

VULNERABILITE AUX TEMPETES DES DUNES LITTORALES : DEVELOPPEMENT D'UN MODELE DE PREDICTION DU DOMMAGE A TRAVERS L'EXEMPLE DE SAINT-TROJAN (ILE D'OLERON, FRANCE)

Jonathan MUSEREAU, Hervé REGNAULD et Olivier PLANCHON

Laboratoire COSTEL (LETG - UMR 6554 - CNRS, CAREN)
Université Rennes 2, Place du Recteur Henri Le Moal 35043 Rennes cedex (France)
Email : jonathan.musereau@uhb.fr

Résumé

Depuis une vingtaine d'années, la côte de Saint-Trojan, au sud-ouest de l'île d'Oléron, s'érode à un rythme très soutenu. Différentes stratégies sont à l'étude pour maintenir le site en l'état. La dune et les plages de sable fin font en effet office de vitrine publicitaire pour l'économie touristique. La question de leur préservation est devenue un enjeu majeur pour la population locale. Ce n'est pas une préoccupation uniquement environnementale, mais aussi économique et sociale. Le phénomène a déjà été largement décrit, notamment par les aménageurs locaux. Mais l'érosion marine n'intervient pas de manière continue et s'exerce presque uniquement lors de conditions paroxysmales, pendant les tempêtes. Nous proposons ici une nouvelle méthode (qualitative et probabiliste) d'évaluation de la vulnérabilité aux tempêtes de la frange littorale. Il s'agit d'employer un modèle de comportement. Ce modèle fait d'abord l'inventaire des conditions météo-marines qui conduisent à l'érosion et tente ensuite de prévoir leur survenue. La méthode de prédiction passe par une représentation graphique de la contrainte qu'exercent les principaux agents marins. Le modèle est validé a posteriori (avec des mesures archivées) mais aussi a priori en tant qu'outil de prédiction. Bien qu'il soit efficace pour prédire les phases d'érosion, il doit encore être amélioré sur certains points. A terme, il est envisagé que cet outil puisse servir de veille climatique dans le cadre d'une amélioration de l'actuel dispositif de gestion.

Mots-clés : dune littorale, tempête, vulnérabilité, érosion marine, modèle.

Abstract

The vulnerability of coastal dunes to storms: the case study of Saint-Trojan (Isle of Oléron, France)

For the last twenty years the coastline of Saint-Trojan (south western coast of Oléron island, Gulf of Biscay) underwent high rates of retreat. The beach and the dune are important elements for the local tourist-based economy. Their conservation has become a political issue and local communities investigated various solutions in order to stop this erosive trend. Coastal planners monitored coastal retreat and computed average retreat rates of 4 to 6 m per year for the last 20 years. Erosive events are nevertheless limited to certain periods and to distinct storms. This paper aims at building a new approach, which would take into account the storms in order to forecast the risk of retreat, following a qualitative and probabilistic method. It consists of a behavioural model which assesses the meteorological and marine forcings inducing coastal retreat. The model tries to predict their occurrence. The predictive tool is a graphic construction, representing the level of forcing which is due to the various meteorological and marine factors. When a certain level is reached, the dune is eroded (threshold effect). The model is tuned to local conditions using adjusted coefficients. The model has been tested using an archive dataset and proved to be successful for predicting erosion events. Although the model provided satisfactory results, it still needs to be improved in order to be applied to other locations.

Keywords: coastal dune, storm, vulnerability, marine erosion, model.

Introduction

L'érosion a lieu durant certaines tempêtes, mais pas toutes les tempêtes, et toutes n'érodent pas partout. Le phénomène dépend à la fois des caractéristiques du site (*site-dependent*) et de ceux de la tempête (*storm-dependent*). Les modèles analytiques de transfert sédimentaire, fréquemment utilisés en aménagement du littoral, décrivent des processus. Par contre, ils n'ont pas le pouvoir d'analyser la réponse morphologique des sites aux processus tel que ceux qu'une tempête entraîne (courants sagittaux, transfert éolien, ...). Jusqu'à présent en effet, ces

modèles ne répondent que très partiellement à la question suivante : pourquoi, à forçage équivalent, peut-on observer plusieurs types de réponse morphologique sur des sites très semblables ? A l'aval du modèle analytique, notre objectif est de modéliser la réponse locale au forçage lié à la tempête en ciblant les paramètres locaux qui permettent de caler un modèle général d'érosion sur les conditions d'échelle locale.

Pour cela, nous avons choisi une zone d'étude concernée par l'érosion marine et bien documentée à ce sujet. Ce secteur, situé au sud de l'île d'Oléron, comprend une dune littorale d'origine récente (un siècle et demi). Il est soumis à une dynamique littorale qui semble s'être intensifiée à la fin du XX^{ème} siècle (Prat, 2001). Toutefois, les conditions météorologiques et océanographiques générales relevées sur la zone (d'après Météo-France) n'y présentent pas de caractère radicalement différent de la « climatologie » de la région (Golfe de Gascogne). Le site de Saint-Trojan a donc un comportement particulier vis-à-vis du phénomène d'érosion. Pour rendre compte de cette spécificité locale, nous avons mis au point une méthode de caractérisation de sa sensibilité à l'érosion marine. L'idée est de mesurer les phénomènes d'érosion et déterminer parallèlement (grâce à un suivi régulier) les conditions météo-marines qui les créent. Ce travail passe par l'établissement d'un seuil de forçage puis par la construction a posteriori d'un modèle conceptuel permettant de visualiser graphiquement ce seuil. Le calage du modèle sur les conditions locales (*downscaling*) s'effectue par ajustement de la série de données météo-marines depuis une confrontation avec des relevés ponctuels mais plus précis. En effet, malgré une forte périodicité des enregistrements (toutes les 6h), la résolution spatiale de la série dont nous disposons est insuffisante pour notre analyse, ce qui est d'ailleurs souvent le cas pour ce type de données. La dernière étape a été de valider le modèle ajusté dans son aspect prédictif.

1. Données et méthode

1.1. Présentation de la zone d'étude

1.1.1. Cadre géomorphologique et évolution historique

Plus grande île de métropole après la Corse (avec une superficie de 175 km²), Oléron se situe sur la marge est du golfe de Gascogne, à proximité du 45° parallèle (figure 1). Sa forme particulière de pointe encadrée par deux pertuis (Antioche au nord, Maumusson au sud) est liée à la configuration géologique régionale où se succèdent anticlinaux et synclinaux dont l'orientation globale est Nord-Ouest/Sud-Est. Leur formation date du plissement pyrénéen, au début du Tertiaire. Sur le socle primaire, les transgressions marines de l'ère Secondaire sont à l'origine des dépôts calcaires (Jurassique et Crétacé) qui en constituent la base. Au cours du Quaternaire, la taille de l'île évolue au gré des variations du niveau marin en raison des ouvertures puis des comblements successifs des zones lagunaires situées en arrière du cordon littoral.

A partir de la seconde moitié du XIX^{ème} siècle, le secteur de Saint-Trojan a connu une importante accrétion, par progradation de la flèche littorale vers le Sud-Ouest (figure 1). L'atterrissement a été évalué à de plus de 500 hectares entre 1832 et 1948 (Bertali *et al.*, 2002). Cette progression coïncide avec l'implantation du pin maritime dans la région, dont le rôle est de lutter contre l'ensablement des villages voisins. Cet ensablement résulte d'une dynamique éolienne particulièrement intense que l'on observe sur l'ensemble des littoraux sableux d'Europe entre le XVI^{ème} et le XVIII^{ème} siècle (Lamb et Frydendahl, 1991 ; Clarke *et al.*, 2002). Les étapes de l'accrétion sont rendues visible par les vestiges des « palissades », qui nous renseignent sur la position approximative du trait de côte lors de leur construction (figure 1).

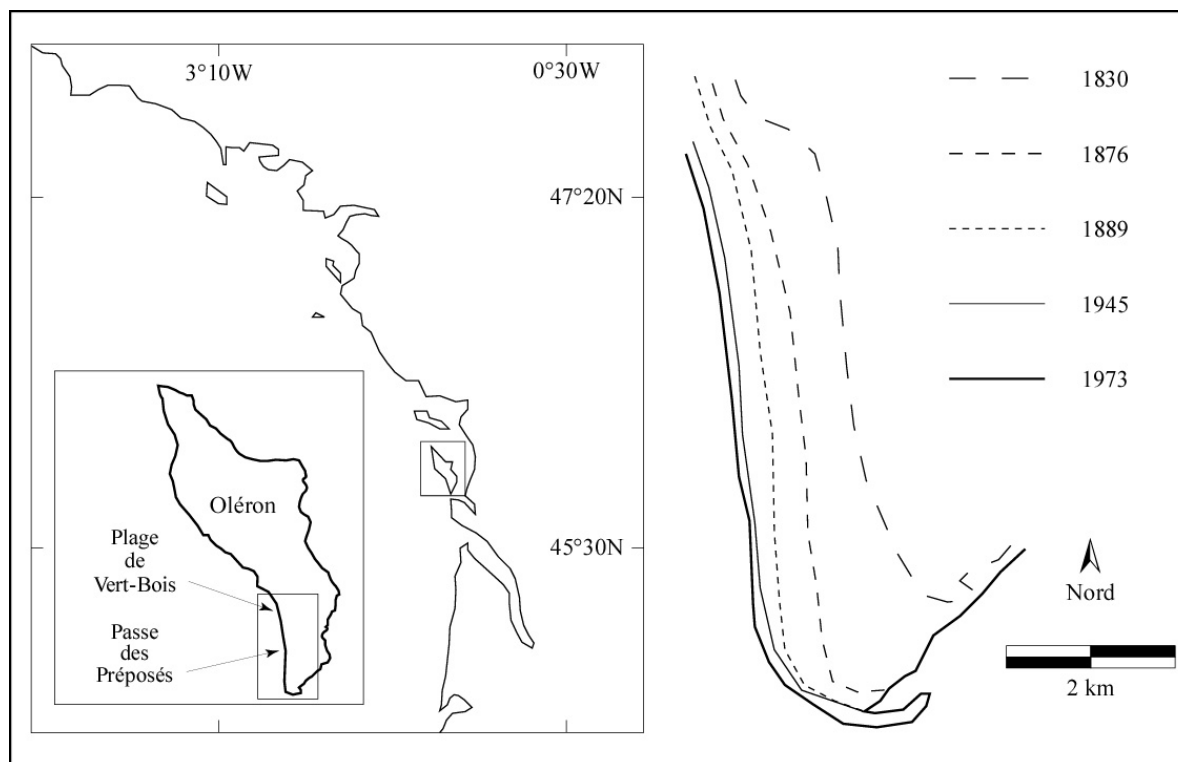


Figure 1 : Localisation et évolution historique du secteur d'étude. *Location and history of the studied area.*

Ces édifices, constitués de planches de bois, ont été érigés à l'époque sur le cordon littoral pour protéger les semis d'oyat, un préalable à la plantation du pin. Schématiquement, ils ont eu pour effet de décaler l'avant dune vers le large en augmentant le gradient de la plage par élévation de la berme (figure 2). De cette manière, dans un contexte géographique et sédimentaire favorable, ce type d'intervention conduit à une accélération de l'engraissement du profil médian et permet la progression de la plage vers le large. Le gain sur la mer a atteint son apogée au début des années 1980. Depuis, on a observé un net recul du trait de côte. Entre 1996 et 2000, ce recul a été estimé en moyenne à près de 10 mètres par an (Prat, 2001), ce qui est bien supérieur au taux rencontrés ailleurs dans la région.

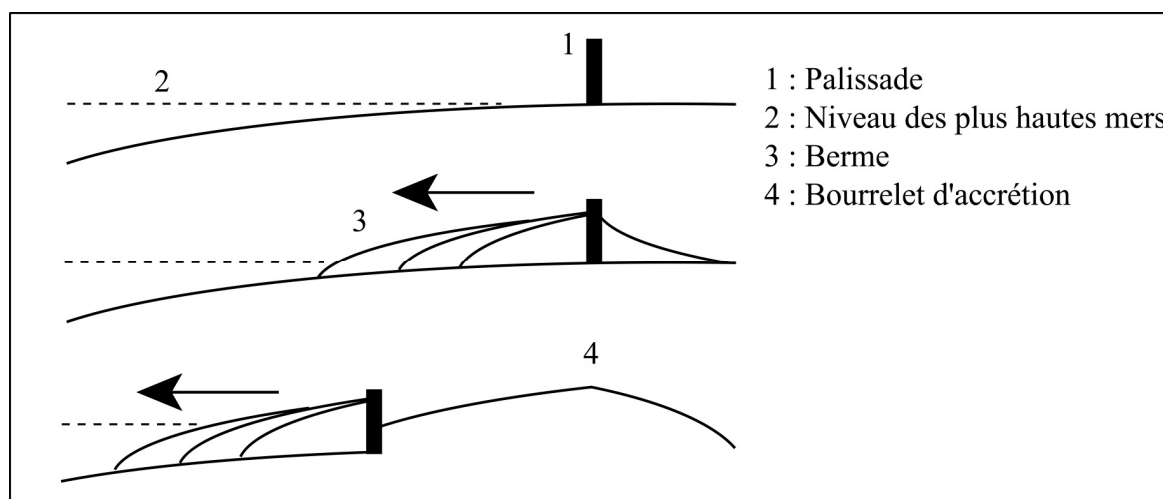


Figure 2 : Effet des « palissades » sur le profil de la plage. *Effect of the « palissades » on the beach profile.*

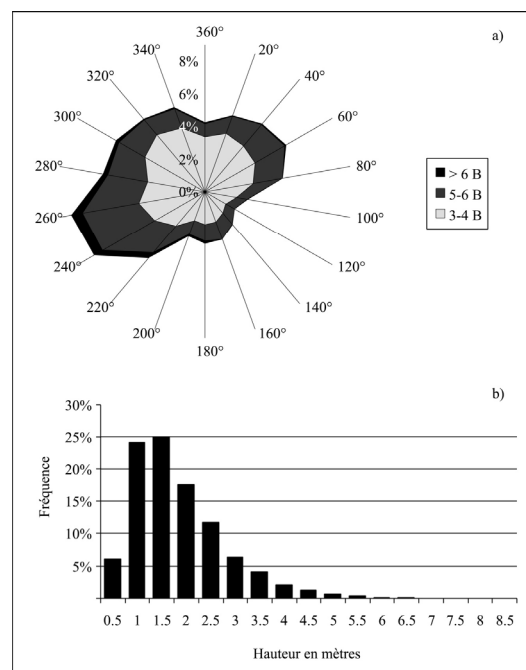
Les raisons de ce changement brutal sont bien évidemment multiples. Au Moyen Âge, des petits murets de pierre avaient été construits pour édifier des pêcheries ou « écluses à poissons ». Il s'agissait simplement de profiter des mouvements de la marée pour piéger le

poisson et le récolter à pied sec. Ces édifices protégeaient également le littoral, en brisant la houle (Miossec, 1998). Leur abandon progressif depuis le XIX^{ème} siècle n'est pas sans conséquences. Enfin, l'arrêt des plantations massives d'oyat et la fréquentation accrue de la dune, notamment depuis l'avènement du tourisme de masse, sont autant de facteurs qui jouent négativement sur l'équilibre du système Plage-Dune. A partir des années 1980, l'implantation d'ouvrages de défense (épis) en amont-dérive du site et l'extraction de matériaux au large de l'île ont sans doute activement participé à la pénurie de sédiments et donc à l'érosion. C'est du moins le constat, sous forme d'anamnèse, qui nous a été proposé lors d'une rencontre avec la section littorale de la DDE 17, en 2003. Dans ces conditions, l'action des tempêtes est redoutable. Dans le même temps, la fréquence des vents forts s'est semble-il accrue dans l'ouest de la France (Lemasson, 1998). Les violentes tempêtes qui ont touché la région à la veille du XXI^{ème} siècle ont eu des effets dramatiques. Le seul épisode du 27 décembre 1999 a causé une déforestation de près de 60% de la forêt domaniale de St-Trojan (MDTA, 2000) et un recul du cordon littoral de près de 18 m au sud du complexe dunaire (Prat, 2001). L'ensemble de ce système de protection, largement dégradé par ces événements, est aujourd'hui profondément fragilisé. C'est notamment depuis la fin de l'année 1999, et la destruction d'un parking au niveau de la passe de Vert-Bois (figure 1), qualifié de « drame de Vert-Bois » par ses riverains, que les oléronnais considèrent l'érosion de la dune comme une problématique majeure sur l'île.

1.1.2. Conditions météorologiques et océanographiques générales

Des données provenant du modèle ARPEGE (source : Météo-France) nous ont permis d'établir une climatologie générale sur le secteur d'étude. Le modèle a l'avantage de produire quotidiennement (toutes les 6h) une valeur pour plusieurs paramètres météo-marins. Son maillage est de un degré et les coordonnées des enregistrements sont les suivantes : 46.00°N – 2.00°W. Des traitements simples ont été opérés (calculs de fréquences) en fonction de l'intensité de deux paramètres essentiels : la vitesse ($m.s^{-1}$) du vent moyen et la hauteur (m) de la houle (figure 3). Malgré quelques données manquantes, la série couverte par les enregistrements s'étend du 07 décembre 1999 au 31 décembre 2004. Pour caractériser la marégraphie, nous nous sommes appuyés sur une série de données de hauteur d'eau (m) théoriques et réelles au port de La Rochelle (source : SHOM) courant sur la même période.

Figure 3 : Rose des vents (a) et fréquence des houles (b) dans le secteur d'étude. *Wind rose (a) and swell frequency (b) around the studied area.*



Il en ressort que le régime annuel des vents dans cette partie du Golfe de Gascogne s'articule de manière bipolaire, avec comme orientations dominantes l'Ouest-Sud-Ouest et, dans une moindre mesure, le Nord-Est. Cette répartition schématisée diffère en outre selon l'intensité du vent. Les valeurs faibles à modérées (3 à 4 Beaufort) montrent une dominante Nord-Ouest et Nord-Est qui traduit la présence d'un régime de brise, en particulier durant la saison « chaude ». Pour les vitesses les plus importantes (supérieures à 6 Beaufort), les secteurs Ouest et Sud-Ouest, auxquels notre site d'étude est directement exposé, sont de loin les plus fréquents. La valeur maximale de la série est de 25 m.s^{-1} (force 10), le 27 décembre 1999, soit une sous-estimation somme toute significative du modèle par rapport aux relevés locaux effectués au sémaphore de Chassiron (38 m.s^{-1}).

En ce qui concerne la houle, le secteur Ouest-Nord-Ouest prédomine. On le retrouve dans environ 80% des cas. Il apparaît également que les hauteurs comprises entre 1 et 2 m sont très largement majoritaires puisque cumulées, elles représentent les 2/3 des enregistrements. Les houles de plus de 4 m (mer forte et niveaux supérieurs) sont assez rares puisque leur fréquence cumulée ne dépasse pas 5%. La valeur la plus élevée est de 8,5 m, le 13 janvier 2004.

Enfin, le marnage moyen à La Rochelle, assez proche de celui du secteur d'étude, est de 4 m. Il varie en réalité d'environ 2 m en Morte Eau Exceptionnelle (MME) à environ 6 m en Vive Eau Exceptionnelle (VVE). A partir de la série mise à notre disposition, nous avons calculé une cote moyenne à partir d'une extraction des valeurs de surcotes et décotes relevées à chaque cycle de marée. Le résultat est de 0 m. Cet équilibre apparent masque cependant des disparités notables. Ainsi, l'amplitude de la surcote maximale a atteint à deux reprises 0,88 m (le 3 janvier 2001 et le 6 novembre 2002) alors que la plus importante décote de la série n'est que de 0,49 m (le 31 janvier 2003). Notons également que des données manquent pour les derniers jours de l'année 1999 et, en particulier, pour la date du 27 décembre 1999. A La Rochelle, cet épisode de référence aurait généré une surcote de 1,80 m selon le SHOM.

1.1.3. Problématique et échec des politiques actuelles de gestion de l'érosion

Deux épisodes particulièrement marquants ont contribué au « drame de Vert-Bois ». La tempête qui a touché la région les 23 et 24 d'octobre 1999 marque les premières destructions du parking. Les effets combinés des forts coefficients de marée (plus de 100, SHOM), d'une pression atmosphérique inférieure à 980 hPa et de vents de secteur Ouest soufflant à plus de 100 km/h en rafale (Météo-France) ont engendré un recul de 6 m (Prat, 2001). L'épisode du 27 décembre 1999 a scellé définitivement le sort du parking. A 17h30, l'anémomètre du Sémaphore de Chassiron (Météo-France) s'est bloqué à 55 m.s^{-1} (soit une rafale de 198 km/h). Le houlographe de la bouée n° 62001 (NOAA), situé par 45.2°N et 5.0°W , a atteint 12 m. Ces deux tempêtes ont des caractéristiques différentes et mobilisent des facteurs d'érosion différents. La première intervient au moment d'une pleine marée haute de Vive Eaux Exceptionnelle (VVE). Pour la seconde, ce sont d'une part les vitesses de vent enregistrées qui sont exceptionnelles et, d'autre part, le niveau d'eau atteint. En effet, le coefficient de marée n'est que de 77 (soit un coefficient moyen) mais la surcote est estimée à 1,80 m. Le coefficient virtuel équivalent au niveau d'eau atteint au moment de la marée haute serait alors de 160 (MDTA, 2000).

A l'occasion de la construction d'une nouvelle aire de stationnement, en 2002, un nouveau type d'aménagement de protection a été testé dans le secteur de Vert-Bois par l'Unité Littorale de la Direction Départementale de l'Équipement de Charente-Maritime. C'était aussi l'occasion de mener une campagne d'observation pour mieux comprendre, et tenter de mieux gérer, le phénomène d'érosion dans ce secteur. L'objectif avoué de ce dispositif était à terme de mobiliser suffisamment de sédiments sur le haut de plage pour qu'il puisse amortir

l'énergie associée aux épisodes tempétueux d'une intensité équivalente à ceux d'octobre et décembre 1999 et préserver ainsi le cordon littoral en jouant le rôle de fusible. Pour cela, des piquets de bois ont été placés en quinconce sur le haut de plage afin de diffuser l'énergie du flux (swash) et du reflux (backwash) engendrés par le déferlement de la houle (figures 4 et 5). L'écoulement étant ralenti, cela permet en théorie d'accumuler marée après marée des séquences de sable d'épaisseur variable. Dans la durée, cette accumulation sert à constituer une dune embryonnaire au pied du cordon littoral.

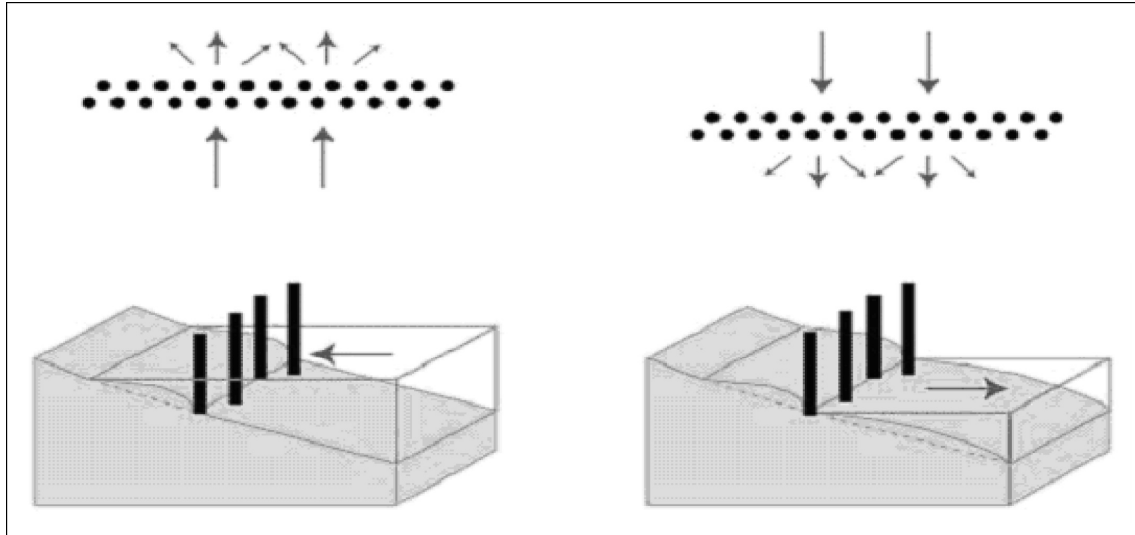


Figure 4 : Principe du dispositif de protection du littoral implanté à Vert-Bois (2002). *Assumptions of the coastal work established at Vert-Bois (2002).*

Seulement, l'aménagement est un échec (figure 5). Malgré un fléchissement du rythme de l'érosion durant les mois qui ont suivi sa mise en place (observations qualitatives), sa dégradation rapide et le recul du trait de côte l'ont aujourd'hui rendu obsolète. Plus encore, de nombreux piquets composant l'édifice sont arrachés pendant les tempêtes et déportés vers le sud par la dérive littorale. Cette situation comporte un risque évident pour la sécurité des visiteurs (baigneurs, surfers, ...).

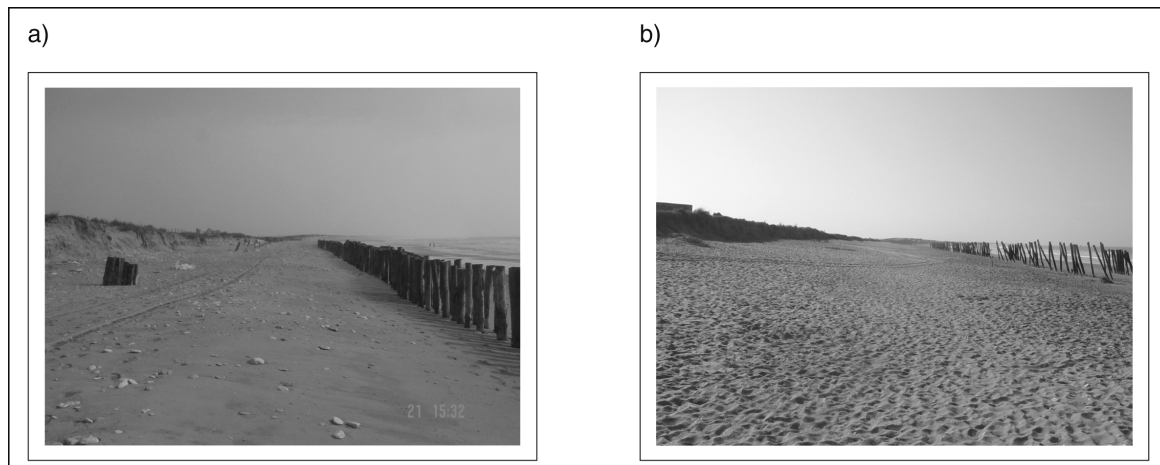


Figure 5 : Illustration de l'échec de l'aménagement avec la situation en février 2003 (a) et en avril 2007(b). *Illustration of the failure of the device with a) Situation in February 2003 and b) Situation in April 2007.*

Faut-il enrocher cette partie de la côte oléronnaise comme le suggèrent certains riverains exaspérés ? Rappelons simplement que, dans ce même secteur, le trait de côte progressait de plusieurs mètres par an au sortir de la Seconde Guerre Mondiale et que la mobilité est une caractéristique essentielle de la dune littorale. Notons enfin que le recul du trait de côte n'y

constitue pas un enjeu majeur pour la société locale puisqu'aucune habitation, infrastructure économiquement porteuse ou réseau de communication important n'est pour le moment directement concerné par l'érosion.

1.2. Objectif et données disponibles pour l'étude

Notre objectif est d'homogénéiser les données relatives aux événements tempétueux qui participent à l'érosion actuelle au sud d'Oléron. Il s'agit de développer un moyen de comparaison pour effectuer un suivi des conditions actuelles à l'échelle spatiale du cordon et l'échelle temporelle de l'événement. Les données disponibles pour ce suivi nous permettent de proposer une méthode d'analyse de la sévérité des tempêtes en fonction de la complexité des conditions qui sont à l'origine de l'érosion. Nous proposons d'en mesurer les principaux facteurs (le vent, le degré d'agitation et le niveau de la mer) pour les confronter à des mesures topographiques qui rendent compte du recul. A terme, nous envisageons de mettre en place un dispositif opérationnel de prédiction du dommage occasionné par les tempêtes. Une première campagne de mesure a été menée à Vert-Bois pour tester la méthode durant les mois de janvier et février 2003, sur la base de relevés quotidiens. Les enseignements tirés de cette campagne servent à illustrer étape par étape l'évolution de notre démarche. Un suivi continu, harmonisé à l'échelle décadaire, a débuté en mai 2006. Nous exposons ici les principaux résultats de cette première année d'enregistrements. L'ensemble des données utilisées pour cette étude est listé en tableau 1.

Type	Période	Périodicité	Localisation	Source
Vitesse du vent moyen (m.s^{-1})	Observation ponctuelle	-	Sémaphore de Chassiron	Météo-France
Vitesse du vent moyen (m.s^{-1})	23/05/2006 au 30/04/2006	4 fois par jour (00h, 6h, 12h, 18h UTC)	45.9° N 1.3° W	NOAA
Hauteur de la mer totale (m)	Observation ponctuelle	-	45.2° N 5.0° W	NOAA
Hauteur de la mer totale (m)	23/05/2006 au 30/04/2006	4 fois par jour (00h, 6h, 12h, 18h UTC)	45.9° N 1.3° W	FNMOG
Hauteur significative de la Houle (m)	07/12/1999 au 31/12/2004	4 fois par jour (00h, 6h, 12h, 18h UTC)	46° N 2° W	Météo-France
Hauteur d'eau (coefficient)	Observation ponctuelle	-	La Rochelle	SHOM
Hauteur d'eau (m)	23/05/2006 au 30/04/2006	2 fois par jour	45.5° N 1.1° W	Marée dans le Monde©
Situation synoptique	Observation ponctuelle	1 fois par jour (00h UTC)	Europe	NCEP

Tableau 1 : Données utilisées pour l'étude. *Database used for the study.*

Pour le suivi des conditions de forçage, compte tenu des coûts et de l'entretien que cela impliquerait, nous ne pouvions pas disposer d'un réseau d'appareil de mesure (anémomètre, houlographe et marégraphe) répondant à nos attentes en résolution spatiale. En effet, le houlographe le plus représentatif, situé au large du pertuis d'Antioche (CETMEF), n'est plus fonctionnel depuis la fin de l'année 2005. Celui dit de la « Bouée Gascogne », appartenant à la NOAA, ne nous renseigne finalement que sur les conditions régnant au large et s'avère peu adapté pour un suivi des conditions locales. Le plus proche marégraphe (de type analogique) est situé à Bourcefranc, dans le bassin de Marennes-Oléron, où les conditions marégraphiques diffèrent légèrement de celle de Saint-Trojan. Les données provenant de cet appareil sont difficilement transposables pour un traitement numérique. Nous avons donc opté pour la mise en place d'un protocole d'enregistrement faisant appel à des données de nature différente, à savoir à partir de modèles de prévision météorologique et océanographique de haute

résolution. Le suivi à distance est, du point de vue logistique, moins contraignant mais nous impose des traitements supplémentaires qu'il convient d'explicitier plus en détail.

Dans le secteur de Vert-Bois, les mesures topographiques concernent essentiellement la plage. La présence d'une falaise dunaire de près de 2 m sur la face externe du complexe dunaire nous interdit de fait toute possibilité de mesure en continu sur la totalité du système Plage-Dune. Des mesures du même ordre sont effectuées au niveau de la passe des Préposés (figure 1) où seule la face externe du cordon littoral peut être modélisée car une ganivelle empêche la progression de la personne chargée des relevés. Ceux-ci sont effectués à l'aide d'une technique de GPS différentiel (*Trimble XRS*®) ; ce qui nous permet d'obtenir une précision inframétrique sur les trois axes. La précision moyenne des relevés, après extraction des valeurs aberrantes et lissage du modelé, approche 30 cm en x et y, 50 cm en z. Par la suite, nous réalisons des Modèles Numériques de Terrain (MNT) desquels une estimation de la variation des volumes sédimentaires peut être tirée.

1.3. La notion d'indice de sévérité de la tempête

Il existe beaucoup de travaux qui tentent de définir par un indice la sévérité d'une tempête en fonction de ses conséquences spatiales. En Europe, le plus connu est sans doute celui de H.H. Lamb et K. Frydendahl (1991), qui ont permis de reconstituer l'historique des tempêtes entre 1570 et 1989 dans le Nord-Ouest de l'Europe. A partir de sources hétérogènes, ces auteurs ont proposé d'établir un indice de sévérité pour classer les événements tempétueux en fonction des dommages qu'ils ont pu occasionner (Equation 1). Le calcul de cet indice fait intervenir la vitesse maximale $V_{\max}$ du vent de surface (déterminant sa puissance), la superficie totale $A_{\max}$ des zones endommagées et la durée totale D de l'événement (présence dans la zone d'étude).

$$V_{\max}^3 \times A_{\max} \times D \quad (1)$$

En appliquant une démarche assez proche, d'autres méthodes ont été développées pour caractériser l'impact des événements météorologiques extrêmes en milieu côtier, en particulier ceux des cyclones sur la côte Est des Etats-Unis (Balsillie, 1986). Celles-ci permettent en outre d'exprimer cet impact en terme d'érosion (recul) potentielle. En ce qui concerne plus particulièrement les littoraux meubles, certains mettent en avant le rôle de la marée de tempête (Zhang *et al.*, 2001), en s'inspirant du principe de Brunn pour prévoir le recul. D'autres font intervenir un plus grand nombre de facteurs explicatifs en y ajoutant par exemple le rôle du déferlement (Kriebel et Dalrympel, 1995). Notre démarche s'inspire de ces travaux, avec le souci d'atteindre un certain réalisme vis à vis du terrain précis sur lequel les dommages sont observés. Pour répondre à cette considération, nous avons mis au point un outil conceptuel volontairement simplifié, notamment du point de vue de sa formalisation. En effet, nous pensons qu'un tel projet doit être financièrement acceptable (ce qui nous impose une optimisation du coût des acquisitions de données) et facile à mettre en œuvre pour qu'il devienne à terme opérationnel en tout point de vue. Selon la typologie de Hanson *et al.* (2003), cet outil s'apparente à un modèle de comportement. En cela, il se base avant tout sur l'observation d'un comportement morphologique et non pas sur une simulation de processus sédimentaires.

1.4. La notion de seuil : forçage météo-marin et phénomènes de « rupture » observés sur le terrain

Nos observations montrent que le cordon littoral subit des dommages essentiellement lorsque les conditions sont propices aux « débordements » côtiers. Bien que les situations amenant à ce dommage soient variées, cela correspond en général à des conditions

paroxysmales combinant un fort vent de mer, un important déferlement des houles et un niveau d'eau élevé. L'exemple du début de l'année 2003 permet d'illustrer à la fois la variété des conditions à l'origine de l'érosion et celle des réponses observées. Durant cette campagne, nous cherchions à calculer quotidiennement le volume sédimentaire de la plage et à en observer les variations. Ces calculs sont effectués à partir de MNT sous le logiciel *Surfer*® (version 8.0). La surface référencée au DGPS est délimitée arbitrairement afin de permettre un repérage rapide lors des mesures successives. Elle est comprise entre les coordonnées 103 400 m et 103 500 m (Système NTF, projection Lambert II étendu). Les mesures débutent à l'altitude 0 m NGF et se terminent au niveau du pied de la falaise dunaire. Les relevés sont menés après chaque marée haute. Durant les mois de janvier et février 2003, trois grandes phases d'érosion ont pu être reconnues de cette manière : entre le 18 et le 22 janvier, entre le 1^{er} et le 5 février, et entre le 18 et le 20 février (figure 6).

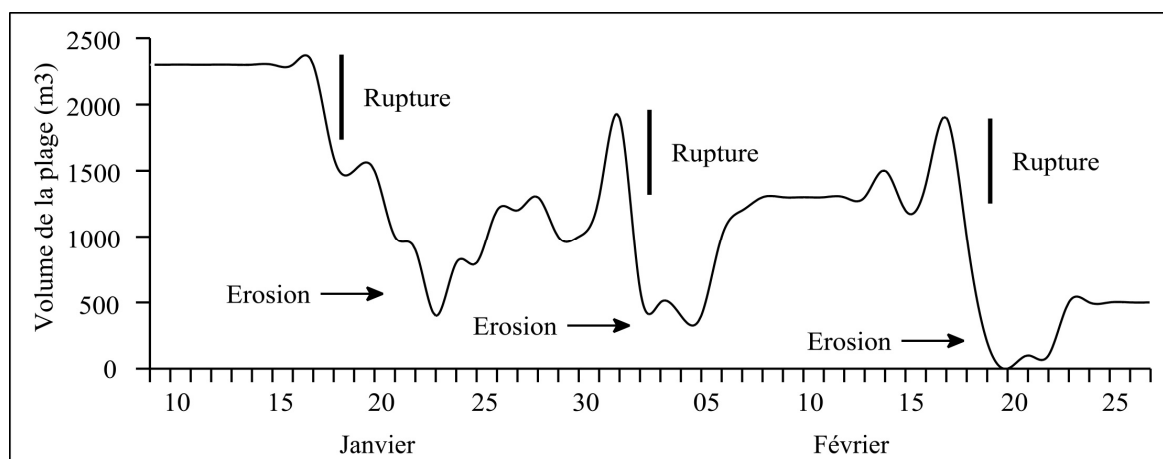
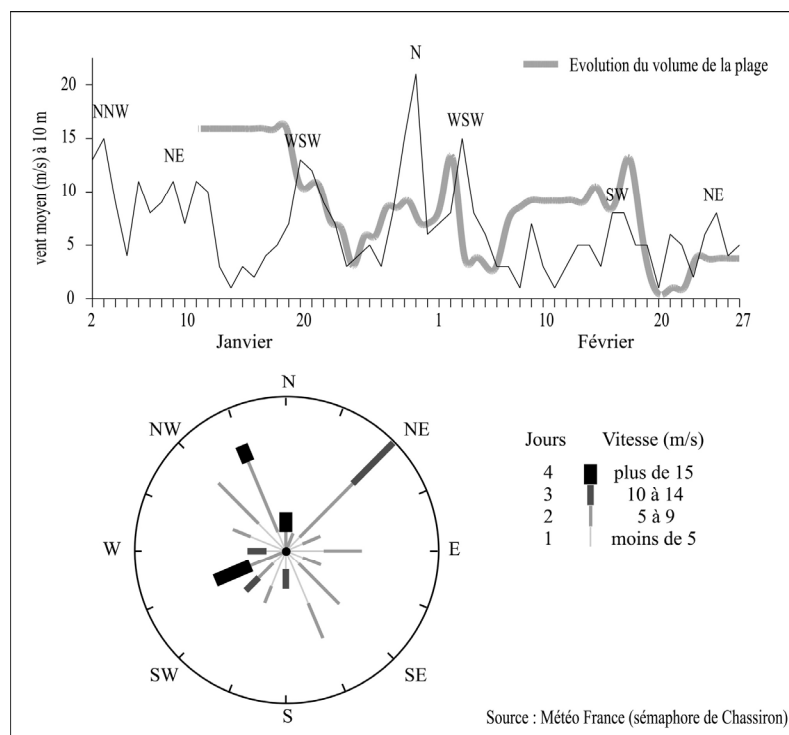


Figure 6 : Observation de l'érosion sur la plage de Vert-Bois (Oléron) du 09 janvier au 27 février 2003. *Observation of erosion on the beach of Vert-Bois (Oléron) between the 09 January and the 27 February.*

Durant ces deux mois, plusieurs épisodes de vents forts ont été mesurés au sémaphore de Chassiron (Météo-France), en particulier les 20 et 30 janvier puis le 03 février (figure 7).

Figure 7 : Conditions de vent associées aux phases d'érosion observées (2 janvier au 27 février 2003). *Wind patterns related to observed erosion periods (2 January to 27 February 2003).*



Source : Météo France (sémaphore de Chassiron)

Le second n'a engendré toutefois aucune érosion alors que, du point de vue météorologique, il s'agit de l'événement le plus intense (vent moyen de 22 m.s^{-1}) que nous avons mesuré au cours de cette période. Comme le montre la situation synoptique du 30 janvier (consultable sur le site <http://www.wetterzentrale.de>), son orientation était différente des autres cas (figures 8 et 9).

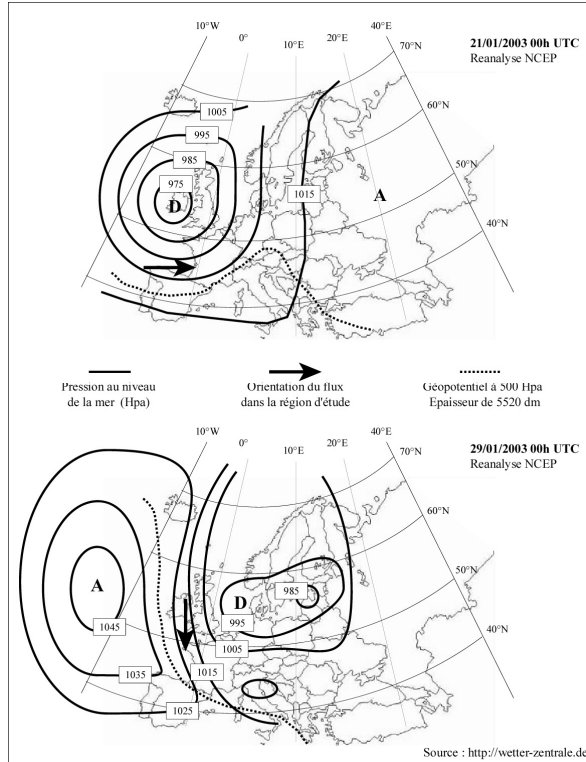


Figure 8 : Situations synoptiques associées aux phases d'érosion observées en Janvier 2003 *Synoptic situations related to observed erosion periods in January 2003*

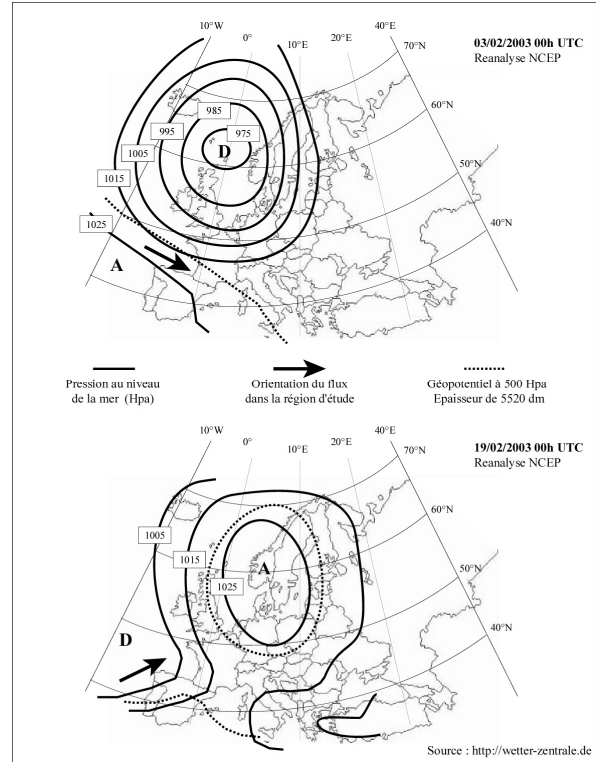


Figure 9 : Situations synoptiques associées aux phases d'érosion observées en Février 2003 *Synoptic situations related to observed erosion periods in February 2003*

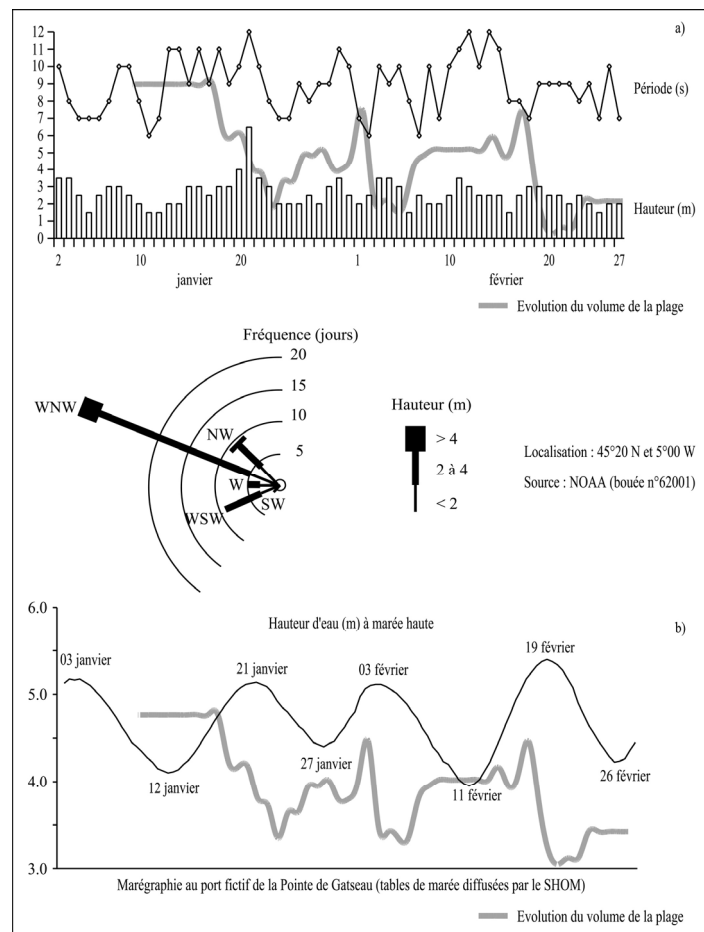
En effet, il est intervenu dans un flux de Nord-Nord-Ouest. Comme le montre la rose des vents de la figure 3a, ce type d'événement est relativement rare dans le secteur d'étude. De plus, la plage de Vert-Bois se situe au fond d'une baie ouverte vers le Sud-Ouest. Elle est donc relativement bien protégée des vents de Nord. L'orientation du vent paraît être un facteur essentiel pour qu'il y ait érosion. Dans ce cas, le vent venait de terre. Ces vents engendrent généralement un courant dit d'upwelling, qui s'accompagne de courants portant les sédiments vers la plage. Ils ont également pour effet de régulariser les houles. A l'inverse, les tempêtes accompagnées de vents de mer engendrent des courants dits de downwelling dont l'effet est porté vers le large (Héquette, 2001). Ces vents occasionnent également une agitation de surface (mer de vent) susceptible de renforcer le caractère érosif des houles.

En ce qui concerne la houle, un événement se distingue nettement des autres, celui du 20 janvier. Ce jour là, la hauteur de la houle mesurée au large approchait 6 m alors que tout au long de la période, elle variait généralement entre 1 et 3 m (figure 10a). On peut remarquer également que la majeure partie des houles provenait de l'Ouest-Nord-Ouest (figure 10b), ce qui corrobore les statistiques annuelles reconstituées à partir des réanalyses du modèle ARPEGE. La trajectoire de la dépression qui a généré cette houle était également particulière dans le sens où son centre est passé très près des côtes atlantiques françaises (figure 8). En d'autres termes, la houle n'a pas eu le temps de s'amortir avant d'atteindre le rivage.

Enfin, la dernière phase d'érosion n'est vraisemblablement pas liée à un épisode de vent

fort (figure 7), ni au déferlement d'une houle massive (figure 10a). La situation synoptique du 19 février montre un net ralentissement de la circulation d'Ouest avec la constitution d'une cellule de hautes pressions sur la Scandinavie (figure 9). Par contre, sur la plage de Vert-Bois, un vent de mer et une houle d'Ouest-Sud-Ouest, tous deux d'un niveau modéré dans leur domaine, étaient présents au moment d'une très haute marée de Vive Eau (figure 10b). Le coefficient de marée était alors de 102. La hauteur de la mer constitue en quelque sorte un niveau de base à partir duquel l'aléa météorologique peut survenir. Les dommages occasionnés sont fortement dépendants de ce niveau.

Figure 10 : Conditions océanographiques associées aux phases d'érosion observées avec a) houlographie et b) marégraphie (du 2 janvier au 27 février 2003). *Oceanographic conditions related to observed erosion with a) swell and b) tides (from 2 January to 27 February 2003).*



L'idée qui s'impose alors est de considérer que les effets de ces trois facteurs de forçage se conjuguent et, qu'au-delà d'un certain point, cette situation, si elle perdure, peut provoquer la « rupture » du système (Regnauld *et al.*, 2004 ; figure 6), par un effet classiquement décrit comme « effet de seuil » par Neboit (1983). Dans les cas observés, le mot « rupture » ne correspond pas forcément à un changement catastrophique du fonctionnement du système, mais simplement au recul du front dunaire par enlèvement du matériel.

1.5. Formalisation conceptuelle d'un modèle de franchissement de seuil

Nous proposons de décrire cette combinaison en superposant graphiquement les trois principaux éléments de l'érosion (figure 11a). Chaque facteur est restitué sous la forme d'une tranche assimilable à un niveau de contrainte s'exerçant sur le milieu. Cette superposition permet de calculer un indice (ϕ_1) purement graphique et sans dimension qui s'apparenterait à la somme des forçages en question (Equation 2).

$$\phi_1 = V + H + M \quad (2)$$

Ce cumul s'effectue à partir des données initiales suivantes : la vitesse V (m.s^{-1}) du vent moyen maximal, la hauteur H (m) de la houle et la hauteur M (m) de la mer. Pour les sites qui nous intéressent, les valeurs de V , H et M ne sont pas toujours d'origine locale. Afin de permettre une acquisition en temps réel, à distance et à moindre coût, nous avons privilégié l'emploi de sources provenant de modèles de prévision météorologique et de prédiction des marées. Ces données sont respectivement issues des réanalyses du modèle GFS (résolution de 0.5°), des réanalyses du modèle NWW3 (résolution de 1.5°) et de tables de marée. En ce qui concerne le vent et les vagues, ces données sont disponibles via Internet (<http://www.windguru.cz>). Les valeurs simulées au moment le plus proche de la marée haute sont par la suite introduites dans le calcul. Les données marégraphiques sont celles du niveau de la mer au port fictif de la Pointe de Gatseau (limite sud de notre d'étude). Elles sont générées à l'aide du logiciel gratuit 'Marées dans le Monde©'.

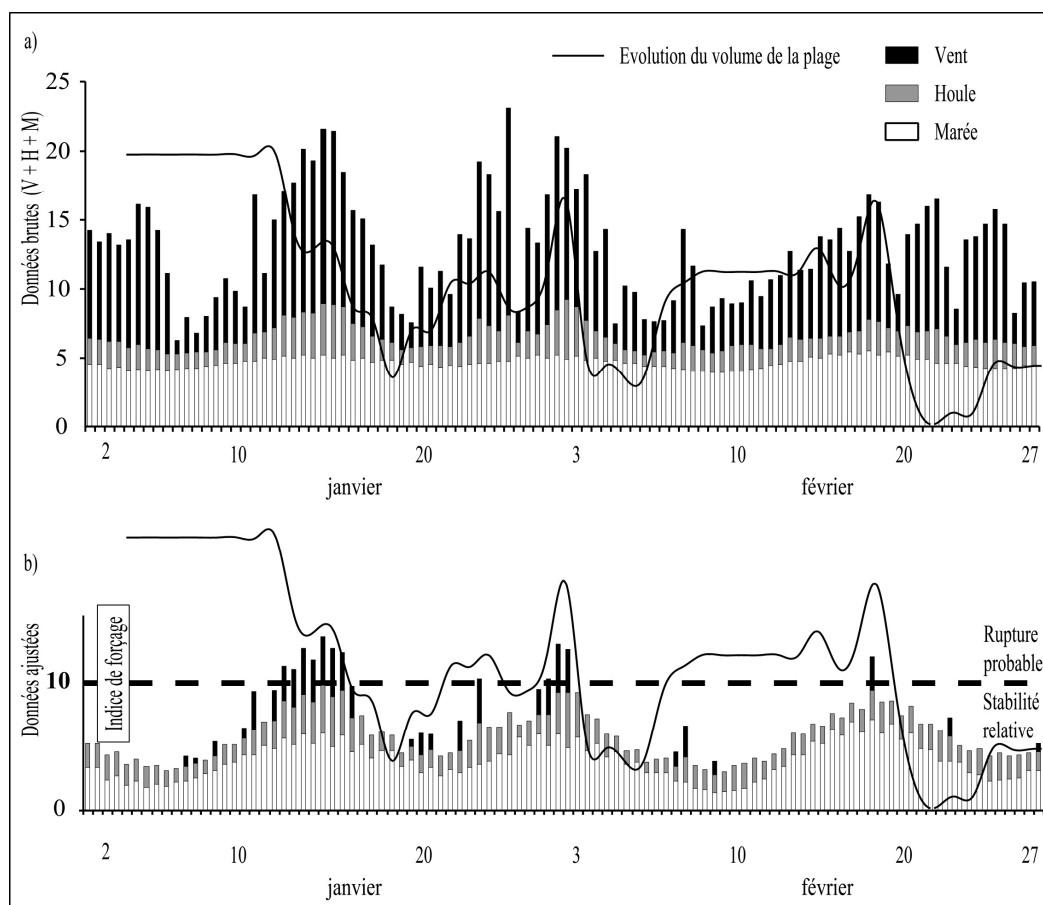


Figure 11 : Formalisation conceptuelle d'un modèle de comportement de plage (exemple des mois de janvier et février 2003 à Vert-Bois) avec a) Principe de construction et b) Ajustement scalaire et filtrage des valeurs. *Conceptual formalisation of a beach behaviour model (illustration through January and February 2003 at Vert-Bois) with a) making of the model and b) tuning of the model (downscaling and sorting of winds and upscaling of tides).*

Nous cherchons à isoler graphiquement les événements qui ont conduit localement à une « rupture » (telle que décrite à la fin du paragraphe 1.4 et illustrée par la figure 6). Pour reconnaître plus facilement ces épisodes, nous proposons une distorsion du graphique d'origine (figure 11b). Cette distorsion passe par l'emploi de coefficients d'ajustement. Cela nous conduit à déterminer une nouvelle valeur pour l'indice (ϕ_2), qui reflète mieux la particularité de ces événements. L'objectif est d'établir une série où l'effet de seuil précité (paragraphe 1.4) interviendrait à partir d'une valeur proche de 10. Ainsi, qualitativement, une valeur en dessous de 10 signifie que la probabilité de « rupture » est quasi-nulle ou synonyme

d'une relative stabilité. A l'inverse, une valeur supérieure à 10 rend compte d'une probabilité de « rupture » importante. Dans la réalité, cette limite est plus floue. Pour réduire l'incertitude liée à l'épaisseur de l'interface entre les deux types de comportements observables, nous interprétons les résultats avec une marge d'erreur d'une unité pour déterminer la « rupture » potentielle par le calcul (valeur de l'indice supérieure ou égale à 11).

En opposant les effets des vents de terre à ceux des vents de mer, nous avons vu que l'orientation du vent est un facteur conditionnant pour partie l'érosion. A Vert-Bois, les exemples du 31 janvier (il n'y a pas eu d'érosion) et du 3 janvier (une « rupture » a été mesurée) illustrent parfaitement cette considération d'ordre général. Afin de rendre compte de cette dichotomie, nous avons choisi de procéder à un filtrage (V'). Celui-ci est propre à l'orientation du site étudié : une valeur nulle est attribuée aux vents de terre, et seules les valeurs correspondant aux vents de mer sont retenues. Afin de différencier de manière plus nette les événements propices à la « rupture », un coefficient (a) sert à la minoration verticale de ce facteur dans le graphique. Sans cela, certains épisodes seraient modélisés comme ayant un caractère érosif alors que ce n'est pas le cas au regard des résultats de nos mesures topographiques. L'échelle de la marégraphie est *a contrario* exagérée par l'emploi d'un opérateur de puissance (b). En effet, la grande majorité des événements étudiés intervient avec des niveaux d'eau importants. Dans l'ensemble des travaux desquels notre démarche est inspirée, ce facteur ressort comme essentiel (Balsillie, 1986 ; Kriebel et Dalrympel, 1995 ; Zhang *et al.*, 2001). Cela permet visuellement de mieux rendre compte de l'écart qui existe, en terme de probabilité d'érosion, entre des conditions associées à une Morte Eau et celles rencontrées lors d'une Vive Eau lorsqu'intervient un épisode tempétueux. Enfin, la constante c correspond au niveau théorique le plus bas possible, c'est-à-dire celui qui serait atteint dans le cas d'une absence totale de vent et de houle au moment d'une marée haute de Morte Eau Exceptionnelle (MEE). Ces ajustements nous conduisent à la formulation suivante (Equation 3) :

$$\varphi_2 = aV' + H + M^b - c \quad (3)$$

Au final, dans notre secteur d'étude, le modèle que nous proposons est formalisé comme suit (Equation 4) :

$$\varphi_3 = 0.3V' + H + M^{1.5} - 7 \quad (4)$$

2. Résultats

2.1. Réponse du milieu aux conditions morphogénétiques actuelles

Nous appliquons cette méthode de suivi depuis le 20 mai 2006. Les premiers résultats obtenus à Vert-Bois sont présentés dans ce paragraphe. Précisons que ce que nous désignons parfois par le terme de « tempête » est différent de celui défini par l'OMM, uniquement basé sur la vitesse du vent (vent moyen supérieur à 24 m.s^{-1}). Au terme d'une année d'enregistrements (près de 700), 18 marées hautes ont été isolées de cette manière (tableau 2). En tout, 13 jours sont concernés : les 6, 22 et 24 octobre, le 23 novembre, les 4, 6 et 7 décembre, les 1^{er}, 18 et 19 janvier et enfin, les 1^{er}, 6 et 21 mars. Ils correspondent en réalité à 8 phases bien distinctes au cours desquelles les conditions météo-marines sont théoriquement favorables à l'érosion. Comme en 2003, ces conditions sont relativement variables d'un cas à l'autre, avec des vitesses de vent moyen allant de 5.5 m.s^{-1} (06/12/2006) à 15 m.s^{-1} (08/12/2006), des hauteurs de houle variant de 1,9 m à 5 m et une marégraphie pouvant aller d'un coefficient moyen (75 le 01/01/2007) à celui d'une importante Vive Eau (112 le 19/03/2007). Tous ces cas n'ont pu faire l'objet d'une vérification journalière comme durant la campagne de 2003.

Date	Vent		Houle	Marée	Indice de Forçage
	Vitesse (m.s ⁻¹)	Direction	Hauteur (m)	Coefficient	Φ_3
06/10/2006	5,8	W	1,9	103	11,2
22/10/2006	8,9	SSW	2,9	86	11,2
24/10/2006	9,3	WSW	5,0	83	13,1
23/11/2006	9,5	SW	2,9	89	11,0
03/12/2006	10,7	SW	3,1	90	12,4
04/12/2006	9,5	WSW	3,4	93	12,3
04/12/2006	9,8	WSW	3,4	95	12,5
06/12/2006	5,5	W	3,2	95	11,0
07/12/2006	9,0	SSW	2,9	90	11,6
08/12/2006	15,0	WSW	4,1	83	14,3
01/01/2007	12,6	WNW	3,3	75	11,9
18/01/2007	10,5	SW	3,2	76	11,4
18/01/2007	11,3	W	3,7	81	12,0
19/01/2007	8,4	W	3,4	86	11,7
21/01/2007	6,6	WNW	2,3	99	11,1
01/03/2007	13,5	WSW	3,7	65	12,1
06/03/2007	9,5	SSW	3,4	88	11,5
19/03/2007	10,4	WNW	2,9	112	13,8

Tableau 2 : Conditions météo-marines associées à l'érosion (mai 2006 à avril 2007) dans le secteur de Vert-Bois. *Wind, swell and tide conditions related to observed erosion periods (May 2006 to April 2007).*

Dans cette seconde phase du suivi, la résolution temporelle des relevés topographiques est bien moindre. A Vert-Bois, les levés au DGPS ont été effectués aux dates suivantes : le 20 mai 2006 (état initial), le 13 octobre 2007, le 21 février 2007 et le 12 avril 2007. Cependant, des observations semi-quantitatives (photos, relevés dans le profil à l'aide de repères fixes) nous ont permis de compléter notre base de données d'observation pour établir une analyse à l'échelle décadaire. Lors de ces différentes visites, nous avons constaté que chaque dépassement significatif du seuil que nous avons déterminé par le calcul s'accompagnait d'une altération visible du système Plage-Dune. Quelques témoignages indirects ont confirmé les érosions consécutives aux franchissements du seuil pendant nos absences du terrain. Nos mesures au DGPS font état d'un recul persistant de la falaise dunaire. Ce recul est de 1 à 3 m selon les levés pour un total de 6 m entre les mois de mai 2006 et avril 2007 (figure 12).

Figure 12 : Illustration qualitative du phénomène d'érosion à Vert-Bois, photos prises entre mai 2006 (en haut) et avril 2007 (en bas). *Qualitative illustration of the erosion at Vert-Bois between May 2006 (top) and April 2007 (bottom).*



Par contre, les volumes de plage calculés à partir des MNT sont variables d'une campagne à l'autre, tantôt en baisse, tantôt en légère hausse. En outre, nous avons pu observer à plusieurs reprises un recul visible de la falaise dunaire tout en mesurant une légère augmentation du volume de la plage.

Cette apparente contradiction peut être interprétée de la manière suivante : temporairement, le haut de plage peut être alimenté par les sédiments enlevés à la falaise, notamment à la suite d'un épisode violent. Les événements qui sont responsables des plus grandes variations dans le profil de la plage sont ceux qui font intervenir les plus hauts niveaux d'eau (6 octobre 2006, 21 janvier 2007 et 19 mars 2007). Ceux qui engendrent les reculs les plus significatifs de la falaise dunaire sont les plus longs épisodes (3 au 8 décembre 2006 et 18 au 21 janvier 2007).

2.2. Les situations synoptiques associées aux « ruptures » du système

Comme nous l'avons vu plus haut, les conditions météo-marines à l'origine des principales phases d'érosion mesurées sur le terrain sont assez variées. Peut-on cependant définir, en terme de probabilité, un type de temps favorable à la manifestation de ce type d'événements ?

Pour cela, nous avons sélectionné les jours où les conditions de forçage sont théoriquement propices à une « rupture » du système littoral, sur la base de nos observations de 2003 et de 2006/2007. Cette sélection a été effectuée sur une série chronologique de quatre ans : du 01 janvier 2003 au 31 décembre 2006. Comme dans le cadre de notre suivi récent, nous avons appliqué une marge d'une unité ($\varphi_3 > 11$) dans l'échelle graphique allouée au forçage météo-marin. Le type de situation associé a été défini à l'aide de la classification des types de circulations sur l'Europe de Hess-Brezowsky. Cette méthode est fréquemment utilisée pour caractériser la circulation atmosphérique et sa variabilité sur l'Océan Atlantique Nord oriental et l'Europe. Plusieurs références sont citées notamment par Gerstengarbe et Werner (2005) et par Kysely et Huth (2006). La méthode de Hess et Brezowsky est fondée sur le champ de pression au niveau de la mer et le géopotential à 500 hPa au-dessus de l'Océan Atlantique Nord et de l'Europe. La classification identifie trois groupes de types de circulations (zonal, mixte et méridien), divisés en 29 sous-types (Grosswetterlagen ou GWL ; Hess et Brezowsky 1952 ; Gerstengarbe et Werner 2005). Le catalogue des GWL quotidiens, disponible pour la période 1881-2004, a été utilisé pour diverses études statistiques de fréquence, persistance et probabilité de transition entre les GWL (Bárdossy et Caspary 1990 ; Klaus 1993).

Au total, une quarantaine de jours (55 marées hautes) et 13 types de situations sont concernés. Leur répartition en fonction des trois groupes de GWL est la suivante : 35% en circulation de type zonal, 22% pour les types mixtes, 43% pour les types méridiens. Concernant les épisodes de très forte magnitude ($\varphi_3 > 13$), les résultats sont tout aussi variables. Sur un total de 14 événements, 30% interviennent dans le cadre d'une circulation de type zonal, 20% pour les types mixtes et 50 % pour les types méridiens. Il ressort qu'ils sont notamment associés au passage de talwegs sur le continent européen, soit 30% de ces cas environ. Lorsqu'un talweg aborde le Golfe de Gascogne, le flux s'oriente généralement au Sud-Ouest dans cette région. Or, notre secteur d'étude est particulièrement exposé à ces vents.

A contrario, l'occurrence d'une « rupture » étant largement dépendante du niveau de la mer et de l'état local du plan d'eau au moment de la marée haute, le type de circulation atmosphérique n'est vraisemblablement pas un point déterminant pour qu'il y ait érosion. Toutefois, en terme de probabilité, la récurrence de situations dépressionnaires accentue logiquement le risque de surcote (Boulingand et Pirazzoli, 1999) et donc, indirectement, le risque qu'intervienne des débordements côtiers, à condition que l'ensemble des autres éléments causaux soit réuni (Pirazzoli, 2000).

2.3. Prédiction du dommage

L'outil est également testé en tant que moyen de prédiction du dommage. En effet, via Internet, nous disposons chaque jour de quatre sorties brutes des modèles GFS et NWW3 pour une échéance de prévision de 7 jours. La méthode employée est identique à celle qui nous a permis de fixer le seuil de vulnérabilité du cordon. Il s'agit de produire des documents semblables à la figure 11, à cela près que la valeur de l'indice est obtenue à partir de données d'une moindre précision. La figure 13 présente un exemple de prédiction pour le début du mois d'octobre 2006 et sa confrontation aux relevés de terrain.

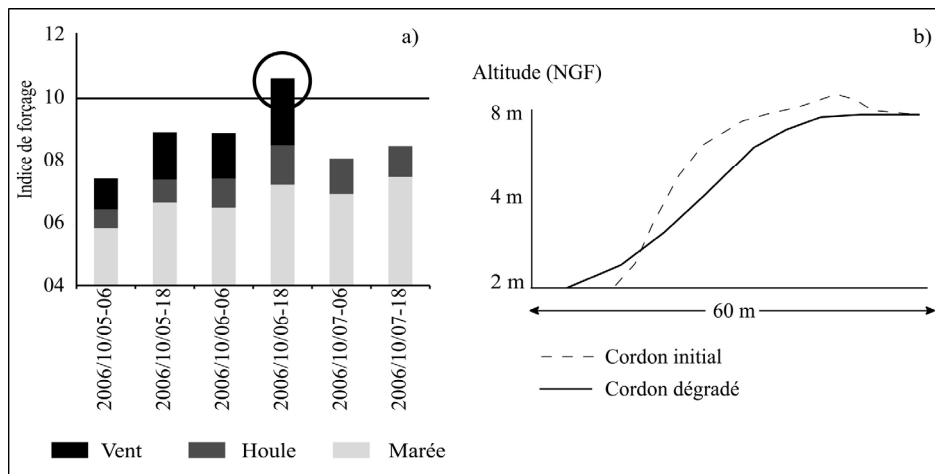


Figure 13 : Prédiction d'un dommage au niveau de la passe des Préposés avec a) Simulation des conditions de forçage à J-5 et b) Dégradation du cordon littoral (relevés datant des 03 et 12 octobre 2006). *A prediction (5 days before) of a damage at the outlet of Les Préposés with a) Simulation of the forcings and b) Observed damage on the barrier (dates of measurements : 03 and 12 October 2006).*

A cinq jours d'échéance, une fois traitées, les valeurs issues des simulations des modèles montrent une probabilité de « rupture » pour le soir du 6 octobre (cercle dans l'histogramme). La hauteur d'eau théorique à pleine mer (16h13) étant de 5,60 m pour un coefficient de 109. Les conditions météo-marines simulées par les modèles au soir du 6 octobre (à 18h UTC) étaient les suivantes : un vent moyen d'Ouest-Sud-Ouest d'environ 7 m.s^{-1} , une houle d'Ouest-Sud-Ouest de 2 m. Les conditions réellement observées au moment de la marée haute étaient : un vent moyen de Sud-Ouest proche de 12 m.s^{-1} (sémaphore de Chassiron, Météo-France) et une houle d'Ouest de l'ordre de 3 m au large (bouée n° 61002, NOAA) pour environ 2 m à la côte (Bulletin côtier de Météo-France). Les mesures topographiques effectuées quelques temps avant et après l'épisode, au niveau de la passe des Préposés, nous renseignent sur le dommage résultant de cette « tempête ». Ces mesures permettent de valider le pouvoir prédictif du modèle de comportement. Avant le 6 octobre, et notamment parce que le niveau d'eau est relativement bas, aucun dépassement de seuil n'était simulé. En raison d'un changement d'orientation du vent (vent de terre), les conditions n'étaient plus favorables à une « rupture » à compter du 7 octobre (figure 13a). Malgré une durée assez courte (une marée haute seulement), cet épisode a engendré une dégradation visible du cordon littoral (figure 13b). Il s'agissait, après une longue période de temps calme (saison estivale), de la première « tempête » susceptible d'engendrer un dommage.

D'autres exercices du même type, mais avec une simple estimation qualitative du dommage (photographies et relevés à partir de repères fixes), ont eu lieu en décembre 2006 et en janvier 2007. Les impacts cumulés des divers épisodes érosifs qui ont eu lieu durant l'hiver 2006-2007 sont importants, avec notamment, au niveau de la passe des Préposés, une invasion de la dune blanche dans l'arrière cordon (figure 14).

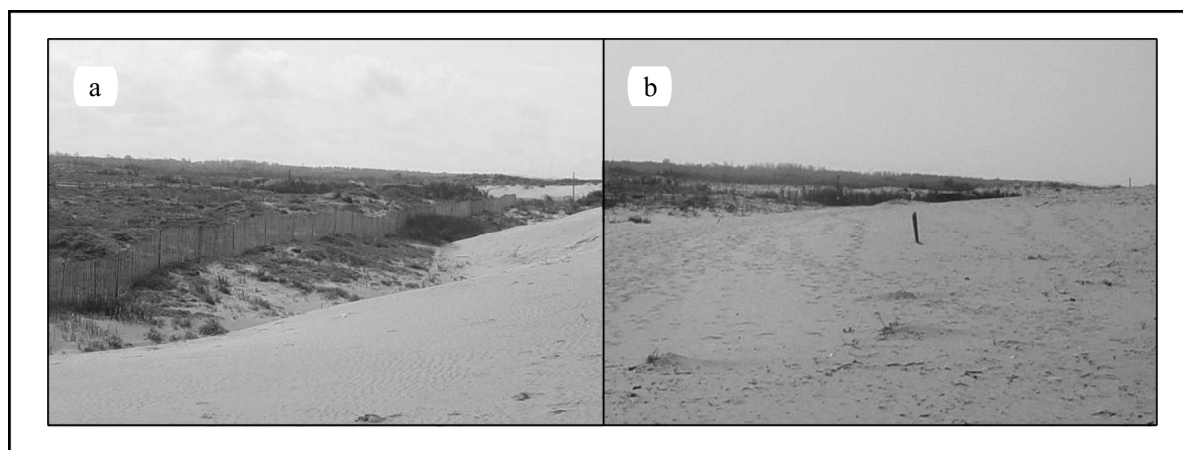


Figure 14 : Illustration des impacts résultant d'une succession de « tempêtes » durant l'hiver 2006-2007, photo (a) : novembre 2006, photo (b) : février 2007. *Illustration of the impacts resulting from the succession of « storms » during the winter season 2006-2007 at the outlet of Les Préposés. Photo (a): November 2006, photo (b): February 2007.*

A cinq jours d'échéance, les prévisions pour ces différents épisodes donnaient des valeurs d'indice comprises entre 11 (le 21/01/2007) et 13 (les 08/12/2006 et 19/03/2007). Les niveaux reconstitués à partir des données d'observation varient entre 11 (le 06/12/2006) et 14,3 (le 08/12/2006). D'une manière générale, la prédiction de la survenue des événements érosifs est juste puisque tous les cas prédits ont bien eu lieu. Cependant, l'ampleur du dommage occasionné est, elle, plus difficilement perçue par le modèle. Ainsi, par exemple, le cas d'octobre 2006 n'a pas été estimé a priori comme un événement majeur de ce point de vue (valeur dépassant de peu le seuil de « rupture »). Il a toutefois engendré un changement significatif dans le profil du cordon littoral car il s'accompagnait d'un fort transfert éolien. Cette erreur est en outre imputable à une sous-estimation de la vitesse du vent moyen par le modèle météorologique (prévue à 7 m.s^{-1} et relevée à 12 m.s^{-1}).

3. Discussion

Sous sa forme actuelle, cet outil est simple à mettre en œuvre et les premiers résultats sont encourageants. Mais il comporte aussi quelques limites. Certains paramètres non pris en compte pourraient avoir un rôle important, comme les surcotes par exemple (Pirazzoli, 2000 ; Baker, 2001). Le choix méthodologique de séparation graphique pour prédire l'érosion est quand à lui fortement critiquable. Des remarques à ce propos ont déjà été développées par Young *et al.* (1995) à travers une critique du modèle SBEACH (Larson et Kraus, 1989). Ces derniers ont mis au point une méthode de prédiction des phases d'érosion/accrétion du profil de la plage. L'ajustement de l'équation qu'ils ont proposé est tiré d'une séparation visuelle des situations correspondant aux deux phases qu'ils cherchaient à distinguer. Avec les mêmes données, Thieler *et al.* (2000) ont employé une analyse discriminante linéaire ou ADL (Fisher, 1936) pour tracer objectivement la droite séparant les cas mesurés. Les résultats de cette discrimination ont montré que la droite de Larson et Kraus (1989) se situerait en dehors de la zone délimitant un degré de confiance de 95%. Cette illustration pose la question essentielle des problèmes de validation des modèles. Par ailleurs, notre modèle ne peut être adapté aux conditions locales qu'au prix d'un long travail d'observation et de suivi. En un sens, il est presque indispensable de disposer d'une base de données d'événements érosifs. Il faut à la fois une bonne connaissance des conditions géomorphologiques qui déterminent le processus de « rupture » et un archivage précis des conditions météo-marines qui y conduisent. La dimension prédictive est bonne si les conditions météo-marines dépassent de beaucoup le seuil théorique que nous proposons de fixer. Elles sont très imprécises pour tous les cas où ce seuil n'est dépassé que de très peu (φ_3 compris entre 10 et 11). La difficulté vient

de ce qu'il est délicat de prendre en compte un effet mémoire, ou une résilience. Avec ce modèle, il n'est pas non plus possible de prédire une relation directe et quantitative entre l'intensité de l'aléa météo-marin et la réponse observée. Par contre, il est possible d'en proposer une interprétation qualitative. En effet, si l'on reprend l'exemple de 2003, après trois épisodes d'érosion successifs (18 au 22 janvier, 29 janvier et 1^{er} au 5 février), le cordon littoral est sans doute moins apte à absorber l'impact d'une nouvelle « tempête », si bien que l'érosion qui résulte du dernier épisode enregistré (18 au 20 février) est plus significative. Ce résultat graphique peut donc être interprété de la manière suivante : le littoral est davantage fragilisé par la répétition des événements que par leur intensité absolue.

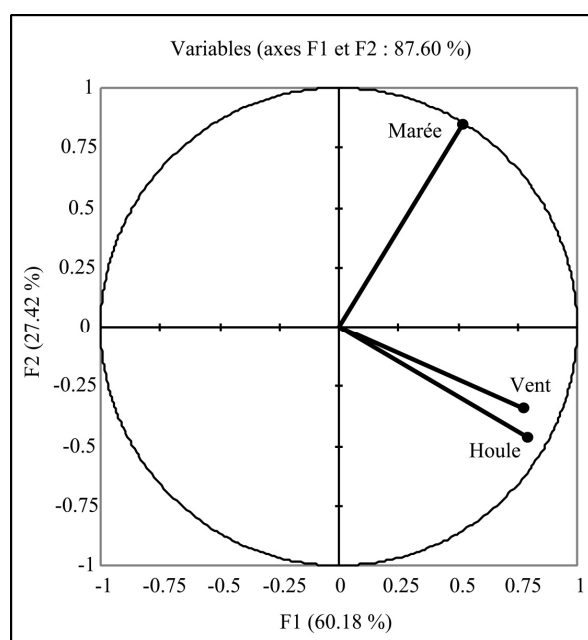
Nous avons analysé statistiquement le rôle qu'occupe chacun des facteurs modélisés pour expliquer l'érosion que nous avons observée durant la première année de suivi continu (mai 2006 à avril 2007). Nous avons effectué un test de corrélation et une Analyse en Composante Principale (ACP) des paramètres pris en compte pour caractériser le forçage météo-marin (tableau 3 et figure 15).

Variables	Vent	Houle	Marée
Vent	1	0,57	0,13
Houle	0,57	1	0,01
Marée	0,13	0,01	1

Tableau 3 : Matrice de corrélation des différents facteurs à l'origine du forçage météo-marin. *Correlation matrix of the meteorological and marine sources of forcing.*

Tout au plus, ces calculs rendent compte de l'étroite corrélation entre la présence d'une forte houle et celle d'un événement météorologique majeur (vent fort), ce qui paraît assez logique. Il en ressort également que la marée serait un facteur secondaire. La conclusion de ce traitement s'inscrit donc en apparente contradiction avec nos observations de terrain. En effet, les phases d'érosion que nous avons observées interviennent presque toujours au moment d'une Vive Eau (figure 10b et tableau 2) et, dans le cas contraire, seuls des aléas d'une très forte magnitude sont susceptibles d'engendrer un changement significatif du point de vue morphologique (exemples du 1^{er} janvier 2007 et du 1^{er} mars 2007). Ainsi, l'ACP, en isolant le facteur marégraphique (sans doute en lien avec sa régularité et son absence de corrélation avec les deux autres facteurs) a tendance à réduire l'influence, pourtant démontrée, de ce paramètre.

Figure 15 : Analyse en Composante Principale (ACP) des différents facteurs à l'origine du forçage météo-marin. *Principal Component Analysis of the meteorological and marine sources of forcing.*



Dans le total de variance expliquant les phases d'érosion que nous avons observées, la présence du couple Vent-Houle semble être un facteur déterminant, voire incontournable. Il est cependant envisageable que ce ne soit pas une nécessité. Pour confirmer ou infirmer cette hypothèse, il nous faudrait pouvoir mesurer l'impact d'un événement particulier. Il s'agit d'un épisode paroxysmique faisant intervenir uniquement l'un ou l'autre facteur au moment d'une MHVVE pour savoir si de telles conditions disposent d'un pouvoir érosif comparable à celui des « tempêtes » déjà observées (celles relevant de la combinaison des trois facteurs). Sur une année de suivi, nous n'avons pas encore eu l'occasion d'observer un tel cas. Cela nous renvoie une fois de plus à la principale limite de cette méthode : la nécessité de disposer d'une base de données événementielles conséquente pour justifier l'interprétation qu'en est faite.

Malgré ces limites, le modèle que nous proposons apporte une information scientifique nouvelle qui complète celles que fournissent les modèles analytiques actuels. Ceux-ci peuvent simuler remarquablement bien des transits sédimentaires en mer ou à proximité de la zone infratidale (Hemdane, 2006) mais ils sont, jusqu'à aujourd'hui, incapables de simuler avec précision les effets d'une tempête. L'incapacité des modèles analytiques à répondre à cette question vient de plusieurs raisons. L'une d'entre elles est qu'ils simulent des processus déterminés alors que la réponse du littoral est conditionnée par des ensembles de processus successifs dont il n'est pas certain qu'ils soient totalement déterminables. C'est pourquoi la notion de réponse chaotique a souvent été invoquée pour décrire les comportements littoraux (Orre et *al.*, 2005). Dans notre cas, nous n'avons pas assez de données pour construire une hypothèse chaotique. Un autre problème est que les modèles analytiques ne couplent pas vent et houle (et à plus forte raison les marées), mais qu'ils les étudient séparément. Ils simulent donc une houle « idéale », non déformée par le vent local. Or nos observations montrent que les houles érosives sont bien celles qui sont associées à des vents précis.

Un dernier problème est que les modèles analytiques ne sont pas calés sur le site qu'ils étudient. Certes, ils sont appliqués sur un MNT qui est bien celui du site local, mais ce calage est totalement illusoire. La topographie sous-marine, particulièrement dans la zone de déferlement, change en permanence et n'est absolument pas une donnée constante (Thieler. *et al.*, 2000). De même, le profil de la plage évolue au cours de la tempête, ce dont aucun modèle ne tient compte. Enfin la plage et la dune ne sont pas des plans fictifs, mais des lieux réels, encombrés d'objets et en partie colonisés par la végétation (Meur-Férec et Ruz, 2002). Il est difficile d'ajouter indéfiniment des paramètres à un modèle analytique pour lui faire prendre en compte tout ce qui vient d'être mentionné. Une telle prise en compte de la totalité des processus localement actifs est utopique. Il est donc logique de raisonner de manière synthétique, *a posteriori*, pour tenter de modéliser grossièrement les situations où l'on constate un dommage (reconnu comme tel par une société littorale soucieuse de sa bonne gestion). Autrement dit, ce qu'il est intéressant de pouvoir modéliser quand on s'adresse à un aménageur, ce sont les conditions d'apparition d'un seuil morphologique et non le fonctionnement exact de la tempête. En ce sens notre modèle, bien qu'imparfait, a une capacité à prédire la probabilité d'un dommage. Mais il présuppose que des observations de terrain aient permis de définir ce qu'est, localement, un dommage.

Conclusion

A Saint-Trojan, plusieurs stratégies de lutte contre l'érosion ont déjà été testées. Dans les années 1980, l'ONF (gestionnaire de la forêt et de la dune littorale) avait tenté une déstabilisation de la dune mobile afin d'anticiper une dégradation prévisible de la frange littorale. Vingt ans plus tard, la section littorale de la DDE 17 (gestionnaire du Domaine Public Maritime) s'est portée vers un procédé nouveau pour agir sur le haut de plage. Ces deux types d'intervention sont loin d'apporter les résultats escomptés. Beaucoup invoquent

une méconnaissance du milieu. Pour l'instant, l'ensemble des études portant sur la dynamique d'érosion marine dans ce secteur montre qu'il existe une relation inscrite dans la durée entre la fréquence des conditions météo-marines paroxysmales (tempêtes) et le rythme du recul. Toutefois, ces analyses n'abordent ce phénomène que de manière descriptive. Nous pensons également que la résolution temporelle utilisée jusqu'à présent est insuffisante pour déceler quelles sont réellement les interactions qui interviennent entre le forçage et la réponse du milieu. En développant une méthode plus simple à mettre en œuvre que celle requise par une démarche analytique, nous pouvons apporter quelques compléments aux conclusions proposées par nos prédécesseurs.

Nos résultats montrent en quoi le littoral bordant « La Dune de Saint-Trojan » peut être considéré comme un espace très réactif au forçage météo-marin, ce qui explique en partie l'intensité de la dynamique de recul observée depuis plusieurs années maintenant. Ils montrent en outre que le dommage occasionné n'est pas nécessairement corrélé à la magnitude de l'aléa météorologique (tempête) mais qu'il découle plutôt d'une combinaison de facteurs contribuant à l'érosion : le vent, la houle, le niveau de la mer. Enfin, au terme d'une année de suivi, nous avons pu rendre compte d'un fait majeur : le lien entre la fréquence des événements érosifs et le niveau de résilience du milieu.

Sur cette base, nous pensons qu'il est envisageable d'étendre notre postulat relatif à l'existence d'effets de seuil concernant le comportement des formes littorales en question. En effet, dès lors que plusieurs épisodes (même d'intensité modérée) se succèdent, nous observons des réponses de plus en plus significatives en terme de déséquilibre sédimentaire. Il semblerait dans ce cas qu'un nouveau seuil soit franchi, celui à partir duquel le système Plage-Dune n'est plus en mesure de cicatriser convenablement et se retrouve en position de vulnérabilité face aux agents météo-marins. Dans ces conditions, la forme est contrainte au recul car elle n'est plus en mesure de s'adapter comme elle aurait pu le faire suite à un épisode isolé (même de forte intensité).

Bibliographie

- BAKER B., 2001 : Surcotes et marées de tempêtes (extrait de « The perfect storm surge »). *Métmar*, **190**, 15-18.
- BALSILLIE J.H., 1986 : Beach and coast erosion due to extreme event impact. *Shore and Beach*, **54**, n° 4, 22-37.
- BARDOSSY A. et CASPARY H.J., 1990 : Detection of climate change in Europe by analysing European atmospheric circulation patterns from 1881 to 1989. *Theoretical and Applied Climatology*, **42**, 155-167.
- BERTALI I., LAHONDERE C., BUENRLEAU G., MICHENEAU C. et DAUGE C., 2002 : De la dune à la forêt. *Les cahiers d'Oléron* (2° éd.), **9**, 27 p.
- BOULINGAND R. et PIRAZZOLI P.A., 1999 : Les surcotes et les décotes marines à Brest, étude statistique et évolution. *Oceanologica Acta*, **22**, 153-166.
- CLARKE M., RENDELL H.M., TASTET J. P., CLAVET B. et MASSE L., 2002 : The Late-Holocene sand invasion and North Atlantic storminess along the Aquitaine Coast, southwest France. *The Holocene*, **12**(2), 231-238.
- DDE 17, 1993 : *Schéma de Mise en Valeur de la Mer (SMVM) 17, livre bleu*. Conseil Général de la Charente-Maritime (commandé par), 125 p.
- GERSTENGARBE F.-W. et WERNER P.C. 2005 : *Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-2004)*. Potsdam, PIK-Report, n° 100, 148 p.
- HANSON H., AARNINKHOF S., CAPOBIANCO M., JIMENEZ J. A., LARSON M.,

NICHOLLS R.J., PLANT N.G., SOUTHGATE H.N., STEETZEL H.J., STIVE M.J.F. et DE VRIEND H.J., 2003 : Modelling of Coastal Evolution on Yearly to Decadal Time Scales. *Journal of Coastal Research*, **19**(4), 790-811.

HEQUETTE A., 2001 : Courants et transports sédimentaires dans la zone littorale : le rôle des courants orbitaux et de downwelling. *Géomorphologie : relief, processus et environnement*, **1**, 57-68.

HEMDANE Y., 2006 : *Transport sédimentaire d'une avant-côte de type macrotidale. Cas du littoral du Nord-Pas-de-Calais (France)*. Thèse de doctorat en Environnement, Université du Littoral-Côte d'Opale, 206 p.

HESS P. et BREZOWSKY H., 1952 : *Katalog der Grosswetterlagen Europas*. Bibliothek des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone, **33**, 39 p.

KLAUS D., 1993 : Zirkulations und Persistenzänderungen des Europäischen Wettergeschehens im Spiegel der Grosswetterlagenstatistik. *Erdkunde*, **47**, 85-104.

KRIEBEL D.L. et DALRYMPER R.A., 1995 : *A northeaster risk index*. R&D Coastal Engineering, Newak, Delaware, 33 p.

KYSELÝ J. et HUTH R., 2006 : Changes in atmospheric circulation over Europe detected by objective and subjective methods. *Theoretical and Applied Climatology*, **85**, 19-36.

LAMB H.H. et FRYDENDAHL K., 1991 : *Historic storms of the North Sea, British Isles and Northwest Europe*. Cambridge, Cambridge University Press, 203 p.

LARSON M. et KRAUS N.C., 1989 : *SBEACH: Numerical Model for Simulating Storm-Induced Beach Change*. Technical Report CERC-89-9, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.

LEMASSON L., 1998 : *Vents et tempêtes sur le littoral de l'ouest de la France : variabilité, variations et conséquences morphologiques*. Thèse de doctorat, département de Géographie, Université de Rennes 2, 183 p. + annexes.

MDTA (Agence), 2000 : *Plan de prévention des risques de feux de forêt et littoraux, aléas submersion marine et érosion côtière*. Conseil Général de la Charente-Maritime (commandé par), avec la collaboration de la DDE 17 et CREOCEAN, 4-7.

MEUR-FEREC C. et RUZ M.H., 2002 : Transports éoliens réels et théoriques en haut de plage et sommet de dune (Wissant, Pas-de-Calais, France). *Géomorphologie*, **4**, 321-324.

MIOSSEC A., 1998 : La question du recul des côtes - Erosion marine, les réponses. *MappeMonde*, **52**(4), 1-6.

NEBOIT R., 1983 : L'homme et l'érosion. *Bull. Fac. Lettres et Sc. Humaines*, Univ. Clermont-Ferrand II, nouv. série, 17-183.

ORRE S., GJEVIK B. et LACASCE J.H., 2005 : Characterizing chaotic dispersion in a coastal tidal model. *Continental Shelf Research*, **26**(12/13), 1360-1374.

PASKOFF R., 1998 : *Les littoraux. Impact des aménagements sur leur évolution*. Armand Colin, Paris (3^e éd), 260 p.

PIRAZZOLI P.A., 2000 : Surges, atmospheric pressure and wind change and flooding probability on the Atlantic coast of France. *Oceanologica Acta*, **23**(6), 643-661.

PRAT M.-C., 2001 : La côte charentaise : une dynamique littorale exacerbée (côte sud-ouest de l'île d'Oléron et côte d'Arvert). *Travaux du Laboratoire de Géographie Physique Appliquée*, **19**, 73-84.

REGNAULD H., HUBERT-MOY L. et MUSEREAU J., 2004 : Risque littoral, évolution climatique et naturalité du dommage. *Information Géographique*, **68**, 40-56.

THIELER E., PILKEY O.H., YOUNG R.S., BUSH D.M. et CHAI F., 2000 : The use of mathematical models to predict beach behavior for U.S coastal engineering: a critical review. *Journal of Coastal Research*, **16**(1), 48-70.

YOUNG R.S., PILKEY O.H., BUSH D.M. et THIELER E.R., 1995 : A Discussion of the Generalized Model for Simulating Shoreline Change (GENESIS). *Journal of Coastal Research*, **11**(3), 875-886.

ZHANG K., DOUGLAS B.C. et LEATHERMAN S.P., 2001 : Beach erosion potential for severe nor'easters. *Journal of Coastal Research*, **17**(2), 309-321.