



HAL
open science

Étude de la morphodynamique et du profil d'équilibre d'une plage de poche macrotidale

Klervi Hamon

► **To cite this version:**

Klervi Hamon. Étude de la morphodynamique et du profil d'équilibre d'une plage de poche macrotidale. Océanographie. 2014. dumas-01020013

HAL Id: dumas-01020013

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01020013>

Submitted on 7 Jul 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UBO

université
de bretagne
occidentale



MASTER SML

SCIENCES DE LA MER ET DU LITTORAL

**MENTION
GEOSCIENCES BREST**

Klervi HAMON

**Etude de la
morphodynamique et du
profil d'équilibre d'une plage
de poche macrotidale**

Année Universitaire : 2013-2014

Structure d'accueil : IUEM, Laboratoire Domaines Océaniques

Tuteur de stage : Anne DESCHAMPS, France FLOC'H , Nicolas LE DANTEC

Référent universitaire : David GRAINDORGE



Remerciements

A l'issue de ce stage je voudrais d'abord remercier Anne, France et Nicolas pour leur investissement dans ce projet.

Je tiens aussi à remercier Serge Suanez et Véronique Cuq du laboratoire GEOMER, d'avoir mis à ma disposition ce jeux de données exceptionnelles issu d'un travail longue haleine depuis 2003.

Merci à mon papa Daniel et à ma maman Françoise

Merci aussi mes sœurs Rozenn, Maïwenn et Annaïg, le gang des P... et aussi à Alexandre qui lui aussi trouve que LateX c'est formidable !

Spécial dédicace à Mumu, ses Pez à la mandarine, et à toute les pauses prises à exactement 10h30 et 15h30, un miracle que le tueur ne nous ai pas trouvées...

A Virgil le barbare cannibale, à qui il faudrait rappeler que l'esclavage a été abolis en France, et les virées sur la corniche pour aller voir la mer sur le chemin de retour.

Merci à Guillaume dont les visites dans le côté obscur ont toujours fait plaisir, aux les garçons (Cyrill et Etiennes) avec leur bonne humeur et leurs chansons, à Juju pour les petites discussions en attendant que l'eau bouille, aux rencontres avec Estelle dans les escaliers, à Léna qui était aussi impatient que moi d'aller manger, aux repas de midi dans la salle de Babeth.....Nioufniouf et sa présence virtuelle en ce soir de rédaction de rapport.

Et aussi aux géocopains qui n'étaient pas dans le coin pour ce stage.

En résumé, gros bisous aux spartiates !!

Une petite mention à la tempête de fin janvier qui a rendu la mise en place des capteurs de pression sur la plage de Porsmilin mémorable... et humide.

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Introduction et Problématique | 5 |
| 1 État de l'art et présentation de la zone d'étude | 7 |
| I Morphodynamique des plages sableuses | 7 |
| 1 Morphologie, type de plage et classification | 8 |
| 2 Processus morphogènes | 9 |
| 3 Cas particulier des plages de poche | 9 |
| II La plage de Porsmilin | 10 |
| 1 Géomorphologie et caractéristiques sédimentaires | 10 |
| 2 Hydrodynamique | 12 |
| 3 Données disponibles | 13 |
| III Topographie | 13 |
| III Données de houle PréviMER | 13 |
| 2 Méthodes d'étude de la morphodynamique des plages | 15 |
| I Les profils d'équilibre | 15 |
| II Méthodes d'analyse statistique | 16 |
| 1 Analyses statistiques classiques | 16 |
| 2 Autres types d'analyses statistiques | 16 |
| III Modèles morphodynamiques empiriques | 18 |
| 3 Résultats | 21 |
| I Analyse statistique classique | 21 |
| 1 Hydrodynamique | 21 |
| I Mise en forme des données | 21 |
| I Analyse spectrale de la hauteur significative de la houle | 22 |
| I Hauteur significative moyenne de la houle | 22 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2 | Profils topographiques | 24 |
| II | II Mise en forme des données | 24 |
| II | II Profil moyen et enveloppes | 24 |
| II | II Étude de la pente | 28 |
| II | II Données brutes | 28 |
| II | II Régression linéaire de degré 3 | 29 |
| II | Analyse orthogonale empirique (EOF) | 30 |
| 1 | 1 Inertie des modes | 31 |
| 2 | 2 Illustration de la décomposition par la méthode EOF | 31 |
| 3 | 3 Sensibilité de la décomposition EOF au choix des paramètres | 34 |
| 4 | 4 Analyse des modes spatiaux et temporels | 35 |
| IV | IV Modes spatiaux | 35 |
| IV | IV Modes temporels | 35 |
| 5 | 5 Analyse spectrale des modes temporels | 35 |
| III | Profil d'équilibre | 36 |
| IV | Modèles morphodynamiques empiriques | 37 |
| 1 | 1 Modèle de Yates et al. (2009) | 37 |
| I | I Principe | 37 |
| I | I Résultats | 38 |
| 2 | 2 Modèle Tangente | 40 |
| II | II Principe | 40 |
| II | II Résultats | 40 |
| 3 | 3 Modèle "Point de plus grande pente" | 41 |
| III | III Principes | 41 |
| III | III Résultats | 42 |
| 4 | 4 Modèle Aires | 42 |
| IV | IV Principes | 42 |
| IV | IV Résultats | 42 |
| 4 | Discussion | 43 |
| | Conclusion et Perspectives | 47 |

Table des figures

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Schéma de la zone littorale et des échelles de temps impliquées dans sa dynamique (d'après Cowell et al., 1999 modifié par Dehouck (2006)) | 7 |
| 1.2 | Classification des plages d'après Masselink et Turner., 1999 (modifié par Dehouck (2006)) | 8 |
| 1.3 | Carte de localisation de la plage de Porsmilin (Modifié d'après Jaud (2011)) . . | 11 |
| 1.4 | a. Rose des vent ; b. Direction des houles en Mer d'Iroise (Jaud (2011) d'après Dehouck (2006)) | 12 |
| 1.5 | Localisation des profils topographiques à Porsmilin (Dehouck, 2006) | 14 |
| 2.1 | Tableau récapitulatif des modèles prédictifs de variation de la position du rivage | 20 |
| 3.1 | Comparaison des hauteurs significatives de vagues issues du modèle PréviMER pour les zones Norgasud et Iroise, ainsi que les hauteurs significatives maximales sur 12 h. | 21 |
| 3.2 | Analyse spectrale de la houle | 23 |
| 3.3 | 178 profils topographiques de la plage de Porsmilin, profil moyen ainsi de l'enveloppe (en noir) pour la période de 2003 à 2014 (12 ans) | 24 |
| 3.4 | Variabilité des profils de plage de Porsmilin A. Profils moyens saisonniers et enveloppes B. à F. Ecart-types saisonniers | 26 |
| 3.5 | Exemple du calcul des pentes, les points rouges représentent les points de calcul, les bleus ceux utilisés pour les régressions linéaires (en noir) | 29 |
| 3.6 | Représentation schématique des variations saisonnières de la pente pour la plage de Porsmilin | 30 |
| 3.7 | Modes spatiaux et temporels (avec la hauteur significative de la houle) des modes 1 (A. et B.), 2 (C. et D.) et 3 (E. et F.) | 32 |
| 3.8 | Reconstructions mathématiques de profils de plage | 33 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.9 | Modes spatiaux et temporels 1,2 et 3 pour des EOF sur des profils interpolés à 120 m (pointillé) et à 155 m (trait plein) | 34 |
| 3.10 | Analyse spectrale des modes temporels | 36 |
| 3.11 | Mode temporel 1, profil moyen et régression de la forme $Ay^{2/3}$ | 37 |
| 3.12 | Représentation schématique du modèle de Yates et al. (2009) et du modèle Tangente | 37 |
| 3.13 | Modèle de Yates et al. (2009) avec la position initiale par rapport au profil d'équilibre en fonction de l'énergie et du taux d'accrétion entre deux profils . . . | 39 |
| 3.14 | Modèle Tangente avec la position initiale par rapport au profil d'équilibre en fonction de l'énergie et du taux d'accrétion entre deux profils | 40 |
| 3.15 | Modèle "Point de plus grande pente" avec position initiale du point de plus grande pente en fonction de l'énergie et du taux de variation de la position du point | 41 |
| 4.1 | Mode temporel 3 et indice océanique de l'oscillation ENSO | 45 |

Introduction et problématique

Le littoral et particulièrement les plages sont des zones fragiles en constante évolution. La compréhension de la dynamique côtière est importante du fait des enjeux associés. En effet les côtes sont en proie à une augmentation des activités économiques, notamment lié au tourisme, entraînant urbanisation, aménagements littoraux et concentration de la population. Dans ce contexte, la caractérisation des changements et des risques est nécessaire à la gestion de ces zones sensibles.

La dynamique sédimentaire des plages sableuses n'est pas suffisamment bien décrite du fait de la complexité des processus :

- L'hydrodynamisme dû au forçage météo-marin est particulièrement complexe en milieu côtier, avec l'influence de la houle et la marée principalement.
- La dynamique sédimentaire (transport, évolution morphodynamique) résultant de ce forçage est elle aussi complexe de part les processus physiques en jeux à différentes échelles de temps et d'espace.

C'est dans ce cadre que le Laboratoire Domaines Océaniques de l'IUEM souhaite développer un modèle numérique de dynamique hydrosédimentaire de la plage de Porsmilin, site atelier représentatif des plages de poche macrotidales. En effet l'évolution topographique de la plage de Porsmilin est suivie depuis 2003, ce qui permet d'avoir aujourd'hui une base de données suffisamment étendue dans le temps pour permettre la compréhension de sa morphodynamique. La paramétrisation d'un modèle hydrosédimentaire étant complexe, il est nécessaire de mener préalablement une étude préliminaire.

C'est dans ce projet que s'inscrit cette étude préliminaire de la plage de Porsmilin. Il s'agit ici de caractériser les principaux processus morphogènes grâce à des modèles empiriques ainsi que de caractériser le profil d'équilibre de la plage.

Chapitre 1

État de l'art et présentation de la zone d'étude

I Morphodynamique des plages sableuses

Par définition une plage correspond au domaine intertidal, c'est-à-dire au domaine de balancement des marées. Cependant pour comprendre la dynamique des zones littorales que sont les plages et plus particulièrement les plages sableuses, il est nécessaire de considérer les transferts sédimentaires entre la plage et la zone subtidale (cross-shore) ainsi que le long de la côte. Le littoral et les plages sont des systèmes qui évoluent à différentes échelles de temps et d'espace en fonction des agents de forçage comme la houle, les marées et les courants associés.

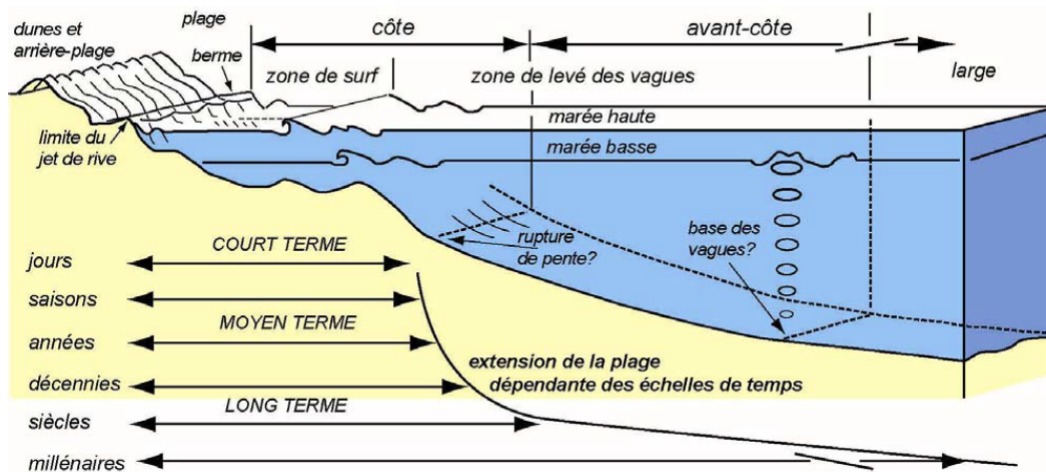


FIGURE 1.1 – Schéma de la zone littorale et des échelles de temps impliquées dans sa dynamique (d'après Cowell et al., 1999 modifié par Dehouck (2006))

1 Morphologie, type de plage et classification

Dans sa partie émergée, la plage est généralement délimitée par des dunes ou une falaise. La profondeur de fermeture du système est considérée comme la limite en mer des plages, elle est définie comme la profondeur limite d'action de la houle, profondeur qui correspond à une demi-longueur d'onde de la houle (Inman and Adams, 2005). (Figure 1.1). Ensuite, depuis la mer vers la terre il y a d'abord la zone de levée des vagues ou "shoaling zone" qui s'étend du point de formation des vagues au point de déferlement ("breaking point"). Puis, il y a la zone de déferlement ou de surf (« surf zone ») qui s'étend depuis le point de déferlement des vagues vers le haut de plage. Enfin, le haut de plage ou "swash zone" correspond à la zone de la pente affectée par le jet de rive.

La classification la plus communément utilisée divise les plages en six catégories avec deux extrêmes : dissipatif (plage plate et peu profonde) et réfléchif (plage avec une pente forte) (Wright and Short, 1984). Ce type de classification (Figure 1.2) est basée sur des paramètres tels que Ω (vitesse de chute adimensionnelle) et RTR (Relative Tidal Range) avec :

$$\Omega = H_b / \omega_s \cdot T$$

$$RTR : \text{Tidal range} / H_b$$

où H_b : Hauteur significative des vagues (m)

ω_s : Vitesse de chute du sédiment (m/s)

T : Période des vagues (s)

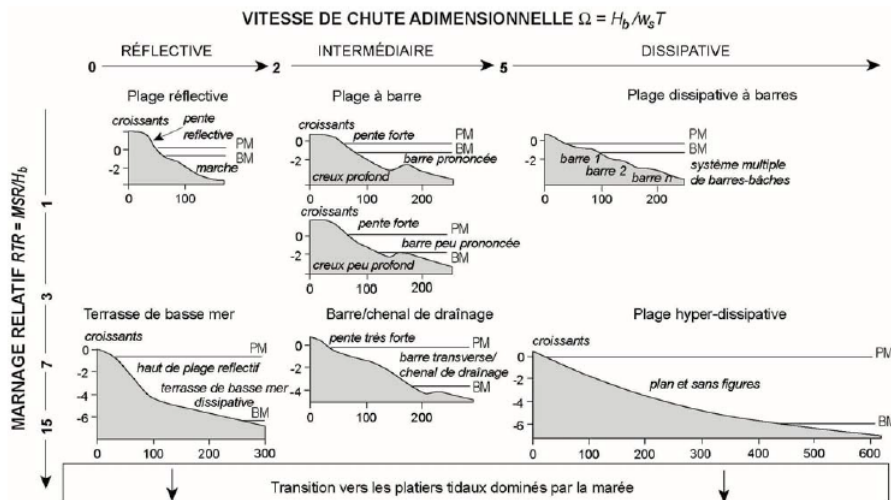


FIGURE 1.2 – Classification des plages d'après Masselink et Turner., 1999 (modifié par Dehouck (2006))

2 Processus morphogènes

Les plages sableuses sont des systèmes dynamiques dont les variations sont contrôlées par différents processus à différentes échelles de temps ; de plusieurs millions d'années pour des paramètres tels que la géologie régionale, quelques centaines d'années pour les variations eustatiques, annuelles pour les variations saisonnières, événementielle (tempête par exemple) et instantanés (déferlement d'une vague par exemple). Pour comprendre ces systèmes complexes, il est important d'identifier les processus qui les contrôlent. En effet, la morphodynamique des plages résulte d'une conjonction de forçages hydro-sédimentaires mais aussi anthropiques.

La morphodynamique de la plage est due aux contraintes appliquées par le fluide sur le sédiment. Ces contraintes qui peuvent être visqueuses ou turbulentes résultent de différents forçages hydrodynamiques tels que la houle, les courants, le niveau d'eau ou encore la marée. Sur les plages, la morphodynamique est fortement influencée par la dissipation de l'énergie des vagues incidentes dans la zone de déferlement. A ces processus s'ajoute la dynamique sédimentaire complexe liée au niveau d'érodabilité (dépendant du type de sédiment, taille, forme etc.), aux différents modes de transports et aux interactions au sein du sédiment.

3 Cas particulier des plages de poche

La morphodynamique des « plages de poche » est modifiée par rapport à celle des plages dites « ouvertes » par la présence de limites latérales, éperons rocheux ou ouvrages d'une longueur équivalente à la longueur de la plage et qui engendrent des phénomènes tels que la réfraction et/ou la diffraction des vagues. Ce type de plage est aussi caractérisé par la présence de courants d'arrachement et de phénomènes dit de rotation, lors desquels le sable s'accumule préférentiellement d'un côté de la plage pendant que l'autre coté s'érode. Ce phénomène est lié à la géométrie d'incidence des vagues (Short and Masselink, 1999; Pinto et al., 2009; Martins et al., 2010).

Bien que les plages de poche soient un type de plage très présent dans le monde, naturellement ou artificiellement en raison de la construction d'ouvrages, elles sont encore relativement peu étudiées et peu de données sont disponibles dans la littérature, en particulier en ce qui concerne les plages de poche macro-tidales. Cette étude se concentre donc sur un système de plage de poche dans un environnement macrotidal, avec la plage de Porsmilin comme site atelier. La morphologie de cette plage a été mesurée régulièrement depuis 2003 à une fréquence suffisante (quasi-mensuelle) pour permettre une étude de la morphodynamique.

II La plage de Porsmilin

La plage de Porsmilin se situe dans l'anse de Bertheaume en mer d'Iroise, sur la commune de Locmaria-Plouzané (Figure 1.3). La plage est suivie par le laboratoire GEOMER de l'IUEM (Institut Universitaire Européen de la Mer) dans le cadre de l'Observatoire du Domaine Côtier depuis 2003. Ce site, avec trois autres plages en mer d'Iroise, était l'objet d'étude de la thèse de Dehouck (2006) portant sur la morphodynamique à moyen et court terme de ces plages. Depuis 2010, le suivi est effectué dans le cadre du SOERE « Trait de côte » (Système d'observation et d'expérimentation au long terme pour la recherche en environnement). L'étude de Jaud (2011) a permis de mettre au point de nouveaux protocoles d'étude pour le suivi de la morphodynamique dans la continuité terre-mer grâce à une combinaison de méthodes : LiDAR terrestre ou TLS (Terrestrial Laser Scanner) et drone pour le terrestre, sondeur multifaisceaux pour le marin. Depuis 2014 la plage de Porsmilin fait partie des 25 sites ateliers du SNO DyLiTC (Service National d'Observation "Dynamique du Littoral et du Trait de Côte") labellisé par l'INSU (Institut National des Sciences de l'Univers).

1 Géomorphologie et caractéristiques sédimentaires

La plage de Porsmilin est une plage de fond d'anse orientée est-ouest et ouverte sur la mer d'Iroise vers le sud. La plage est bordée par des falaises sur ses deux côtés. Ses dimensions sont réduites : environ 200 m de large (cross-shore) et 200 m de long (longshore), en période de découverte maximum (Jaud, 2011).

Le domaine supra-tidal est constitué d'un talus dunaire. Le domaine intertidal présente ponctuellement des barres intertidales, d'amplitude d'ordre décimétrique sur les niveaux de basse mer ou métriques sur les niveaux de haute mer. Des croissants de plage sont parfois observés en haut de plage (Dehouck, 2006). Une tourbière holocène affleure épisodiquement sur la terrasse de basse mer permettant reconstruction paléoclimatologique et reconstruction du paléorivage (Goslin et al., 2013; Fernane et al., 2014).

La granulométrie de la plage est comprise entre une fraction moyenne de 1.5 mm pour le point d'échantillonnage le plus bas sur la plage jusqu'à une fraction moyenne de 0.38 mm sur la dune en passant par une granulométrie de 0.45 mm en milieu de plage. L'étude granulométrique des étudiants de master 1 Géosciences Brest de l'IUEM dont les résultats sont présentés ici s'est déroulée en mars 2014 après un hiver marqué par une succession de tempêtes exceptionnelles. Le stock sableux ayant été fortement mobilisé pendant ces épisodes de tempêtes il leur a été possible d'estimer la granulométrie des galets laissés à découvert sur la plage. La taille moyenne des galets

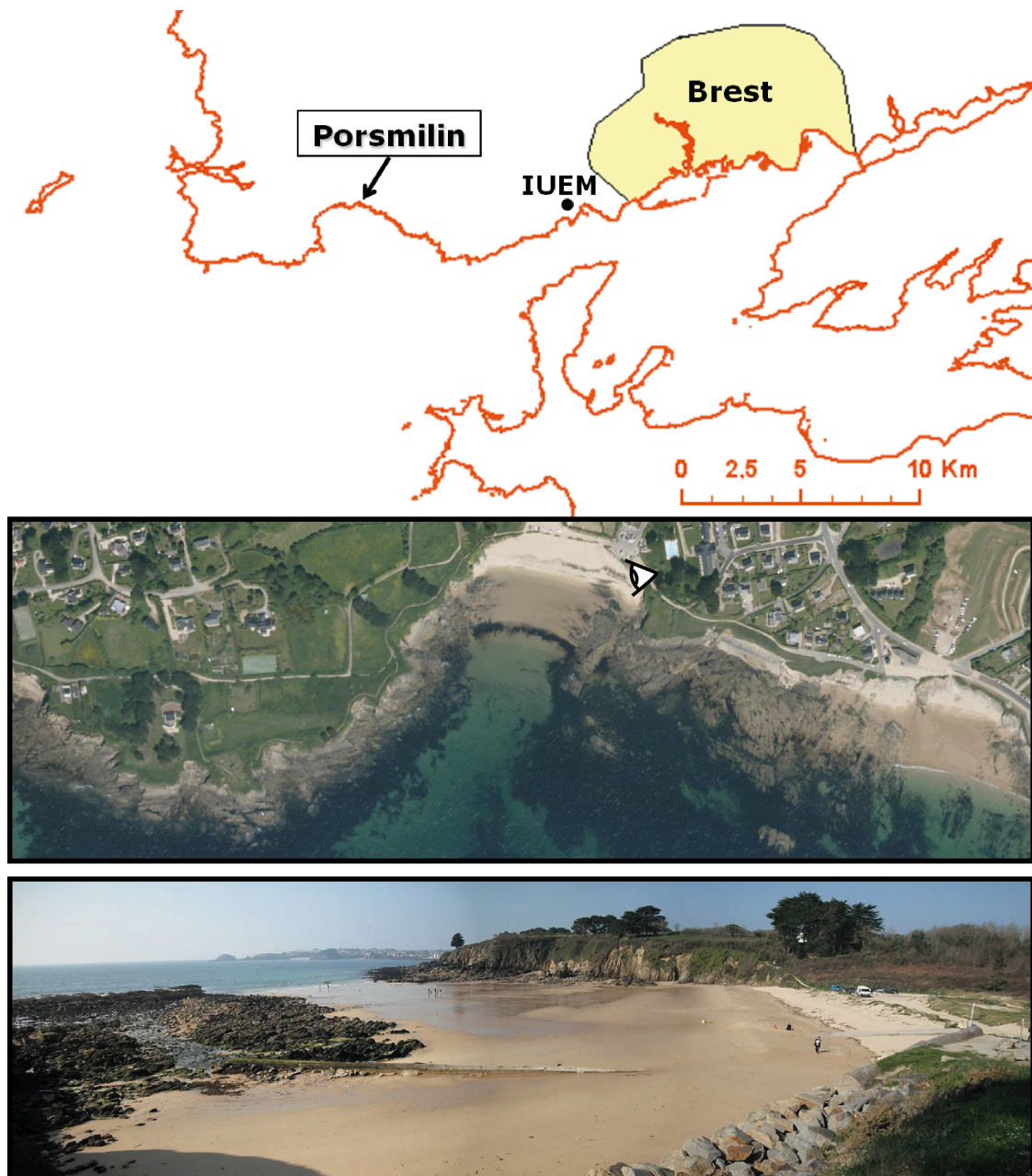


FIGURE 1.3 – Carte de localisation de la plage de Porsmilin (Modifié d'après Jaud (2011))

présents sur la plage est de l'ordre de la dizaine de centimètres. En comparaison, Dehouck (2006) décrit la plage de Porsmilin comme constituée de sables moyens ($D_{50} = 320\mu\text{m}$) globalement homogènes avec une augmentation de la fraction de débris coquillers sur les lignes de rivage, au sommet des croissants de plage et sur les crêtes des barres intertidales. Les différence de résultat entre ces deux étude s'explique par les conditions dans lesquelles elle ont été réalisées. L'étude des étudiants de l'IUEM ayant été réalisée début 2014 après un hiver atypique du fait de la répétition de tempêtes, il est normal que les résultats de leurs analyses soient plus disparates et que la fraction moyenne soit plus grossière que lors de l'étude de Dehouck (2006).

2 Hydrodynamique

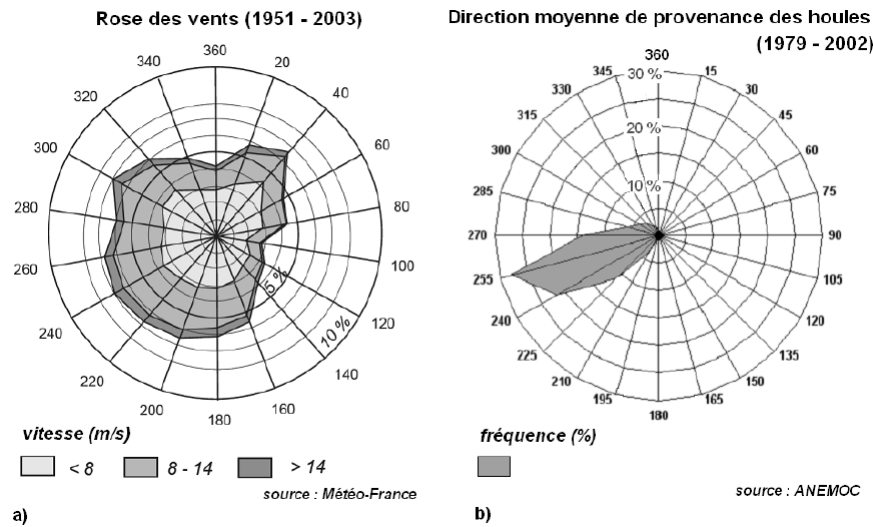


FIGURE 1.4 – a. Rose des vent ; b. Direction des houles en Mer d'Iroise (Jaud (2011) d'après Dehouck (2006))

En mer d'Iroise, la marée a un régime macro-tidal semi-diurne avec marnage moyen de 5.6 m en vives-eaux et de 2.9 m en périodes de mortes-eaux. Le marnage peut atteindre 7.3 m pour des marées d'équinoxe en vives-eaux. Les courants de marée sont orientés Nord-Est Sud-Ouest dans l'anse de Bertheaume. Leur intensité est variable, avec un maximum de 0.4 m/s à mi-flot et mi-jusant en période de vives-eaux (SHOM, 1994).

Les vents océaniques dominants sont de secteur N160 à N40 (Figure 1.4) (Dehouck, 2006). Le climat de vague est très énergétique en mer d'Iroise mais la propagation des vagues est complexe en raison de la présence d'îles, de plateformes rocheuses et du découpage de la côte. La plage de Porsmilin est préférentiellement exposée aux vagues de secteur Sud et Sud-Ouest et plus modérément aux vagues de secteur Ouest qui, par le jeu des phénomènes de diffraction et de réfraction, ont une incidence quasi normale à la plage (Dehouck, 2006). L'anse de Bertheaume est abritée des houles de secteur Nord. L'agitation est généralement faible avec une hauteur significative moyenne des vagues (H_s) de 0.5 m (Dehouck, 2006). Lors des tempêtes la hauteur significative des vagues peut dépasser 2 m (Dehouck, 2006).

Dans la classification de Wright and Short (1984) (cf § 1.1.1 Morphologie, type de plage et classification) la plage de Porsmilin est de type "intermédiaire". Dehouck (2006) calcule une vitesse de chute adimensionnelle $\Omega = 0.60 - 0.65$ et $RTR = 35$ avec des paramètres de vagues moyens ($H_s = 0.1m$ et $T = 10s$). Jaud (2011) trouve $\Omega = 1.4$. Ces deux valeurs indiquent que la plage de Porsmilin est de type réfléchif (Voir figure 1.2). Ω est lié à des paramètres variant beaucoup en fonction des saisons, donc si les valeurs de Dehouck (2006) et de Jaud

(2011) ont été calculée à une saison différente il est normal que Ω soit différent. Habituellement le déferlement est plongeant mais tous les types de déferlement peuvent se produire selon les conditions.

La plage de Porsmilin a subit une anthropisation modérée se traduisant par la présence d'ouvrages bétonnés sur la plage et par l'aménagement des abords de celle-ci. Ces aménagements peuvent être à l'origine de variations dans le comportement morphodynamique de la plage (Jaud, 2011) cependant ces ouvrages (cale et enrochement) sont présents depuis le début de l'acquisition des données et leur effet est donc constant sur l'ensemble des données.

3 Données disponibles

III Topographie

Le suivi topographique de la plage de Porsmilin depuis 2003 a été effectué initialement à l'aide de deux tachéomètres laser (Nikon et Leica) puis à l'aide d'un GPS différentiel par le laboratoire GEOMER de l'IUEM.

Pour chaque acquisition le même profil transverse (Figure 1.5) depuis le haut de plage jusqu'à la ligne de rivage a été réalisé. Les profils sont calés grâce à des clous topographiques placés sur des zones stables telles qu'une cale bétonnée ou un blockhaus (Dehouck, 2006). Les profils ont ensuite été géoréférencés.

Entre janvier 2003 et juin 2005, 84 profils ont été réalisés de janvier 2003 à novembre 2003, un profil a été levé toutes les semaines et entre novembre 2003 et juin 2005, les profils sont réalisés à une fréquence bihebdomadaire. Par la suite des levés ont été réalisés environ tous les mois en fonction de la marée, l'idéal étant de réaliser les mesures à basse mer par un grand coefficient afin de pouvoir couvrir un maximum de l'estran.

La précision sur les mesures est de l'ordre du centimètre avec une erreur verticale maximale de 2.2 cm (Dehouck, 2006).

III Données de houle PréviMER

La hauteur significative des vagues sera utilisée dans cette étude afin de quantifier l'énergie incidente due au vagues. En effet l'énergie des vagues est proportionnelle à la hauteur significative de celles-ci comme le montre l'équation ci-dessous.

$$E = \frac{1}{8}(\rho g H^2)$$

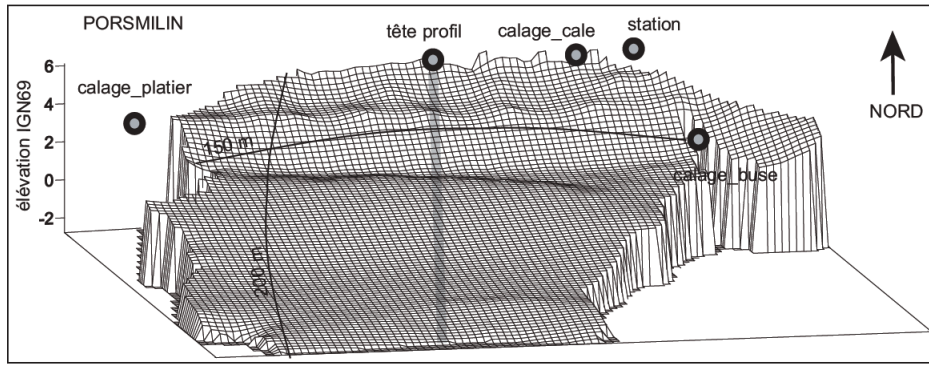


FIGURE 1.5 – Localisation des profils topographiques à Porsmilin (Dehouck, 2006)

Avec : E l'énergie par unité de volume ($J.m^{-2}$)

ρ la densité de l'eau ($kg.m^{-3}$)

g l'accélération de la gravité ($m.s^{-2}$)

H la hauteur des vagues (m).

Les données de hauteur significative des vagues sont obtenues via le service PREVIMER, projet réalisé en partenariat entre l'Ifremer, le SHOM et Météo-France. Son objectif est de « produire des analyses et des prévisions sur l'état de l'environnement marin » (www.previmer.org) à différentes échelles spatiales. Les données de prévision des vagues (Hauteur significative) qui nous intéressent ici sont obtenues en sortie du modèle WAVEWATCH III (Magne and Ardhuin, 2008; Ardhuin and Magne, 2010).

Nous disposons de deux jeux de données distincts. Le premier est issu du modèle pour la zone Iroise et s'étend de 2002 à 2010. De même, le second jeu de données est issu du modèle pour la zone Norgasud et s'étend de 2008 à 2014. La zone Norgasud comprend le Golfe de Gascogne et Nord Atlantique. Pour ces deux jeux les données sont obtenues avec un modèle (WWIII) sur une grille non structurée qui fournit les états de mer toute les heures.

Pour chacune des deux zones, les données sont récupérées au point : $48^{\circ}20.775'N$ $4^{\circ}39.850'W$, où la profondeur d'eau est -9.4 m (par rapport au zéro hydro).

Chapitre 2

Méthodes d'étude de la morphodynamique des plages

I Les profils d'équilibre

Le profil d'équilibre est un profil de plage vers lequel tend une plage soumise à un régime de vague constant (Pilkey et al., 1993). Quand cette forme de profil est atteinte, il n'y a plus de variations de morphologie. Le profil d'équilibre est la notion théorique d'une configuration stable vers laquelle tend une plage donnée pour un climat de forçage donné. Dans la réalité, l'équilibre n'est jamais atteint, notamment parce que le forçage est variable. Dean (1991) propose un profil d'équilibre de la forme :

$$h = Ay^{(2/3)}$$

où : h est la distance transversale

y : l'élévation

A : le paramètre empirique dépendant de la granulométrie.

Concrètement le profil d'équilibre résulte de l'interaction entre les forces constructives (qui transportent le sédiment vers le continent) et les forces destructives (qui déplacent le sédiment vers le large). Les profils d'équilibres ont des caractéristiques connues (Dean, 1991) : ils sont concaves, leur pente dépend de la granulométrie (plus le sédiment est grossier, plus la pente est forte), le haut de plage (beach face) est approximativement plan. Des vagues dont la pente est plus forte résulteront en une plage moins inclinée où des barres sableuses auront tendance à se former. La pente d'une vague est définie par le rapport hauteur de la vague H divisé par la longueur d'onde L .

La compréhension et la connaissance des profils d'équilibres d'une plage est un outil pour la

prédiction de la réponse d'une plage à un climat de vagues donné. Ces profils servent également de condition initiale pour les modèles numériques de morphodynamique.

II Méthodes d'analyse statistique

1 Analyses statistiques classiques

Les analyses statistiques "classiques" tel qu'entendu ici regroupent l'analyse des premiers moments des données (moyennes, écarts types). Le but est de caractériser le comportement moyen de la plage en fonction de la saison.

L'analyse des données de hauteur significative de houle se fait par analyse spectrale. Appliquer une transformée de Fourier permet de faire ressortir le contenu fréquentiel dans une série de données temporelles. Pour des données de hauteur significatives de vagues cela permet par exemple de détecter l'influence des cycles climatiques sur le régime de houle.

2 Autres types d'analyses statistiques

Afin d'étudier les variations temporelles des profils de plage, des méthodes statistiques linéaires sont souvent utilisées. La méthode la plus couramment utilisée est l'analyse orthogonale empirique (EOF « Empiric Orthogonal Functions ») (Larson et al., 2003). Cette méthode a été développée initialement pour des applications en océanographie, afin de suivre l'évolution de la température de surface des océans par exemple.

L'analyse consiste à faire ressortir des schémas de variation morphologique du profil de plage à partir d'une base de données constituée d'une série temporelle de profils topographiques. En sortie d'analyse, on obtient deux séries de vecteurs matriciels orthogonaux. La première série correspond aux variations temporelles et la seconde aux variations spatiales. Pour chaque série, les vecteurs traduisent des variations morphologiques ou temporelles de plus en plus petites qui comptent pour un pourcentage de plus en plus faible de l'inertie totale.

Concrètement, les premiers vecteurs (aussi appelés modes) reflètent la moyenne statistique des données. Les fonctions suivantes sont les variations autour de cette moyenne et ainsi de suite jusqu'à ce que les modes ne soient plus représentatifs. Les modes inférieurs représentent le bruit dans le signal.

Cette méthode est utilisée pour déterminer les schémas de variations des profils de plage (Aubrey, 1979, 1980; Rihouey, 2004; Karunaratna et al., 2012) ou la variation de la position du rivage (Miller and Dean, 2007a,b; Hansen and Barnard, 2010; van de Lageweg et al., 2013).

Cette méthode s'applique aussi bien à des plages sableuses à barres intertidales (Rihouey, 2004) qu'aux plages de granulométrie plus grossière (Karunarathna et al., 2012), ou encore à des plages de poche (Loureiro et al., 2013; Turki et al., 2013). La méthode EOF peut être utilisée pour analyser les variations dans une base de données mais aussi comme point de départ pour le développement de modèles de prédiction empirique (Aubrey, 1979; Hansen and Barnard, 2010).

Larson et al. (2000); Rihouey (2004); Karunarathna et al. (2012) ont appliqué une autre méthode d'analyse statistique à des profils de plage : l'analyse canonique des corrélations (CCA « Canonical Correlation Analysis »). Le principe de cette méthode est de comparer deux jeux de données multitemporelles distinctes afin de détecter si des variations se produisent simultanément et de trouver la corrélation entre les variations associées. Typiquement, dans l'étude des plages, il est possible de faire des analyses canoniques des corrélations entre le climat de vagues et les variations de la position du rivage. Cette méthode plus complexe demande une puissance de calcul importante, par conséquent les jeux de données sont généralement filtrés grâce à l'EOF. Concrètement seuls les premiers modes spatiaux et temporels de l'analyse EOF sont utilisés pour l'analyse canonique des corrélations (Larson et al., 2003). Cette méthode peut aussi être utilisée pour développer un modèle d'évolution morphodynamique 2D.

Afin d'identifier des structures sédimentaires qui se propagent comme par exemple les barres sableuses, il est aussi possible d'utiliser d'autres méthodes statistiques (Larson et al., 2003) :

- EEOF (« Extended Empirical Orthogonal Functions ») : analyse basée sur l'ajout d'observations de la morphologie différées (dans le temps) à la base de données initiale avant de réaliser une analyse EOF,
- CEOF (« Complex Empirical Orthogonal Function ») : consiste à réaliser une transformée de Hilbert sur la série de données avant de faire une analyse EOF,
- POP (Principal Oscillation Pattern) : analyse utilisée pour identifier les variations de géométrie sans connaissance préalable du forçage.

Les méthodes d'analyse statistique ci dessus peuvent être utilisées pour étudier les variations des séries temporelles de données topographiques et/ou hydrodynamiques afin de caractériser la morphodynamique. Dans certain cas, les méthodes statistiques servent aussi à lisser les données en supprimant les modes de variations les plus petits (c'est-à-dire les variations comptant pour un faible pourcentage de la variation totale).

Dans le cas de cette étude, une série d'analyses statistiques dites classique (moyennes, écarts-types) et une analyse orthogonale empirique seront appliquées sur les données de la plage de Porsmilin.

III Modèles morphodynamiques empiriques

La prédiction de l'évolution des plages sableuses est un enjeu fondamental pour la gestion intégrée des zones côtières (GIZC).

Il existe plusieurs approches pour modéliser le comportement morphodynamique des plages sableuses. Il est possible de réaliser des modèles numériques, expérimentaux ou empiriques. Le choix de l'approche se fait en fonction des données disponibles pour la modélisation et de la problématique à traiter. Dans notre cas, nous disposons d'une série de données correspondant à des profils topographiques de la plage ainsi que des données de hauteurs significatives de vagues. Nous cherchons à déterminer les variations de la position du rivage en fonction du climat de mer. La mise en place d'un modèle expérimental (tel que dans Grasso et al. (2009)) est inadaptée pour la compréhension d'un système en particulier comme ici. Un modèle numérique, beaucoup plus complexe à réaliser, peut être mis en place mais demande une meilleure compréhension du système et motive donc la réalisation d'une étude préliminaire basée sur la réalisation de modèles empiriques. C'est le cas dans cette étude où la réalisation de modèles empiriques servira à la compréhension des processus morphogènes et du profil d'équilibre de la plage de Porsmilin afin de développer à posteriori un modèle numérique.

Dans les années 1980, les modèles empiriques appliqués aux plages permettaient de prédire la morphologie des profils de plage (Aubrey, 1980) et l'état des plages (Wright et al., 1985) au sens de Wright and Short (1984). Dans cette étude, le but est de mettre en place un modèle empirique de prédiction des variations à différents niveaux d'élévation le long du profil de plage. Ce type de modèle a été développé par Miller and Dean (2004) qui propose un modèle qui relie le changement de position au déséquilibre par rapport aux conditions d'équilibre.

Yates et al. (2009) proposent un modèle de variation de la position de la ligne de rivage où la position du rivage est fonction de conditions d'équilibre entre l'hydrodynamique (houle incidente) et le profil d'équilibre de la plage (cf § 2.I Les profils d'équilibre) (tel qu'introduites par Wright et al. (1985) puis Miller and Dean (2004)). Ce modèle a été utilisé sur quatre plages micro-tidales de la région de Los Angeles en Californie (Yates et al., 2009), sur la plage d'Ocean Beach à San Francisco (Yates et al., 2011) et sur une plage de poche micro-tidale de Nouvelle-Zélande (van de Lageweg et al., 2013).

Le modèle de Davidson et al. (2010) prédit les variations de la position de la ligne de rivage, en fonction de la vitesse de chute adimensionnelle Ω (telle que décrite au § 1.I.1 Morphologie, type de plage et classification), et donc fonction du climat de vague, ici H_s et T et d'une constante linéaire de variation de la position qui n'est pas reliée aux conditions hydrodynamiques.

miques. Ce modèle a par la suite été amélioré (Davidson et al., 2013) en incorporant un terme prenant en compte les vitesses de chute adimensionnelles sur la période précédant le point de mesure, introduisant une sorte de « mémoire » du système. Ce modèle a été utilisé avec succès pour la prédiction des variations de la position du rivage sur les plages Australiennes de Gold coast et Narrabeen (Davidson et al., 2013).

Ces deux modèles ont été utilisés par Castelle et al. (2014) sur la plage méso à macro-tidale du Truc Vert en France. Cette étude montre que les deux modèles ont des performances relativement similaires. Les modèles de Yates et al. (2009); Davidson et al. (2010) et Davidson et al. (2013) sont résumés sous forme de tableau dans la figure 2.1. Pour la plage de Porsmilin, le modèle qui sera mis en place au cours de cette étude sera celui de Yates et al. (2009).

| | | | |
|---------------------|---|--|--|
| | Yates et al. (2009) | Davidson et al. (2010) | Davidson et al. (2013) |
| Site | Torrey Pine Cardiff Camp Pendleton San Onofre | Gold Coast | Gold Coast Narrabeen |
| Marée | ME : 1.0 m VE : 2.5 m | Microtidale | Microtidale |
| Granulométrie | Entre 0.16 et 0.28 mm | D50=0.25 mm | |
| Acquisitions | Profiles hebdomadaire à mensuels | Images Argus | Images Argus |
| Niveau de référence | NM | NM | Narrabeen : NM+0.7m Gold coast : NM |
| Houle | Modèle à -10 m Bouée | Bouée | Bouée |
| Formulation | $S(t) = (S_0 - S_{eq})e^{-aC^+E^{1/2}t} + S_{eq}$ | $\frac{dx}{dt} = b + c(\Omega_0 - \Omega(t))\Omega^k(t)$ | $\frac{dx}{dt} = b + c_-^+P^{0.5}(\Omega_{eq}(t) - \Omega(t))$ |
| Utilisation | Yates et al. (2011) van de Lageweg et al. (2013) Castelle et al. (2014) | | Castelle et al. (2014) |

FIGURE 2.1 – Tableau récapitulatif des modèles prédictifs de variation de la position du rivage

Chapitre 3

Résultats

I Analyse statistique classique

1 Hydrodynamique

I Mise en forme des données

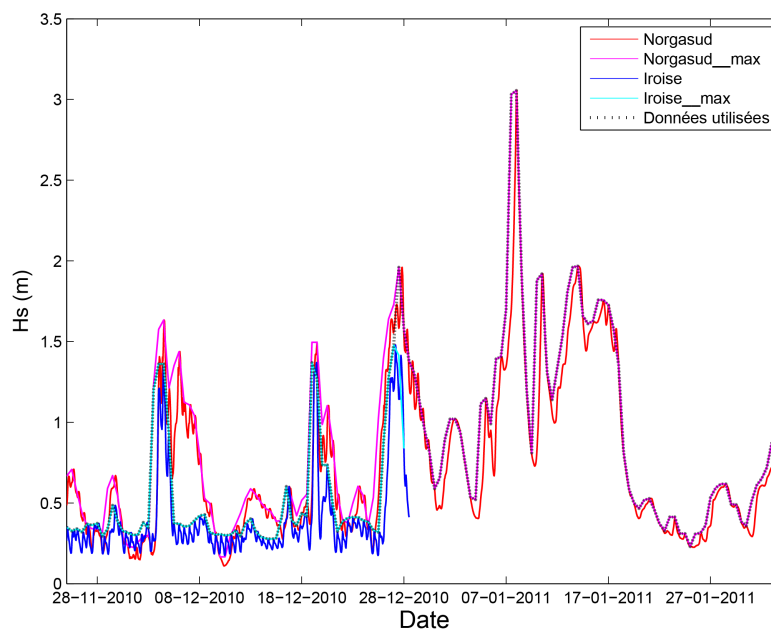


FIGURE 3.1 – Comparaison des hauteurs significatives de vagues issues du modèle PréviMER pour les zones Norgasud et Iroise, ainsi que les hauteurs significatives maximales sur 12 h.

Afin d'obtenir un jeu de données unique sur toute la période d'étude, les données pour la zone Iroise et Norgasud ont été combinées. Pour la période 2002-2010 seules les données pour la zone Iroise sont prises en comptes et pour la période 2011-2014, ce sont les données de la zone Norgasud qui sont utilisées.

Pour s'affranchir de l'influence du balancement de la marée mis en évidence par la figure

3.1 et l'analyse spectrale (Figure 3.10B), il a été choisi, après avoir testé plusieurs méthodes (moyenne sur 12 h), d'utiliser le maximum sur 12 h comme donnée de la hauteur significative de la houle. Il y a ainsi deux hauteurs significatives par jour dans les données utilisées à posteriori.

La figure 3.1 montre aussi les différences existantes entre les deux jeux de données Iroise et Norgasud bien que le point de calcul du modèle soit identique pour les deux zones. La résolution (différente pour Iroise et Norgasud) utilisée par ces modèles numériques est probablement la cause des différences observées.

I Analyse spectrale de la hauteur significative de la houle

Une analyse spectrale de la hauteur significative des vagues est réalisée via une transformée de Fourier sur les données de houle de 2002 à 2014 : brutes, moyennées sur 12 h et sur le maximum sur 12 H. Le but de cette analyse est d'identifier des schémas de variation dans le climat de houle. Afin d'améliorer la lisibilité de la figure une moyenne glissante pondérée est appliquée sur une fenêtre de 5 points pour la figure 3.10D.

Il est possible d'observer un premier pic d'amplitude légèrement supérieur à 0.1 pour une fréquence qui correspond à environ une année (Figure 3.10C). Cela indique donc une forte influence saisonnière dans le climat de houle. Le second pic très remarquable se situe à une fréquence de 12 h environ (Figure 3.10B). On retrouve donc ici la fréquence de la marée semi-diurne. D'autres pics moins nets (Figure 3.10D) peuvent aussi être observés à des fréquences entre trois mois et une vingtaine de jours. Enfin la hauteur significative maximum et la hauteur significative moyenne sur 12 h présentent un pic à une fréquence d'environ 7.5 ans.

Pour valider les performances des données Prévimer au large de la plage de Porsmilin, un ADCP (RDI) 600 kHz été placé par le Laboratoire Domaines Océaniques de l'IUEM au point de calcul du modèle Prévimer. Cet instrument a été déployé pendant deux mois, en période fortement énergétique afin de valider le modèle en milieu côtier car la propagation de la houle est de plus en plus complexe en milieu peu profond. Les données obtenues lors de cette campagne sont en cours de traitement.

I Hauteur significative moyenne de la houle

Les moyennes de la hauteur significative des vagues ont été calculées à partir du maximum de la houle sur 12 h. La moyenne de 2002 à 2014 est de 0.76 m avec un écart type de 0.56 m.

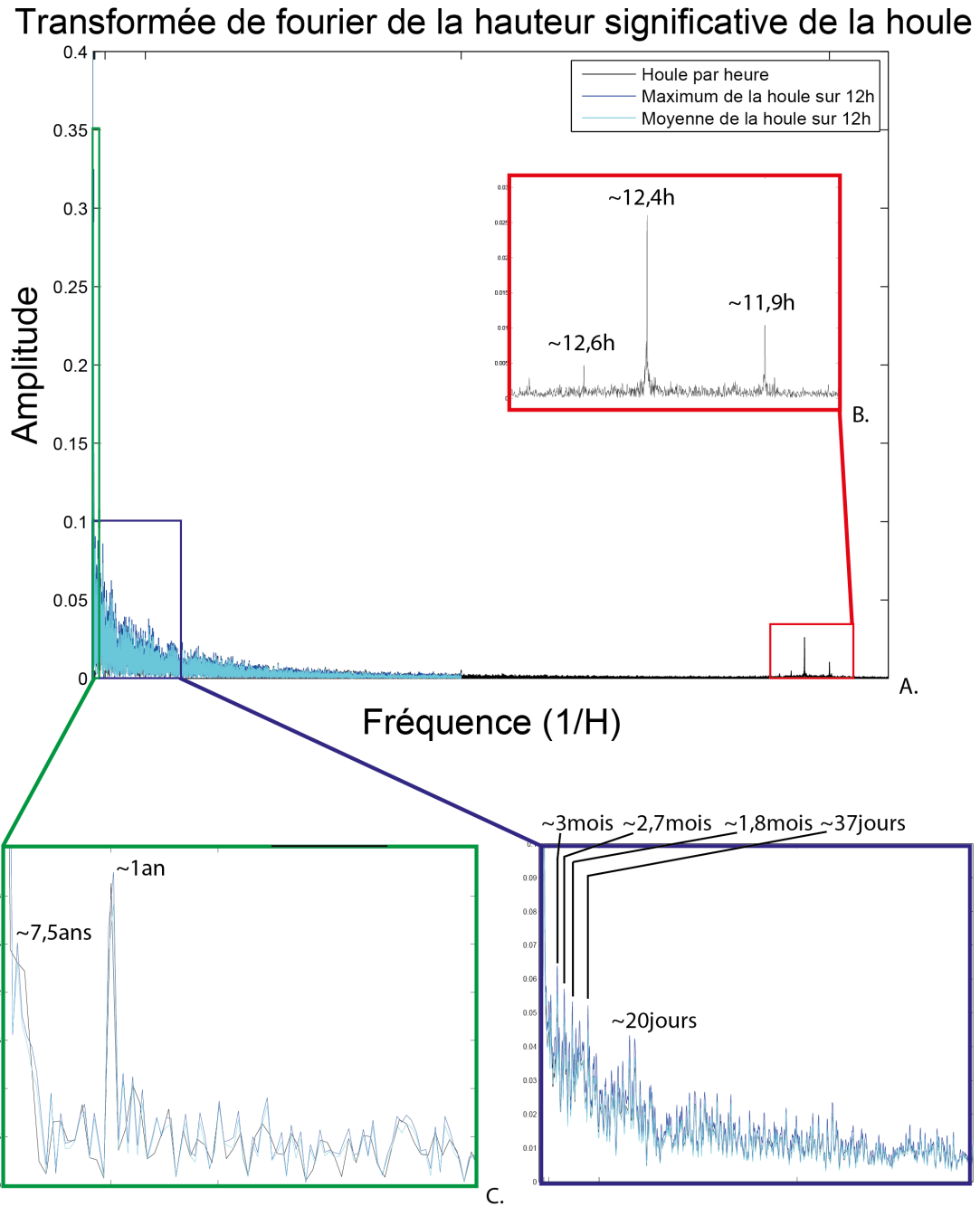


FIGURE 3.2 – Analyse spectrale de la houle

Les moyennes saisonnières ont aussi été calculées. En été, la hauteur significative moyenne est de 0.5 m environ, en automne elle est de 0.73 m, en hiver de 1.08 m et au printemps la hauteur moyenne est de 0.70 m. La saison hivernale est donc la plus la plus énergétique avec une hauteur significative environ eux fois plus grande qu'en été, la saison la moins énergétique. Le printemps et l'automne on des valeurs moyennes de hauteur significatives similaire et intermédiaire à environ 0.7 m.

2 Profils topographiques

II Mise en forme des données

Avant de pouvoir procéder à l'étude des données de topographie, il faut créer des profils à partir des données de GPS. Les données brutes se présentent sous la forme d'une série coordonnées E (easting) N (northing) Z (altitude) géoréférencées dans le système Lambert 93. Ces données ont été acquises sur le même modèle : il s'agit d'une série de points acquis le long d'un profil s'étalant depuis une tête de profil fixe en haut de plage vers le bas de plage. Cette tête de profil est utilisée comme point de référence pour le calcul de la distance le long du profil ce qui permet d'obtenir des profils de plage de la forme : distance par rapport à la tête de profil / altitude (Figure 3.3). Dans la suite du document, les positions des points sur le profil seront exprimées par la distance vers la mer prise par rapport à la tête de profil.

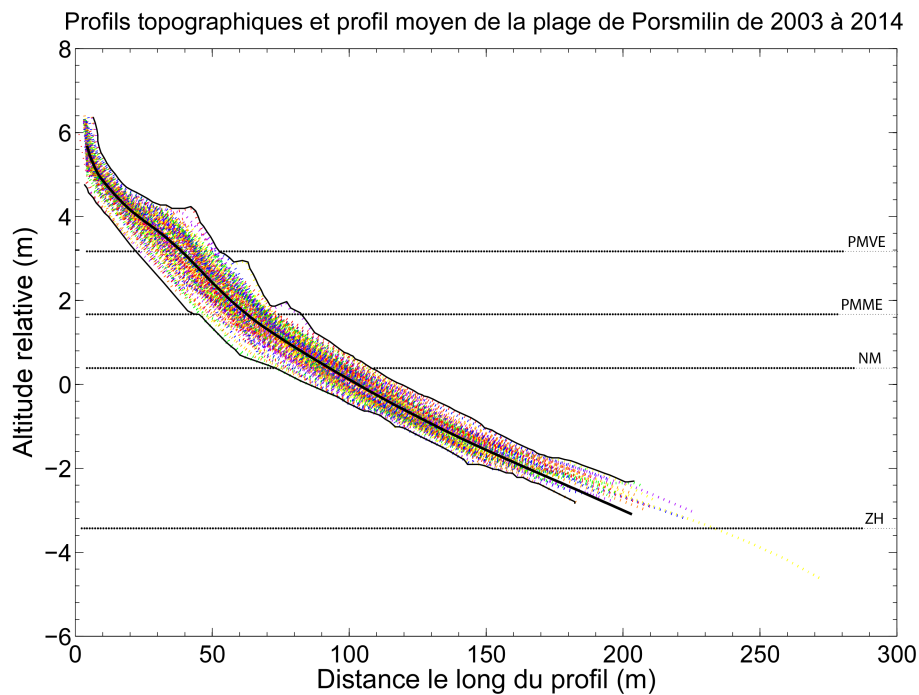


FIGURE 3.3 – 178 profils topographiques de la plage de Porsmilin, profil moyen ainsi de l'enveloppe (en noir) pour la période de 2003 à 2014 (12 ans)

II Profil moyen et enveloppes

Une première série d'analyses statistiques dites « classiques » est réalisée sur la série de profils topographiques. Il s'agit d'étudier les profils moyens (saisonniers et profil moyen général) de la plage sur la période d'étude et de déterminer les variations. Les profils moyens sont obtenus à partir des profils topographiques obtenus grâce au GPS.

D'une part, pour obtenir une série de profils homogènes, chaque profil est interpolé linéai-

rement afin d'avoir des profils de longueur identique avec un pas d'échantillonnage identique. Ici il a été choisi d'interpoler les profils de 0 à 150 m car la longueur moyenne des profils est de 156 m. En cas de profils trop courts, une extrapolation linéaire est réalisée.

A partir de cette série de profils homogènes, le profil moyen, les enveloppes et les profils moyens saisonniers ainsi que leurs enveloppes sont calculés.

A partir des profils interpolés, l'écart type est calculé pour l'ensemble des profils et pour chaque saison. Concrètement les profils moyens sont déterminés pour les profils hivernaux acquis en Décembre, Janvier et Février, printaniers acquis en Mars, Avril et Mai, estivaux acquis en Juin, Juillet et Août et automnaux acquis en Septembre, Octobre et Novembre.

Le profil moyen (Figure 3.4A) de la plage est compris entre environ 5.5 m d'altitude à la tête de profil et -1.5 m d'altitude à 150 m de la tête de profil. Les profils obtenus montrent que la plage a une forme légèrement concave. Les enveloppes suggèrent que les variations de morphologie (jusqu'à 2 m d'amplitude) les plus importantes ont lieu entre 20 et 75 m, c'est-à-dire en milieu de plage. Cette observation est confirmée par le calcul de l'écart type (Figure 3.4B) qui montre un pic avec un maximum de plus de 0.4 m à environ 40 m ce qui indique une forte variabilité morphologique dans cette zone.

En hiver, le profil moyen saisonnier (Figure 3.4A) est très linéaire avec des variations de forte amplitude comme le montre l'écart-type (Figure 3.4F) avec un pic de plus de 0.5 m à 45 m. En haut de plage le profil hivernal est situé sous le profil moyen alors qu'en bas de plage le profil hivernal se situe au-dessus du profil moyen. Le point du profil où se situe ce changement correspond au niveau de Pleine Mer par Mortes-Eaux (PMME). Globalement le profil abandonne son aspect concave pour un profil de plage plus linéaire. Il semble y avoir érosion du haut de plage au profit de l'engraissement du bas de plage. A cette période, le profil de plage est le plus érodé.

Au printemps, le profil moyen (Figure 3.4.A) est aussi assez linéaire. L'écart type (Figure 3.4C) montre une variabilité maximum entre 20 et 80 m avec un maximum de 0.4 m. A cette saison le profil moyen est le plus proche du profil moyen annuel. Le haut de plage est toujours inférieur à la moyenne annuelle, alors qu'en bas de plage le profil moyen saisonnier correspond au profil moyen annuel. De la même façon qu'en hiver le point de pivot se trouve au niveau de PMME. Les variations par rapport au profil hivernal montrent un réengraissement du haut de plage au détriment du bas de plage qui perd en élévation. Cette tendance se poursuit en été.

En été, le profil moyen (Figure 3.4A) présente une barre entre 35 et 45 m. L'amplitude

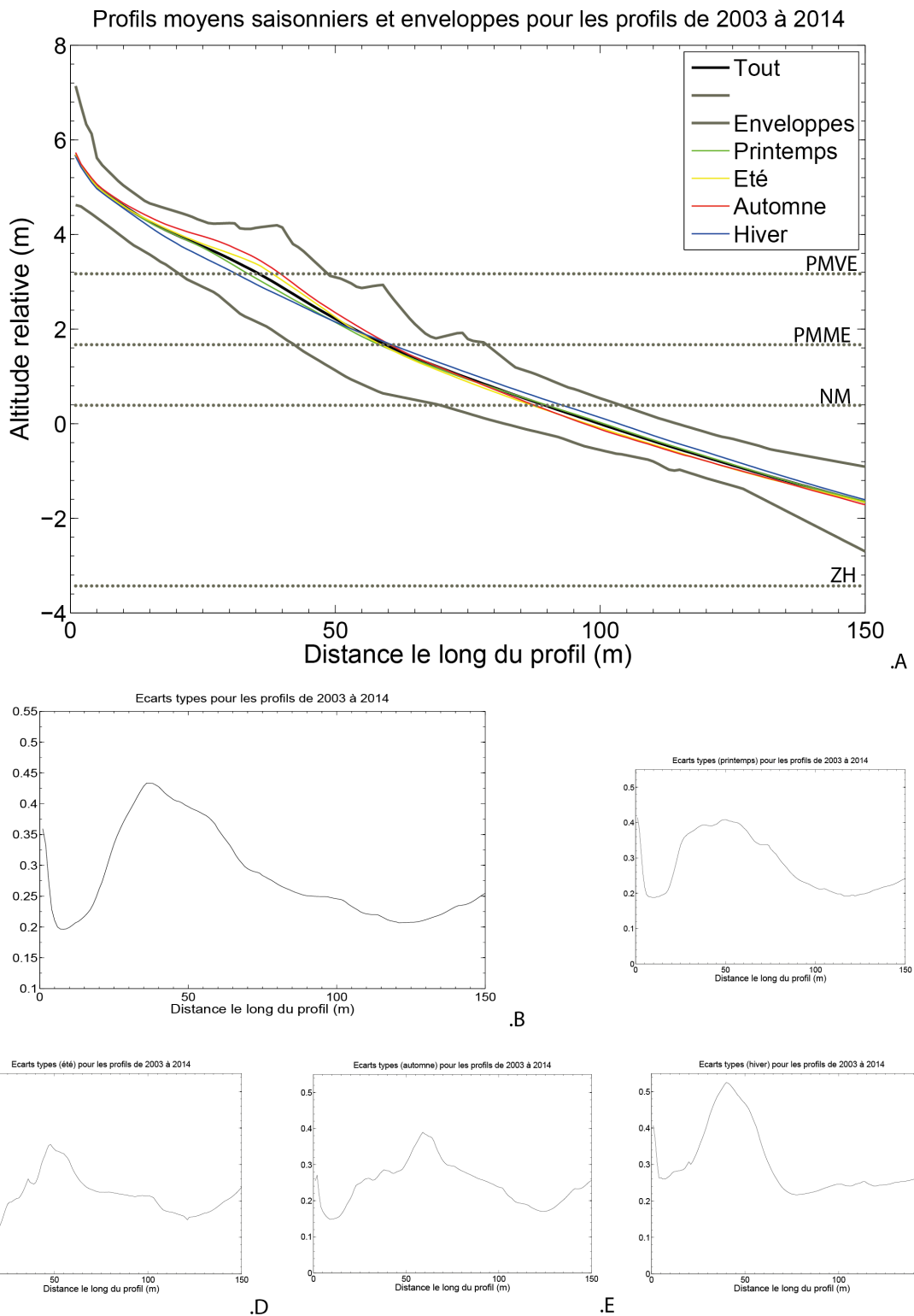


FIGURE 3.4 – Variabilité des profils de plage de Porsmilin A. Profils moyens saisonniers et enveloppes B. à F. Écarts-types saisonniers

des variations visible sur les enveloppes est d'environ 1m en milieu de plage. L'écart type (Figure 3.4D) présente un pic d'environ 0.35 m à 50 m. Durant la période estivale le profil moyen saisonnier est supérieur au profil moyen annuel en haut de plage (présence d'une structure sédimentaire type barre sableuse) jusqu'au niveau de PMME, tandis qu'en bas de plage le profil moyen en été est inférieur au profil moyen annuel. Le profil de plage présente donc une morphologie plus concave.

En automne, le profil moyen (Figure 3.4A) présente aussi une morphologie de barre entre 15 et 45 m. L'amplitude des variations est d'environ 1 m le long du profil. L'écart type (Figure 3.4E) présente un large pic de 0.4 m à 65 m. Le profil moyen automnal a une allure semblable à celle du profil moyen estival mais avec des écarts plus marqués par rapport au profil moyen annuel. On observe une morphologie de type barre très marquée en haut de plage, et un bas de plage avec une élévation inférieure au profil moyen annuel. Le profil automnal présente donc la morphologie saisonnière la plus concave avec un ré-engraissement maximum.

Le tracé et l'analyse des profils moyens saisonniers permettent de mettre en évidence une dynamique de barres saisonnières, avec des profils plutôt linéaires en hiver et au printemps et un profil à barre en été et en automne. Le tracé des enveloppes et des écarts types permet mettre en évidence une zone fortement dynamique du point de vue morphologique en milieu de plage, entre 25 et 55 m environ, ce qui correspond à la zone de formation et de disparition intermittente de la barre. La dynamique sédimentaire suit donc le schéma suivant :

- En hiver le profil est le plus érodé avec le sédiment réparti en bas de plage.
- Au printemps, on peut déceler le début de la formation d'une barre avec la migration du sable depuis le bas vers le haut de plage.
- En été, cette dynamique continue et atteint un maximum en automne où le profil de plage présente clairement une structure sédimentaire de type barre sableuse qui concentre le sable disponible au détriment du bas de plage.

La figure 3.4A permet aussi de remarquer qu'il existe un point commun à tous les profils où il n'y a pas de variations saisonnières ; il s'agit du point de pivot entre les dynamiques inverses du haut et du bas de plage. Ce point se situe au niveau de la marée de pleine mer en mortes-eaux. La dynamique saisonnière de la plage est donc dominée par le phénomène de formation intermittente de la barre sableuse.

II Étude de la pente

II Données brutes

Afin d'étudier la pente de la plage et ses variations, plusieurs analyses sont réalisées. D'une part, une étude systématique de la pente le long du profil est réalisée sur les données « brutes ». La pente est calculée aux points d'altitude -1, 0, 1, 2, 3, 4 et 5 m (Figure ??). Afin d'éviter les artéfacts en bas de pente, la pente n'est calculée que sur les profils suffisamment longs. L'analyse des pentes est donc réalisée sur 105 profils. Pour chaque point de calcul une régression linéaire est réalisée en considérant les 6 points de mesure les plus proches. La pente est obtenue à partir de la droite de régression. L'obtention de la pente en un point du profil fixe pour chaque acquisition permet de calculer la variation de la pente entre deux acquisitions.

Dans un second temps le calcul des pentes est réalisé sur des séries de données saisonnières : profils hivernaux (Décembre, Janvier, Février), printaniers (Mars, Avril, Mai), estivaux (Juin Juillet Aout) et automnaux (Septembre, Octobre, Novembre)(Annexe A). L'analyse sur les données brutes donne une pente moyenne générale de 0.0564. Sur le profil, les pentes varient entre 0.033 en bas de plage (-1 m) et 0.08 en haut de plage (5 m) ce qui reflète l'aspect concave des profils de plage. Le calcul des pentes en fonction de la saison sur les données brutes montre de fortes variabilités saisonnières de la pente.

- Au printemps, les pentes augmentent spatialement de -1 à 4 m où l'on observe un replat dans le profil.
- En été, on observe aussi une augmentation de -1 à 2 m et un replat plus prononcé entre 3 et 4 m d'altitude.
- En Automne, on observe le même type de variations sur un profil globalement plus oblique que le profil moyen.
- En hiver, les pentes augmentent de façon homogène le long du profil.

ces observation correspondent à l'allure des profils saisonnier moyens visibles sur la figure 3.4A.

Le calcul de la différence de pente entre deux acquisitions permet d'avoir une idée de la dynamique le long du profil. En moyenne les variations de pente sont plus importantes en milieu de plage entre 1 et 3 m d'altitude. Les variations saisonnières sont fortement influencées par la dynamique de la barre : tendance à l'augmentation de la pente en milieu de plage sauf en hiver, période durant laquelle il n'y a pas de barre sableuse sur la plage.

Les pentes et les variations reflètent l'évolution saisonnière de la barre sableuse dont l'influence sur les profils saisonniers (présence de replat) est détectable du printemps à l'automne. En hiver, l'augmentation homogène des pentes démontre la disparition de la barre.

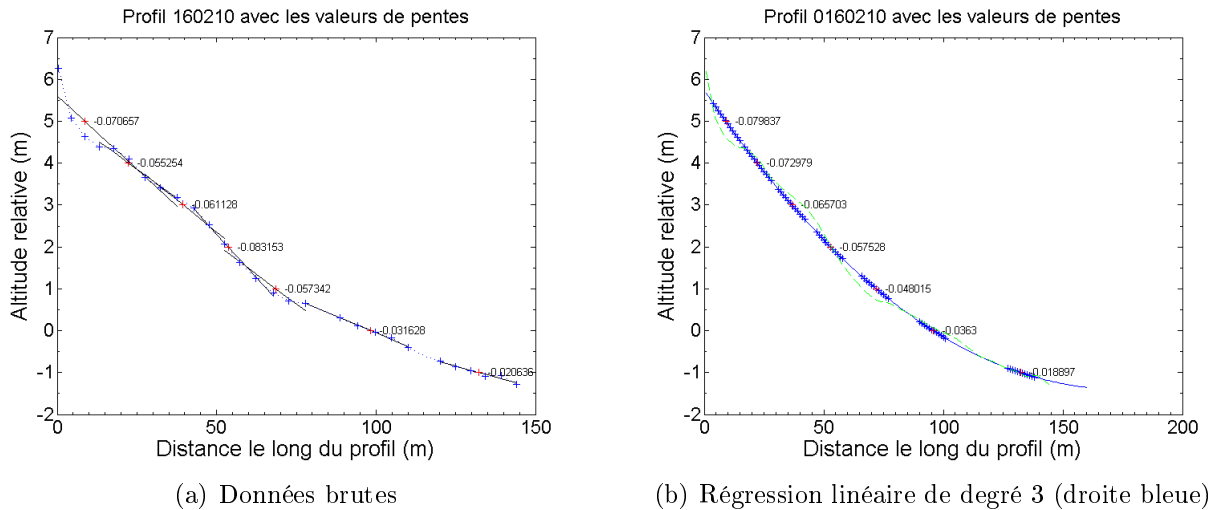


FIGURE 3.5 – Exemple du calcul des pentes, les points rouges représentent les points de calcul, les bleus ceux utilisés pour les régressions linéaires (en noir)

II Régression linéaire de degré 3

Afin de s'affranchir de l'influence de la barre sableuse sur les pentes, une régression polynomiale de degré 3 est réalisée sur chaque profil (Figure ??). Cette méthode permet de séparer les tendances générales des variations de pente sur les profils. Cette étude est réalisée sur le même jeu de données que précédemment, c'est-à-dire sur 105 profils topographiques acquis entre 2003 et 2014 et sur les profils séparés en fonction de la saison. Après la régression de degré 3, une seconde régression linéaire est réalisée à partir des 6 points du polynôme de degré deux voisins du point de calcul. Comme précédemment la pente est obtenue grâce à la droite de régression linéaire et les variations de la pente entre chaque acquisition sont calculées (Annexe B).

Comme pour l'analyse sur les données brutes la pente moyenne générale du profil de plage est de 0.0564. Les pentes augmentent continuellement depuis 0.033 à -1 m jusqu'à 0.076 m à 5 m. Cette évolution de la pente qui augmente depuis le bas vers le haut de plage montre la concavité du profil.

De façon générale en été et en automne, le bas de plage est plus incliné que la pente moyenne et le haut de plage est moins oblique que le profil moyen. Inversement en hiver et au printemps le haut de plage est plus incliné que la moyenne et le bas de plage est plus horizontal.

L'étude des variations de la pente reflète aussi cette variation de la concavité du profil particulièrement flagrante entre l'automne et l'hiver avec un inversement des tendances de variation. En effet en automne la pente du haut de plage a tendance à augmenter alors que le bas de plage (altitude inférieure à 3 m) devient plus horizontal.

Inversement en hiver le haut de plage a une pente qui tend à diminuer et un bas de plage

dont la pente augmente. Au printemps et en été les variations de la pente semblent refléter la reconstruction du profil de concavité maximum atteint en automne. Les variations saisonnières « type » sont résumées pas la figure 3.6.

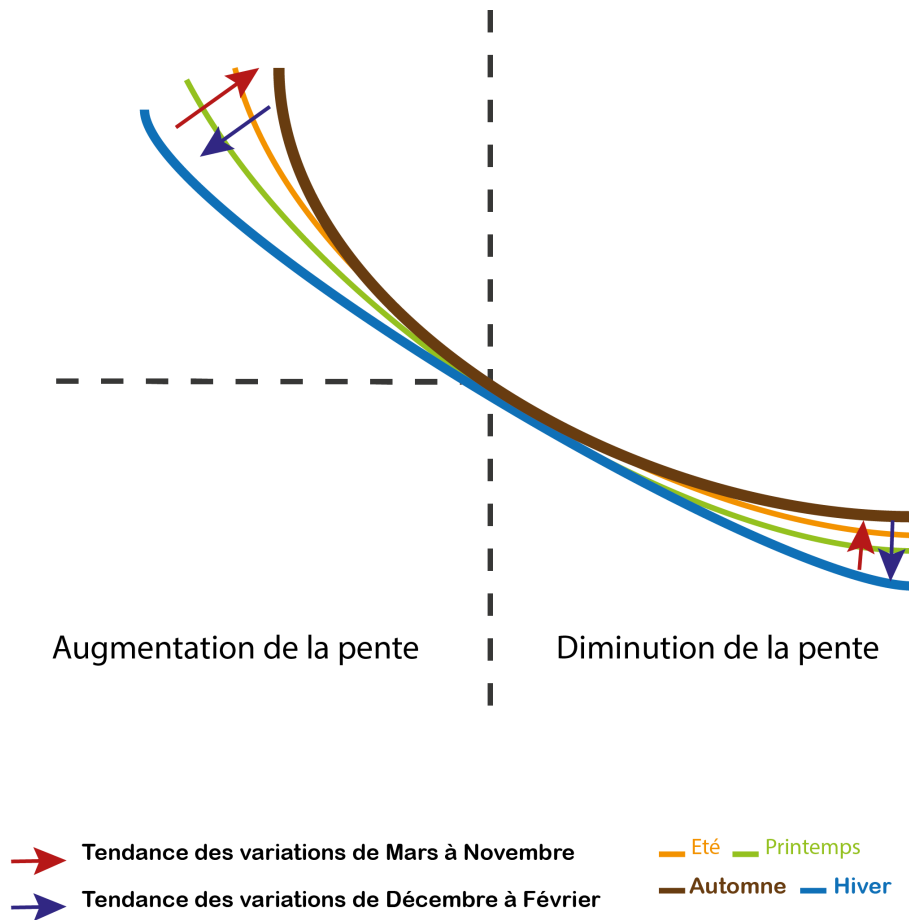


FIGURE 3.6 – Représentation schématique des variations saisonnières de la pente pour la plage de Porsmilin

II Analyse orthogonale empirique (EOF)

La réalisation de cette analyse nécessite la mise en forme préalable des données en une matrice où chaque ligne correspond à un profil de plage et chaque colonne correspond à un point (toujours le même) de ce profil. La matrice est donc de dimension (nombre de profil) * (nombre de point le long du profil).

Il est donc nécessaire d'homogénéiser la longueur des profils. Pour ce faire chaque profil est interpolé de façon linéaire avec un pas de 1 m sur une longueur de 120 m. Si les profils sont de longueur inférieure à 110 m ils ne sont pas utilisés dans l'analyse. Pour les profils de longueur entre 110 et 120 m, le profil est extrapolé linéairement d'après la méthode de Hansen and Barnard (2010). La longueur d'interpolation des profils est choisie de façon à maximiser le

nombre de profil utilisé pour l'analyse.

L'analyse EOF ne nécessite pas un pas de temps régulier entre les profils, ils sont donc simplement rangés par ordre chronologique du plus ancien (première ligne) au plus récent (dernière ligne).

La méthode consiste en une décomposition en valeurs propres de cette matrice, ce qui permet d'obtenir ses vecteurs orthogonaux et ses valeurs propres. Le détail du principe de l'analyse EOF est disponible dans Rihouey (2004). Les produits de la décomposition sont des modes temporels et des modes spatiaux. Les valeurs propres représentent l'inertie de chaque mode de variation, c'est-à-dire son poids ou encore son degré d'importance dans la variation. Afin de faciliter l'interprétation des résultats, les modes spatiaux sont multipliés par la racine carrée de leur valeur propre afin que le mode 1 corresponde au profil moyen de la plage Rihouey (2004) :

$$\textit{Profil moyen} = (\textit{mode spatial 1}) * \sqrt{\textit{valeur propre}}$$

1 Inertie des modes

La figure 3.7 représente les résultats de l'analyse EOF, seuls les trois premiers modes sont représentés ici. Les modes temporels sont représentés avec la hauteur significative de la houle afin de faciliter l'interprétation dans la suite de cette étude. Ces trois premiers modes expliquent près de 96% de l'inertie totale des profils. Respectivement, le mode 1 prend en compte 85.7% de l'inertie, le mode 2 représente 5.8% et le mode 3 4.4%. Le quatrième mode qui ne représente que 2.4% de l'inertie ainsi que les modes supérieurs ne sont pas étudiés ici, le faible pourcentage d'inertie qu'ils représentent indique leur rôle peu significatif par rapport à la dynamique de la plage. La hauteur significative de la houle est représentée en plus de l'amplitude des modes temporelles afin d'examiner les corrélations entre ces deux signaux, ce qui sera commenté par la suite.

2 Illustration de la décomposition par la méthode EOF

Pour mieux appréhender l'interprétation des analyses orthogonales empiriques pour l'étude des profils de plage, 3 cas typiques sont décrits ici. La reconstruction d'un profil de plage repose sur les principes suivants :

- Le mode spatial 1 représente le profil moyen de la plage.
- Les modes spatiaux 2 et 3 représentent les variations autour du mode 1.

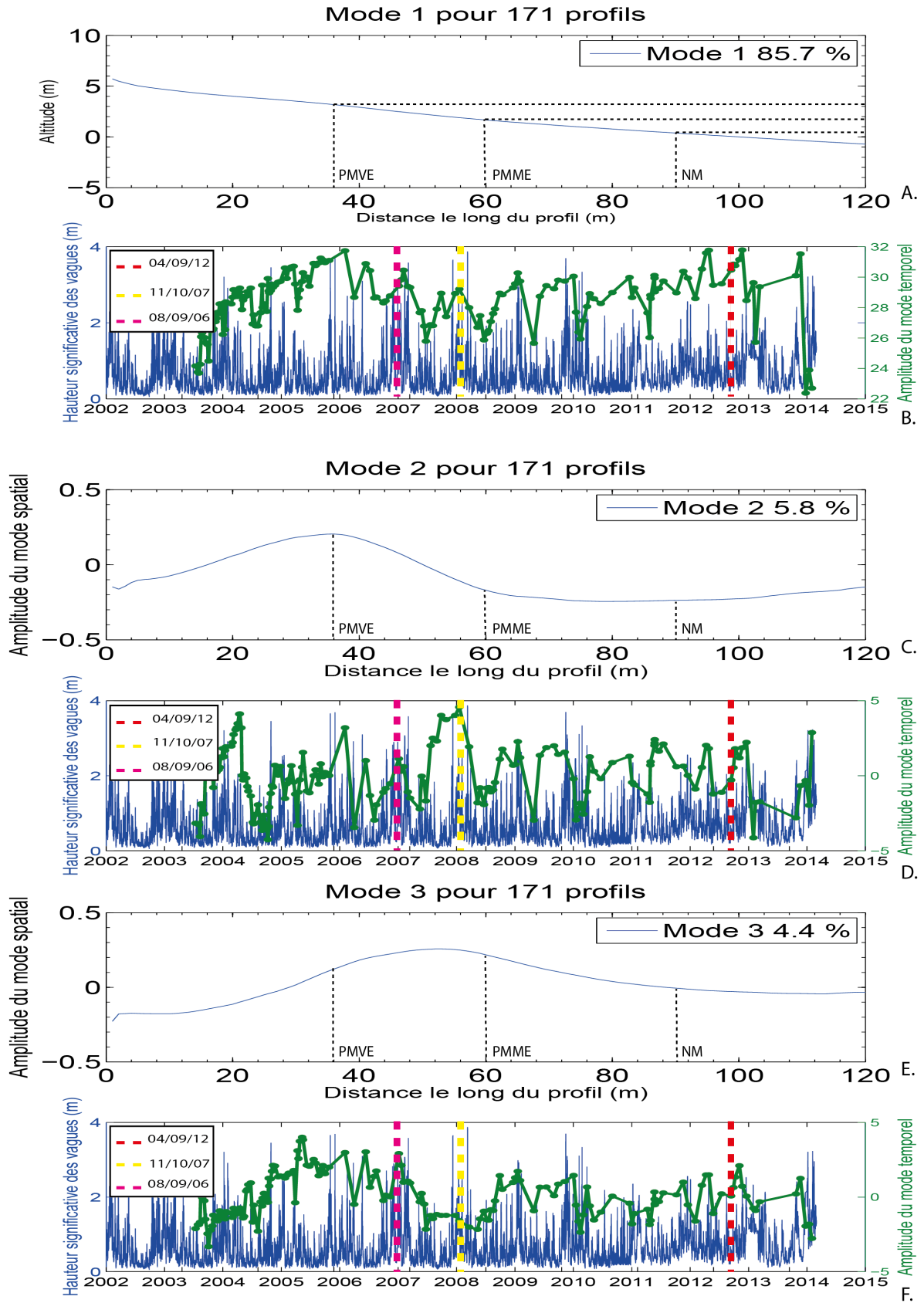


FIGURE 3.7 – Modes spatiaux et temporels (avec la hauteur significative de la houle) des modes 1 (A. et B.), 2 (C. et D.) et 3 (E. et F.)

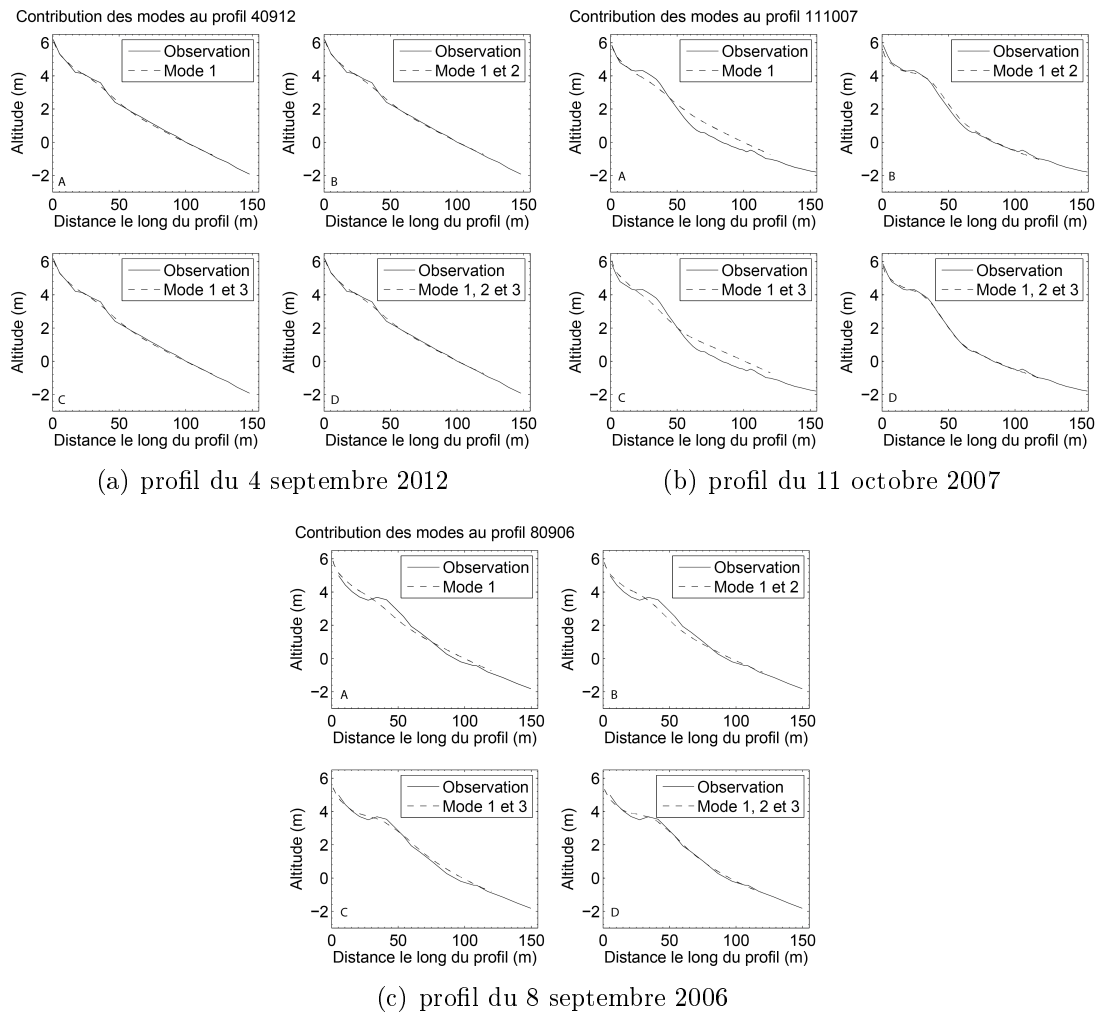


FIGURE 3.8 – Reconstructions mathématiques de profils de plage

- Le mode temporel 1 représente l'altitude du mode 1, c'est-à-dire l'altitude du profil moyen à un temps donné.
- Les modes temporels 2 et 3 pondèrent respectivement l'influence des modes spatiaux 2 et 3 à un temps donné.

Ainsi chaque profil utilisé pour l'analyse peut être reconstruit par addition des modes spatiaux multipliés par l'amplitude du mode temporel associé au profil reconstruit.

Le premier exemple est celui d'un profil où les modes temporels 2 et 3 sont proches de zéro (Figure 3.8a), à cette date (Le 4 septembre 2012) il est donc impossible de détecter l'influence des modes spatiaux 2 et 3 sur le profil reconstruit, les figures 3.8a.B, 3.8a.C et 3.8a.D qui illustrent l'influence des modes inférieurs sont similaires à la figure 3.8a.A où seul le premier mode est représenté.

Pour le second exemple, la reconstruction est effectuée pour le profil du 11 octobre 2007, une date où le mode temporel 2 est fortement prédominant par rapport au mode temporel 3. La

reconstruction avec le mode 1 et le mode 2 permet d'obtenir un profil reconstruit correspondant déjà bien au profil observé. Avec l'ajout du mode 3 (Figure 3.8b.D) la reconstruction coïncide encore mieux avec le profil observé. Par contre associer les modes 1 et 3 ne permet pas de retrouver le profil observé.

Le troisième exemple est une reconstruction du profil du 8 septembre 2006 (Figure 3.8c). Contrairement à l'exemple précédent, ici le mode 3 est prédominant par rapport au mode 2. Ainsi, lors de la reconstruction le mode 3 explique la plus grande partie des variations autour du mode 1.

3 Sensibilité de la décomposition EOF au choix des paramètres

L'impact du choix de la longueur du profil et donc du nombre de profils (cf § II Analyse orthogonale empirique (EOF)) a été testée en réalisant l'analyse avec deux mises en forme différentes des données. D'une part l'analyse a été réalisée sur une série de 102 profils interpolés à 155 m dont la longueur minimum est de 150 m. D'autre part, l'analyse a été réalisée sur 171 profils interpolés à 120 m dont la longueur minimum est 110 m.

Les modes spatiaux obtenus sont comparés sur la figure 3.9. Aucune différence significative n'est à noter, ce qui permet de valider le choix de privilégier le nombre de profils utilisés pour l'analyse par rapport à la longueur des profils.

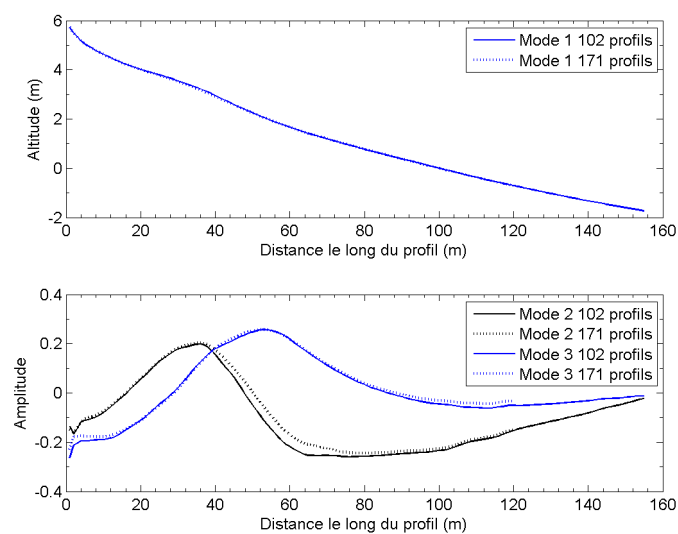


FIGURE 3.9 – Modes spatiaux et temporels 1,2 et 3 pour des EOF sur des profils interpolés à 120 m (pointillé) et à 155 m (trait plein)

4 Analyse des modes spatiaux et temporels

IV Modes spatiaux

Le premier mode spatial (Figure 3.7A) correspond au profil moyen de la plage. Le mode spatial 2 (Figure 3.7C) présente un pic d'amplitude 0.2 m environ entre 20 et 40 m au niveau de pleine mer vives-eaux (PMVE) puis un minimum à 60 m et des valeurs négatives jusqu'à la fin du profil. Ce type de mode spatial correspond à la présence d'une structure sédimentaire de type barre ou berme en haut de plage au niveau de PMVE.

Le mode spatial 3 (Figure 3.7D) présente un minimum en début de profil puis un pic entre 35 et 60 m légèrement au-dessus du niveau de PMME, et jusqu'à l'extrémité du profil son amplitude reste positive. De même que pour le mode 2, le mode 3 semble refléter une dynamique sédimentaire liée à une barre située plus bas le long du profil.

IV Modes temporels

Le premier mode temporel (Figure 3.7B) correspond aux variations d'altitudes globales du profil de plage. On peut observer une augmentation globale de l'élévation entre 2003 et 2005 puis une baisse et une stabilisation de l'élévation moyenne avec de très fortes oscillations saisonnières. On peut aussi noter que les baisses d'altitudes correspondent à des périodes où la hauteur significative des vagues est élevée, c'est-à-dire en hiver quand l'érosion est forte.

Les modes temporels 2 et 3 présentent aussi des variations saisonnières. Entre les deux modes il semble y avoir une dynamique inverse sur certaines périodes comme par exemple l'année 2003 et une dynamique couplée sur d'autres comme en 2008.

Le mode temporel 2 (Figure 3.7D) est bien corrélé avec la hauteur significative de la houle. En effet quand la hauteur significative de la houle est élevée, l'amplitude du mode temporel est négative; il n'y a pas de barre sableuse sur la plage. A l'inverse, en période plus calme, l'amplitude du mode temporel 2 est positive, il y a donc une barre sableuse qui s'est accrétée.

La corrélation entre le mode temporel 3 (Figure 3.7F) et la hauteur significative de la houle est moins évidente que pour le mode temporel 2, il semble donc y avoir un autre processus que la houle à l'origine des variations observées.

5 Analyse spectrale des modes temporels

Une analyse spectrale (transformée de Fourier) est réalisée sur les modes spatiaux 2 et 3 afin de mettre en évidence leur période de variation. Afin de réaliser la transformée de Fourier

les modes temporels sont rééchantillonnés à un pas de 30 jours par interpolation linéaire.

L'analyse spectrale du mode temporel 2 (Figure 3.10a) révèle un pic à une fréquence qui correspond à environ 360 jours, confirmant l'existence d'une dynamique saisonnière

L'analyse spectrale du mode temporel 3 (Figure 3.10b) met en évidence un pic à une fréquence qui correspond à une période de 3.77 ans. Un second pic est observable à une fréquence d'un an, ce qui met aussi en évidence une dynamique saisonnière.

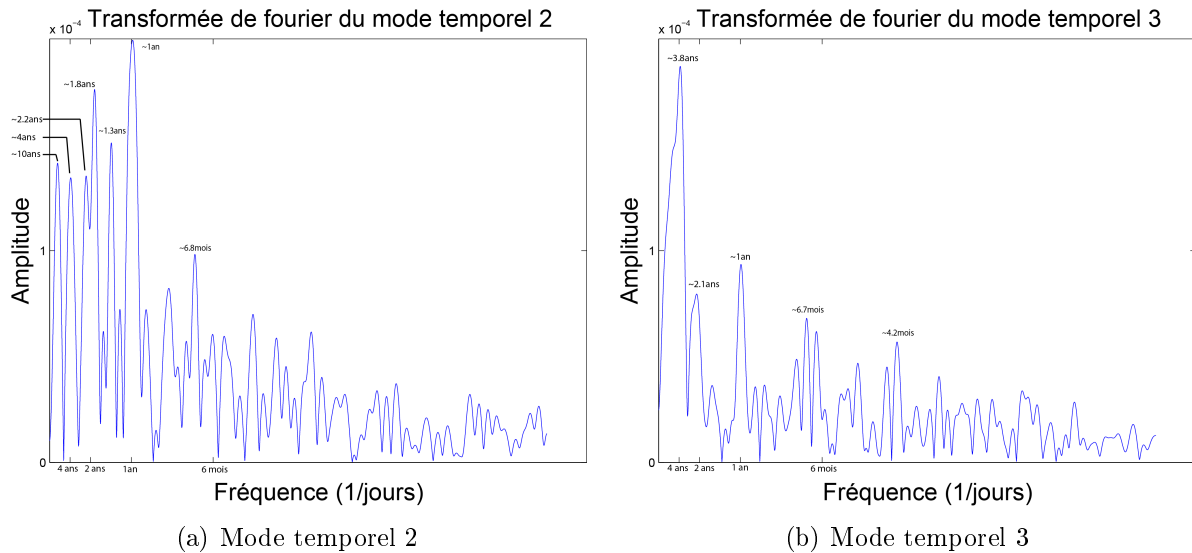


FIGURE 3.10 – Analyse spectrale des modes temporels

III Profil d'équilibre

La figure 3.11 représente mode temporel 1 obtenu par l'analyse EOF, le profil moyen obtenu après moyennage des profils topographiques et le profil obtenu par régression linéaire de la forme $Ay^{2/3}$. Cette régression est réalisée car les études de Dean (1991) et Pilkey et al. (1993) montrent que les profils d'équilibres de plages sont de cette forme. Le paramètre A est lié à la granulométrie de la plage, ici on trouve $A = 0.27$ ce qui est cohérent avec les résultats de Dean (1991) qui trouvait que 99% des A était compris entre 0 et 0.3. Seul le mode temporel 1 montre l'influence de la barre sableuse. Globalement les trois profils sont proches, dans la suite de cette étude le profil moyen sera arbitrairement considéré comme le profil moyen. Un autre moyen d'obtenir le profil d'équilibre de la plage est d'utiliser un modèle numérique de la plage avec des conditions de houle constantes jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de variation.

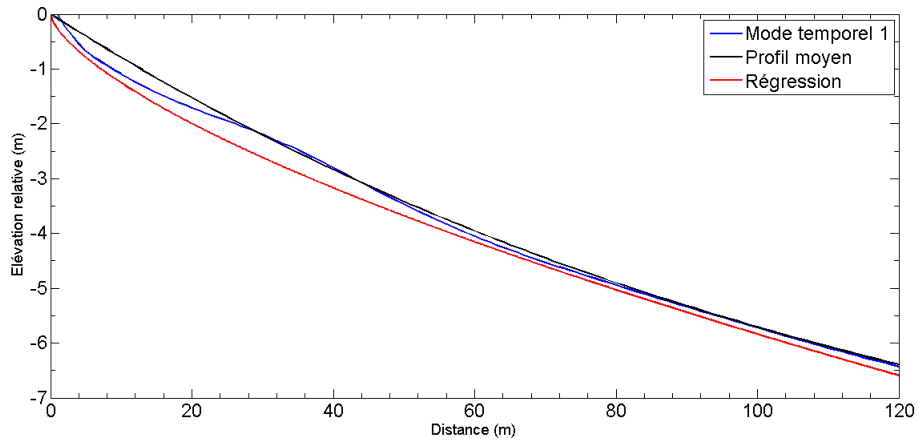


FIGURE 3.11 – Mode temporel 1, profil moyen et régression de la forme $Ay^{2/3}$

IV Modèles morphodynamiques empiriques

1 Modèle de Yates et al. (2009)

I Principe

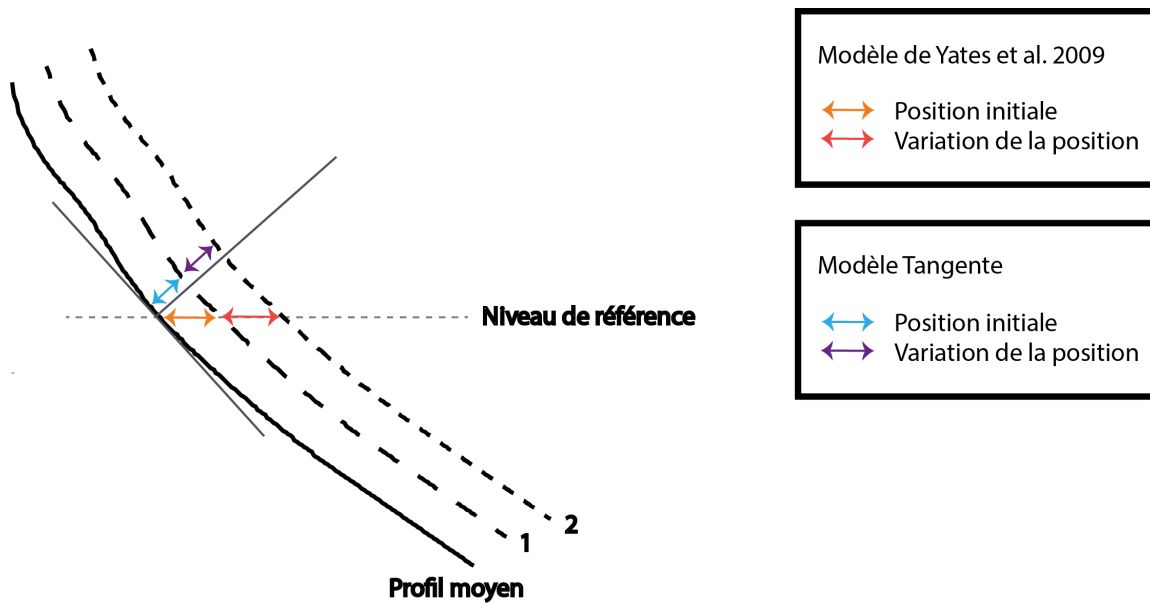


FIGURE 3.12 – Représentation schématique du modèle de Yates et al. (2009) et du modèle Tangente

Le modèle de variation de la position de la plage développé dans Yates et al. (2009) et Yates et al. (2011) est basé sur le principe de profil d'équilibre expliqué dans la partie 2.I Les profils d'équilibre. Les prémisses du modèle sont que le taux de variation de la position de la plage dépend à la fois des conditions hydrodynamiques (hauteur significative de la houle) et du déséquilibre entre les conditions de houle et la position courante de la plage. Par exemple, pour des conditions de houles identiques, si la position de la plage est plus éloignée de la position

d'équilibre, le taux de changement sera plus grand que si la position de la plage est proche du point d'équilibre. Le but est donc de mettre en évidence le type de réponse concernant la position de la plage, en fonction de l'énergie de la houle et de la position initiale du rivage. Les données montrent l'existence d'un profil d'équilibre pour un climat de houle donné, en d'autres termes, l'existence d'une condition énergétique à l'équilibre pour laquelle il n'y aurait pas de variation de la position du rivage.

Ce modèle a en effet été appliqué avec succès sur des plages microtidales Yates et al. (2009); Yates et al. (2011) et sur une plage mésotidale Castelle et al. (2014). Cependant ce modèle n'a été testé ni sur une plage de poche ni sur une plage macrotidale comme c'est le cas dans cette étude.

La position de la plage est définie comme l'intersection du profil de plage et d'un niveau de référence. Pour cette étude différents niveaux de références sont testés (Pleine Mer Vives-Eaux (PMVE), Plein Mer Mortes-Eaux (PMME) et Niveau Moyen (NM)). Le choix du niveau est une considération importante sur notre zone macrotidale car la dynamique du profil est dépendante du niveau considéré.

La position initiale de la plage correspond à la position cross-shore du niveau de référence considéré au début de la période étudiée, évaluée par rapport à la position moyenne. Une position initiale négative indique un profil érodé alors qu'une position initiale positive correspond à un profil accrété par rapport au profil moyen au niveau de référence.

Le taux de variation est défini comme la distance entre les positions de la plage au début et à la fin de la période étudiée, divisé par le nombre de jours pendant la période considérée. Si le taux de variation est positif, la plage s'engraisse alors que si le taux de variation est négatif, la plage est en érosion, toujours au niveau de référence.

Le paramètre utilisé pour quantifier l'énergie de la houle sur la période étudiée est la hauteur significative des vagues (cf § 1.II.3.1 Données de houle PréviMER). L'énergie est obtenue en élevant au carré la moyenne de la hauteur maximum sur 12 h.

I Résultats

Sur la figure 3.13a le niveau de référence est le niveau de PMVE. Les points semblent s'ordonner de la manière suivante :

- Pour des positions initiales négatives et/ou quand l'énergie est faible, les taux de variations sont positifs ; la plage est en accrétion.
- Pour des énergies plus fortes et/ou les positions initiales positives, les taux de variation

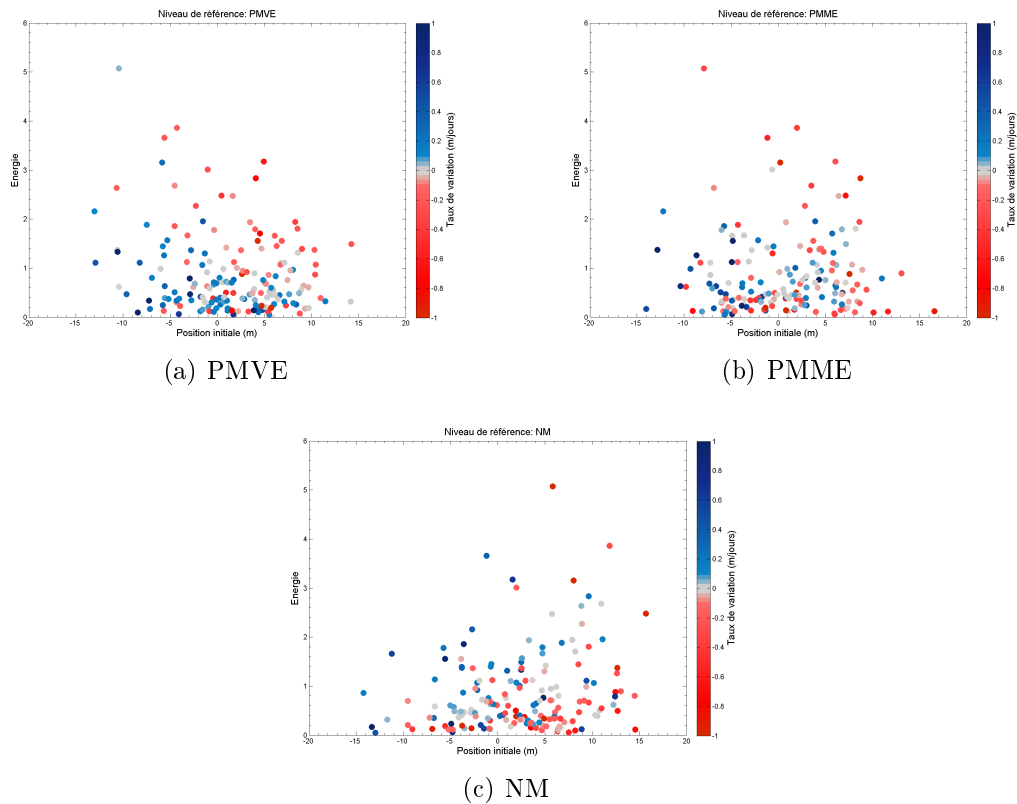


FIGURE 3.13 – Modèle de Yates et al. (2009) avec la position initiale par rapport au profil d'équilibre en fonction de l'énergie et du taux d'accrétion entre deux profils

sont négatifs ; la plage est en érosion.

Il est cependant difficile de déterminer une condition énergétique à l'équilibre pour laquelle il n'y aurait pas de variation de la position du rivage.

Pour la figure 3.13b représentant les variations au niveau PMME il est possible de retrouver le type de variations observées sur la figure 3.13. Cependant, la répartition des points semble moins claire, la dynamique est donc probablement moins bien définie à ce niveau.

La figure 3.13c présente les variations au niveau moyen des marées. A ce niveau les points correspondants à des énergies faibles et/ou des positions initiales positives ont des taux de variation négatifs, la plage est donc en érosion. Pour des énergies fortes et/ou des positions initiales négatives le taux de variation est positif, la plage est en accrétion.

Une variation dans la réponse de la plage est donc observable en fonction du niveau de référence. Bien que de façon générale les profils érodés semblent avoir tendance à se combler et inversement, pour des énergies fortes par exemple le haut de plage (au niveau PMVE) à plus tendance à l'accrétion alors que plus bas (au niveau moyen) la tendance sera à l'érosion.

Ces observations semblent refléter les transferts sédimentaires transversaux de la plage où l'engraissement du haut de plage se fait au dépend du bas de plage et inversement. Au

niveau de PMME la dynamique est plus indéterminée, il est probable que ce niveau se situe dans la zone de transition entre les deux dynamiques opposées décrites précédemment. Afin de mieux contraindre la dynamique propre à la plage de Porsmilin, d'autres modèles de variations ont été testés.

2 Modèle Tangente

II Principe

Ici la variation de la position n'est plus calculée le long d'un niveau de référence horizontal mais sur la perpendiculaire à la tangente au point de référence sur le profil moyen (Figure 3.12).

II Résultats

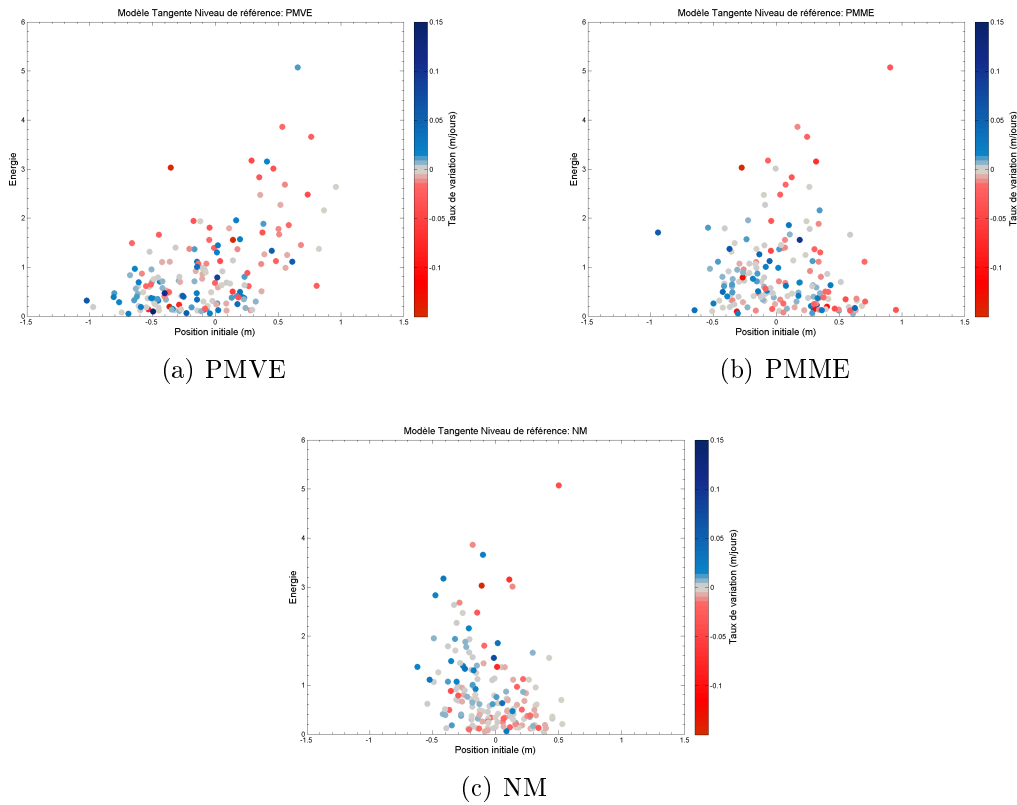


FIGURE 3.14 – Modèle Tangente avec la position initiale par rapport au profil d'équilibre en fonction de l'énergie et du taux d'accrétion entre deux profils

Au niveau de PMVE (Figure 3.14a), les points dont la position initiale est négative et dont l'énergie est faible ont des taux de variation positifs, ce qui signifie qu'il y a accrétion. Inversement les points dont la position initiale est positive et dont les énergies sont plus élevées ont des taux de variation négatifs, ce qui indique qu'il y a érosion.

La figure 3.14b présente les variations pour le niveau PMME. Les observations pour cette figure sont semblables aux observations pour la figure 3.14a. Les positions initiales sont cependant plus groupées autour du zéro ce qui montre une variabilité moindre à ce niveau.

Pour le niveau moyen (Figure 3.14c), les positions initiales sont aussi très groupées autour du zéro. Cependant, contrairement aux niveaux PMVE et PMME ici les points dont la position initiale est négative correspondent à des énergies fortes et des taux de variations positifs. A contrario les points avec une position initiale positive correspondent à des énergies plus faibles et des taux de variations négatifs.

Comme pour le modèle de Yates et al. (2009) on observe avec ce modèle des dynamiques inverses entre PMVE et NM. On peut aussi remarquer que, par rapport au modèle de Yates et al. (2009), les taux de variations et la distance au profil moyen sont significativement plus faibles. Ces différences sont dues à la méthode de calcul, car les différences de positions horizontales sont plus grandes que les différences de niveau sur la perpendiculaire à la tangente à la pente.

3 Modèle "Point de plus grande pente"

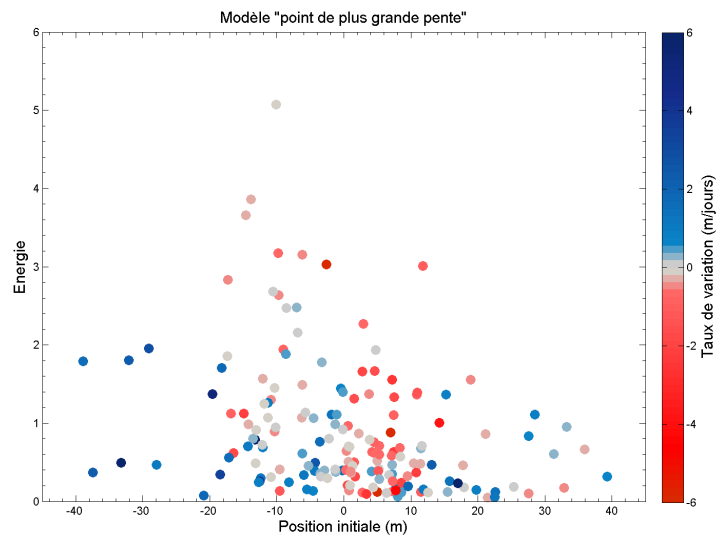


FIGURE 3.15 – Modèle "Point de plus grande pente" avec position initiale du point de plus grande pente en fonction de l'énergie et du taux de variation de la position du point

III Principes

Ce modèle considère la variation de la position du point de plus grande pente le long du profil. En effet le point de plus grande pente correspond au pied de la barre, donc suivre ce point revient à suivre l'évolution de la barre sur la plage. Cette dernière ayant une évolution

liée aux saisons, les variations sont donc corrélables à l'énergie de la houle.

III Résultats

La figure 3.15 illustre la grande variabilité de la position du point de plus grande pente le long du profil avec des positions variant sur près de 40m de part et d'autre du point de référence (point de plus grande pente du profil moyen). Les taux de variation positifs semblent être associés à des énergies faibles indépendamment de la position initiale. Les taux de variations négatifs semblent être associés à des positions initiales proches de zéro pour des énergies les plus élevées. Cependant la figure ne présente pas des résultats assez nets pour tirer des conclusions générales.

Pour caractériser les variations de la barre dans le temps, il existe des méthodes statistiques de type EEOF, CEOF ou POP (cf § 2.II.2 Autres types d'analyses statistiques) qui pourrait être plus adaptées.

4 Modèle Aires

IV Principes

Pour ce modèle, les variations sont quantifiées en fonction de l'aire entre le profil moyen et le profil étudié. Le but est de quantifier la différence de morphologie du profil étudié par rapport au profil moyen.

IV Résultats

Les résultats de ce modèle n'étant pas concluants, (taux de variations et positions initiales disparates et non-corrélés avec la houle) ils ne seront pas présentés ici.

Ce modèle n'étant pas concluant il serait plus adapté d'adopter une approche volumétrique de type budget sédimentaire pour quantifier les variations.

Chapitre 4

Discussion

Le but de cette étude est de caractériser le morphodynamique et le profil d'équilibre de la plage de Porsmilin grâce à des données de topographie s'étendant sur plus de 10 ans, avec des acquisitions mensuelles en moyenne, ainsi qu'avec des données de houle toutes les heures sur la même période. L'étendue pluriannuelle de ce jeu de données permet donc d'étudier la dynamique de la plage en évitant une influence trop forte des perturbations événementielles, ce qui permet une bonne représentativité des résultats.

La morphologie de la plage de Porsmilin est dominée, au premier ordre, par les variations saisonnières d'une structure sédimentaire de type barre. En effet, l'étude de la morphologie saisonnière reflète la création de la barre par accrétion du haut de plage du printemps à l'automne, période de plus faible énergie de la houle. En hiver, le régime de houle plus énergétique provoque la disparition de la barre et donc l'érosion du haut de plage. Cette dynamique de barre est superposée à une tendance plus générale bien décrite par les variations de pente. En période de faible énergie le haut de plage s'accrète alors que le bas de plage s'érode, résultant en un profil de plage concave. Inversement, en période de forte énergie, le haut de plage s'érode au profit du bas de plage qui s'accrète, le profil de plage résultant devenant donc plus linéaire. Ces observations concordent avec les résultats de l'analyse statistique. EOF qui montrent que :

- L'altitude moyenne du profil de plage est soumise à des variations saisonnières.
 - o Quand la plage reçoit une houle fortement énergétique (hiver), l'altitude moyenne est faible donc la plage est érodée.
 - o Au contraire, quand le régime de houle est faiblement énergétique (été), l'altitude est plus élevée, la plage est accrétée.
- Il n'y a pas une dynamique de barre unique mais deux dynamiques dé-corrélées entre elles :

- Une première structure sédimentaire de type barre est observable au niveau de PMVE. Les variations temporelles de cette structure sont directement corrélables au régime énergétique de la houle, la barre est très présente quand la houle est faiblement énergétique et disparaît quand la houle est très énergétique. On peut cependant remarquer quelques exceptions pour les hivers 2004, 2008 et 2014 où l'analyse EOF montre une contribution de cette structure sédimentaire au profil de plage particulièrement élevée. Il est possible que lors de tempête particulièrement violentes et/ou répétitives, la plage soit complètement érodée et que le platier rocheux soit à découvert, où qu'un cordon de galets se forme comme ça a été le cas début d'année 2014. Dans ces cas il est possible que le mode de variation ne reflète non pas une barre sableuse mais la présence d'une autre structure au niveau de PMVE.
- Une seconde structure sédimentaire, elle aussi de type barre, est observable légèrement plus bas le long du profil aux environs du niveau de PMME. Les variations temporelles de cette barre ne montrent pas de corrélation claire avec la hauteur significative de la houle. Le processus morphogène lié à la dynamique de cette structure sédimentaire n'est donc pas la houle. Il est possible que cette barre soit liée à des variations climatiques influençant par exemple le niveau de la nappe.

Pour déterminer les processus liés à la dynamique de la seconde barre, des événements de forçage météo-marins ayant pu influencer la plage ont été recherchés. L'analyse spectrale du mode temporel montre que la périodicité dominante de la barre est d'environ 3.7 ans. Cependant cette période ne se retrouve pas dans l'analyse spectrale de la houle. Un des grands cycles climatiques à l'échelle de la planète est ENSO (El Niño Southern Oscillation), dont l'influence est ressentie jusqu'en Méditerranée (gouriaud03). Pour vérifier une éventuelle corrélation entre la variation de la barre et El Niño la figure 4.1 représente le mode temporel 2 et l'indice océanique d'ENSO. Il ne semble pas y avoir une très bonne corrélation entre ENSO et la variation de la barre. Il est donc impossible de relier directement ces deux phénomènes

De tous les modèles morphodynamiques testés, le modèle de variation "Tangente" permet la meilleure interprétation de la dynamique. Ce modèle basé sur l'équation de Yates et al. (2009) $S(t) = (S_0 - S_{eq})e^{-aC^+E^{1/2}t} + S_{eq}$ est le mieux adapté à la dynamique de Porsmilin. En effet, ce modèle tient compte de la variation de position tangentielle à la pente de la plage, contrairement au modèle de Yates qui ne considérait « que » la variation horizontale des positions de niveaux de référence. Le modèle de Yates est adapté dans le cas de plage ayant un profil quasi-linéaire, subissant une érosion globale lors de fortes houles et une accrétion globale lors de faibles conditions énergétiques. Dans notre cas, l'analyse statistique a clairement montré

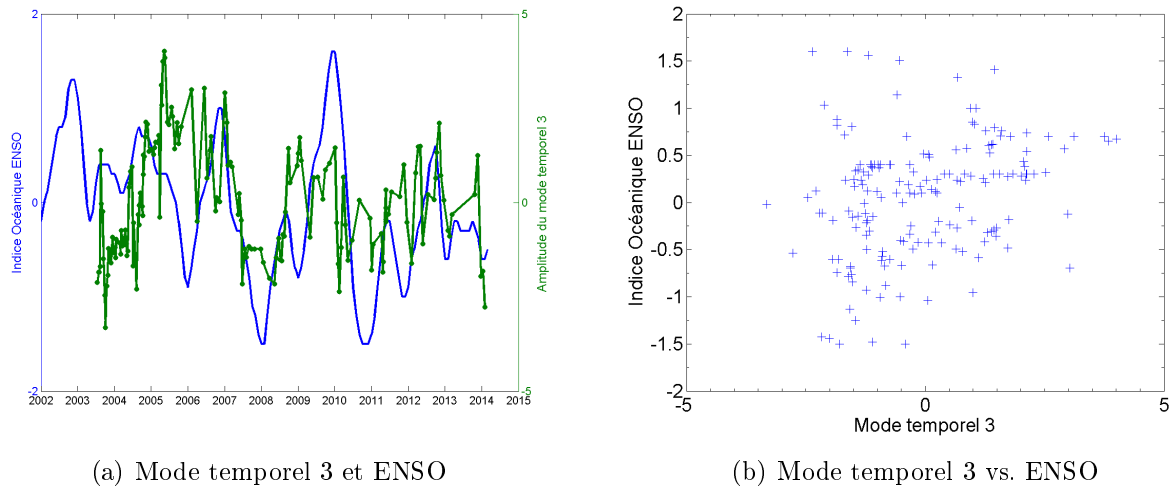


FIGURE 4.1 – Mode temporel 3 et indice océanique de l'oscillation ENSO

une dynamique de transfert entre le bas de plage et le haut, avec formation de barre sableuses. Cette dynamique est mieux représentée avec un modèle tangential, appliqué à différents niveaux de référence.

Le test du modèle à trois niveaux (PMVE, PMME, NM) a permis de mettre en évidence des modèles de variation différents entre haut et bas de plage. Les transferts sédimentaires semblent se faire en cross-shore, l'engraissement du haut de plage se faisant aux dépens du stock de sédiment disponible en bas de plage et inversement.

La dispersion des positions initiales autour de la position d'équilibre permet aussi de remarquer une variation le long du profil. Au niveau PMVE les positions initiales sont très dispersées autour de la position d'équilibre attestant d'une variabilité morphologique forte. En se rapprochant du bas de plage (niveau PMME et NM) cette variabilité diminue. L'amplitude des variations est donc plus grande en haut qu'en bas de plage. Cette différence de variabilité morphologique peut être expliquée par la dynamique de plage sableuse plus importante en haut de plage dans une zone de formation-disparition de la barre, cela montre aussi que la barre sableuse concentre le stock sédimentaire en période calme alors qu'en période d'énergie forte le sable est réparti sur tout le bas de plage.

La plage a donc un comportement principalement dicté par les variations saisonnières de l'énergie incidente.

- En période de forte énergie, c'est-à-dire en hiver, le profil est plutôt linéaire avec une tendance à l'érosion du haut de plage et accrétion du bas de plage.
- En période de plus faible énergie, au printemps, en automne et surtout en été, le profil est de forme concave avec une barre sableuse en haut de plage. La tendance est à l'accrétion

de haut de plage et à l'érosion du bas.

Les modèles empiriques ont permis de comprendre la dynamique mais il n'ont cependant pas permis de déterminer les conditions pour lesquelles le profil de plage est à l'équilibre. Le modèle de Yates et al. (2009) a été développé sur des plages ouvertes où le modèle permettait de trouver une fonction liant énergie de la houle, position initiale du niveau de référence et taux de variation nul (condition d'équilibre). Avec les différentes méthodes de mise en relation des variations observées sur la plage et les conditions énergétiques, à Porsmilin, nous n'avons pas obtenu de relation linéaire de condition d'équilibre. La situation de la plage en fond d'anse, encadrée par des éperons rocheux, de dimension 3 complexifie les processus morphosédimentaires. Il s'agira par la suite de vérifier le fonctionnement longshore (le long de la plage) des transport sédimentaires, qui peuvent avoir un impact important sur les plage de poche (Loureiro et al., 2012a,b; Martins et al., 2010; Short and Masselink, 1999).

Conclusion et Perspectives

Cette étude avait pour but la caractérisation de la morphodynamique et du profil d'équilibre de la plage de Porsmilin. Il a été possible de mettre en évidence la relation entre la saisonnalité de l'énergie incidente et la dynamique sédimentaire dominée par la présence intermittente de barres sableuses responsables des variations de morphologie du profil de plage. Les transferts sédimentaires observés dans cette étude sur un profil (2D) dans la zone intertidale sont cross-shore et montrent un transfert du stock sableux entre le haut de plage et le bas de plage. Cependant il est raisonnable d'envisager des transferts sédimentaires cross-shore à plus grande échelle, en cross-shore jusqu'à la profondeur de fermeture de la plage mais aussi en longshore. La caractérisation des effets de bord sur la plage devrait être faite par une approche 3D de la zone d'étude. En effet la plupart des plages de poches sont soumises à de fortes variations longshore de type rotation (Short and Masselink, 1999; Loureiro et al., 2012a). Dans cette perspective le laboratoire Domaines Océaniques a acquis depuis 2006 des données topographiques et bathymétriques avec un drone puis avec un TLS et un sondeur multifaisceaux afin de réaliser des modèles numériques de terrain 3D continu en Terre-Mer. Ces données haute-résolution de la totalité de la cellule sédimentaire vont permettre de compléter cette étude, en appliquant des méthodes d'analyse similaires le long de différents profils cross-shore, et long-shore (van de Lageweg et al., 2013; Turki et al., 2013). A terme le laboratoire Domaines Océaniques envisage de paramétrer un modèle numérique hydro-sédimentaire de la plage de Porsmilin en s'appuyant notamment sur le travail réalisé dans le cadre de ce stage.

Bibliographie

- Fabrice Ardhuin and Rudy Magne. Modélisation des états de mer du globe à la plage : validation de nouveaux paramètres produits par prévimar. In *XIème Journées Nationales Génie Côtier- Génie Civil, 22-25 juin 2010, Les Sables d'Olonne*, 2010.
- David G. Aubrey. Seasonal patterns of onshore/offshore sediment movement. *Journal of Geophysical Research*, 84(C10) :6347–6354, 1979.
- David G. Aubrey. The statistical prediction of beach changes in southern california. *Journal of Geophysical Research*, 85(C6) :3264–3276, 1980.
- Bruno Castelle, Vincent Marieu, Stéphane Bujan, Sophie Ferreira, Jean-Paul Parisot, Sylvain Capo, Nadia Sénéchal, and Thomas Chouzenoux. Equilibrium shoreline modelling of a high-energy meso-macrotidal multiple-barred beach. *Marine Geology*, 347 :85–94, 2014.
- M.A. Davidson, R.P. Lewis, and I.L. Turner. Forecasting seasonal to multi-year shoreline change. *Coastal Engineering*, 57 :620–629, 2010.
- M.A. Davidson, K.D. Splinter, and I.L. Turner. A simple equilibrium model for predicting shoreline change. *Coastal Engineering*, 73 :191–202, 2013.
- Robert G. Dean. Equilibrium beach profiles : Characteristics and application. *Journal of Coastal Research*, 7(1) :53–84, 1991.
- Aurélie Dehouck. *Morphodynamique des plages sableuses de la mer d'Iroise (Finistère)*. PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale, 2006.
- Assia Fernane, Emmanuel Gandouin, Aurélie Penaud, Brigitte Van Vliet-Lanoë, Jérôme Goslin, Muriel Vidal, and Christophe Delacourt. Coastal palaeoenvironmental record of the last 7 ka bp in nw france : infra-millenary climatic and anthropic holocene signals. Soumis, 2014.
- Jérôme Goslin, Brigitte Van Vliet-Lanoë, Pierre Stéphane, Christophe Delacourt, Assia Fernane, Emmanuel Gandouin, Alain Henaff, Aurélie Penaud, Serge Suanez, et al. Holocene relative sea-level changes in western brittany (france) between 7600 and 4000 cal. bp : Reconstitution from basal-peat deposits. *Géomorphologie : Relief. Processus. Environnement*, 4 :425–444, 2013.
- F. Grasso, H. Michallet, E. Barthélemy, and R. Certain. Physical modeling of intermediate cross-shore beach morphology : Transient and equilibrium states. *Journal of Geophysical Research*, 114(C09001), 2009.
- Jeff E. Hansen and Patrick L. Barnard. Sub-weekly to interannual variability of a high-energy shoreline. *Coastal Engineering*, 57 :959–972, 2010.
- Douglas L. Inman and Peter N. Adams. Bedforms and closure depth on equilibrium beaches. *DTIC Document*, 2005.

- Marion Jaud. *Techniques d'observation et de mesure haute résolution des transferts sédimentaires dans la frange littorale*. PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale, 2011.
- Harshinie Karunaratna, Jose M. Horillo-Caraballo, Roshanka Ranasinghe, Andrew D. Short, and Dominic E. Reeve. An analysis of the cross-shore beach morphodynamics of a sandy and a composite gravel beach. *Marine Geology*, 299-302 :33–42, 2012.
- Magnus Larson, Michele Capobianco, and Hans Hanson. Relationship between beach profiles and waves at duck, north carolina, determined by canonical correlation analysis. *Marine Geology*, 163 :275–288, 2000.
- Magnus Larson, Michele Capobianco, Henk Jansen, Crzegorz Rozynski, Howard N. Southgate, marcel Stive, Kathelijne M. Wijnberg, and Suzannz Hulscher. Analysis and modeling of field data on coastal morphological evolution over yearly and decadal time scales. part 1 : Background and linear techniques. *Journal of Coastal Research*, 19 :760–775, 2003.
- Carlos Loureiro, Oscar Ferreira, and J. Andrew G. Cooper. Geologically constrained morphological variability and boundary effects on embayed beaches. *Marine Geology*, 329-331 :1–15, 2012a.
- Carlos Loureiro, Oscar Ferreira, and J. Andrew G. Cooper. Extreme erosion on high-energy embayed beaches : Influence of megarips and storm grouping. *Geomorphology*, 139-140 :155–171, 2012b.
- Carlos Loureiro, Oscar Ferreira, and J. Andrew G. Cooper. Applicability of parametric beach morphodynamic state classification on embayed beaches. *Marine Geology*, 346 :153–164, 2013.
- Rudy Magne and Fabrice Ardhuin. Prévisions et rejeux des états de mer du globe à la plage. In *Xème Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil, 14-16 octobre 2008, Sophia Antipolis*, 2008.
- Cristina Celia Martins, Michel Michaelovitch de Mahiques, and Joao Manuel Alveirinho Dias. Daily morphological changes determined by high-energy events on an embayed beach : a qualitative model. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35 :487–495, 2010.
- Jon K. Miller and Robert G. Dean. A simple new shoreline change model. *Coastal Engineering*, 51 :531–556, 2004.
- Jon K. Miller and Robert G. Dean. Shoreline variability via empirical orthogonal function analysis : Part i temporal and spatial characteristics. *Coastal Engineering*, 54 :111–131, 2007a.
- Jon K. Miller and Robert G. Dean. Shoreline variability via empirical orthogonal function analysis : Part ii relationship to nearshore conditions. *Coastal Engineering*, 54 :133–150, 2007b.
- Orrin H. Pilkey, Robert S. Young, Stanley R. Riggs, A. W. Sam Smith, Huiyan Wu, and Walter D. Pilkey. The concept of shoreface profile of equilibrium : A critical review. *Journal of Coastal Reasearch*, 9(1) :255–278, 1993.
- C. A. Pinto, R. Taborda, C. Andrade, and S. B. Teixeira. Seasonal and mesoscale variations at an embayed beach (armaçao de pera, portugal). *Journal of Coastal Reasearch*, 56 :118–122, 2009.

- Didier Rihouey. *Analyse statistique de l'évolution morphodynamique des plages sableuses : Application aux sites d'étude du programme national d'environnement côtier et aux plages d'anglet*. PhD thesis, Université de Pau et des pays de l'Adour, 2004.
- Andrew D. Short and Gerhard Masselink. *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*, chapter Embayed and Structurally Controlled Beaches. Wiley, 1999.
- I. Turki, R. Medina, M. Gonzalez, and G. Coco. Natural variability of shoreline position : observations at three pocket beaches. *Marine Geology*, 338 :76–89, 2013.
- W. I. van de Lageweg, K. R. Bryan, Giovanni Coco, and B. G. Ruessink. Observations of shoreline-sandbar coupling on an embayed beach. *Marine Geology*, 344 :101–114, 2013.
- L. D. Wright and A. D. Short. Morphodynamic variability of surf zones and beaches : A synthesis. *Marine Geology*, 56 :93–118, 1984.
- L. D. Wright, A. D. Short, and M. O. Green. Short-term changes in the morphodynamic states of beaches and surf zones : An empirical predictive model. *Marine Geology*, 62 :339–364, 1985.
- M. L. Yates, R. T. Guza, and W. C. O'Reilly. Equilibrium shoreline response : Observations and modeling. *Journal of Geophysical Research*, 114(C09014), 2009.
- M. L. Yates, R. T. Guza, W. C. O'Reilly, J. E. Hansen, and P. L. Barnard. Equilibrium shoreline response of a high wave energy beach. *Journal of Geophysical Research*, 116(C04014), 2011.

Annexes

Annexe A : Tableau des résultats de l'analyse des pentes : Données Brutes

| Pente moyenne | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Moyenne | Nbr de profils |
|-------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|--------------------|---------------------|-------------------|----------------|
| Tout les profils | -0,0327728 | -0,03839587 | -0,04866048 | -0,06476546 | -0,069336 | -0,06125438 | -0,079560704 | -0,0563922 | 104 |
| PRINTEMPS | -0,03269054 | -0,03675933 | -0,04736861 | -0,06497552 | -0,06913402 | -0,06349247 | -0,077838425 | -0,056037 | 36 |
| ÉTÉ | -0,03174571 | -0,03764396 | -0,04669372 | -0,06798112 | -0,06785649 | -0,05694051 | -0,080715036 | -0,0556538 | 18 |
| AUTOMNE | -0,03271468 | -0,0410304 | -0,05441303 | -0,0701144 | -0,07507658 | -0,05722126 | -0,072109005 | -0,0575256 | 28 |
| HIVER | -0,03437484 | -0,03851251 | -0,04455254 | -0,05410337 | -0,06373638 | -0,06645545 | -0,091234526 | -0,0561385 | 22 |

| Différence de pente | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Moyenne |
|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|
| Tout les profils | 5,44E-06 | 5,19E-05 | -0,00026 | -0,00037 | -0,0003 | -3,20E-05 | -3,20E-05 | -0,0001338 |
| PRINTEMPS | -1,04E-04 | 5,12E-04 | -5,63E-04 | -1,53E-03 | -7,15E-04 | 1,16E-03 | 1,65E-03 | 5,857E-05 |
| ÉTÉ | -0,00113598 | -1,62E-03 | 1,80E-05 | -0,00097 | -0,00084 | 0,003913 | 0,00034 | -4,214E-05 |
| AUTOMNE | 6,91E-04 | -9,66E-04 | -3,07E-03 | -1,92E-03 | -2,82E-03 | -1,10E-03 | 2,18E-03 | -0,0010007 |
| HIVER | 2,08E-04 | 1,96E-03 | 3,81E-03 | 4,20E-03 | 4,24E-03 | -3,89E-03 | -6,23E-03 | 0,000614 |

Annexe B : Tableau des résultats de l'analyse des pentes : Régression linéaire de degré 3

| Pente moyenne | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Moyenne | Nbr de profils |
|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|
| Tout les profils | -3,278E-02 | -3,871E-02 | -4,631E-02 | -5,472E-02 | -6,278E-02 | -7,016E-02 | -7,582E-02 | -5,447E-02 | 104 |
| PRINTEMPS | -3,146E-02 | -3,696E-02 | -4,534E-02 | -5,498E-02 | -6,445E-02 | -7,343E-02 | -7,992E-02 | -5,522E-02 | 36 |
| ÉTÉ | -3,060E-02 | -3,903E-02 | -4,724E-02 | -5,524E-02 | -6,266E-02 | -6,978E-02 | -7,590E-02 | -5,435E-02 | 18 |
| AUTOMNE | -3,488E-02 | -4,328E-02 | -4,985E-02 | -5,565E-02 | -6,069E-02 | -6,471E-02 | -6,805E-02 | -5,387E-02 | 28 |
| HIVER | -3,463E-02 | -3,551E-02 | -4,256E-02 | -5,254E-02 | -6,267E-02 | -7,204E-02 | -7,902E-02 | -5,414E-02 | 22 |

| Différence de pente | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Moyenne |
|-------------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Tout les profils | -8,756E-06 | 6,132E-05 | 9,280E-05 | 1,089E-04 | 1,110E-04 | 1,195E-04 | 1,024E-04 | 8,389E-05 |
| PRINTEMPS | 3,431E-04 | 6,462E-04 | 3,454E-04 | -1,604E-05 | -1,703E-04 | -1,452E-04 | 6,711E-04 | 2,392E-04 |
| ÉTÉ | 9,790E-04 | 1,800E-03 | 1,690E-03 | 1,060E-03 | 2,590E-04 | -6,650E-04 | -1,320E-03 | 5,433E-04 |
| AUTOMNE | 2,668E-06 | 1,162E-03 | 1,207E-03 | 5,001E-04 | -6,582E-04 | -2,073E-03 | -3,536E-03 | -4,851E-04 |
| HIVER | -1,490E-03 | -3,872E-03 | -3,151E-03 | -9,830E-04 | 1,474E-03 | 4,083E-03 | 5,003E-03 | 1,521E-04 |

Résumé

Dans cette étude, une série de profils topographiques de plage acquis de 2003 à 2013 et des hauteurs significatives de houle issues du modèle PréviMER sont analysées afin de comprendre des variations morphologiques et les conditions d'équilibres de la plage de poche macrotidale de Porsmilin (Finistère).

D'abord, les données de houle sont analysées afin de déterminer les variations d'énergie incidente. Ensuite, analyses statistiques classiques et analyse orthogonal empirique (EOF) sont utilisées pour étudier les variations de la morphologie à partir des profils de plage. Enfin les variations morphologiques et hydrodynamiques sont reliées grâce à des modèles empiriques de variations morphodynamiques d'un profil de plage basés sur (Yates et al., 2009).

Une relation entre la saisonnalité de l'énergie incidente et les variations morphologiques a pu être mise en évidence ainsi que la présence d'une double dynamique de type barre sableuse liée à un comportement inversé entre le haut et le bas de plage.

Abstract

In this study, data from a 12 years topographic profil serie and significant wave height from the numerical model PréviMer is analysed. The objectif is the comprehension of morphological variations and equilibrium conditions on the macrotidal pocket beach of Porsmilin (Finistère).

First, the fluctuation of incident wave energy is obtained with the analysis of wave height. Then, bulk statistical method and empirical orthogonal eigenfuction (EOF) are used on the beach profil data to characterize the morphological variations. Finally, morphological and hydrodynamics variations are correlated via empirical variation models based on Yates et al. (2009).

A correlation is found between seasonnality in the incident wave energy and morphological variation. A double bar dynamic is also observed and a inverse dynamic between the upper and lower beach part.