'estimation se répartissent en trois catégories :

- les formules empiriques d'évolution du profil de plage ;
- les modèles numériques reproduisant les processus perpendiculaires à la côte, comme par exemple SBEACH, DUROSTA, UNIBEST-DE, CROSSMOR, etc ;
- les modèles numériques reproduisant les processus perpendiculaires et parallèles à la côte et plus particulièrement XBEACH, qui a été conçu spécifiquement pour évaluer l'impact des événements extrêmes sur les plages et les dunes.

Les formules empiriques prennent en compte une approche très simplifiée de la réalité pour estimer le recul du trait de côte et de la dune, ainsi que l'évolution d'une plage sous l'effet d'une tempête. Chacune de ces formules est basée sur le principe que le profil de plage se met en équilibre avec les conditions hydrodynamiques. Le principe de la conservation des sédiments dans le profil est également une hypothèse forte de ces formules. Les formules et les méthodes d'Edelman (1972), DUROS+ (2008), FEMA (1995), Dean (1991) et Kriebel et Dean (1993) sont présentées en détail dans ce rapport. Une première série de tests simples a été initiée sur 4 sites tests (en Aquitaine et en Corse) pour les méthodes les plus opérationnelles actuellement (DUROS+ et FEMA). Malgré des incertitudes, les résultats de ces premiers essais sont intéressants et mériteraient d'être prolongés par des tests plus complets.

Parallèlement, pour bien comprendre le contexte des observations géomorphologiques *in situ* et le principe des méthodes d'évaluation du recul dunaire, une synthèse bibliographique décrivant les processus et les phénomènes hydro-sédimentaires impactant les dunes littorales est proposée dans ce rapport. Cette synthèse a montré l'importance de l'énergie des vagues et du jet de rive, ainsi que l'effet prépondérant des surcotes de tempête qui favorisent l'attaque de la dune par les vagues.

Le deuxième objectif de ce travail était d'émettre des recommandations pour la réalisation des PPRL. Dans le cadre de la publication d'une nouvelle version du guide méthodologique pour la réalisation des Plans de Prévention des Risques Littoraux, un encart traitant spécifiquement du recul maximal des dunes lors d'événements extrêmes a été rédigé à la demande de la DGPR, pour être intégré au nouveau guide. Cet encart est structuré en trois parties qui présentent succinctement les éléments d'évaluation du recul dunaire lors des tempêtes : les mesures de terrain, les formules empiriques et les modèles numériques. Enfin, dans le but de guider la mise en place d'études sur des zones de PPRL, une méthode de travail en 6 étapes est proposée. La première phase de travail consiste à faire l'état des lieux de la zone d'étude. L'ensemble des éléments à collecter sont détaillés et synthétisés dans une grille d'évaluation. Cette grille permet un premier niveau de classification des environnements dunaires face à l'érosion et aux forts reculs instantanés. Trois classes sont distinguées : les dunes peu sensibles, les dunes sensibles et les dunes très sensibles. Cette typologie basique est ensuite utilisée pour détailler la méthode de travail proposée.

Sommaire

1. Introduction	13
1.1. CONTEXTE ET OBJECTIF.....	13
1.2. GENERALITES SUR LES DUNES LITTORALES.....	13
1.3. ORGANISATION DU RAPPORT	14
2. Mesures et observations du recul dunaire	17
2.1. OBSERVATOIRE DE LA CÔTE AQUITAINE	17
2.1.1. Présentation de la zone d'étude	17
2.1.2. Présentation de l'Observatoire de la Côte Aquitaine (OCA)	19
2.1.3. Collecte des informations.....	19
2.2. RÉSEAU D'OBSERVATION DU LITTORAL DE LA CORSE	23
2.2.1. Présentation de la zone d'étude	23
2.2.2. Présentation du Réseau d'Observation du Littoral de la Corse (ROL).....	24
2.2.3. Collecte des informations.....	26
2.3. OBSERVATOIRE LITTORAL DES PAYS DE MONTS	31
2.3.1. Présentation de L'OLPM.....	31
2.3.2. Présentation de la zone d'étude	31
2.3.3. Collecte des informations.....	32
2.4. BASE DE DONNÉES DES EFFETS DE LA TEMPÊTE XYNTHIA.....	36
2.4.1. Présentation de la base	36
2.4.2. Collecte des informations.....	38
2.5. LANGUEDOC ROUSSILLON	45
2.5.1. Site atelier de Sète.....	45
2.5.2. Réseau de surveillance des tempêtes et de leurs impacts	47
2.6. BILAN	50
3. Morphodynamique des dunes pendant les tempêtes	51
3.1. PHÉNOMÈNES MÉTÉO-MARINS PARTICIPANT À L'ÉROSION DES DUNES PENDANT LES TEMPÊTES	51
3.1.1. Déferlement des vagues et jet de rive	51
3.1.2. Surcote de tempête et ondes infragravitaires	52
3.1.3. Courants liés au déferlement	53
3.1.4. Vent et pluie.....	54
3.2. PROCESSUS DE TEMPÊTE ET TRANSPORT SÉDIMENTAIRE SUR LA PLAGE ET LES DUNES	55
3.2.1. Érosion du système littoral et indicateur de puissance des tempêtes.....	55
3.2.2. Échelle des impacts de tempête en relation avec le niveau d'eau.....	56

3.2.3. Action des vagues en régime de collision.....	58
3.3. MODIFICATIONS DE LA MORPHOLOGIE LORS DES TEMPÊTES.....	61
3.3.1. Effet du vent.....	61
3.3.2. Effet des vagues	62
3.3.3. Effet de la submersion des dunes	66
4. Présentation générale des méthodes pour estimer le recul maximal d'une dune (LMAX)	71
4.1. FORMULES D'ÉVOLUTION DU PROFIL DE PLAGE ET DE LA DUNE	71
4.2. LES MODELES NUMERIQUES REPRODUISANT LES PROCESSUS PERPENDICULAIRES A LA COTE	74
4.2.1. SBEACH	74
4.2.2. Modèles d'impact des vagues	75
4.2.3. Modèle de glissement en masse et infiltration d'eau dans la dune	76
4.2.4. Résolution des processus hydro-sédimentaires complexes	77
4.3. LES MODÈLES NUMÉRIQUES REPRODUISANT LES PROCESSUS PERPENDICULAIRES ET PARALLÉLES À LA COTE.	78
4.3.1. Généralités	78
4.3.2. XBEACH	79
5. Description des formules d'évolution du profil plage-dune	81
5.1. MÉTHODE D'EDELMAN (1972)	81
5.2. MÉTHODE DUROS+ (2008).....	82
5.3. MÉTHODE FEMA (1995).....	86
5.4. FORMULE DE DEAN (1991)	87
5.5. MÉTHODE DE KRIEBEL & DEAN (1993).....	88
6. Premiers tests de formules d'évolution du profil plage-dune	93
6.1. DUNES AQUITAINES.....	93
6.2. DUNES CORSES	96
6.3. BILAN	99
7. Pistes de travail pour la réalisation des PPRL.....	101
7.1. PROPOSITION D'UNE MÉTHODE VISANT À ÉVALUER LE REcul MAXIMAL (LMAX)	101
7.2. ANALYSE PRÉALABLE DES ENVIRONNEMENTS DUNAIRES DANS LE CADRE D'UNE ÉTUDE DE L'ALÉA ÉROSION	102
7.2.1. Contexte hydrodynamique	102
7.2.2. Contexte sédimentaire	105
7.2.3. Morphologie	106
7.2.4. Anthropisation	111
7.2.5. Proposition d'une grille d'analyse préalable	111

7.3. DESCRIPTION DE LA MÉTHODE POUR TROIS CLASSES DE DUNES	115
7.3.1.Cas d'un environnement dunaire peu sensible.....	115
7.3.2.Cas d'un environnement dunaire sensible.....	116
7.3.3.Cas d'un environnement dunaire très sensible.....	117
8. Contribution à la mise à jour du guide PPRL : Proposition d'un « encart » sur le recul dunaire maximal.....	119
9. Conclusion	121
10. Bibliographie.....	125

Liste des illustrations

Figure 1 : Profil caractéristique d'une dune littorale bien développée (Pedreros, 2000)	14
Figure 2 : Profil de plage et de dune en Aquitaine (Favennec, 2002)	17
Figure 3 : Les différents types de fronts dunaires en Aquitaine (Favennec, 2002)	18
Figure 4 : Profils topographiques suivi annuellement par l'Observatoire de la Côte Aquitaine et présentant un recul significatif récent.	20
Figure 5 : Profils topographique G2 de la dune littorale de l'Amélie (Soulac-sur-Mer, 33), montrant un recul annuel régulier très fort entre 2007 et 2012.	20
Figure 6 : Profils topographique L13 de la dune littorale, au sud du courant d'Huchet (Landes, 40), montrant un recul brutal du pied de dune entre 2009 et 2010.	21
Figure 7 : Profils topographique L17.1 de Capbreton (Landes, 40), montrant un recul annuel régulier de la falaise dunaire entre 2007 et 2012.	22
Figure 8 : Profils topographique L19 de Tarnos (Landes, 40), montrant une érosion du haut de plage et un léger retrait du front dunaire entre 2007 et 2008.	23
Figure 9 : Répartition des différents types de littoraux sableux de la Corse.....	24
Figure 10 : Le Réseau d'Observation du Littoral de la Corse en 2012.	25
Figure 11 : Technique et indicateurs utilisée pour le levé du trait de côte.....	26
Figure 12 : Site de Tavignano avec le positionnement des profils de plages (à gauche, BD-ortho2007) et des exemples d'illustration de la morphologie dunaire (à droite, photos prises le 28 septembre 2010)	27
Figure 13 : Profil au nord du site Tavignano	27
Figure 14 : Profil au centre du site Tavignano	28
Figure 15 : Site de Taravo avec le positionnement des profils de plages (à gauche, BD-ortho2007) et un exemple d'illustrations de la morphologie des dunes à proximité de ces profils (à droite, photos prises le 20 septembre 2012)	29
Figure 16 : Évolution du profil à l'Est du site de Taravo.....	29
Figure 17 : Évolution du profil à l'ouest du site de Taravo	30
Figure 18 : Localisation du terrain d'étude de l'Observatoire Littoral des Pays de Monts - Communauté de communes Océan-Marais de Monts	32

Figure 19: Les unités paysagères du littoral du pays de Monts (crédit photo : G. Rossini-ville de Saint-Jean-de-Monts, été 2008 ; source : Le Guern <i>et al.</i> , 2011 RP-59538-FR)	32
Figure 20 : Comparaison des reculs du trait de côte (pied de dune) calculés à partir des jeux de photos aériennes juillet 2000 et août 2001 (Le Guern <i>et al.</i> , 2013, BRGM/RP-62937-FR).....	33
Figure 21 : Comparaison des reculs du trait de côte (pied de dune) calculés à partir des jeux de photos aériennes de juillet 2009 et avril 2010 (d'après Le Guern <i>et al.</i> , 2013).	34
Figure 22 : Estimation des hauteurs de falaise d'érosion dunaire après la tempête Xynthia	35
Figure 23 : Localisation des observations réalisées sur les effets de la tempête Xynthia. Source : Garcin <i>et al.</i> , (2011).....	36
Figure 24: Localisation des 52 points où un recul du trait de côte a été noté suite à la tempête Xynthia	38
Figure 25 : Carte de localisation des points d'observation où la valeur du recul du trait de côte a été évaluée.....	39
Figure 26 : Histogramme des valeurs de recul du trait de côte durant Xynthia (classes de 3m)	40
Figure 27 : Érosion et recul du trait de côte ayant entraîné un falaisage de la dune (Saint-Jean-de-Monts)- À noter l'altitude à laquelle a été tronqué le chemin d'accès à la plage (BD Xynthia, Pedreros <i>et al.</i> , 2010 ; Garcin <i>et al.</i> , 2011).	40
Figure 28 : Points où un recul de 10 à 15 m a été observé suite à Xynthia (Commune de la Tranche-sur-Mer) Fond image 2007 antérieur à Xynthia (GoogleEarth).....	41
Figure 29 : Érosion de la dune et endommagement des habitations de première ligne (Point B61 de la Figure 28)	41
Figure 30 : Érosion de la dune et falaisage durant Xynthia (point B65 de la Figure 28)	42
Figure 31: Évolution de la côte entre 2006 (image du haut) et 2010 post Xynthia (image du bas) au point B65 La ligne orange correspond au sommet de dune post-Xynthia tandis que celle en tirets correspond au haut de dune avant Xynthia	42
Figure 32 : Recul dunaire de l'ordre de 15 m à l'île de Ré (à noter la banquette formée par des dépôts plus indurés sous la dune)	43
Figure 33 : Points où l'érosion de la plage a été constatée	44
Figure 34 : Localisation du site d'étude de Sète (Gervais, 2012).	45
Figure 35 : Matériel et méthodes utilisés sur le terrain pour les levés de l'impact morphologique des tempêtes sur la plage et l'avant-côte du Lido de Sète (Gervais, 2012).	46
Figure 36 : Présentation des indicateurs morphologiques et hydrodynamiques obtenus par l'outil Argus (Source BRGM)	46
Figure 37 : Principe de fonctionnement du système fixe d'imagerie vidéo ARGUS installé sur le Lido (Gervais, 2012).....	47
Figure 38 : Zones d'érosion et de submersion particulièrement fortes en période de tempête. Lien avec la morphologie des barres sableuses sous-marines festonnées sur la plage de Sète (Gervais 2012, d'après Balouin <i>et al.</i> , 2012).	47
Figure 39 : Carte des points fixes suivis par les différents partenaires et des stations vidéo (BRGM/RP-62731-FR).....	48
Figure 40 : Érosion observée par le réseau Tempête le 24/10/2011 (BRGM/RP-60694-FR)	49
Figure 41 : Érosion du front de dune dans le secteur des Baronnetts au Grau du Roi (source DDTM30/Mairie Grau du Roi), tempête du 6 mars 2013.	49
Figure 42 : Transformation des vagues en zone littorale. Modifié d'après Short, (1999).	52
Figure 43 : Schéma illustrant les principaux paramètres entrant en compte dans l'élévation des niveaux marins extrêmes (Source BRGM)	52

Figure 44 : Les ondes infra-gravitaires (Modifié d'après Short, 1999).....	53
Figure 45 : a) Profil perpendiculaire à la côte illustrant les courants induits par le déferlement. b) Vue en plan de la répartition du courant de dérive littoral. Gervais (2012) d'après Castelle (2004).....	54
Figure 46 : Échelle des impact de tempête (Storm Impact Scale) en fonction des niveau d'eau et de la morphologie de la côte, Gervais (2012) d'après Sallenger (2000).	57
Figure 47 : Relation entre l'indicateur de potentiel d'érosion des tempêtes (SEPI) et le recul du trait de côte. L'histogramme représente l'indicateur SEPI à Lewes (Delaware, USA) depuis 1957 jusqu'à 1997. La ligne montre la position du trait de côte à Cottonpatch Hill, Delaware, par rapport à la position en 1845 (Zhang <i>et al.</i> , 2001).	58
Figure 48 : Action des vagues de tempête et du jet de rive sur la plage et le pied de dune du Lido de Sète (Gervais, 2012).....	59
Figure 49 : Processus de transformation des vagues en zone de déferlement, aux abords du front dunaire (Van Rijn, 2009).....	60
Figure 50 : Schéma conceptuel des types de glissement affectant le front de dune dans les modèles d'Erikson <i>et al.</i> (2007).....	60
Figure 51 : Image d'un secteur érodé d'une dune lors d'une expérience en canal à houle. (Palmsten et Holman, 2011)	61
Figure 52 : Diagrammes schématiques d'un caoudeyre (à gauche) et d'un sifflevent allongé (à droite). Source : Hesp (2002)	62
Figure 53 : Érosion des systèmes dunaire par les tempêtes et falaises et micro-falaises dunaires. Source : DREAL-LR dans Gervais 2012.	63
Figure 54 : Recul important de la dune qui forme une falaise après le passage de la tempête Xynthia à Saint-Jean-de-Monts, BRGM- RP59385-FR, Garcin <i>et al.</i> , (2011).	64
Figure 55 : Dépôts de sable de plage dans les zones dunaires, Photo DREAL-LR dans Gervais, (2012).....	64
Figure 56 : Évolution de l'ensablement du pied de dune et du haut de plage du lido de Sète après ou pendant des évènements de tempête selon 2 points de vue (A et B). Gervais, (2012).65	65
Figure 57 : Schéma conceptuel du fonctionnement des dépôts et érosion sur le haut de plage et le pied de dune (Lido de Sète) en fonction de l'élévation du jet de rive, Gervais (2012).	66
Figure 58 : Réponse morphologique des profils de dune ou de cordon sableux lors de phénomène de submersion. Les traits pointillés représentent les profils topographiques perpendiculaires à la côte après l'évènement de submersion. Donnelly (2007).	67
Figure 59 : Schéma des structures morpho-sédimentaires résultant d'épisodes de submersion des dunes. a) Lobes b) Terrasse c) Epandage. Donnely <i>et al.</i> , (2006).....	68
Figure 60 : Schéma d'un lobe sableux de débordement, d'après Donnely <i>et al.</i> , (2006).	69
Figure 61 : Brèche de la Belle Henriette située à La Faute-sur-Mer après la tempête Xynthia, BRGM-RP58261-FR, Pedreros <i>et al.</i> , (2010).....	69
Figure 62 : Overwash et ensablement de l'arrière-dune sur le lido de Maguelone (source BRGM), tempête du 6 mars 2013.	70
Figure 63 : Schéma illustrant l'estimation du recul de la dune suivant la loi de Bruun (1954).	71
Figure 64 : Série de vagues durant une expérience d'érosion de dune dans le canal à houle Deltaflume. Ces test sur modèles réduits permettent de calibrer et d'améliorer les formules et les modèles. Source : Deltares.	72
Figure 65 : Comparaison de profils de plage (traits pleins) avec des profils d'équilibre (pointillés) établis par la formule de Dean (1991).	73

Figure 66 : Exemple de réponse du profil de plage (ordonnée) en fonction de l'évolution d'une surcote de tempête théorique (abscisse). Pour Beta = 0, le profil répond immédiatement aux conditions. (a) Tempête de courte durée très intense (b) Temps plus longue mais moins intense. Source : Kriebel et Dean, 1993.....	74
Figure 67 : Comparaison entre observations d'érosions dunaires par débordement et les résultats du modèle SBeach amélioré pour deux cas de la côte Est américaine. Larson <i>et al.</i> (2004a).....	75
Figure 68 : Comparaison du volume érodé pendant une tempête et du paramètre analytique d'impact des vagues déterminé par Larson <i>et al.</i> , (2004b). Les données de tempête proviennent de la base de Birkemeier <i>et al.</i> (1988).....	76
Figure 69 : Volume de sédiment saturé en eau estimé par le modèle (pointillés) comparé à l'érosion observée (trait plein). Source : Palmsten et Holman (2012).	76
Figure 70 : Comparaison des profils plage-dune modélisés par Crossmor2007 et des observations pour le cas de l'évènement de référence hollandais de 1953 (Van Rijn, 2009).	78
Figure 71 : Mise en œuvre du modèle Xbeach pour un cas théorique d'ouverture d'une brèche dans le cordon dunaire, puis d'une inondation de l'arrière dune. Source : Deltares.	80
Figure 72 : Schéma du profil de plage post-tempête défini par la méthode DUROS, d'après Brandenburg (2010).....	82
Figure 73 : Estimation du recul de la dune suivant le guide provisoire hollandais (Van de Graaf, 1977, d'après Ruessink <i>et al.</i> , 2012).	83
Figure 74 : Exemple de profil post-tempête (en rouge) obtenu avec la méthode DUROS+, l'altitude est exprimée par rapport au NAP, niveau moyen de référence au Pays-Bas, Den Heijer, (2013).....	84
Figure 75 : Estimation du recul de la dune suivant le profil d'équilibre simplifié adopté dans la méthode FEMA (1995).....	86
Figure 76 : Représentation du calcul du volume du stock maximal mobilisable par un événement caractérisé par un niveau d'eau centennal, valeur limite avant disparition de la dune (Source : FEMA, 1995)	87
Figure 77 : Profil d'équilibre d'une plage pour un sédiment de 0.3mm et 0.6mm, avec $A(0,3 \text{ mm}) = 0.1 \text{ m}^{1/3}$ et $A(0,6 \text{ mm}) = 0.2 \text{ m}^{1/3}$ (Dean, 1991)	87
Figure 78 : Abaque montrant le recul relatif du trait de côte $\Delta y'$ fonction de la profondeur de déferlement des vagues h^*B et de la surcote de tempête SB. (Dean, 1991).....	88
Figure 79 : Les quatre profils de plage et de dune pris en compte par Kriebel et Dean (1993), traits clairs, profils initiaux ; traits sombres, profils après tempête, d'après Almeida <i>et al.</i> (2011).	90
Figure 80 : Exemple d'interface de l'outil GEOSTORM développé pour la plage de Faro par Almeida <i>et al.</i> (2011) dans le cadre du programme MICORE.....	91
Figure 81 : Site test AQI1 (L'Amélie, 33), recul de la dune estimé par la méthode DUROS+ pour 4 niveaux de forçages.....	94
Figure 82 : Site test AQI2 (Moliet, sud-Huchet, 40), recul de la dune estimé par la méthode DUROS+ pour 4 niveaux de forçages.	95
Figure 83 : Site test Corse1 (Taravo Est), recul de la dune estimé par la méthode DUROS+ pour 4 niveaux de forçages.....	97
Figure 84 : Site test Corse 2 (Tavignano Nord), recul de la dune estimé par la méthode DUROS+ pour 4 niveaux de forçages.....	98
Figure 85 : Étapes de travail pour estimer et établir le LMax.....	102
Figure 86 : Les différents modes d'érosion marine du front dunaire en fonction du niveau de la mer, des hauteurs de déferlement et de la morphologie de la dune	103

Figure 87 : Exemples de marégrammes (Saint-Malo, La Rochelle et Marseille) illustrant la variabilité du marnage sur les côtes métropolitaines	104
Figure 88 : Schéma illustrant la définition de l'exposition aux houles.....	105
Figure 89 : Schéma illustrant la définition de la hauteur d'un cordon dunaire par rapport à un niveau d'eau de référence	106
Figure 90 : Schéma illustrant la définition de la continuité longshore de la crête dunaire du cordon externe par rapport à un niveau de référence (a) Cordon continu, (b) cordon discontinu.	107
Figure 91 : Morphologies du front dunaire et évolutions	108
Figure 92 : Schéma illustrant la définition de la largeur du cordon / recul de référence.....	109
Figure 93 : Schéma illustrant la définition de la hauteur d'un massif dunaire par rapport à différents niveaux de référence (a) massif dunaire « haut », (b) Massif dunaire « bas »	109
Figure 94 : Schéma illustrant la définition de la continuité des massifs dunaires pour un même niveau de référence (A) Massif dunaire discontinu, (B) Massif dunaire continu	110
Figure 95 : Méthode de détermination du Lmax, logigramme pour des dunes peu sensibles à l'érosion.....	116
Figure 96 : Méthode de détermination du Lmax, logigramme pour des dunes sensibles à l'érosion.....	117
Figure 97 : Méthode de détermination du Lmax, logigramme pour des dunes très sensibles à l'érosion.....	118

Liste des tableaux

Tableau 1 : Analyse de l'évolution des profils perpendiculaires à la côte pour des fronts dunaires des plages suivies annuellement par l'OCA dans les Landes.....	21
Tableau 2 : Mobilité du front dunaire à différentes altitudes sur les profils cross-shore du front dunaire (Landes)	22
Tableau 3 : Évolution de la cote de 2 m NGF le long des profils nord et au centre du site Tavignano	28
Tableau 4 : Évolutions représentatives de la dune pour les profils du site de Taravo	30
Tableau 5 : Indice de puissance des tempête, Storm Power Index, d'après Dolan et Davis, 1992...56	
Tableau 6 : Caractéristiques du profil de référence utilisé pour la méthode DUROS (Brandenburg, 2010).....	85
Tableau 7 : Paramètres nécessaires à la formule DUROS+ et résultats du recul estimé pour AQ11 (PHMA = Plus haute marée astronomique).	94
Tableau 8 : Paramètres nécessaires à la formule DUROS+ et résultats du recul estimé pour AQ11 (PHMA = Plus haute marée astronomique).	95
Tableau 9 : Paramètre de la méthode FEMA pour les sites tests AQ11 et AQ12, résultats de recul dunaire pour différentes périodes de retour et comparaison avec des observations.	96
Tableau 10 : Paramètres nécessaires à la formule DUROS+ et résultats des estimations pour le site test Corse1. La formule estime que les dunes seront détruites pour des événements extrêmes (recul estimé > largeur de la dune).....	97
Tableau 11 : Paramètres nécessaires à la formule DUROS+ et résultats du recul estimé pour le site Corse2.....	98

Tableau 12 : Paramètre de la méthode FEMA pour les sites tests Corse1 et Corse2, résultats de recul dunaire pour différentes périodes de retour et comparaison avec des observations.....	99
Tableau 13 : Proposition d'une grille d'évaluation du contexte environnemental d'un secteur dunaire	112
Tableau 14 : Éléments de la grille d'évaluation marquant une certaine sensibilité (en jaune) ou une forte sensibilité (en orange) des dunes à l'érosion.....	114
Annexe 1 : Version validée par la DGPR de l'encart « Bilan des méthodes d'estimation de l'impact d'un évènement sur le recul dunaire maximal ».....	129

1. INTRODUCTION

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIF

Alors que les cordons dunaires jouent un rôle de protection contre les submersions marines et le recul du trait de côte, ils peuvent être affectés par des reculs significatifs ou des dégradations importantes au cours d'événements extrêmes. Ainsi, lors de la tempête Xynthia, des reculs de 3 à 5 m ont été observés en moyenne. Ils ont même dépassé 20 m dans les secteurs les plus exposés (par exemple sur la commune d'Olonne sur Mer) (BRGM RP-58261-FR, Pedreros *et al.*, 2010). Dans certains cas, ces reculs ou les dégradations causées par les tempêtes peuvent compromettre la fonction protectrice de la dune.

Pour comprendre et estimer ce phénomène, la méthode recommandée par le Guide Méthodologique pour l'établissement des Plans de prévention des risques littoraux (PPRL) consiste à prendre en compte le recul « régulier » du trait de côte, mais aussi un recul maximal instantané nommé « Lmax ». Ces deux éléments chiffrés sont utilisés pour le zonage de l'aléa « recul du trait de côte ». Plusieurs méthodes de détermination de Lmax existent. Mais il est probable que ces règles ne soient pas transposables immédiatement à tous les types de dunes et à tous les environnements côtiers. Ainsi, les outils et méthodes de détermination de « Lmax » n'ont pas été développés ou validés dans le cas de dunes et de systèmes côtiers de France métropolitaine. Lors de l'établissement des futurs PPRL, il existe donc un risque que les résultats de ces méthodes soient différents et peu exploitables d'un site à l'autre, conduisant à des évaluations de l'aléa hétérogènes. Dans la perspective de réaliser des PPRL dans des zones dunaires, ce projet mené dans le cadre du programme de travail DGPR-BRGM 2013 a pour objectif :

- de dresser un état de l'art exhaustif des méthodes et outils pour l'évaluation du Lmax ;
- d'émettre des recommandations pour permettre aux futurs PPRL d'adopter les méthodes les plus adaptées dans les différents environnements dunaires rencontrés en Métropole.

1.2. GÉNÉRALITES SUR LES DUNES LITTORALES

Les dunes littorales sont des structures sédimentaires caractéristiques des côtes sableuses. Généralement végétalisées, elles forment un bourrelet au-delà du haut de plage. Le vent est le principal agent constructeur de ces structures, il érode les sables fins sur la plage et les dépose sur la dune. La morphologie typique d'une dune bordière bien développée (Pedreros, 2000) est constituée par (Figure 1) :

- Une dune embryonnaire ou avant-dune.

Lorsqu'elle est présente, elle se situe à proximité immédiate du haut de plage. Elle correspond à des accumulations sableuses, souvent sous forme de banquette ou terrasse en contact avec le corps principal de la dune. Ce type de structure témoigne d'un important apport de sable provenant de la plage et d'une période de repos vis-à-vis de l'érosion. La végétation est essentiellement halophile (tolérante à la salinité) car ce secteur est touché par les embruns.

- Une dune blanche.

C'est la partie active de la dune car elle est alimentée régulièrement en sable et l'action du vent s'y développe pleinement. Elle comprend le front dunaire ou la face avant de la dune qui s'étend jusqu'au plateau dunaire. C'est un milieu qui présente une certaine mobilité et qui est propice au développement d'une végétation caractéristique comme l'oyat (ou gourbets).

- Une dune grise.

Protégée par la dune blanche, les apports sédimentaires éoliens y sont moins importants. Sa couleur est liée à la présence d'une végétation caractéristique de teinte grise, qui s'étend depuis le plateau dunaire jusqu'au talus d'envahissement et la zone d'arrière-dune (ou lette).

Sur la dune, l'érosion éolienne ponctuelle peut également créer des zones de déflation, nommées sifflevent et caoudeyre, tandis que les pourrières sont des secteurs de dépôts en arrière de la dune.

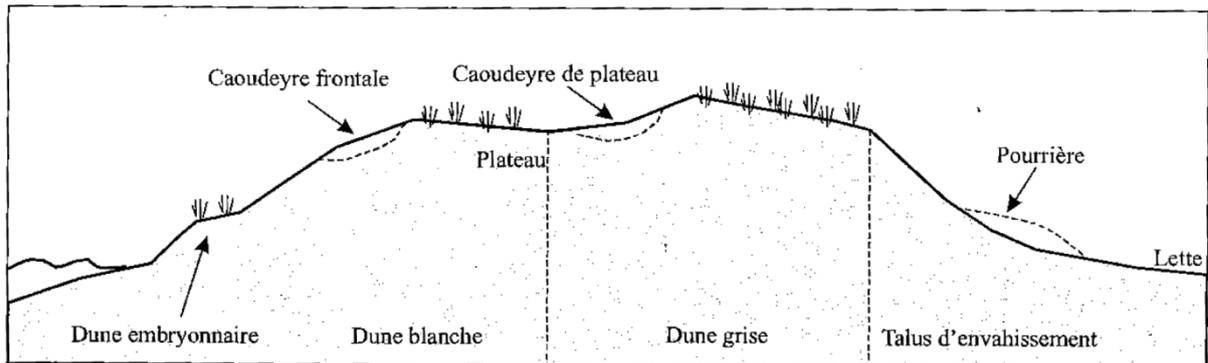


Figure 1 : Profil caractéristique d'une dune littorale bien développée (Pedreros, 2000).

Lorsque les dunes bordières ne sont pas des structures isolées et indépendantes les unes des autres, on parle alors de cordon dunaire. Quand la morphologie du bourrelet sableux est peu développée et que la végétation est rare, le terme de cordon sableux peut être employé. L'étude de ce type de structure sédimentaire est intégrée dans ce travail, qui prend en compte également certains cordons sableux de la côte méditerranéenne d'altitude peu élevés et entourés d'eau. Cependant, les dunes littorales ne doivent pas être confondues avec les bermes, barres sableuses de haut de plage qui sont essentiellement construites par l'action des vagues de beau temps.

1.3. ORGANISATION DU RAPPORT

Pour répondre aux objectifs de cette étude qui vise à dresser un état de l'art exhaustif des méthodes et outils pour l'évaluation du L_{max} et à émettre des recommandations en vue de la réalisation de PPRL, le rapport est organisé en sept parties :

- **mesures et observations du recul dunaire** : Cette partie a pour objectif de présenter des observations et des mesures de recul de dunes sur le littoral métropolitain. Ces observations ont été réalisées par le BRGM dans le cadre d'études de suivis d'évolution du trait de côte ;
- **morphodynamique des dunes lors de tempêtes** : Ce chapitre est une revue des processus hydro-sédimentaires et des propriétés physiques et géomorphologiques de la dune à l'origine de l'érosion et de la fragilisation de ses fonctions protectrices contre la submersion lors de tempêtes ;
- **inventaire des méthodes d'estimation du recul maximal des dunes (L_{max})** : Ce chapitre permet de dresser un état de l'art exhaustif des méthodes et approches existantes pour estimer le « L_{max} » ;

- **description des formules d'évolutions du profil plage-dune** : Cette partie a pour but de développer la description des méthodes basées sur des formules empiriques du profil de plage ;
- des **tests simples de plusieurs formules empiriques** sont proposés ensuite sur des sites d'études présentés dans le chapitre dédié aux « mesures et observations » ;
- les deux dernières parties formulent des **Pistes de travail pour la réalisation des PPRL** : une méthode de travail en six étapes est proposée et détaillée pour 3 types d'environnements dunaires. Enfin, un encart réalisé pour le nouveau guide méthodologique pour la réalisation des plans de prévention des risques littoraux du MEDDE propose une synthèse des moyens et des techniques d'évaluation du Lmax présentés dans ce rapport.

2. MESURES ET OBSERVATIONS DU REcul DUNAIRE

Ce chapitre a pour but de présenter des données collectées par le BRGM et ces partenaires sur les dunes et les phénomènes d'érosion qui les touchent.

2.1. OBSERVATOIRE DE LA CÔTE AQUITAINE

2.1.1. Présentation de la zone d'étude

La côte aquitaine est constituée d'une longue côte sableuse et d'un secteur rocheux au sud. La côte sableuse s'étend entre la Pointe de Grave (33, Gironde) au nord et la Pointe Saint-Martin (64 Pyrénées Atlantiques) au sud. Elle se distingue des autres littoraux français par la présence d'un massif dunaire exceptionnel, long de 238 km. Quasiment rectiligne et pour l'essentiel non urbanisée, elle est formée d'un système de plages de sable et d'un système dunaire large de 0,2 à 10 km. Celui-ci comprend un cordon littoral non boisé, modelé par l'Homme au XIX^e siècle, précédant et protégeant de vastes étendues de dunes paraboliques boisées pour les plus anciennes, et de barkhanes pour les plus modernes. La dune littorale est un bourrelet sableux élevé par le vent à partir du sable de l'estran et plus ou moins fixé par une végétation spécifique (Figure 2). Cette dune est entretenue par l'homme au travers l'intervention de l'ONF (Office National des Forêts) ou de collectivités locales.

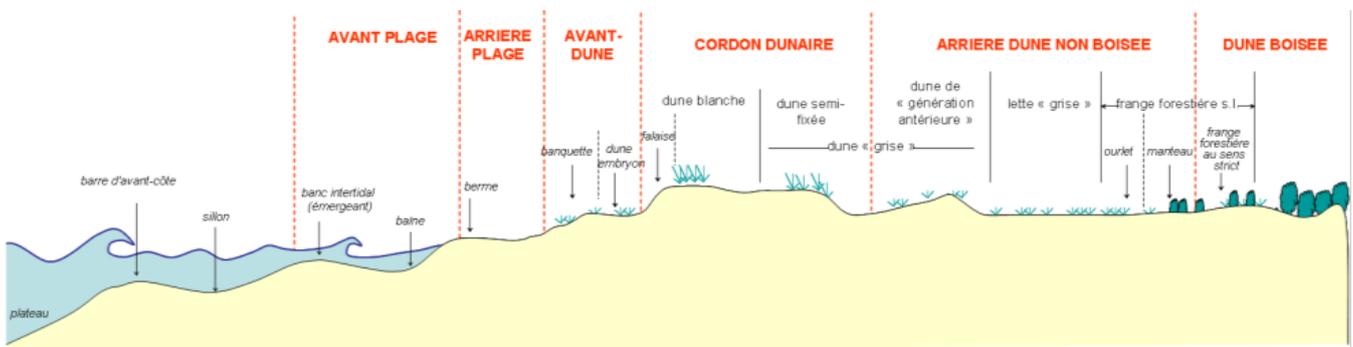


Figure 2 : Profil de plage et de dune en Aquitaine (Favennec, 2002).

Pour la côte aquitaine, le suivi régulier des dunes littorales par l'ONF a permis d'établir une typologie du front dunaire, c'est-à-dire de la zone de contact entre la dune et la plage. Les morphologies rencontrées dépendent du contexte dynamique et sédimentaire du littoral. Une classification dynamique de la morphologie des fronts dunaires aquitains a été proposée par l'ONF (Favennec, 2002, Figure 3).

Dans les secteurs stables ou en accretion, le contact entre la plage et la dune littorale peut être caractérisé par une pente douce et régulière. Plus généralement, elle est marquée par la présence d'une avant-dune qui forme un bourrelet sableux volumineux entre la plage et la dune. Les avant-dunes sont souvent colonisées par une végétation d'oyats. La rupture de pente entre la plage et l'avant-dune est modérée et la pente vers le sommet de la dune est douce.

Les banquettes sableuses sont des stades précoces d'avant-dune. Il s'agit d'accumulations sableuses subhorizontales, appuyées contre le versant externe de la dune et en partie colonisées par la végétation (notamment par l'Agropyron ou chiendent des sables).

Dans les secteurs en érosion, le front dunaire est nettement différent. Il est caractérisé par la présence de falaises sableuses qui résultent d'une attaque directe et importante de la mer sur la dune. Trois niveaux d'évolution de falaises sont distingués :

- la falaise sableuse vive est fraîchement entaillée par l'érosion marine, elle présente une très forte pente ;
- la falaise sableuse régularisée bénéficie d'un répit de l'érosion marine. La pente, de l'ordre de 60 %, présente un profil d'équilibre statique, suite aux éboulements gravitaires successifs de la falaise vive ;
- la falaise sableuse éolisée bénéficie de l'apport de sable par le vent qui tend à adoucir les pentes, mais elle est aussi modelée par l'érosion éolienne qui crée des « accidents » et des hétérogénéités dans la morphologie.

Il faut noter également que dans les secteurs relativement stables, les banquettes sableuses et les avant-dunes peuvent subir ponctuellement l'effet de l'érosion marine et présenter des microfalaises sableuses.

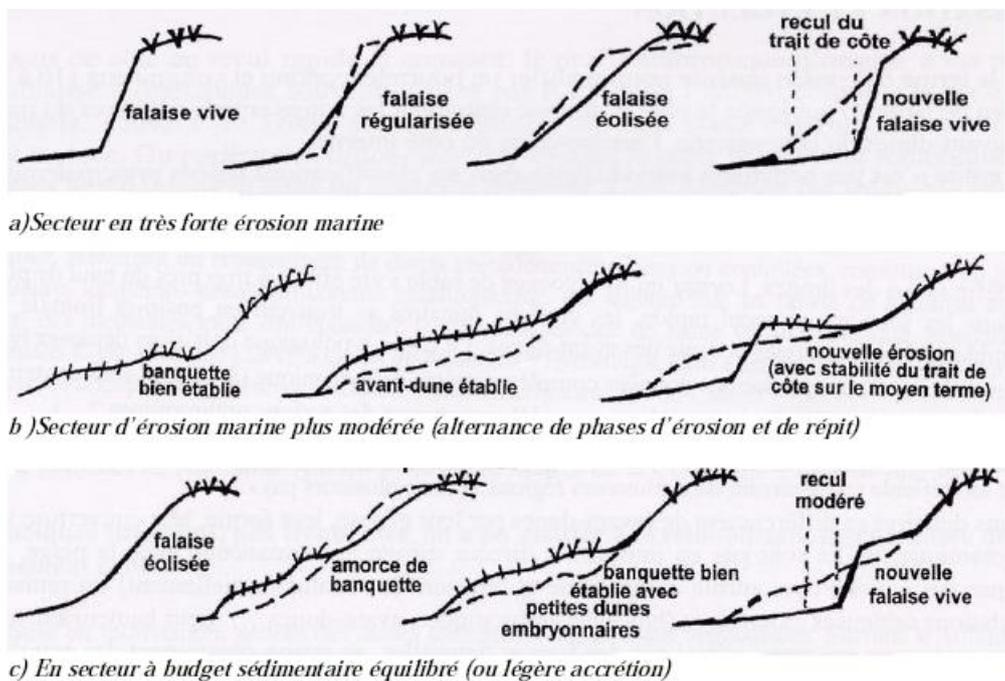


Figure 3 : Les différents types de fronts dunaires en Aquitaine (Favennec, 2002).

2.1.2. Présentation de l'Observatoire de la Côte Aquitaine (OCA)

Dans le cadre du Contrat de Projet État-Région 2007-2013, l'Europe (FEDER), l'État, le Conseil Régional d'Aquitaine, les départements de la Gironde, des Landes et des Pyrénées-Atlantiques, le Syndicat Intercommunal du Bassin d'Arcachon, le BRGM et l'ONF se sont associés, à travers une convention de partenariat signée le 17/09/2008, pour poursuivre les actions menées par l'Observatoire de la Côte Aquitaine.

L'objectif principal de cet observatoire est de mettre à disposition des gestionnaires du littoral aquitain un outil d'aide à la décision, permettant de quantifier et d'anticiper les phénomènes liés à l'érosion de la côte aquitaine. Les actions de l'Observatoire sont multiples : mesures, suivis, expertises, centre de ressources régional (SIG, photothèque), communication... Les objectifs et résultats de ce projet sont communiqués sur le site : <http://littoral.aquitaine.fr>.

Les principaux indicateurs géomorphologiques suivis par l'Observatoire de la Côte Aquitaine sur le littoral sableux sont :

- le trait de côte (pied de dune) ;
- les contacts plage/dune ;
- les entailles d'érosion dunaire ;
- la morphologie des plages (transects plage/dune perpendiculaires au trait de côte).

Les moyens de mesure opérés à l'heure actuelle sont :

- les levés de terrain au GPS (précision métrique) et DGPS (précision centimétrique) ;
- la photo-interprétation de photographies aériennes verticales ;
- la télédétection spatiale (i.e. : SPOT5, Formosat-2).

Ces missions de suivis sont réalisées par le BRGM et l'ONF en fonction des différents indicateurs définis. Depuis 2002, des missions annuelles de suivi géomorphologique du littoral de la côte sableuse aquitaine sont menées par le BRGM. Elles consistent à réaliser des levés DGPS du trait de côte et des profils topographiques dune/plage. Elles sont effectuées en début de printemps (généralement entre fin mars et début mai), après les périodes de fortes houles hivernales et les grandes marées d'équinoxe.

2.1.3. Collecte des informations

Base de données de profils topographiques

La collecte des informations pour cette étude a porté sur l'ensemble des profils topographiques de l'OCA, mais l'analyse s'est avant tout concentrée sur les profils topographiques mesurés dans les Landes (côte sableuse) entre 2007 et 2012.

Une première analyse des profils a permis de déterminer la présence de reculs significatifs (> 1 m) pour 17 sites sur les 50 sites suivis annuellement. Les cartes de la Figure 4 présentent les sites de la côte sableuse ayant subi un recul dunaire au cours des 5 dernières années.

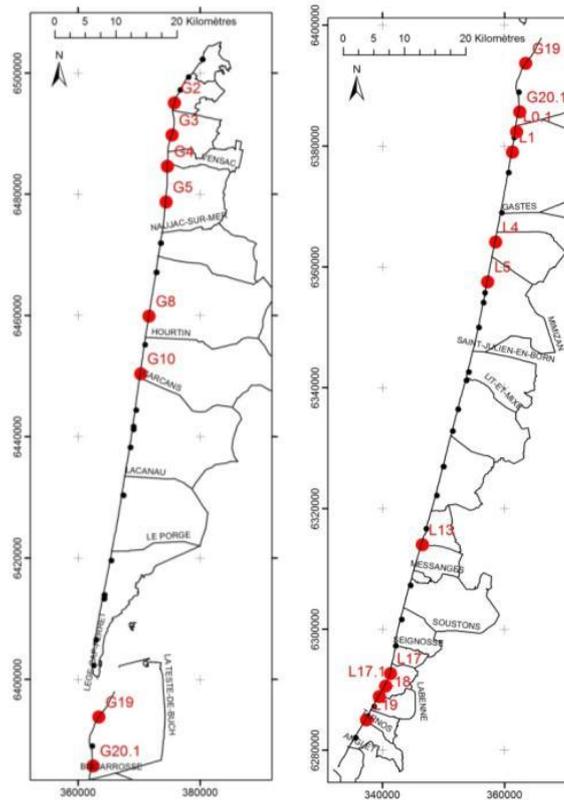


Figure 4 : Profils topographiques suivis annuellement par l'Observatoire de la Côte Aquitaine et présentant un recul significatif récent.

Les figures suivantes illustrent deux types de recul dunaire observés sur la côte aquitaine. Le premier graphique (Figure 5) correspond à des mesures réalisées dans un secteur de forte érosion récurrente, au niveau Soulac-sur-Mer (dunes de l'Amélie). On constate que l'ensemble de la face dunaire recule annuellement. Des reculs maximaux de 5 à 6 m par an sont observés. Le graphique suivant (Figure 6) montre un très fort recul du pied de dune observé dans les Landes, dans un secteur pouvant être influencé par l'embouchure du courant d'Huchet, entre 2009 et 2010. À l'altitude de 5 m IGN, ce recul est estimé à 20 m. Malgré cette valeur importante, on constate que la partie haute de la face dunaire n'est pas touchée. L'étude des profils topographiques annuels montre que les reculs dunaire significatifs ne sont pas homogènes sur l'ensemble de la zone suivie.

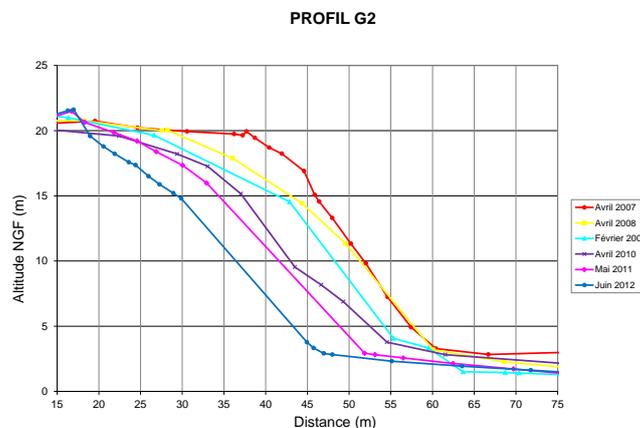


Figure 5 : Profils topographique G2 de la dune littorale de l'Amélie (Soulac-sur-Mer, 33), montrant un recul annuel régulier très fort entre 2007 et 2012.

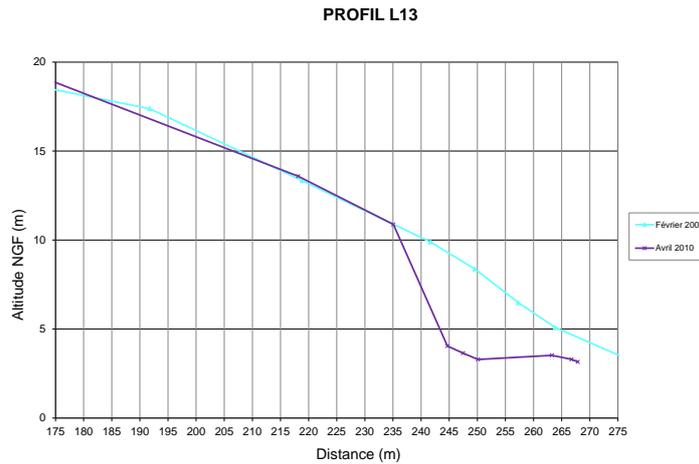


Figure 6 : Profils topographique L13 de la dune littorale, au sud du courant d'Huchet (Landes, 40), montrant un recul brutal du pied de dune entre 2009 et 2010.

Analyse des profils topographiques sélectionnés dans les Landes (40)

Les tableaux suivants synthétisent l'ensemble des estimations de recul dunaire effectuées sur les données de l'Observatoire de la Côte Aquitaine dans le département des Landes. Le Tableau 1 indique la tendance érosive, stable ou en accrétion de chaque profil de dune par rapport à l'année précédente. En cas d'érosion, le point de plus forte évolution dans le profil (pied de dune, milieu, haut de dune) est spécifié. Si cette évolution (en un point du profil) est la plus importante de toute la série de donnée temporelle, la case est coloré en rouge.

Profil	Lieu / année	2008	2009	2010	2011	2012
L0.1	Nord Biscarosse	Pied			Milieu	Pied
L1	Sud Biscarosse			Pied	Pied	Milieu
L4	Ste Eulalie	Milieu (7,5m)		Pied	Milieu (8,5m)	Milieu (8,5m)
L5	nord Mimizan			Pied	Milieu (8,5m)	
L13	Sud Huchet		Pied	Pied	Milieu	Milieu
L17	Capbreton	Pied	Pied	Haut	Haut	
L17.1	Sud Capbreton	Haut et Milieu		Haut	Milieu	Haut
L18	Nord Labenne	Pied		Pied	Pied	Pied
L19	Nord Tarnos	Milieu (7,5m)				Milieu (10m)

légende	Pied / Milieu / Haut (+altitude) = Point de recul maximal dans le profil
	Recul maximal en un endroit dans la série de donnée temporelle
	Profil montrant une tendance érosive
	Profil montrant une tendance à la stabilité
	Profil montrant une tendance à l'accrétion

Tableau 1 : Analyse de l'évolution des profils perpendiculaires à la côte pour des fronts dunaires des plages suivies annuellement par l'OCA dans les Landes.

Le Tableau 2 synthétise les reculs maximaux observés en trois points caractéristiques de la face dunaire à une altitude donnée (IGN) pour les 5 années d'étude. Ce tableau montre les deux types de recul détaillés précédemment.

Pour la majorité des profils présentant de l'érosion (L0.1, L1, L4, L5, L13, L18), le recul le plus important est situé au niveau du pied de dune (Figure 6). Il devient plus faible au milieu de la dune et n'affecte pas le sommet.

Pour les profils de Capbreton (L17, L17.1), l'érosion apparaît homogène sur l'ensemble de la face dunaire (Figure 7). En termes de recul maximal, les valeurs mesurées à Capbreton sont plus faibles que celle observées pour la majorité des autres profils landais). Mais ces différences et ces informations doivent être mises en contexte pour pouvoir être exploitées, par exemple, dans le cadre de la réalisation de PPRL. Ainsi, le recul de l'ensemble de la face dunaire est un signe d'une diminution des fonctions protectrices de la dune, ce qui n'est pas forcément le cas pour des reculs importants uniquement localisés au pied de la dune.

Le profil L19 (Tarnos) montre une relative stabilité de la dune, mis à part l'érosion de quelques mètres autour de 7,5 m d'altitude NGF (Figure 8). Cette érosion peut être interprétée soit, comme l'effet d'une tempête, puis d'une régularisation rapide du pied de dune, soit comme une manifestation de l'érosion éolienne sur le profil et d'une « simple » évolution de celui-ci sous forme de sifflevent.

Profil	Lieu	ped (5m IGN)	milieu (10m ou -)	haut (15m ou +)
L0.1	Nord Biscarosse	10m (2012)	8m (7,5m IGN-2011)	
L1	Sud Biscarosse	10m (2011)	2m (2012)	
L4	Ste Eulalie	12m (2010)	2m (2010)	
L5	nord Mimizan	10m (2010)	1m (2011)	
L13	Sud Huchet	20m (2010)	4m (2010)	
L17	Capbreton	4m (2009)	2,5m (2009)	2m (2011)
L17.1	Sud Capbreton	4m (2008)	4m (2008)	4,5m (2008)
L18	Nord Labenne	16m (2008)	5m (2008)	
L19	Nord Tarnos		5m (2008)	

Tableau 2 : Mobilité du front dunaire à différentes altitudes sur les profils cross-shore du front dunaire (Landes).

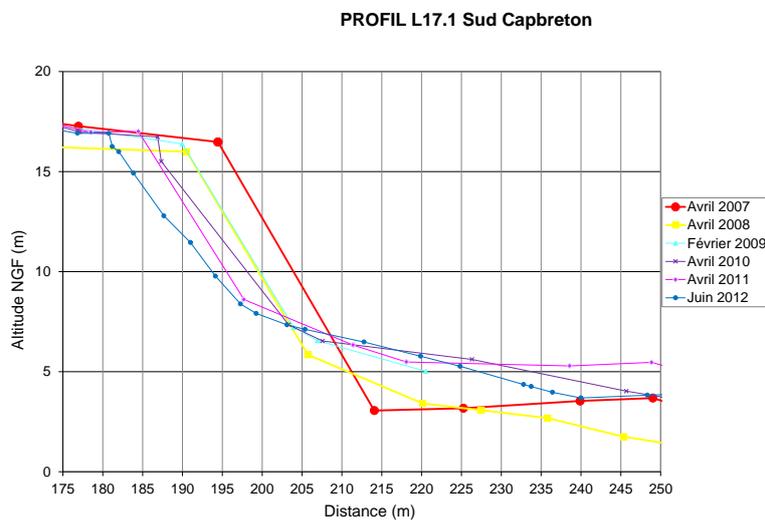


Figure 7 : Profils topographique L17.1 de Capbreton (Landes, 40), montrant un recul annuel régulier de la falaise dunaire entre 2007 et 2012.

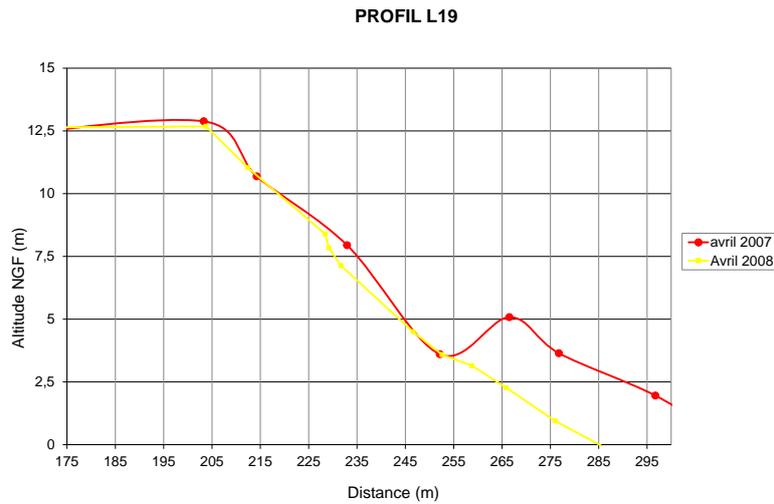
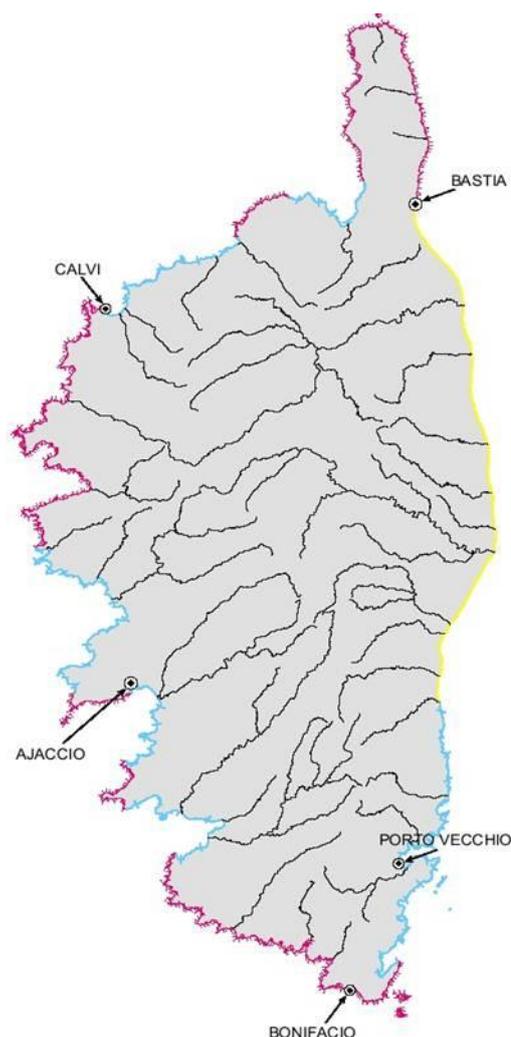


Figure 8 : Profils topographique L19 de Tarnos (Landes, 40), montrant une érosion du haut de plage et un léger retrait du front dunaire entre 2007 et 2008.

2.2. RÉSEAU D'OBSERVATION DU LITTORAL DE LA CORSE

2.2.1. Présentation de la zone d'étude

Le littoral de la Corse s'étend sur près de 1 000 km avec une géomorphologie variée caractérisée par la présence de falaises et de cordons sédimentaires (plages, dunes, cordons de galets), (Figure 9). Les littoraux sableux se situent dans des contextes très divers : plages de poches isolées au sein d'une côte rocheuse (Cap Corse, certains secteurs de la côte occidentale), grandes plages sableuses séparées par des caps rocheux (côte occidentale), littoraux sableux très étendus (côte orientale).



Répartition des différents types de littoraux sableux

- - - - - Petites plages sableuses isolées dans des criques (côte rocheuse)
- + + + + + Ensembles de plages sableuses (>1 km) situées entre des avancées rocheuses (côte rocheuse)
- Côtes sableuses rectilignes et continues

Figure 9 : Répartition des différents types de littoraux sableux de la Corse.

Le littoral de la Plaine Orientale de la Corse est un linéaire côtier d'une centaine de kilomètre de long qui s'étend depuis Bastia (Haute-Corse) jusqu'à Solenzara (Corse-du-Sud). À l'exception de quelques affleurements rocheux, au niveau de caps, il est essentiellement constitué de plages sableuses, avec des massifs dunaires faiblement développés, des étangs et des lagunes littorales reliés à la mer par des *graus*, à l'embouchure desquels se développent des flèches sableuses, ainsi que quelques fleuves et rivières. Dans le reste de l'île, les côtes rocheuses peuvent abriter des plages sableuses dont la taille est variable, mais dont l'extension peut atteindre tout de même plusieurs kilomètres. La Corse est sujette à une érosion de son littoral et de ses plages sableuses due à des phénomènes naturels (diminution des apports solides des fleuves, etc.) et à des aménagements sur la côte.

2.2.2. Présentation du Réseau d'Observation du Littoral de la Corse (ROL)

Au cours des années 1990, un diagnostic de l'érosion côtière le long du littoral de Corse a été réalisé par le BRGM en partenariat avec l'Office de l'Environnement de la Corse (OEC)

et de la DRIRE. Il est alors apparu la nécessité de suivre l'évolution de certains sites (Palvadeau et Nay, 2000). Depuis 1999, dans le cadre de la convention OEC-BRGM, un programme d'observation a été mis en place pour fournir les données nécessaires à la compréhension des phénomènes et processus, à la quantification des évolutions côtières et à l'identification des remèdes possibles. Ce programme se décline en un **Réseau d'Observation du Littoral de la Corse (ROL)** qui s'étend à des sites « régionaux », témoins représentatifs des évolutions régionales naturelles et à des sites « sensibles » qui sont soumis à évolutions critiques ponctuelles.

L'objectif du ROL est triple :

- **être un outil de suivi du littoral** : il a pour mission de valoriser et de compléter les informations existantes sur le littoral, de caractériser les évolutions des systèmes côtiers, d'évaluer les vitesses de recul du trait de côte, mais également la dynamique des morphologies sableuses sous-marines qui constituent le stock sédimentaire disponible. Cet outil a pour but de permettre à l'ensemble des acteurs d'évaluer l'état du littoral mais aussi d'évaluer l'efficacité des politiques de gestion mises en place ;
- **être un outil de mutualisation et d'organisation de l'information** : le réseau de suivi œuvre pour mutualiser les efforts de connaissance et d'acquisition de données sur l'évolution du littoral corse. Ce suivi a également pour objectif de diffuser une information adaptée à un large public ;
- **être un outil de prospective** : le ROL a pour objectif de développer des outils de prospective visant à anticiper les changements futurs sur le littoral. Il permet la mise à disposition d'outils d'aide à la décision nécessaires à la définition et à l'adaptation des politiques publiques. Dans ce cadre, le réseau a une mission d'expertise et d'avis en soutien aux partenaires du projet.

Le réseau actuel comprend 15 sites totalisant 33 profils de plage et environ 51 km de linéaire de trait de côte, dont l'évolution est suivie à fréquence annuelle (Figure 10).

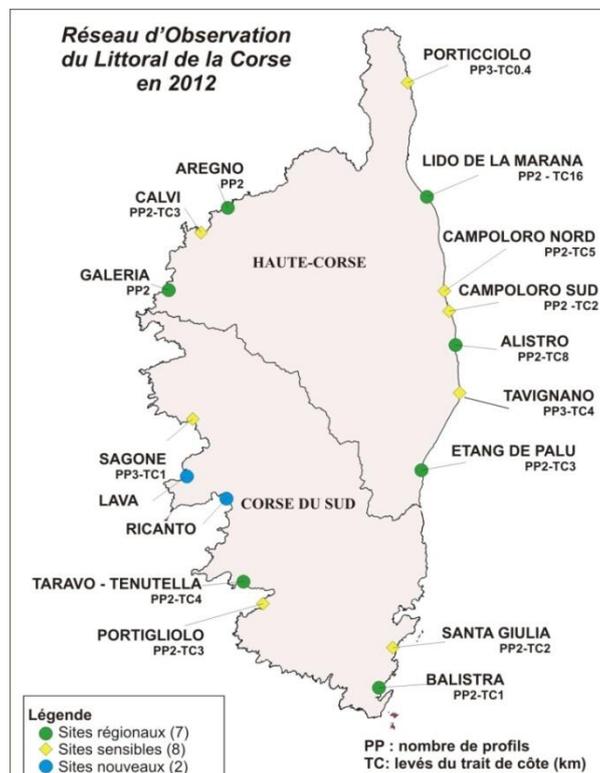


Figure 10 : Le Réseau d'Observation du Littoral de la Corse en 2012.

Le réseau de mesures repose sur l'acquisition conjointe :

- de profils de plage transversaux au trait de côte, par topographie DGPS sur les parties émergées et en bathymétrie pour la partie immergée ;
- des levés longitudinaux du trait de côte au DGPS sur certains sites.

La figure suivante (Figure 11) présente les deux indicateurs morphologiques qui sont ainsi repérés et géoréférencés pour le suivi du trait de côte :

- la position de la berme de basse plage (la plus récente, ou à défaut de la ligne du jet de rive, ou de contact avec l'eau) qui correspond au niveau moyen de l'eau en période calme ou « trait de côte moyen » ;
- la position du pied de dune (ou à défaut de la limite de végétation).

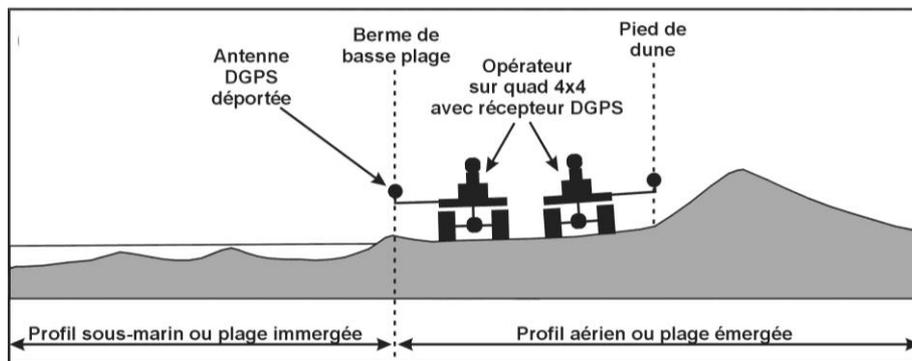


Figure 11 : Technique et indicateurs utilisés pour le levé du trait de côte.

2.2.3. Collecte des informations

Ce Réseau d'Observation du Littoral a permis de suivre l'évolution de 15 sites depuis sa création notamment à travers l'acquisition de profils topo-bathymétriques.

L'évolution de ces profils permet de visualiser à la fois les changements de la morphologie sous-marine, comme l'évolution des barres d'avant-côte, mais également ceux de la morphologie de la plage aérienne et des cordons sableux de haut de plage, quand ils sont présents.

Seuls quelques sites fournissent des informations sur les reculs maximaux que peuvent subir les dunes en Corse. Les sites montrant des évolutions parfois brutales de leur morphologie dunaire sont les plages de Tavignano et Taravo.

Pour mieux comprendre les profils de plage qui seront illustrés par la suite, le niveau moyen de la mer peut être pris égal à 0 m NGF (à quelques cm près).

Le site de Tavignano

Cette plage est située sur la commune d'Aléria. Elle est bordée au sud par l'embouchure du fleuve Tavignano et au nord par la digue sud du Grau de l'étang de Diane. Un seul profil était relevé en 2002 (celui au centre, Figure 12) puis suite à la constatation d'une érosion importante, deux autres profils ont été rajoutés à partir de 2008, l'un au sud, l'autre au nord.

Le profil nord est suivi depuis 2008 et a montré un fort recul de la dune entre 2008 et 2009. Il semble s'être stabilisé depuis (Figure 13). L'hiver 2008-2009 a été marqué par plusieurs tempêtes dont une (28 novembre 2008) qui provoqua de nombreux dégâts le long du littoral de la Plaine orientale de la Corse.

Le profil au centre est caractérisé par la présence d'une dune qui semble être restée globalement stable entre 2002 et 2006. Un fort recul est à noter entre 2006 et 2008 (pas de mesures en 2007), une légère avancée en 2009 puis à nouveau un recul jusqu'en 2011 et une stabilité en 2012 (Figure 14).

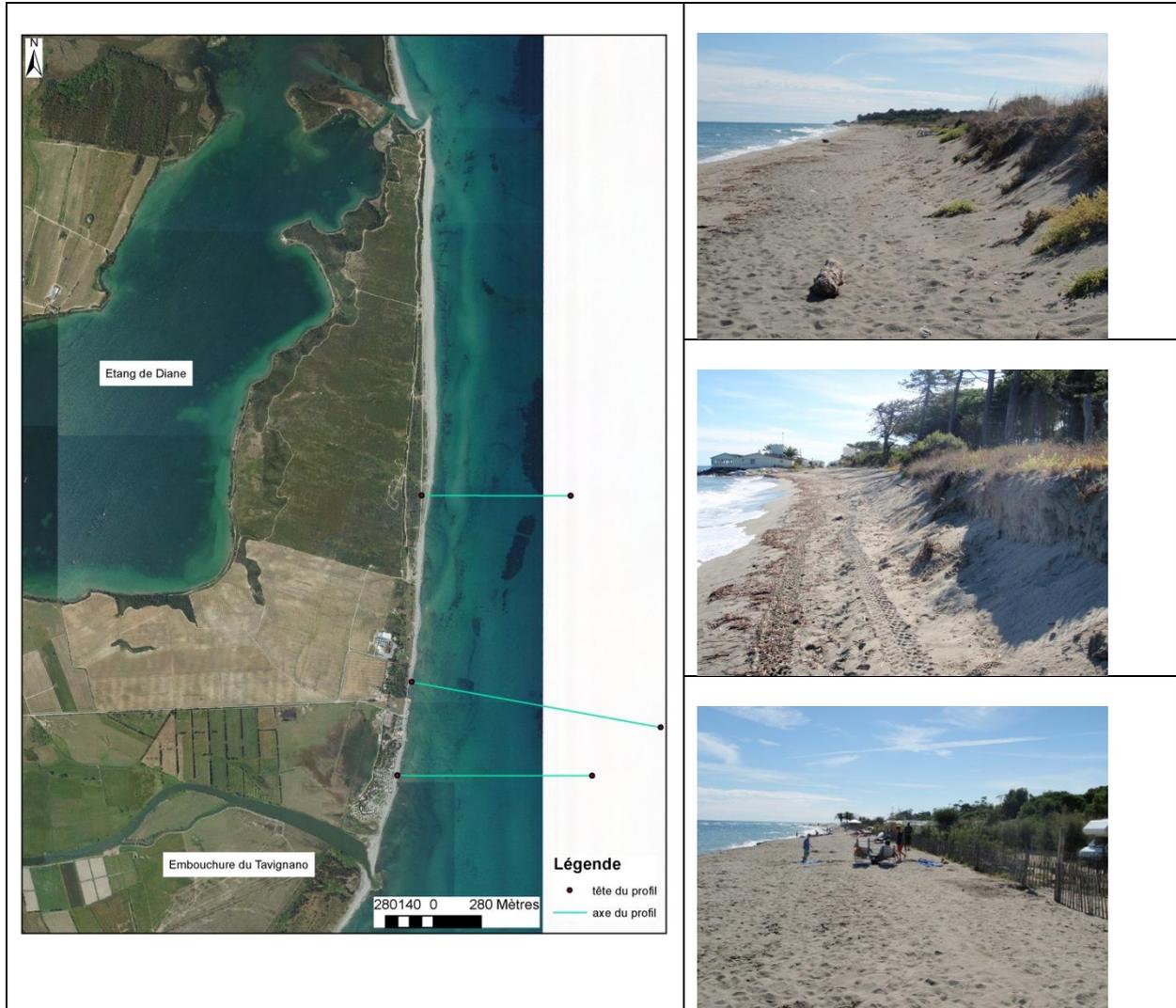


Figure 12 : Site de Tavignano avec le positionnement des profils de plages (à gauche, BD-ortho2007) et des exemples d'illustration de la morphologie dunaire (à droite, photos prises le 28 septembre 2010).

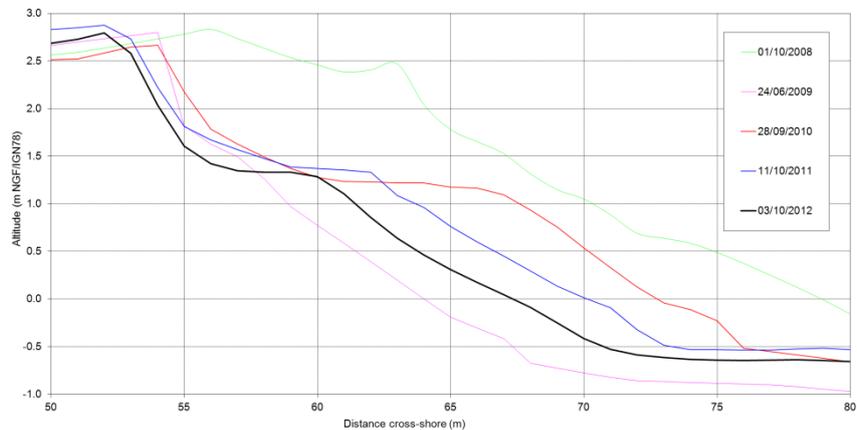


Figure 13 : Profil au nord du site Tavignano.

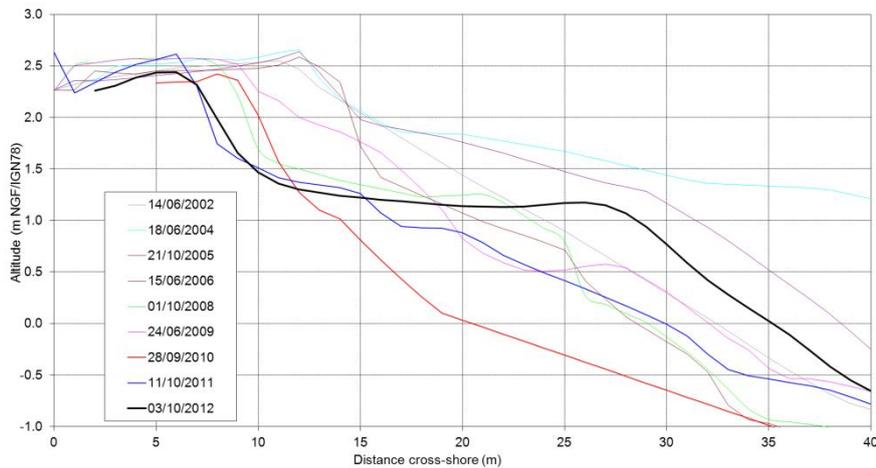


Figure 14 : Profil au centre du site Tavignano.

Sur ces profils nous pouvons visualiser une dune dont le pied se situerait aux alentours de 1,5 m NGF et le sommet légèrement au-dessus de la cote 2,5 m NGF. Pour quantifier les mouvements de la dune, l'évolution de la cote de 2 m NGF a été choisie (Tableau 3).

	Position de la cote 2 m NGF par rapport au début du profil (profil Nord)	Position de la cote 2 m NGF par rapport au début du profil (profil central)
2002		X = 15 m
2004		X = 15,5 m (+ 0,5 m)
2005		X = 15 m (- 0,5 m)
2006		X = 14,5 m (- 0,5 m)
2008	X = 64,4 m	X = 9,5 m (- 5 m)
2009	X = 54,5 m (- 9,5 m)	X = 12 m (+ 2,5 m)
2010	X = 55,5 m (+ 1 m)	X = 10 m (- 2 m)
2011	X = 54,5 m (- 1 m)	X = 7,5 m (- 2,5 m)
2012	X = 54 m (- 0,5 m)	X = 8 m (+ 0,5 m)

Tableau 3 : Évolution de la cote de 2m NGF le long des profils nord et au centre du site Tavignano.

Les évolutions de la dune le long de ces 2 profils montrent à la fois que les reculs peuvent être importants d'une année sur l'autre, près de 10 m pour le profil nord et 5 m pour le profil central. L'estimation des évolutions annuelles de la cote « 2 m NGF » indique également que les mouvements de ce cordon sableux ne sont pas homogènes pour tout le secteur.

Le site de Taravo

La plage du Taravo est localisée sur la commune de Serra di Ferro, dans la partie nord du Golfe de Valinco. Il s'agit d'une baie globalement orientée au sud-est. Elle est limitée à l'ouest par la pointe rocheuse de U Porticciu. Dans le fond de baie se trouve un bras du Taravo qui devient actif lors de débits importants, coupant à travers le cordon littoral pour se jeter en mer. Sur la plage de Taravo, le sédiment est constitué par un sable fin à moyen carbonaté. Ce site est suivi depuis 2002 par le biais de 2 profils topo-bathymétriques (Figure 15).



Figure 15 : Site de Taravo avec le positionnement des profils de plages (à gauche, BD-ortho2007) et un exemple d'illustrations de la morphologie des dunes à proximité de ces profils (à droite, photos prises le 20 septembre 2012).

Une morphologie dunaire caractéristique est identifiée sur le profil oriental dont le sommet culmine aux alentours de 3 m NGF et un pied de dune situé entre 2 m et 2,5 m NG (Figure 16). La cote 2,5 m NGF a été choisie pour caractériser les évolutions dans le temps.

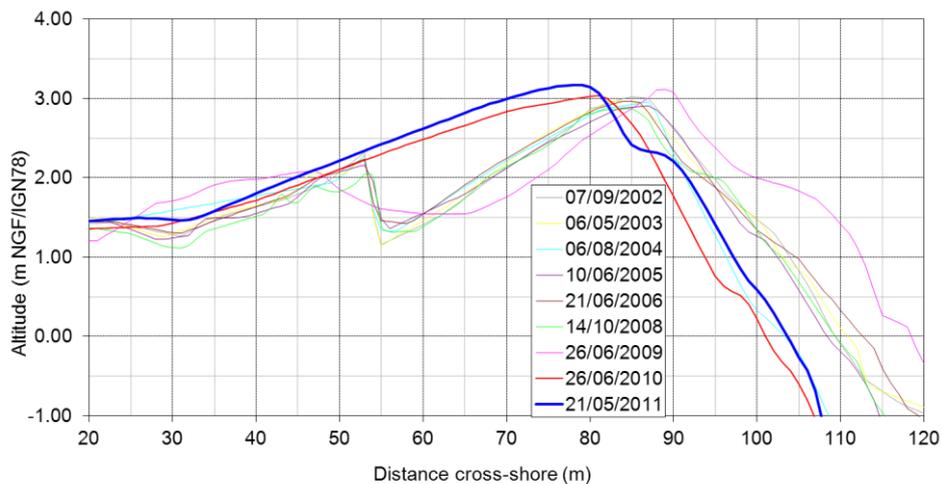


Figure 16 : Évolution du profil à l'est du site de Taravo.

Le profil ouest ne permet pas de distinguer l'ensemble de la morphologie dunaire. Mais le début du profil correspond bien au sommet de la « dune » qui forme un petit plateau couvert de végétation. Le suivi n'y est pas facile car, suivant les années, la zone est difficilement accessible en raison de la végétation et d'une clôture délimitant un terrain privé. Le début du profil montre l'évolution de la position du front dunaire au cours des différents relevés réalisés.

Le sommet de la dune est à 2,7 m NGF tandis que le pied de dune est entre 1,5 m NGF et 2 m NGF d'altitude. Nous avons donc choisi de caractériser l'évolution de la dune à la cote 2 m NGF (Figure 17).

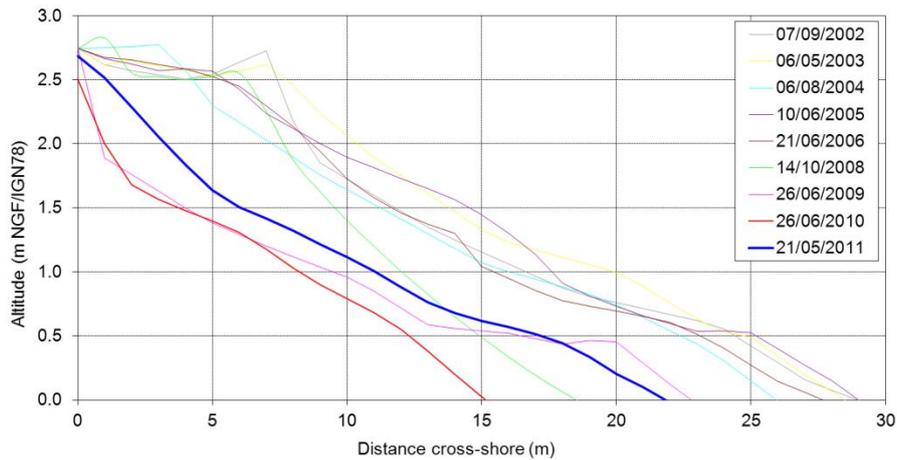


Figure 17 : Évolution du profil à l'ouest du site de Taravo.

Les évolutions constatées depuis 2002 sont contrastées avec tantôt des avancées puis des reculs. Cependant il est à noter que d'une année sur l'autre les reculs peuvent être particulièrement importants, près de 7 m pour le profil ouest entre 2008 et 2009, et près de 8 m entre 2009 et 2010 pour celui à l'est (Tableau 4).

Année	Position de la cote 2 m NGF par rapport au début du profil. (profil ouest)	Position de la cote 2.5 m NGF par rapport au début du profil. (profil est)
2002	X = 8,5 m	X = 91 m
2003	X = 10,5 m (+ 2 m)	X = 90 m (- 1 m)
2004	X = 7,2 m (- 2,8 m)	X = 89,25 m (- 0,75 m)
2005	X = 9 m (+ 1,8 m)	X = 91 m (+ 1,75 m)
2006	X = 8,5 m (- 0,5 m)	X = 89,1 m (- 1,9 m)
2008	X = 7,6 m (- 0,9 m)	X = 88,2 m (- 0,9 m)
2009	X = 0,8 m (- 6,8 m)	X = 94 m (+ 5,8 m)
2010	X = 1 m (+ 0,2 m)	X = 86,2 m (- 7,8 m)
2011	X = 3,4 m (+ 2,5 m)	X = 84,4 m (- 1,8 m)

Tableau 4 : Évolutions représentatives de la dune pour les profils du site de Taravo.

Comme pour le site de Tavignano, nous constatons des disparités entre les 2 profils que ce soit sur le type ou l'ampleur des évolutions de la dune. En fonction de la complexité des secteurs d'étude, le travail sur un profil perpendiculaire unique n'est donc pas suffisant pour cerner toute la variabilité spatiale du recul dunaire. De plus, la prise en compte de la dynamique morpho-sédimentaire parallèlement à la côte est un élément à ne pas négliger pour étudier l'érosion et les reculs maximaux des dunes corses.

2.3. OBSERVATOIRE LITTORAL DES PAYS DE MONTS

2.3.1. Présentation de L'OLPM

Né en 2009, l'Observatoire du littoral des Pays de Monts (OLPM) couvre un linéaire côtier d'environ 19 km réparti sur 3 communes vendéennes (La Barre-de-Monts, Notre-Dame-de-Monts et Saint-Jean-de-Monts) appartenant à la Communauté de Communes Océan-Marais de-Monts. Il bénéficie de l'étroite collaboration établie entre les différents partenaires impliqués. D'une part, la communauté de communes, assure la maîtrise d'ouvrage, et participe *via* une contribution financière et technique (achat de logiciels et de données). D'autre part, les partenaires scientifiques et techniques, représentés par, le BRGM, l'Office National des Forêts (ONF) et l'Université de Nantes (IGARUN), sont en charge de l'état des lieux, de la structuration et de la mise en forme des données, des suivis réguliers et événementiels sur le terrain, de la compréhension des phénomènes et de propositions d'actions.

Dans le cadre de l'établissement d'un état initial de la zone d'étude, une typologie des plages, du contact plage/dune et du cordon dunaire a été effectué en 2010, en s'appuyant sur les travaux de l'Observatoire de la Côte Aquitaine. Les suivis de terrain réalisés depuis le printemps 2010 intègrent notamment la mesure de profils de plage, la cartographie du contact plage/dune, l'étude des espèces patrimoniales (ONF) et des eaux souterraines côtières.

2.3.2. Présentation de la zone d'étude

La côte sableuse des Pays de Monts est située en Vendée, au sud de l'île de Noirmoutier (Figure 18). Le littoral est constitué principalement par des plages sableuses et un massif dunaire, localement urbanisé. L'aménagement du littoral se manifeste par une série de remblais (Saint-Jean-de-Monts, La Barre-de-Mont) et de perrés (Notre-Dame-de-Monts) qui fixent le trait de côte. Le Pont d'Yeu est un affleurement rocheux situé au niveau de Saint-Jean-de-Monts. Il forme la limite entre la partie sud de la côte, orientée NW-SE et la côte nord, orientée N-S.

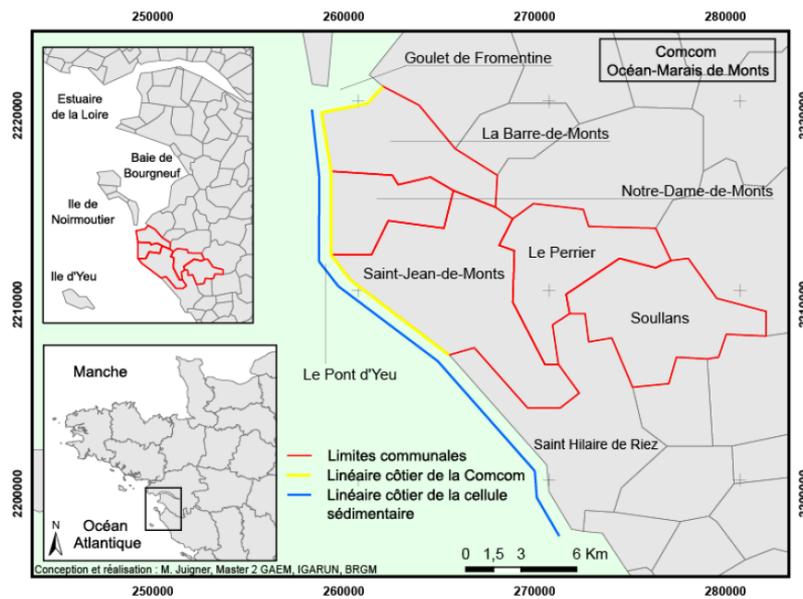


Figure 18 : Localisation du terrain d'étude de l'Observatoire Littoral des Pays de Monts - Communauté de communes Océan-Marais-de-Monts.

L'espace dunaire comprend un cordon littoral non boisé (dune grise) précédant et protégeant de la migration dunaire des étendues de dunes boisées (forêt domaniale gérée pour l'essentiel par l'ONF) (Figure 19). La largeur des dunes varie généralement de 0,2 à 2 km. La hauteur des crêtes dunaires varie de cinq mètres à une vingtaine de mètres. La zone la plus étroite, située au sud sur la commune de Saint-Hilaire-de-Riez présente un cordon étroit (15 à 30 mètres de large) et peu élevé (environ 5 m de haut). L'arrière-pays est constitué d'un marais de basse altitude (2 à 3 m NGF).



Figure 19 : Les unités paysagères du littoral du pays de Monts (crédit photo : G. Rossini-ville de Saint-Jean-de-Monts, été 2008 ; source : Le Guern et al., (2011) BRGM/RP-59538-FR).

2.3.3. Collecte des informations

- Suivi du trait de côte

L'indicateur utilisé pour marquer le trait de côte est le pied de dune. Il est numérisé lors d'une analyse des ortho-photographies puis traité avec un outil intégré (DSASS) à un SIG (ArcGis ©) qui permet d'extraire automatiquement les évolutions du trait de côte, selon des profils prédéfinis espacé de 20 m. L'évolution annuelle du trait de côte a été étudiée pour 2

périodes distinctes, grâce aux ortho-photographies réalisées en 2000 et 2001, puis en 2009 et 2010. Ces travaux donnent une vision synthétique de l'évolution de l'ensemble de la zone de suivi au cours d'une année.

Entre 2000 et 2001 (Figure 20), le littoral des Pays-de-Monts montre une variabilité spatiale du recul dunaire. Deux secteurs situés au niveau de la Barre-de-Monts et à Saint-Jean-de-Monts sont stables ou en accrétion. Au niveau du Goulet de Fromentine, le recul du pied de dune atteint en moyenne 7 m mais avec une très forte variabilité spatiale. C'est la forte dynamique hydro-sédimentaire du Goulet qui induit cette grande variabilité spatio-temporelle. À Notre-Dame-de-Monts, le recul atteint 1,8 m et tandis qu'il est de 3,2 m au Pont d'Yeu.

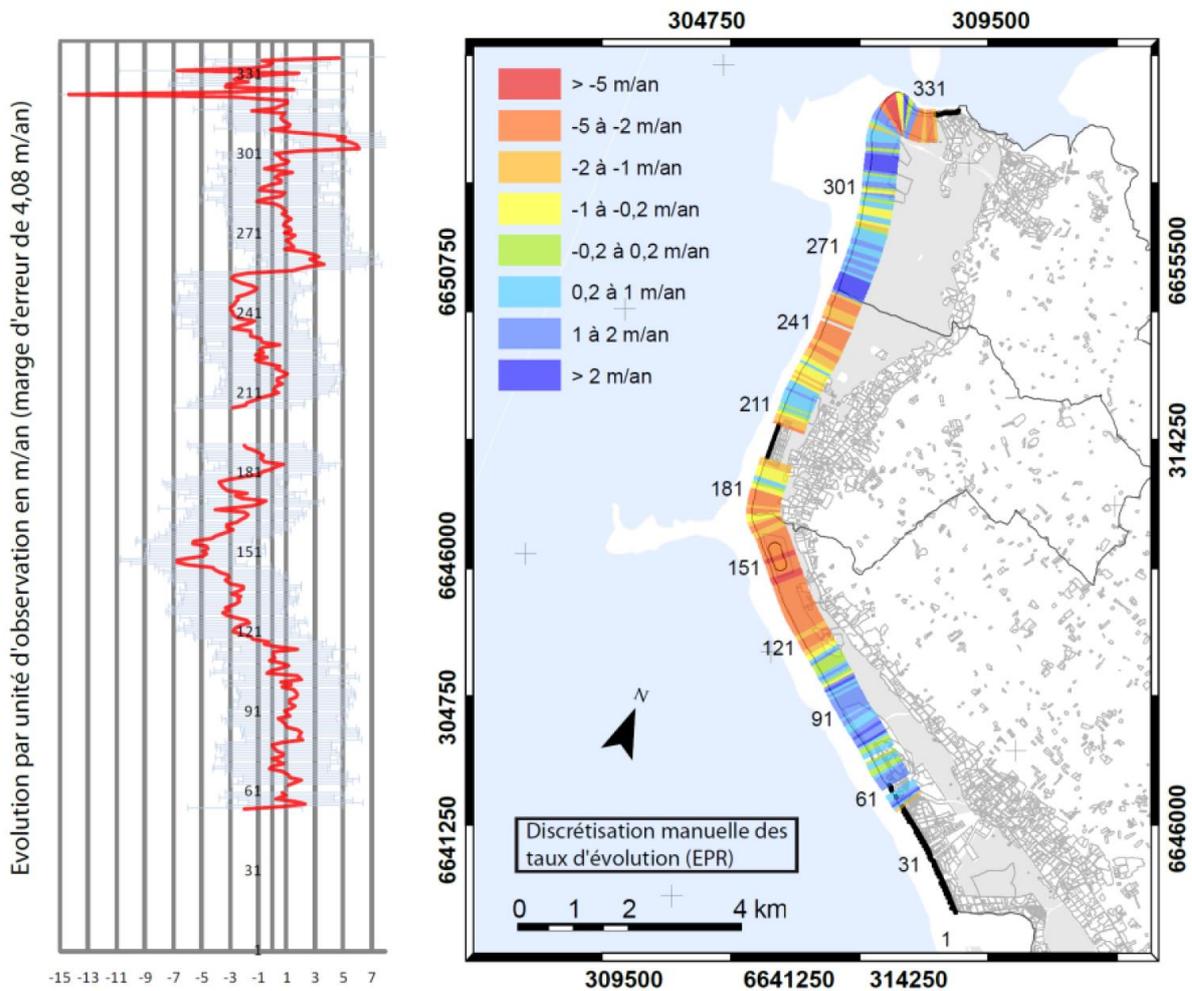


Figure 20 : Comparaison des reculs du trait de côte (pied de dune) calculés à partir des jeux de photos aériennes juillet 2000 et août 2001 (Le Guern et al., (2013), BRGM/RP-62937-FR).

L'analyse historique à long terme de l'évolution du trait de côte des Pays-de-Monts à partir de photos aériennes prise entre 1920 et 2010 (Le Guern et al., 2013, BRGM/RP-62937-FR) montre que la répartition des zones d'érosion/accrétion est généralement conforme à celle observée entre juillet 2000 et août 2001, sauf pour la forêt domaniale située au sud de la Barre-de-Monts (entre les points 241 et 271, Figure 20).

En revanche, entre 2009 et 2010, l'évolution du trait de côte est caractérisée par une érosion généralisée (Figure 21). Le recul est supérieur à 5 m pour la grande majorité du littoral des Pays-de-Monts. Ces fortes érosions qui ne correspondent pas aux tendances historiques de la zone sont expliquées par l'action de la tempête Xynthia, qui, en provoquant une surcote exceptionnelle, a permis une érosion directe de la dune par les vagues. Les valeurs de recul ne sont pas homogènes pour toute la côte. Sur les secteurs de reculs réguliers et historiques (comme par exemple près de l'hippodrome de Saint-Jean-de-Monts), l'érosion entre 2009 et 2010 est supérieure à 6 m et atteint localement 10 m. Pour le secteur du goulet de Fromentine, l'érosion lors de Xynthia est très variable avec des zones d'érosion ponctuelle dépassant 10 m et pouvant même atteindre 20 m. Dans les secteurs généralement stables ou en accretion, l'érosion entre 2009 et 2010 est inférieure à 10 m et plutôt située autour de 6 m. Dans le cadre d'une étude des reculs maximum affectant les dunes, ces valeurs observées en Pays de Loire après un évènement tel que la tempête Xynthia sont de bons indicateurs. Néanmoins, pour améliorer la précision de ces informations, il est important de pouvoir compléter les reculs du trait de côte issus des techniques de télédétection par des mesures topo-bathymétriques de terrain.

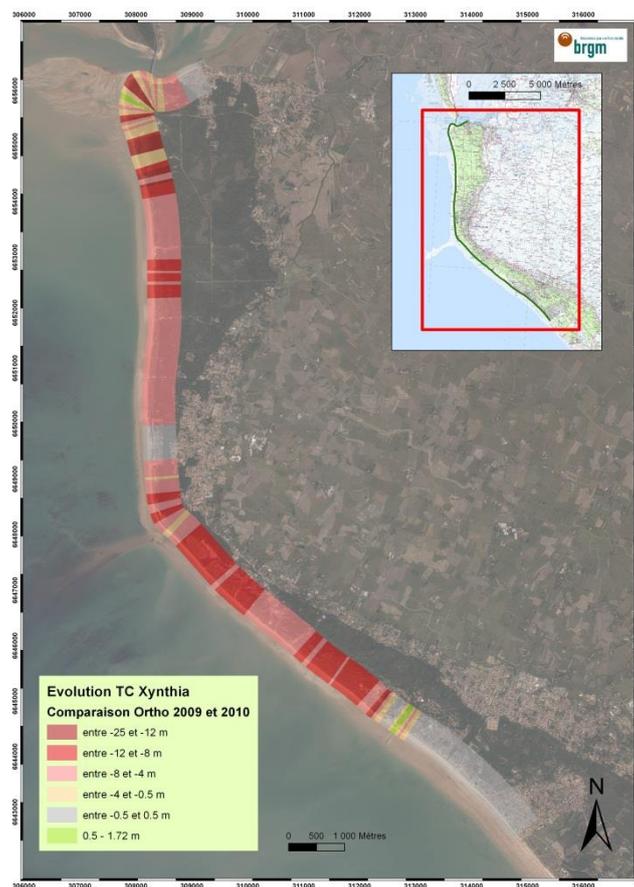


Figure 21 : Comparaison des reculs du trait de côte (pied de dune) calculés à partir des jeux de photos aériennes de juillet 2009 et avril 2010 (d'après Le Guern et al., 2013).

- Falaises d'érosion après la tempête Xynthia

La tempête Xynthia, qui est survenue le 28 février 2010, a impacté considérablement le littoral des Pays-de-Monts. Dans ce secteur, le recul du trait de côte correspond à un recul dunaire. En l'absence de profil topographique réalisé avant la tempête, il n'est pas possible de décrire très précisément les évolutions morphologiques du front dunaire. Par contre, une campagne de terrain a été réalisée après la tempête pour décrire les dégâts occasionnés sur

les plages et les dunes. Sur la base de ces observations de l'OLPM, un travail de synthèse a été mené pour estimer, sur l'ensemble de la zone d'étude, la hauteur approximative des falaises dunaires engendrées par la tempête Xynthia.

La carte suivante (Figure 22) montre des falaises d'érosion pouvant atteindre une hauteur de 5 m au niveau de l'hippodrome et de la plage de la Tonnelle de Saint-Jean-de-Monts. Ces falaises sont fréquemment supérieures à 2,5 m au niveau du Pont d'Yeu et de la plage des Lays à Notre-Dame-de-Monts. Dans les zones les plus stables et les moins touchées par l'érosion, des falaises métriques, ou des microfalaises de l'ordre de 50 cm ont pu être observées. Le ratio entre la hauteur totale des dunes et celle des falaises d'érosion peut être un bon indicateur pour estimer l'impact de la tempête sur les différentes plages suivi. L'impact le plus fort se trouve au niveau du Pont d'Yeu, où la falaise érosive atteint le sommet de la dune. Au nord du front urbain de Notre-Dame-de-Monts, la falaise atteint 70 % du la hauteur dunaire, tandis qu'au niveau de l'hippodrome, les dunes sont relativement plus hautes, même si la falaise d'érosion correspond à 60 % de la hauteur totale.

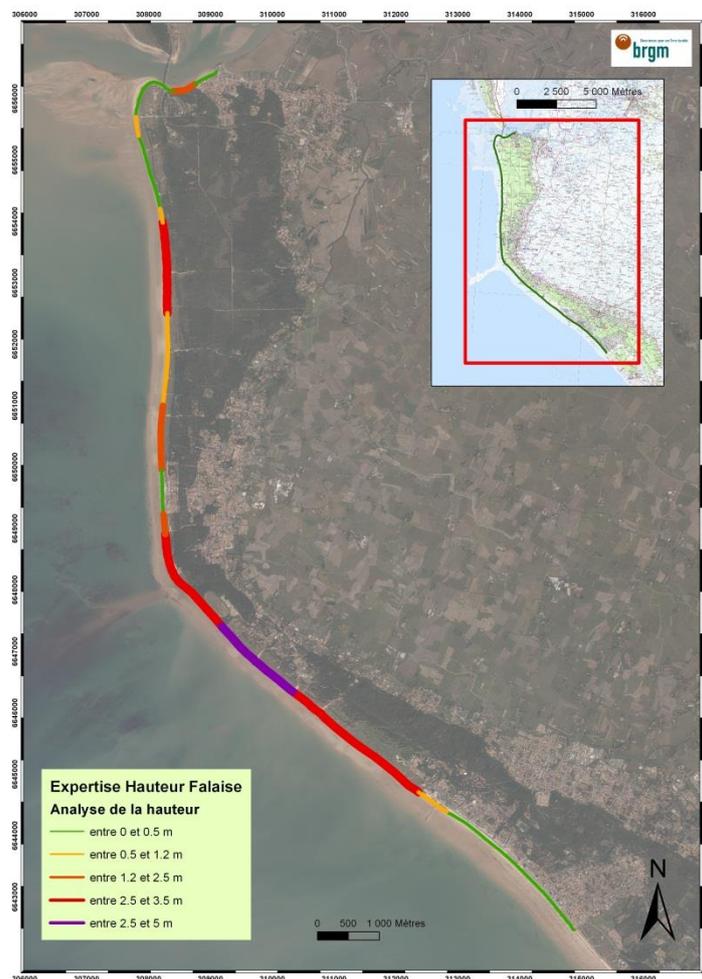


Figure 22 : Estimation des hauteurs de falaise d'érosion dunaire après la tempête Xynthia.

2.4. BASE DE DONNÉES DES EFFETS DE LA TEMPÊTE XYNTHIA

2.4.1. Présentation de la base

- Généralités

Dans le cadre de ses activités de recherche, le BRGM a effectué, en collaboration avec l'Office National des Forêts (ONF), une mission de terrain du 8 au 12 mars dans les départements de Charente-Maritime, de la Vendée et de la Loire-Atlantique suite au passage de la tempête Xynthia (28 Février 2010). L'objectif de cette mission était de recueillir, avant que les traces ne soient effacées, des informations sur les évolutions morphologiques du littoral (érosion), les niveaux d'inondation maximaux, les dégâts induits et les processus s'étant produits durant cette tempête. Cette mission n'avait pas vocation à couvrir l'ensemble des zones littorales affectées par Xynthia. La zone observée s'étend toutefois sur un linéaire côtier de l'ordre de 240 km compris entre la baie de Bourgneuf au nord et le Pertuis d'Antioche au sud. Deux cent quatre-vingt-onze observations géo-localisées ont été réalisées (Figure 23). Elles mettent en évidence des dégâts au sud du département de la Loire-Atlantique (2 communes affectées), la Vendée (15 communes affectées) et la partie nord de la Charente-Maritime (16 communes affectées ; Pedreros *et al.*, 2010, BRGM/RP-58261-FR). Les informations recueillies sur le terrain ont ensuite été structurées, homogénéisées puis saisies dans une base de données au format ACCESS (© Microsoft) dans laquelle ont été intégrées des interfaces « utilisateur » permettant de consulter la base de données. Cette base de données a été réalisée de façon à permettre un interfaçage avec les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) courants (Garcin *et al.*, 2011, BRGM/RP-59395- FR).



Figure 23 : Localisation des observations réalisées sur les effets de la tempête Xynthia.
Source : Garcin *et al.*, (2011).

- Les champs de la base de données

La structure de la base de données a été créée afin de permettre de saisir l'ensemble des mesures et observations, elle comprend au total vingt-neuf champs thématiques.

Les champs correspondent à des observations que l'on peut regrouper en cinq thèmes :

1. Caractéristiques générales du point d'observation,
2. Observations sur la submersion marine,
3. Observations sur les évolutions morphologiques induites par la tempête,
4. Observations sur les dégâts occasionnés par Xynthia (hors dégâts du vent),
5. Observations diverses sur le point ou ses alentours immédiats.

Ces champs peuvent être de plusieurs types : numériques (réel), alphanumériques ou booléen (oui/non).

Dans le cadre de la présente étude sur le recul des dunes, les informations qui nous intéressent sont dans le thème 3 qui sont les « *observations sur les évolutions morphologiques induites par la tempête* ». Ces informations sont scindées en plusieurs items :

- *érosion du trait de côte (Booléen)* : Champ booléen indiquant s'il y a eu une érosion du trait de côte sur le point (Booléen). Dans le secteur dunaire, le trait de côte correspond au pied de dune ;
- *recul du trait de côte (numérique)* : Valeur en mètre du recul du trait de côte (évaluée ou mesurée) ;
- *érosion de la plage (Booléen)* : Champ booléen indiquant s'il y a eu érosion de la plage sur le point ;
- *valeur de l'érosion plage (numérique)*: Valeur de l'érosion de la plage (évaluée ou mesurée, en m). Si la valeur n'est pas connue, aucune valeur n'est renseignée ;
- *affouillement (Booléen)* : champ booléen indiquant si un affouillement a été constaté ;
- *valeur de l'affouillement (numérique)* : valeur de l'affouillement estimé (en mètre). Si la valeur n'est pas connue, aucune valeur n'est renseignée ;
- *apport de sable (Booléen)*: champ booléen indiquant si un apport de sable lié à la submersion a été constaté ;
- *apport de débris (Booléen)*: champ booléen indiquant si un apport de débris lié à la submersion a été constaté ;
- *ripple marks (Booléen)* : champ booléen indiquant si des figures de courant liées à la submersion ont été observées ;
- *commentaire morphologie (alphanumérique)*: texte libre contenant des informations complémentaire sur la morphologie.

Sur ces dix champs, ce sont surtout les champs « *Érosion du trait de côte* », « *recul du trait de côte* », « *érosion de la plage* », « *valeur de l'érosion de la plage* » qui seront analysés.

2.4.2. Collecte des informations

- Observations sur le recul du trait de côte

Sur les 291 observations réalisées (qui ne concernent pas que des évolutions morphologiques), 52 points d'observation mentionnent un recul du trait de côte. Les 52 points où un recul du trait de côte a été identifié sont présentés dans la Figure 24. Ils concernent tous la côte sableuse avec cordon dunaire plus ou moins développé.

Sur ces 52 points, une estimation du recul du trait de côte a été fournie pour 18 points d'observation (Figure 25). Le faible nombre de recul du trait de côte quantifiés s'explique par le fait que la mission a été réalisée « à chaud », une semaine après l'événement et que le temps pour effectuer les observations était limité. Les valeurs de recul du trait de côte qui ont été estimées varient de 2 m à 30 m, les faibles valeurs de recul du trait de côte (inférieur à 2 m) n'ont pas été systématiquement notées. Compte-tenu du fait qu'une quantification systématique des valeurs de recul n'a pas été réalisée sur tous les segments ayant subis une érosion, la valeur moyenne du recul constatée (moyenne de 11 m, écart type de 7 m) n'est donnée qu'à titre indicatif. L'histogramme des valeurs de recul estimé est présenté dans la Figure 26.

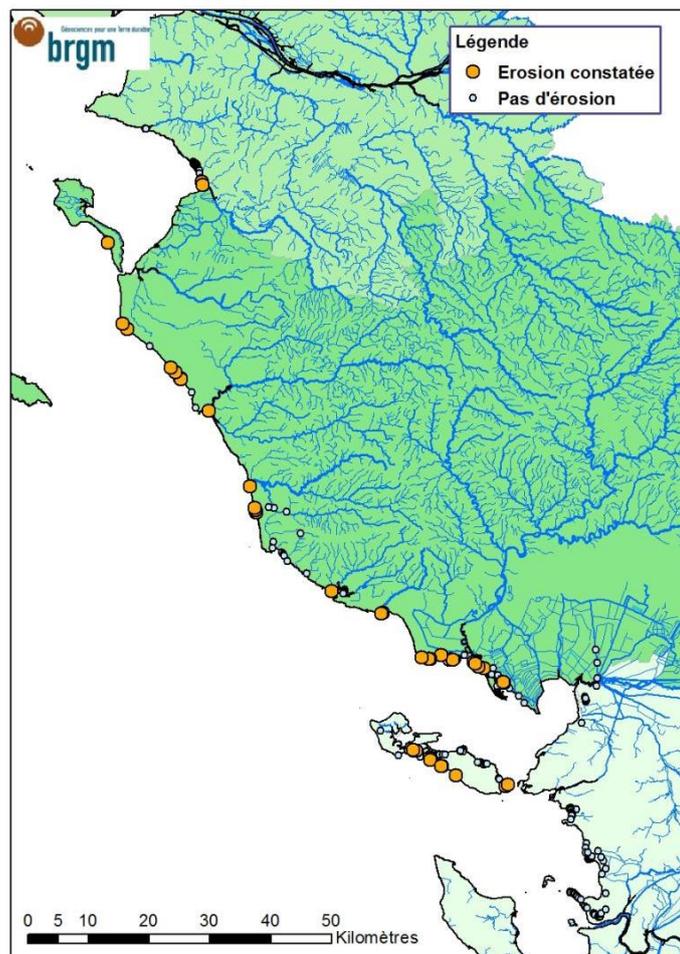


Figure 24 : Localisation des 52 points où un recul du trait de côte a été noté suite à la tempête Xynthia.

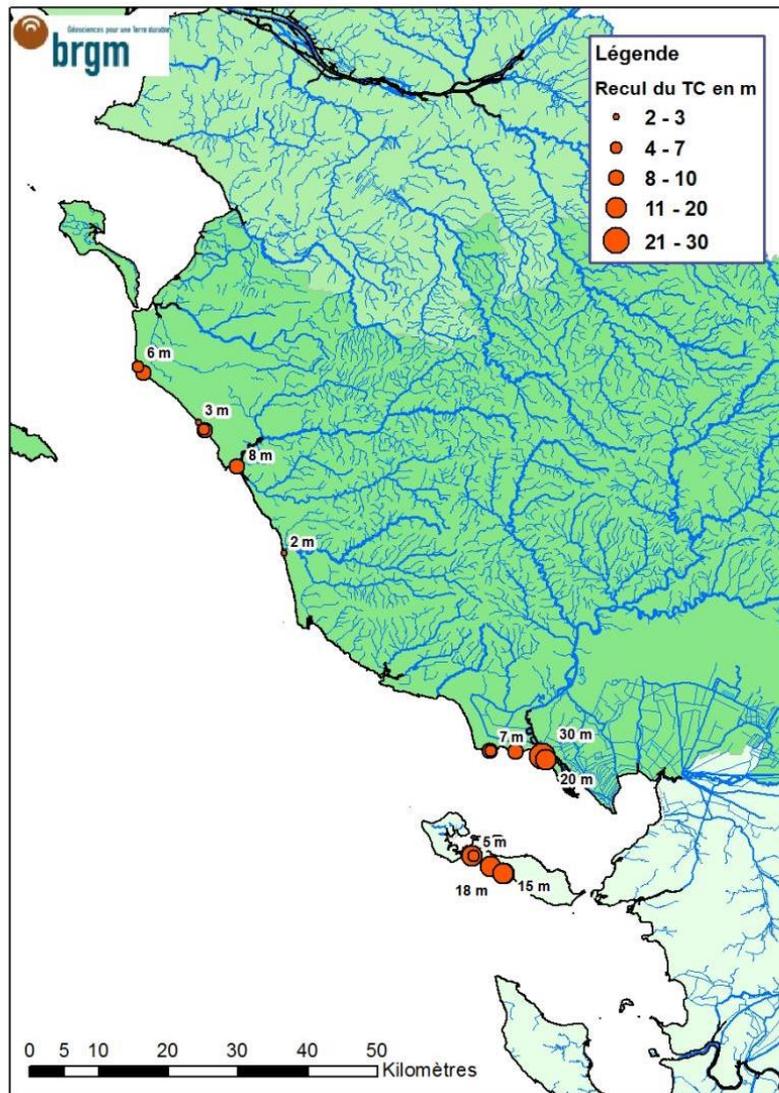


Figure 25 : Carte de localisation des points d'observation où la valeur du recul du trait de côte a été évaluée.

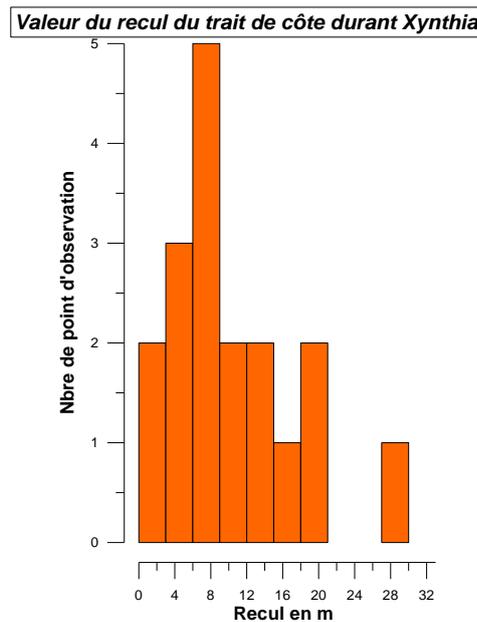


Figure 26 : Histogramme des valeurs de recul du trait de côte durant Xynthia (classes de 3 m).

Les figures suivantes illustrent l'effet d'une forte érosion des dunes littorales dans les régions impactées par la tempête Xynthia.

Un point particulier a été réalisé au niveau de la commune de La Tranche-sur-Mer (Figure 28). Certaines habitations, directement installées sur la dune, ont été impactées et endommagées par la tempête (Figure 29).

La Figure 31, située également à La Tranche-sur-Mer, illustre bien la grande variabilité spatiale de l'érosion et la difficulté à évaluer le risque pour un bien. Cette figure montre que la tempête Xynthia a linéarisé une dune formant une petite pointe d'une vingtaine de mètres, au droit d'un épi. Au niveau de cette pointe (visible sur l'orthophoto de 2006), le recul lié à la tempête est très fort. En revanche, à moins de 50 m à l'ouest, la maison située au sommet de la dune n'a pas été endommagée, car le recul du pied de dune a été beaucoup moins important.



Figure 27 : Érosion et recul du trait de côte ayant entraîné un falaisage de la dune (Saint-Jean-de-Monts) - À noter l'altitude à laquelle a été tronqué le chemin d'accès à la plage (BD Xynthia, Pedreros et al., 2010 ; Garcin et al., 2011).

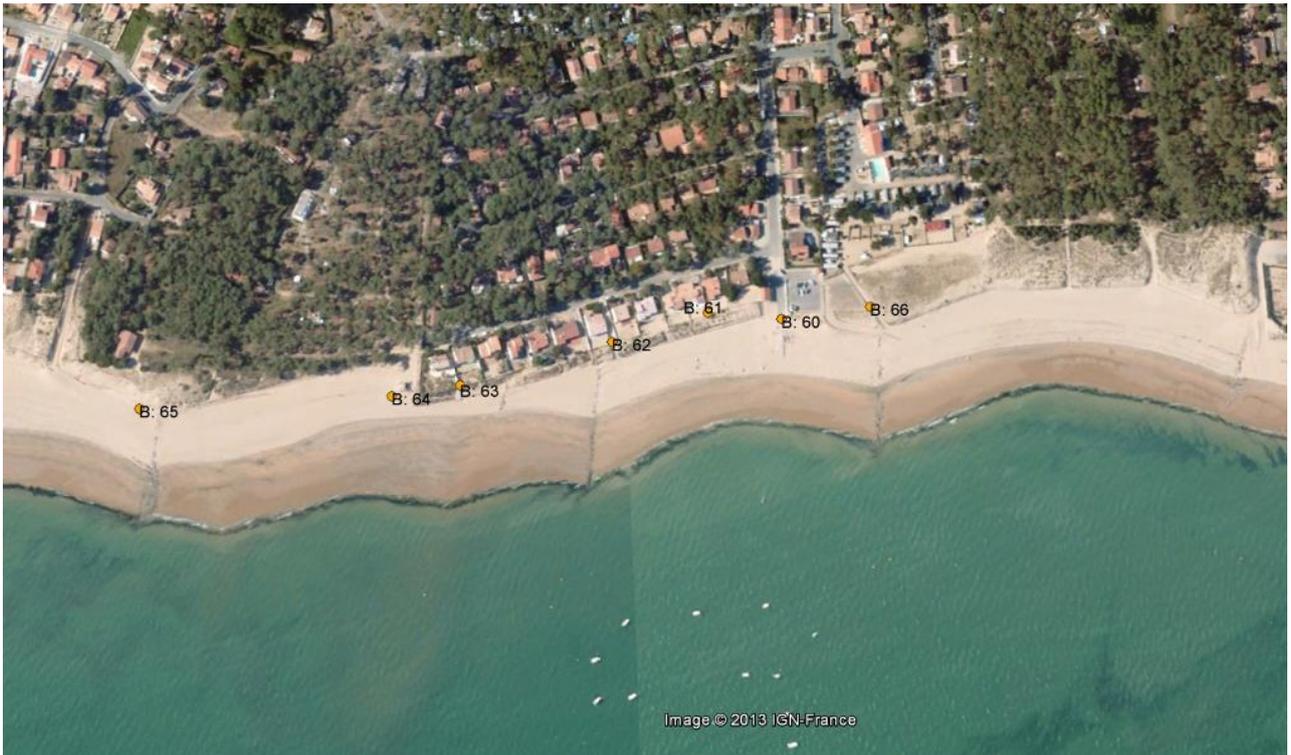


Figure 28 : Points où un recul de 10 à 15 m a été observé suite à Xynthia (Commune de La Tranche-sur-Mer) - Fond image 2007 antérieur à Xynthia (GoogleEarth).



Figure 29 : Érosion de la dune et endommagement des habitations de première ligne (Point B61 de la Figure 28).



Figure 30 : Érosion de la dune et falaisage durant Xynthia (point B65 de la Figure 28).



Figure 31 : Évolution de la côte entre 2006 (image du haut) et 2010 post Xynthia (image du bas) au point B65. La ligne orange correspond au sommet de dune post-Xynthia tandis que celle en tirets correspond au haut de dune avant Xynthia.



Figure 32 : Recul dunaire de l'ordre de 15 m à l'île de Ré (à noter la banquette formée par des dépôts plus indurés sous la dune).

- Érosion de plage

En plus du recul du trait de côte, des érosions de plage ont été aussi observées (Figure 33). En l'absence de profils réalisés avant et après l'événement, ces observations sont délicates à quantifier. Des évaluations ont toutefois été fournies sur quelques points. L'observation de l'érosion de plage, c'est-à-dire de la baisse générale de l'altitude de l'estran et du domaine subaérien est un élément majorant l'impact d'une tempête sur le recul dunaire. En effet, le volume érodé dans une dune est bien plus important si l'altitude du pied de cette dune baisse significativement.

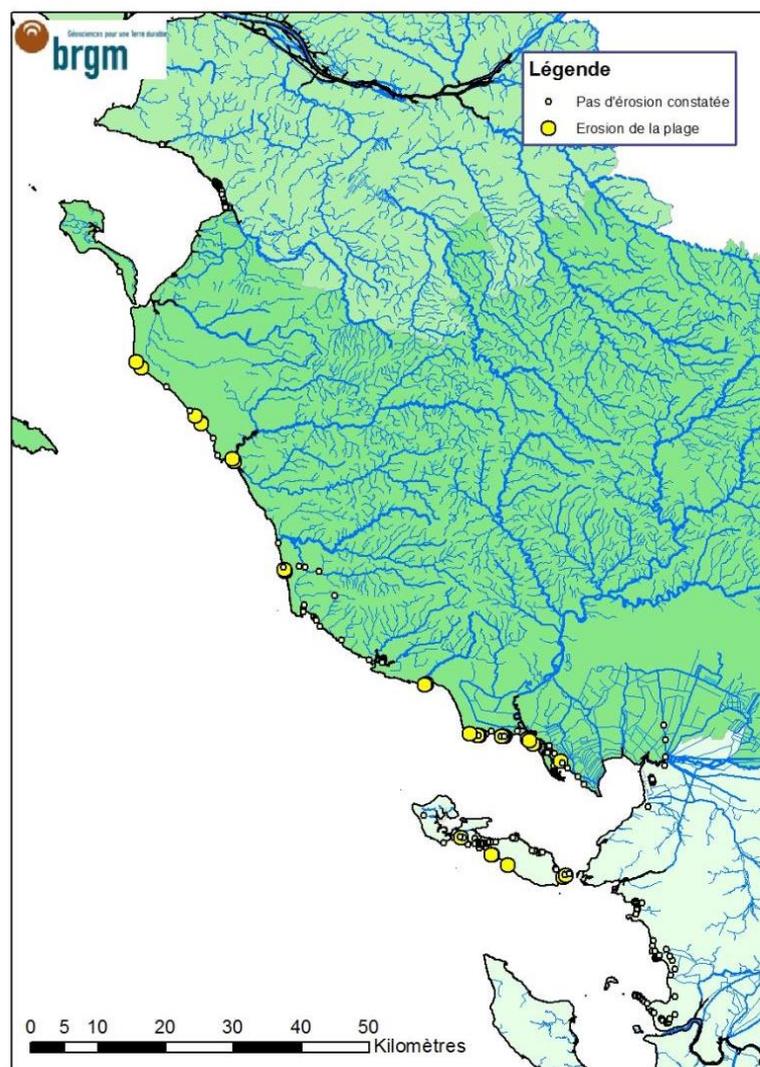


Figure 33 : Points où l'érosion de la plage a été constatée.

2.5. LANGUEDOC-ROUSSILLON

2.5.1. Site atelier de Sète

Le site du Lido de Sète est un secteur caractéristique des côtes basses et sableuses du Languedoc-Roussillon (Figure 34). Subissant une érosion récurrente, le site est suivi afin d'étudier l'effet des aménagements de protection de la plage (système Ecoplage de drainage et atténuateurs de houle). Dans le cadre d'un projet de recherche européen sur l'impact des tempêtes marines sur le littoral (MICORE, Morphological Impacts and COastal Risks induced by Extreme storm events), une thèse (Gervais, 2012) a été réalisée. Ce travail est régulièrement cité dans la suite de ce rapport. Les moyens de suivi mis en œuvre pour ce travail sont exemplaires. Ils permettent de suivre l'évolution morpho-sédimentaire de la plage avec précision et à haute fréquence.

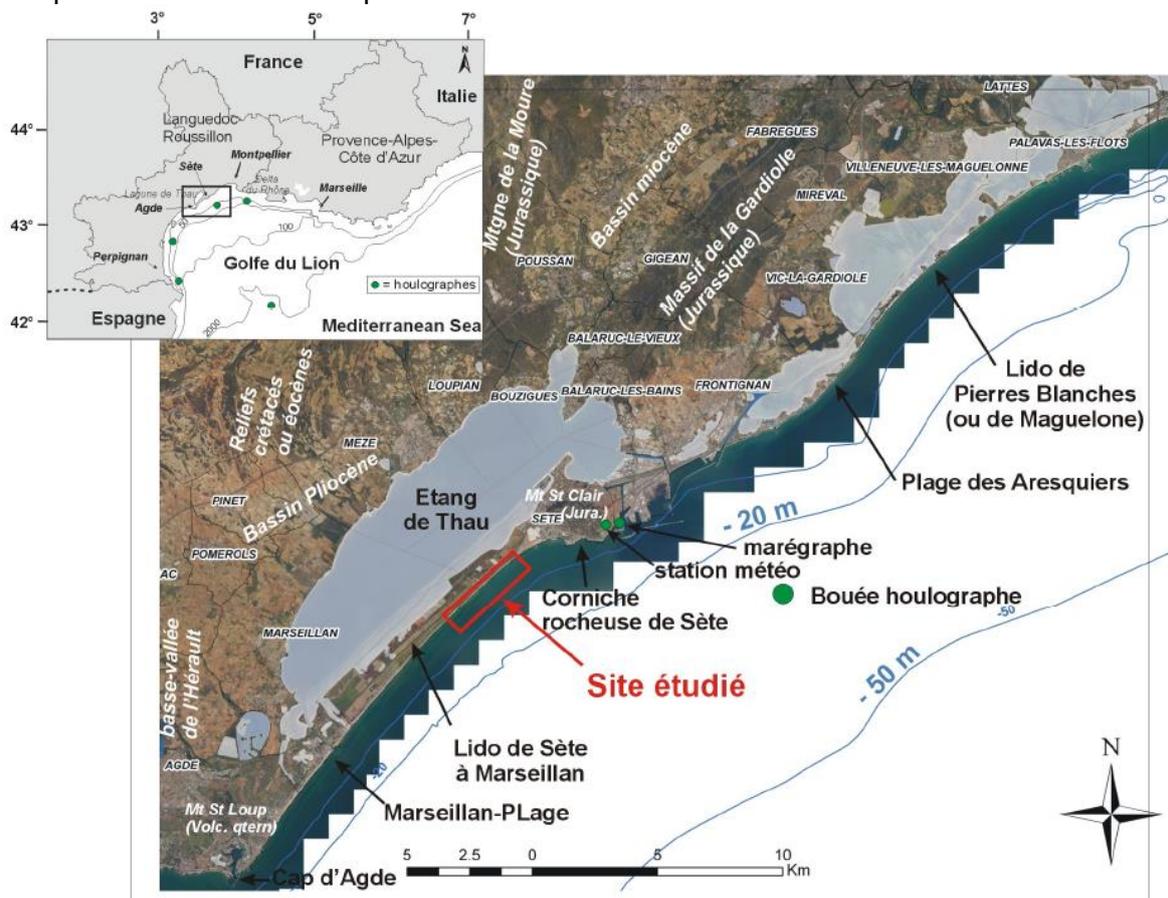


Figure 34 : Localisation du site d'étude de Sète (Gervais, 2012).

La Figure 35 présente les moyens classiques de suivi de la morphologie des plages : topographie et levé du trait de côte à partir d'un GPS différentiel centimétrique et bathymétrie, base de photographies. Depuis 2011, dans le cadre d'un projet de suivi des aménagements maritimes (Collaboration Thau Agglo – BRGM), le site d'étude est également équipé d'un système de caméra vidéo Argus (Figure 36 et Figure 37). Le traitement de cette imagerie permet de suivre à haute fréquence et sur une large emprise (4 km), la position des zones de déferlement des vagues, marqueur de la morphologie sous-marine de la plage. Sur le lido de Sète, on observe la présence de deux barres sableuses sous-marines festonnées. Ces données permettent de faire le lien entre la position des zones d'érosion du haut de plage et la forme des barres sableuses sous-marines, notamment la barre interne (Figure 38). L'érosion du pied de dune apparaît dans les secteurs où les barres sableuses sous-marines sont les plus proches de la côte.

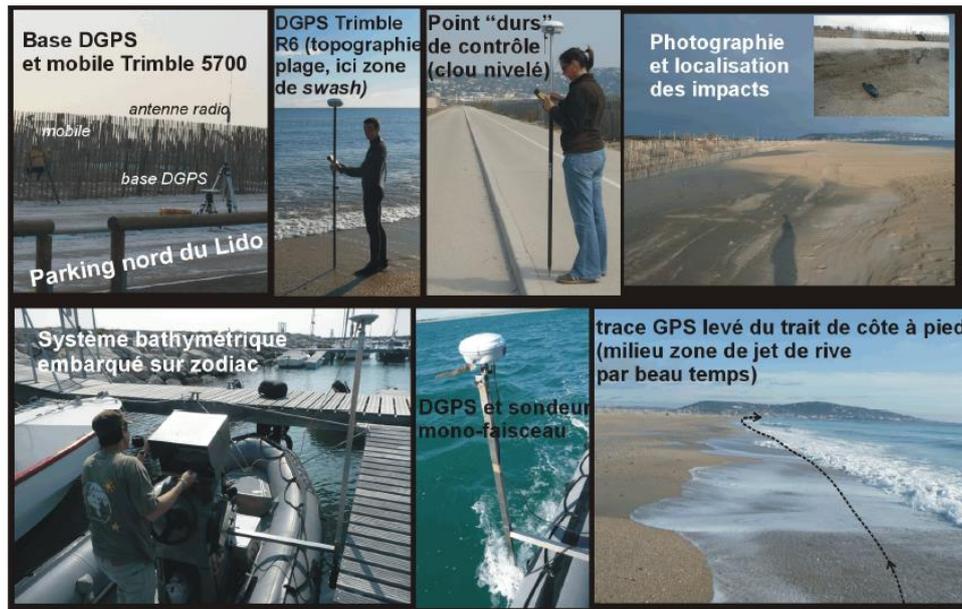


Figure 35 : Matériels et méthodes utilisés sur le terrain pour les levés de l'impact morphologique des tempêtes sur la plage et l'avant-côte du Lido de Sète (Gervais, 2012).

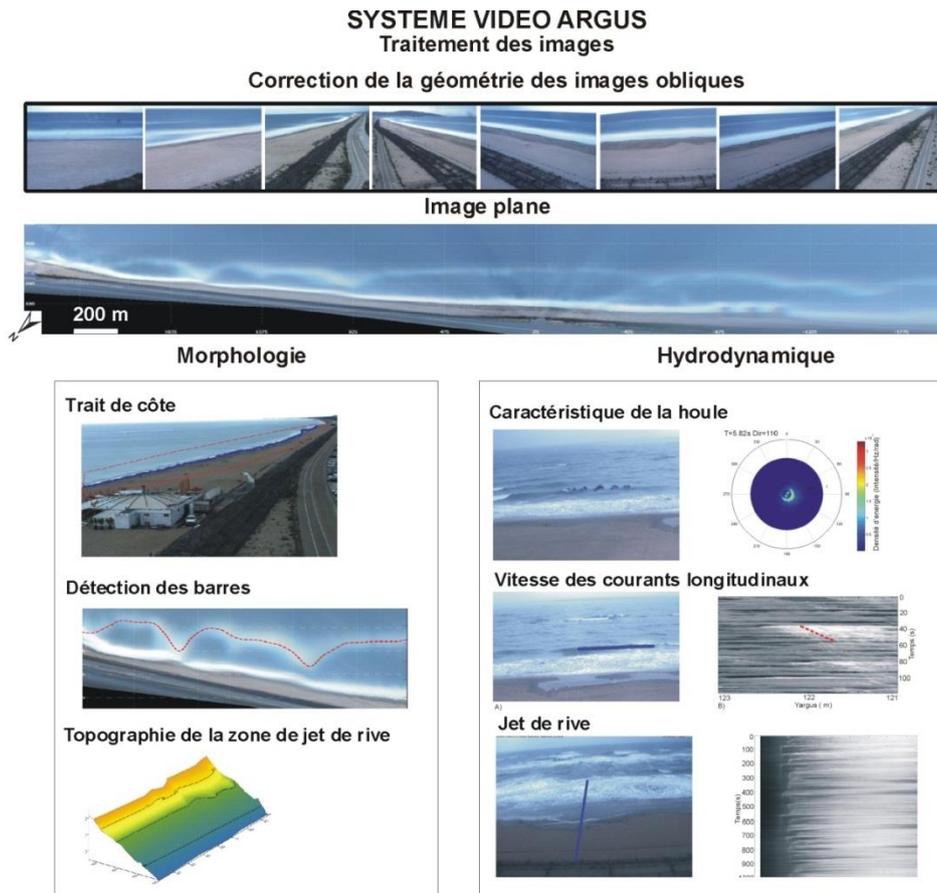


Figure 36 : Présentation des indicateurs morphologiques et hydrodynamiques obtenus par l'outil Argus (Source BRGM).



Figure 37 : Principe de fonctionnement du système fixe d'imagerie vidéo ARGUS installé sur le Lido (Gervais, 2012).

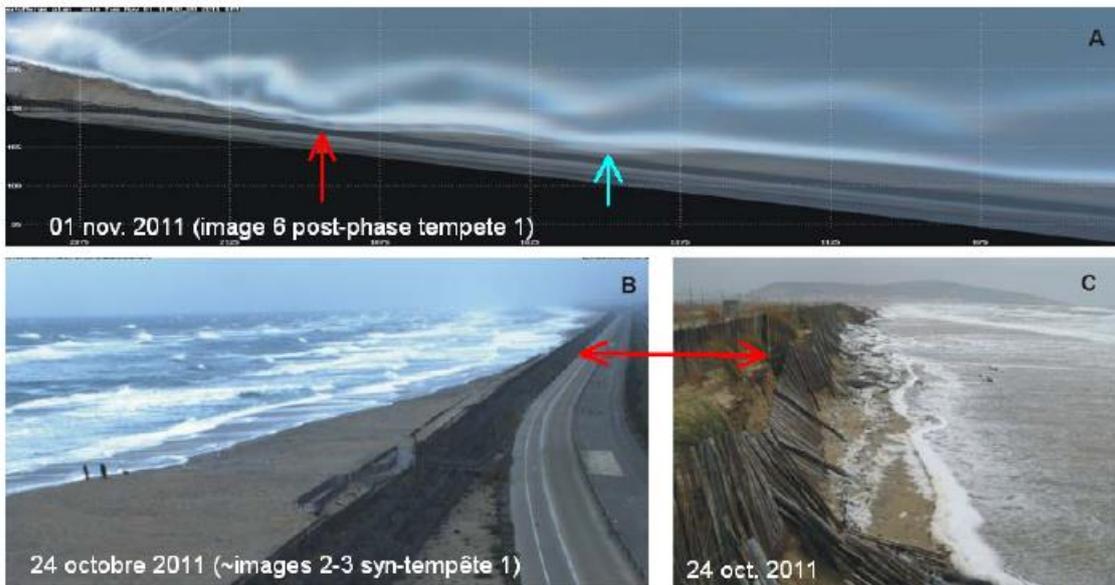


Figure 38 : Zones d'érosion et de submersion particulièrement fortes en période de tempête. Lien avec la morphologie des barres sableuses sous-marines festonnées sur la plage de Sète (Gervais 2012, d'après Balouin et al., 2012).

2.5.2. Réseau de surveillance des tempêtes et de leurs impacts

Dans un contexte d'érosion importante du littoral du Languedoc-Roussillon, l'information historique sur les événements de tempête est une donnée cruciale pour la caractérisation des risques côtiers et la prévision de leurs impacts. Or le constat a été fait que cette donnée est difficilement accessible et utilisable en raison des sources souvent très diverses, de dispositifs de suivi peu comparables, voire de portions du littoral non couvertes. L'objectif du réseau « Tempêtes » est de mutualiser et d'homogénéiser les démarches existantes en

matière de suivi des tempêtes et de leurs impacts, et de les généraliser à l'ensemble du littoral de la région, en s'appuyant sur les mises en réseau des organismes et services administratifs concernés (De la Torre et Balouin, 2012, BRGM/RP-60694-FR).

Le BRGM coordonne la mise en œuvre du « Réseau Tempête » de surveillance des tempêtes et de leurs impacts dans le cadre du volet « gérer durablement le littoral » du Contrat de Projet État-Région.

Opérationnel depuis 2011, la mise en œuvre du réseau comprend :

- un réseau de partenaires régionaux, volontaires et impliqués dans le suivi des tempêtes ;
- des outils permettant le déclenchement des suivis (message automatique d'information sur l'arrivée d'une tempête) et la mutualisation des informations (plateforme FTP accessible aux partenaires) ;
- un ensemble minimum de 42 sites de suivis et de 3 stations vidéo (Figure 39) ;
- un protocole d'harmonisation des méthodes de suivi validé sur le terrain.

Sur la période d'octobre 2011 à décembre 2013, le réseau a principalement été activé à l'occasion des tempêtes d'octobre 2011, octobre et novembre 2012 et la tempête de mars 2013. Pour chacun de ces événements, les équipes du réseau sont intervenues sur le terrain pour constater ces impacts (Figure 40 et Figure 41). L'intégralité des observations a été mutualisée sur une base de données en ligne, disponible sur le site <http://littoral.languedocroussillon.fr>.

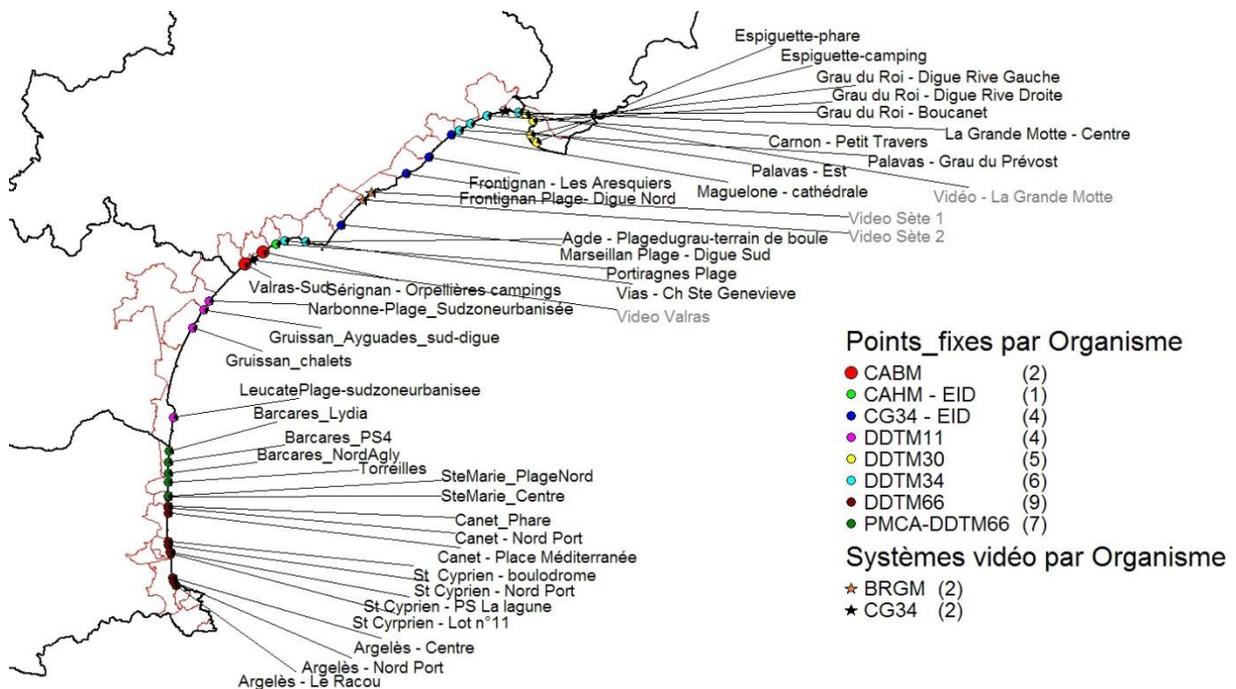


Figure 39 : Carte des points fixes suivis par les différents partenaires et des stations vidéo (BRGM/RP-62731-FR).

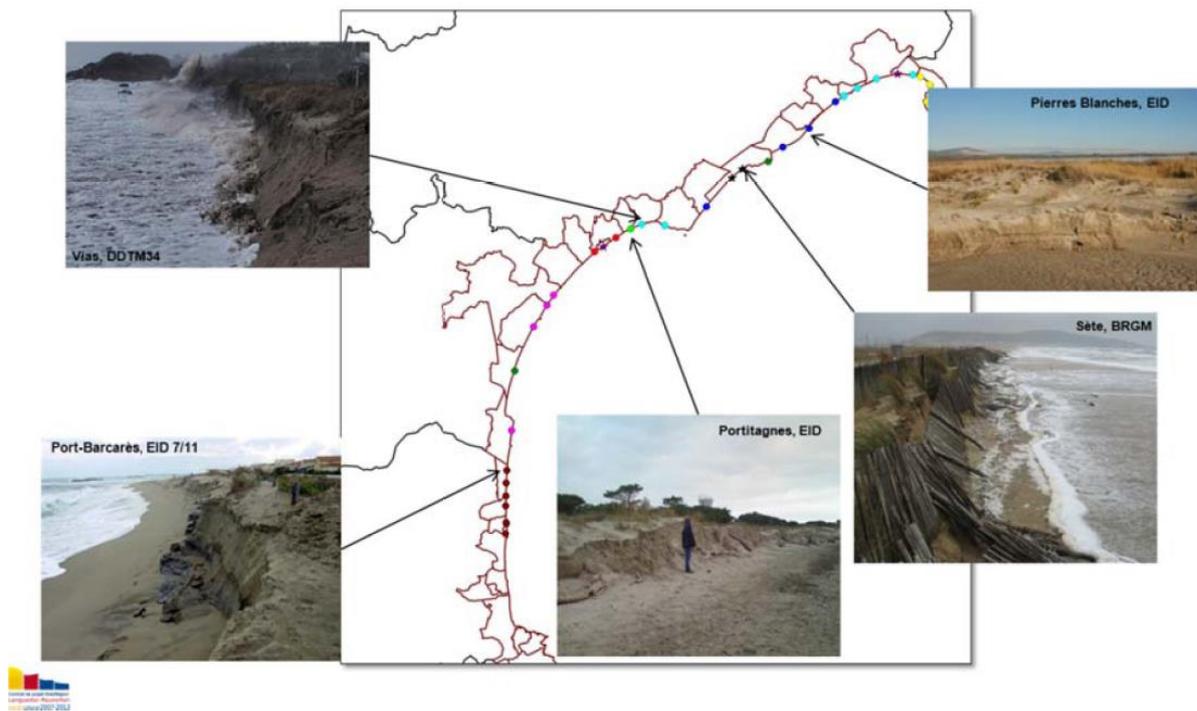


Figure 40 : Érosion observée par le réseau Tempête le 24/10/2011 (BRGM/RP-60694-FR).



Figure 41 : Érosion du front de dune dans le secteur des Baronnets au Grau du Roi (source DDTM30/Mairie Grau du Roi), tempête du 6 mars 2013.

2.6. BILAN

Les mesures topo-bathymétriques des profils de plage et de dunes donnent des informations précieuses sur le recul dunaire qui peut ainsi être quantifié précisément à des altitudes fixes. Les profils topographiques présentent aussi l'avantage de permettre un repérage fin des éléments caractéristiques de la morphologie dunaire (pied de dune, crête, arrière-dune). Les profils de plage de l'OCA (Observatoire de la Côte Aquitaine) et du ROL (Réseau d'Observation du Littoral Corse) ont montré différentes formes de recul dunaire : recul de l'ensemble de la falaise, érosion de l'avant-dune, translation de la dune vers les terres. Ces profils permettent une observation du recul pouvant atteindre 15 à 20 m dans les Landes et 10 m en Corse. Mais la répétitivité annuelle de ces mesures apparaît insuffisante pour caractériser un événement unique de tempête. De plus, la densité des réseaux de profils topographiques étudiés (ROL et OCA), calibrée pour des échelles spatiales étendues, ne permet pas de prendre en compte toute la variabilité locale des environnements dunaires. D'autres techniques d'observation et de mesures sont donc complémentaires.

Ainsi, l'exemple du travail de synthèse mené à partir des données de l'Observatoire des Pays-de-Monts propose une approche pour répondre aux questions de la variabilité spatiale de l'érosion dunaire parallèlement à la côte. Le travail de cartographie diachronique du trait de côte par orthophotographie aérienne permet de visualiser l'évolution du pied de dune entre 2 campagnes d'images. Sur la côte des Pays-de-Monts, ce recul varie de 5 m à plus de 20 m entre 2009 et la campagne photographique de 2010, réalisée après la tempête Xynthia. Il faut toutefois noter que la précision du travail sur les photographies aériennes reste limitée, c'est pourquoi les Observatoires où le BRGM est opérateur pratiquent également des mesures in situ de suivi du trait de côte par GPS centimétrique.

Parmi les autres techniques de mesures existantes actuellement, les acquisitions Lidar sont de très bonnes bases d'observations géomorphologiques des dunes. Elles fournissent à la fois des données topographiques denses et de qualité, avec une couverture complète sur de vastes zones. Cependant, la mise en œuvre, le coût et la difficulté de planifier des opérations successives de survol constituent les principales limitations de cette technologie qui se développe en France. D'une façon générale, ces données acquises ponctuellement dans le temps ne permettent pas de décrire directement l'évolution liée à une tempête, mais sont utiles pour un état des lieux et une description de l'environnement d'étude dans le cas d'un PPR (voir partie 7.2).

Pour permettre de suivre les évolutions liées aux événements extrêmes, la capacité d'intervention rapide sur le terrain est un élément essentiel pour observer et décrire l'ampleur des reculs instantanés après les tempêtes. Cet élément est intégré par les équipes du BRGM, comme le montrent les travaux réalisés après la tempête Xynthia et le réseau « tempête » mis en place en Languedoc-Roussillon. Dans les Observatoires comme l'OCA ou l'OLPM, l'association avec l'ONF permet également une grande réactivité pour réaliser les observations et les mesures après des événements érosifs.

Enfin, il faut noter l'importance des observations plus spécifiques, menées dans un objectif de recherche ou de surveillance de sites sensibles, pour comprendre les phénomènes opérant lors des tempêtes et pour observer l'évolution morpho-sédimentaire de l'ensemble des compartiments de la plage à différentes échelles temporelles. C'est pourquoi le dispositif de suivi topo-bathymétrique et d'imagerie vidéo déployé sur le site atelier du Lido de Sète a été présenté dans ce chapitre.

3. MORPHODYNAMIQUE DES DUNES PENDANT LES TEMPÊTES

L'objectif de ce chapitre est de présenter et de décrire les phénomènes naturels qui agissent sur les dunes lors d'évènements de tempête. Une approche morphodynamique est utilisée pour décrire les interactions entre les forçages (qui apportent de l'énergie) le transport des sédiments et la morphologie des dunes littorales, afin de présenter les impacts des évènements extrêmes sur les environnements dunaires.

3.1. PHÉNOMÈNES MÉTÉO-MARINS PARTICIPANT À L'ÉROSION DES DUNES PENDANT LES TEMPÊTES

Au cours d'une tempête, différents phénomènes atmosphériques ou océaniques vont agir sur le haut de plage. Ces processus météo-marins agissent directement, indirectement, de manière combinée ou pas, sur la morphologie des dunes littorales en influençant le transport sédimentaire. Ces phénomènes sont :

- les vagues ;
- le vent ;
- la pluie ;
- la marée ;
- la pression atmosphérique.

La suite de cette partie a pour but de présenter les effets de ces différents phénomènes.

3.1.1. Déferlement des vagues et jet de rive

Les vagues et leurs transformations dans la zone côtière forment la source d'énergie principale lors des évènements de tempête (Figure 42). Le déferlement correspond au moment où une vague se brise en arrivant à la côte. La libération d'énergie est maximale à ce moment. La vague écroulée continue ensuite à se propager dans un mélange turbulent et énergétique. En arrivant sur la pente de la plage, sa dissipation se poursuit sous la forme d'une lame d'eau nommée « *jet de rive* » (swash en anglais). Lorsque la vitesse du jet de rive devient nulle, la vague redescend la plage en formant une « *nappe de retrait* ». Le déferlement des vagues et le jet de rive sont susceptibles de transporter d'importantes quantités de sédiment et d'atteindre le pied de dune. Ils forment donc les vecteurs principaux de l'érosion des dunes en période de tempête.

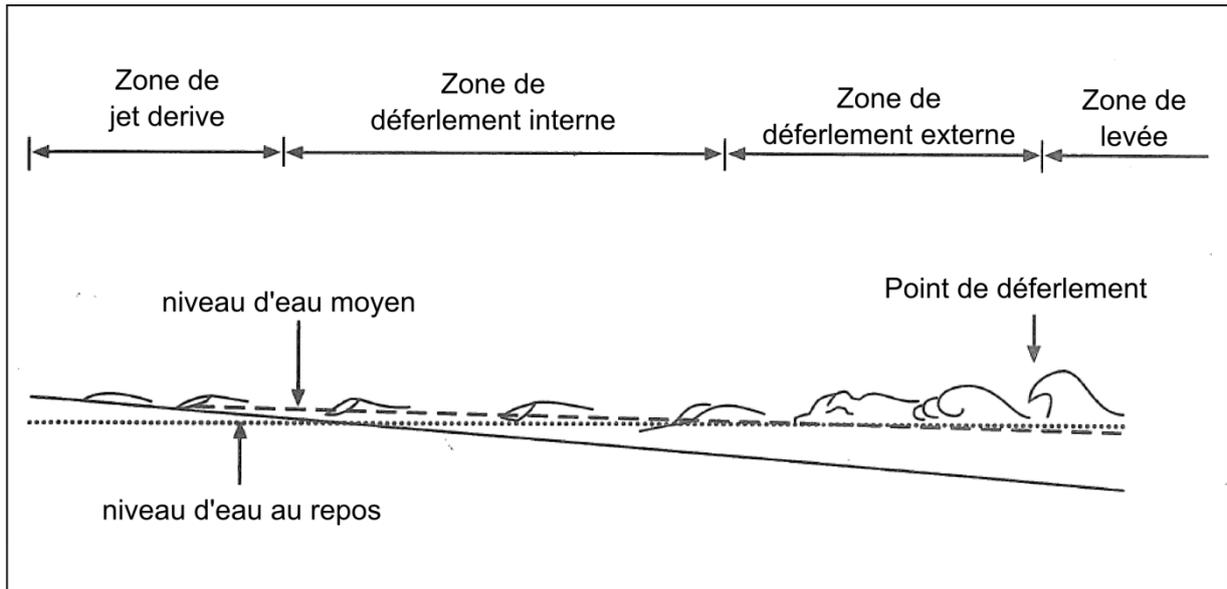


Figure 42 : Transformation des vagues en zone littorale. Modifié d'après Short, 1999.

3.1.2. Surcote de tempête et ondes infragravitaires

En période de tempête, les effets combinés du vent fort orienté vers la côte, de la houle, de la marée et d'une dépression atmosphérique vont faire monter significativement le niveau moyen de la mer (Figure 43). Ce phénomène, nommé surcote, est un élément essentiel dans le processus d'érosion dunaire car il permet aux vagues d'atteindre le niveau altimétrique des dunes littorales. Le schéma suivant présente la contribution de la marée astronomique, de la dépression atmosphérique (surcote atmosphérique) et du déferlement des vagues (*set-up*) dans le niveau d'eau moyen lors d'une tempête. L'effet du déferlement et du jet de rive (*swash*), présenté précédemment, et l'altitude maximale atteinte par une vague est également mentionné sous le terme de « *run-up* ».

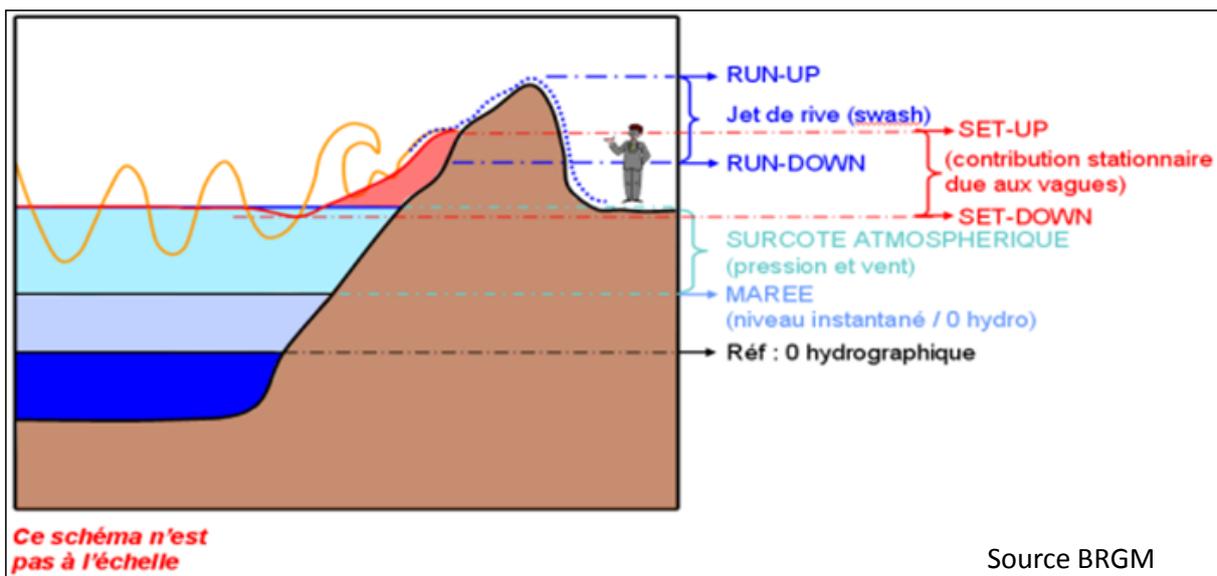


Figure 43 : Schéma illustrant les principaux paramètres entrant en compte dans l'élévation des niveaux marins extrêmes (Source BRGM).

Les ondes infragravitaires sont des phénomènes liés à l'organisation des houles venant du large sous forme de groupes d'ondes (Figure 44). Le terme « infragravitaire » désigne des ondes dont la période est plus importante que celle des vagues et la houle, appartenant aux ondes « gravitaires ». Ces ondes de basse fréquence ont la caractéristique de ne pas déferler dans la zone côtière. Ainsi, la part d'énergie infragravitaire croît au fur et à mesure que l'énergie des vagues s'amenuise en remontant sur la plage. Au niveau du haut de plage, ce phénomène se matérialise notamment dans le jet de rive (Stockdon *et al.*, 2006 ; Cox *et al.*, 2013), par l'apparition régulière (dans l'espace et le temps) d'ondes plus fortes, capables d'une excursion sur la plage beaucoup plus importante que la moyenne des autres vagues. La combinaison d'une surcote et d'un maximum d'énergie dans les ondes infragravitaires peut permettre la montée du jet de rive sur la dune, favoriser les fortes érosions et les débordements par paquet de mer.

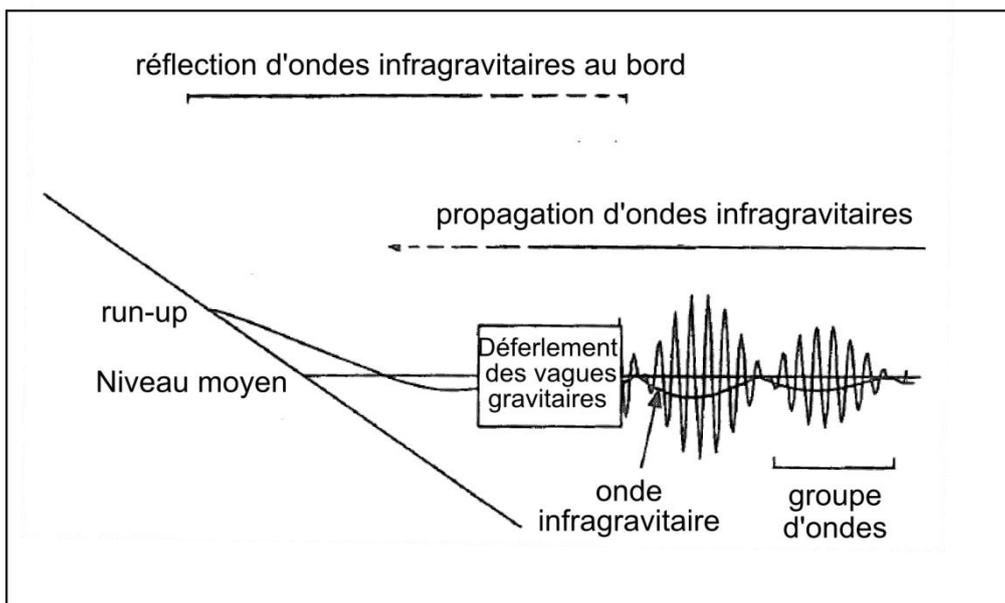
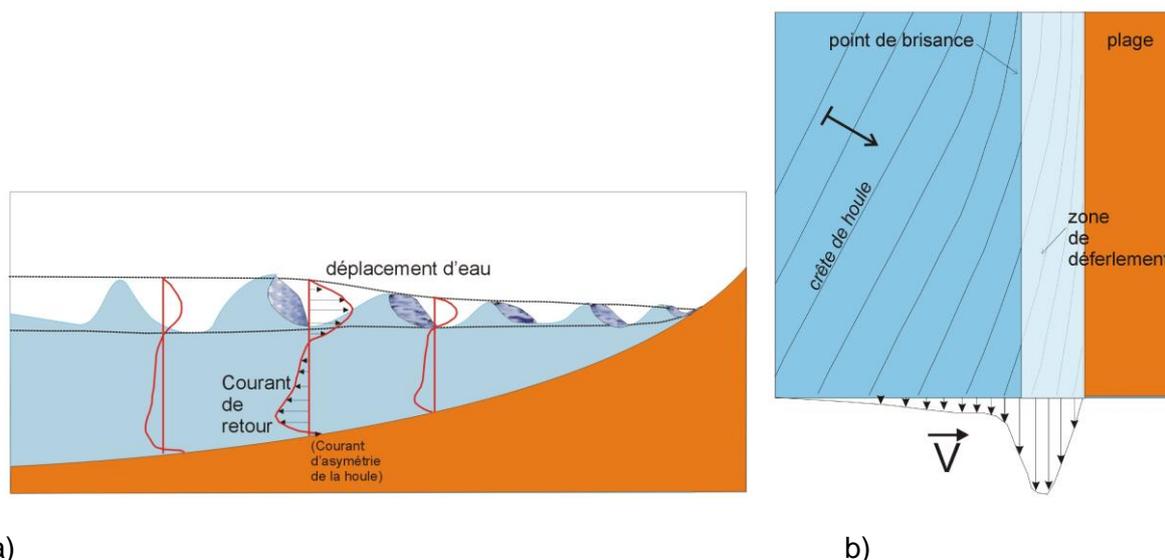


Figure 44 : Les ondes infra-gravitaires (modifié d'après Short, 1999).

3.1.3. Courants liés au déferlement

La zone de déferlement est un domaine où d'intenses courants prennent naissance (Figure 45). Ces courants influencent de façon prépondérante la dynamique et le transport sédimentaire du milieu littoral. Ainsi, le transport en masse est un courant orienté vers la côte, dont l'intensité maximale est atteinte dans la zone de déferlement. Le courant de retour est provoqué par la nécessité d'un rééquilibrage de niveau entre les masses d'eau transportée vers la côte par le déferlement et le niveau moyen plus au large. Lorsque la surcote et le déferlement sont très forts en période de tempête, le courant de retour créé peut devenir particulièrement puissant et se propager jusqu'aux limites de la plage sous-marine. Le courant de dérive littorale est une composante parallèle à la côte, dont l'intensité est dépendante de l'angle d'orientation des houles. Généralement, ces courants littoraux ne provoquent pas directement l'ablation de sédiment sur le front dunaire, mais en période de tempête, ils sont capables de déplacer les quantités de sables mobilisés sur de grandes distances.



a) Profil perpendiculaire à la côte illustrant les courants induits par le déferlement.
 b) Vue en plan de la répartition du courant de dérive littoral. Gervais (2012) d'après Castelle (2004).

3.1.4. Vent et pluie

Le vent est la source d'énergie principale de la construction des dunes littorales. Lorsqu'il est orienté vers la terre et que sa force est suffisante lors d'évènements énergétiques, le vent a la capacité de transporter le sable de plage vers la dune. La dune, qui forme une barrière face au vent, est une zone de dépôt privilégiée pour les sédiments éoliens de la plage. La présence de végétation accroît cette capacité de piégeage.

Le vent fort a aussi une capacité à éroder la dune en transportant le sable vers le domaine continental, ou bien vers la mer en fonction de son orientation.

L'humidité du sol renforce la cohésion des grains de sables et diminue les possibilités de mise en mouvement des sédiments par le vent (Pedreros, 2000). En période de tempête, la pluie peut donc limiter fortement le transport éolien sur la plage et la dune. Mais, dans des conditions particulières d'averses intenses et courtes, les gouttes d'eau, au moment de toucher le sol, font gicler les grains de sables qui peuvent alors être transportés par le vent violent. En période de tempête, l'estimation du transport sédimentaire éolien sur les dunes est une question complexe à traiter (Gabarrou *et al.*, soumis). Dans la suite de ce rapport, ce point est abordé par une présentation succincte des modifications morphologiques érosives des dunes provoquée par le transport éolien (voir partie Effet du vent 3.3.1).

3.2. PROCESSUS DE TEMPÊTE ET TRANSPORT SÉDIMENTAIRE SUR LA PLAGE ET LES DUNES

3.2.1. Érosion du système littoral et indicateur de puissance des tempêtes

Lors d'épisodes de tempêtes, l'énergie de la mer et du vent est largement suffisante pour déplacer d'importantes quantités de sédiment. Pour les littoraux constitués de sédiments meubles, le transport sédimentaire s'accompagne d'érosion ou d'accrétion. L'érosion est une perte de sédiment qui peut entraîner un recul du trait de côte et une perte de volume du système littoral, constitué par la plage sous-marine, l'estran et les dunes au sein d'une cellule sédimentaire. L'accrétion ou engraissement, au contraire, correspond à une augmentation de volume qui peut permettre la création de structures sédimentaires ou la progression de la ligne de rivage vers le large.

En première approche, l'impact d'un épisode érosif peut être évalué par un recul du trait de côte, une évolution morphologique et une perte de volume sédimentaire. Mais d'autres éléments pourraient être pris en compte comme par exemple la réversibilité ou l'irréversibilité des déplacements sédimentaires provoqués par l'épisode érosif. Ainsi, certains événements énergétiques érodent significativement la dune, mais les volumes de sédiments érodés peuvent participer en retour à l'engraissement de la plage intertidale ou sous-marine. Ces sédiments déplacés restent dans le système littoral. Une certaine réversibilité des processus est envisageable. Les phénomènes d'accrétion en haut de plage lors de périodes de calmes peuvent alors permettre la reconstruction de la dune, à moyen terme. Mais d'autres types d'épisodes énergétiques sont plus impactant et provoquent une érosion généralisée et la sortie définitive de volumes sédimentaires hors du système littoral étudié. Les impacts morpho-sédimentaires de ces événements sur les dunes peuvent être qualifiés d'extrêmes, car les possibilités de reconstructions du cordon dunaire à court ou moyen terme sont alors réduites.

Sur la côte est-américaine, l'approche de Dolan et Davis (1992) permet de faire le lien entre une classification de l'intensité des tempêtes et une échelle des impacts sur le littoral et les dunes. Les tempêtes sont classées en 5 catégories sur la base d'une étude statistique de l'indice de « *Storm Power* ». Cet indice « P » de puissance de la tempête prend en compte sa durée (t_D) en heure et la hauteur significative des vagues au large durant la tempête ($H_{1/3}$) en m, tel que: $P = (H_{1/3})^2 \cdot t_D$.

Pour chaque classe de tempête, les auteurs se basent sur leur connaissance de la côte est-américaine pour proposer une description à dire d'expert des dégâts engendrés. Les éléments pris en compte dans l'estimation des dégâts sont : l'érosion de la plage et de la dune, une estimation de la capacité de reconstruction de la plage, la formation de brèche dans le cordon, le débordement par paquets de mer, les dommages sur les infrastructures (Tableau 5). Le tableau indique que pour les tempêtes les plus puissantes (classe 4 et 5), la configuration de la plage et de la dune changent durablement du fait d'une érosion sévère, impliquant la sortie hors du système littoral étudié de volumes sédimentaires importants.

Classe de tempête		Storm Power Index (m ² .h)	Erosion de plage	Reconstruction de la plage	Erosion de la dune	Brèche de la dune	Débordement par paquets de mer	Dommages sur les infrastructures
1	Faible	<235	Changements mineurs	Complète et immédiate	Non	Non	Non	Non
2	Modérée	536	Modestes et restreints au bas de plage	Complète	Non	Non	Non	Mineurs
3	Significative	3047	Erosion sur l'ensemble de la plage	Reconstruction possible après une période de plusieurs mois	Peut être significative	Non	Sur les profils bas	Dégâts ponctuels
4	Sévère	7620	Erosion sévère et recul du trait de côte	Reconstruction rarement complète	Sévère	Dans les secteurs de plage étroite	Sur les plages basses	Dégâts à l'échelle locale
5	Extrême	> 7620	Erosion extrême, recul pouvant dépasser 50m	Changement permanent et clairement perceptibles	Destruction de la dune sur de grands secteurs	Très étendues	Généralisés	Dégâts majeurs à l'échelle régionale

Tableau 5 : Indice de puissance des tempêtes, Storm Power Index, d'après Dolan et Davis, 1992.

En France, ce type d'approche a été développé par le BRGM dans le cadre du projet de recherche européen MICORE pour le golfe du Lion. Ce projet a permis d'établir des liens entre les effets des tempêtes sur le littoral et la hauteur significative des vagues (Gervais, 2012). Les résultats ont permis la mise en place de seuil de surveillance pour le réseau Tempête présenté dans la partie 2.5.2 et de modèles conceptuels d'évolution des plages (exemple Figure 57).

3.2.2. Échelle des impacts de tempête en relation avec le niveau d'eau

En 2000, Sallenger propose une échelle des impacts érosifs des tempêtes (Storm Impact Scale) sur les cordons littoraux (Figure 46). Cette échelle s'applique aux îles-barrières qui bordent la côte Est des États-Unis et qui sont régulièrement touchées par des ouragans. Cette échelle d'évaluation a l'avantage de prendre en compte à la fois le niveau d'eau et la morphologie des dunes. Elle met en avant le fait qu'une même tempête n'aura pas le même impact érosif selon le type de cordon dunaire préexistant. Deux types d'environnements sont pris en exemple par l'auteur : un secteur de dunes bien établies (Duck, Caroline du Nord), semblables aux dunes de la côte Aquitaine, et une autre zone d'îles sableuses très basses (Îles Dernières, Louisiane), formées de cordons sableux aisément submersibles, plus ou moins comparables à certains secteurs situés en Méditerranée.

L'érosion des dunes est reliée à plusieurs seuils établis en fonction du niveau d'eau atteint par rapport au pied et au sommet de la dune. La prise en compte du jet de rive est primordiale. Dans l'article de Sallenger (2000), deux formules sont proposées pour estimer le niveau maximal du jet de rive et le niveau minimum de la nappe de retrait (cf. 3.1.1). Actuellement, les formules de Stockdon *et al.*, (2006) sont plus couramment utilisées pour estimer l'altitude atteinte par le jet de rive.

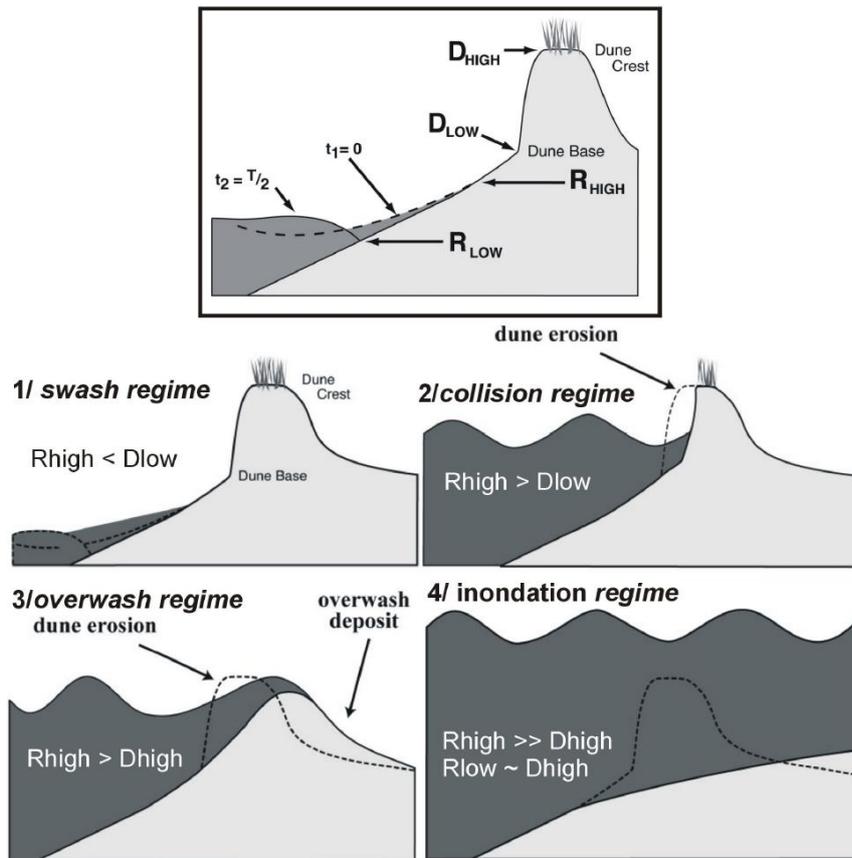


Figure 46 : Échelle des impacts de tempête (Storm Impact Scale) en fonction des niveaux d'eau et de la morphologie de la côte, Gervais (2012) d'après Sallenger (2000).

Quatre régimes liés au niveau d'eau des vagues de tempête sont définis en fonction des seuils :

- Le régime de jet de rive (swash regime, Figure 46)

Le premier seuil est atteint lorsque le niveau maximal du jet de rive (R_{high}) dépasse le pied de dune (D_{low}). Sous ce seuil, Sallenger (2000) définit des conditions de tempête en « régime de jet de rive ». L'érosion provoquée sur la plage est typique de tempêtes hivernales classiques. Le système a la capacité de se reconstruire rapidement lors de conditions de vagues faibles. La dune n'est pas attaquée.

- le régime de collision (collision regime, Figure 46)

Lorsque le jet de rive atteint le pied de dune et tant que le niveau maximal du jet de rive ne dépasse pas le sommet de dune, on entre dans le « régime de collision ». À ce stade, la base de la dune est érodée. Le sable peut être transporté hors du système, vers le large ou par la dérive littorale.

- le régime de débordement par paquets de mer (overwash regime, Figure 46)

Lorsque le niveau maximal du jet de rive dépasse le sommet de la dune, il s'agit du régime de débordement par paquets de mer. Dans ces conditions, des volumes d'eau peuvent se propager à terre à plus de 2m/s avant de ralentir progressivement. Ces phénomènes provoquent une forte érosion de la dune et des dépôts à terre, en plus des processus du régime de collision. Sallenger (2000) fait remarquer que ces événements sont peu fréquents sur les dunes hautes et bien formées (Duck, NC) alors qu'ils sont beaucoup plus fréquents sur le cordon peu élevé des Îles Barrières en Louisiane.

- Le régime d'inondation (inondation regime, Figure 46)

Le régime d'inondation apparaît lorsque le niveau minimum de la nappe de retrait atteint celui du sommet de la dune. Ce seuil signifie que l'ensemble de la dune est continuellement sous l'eau. Elle est alors soumise au processus du déferlement des vagues, mais les auteurs précisent que les observations de ces événements sont rares et les conséquences mal comprises.

L'étude de Sallenger (2000) permet d'appréhender simplement le lien fort entre le niveau d'eau sur la plage et la dune, les processus hydrodynamiques et le potentiel érosif d'une tempête.

Un autre indicateur a été mis au point aux États-Unis pour qualifier l'intensité des événements tempétueux en fonction de la surcote de tempête. Il montre de bonnes corrélations avec les observations de recul et de dommages sur les dunes et le trait de côte (Figure 47). Cet indicateur, le SEPI (*Storm Erosion Potential Index*) prend en compte la durée et l'intensité de la surcote pour les tempêtes touchant la côte est-américaine (Zhang *et al.*, 2001). Le calcul du SEPI nécessite de connaître les niveaux d'eau et la surcote de tempête toutes les heures durant l'évènement extrême.

$$SEPI = \sum_{t=0}^{tp} S_{2SD}(t)H_{MHHW}(t)\Delta t. \quad (\text{Équation 1})$$

Ce paramètre correspond à la somme horaire du produit de la surcote de tempête au-dessus de 2 fois l'écart-type du niveau d'eau pendant la tempête (S_{2sd}) et de la surcote au-dessus du niveau moyen des plus hautes marées diurnes, calculé aux USA par la NOAA sur un cycle standard de 19 ans (H_{MHHW}). Δt correspond à l'intervalle de temps (1h), et « tp » à la durée de la tempête.

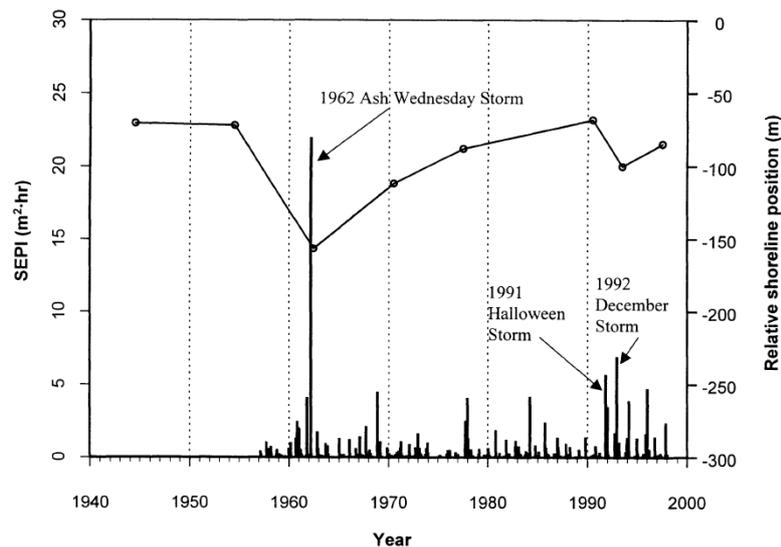


Figure 47 : Relation entre l'indicateur de potentiel d'érosion des tempêtes (SEPI) et le recul du trait de côte. L'histogramme représente l'indicateur SEPI à Lewes (Delaware, USA) depuis 1957 jusqu'à 1997. La ligne montre la position du trait de côte à Cottonpatch Hill, Delaware, par rapport à la position en 1845 (Zhang *et al.* 2001).

3.2.3. Action des vagues en régime de collision

Les processus qui agissent sur la dune et provoquent son érosion sous l'effet d'un régime de collision des vagues font l'objet de recherches récentes, souvent axées sur la modélisation numérique et les observations sur des modèles physiques. La thèse de Gervais (2012) a

permis de réaliser des observations sur l'évolution de la plage de Sète (Hérault) pendant 2 saisons hivernales. La figure suivante illustre l'action des vagues et de la surcote qui ont affecté le pied de la dune (matérialisé par la première rangée de ganivelles) lors de la tempête de janvier 2010 (Figure 48). Elle montre l'arrivée du jet de rive sur le front dunaire (swash) et l'état de la dune après le reflux de la nappe de retrait (back-swash).



Figure 48 : Action des vagues de tempête et du jet de rive sur la plage et le pied de dune du Lido de Sète (Gervais, 2012).

Phénomènes complexes, turbulences et ondes basses fréquences

En 2009, Van Rijn décrit les phénomènes liés à l'arrivée des vagues de tempête sur la plage dans le but de modéliser leurs effets érosifs sur la dune. En régime de collision, les vagues déferlent sur la plage et de larges volumes d'eau montent sur l'avant dune. Le sable mis en mouvement est transporté par le jet de rive et la nappe de retrait, provoquant une érosion du haut de plage et le minage du pied de la dune. Cet affouillement du pied de dune peut provoquer l'effondrement du front dunaire, lorsque l'angle de stabilité des sédiments est dépassé. Les sédiments effondrés sont alors attaqués par les vagues déferlantes et les courants induits qui peuvent transporter le sable vers le large.

Sur la base d'observations réalisées lors d'expériences de modélisation physique en canal à houle, les chercheurs hollandais de Deltares et de l'université d'Utrecht (Van Rijn, 2009) ont montré la prédominance de 4 processus agissant lors d'évènement d'érosion dunaire en condition de tempête.

- la génération d'une importante force d'impact des vagues, directement sur le front de dunaire, qui provoque l'érosion des sédiments ;
- la production d'une forte turbulence liée à l'arrivée des vagues déferlantes, à leur réflexion sur le front dunaire et aux interactions pouvant provoquer des phénomènes de mise en suspension puissants (Figure 49) ;
- la génération d'ondes basse fréquence dans la zone de surf, en relation avec la variation spatio-temporelle du point de déferlement ;
- le glissement en masse du front dunaire lorsque la pente devient trop abrupte, créant des accumulations au pied de dune.

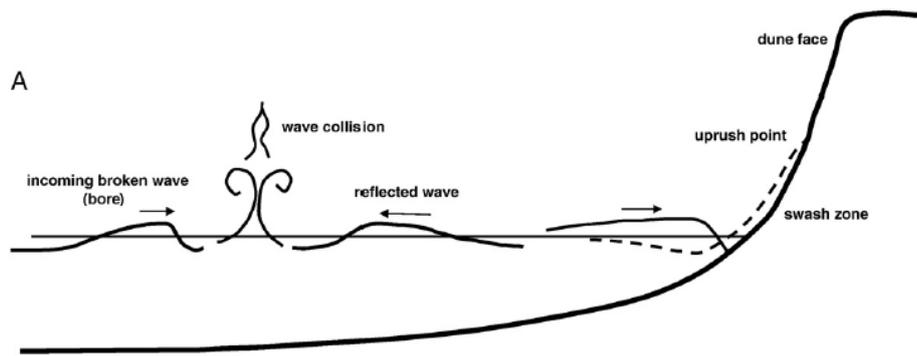


Figure 49 : Processus de transformation des vagues en zone de déferlement, aux abords du front dunaire (Van Rijn, 2009).

Impact des vagues et effondrement de la falaise dunaire

Les descriptions des phénomènes hydro-sédimentaires proposées par Nishi et Kraus (1996) ou Erikson *et al.*, (2007) sont plus simplifiées que dans les travaux de Van Rijn (2009). Pour ces auteurs, l'érosion de la dune est liée à la force de chaque vague impactant la dune au cours de la tempête, selon les hypothèses proposées par Fisher et Overton (1984). Mais leur travail s'applique surtout à mieux décrire les phénomènes de glissements et le recul des falaises dunaires. Leur approche se base sur des observations d'une dune en érosion formant un escarpement, dans un canal à houle. Dans ce cas précis de recul, les auteurs font une analogie avec les falaises côtières rocheuses et notent une évolution de la dune en 2 étapes (Figure 50) :

- dans un premier temps, l'érosion des vagues supprime le matériel en pied de dune et provoque une encoche à la base de l'escarpement dunaire ;
- dans un second temps, la zone fragilisée s'effondre en masse et provoque la régression de la crête de dune. L'effondrement serait provoqué soit par une rupture de la dune au droit de l'encoche, soit le long de zones de faiblesses en faisceau.

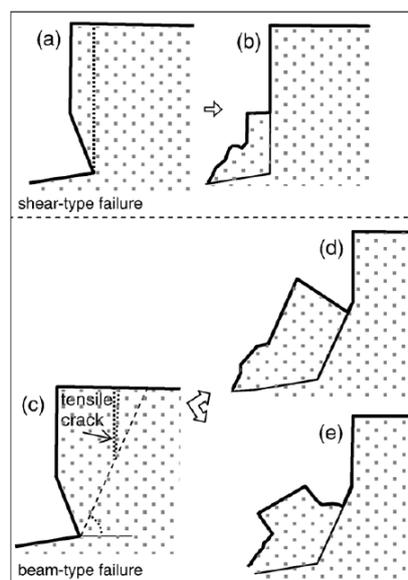


Figure 50 : Schéma conceptuel des types de glissement affectant le front de dune dans les modèles d'Erikson *et al.*, (2007).

Glissement en masse et infiltration d'eau dans la dune

Toujours à la suite d'une expérience en canal à houle, Palmsten et Holman (2011 et 2012) observent que des glissements en masse interviennent assez régulièrement, mais seulement après que la dune ait été infiltrée par l'eau des vagues. Il apparaît aussi que le matériel sableux mobilisé par le glissement est uniquement constitué de sédiment humide. La Figure 51 montre d'ailleurs un glissement en masse de sable humide, qui laisse apparaître une portion sèche de la dune en modèle réduit.



Figure 51 : Image d'un secteur érodé d'une dune lors d'une expérience en canal à houle (Palmsten et Holman, 2011).

À partir de ce constat, les auteurs font l'hypothèse que c'est l'infiltration de l'eau des vagues et du jet de rive dans les sédiments qui est le moteur principal de l'érosion des dunes. Ils estiment que le volume de sédiment érodé est une fonction de la saturation des sables en eau.

3.3. MODIFICATIONS DE LA MORPHOLOGIE LORS DES TEMPÊTES

Au cours des tempêtes, les différents phénomènes météo-marins ont la capacité à éroder et à transporter les sables constituant les dunes. Ces processus peuvent être difficiles à observer et à quantifier durant les épisodes énergétiques, mais ils se matérialisent concrètement après la tempête par des évolutions morphologiques flagrantes comme la modification des structures sédimentaires et la création de formes géomorphologiques caractéristiques.

3.3.1. Effet du vent

Comme indiqué dans le chapitre 3.1.4, l'impact instantané et spécifique du vent lors d'une tempête extrême n'est pas simple à estimer. Mais à plus long terme, l'action éolienne érosive crée des structures très caractéristiques des milieux dunaires nommées « sifflevent ». Hesp (2002) a réalisé une synthèse des connaissances sur ces structures. Les formes peuvent être variables, mais 2 grandes catégories sont distinguées (Figure 52) : les sifflevents allongés et les formes arrondies, nommées « caoudeyres » (terme utilisé pour les dunes de la côte aquitaine).

Ces structures d'érosions éoliennes sont formées en amont d'un secteur de déflation, lieu d'érosion et de transport éolien soutenu. Il se termine par un lobe de dépôt nommé « pourrière » qui recueille le sable transporté au cœur du sifflement. De part et d'autre, le creusement du sifflement dans la dune crée des surfaces abruptes qui peuvent s'effondrer et nourrir la zone de déflation. Selon Hesp (2002), les sifflements allongés sont potentiellement plus profonds et plus érodés que les formes arrondies.

Une étude de 40 sifflements situés sur la côte ouest néozélandaise indique des longueurs comprises entre 10 et 350 m, une largeur moyenne comprise entre 10 et 30 m, et une profondeur généralement inférieure à 8 m.

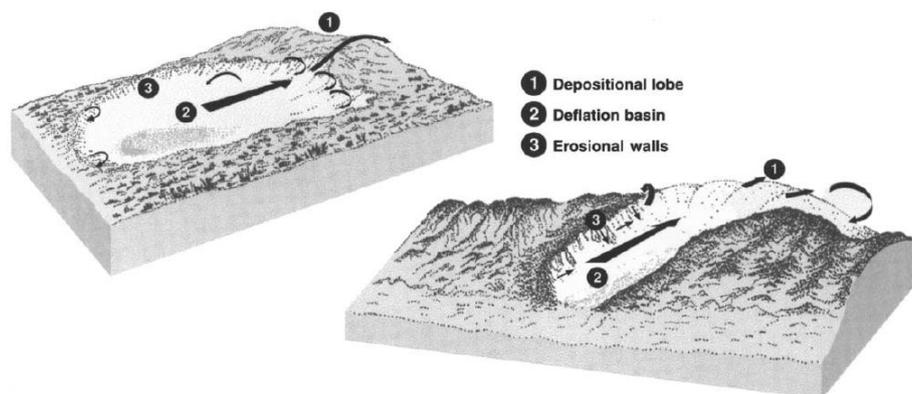


Figure 52 : Diagrammes schématiques d'un caoudeyre (à gauche) et d'un sifflement allongé (à droite) Source : Hesp (2002).

Ces structures sont communes sur les plages et les dunes subissant régulièrement des phases d'érosion marine, mais également dans des secteurs stables présentant une forte dynamique des vagues et du vent. Différents phénomènes peuvent donner naissance aux sifflements : érosion par les vagues du front dunaire, forte accélération du vent au sommet de la dune (lors d'une tempête), changement climatique influençant la végétation, influence de pluies violentes ou de l'activité humaine.

Dans sa synthèse, Hesp (2002) décrit un phénomène de creusement d'un sifflement pendant et après une tempête. Ainsi, après l'attaque de la dune par des vagues de tempête, les escarpements formés peuvent apparaître irréguliers. L'accélération du vent au niveau des loupes d'érosion les plus importantes de la falaise dunaire est un élément de création de sifflement et de caoudeyre. Le développement de l'érosion éolienne prend ensuite plusieurs années, en fonction des conditions météorologiques. Puis, réciproquement, la présence d'un sifflement peut intensifier l'action destructrice des vagues en favorisant le débordement par paquet de mer et la création de brèches.

3.3.2. Effet des vagues

Falaise dunaire

Les différents escarpements présents sur la plage et les dunes sont les marqueurs géomorphologiques d'évènements érosifs. Pour les tempêtes ayant un faible impact, ces escarpements peuvent affecter uniquement le haut de plage et notamment la berme, barre sableuse construite par les vagues de beau temps. Ce type d'érosion intervient dans le cadre de l'évolution saisonnière normale d'une plage.

Dans le cas de l'impact modéré d'une tempête, la dune peut être touchée. Dans un secteur stable présentant une dune embryonnaire ou une petite avant-dune en pente douce, l'escarpement sera de petite taille, inférieur à 1m, et sera qualifié de micro-falaise.

Si la taille de l'escarpement est supérieure à 1 m, le terme de falaise dunaire est employé. La présence d'une falaise témoigne d'un fort impact morphologique de l'évènement tempétueux. Dans un secteur littoral habituellement stable qui présente une banquette sableuse d'avant-dune, la création d'une falaise implique l'érosion complète de la banquette et une forte tempête. Dans une zone en érosion récurrente, où le corps de la dune a déjà été attaqué récemment, la falaise dunaire est déjà vive ou apparaît facilement réactivée par des tempêtes modestes. La Figure 53 illustre trois cas de falaises dunaires subverticales observées juste après un évènement tempétueux. La photo prise en octobre 2003 à Barcarès montre une petite dune en phase d'érosion qui présente une microfalaise.

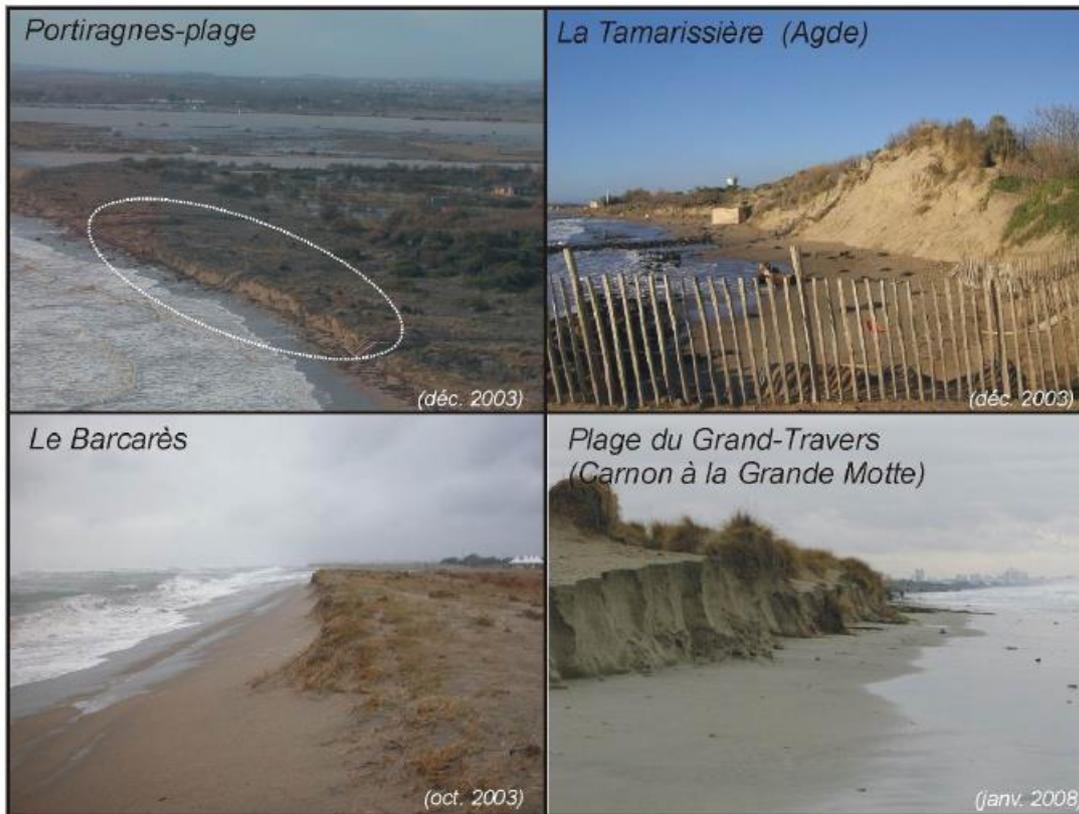


Figure 53 : Érosion des systèmes dunaire par les tempêtes et falaises et micro-falaises dunaires.
Source : DREAL-LR dans Gervais 2012.

La Figure 54 montre une falaise dunaire plurimétrique formée par la tempête Xynthia en 2010. La falaise n'est pas subverticale, car des effondrements sont fréquents après la tempête et tendent à régulariser naturellement la morphologie.



Figure 54 : Recul important de la dune qui forme une falaise après le passage de la tempête Xynthia à Saint-Jean-de-Monts, BRGM- RP59385-FR, Garcin et al., (2011).

Dépôt sableux

Paradoxalement, les tempêtes n'ont pas uniquement des effets érosifs. Les fortes vagues et les surcotes de tempête peuvent favoriser les dépôts de sable sur le haut de plage et la dune. En effet, les vagues franchissantes et le jet de rive ont la capacité à charrier de grandes quantités de sédiments de plage. Ceux-ci peuvent être littéralement éjectés sur les zones dunaires ou les fronts de mer urbanisés (Figure 55). Dans les zones naturelles, ce sable peut venir s'accumuler au pied de la dune. Dans les cas les plus extrêmes, on peut assister à un franchissement de la dune et à un dépôt de nappes sableuses dans le paysage dunaire végétalisé (voir également la partie suivante, § 3.3.3, sur l'effet des submersions).



Figure 55 : Dépôts de sable de plage dans les zones dunaires. Photo DREAL-LR dans Gervais, (2012).

Dans sa thèse, Gervais (2012) a montré que certaines conditions de tempêtes permettaient le dépôt d'importants volumes de sable sur le haut de plage et le pied de dune à Sète. Les observations ont été réalisées dans le cadre du suivi des aménagements de cette plage. La dune, artificielle et de dimension modeste, est équipée de ganivelles (clôtures en bois) qui

permettent de protéger le front dunaire et de piéger le sable transporté par le vent ou le jet de rive (Figure 56).

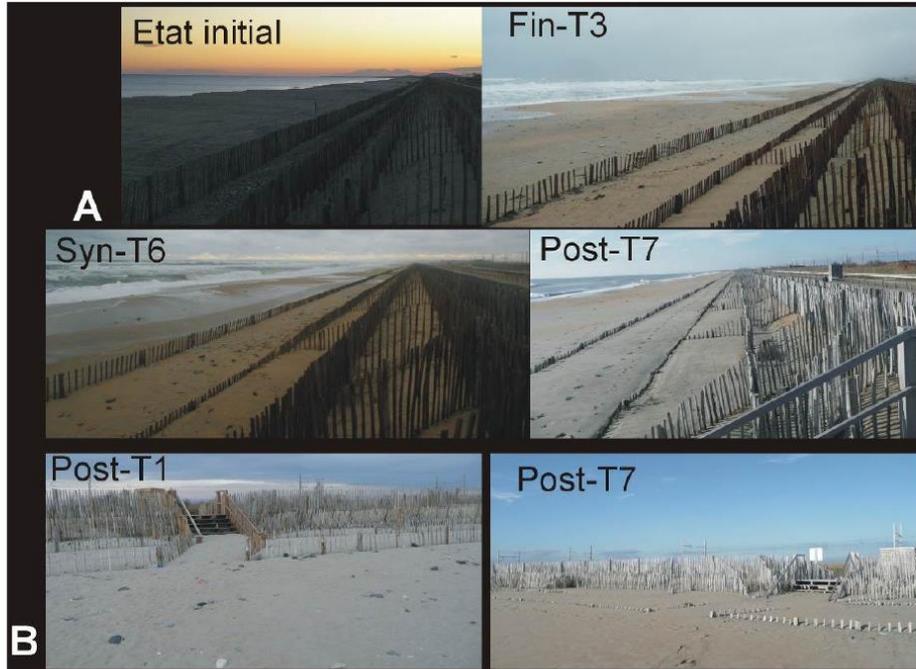


Figure 56 : Évolution de l'ensablement du pied de dune et du haut de plage du Lido de Sète après ou pendant des événements de tempête selon 2 points de vue (A et B). Gervais (2012).

La Figure 57 synthétise les observations et les constats réalisés sur la plage de Sète entre 2008 et 2010. Pour des tempêtes peu importantes, le haut de plage n'est pas affecté significativement. Pour des vagues comprises entre 3 et 4m de hauteurs significatives et un jet de rive qui atteint 2 m d'altitude, des dépôts surviennent en haut de plage, sur la berme voire en pied de dune. En revanche, pour des tempêtes plus fortes et une submersion plus importante par les paquets de mer, l'érosion devient prépondérante.

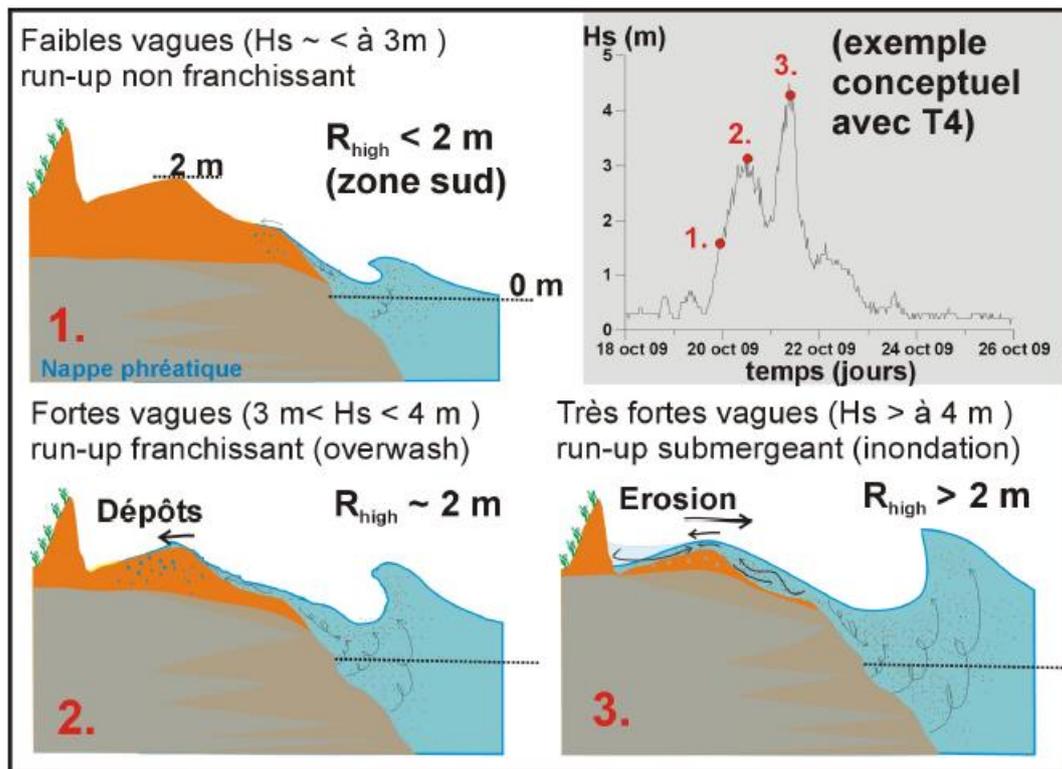


Figure 57 : Schéma conceptuel du fonctionnement des dépôts et érosion sur le haut de plage et le pied de dune (Lido de Sète) en fonction de l'élévation du jet de rive, Gervais (2012).

3.3.3. Effet de la submersion des dunes

Modification du profil de dune

La submersion des dunes par des paquets de mer ou par une inondation provoque des évolutions du profil topographique. Sur la base d'une étude portant sur plus de 50 jeux de données situés essentiellement sur la côte atlantique nord-américaine et le golfe du Mexique, Donnelly (2007) a distingué 7 types de réponses morphologiques sur des profils perpendiculaires (Figure 58). Les quatre premiers types concernent spécifiquement les dunes, les 3 derniers concernent les environnements « d'île-barrière », peu végétalisée, entourés d'eau, formés de cordon, lido ou flèche sableuse dont l'altitude maximale est faible.

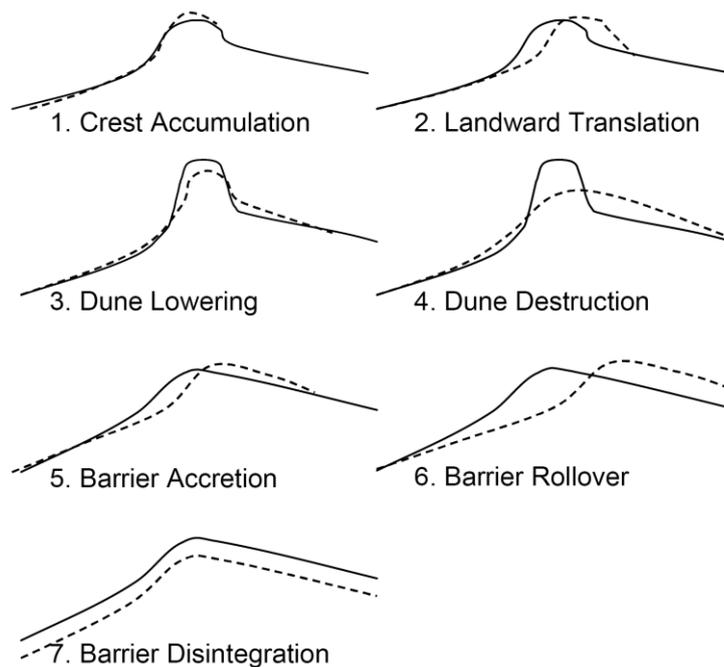


Figure 58 : Réponse morphologique des profils de dune ou de cordon sableux lors de phénomène de submersion. Les traits pointillés représentent les profils topographiques perpendiculaires à la côte après l'évènement de submersion. Donnelly (2007).

1) Accrétion de la crête :

cet apport sédimentaire sur la crête de la dune correspond au phénomène de dépôts sableux décrit précédemment dans le paragraphe consacré à l'effet morphologique des vagues de tempête sur la dune. Le jet de rive débordant a la capacité de transporter de grandes quantités de sable érodé de la plage. En arrivant au sommet de la dune, le ralentissement est maximal. La vague perd sa capacité de transport et dépose les sables avant de s'infiltrer dans la dune ou de redescendre le front dunaire dans la nappe de retrait.

2) Translation vers le continent :

les mécanismes impliquant cette réponse morphologique sont mal connus. Une hypothèse est avancée par Donnelly (2007) qui décrit 2 phases d'évolution. La première phase érode et abaisse la hauteur de la dune, tandis que la seconde dépose du sable sur la face interne de la dune.

3) Abaissement de la dune :

cette évolution correspond à un phénomène d'érosion de la dune. Le sable érodé peut être transporté vers le large et à terre.

4) Destruction de la dune :

il s'agit de la phase ultime d'érosion de la dune.

5) 6) 7) Évolutions du cordon sableux :

ces classes d'évolutions morphologiques ont été regroupées par Donnelly (2007) qui ne disposait pas d'un jeu de données suffisant pour décrire l'accrétion, l'érosion ou la translation (rollover) de cordon sableux bas et peu végétalisés après une tempête.

Dépôts de submersion et brèches

La vision en profil perpendiculaire proposée par Donnelly (2007) nécessite d'être complétée pour décrire précisément les modifications morphologiques engendrées par les épisodes de submersion des dunes. Donnelly *et al.*, (2006) présentent les trois principales structures morpho-sédimentaires rencontrées après des ouragans ayant affectés les îles-barrières de la côte est-américaine et du Golfe du Mexique (Figure 59).

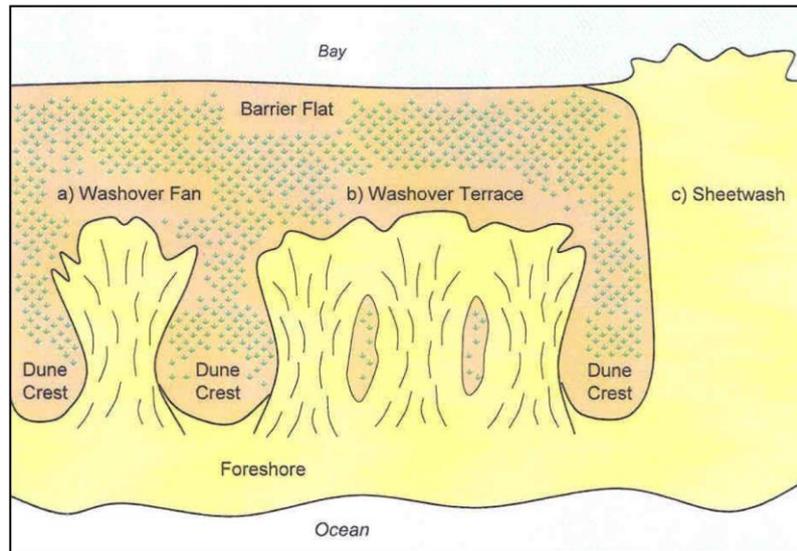


Figure 59 : Schéma des structures morpho-sédimentaires résultant d'épisodes de submersion des dunes. a) Lobes b) Terrasse c) Épandage. Donnelly *et al.*, (2006).

Les lobes sableux de débordement (washover fan) se développent à partir des zones de faiblesse de la dune, correspondant à des secteurs de largeur ou d'altitude plus faible qu'aux alentours. Dans ces secteurs bas, la mer peut s'engouffrer jusqu'à la crête dunaire. Au-delà de l'étroit passage de la crête, les paquets de mer se propagent et s'étalent en perdant progressivement leur énergie et en déposant le sable sous forme d'un lobe sédimentaire.

Si les débordements par paquets de mer sont nombreux au-dessus de la dune, ou que la surcote de tempête atteint la crête de dune, les lobes d'overwash deviennent coalescents et forment une terrasse sableuse (Figure 59).

En cas de forte inondation de la dune, l'érosion de la plage et de la dune crée de vastes épandages sableux (Figure 59).

En fonction de l'énergie des vagues, de l'importance de la surcote et de la morphologie préalable de la dune, les dépôts sableux peuvent s'étendre uniquement jusqu'à la crête dunaire, qui s'ensable alors sous l'effet de la submersion. Mais la structure « classique » d'un lobe de débordement (Figure 60) est marquée par une zone de brèche érodée à travers la dune (Figure 61) qui débouche sur un secteur de dépôt sédimentaire à l'arrière de la dune (Figure 62).

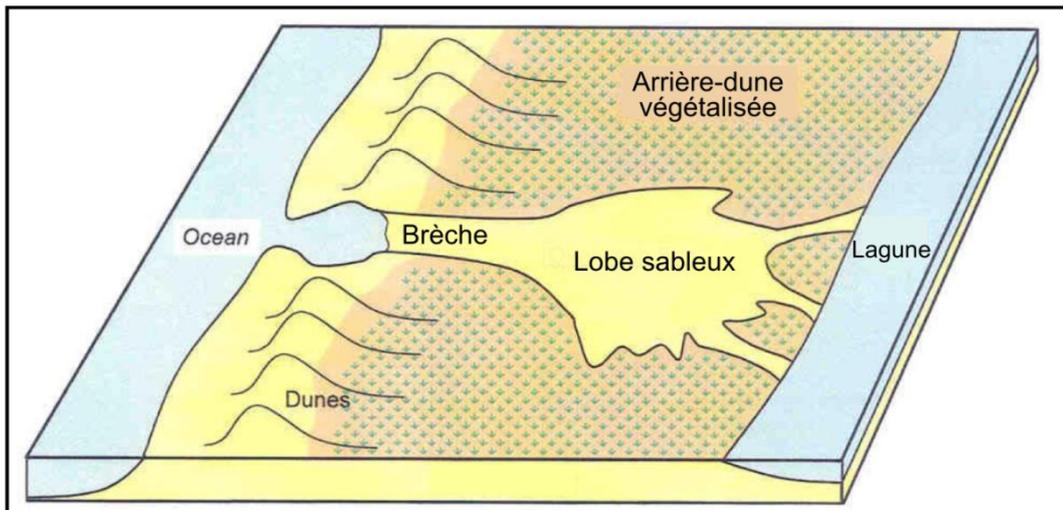


Figure 60 : Schéma d'un lobe sableux de débordement, d'après Donnely et al., (2006).



Figure 61 : Brèche de la Belle Henriette située à La Faute-sur-Mer après la tempête Xynthia, BRGM-RP58261-FR, Pedreros et al., (2010).



Figure 62 : Overwash et ensablement de l'arrière-dune sur le Lido de Maguelone (source BRGM), tempête du 6 mars 2013.

4. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES MÉTHODES POUR ESTIMER LE RECU MAXIMAL D'UNE DUNE (LMAX)

Pour évaluer le recul maximal d'une dune, l'observation et la mesure de l'érosion provoquée par un épisode de tempête sont des éléments de connaissance fondamentaux. Mais lorsque les données d'observation de recul dunaire n'existent pas, ne sont pas exploitables ou ne sont pas significatives, il peut être nécessaire d'utiliser des méthodes d'estimation. L'estimation d'un processus d'érosion nécessite une bonne compréhension de l'environnement littoral étudié et des phénomènes agissant sur la dune. L'objectif du précédent chapitre était de présenter les principaux processus responsables de l'érosion dunaire. Cette partie a pour but de décrire les méthodes et les modèles qui prennent en compte et qui représentent tout ou une partie de ces processus.

Les méthodes et les modèles recensés se répartissent en plusieurs catégories :

- les formules empiriques d'évolution du profil de plage et de la dune ;
- les modèles numériques reproduisant les processus perpendiculaires à la côte ;
- les modèles numériques reproduisant les processus perpendiculaires et parallèles à la côte.

4.1. FORMULES D'ÉVOLUTION DU PROFIL DE PLAGE ET DE LA DUNE

Ces méthodes permettent d'évaluer le recul du trait de côte et / ou l'évolution du profil de plage. Elles se basent principalement sur l'hypothèse que le profil de plage se met à l'équilibre avec les conditions rencontrées.

Le premier modèle employant cette hypothèse a été développé par Bruun (1954). Il estime le recul du littoral en fonction de la hausse du niveau de la mer (Figure 63). Il suppose que le recul horizontal est directement proportionnel à la hausse du niveau d'eau suivant la loi :

$$R = LS / (B + h) \quad (\text{Équation 2})$$

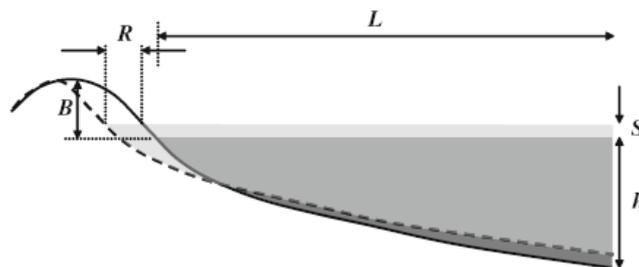


Figure 63 : Schéma illustrant l'estimation du recul de la dune suivant la loi de Bruun (1954).

Avec h , la profondeur maximale en-deçà de laquelle il y a échange de sédiment entre le domaine côtier et le large et R , le recul horizontal de la dune, L , la distance entre le pied de dune et la profondeur h , B , la hauteur de dune pour la zone érodée et S , la hausse du niveau d'eau.

Le modèle de Bruun a été mis au point pour étudier l'évolution à long terme du littoral sous l'effet de lentes variations eustatiques. Mais il a été adaptée par Edelman (1972) pour estimer l'érosion de la plage et de la dune au cours du temps sous l'effet d'une surcote de tempête.

Pour le cas spécifique de la côte hollandaise, Vellinga (1986) a amélioré et raffiné l'approche d'Edelman (1972) en ajustant la forme du profil final en fonction d'essais réalisés dans un canal à houle (Figure 64). Depuis, la méthode DUROS (DUne éROSion) a été développée, elle est basée sur la formule de Vellinga qui est régulièrement améliorée par les équipes néerlandaises. La méthode DUROS est utilisée pour estimer la vulnérabilité des dunes qui protègent certaines zones basses des Pays-Bas.

Plus récemment, Van Rijn (2009) a développé une règle simplifiée d'érosion des dunes hollandaises pour une tempête de référence (DUNERULE-model). Elle s'appuie également sur les données recueillies par Vellinga (1986), des tests en laboratoire et des expériences numériques menées avec le modèle CROSMOR2007. Cette formule repose sur l'intégration de paramètres relatifs à la morphologie de la dune et de la plage et à l'hydrodynamique (houle, surcote, pente de plage, angle d'incidence des vagues...).



Figure 64 : Série de vagues durant une expérience d'érosion de dune dans le canal à houle Deltaflume. Ces tests sur modèles réduits permettent de calibrer et d'améliorer les formules et les modèles. Source : Deltares.

L'approche hollandaise initiée par Vellinga (1986) a été reprise et simplifiée par Hallermeier et Rhodes (1988) pour l'appliquer sur la côte américaine sous la forme de la règle des « 540 ft² » de l'agence américaine FEMA (Judge *et al.*, 2003). Cette règle relie un événement de tempête touchant la côte américaine à un volume fixe érodé sur la dune, en fonction de la période de retour de la tempête (FEMA, 1995).

À l'opposé de la démarche simplificatrice de la FEMA, Kriebel et Dean (1993) proposent un modèle plus détaillé et plus complet. Ainsi, Dean (1991) reprend le concept du profil d'équilibre des plages qui fait l'hypothèse que les profils de plage sont en équilibre avec les conditions hydrodynamiques, à condition que l'exposition à ces conditions soit suffisamment longue. À partir d'une grande variété de cas connus, il montre que la formulation de type $y = A \cdot x^{2/3}$, est assez bien adaptée pour représenter une forme générale parabolique pour les profils de plage (Figure 65). Dans cette fonction, « A » est le coefficient qui prend en compte les conditions environnementales du littoral.

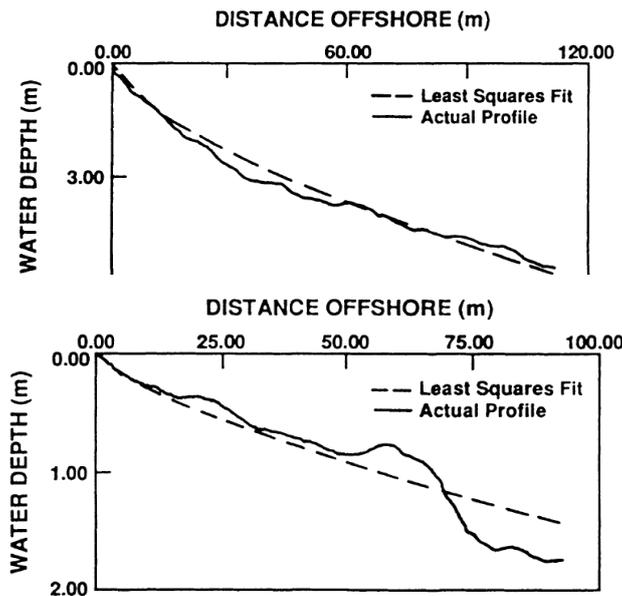


Figure 65 : Comparaison de profils de plage (traits pleins) avec des profils d'équilibre (pointillés) établis par la formule de Dean (1991).

Sur cette base, Kriebel et Dean (1993) décrivent un modèle qui estime la modification du profil de plage en fonction de la morphologie initiale, de la surcote de tempête, de la hauteur des vagues et de la granulométrie des sédiments. Ce modèle théorique permet aussi d'intégrer dans le temps l'évolution simplifiée des conditions hydrodynamiques d'une tempête et un temps de réponse du profil de plage aux conditions rencontrées. La Figure 66 représente l'effet du temps de réponse du profil par rapport à une réponse « immédiate ». Pour une tempête longue (Figure 66 a), le profil évolue avec un temps de décalage sur l'ordonnée $\sigma(t)$, mais atteint presque l'érosion maximale prévisible (R_{∞}). Pour une tempête courte (Figure 66 b), l'érosion effective $R(t)$ est bien inférieure à l'érosion maximale prévisible (R_{∞}). En plus, la méthode de Kriebel et Dean (1993) propose plusieurs types de profil initiaux pour estimer le recul dunaire en fonction de différentes configurations morphologiques de la plage, incluant notamment la présence d'une berme, barre sableuse située en haut de plage, avant la dune.

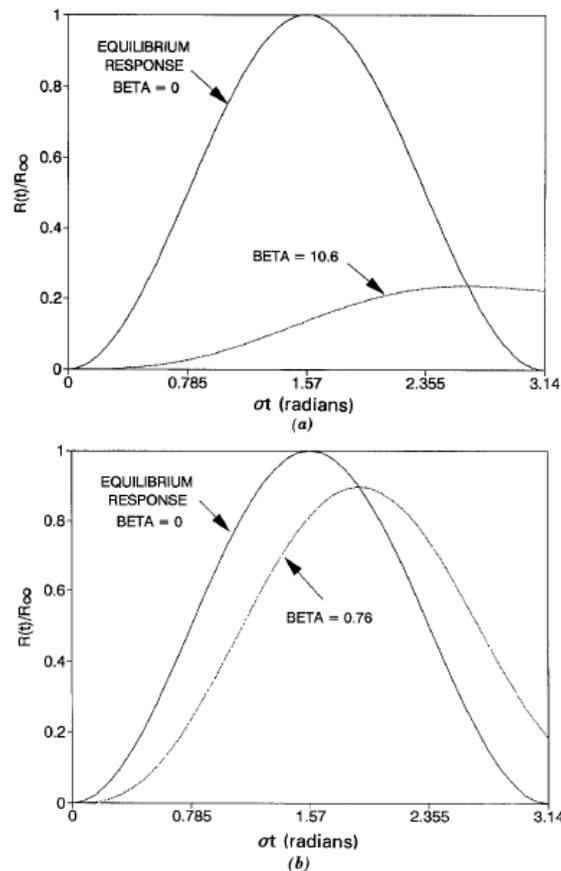


Figure 66 : Exemple de réponse du profil de plage (ordonnée) en fonction de l'évolution d'une surcote de tempête théorique (abscisse). Pour Beta = 0, le profil répond immédiatement aux conditions.
 (a) Tempête de courte durée très intense (b) Temps plus longue mais moins intense.
 Source : Kriebel et Dean (1993).

4.2. LES MODÈLES NUMÉRIQUES REPRODUISANT LES PROCESSUS PERPENDICULAIRES À LA COTE

Avec une approche simplifiée des phénomènes d'érosion se produisant lors de tempêtes, il est possible d'estimer l'évolution du profil de plage et le recul du pied de dune grâce à des formules simples. La résolution de ces formules ne pose pas de difficulté technique particulière, une fois que les termes et les paramètres de la formule sont renseignés. Mais la prise en compte plus précise de certains phénomènes hydro-sédimentaires complexes de la zone littorale ne peut pas être traité par des formules trop simplificatrices et nécessite l'emploi de modèles numériques plus puissants.

4.2.1. SBEACH

Le modèle SBEACH (Larson et Kraus, 1989) est un des premiers modèles opérationnels à mieux prendre en compte les processus physiques de déferlement et de transport sédimentaire perpendiculaire à la côte. Mais, comme les formules présentées précédemment, il se base sur l'hypothèse simplificatrice du « profil d'équilibre » de la plage pour déterminer les variations morphologiques. Ce code de calcul est couramment employé en ingénierie côtière et a été récemment amélioré pour mieux estimer l'effet des débordements par paquets de mer sur le profil de plage et de dune (Figure 67, Larson *et al.*, 2004).

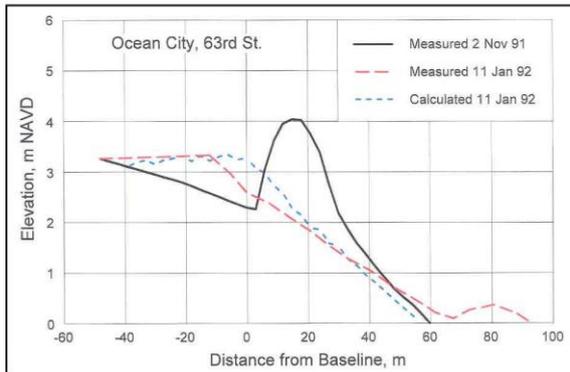
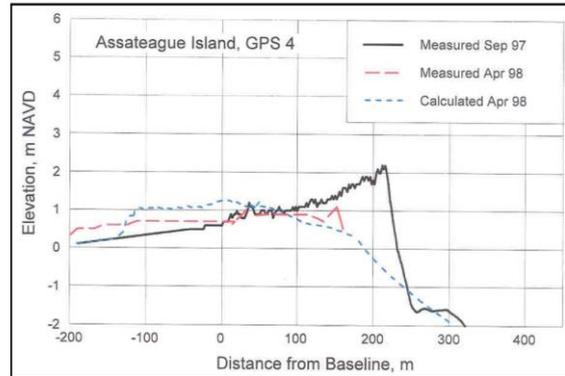
Figure 8. Calculation of dune erosion and overwash, 63rd Street.

Figure 12. Calculation of barrier island overwash, GPS 4.

Figure 67 : Comparaison entre observations d'érosions dunaires par débordement et les résultats du modèle SBeach amélioré pour deux cas de la côte Est américaine. Larson *et al.* (2004a).

4.2.2. Modèles d'impact des vagues

Les travaux de recherche théoriques ou basés sur des expériences en canal à houle qui ont été abordés dans la partie 3.2.3 « Action des vagues en régime de collision » montrent que les modèles basés sur l'étude de l'impact des vagues en haut de plage constituent une alternative pour prévoir l'érosion de la dune. Fisher et Overton (1984) et Nishi et Kraus (1996) ont eu l'idée d'estimer le recul de la dune à partir de l'érosion engendrée par l'impact de chaque déferlement de vague. L'érosion induite par la tempête est alors une fonction du nombre et de l'intensité de ces impacts. Fisher et Overton (1984) utilisent la hauteur de vagues, la profondeur, le niveau d'eau, la pente de la plage, la hauteur de la dune et sa position sur la plage, la taille de grain et la densité de la végétation pour estimer l'érosion de la dune. Nishi et Kraus (1996) définissent trois types d'érosion pour la dune suite à l'impact des vagues, suivant la pente de la dune, la composition de la dune et les conditions de vagues. Overton *et al.*, (1994) ont creusé l'idée de l'impact des vagues déferlantes sur la dune et la formalisent par « la force du jet de rive ». De plus ils montrent que la taille de grain et la densité de la dune sont des paramètres significatifs dans la relation qui lie la force du jet de rive et l'érosion de la dune. La limite de ce modèle réside dans la difficulté d'estimer la hauteur maximale du jet de rive.

Plus récemment, Larson *et al.*, (2004b) ont amélioré la formulation de Overton *et al.*, (1994) avec le développement d'un modèle analytique permettant de calculer le recul de la dune et le volume érodé au cours de fortes tempêtes. Dans le modèle, le poids des sédiments érodés est une fonction de la force d'impact des lames d'eau. Les éléments pris en compte dans la formule sont : le nombre de vagues, leur période, la vitesse et l'altitude maximale du jet de rive, la pente de la plage, l'altitude du pied de dune et de la crête. Le modèle a été testé avec une large gamme de données. Les résultats sont cohérents avec les données de laboratoire issues d'expérience en canal à houle. Mais ils sont moins pertinents lorsqu'on les compare avec des données de terrain (Figure 68). Ces travaux de recherche ne sont pas encore intégrés dans des modèles opérationnels.

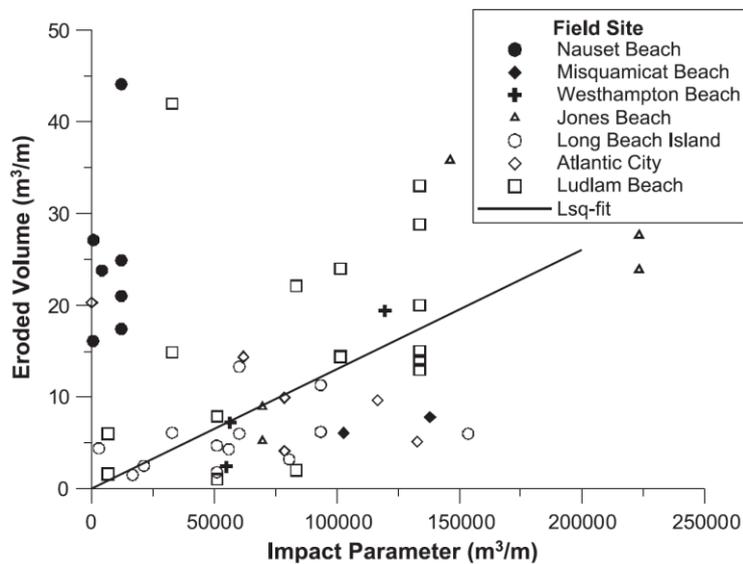


Figure 68 : Comparaison du volume érodé pendant une tempête et du paramètre analytique d'impact des vagues déterminé par Larson et al., (2004b). Les données de tempête proviennent de la base de Birkemeier et al., (1988).

4.2.3. Modèle de glissement en masse et infiltration d'eau dans la dune

Les expériences menées en laboratoire par Palmsten et Holman (2011, 2012) ont également été présentées dans la partie 3.2.3 « Action des vagues en régime de collision ». Ces travaux de recherche ont permis d'identifier des pistes pour modéliser les volumes sédimentaires érodés sur la dune pendant les tempêtes. Les processus pris en compte sont le jet de rive, l'infiltration de l'eau dans la dune et la balance des forces de stabilisation-déstabilisation des sédiments dunaires saturés par l'infiltration d'eau. Des hypothèses simplificatrices sont effectuées par les auteurs pour prendre en compte l'infiltration et le jet de rive. Les premiers résultats du modèle numérique montrent une bonne correspondance entre les observations de laboratoire et les résultats simulés. La Figure 69 compare l'érosion de la falaise dunaire, correspondant à la chute de volume sédimentaire saturé d'eau au cours d'une expérience de 24 h.

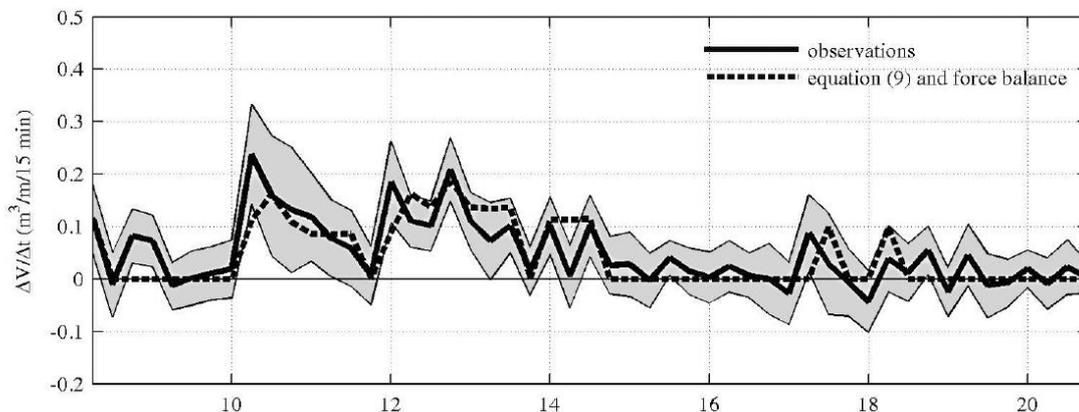


Figure 69 : Volume de sédiment saturé en eau estimé par le modèle (pointillés) comparé à l'érosion observée (trait plein). Source : Palmsten et Holman (2012).

4.2.4. Résolution des processus hydro-sédimentaires complexes

Steetzel (1993) a développé un modèle morphodynamique pour améliorer la reproduction des processus hydro-sédimentaire de la plage et les épisodes d'érosion de dune. Ce modèle appelé DUROSTA résout la propagation, le gonflement, la réfraction et le déferlement des vagues. En fonction de la transformation des vagues dans la zone littorale, il peut ensuite calculer le transport de sable local perpendiculairement au trait de côte et en déduire l'évolution du fond. Ce modèle néerlandais est distribué par Deltares sous le nom de UNIBEST-DE.

Dans une publication de 2009, Van Rijn présente les capacités du modèle CROSMOR2007 dans ce type de situation. Le modèle est basé sur une simulation précise des phénomènes de vague, par une approche de type « vague à vague » perpendiculairement au trait de côte. Les méthodes utilisées pour distinguer la zone de jet de rive de la zone de déferlement et pour prendre en compte les ondes infragravitaires sont présentées dans la publication. Le transport sédimentaire estimé dans le modèle CROSMOR2007 dépend des formules Transpor2004 de VanRijn. Le taux de transport sédimentaire est déterminé pour chaque vague, en fonction du charriage et des suspensions. Dans la zone la plus proche de l'érosion dunaire, un facteur de calibration additionnel est utilisé pour prendre en compte le fort accroissement local de la capacité de transport sédimentaire (facteur « sef ») observé lors des expériences de laboratoire. L'érosion dans la zone de swash dépend du jet de rive, de la formule de transport appliquée et du glissement des sédiments dunaire lorsque la pente devient trop forte. Des tests de sensibilité du modèle CROSMOR 2007 ont montré que les paramètres de réglage influençant le plus l'érosion sont :

- le paramètre d'amélioration du transport en suspension (« sef »), qui représente la turbulence additionnelle aux abords du pied de dune ;
- le paramètre de déferlement des vagues qui détermine la hauteur maximale des vagues.

Il faut noter que, dans ce modèle, l'ajout de la composante infra-gravitaire de l'énergie des vagues n'apparaît pas primordial dans l'érosion de la dune.

Au final, la comparaison du modèle avec les expériences en canal à houle donne des résultats satisfaisants, mais des effets d'échelle importants sont à prendre en considération pour comparer les résultats du canal avec la réalité d'une tempête frappant la côte, comme par exemple la tempête de 1953 ayant frappé les Pays-Bas. La Figure 70 présente les résultats des simulations du modèle CROSMOR2007 comparés aux observations effectuées en 1953 dans le sud-ouest de la Hollande. Ces observations ont montré une érosion de l'ordre de 60 à 150 m³/m, avec une moyenne de 90 m³/m. Ces volumes érodés par mètre linéaire de côte sont équivalents à un recul moyen de 10 m du pied de dune. Pour une granulométrie des sédiments comprise entre 0,2 et 0,25 mm, le modèle obtient des érosions comprises entre 100 et 120 m³/m, ce qui peut apparaître ponctuellement plus fort que les observations faites sur le terrain. Le recul maximal du pied de dune simulé est de l'ordre de 13 m pour des sédiments de 0,2 mm.

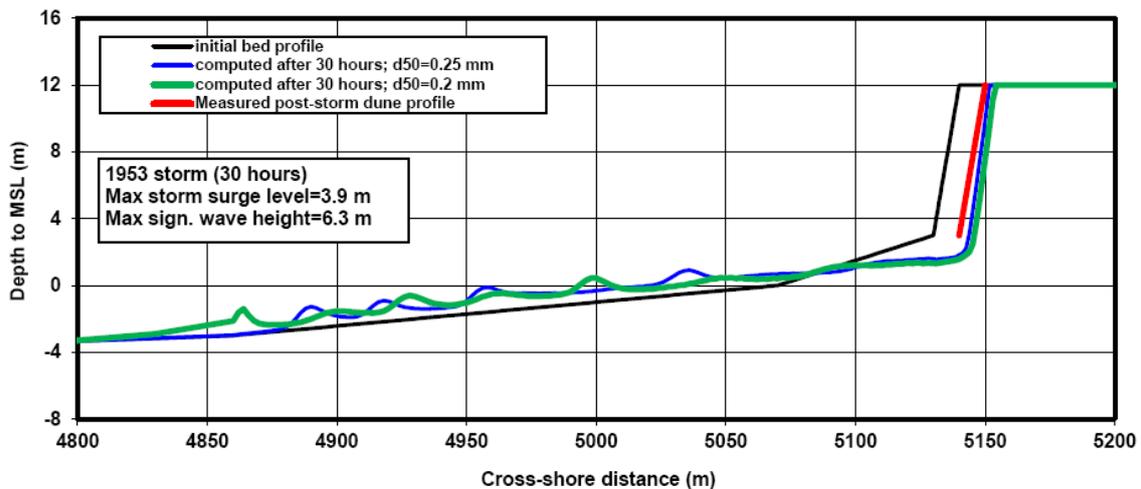


Figure 70 : Comparaison des profils plage-dune modélisés par Crossmor2007 et des observations pour le cas de l'évènement de référence hollandais de 1953 (Van Rijn, 2009).

4.3. LES MODÈLES NUMÉRIQUES REPRODUISANT LES PROCESSUS PERPENDICULAIRES ET PARALLÈLES À LA CÔTE.

4.3.1. Généralités

Le précédent paragraphe a permis de présenter des modèles qui reproduisent spécifiquement les phénomènes d'érosion de la plage et de la dune selon des processus perpendiculaires à la côte. La vision « *cross-shore* » est bien adaptée à l'étude de l'érosion dunaire, et la simplification relative des processus permet, en retour d'affiner l'effet des vagues sur le transport sédimentaire. Néanmoins, ils ne permettent pas de prendre en compte la diversité des processus qui interagissent dans le domaine littoral. Certains phénomènes d'érosion sont liés au transport de sédiments parallèlement au trait de côte. Ces érosions ne peuvent être reproduites précisément par les modèles « *cross-shore* ». Les modèles 2D (ou 3D) ont la capacité à reproduire les phénomènes hydro-sédimentaires perpendiculaires et parallèles à la côte. Leur emploi est très complexe et nécessite souvent des temps de calcul conséquents.

Ces modèles sont constitués de modules spécifiques (vagues / courant / sédiments) qui sont couplés pour simuler l'évolution morpho-sédimentaire d'une plage. Parmi ces outils, on retrouve des suites logicielles opérationnelles (et éventuellement commerciales) comme TELEMAC (EDF), DELFT (Deltares), MIKE (DHI) et des modèles en développement ou à vocation de recherche comme Morphodyn (Université Bordeaux 1), Mars-Swan et son module morphodynamique MARSOIN (BRGM, IFREMER). Ces modèles peuvent reproduire des surcotes de tempête et les effets du déferlement des vagues sur des bathymétries complexes. En revanche, les effets particuliers du jet de rive, de la collision des vagues avec la dune et du débordement par paquets de mer ne sont pas pris en compte dans ces modèles qui n'ont pas été développés spécifiquement pour simuler l'érosion dunaire.

4.3.2. XBEACH

Le modèle XBEACH (eXtreme Beach behavior) est actuellement le plus avancé pour résoudre des processus physiques dominant le comportement des systèmes plage/dune en période de tempête (Roelvink *et al.*, 2009). Ce modèle permet de simuler certains phénomènes côtiers sur des zones dont l'extension est de quelques centaines de mètres, avec une résolution de l'ordre du mètre. XBeach est un modèle ouvert et gratuit qui 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.

En mode 2DV (prise en compte de processus parallèles à la côte et des processus verticaux intégrés sur la verticale), il résout les équations *Shallow water*, l'équation d'action des vagues, une équation de transport de sédiment et une équation d'évolution du fond. Sa particularité réside dans l'amélioration de la modélisation du jet de rive qui prend en compte les effets des ondes infra-gravitaires. La circulation littorale dans la frange côtière est également calculée par le modèle ce qui lui permet d'évaluer le transport sédimentaire et les évolutions morphologiques : érosion, ensablement, submersion de dunes ou de récifs au cours d'événements météorologiques intenses. Les phénomènes pris en compte dans l'équation d'onde des vagues appelée aussi équation d'équilibre d'action des ondes courtes, sont la propagation des vagues, la réfraction bathymétrique, la réfraction due aux courants et le déferlement. 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 permet donc un travail spécifique de simulation de l'érosion de la dune en période de tempête. L'exemple suivant montre la simulation d'une ouverture de brèche dans une zone fragile de la dune, de l'agrandissement de la brèche et de l'inondation de la zone basse de l'arrière-dune (Figure 71). Bien que ce cas test reste simple, du fait de l'absence de vague, il permet d'illustrer la capacité du modèle à prendre en compte les surcotes et les zones de faiblesse des dunes pour créer des brèches. Cet exemple de simulation est en phase avec un cas réel mesuré dans le Zwin, en Belgique.

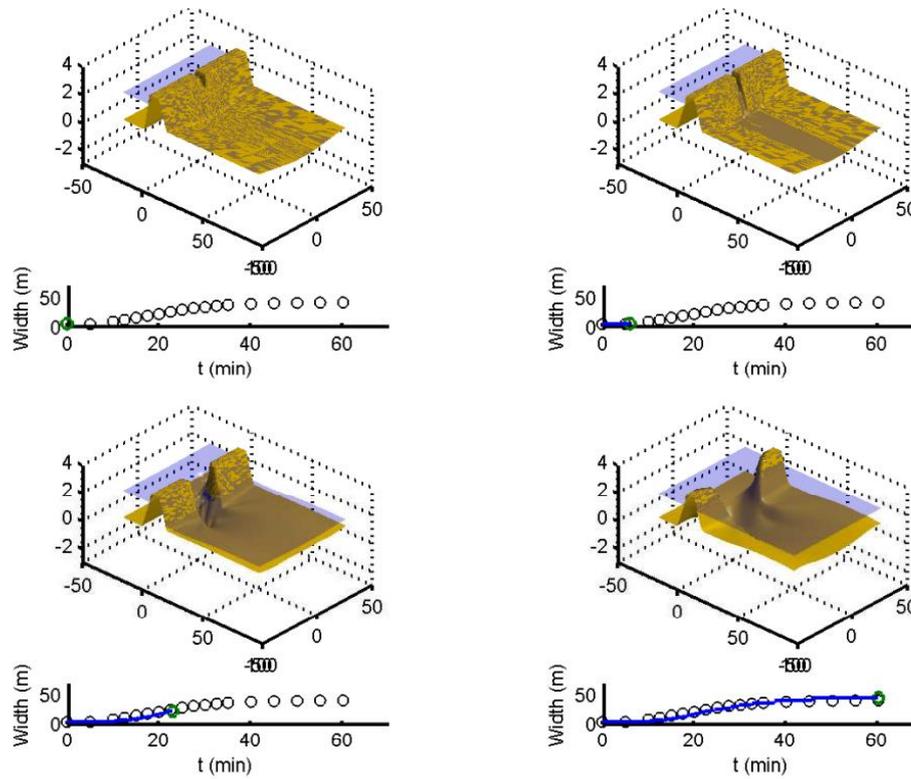


Figure 71 : Mise en œuvre du modèle Xbeach pour un cas théorique d'ouverture d'une brèche dans le cordon dunaire, puis d'une inondation de l'arrière dune. Source : Deltares.

5. DESCRIPTION DES FORMULES D'ÉVOLUTION DU PROFIL PLAGE-DUNE

Le précédent chapitre avait pour objectif d'établir un inventaire complet des méthodes pour estimer le recul maximal des dunes. Cette partie a pour but de décrire de façon approfondie les techniques utilisant des formules d'évolution du profil plage-dune.

5.1. MÉTHODE D'EDELMAN (1972)

Cette méthode s'inscrit dans le prolongement de la loi de Bruun (1964) qui établit un lien entre la montée du niveau et le recul du trait de côte. Edelman (1972) met en équation le recul du trait de côte (R) en fonction du temps, tel que :

$$\frac{dR}{dt} = \frac{W_*}{h_* + B(t)} \times \frac{dS}{dt} = \frac{W_*}{h_* + B_0 - S} \times \frac{dS}{dt} \quad (\text{Équation 3})$$

Cette formule exprime le recul d'un profil conservant la même forme de type $y = A \cdot x^{2/3}$ où W_* représente la largeur de plage dont la morphologie est évolutive, h_* la profondeur au-delà de laquelle la morphologie de la plage n'est plus évolutive, $B(t)$ correspond à l'évolution de la hauteur de la dune (ou de la berme) au-dessus du niveau moyen de la mer (B_0), au cours du temps et S , la surcote de tempête.

Rosati *et al.*, (2013) étendent cette formulation d'Edelman pour lui permettre de prendre en compte les phénomènes d'*overwash* et de transport éolien. Pour ce faire, ils ajoutent à W_* (longueur de la plage active), la surface de sédiments déposée vers le côté terre (V_D) divisée par l'augmentation du niveau marin (S) :

$$R = \left(W_* + \frac{V_D}{S} \right) \ln \frac{h_* + B_0}{h_* + B_0 - S} \quad \text{Équation 4}$$

Il faut noter que les auteurs ne discutent pas de l'utilisation de cette formule pour estimer l'impact d'une tempête individuelle. Ils la présentent plutôt comme une extension de la règle de Bruun, et donc utilisable pour une analyse de l'augmentation du niveau marin à long terme.

Pour l'exploitation de ces formules, la détermination de la profondeur et de la largeur du profil de plage actif est un élément primordial qui peut faire débat. En effet, en ingénierie côtière, la valeur « h_* » est couramment nommée « profondeur de fermeture ». S'il n'y a pas de mesures de profils topo-bathymétriques régulièrement réalisés sur la plage, il existe plusieurs formules pour calculer cette profondeur de fermeture. La plus communément utilisée est la formule de la profondeur de fermeture interne d'Hallermeier (1980). Cette formule estime en théorie la limite du profil de plage dont la morphologie évolue au cours d'une année. Elle dépend de la hauteur significative des plus hautes vagues annuelles sur une durée de 12h (H_{0S}), de leur période T et de g , l'accélération de la gravité, tel que :

$$h_* = 2.28 \times H_{S0} - 68.5 \times \frac{H_{S0}^2}{gT^2} \quad \text{Équation 5}$$

Cette formule est modifiée par Birkemeier (1985) tel que :

$$h_* = 1.75 \times H_{S0} - 57.9 \times \frac{H_{S0}^2}{gT^2} \quad \text{Équation 6}$$

Houston (1995) propose aussi une expression simplifiée de la façon suivante :

$$h_* = 8.9 \times \overline{H_S} \times MLW \quad \text{Équation 7}$$

Où $\overline{H_s}$ représente la moyenne annuelle de hauteur de vague significative et MLW, le niveau moyen des basses mers.

Le débat est repris par Dean (1991, voir § 5.4) qui assimile la profondeur limite de la zone active à la profondeur de déferlement des vagues :

$$h_* \text{ ou } h_b = 1.28 \times H_b \text{ (Équation 8) avec } H_b, \text{ la hauteur des vagues déferlantes.}$$

Concernant la largeur de la zone de déferlement (W_*) Kriebel et Dean (1993, voir § 5.5) ont établi une formulation la reliant à la profondeur de déferlement et le paramètre « A », fonction de la vitesse de chute des sédiments (w) :

$$W_* = \left(\frac{H_b}{0.78 \times A} \right)^{3/2} \text{ (Équation 9) et } A = 2.25 \left(\frac{w^2}{g} \right)^{1/3}$$

5.2. METHODE DUROS+ (2008)

La réglementation côtière hollandaise utilise la méthode DUROS (DUne éROsion). Il s'agit d'un modèle empirique cross-shore d'érosion de profils de plage et de dune ; il est donc adapté aux côtes linéaires et relativement homogènes. Ce modèle a été construit à partir des résultats d'expériences en laboratoire et d'observations collectées après la tempête de 1953, évènement exceptionnel ayant durement touché les Pays-Bas. Avec le temps, les formules de DUROS évoluent et sont améliorées. La méthode se base sur l'expression d'un profil de dune après tempête, à partir d'un profil initial et de conditions hydrodynamiques données. Le profil de dune post-tempête se décompose en trois parties (Figure 72) :

- 1- côté terre, une partie linéaire de pente 1 :1 représentant la dune érodée ;
- 2- pour la plage, un profil d'équilibre parabolique $y = f(x)$ dont la fonction « f » dépend de la version de DUROS choisie. Ce profil s'étend depuis le pied de dune jusqu'au point défini par les coordonnées (x_R, y_R) ;
- 3- au large, une partie linéaire de pente 1 :12.5.

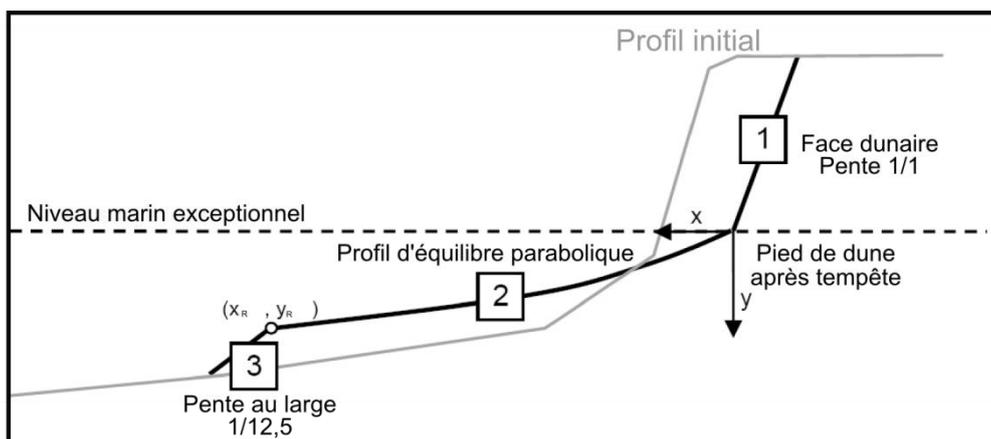


Figure 72 : Schéma du profil de plage post-tempête défini par la méthode DUROS, d'après Brandenburg (2010).

Différentes expressions pour $y = f(x)$ ont été utilisées dans la méthode DUROS au fil des ans :

1) Van de Graaff, 1977

$$y = 0.415(x + 4.5)^{0.5} - 0.88 \quad \text{(Équation 10)}$$

Où y est la profondeur (par rapport au niveau d'eau moyen) sous le niveau d'eau maximal au cours de la tempête et x , la distance à partir du pied de dune érodé (Figure 73). Ce profil s'applique depuis le pied de la dune érodée ($x = 0$ m, $z = 0$ m) jusqu'à une profondeur d'eau égale à $1.28H_{sbr}$, avec H_{sbr} la profondeur au niveau du point de déferlement. Le segment 3 de la Figure 72 n'était pas encore défini pour cette version préliminaire de la méthode DUROS.

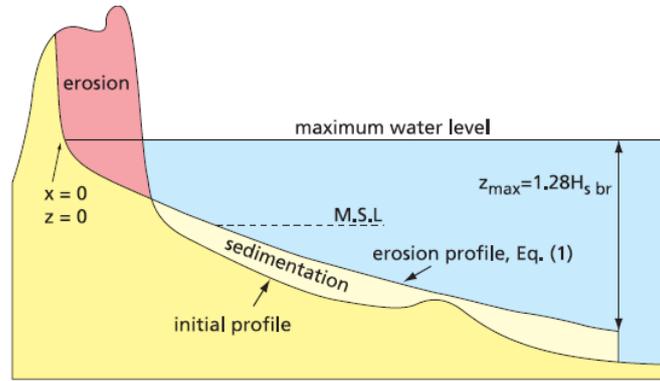


Figure 73 : Estimation du recul de la dune suivant le guide provisoire hollandais (Van de Graaf, 1977, d'après Ruessink et al., 2012).

2) DUROS, Vellinga, 1986

$$\left(\frac{7.6}{H_{0s}}\right)y = 0.47 \left[\left(\frac{7.6}{H_{0s}}\right)^{1.28} \left(\frac{w_s}{0.0268}\right)^{0.56} x + 18 \right]^{0.5} - 2 \quad (\text{Équation 11})$$

Avec H_{0s} , la hauteur significative de vagues et T_p la période pic de vagues au large (à - 20m de profondeur pour le cas hollandais). w_s représente la vitesse de chute du sédiment, elle est reliée à la taille de grain médian D_{50} par la relation suivante :

$$\log_{10} \left(\frac{1}{w_s}\right) = 0.476(\log_{10} D_{50})^2 + 2.18 \log_{10} D_{50} + 3.226 \quad (\text{Équation 12})$$

Il faut noter que, comme pour l'estimation de la profondeur de fermeture présentée précédemment, la détermination de la vitesse de chute des sédiments est un élément qui peut être soumis à discussion.

Les coordonnées (x_R, y_R) qui marquent la transition entre le segment 2 et le segment 3 de la Figure 72 sont définies telles que :

$$x_R = 250 \left(\frac{H_{0s}}{7.6}\right)^{1.28} \left(\frac{0.0268}{w_s}\right)^{0.56} \quad (\text{Équation 13})$$

$$y_R = \left[0.4714 \left\{ 250 \left(\frac{12}{T_p}\right)^{0.45} + 18 \right\}^{0.5} - 2 \right] \left(\frac{H_{0s}}{7.6}\right) \quad (\text{Équation 14})$$

3) DUROS+, Van Gent et al., 2008

$$\left(\frac{7.6}{H_{0s}}\right)y = 0.4714 \left[\left(\frac{7.6}{H_{0s}}\right)^{1.28} \left(\frac{12}{T_p}\right)^{0.45} \left(\frac{w_s}{0.0268}\right)^{0.56} x + 18 \right]^{0.5} - 2 \quad (\text{Équation 15})$$

La formule DUROS+ est la méthode actuellement en vigueur au Pays-Bas. Les coordonnées (x_r, y_r) sont les mêmes que pour la méthode DUROS. L'altitude du pied de dune érodé est défini par le niveau de surcote de tempête. Le pied de dune marque la transition entre le segment 2 et le segment 1 (Figure 74). La position longitudinale du pied de dune érodé est déterminée par itération, pour obtenir la conservation de la masse du sédiment dans le profil, entre l'érosion du haut de plage et de la dune et l'accrétion en bas de plage.

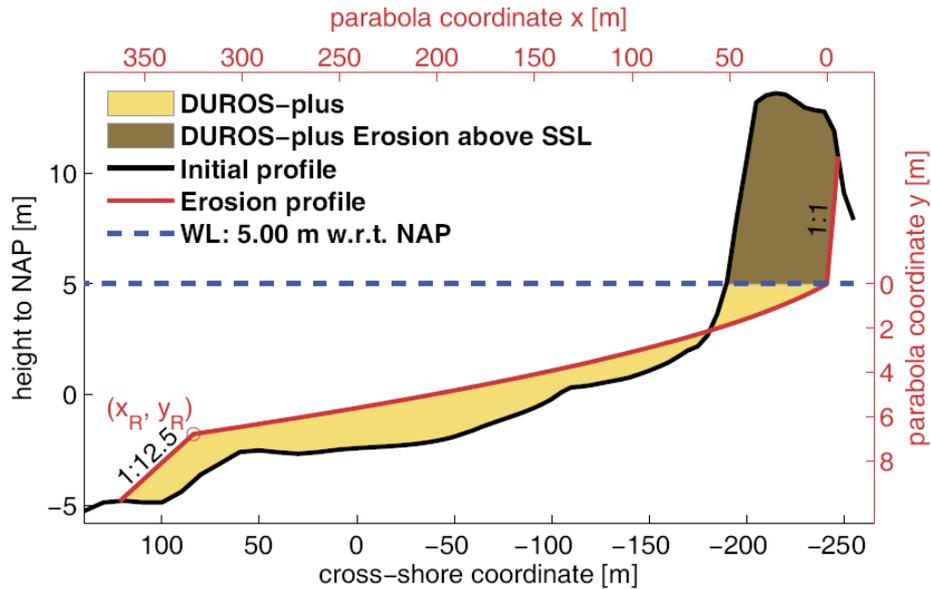


Figure 74 : Exemple de profil post-tempête (en rouge) obtenu avec la méthode DUROS+, l'altitude est exprimée par rapport au NAP, niveau moyen de référence au Pays-Bas, Den Heijer (2013).

4) DUROS++

$$\left(\frac{7.6}{H_{0s}}\right)y = 0.6 \left[\left(\frac{7.6}{H_{0s}}\right)^{1.28} \left(\frac{12}{T_p}\right)^{0.45} \left(\frac{w_s}{0.0268}\right)^{0.56} x + 50 \right]^{0.5} - 4.2 \quad (\text{Équation 16})$$

Les évolutions de la méthode DUROS++, proviennent de l'amélioration apportée au positionnement de l'abscisse (x_R) du point marquant la fin du profil parabolique au large. Ce point détermine la largeur de la zone de plage active. Dans sa nouvelle formulation, il tient compte non seulement de la hauteur de vagues, de la vitesse de chute du sédiment mais aussi de la profondeur d'eau (d) qui marque la limite au large du profil post-tempête, ainsi :

$$x_R = 250 \times cf_{profondeur} \times \left(\frac{H_{0s}}{7.6}\right)^{1.28} \left(\frac{0.0268}{w_s}\right)^{0.56} \quad (\text{Équation 17})$$

Avec $cf_{profondeur} = \Delta \times \max\left(\frac{15}{d} + 0.11, 1\right) + (1 - \Delta)$ où Δ est définie telle que :

$$\Delta = \begin{cases} 0 & \text{si } \frac{H_{0s}}{d} \leq 0.4 \\ \left(\frac{\frac{H_{0s}}{d} - 0.4}{0.06}\right) & \text{si } 0.4 < \frac{H_{0s}}{d} \leq 0.46 \\ 1 & \text{si } \frac{H_{0s}}{d} > 0.46 \end{cases}$$

5) DUROS Research version, Brandenburg, 2010

$$\left(\frac{8.15}{H_{0s}}\right)y = 0.6642 \left[\left(\frac{8.15}{H_{0s}}\right)^{1.28} \left(\frac{12}{T_p}\right)^{0.45} \left(\frac{w_s}{0.0268}\right)^{0.56} x + 35 \right]^{0.5} - 3.9 \quad (\text{Équation 18})$$

Comme nous l'avons vu précédemment (partie 3.2), l'effet du jet de rive est très important dans les phénomènes d'érosion des dunes. Or les différentes versions de la méthode DUROS (initial, + et ++) n'en tiennent pas compte, ce qui peut limiter leur précision. La version « recherche » de la méthode DUROS par contre prend en considération l'existence d'une zone de jet de rive dans la construction du profil post tempête. Dans cette méthode, le profil érodé se compose de 4 parties :

- une partie linéaire de pente 1 :1 côté terre ;
- une zone de jet de rive linéaire de pente 1 :15 dont la hauteur est définie par l'équation :

$$y_{run\ up} = 5.9\phi_{haut\ de\ plage}\hat{T}\sqrt{gH_s}\tan\phi_{run\ up} \quad (\text{Équation 19})$$

avec $\phi_{haut\ de\ plage}$, la pente du haut de plage et $\phi_{run\ up}$, la pente de la zone de jet de rive

- une zone avec un profil parabolique (dont l'expression est décrite plus haut) ;
- une partie linéaire de pente 1 :12.5 côté mer, à la fin du profil d'équilibre jusqu'au profil initial.

Il faut noter que la méthode DUROS est valable pour les cas dont le profil initial de dune ressemble au profil de référence hollandais (Tableau 6), pour lequel la méthode a été calibrée. Cette méthode n'est pas applicable dans les cas de débordement par paquets de mer. De plus, les différentes formules ont été définies à partir d'expériences en laboratoire (canal à houle) pour lesquelles il a été supposé que des conditions hydrodynamiques stationnaires et maximales pendant 5 heures, généreraient la même érosion qu'une tempête de 45 h en Mer du Nord.

Hauteur de vague significative	7,6 m
Période pic des vagues au large	12 s
Profondeur au large	20 m
Niveau d'eau maximal au cours de la tempête (SSL) au-dessus du niveau moyen de référence au Pays-Bas (NAP)	+ 5 N.A.P
Durée de la tempête	45 h (= 5 h en laboratoire)
Taille de grain pour un sédiment moyen	225 μ m
Vitesse de chute du sédiment (moyen)	0,0248 m/s
Température de l'eau	5 °C
Profil cross-shore initial	Hauteur de dune: + 15 N.A.P. Pente du front de dune de 1:3 jusqu'à + 3 N.A.P. Pente de 1:20 entre + 3 m et 0 m N.A.P. Pente de 1:70 entre 0 m et - 3 m N.A.P. Pente de 1:180 entre - 3 m et - 20 m N.A.P.

Tableau 6 : Caractéristiques du profil de référence utilisé pour la méthode DUROS (Brandenburg, 2010).

5.3. MÉTHODE FEMA (1995)

Aux États-Unis, Hallermeier et Rhodes (1988) ont proposé une méthode simple pour la FEMA (Federal Emergency Management Agency). Cette règle est dérivée de la méthode des profils d'équilibre de DUROS proposée par Vellinga (1986) et applicable sur les côtes de l'Atlantique et du Golfe du Mexique. Le profil est séparé en 3 segments linéaires (Figure 75) :

- 1- côté terre, une partie de pente 1/1 représentant la dune érodée ;
- 2- pour la plage, une pente de 1/40 ;
- 3- au large, une pente de 1/12.5.

Les différents segments sont positionnés par itération par rapport au profil initial, de manière à ce que le volume érodé de la dune soit redistribué dans le reste du profil de plage.

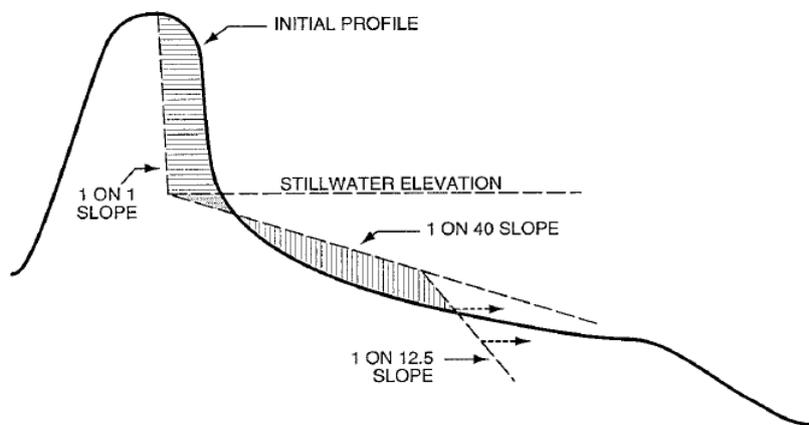


Figure 75 : Estimation du recul de la dune suivant le profil d'équilibre simplifié adopté dans la méthode FEMA (1995).

Le volume de dune érodée est fonction de la période de retour (« T » en années) de l'évènement considéré. Pour un profil perpendiculaire au trait de côte, la dune est érodée d'une aire « A » (en m²) selon la formule suivante :

$$A = 8 \times T^{0.4} \quad (\text{Équation 20})$$

Pour un évènement centennal, l'érosion correspond à 50 m² ou 540 pieds carrés (540 Square Feet ou 540 SF) et donne son nom à la règle (FEMA, 1995).

Le stock sédimentaire de la dune est obtenu en calculant la surface comprise entre la ligne «niveau d'eau centennal statique», la verticale au point culminant de la dune et le profil topographique initial (Figure 76). Si cette surface est supérieure à 50 m² (ou 540 pieds carrés), la dune est censée résister à la tempête.

Pour obtenir la valeur du recul théorique associée à l'évènement centennal, il faut déterminer, à partir du profil topographique initial, la surface de 540 pieds carrés, correspondant aux sédiments mobilisables au-dessus du niveau de surcote extrême. Le recul maximal de la dune est déterminé à l'altitude du niveau extrême.

Cette règle des 540 SF est basée sur l'analyse de nombreuses séries d'observations de reculs de dune après tempête. Elle n'est pas utilisable sur les plages/dunes à granulométrie très grossière (graviers/galets).

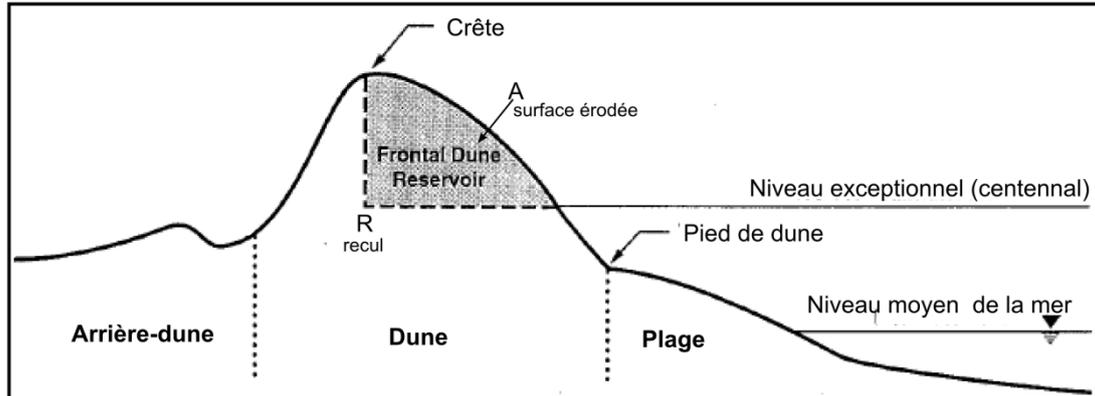


Figure 76 : Représentation du calcul du volume du stock maximal mobilisable par un événement caractérisé par un niveau d'eau centennal, valeur limite avant disparition de la dune (Source : FEMA, 1995).

5.4. FORMULE DE DEAN (1991)

Dean (1991) reprend le concept des profils d'équilibre des plages qui s'expriment selon une formule simple :

$$y = A \cdot x^{2/3} \quad (\text{Équation 21})$$

Le paramètre A de Dean est différent du paramètre « A » de la méthode FEMA décrit précédemment. Il dépend des conditions environnementales de la plage, qui, si elles changent, modifient le profil de la plage. À l'opposé des solutions de simplification de la FEMA, le travail de Dean consiste à améliorer l'expression de « A » pour prendre en compte au mieux les processus morphogènes sur le profil de plage.

De façon théorique, il entreprend de décrire la modification du profil de plage et l'évolution du trait de côte pour plusieurs cas d'ingénierie côtière (rechargement de plage, présence d'un mur). Dans le cas d'une plage « naturelle », les effets de la granulométrie (Figure 77), des surcotes, des vagues déferlantes et du *set-up* sur le profil de plage sont étudiés (Figure 78).

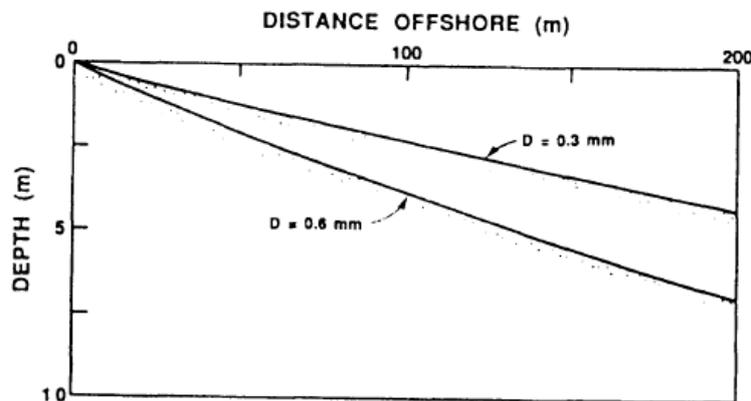


Figure 77 : Profil d'équilibre d'une plage pour un sédiment de 0.3 mm et 0.6 mm, avec $A(0,3 \text{ mm}) = 0.1 \text{ m}^{1/3}$ et $A(0,6 \text{ mm}) = 0.2 \text{ m}^{1/3}$ (Dean, 1991).

Une série de développements et d'hypothèses simplificatrices lui permettent de décrire le recul du trait de côte R, en prenant en considération les caractéristiques des vagues déferlantes et de la zone de déferlement. L'effet du *set-up*, qui produit une augmentation locale du niveau d'eau sous l'effet du déferlement des vagues est également pris en compte.

Après différentes hypothèses simplificatrices, et si la valeur du recul dunaire R est très inférieure à la largeur de la zone de déferlement, il peut s'exprimer tel que :

$$R = (S + 0.068 \times H_b) \frac{W_*}{B_0 + h_b} \quad (\text{Équation 22})$$

avec S la surcote, H_b la hauteur des vagues déferlantes, W_* la largeur de la zone de déferlement, B_0 la hauteur de dune au-dessus du niveau d'eau moyen et h_b la profondeur à laquelle les vagues déferlent.

D'après Dean (1991), W_* (limite au large de la zone active) s'écrit :

$$W_* = \left(\frac{H_b}{0.78 \times A} \right)^{3/2} \quad (\text{Équation 9}) \text{ et } A = 2.25 \left(\frac{w^2}{g} \right)^{1/3} \quad (\text{Équation 23}),$$

w étant la vitesse de chute du sédiment, h_b est la profondeur à partir de laquelle les vagues déferlent et peut s'exprimer en fonction de la hauteur des vagues déferlantes H_b : h_b ou $h_* = 1.28 \times H_b$ (Équation 8) avec H_b , la hauteur des vagues déferlantes.

La Figure 78 illustre le recul trait de côte en fonction de la profondeur de déferlement des vagues (h^*/B) et de la surcote de tempête (S/B) avec (h^*), profondeur de déferlement des vagues et B , hauteur de la dune ou berme, et S , surcote de tempête. Le recul relatif du trait de côte ($\Delta y'$) est défini tel que : $\Delta y' = \frac{\Delta y}{W_*}$, avec Δy , recul du trait de côte et W_* , largeur de la zone de déferlement (Dean, 1991).

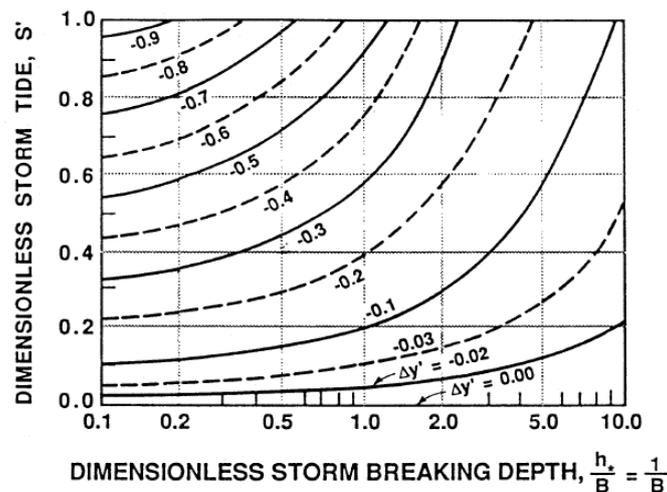


Figure 78 : Abaque montrant le recul relatif du trait de côte $\Delta y'$ fonction de la profondeur de déferlement des vagues h^*/B et de la surcote de tempête S/B . (Dean, 1991).

5.5. MÉTHODE DE KRIEBEL & DEAN (1993)

Dean (1991) a développé ses recherches par la prise en compte la plus complète possible des phénomènes littoraux pour décrire l'atteinte du profil d'équilibre d'une plage. Kriebel et Dean (1985, 1993) suivent cet angle de vue pour déterminer spécifiquement l'évolution d'un profil dune/plage sous l'effet d'une tempête.

La méthode de Kriebel et Dean (1993) est basée sur l'hypothèse que la réponse du profil de plage à la tempête est une fonction exponentielle du temps. Ainsi, au début de la tempête, la plage évolue peu, puis, si la tempête se prolonge suffisamment, l'érosion pourra s'amplifier.

Sachant que le taux de réponse du profil doit être proportionnel à la différence entre la forme du profil instantané et celle du profil final ou d'équilibre et que le profil est soumis à un forçage pour l'érosion variable dans le temps, la position horizontale de chaque point du profil ($R(t)$) vérifie l'équation différentielle linéaire suivante :

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{1}{T_s} [R_\infty f(t) - R(t)] \quad (\text{Équation 24})$$

Avec $R(t)$, le recul de la dune, T_s l'échelle de temps caractéristique de la réponse exponentielle, R_∞ le recul potentiel maximal et $f(t)$ la fonction variant dans le temps telle que $R_\infty f(t)$ représente le terme de forçage pour l'érosion.

La solution de cette équation différentielle est le produit de convolution du forçage pour l'érosion et de la solution caractéristique pour un forçage stationnaire, soit dans ce cas, une fonction exponentielle.

D'où :

$$R(t) = \frac{R_\infty}{T_s} \int_0^t f(\tau) e^{-(t-\tau)/T_s} d\tau \quad (\text{Équation 25})$$

Avec τ correspondant à un déphasage dans le temps.

Kriebel & Dean (1993) ont choisi d'appliquer cette méthode de convolution pour une surcote de tempête idéalisée. Les variations du niveau d'eau au cours de la tempête sont paramétrées de la façon suivante :

$f(t) = \sin^2(\sigma t)$ pour $0 < t < T_D$, avec $\sigma = \pi/T_D$ et T_D est la durée de la tempête soit le temps entre le début et la fin de la montée du niveau d'eau.

Cette paramétrisation est valable pour des ouragans ou des tempêtes extratropicales.

À partir de cette expression de $f(t)$ et de l'équation 25 la solution s'écrit :

$$\frac{R(t)}{R_\infty} = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{\beta^2}{1+\beta^2} \exp\left(-\frac{2\sigma t}{\beta}\right) - \frac{1}{1+\beta^2} [\cos(2\sigma t) + \beta \sin(2\sigma t)] \right\} \quad \text{Équation 26}$$

avec $\beta = 2\pi \frac{T_s}{T_D}$

Le recul maximal suite à une tempête dépend de la durée de celle-ci. Il est atteint au bout du temps t_m tel que la dérivée de l'équation 26 soit nulle. L'amplitude du pic de réponse c'est-à-dire le recul maximal atteint lors de la tempête s'obtient alors :

$$\frac{R_{max}}{R_\infty} = \frac{1}{2} [1 - \cos(2\sigma t_m)] \quad \text{Équation 27}$$

Afin de connaître la valeur du recul maximal atteint lors de la tempête, il reste à déterminer l'érosion potentielle maximale pour un profil de dune donné (R_∞) et l'échelle de temps caractéristique de la réponse exponentielle (T_s).

Comme pour Dean (1991), la méthode de Kriebel & Dean (1993) se base sur l'hypothèse que le profil plage/dune tend vers une position d'équilibre en réponse aux forçages hydrodynamiques de la forme :

$$x = \left(\frac{h}{A}\right)^{3/2}$$

avec h , la profondeur à la distance x de l'intersection du niveau d'eau et du profil de dune en direction du large et A , un paramètre qui caractérise la pente global du profil. D'après Dean 1978, il est défini tel que :

$$A = 2.25 \left(\frac{w^2}{g} \right)^{1/3}$$

avec w , la vitesse de chute du sédiment et g , l'accélération de pesanteur. Cette définition est valable pour des grains de sable dont la taille varie entre 0,1 et 0,4 mm et pour des températures de l'eau autour de 20 °C.

Kriebel & Dean (1993) déclinent cette approche pour 4 profils de plage schématiques (Figure 79) :

- A) profil de plage avec un haut de plage vertical ;
- B) profil avec un haut de plage en plan incliné ;
- C) profil avec un haut de plage en plan incliné et une dune ;
- D) profil avec une berme et une dune.

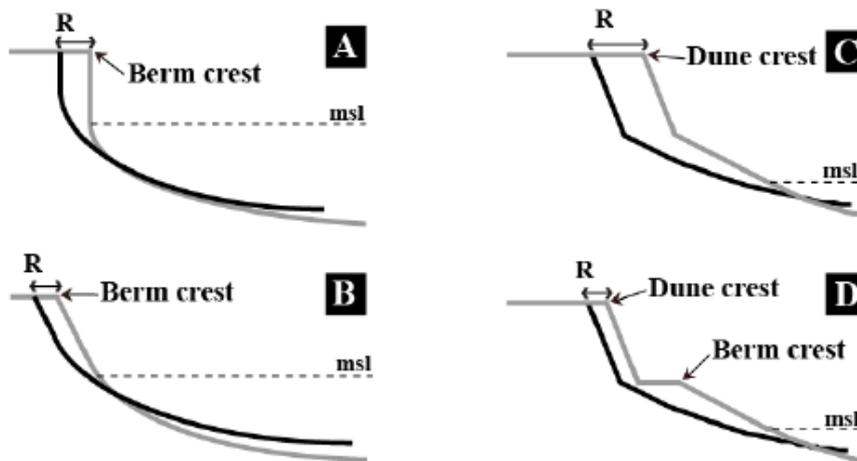


Figure 79 : Les quatre profils de plage et de dune pris en compte par Kriebel et Dean (1993), traits clairs, profils initiaux ; traits sombres, profils après tempête, d'après Almeida et al., (2011).

Le calcul de R_∞ se base sur le principe de maintien du volume de sédiment dans le profil. A partir de cette hypothèse, une formulation de R_∞ peut être associée à chaque type de profil.

$$\text{Pour le profil A : } R_\infty = \frac{Sx_b}{B+h_b-\frac{S}{2}} \quad \text{Équation 28}$$

$$\text{Pour le profil B : } R_\infty = \frac{S(x_b-\frac{h_b}{m})}{B+h_b-\frac{S}{2}} \quad \text{Équation 29}$$

$$\text{Pour le profil C : } R_\infty = \frac{S(x_b-\frac{h_b}{m})}{B+D+h_b-\frac{S}{2}} \quad \text{Équation 30}$$

$$\text{Pour le profil D : } R_\infty = \frac{S(x_b-\frac{h_b}{m})}{B+D+h_b-\frac{S}{2}} - \frac{W(B+h_b-\frac{S}{2})}{B+D+h_b-\frac{S}{2}} \quad \text{Équation 31}$$

Avec x_b , la largeur de la zone de déferlement, telle que :

$x_b = \left(\frac{h_b}{A}\right)^{3/2}$ où h_b est la profondeur où les vagues déferlent et est supposée égale à $1.28 H_b$ avec H_b la hauteur des vagues déferlantes.

m , la pente du haut de plage, S , la surcote, B la hauteur de berme et D , la hauteur de dune.

L'échelle de temps caractéristique de la réponse du profil est obtenue à partir d'une formulation empirique mise au point par Kriebel et Dean (1993) à partir d'expériences numériques. Elle s'écrit sous la forme suivante :

$$T_S = 320 \frac{H_b^{3/2}}{g^{1/2} A^3} \left(1 + \frac{h_b}{H} + \frac{m x_b}{h_b}\right)^{-1} \quad \text{Équation 32}$$

Avec $H = B$ ou $H = B + D$ suivant le profil étudié.

Dans le cadre du programme européen MICORE, l'approche de Kriebel et Dean a été utilisée pour développer un outil d'étude des tempêtes et de l'érosion affectant la plage de Faro au Portugal (Figure 80). La comparaison des résultats de la méthode de Kriebel et Dean avec 6 suivis topographiques post-tempête donne des résultats très encourageants pour le recul dunaire, surtout pour les plus grosses tempêtes étudiées.

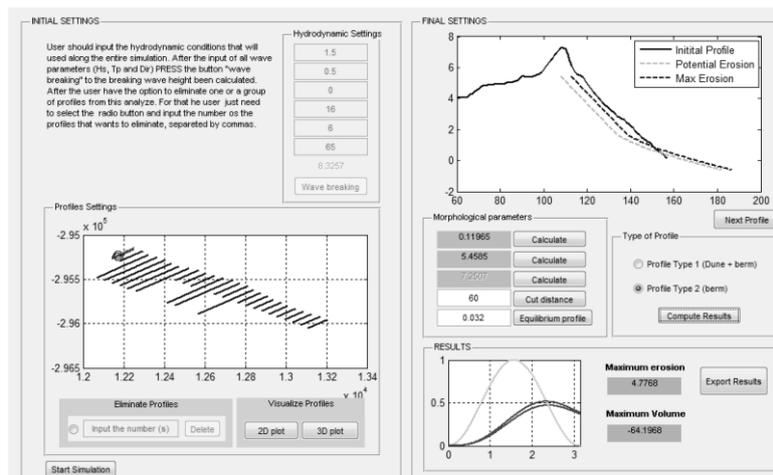


Figure 80 : Exemple d'interface de l'outil GEOSTORM développé pour la plage de Faro par Almeida et al., (2011) dans le cadre du programme MICORE.

6. PREMIERS TESTS DE FORMULES D'ÉVOLUTION DU PROFIL PLAGE-DUNE

Ce chapitre a pour but de présenter quelques tests d'estimation de recul dunaire basé sur les formules empiriques présentées dans la partie 4.1 et détaillé dans le chapitre 5. Ces tests sont menés sur les méthodes FEMA et DUROS+ qui sont actuellement des méthodes opérationnelles, mises en œuvre aux USA et aux Pays-Bas. Quatre sites tests métropolitains décrits dans le chapitre 2 ont été sélectionnés pour ces essais.

Pour la côte Atlantique, les deux sites qui ont été choisis parmi les profils topographiques suivis annuellement par l'Observatoire de la Côte Aquitaine ont été illustrés dans la partie 2.1.3. Les dunes littorales de la côte Aquitaine, modelées et entretenues par l'action des hommes, sont généralement larges et hautes. Le premier secteur étudié (profil OCA G2, AQ1) se situe en Gironde, au niveau de la commune de Soulac-sur-Mer. Il est caractérisé par une forte érosion récurrente et un front dunaire constitué d'une falaise abrupte (Figure 5). Le second secteur (Profil OCA L13, AQ2) se trouve dans les Landes, sur la commune de Moliets, dans une zone de dunes stables, mais qui présente un recul important du pied de dune entre 2009 et 2010 (Figure 6). La plage se situe au sud du courant d'Huchet et peut être influencée par l'embouchure.

En Méditerranée, les deux sites choisis sont situés en Corse et ont été illustrés dans la partie 2.2.3. Comparativement à la côte Aquitaine, les dunes de Corse sont basses et peu développées. Le site de Taravo (Corse1, profil est), situé sur la côte ouest de la Corse du Sud montre une translation nette de la dune vers le continent, entre 2009 et 2010 (Figure 16). Le site de Tavignano (Corse2, profil nord) se trouve en Haute-Corse, sur la côte orientale. Une érosion d'environ 10 m du pied de dune est observée entre 2008 et 2009 (Figure 13).

6.1. DUNES AQUITAINES

Duros

La méthode DUROS (version DUROS+) a été appliquée sur les 2 profils tests d'Aquitaine. Pour ces deux profils, les données topographiques du haut de plage correspondent aux mesures réalisées par l'Observatoire de la Côte Aquitaine, en revanche, la représentation du bas de plage et du domaine pré littoral est simplifiée, basé sur les cartes bathymétriques existantes (SHOM).

Les calculs ont été réalisés dans un référentiel altimétriques établi par rapport au niveau moyen de la mer. Ce niveau est situé à 0,439 m au-dessus du zéro IGN69 à la Pointe de Grave (AQ1, SHOM, 2013) et 0,037 m au-dessus du zéro IGN69 à Moliets (AQ2, référence Boucau Bayonne, SHOM, 2013). Pour cet exemple d'application, les paramètres entrés dans la formule (niveaux d'eau et vagues) sont des valeurs issues des bases de données disponibles, dont les périodes de retour sont connues. Le choix réalisé ici consiste à associer des données de niveaux d'eau (marée astronomique + surcote atmosphérique) et des caractéristiques de vague (Hs, Tp) dont les périodes de retour sont annuelles, décennales, cinquantennales et centennales. Ce choix permet de tenir compte de conditions de forçage croissantes et ainsi d'observer leurs impacts sur l'érosion des fronts dunaires. Cependant, il est essentiel de rappeler que les conditions de forçages ainsi traitées (par exemple : croisement de valeurs de retour décennale pour les niveaux d'eau et les vagues) représentent une situation théorique de période de retour de dépassement conjoint très largement supérieure à un événement de période de retour de dépassement décennale.

Ainsi pour les exemples Aquitains (AQI1 et AQI2, Tableau 7) :

- les données de niveaux d'eau sont issues du document SHOM/CETMEF (2012) pour les secteurs étudiés ;
- les données de houles utilisées proviennent de la base de données d'extrêmes BoBWA-X Bulteau *et al.*, (2013, BRGM/RP-62730-FR) aux points d'analyse Gascogne_08 et Gascogne_13.

Pour chaque site, les paramètres nécessaires à l'application de la méthode DUROS+ et les résultats obtenus sont mentionnés dans les Tableau 7 et Tableau 8.

- AQI1

Niveau d'eau (m, IGN69)	3,13	3,5	3,6	3,7
période de retour (an)	PHMA	10	50	100
Hs (m)	7,3	9,3	10,3	10,7
période de retour (an)	1	10	50	100
Tp (s)	16			
Taille grain (µm)	225			
Recul estimé (m)	13	21	26	28

Tableau 7 : Paramètres nécessaires à la formule DUROS+ et résultats du recul estimé pour AQI1 (PHMA = Plus haute marée astronomique).

Les profils topographiques « post-tempête » calculés par la formule DUROS+ sont tracés pour être comparés avec la morphologie initiale et estimer le recul de dune. Pour le premier cas AQI1 (Figure 81), le recul du pied de dune estimé par la méthode DUROS+ est compris entre 13 m et 28 m. Pour le premier niveau d'intensité, le recul estimé est sensiblement plus important que le maximum de 6 m observé entre 2011 et 2012 (voir partie 2.1.3 et Figure 5). Mais les reculs observés sur ce site sont mesurés annuellement et sont relativement réguliers chaque année. Ils ne correspondent pas forcément à un fort recul instantané, caractéristique de l'impact d'évènements extrêmes que cherche à reproduire la formule DUROS+.

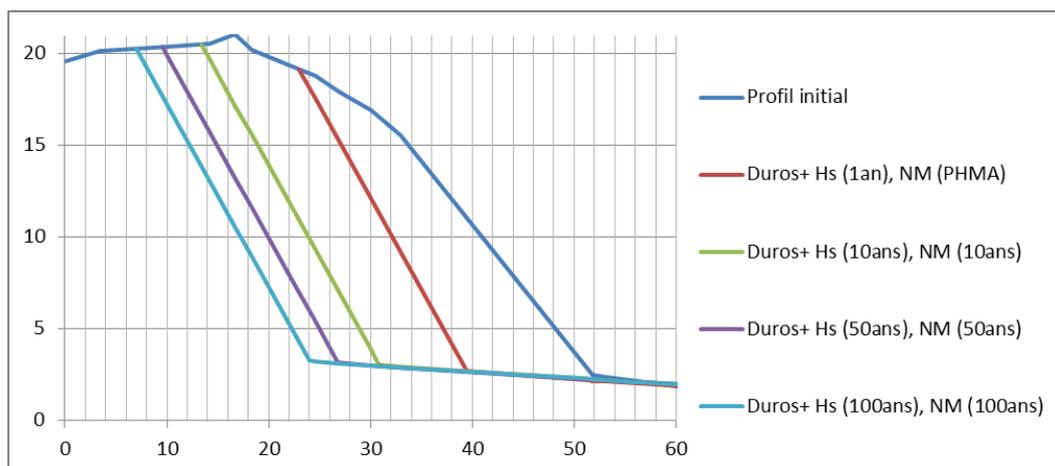


Figure 81 : Site test AQI1 (L'Amélie, 33), recul de la dune estimé par la méthode DUROS+ pour 4 niveaux de forçages.

- AQI 2

Pour le second cas AQI2 (Tableau 8 et Figure 82), le recul du pied de dune estimé par la méthode DUROS+ est compris entre 8 et 29 m. On constate une nette différence de recul entre le premier niveau d'intensité testé (PHMA et Hs annuel) et les intensités plus fortes, dont les reculs sont compris entre 25 et 29 m. Ces valeurs sont comparables aux 29 m de recul observé entre 2011 et 2012, bien que le secteur n'ait pas subi de tempête extrême sur cette période. De plus, la forme des profils résultant montre que le volume érodé estimé par la méthode DUROS+ est inférieur à l'érosion observée sur le terrain (Figure 6). Ainsi, à l'altitude de 5 m IGN69, le recul du profil d'équilibre calculé par DUROS est de 8 m tandis qu'il est encore de 20 m pour les profils topographiques mesurés. Ce très fort recul observé pourrait s'expliquer par l'influence de l'embouchure du courant d'Huchet sur la forme générale du profil de plage. Tout comme l'influence anthropique (rechargement ou reprofilage), ce type de processus n'est pas pris en compte dans la formule.

Niveau d'eau (m, IGN69)	2,33	2,9	2,9	3
période de retour (an)	PHMA	10	50	100
Hs (m)	7,4	9,7	11	11,4
période de retour (an)	1	10	50	100
 Tp (s)	18		19	
Taille grain (µm)	225			
Recul estimé (m)	8	25	26	29

Tableau 8 : Paramètres nécessaires à la formule DUROS+ et résultats du recul estimé pour AQI1 (PHMA = Plus haute marée astronomique).

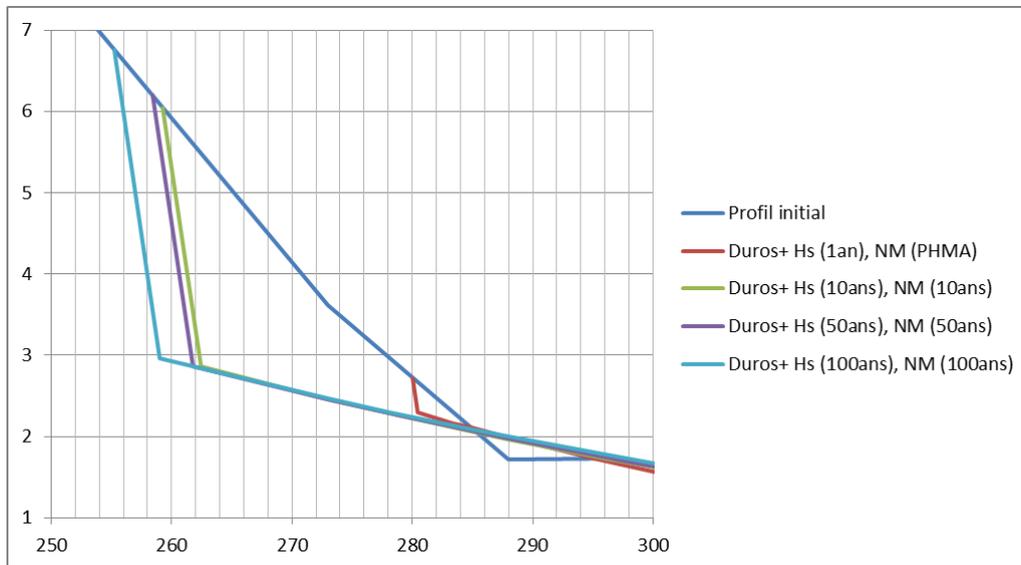


Figure 82 : Site test AQI2 (Moliet, sud-Huchet, 40), recul de la dune estimé par la méthode DUROS+ pour 4 niveaux de forçages.

FEMA

Pour l'Aquitaine, les niveaux d'eau associés aux périodes de retour 1, 10, 50 et 100 ans sont issus des statistiques des niveaux marins extrêmes dans les ports les plus proches des zones d'intérêt (Pointe de Grave pour AQI1 et Boucau-Tarnos pour AQI2, SHOM-CETMEF, 2012). Les surfaces érodées, imposées par la méthode, permettent de déterminer le recul à partir du profil topographique initial à l'altitude de la surcote de tempête (voir paragraphe 5.3).

Période de retour (en année)	1	10	50	100	Observations
Surface érodée (en m ²)	8	20.09	38.25	50.48	
Niveau extrême AQI1 (m IGN69)	3.13	3.5	3.6	3.7	
AQI1 Recul (en m)	5	7.8	10.7	12.2	6
Niveau extrême AQI2 (m IGN69)	2.33	2.9	2.9	3.0	
AQI2 Recul (en m)	11.3	16.7	22.5	25.4	29

Tableau 9 : Paramètre de la méthode FEMA pour les sites tests AQI1 et AQI2, résultats de recul dunaire pour différentes périodes de retour et comparaison avec des observations.

Pour le site test AQ1, les résultats de la méthode FEMA sont cohérents avec les observations. Ainsi, le recul observé de 6 m correspond relativement bien avec l'estimation du recul pour une période de 1 à 10 ans. En revanche, l'estimation du recul centennal de FEMA avec les résultats de la méthode DUROS+ montre une valeur presque trois fois plus faible que le recul calculé par Duros+ pour l'intensité maximale testée (29 m pour DUROS+ - Hs 100 ans, NM 100 ans- contre 12,2 m pour FEMA).

Pour le site test AQI2, les estimations de FEMA et de DUROS+ pour un niveau d'eau centennal sont légèrement plus fortes pour DUROS+, mais restent du même ordre de grandeur (29 m pour DUROS et 25 m pour FEMA).

6.2. DUNES CORSES

Duros

La méthode DUROS (version DUROS+) a été appliquée sur deux profils tests de Corse. Pour ces deux profils, les données topo-bathymétriques du profil de plage correspondent aux mesures réalisées par le BRGM dans le cadre du ROL (Réseau d'Observation du Littoral Corse).

Pour chaque site, les paramètres nécessaires à l'application de la méthode DUROS+ (partie 5.2) sont mentionnés dans les Tableau 10 et Tableau 11 :

- les données de niveau d'eau sont issues du rapport CETMEF (2013) et correspondent à l'association des valeurs de PHMA (plus haute marée astronomique) et de surcote de pleine mer calculée pour le port d'Ajaccio. Dans un secteur où le marnage est faible, ce choix permet de maximiser les niveaux d'eau utilisés. Il faut noter aussi que, pour le cas Corse2, ces données ne sont utilisées qu'à titre indicatif. Faute de port ou d'étude de référence située sur la côte orientale de l'île et/ou à proximité du profil, la qualité des données sur les niveaux d'eau est considérée comme médiocre ;
- les données de houles sont issues de la base de données ANEMOC (Morellato et Benoit, 2010) aux points d'analyse Medit 7722 pour Corse1 et Medit 4402 pour Corse2.

- Corse 1

Niveau d'eau (m, IGN72)	0,64	0,84	1	1,07
période de retour (an)	1	10	50	100
Hs (m)	5	7	8,3	8,9
période de retour (an)	1	10	50	100
Tp (s)	12			
Taille grain (µm)	225			
Recul estimé (m) à 1m NGF	42	76	96	destruction

Tableau 10 : Paramètres nécessaires à la formule DUROS+ et résultats des estimations pour le site test Corse1. La formule estime que les dunes seront détruites pour des évènements extrêmes (recul estimé > largeur de la dune).

Les profils topographiques « post-tempête » du site Corse 1 (Taravo) calculés par la formule DUROS+ sont tracés pour être comparés avec la morphologie initiale et estimer le recul de dune. Pour le cas « Corse1 » (Figure 83), le recul de la dune et de la plage à 1 m NGF d'altitude est estimé à 42 m pour le premier niveau d'intensité testé. La formule va jusqu'à prédire la destruction totale de la dune et un recul de plus de 90 m à partir des conditions « houles et niveau d'eau cinquantennales ». Les effets estimés de ces conditions sont très significativement plus forts que le recul maximum de 18 m observé à la même altitude entre 2009 et 2010. De plus, entre 2009 et 2010, la dune avait reculé sans perte majeure de volume (processus de roll-over). Ce type d'adaptation des cordons dunaires aux forçages marins ne peut pas être reproduit par la formule testée.

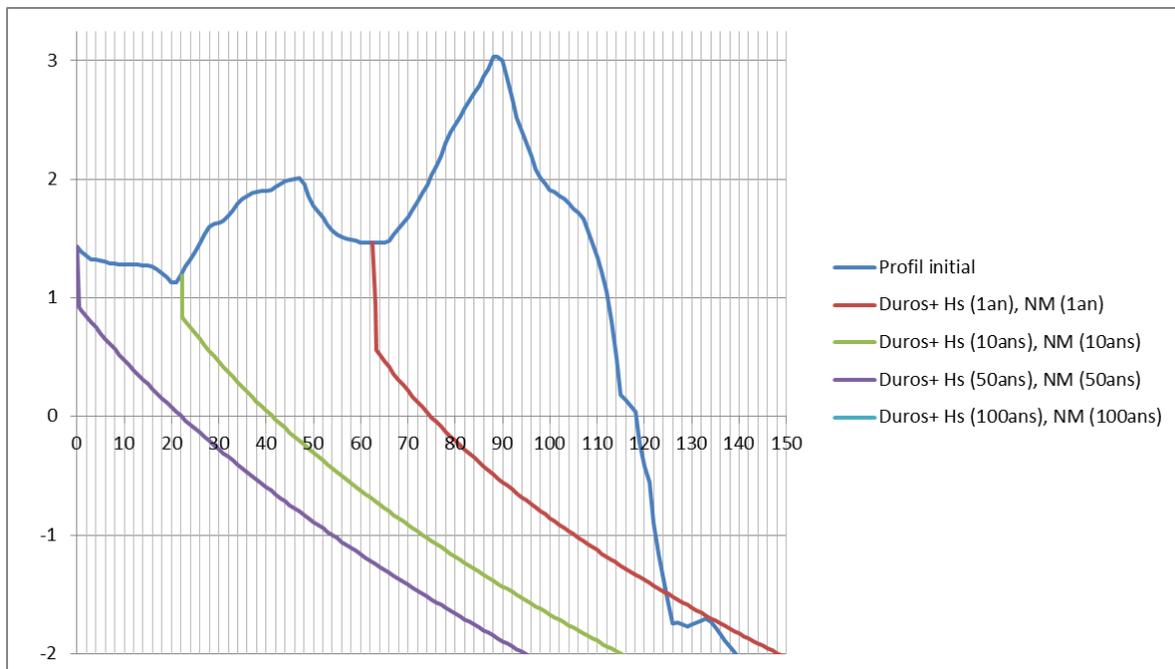


Figure 83 : Site test Corse1 (Taravo Est), recul de la dune estimé par la méthode DUROS+ pour 4 niveaux de forçages.

- Corse 2

Pour le second cas (Corse2, Tavignano, Tableau 11 et Figure 84), le recul du pied de dune, estimé par la méthode DUROS+, est compris entre 23 et 32 m à une altitude de 1 m NGF. Ces valeurs sont 2 à 3 fois plus importantes que les 11 m de recul observés à 1 m NGF entre 2008 et 2009, mais il faut signaler que la formule ne prédit pas la destruction totale de la dune pour ces différents scénarios.

Niveau d'eau (m, IGN72)	0,64	0,84	1	1,07
période de retour (an)	1	10	50	100
Hs (m)	3,7	5,5	6,4	6,9
période de retour (an)	1	10	50	100
 Tp (s)	12			
Taille grain (µm)	225			
Recul estimé (m)	23	27	30	32

Tableau 11 : Paramètres nécessaires à la formule DUROS+ et résultats du recul estimé pour le site Corse2.

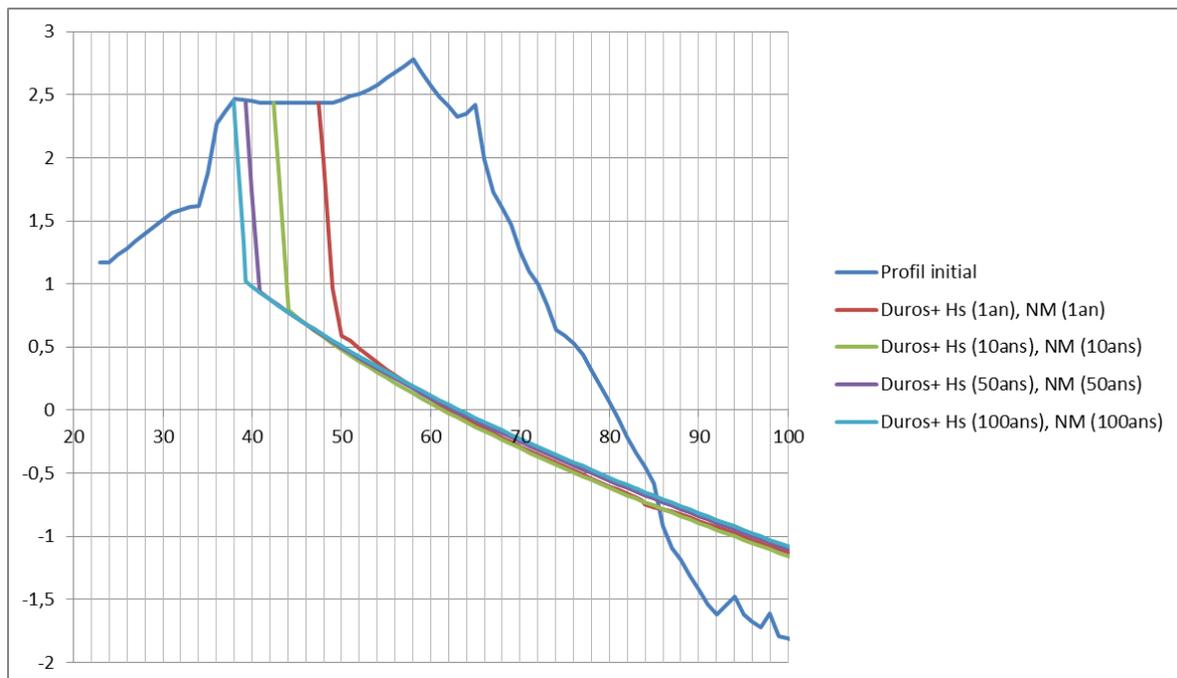


Figure 84 : Site test Corse 2 (Tavignano Nord), recul de la dune estimé par la méthode DUROS+ pour 4 niveaux de forçages.

FEMA

Pour la Corse, les données de niveau d'eau sont tirées du rapport CETMEF (2013) et correspondent à l'association des valeurs de PHMA et de surcote de pleine mer calculées pour le port d'Ajaccio. Ces niveaux d'eau permettent d'estimer une valeur de recul du pied de dune (Tableau 12) à partir du volume érodé prédit par la formule.

Période de retour (en année)	1	10	50	100	Observations
Surface érodée (en m ²)	8	20.09	38.25	50.48	
Niveau extrême Corse1 (m IGN72)	0.64	0.84	1	1.07	
Corse1 Recul (en m)	9.9	20	Destruction	Destruction	18
Niveau extrême Corse2 (m IGN72)	0.64	0.84	1	1.07	
Corse2 Recul (en m)	10.6	16.7	Destruction	Destruction	13

Tableau 12 : Paramètre de la méthode FEMA pour les sites tests Corse1 et Corse2, résultats de recul dunaire pour différentes périodes de retour et comparaison avec des observations.

Pour le site test Corse1, la comparaison des résultats de la méthode FEMA (Tableau 12) avec les observations semble cohérente pour des événements dont la période de retour est inférieure à 50 ans. Pour des surcotes plus importantes, la méthode FEMA prédit une érosion complète de la dune. Cette estimation est en bon accord avec l'évolution du profil calculé par la méthode DUROS+ qui montre une dune détruite pour les valeurs extrêmes de houle et de niveau d'eau (Figure 83). Mais il faut noter que ces méthodes ne prennent pas en compte les possibilités de translation de la dune vers la terre, ce qui apparaît pourtant sur les profils observés entre 2009 et 2010.

Pour le site test Corse2, l'estimation du recul associé à un niveau d'eau inférieur à 50 ans est également en bon accord avec les observations issues de la base de données du ROL (Tableau 12). En revanche, pour des conditions plus extrêmes, les méthodes DUROS+ et FEMA sont divergentes, FEMA prédisant la destruction de la dune, tandis que DUROS+ estime une très forte érosion sans destruction.

6.3. BILAN

Parmi un ensemble de formules permettant d'estimer l'érosion du profil de plage et le recul dunaire, les méthodes FEMA et DUROS+ ont été testées sur des exemples de plages métropolitaines. Ces méthodes sont régulièrement utilisées aux USA et aux Pays-Bas. Les plages choisies pour ces tests proviennent de secteurs situés en Aquitaine et en Corse, dont les profils de plage sont suivis annuellement par le BRGM. Le suivi annuel ne permet pas d'identifier l'effet d'un événement extrême unique, mais il fournit cependant des informations précieuses sur les reculs qui affectent les sites de mesures.

La méthode FEMA apparaît en bonne cohérence avec les observations réalisées en Aquitaine (AQI1) et en Corse pour les événements de surcote annuelle à décennale, excepté pour le secteur de Moliets (AQI2). En revanche, les résultats de reculs estimés avec la méthode DUROS+ pour les périodes de retour annuel et décennal (houle et niveau d'eau) sont nettement plus forts que les observations, sauf pour Moliets (AQI2) où les valeurs sont inférieures à l'observation. Mais il faut rappeler que les conditions de forçages ainsi traitées, par exemple, le croisement de valeurs de retour décennale pour les niveaux d'eau et les vagues, représentent une situation théorique de période de retour de dépassement conjoint probablement supérieure à un événement décennal.

Pour les événements de surcote cinquantennale à centennale, les deux méthodes testées obtiennent des résultats comparables pour deux secteurs (AQI2 et Corse1). Pour la plage de l'Amélie (AQI1), les valeurs maximales du recul estimé diffèrent fortement, de 12 m pour FEMA à 28 m pour DUROS. Pour la plage de Tavignano (Corse 2), la méthode FEMA prédit la destruction de la dune pour un niveau d'eau cinquantennal, tandis que DUROS+ estime une très forte érosion, sans destruction complète. Les observations disponibles pour cette étude ne permettent pas de conclure sur la performance des formules pour les scénarios cinquantennaux ou centennaux.

Un autre point qui limite la portée de ces méthodes concerne l'impossibilité de prendre en compte des phénomènes autres que la surcote de tempête et/ou les fortes vagues. Ainsi, le recul maximal de la plage de Moliets pourrait être sous-estimé par les deux méthodes car l'influence probable d'une embouchure proche du profil étudié n'est pas traitée dans les formules, ce qui pourrait expliquer le décalage entre observations et estimations. De même, il faut noter que le recul observé à Taravo (Corse¹) correspond à une translation de la dune vers la terre sans perte importante de sédiment (roll-over), et non à une érosion « classique » transportant les sables vers le large ou le bas de plage. Ce type de phénomène n'est pas pris en compte non plus par les formules testées.

Malgré ces limitations, les premiers tests pratiqués pour cette étude sont encourageants. Pour les événements les moins puissants, certains résultats sont cohérents avec les observations, Pour les événements les plus forts, la comparaison avec les observations n'est pas possible avec les données disponibles, mais les comparaisons entre les deux méthodes peuvent être intéressantes, sans toutefois permettre de conclusion.

D'une manière générale, ces méthodes pourraient illustrer de façon instructive le recul des fronts de dune sous l'effet de forçages extrêmes dans des secteurs très mal connus. Mais le nombre de cas testés dans cette étude est insuffisant pour permettre des conclusions plus avancées. Ces tests montrent cependant que des perspectives d'adaptation des formules aux conditions et aux environnements des façades maritimes françaises sont envisageables. Ainsi, les volumes définis par la formule des 540ft² de FEMA pourraient être adaptée aux conditions et aux dunes françaises. De même, un travail sur les paramètres utilisés dans la formule DUROS+ (Tableau 6) pourrait permettre d'adapter la méthode aux caractéristiques des tempêtes et des environnements français. Enfin, les autres formules présentées dans le chapitre 5 mériteraient aussi d'être testées, à condition de pouvoir renseigner les paramètres de façon suffisamment précise, et notamment les paramètres liés aux vagues.

7. PISTES DE TRAVAIL POUR LA RÉALISATION DES PPRL

7.1. PROPOSITION D'UNE MÉTHODE VISANT À ÉVALUER LE REcul MAXIMAL (LMAX)

Devant la complexité des processus et phénomènes qui conditionnent le recul maximal instantané du front dunaire lors d'une tempête, la variabilité des valeurs de ce recul et l'hétérogénéité de notre connaissance, il nous paraît utile de proposer une méthode visant à rationaliser et à guider la démarche d'évaluation du LMax. Elle s'intègre dans la démarche générale en 2 phases du guide méthodologique pour les PPRL (MEDDE, 2013) car elle nécessite une analyse du fonctionnement du littoral (MEDDE, fascicule spécifique à paraître) et un travail de caractérisation de l'aléa (phase 2 du guide). De plus, cette approche se situe en amont de la méthode d'analyse des défaillances des cordons dunaires proposés par le guide dans le cadre de la caractérisation de l'aléa de submersion.

Cette méthode est décomposée en 6 étapes qui sont partiellement séquentielles (Figure 85) :

- phase 1 : état des lieux et des connaissances sur le secteur considéré. Cette phase d'inventaire et de collecte de données consiste également à remplir une grille d'analyse de l'environnement dunaire. En fonction des données disponibles, elle peut permettre une première approche de la valeur LMax du secteur ;
- phase 2 : identification des manques de données et de connaissances sur le secteur ;
- phase 3 : si un manque de données ou de connaissances est identifié, lancer les nouvelles acquisitions de données (mesure, suivi temporel etc.), permettant de compléter la grille d'évaluation, sinon la phase 4 est lancée ;
- phase 4 : choix de la méthode et du modèle d'évaluation du LMax le plus adapté au site ;
- phase 5 : calcul du LMax ;
- phase 6 : validation du LMax à l'aide de la connaissance et des données que l'on a sur le site. Si les résultats ne semblent pas valides, on relance la phase de choix de la méthode, ou d'identification des manques de connaissance.

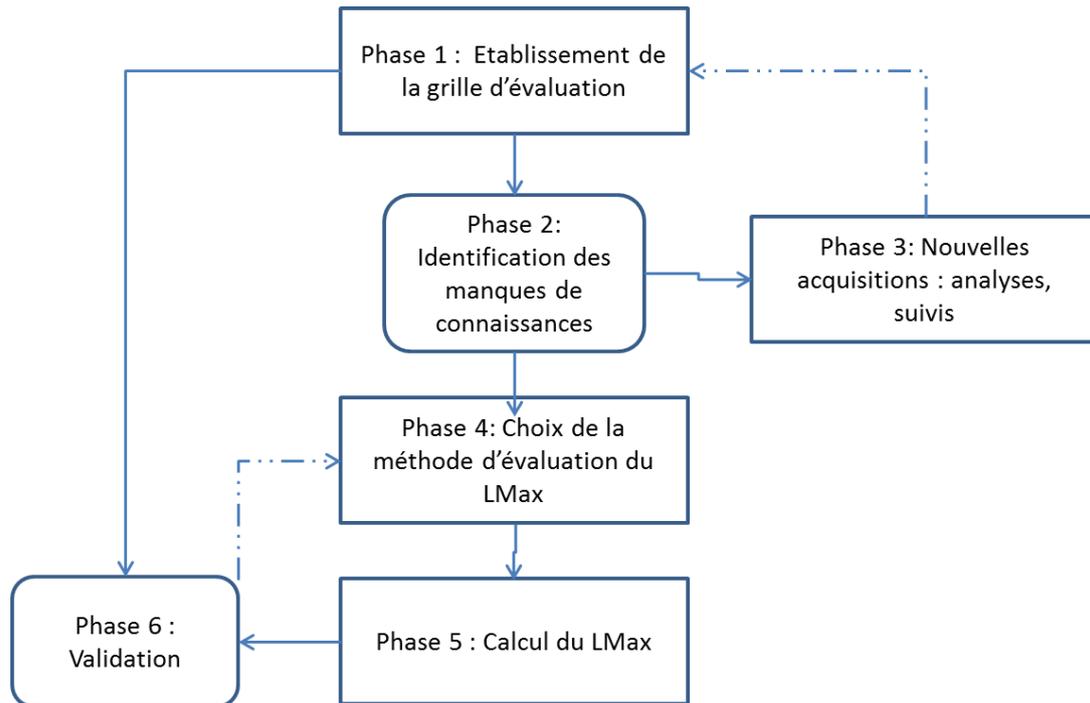


Figure 85 : Étapes de travail pour estimer et établir le LMax.

La suite de ce chapitre détaille les éléments nécessaires à la phase d'état des lieux des connaissances. La méthode est ensuite illustrée et détaillée grâce à trois cas d'environnements dunaires de sensibilité différente à l'érosion.

7.2. ANALYSE PRÉALABLE DES ENVIRONNEMENTS DUNAIRES DANS LE CADRE D'UNE ÉTUDE DE L'ALÉA ÉROSION

En fonction de la diversité des environnements dunaires, des outils disponibles et de l'état de la connaissance, les moyens à employer pour établir l'aléa d'érosion dunaire et l'estimation du recul maximal peuvent varier considérablement d'un site à l'autre.

Pour cadrer le contexte d'étude, différents éléments hydrodynamiques, sédimentaires et morphologiques sont à prendre en considération. Ces éléments sont décrits, puis pris en compte dans une grille d'évaluation synthétique qui a pour but de faciliter la phase de collecte de données et leur utilisation.

7.2.1. Contexte hydrodynamique

- *Niveaux d'eau extrêmes*

La connaissance des niveaux d'eau extrêmes est un élément primordial pour estimer les différents types de processus marins susceptibles d'éroder les dunes. La Figure 86 synthétise l'échelle des impacts de tempête sur la dune établie par Sallenger (2000) et présentée dans la partie 3.2.2.

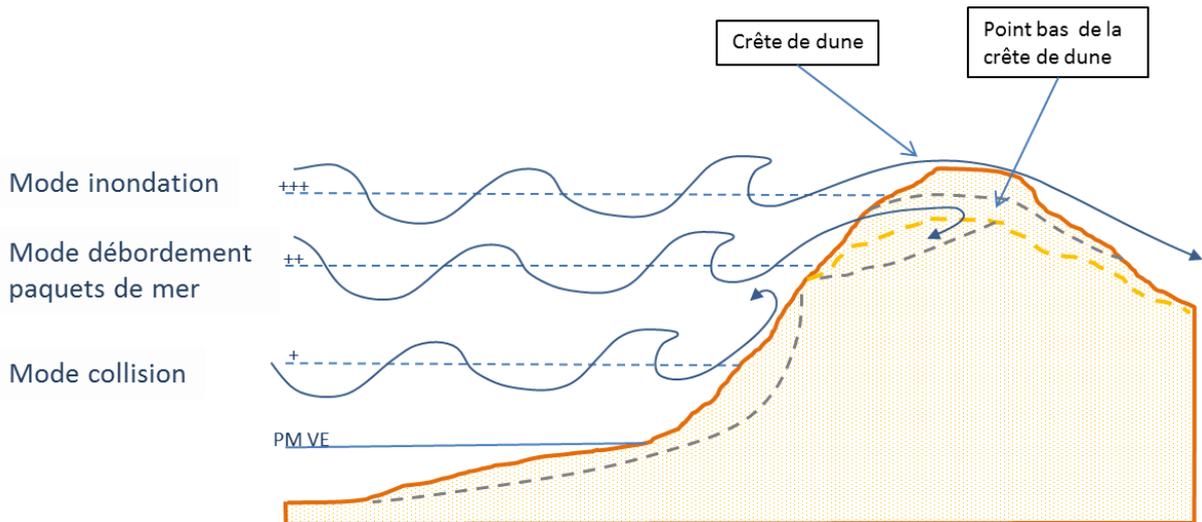


Figure 86 : Les différents modes d'érosion marine du front dunaire en fonction du niveau de la mer, des hauteurs de déferlement et de la morphologie de la dune.

Le niveau de la mer est conditionné par les caractéristiques de la tempête qui va générer une surcote atmosphérique et un important déferlement des vagues duquel dépendra une surcote liée aux vagues (*wave setup*) et l'altitude du jet de rive.

Le remplissage de la grille d'évaluation nécessite d'identifier si les niveaux d'eau de références (niveau extrêmes statiques et effets de vagues) sont connus pour la zone d'étude.

- *Marnage*

En domaine tidal, les différents processus d'érosion de la dune présentés par Sallenger (2000, Figure 87) montrent une dépendance importante avec le cycle de la marée. En effet, en fonction du cycle semi-diurne de la marée, de son coefficient et de la conjonction avec l'événement tempétueux, les modalités d'érosion du cordon dunaire seront différentes. Selon les conjonctions entre la pleine mer et le pic d'intensité de la tempête et de la surcote, les régimes d'érosion varieront : il sera ainsi possible de passer, sur un même secteur, du mode *collision* au mode *débordement par paquet de mer* voire au mode *inondation* et inversement, avec des répercussions importantes sur la valeur du recul maximal. La figure suivante montre la variabilité des régimes de marée sur les côtes métropolitaines, impliquant différentes modalités d'interactions avec les surcotes de tempête et les phénomènes d'érosion dunaire.

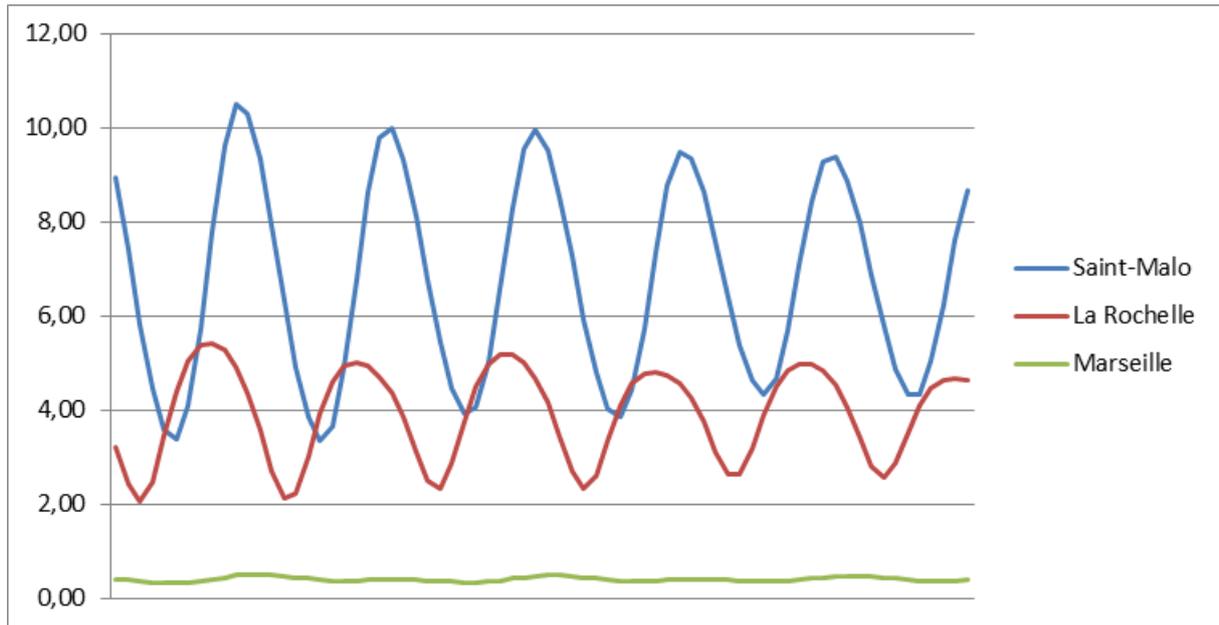


Figure 87 : Exemples de marégrammes (Saint-Malo, La Rochelle et Marseille) illustrant la variabilité du marnage sur les côtes métropolitaines.

- *Exposition aux houles*

Spécifie le niveau d'exposition aux houles de chaque segment, celui-ci pouvant varier pour un secteur soumis au même régime de vague en fonction de l'orientation de la côte par rapport au train de houles (angle d'incidence), à l'existence de hauts fonds ou d'îles au large etc. (Figure 88). L'exposition de la côte par rapport aux houles conditionnera en grande partie l'énergie des vagues à la côte et donc en grande partie le recul maximal instantané possible.

Il est nécessaire pour cela de connaître le climat de houle au large, l'orientation de la côte, la bathymétrie de l'avant plage, l'existence d'îles ou de hauts fonds en avant-plage ou au large.

L'intensité des phénomènes induits par la transformation des vagues de tempête à la côte peut également être prise en compte à ce niveau (voir partie 3.1) : turbulence liée au déferlement, courants induits, jet de rive. Ces informations sont issues de modélisation ou d'observations *in situ* des phénomènes hydrodynamiques. Les seuils entre une exposition forte, moyenne ou faible ne sont pas discutés dans ce rapport. Ils peuvent donner lieu à une évaluation à dire d'expert, en fonction des données disponibles.

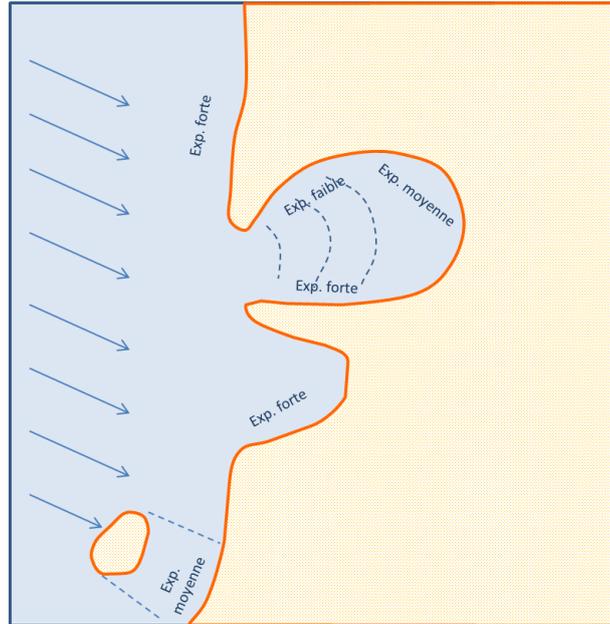


Figure 88 : Schéma illustrant la définition de l'exposition aux houles.

7.2.2. Contexte sédimentaire

- *Stock sableux d'avant plage*

Le contexte sédimentaire d'avant-plage notamment la présence d'un stock sableux plus ou moins conséquent est un paramètre à prendre en compte car ce stock sédimentaire participe à la recharge sédimentaire de la plage pendant les périodes calmes. Lors des tempêtes, le front dunaire est généralement érodé et la plage subit une érosion importante pouvant aboutir à une baisse importante de son altitude. Le sable érodé durant les tempêtes est transporté par les courants de retour en direction du large. Si le stock sableux est inexistant ou très peu important, la plage ne pourra pas se reconstituer durant les périodes d'accalmie. Ainsi, le profil de plage aura baissé, entraînant une moindre protection du front dunaire contre les vagues qui viendront plus facilement l'attaquer. Il est donc nécessaire de prendre en compte cet aspect dans la typologie des dunes.

Le stock sableux d'avant-plage permet d'évaluer les possibilités de récupération de la côte suite à un événement érosif affectant la plage et le cordon dunaire. Sa caractérisation n'est pas simple et requiert des cartes sédimentologiques de l'avant plage, des sondages et des données de géophysique (sismique par exemple).

- *Tendance d'évolution du trait de côte à long terme*

L'analyse de l'évolution à long terme, c'est-à-dire à l'échelle de plusieurs décennies, renseigne sur les processus dominants affectant le segment (érosion, stabilité, accrétion). Elle fournit aussi des informations sur la variabilité des processus au cours de cette évolution (enchaînement de périodes d'érosion avec des périodes d'accrétion ou érosion chronique par exemple). Ce paramètre nécessitera, pour être renseigné d'avoir au moins accès à une cartographie diachronique du trait de côte et cela à plusieurs dates couvrant plusieurs décennies.

7.2.3. Morphologie

Les dunes sur le littoral métropolitain possèdent des morphologies très variées, certaines sont plutôt basses, ne possèdent qu'un seul cordon dunaire coté plage alors que d'autres peuvent présenter plusieurs cordons successifs (du littoral vers les terres), d'altitude et de continuités variables, ou formées des champs de dunes individuelles (dunes paraboliques, barkhanes...). Un environnement littoral dunaire formé par un seul cordon de dune sera plus vulnérable et moins résilient à l'érosion qu'un large système dunaire constitué de plusieurs cordons successifs. Dans ce dernier cas, le stock sableux terrestre est beaucoup plus important et permet à la dune de mieux se reconstituer après l'événement érosif.

Ces différences d'organisation macroscopique et d'emprise du système dunaire résultent d'une part :

- de leur histoire c'est-à-dire des conditions passées qui ont permis l'établissement et le développement dunaire qu'il s'agisse de conditions climatiques ou anthropiques ;
- de processus plus récents qui ont pu modifier la dynamique éolienne ou aboutir à la réduction, à l'érosion ou à la destruction partielle et locale du système dunaire.

- *Cordon dunaire externe*

Cordon dunaire simple : Spécifie si la dune est composée d'une seule rangée de dune ou bien s'il s'agit d'un massif dunaire composé de plusieurs rangées de dunes.

- Hauteur / niveau d'eau de référence

Spécifie si l'altitude du cordon dunaire externe est largement supérieure à un niveau d'eau de référence. Celui-ci correspond au niveau de la mer (marée+surcote+setup) pour un événement de référence (centennal par exemple). Pour l'exemple, on considérera que le cordon est relativement haut si lors de l'événement de référence, malgré l'élévation du niveau de la mer au niveau du rivage, il n'y a pas de mode par débordement (Figure 89) possible. Le critère de hauteur est donc relatif à un événement dont la période de retour est définie. Les données utiles pour renseigner ce paramètre sont un MNT (modèle numérique de terrain), un événement de référence avec le niveau d'eau associé (marée + surcote + setup) et les vagues à la côte.

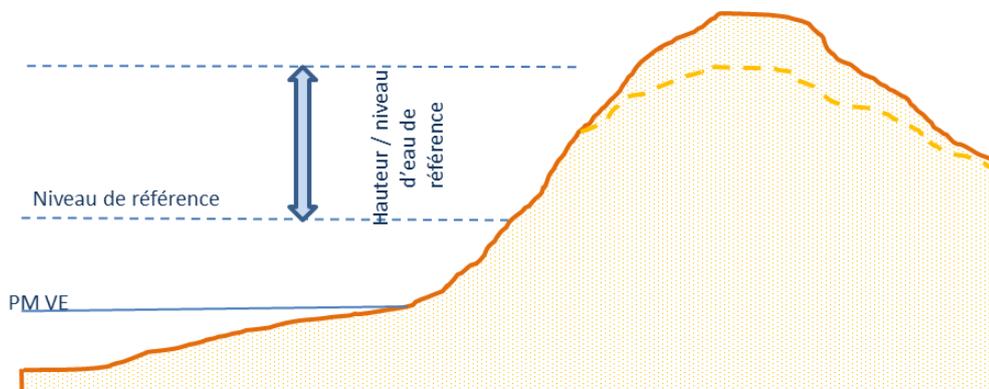


Figure 89 : Schéma illustrant la définition de la hauteur d'un cordon dunaire par rapport à un niveau d'eau de référence.

- Continuité de la crête dunaire parallèlement à la côte / niveau d'eau de référence

Ce paramètre spécifie, pour un niveau d'eau de référence, si la crête du cordon externe est continue ou discontinue. On parlera de cordon discontinu si certains secteurs de la crête du cordon sont à une altitude inférieure ou égale à celle du niveau de référence (Figure 90, (b)) et de cordon continu dans le cas inverse (Figure 90, (a)). Les données utiles pour la détermination de cet indicateur sont : des mesures topographiques, des niveaux d'eau de référence et des vagues à la côte.

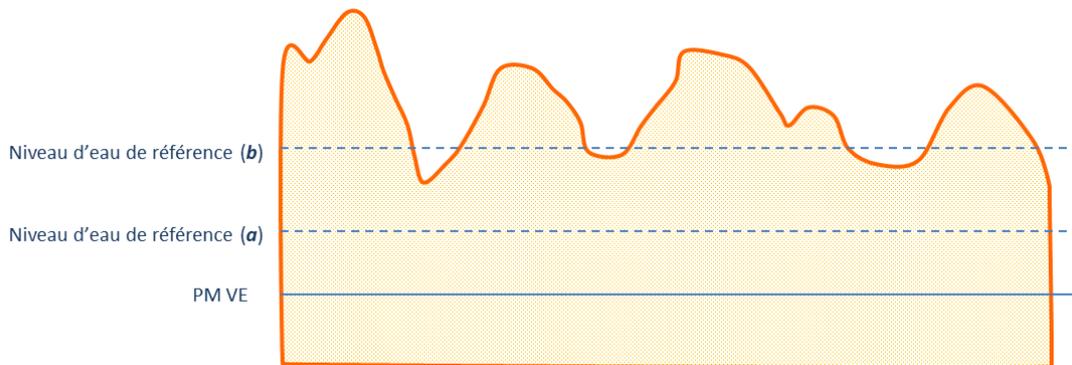


Figure 90 : Schéma illustrant la définition de la continuité longshore de la crête dunaire du cordon externe par rapport à un niveau de référence (a) Cordon continu, (b) cordon discontinu.

- Morphologie du front dunaire

Ce paramètre descriptif correspond à l'état du flanc externe du cordon (côté mer) à la date de la réalisation de l'étude. Comme présenté dans la Figure 3 (pour la côte aquitaine) et la Figure 91, il évolue dans le temps en fonction du contexte local (tendance à l'accrétion ou érosion chronique). Les données utiles pour renseigner ce champ sont issues des observations de terrain éventuellement associées à des ortho-photographies.

- A : Falaise vive
- B : Falaise régularisée
- C : Falaise éolisée
- D : Banquette d'avant-dune
- E : Banquette et dunes embryonnaires

Erosion et recul instantané en fonction de la morphologie du front dunaire

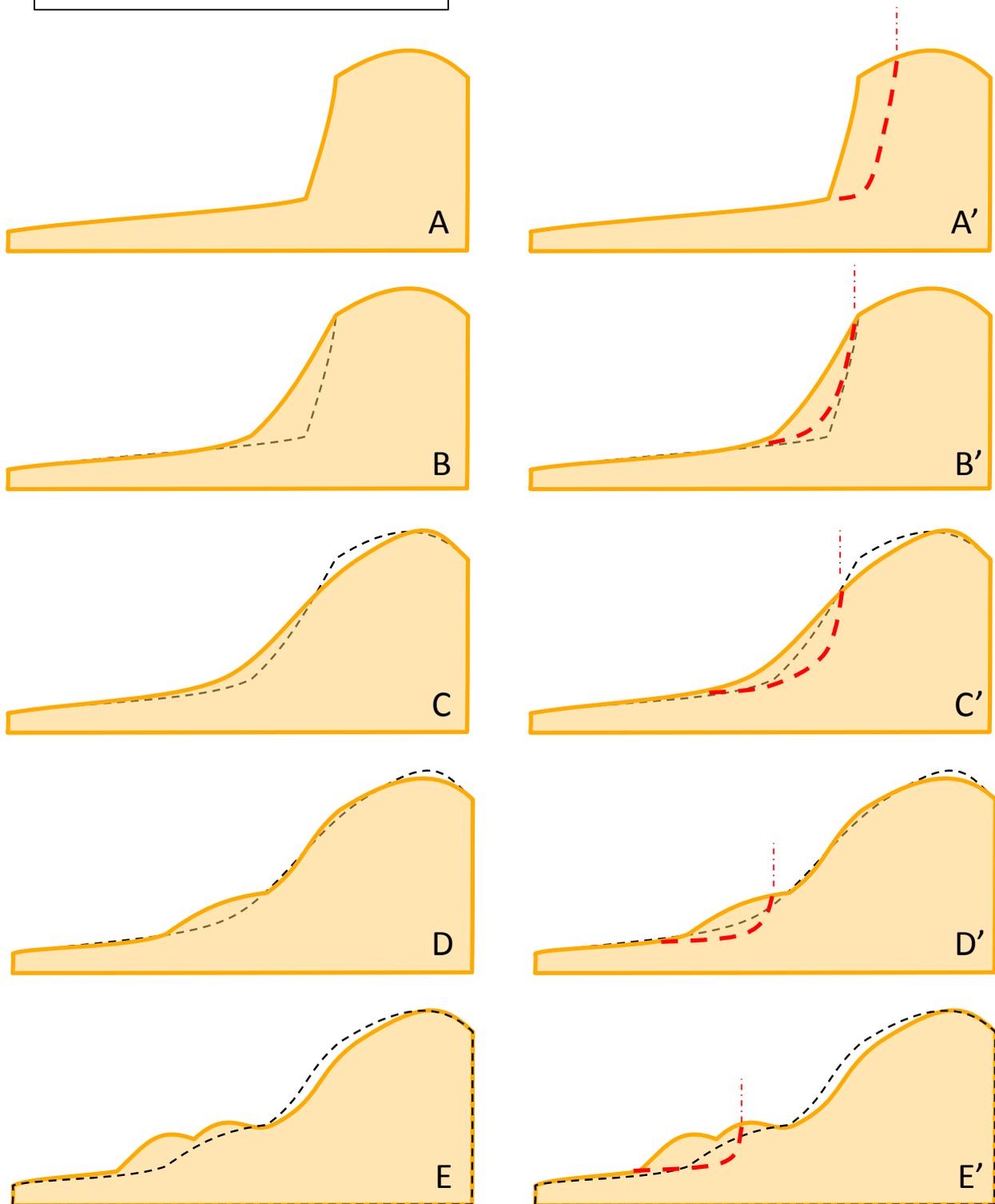


Figure 91 : Morphologies du front dunaire et évolutions.

- Largeur / recul de référence

Spécifie si la largeur du cordon dunaire externe prise à l'altitude du niveau d'eau de référence est relativement grande. La proposition d'un seuil entre une grande largeur et une faible largeur se définit par rapport au recul de référence (Figure 92). Ce type d'indicateur est un élément important de l'évaluation préalable de l'aléa érosion pour un environnement dunaire. Sa détermination nécessite la collecte d'informations sur l'érosion régulière, les forts reculs instantanés de la dune lors des tempêtes. Ces données sont à coupler avec les informations de niveau d'eau et un MNT (données topographiques). Le choix d'un seuil n'est pas discuté dans ce rapport. Faute de données ou d'informations suffisamment précises, une évaluation à dire d'expert est envisageable pour qualifier la largeur de la dune à ce stade d'analyse préalable.

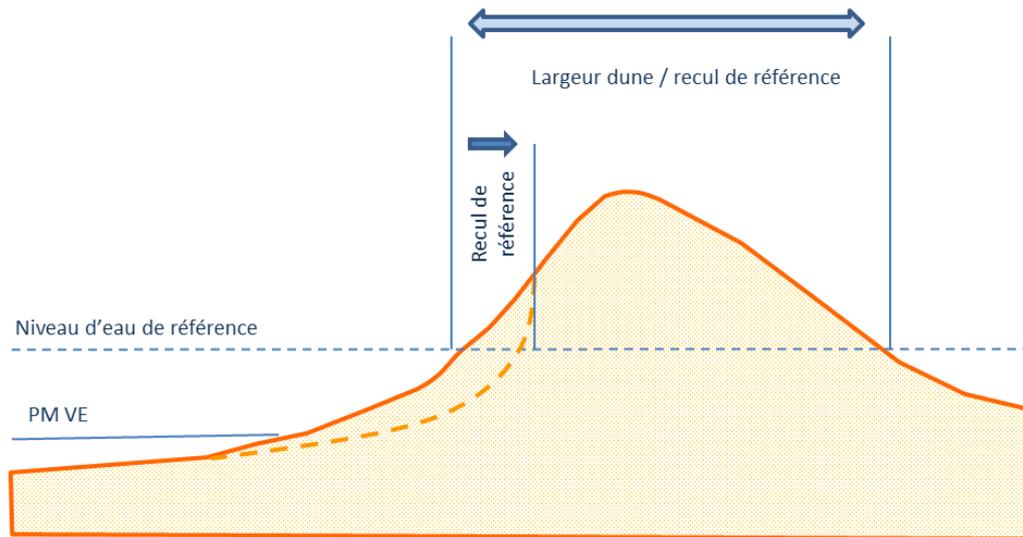


Figure 92 : Schéma illustrant la définition de la largeur du cordon / recul de référence.

- *Massif dunaire*

Les champs suivants ne seront renseignés que dans le cas où le champ dunaire n'est pas composé d'un unique cordon.

- Hauteur / niveau d'eau de référence

Spécifie si l'altitude du massif dunaire est largement supérieure à un niveau d'eau de référence. On pourra considérer que le massif dunaire est « relativement haut » si lors de l'événement de référence, malgré l'élévation du niveau de la mer au niveau du rivage, le mode « érosion par l'effet des débordements de paquets de mer » est impossible (Figure 93). Les données utiles pour renseigner ce paramètre sont un événement de référence avec le niveau d'eau associé (marée + surcote + setup) et la hauteur du jet de rive atteint par les vagues.

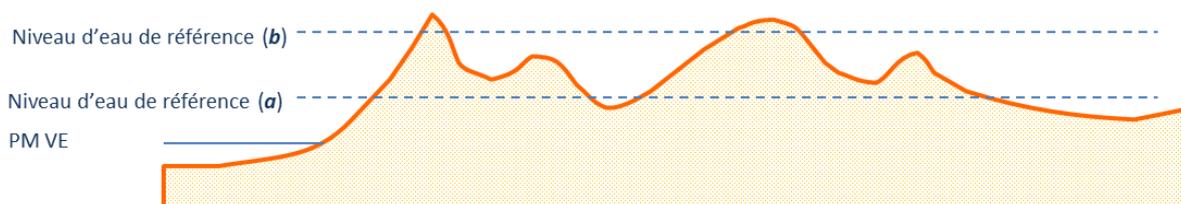


Figure 93 : Schéma illustrant la définition de la hauteur d'un massif dunaire par rapport à différents niveaux de référence (a) Massif dunaire « haut », (b) Massif dunaire « bas ».

- Largeur / recul de référence

Spécifie si la largeur du massif dunaire prise à l'altitude du niveau d'eau de référence est relativement grande par rapport au recul de référence (concept identique à celui de la Figure 92 mais appliqué à un massif dunaire). Les données nécessaires comprennent un MNT, des niveaux référence du plan d'eau et des vagues, et des données de recul dunaire de référence.

- Continuité des structures (dunaires) / niveau de référence

On parlera de discontinuité si le massif dunaire présente des zones dont l'altitude est inférieure à celle du niveau d'eau de référence ; si toutes les altitudes du massif dunaire sont au-dessus du niveau de référence, le massif sera considéré comme continu (Figure 94). Les données utiles pour renseigner ce paramètre sont un MNT LIDAR et le niveau d'eau de référence.

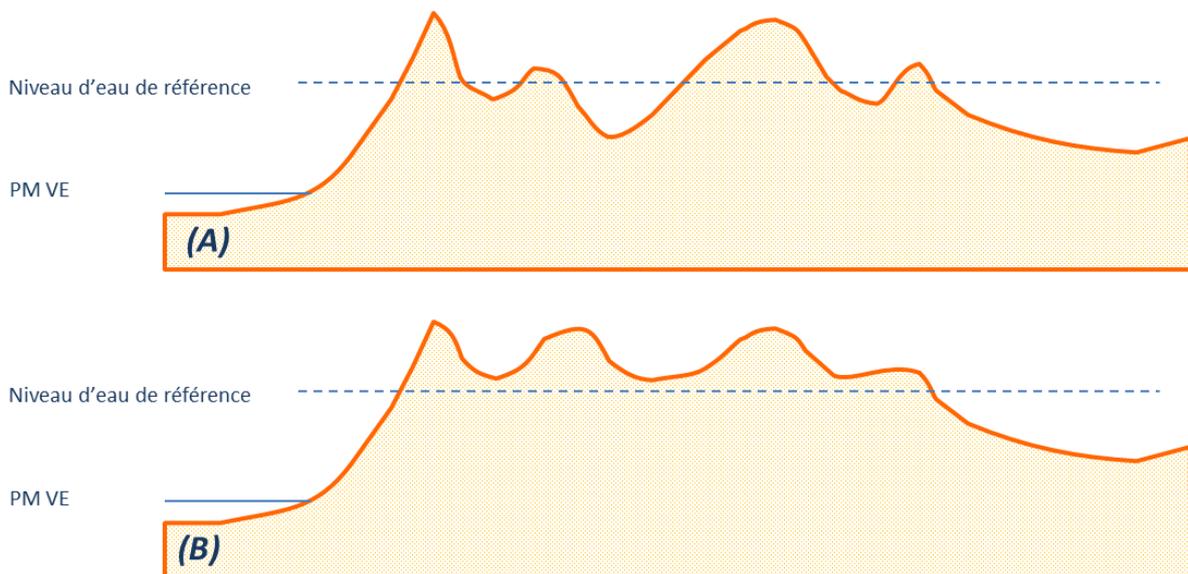


Figure 94 : Schéma illustrant la définition de la continuité des massifs dunaires pour un même niveau de référence (A) Massif dunaire discontinu, (B) Massif dunaire continu.

- *Caractérisation de l'arrière-pays*

Nous distinguons trois types d'arrière-pays :

- des zones relativement basses c'est-à-dire des zones dont l'altitude moyenne est inférieure à celle du niveau d'eau de référence ;
- des étendues d'eau (lagunes et étangs) qui occupent généralement des zones basses ;
- des zones relativement hautes, c'est-à-dire d'altitudes supérieures à celle du niveau d'eau de référence.

Les données utiles sont un MNT, le niveau d'eau de référence, une base de données géo-référencées d'occupation du sol ou des ortho-photo actuelles.

7.2.4. Anthropisation

- *Protection de dune*
- Ouvrages en dur (hard ingénierie)

Spécifie l'existence d'ouvrages visant soit à fixer le littoral (lutte contre l'érosion) soit à diminuer l'aléa submersion marine (digues etc.). Ces ouvrages modifient localement le recul instantané par la protection directe qu'ils opèrent sur la plage et le pied de dune en modifiant les processus hydro-sédimentaires « *cross shore* » mais aussi parfois parce qu'ils affectent les processus *longshore* (transit de sédiment par la dérive littorale).

- Actions de remédiation (soft ingénierie)

Cet item permet de considérer l'existence d'action de remédiation de l'état des dunes (recréation de massifs dunaires) ou de leur fonctionnement (fixation par des végétaux, piégeage de sables éoliens par ganivelles...). Ces actions contribuent à, au moins, maintenir les morphologies voir à augmenter le stock sableux et le volume des cordons dunaires.

- Actions intermédiaires

Ce type correspond aux actions de « restauration » des plages par rechargement en sable. Ce rechargement, en modifiant le profil des plages et le stock sédimentaire, contribue à modifier pendant un certain temps le recul maximal potentiel.

Pour tous les types d'actions anthropiques, il est nécessaire d'avoir accès à une base de données géo-référencées sur les ouvrages ainsi que sur les actions en cours et passées. La connaissance des dates de mise en place des ouvrages et de leur éventuelle évolution temporelle (renforcement, rehaussement...) est aussi nécessaire d'une part pour mieux évaluer leurs rôles dans les processus d'érosion mais aussi pour mieux interpréter les évolutions passées du trait de côte et des morphologies dunaires.

- *Bâti et aménagements*

Spécifie l'existence d'aménagements ou de bâtiments côtiers dont l'objectif n'est pas la lutte contre l'érosion ou la submersion marine, mais dont la présence modifie le fonctionnement sédimentaire cross-shore et donc le comportement du segment. Par ailleurs ces aménagements et ce bâti côtier constituent des enjeux qui sont exposés aux processus d'érosion du cordon sableux. Nous avons donc distingué les bâtiments et aménagements qui sont soit implantés directement sur le massif dunaire, soit en arrière de la dune.

Les données nécessaires sont des bases de données géo-référencées à haute résolution du bâti (type BD TOPO) et de l'occupation du sol ainsi qu'une base de données sur les ouvrages.

7.2.5. Proposition d'une grille d'analyse préalable

Pour faciliter l'étude de l'environnement dunaire et la prise en compte de l'ensemble des éléments d'évaluations mentionnés précédemment, une grille de travail est proposée (Tableau 13).

Cette grille organise les éléments de la collecte d'information en 3 familles principales : contexte, morphologie, anthropisation. Chaque famille présente des caractéristiques qui doivent être renseignées par des attributs. Les données utiles pour renseigner les différents éléments sont mentionnées dans le Tableau 13. Une fois complétée, cette grille propose une vision synthétique des caractéristiques de l'environnement dunaire face à l'érosion et fournit des indications sur les données et éléments manquants.

<i>Familles</i>	<i>Sous familles</i>	<i>Caractéristiques</i>	<i>Attributs</i>	<i>Etat</i>	<i>Données utiles</i>
Contexte	Hydro	Marnage	<i>Microtidal</i>	<input type="checkbox"/>	Données de marnage local
			<i>Mésotidal</i>	<input type="checkbox"/>	
			<i>Macrotidal</i>	<input type="checkbox"/>	
		Exposition aux houles	<i>Faible</i>	<input type="checkbox"/>	Climat de vagues au large du site, MNT bathymétrique, cartographie
			<i>Moyenne</i>	<input type="checkbox"/>	
			<i>Forte</i>	<input type="checkbox"/>	
	Sédimentaire	Stock sableux avant-plage	<i>Faible</i>	<input type="checkbox"/>	Données cartographiques, MNT bathymétrique, sondages, géophysique
			<i>Conforme</i>	<input type="checkbox"/>	
			<i>Elevé</i>	<input type="checkbox"/>	
		Tendance évolution TC long terme	<i>Erosion</i>	<input type="checkbox"/>	Cartographie de l'évolution historique du TC
<i>Stable</i>	<input type="checkbox"/>				
<i>Accrétion</i>	<input type="checkbox"/>				
Morphologie	Cordon dunaire externe	cordon simple	<i>Oui</i>	<input type="checkbox"/>	MNT, cartes, photo aériennes
			<i>Non</i>	<input type="checkbox"/>	
		Hauteur / niv d'eau de Ref	<i>Haut</i>	<input type="checkbox"/>	MNT topo-bathymétrique, niveaux de référence et vagues
			<i>Bas</i>	<input type="checkbox"/>	
		Largeur / Recul Ref	<i>Large</i>	<input type="checkbox"/>	MNT, niveaux de référence, vagues, données de recul régulier et instantané
			<i>Etroit</i>	<input type="checkbox"/>	
		Continuité <i>longshore</i> / Niv d'eau de Ref	<i>Continu</i>	<input type="checkbox"/>	MNT, niveaux de référence et vagues
			<i>Discontinu</i>	<input type="checkbox"/>	
		Morphologie front dunaire	<i>Falaise vive</i>	<input type="checkbox"/>	Données d'observation de terrain, orthophoto
			<i>Falaise régularisée</i>	<input type="checkbox"/>	
	<i>Falaise éolisée</i>		<input type="checkbox"/>		
	<i>Banquette</i>		<input type="checkbox"/>		
	<i>Dune embryonnaire</i>		<input type="checkbox"/>		
	Massif dunaire (si cordon simple = false)	Hauteur / Niv d'eau de Ref	<i>Haut</i>	<input type="checkbox"/>	MNT, niveaux de référence et vagues
			<i>Bas</i>	<input type="checkbox"/>	
		Largeur / Recul Ref	<i>Large</i>	<input type="checkbox"/>	MNT, niveaux de référence, vagues, données de recul régulier et instantané
			<i>Etroit</i>	<input type="checkbox"/>	
		Continuité des structures / Niv d'eau de Ref	<i>Continu</i>	<input type="checkbox"/>	MNT, niveaux de référence et vagues
			<i>Discontinu</i>	<input type="checkbox"/>	
	Arrière-pays	altitude / Niv d'eau de Ref	<i>zone basse</i>	<input type="checkbox"/>	MNT, niveaux de référence, vagues, orthophoto ou BDD occupation du sol
			<i>lagune / étang</i>	<input type="checkbox"/>	
			<i>non basse</i>	<input type="checkbox"/>	
Anthropisation	Protection dune	Hard	<i>Enrochement pied</i>	<input type="checkbox"/>	Base de données géoréférencées sur les ouvrages (attribut descriptif, date de mise en place...)
			<i>Epis</i>	<input type="checkbox"/>	
			<i>Brise-lames</i>	<input type="checkbox"/>	
		Soft	<i>Ganivelles</i>	<input type="checkbox"/>	Base de données géoréférencées sur les ouvrages et sur les actions de remédiation engagées
			<i>Végétalisation</i>	<input type="checkbox"/>	
		Mixtes	<i>Rechargement plage</i>	<input type="checkbox"/>	Base de données géoréférencées sur les actions de remédiation engagées
	<i>Reconstruction dune</i>		<input type="checkbox"/>		
	Bâti	Bâtiments / Infrastructure	<i>Urbain dense</i>	<input type="checkbox"/>	Base de données géoréférencées du bâti et de l'occupation du sol
			<i>Lotissements</i>	<input type="checkbox"/>	
		Autre ?	<i>Autre ?</i>	<input type="checkbox"/>	
Localisation		<i>En arrière dune</i>	<input type="checkbox"/>		
	<i>Sur la dune</i>	<input type="checkbox"/>			

Tableau 13 : Proposition d'une grille d'évaluation du contexte environnemental d'un secteur dunaire.

À l'issue de la phase d'analyse préalable de l'environnement, le remplissage de la grille permet d'identifier a priori une certaine sensibilité des dunes à l'érosion et aux forts reculs instantanés. Le Tableau 14 distingue les attributs qui marquent une sensibilité moyenne (cases jaunes) ou forte (cases oranges). Il permet de distinguer un premier niveau de typologie des environnements composés de dunes peu sensibles, sensibles ou très sensibles à l'érosion et / ou au recul instantané.

Logiquement, les dunes identifiées comme « basses » et / ou « étroites » présentent une forte sensibilité. La présence de bâti sur la dune ou la connaissance de phase de reconstruction de la dune sont également un critère de sensibilité importante.

D'autres éléments comme une forte exposition aux houles, un faible stock sédimentaire, une tendance érosive de la côte, la présence de discontinuité dans la crête, un front dunaire marqué par une falaise, la connaissance d'action de rechargement de plage, la présence de zones basses, d'étang et / ou d'urbanisation dans l'arrière-pays, sont des indicateurs d'une certaine sensibilité de l'environnement à l'érosion dunaire.

Le cas des ouvrages de protection « en dur » n'est pas abordé, car il nécessite un diagnostic sur les effets positifs ou négatifs des ouvrages en place.

Familles	Sous familles	Caractéristiques	Attributs	Etat	Données utiles
Contexte	Hydro	Marnage	Microtidal	<input type="checkbox"/>	Données de marnage local
			Mésotidal	<input type="checkbox"/>	
			Macrotidal	<input type="checkbox"/>	
	Exposition aux houles	Faible	<input type="checkbox"/>	Climat de vagues au large du site, MNT bathymétrique, cartographie	
		Moyenne	<input type="checkbox"/>		
		Forte	<input type="checkbox"/>		
	Sédimentaire	Stock sableux avant-plage	Faible	<input type="checkbox"/>	Données cartographiques, MNT bathymétrique, sondages, géophysique
			Conforme	<input type="checkbox"/>	
Elevé			<input type="checkbox"/>		
Tendance évolution TC long terme		Erosion	<input type="checkbox"/>	Cartographie de l'évolution historique du TC	
	Stable	<input type="checkbox"/>			
	Accrétion	<input type="checkbox"/>			
Morphologie	Cordon dunaire externe	cordon simple	Oui	<input type="checkbox"/>	MNT, cartes, photo aériennes
			Non	<input type="checkbox"/>	
		Hauteur / niv d'eau de Ref	Haut	<input type="checkbox"/>	MNT topo-bathymétrique, niveaux de référence et vagues
			Bas	<input type="checkbox"/>	
		Largeur / Recul Ref	Large	<input type="checkbox"/>	MNT, niveaux de référence, vagues, données de recul régulier et instantané
	Etroit		<input type="checkbox"/>		
	Continuité longshore / Niv d'eau de Ref	Continu	<input type="checkbox"/>	MNT, niveaux de référence et vagues	
		Discontinu	<input type="checkbox"/>		
	Morphologie front dunaire	Falaise vive	<input type="checkbox"/>	Données d'observation de terrain, orthophoto	
		Falaise régularisée	<input type="checkbox"/>		
		Falaise éolisée	<input type="checkbox"/>		
		Banquette	<input type="checkbox"/>		
		Dune embryonnaire	<input type="checkbox"/>		
	Massif dunaire (si cordon simple = false)	Hauteur / Niv d'eau de Ref	Haut	<input type="checkbox"/>	MNT, niveaux de référence et vagues
Bas			<input type="checkbox"/>		
Largeur / Recul Ref		Large	<input type="checkbox"/>	MNT, niveaux de référence, vagues, données de recul régulier et instantané	
	Etroit	<input type="checkbox"/>			
Continuité des structures / Niv d'eau de Ref	Continu	<input type="checkbox"/>	MNT, niveaux de référence et vagues		
	Discontinu	<input type="checkbox"/>			
Arrière-pays	altitude / Niv d'eau de Ref	zone basse	<input type="checkbox"/>	MNT, niveaux de référence, vagues, orthophoto ou BDD occupation du sol	
		lagune / étang	<input type="checkbox"/>		
		non basse	<input type="checkbox"/>		
Anthropisation	Protection dune	Hard	Enrochement pied	<input type="checkbox"/>	Base de données géoréférencées sur les ouvrages (attribut descriptif, date de mise en place...)
			Epis	<input type="checkbox"/>	
			Brise-lames	<input type="checkbox"/>	
	Soft	Ganivelles	<input type="checkbox"/>	Base de données géoréférencées sur les ouvrages et sur les actions de remédiation engagées	
		Végétalisation	<input type="checkbox"/>		
	Mixtes	Rechargement plage	<input type="checkbox"/>	Base de données géoréférencées sur les actions de remédiation engagées	
		Reconstruction dune	<input type="checkbox"/>		
Bâti	Bâtiments / Infrastructure	Urbain dense	<input type="checkbox"/>	Base de données géoréférencées du bâti et de l'occupation du sol	
		Lotissements	<input type="checkbox"/>		
	Autre ?	Autre ?	<input type="checkbox"/>		
Localisation	En arrière dune	<input type="checkbox"/>			
	Sur la dune	<input type="checkbox"/>			

Tableau 14 : Éléments de la grille d'évaluation marquant une certaine sensibilité (en jaune) ou une forte sensibilité (en orange) des dunes à l'érosion.

7.3. DESCRIPTION DE LA MÉTHODE POUR TROIS CLASSES DE DUNES

Les travaux menés pour la mise au point d'une grille d'évaluation des environnements dunaires permettent de distinguer assez simplement trois grandes classes : les zones peu sensibles, sensibles ou très sensibles à l'érosion et au recul instantané des dunes.

Pour chacune de ces classes, l'emploi de la méthode de détermination du recul L_{max} est décrit au travers de logigrammes qui détaillent les différentes étapes (Figure 85) et des scénarios de travail envisageables. Le choix de la méthode d'estimation du L_{max} est l'élément central de la construction des scénarios. Ces tests se basent sur les trois principales méthodes décrites dans ce rapport :

- mesures et observations ;
- formules empiriques ;
- modèles numériques.

7.3.1. Cas d'un environnement dunaire peu sensible

Phase 1 : L'état des lieux et des connaissances permet de renseigner la grille d'évaluation. Cette grille n'identifie aucun des éléments sensibles présentés dans le Tableau 14. L'environnement dunaire est considéré comme peu sensible.

Phase 2 : Cette étape permet d'identifier les manques de connaissance. S'il n'existe pas d'observation de recul dunaire sur le secteur, il convient d'identifier si les données utilisées dans les formules empiriques sont disponibles.

Phase 3 : Nouvelles acquisitions. Dans le cas de dunes peu sensibles, il ne semble pas nécessaire d'acquérir spécifiquement des observations de recul dunaire. En revanche, si les données utiles à l'utilisation de formules empiriques simples n'ont pas été recueillies lors de l'état des lieux (phase 1), le travail de cette troisième étape doit permettre d'y parvenir. Pour ce type de dunes, il faudrait privilégier l'utilisation de données préexistantes. Si les données utiles aux formules empiriques n'existent pas, il faut de préférence privilégier l'acquisition d'observations du recul dunaire.

Phase 4 : Cette étape a pour but de choisir la méthode d'estimation du L_{Max} . S'il existe des observations de forts reculs dunaires sur la zone, elles peuvent être utilisées pour déterminer le L_{max} . Si ces observations n'existent pas, une ou des formules empiriques simples peuvent être employées.

Phase 5 : Détermination du L_{max} . Les méthodes définies à l'étape 4 fournissent des estimations. Un travail spécifique sur les marges d'erreur doit être réalisé conjointement.

L'ensemble de ces étapes est synthétisé dans la Figure 95.

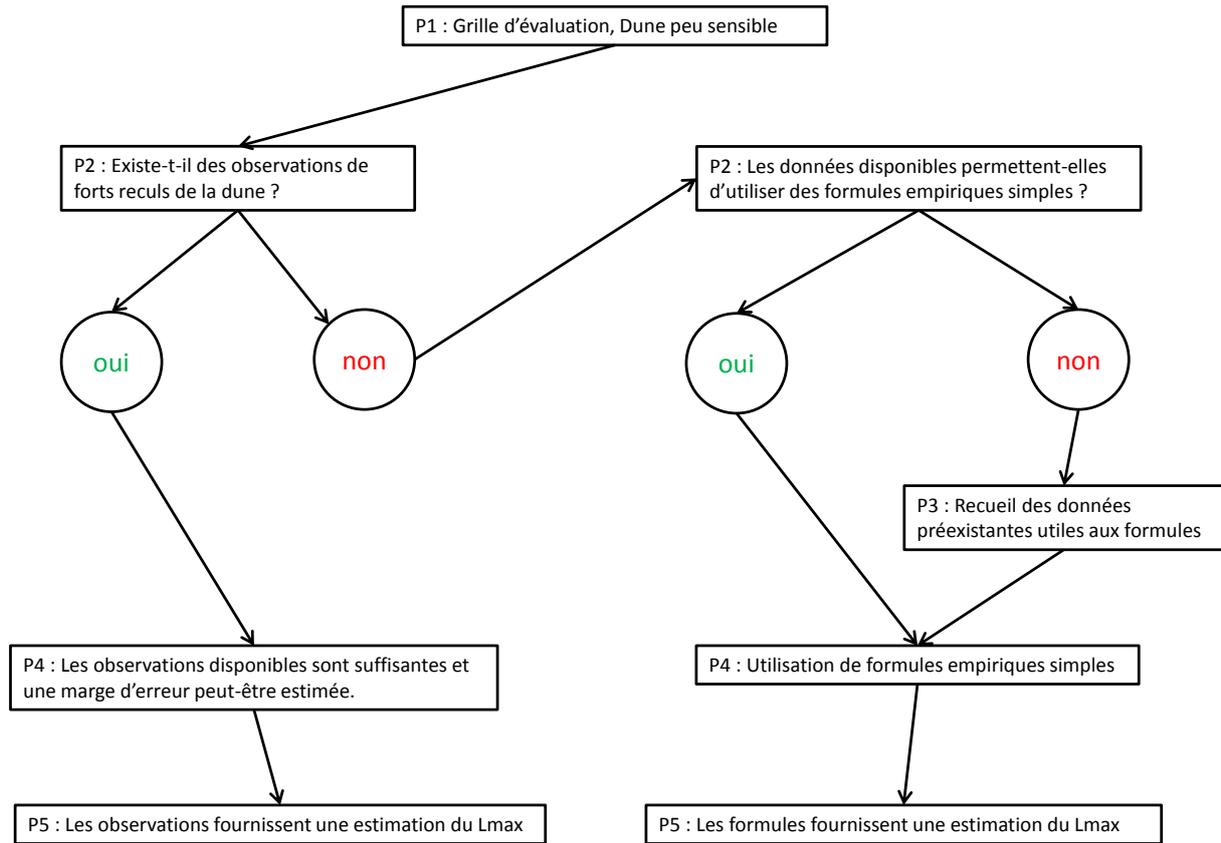


Figure 95 : Méthode de détermination du Lmax, logigramme pour des dunes peu sensibles à l'érosion.

7.3.2. Cas d'un environnement dunaire sensible

Phase 1 : L'état des lieux et des connaissances permet de renseigner la grille d'évaluation. Cette grille identifie un ou des éléments sensibles présentés dans le Tableau 14. L'environnement dunaire est considéré comme sensible.

Phase 2 : Cette étape permet d'identifier les manques de connaissance. S'il existe des observations de forts reculs dunaires sur le secteur, il faut analyser la qualité de ces données. S'il n'existe pas d'observation ou si la qualité des données disponibles n'est pas satisfaisante, il est nécessaire d'envisager la possibilité d'acquérir des observations de recul dunaire de qualité. S'il n'est pas possible d'acquérir ces données, il convient alors d'identifier si les données utilisées dans les formules empiriques ou les modèles numériques sont disponibles.

Phase 3 : Nouvelles acquisitions. Dans le cas de dunes sensibles, il est nécessaire de disposer de mesures de recul dunaire de qualité. S'il n'est vraiment pas possible d'utiliser et d'acquérir ce type de données, il faut pouvoir utiliser les formules empiriques et / ou les modèles numériques adaptés à l'environnement. Si besoin, les données utiles à la mise en place des modèles ou formules, identifiées lors de la phase 2, sont acquises pendant de cette étape de travail.

Phase 4 : Cette étape a pour but de choisir la méthode d'estimation du LMax. S'il existe des observations de bonne qualité sur la zone, elles peuvent être utilisées pour déterminer le Lmax. Si ces observations n'existent pas, des formules empiriques et des modèles numériques peuvent être employés. Le test de ces outils peut s'avérer nécessaire à cette étape de travail, afin de déterminer la ou les techniques utilisables.

Phase 5 : Détermination du Lmax. Les méthodes définies à l'étape 4 fournissent des estimations. Un travail d'estimation des marges d'erreur doit être réalisé conjointement. Une discussion sur les limites d'utilisation de ces données est souhaitable pour préparer l'étape de validation (phase 6, Figure 85).

L'ensemble de ces étapes est synthétisé dans la Figure 96.

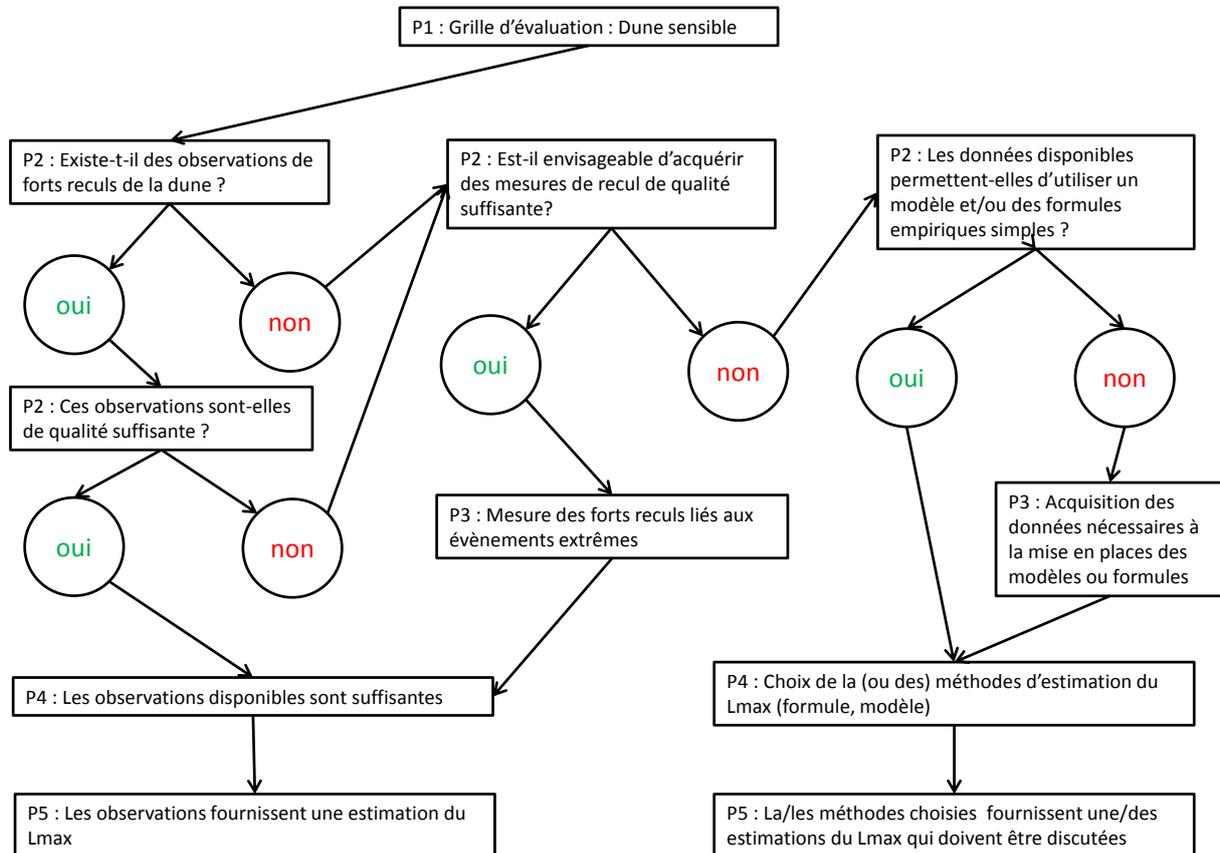


Figure 96 : Méthode de détermination du Lmax, logigramme pour des dunes sensibles à l'érosion.

7.3.3. Cas d'un environnement dunaire très sensible

Phase 1 : L'état des lieux et des connaissances permet de renseigner la grille d'évaluation. Cette grille identifie un ou des éléments sensibles et très sensibles présentés dans le Tableau 14. L'environnement dunaire est considéré comme très sensible.

Phase 2 : Cette étape permet d'identifier les manques de connaissance. S'il existe des observations de forts reculs dunaires sur le secteur, il faut s'assurer de la bonne qualité de ces données. S'il n'existe pas d'observation ou si la qualité des données disponibles n'est pas satisfaisante, il est nécessaire d'envisager toutes les possibilités d'acquérir des observations de recul dunaire. Parallèlement, il convient d'identifier si les données utilisées dans les formules empiriques ou les modèles numériques sont disponibles.

Phase 3 : Nouvelles acquisitions. Dans le cas de dunes très sensibles, il est nécessaire de disposer de mesures de recul dunaire de qualité. S'il n'est pas possible d'utiliser et d'acquérir ce type de données quantitatives, il faut tout de même pouvoir collecter et exploiter des observations qualitatives. De plus, les données utiles à la mise en place des modèles ou formules, identifiées lors de la phase 2, sont acquises pendant de cette étape de travail.

Phase 4 : Cette étape a pour but de choisir la méthode d'estimation du LMax. Dans le cas de dunes très sensibles, les observations sont nécessaires et doivent être couplées à des estimations de recul par des formules, ou mieux, par des modèles numériques. Si les données d'observation sont de très bonne qualité, l'utilisation de formules empiriques peut s'avérer suffisante. En revanche, si l'on ne dispose que d'observations qualitatives, la mise en œuvre d'un modèle numérique semble nécessaire. Le test de ces outils est important à cette étape de travail, afin de déterminer la ou les techniques les plus pertinentes.

Phase 5 : Détermination du Lmax. Les techniques choisies à l'étape 4 fournissent des estimations. Un travail de détermination des marges d'erreur doit être réalisé conjointement. La discussion sur les limites d'utilisation et les valeurs obtenues par les différentes techniques de mesures ou de modélisation est aussi nécessaire à cette étape, avant la phase de validation qui n'est pas développée dans ce rapport.

L'ensemble de ces étapes est synthétisé dans la Figure 97.

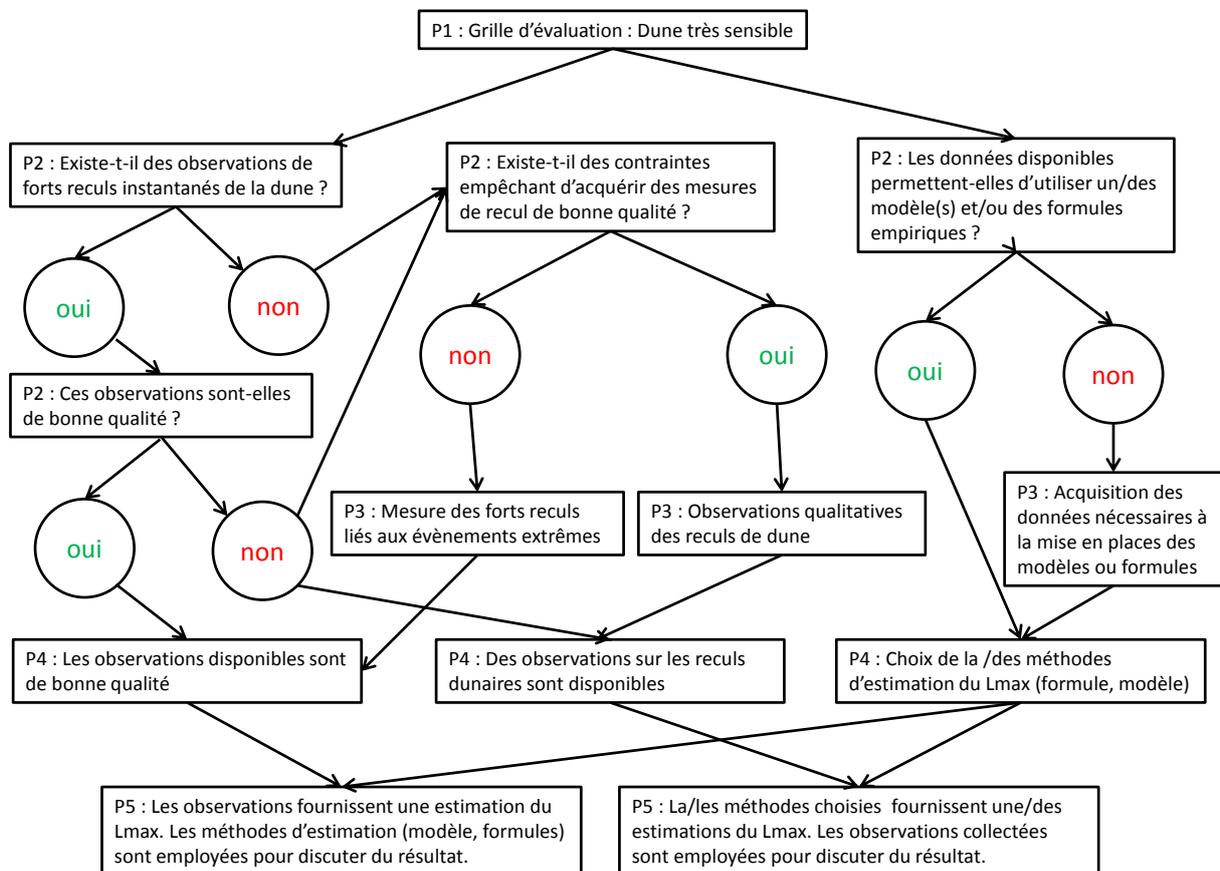


Figure 97 : Méthode de détermination du Lmax, logigramme pour des dunes très sensibles à l'érosion.

8. CONTRIBUTION À LA MISE A JOUR DU GUIDE PPRL : PROPOSITION D'UN « ENCART » SUR LE REcul DUNAIRE MAXIMAL

Le guide méthodologique pour la réalisation des Plans de Prévention des Risques Littoraux a pour objet de fournir des éléments de méthode et de cadrer les analyses et évaluations des aléas littoraux. La publication d'une version révisée de ce guide est prévue pour le début de l'année 2014. Dans ce cadre et à la demande de la DGPR, un encart traitant spécifiquement du recul maximal dunaire lors d'un événement exceptionnel a été rédigé à partir des premiers résultats de cette étude. Cet encart a été soumis à validation de la DGPR et du CEREMA (ex CETMEF) en janvier 2014. Il est repris *in extenso* dans l'annexe 1.

L'encart proposé pour le guide PPRL identifie trois approches pour évaluer le recul maximal des dunes lors d'évènements de tempête ;

- 1) observer les évolutions morpho-sédimentaires après les tempêtes et mesurer le recul et l'érosion dunaire ;
- 2) estimer et prédire le recul maximal grâce à des formules empiriques calibrées ;
- 3) estimer et prédire le recul maximal grâce à des modèles numériques.

9. CONCLUSION

Les dunes côtières et les aléas littoraux

Les dunes côtières sont des corps sédimentaires caractéristiques des côtes meubles sableuses. Dans un contexte d'érosion récurrente 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.

- 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 difficile à interpréter sur le long terme, de plus, l'impact d'un événement tempétueux majeur peut ponctuellement devenir dominant. C'est pourquoi le nouveau guide PPRL (MEDDE, à paraître) définit la largeur de la zone d'aléa à 100 ans telle que :

$$L_r = 100.T_x + L_{max} \quad \text{Équation 33}$$

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.

- 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. Dans ce dernier cas, la dune est considérée comme une structure naturelle de protection, dont l'endommagement est envisagé sous la forme d'une ruine généralisée ou selon une détérioration matérialisée par l'apparition de brèches. Dans ce rapport, les liens entre les processus de submersion, l'effet des vagues de tempête et les fortes érosions de la dune sont décrits dans le chapitre 3. De plus, il est envisageable que les méthodes d'estimation du recul maximal, inventoriées dans le chapitre 4, soient utilisées pour évaluer la fragilisation des fonctions protectrices des dunes contre les submersions marine lors des tempêtes.

- L'aléa de 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 qui n'est abordée que de façon succincte dans ce rapport (parties 3.1.4 et 3.3.1). En revanche, cette étude montre que l'effet des vagues et de la submersion lors des événements de tempête peut également provoquer d'important dépôts sableux et la migration des dunes par translation vers les terres (parties 3.3.2 et 3.3.3).

Cette étude méthodologique de détermination du recul maximal des dunes pour les événements extrêmes a été menée dans le cadre du programme de travail DGPR/BRGM 2013, en amont des volets « recul du trait de côte » des PPRL et de la mission d'intérêt général MIG-Dune menée par ONF (Office National des Forêts). Le premier objectif de ce travail était de dresser un état de l'art exhaustif des méthodes et outils existants pour évaluer le LMax.

Les observations de recul dunaire en métropole

Dans un premier temps, des mesures et des observations de recul dunaire ont été collectées dans les bases de données des observatoires et des zones d'études du BRGM. Les profils de plage de l'OCA (Observatoire de la Côte Aquitaine) et du ROL (Réseau d'Observation du Littoral Corse) ont montré différentes formes de recul dunaire : recul de l'ensemble de la falaise, érosion de l'avant-dune, translation de la dune vers les terres. Les profils permettent une observation fiable et précise du recul, celui-ci atteint 15 à 20 m dans les Landes et 10 m en Corse. Mais la répétitivité annuelle apparaît insuffisante pour attribuer un recul à un événement unique de tempête. De plus, la variabilité spatiale des dunes n'est pas prise en compte avec cette méthode. C'est pourquoi des suivis annuels du pied de dune sont pratiqués simultanément dans ces Observatoires.

Pour estimer la variabilité du recul dunaire tout au long du littoral, les orthophotographies aériennes sont aussi des outils précieux. Dans le cadre de l'Observatoire Littoral des Pays de Monts (OLPM), le recul du pied de dune a été cartographié après la tempête Xynthia de 2010 sur un linéaire côtier de près de 20 km. Les résultats montrent la variabilité des valeurs d'érosion, celle-ci apparaît majoritairement supérieure à 5 m, fréquemment de l'ordre de 10 m, et peut atteindre 20 m très ponctuellement. L'intérêt de ces données sur une grande emprise spatiale est certain, mais la précision et la cohérence des résultats (de l'ordre de 5 m) doit être vérifiée par un travail de terrain. Ainsi, le suivi de terrain post-tempête pratiqué par l'OLPM a permis d'estimer la taille des falaises d'érosion créées par Xynthia, généralement comprise entre 1 m et 3 m, elles atteignent 5 m dans les secteurs en érosion récurrente. Un suivi du littoral après la tempête Xynthia a également été mené par le BRGM sur le littoral du sud de la Vendée et de Charente-Maritime. Un recul du trait de côte a été identifié sur 52 points d'observation. La valeur moyenne du recul constatée est de l'ordre de 10 m, 4 reculs sont estimés supérieurs à 16 m, dont une observation atteignant 30 m.

Dans le Languedoc-Roussillon, les campagnes de suivi du littoral après tempête se sont systématisées grâce à l'organisation d'un « réseau tempête » qui intervient sur le terrain en fonction de condition de tempête rencontrées. De plus, le dispositif de suivi topobathymétrique et d'imagerie vidéo déployé sur le site atelier du Lido de Sète a été présenté pour montrer les moyens et les solutions techniques à mettre en œuvre pour améliorer la compréhension de l'impact des tempêtes sur les plages et les dunes.

Inventaire des méthodes d'estimation du recul dunaire

Dans un second temps, un inventaire des méthodes d'estimation a été réalisé pour compléter le chapitre sur les techniques d'observation in situ. Ces méthodes d'estimation se répartissent en trois catégories :

- les formules empiriques d'évolution du profil de plage ;
- les modèles numériques reproduisant les processus perpendiculaires à la côte, comme par exemple SBEACH, DUROSTA, UNIBEST-DE, CROSSMOR, etc ;
- les modèles numériques reproduisant les processus perpendiculaires et parallèles à la côte et plus particulièrement XBeach qui a été conçu spécifiquement pour évaluer l'impact des événements extrêmes sur les plages et les dunes.

Les formules empiriques prennent en compte une approche très simplifiée de la réalité pour estimer le recul du trait de côte et de la dune, ainsi que l'évolution d'une plage sous l'effet d'une tempête. Chacune est basée sur le principe que le profil de plage se met en équilibre avec les conditions hydrodynamiques. Le principe de la conservation des sédiments dans le profil est également une hypothèse forte de ces formules. Les formules et les méthodes d'Edelman (1972), DUROS+ (2008), FEMA (1995), Dean (1991) et Kriebel et Dean (1993) ont été présentées en détail dans ce rapport. De plus, une première série de tests simples a été réalisée sur 4 sites métropolitains (Aquitaine et Corse) pour les méthodes les plus opérationnelles actuellement (DUROS+ et FEMA). Malgré des incertitudes, les résultats ne montrent pas d'incohérence majeure. Ces premiers essais mériteraient d'être prolongés par des tests plus complets.

Parallèlement, pour bien comprendre le contexte des observations géomorphologiques in situ et le principe des méthodes d'évaluation du recul dunaire, une synthèse bibliographique décrivant les processus et les phénomènes hydro-sédimentaires impactant les dunes littorales est proposée dans ce rapport. Cette synthèse a montré l'importance de l'énergie des vagues et du jet de rive, ainsi que l'effet prépondérant des surcotes de tempête qui favorisent l'attaque de la dune par les vagues.

Pistes de travail pour la réalisation de PPRL

Le deuxième objectif de ce travail était d'émettre des recommandations et des pistes de travail pour la réalisation des PPRL. Dans le cadre de la publication d'une nouvelle version du guide méthodologique pour la réalisation des Plans de Prévention des Risques Littoraux, un encart traitant spécifiquement du recul maximal des dunes lors d'évènements extrêmes a été rédigé à la demande de la DGPR, pour être intégré à ce nouveau document. Cet encart est structuré en trois parties qui présentent succinctement les éléments d'évaluation du recul dunaire lors des tempêtes : les observations et mesures de terrain, les formules empiriques et les modèles numériques.

De plus, dans le but de guider la mise en place d'études sur des zones de PPRL, une méthode de travail en 6 étapes est proposée. La première phase de travail consiste à faire l'état des lieux de la zone d'étude. L'ensemble des éléments à collecter sont détaillés dans le rapport, puis synthétisés dans une grille d'évaluation préalable. Cette grille permet un premier niveau de classification des environnements dunaires face à l'érosion et aux forts reculs instantanés. Trois classes sont distinguées : les dunes peu sensibles, les dunes sensibles et les dunes très sensibles. Cette typologie basique est ensuite utilisée pour détailler la méthode de travail proposée pour les trois types de dunes sensibles à l'érosion et aux forts reculs lors d'évènements extrêmes.

Perspectives

Cette étude avait pour but d'établir un état de l'art des techniques d'évaluation du recul dunaire lors d'évènement tempétueux. Plusieurs perspectives de travail sont envisagées pour progresser dans la compréhension et l'évaluation de cet aléa.

- 1) Réflexion pour améliorer les protocoles d'observation et de mesure de la morphologie dunaire et de ses évolutions, notamment après les tempêtes ;
- 2) Inventaire des outils pertinents et utiles pour mieux qualifier les conditions hydrodynamiques impactant les dunes ;
- 3) Mise en place de tests approfondis des méthodes basées sur des formules empiriques du profil d'équilibre des plages pour différents environnement dunaires métropolitains ;
- 4) Description des méthodes de modélisation numérique basées sur les modèles cross-shore (perpendiculaires à la côte) actuellement disponibles ou en développement ;

- 5) Mise en place du modèle XBEACH pour des cas idéalisés et des sites ateliers réalistes et représentatifs ;
- 6) Test de la méthode d'évaluation du Lmax pour des cas réels représentant les trois types d'environnement dunaire identifiés (peu sensible, sensible, très sensible) ;
- 7) Utilisation de la grille d'évaluation pour établir une typologie précise des environnements dunaires métropolitains sensibles à l'érosion et au recul instantané lors d'évènements d'extrêmes.

10. BIBLIOGRAPHIE

- Almeida L. P., Ferreira O. et Taborda R. (2011)** - Geoprocessing tool to model beach erosion due to storms: application to Faro beach (Portugal). *Journal of Coastal Research*, SI 64, (ICS2011), p. 1830 - 1834.
- Balouin Y., Desbiendras L., Gervais M. et Tesson J. (2012)** - Dynamique à haute fréquence des barres d'avant-côte en milieu microtidal : suivi vidéo du Lido de Sète, Golfe du Lion, *XIIèmes Journées Nationales Génie Côtier, Génie Civil, Cherbourg, 12-14 juin 2012*.
- Birkemeier W. A. (1985)** - Field data on seaward limit of profile change. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 111, (3), p. 598-602.
- Birkemeier W. A., Savage R. J. et Leffler M. W. (1988)** - A collection of storm erosion field data *Miscellaneous Paper CERC-88-9, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS*, p.
- Brandenburg P. (2010)** - Scale dependency of dune erosion models. 118 p.
- Bruun P. (1954)** - Coast erosion and the development of beach profiles. Beach Erosion Board Technical Memorandum n°44. US Army Corps of Engineers, Washington, D.C. 79 p.
- 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, 48p., 27fig., 2 ann.
- Castelle B. (2004)** - Modélisation de l'hydrodynamique sédimentaire au-dessus des barres sableuses soumises à l'action de la houle - Application à la côte aquitaine. Université Bordeaux 1, 344.
- CETMEF (2013)** - Analyse des surcotes extrêmes le long des côtes métropolitaines. 128 p.
- Cox N., Dunkin L. M. et Irish J. L. (2013)** - An empirical model for infragravity swash on barred beaches. *Coastal Engineering*, 81, (0), p. 44-50.
- De la Torre Y. et Balouin Y. (2012)** - Mise en œuvre opérationnelle du "Réseau Tempête" sur le littoral du Languedoc-Roussillon. Rapport BRGM/RP-60694-FR. 97 p., 15 ill., 5 ann.
- Dean R. G. (1991)** - Equilibrium beach profiles: Characteristics and applications. *Journal of Coastal Research*, 7, (1), p. 53-83.
- Den Heijer C. (2013)** - The role of bathymetry, wave obliquity and coastal curvature in dune erosion prediction. Technische Universiteit Delft, 173 p.
- Dolan R. et Davis R. E. (1992)** - An intensity scale for Atlantic coast northeast storms. *Journal of Coastal Research*, 8, p. 352-364.
- Donnelly C. (2007)** - Morphologic Change by Overwash: Establishing and Evaluating Predictors. *Journal of Coastal Research*, SI50, (ICS2007 (Proceedings)), p. 520 – 526.

Donnelly C., Kraus N. et Larson M. (2006) - State of Knowledge on Measurement and Modeling of Coastal Overwash. *Journal of Coastal Research*, p. 965-991.

Edelman T. (1972) - Dune erosion during storm conditions., *Proceedings, 13th International Conference on Coastal Engineering. American Society of Civil Engineers,*.

Erikson L. H., Larson M. et Hanson H. (2007) - Laboratory investigation of beach scarp and dune recession due to notching and subsequent failure. *Marine Geology*, 245, (1), p. 1-19.

Favennec J. (2002) ONF - Connaissance et gestion durable des dunes de la côte atlantique - Manuel récapitulatif des enseignements du projet européen Life-Environnement de "Réhabilitation et gestion durable de quatre dunes françaises". , 394 p.

FEMA (1995) - Guidelines and specifications for wave elevation determination and v-zone mapping. 160 p.

Fisher J. S. et Overton M. F. (1984) - Numerical model for dune erosion due to wave uprush., *Proceedings of the 19th Coastal Engineering Conference. ASCE.*

Gabarrou S., Le Cozannet G., Parteli E. J. R., Pedreros R., Oliveros C. et Mallet C. - Modeling the retreat of a coastal transverse dune under changing wind conditions, . *submitted to Geomorphology*, p.

Garcin M., Pedreros R., Monfort D. et Krien Y. (2011) - Base de données d'observation des effets de la tempête Xynthia sur le littoral. Rapport -BRGM/RP-59395- FR. 23 p.

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

Hallermeier R. J. (1980) - A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. *Coastal Engineering*, 4, (0), p. 253-277.

Hallermeier R. J. et Rhodes P. E. (1988) - Generic treatment of dune erosion for 100-year event, *Proc., 21st Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE, New York.*

Hesp P. (2002) - Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology*, 48, (1-3), p. 245-268.

Houston J. R. (1995) - Beach-fill volume required to produce specified dry beach width, Coastal Engineering Technical Note 11-32, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

Judge E. K., Overton M. F. et Fisher J. S. (2003) - Vulnerability Indicators for Coastal Dunes. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 129, (6), p. 270-278.

Kriebel D. L. et Dean R. G. (1985) - Numerical simulation of time-dependent beach and dune erosion. *Coastal Engineering*, 9, (3), p. 221-245.

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

Larson M., Erikson L. et Hanson H. (2004 b) - An analytical model to predict dune erosion due to wave impact. *Coastal Engineering; Coastal Morphodynamic Modeling*, 51, (8), p. 675-696.

Larson M. et Kraus N. C. (1989) - SBEACH. Numerical Model for Simulating Storm-induced Beach Change; Report 1. Empirical Foundation and Model Development. Technical Report CERC-89-9,. 267 p.

Larson M., Wise R. A. et Kraus N. C. (2004 a) - Coastal overwash: Part 2, Upgrade to SBEACH. Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note ERDC/CHL CHETN-XIV-14. Vicksburg, MS. *US Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory.*, p. 21.

Le Guern C., Juigner M., Baudouin V., Robin M., Fattal P., Rollier C., Marie D. et Maanan M. (2013) - Observatoire du littoral des Pays de Monts - Synthèse 2012 des réalisations des partenaires scientifiques (IGARUN, ONF, BRGM), Rapport d'avancement 2012. BRGM RP-62937-FR. à paraître.

Le Guern C., Suaud S., Legras L., Fattal P., Gouguet L., Robin M., Baudouin V. et Mallet C. (2011) - Observatoire du littoral des Pays de Monts - Synthèse des réalisations 2010, Rapport BRGM RP-59538-FR. 211 p., 56 Illustrations, 12 annexes.

MEDDE (2013) - Guide méthodologique : Plan de Prévention des Risques Littoraux. DGPR, 169 p.

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.

Nishi R. et Kraus N. C. (1996) - Mechanism and calculation of sand dune erosion by storms., *Proceedings of the 25th Coastal Engineering Conference. ASCE.*

Overton M. F., Fisher J. S. et Hwang K. (1994) - Development of a dune erosion model using SUPERTANK data. *Proceedings of the 24th Coastal Engineering Conference. ASCE.* 2488-2502 p.

Palmsten M. L. et Holman R. A. (2011) - Infiltration and instability in dune erosion. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 116, (Journal Article), p. C10030-C10030.

Palmsten M. L. et Holman R. A. (2012) - Laboratory investigation of dune erosion using stereo video. *Coastal Engineering*, 60, (Journal Article).

Palvadeau E. et Nay K. (2000) - Réseau d'observation du littoral de la Corse. Choix et implantation des sites. BRGM/RP-40965-FR. 72 p., 16 fig., 1 ann.

Pedreras R. (2000) - Quantification et modélisation du transport éolien au niveau des zones côtières - Application au littoral girondin. Université Bordeaux 1, 195 p.

Pedreras R., Garcin M., Krien Y., Monfort Climent D., Mugica J. et François B. (2010) - Tempête Xynthia : compte rendu de mission préliminaire. Rapport BRGM/RP-58261-FR. 45 p., 31 Fig., 1 Ann.

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

Rosati J. D., Dean R. G. et Walton T. L. (2013) - The modified Bruun Rule extended for landward transport. *Marine Geology*, 340, p. 71-81.

Ruessink B. G., Boers M., van Geer P. F. C., de Bakker A. T. M., Pieterse A., Grasso F. et de Winter R. C. (2012) - Towards a process-based model to predict dune erosion along the Dutch Wadden coast. *Netherlands Journal of Geosciences*, 91, (3), p. 357-372.

Sallenger A. H., Jr. (2000) - Storm Impact Scale for Barrier Islands. *Journal of Coastal Research*, 16, (3), p. 890-895.

SHOM (2013) - *Référence Altimétrique Maritime*, 116 p.

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

Short A. D. (1999) - *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*, Wiley, Chichester, 379 p.

Steezel H. J. (1993) - Cross-shore transport during storm surges. Delft Hydraulics, Delft University, 242 p.

Stockdon H. F., Holman R. A., Howd P. A. et Sallenger Jr A. H. (2006) - Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53, (7), p. 573-588.

Stockdon H. F., Holman R. A., Howd P. A. et Sallenger Jr A. H. (2006) - Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53, (7), p. 573-588.

Van de Graaff J. (1977) - Dune erosion during a storm surge. Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, Coastal Engineering Group.

Van Gent M. R. A., Van Thiel de Vries J. S. M., Coeveld E. M., de Vroeg J. H. et Van de Graaff J. (2008) - Large-scale dune erosion tests to study the influence of wave periods. *Coastal Engineering*, 55, (12), p. 1041-1051.

Van Rijn L. C. (2009) - Prediction of dune erosion due to storms. *Coastal Engineering*, 56, (4), p.

Vellinga P. (1986) - Beach and Dune Erosion During Storm Surges. PhD., 169 p.

Zhang K., Douglas B. C. et Leatherman S. P. (2001) - Beach Erosion Potential for Severe Nor'easters. *Journal of Coastal Research*, 17, (2), p. 309-321.

Annexe 1

Version validée par la DGPR de l'encart « Bilan des méthodes d'estimation de l'impact d'un événement sur le recul dunaire maximal »

Encart 1 : Bilan des méthodes d'estimation de l'impact d'un événement sur le recul dunaire maximal (BRGM)

Pour les côtes basses sableuses, des événements tempétueux extrêmes peuvent provoquer une érosion considérable de la dune littorale et un recul important du trait de côte. Ce recul maximal (L_{max}) doit être pris en compte dans la méthode d'estimation de l'aléa érosion. Plusieurs éléments sont présentés pour évaluer ce recul maximal. Le rapport BRGM/RP-63157 (Desmazes et al., 2014) fournit des éléments de contexte, des illustrations et des détails méthodologiques complémentaires à cet encart.

1) Observation du recul dunaire lié aux tempêtes

L'observation du recul des dunes après une tempête est fondamentale pour mieux connaître la dynamique érosive des zones à enjeux. Les bases de données topographiques et les mesures réalisées avant et après des tempêtes majeures sont des éléments de connaissances primordiaux. Les informations historiques et tous les types d'observations disponibles (photographie, description...) sont également à prendre en considération pour renseigner l'impact réel des tempêtes sur les zones basses sableuses et dunaires. Ainsi, sur la côte atlantique, les observations réalisées après la tempête Xynthia ont permis d'estimer des reculs moyens de l'ordre de 10 m (Illustration 1), pouvant atteindre ponctuellement 30 m (Garcin et al., 2011). Lorsque les mesures et les observations de terrain n'existent pas ou sont trop lacunaires pour être interprétables, d'autres méthodes d'estimation peuvent être mise en œuvre. Toutefois ces approches nécessitent au minimum la connaissance d'un profil topographique perpendiculaire et représentatif de l'environnement étudié (plage, dune et arrière-dune).



Illustration 1 : Recul exceptionnel de dune suite à la tempête Xynthia - mars 2010 – La Tranche sur Mer, Vendée (Photo : BRGM)

2) Formules empiriques d'estimation du recul dunaire

Les principales méthodes qui permettent d'estimer les évolutions morphologiques des dunes lors d'événements extrêmes sont basées sur des formules empiriques décrivant le profil perpendiculaire de la plage après la tempête. Ces formules se basent sur l'hypothèse que

les plages adoptent un profil en équilibre avec les conditions environnementales rencontrées (Bruun, 1954, Vellinga, 1986, Dean, 1991).

a) Méthode FEMA

Aux Etats-Unis, la FEMA, Federal Emergency Management Agency, propose d'utiliser une règle simple, dérivée de la formule de profil d'équilibre proposée par Vellinga (1986) et applicable sur les côtes de l'Atlantique et du Golfe du Mexique. Cette règle établit un volume de dune érodée en fonction de la période de retour (« T » en années) associée au niveau d'eau extrême. Pour un profil perpendiculaire au trait de côte, la dune est érodée d'une aire « A » (en m²) selon la formule suivante : $A = 8 \times T^{0.4}$

Pour un niveau d'eau centennal statique, l'érosion correspond à 540 pieds carrés (540 SF) et donne son nom à la règle (FEMA, 1995). Cette règle des 540 SF est basée sur l'analyse de nombreuses séries d'observations « reculs de dune / tempête ». Elle n'est pas utilisable sur les plages/dunes à granulométrie mixte (sables/galets) ou très grossière (graviers/galets).

Le stock sédimentaire de la dune est obtenu en calculant la surface comprise entre la ligne « niveau d'eau centennal statique » et la verticale au point culminant (Illustration 3). Si cette surface est supérieure à 50 m² (ou 540 pieds carrés), la dune est censée résister à la tempête.

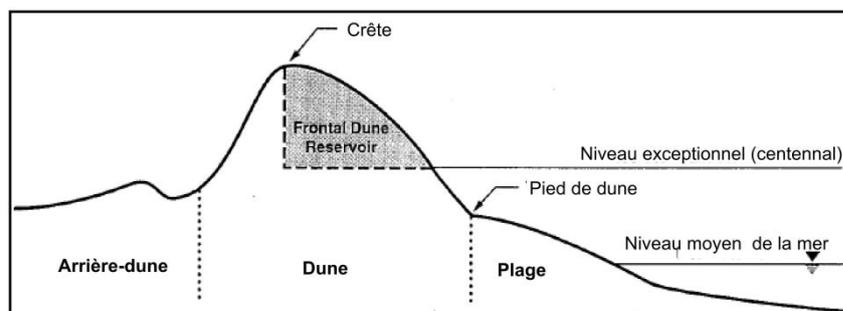


Illustration 3 : Représentation du calcul du volume du stock maximal mobilisable par un événement caractérisé par un niveau d'eau centennal, valeur limite avant disparition de la dune (Source : FEMA, 1995)

Cette règle est également utile pour obtenir une valeur du recul maximal pour un événement caractérisé par un niveau d'eau centennal, qui retire un volume égal à 50 m². L_{max} est alors obtenu, pour un profil donné de dune, de telle sorte que la surface mobilisable (zone grisée sur l'illustration 3) soit égale à 50 m². Compte tenu de l'empirisme de cette règle, il est nécessaire de s'assurer de la cohérence du résultat obtenu avec des observations disponibles de reculs dans la région étudiée (suivi de profils de plage/dune pré- et post-tempêtes).

b) Méthode DUROS

Aux Pays-Bas, la méthode DUROS (DUne éROSion) est mise en œuvre pour estimer la résistance des dunes à l'érosion lors des tempêtes. Depuis 1986 (Vellinga, 1986), cette méthode est régulièrement améliorée en utilisant notamment les résultats de modèles réduits physiques et de canaux à houle. Le profil de plage post-tempête reproduit par la méthode se décompose en trois parties (Illustration 4) :

1) Pour la face dunaire, la pente est linéaire, telle que $y = x$

- 2) Pour la plage après le pied de dune, le profil d'équilibre de forme parabolique est défini tel que $y=f(x)$. Ce profil s'étend jusqu'au point (x_{max}, y_{max})
 3) Au large du point (x_{max}, y_{max}) , la pente est fixe et linéaire, telle que $y = x / 12,5$

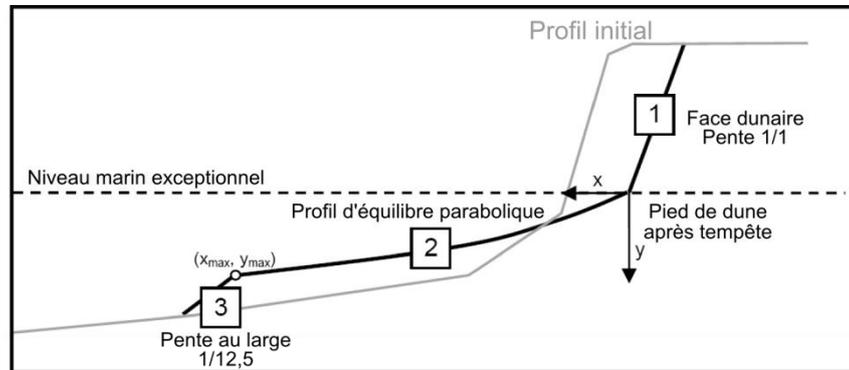


Illustration 4 : les trois éléments constituant le profil de plage après tempête pour la méthode DUROS (d'après van Gent et al., 2008).

Les coordonnées (x_{max}, y_{max}) sont définies telles que :

$$x_{max} = 250 \left(\frac{H_{0s}}{7.6} \right)^{1.28} \left(\frac{0.0268}{w_s} \right)^{0.56} \quad \text{et} \quad y_{max} = \left[0.4717 \left\{ 250 \left(\frac{12}{T_p} \right)^{0.45} + 18 \right\}^{0.5} - 2.0 \right] \left(\frac{H_{0s}}{7.6} \right)$$

H_{0s} (m) correspond à la hauteur significatives des vagues au large, T_p (sec) est la période pic de vagues au large, w_s (m/s) est la vitesse de chute des sédiments.

La formule Duros+ (van Gent et al., 2008) exprime la fonction parabolique $y=f(x)$ de la plage :

$$\left(\frac{7.6}{H_{0s}} \right) y = 0.4714 \left[\left(\frac{7.6}{H_{0s}} \right)^{1.28} \left(\frac{12}{T_p} \right)^{0.45} \left(\frac{w_s}{0.0268} \right)^{0.56} x + 18 \right]^{0.5} - 2$$

La détermination du recul dunaire nécessite ensuite de comparer le profil initial avec le profil estimé par la méthode DUROS. Cette méthode est spécifiquement adaptée aux profils de plages néerlandaises subissant les tempêtes de la mer du Nord, mais elle peut être testée sur les environnements métropolitains similaires constitués de dunes relativement hautes, d'un trait de côte rectiligne et dont le transport sédimentaire est essentiellement perpendiculaire à la côte.

c) Méthode de Kriebel et Dean (1993)

La méthode mise au point par Kriebel et Dean (1993) permet de prendre en considération plusieurs types de plages. Comme DUROS, elle est également liée à l'utilisation de formules qui représentent le profil d'équilibre de la plage après une tempête. La valeur « R_{∞} » du recul est déterminée par une formule qui dépend du profil initial de la plage et qui considère que l'évolution au cours de la tempête est complète. 4 formules sont proposées en fonction du profil initial théorique (Illustration 5).

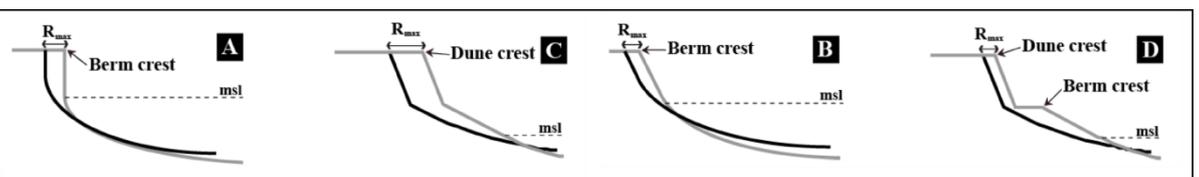


Illustration 5 : les quatre profils de plage initiaux pris en compte par la méthode de Kriebel et Dean (1993).

Le profil A présente un haut de plage vertical jusqu'au niveau de la berme (barre sableuse submersible de haut de plage), la valeur « R_∞ » est définie telle que : $R_\infty = \frac{Sx_b}{B+h_b-\frac{S}{2}}$

Le profil B présente un haut de plage en pente linéaire jusqu'à la berme, « R_∞ » est tel que :

$$R_\infty = \frac{S(x_b - \frac{h_b}{m})}{B+h_b-\frac{S}{2}}$$

Le profil C présente un haut de plage en pente linéaire et une dune, « R_∞ » est tel que

$$R_\infty = \frac{S(x_b - \frac{h_b}{m})}{B + D + h_b - \frac{S}{2}}$$

Le profil D est caractérisé par une berme en haut de plage et une dune, « R_∞ » est tel que :

$$R_\infty = \frac{S(x_b - \frac{h_b}{m})}{B + D + h_b - \frac{S}{2}} - \frac{W(B + h_b - \frac{S}{2})}{B + D + h_b - \frac{S}{2}}$$

Avec x_b (m), correspondant à la largeur de la zone de déferlement ; h_b , la profondeur de déferlement les vagues ; m , la pente de la face maritime de la dune ; S (m), la surcote ; B (m) la hauteur de berme et D (m), la hauteur de la dune.

La seconde particularité de la méthode de Kriebel et Dean (1993.), est de considérer que l'évolution du profil de plage durant la tempête nécessite au préalable un temps de réponse aux forçages. La durée de la tempête et le temps de réponse de la plage sont donc des éléments déterminants pour estimer la quantité d'érosion du haut de plage et le recul dunaire. Les hypothèses et les éléments utiles pour estimer le temps de latence du profil de plage ne sont pas détaillés dans cet encart synthétique, mais ils peuvent être étudiés dans la publication de Kriebel et Dean (1993), récemment repris par Almeida et al., 2011 dans le cadre du projet Européen Micore (<https://www.micore.eu/>).

Les méthodes empiriques basées sur la notion de profil d'équilibre doivent être employées avec précaution pour estimer le recul dunaire, car les incertitudes sont importantes et très dépendantes de la configuration des plages. De plus, ces formules empiriques ne tiennent pas compte de manière exhaustive de l'ensemble des phénomènes hydrodynamiques impliqués dans l'érosion de la plage durant les tempêtes.

3) Les modèles numériques d'estimation du recul dunaire

Les modèles numériques sont des outils qui permettent la prise en compte de ces processus complexes agissant dans la zone littorale. Ainsi, le modèle SBeach (Larson et Kraus, 1989) estime l'extension de la zone du jet de rive et le transport des sédiments pour déterminer l'évolution du profil de plage et de la dune lors d'une tempête. Des améliorations ont été apportées récemment afin de reproduire les effets des overwash sur le profil de plage (Donnelly et al., 2006). Cet outil est couramment employé en ingénierie côtière, mais l'interprétation des résultats reste tributaire de bonnes données de contrôle (événements passés observés, suivis pré et post-tempête).

On peut aussi citer le développement récent du modèle Xbeach (Roelvink, 2009) qui vise à reproduire les composantes parallèles et perpendiculaires à la côte des phénomènes hydro-sédimentaires lors des tempêtes. Ce type de modèle se situe au niveau de l'état de l'art en recherche, il est toujours en phase de développement. Sur des zones à enjeux, où la dynamique des dunes est sensible et complexe, ce type d'approche numérique peut permettre d'améliorer et de compléter les résultats des méthodes empiriques d'estimation du recul dunaire lors d'évènements exceptionnels. Mais il demeure que les résultats obtenus doivent toujours être confrontés aux observations, et, dès lors que l'on se place sous des conditions extrêmes (niveau marin extrême, violentes vagues...), ils doivent être discutés avec soin.



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