

N° d'ordre 3097

THÈSE

Présentée à

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1

Ecole Doctorale Sciences du Vivant,
Géosciences, Sciences de l'Environnement

Par Franck DESMAZES

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR

Spécialité : Géologie marine

CARACTÉRISATION DES BARRES SABLEUSES D'UNE PLAGE DE LA CÔTE AQUITAINE. EXEMPLE DE LA PLAGE DU TRUC VERT.

Soutenue le 15 décembre 2005

Après avis de :

Mme Hélène HOWA, Maître de Conférences, Université d'Angers

M. Michel TESSON, Professeur, Université de Perpignan

Devant la commission d'examen formée de :

M. P. BERTRAND, Directeur de recherche, Université Bordeaux 1

M. P. CASTAING, Professeur, Université Bordeaux 1

M. T. GARLAN, Ingénieur, SHOM

Mme H. HOWA, Maître de Conférences, Université d'Angers

M. D. MICHEL, Maître de Conférences, Université Bordeaux 1

M. M. TESSON, Professeur, Université de Perpignan

Examineur

Directeur de thèse

Examineur

Rapporteur

Examineur

Rapporteur

REMERCIEMENTS

Aux personnes à l'origine de ce travail : Denis Michel et Thierry Garlan.

Aux rapporteurs de la thèse et aux membres du jury.

Au personnel « tout-terrain » du DGO : Stéphane B, Patrice B et Georges O.

Aux nombreux étudiants-stagiaires motivés par l'observation des milieux côtiers, et plus particulièrement Amélie G, Carole L, Nicolas J, Néjéma Z, Jérôme C, Gregory L, Antoine D et Antoine E.

Aux membres des équipes METHYS et SEDIMENTOLOGIE du DGO.

A toutes les personnes rencontrées au cours des missions et des congrès, et notamment Raphaël C, Bernadette T, Alexis S, Christophe B, Xavier B.

Aux enseignants de l'UFR Sciences de la Terre et de la Mer de l'université de Bordeaux 1, et entres autres : Laurent M, Bruno M, Philippe M, Pierre A, Aldo S.

A l'association Océan et son équipe.

Aux sympathiques étudiants des Doctoriales 2004 et des stages de monitorats.

Aux membres fondateurs de Rencontre du 3^{ème} Type : Mathieu W, Dorothée A, Linda B, Isabelle C, Germain M, Nadia P, Frédéric LL, Chloé M, Yann H, aux adhérents qui aiment trinquer et aux futurs membres qui auront la charge de pérenniser cette association de doctorants.

A toute la bande de docteurs issue du labo : Rodrigo P, Yann B, Stéphane A., Johanna L, Gwenaëlle C, Cédric Bobo, Bruno C...

Aux prochains diplômés : Tim O, Sylvain C, Vincent H, Fred G, Mathieu G, Julie T, Elsa J., Manue D, Marc-Vincent C, Vincent M...

Aux oubliés de cette liste qui voudront bien me pardonner ?!

Aux courageux connaisseurs qui auront reconstitué l'ensemble des noms de famille volontairement raccourcis.

A mes proches (amis et famille) présents tout au long de ce travail.

Au soutien sans faille de mes parents.

A Cécile et Zoé.

MERCI

**CARACTERISATION DES BARRES SABLEUSES
D'UNE PLAGE DE LA CÔTE AQUITAINE.
EXEMPLE DE LA PLAGE DU TRUC VERT, GIRONDE.**

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....p 5

**CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES PLAGES ET
LES BARRES SABLEUSES**

page 10

A) Les systèmes de plages sableuses.....p 12

- 1) Le littoral est un système complexe.....12
- 2) Les forçages du milieu côtier.....16
- 3) Les échelles d'observation.....19
- 4) Etude d'un système littoral de plage sableuse.....21

B) Les différents types de barres sableuses.....p 22

- 1) Position des barres sableuses sur un profil de plage.....22
- 2) Formes des barres sableuses.....25
- 3) Processus de formation des barres sableuses.....28
- 4) Classification morphodynamique des plages à barres.....32

C) Présentation de la zone d'étude.....p 40

- 1) Situation géographique.....40
- 2) Les constituants du littoral.....41
- 3) Les forçages et les flux sédimentaires de la côte aquitaine.....48
- 4) Morphologie des plages et des barres sableuses de la côte aquitaine et de la zone du Truc Vert.....76

Bilan de la présentation du cadre d'étude de la thèse.....p 92

CHAPITRE II : TECHNIQUES D'OBSERVATION DE LA MORPHOLOGIE D'UNE PLAGE SABLEUSE A BARRES

page 95

A) Mesures géomorphologique en domaine intertidal et subaérienp 100

- 1) Mesures topographiques par tachéométrie.....100
- 2) Utilisation du GPS pour l'étude morphologique des plages.....106

B) Mesures géomorphologiques de la plage sous-marine.....115

- 1) Analyse d'une carte marine ancienne.....115
- 2) Bathymétrie monofaisceau.....121
- 3) Bathymétrie multifaisceaux.....125
- 4) Sonar latéral à balayage.....127

C) Développement d'une technique d'observation des plages à barres par télédétection vidéo p 131

- 1) Intérêt des techniques de télédétection vidéo pour l'étude des barres sableuses.....131
- 2) Principes de mesure vidéo en milieu côtier.....135
- 3) Développement d'un système vidéo pour l'observation des plages d'Aquitaine159
- 4) Premiers tests d'un système d'observation vidéo sur la plage du Truc Vert.....169

CHAPITRE III : MORPHOLOGIE DES BARRES SABLEUSES DE LA PLAGE DU TRUC VERT

page 179

<u>A) Etude du haut de plage</u>	p 184
1) La dune embryonnaire.....	184
2) La berme.....	190
<u>B) Etude du bas de plage intertidale</u>	p 210
1) Morphologie de la plage intertidale.....	211
2) Forme du système de barre et baie.....	218
<u>C) Etude de la plage sous-marine</u>	p 227
1) Analyse cross-shore.....	229
2) Analyse tridimensionnelle de la plage sous-marine.....	233
CONCLUSION	p 255
BIBLIOGRAPHIE	p 264
ANNEXES	p 273

CARACTERISATION DES BARRES SABLEUSES D'UNE PLAGE DE LA CÔTE AQUITAINE. EXEMPLE DE LA PLAGE DU TRUC VERT, GIRONDE.

INTRODUCTION

Pourquoi étudier les environnements littoraux ?

Les environnements littoraux sont situés à la frontière du continent et de l'océan. Entre des domaines que tout oppose, ils forment une interface particulière qui reste encore mal connue à l'heure actuelle. Ainsi, les processus dynamiques, les constituants du milieu et leurs relations n'ont jamais été intégralement analysés. En fait, il semble que l'étude du littoral constitue un sujet inépuisable tant les côtes sont diversifiées autour de la planète et variables dans le temps. La compréhension de ces environnements représente donc un vaste domaine d'investigation pour la recherche fondamentale et les sciences naturelles.

Il faut également constater que la zone côtière est un espace d'activités privilégié pour les hommes. On y trouve une grande concentration d'habitations, de plus, la pêche, le tourisme et les activités portuaires sont des domaines économiques majeurs. La zone côtière est donc considérée comme très attractive, mais elle est aussi particulièrement dangereuse. En effet, les évolutions spectaculaires, l'impact des tempêtes et de l'érosion à long terme menacent parfois les activités humaines. Ces risques et surtout la méconnaissance du milieu naturel entraînent légitimement un sentiment de méfiance ou de peur. Malheureusement, les réactions humaines sont trop souvent mal adaptées, très coûteuses et parfois destructrices pour l'environnement. Enfin, le domaine côtier est bien évidemment une zone stratégique de défense. Ce positionnement si particulier, entre l'océan et le continent, explique que ce travail ait été en très grande majorité financé par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.

Dans ce contexte, les sujets de recherche fondamentale sur les milieux côtiers rejoignent les intérêts sociaux, économiques et stratégiques. Il apparaît clairement qu'une meilleure connaissance de l'environnement littoral doit permettre un développement plus harmonieux, plus durable et plus sûr des activités humaines dans ces zones frontières.

Comment étudier les environnements littoraux ?

La compréhension du fonctionnement d'un milieu littoral peut se résumer en 5 étapes clés (Figure I.1):

- 1) Observation de l'environnement littoral au temps « T ».
- 2) Observation de l'environnement littoral au temps « T+1 ».
- 3) Description des évolutions entre « T » et « T+1 ».
- 4) Explication des phénomènes à l'origine des évolutions.
- 5) Prédiction des évolutions futures du milieu.

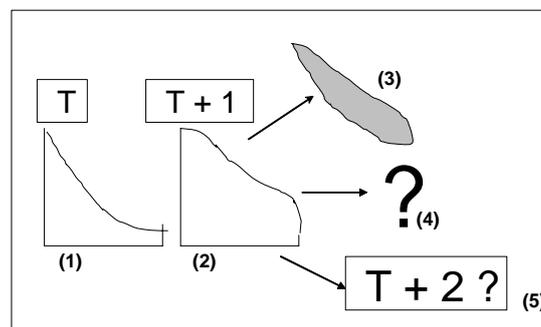


Figure I.1 : Cinq étapes pour comprendre le fonctionnement d'un environnement littoral

Ces cinq étapes sont indispensables à l'avancée de la connaissance du domaine côtier. Elles prennent en compte deux approches complémentaires : d'un côté l'observation du milieu et de l'autre la compréhension des phénomènes. Pour faire aboutir cette démarche, il est capital d'utiliser une large palette de disciplines comme la géologie, l'océanographie, la sédimentologie, la climatologie, l'écologie, la chimie marine, la physique, l'hydrodynamique, la métrologie, etc. Persévérance, précision et analyses pluridisciplinaires sont donc nécessaires pour mener à bien des études sur un environnement littoral.

Le but de cette thèse

Ce travail a pour but d'améliorer la connaissance des milieux côtiers. Il se focalise en priorité sur la phase d'observation de l'environnement, mais ne néglige pas la réflexion sur les processus de fonctionnement. Ainsi, en liaison avec cette double approche, deux questions fondamentales ont guidé le déroulement des travaux et la rédaction de la thèse.

- Comment observer précisément l'interface littorale ?
- Comment décrire clairement un environnement aussi complexe ?

Pour répondre à ces questions, un travail conséquent d'analyse et de méthodologie a été mené sur les techniques de mesures et le traitement des données, tout au long du projet de recherche. De plus, la thèse prend le parti de décrire l'environnement littoral comme un système complexe, c'est-à-dire comme une combinaison d'éléments en relation dans un ensemble. La méthode analytique est utilisée de façon préférentielle dans les chapitres 2 et 3 qui décrivent des techniques de mesure et les résultats des observations. La description du système complexe est développée plus particulièrement dans la partie 1 et la conclusion.

Caractérisation des barres sableuses d'une plage de la côte Aquitaine

Plus précisément, la problématique de la thèse consiste à décrire les barres sableuses de la plage du Truc Vert, située sur la côte Aquitaine. L'étude porte sur les plages, qui sont des environnements côtiers constitués de sédiments granulaires. Leur morphologie est généralement structurée par des corps sédimentaires : les barres sableuses. Ces structures remarquables sont caractérisées par des dimensions importantes (parfois plusieurs kilomètres de longueur) et une amplitude qui peut dépasser 5 mètres. Les stocks de sédiments qu'elles représentent les placent au centre du fonctionnement de la plage. Par conséquent, l'évolution morphologique d'une barre sableuse va influencer l'ensemble des processus hydro-sédimentaires du milieu littoral.

La compréhension des environnements de plages passe donc par l'étude des barres sableuses. Leur formation, leur évolution en fonction des conditions météorologiques, la description des morphologies restent des domaines encore mal compris, malgré les recherches intensives menées sur certaines plages. Les environnements influencés à la fois par des marées importantes et par une forte énergie des houles sont particulièrement mal connus. Les mesures in situ y sont difficiles, ce qui retarde l'observation et la compréhension des processus.

Ce travail a pour but de détailler la morphologie d'une plage à barres sableuses, dans un environnement mésotidal de haute énergie. Les caractéristiques des corps sédimentaires seront détaillées à partir de mesures in situ. Les observations et les traitements de données nécessitent d'employer, entre autres, les méthodes de plusieurs disciplines scientifiques comme :

- La géomorphologie, qui décrit les formes naturelles situées à la surface de la planète ;

- La sédimentologie qui étudie l'érosion, le transport et le dépôt des sédiments ;
- La topographie, dont l'objectif est de mesurer la morphologie terrestre ;
- L'hydrographie qui permet d'observer les formes sous-marines ;
- L'océanographie qui décrit les mouvements de l'océan.

Organisation de la thèse

La thèse est composée de trois parties, la première présente des généralités sur les plages sableuses, la forme des barres littorales, leur classification et les hypothèses de formation. Ce chapitre fait également le point sur l'état de connaissance des plages de la côte Aquitaine. Il a pour objectif particulier de formuler une série de questions qui guideront la suite des recherches.

Ensuite, les méthodes de mesures sur la plage seront détaillées. Cette deuxième partie distingue d'un côté les observations morphologiques et sédimentologiques effectuées en domaine sub-aérien et de l'autre, les mesures pratiquées en domaine marin. Puis, une large part de ce chapitre sera consacrée à décrire les avantages et les principes des techniques d'observation par caméra. Le développement et la mise au point d'un nouveau système de mesure vidéo conçu pour les plages de la côte Aquitaine seront expliqués.

Les résultats de l'étude sont exposés dans la troisième partie. Les barres sableuses de la plage du Truc Vert y sont décrites. Un effort particulier est apporté pour quantifier la morphologie des structures sédimentaires rencontrées depuis le haut jusqu'au bas de la plage. Lorsque les données le permettent, des critères descriptifs et des classifications sont déterminés afin de simplifier les comparaisons entre les barres sableuses.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES PLAGES ET LES BARRES SABLEUSES

PLAN DU CHAPITRE

A) Les systèmes de plages sableuses.....p 12

- 1) Le littoral est un système complexe.....12**
 - 1.1. La notion de système12
 - 1.2. Le système littoral.....13
- 2) Les forçages du milieu côtier.....16**
- 3) Les échelles d'observation.....19**
- 4) Etude d'un système littoral de plage sableuse.....21**

B) Les différents types de barres sableuses.....p 22

- 1) Position des barres sableuses sur un profil de plage.....22**
- 2) Formes des barres sableuses.....25**
- 3) Processus de formation des barres sableuses.....28**
- 4) Classification morphodynamique des plages à barres.....32**
 - 4.1. Plages influencées par la houle32
 - 4.2. Plages en domaine tidal.....35
 - 4.3. Plages à barres multiples.....36

C) Présentation de la zone d'étude.....p 40

- 1) Situation géographique40**
- 2) Les constituants du littoral.....41**
 - 2.1. Le substratum géologique.....41
 - 2.2. Le prisme sédimentaire.....41
 - a) Epaisseur de remaniement du prisme sédimentaire.....42
 - b) Sédimentation superficielle de la plage sous-marine du TrucVert...44
 - c) Granulométrie de la plage intertidale et du haut de plage.....45
- 3) Les forçages et les flux sédimentaires de la côte aquitaine.....48**
 - 3.1. Le transport éolien.....48
 - 3.2. Impact des vagues et des courants induits.....50
 - a) La houle.....50
 - b) Les courants induits par la houle.....52
 - c) Le transport sédimentaire induit par les houles.....63
 - d) Bilan de l'action des houles et des courants induits sur les plages d'Aquitaine.....66
 - 3.3. Le niveau de la mer et la marée au Truc Vert.....68
 - a) Eustatisme.....68

b) Marée de tempête.....	68
c) Impact de la marée.....	69
d) La marée au Truc Vert.....	72
<u>3.4. Bilan des connaissances sur les forçages et les flux sédimentaires de la côte aquitaine.....</u>	<u>75</u>

4) Morphologie des plages et des barres sableuses de la côte aquitaine et de la zone du Truc Vert.....76

4.1. Le cordon dunaire littoral.....	77
4.2 La berme et le haut de plage.....	80
4.3 Barres et baïnes sur la plage intertidale.....	80
a) Formation des barres et baïnes.....	82
b) Migration longshore des barres et baïnes.....	84
c) Destruction des barres et baïnes.....	87
4.4 Morphologie de la plage sous-marine.....	88

Bilan de la présentation du cadre d'étude de la thèse.....p 92

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES PLAGES ET LES BARRES SABLEUSES

Ce chapitre introduit les notions qui seront utiles pour la suite de l'étude. La première partie explique une approche qui permet de mieux envisager la structure et le fonctionnement d'un environnement littoral et d'une plage sableuse. La seconde partie détaille un certain nombre de connaissances sur les barres sableuses : leur position sur la plage, leur forme, les hypothèses de formations et des classifications sont présentées. Enfin, la troisième partie récapitule les idées issues des plus récents travaux de recherche sur la côte aquitaine, en particulier sur la plage du Truc Vert et ses barres sableuses.

A) Les systèmes de plages sableuses

1) Le littoral est un système complexe

1.1. La notion de système

(d'après De Rosnay, 1975)

Un système est un ensemble d'éléments en interaction. Pour décrire ce type d'objet complexe, il est utile de combiner des études analytiques classiques à une approche systémique. Tandis que les analyses traditionnelles visent à détailler chaque constituant de façon séparée, les études systémiques considèrent la globalité de l'environnement et les relations entre les éléments de l'ensemble. Ce paragraphe a pour objectif de montrer les caractéristiques de cette démarche d'analyse globale, appliquée à un environnement côtier. Avant de présenter les constituants communs à tout système, il est toutefois important d'expliquer « pourquoi ces objets sont complexes ? ».

- Tout d'abord, les systèmes sont composés d'une grande variété d'éléments possédant leur caractéristiques propres.
- Ces éléments sont organisés en niveaux hiérarchiques et peuvent être emboîtés.
- Les interactions entre les éléments sont de nature très variées.
- Ces interactions sont généralement non-linéaires car elles ne peuvent pas être expliquées par une simple relation de proportionnalité.

Afin de décrire la composition d'un système complexe, il faut maintenant distinguer des caractéristiques spatiales et temporelles. La structure du système s'organise dans l'espace, elle est caractérisée par :

- une limite ou frontière ;
- des éléments ou composants, pouvant être dénombrés et assemblés en catégories ou familles ;
- des réservoirs, dans lesquelles les éléments peuvent être rassemblés et stockés ;
- un réseau de communication, qui prend des formes variées et permet des échanges d'éléments et d'énergie.

Le fonctionnement du système est dirigé par des phénomènes dépendant du temps, on distingue :

- Les flux d'énergie ou d'éléments qui circulent entre les réservoirs par les réseaux de communication.

Ils représentent une quantité par unité de temps ; parfois, des « vannes » peuvent contrôler les flux.

- Les « délais » résultent des vitesses de circulation entre les réservoirs.

Leur importance n'est pas négligeable dans certains systèmes complexes car ils peuvent induire des phénomènes d'inhibition ou d'amplification.

- Enfin, les boucles de rétroaction jouent un rôle déterminant dans le fonctionnement des systèmes en combinant les effets des réservoirs, des flux, des vannes et des délais.

Elles permettent une dynamique de croissance et d'évolution, ou bien au contraire un effet de stabilité et de régulation.

1.2. Le système littoral

Les environnements littoraux peuvent être considérés comme des systèmes (Figure I.2). Ils forment une zone géographique complexe, à la limite du continent, de l'océan et de l'atmosphère. A l'intérieur de ce vaste ensemble, des systèmes de rangs inférieurs et d'extension plus limitée peuvent être distingués. Les frontières de tous ces domaines sont bien souvent difficiles à établir et dépendent en général des approches utilisées. Dans les faits, le problème de positionnement des limites géographique est un souci d'importance qui sera abordé à plusieurs reprises au cours de cette étude. A l'intérieur de ses limites plus ou moins

nettes, le système côtier est composé d'eau, d'air, de sédiments, de roches et d'organismes vivants. Ces éléments sont stockés dans l'océan, l'atmosphère, le prisme sédimentaire, le substratum géologique et la biosphère. Ils sont étudiés par des disciplines spécifiques : océanographie, météorologie, sédimentologie, géologie et biologie. De plus, en fonction de l'influence plus ou moins grande de chaque constituant, on distingue plusieurs catégories de milieux côtiers :

- Les mangroves et les récifs coralliens sont dominés par les organismes vivants
- Les embouchures (estuaire, lagune, ria) sont caractérisées par la présence d'eau continentale.
- Les plateaux rocheux et les falaises montrent l'affleurement du substrat géologique.
- Les platiers vaseux sont formés par un prisme littoral où prédominent les sédiments fins, tandis que les plages, objets de cette étude, sont constituées d'accumulation de sables.

Dans chacun de ces systèmes, une grande partie des échanges d'énergie et d'éléments sont effectués au niveau des interfaces, à la transition entre les réservoirs où les systèmes d'ordres inférieurs. Ainsi, la transition entre la mer et l'atmosphère est le lieu de déplacement des vagues qui véhiculent une grande quantité d'énergie. L'interface entre le prisme sédimentaire et l'océan ou l'atmosphère est pour sa part un domaine de transport d'éléments très important pour le fonctionnement de l'environnement.

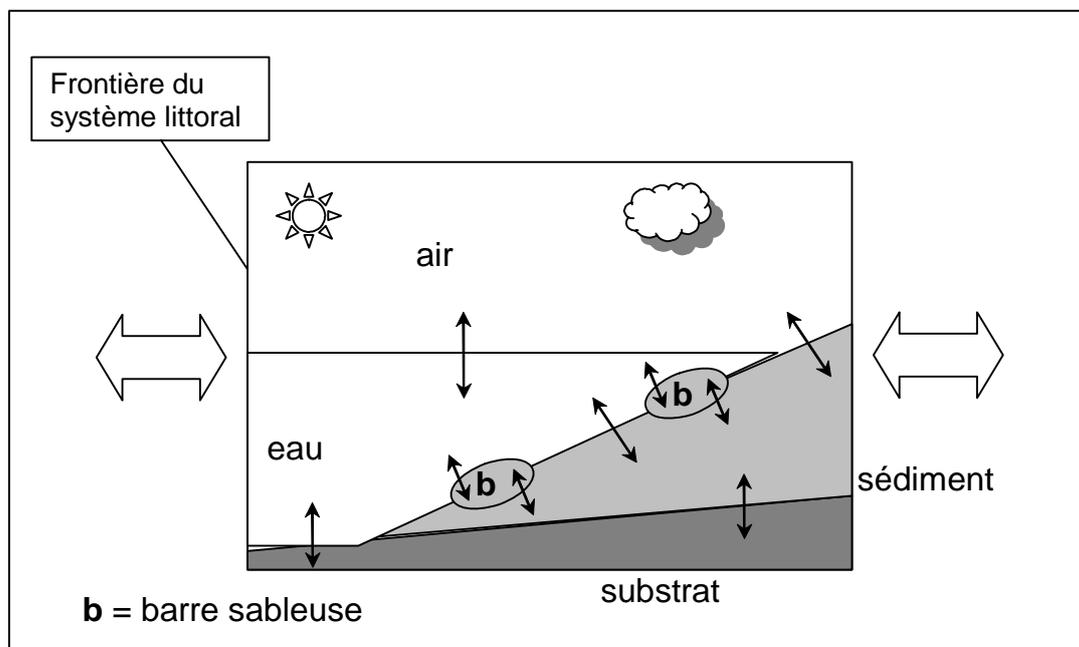


Figure I.2 : Schéma d'un système littoral de plage sableuse.
Les lignes noires représentent les frontières et les interfaces du système.
Les flèches correspondent aux échanges d'énergie et de matière.

Toutes les études qui concernent les limites géographiques, la composition des réservoirs et la forme des interfaces peuvent s'inclure dans l'approche d'observation du littoral. La réflexion sur l'évolution du système dans le temps nécessite, pour sa part, d'intégrer d'autres composants (flux, délais, et boucles de rétroaction) afin de comprendre les processus de fonctionnement. Dans les milieux côtiers, les flux d'énergie sont souvent nommés « forçages ». Ils induisent le mouvement des éléments du système et seront présentés plus précisément dans le paragraphe suivant. En général, les environnements littoraux sont dits « ouverts », c'est-à-dire que des flux d'éléments et d'énergie entrent et sortent du système. L'« équilibre dynamique » est atteint si entrées et sorties sont équivalentes. De leur côté, les délais du milieu sont susceptibles de perturber la mise en place d'un équilibre. Ils peuvent correspondre à des frottements entre éléments, ou à des seuils énergétiques qui déclenchent, par exemple, la modification sensible d'une barre sableuse ou le transport d'une taille de sédiment. Enfin, les boucles de rétroaction permettent la stabilité du système ou bien des changements irréversibles. L'exemple le plus connu dans l'étude du domaine littoral est nommé « boucle morphodynamique » (Figure I.3). Elle relie l'énergie des vagues, le transport des sédiments et la forme du fond. Ainsi, sous l'action des houles, les sédiments peuvent être déplacés, ce qui provoque un changement de la morphologie. En réponse, la nouvelle morphologie va influencer l'action des vagues, et par conséquent le transport sédimentaire. La boucle de rétroaction morphodynamique doit donc être prise en compte pour toute étude des systèmes littoraux qui s'intéressent aux forçages, au transport sédimentaire ou à la morphologie de l'environnement. Dans la suite de ce travail, le terme « morphodynamique » sera employé pour qualifier la conjonction de la morphologie et de hydrologie.

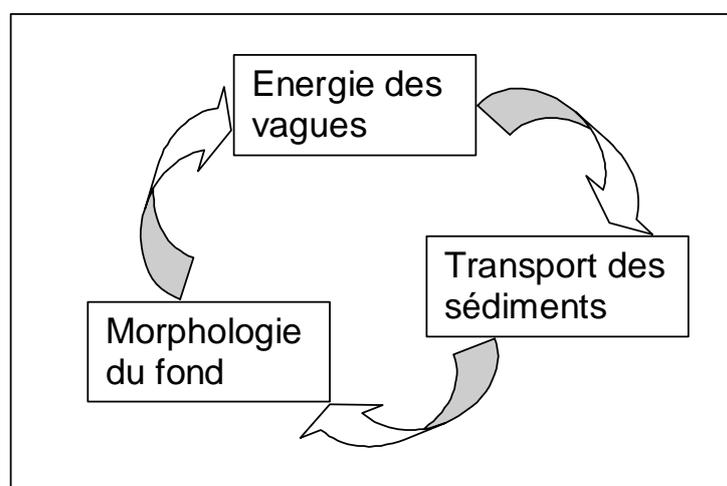


Figure I.3 : Boucle de rétroaction morphodynamique.

2) Les forçages du milieu côtier

D'après Davis (1985) et Komar (1998).

L'exemple de la boucle de rétroaction morphodynamique est un moyen d'illustrer la forte dépendance du transport sédimentaire, de la morphologie et des forçages du système. La difficulté d'étude de l'ensemble est en partie due à la grande complexité des apports énergétiques. Ce paragraphe a pour but de présenter de façon succincte les principaux forçages intervenant sur les plages ; il s'intéresse plus particulièrement à la capacité de transport sédimentaire des phénomènes.

Un forçage est un processus qui affecte les composantes énergétiques d'un système. En milieu côtier, l'énergie est apportée par les vents, les courants et la houle (Figure I.4). La dissipation de ces flux d'énergie est principalement provoquée par le frottement et le déplacement des particules d'eau, d'air et de sédiment.

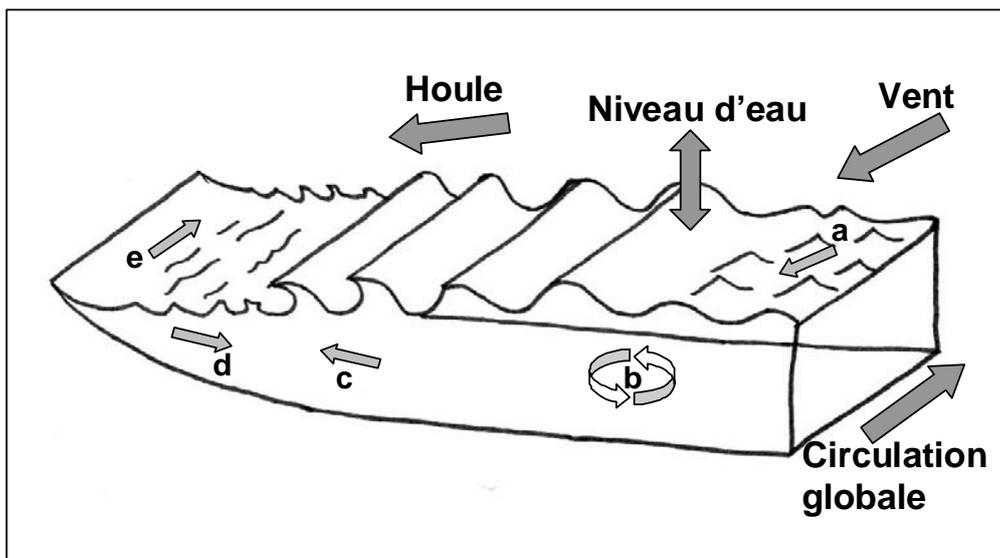


Figure I.4 : Les forçages du milieu côtier.

L'énergie est apportée par le vent, la houle, le niveau d'eau et la circulation globale.

Les courants qui se forment peuvent provoquer le mouvement des sédiments.

(a) courant induit par le vent ; (b) courants rotatifs dus à la marée.

Courants induits par la transformation des vagues :

(c) transport en masse ; (d) courant de retour ; (e) dérive littorale.

Le vent transmet son énergie par des frottements sur l'eau qui créent de petites vagues désordonnées (le clapot). Un vent fort et constant sur une longue période peut aussi influencer la surface de l'eau côtière et induire des courants de compensation (upwelling ou

downwelling) et des courants de dérive. De plus, l'énergie éolienne peut directement déplacer les sédiments sur les zones émergées.

Les courants de marées et les courants géostrophiques influencent également le littoral. Si leur action s'applique au fond (sur l'interface eau-sédiment) à des vitesses suffisantes, ils peuvent entraîner un transport sédimentaire.

Pour certaines côtes, la houle est un forçage primordial, car sa transformation à l'approche du rivage libère une grande quantité d'énergie. Près de la surface de la mer, la houle est une onde qui provoque la rotation des particules d'eau lors de son passage. Vers le fond, ce mouvement devient elliptique, puis se transforme en courant alternatif susceptible de déplacer les sédiments. Simultanément, les frottements et la perte d'énergie de la houle à proximité du continent modifient la forme de l'onde en augmentant la taille et la cambrure des vagues. Les courants alternatifs du fond deviennent alors asymétriques et induisent un flux moyen orienté vers la côte nommé « transport en masse ». Lorsque les vagues qui arrivent près du rivage sont trop cambrées, leur forme devient instable et elles se brisent en libérant une grande quantité d'énergie. La houle commence alors à déferler, dans un phénomène extrêmement complexe qui crée de la turbulence, des mélanges d'air, d'eau et de sable. Un « courant de retour » se met également en place sous le déferlement et compense les apports d'eau du « transport en masse ». De plus, dans le cas de houles qui arrivent obliques à la côte, un courant de « dérive littorale » se forme parallèlement au littoral.

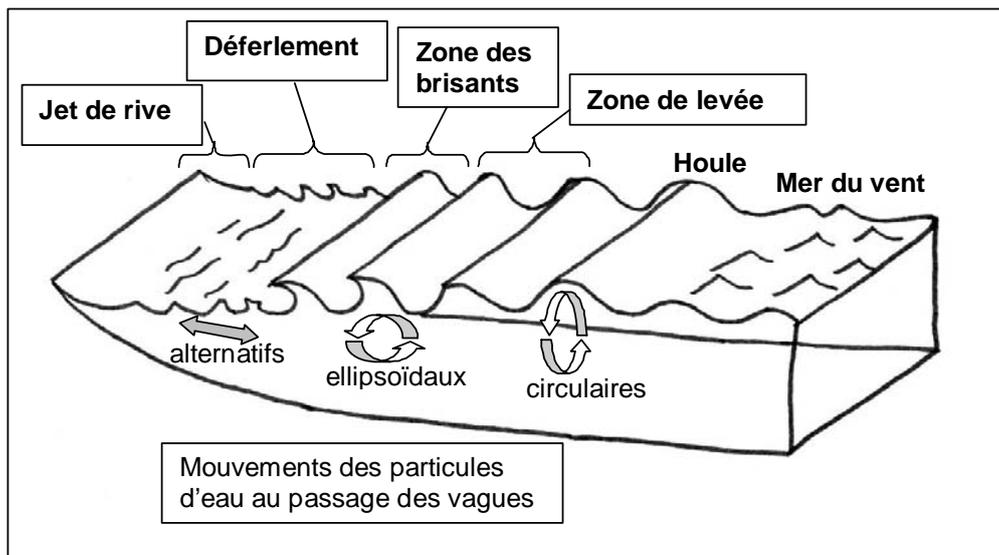


Figure I.5 : Transformation des vagues à l'approche de la côte.

D'après ces observations, les différentes phases d'évolution des vagues permettent de distinguer quatre zones du littoral, qui forment autant de sous-systèmes définis par l'approche océanographique (ou hydrodynamique). Du large vers la côte, on trouve (Figure I.5) :

- La zone de levée. Les vagues sont freinées sur le fond et commencent à être déformées.
- La zone de brisants. Les vagues ne sont plus en équilibre et se cassent
- La zone de déferlement. Les vagues brisées roulent en perdant leur énergie
- La zone de jet de rive. Les vagues ne forment plus qu'une mince lame d'eau qui vient mourir sur le rivage.

Le vent, les courants et la houle sont des forçages majeurs pour le transport sédimentaire du milieu côtier. Cependant, leur action sur le système peut être très fortement influencée par le niveau de l'eau. En fonction de la hauteur de l'océan par rapport au continent, l'action des houles et des autres forçages sera différente sur le prisme sédimentaire et le fonctionnement de l'ensemble du système en sera modifié. Plusieurs processus énergétiques vont influencer le niveau de la mer selon des modalités, des échelles spatiales et temporelles différentes. Ainsi, on peut distinguer l'évolution du niveau général des océans (eustatisme), la marée, la pression atmosphérique et l'action du vent et des vagues.

3) Les échelles d'observation

L'étude des systèmes littoraux et des plages sableuses s'inscrit dans un espace à 3 dimensions. Elle prend également en compte la dimension temporelle nécessaire pour décrire les modifications du milieu. Toute la complexité des analyses sur ces environnements vient de la variété des forçages et de la diversité des éléments emboîtés et reliés les uns aux autres. Sur de tels systèmes, une large gamme d'évolutions se développe à des échelles spatiales et temporelles très vastes. Ainsi, des processus différents vont transformer des structures et des morphologies littorales différentes. Cette variété d'objets, de processus, d'échelles spatiales et temporelles implique l'interaction de plusieurs disciplines scientifiques afin d'étudier l'environnement littoral dans son ensemble.

Ce paragraphe présente certains objets caractéristiques des littoraux, leur échelle de taille et les périodes qui permettent d'observer leur évolution (Figure I.6). Les disciplines associées à l'étude de ces formes côtières seront également indiquées. Mais il faut noter qu'il s'agit avant tout d'une simplification des faits pour permettre une meilleure compréhension et un positionnement clair de cette étude : les valeurs de tailles et de temps sont données à titre indicatif, de même pour les domaines d'application des disciplines scientifiques. En effet, l'ampleur des évolutions d'un littoral dépend avant tout de la puissance des forçages, du temps de réponse des systèmes et des capacités techniques à observer ces modifications.

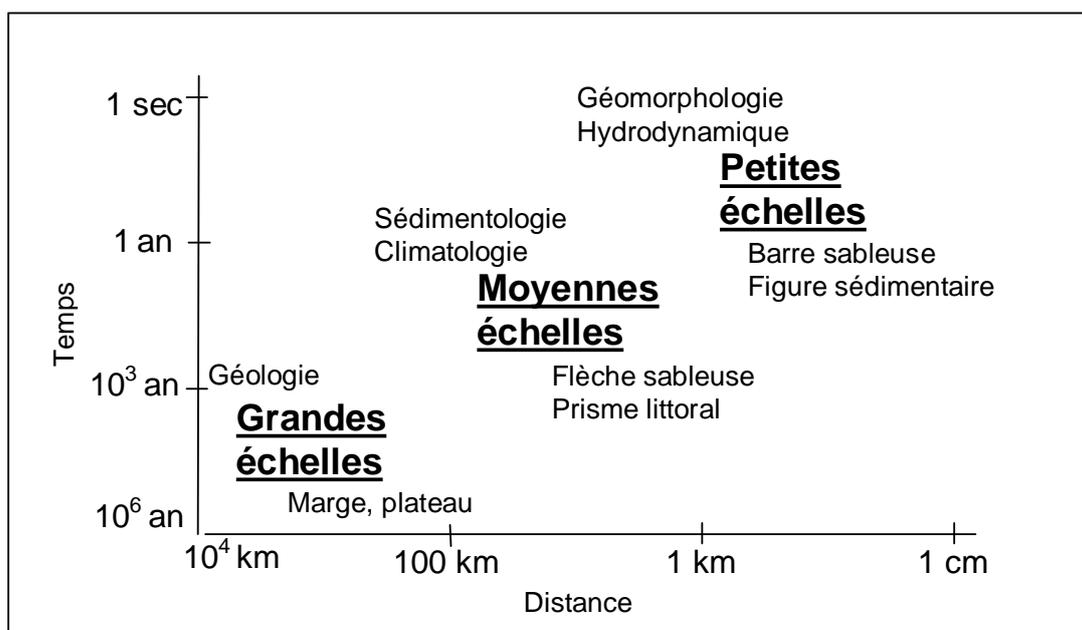


Figure I.6 : Les échelles d'observation d'un système littoral.

Les plus grandes échelles constituent le domaine d'étude de la géologie, science de la Terre et de son histoire. Elles concernent des durées comprises entre plusieurs millions et 1 milliard d'années pour des tailles allant de 10 000 à 100 km. Les éléments qui vont se transformer significativement à ces échelles sont les marges et les plateaux continentaux, par exemple. Les marges forment une frontière entre les plaques tectoniques continentales et océaniques. Elles sont donc bien intégrées dans le système littoral global. La tectonique des plaques est le processus majeur capable de modifier la morphologie de ces objets gigantesques, à l'échelle de la Terre. Les plateaux continentaux sont des zones sous-marines en pente douce qui prolongent le continent vers le large. La tectonique mais surtout l'eustatisme vont influencer la morphologie de ces structures.

Les échelles intermédiaires sont comprises entre 1 millier et 1000 années, pour des tailles allant de 100 à 1 km. Ces échelles entrent dans le cadre d'étude de la sédimentologie. Cette science vise à reconstituer l'évolution des structures littorales en analysant leurs traces dans les accumulations sédimentaires. Les phénomènes étudiés sont variés, comme par exemple la mise en place et l'érosion d'un cordon dunaire, l'évolution d'une flèche sableuse ou d'un prisme littoral. Les processus mis en jeu à ces échelles sont généralement étudiés en climatologie. En effet, les changements climatiques influencent les régimes de vents, de houles et les apports sédimentaires qui transforment les éléments étudiés. Il faut noter également que l'action anthropique commence à influencer très nettement le littoral pour cette gamme d'échelles spatio-temporelles moyennes. Par exemple, la coupure des échanges sédimentaire sur une côte par la construction d'un port peut avoir une incidence, à l'échelle du siècle, sur la morphologie d'une côte de plusieurs dizaines de km.

Les petites échelles d'étude sont comprises entre 1 an et 1 seconde, pour des tailles allant de 1 km à 1 cm. Les objets littoraux à cette échelle englobent les barres sableuses, les mégarides et les rides. La géomorphologie est la science qui étudie et mesure la forme de ces structures. Les processus d'évolution et les forçages sont étudiés en hydrodynamique sédimentaire. Cette discipline consiste tout d'abord à comprendre les phénomènes hydrologiques en jeu dans le milieu littoral, puis elle vise à quantifier le transport sédimentaire induit par ces forçages.

4) Etude d'un système littoral de plage sableuse

Ce travail de recherche sera centré à la limite des petites et moyennes échelles. Il a pour but d'étudier des structures importantes pour la morphologie des plages : les barres sableuses. Les plages à barres sont des systèmes littoraux dont l'observation doit être menée sur l'ensemble de l'immense gamme d'échelles spatiales et temporelles. Mais cette thèse n'a pas pour objectif d'appréhender le fonctionnement complet du système, elle est focalisée sur le prisme sédimentaire qui joue un rôle prépondérant dans ces environnements. Plus précisément, c'est la forme de l'interface entre les sédiments et l'eau (ou l'air) qui est analysée. En effet, les barres sableuses se mettent en place au niveau de cette limite, par l'action des forçages et du transport sédimentaire.

L'équilibre dynamique est une notion centrale dans l'étude des systèmes. Mais lors d'un travail sur les plages sableuses à barres, il faut être très attentif car les équilibres sont souvent difficilement observables. Ainsi, la stabilité morphologique ne signifie pas forcément un équilibre, parce que le système peut avoir un délai de réaction. A l'inverse, un ensemble de barres très variables pourra présenter un bilan équilibré. Afin de surmonter ce problème et connaître l'état d'équilibre d'une plage, il faut pouvoir connaître les flux d'énergie et d'éléments du système. Pour l'étude des barres sableuses, il est nécessaire d'observer le volume de la structure, ainsi que la quantité de sédiments transportés. Mais ces deux paramètres sont très difficiles à mesurer, comme on pourra le constater dans la suite de l'étude. De plus, une observation sur de larges échelles temporelles est nécessaire pour appréhender correctement les processus responsables de la dynamique du littoral. Dans le cadre de l'étude, ces difficultés ne permettent pas de travailler sur l'équilibre dynamique de la plage. L'effort de recherche sera donc axé sur l'amélioration des techniques d'observation des barres sableuses et sur la description morphologique des structures sédimentaires.

B) Les différents types de barres sableuses

1) Position des barres sableuses sur un profil de plage

Les barres sableuses de plages prennent des formes particulières, en interaction avec les processus hydro-sédimentaires. La description dans l'espace de leur morphologie n'est pas forcément évidente car les objets étudiés sont complexes. Donc, avant de travailler sur des évolutions morphologiques en 3 dimensions d'une vaste zone littorale, il semble opportun de simplifier l'espace pour observer plus efficacement les barres sableuses. Deux types de simplifications sont distinguées, d'un côté, elles concernent le nombre de dimensions spatiales prises en compte, et de l'autre, la taille de la zone de plage étudiée.

La première simplification consiste à étudier la plage selon un plan orthonormé. Les axes sont choisis selon 3 directions préférentielles :

- La direction perpendiculaire à la côte, nommée direction « cross-shore » dans la suite de l'étude ;
- La direction parallèle à la côte, elle aussi est désignée par un terme anglo-saxon, il s'agit de la direction « longshore » ;
- La direction verticale qui définit l'amplitude des formes observées.

Les mesures effectuées selon les directions cross-shore et verticale sont communément appelées « profil de plage ». Ces derniers forment bien souvent la base des observations sur les plages.

D'autres simplifications interviennent ensuite, elles établissent des limites géographiques entre des éléments du système. Plusieurs paramètres peuvent être pris en compte, mais les limites hydrodynamiques sont couramment utilisées pour déterminer les frontières théoriques entre compartiments. Les barres sableuses littorales peuvent être présentes dans chacun des sous-systèmes définis. Il faut également noter que les compartiments établis dans cette étude ne correspondent pas forcément aux descriptions généralement données dans la littérature. En revanche, ils sont parfaitement adaptés aux barres sableuses de la zone de travail (Figure I.7).

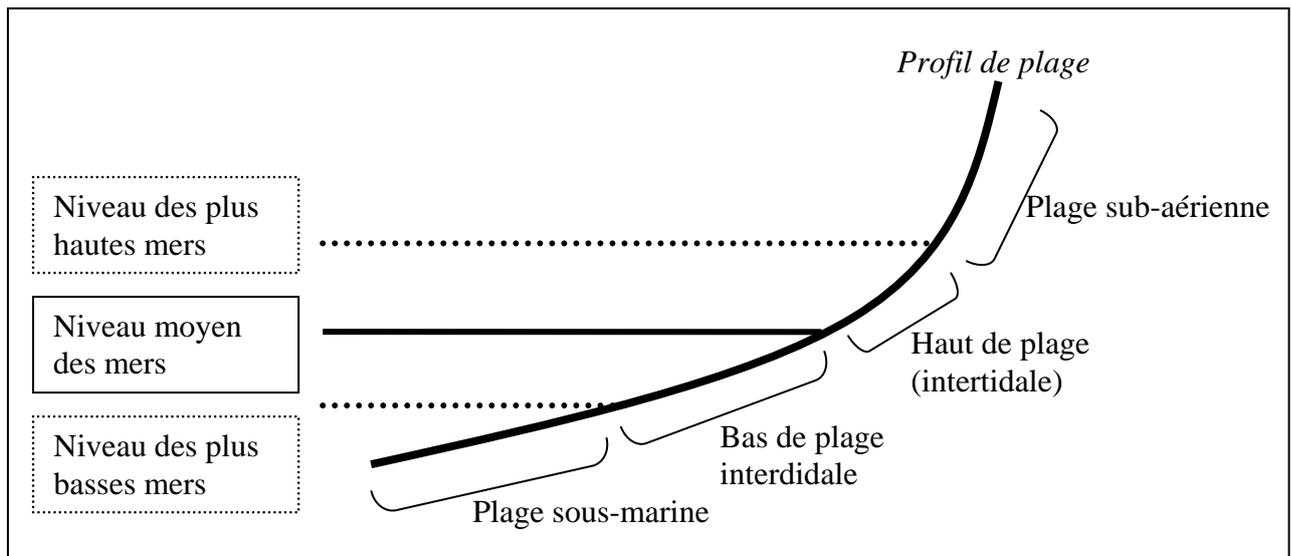


Figure I.7 : Répartition des compartiments d'une plage sur un profil cross shore. Les barres sableuses peuvent être présente dans chacun de ces compartiments.

Les paramètres hydrologiques considérés permettent la description simplifiée du profil de plage. Ils prennent en compte l'action des vagues, les épisodes de tempête et la marée. Du continent vers l'océan, du haut vers le bas de plage, on distingue donc :

- La plage sub-aérienne

Cette zone n'est que très rarement touchée par la mer. Les accumulations sableuses caractéristiques de ce domaine sont avant tout les dunes littorales. Ces structures sédimentaires remarquables peuvent dépasser 20 m et sont souvent colonisées par la végétation. Les autres types de barres sableuses de la plage sub-aérienne sont les dunes embryonnaires, les banquettes sableuses, les barres de tempête.

- Le haut de plage

Dans le cas de plage à marée, le haut de plage est compris depuis le niveau moyen des mers jusqu'au domaine sub-aérien. Les barres sableuses localisées dans cette partie sont les croissants de plage, les bermes, les barres de swash et les barres intertidales.

- Le bas de plage intertidal

Cet environnement se situe entre le niveau moyen des mers et le niveau des plus basses mers. Il est caractérisé par la présence de barres sableuses qui peuvent exister également en haut de plage intertidale. Ces barres s'observent donc assez facilement lors des marées basses, elles sont généralement associées à des dépressions morphologiques nommées sillons littoraux.

- La plage sous-marine

La plage sous-marine se situe sous le niveau des plus basses mers. Sa limite hydrologique au large n'est pas forcément facile à déterminer, car il s'agit de la limite d'action des houles. Les barres sableuses de la zone se nomment barres sous-marines, pré-littorales ou subtidales.

Les barres sableuses littorales peuvent se développer dans chacun des compartiments cross-shore définis, mais leur présence n'est pas systématique et leur nombre varie en fonction de l'environnement étudié et du stade d'évolution de la plage. De plus, les frontières hydrodynamiques ne sont pas réellement fixes, car elles dépendent essentiellement des processus mis en jeu. C'est le cas en particulier pour les limites supérieure et inférieure de la plage : l'action de tempêtes plus violentes peut déplacer la limite d'action des houles au large et vers le haut de plage. Enfin, d'autres paramètres peuvent être utilisés pour établir des frontières entre compartiments. Ainsi, cette étude portera une attention particulière aux limites morphologiques entre compartiments d'une plage à barres.

2) Formes des barres sableuses

L'étude de la forme d'une barre sableuse revient à établir une série de paramètres descriptifs, à partir d'observations de terrain et de représentations.

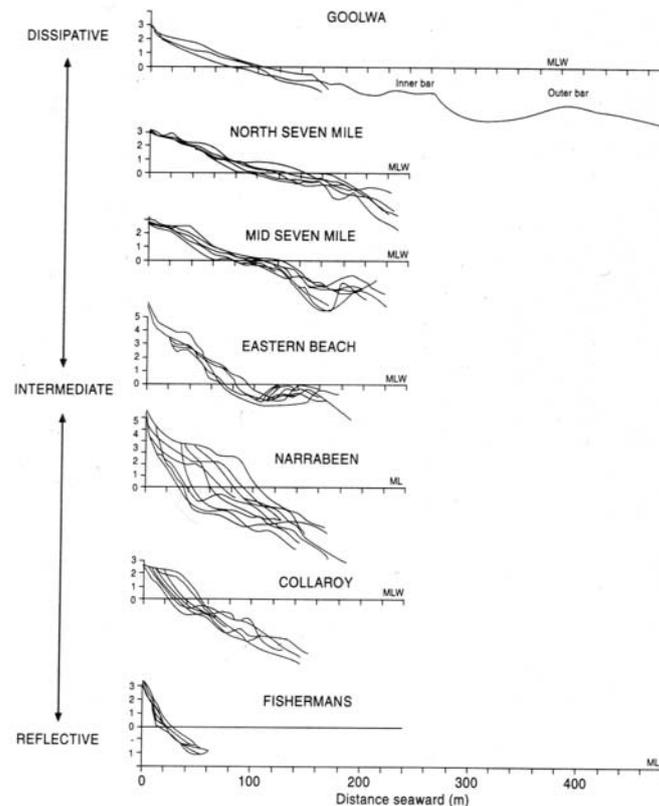


Figure I.8 : Exemples de profils de plage perpendiculaires à la côte (cross-shore). Cette figure présente plusieurs plages à barres, mesurées 3 à 12 fois dans le temps. Les abscisses représentent la distance vers la mer (m) ; les ordonnées, des altitudes (m). L'aspect dissipatif, intermédiaire ou réfléchif est présenté dans le paragraphe 1.A.4 (d'après Short, 1999).

Les descriptions de plage les plus communes concernent les observations en profils morphologiques perpendiculaires à la côte (cross-shore, Figure I.7 et I.8). Généralement, les représentations graphiques dans un repère à 2 dimensions (distance et altitude) sont utilisées pour établir la présence ou l'absence de structure dans les compartiments d'étude. Elles fournissent également des informations qualitatives sur l'évolution et la forme des systèmes dans le temps. Des paramètres quantitatifs peuvent cependant être déduits de l'étude en profils pour préciser la forme de la barre sableuse étudiée. Le calcul de surface du profil permet d'estimer un volume sédimentaire sur une unité de longueur parallèlement à la côte. C'est une bonne méthode pour commenter l'évolution de profils dans le temps et l'importance relative de la barre sableuse sur la plage. Sur ces bases d'informations, on détermine alors l'état érodé

ou engraisé, la migration vers le large ou vers la côte des barres sableuses. D'autres paramètres plus précis peuvent être extraits des données. Ainsi, la position de la crête, l'asymétrie des versants, l'amplitude de la structure sédimentaire sont des informations parfois retrouvées dans la littérature. Leur interprétation est basée sur des analyses statistiques classiques de moyenne et d'écart-type. L'utilisation des statistiques multivariées pour l'étude des profils est un domaine très productif pour la description des profils de plage et l'étude des barres sableuses. Ce point sera abordé en détail dans le 3^{ème} chapitre de cette thèse.

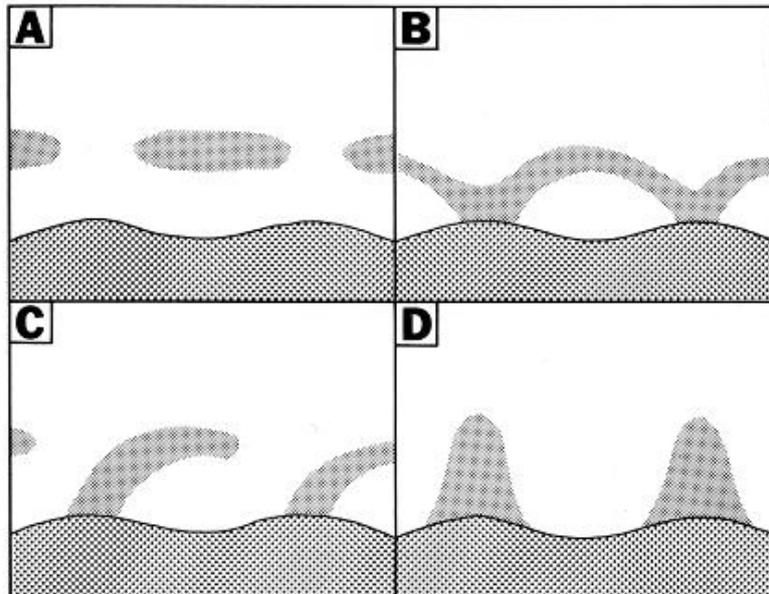


Figure I.9 : Schéma en plan de différents types de barres sableuses littorales.
(a) Barres rectilignes discontinues ; (b) Barres en croissant ; (c) Barres obliques en lune ;
(d) Barres transverses, (d'après Davis, 1985).

Les images aériennes, satellites, vidéo, ou bien les photos obliques de plages sont des moyens très employés pour observer la forme des barres sableuses. Ces méthodes peuvent représenter la plage selon les directions cross-shore et longshore, mais elles ne prennent pas en compte l'altitude ou la profondeur. Les paramètres qui sont déduits de ces observations correspondent à la position des crêtes de barres, à leur orientation, à la régularité et la longueur d'onde des systèmes morphologiques. La visualisation en plan est un moyen de repérer les formes couramment observées sur les côtes sableuses (Figure I.9). Plusieurs catégories sont distinguées :

- Les barres rectilignes, continues ou discontinues.

Elles sont présentes dans tous les compartiments des plages et s'étendent parallèlement à la côte. L'aspect continu ou discontinu dépend de la présence de chenaux qui entrecoupent les systèmes.

- Les barres festonnées ou en croissants.

Au niveau de la plage sous-marine, elles sont caractérisées par une ondulation plus ou moins régulière, ou parfois par la répétition rythmique d'un motif en croissant. En haut de plage, elles prennent la forme de croissants plurimétriques à la pointe orientée vers le large.

- Les barres obliques et transverses

Elles peuvent être droites ou arquées, reliées ou non à la côte. Généralement, elles se répètent de façon régulière dans la direction longshore. Les barres transverses sont perpendiculaires à la côte.

Les méthodes d'observation peuvent être couplées pour établir une description de la forme tridimensionnelle des barres sableuses. Les profils cross-shore donnent des informations sur la profondeur (ou l'altitude) des systèmes, selon un plan vertical. L'analyse de carte permet de décrire la répartition et l'orientation des barres sableuses, sur un plan horizontal. D'autres techniques d'étude en 3D sont possibles, elles prennent en compte simultanément les 2 dimensions horizontales et la dimension verticale. Mais elles sont encore assez peu utilisées pour analyser la forme des barres sableuses littorales.

3) Processus de formation des barres sableuses

D'après Desmazes (2000).

Les barres sableuses sont formées par des processus sédimentaires complexes et généralement différents pour chaque type de structure.

- Le transport éolien

Le transport éolien est le processus qui permet l'accumulation des sédiments dans les dunes littorales, les banquettes sableuses et les dunes embryonnaires. Le vent de mer entraîne les sédiments émergés de la plage vers des zones de dépôt subaérien (Hesp, 1999).

- Le jet de rive (swash)

Le jet de rive permet la formation des barres de swash, des bermes et des barres de tempête. Lorsque les vagues dissipent leur dernière énergie et viennent mourir en haut de plage, elles peuvent déposer des quantités de sédiment non négligeables. Ces dépôts sont parfois construits très rapidement, à l'échelle d'une marée ou d'une tempête, pour former une barre de swash. Sur une échelle de temps plus longue, le développement d'une structure importante est possible. Ainsi, la berme se construit en condition de houles faibles et stables (Komar, 1998).

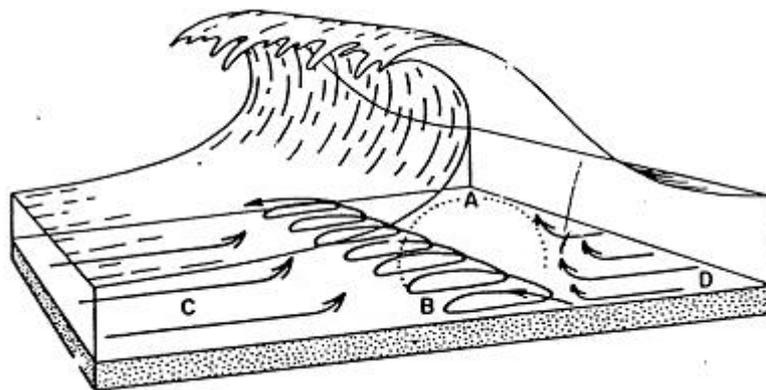


Figure 1.10 : Schéma des courants et du transport sédimentaire induits par une vague déferlante. A) Mise en suspension par la turbulence ; B) Dérive littorale ; C) Courant de retour ; D) Transport en masse.

- Le déferlement des vagues

Le déferlement des vagues intervient de façon presque certaine dans la formation des barres sableuses de la plage intertidale et sous-marine. L'hypothèse du point de déferlement est la

base d'un grand nombre de théories expliquant la mise en place des structures sédimentaires. Le modèle conceptuel de Greenwood et Davidson-Arnott (1979) présente le phénomène de façon synthétique (Figure I.10). Quand une vague arrive sur une côte peu profonde, elle va provoquer un courant de « transport en masse » en direction de la plage (onshore). Ce phénomène augmente avec la remontée des fonds et peut mobiliser, puis transporter des sédiments sableux. Lorsque la vague brise, le transport en masse diminue en intensité, favorisant le dépôt du flanc externe d'une barre sableuse. Ensuite, une grande quantité d'énergie continue à être libérée pendant le déferlement de la vague. La turbulence devient importante et le courant de « dérive littorale » se forme, parallèle à la côte. Ces processus complexes vont alors éroder les sédiments ; ils favorisent ainsi le surcreusement d'une fosse et mettent en relief le flanc interne de la barre sableuse. En application à ces principes, la figure I.11 montre la mise en place de barres multiples sur un profil de plage.

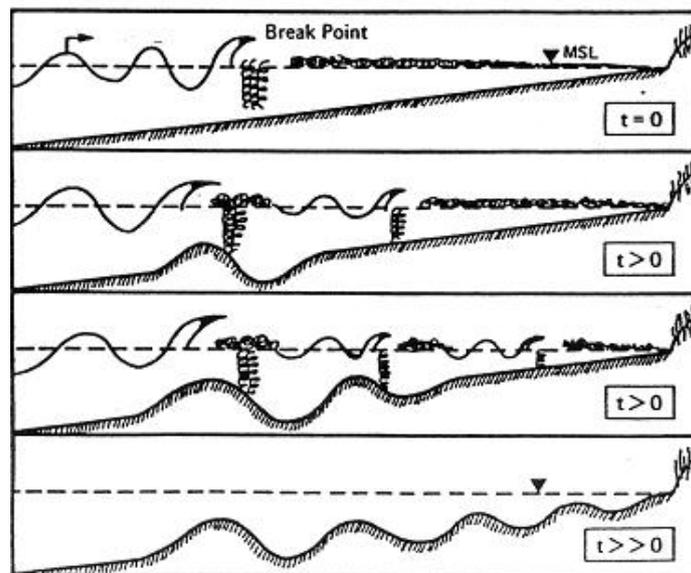


Figure I.11 : Formation d'une plage à barres sous l'effet du déferlement multiple des vagues, d'après Dolan et Dean (1985).

D'autres processus liés au déferlement peuvent également être à l'origine de la construction de formes sédimentaires. Certains auteurs considèrent que le courant de retour a une influence capitale pour le transport des sédiments et la formation des barres sableuses. L'initiation du phénomène est due à la grosse quantité d'eau amenée à la côte après le déferlement des vagues. Une compensation se met alors en place, sous forme d'un courant violent, plus ou moins canalisé. Les flux induits peuvent transporter des sédiments vers le large, ils y déposent alors des quantités importantes de matériel susceptibles de provoquer la mise en place d'une structure.

- Transformation de la houle en milieu peu profond

La transformation des houles en milieu peu profond est un domaine de recherche qui fournit aussi des explications sur l'évolution et la morphologie des barres sableuses. Dans le cas de plages pouvant réfléchir l'énergie des vagues, la création d'ondes stationnaires sur un profil cross-shore peut induire la présence de systèmes rectilignes sous les zones de transport où convergent des ondes (Figure I.12).

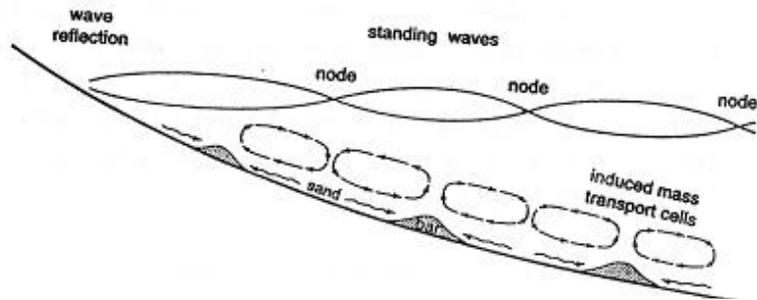


Figure I.12 : Formation de barres sableuses sous une onde stationnaire, d'après Komar (1998).

Ces ondes existent aussi sous forme d'ondes de bord piégées (Figure I.13). Dans le sens longshore, elles sont alors capables de provoquer des déplacements parallèles à la côte. De tels processus ne seront pas détaillés dans ce mémoire, mais ils pourraient expliquer la formation des croissants de plage, au niveau de la berme. De plus, des phénomènes analogues existent pour des ondes de tailles très importantes, nommées ondes infragravitaires. Ces ondulations difficilement décelables sont également issues de la transformation des houles à la côte. Leur présence faciliterait le développement de la rythmicité de certaines barres sableuses obliques ou festonnées (Bowen et Inman, 1971).

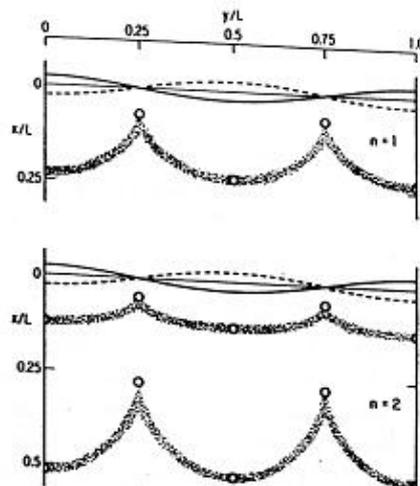


Figure I.13 : Formation de structure en croissant sous l'action d'ondes de bord. D'après Bowen et Inman, (1971).

- Organisation naturelle des structures rythmiques

Enfin, il existe des théories qui prônent la capacité « d'auto-organisation » d'un environnement sédimentaire côtier (Castelle et al., 2004). Ainsi, une irrégularité présente sur une morphologie régulière pourrait créer une convergence d'énergie et favoriser la mise en place de cellules de circulation hydrodynamique. Selon le principe de rétroaction morphodynamique, le transport sédimentaire induit par les cellules peut alors former des barres sableuses rythmiques.

La compréhension des processus hydro-sédimentaires est un vaste domaine de recherche scientifique. Le développement des modélisations numériques et physiques permet des progrès rapides pour préciser les concepts présentés dans ce paragraphe. Mais la vérification des hypothèses par des mesures de terrain reste toujours nécessaire. De la même façon, l'observation naturaliste des barres sableuses nécessite de toujours garder à l'esprit l'importance des processus hydro-sédimentaires dans la mise en place des systèmes morphologiques.

4) Classification morphodynamique des plages à barres

La connaissance approfondie d'une plage passe par la distinction de stades morphologiques associés à des conditions hydrodynamiques. Si un observateur est capable de déterminer différentes morphologies caractéristiques, il a alors la possibilité de décrire des évolutions et de réfléchir sur les processus à l'origine des modifications. Ainsi, la forme d'une plage et de ses barres sableuses peut correspondre à un équilibre stable ou à un stade de transition. Il peut être le résultat d'un niveau d'énergie appliqué à la plage, d'un équilibre dynamique ou bien d'une entrée ou sortie de sable dans le système.

Les études de Wright et Short (1984) font référence dans le domaine de la classification morphodynamique des plages et des barres sableuses. Sur la côte australienne, les auteurs ont pu observer durant plusieurs années un grand nombre de plages. Ces environnements possèdent des morphologies particulières, qui se modifient en fonction des conditions hydrodynamiques distinctes. La synthèse de leurs observations établit une classification basée sur la morphologie des plages, la présence de barres sableuses et l'influence hydrodynamique prépondérante des vagues (Figure I.14). Ce paragraphe a pour objectif de présenter les états morphodynamiques communément admis pour classer les plages. Il permettra de focaliser tout particulièrement sur la terminologie des différentes sortes de barres sableuses, leur position sur le profil de plage et les conditions hydrodynamiques qui favorisent leur présence. Trois classifications sont présentées : la synthèse de Wright et Short (1984) améliorée par Short (1999) sur les plages influencées par la houle, le travail de Masselink et Short (1993) qui prend en compte l'action de la houle et des marées, et enfin la classification de Short et Aagaard (1993) qui décrit des plages présentant plusieurs barres sableuses.

4.1. Plages influencées par la houle (Short, 1999)

- (a) Plage dissipative

Les plages dissipatives ont pour caractéristique de dissiper et d'absorber efficacement l'énergie des vagues. La pente est faible et les vagues déferlent sur une grande distance. Ce type de plage peut être structuré par un système multiple de barres linéaires peu marquées sur lesquelles brisent plusieurs fois les vagues, selon le processus présenté dans la figure I.11.

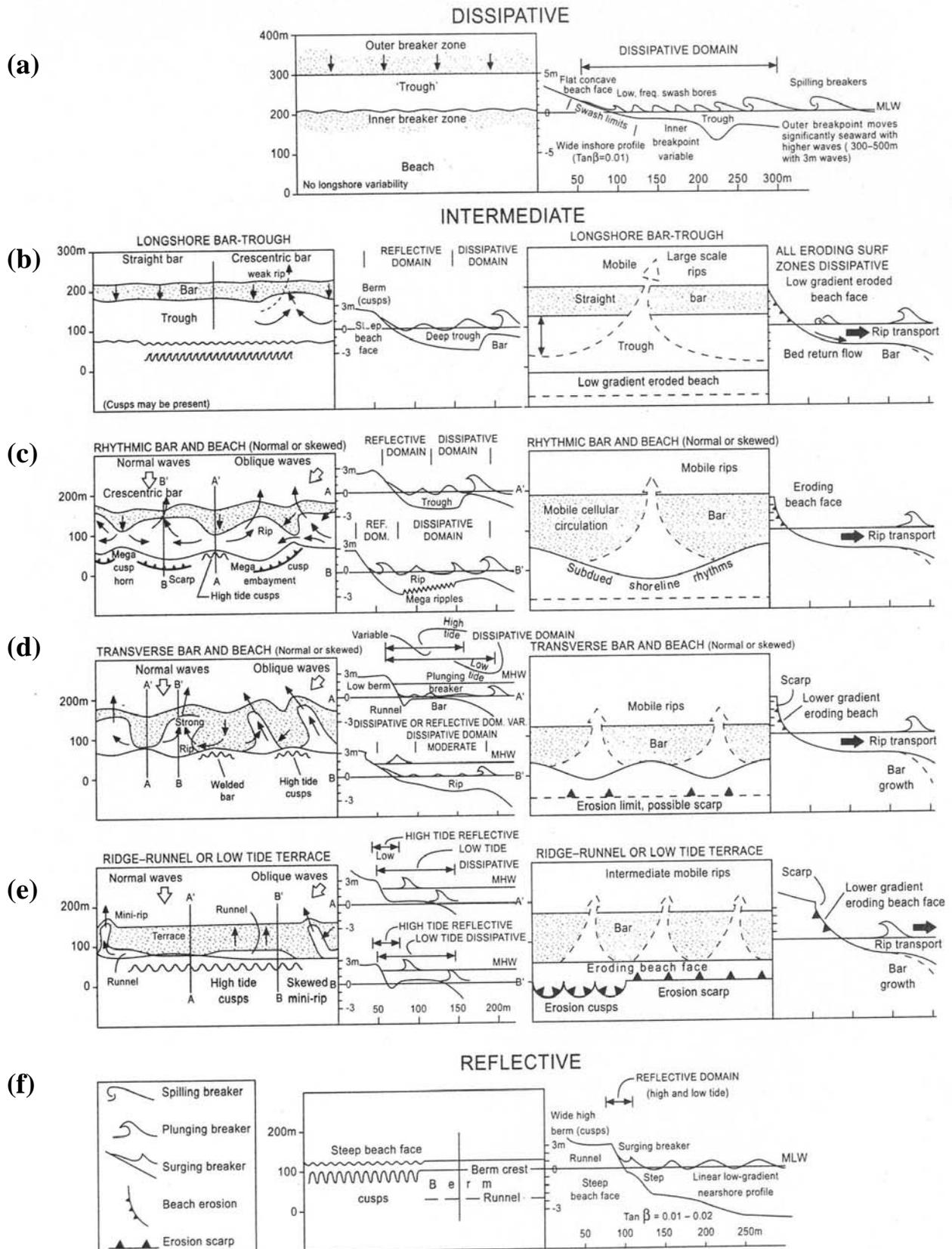


Figure 1.14 : Classification morphodynamique des plages à barres dominées par l'énergie de la houle (d'après Short, 1999). A gauche, les conditions de vagues favorisent l'accrétion du profil de plage ; à droite, la tendance est à l'érosion des structures. Pour chaque tendance et chaque état, un profil de plage cross-shore et une vue en plan sont représentés.

- (b) Plage à barre sous-marine et fosse pré-littorale

L'énergie des vagues se dissipe en déferlant sur une barre sableuse sous-marine linéaire, parfois festonnée. La barre est séparée de la côte par une fosse pré-littorale profonde en pente faible. Le haut de plage devient plus pentu, on peut trouver des croissants de plage sur la berme.

- (c) Plage et barre rythmiques

La plage est composée d'un système de barres sous-marines en croissants et d'une fosse pré-littorale. La pointe des croissants est orientée vers la côte sans être accolée. Mais de grandes ondulations du haut de plage tendent à limiter la taille de la fosse pré-littorale.

- (d) Barres et chenaux obliques ou transverses

Dans ce cas, les barres rythmiques sont soudées à la côte ; elles sont séparées par un chenal qui guide des courants de retour parfois violents. Les structures sédimentaires affleurent à marée basse, tandis que les chenaux restent constamment sous l'eau. La forme du haut de plage montre une alternance rythmique entre les zones à berme au niveau de la liaison des barres obliques et des zones érodées, en pente forte, au niveau des chenaux.

- (e) Terrasse de marée basse ou barre et sillon littoraux

Cet état morphodynamique est caractérisé par une barre sableuse faiblement marquée, presque entièrement accolée au littoral. Elle découvre largement à marée basse, mais reste parfois séparée du haut de plage par un sillon littoral peu profond, parallèle à la côte. L'aspect de cette barre intertidale est globalement linéaire, mais elle peut être entrecoupée de petits chenaux perpendiculaires au trait de côte. Le haut de plage est abrupt et les vagues déferlent dessus à marée haute.

- (f) Plage réfléchive

Les plages réfléchives ont une morphologie bien différente des plages dissipatives. La pente y est très importante. L'énergie des vagues n'est donc pas absorbée, mais réfléchiée par le haut de plage. Cet état n'est pas vraiment favorable à la construction des barres sableuses sous-marines ou intertidales, par contre, la berme est très développée.

4.2. Plages en domaine tidal (Masselink et Short, 1993)

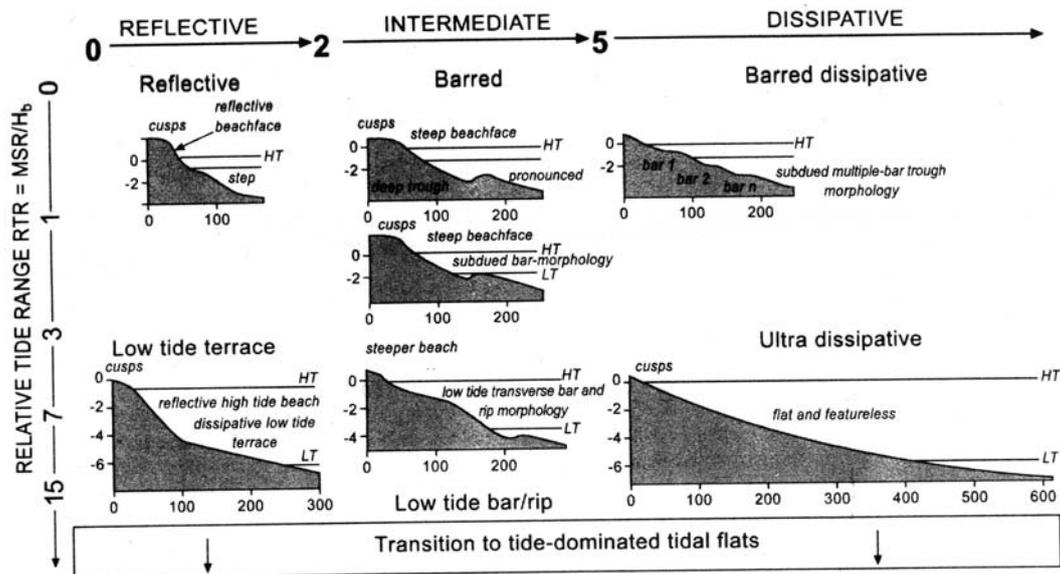


Figure I.15 : Classification morphodynamique des plages influencées par la houle et la marée (d'après Masselink et Short, 1993). Le paramètre RTR quantifie l'importance du marnage en fonction de la hauteur des vagues (marnage relatif). La quantification du caractère réflectif, intermédiaire ou dissipatif est détaillée dans Wright et Short (1984).

Masselink et Short (1993) ont proposé une classification morphodynamique des plages qui prend en compte le marnage et la houle de la zone d'étude (Figure I.15). Ils distinguent trois types de conditions morphodynamiques : réflective, intermédiaire et dissipative.

- Pour un marnage relatif faible (marnage relatif de 0 à 1) :

La morphologie réflective est caractérisée par une pente forte, des croissants en haut de plage et éventuellement une barre à peine marquée sous le niveau de basse mer.

La morphologie intermédiaire montre une pente moins forte en bas de plage, des croissants sur la berme et une barre sous-marine très nette.

La morphologie dissipative est définie par un système de barres multiples peu marquées, qui structurent la plage intertidale et sous-marine.

- Pour un marnage relatif moyen (marnage relatif de 1 à 3), la morphologie intermédiaire présente une barre sableuse sous-marine moins prononcée, qui affleure à marée basse.
- Pour un marnage relatif fort (marnage relatif de 3 à 15), la largeur de la plage devient souvent très importante. La morphologie s'en trouve affectée :

Les plages réfléchives ont une forme contrastée. Après une berme et des croissants, le haut de plage intertidal est pentu tandis que le bas de plage en pente douce forme la terrasse de marée basse. Une rupture de pente sépare distinctement ces deux parties.

La morphologie intermédiaire est caractérisée par une forme originale dénommée « plage à barre de marée basse et chenaux ». Le haut de plage intertidale est structuré par une barre plus ou moins bien formée. Des études complémentaires sur le temps d'action des processus de transformation des vagues montrent qu'à cet endroit, la barre sableuse est probablement formée par le jet de rive (Masselink et Hegge, 1995, Figure I.16). Plus bas, au niveau de la plage sous-marine, on trouve la barre sableuse de marée basse qui évolue sous l'action du déferlement des vagues lorsque la mer est descendue.

Enfin, les plages à fort marnage présentent une morphologie ultra-dissipative lorsque la largeur du domaine intertidale dépasse 400 m et que l'on ne trouve aucune structure, excepté quelques croissants de plage.

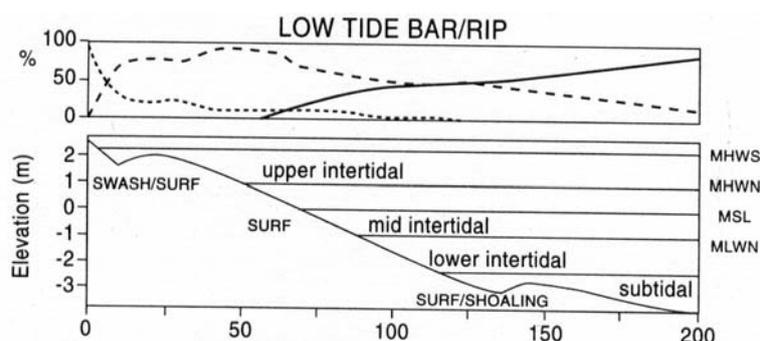


Figure I.16 : Temps d'action des différents processus liés à la transformation des vagues sur une plage de type « barre de marée basse et chenaux ». En haut, le graphique représente le temps en % durant un demi cycle morte-eaux / vives-eaux en fonction de la position cross-shore en mètre. Le trait plein correspond à l'action de la zone de levée, les pointillés à l'action du déferlement et les pointillés fins au jet de rive. En bas, le profil de plage est représenté ainsi que le niveau de la marée. D'après Masselink et Hegge (1995).

4.3. Plages à barres multiples (Short et Aagaard, 1993)

Sur le même modèle, Short et Aagaard (1993) ont établi la classification de plages à barres multiples (Figure I.17). Cette organisation concerne surtout les plages micro-tidales, mais elle donne de bonnes indications sur l'organisation des systèmes multi-barres. La classification distingue la présence de 1, 2 ou 3 barres sableuses et les 6 états de plage décrit précédemment (dissipatif, barre et fosse pré-littorales, barre et plage rythmiques, barres obliques, terrasse de marée basse, réfléchif).

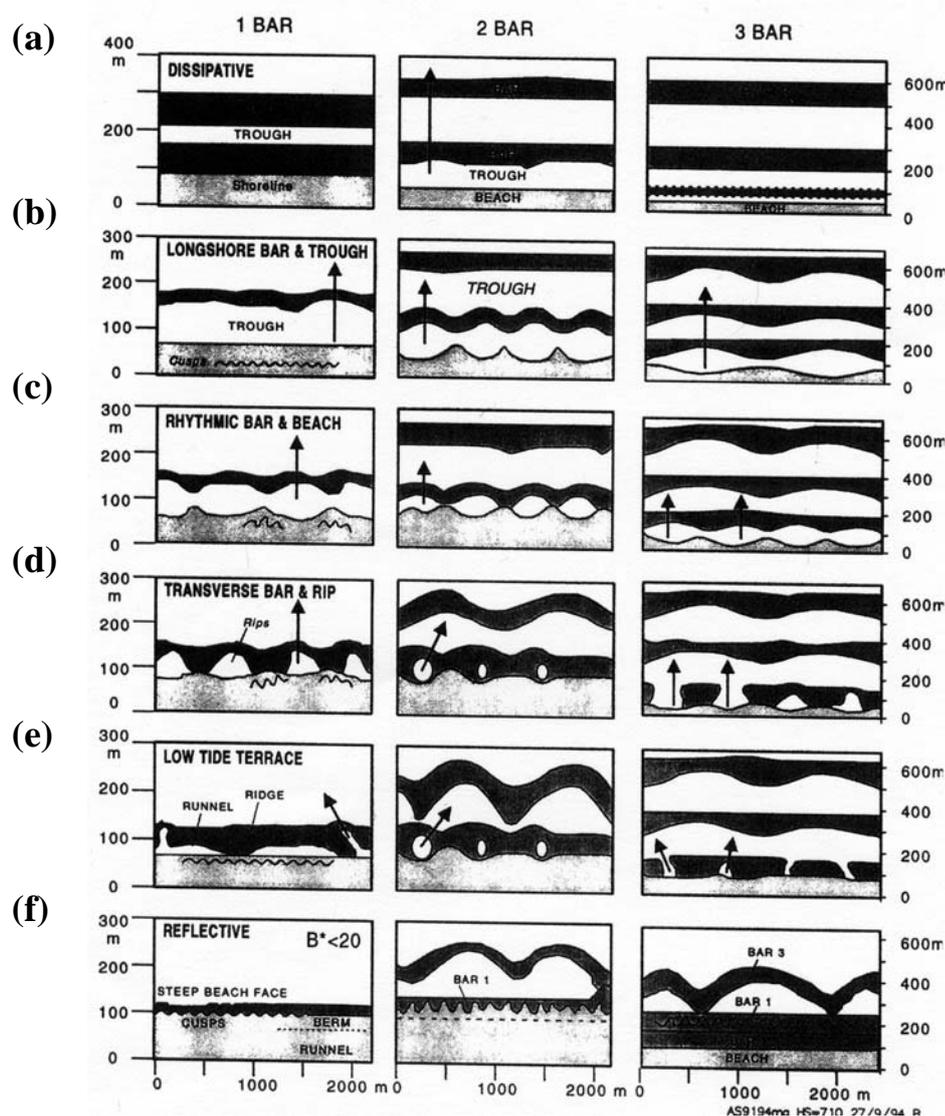


Figure 1.17 : Classification morphodynamique des plages à barres simple et multiples (d'après Short et Aagaard, 1993). Vue en plan. Signification de certains termes morphologiques : through = fosse ; runnel = sillon.

- Cas d'une plage à 2 barres sableuses.

La barre externe reste linéaire entre les états dissipatifs (a), barre et fosse pré-littorale (b) et barre et plage rythmiques (c). Elle devient festonnée pour les stades de barre oblique (d) et terrasse de marée basse (e). La barre externe aura tendance à s'accoler ponctuellement à la côte dans le cas d'une plage réfléchive (f).

La barre interne est linéaire au stade dissipatif (a), puis devient festonnée au stade barre et fosse pré-littorales (b) alors que le haut de plage est également franchement rythmique. A l'état de plage rythmique (c), la barre interne en croissant est accolée par les cornes au haut de plage. Pour les stades barres obliques (d) et terrasse de marée basse (e), la barre interne est soudée à la côte, entrecoupée parfois de petits chenaux. Au stade réfléchif (f), la barre interne est entièrement reliée au haut de plage, seule la barre externe reste bien marquée.

- Cas d'une plage à 3 barres sableuses.

La barre intermédiaire et la barre externe ont à peu près la même forme. Elles sont linéaires au stade dissipatif (a) et festonnées pour les autres stades, exception faite de l'état réfléchif. Dans le cas d'une plage réfléchive (f), les barres internes et intermédiaires sont complètement accolées au haut de plage ; la barre externe présente une forme de croissant relié à la côte par les cornes.

Dans cette classification, la barre interne a une forme plus variable. Elle est marquée de petites structures rythmiques pour le stade dissipatif (a). Puis, elle devient festonnée au stade barre et fosse pré-littorales (b). Au stade barre et plage rythmique (c), la longueur d'onde des ondulations diminue pour suivre la forme du haut de plage. Ensuite, des barres obliques (d) accolées au haut de plage se forment, séparées par des chenaux de vidange. Au stade terrasse de marée basse (e), la barre interne est soudée à la côte, entrecoupée parfois de petits chenaux.

Cette classification constitue une synthèse acceptable pour décrire l'état morphodynamique d'une plage à barres, mais il s'agit avant tout d'une piste de travail et de comparaison. Une autre approche est utilisée avec succès dans l'article de Short et Aagaard (1993), elle consiste à décrire la forme de chaque barre sableuse prise indépendamment.

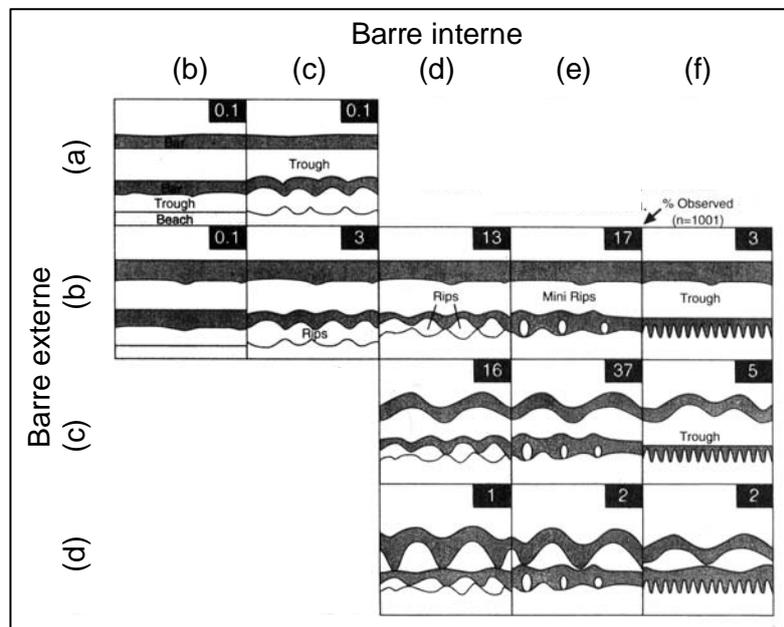


Figure 1.18 : Représentation des différentes combinaisons de barres sableuses observées sur les plages de Nouvelles Galles du Sud (Australie) (d'après Short et Aagaard, 1993). Les chiffres encadrés en noir représentent les pourcentages d'observations. Correspondance des états morphodynamiques : (a) dissipatif, (b) barre et fosse pré-littorales, (c) barre et plage rythmiques, (d) barres obliques, (e) terrasse de marée basse, (f) réfléchif.

Il en résulte une classification beaucoup plus complexe, mais aussi plus proche de la réalité morphodynamique qui voit les barres sableuses évoluer de façon plus ou moins indépendante, en fonction des conditions hydrologiques. La figure I.18 présente cette approche particulièrement intéressante. Elle montre les résultats de l'observation des plages de Nouvelles Galles du Sud (Australie). La forme de la barre externe est comprise entre un état dissipatif (barre linéaire) et le stade « barres obliques et chenaux » (barres en croissant accolées). La barre interne est plus variable évoluant du stade « barre et fosse pré-littorales » à l'état réfléchif. L'organisation générale de la figure suggère la modification de la plage dans le temps, au cours d'évènements hydrodynamiques qui peuvent affecter différemment les deux barres sableuses. Ce type de représentation synthétique semble un bon moyen pour décrire les morphologies observées, détailler les évolutions possibles et comprendre les causes de changements.

En conclusion, la classification morphodynamique permet de simplifier la description des plages en fonction de 6 stades bien différenciés (dissipatif, barre et fosse pré-littorales, barre et plage rythmiques, barres et chenaux obliques, terrasse de marée basse, réfléchif). Il apparaît que le travail de Short (1999, Figure I.14) est le plus précis car il utilise des représentations morphologiques en cartes et en profils. Cette classification doit inspirer la suite des recherches sur les plages d'aquitaine, influencées par une forte houle et un marnage méso-tidal. L'organisation des états de plage en fonction des tendances réfléchives ou dissipatives est particulièrement utile pour associer la morphologie aux processus qui agissent sur l'environnement. Toutefois, il faut noter que ce paragraphe s'est plus particulièrement focalisé sur la description morphologique des systèmes afin de bien introduire la suite des recherches. Pour plus de précision sur l'aspect hydrodynamique des classifications présentées, nous conseillons au lecteur l'ouvrage de Short (1999) qui a servi de base à ce travail de synthèse.

Cette partie de généralités sur les barres sableuses avait pour but d'introduire les notions nécessaires à l'étude de ces structures sur les plages. Les différents types de barres sableuses ont été décrits sur des représentations de plage en profils ou cartes. Certaines hypothèses de formation ont été présentées ainsi que différentes classifications morphodynamiques. La suite de ce premier chapitre a pour but de présenter les connaissances actuelles sur le système littoral Aquitain.

C) Présentation de la zone d'étude

1) Situation géographique

Le littoral aquitain est une côte basse sableuse qui s'étend sur plus de 200 Km, au Sud-ouest de la France, entre les estuaires de la Gironde et de l'Adour. Ce rivage rectiligne est orienté selon une direction moyenne N 10°, face à l'océan Atlantique. Les Passes du Bassin d'Arcachon séparent une partie sud landaise d'une zone nord girondine. Dans la partie sud, le plateau continental, qui relie le rivage aux abysses, est étroit et de petites embouchures sont présentes. La partie nord est caractérisée par l'absence d'embouchure et un plateau continental plus large.

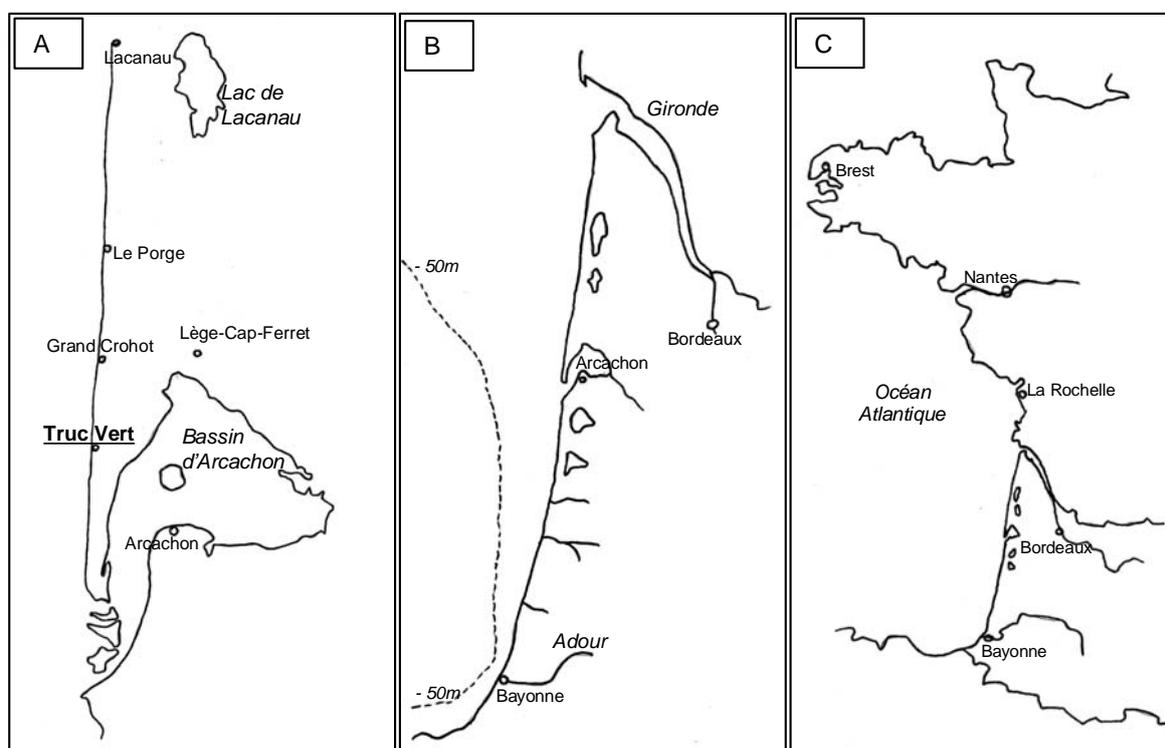


Figure I.19 : Localisation de la zone d'étude. (A) Une partie de la côte girondine (60 Km), des Passes du Bassin d'Arcachon à Lacanau. (B) La côte aquitaine entre la Gironde et l'estuaire de l'Adour (240 Km). (C) Côtes Ouest de la France. Le haut des cartes est orienté vers le Nord.

La zone d'étude se situe dans la partie girondine, entre la plage du Truc Vert et celle du Grand Crohot (Figure I.19). Cette plage se trouve au nord de la flèche sableuse du Cap Ferret qui délimite la lagune d'Arcachon. C'est une zone difficilement accessible, elle n'est donc pas directement influencée par l'action anthropique. Le lieu-dit exact est « plage du Crohot

Noir », mais nous nommerons le site « plage du Truc Vert » pour plus de commodités. Sa position géographique est 44°44'35"N et 1°14'35"O en coordonnées WGS 84 et 316615 Est et 277624 Nord dans la projection Lambert 3 Sud. Il est délicat d'établir des limites géographiques strictes pour la zone d'étude car elles dépendent à la fois des techniques d'observation, de paramètres hydrologiques, sédimentologiques et morphologiques. Pour l'instant, il convient donc de rester souple dans la définition des frontières de la zone d'étude car cet aspect sera discuté dans la suite de l'étude.

2) Les constituants du littoral

2.1. Le substratum géologique

La plage du Truc Vert est intégrée dans un vaste ensemble géologique que l'on nomme le Bassin Aquitain (Figure I.20). Ce domaine en dépression relative est un lieu de stockage préférentiel des roches sédimentaires depuis des millions d'années (Bellec, 2003). Pendant l'ère Secondaire (245 à 65 millions d'années), calcaires, évaporites, flyschs, etc. s'accumulent dans le Bassin Aquitain. Sa structure est nettement différenciée entre la zone nord plutôt stable et le sud, constitué du bassin de Parentis en subsidence importante. A cette échelle de temps et d'espace, la forme du bassin sédimentaire et la nature du matériel accumulé sont expliquées en grande partie par les mouvements des plaques tectoniques, l'érosion des montagnes (Massif Central) et l'ouverture du Golfe de Gascogne. A l'ère Tertiaire (65 à 1,65 millions d'années), la jeune chaîne Pyrénéenne s'érode rapidement et participe activement au comblement du Bassin Aquitain. Des mers peu profondes se forment également en fonction du niveau de l'océan mondial et du jeu tectonique. Au Miocène (23,5 à 5,3 millions d'années), cette sédimentation marine est bien connue dans la région grâce à des affleurements d'une grande qualité qui ont permis de décrire les stratotypes du Burdigalien et de l'Aquitainien.

2.2. Le prisme sédimentaire

Au-dessus du substratum rocheux se trouvent des couches de sédiments non consolidés. Ces sédiments se sont déposés depuis le Pliocène (5,3 millions d'années) jusqu'à nos jours. La

couche atteint une centaine de mètres au niveau du littoral, d'après les informations des forages pétroliers (Figure I.21).

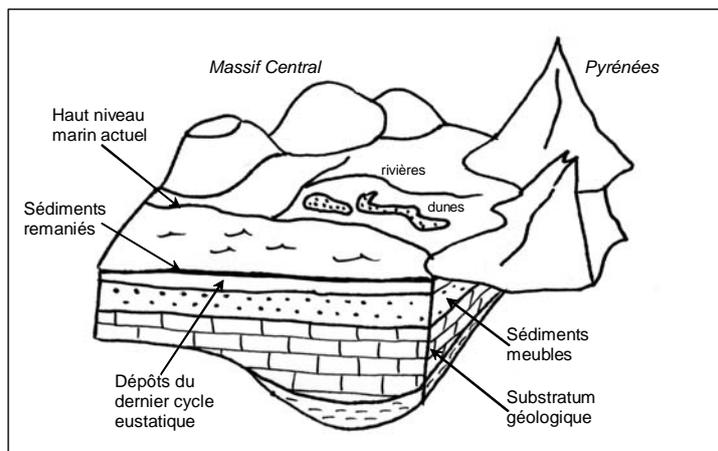


Figure I.20 : Schéma du Bassin Aquitain.

Elle s'est déposée en faisceaux, au rythme des variations eustatiques. Les sédiments qui la composent sont d'origine alluviale, marine et éolienne. Sur le plateau continental, dans la partie immergée du Bassin Aquitain, on y distingue un niveau de 20 m d'épaisseur environ qui correspond à l'enregistrement du dernier grand cycle glacio-eustatique qui a débutée voici 45 000 ans environ. Au-dessus se trouve une pellicule de sédiments remaniés par les processus hydrologiques du haut niveau marin actuel (Figure I.20). La partie continentale, pour sa part, est recouverte d'une couche de sables éoliens issus d'un contexte périglaciaire (le Sable des Landes), qui forme actuellement des dunes et des épandages dans toute la région. Ces informations indiquent qu'il existe une très grande quantité de sédiments dans le système littoral. Mais ces volumes colossaux n'interviennent pas dans le façonnement de la plage (à l'interface de l'eau et de l'air avec les sédiments) à des échelles de temps inférieures à 10 000 ans environ, car les processus hydro-sédimentaires qui agissent sur ces durées ne sont pas assez puissants.

a) Epaisseur de remaniement du prisme sédimentaire

Afin de mieux cerner le fonctionnement actuel du système, il est important de connaître l'épaisseur de sédiments remaniés par les processus contemporains. Dans ce contexte, le terme « actuel » définit la période de haut niveau marin établie depuis 4000 ans. Cette analyse sédimentologique se positionne donc dans la gamme des échelles d'étude intermédiaires (voir partie I.A.3). La courbe établie par Cirac et al. (2000), à partir de datations effectuées dans des carottes prélevées sur le plateau continental, montre que la profondeur remaniée est : supérieure à 2 m à -25 m, de 1,2 m à -30 m, de l'ordre de 40 cm à -50 m et presque nulle à -90

m (Figure I.22). Par manque de mesures, cette courbe n'est malheureusement pas valable dans des zones plus proches du rivage, mais certaines observations (Weber (1978), Arbouille (1987), Michel (1997), Desmazes (2001)) laissent imaginer une profondeur de remaniement très importante, à de petites échelles temporelles.

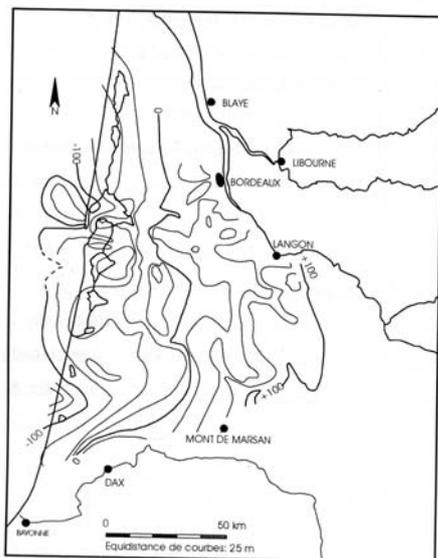


Figure I.21 : Ligne de niveau de la base du Plio-Quaternaire dans la région Aquitaine (d'après Bellec, 2003).

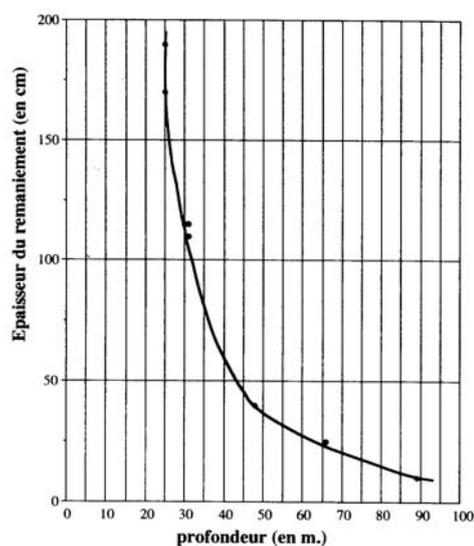


Figure I.22 : Profondeur de remaniement des sédiments sableux du plateau aquitain (d'après Cirac et al., 2000).

L'étude des enregistrements sédimentaires de la plateforme aquitaine, synthétisés par Cirac et al. (2000) nous révèle également la nature des processus à l'origine des dépôts récents entre 25 m et 90 m de profondeur. Ainsi, pour chacune des carottes observées, les séquences sédimentaires correspondent à des tempestites, déposées par l'action d'un violent courant induit par les tempêtes. Ce courant est provoqué par un brusque retour d'eau accumulée à la côte pendant l'évènement météorologique. Il s'agit donc d'un phénomène hydro-sédimentaire littoral qui agit sur le plateau continental jusqu'à des profondeurs importantes.

Ces observations sont primordiales pour l'étude du prisme sédimentaire. Elles montrent qu'à des échelles de temps inférieures à 4000 ans (entre 1000 et 100 ans), certains processus côtiers peuvent agir très loin du rivage, sur la plateforme continentale. Ces observations étendent considérablement le domaine littoral, dans le cas d'une frontière au large définie par la limite d'action des processus hydrologiques côtiers. En fait, la limite extérieure du littoral aquitain dépend essentiellement de l'échelle de temps considérée : plus les périodes sont longues, plus la frontière hydrologique de la zone est profonde et éloignée du rivage, comme l'ont déjà expliqués Cowell et al. (1999) dans une synthèse sur les plages sous-marines.

b) Sédimentation superficielle de la plage sous-marine du Truc Vert

Une séquence de tempête a également été observée dans un vibrocarottage de 2,8 m, prélevé à 10 m de profondeur sur la plage du Truc Vert, lors de la mission Itsas 4 de juin 2000 (Desmazes et al., 2002). La figure I.23 présente ce dépôt sédimentaire métrique, granodécroissant, dont la base est composée de graviers.

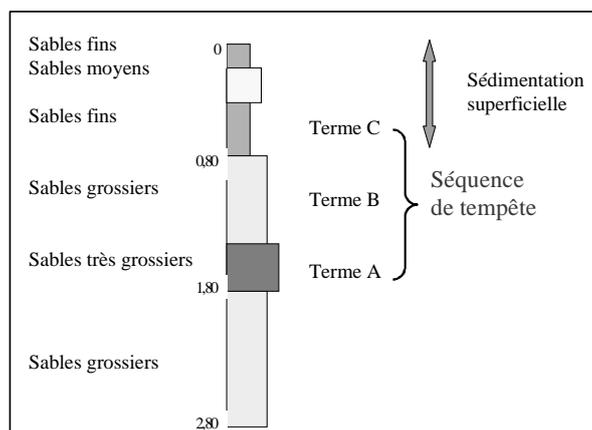


Figure I.23 : Log synthétique de la carotte VKO6 présentant une séquence de tempête.
D'après Desmazes et al. (2002)

Il faut aussi remarquer que la partie supérieure de la carotte ne semble pas structurée par une tempestite. En effet, elle montre des dépôts de sables fins à très fins gris et de sables moyens beiges plus ou moins mélangés. Ces dépôts qui alternent sur une trentaine de centimètres ont également été observés dans une série de petits carottages effectués sur la plage sous-marine du Truc Vert au cours de la mission Prislit 2000 (Desmazes et al., 2001). Les résultats de cette étude ont montré une très grande hétérogénéité des sédiments dans les premiers centimètres du prisme sédimentaire. La composition granulométrique de cette interface particulière a été observée au cours de la mission PHES 99 (Figure I.24). Les prélèvements par bennes Shipeck ont prouvé la forte variabilité spatiale et temporelle des sédiments situés entre -10 et -20 m de profondeur (Desmazes et Michel, 2002).

Pour expliquer une telle hétérogénéité, il faut tout d'abord comprendre l'origine des deux pôles sédimentaires observés sur le fond marin. D'un côté, on trouve les sables moyens beiges qui proviennent du stock de sables des Landes, remanié par le dernier cycle eustatique. De l'autre, se situent les sables fins gris côtiers, dont l'origine est très certainement liée au fonctionnement de l'estuaire de la Gironde. Le mélange observé de ces deux stocks nécessite probablement de fréquents mouvements qui viennent brasser l'interface eau-sédiment à des échelles allant de la journée à l'année. Mais avant de confirmer cette hypothèse, il est

nécessaire de mieux connaître les forçages qui agissent sur cette interface au niveau de la plage sous-marine. Ce point particulier sera abordé dans la prochaine partie du chapitre.

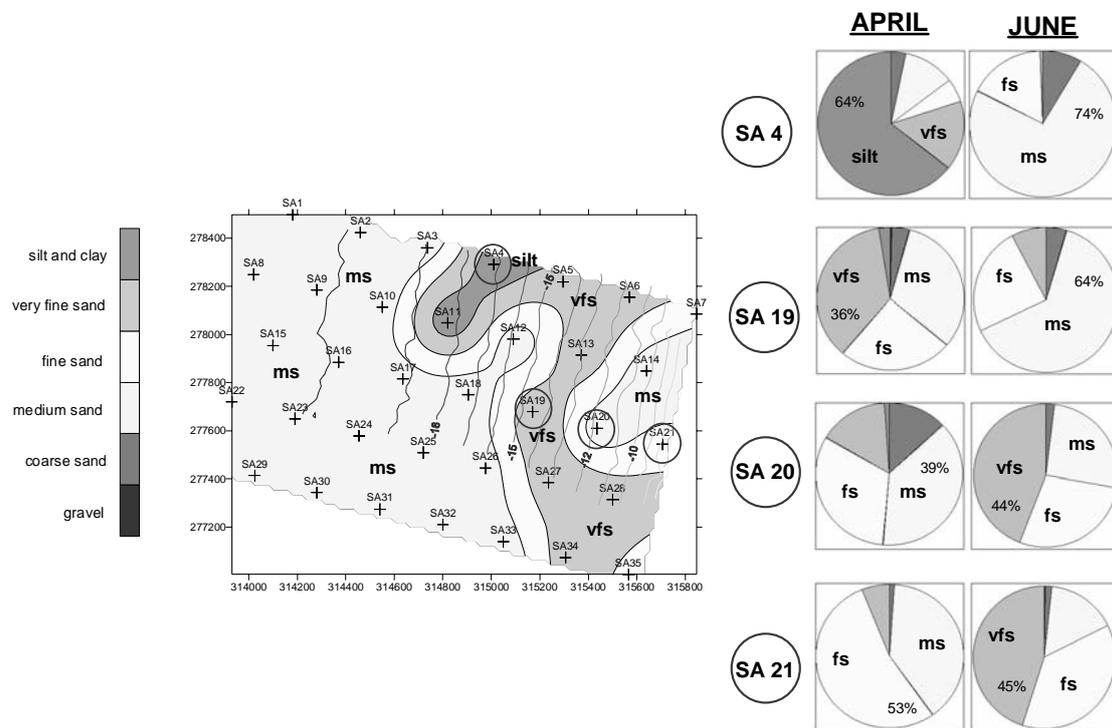


Figure 1.24 : Sédimentation superficielle de la plage sous-marine inférieure du Truc Vert en avril 1999. L'évolution de granulométrie entre avril et juin est présentée pour 4 échantillons répartis entre -8 et -17 m de profondeur. ms = sables moyens ; fs = sables fins ; vfs = sables très fins. D'après Desmazes et Michel (2002).

c) Granulométrie de la plage intertidale et du haut de plage

Plus haut sur la plage, la nature sédimentologique du sommet du prisme sédimentaire est mal connue car les observations sont assez rares. Weber (1978) a pourtant effectué un suivi régulier de la granulométrie de la plage, depuis la dune, jusqu'à une profondeur de 14 m. Mais ces travaux de thèse se situaient sur la plage de la Salie, dans un environnement d'embouchure lagunaire perturbé par la présence d'un wharf. Il en ressort toutefois que l'ensemble du profil étudié est constitué de sables moyens. Néanmoins, en haut de plage, les sédiments provenant de la dune littorale sont plus fins que sur les zones profondes et dans les dépressions morphologiques. Récemment, des prélèvements de sédiments ont aussi été effectués sur la plage intertidale du Truc Vert. Ces tests doivent être prolongés pour donner des résultats significatifs. Il apparaît cependant qu'à quelques différences près, les caractéristiques granulométriques des deux plages sont proches.

L'exemple du 20 février 2004 illustre bien la sédimentologie à la surface du haut de plage et de l'estran de la plage du Truc Vert (Figure I.25).

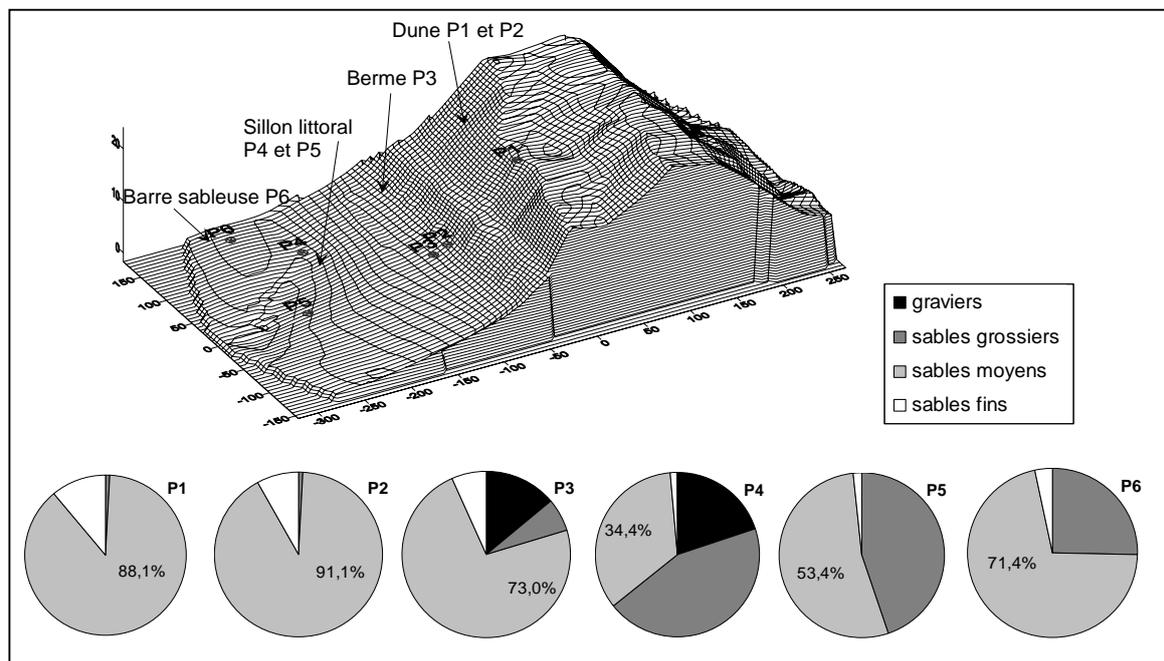


Figure I.25 : Caractéristiques morpho-sédimentaires de la plage du Truc Vert. Exemple du 20 février 2004. Granulométrie par tamisage sur des échantillons de surface et topographie GPS. Les sables moyens dominent, mais la sédimentation est très variée.

- Sur la dune (P1 et P2), comme à la Salie, les sédiments sont des sables moyens très bien classés par les processus éoliens.
- Au niveau de la berme (barre sableuse de haut de plage, P3).

L'action d'une vague plus puissante a créée une laisse de haute mer constituée de sables grossiers. Plus précisément, il s'agit d'un mélange de sables moyens et de coquilles entières pluri-centimétriques. Cette observation indique que la sédimentation à la surface de la plage évolue très rapidement, à des échelles de temps parfois inférieures à un cycle de marée.

- Plus bas, sur l'estran, deux échantillons (P4 et P5) composés de sables moyens et grossiers ont été prélevés dans un sillon littoral (baïne).

Le prélèvement le plus grossier est aussi constitué de graviers, mais aucune coquille entière n'a été observée. La granulométrie des sédiments du sillon littoral est la preuve d'une forte dynamique, capable de briser des coquilles et de transporter des graviers et du sable grossier. Il est possible aussi que les conditions hydrologiques de la baie soient favorables à un important tri sédimentaire, ce qui pourrait expliquer la différence de composition entre les deux échantillons prélevés à des positions différentes.

- Au niveau de la barre sableuse (P6), le sable moyen domine, il est plus grossier et beaucoup moins bien classé qu'en haut de plage (P2).

Les processus hydrodynamiques y sont probablement très forts, mais ils n'ont cependant pas les mêmes caractéristiques que dans le sillon littoral.

Ces mesures montrent que la sédimentation de la plage intertidale du Truc Vert est très variable dans l'espace et certainement dans le temps. Elle est malgré tout dominée de façon constante par le stock de sables moyens beiges. Il faut remarquer aussi l'absence du pôle de « sables fins gris » repéré plus bas sur la plage sous-marine. Ces sédiments relativement fins sont vraisemblablement facilement transportés vers le large par les puissants phénomènes hydrologiques de l'estran. Pour expliquer plus précisément la sédimentation observée sur la plage, il semble nécessaire de prendre en compte des aspects traités dans les deux prochaines parties de ce chapitre : les processus hydro-sédimentaires et leur durée d'action sur la plage, ainsi que la morphologie de l'environnement et la taille des structures.

3) Les forçages et les flux sédimentaires de la côte aquitaine

La partie de description des constituants du littoral aquitain a permis de faire un bilan des connaissances actuelles du substratum géologique et du prisme sédimentaire littoral. L'impact de la biosphère n'a pas été abordé car elle n'entre pas dans le cadre de cette étude. En revanche, l'océan et l'atmosphère sont des constituants majeurs de l'environnement littoral aquitain, car ils apportent l'énergie du système et provoquent le mouvement des sédiments côtiers. Leur rôle est étudié dans ce paragraphe qui traite des forçages et des flux sédimentaires sur la côte. Le travail sur les flux de sédiments est un moyen important pour relier les apports d'énergie à l'évolution de la morphologie de la plage et de l'interface du prisme sédimentaire. Cette description distingue le transport éolien, l'impact des vagues et des courants induits et l'effet du niveau de la mer.

Comme pour l'étude globale du système littoral, le travail sur les forçages et les flux sédimentaires s'organise en 2 pôles complémentaires qui distinguent l'observation des phénomènes d'un côté, et la compréhension des processus de l'autre. Ces deux approches ont pour objectif d'analyser et de modéliser l'action des forçages sur le système. La quantification des échanges d'énergie et surtout des flux sédimentaires est une excellente solution pour comparer les mesures de terrain aux prévisions. Quand le modèle est juste, il est alors possible d'expliquer les évolutions observées et de prévoir les modifications de l'environnement.

3.1. Le transport éolien

Cette méthodologie a été menée dans le cadre de la thèse de Pedreros (2000) sur le transport éolien. Au niveau de la côte aquitaine, Météo France effectue des mesures de vent plusieurs fois par jours. Une climatologie est disponible sous forme de roses des vents indiquant les vitesses et directions moyennes. Penin (1980) a analysé ces données entre 1949 et 1976 et a conclu à la prédominance des vents de secteur Ouest. Les événements les plus violents sont enregistrés en hiver, à des vitesses dépassant $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($54 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$). En été, les vitesses sont faibles et les directions variables. De plus, il existe maintenant un modèle numérique (ARPEGE) capable d'estimer la valeur du vent entre les stations de mesures, selon un pas régulier.

Au cours de missions spécifiques, Pedreros a mesuré le forçage éolien sur plusieurs plages de la côte nord-aquitaine. Le vent et d'autres paramètres environnementaux étaient observés grâce à une station météorologique, tandis que le transport sédimentaire éolien était mesuré dans des pièges à sédiments placés au niveau de la zone de dépôt, sur la dune littorale. Les résultats montrent qu'une vitesse de 9 m. s^{-1} est nécessaire pour mobiliser le sable, ces vitesses concernent le plus souvent des vents de secteur Ouest. L'utilisation des pièges à sédiment sur une période de 73 jours indique que le transport varie fortement selon la force du vent et la position du piège sur la dune. Des valeurs comprises entre 0 et 700 kg. m^{-1} ont été observées pour la période d'étude. Les suivis topographiques avaient pour objectif de quantifier les évolutions volumiques sur une durée plus longue (2 ans et 4 mois). Des différences importantes ont été observées en fonction de la morphologie des 3 sites d'étude (Hourtin sud, Le Porge et Truc Vert). Pour la plage du Truc Vert, Pedreros (2000) estime qu'un apport de $25,1 \text{ m}^3$ par mètre linéaire de côte s'est produit durant la période d'étude sur la zone principale de transport éolien, comprise entre l'altitude de 5,7 m NGF et le début de la falaise dunaire. La figure I.26 montre l'évolution morphologique du domaine éolien entre septembre 1997 et avril 1999 (Desmazes et al., 2003). Les calculs de volumes sur une zone de 300 m longshore sur 65 m cross-shore indiquent une accrétion de 8700 m^3 ($\pm 400 \text{ m}^3$), soit un accroissement moyen de 27 cm par m^2 et par an. La prise en compte de la falaise dunaire dans le calcul ne modifie pas notablement le bilan, mais augmente la marge d'erreur du volume à cause d'un nombre insuffisant de points de mesures.

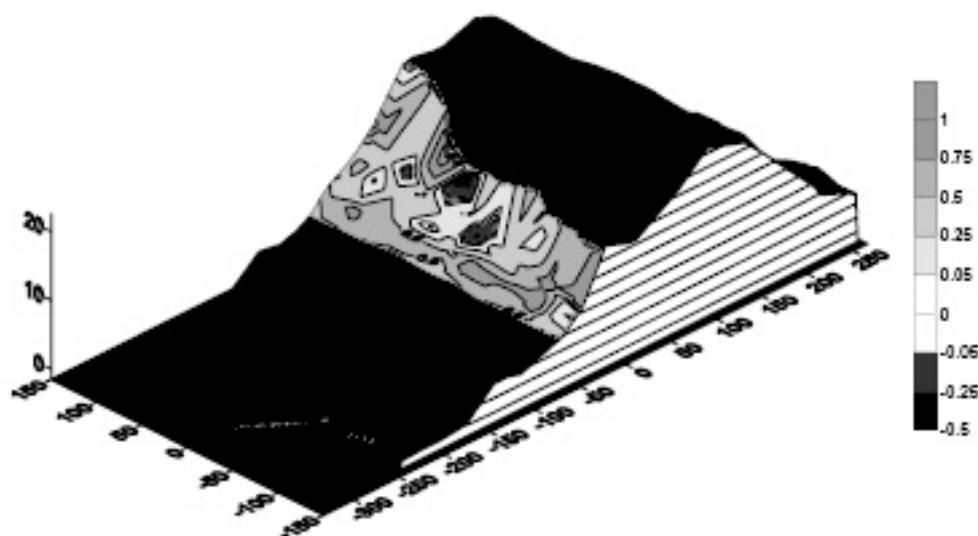


Figure I.26 : Evolution de la zone éolienne entre septembre 1997 et avril 1999, unités en mètres. D'après Pedreros (2000) et Desmazes et al. (2003).

Sur cette base de résultats mesurés, Pedreros a également amélioré les formules de transport éolien existantes et mis au point un modèle numérique capable de simuler les flux de sables sur la côte aquitaine. Les résultats sont très encourageants car les erreurs entre observations et simulations sont comprises entre 10 et 40 %. Ce modèle est surtout un outil intéressant pour interpoler dans l'espace et dans le temps les flux sédimentaires. Il est donc possible d'estimer précisément le transport éolien sur l'ensemble de la côte aquitaine, entre les périodes d'observation. Cette valeur est de l'ordre de $6 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ et représente un volume nettement inférieur aux estimations allant de 20 à $40 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ proposées par de précédents auteurs.

Dans cette thèse, nous ne reviendrons pas sur les calculs volumiques et la modélisation du transport éolien. En revanche, nous porterons notre attention sur les mesures topographiques des formes sédimentaires du haut de plage et nous discuterons sur la position des limites de chaque structure.

3.2. Impact des vagues et des courants induits

A des échelles de temps comprises entre l'heure et l'année, la houle est l'acteur principal du fonctionnement de la côte aquitaine. Les apports d'énergie qu'elle engendre sont colossaux. C'est pourquoi des travaux d'observation et de simulation de la houle, des courants induits et de flux sédimentaires sont entrepris depuis plusieurs années pour comprendre l'impact des vagues sur l'environnement littoral régional.

a) La houle

- **Statistiques sur les houles du Golfe de Gascogne**

Butel et al. (2002) ont synthétisé un nombre important de données de houles dans le Golfe de Gascogne. Les statistiques publiées sont basées sur un ensemble d'informations provenant de la bouée météorologique Gascogne, mouillée à 4500 m de profondeur, de la bouée du CETMEF mouillée au large de l'île d'Yeu par 33 m de fond, de la bouée Biscarosse positionnée à 23 m de profondeur par le Centre d'essai des Landes et du modèle VAG-Atla de Météo France. Les résultats montrent des différences entre les enregistrements qui s'expliquent par le positionnement géographique des capteurs et l'hétérogénéité des données

disponibles (notamment pour Biscarosse). Pour les houlographes situées à proximité de la côte, les moyennes annuelles des hauteurs (H_{sig}) et des périodes sont de 1,36 m et 6,5 sec à Biscarosse et 1,81 m et 5,89 sec à l'île d'Yeu. La variabilité temporelle est marquée car la hauteur et la période moyenne de la houle peuvent se modifier de 30 à 80 cm et de 1,5 sec entre les saisons. Le changement saisonnier des houles du Golfe de Gascogne est dû au régime climatique de l'Atlantique Nord (Castelle, 2004). Les vagues dont la hauteur dépasse 2 m sont observées durant 18 % et 35 % du temps à Biscarosse et à l'île d'Yeu, les périodes supérieures à 9 sec sont mesurées pendant 12 % et 4 % du temps (Figure I.27). Au cours d'évènements de forte énergie, la hauteur de la houle peut atteindre 13,9 m, 8,9 m et 9,7 m ; ces chiffres correspondent à la moyenne des plus hautes vagues annuelles pour les bouées Gascogne, Yeu et Biscarosse. La direction des vagues est généralement comprise entre l'Ouest et le Nord-ouest au large de Biscarosse, d'après le modèle Vag-Atla. Elle se situe entre le Ouest Nord-ouest et l'Ouest Sud-ouest au niveau de la bouée Yeu. Dans leur étude, Butel et al. (2002) ont également établi une classification des houles observées pour chaque capteur. Ce résultat peut s'avérer intéressant dans l'avenir pour relier des évolutions morphologiques à des classes de houles connues.

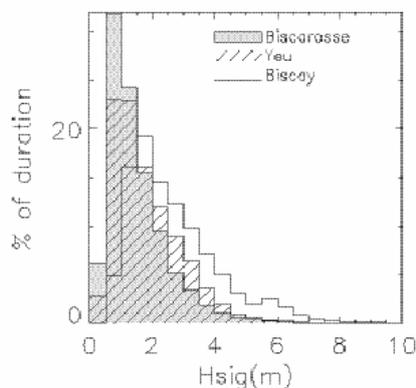


Figure I.27 : Hauteur significative de la houle (H_{sig}) en fonction de leur durée (% of duration) pour les 3 types de capteurs (d'après Butel et al., 2002).

- **Transformation des houles sur la côte aquitaine**

Pour préciser ces observations au niveau de la côte nord aquitaine, un houlographe Tryaxis a été mouillé en 2001, par 56 m de fond, à l'ouest de la flèche sableuse du Cap Ferret (Dupuis et al, 2004). Ce nouvel instrument permet de connaître heure par heure les caractéristiques de la houle. Il est particulièrement utile pour définir les conditions au large, notamment lors de campagnes de mesures hydrodynamiques sur la plage. Ainsi, avec l'appui de cet outil, les plus récentes missions au Truc Vert ont pour objectif d'observer la transformation des vagues à l'approche de la côte (Sénéchal et al., 2002). A partir de données de terrain, Sénéchal (2003) a

montré que des harmoniques sont libérées dans la zone de surf, au-dessus d'une morphologie de barre et sillon littoraux. Cette observation signifie que des ondes de fréquences supérieures aux houles incidentes peuvent apparaître pendant le déferlement des vagues. Des mouvements à plus basses fréquences ont également été observés sur les enregistrements, montrant que le niveau de l'eau au-dessus du capteur peut aussi évoluer selon une période supérieure à environ 20 secondes. Parallèlement aux travaux d'observation, une approche de simulation numérique des vagues en milieu peu profond a été entreprise par Bonneton et Dupuis (2001) ; le modèle fournit de bons résultats sur la plage du Truc Vert (Bonneton et al., 2004). Les analyses de la transformation des houles sont importantes pour comprendre les processus complexes mis en jeu sur les plages. Elles permettent d'estimer une partie prépondérante des échanges d'énergie du système et constituent une étape préliminaire à l'étude du transport sédimentaire.

b) Les courants induits par la houle

Avant d'agir sur le fond, c'est-à-dire à l'interface du prisme sédimentaire et de l'océan, les vagues provoquent le mouvement des particules d'eau. Les courants qui se forment peuvent alors transporter des sédiments si leur force est suffisante. Sur les plages de la côte aquitaine, les courants induits par la houle n'ont pas été beaucoup observés car les mesures sont difficiles.

Un long enregistrement de 10 jours est néanmoins disponible, il nous permet de mieux comprendre les courants qui se forment à 10 m de profondeur, sur la plage sous-marine du Truc Vert. Le capteur utilisé durant la mission PHES d'avril 1999 est de type S4 InterOcéan. Il mesure la vitesse et la direction du courant à une fréquence de 2 Hz, à environ 30 cm au-dessus du fond.

- **Direction et vitesse moyenne des courants en zone de levée des vagues**

La figure I.28 présente l'orientation du courant au cours de la campagne de mesure, chaque direction représentant un secteur de 90°. Le calcul des pourcentages est effectué par périodes de 30 min au cours desquelles on observe une grande variabilité dans la direction des mouvements à la fréquence de 2 Hz :

- En majorité, 30 à 45 % des mesures sont orientées vers l'Ouest (40 % de moyenne).

- Les courants vers l'Est représentent 15 à 40 % des mesures (30 % de moyenne).
- Les pourcentages de mouvements vers le Sud sont moins réguliers, entre 2 % et 45% (20 % de moyenne).
- Enfin, le courant vers le Nord est plus rare, entre 0 et 15% environ (10 % de moyenne).

Tout au long de la campagne de mesure, la proportion de courants vers l'Ouest est restée plutôt stable. En pourcentage, les mouvements vers l'Est ont été nettement dépassés par le Sud au cours de 3 événements (les 8, 11 et 13 avril 1999). Les courants orientés vers le Nord peuvent également « empiéter » sur les pourcentages du Sud (les 14 et 16 avril).

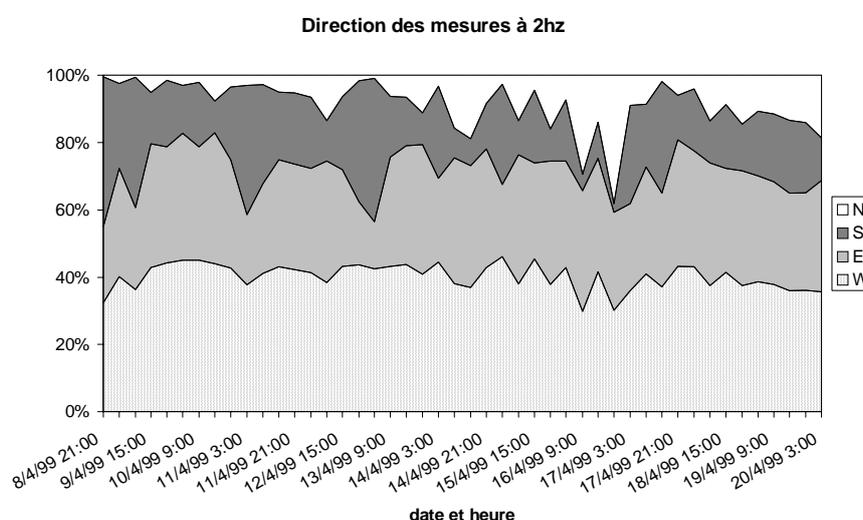


Figure 1.28 : Direction des courants mesurés à 2 Hz pendant la campagne PHES 99. Pourcentages établis par intervalles de 30 min.

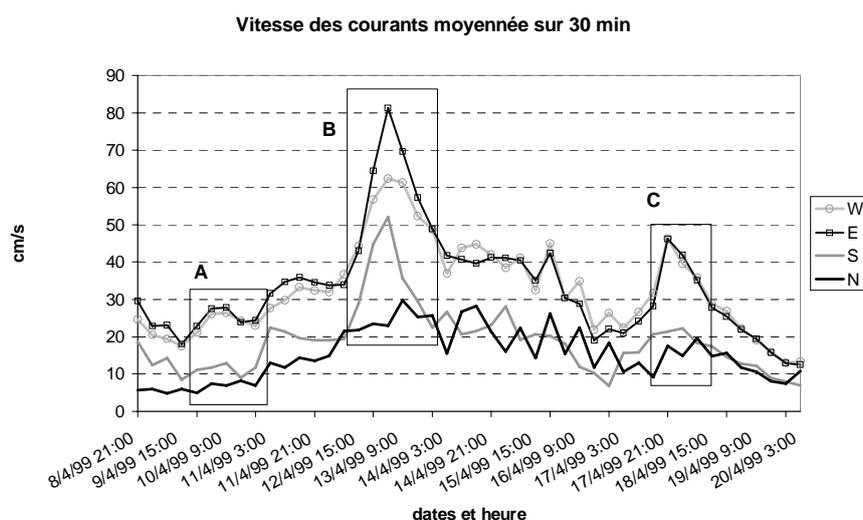


Figure 1.29 : Vitesses moyennes des courants ($cm.s^{-1}$) établies par intervalles de 30 min et par directions. Les cadres A, B et C présentent les journées dont les vitesses réelles sont analysées dans la suite de l'étude.

La vitesse moyenne pour chaque direction a été calculée par périodes de 30 min (Figure I.29).

Durant la campagne de mesure, elle varie :

- Vers le Nord, de 5 à 30 cm. s⁻¹ (moyenne de 15 cm. s⁻¹),
- Vers le Sud, de 7 à 52 cm. s⁻¹ (moyenne de 20 cm. s⁻¹),
- Vers l'Ouest, de 13 à 62 cm. s⁻¹ (moyenne de 33 cm. s⁻¹),
- Vers l'Est, de 12 à 81 cm. s⁻¹ (moyenne de 34 cm. s⁻¹).

La Figure I.29 montre la prédominance des vitesses de courants Est-Ouest qui dépassent d'environ 20 cm.s⁻¹ les mouvements d'orientation Nord-Sud. Il est intéressant de remarquer la supériorité des vitesses vers l'Est alors qu'elles sont moins souvent mesurées. Durant les évènements de Sud (les 8, 11 et 13 avril 1999), on constate logiquement la prépondérance des courants moyens vers le Sud sur les mouvements portant au Nord. La vitesse des courants Sud s'approche même des valeurs de l'axe Est-Ouest. Dans le cas d'évènements du Nord (14 et 16 avril), la vitesse des courants et le pourcentage de mesures orientées vers le Nord prennent systématiquement l'avantage sur les courants Sud.

• **Vitesse instantanée des courants**

Le travail sur les vitesses moyennes est utile pour synthétiser les observations d'une longue campagne de mesure, mais une partie des informations n'est pas prise en compte. Ainsi, on ne connaît pas la vitesse instantanée des courants, ce qui peut avoir de grandes conséquences sur l'étude ultérieure du transport sédimentaire résiduel. C'est pourquoi 3 jours d'enregistrements ont servi d'exemples pour analyser les vitesses réelles observées à 2 Hz par le capteur S4.

La journée du 9 au 10 avril est caractérisée par des vitesses moyennes plutôt faibles par rapport aux conditions de la campagne de mesure. L'observation de la vitesse réelle des courants mesurés à 2 Hz, par tranche de 25 à 50 cm.s⁻¹, sur des périodes de 30 min, montre (Figure 30, exemple A) :

- Des vitesses vers le Nord et le Sud inférieures à 25 cm.s⁻¹.
- Des vitesses vers l'Ouest et l'Est majoritairement inférieures à 25 cm.s⁻¹, mais les courants supérieurs à 25 cm.s⁻¹ représentent plus de 40 % des mesures pour le quadrant Est, alors qu'ils restent inférieurs à cette limite pour les courants vers l'Ouest.

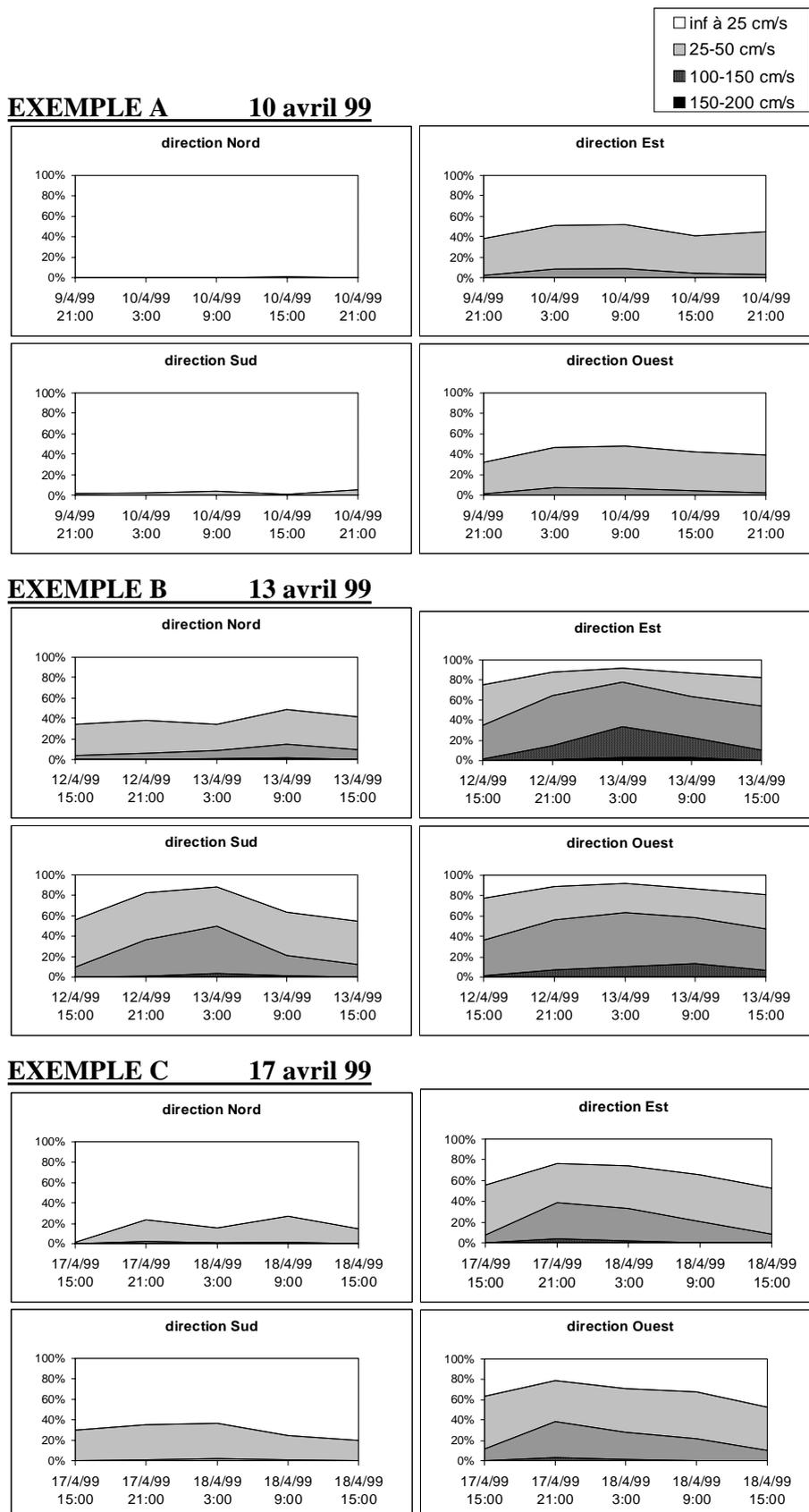


Figure I.30 : Représentation des vitesses instantanées mesurées par le courantomètre. Les mesures sont présentées en fonction de leur direction et intervalle de vitesses. Pour chaque intervalle, le pourcentage de mesure est déterminé par tranche de 30 min.

La journée du 12 au 13 avril correspond aux plus forts courants enregistrés durant la mission. Les pics de vitesses moyennes sur 30 min sont très nets sur la figure I.29 et dépassent largement $50 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (Est, Ouest, Sud). Mais la figure I.30 (exemple B) montre clairement que les vitesses moyennes sous-estiment très fortement la vélocité des courants. Ainsi :

- 50 à 65 % des courants vers le Nord ont une vitesse inférieure à $25 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Mais 25 % à 35 % se situent entre 25 et $50 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ et 3,5 % à 13 % entre 50 et $100 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Les courants vers le Sud sont plus forts. 40 % des mesures sont comprises entre 25 et $50 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, alors que les mesures dans la classe 50 à $100 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ représentent jusqu'à 45 %.
- Bien que la fréquence des mesures vers l'Ouest soit beaucoup plus importante que vers le Sud, les graphiques d'intensité des courants ont des formes similaires. Les valeurs vers l'Ouest sont cependant plus fortes (35 à 50 % dans la classe 50- $100 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ et 1,5 à 12 % dans la classe 100- $150 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$).
- Moins fréquents que les mouvements vers l'Ouest, les courants instantanés dirigés vers l'Est sont les plus violents. 30 à 50 % sont mesurés dans la classe 50 à $100 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ et jusqu'à 20 % des observations sont comprises entre 100 et $150 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Des courants supérieurs à $150 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ont été mesurés le 13 avril 1999 entre minuit et 6h du matin.

Alors que la journée du 9-10 avril correspond à une situation plutôt calme pour la campagne de mesure, celle du 12-13 avril présente un évènement de forte énergie. La troisième journée étudiée (17-18 avril 1999) correspond aussi à un pic de vitesse de courant, mais les intensités y sont moindres (figure I.30, exemple C).

- Les vitesses inférieures à $25 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ sont majoritaires pour les mouvements de l'axe Nord-Sud, même si les courants de la classe 25- $50 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ représentent jusqu'à 35 % des mesures.
- Les courants de l'axe Est-Ouest sont plus forts. Les vitesses augmentent jusqu'au 17 avril à 21 h où la classe 50- $100 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ représente alors 35 % des mesures.

La figure I.28 avait pour but de montrer la diversité des directions de courants induits par les vagues pendant la mission PHES 99, au niveau de la plage sous-marine. Les 3 exemples présentés ensuite ont permis pour leur part d'observer une très large gamme de vitesses, depuis des valeurs inférieures à $25 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ jusqu'à des courants pouvant dépasser $150 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

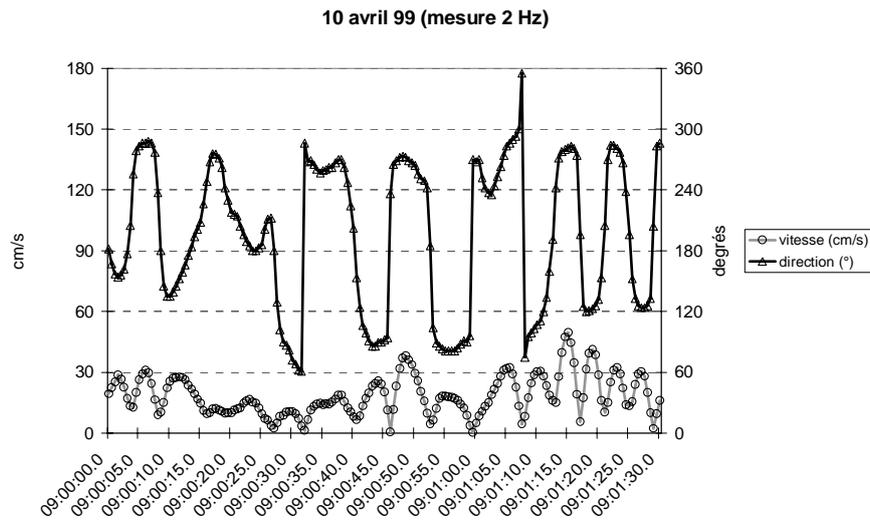
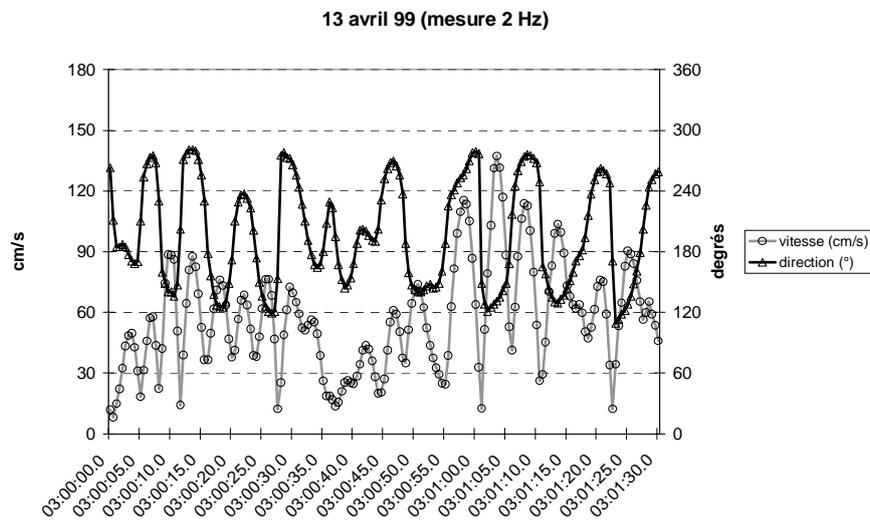
Exemple A**Exemple B**

Figure I.31 : Représentation des mesures du courantomètre à 2 Hz pendant 1 min 30 s. Vitesse instantanée du courant en $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ et direction du courant en degrés.

- **Analyse des courants orbitaux induits par la houle**

Afin de mieux comprendre l'organisation de ces circulations à la fréquence de 2 Hz, deux enregistrements du capteur ont été extraits sur une durée de 1 min et 30 s. Le premier graphique (Figure I.31, exemple A) correspond aux conditions modérées du 10 avril 1999. La courbe de direction montre l'évolution des courants sous l'action des vagues, à une période de 5 à 10 secondes environ. Les mouvements oscillent entre l'Ouest et l'Est en accélérant et décélérant. Entre les directions extrêmes, le courant tourne vers le Sud et ralentit au maximum. Les mouvements ne s'orientent au Nord qu'une seule fois sur cet enregistrement, ce qui illustre plus généralement le faible pourcentage de courant dans ce sens. Conformément aux statistiques sur les directions (Figure I.28), on observe aussi un nombre

plus important de mesures dirigées vers l'Ouest, formant parfois des « plateaux » sur la courbe de direction.

Pour expliquer ces mesures, il faut imaginer le cas d'une houle progressant vers l'Est. Sous l'action de cette onde, les particules d'eau sont d'abord transportées vers l'Est, au passage de la face avant, puis la vitesse s'annule au sommet pour s'orienter vers l'Ouest à l'arrière de la vague (Komar, 1998). Si la propagation de l'onde ne suit pas exactement une direction Ouest-Est, alors les vitesses minimales au sommet et au creux de la vague s'orienteront plutôt vers le Nord ou le Sud en fonction de l'angle d'incidence. La forte fréquence des courants orientés vers l'Ouest peut s'expliquer par la déformation des vagues qui deviennent asymétriques à l'approche de la côte. Cette déformation provoque des courants vers l'Est courts mais plus violents, alors que comparativement, les courants vers l'Ouest sont plus longs et moins rapides.

Le second graphique (Figure I.31, exemple B) présente un extrait des mesures de l'épisode de forte énergie du 13 avril 1999. La comparaison avec l'exemple A du 10 avril révèle un certain nombre de différences :

- 1) Les vitesses sont bien plus élevées et on constate qu'elles ne s'annulent jamais. Lorsque les vitesses sont minimales, il reste toujours une légère circulation orientée vers le Sud.
- 2) L'éventail des directions est moins large, resserré entre 110° et 280° . Une petite différence de l'angle d'incidence des vagues pourrait expliquer cette évolution (Figure I.33).
- 3) Pour un grand nombre de vagues observées dans cet exemple, les vitesses vers l'Est sont plus élevées que les courants vers l'Ouest. De plus, les trois dernières ondulations (à partir de 3 h:00 min:50 s) montrent des vitesses accrues et des courants moins fréquents vers l'Est. Ces observations appuient l'hypothèse d'une interaction des vagues avec le fond de la plage sous-marine, lors de cet épisode de forte énergie. Au moment de leur passage au-dessus du capteur, les houles devenues asymétriques possèdent alors une face avant abrupte et de longueur réduite. Dans ces conditions, le déséquilibre crée un courant de « transport en masse » orienté vers la côte.

- **Notion de courants résiduels**

Les deux graphiques de la figure I.31 sont de bons exemples pour expliquer la rapidité de variation des courants de la plage sous-marine, sous l'action des houles. Ils montrent aussi que les mouvements sont généralement alternatifs ou circulaires. De ce fait, les déplacements induits après plusieurs séries de vagues peuvent être faibles malgré la vigueur des courants.

Ainsi, la figure I.32 présente la direction et la vitesse du courant résiduel calculé pour 1h 30 min. La courbe de vitesse reste généralement basse, entre 10 et 15 cm.s^{-1} , sauf au cours de l'épisode des 12 et 13 avril où les valeurs atteignent 30 cm.s^{-1} . Ce résultat peut paraître surprenant en connaissant les vitesses instantanées qui dépassent fréquemment 1 m.s^{-1} , mais il reflète une certaine neutralisation des mouvements de sens opposés. De la même façon, les directions résiduelles sont majoritairement orientées entre le Sud et le Sud-est ; parfois seulement, on note des épisodes vers le Nord ou l'Est. Cette courbe de direction met particulièrement en avant le moment où les vitesses instantanées sont minimales, orientées vers le Sud au passage du creux ou du sommet des vagues. Les mouvements résiduels vers le Sud (et parfois le Nord) présentent soit la signature du courant de dérive littorale, soit l'action d'un autre phénomène, comme la marée ou une circulation sur le plateau continental. De plus, la présence de valeurs légèrement dirigées vers l'Est est un signe tangible de l'existence d'un transport vers la côte au niveau du point de mesure. Enfin, la dernière moitié de l'enregistrement est caractérisé par une série d'ondulations d'une période de 12 heures qui sont peut-être le signe d'une influence tidale.

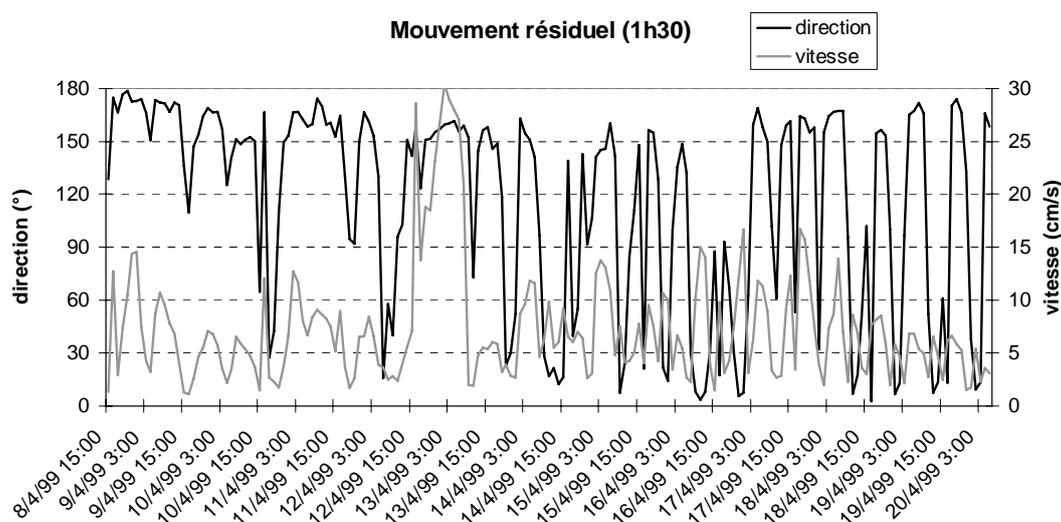


Figure I.32 : Direction en degrés et vitesse en cm.s^{-1} du courant résiduel calculé par intervalles de 1h 30 min durant la mission PHES 99

La représentation des mouvements résiduels est un moyen pratique pour synthétiser de longs enregistrements, mais elle n'est pas vraiment significative de la dynamique réelle du milieu. Il faut donc utiliser cette approche avec précaution, sans négliger le fonctionnement du système à une très courte échelle temporelle. Cette méthode permet néanmoins de résumer correctement le déplacement moyen d'une particule d'eau située dans un plan au niveau du capteur. Mais a priori, son utilisation pour déterminer le transport sédimentaire n'est pas entièrement correcte, car les conditions énergétiques sont largement sous-estimées.

- **Bilan de l'observation des courants induits par les houles en zone de levée**

Pour résumer : l'analyse pratiquée sur l'enregistrement des courants de la plage sous-marine, au cours de la mission PHES d'avril 1999, avait pour objectif de décrire les grandes caractéristiques des mouvements induits par la houle au fond. Ce travail a permis d'illustrer la complexité des circulations en un point de la zone de levée des vagues. Des solutions simples ont facilité l'observation des phénomènes sur une large échelle temporelle.

- A l'échelle de la seconde, on observe nettement les mouvements alternatifs liés au passage des vagues (Figure I.31).

Il faut noter que de futures études portant sur l'observation des courants en 3 dimensions peuvent s'avérer très instructives pour suivre plus précisément les orbites des particules d'eau.

- A l'échelle de la journée, la répartition des vitesses et des directions mesurées peut se modifier sensiblement (Figure I.30) ce qui implique une évolution des déplacements résiduels (Figure I.32).

Les facteurs à l'origine de ces changements peuvent être la marée, le vent provoquant des circulations d'eau et la modification des houles incidentes.

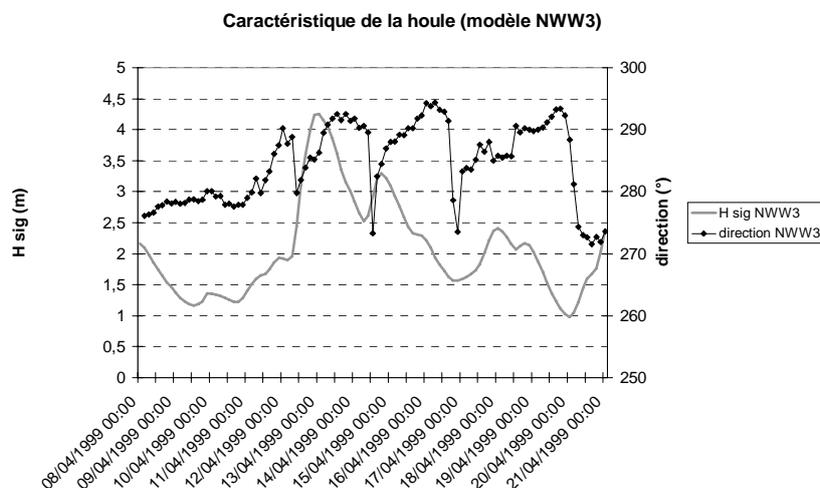


Figure I.33 : Caractéristiques de la houle (hauteur significative en mètres et direction en degrés) pendant la mission PHES 99, d'après le modèle NWW3.

- A l'échelle des 10 jours de la campagne de mesure, les variations de courants sont nettement visibles (Figure I.28 et I.29).

Les caractéristiques des houles incidentes sont mises en avant pour expliquer les courants observés (Figure I.33). Ainsi, l'exemple du 10-11 avril 1999 qui présente des courants plutôt modérés correspond à une houle de hauteur moyenne (inférieure à 1,5 m) de direction 280° environ. L'épisode du 16-17 avril et ses très fortes vitesses sont associés à un coup de mer

avec des vagues dépassant 4 m, de direction 290° d'après le modèle américain NWW3. La journée du 17-18 avril 1999 est également caractérisée par des conditions relativement dynamiques : les courants sont assez forts à 10 m de fond et la houle dépasse 2 m de hauteur significative.

Ce travail d'analyse des courants donne une bonne idée de l'énergie du milieu littoral sur la côte aquitaine. Les vitesses orbitales instantanées, les courants moyens de transport en masse et (peut-être) de dérive littorale ont pu être observés. Des relations ont été établies directement avec les conditions de houle, mais un travail plus approfondi doit être mis en place pour préciser les liens observés. En revanche, les interactions avec les autres forçages comme la marée, le vent ou les courants géostrophiques ne semblent pas forcément évidentes à expliquer globalement avec ces méthodes. De plus, l'analyse d'un unique point de mesure reste restrictive pour décrire correctement la complexité de l'environnement. En effet, le capteur était positionné au large des bancs sableux et de la zone de déferlement, ce qui simplifie considérablement les processus à étudier et n'a pas permis de distinguer de courants de retour de type « rip current » (ou courant sagittal). A l'heure actuelle, il n'est donc pas possible de comprendre le fonctionnement complet des courants du système par une étude d'observations ponctuelles et isolées. En attendant l'analyse d'autres mesures, les progrès de la modélisation numérique peuvent faciliter et nourrir la réflexion sur la courantologie des zones littorales, comme le montre la thèse de Castelle (2004).

- **Intérêt des simulations hydrodynamiques**

Une grande partie des résultats du travail de simulation numérique de Castelle (2004) est constituée de cartes qui indiquent la direction et la force des courants au-dessus d'une morphologie de plage de la côte aquitaine. L'intérêt principal est de pouvoir visualiser rapidement les effets conjoints de la houle, de la morphologie et du niveau de l'eau sur la force et la direction des courants (Figure I.34). Même si les vitesses instantanées au passage des vagues ne sont pas reproduites, le modèle permet de rendre compte du transport en masse, de la dérive littorale et des courants de retour. Ainsi, les résultats montrent l'établissement de cellules de circulation sur plusieurs centaines de mètres, guidées par la morphologie. L'existence de courants de retour canalisés dans des sillons littoraux (rip current ou courants sagittaux) est également expliquée. Les paramètres qui semblent agir sur l'intensité des courants sagittaux sont : les caractéristiques de la houle (notamment l'angle d'incidence), la largeur et de la profondeur du sillon littoral, le niveau de la marée. De plus, une comparaison

avec des mesures de terrain a été menée dans le cadre de la campagne PNEC 2001. Les résultats des simulations sont en bonne corrélation avec les capteurs dans le cas de courants longshore de fortes intensités (supérieurs à 40 cm.s^{-1} en moyenne), de conditions de vent faibles et de houles stables.

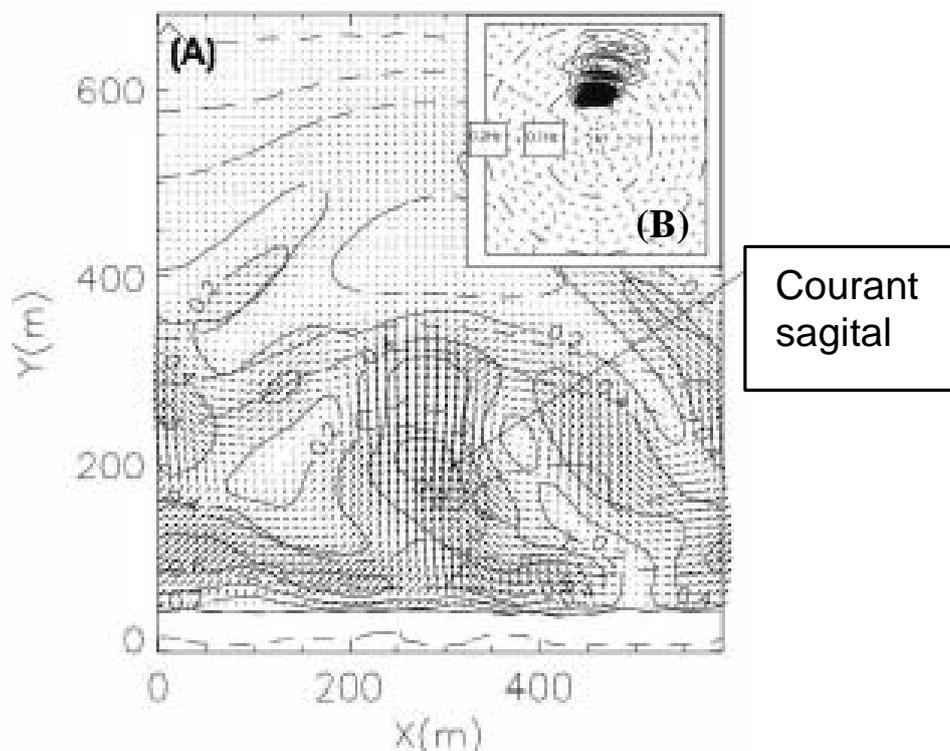


Figure 1.34 : Simulation des courants moyens induits par les vagues au-dessus de la morphologie observée durant la campagne PNEC 2001. Carte (A) : topo-bathymétrie en ligne pointillée, valeur des courants en ligne continue, direction indiquée par les vecteurs. La carte correspond à une simulation à mi-marée. Les caractéristiques des vagues proviennent des mesures de la bouée Tryaxis (spectre B) le 18 octobre 2001 à 15h : houle de 3 m d'incidence frontale. D'après Castelle et al., (sous presse).

Pour conclure : le travail de simulation numérique apparaît comme très utile pour réfléchir aux processus mis en jeu dans la zone littorale. Les phénomènes liés à la transformation des vagues peuvent être reproduits de façon plus ou moins précise. Quoiqu'il en soit, ces informations sont particulièrement précieuses dans l'étude de zones difficiles d'accès comme la côte aquitaine. La comparaison avec les mesures de terrain est toutefois nécessaire pour tester les modèles mathématiques. En contrepartie, les simulations donnent une vision spatiale qui permet de guider les futures campagnes de mesures, afin de vérifier par l'expérience les hypothèses avancées.

c) Le transport sédimentaire induit par les houles

L'immense quantité d'énergie dégagée par la transformation et le déferlement des vagues sur les côtes sableuses se dissipe majoritairement en provoquant le mouvement des particules d'eau, en frottant sur le fond et en mobilisant les sédiments. Pour comprendre comment évolue le fond marin et la morphologie de la plage, il faut étudier les processus qui guident l'érosion, le transport et le dépôt des sables dans les zones influencées par l'action des houles et des courants induits. Les approches d'observation et de réflexion doivent se combiner car l'environnement est particulièrement complexe et la détermination de bilans et de flux est souvent très délicate. Plusieurs méthodes sont envisagées, elles s'adaptent plus ou moins bien en fonction de l'environnement et des conditions hydro-sédimentaires de la côte aquitaine.

- Les comparaisons de cartes topo-bathymétriques ont pour objectif de calculer les changements morphologiques et le déplacement des volumes de sables entre deux instants.

Pour la côte aquitaine les comparaisons de volumes sont effectuées depuis longtemps (Weber, 1978), mais doivent encore être améliorées car les formes sont complexes et s'étendent sur de larges distances. Dans cette thèse, une grande partie des recherches présentées sont focalisées sur la mesure des barres sableuses littorales. Les résultats ont pour but de faire progresser les techniques de quantification des morphologies et de leurs évolutions.

- D'autres suivis morphologiques sont possibles à plus petite échelle spatiale, ils concernent l'observation en continu de la migration des rides et des mégarides au fond, sous l'action des courants induits par la houle (Gallhager et al, 1998).

Leur interprétation permet de détailler les directions de transport au fond et leurs relations avec les courants mesurés. Ces méthodes de mesures encore rares (Gallhager et al., 1996) n'ont encore pas été testées sur la côte aquitaine. Une observation discontinue des figures sédimentaires est toutefois possible à marée basse, sur l'estran.

- Les traçages radioactifs ou fluorescents indiquent le sens de déplacement des sédiments entre deux temps d'observation.

Ils permettent d'observer un transport résiduel sous l'effet du charriage et de la suspension des sédiments. Mais en fonction des conditions hydrodynamiques rencontrées, la détermination des volumes déplacés peut s'avérer très délicate. Des expériences de traçages

ont été mises en place sur le domaine côtier aquitain. Pour la plage sous-marine, les résultats ont montrés une prédominance des mouvements perpendiculaires à la côte. Au Cap Ferret, un faible déplacement vers le Nord a été détecté durant une expérience de traçage radioactif menée d'avril à septembre 1967 (Weber, 1978). Un transport compris entre 0,01 et 0,05 m³ par mètre de plage et par jour est estimé. Sur la plage intertidale (Howa, 2003), les traçages ont montré que les sables pouvaient migrer de plus de 500 m par jour parallèlement à la côte, en cas de mauvais temps. Pour des périodes plus clémentes, les déplacements longshore atteignent 12 m par jour, ils sont plus importants dans les sillons littoraux. La migration vers le haut de plage est également possible. Le transport total estimé est de 1,1m³ par mètre de plage et par jour en période de beau temps.

- Pour estimer le transport, la méthode de McLaren (1981), complétée par Gao et Collins (1991) se base sur les caractéristiques granulométriques des sédiments.

A partir d'une grille régulière de prélèvement, des vecteurs de transport peuvent être établis entre les mailles, en fonction de la moyenne, du classement et de l'asymétrie des échantillons. Cette technique a été appliquée par Pedreros et al. (1996) et Michel et Howa (1999) sur la plage de La Salie. Les résultats, en concordance avec les expériences de traçage fluorescent et les suivis topographiques, ont permis d'établir un modèle conceptuel de fonctionnement sur un système de barre et sillon intertidaux, en condition de beau ou de mauvais temps. Il faut toutefois remarquer que la méthode fonctionne bien pour déterminer la direction des mouvements, mais qu'elle ne permet pas de quantification réaliste de flux.

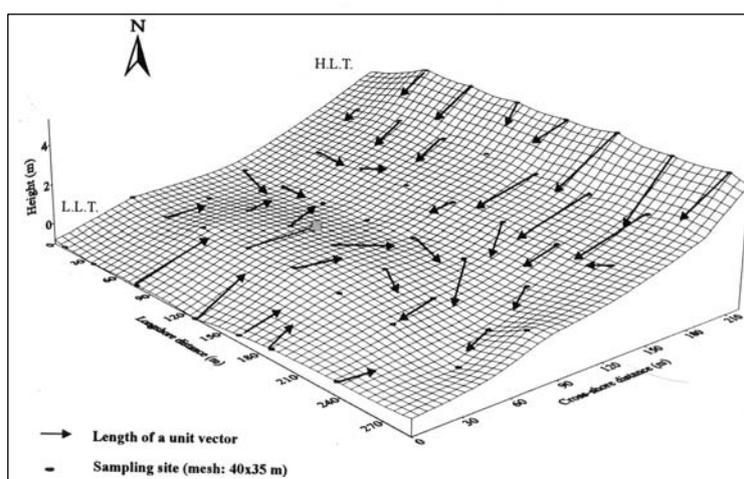


Figure 1.35 : Transport sédimentaire estimé d'après la méthode de Gao et Collins (1991). Les vecteurs représentent la direction du transport après un cycle de marée sur l'estran de La Salie, en condition de houles faibles. On observe une convergence vers le sillon littoral et une évacuation vers la plage sous-marine par un chenal. D'après Michel et Howa (1999).

- Les prélèvements d'eau servent pour leur part à mesurer la quantité de sédiment en suspension à un instant précis.

Ces observations très ponctuelles dans le temps et l'espace doivent être extrapolées pour tenter de quantifier des flux. Chapalain et Duvieillbourg (2003) ont testé une méthode de prélèvement par échantillonneur séquentiel sur la plage du Truc Vert, au cours de la mission PNEC 2001. Le matériel a été positionné en bas de plage pendant un cycle de marée. Les conditions de houles modérées ont permis un échantillonnage dans la zone de déferlement. Les résultats indiquent une concentration de 4,5 à 2 g.l⁻¹ de sables en suspension. Ces chiffres sont à prendre avec précaution car le piégeage des sédiments est un exercice difficile dans cette zone très turbulente (Levoy et Montfort, 2002).

- Les mesures par OBS ou ABS (instruments de mesures optique ou acoustique de la concentration) ont l'avantage d'être effectuées en continu.

Mais leur précision dans la zone de surf n'est pas excellente et des calibrages très sérieux doivent être effectués (Levoy et Montfort, 2002). De plus, il s'agit de mesures ponctuelles dans l'espace, qu'il faut également extrapoler pour obtenir des bilans utilisables. Ce type de mesure a été testé sur la plage du Truc Vert lors de la mission PNEC 2001, sans résultat significatif pour l'instant.

- Les autres méthodes employées pour calculer le transport sédimentaire sont basées sur des formules empiriques qui estiment les flux en fonction de paramètres environnementaux.

Le travail d'estimation consiste alors à comparer les formules disponibles et à améliorer au maximum la qualité des paramètres environnementaux. Le modèle numérique utilisé par Castelle (2004) permet de déterminer les courants moyens induits par la houle sur une plage à barre sableuse. A partir du champ de courants obtenu, le modèle estime le transport sédimentaire en fonction de la formule de Bailard (1981). Les résultats d'une simulation au-dessus d'un système de barre et sillon intertidaux montre de grandes similitudes avec le modèle de direction du transport proposé par Michel et Howa (Figure I.35). En revanche, il semble difficile de comparer les flux estimés avec des mesures de terrain, très rares et trop ponctuelles dans l'espace. De façon plus générale, il apparaît que la dérive littorale orientée vers le Sud domine largement les échanges sédimentaires de la côte aquitaine. Les estimations établies à partir de différentes formules de transport (Kamphuis, LCHF, CERC) font état d'un flux de sable compris entre 400 000 et 630 000 m³.an⁻¹ (Aubié et Tastet, 2000 ; Howa, 2003).

Ces volumes correspondent donc à des flux résiduels qui sortent du système nord-aquitain, pour se diriger vers le sud, sous l'effet de la dérive littorale induite par les houles.

d) Bilan de l'action des houles et des courants induits sur les plages d'Aquitaine

Les houles océaniques influencent le fonctionnement du système littoral aquitain de façon prépondérante. Celles qui atteignent la côte possèdent généralement une énergie assez forte ; mais plusieurs fois par an, cette puissance devient exceptionnelle au cours de violentes tempêtes. Plus globalement, l'ensemble des vagues arrivant sur la plage se transforment et produisent des phénomènes hydro-sédimentaires complexes qui agissent sur le fond.

Dans la zone de levée, la forme des vagues se modifie. On observe de violents courants orbitaux qui dépassent fréquemment 50 cm.s^{-1} dès que la houle atteint 1,5 m de hauteur significative. Certaines caractéristiques du courant observé permettent d'analyser la mise en place du transport en masse ainsi qu'un courant parallèle à la côte, à une profondeur de 10 m. Mais les mesures sont encore rares car la zone de levée s'établit principalement au niveau de la plage sous-marine qui reste difficilement accessible.

La zone de déferlement est un domaine très énergétique où la collecte de données présente des risques. En revanche, cet environnement est principalement centré sur la plage intertidale ce qui permet l'installation de matériel à marée basse. Ainsi, plusieurs expériences de traçage fluorescent sur la plage de La Salie ont montré l'importance du transport sédimentaire longshore provoqué par la dérive littorale. Les mouvements de sable sont particulièrement importants dans cette zone de turbulences et de courants intenses, favorables au transport en suspension ou par charriage. Sur la plage du Truc Vert, Castelle (2004) a pu étudier les courants moyens induits par le déferlement des vagues sur un système de barre intertidale. Une analyse spectrale a mis en évidence l'évolution du courant à basse fréquence, ce qui est interprété comme le signe d'un courant de retour sagittal.

Dans ce domaine il apparaît important de mener de façon conjointe des expériences d'observation et de simulation. Les observations sont nécessaires pour vérifier les hypothèses effectuées dans les modèles mathématiques, tandis que les simulations permettent d'étudier l'influence d'un paramètre et d'analyser plus simplement une évolution spatio-temporelle du

courant ou du transport sédimentaire. Les simulations effectuées pour les plages de la région Aquitaine indiquent clairement l'existence de cellules de circulation dans lesquelles les courants de retour sagittaux (rip current) prennent une place importante. Ces cellules guident le fonctionnement morphodynamique du système à une échelle spatiale kilométrique. Ce type de structures hydrologiques kilométriques peut être observé à l'aide d'images vidéo. Il est possible de détecter ces phénomènes par l'intermédiaire du positionnement des zones de déferlement préférentiel. La mise au point et le principe de cette technique seront exposés dans le second chapitre de cette thèse. Enfin, il faut signaler deux autres processus provoqués par la houle qui sont encore peu étudiés sur le littoral de la Gironde. Tout d'abord le jet de rive, dont l'impact sur la morphologie du haut de plage sera étudié dans le chapitre III dans une analyse de la forme des bermes. Ensuite, les courants de tempête qui peuvent modifier durablement la forme du littoral et provoquer un transport sédimentaire intense (voir partie I.C.2) qu'il est dorénavant nécessaire de pouvoir quantifier pour améliorer les bilans de flux.

3.3. Le niveau de la mer et la marée au Truc Vert

a) Eustatisme

Les processus littoraux guidés par le niveau de la mer agissent sur de vastes échelles de temps. Ainsi, l'impact de l'eustatisme se détermine en étudiant l'évolution du prisme sédimentaire sur plusieurs centaines d'années (cf partie I.C.2.2). A l'heure actuelle, des estimations indiquent que le niveau marin en Aquitaine s'élève de 1 à 3 mm par an (Aubié et Tastet, 2000). Certaines théories (Bruun, 1962) estiment que cette lente montée des eaux peut provoquer un transfert de sédiment vers le large. Cette hypothèse, largement discutée dans la littérature (Howa, 2003), est reprise par Aubié et Tastet (2000) dans le bilan sédimentaire global de la côte nord aquitaine. Les chiffres avancés semblent considérables ; estimés entre 600 000 et 900 000 m³.an⁻¹, ils correspondent à un amaigrissement de 6 à 9 m³.an⁻¹ pour un mètre linéaire de côte. Malheureusement, la largeur de plage affectée par cette perte de sédiment n'est pas précisée, ce qui influence grandement la signification des volumes estimés. Ainsi, ces volumes représentent une érosion de 5 à 10 cm sur une plage de 100 m de large (cross-shore), 1 à 2 cm pour 500 m et 5 à 10 mm pour 1000 m. Le chapitre suivant traite des méthodes d'observation, il expliquera que ces évolutions ne sont pas mesurables à l'échelle annuelle pour des plages de taille supérieure à 500 m. Avec les techniques actuelles, de telles variations ne pourront être mesurées qu'après des dizaines d'années d'évolution. De plus, la notion d'érosion de plage n'est pas si simple à définir quand on étudie les effets de l'eustatisme. En effet, nous avons vu précédemment que la définition des frontières d'un littoral dépendait grandement des processus pris en compte dans le fonctionnement du système (voir partie I.C.2.2). Ainsi, plus les phénomènes littoraux agissent sur le long terme, plus la frontière du système est décalée vers le large (Cowell et al., 1999).

b) Marée de tempête

En revanche, l'impact des tempêtes doit pouvoir être observé plus aisément car d'importantes modifications sont provoquées très rapidement et marquent durablement l'environnement. Lors des tempêtes, une partie des processus capables de mobiliser les sédiments sont directement dus aux vagues et à leur action sur le fond. Mais un autre phénomène majeur est

lié au niveau de l'eau et augmente encore la puissance d'action des tempêtes sur le littoral : il s'agit des surcotes. Le phénomène se définit comme l'action conjuguée du vent, de la houle et d'une dépression atmosphérique qui provoque une marée exceptionnelle. Cet afflux d'eau à la côte provoque une intense circulation vers le large. Il entraîne alors de grandes quantités de matériel qui se déposent sous forme d'une séquence sédimentaire nommée tempestite (voir § I.C.2.2 et Reading, 1986). Ces processus n'ont pas encore été observés directement sur le littoral aquitain, mais il semble que l'étude de tels événements puisse apporter de précieux renseignements pour compléter les bilans sédimentaires et mieux comprendre les évolutions morphologiques.

c) Impact de la marée

De façon beaucoup plus régulière, les marées astronomiques jouent également un rôle capital pour le système littoral. Sur la côte aquitaine, la marée est semi-diurne et le marnage est compris entre 1,5 et 4,5 m environ. Etudiée de façon isolée, l'action de la marée n'apporte pas une énergie capable de modifier profondément la morphologie de la plage. Les courants provoqués par l'onde sont giratoires et généralement assez faibles le long de la côte. A La Salie ou au Truc Vert, les vitesses varient entre 5 et 20 cm.s^{-1} (Weber, 1978 ; Desmazes, 2001), mais les courants peuvent devenir bien plus importants à proximité de l'estuaire de la Gironde et des Passes du Bassin d'Arcachon.

Sur les plages de la côte aquitaine, les effets conjugués de la marée et des houles ont un fort impact sur le fonctionnement du système. Un exemple simple permet de comprendre l'évolution des processus liés aux vagues au cours d'un cycle de marée.

Considérons un profil de la plage représentatif de la côte aquitaine (Figure I.36 a). Une barre sableuse est présente dans chaque compartiment du système, en haut de plage, en bas de plage intertidale et sur la plage sous-marine. Pour cet exemple, le marnage est de 4 m et la hauteur d'eau est déterminée par la règle des douzièmes (Figure I.36 b). La houle de 2 m (H) déferle dans 2,56 m d'eau (h), selon la formule $h = H / 0,78$ (Komar, 1998). Le jet de rive peut atteindre une hauteur R de 1,4 m au-dessus du niveau de l'eau, selon la formule $R = 0,7.H$ (Guza et Thornton, 1982).

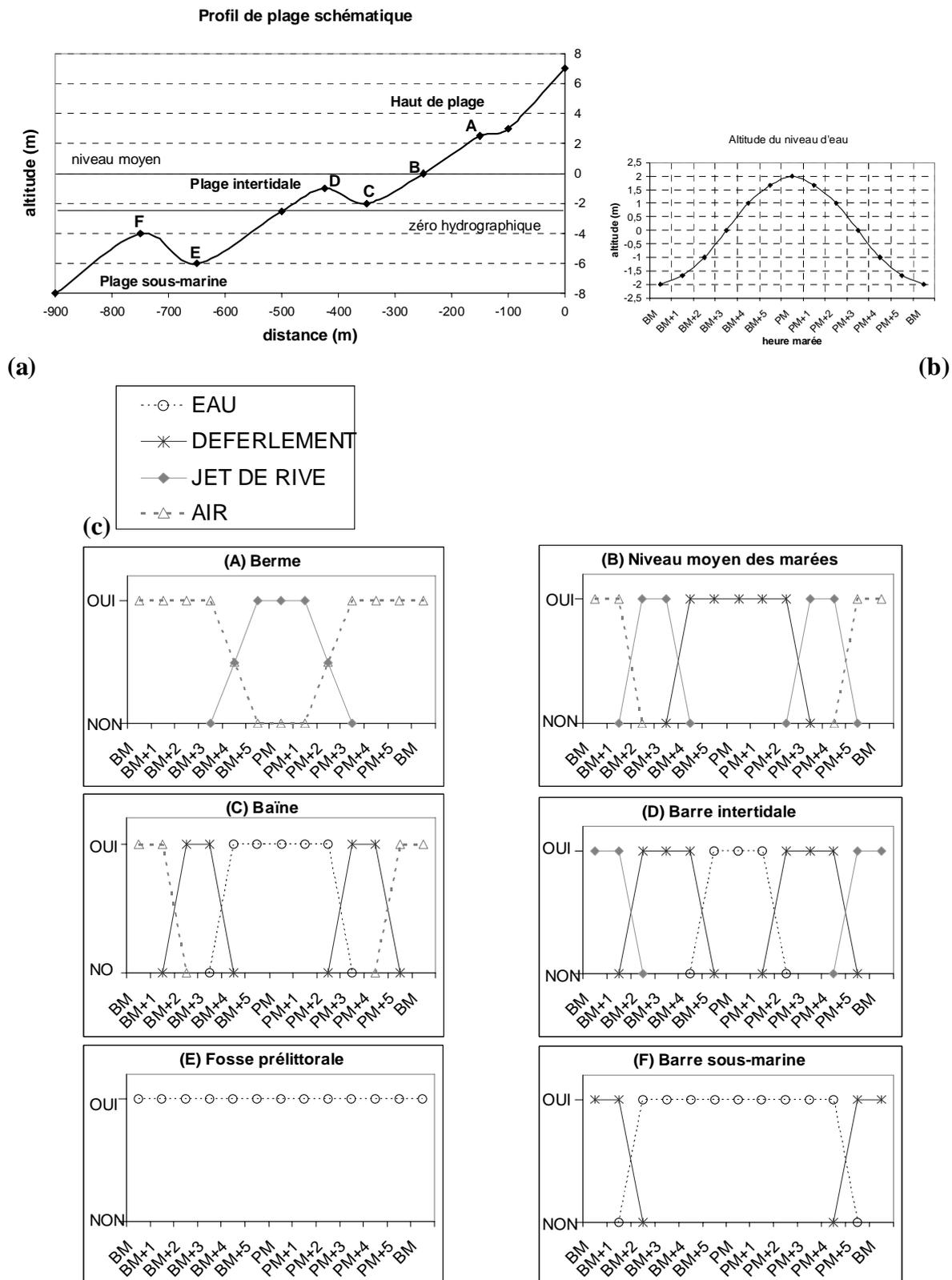


Figure 1.36 : Influence du niveau d'eau sur la position des phénomènes dus aux vagues.

(a) Profil schématique d'une plage girondine à barres sableuses.

(b) Niveau d'eau au cours d'un cycle de marée.

(c) Action au cours de la marée des processus liés aux vagues en 6 points de la plage.
 EAU : processus en zone de levée ; DEFERLEMENT : estimé pour des vagues de 2 m ;
 JET DE RIVE : estimé au-dessus du niveau de la marée ; AIR : processus éoliens.

La figure I.36 c schématise la diversité des processus qui peuvent agir sur une plage sableuse à barres. La synthèse des informations obtenues à partir de cet exemple montre que :

- Les processus éoliens et le jet de rive dominant sur le haut de plage ;
- Le déferlement et les courants orbitaux des houles agissent majoritairement sur le bas de plage intertidale ;
- La plage sous-marine est dominée par les processus de déformation des vagues avant le déferlement ;

Dans ces conditions hydrodynamiques, on peut supposer que :

- Les évolutions de la barre sous-marine auront lieu de façon préférentielle à marée basse, lorsque les vagues déferlent ;
- La barre intertidale subit le jet de rive, mais surtout deux longs épisodes de déferlement qui influencent très probablement sa morphologie au cours du cycle de marée ;
- Les sédiments de la berme en haut de plage pourront être mobilisés par le jet de rive durant la marée haute.

Cette représentation des processus de la plage est très simplifiée, mais elle montre pourtant la grande complexité des phénomènes en action au-dessus des barres sableuses. Sur le même principe, mais avec un modèle beaucoup plus évolué, Castelle (2004) a montré l'évolution des courants en fonction du niveau d'eau au-dessus des structures sédimentaires du littoral aquitain. Ce type d'approche met en avant la difficulté d'étude des plages sableuses à barres. D'un côté il est nécessaire d'étudier la globalité du système, et de l'autre, il faut analyser les différents processus qui agissent sur chaque barre sableuse prise indépendamment. Ces conclusions viennent en accord avec les méthodes d'analyses employées par Short et Aagaard (1993) et Masselink et Hegge (1995) (voir partie I.B.4) pour étudier le littoral de Nouvelles Galles du Sud (Australie). L'observation en continu des processus hydrologiques et des évolutions morphologiques au rythme des marées est donc une perspective importante pour comprendre le fonctionnement du système. Les méthodes de mesures vidéo, présentées dans le chapitre suivant, peuvent servir de support à ces perspectives d'études.

d) La marée au Truc Vert

La marée est un forçage important du système littoral car elle provoque la migration des zones d'action de la houle. Sur la plage du Truc Vert, ses caractéristiques sont encore peu connues. Deux aspects fondamentaux doivent être déterminés :

- Une hauteur de référence, nommée « zéro hydrographique », « niveau des plus basses mers » ou « zéro marin », dont on doit estimer l'altitude dans un repère terrestre ;
- La forme de l'onde de marée, afin de connaître à chaque heure le niveau d'eau au-dessus du zéro hydrographique.

En l'absence de simulation du SHOM, nous avons dû estimer l'altitude du zéro hydrographique au Truc Vert. Pour cela, nous avons utilisé les données existantes établies par le SHOM entre la Pointe de Grave et Biscarosse. Une relation linéaire a été définie afin de calculer l'altitude du zéro marin au Truc Vert, en fonction de sa position géographique sur la côte (Figure I.37). La valeur obtenue est de -2,15 m NGF. La précision absolue ne peut pas être estimée. Il s'agit donc d'une valeur approchée qui a pour but de donner un repère à cette étude. Des estimations beaucoup plus précises sont néanmoins possibles, grâce à la méthode mise au point par Balay et al. (2002). Cette technique de détermination du zéro hydrographique combine la simulation des marées et l'utilisation des altimètres spatiaux (ERS et Topex-Poséidon) dans un référentiel précis. Les résultats fournissent une estimation du niveau des plus basses mers avec une incertitude de 25 cm.

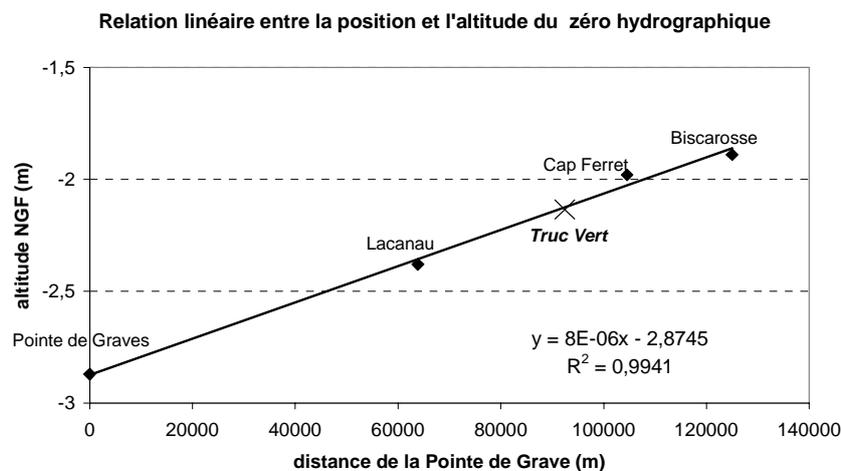


Figure I.37 : Détermination d'une relation linéaire entre la position géographique sur la côte et l'altitude du zéro hydrographique. Estimation du zéro marin au Truc Vert.

La technique d'interpolation utilisée dans cette étude permet d'estimer d'autres niveaux de référence (altitude NGF) très utiles pour l'observation de la plage du Truc Vert.

- Zéro hydrographique, -2,15 m ;
- Marée basse de vives-eaux (coefficient de 95), -1,6 m ;
- Marée basse de mortes-eaux (coefficient de 45), -1 m ;
- Niveau moyen de la mer, 0,35 m ;
- Pleine mer de mortes-eaux (coefficient de 45), 1,25 m ;
- Pleine mer de vives-eaux (coefficient de 95), 2,15 m ;
- Plus haut niveau atteint par la marée, 2,7 m.

Le marnage maximum théorique est donc de 4,85 m.

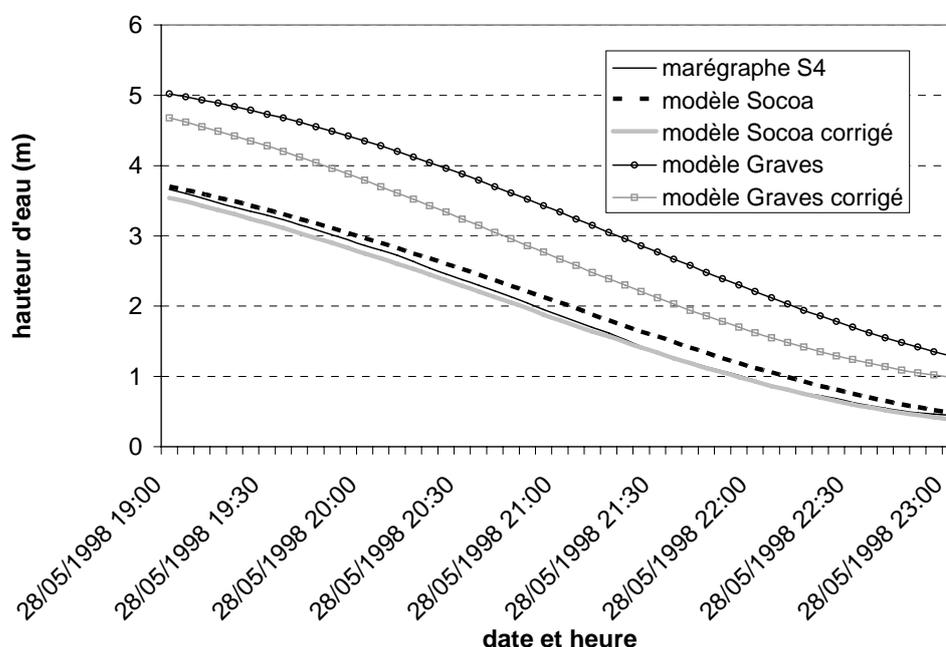


Figure I.38 : Exemple de comparaison des mesures de hauteurs d'eau du capteur S4 avec les valeurs du modèle WXTide à la Pointe de Grave et à Socoa, pour le 28 mai 1998 de 19 h à 23h, lors de la mission PNOC 98. Une correction temporelle est appliquée pour réduire le décalage. Le modèle Socoa corrigé donne de bons résultats.

La forme de l'onde de marée peut être connue très précisément en déterminant l'influence des astres sur le bassin océanique. Le SHOM simule l'onde en intégrant un grand nombre de composantes harmoniques. Pour ce travail, nous avons utilisé le logiciel WXTide qui reprend une partie de ces harmoniques pour calculer la marée. Les résultats du modèle ont été comparés au seul enregistrement continu de hauteur d'eau, disponible pour la plage du Truc Vert (Figure I.38). Ces mesures ont été établies entre le 24 et 29 mai 1998, durant la mission PNOC 98, à l'aide d'un capteur S4. Les résultats montrent que la forme de l'onde de marée

établie à Socoa est plus proche de celle du Truc Vert que l'onde de la Pointe de Grave. Une correction de +12 min doit être apportée au modèle WXTide pour obtenir une meilleure estimation de hauteur d'eau au Truc Vert. L'erreur moyenne obtenue entre le modèle et les mesures de la mission PNOC 98 est de ± 5 cm. L'erreur maximale est de +17 cm. Ces résultats basés sur les simulations du modèle WXtide sont acceptables et établissent une base marégraphique utile pour l'étude du site du Truc Vert. Mais ils doivent cependant être pris avec précaution pour deux raisons. Premièrement, la durée d'observation de la marée durant la mission PNOC 98 est trop courte. La connaissance précise des conditions de marée en un lieu précis nécessite normalement des observations qui prennent en compte plusieurs cycles mortes-eaux vives-eaux. Deuxièmement, le capteur de pression était placé dans une fosse pré-littorale à environ 4,5 m de profondeur. Or à cet endroit, le niveau d'eau est fortement influencé par l'arrivée des séries de vagues qui provoquent des accumulations d'eau à la côte. Ce phénomène s'additionne donc au processus de marée et entraîne un bruit de fond qui nécessite de moyenner des observations. Pour améliorer les résultats obtenus, des campagnes complémentaires sont nécessaires afin de mieux comparer le niveau de l'eau aux modèles de marée existants. Des observations sur des zones influencées ou non par la houle peuvent permettre également de mieux caractériser l'impact des vagues et des conditions météorologiques sur le niveau d'eau des plages d'Aquitaine.

3.4. Bilan des connaissances sur les forçages et les flux sédimentaires de la côte aquitaine.

Cette partie sur les forçages et les flux sédimentaires de la côte aquitaine avait pour objectif de présenter les principales sources d'énergie du système côtier et leur action sur l'interface du prisme littoral. Les études menées jusqu'à présent ont montré la nécessité de travailler à la fois sur l'observation des phénomènes et sur la modélisation des processus.

Le travail de Pedreros (2000) sur le forçage éolien en est une preuve, même si l'action du vent sur la plage semble simple en comparaison du forçage exercé par la houle.

Sur ce thème complexe, les plus récentes études concernant la côte girondine et la plage du Truc Vert ont été mentionnées (§ I.C.3.2). Ces travaux concernent en particulier l'observation des caractéristiques de la houle et la simulation des processus induits par sa transformation en eau peu profonde. Pour compléter ces informations, il a semblé important de décrire en détail un enregistrement de courants induits par les vagues en zone de levée. A partir de cet exemple, un futur travail d'analyse des courants en zone de déferlement pourrait venir enrichir nos connaissances du milieu.

A la complexité des processus liés à la houle, il faut également ajouter l'effet de la marée qui influence le fonctionnement du système. Sur la plage du Truc Vert, les caractéristiques de l'onde de marée ont été précisées en adaptant un modèle numérique simple aux mesures d'une mission d'observation.

Dans cette partie, les informations disponibles sur les flux sédimentaires ont également été présentées lorsqu'elles existent. Le transport des sables est en effet une conséquence quasi-immédiate de l'entrée d'énergie dans le système, bien qu'il soit souvent difficile à mesurer directement. Mais de façon indirecte, le mouvement des particules provoque généralement une modification de l'interface sédimentaire ; ces modifications induisent des changements dans la forme de la plage qui peuvent être observés. Ce thème sera d'ailleurs abordé dans la partie suivante qui présente l'avancée des connaissances sur la morphologie et la dynamique des barres sableuses des plages de la côte aquitaine. Il introduira les travaux de recherche présentés dans les chapitres suivants.

4) Morphologie des plages et des barres sableuses de la côte aquitaine et de la zone du Truc Vert

Les plages de la côte aquitaine ont une morphologie marquée par la présence de barres sableuses dans chacun des compartiments cross-shore du littoral (Figure I.39) :

- la plage sub-aérienne est caractérisée par la présence d'une dune littorale;
- Une berme peut se développer en haut de plage ;
- Le bas de plage intertidale est structuré par une barre oblique et un sillon ou chenal littoral nommés localement «baïne» ;
- La plage sous-marine voit le développement d'une banc sableux festonné nommé « barre en croissant » et d'une fosse ou sillon pré-littoral.

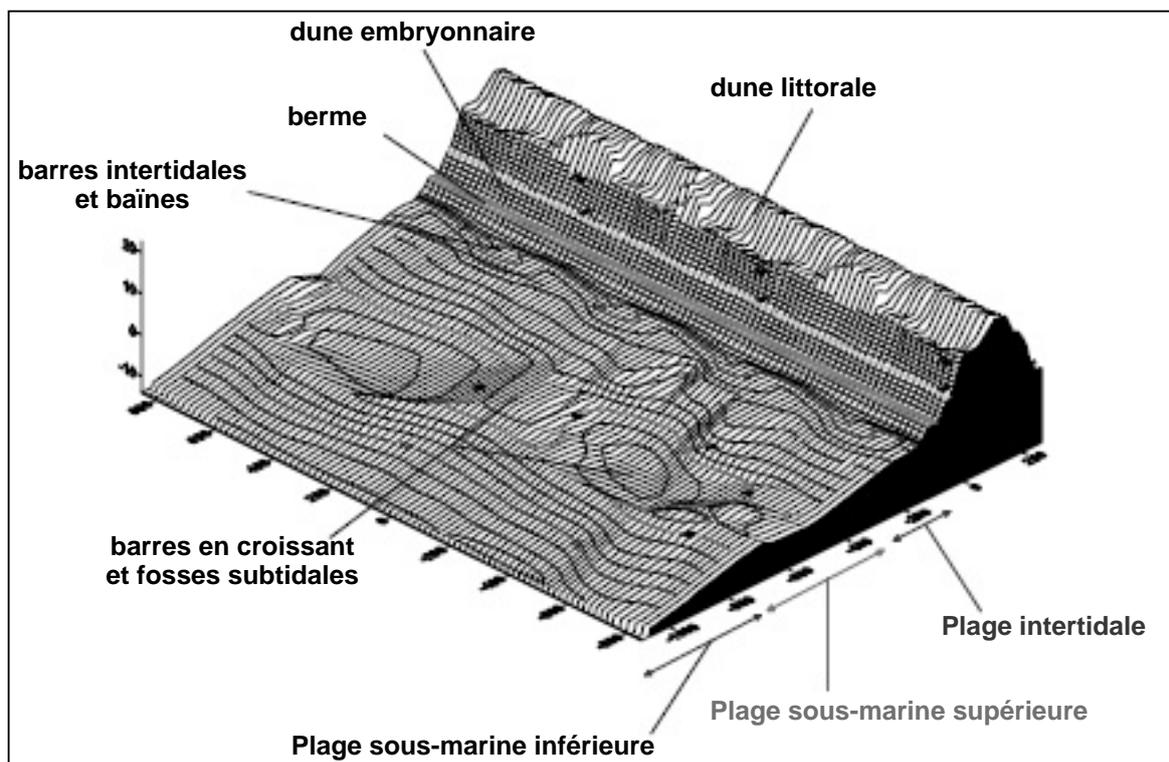


Figure I.39 : Morphologie tridimensionnelle caractéristique d'une plage de la côte aquitaine.

Ces corps sédimentaires se retrouvent avec une grande régularité sur l'ensemble du littoral. A proximité des embouchures, certains domaines font toutefois exception, comme :

- la côte Nord du Médoc, près de l'estuaire de la Gironde,
- la zone des Passes du Bassin d'Arcachon,

- quelques petites embouchures de la côte Landaise,
- et le sud de la côte, non loin de l'estuaire de l'Adour.

De plus, il semblerait que la forme des barres sableuses et la pente de la plage évoluent du Nord au Sud (Le Nindre et al., 2001). Donc, malgré une relative homogénéité morphologique de la côte, on observe une certaine différenciation entre la zone nord aquitaine et le littoral sud des Landes. Ces légères différences sont expliquées par plusieurs facteurs :

- Le plateau continental est plus étroit au Sud du Bassin d'Arcachon ;
- Les caractéristiques des vagues et leur comportement ne sont pas strictement identiques entre les zones ;
- Il existe aussi des différences sédimentologiques et géologiques entre les deux domaines.

Mais ce travail de thèse ne s'intéresse pas à la variabilité du rivage sur une grande échelle spatiale. Il se focalise plutôt sur la description des structures sédimentaires en un lieu précis de la côte nord-aquitaine, la plage du Truc Vert. Les résultats des analyses et des observations de cette plage pourront cependant servir de base de comparaison à des travaux portant sur de plus vastes espaces.

4.1. Le cordon dunaire littoral (*d'après Pedreros, 2000*)

Les dunes littorales sont des structures sédimentaires remarquables de la côte aquitaine. Elles ont été édifiées par les hommes à partir du milieu du XIX^{ème} siècle, afin de limiter l'ensablement de la forêt de pins maritimes plantée à l'arrière de la plage. Le principe de mise en place consiste à bloquer les échanges sableux éoliens entre la plage et le continent en installant des palissades et en plantant des oyats. Le sable transporté par les vents de mer est alors bloqué par les obstacles installés et s'accumule dans la dune en formation. A l'heure actuelle, les dunes littorales peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres de largeur et dépasser 20 mètres d'altitude. Leur surveillance et leur entretien sont confiés à l'Office National des Forêts. Le profil complet du cordon dunaire aquitain permet de distinguer plusieurs domaines (Figure I.40) :

- La dune embryonnaire

A proximité immédiate du haut de plage, elle prend la forme d'une banquette ou d'une terrasse, colonisée par des espèces halophiles (l'agropyrum par exemple).

- La dune blanche

C'est une zone susceptible de recevoir des apports sableux éoliens. Elle débute par un talus en pente plus ou moins douce puis se poursuit par un plateau. Ce domaine est propice au développement des plantations d'oyats.

- La dune grise

Protégée par la dune blanche, elle est à l'abri des apports sédimentaires. Elle constitue donc un milieu stable, colonisée principalement par les immortelles des dunes qui lui donne sa couleur.

- Le talus d'envahissement

Il forme la face arrière de la dune littorale et rejoint la forêt. Il est fréquemment prolongé par la lette, zone basse, parfois humide, où les arbres sont rares.

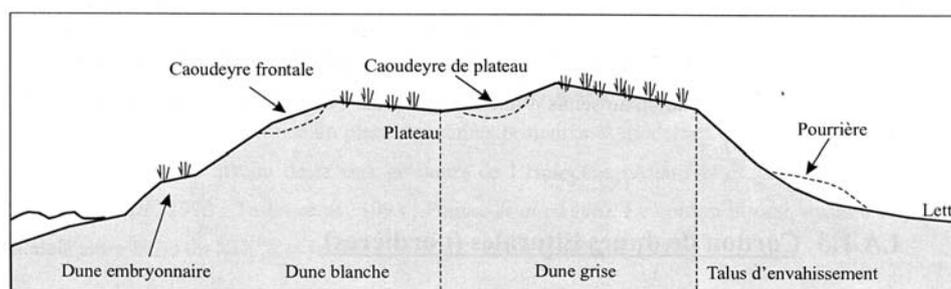


Figure I.40 : Schéma d'un profil dunaire caractéristique, d'après Pedreros (2000). Les caoudeyres représentent des zones en érosion sur la dune ; la pourrière est une accumulation sableuse à proximité du talus d'envahissement (termes locaux).

La plage subaérienne du Truc Vert est constituée par un système dunaire complet et particulièrement bien formé (Figure I.41 a). Mais d'autres morphologies ont été observées sur la côte girondine. Au sud du Porge (Figure I.41 b), la dune embryonnaire est absente bien que quelques accumulations sableuses puissent être colonisées par des agropyrum. Le talus de la dune blanche est très pentu et des zones sans végétation peuvent être érodées. La dune grise est étroite et parfois absente. Sur le site de Hourtin Sud (Figure I.41 c), il n'existe pas d'accumulation sableuse au pied de la dune blanche. Le front dunaire forme une falaise et la dune grise est presque inexistante. Enfin, la forêt de pins se développe jusqu'en haut du talus d'envahissement.

Un travail d'extrapolation sur l'ensemble de la côte girondine a permis d'estimer la représentativité de chaque morphologie, puis de calculer le transport éolien annuel global (voir partie I.C.3.1). Les résultats montrent que le profil très complet mesuré au Truc Vert s'observe sur 17 % du linéaire côtier ; le type intermédiaire du Porge représente 44 % et la

forme érodée de Hourtin Sud, 39 %. Outre l'estimation du transport éolien annuel, l'observation des dunes littorales fournit d'importantes informations sur l'évolution de la côte, car elles forment un domaine de transition entre la plage et le continent. A ce titre, leur suivi est capital pour les hommes qui peuvent avoir des intérêts sur le continent, à proximité immédiate du littoral. Ce type d'étude a été mené par Aubié et Tastet (2000) pour analyser l'évolution de la crête de dune blanche, à l'aide notamment de photos aériennes. Les résultats montrent une relative stabilité, voire une accrétion de la dune pour la zone du Truc Vert. Ils sont confirmés par les mesures de Pedreros (2000) présentées précédemment. Dans cette étude, nous ne reviendrons donc pas sur la forme et l'évolution de la dune blanche dans le temps. Par contre, nous observerons la morphologie et les modifications de la dune embryonnaire de la plage du Truc Vert. En effet, cette structure se situe à une position clé du système littoral car elle forme la limite entre la plage sub-aérienne et le haut de plage intertidale. Sa dynamique doit donc être sensiblement différente de celle de la dune blanche parce qu'elle est ponctuellement soumise à l'action plus ou moins directe des vagues et de la marée.

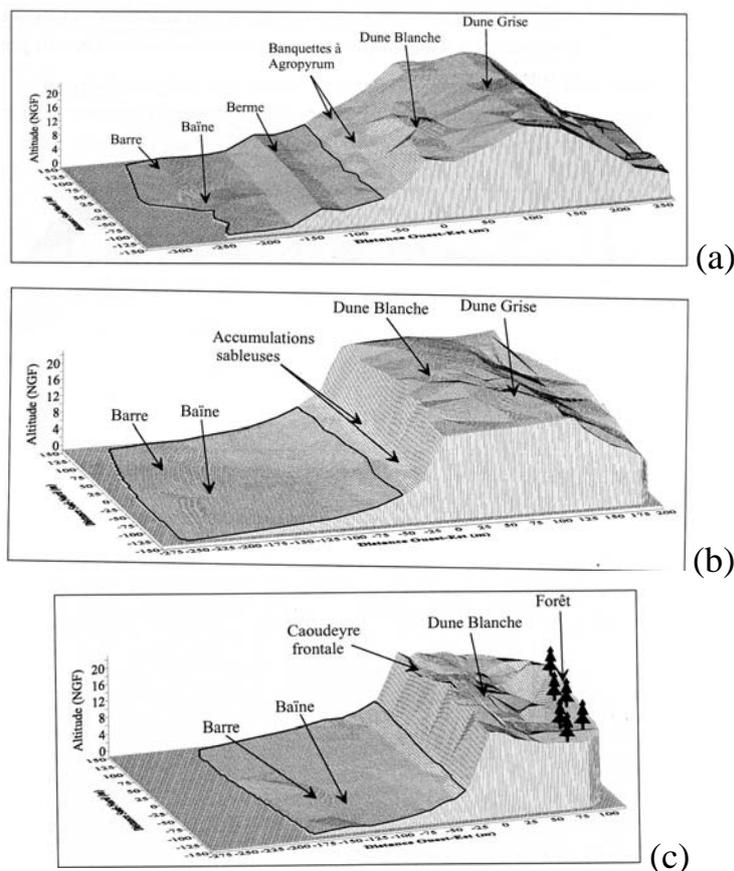


Figure 1.41 : Morphologies caractéristiques des dunes et des estrans de trois plages du littoral girondin. (a) Truc Vert ; (b) Le Porge sud ; (c) Hourtin sud. D'après Pedreros (2000).

4.2 La berme et le haut de plage

La berme est une barre sableuse située en haut de plage. Sur la côte aquitaine, elle est observée de façon préférentielle en période estivale, lorsque les houles sont moins énergétiques. Malgré une relative facilité d'accès et de mesure, elle n'a pas été étudiée en détail jusqu'à présent. Au niveau de la plage du Truc Vert, De Melo (2003) a néanmoins décrit deux séquences d'évolution de la berme au cours des étés 1999 et 2001. La figure I.42 montre la migration de la structure vers le haut, au cours de la période estivale de 1999.

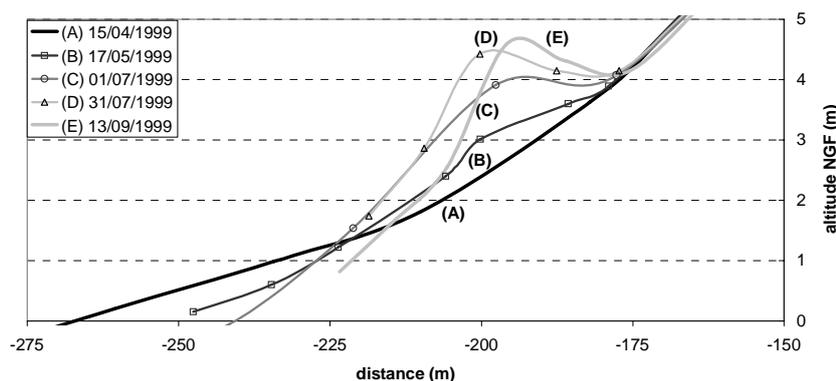


Figure I.42 : Séquence évolutive de la berme entre mai et septembre 1999.

Dans cette thèse, nous ne reviendrons pas sur l'étude de la séquence de migration estivale de la berme, qui est conforme à de nombreux modèles d'évolution saisonnière de la plage (Komar, 1998). En revanche, nous travaillerons sur une description plus précise des profils de plage afin de mieux quantifier la morphologie et de créer une typologie des structures. L'objectif est de simplifier les analyses ultérieures qui porteront sur l'évolution spatiale du haut de plage et étudierons les modifications à court terme de la berme.

4.3 Barres et baines sur la plage intertidale

Les barres et baines sont des formes caractéristiques de la côte aquitaine (Michel et Howa, 1999). La description classique définit une barre intertidale oblique, reliée à la côte par son extrémité Nord. La barre est séparée du haut de plage par un sillon littoral ouvert vers le sud-ouest. Ce motif se répète avec une grande régularité le long du littoral. Il est observé de façon préférentielle en période estivale. De Melo (2003) a pu montrer que la forme de ces structures intertidales n'était pas toujours aussi clairement identifiable. Des mesures GPS sur la plage du

Truc Vert ont permis de positionner des ensembles de barres et baïnes sur une carte. Les résultats montrent 3 types d'observations possibles :

Type 1 : L'observation est aisée. Les barres et baïnes sont bien développées et de forme classique (31 % des cas).

Type 2 : L'observation des structures est rendue difficile par les conditions hydrologiques (marée, houle) ou la forme complexe des barres sableuses intertidales. Les barres sableuses sont plates, courtes, très longues ou de tailles irrégulières. Elles sont parfois déconnectées du haut de plage. La direction des chenaux est variable, orientée vers l'ouest, le sud-Ouest ou le nord-Ouest (58 % des cas).

Type 3 : Pas d'observation de structures. Les barres sableuses sont absentes ou bien les conditions de mer ne permettent pas leur observation (11 % des cas).

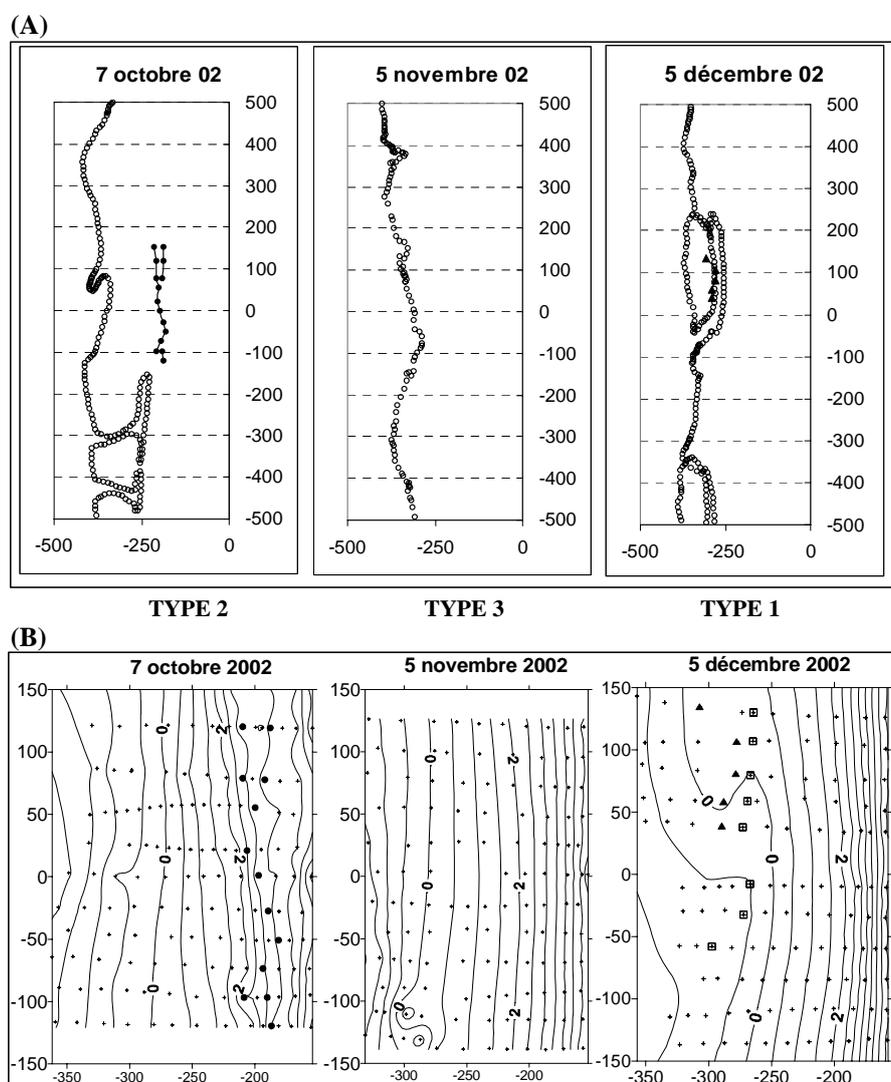


Figure I.43 : Illustration des 3 types d'observations de l'estran définis par De Melo (2003). Les données proviennent de mesures effectuées durant l'automne 2002 sur la plage du Truc Vert (d'après Desmazes et al, 2003). (A) cartographie GPS 2D ; (B) topographie. Ronds = berme, carrés = baïne, triangles = crête de barre. Voir Annexe 2.

Les longueurs d'ondes estimées à partir des observations GPS sont comprises entre 50 et 1000 m. Le type 1 est caractérisé par les formes aisément identifiables sur le terrain, la taille longshore est évaluée en moyenne à 500 m, l'écart-type est de 140 m. Ces valeurs sont comparables aux observations de Lafon et al. (2004) qui ont étudié 13 images du satellite SPOT. La taille longshore moyenne des bancs de l'estran varie entre 370 et 460 m selon les images. Les longueurs extrêmes sont comprises entre 100 et 1500 m, pour des écarts-types de 130 à 210 m.

a) Formation des barres et baïnes

A cause des conditions d'observations variables, le travail sur les bancs sableux du bas de plage intertidale n'est pas forcément évident et l'étude des évolutions morphologiques reste un problème délicat. Néanmoins, De Melo (2003) a analysé la formation de ces barres sableuses, grâce notamment aux mesures effectuées de mai à septembre 2001 (Figure I.44). Plusieurs phases ont été différenciées, elles correspondent bien aux modèles conceptuels proposés dans la littérature (Michel et Howa, 1999) :

- a) Pas de barres intertidales, mais la présence d'une structure sous-marine est notée (Phase 0) ;
- b) Migration de la barre submergée vers la plage intertidale (Phase 1) ;
- c) Engraissement de la barre et accolement au littoral par son extrémité Nord. La baïne commence à s'individualiser (Phase 2) ;
- d) Le système de barre et baïne est formé et s'observe régulièrement sur la côte. La baïne est orientée NE-SO (Phase 3).

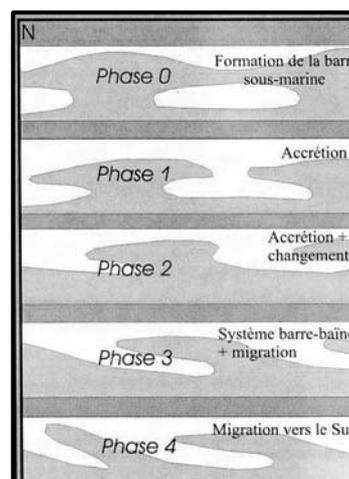


Figure I.44 : Mise en place et évolution des barres sableuses intertidales au cours de l'été 2001, d'après De Melo (2003).

Pour sa part, Castle (2004) a travaillé à la simulation numérique de la formation de barres et de baïnes sur une plage virtuelle. Les résultats montrent que des structures sédimentaires peuvent se former dans la zone de balancement des marées selon le principe d'auto-organisation (voir partie I.B.3).

Les barres apparaissent pour des houles variées, dont la hauteur significative peut atteindre 3 m. Ce résultat n'est pas entièrement en accord avec la théorie soutenue par De Melo qui considère que les corps sableux intertidaux se développent sous l'action d'une houle de moyenne ou faible énergie.

Les structures formées par modélisation ne sont pas régulièrement espacées. Ce résultat n'est pas négatif, car 58 % des cas observés par De Melo sont irréguliers (type 2). De plus, une expérience simulée sur une plage intertidale plate avec une zone sous-marine structurée par une barre en croissant a montré que le modèle utilisé pouvait créer deux barres intertidales régulières (Figure I.45). Ce résultat donne des indications sur l'importance des relations entre la morphologie sous-marine et la forme des barres sableuses de l'estran.

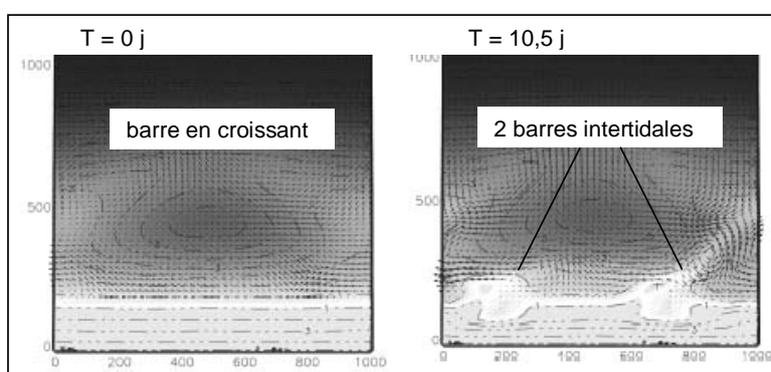


Figure I.45 : Simulation morphodynamique qui montre, après 10 jours, la formation de 2 barres et baïnes en liaison avec la barre en croissant. Caractéristique de la houle : hauteur de 1,5 m, période de 12 s et incidence -10° . D'après *Castelle (2004)*.

D'autres tests numériques ont également mis en avant le développement de corps sous-marins, conjointement à la formation de barres intertidales. Ces cas de figure n'ont pas été prouvés sur le terrain, mais l'existence de barres sous-marines directement reliées avec les morphologies intertidales a déjà été observée (Froidefond et al., 1990).

De plus, De Melo a indiqué l'importance des barres submergées dans la phase précédant la création du banc sableux intertidal. Néanmoins, *Castelle* ne décrit pas de migration de bancs sous-marins venant engraisser la plage et les barres intertidales, comme le précise De Melo. Ce point est une des limites du modèle mathématique qui ne prend pas en compte l'asymétrie des vagues et l'action du jet de rive sur l'estran. La modélisation numérique de ces phénomènes reste donc à développer pour améliorer les simulations sur la plage. De plus, l'observation de la zone de transition entre le domaine intertidal et la zone sous-marine doit

devenir une priorité, afin de mieux comprendre les processus de formation des barres et baïnes. Dans cette thèse, un travail de description spécifique de la zone de transition sera présenté dans la partie C du chapitre III.

b) Migration longshore des barres et baïnes

De Melo (2003) a pu observer la migration de barres et baïnes bien formées (type 1), à l'aide de la méthode de suivi GPS des contours. Ces mouvements ont surtout été mesurés entre mai et septembre 1999 sur la plage du Truc Vert. Les analyses montrent que :

- Pour des vagues de direction Ouest à Nord-ouest de hauteur inférieure à 2 m, la migration vers le sud est de l'ordre de $0,4 \text{ m.jour}^{-1}$;
- Pour des vagues de direction Ouest à Nord-ouest de 2 à 3 m de hauteur, la migration vers le sud est de l'ordre de $0,8 \text{ à } 2,4 \text{ m.jour}^{-1}$;
- Des vagues du Sud-ouest peuvent provoquer une migration vers le Nord.

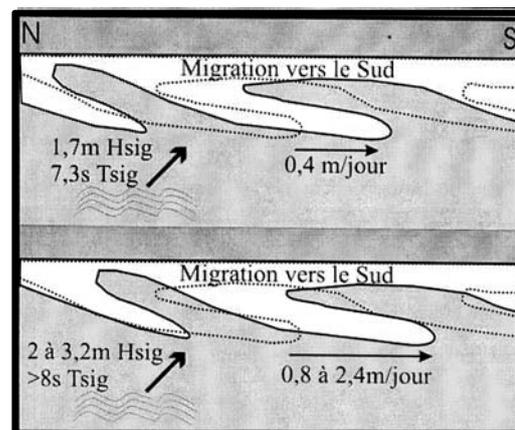


Figure 1.46 : Migration des barres vers le Sud, à partir des observations de suivi GPS des contours, au cours de l'été 1999. D'après De Melo (2003).

Les vitesses de migration doivent toutefois être prises avec précaution car la méthode de suivi des contours ne constitue pas un moyen totalement fiable pour la quantification. Le positionnement des structures dépend beaucoup de la vision de l'opérateur de terrain et des conditions d'observation. Selon la méthodologie employée par De Melo, l'estimation de la migration nécessite pour l'opérateur de situer avec exactitude le fond de la baie. L'expérience des mesures de terrain nous montre que ce détail morphologique n'est pas forcément évident à repérer sur la plage. Dans ces conditions, l'erreur induite entre deux mesures successives espacées dans le temps est difficilement quantifiable. Les résultats chiffrés doivent donc être considérés comme des estimations.

Lafon et al. (2002) ont pour leur part utilisé une méthode de cartographie basée sur les images du satellite SPOT. Cette étude est rendue possible grâce à la transparence de l'eau qui permet de voir la forme des structures intertidales depuis le ciel. Mais le tracé des morphologies en cartes repose sur un principe beaucoup moins direct que le suivi GPS. La première étape consiste à déterminer la hauteur de la marée au-dessus du zéro marin au moment de la prise d'image. La seconde étape a pour but de calculer la réflectance théorique du fond à cette profondeur, selon un algorithme calibré par des mesures de terrain. La troisième étape permet de repérer cette valeur de réflectance sur l'image géoréférencée et donc de tracer la ligne de plus basse mer théorique. Après un lissage, cette ligne représente la forme des barres et baïnes intertidales lorsqu'elles sont présentes. La précision de cette méthode est discutée par Lafon et al. (2002). Elle est de toute façon moins bonne que le repérage sur la plage d'une limite de baie par un opérateur, mais suffisante pour détecter des migrations importantes. Les images satellites présentent surtout l'immense intérêt de permettre une observation sur une grande échelle spatiale. A partir de deux images de la côte girondine (juillet et octobre 1989), une migration moyenne de $2,4 \pm 2,1$ m.jour⁻¹ a été déterminée pour 68 barres et baïnes observées (Figure I.47). Lafon et al. (2004) ont réitéré l'expérience avec des images satellites de l'été 1986. Le taux de migration moyen est de $3,1 \pm 2,3$ m.jour⁻¹ pour 74 bancs observés. Ces résultats sont du même ordre de grandeur que ceux établis par De Melo. Mais il faut noter que la comparaison avec les observations de De Melo n'est pas évidente parce que les mouvements entre images satellites ont été définis à partir de l'extrémité des bancs sableux, contrairement aux suivis GPS qui positionnent le fond des baïnes.

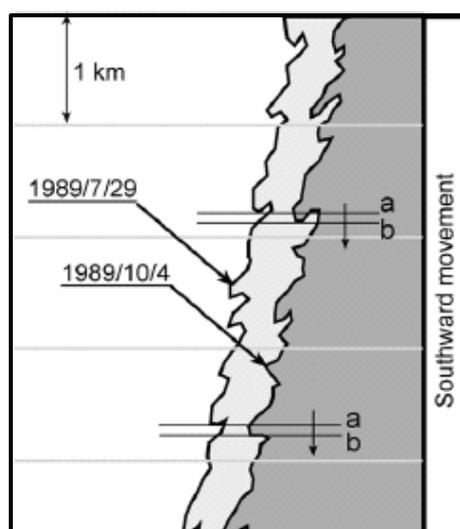


Figure I.47 : Migration des barres et baïnes observée grâce aux images du satellite SPOT. Les tracés des structures de juillet et d'octobre 1989 sont placés côte à côte pour favoriser la comparaison, d'après Lafon et al. (2002).

Sur la plage de La Salie, Michel et Howa (1999) ont également étudié le mouvement des barres intertidales. La méthode de mesure morphologique par tachéométrie (cf. chapitre II) permet cette fois de connaître plus précisément la valeur du déplacement. Ainsi, une migration estimée à 25 m jour^{-1} vers le sud a été observée au cours d'une campagne de 5 jours. Les conditions hydrodynamiques associées correspondent à une situation de beau temps. Les vagues avaient une hauteur de 1,2 m, une période de 9 s et un angle d'incidence de 30° . Michel et Howa (1999) expliquent la forte migration longshore de la barre intertidale par le fonctionnement d'une cellule de circulation des courants littoraux. Les estimations de transport sédimentaire présentées dans la partie I.C.3, ont permis de préciser le modèle conceptuel qui fait référence pour les études des bancs sableux de l'estran, sur la côte aquitaine, en condition de beau temps.

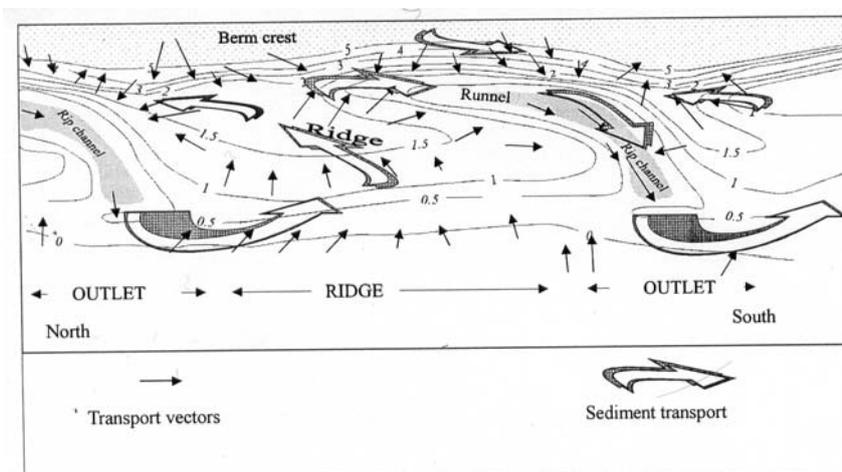


Figure I.48 : Modèle conceptuel de fonctionnement d'un système de barre et baie en condition de houles faibles, d'après Michel et Howa (1999).

Considérons un échantillon de sable situé sur la crête de barre intertidale (ridge), la figure I.48 montre qu'il est transporté vers le haut de plage sous l'action des vagues, au moment de la marée montante. Lorsque le sable arrive dans le sillon (runnel), un courant de vidange longshore le transporte alors jusqu'à la sortie de baie au sud (outlet). A cet endroit, le chenal (rip channel) est orienté vers le large et les sédiments sont envoyés sur la plage sous-marine. Au cours du cycle de marée, l'importance du courant de vidange évolue et diminue une fois la baie presque vide au jusant. Les sédiments de la plage sous-marine peuvent alors être repris par la dérive littorale induite par l'angle d'incidence des houles. Ce courant combiné à l'action de la baie provoque la migration de la barre vers le sud au cours du cycle de marée.

c) Destruction des barres et baïnes.

Les séquences évolutives qui viennent d'être décrites sont principalement observées en condition de mer plutôt calme pour la région. A partir des suivis de contours mensuels ou bimensuels, De Melo (2003) a pu constater la destruction des barres et baïnes lors de conditions de mer forte. La destruction complète correspond au passage de morphologies de type 1 (bien formé) vers le type 3 (pas de barre observée). Une situation de ce type s'est produite entre le 6 et le 20 novembre 1998, alors que des houles de 4 à 5 m ont été enregistrées. Il faut noter qu'un doute est toujours possible concernant l'absence totale des bancs intertidaux (type 3), car les conditions de mer ne permettent pas forcément le suivi de l'estran dans son intégralité. Quatre situations de destruction partielle des bancs sableux ont aussi été constatées entre 1999 et 2001. Elles correspondent au passage d'une morphologie de type 1 (bien formé) vers le type 2 (forme complexe). A chaque fois, des houles de 3 à 4 m ont été enregistrées entre les deux observations.

A partir de ces informations, De Melo fait l'hypothèse que les fortes houles ont participé à la destruction des morphologies de l'estran. Mais il faut bien reconnaître que la fréquence de suivi (1 à 2 fois par mois) ne permet pas d'observer la destruction en temps réel. Une série d'informations très importantes pour le fonctionnement du système ne peuvent pas non plus être déterminées, comme le temps de réponse des morphologies soumises aux vagues ou les délais de reconstruction. En fait, la fréquence de mesure est bien définie pour observer des tendances saisonnières, mais l'observation de la dynamique liée aux changements des conditions de houle ou aux cycles de marée est rendue très difficile, car de nombreuses hypothèses doivent être formulées.

Dans cette thèse, les séquences d'évolutions présentées ne seront pas précisées ou remises en question, car pour cela, il faudrait travailler sur des mesures beaucoup plus fréquentes. Nous allons donc concentrer nos efforts sur l'amélioration des analyses morphologiques de la plage intertidale du Truc Vert. Il paraît très important de travailler sur des mesures plus précises que le suivi de contour GPS ou l'imagerie satellite qui apportent avant tout des informations qualitatives sur de larges zones et permettent ensuite d'établir des ordres de grandeur pour la longueur d'onde ou la position des barres. La technique de topographie par tachéométrie utilisée par Michel et Howa (1999) semble être une bonne méthode. Elle sera présentée en détail dans le chapitre suivant.

Sur la plage du Truc Vert, les analyses morphologiques porteront sur l'ensemble des profils topographiques cross-shore disponibles. Elles viendront en complément des études de De Melo (2003) sur la forme longshore des structures de l'estran. Le but est de trouver des paramètres descriptifs simples et d'établir une typologie des formes rencontrées. Ces travaux sont menés dans la perspective d'analyser efficacement les levés topographiques multi-profilés effectués au cours de missions intensives et mesurés régulièrement depuis 2002 (Figure I.43). En effet, l'étude de profils cross-shore uniques est un préalable avant de décrire et de quantifier la forme tridimensionnelle des barres et baïnes du bas de plage intertidale.

4.4 Morphologie de la plage sous-marine.

La plage sous-marine est un domaine complètement océanique car il est constamment submergé. Les interactions avec le continent restent cependant très fortes, comme le montrent les études précédemment citées (Michel et Howa, 1999 ; De Melo, 2003 ; Castelle, 2004), qui mentionnent des relations entre la plage intertidale et la zone sous-marine.

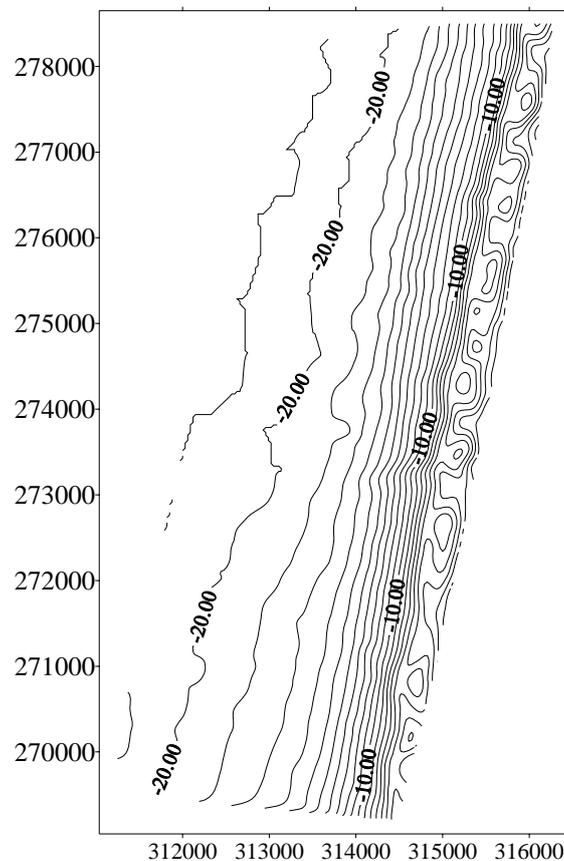


Figure I.49 : Carte bathymétrique de la plage sous-marine du Truc Vert (SHOM, 1967). Projection Lambert 3 Sud (m) et profondeurs établies par rapport au zéro hydrographique.

Les caractéristiques du domaine subtidal de la côte aquitaine, à proximité de la plage du Truc Vert, ont été décrites par Desmazes (2001) à partir d'une ancienne bathymétrie effectuée par le SHOM en 1967 (Figure I.49). D'un côté, la plage sous-marine supérieure se caractérise par la présence de barres sableuses. De l'autre, la plage sous-marine inférieure est une zone en pente douce sans barre sableuse. Elle débute vers -10 m et se termine à environ 20 m de profondeur par une rupture de pente qui matérialise la frontière morphologique entre la plage et le plateau continental. Sur la plage sous-marine inférieure, l'absence de bancs sableux ne signifie pas que le transport sédimentaire est inexistant. L'étude granulométrique au sommet du prisme sédimentaire littoral (partie I.C.2) et l'analyse d'un enregistrement de courant (partie I.C.3) ont montré qu'une certaine dynamique agissait sur la zone. Des mesures ont également été effectuées en mai 2003 avec un sonar à balayage latéral. Cette technique est décrite dans le prochain chapitre traitant des méthodologies, elle permet de repérer des structures sédimentaires de taille inférieure aux barres sableuses. L'image du fond de la plage sous-marine inférieure du Truc Vert montre la présence de mégarides symétriques de 0,5 à 2 m de longueur d'onde orientées parallèlement au littoral (Figure I.50 a et b). Ces structures peuvent résulter de l'action des courants oscillants formés au passage des vagues. Des formes arquées ou perpendiculaires à la côte ont également été observées à proximité de la plage sous-marine supérieure (Figure I.50 c). Leur présence est interprétée comme le signe d'un intense transport associé à la zone de levée de vagues (Etchegaray, 2004).

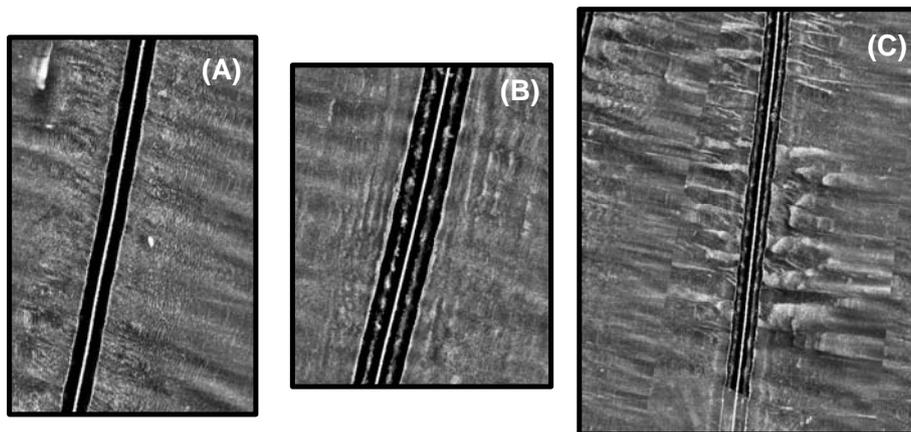


Figure I.50 : Exemples de structures sédimentaires observées grâce au sonar à balayage latéral, mission Prislit 2, mai 2003, plage sous-marine du Truc Vert. Le trajet du sonar est orienté parallèlement à la côte (Nord vers le haut).

Au niveau de la plage sous-marine supérieure, la carte bathymétrique du SHOM permet d'observer une barre sableuse festonnée (Figure I.49). Une longueur d'onde de l'ordre de 1000 m longshore a été déterminée pour 7 motifs, dénommés croissants. Entre chaque

croissant, la fosse pré littorale peut atteindre 7 m de profondeur. Les méthodes de traitement de ces données bathymétriques seront précisées dans le chapitre II. La partie Nord de cette carte sera étudiée en détail dans la partie C du chapitre III qui se focalisera sur la description des morphologies tridimensionnelles.

Le principal problème lié à l'étude de ces barres sableuses résulte du manque d'informations disponibles. Il est pourtant nécessaire de pouvoir comparer plusieurs situations afin de comprendre plus globalement le fonctionnement de ces structures. Mais l'accès à la plage sous-marine reste particulièrement délicat car le déferlement y est souvent intense. Les mesures in situ et les sondages bathymétriques sont donc rares et, dans ces conditions, les techniques de télédétection s'avèrent très précieuses.

A partir d'images aériennes IGN, Froidefond et al. (1990) ont d'ailleurs été les premiers à indiquer la présence de structures en croissants situées en position intermédiaire entre l'estran et la barre festonnée. Ils ont également remarqué le couplage possible entre les barres sableuses de l'estran et celles de la plage sous-marine (Figure I.51).

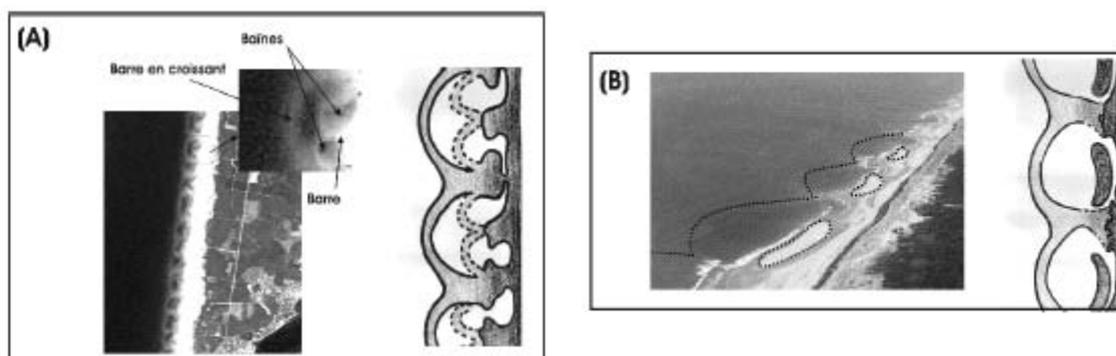


Figure I.51 : Illustration de morphologies couplées entre zones sous-marine et intertidale, d'après *Castelle (2004)*. (A) Barres sous-marines intermédiaires et baines, image SPOT. (B) Barres intertidales associées aux croissants sous-marins, image aérienne oblique.

A l'aide d'une image LANDSAT couvrant l'ensemble de la côte aquitaine, *Castelle (2004)* a pu noter des modifications progressives de la taille des croissants entre le Nord et le Sud du littoral. Cette observation vient renforcer les hypothèses d'évolutions morphologiques des plages à l'échelle de l'ensemble de la côte aquitaine (*Le Nindre et al., 2001*).

Concernant la côte girondine, *Lafon et al. (2004)* ont mesuré la taille des croissants sous-marins sur 9 images du satellite SPOT. Ces résultats établis grâce à la transparence de l'eau indiquent des valeurs moyennes allant de 580 et 820 m, les tailles extrêmes sont comprises entre 250 m et 1570 m. A partir d'un couple d'images datant de 1991, cette étude a également permis de repérer une tendance à la migration vers le sud pour les formes sous-marines. Il faut

noter que ce type d'observation sur le fonctionnement du système est un cas unique pour le domaine sous-marin nord-aquitain, mais qu'il reste à confirmer par des mesures in situ.

Pour combler le manque d'informations concernant la dynamique de la plage sous-marine, Froidefond et al. (1990) ont également mis en place des expériences de simulation numérique afin d'étudier la réfraction des vagues sur la barre sableuse et la mise en place de cellules de circulation en fonction de la marée. Avec des moyens beaucoup plus évolués, Castelle (2004) a précisé cette vision en simulant les vagues, les courants et les modifications morphologiques sur l'ensemble de la plage. Les résultats portent principalement sur les mécanismes de formation des barres en croissant (Figure I.52). Les simulations montrent qu'à partir d'une barre sous-marine rectiligne et légèrement irrégulière, des cellules de circulation de courant se forment et vont induire des transformations morphologiques en quelques jours seulement. Sous l'action d'une houle frontale de 3 m et de période 10 s, ces processus d'auto-organisation peuvent construire une barre festonnée constituée de croissants de 600 m de longueur d'onde. Pour des houles plus fortes (4 m), la longueur d'onde des structures augmente (750 m). En revanche, des conditions moins énergétiques ne semblent pas favorables à la construction de barres en croissants. Pour des houles de 2 m, par exemple, les courants sagittaux (rip current) qui permettent le retour des masses d'eau vers le large et forment le cœur dynamique des cellules de circulation, ne sont pas suffisamment puissants pour transporter des sédiments au large et modeler des barres festonnées. D'autres simulations ont aussi montré l'importance des angles d'incidence de la houle. Ainsi, des houles obliques peuvent modifier les cellules de circulations littorales et transformer la forme des croissants.

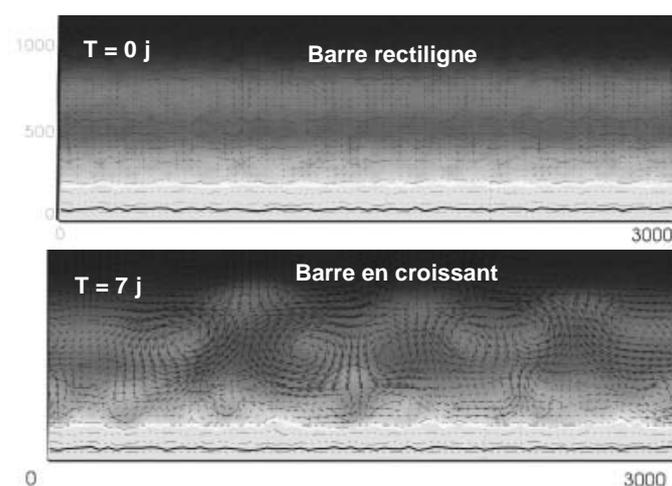


Figure I.52 : Simulation numérique de la formation d'une barre sous-marine festonnée à partir d'une barre rectiligne. Les vecteurs représentent les courants, organisés sous forme de cellules de circulation. Conditions de houles durant 7 jours : hauteur de 4 m, période de 10 s et angle d'incidence nul. D'après Castelle (2004).

Par manque de mesures, cette thèse ne permettra pas d'analyser des séquences de formation ou d'évolution des barres sous-marines, pour comparer avec les simulations numériques de Castelle (2004). Néanmoins, et à partir des données en notre possession, nous essayerons d'analyser avec précision la forme tridimensionnelle de ces structures encore mystérieuses. Le but sera d'établir une série de paramètres quantitatifs qui faciliteront la comparaison avec de futurs levés bathymétriques. Le travail de développement d'un outil vidéo est lui aussi centré sur la problématique d'observation de la plage sous-marine. Nous verrons en quoi une telle instrumentation peut permettre de mieux connaître les structures subtidales de la plage du Truc Vert.

Bilan de la présentation du cadre d'étude de la thèse

Ce premier chapitre a permis de présenter un certain nombre de généralités sur les systèmes littoraux, les plages à barres sableuses et les caractéristiques du littoral aquitain. La connaissance précise du contexte général permet d'affiner maintenant le cadre des recherches mener pendant ces travaux de thèse. Les objectifs à moyen terme et les buts précis du mémoire peuvent être détaillé.

Ainsi, ce chapitre a clairement montré la nécessité d'allier un travail d'observation du milieu naturel à une réflexion sur la nature des processus mis en jeu. Au sein du Département de Géologie et d'Océanographie de l'Université (DGO) de Bordeaux 1, ces deux approches sont menées de façon conjointe pour l'étude du littoral aquitain. Les travaux d'observation de la houle, du transport sédimentaire et de la dynamique des barres sableuses sont couplés à des efforts de modélisation, comme il a été montré dans la partie de présentation de la zone d'étude. De plus, ces recherches s'intègrent dans le cadre plus vaste de l'Observatoire Aquitaine des Sciences de l'Univers (OASU) et de différents programmes nationaux (PATOM, PNEC).

Cette thèse financée par le SHOM s'inscrit dans cette démarche de travail collectif. Elle poursuit plus particulièrement les recherches débutées dans le cadre de l'Action de Recherche Thématique « Hydrodynamique sédimentaire » (ART 7) du Programme National Environnements Côtiers (PNEC). Au niveau national, ce travail vient à la suite de deux thèses

ayant pour sujet la morphodynamique des plages à barres : Certain (2002), côte microtidale à barres (Méditerranée) et Stepanian (2002), plage microtidale à barres (Manche). Au niveau local, ces recherches vont permettre de compléter et de prolonger les thèmes abordés dans les thèses de De Melo (2003) et Castelle (2004).

A moyen terme, le premier objectif de ce travail est d'établir une classification morphodynamique des plages d'Aquitaine, sur la base des exemples présentés dans la partie I.B.4. Le second objectif est d'améliorer la quantification des flux sédimentaires de la côte. Pour y parvenir, il faut être capable de :

- Caractériser la morphologie d'une barre sableuse et quantifier son volume ;
- Distinguer plusieurs états de la plage et de ces compartiments ;
- Observer des évolutions d'état de la plage et des transferts de sédiments entre les compartiments ;
- Expliquer ces modifications par des paramètres environnementaux adaptés.

Dans l'immédiat, notre action portera sur l'analyse des profils topographiques et des cartes bathymétriques afin de décrire la morphologie des différentes barres sableuses de la plage du Truc Vert. Le but est de distinguer plusieurs types de barres caractéristiques de la plage. La mise au point d'un outil de mesure vidéo est une autre partie du travail présenté. L'objectif est de favoriser l'observation des barres sableuses à des fréquences qui permettent de suivre l'évolution des structures.

CHAPITRE II : TECHNIQUES D'OBSERVATION DE LA MORPHOLOGIE D'UNE PLAGE SABLEUSE A BARRES

PLAN DU CHAPITRE

A) Mesures géomorphologique en domaine intertidal et subaérienp 100

1) Mesures topographiques par tachéométrie.....100

- 1.1. Principe de positionnement d'un point par tachéométrie.....100
- 1.2. Importance de la mise en station pour la précision des mesures..... 101
- 1.3. Stratégie d'échantillonnage et rôle du porteur de mire..... 104
- 1.4. Bilan de la méthode de mesure par tachéométrie..... 105

2) Utilisation du GPS pour l'étude morphologique des plages.....106

- 2.1. Principe de fonctionnement du système GPS.....106
- 2.2. Méthodes différentielles.....109
- 2.3. Récepteurs bi-fréquences et positionnement en temps réel.....111
- 2.4. Intérêts des mesures GPS sur la plage du Truc Vert.....113

B) Mesures géomorphologiques de la plage sous-marine.....p 115

1) Analyse d'une carte marine ancienne.....115

- 1.1. Collecte des données.....115
- 1.2. Maillage des données.....117
 - a) Triangulation et interpolation linéaire.....118
 - b) Kriging.....119

2) Bathymétrie monofaisceau.....121

- 2.1. Acquisition des données.....121
- 2.2. Précision et erreurs sur la mesure.....121
- 2.3. Traitement des données.....123

3) Bathymétrie multifaisceaux.....125

- 3.1. Acquisition des données.....125
- 3.2. Traitement des données.....126

4) Sonar latéral à balayage.....127

- 4.1. Principe et acquisition des données.....127
- 4.2. Traitement des données.....128
- 4.3. Artefacts.....129

C) Développement d'une technique d'observation des plages à barres par télédétection vidéo.....p 131

1) Intérêt des techniques de télédétection vidéo pour l'étude des barres sableuses.....	131
2) Principes de mesure vidéo en milieu côtier.....	135
<u>2.1. Cartographie des zones de déferlement.....</u>	<u>135</u>
a) Principe du système ARGUS.....	135
b) Etalonnage de la caméra et redressement des pixels de l'image....	137
c) Validation de la relation entre le déferlement des vagues, le maximum d'intensité de l'image et la présence d'une barre sableuse.	139
<u>2.2. Amélioration des techniques vidéo pour la mesure des zones intertidales et sub-aériennes.....</u>	<u>141</u>
a) Estimation de la morphologie de la plage intertidale par l'utilisation d'images moyennées.....	142
b) Techniques de l'ombre portée pour mesurer un profil de plage.....	144
c) Stéréoscopie.....	146
d) Conclusion.....	148
<u>2.3. Imagerie des processus hydrodynamiques du domaine littoral.....</u>	<u>148</u>
a) Observation des vagues.....	149
b) Observation du jet de rive.....	152
c) Observation des courants littoraux.....	155
3) Développement d'un système vidéo pour l'observation des plages d'Aquitaine	159
<u>3.1. Choix d'un système de mesures vidéo.....</u>	<u>159</u>
<u>3.2. Architecture du système.....</u>	<u>160</u>
<u>3.3. Choix du matériel et techniques d'acquisition des données.....</u>	<u>162</u>
a) Mise en place du matériel sur le terrain.....	162
b) Acquisition des données.....	163
<u>3.4. Programmation des modules de traitements d'images.....</u>	<u>164</u>
a) 1 ^{ère} phase de traitement.....	164
b) 2 ^{nde} phase de traitement.....	165
<u>3.5. Résultats et visualisation.....</u>	<u>166</u>
<u>3.6. Bilan du travail effectué pour le développement d'un système de mesure vidéo des plages de la côte aquitaine.....</u>	<u>167</u>
4) Premiers tests d'un système d'observation vidéo sur la plage du Truc Vert.....	169
<u>4.1. Mise en place terrain et acquisition des données.....</u>	<u>169</u>
<u>4.2. Traitement des images.....</u>	<u>173</u>
a) 1 ^{ère} phase de traitement.....	170
b) 2 ^{nde} phase de traitement.....	171
<u>4.3. Résultats.....</u>	<u>173</u>
<u>4.4. Visualisation.....</u>	<u>175</u>
<u>4.5. Bilan des premiers tests d'observation vidéo de la plage du Truc Vert...178</u>	<u>178</u>

CHAPITRE II : TECHNIQUES D'OBSERVATION **DE LA MORPHOLOGIE D'UNE PLAGE** **SABLEUSE A BARRES**

Cette thèse a pour but d'observer et de décrire les barres sableuses de la plage du Truc Vert. Le premier chapitre a montré clairement que ce milieu littoral est complexe. Ainsi, des barres sableuses tridimensionnelles se retrouvent dans tous les compartiments du littoral nord-aquitain. Une évolution saisonnière a été entrevue, elle explique en partie le fonctionnement de la plage, mais reste bien souvent masquée par une dynamique beaucoup plus rapide. Les modifications à haute fréquence sont dues à l'importante quantité d'énergie qui arrive dans le système par l'action de fortes houles. La marée de type méso-tidale a également un rôle moteur dans la répartition de cette énergie sur l'ensemble de la plage.

Pour comprendre le fonctionnement d'un tel environnement, il faut mettre en place des moyens de mesure ambitieux afin de décrire correctement la géomorphologie du milieu. Dans l'absolu, la technique d'observation idéale doit permettre d'analyser la forme de la plage dans son ensemble, en 3 dimensions, avec une précision et une fréquence importante. Mais à l'heure actuelle, aucune méthode ne fournit d'aussi bons résultats sur la plage du Truc Vert. Des moyens d'observation et d'analyse simplifiées doivent donc être mis en place. Les simplifications consistent à :

- Etudier chaque compartiment de plage ou chaque barre sableuse indépendamment ;
- Réduire le nombre de dimensions spatiales par une étude en profil ou en plan ;
- Limiter la fréquence d'observation ;
- Utiliser des techniques de mesures moins précises (faible résolution ou marge d'erreur importante) ;
- Simplifier la description des données.

Sur la plage du Truc Vert, les compromis sont donc nécessaires, mais ils ont déjà permis d'obtenir des résultats significatifs sur la dune, la berme, les barres et baïnes et la barre en croissant (voir chapitre I.C.4).

Ainsi, Pedreros (2000) a effectué des mesures topographiques de la dune en 3D, mais il s'est limité à décrire simplement la morphologie, sans détail ni paramètre. En revanche, la

quantification des évolutions a été effectuée avec soin, grâce au petit nombre des suivis et au rythme assez faible des modifications du domaine éolien.

La berme n'a pas été beaucoup étudiée sur la plage du Truc Vert. De Melo (2003) a juste procédé à une description rapide (présence / absence ; migration / accrétion) à partir d'observations en profil unique.

Par contre, elle a travaillé de façon plus approfondie sur les barres et baïnes. Elle a utilisé une description simplifiée, basée sur la forme du contour GPS des barres et baïnes. Une classification a été établie grâce à une analyse qualitative de ces données. Plusieurs paramètres ont aussi été extraits des mesures de contours, ils décrivent avec une précision plutôt moyenne la longueur d'onde et la vitesse de migration des barres sableuses. Lafon et al. (2002) ont pratiqué le même type d'étude à partir d'images SPOT. La précision et la fréquence sont encore moins bonnes, mais ces mesures présentent l'avantage de couvrir une vaste part du littoral girondin. D'autres paramètres (hauteur de barre et volume) ont été estimés par De Melo (2003) à partir des mesures de profils topographiques, mais ils n'ont pas vraiment été exploités dans sa thèse.

Les connaissances sur les barres sous-marines sont encore rares. Ces structures complexes ont été décrites de façon succincte, à partir d'images aérienne ou satellite (Froidefond et al., 1990). Lafon et al. (2004) ont toutefois essayé de quantifier la longueur d'onde des croissants à partir d'une image SPOT, mais la précision reste faible. Seul Desmazes (2001) a mesuré ce paramètre assez précisément sur la carte SHOM 1967.

Cette thèse a pour objectif de caractériser la morphologie des barres sableuses de la plage du Truc Vert. Pour poursuivre et compléter les études précédentes, un certain nombre de choix et de compromis méthodologiques ont été fait.

- 1) L'étude porte sur l'ensemble de la plage. Mais cette vision globale est simplifiée par une analyse spécifique de chaque compartiment et de chaque barre sableuse.
- 2) L'analyse doit être précise et quantifiée. La description des morphologies passe par la détermination et le calcul systématique de paramètres afin de faciliter les comparaisons et

d'étudier objectivement la forme de la plage et des barres sableuses. Ce travail sera présenté dans le prochain chapitre.

3) Le haut de plage et le bas de plage intertidale sont étudiés à partir d'une collection de profils topographiques. L'observation de formes tridimensionnelles n'est malheureusement pas possible avec cette méthode. Par contre, le grand nombre de données disponibles va permettre de distinguer des situations caractéristiques de la morphologie de cette plage. La reconnaissance de ces situations est un moyen efficace pour faciliter l'analyse ultérieure de levés multi-profiles. La technique d'acquisition des profils topographiques est décrite dans la première partie de ce chapitre.

4) Pour la plage sous-marine, les mesures sont beaucoup plus rares, mais elles permettent une étude en 3D de la barre en croissant. Elles sont acquises par des méthodes bathymétriques qui seront détaillées dans la seconde partie de ce chapitre.

5) Les mesures pratiquées couramment sur la plage ne permettent pas l'observation de l'ensemble des barres sableuses à une fréquence suffisante pour analyser correctement toutes les séquences évolutives. Pour combler ce manque, il a été décidé de réfléchir à la mise au point d'une méthode de télédétection vidéo. La troisième partie de ce chapitre présente l'état d'avancement de cette réflexion et les premiers essais de cette technique.

A) Mesures géomorphologiques en domaine intertidal et subaérien

1) Mesures topographiques par tachéométrie

d'après Brabant (2000)

1.1. Principe de positionnement d'un point par tachéométrie

Le tachéomètre est un instrument de mesure topographique de précision. C'est un outil complexe qui intègre un théodolite et un distancemètre. Son principe est basé sur le positionnement d'une mire réfléchissante, placée par un porteur de mire sur le point à mesurer. L'opérateur du tachéomètre doit avant tout viser cette mire par le collimateur de l'instrument. Une fois la visée effectuée, le théodolite, constitué de 2 cercles gradués fournit deux mesures d'angles pour positionner la mire en vertical et en horizontal (Figure II.1). Simultanément, le distancemètre détermine l'éloignement du point après émission et réflexion d'une onde lumineuse (Figure II.2). La distance est mesurée en calculant le nombre de longueurs d'onde nécessaires pour un aller et retour vers la mire. Ces 3 mesures (angle horizontal, angle vertical et distance) permettent de positionner le point observé dans un repère centré sur le tachéomètre.

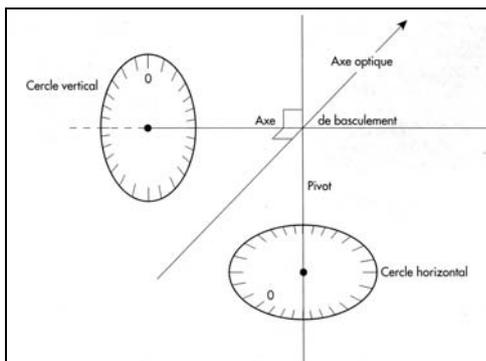


Figure II.1 : Principe du théodolite. La mire est visée par l'axe optique. Les angles d'orientation de l'axe optique sont lus sur le cercle vertical et le cercle horizontal

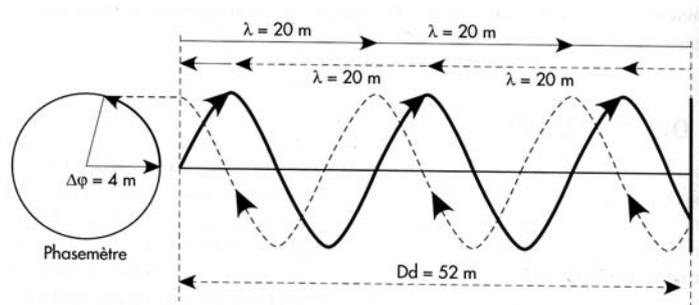


Figure II.2 : Principe du distancemètre. Pour une distance (Dd) à mesurer et une longueur d'onde (λ) donnée, un nombre de longueur d'onde (k) est compté avant réception du signal. Le décalage ($\Delta\phi$) est mesuré grâce au phasemètre, on obtient : $2Dist = k.\lambda + \Delta\phi$.

La précision du positionnement dépend de la qualité de ces trois mesures. Les erreurs de distance proviennent soit d'un défaut d'étalonnage de l'appareil, soit de la réfraction du rayon dans l'atmosphère. Elles occasionnent des décalages de 2 à 5 cm sur une mesure. Les erreurs sur les angles sont dues principalement à des problèmes indirects de mise en station de l'appareil. Cette étape est détaillée dans le paragraphe suivant pour le cas du suivi de la plage du Truc Vert.

1.2. Importance de la mise en station pour la précision des mesures

Au cours d'un levé topographique, le porteur de mire se déplace sur la zone à mesurer tandis que l'opérateur positionne la mire grâce au tachéomètre. Ce déroulement immuable implique que la position du tachéomètre reste parfaitement fixe pendant les mesures. La mise en station consiste avant toute chose à placer l'instrument dans un endroit stable durant la durée des mesures.

Sur la plage du Truc Vert, les mesures topographiques ont pour objectif de quantifier la forme de la plage. Comme nous l'avons vu précédemment, cette forme est très variable dans le temps. L'étude de la plage vise donc à collectionner les mesures pour les comparer et obtenir une série d'états morphologiques caractéristiques. La comparaison précise des données d'une date à l'autre nécessite d'utiliser un référentiel commun à tous les levés. Ce référentiel est défini lors de la mise en station de l'instrument, il doit être repris exactement pour garantir la qualité des observations au cours du temps.

Dans sa conception, le tachéomètre est déjà structuré autour d'un repère tridimensionnel orthonormé qui est défini par l'axe optique et les axes des deux cercles gradués nommés pivot et axe de basculement (Figure II.1).

La première étape de la mise en station consiste à placer le pivot à la verticale. Le centre de la Terre forme un repère fixe qui peut être réutilisé dans le temps. La verticalité de l'axe est obtenue grâce à un niveau à bulle.

La seconde étape a pour objectif d'orienter l'axe de basculement dans le plan horizontal. Pour le cas de l'étude de la plage du Truc Vert, la direction choisie pour l'axe des abscisses est d'environ N 10°, plus ou moins parallèle à la côte. Elle est établie en visant un repère fixe en

bois nommé PK 89 (borne ONF de repérage), situé sur l'axe des ordonnées, dans la direction Nord 100° à l'Est de la station de mesure.

La troisième étape de la mise en station est cruciale, elle nécessite de définir précisément l'origine du référentiel. Cette étape ne constitue pas un souci majeur lorsque le tachéomètre est positionné exactement au même endroit à chaque levé. Il suffit alors de prendre la position de l'instrument comme origine du repère.

Mais sur la plage du Truc Vert, aucun repère fixe n'a été utilisé pour installer le tachéomètre à la même place lors des différents suivis. Bien que la position soit restée sensiblement la même au sommet de la dune, il est impossible d'utiliser l'instrument comme origine d'un repère précis. Il est donc nécessaire de trouver un autre point pour permettre la comparaison des données dans un référentiel.

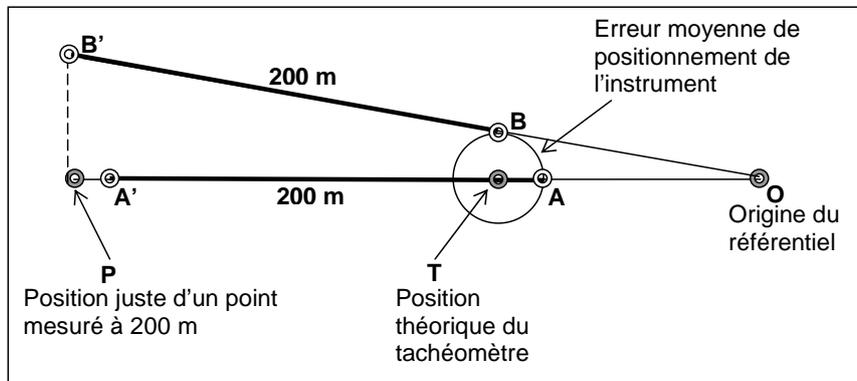


Figure II.3 : Illustration des erreurs provoquées par une mise en station imprécise. A et B représente le tachéomètre mal positionné. A' et B' correspondent à une mesure identique située à 200 m sur l'axe des ordonnées. La position de A' est corrigée aisément en mesurant la distance OA, dans un référentiel centré sur O ; ce n'est pas le cas pour la mesure B'. Pour utiliser la mesure B' dans une analyse, il faut faire l'hypothèse d'une topographie stable entre P et B'.

- De 1997 à 2002, le seul point fixe à avoir été mesuré systématiquement est le PK89.

Les données montrent un écart moyen de 13 cm autour de la distance PK89-tachéomètre, et un écart maximum d'environ 40 cm, ce qui prouve la variabilité du positionnement de l'instrument. Malheureusement, il n'est pas possible de quantifier puis de corriger correctement les erreurs induites entre les levés par ce positionnement approximatif. En effet, la mesure d'un point de contrôle unique ne permet pas de retrouver la position de la station de mesure dans le plan horizontal. Le seul moyen de limiter l'erreur entre les mesures consiste à centrer le repère sur le point fixe PK 89 mesuré systématiquement (Figure II.3). Cette manipulation permet de corriger les imprécisions de mise en station sur l'axe des ordonnées, l'erreur de positionnement en abscisses ne sera absolument pas prise en compte. En revanche,

pour les altitudes, l'utilisation comme origine d'un point fixe dans le temps permet de garantir la qualité des valeurs mesurées.

- Depuis 2002, un second point fixe est mesuré lors des levés topographiques.

Ce point se situe à proximité immédiate du tachéomètre et favorise le positionnement de l'instrument dans le repère par une méthode classique de topographie dénommée bilatération. Le calcul consiste à établir les coordonnées de l'intersection des cercles centrés sur les deux points de repères fixes :

- Le rayon des cercles correspond à la mesure de distance du tachéomètre ;
- la position des points de repère est connue dans le repère ;
- L'établissement d'une solution unique de l'équation est facilité par la connaissance approximative de la position de l'instrument.

Cette méthode de bilatération a permis de retrouver la position du tachéomètre pour les levés effectués depuis 2002. Les points mesurés ont ensuite pu être replacés dans un référentiel fixe et invariant entre les dates de mesure. Entre 2002 et 2004, la variabilité relative de positionnement du tachéomètre est de 15 cm en moyenne, elle atteint 30 à 40 cm au maximum. Les erreurs maximales dues aux problèmes de mise en station ont également été estimées (Figure II.4). Elles donnent une bonne idée de l'imprécision des levés qui ne peuvent être replacés dans un référentiel invariant. Pour un positionnement faux à 15 cm, l'erreur sur la mesure peut atteindre 65 cm en abscisse et en ordonnée pour un point situé en limite de zone d'étude. Cette erreur monte entre 1,3 et 2 m pour un positionnement à 50 cm.

Ces résultats montrent bien la nécessité de prendre soigneusement en compte la méthode de mise en station, lorsque des mesures topographiques précises et des comparaisons veulent être effectuées. Les problèmes rencontrés sur la plage du Truc Vert justifient que notre étude se limite à l'analyse d'un profil central unique. Pour exploiter les données, il semble également nécessaire d'établir l'hypothèse d'un comportement homogène de la plage autour de cet axe. Mais il apparaît délicat de mesurer de très petites modifications morphologiques entre des profils qui ne sont pas mesurés exactement au même endroit dans le temps. Toute la difficulté d'analyse de ces données réside dans le fait d'extraire des renseignements précis sur la morphologie des barres sans omettre les imprécisions dues à mise en station. Le chapitre suivant présentera en détail la stratégie employée pour analyser ces mesures topographiques.

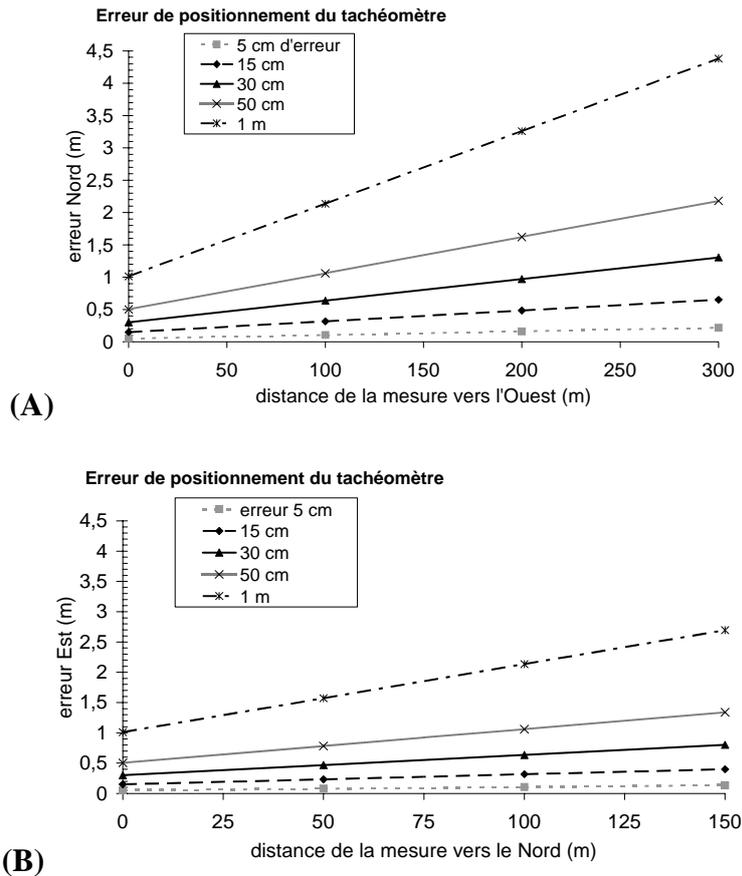


Figure 2.4 : Erreur de positionnement d'un point topographique en raison d'une mise en station imprécise. Les droites correspondent à différentes erreurs de positionnement du tachéomètre de 5 cm à 1 m. Elles indiquent l'erreur de positionnement en fonction de la distance du point mesuré. (A) mesure vers l'Ouest ; (B) mesure vers le Nord.

1.3. Stratégie d'échantillonnage et rôle du porteur de mire

La qualité des mesures topographiques par tachéométrie dépend en premier lieu de la précision et de la mise en station de l'instrument. Mais la pertinence des points mesurés est tout aussi importante pour pouvoir interpréter ultérieurement les données collectées. Sur cet aspect, le rôle du porteur de mire est fondamental pour appliquer une stratégie d'échantillonnage. Dans cette étude de la plage du Truc Vert, la stratégie d'échantillonnage est basée sur le suivi dans le temps d'un profil cross-shore. Cette méthode permet une observation très simplifiée des morphologies et correspond à une vision classiquement rencontrée dans l'étude des plages à barres (cf chapitre I). Elle vient en complément des analyses longshore de De Melo (2003).

Dans ce cadre, le rôle du porteur de mire consiste tout d'abord à se placer précisément sur le profil cross-shore. Cet aspect n'est pas forcément évident sur une plage où les repères visuels sont rares et les alignements particulièrement difficiles à suivre en bas de plage. La difficulté de placement sur le profil entraîne une légère imprécision des données qui peut s'ajouter aux problèmes de mise en station. Une fois en position sur le profil d'étude, le porteur de mire doit repérer les points caractéristiques de la morphologie. Ce travail d'observation consiste à positionner les ruptures de pente, sommets de barres, fonds de baïnes, inversions de pente, etc. C'est une étape capitale car la qualité des analyses géomorphologiques dépendront en grande partie de la pertinence des points mesurés. La pratique montre cependant que la reconnaissance des points caractéristiques reste subjective. Un sommet de barre peu marqué sera déterminé à ± 1 ou 2 mètres, tandis qu'une rupture de pente bien nette pourra être observée à ± 20 cm. Des analyses méthodologiques beaucoup plus poussées seraient utiles pour connaître plus précisément les imprécisions dues au placement du porteur de mire.

1.4. Bilan de la méthode de mesure par tachéométrie

Le tachéomètre est un instrument efficace pour la mesure topographique. Il permet de positionner un point de la plage émergée dans un repère tridimensionnel. Sa précision est néanmoins dépendante d'une mise en station correcte, ce qui n'a pas toujours été le cas sur la plage du Truc Vert. La mise en station imprécise de l'instrument pose des soucis pour comparer les profils de la base de données. La mesure systématique d'un point fixe dans le temps a toutefois permis d'obtenir des altitudes fiables. De plus, l'emplacement du point fixe sur l'axe des ordonnées a l'avantage de réduire en grande partie les erreurs de mesures dans cette direction (cross-shore). En revanche, la qualité du positionnement en abscisse (dans la direction parallèle à la côte) ne peut pas être améliorée. Ce problème reste limité dans le cadre de notre étude qui se focalise sur l'analyse d'un unique profil central cross shore. Il est malgré tout nécessaire de faire l'hypothèse d'une morphologie homogène autour de la zone d'étude. Cette partie a également mis en lumière l'importance du travail du porteur de mire. Ainsi, la qualité des choix effectués pour mesurer les points caractéristiques du terrain se retrouve dans les analyses géomorphologiques ultérieures. L'hypothèse d'une morphologie homogène autour de la zone d'étude permet de négliger les imprécisions liées à un placement approximatif de la mire sur le profil mesuré.

Dans la partie suivante, nous détaillerons les principes des méthodes d'observation par GPS.

2) Utilisation du GPS pour l'étude morphologique des plages

D'après Brabant (2000) et Leica Geosystem (2001)

2.1. Principe de fonctionnement du système GPS :

Le système GPS fournit le positionnement d'un point dans un référentiel géodésique. Son principe repose sur la réception et l'exploitation de messages émis par un ensemble de satellites. Dans un premier temps, un récepteur GPS capte les signaux émis depuis l'espace. Ensuite, il décode et interprète ces informations pour calculer une position. Ce calcul est basé sur l'estimation de la distance D séparant le récepteur GPS d'un satellite observé. Le point GPS se situera donc sur la sphère de rayon D , centrée sur le satellite. L'intersection de 3 sphères de ce type permet, en théorie, de déterminer une position dans les 3 dimensions du repère (Figure II.5).

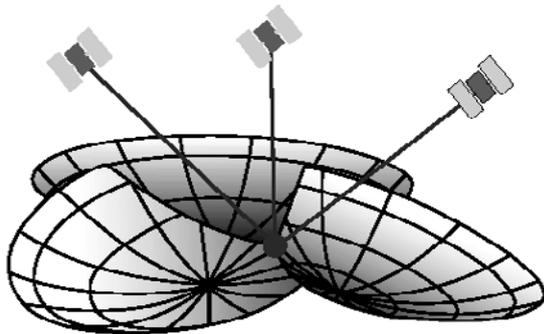


Figure II.5 : Principe de positionnement GPS. L'intersection de 3 sphères imaginaires centrées sur les satellites, de rayon équivalent à la distance satellite – récepteur, donne la position du récepteur. D'après Leica Geosystem (2001).

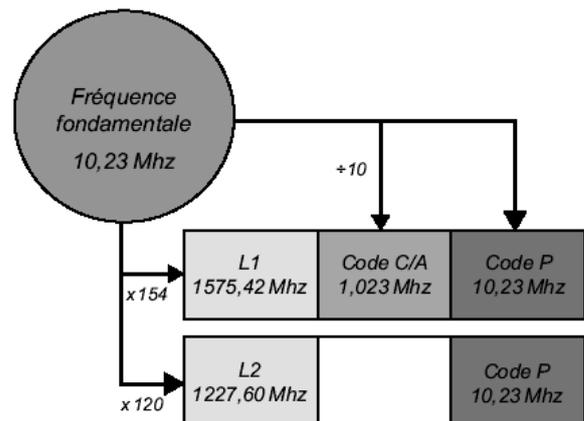


Figure II.6 : Structure du signal GPS. La fréquence fondamentale est générée par une horloge atomique de très haute précision, les ondes porteuses L1 et L2 et la modulation des codes dérivent de cette onde fondamentale. D'après Leica Geosystem (2001).

Le signal généré par les satellites GPS est à la base de la méthode de positionnement. Les informations sont émises sous la forme de deux ondes radio porteuses d'un code et d'un message modulés (Figure II.6). La modulation d'une onde consiste à superposer un signal à une onde porteuse. La première onde porteuse (L1) est émise à 1 576,42 Mhz. Elle est

modulée par 2 codes, le code C/A à 1,023 Mhz est le code P à 10,23 Mhz. La seconde onde porteuse (L2) émise à 1 227,6 Mhz est modulée par le code P (Figure II.7).

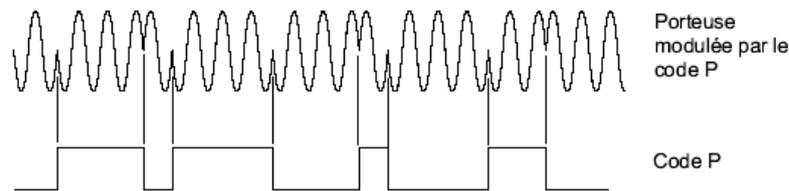


Figure II.7 : Modulation d'un code P binaire sur l'onde porteuse.
D'après Leica Geosystem (2001).

Ces codes binaires sont des tops horaires, ils indiquent l'heure d'émission de l'onde. Le message pour sa part est modulé à 50 Hz. Il fournit des indications précieuses sur le fonctionnement du satellite :

- position et estimation de la trajectoire future
- état de fonctionnement général et dérive des horloges atomiques internes
- paramètres de correction de la vitesse de déplacement de l'onde (correction atmosphérique).

Le code de l'onde est utilisé pour estimer une position. En comparant l'heure d'émission de la porteuse à l'heure d'arrivée, le récepteur peut calculer la durée du trajet depuis le satellite (Figure II.8). La connaissance de la vitesse de propagation de l'onde (aux alentours de la vitesse de la lumière) permet de déterminer la distance D. En fait, D est qualifiée de pseudo-distance, car les calculs sont largement entachés d'erreurs, ce qui empêche le positionnement très précis.

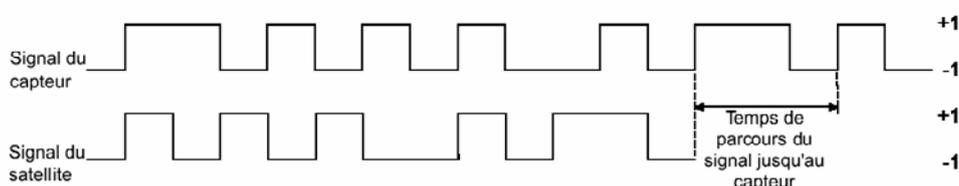


Figure II.8 : Comparaison du signal satellitaire avec le top horaire généré par le récepteur. Le décalage permet de connaître le temps de parcours. L'estimation précise de cette durée est nécessaire au calcul de la pseudo-distance. D'après Leica Geosystem (2001).

Chaque type d'erreur est introduit dans le système d'équations d'intersections des sphères afin d'être déterminé. La première imprécision à résoudre provient de problèmes de

synchronisation entre l'horloge GPS des satellites et celle du récepteur. L'utilisation d'un quatrième satellite fournit une solution pour réduire ce décalage. D'autres erreurs sur les pseudo-distances sont indiquées dans le message modulé à 50 Hz, elles sont en partie corrigées par le contenu du message. Une incertitude importante sur le positionnement existe également en raison de la fréquence relativement faible du code C/A (dont l'abréviation signifie « Coarse Acquisition » ou acquisition grossière). Le code P (pour Précision) permet de meilleurs résultats mais n'est pas accessible pour une utilisation civile. De plus, certaines configurations géométriques de la constellation satellitaire produisent une dilution de la précision (DOP). Cet effet est estimé par le paramètre GDOP (Geometric Dilution Of Precision), défini comme inversement proportionnel au volume compris entre les satellites et le récepteur (Figure II.9).

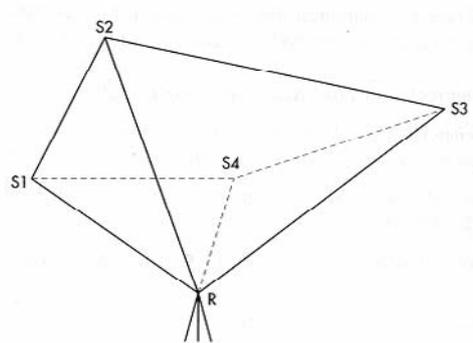


Figure II.9 : Principe de calcul du GDOP. R représente le récepteur ; S, les satellites.
D'après Brabant (2000).

Un GDOP élevé (supérieur à 8) est le signe d'une mauvaise géométrie des satellites qui seront situés trop bas sur l'horizon. Cette situation va entraîner une surface d'erreur plus importante (Figure II.10). Les ondes radio vont alors traverser l'atmosphère et l'ionosphère sur une plus grande distance, ce qui va détériorer encore la qualité du signal. Le paramètre GDOP doit donc être surveillé pour obtenir des mesures correctes.

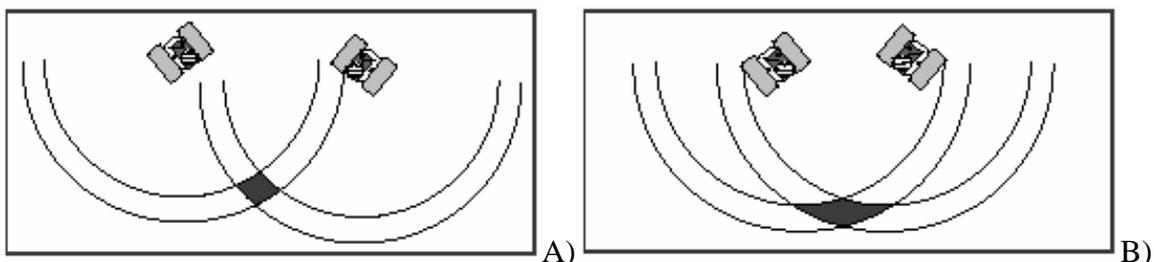


Figure II.10 : Relation entre le paramètre GDOP et les incertitudes du positionnement.
A) Bonne répartition spatiale des satellites = incertitude de position faible.
B) Répartition spatiale des satellites défavorable = incertitude de position élevée.
D'après Leica Geosystem (2001).

En tout cas, un positionnement d'une précision de 5 à 20m est largement envisageable avec un traitement soigné du code C/A, des messages de correction et une bonne configuration géométrique de la constellation. Ces performances sont facilement obtenues par les récepteurs classiques du marché, utilisés pour la navigation de plaisance ou le positionnement des voitures. De tels instruments portables et bon marché sont couramment utilisés sur la plage du Truc Vert pour cartographier les contours des barres sableuses (voir partie I.C.4 et De Melo, 2003).

2.2. Méthodes différentielles

Pour utiliser les techniques de GPS en topographie, il faut mettre en oeuvre des méthodes beaucoup plus précises que celles des récepteurs communs. Des améliorations notables sont apportées par les méthodes différentielles, dont le principe consiste à comparer les observations de 2 récepteurs.

- Méthode différentielle sur le code

Les corrections envoyées par les messages modulés sont grandement améliorées par l'utilisation d'une seconde station de réception positionnée sur un point connu. Cette première méthode de GPS différentiel consiste donc à corriger les calculs effectués sur le code. La station de référence, de coordonnées connues, va fournir après calcul une position très précise des satellites observés par le récepteur mobile. Car effectivement, sous l'effet d'actions perturbatrices telles que la non-sphéricité de la Terre, les marées océaniques et l'attraction du soleil et de la lune, les orbites réelles des satellites diffèrent bien souvent des trajectoires calculées. Les erreurs d'horloges des satellites sont également mieux quantifiées. Cette technique de correction permet une précision métrique pour un positionnement en latitude et longitude.

- Post-traitement de la phase

Les incertitudes liées à la faible fréquence du code C/A réduisent notablement la qualité du positionnement, elles sont éliminées en travaillant sur la phase des ondes porteuses. Des récepteurs perfectionnés vont donc analyser l'arrivée de petites longueurs d'ondes (environ 20 cm) émises à haute fréquence afin d'obtenir une excellente précision. Un traitement

préliminaire est nécessaire, il consiste à corriger l'onde de l'effet Doppler. Cette déformation due au déplacement relatif de la source et du récepteur affecte la fréquence du signal. La correction est rendue possible en comparant la fréquence de l'onde reçue avec une onde constante générée par le capteur. Une fois l'effet Doppler corrigé, le principe du traitement de la phase des ondes GPS se base sur des méthodes différentielles. L'utilisation des mesures de 2 récepteurs permet de simplifier les équations de positionnement du mobile. La méthode des doubles différences employée généralement s'appuie sur l'observation simultanée de 2 satellites par les 2 capteurs GPS (Figure II.11). Elle élimine du calcul les erreurs d'horloges des satellites et des récepteurs ainsi que les erreurs sur les coordonnées des satellites.

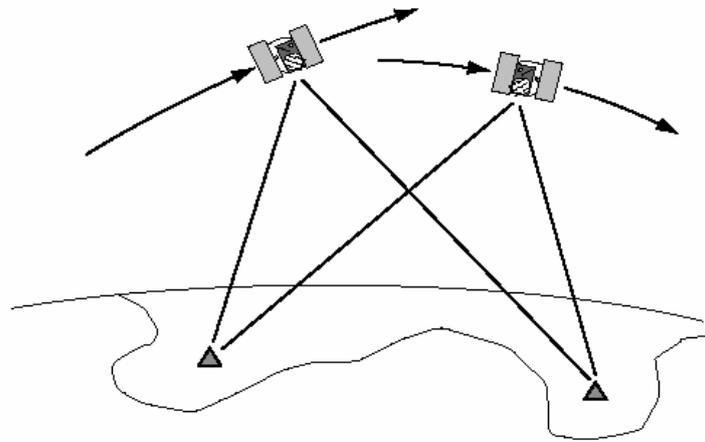


Figure II.11 : Principe de la méthode des doubles différences. 2 satellites sont observés simultanément par 2 récepteurs. Cette technique différentielle permet de simplifier les équations de positionnement. D'après Leica Geosystem (2001).

Une inconnue primordiale reste encore à déterminée pour connaître la distance séparant le mobile du satellite donné : c'est l'ambiguïté de phase. Cette ambiguïté concerne le nombre de longueurs d'onde séparant le satellite du récepteur. Des procédés statistiques complexes doivent être mis en œuvre pour résoudre ce problème. Les grands principes du traitement sont présentés dans la figure II.12.

Les techniques de positionnement par traitement de la phase de l'onde GPS nécessitent de mettre en commun les mesures des 2 récepteurs. Le calcul de coordonnée s'effectue donc en post-traitement, après l'acquisition des données sur le terrain. De plus, les erreurs ionosphérique et troposphérique obligent à des temps de stationnement longs sur les points de mesure, avant d'obtenir des moyennes convenables (plusieurs minutes parfois). Par conséquent, ces observations sont dites statiques. Elles assurent d'excellentes précisions, de l'ordre de 5mm, sur les coordonnées en 3 dimensions.

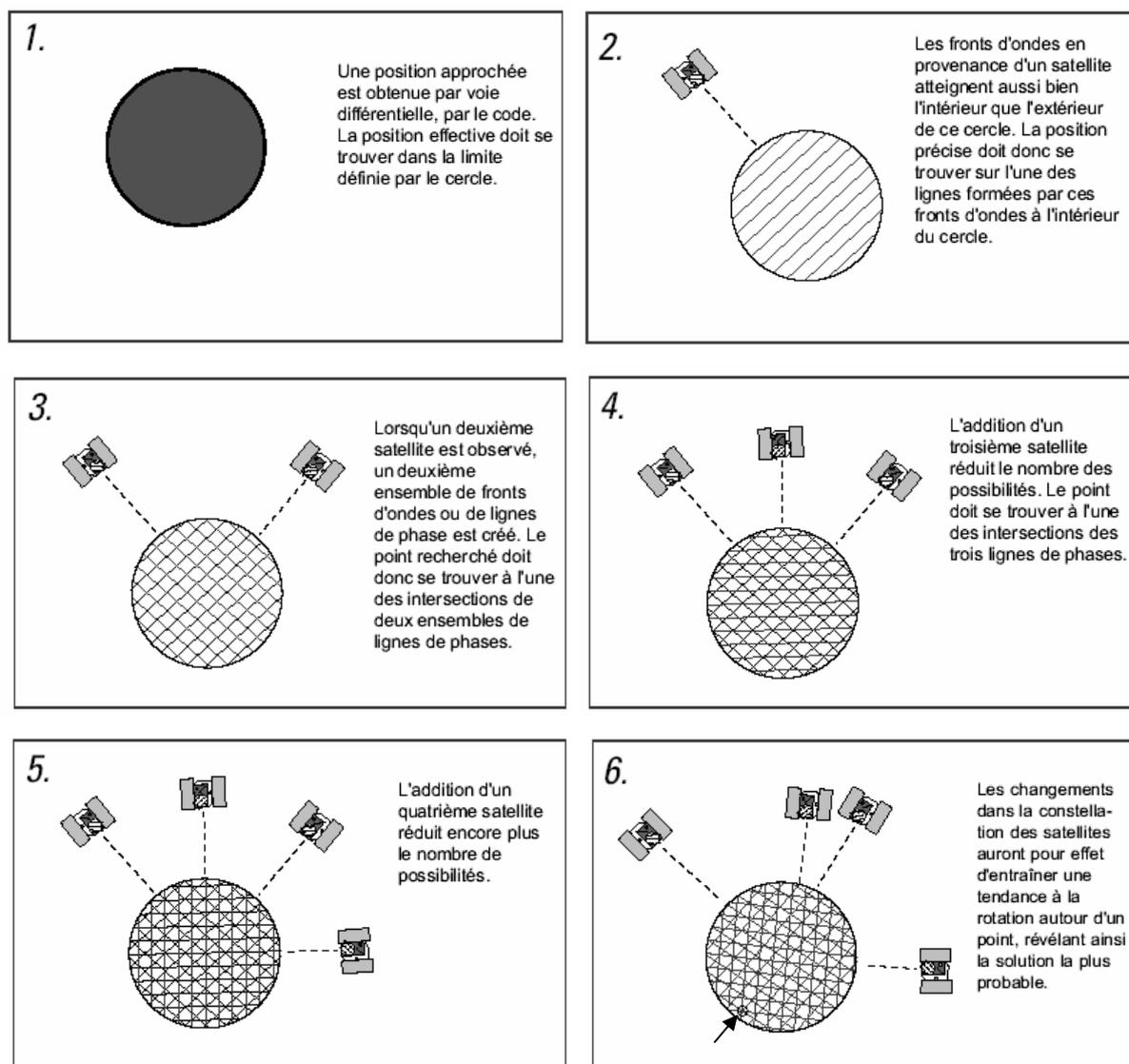


Figure II.12 : Principes généraux de résolution de l'ambiguïté de phase.
D'après Leica Geosystem (2001).

2.3. Récepteurs bi-fréquences et positionnement en temps réel

Les méthodes de mesures statiques fournissent des données très précises mais ne permettent pas le levé rapide d'un nombre important de positions. Elles sont donc inefficaces sur la zone de mesure du Truc Vert où les barres sableuses doivent être caractérisées en détail par de nombreux points dans un délai court. Pour obtenir des mesures plus rapidement, il est donc nécessaire de diminuer les temps d'observation et d'améliorer la correction des erreurs atmosphériques. Ainsi, avant d'arriver au récepteur, les signaux traversent deux couches de l'atmosphère dont les caractéristiques provoquent des perturbations dans la propagation des ondes. La troposphère est la couche inférieure de l'atmosphère, siège des événements météorologiques. Sa concentration en vapeur d'eau influence le signal en provoquant un

allongement du trajet radioélectrique. Pour corriger son effet, des modèles de diffusion troposphérique sont utilisés. Il faut également veiller à la géométrie de la constellation GPS (paramètre GDOP) car des satellites trop bas sur l'horizon induisent un trajet plus long dans l'atmosphère et par conséquent des erreurs de propagation importantes. L'ionosphère est une couche dont l'altitude varie entre 80 et 500 km. Les rayons ultraviolets de l'activité solaire y agissent et ionisent une partie des molécules gazeuses présentes, en libérant des électrons. L'onde GPS qui rencontre une zone ionisée est ralentie proportionnellement à l'augmentation de densité des électrons du milieu (Figure II.13).

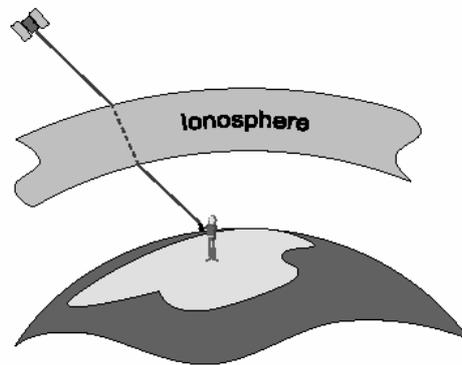


Figure II.13 : La réfraction ionosphérique perturbe le trajet et la vitesse de l'onde GPS.
D'après Leica Geosystem (2001).

Pour s'affranchir de l'erreur parfois importante due à la réfraction ionosphérique, il est possible d'utiliser des récepteurs bi-fréquences qui travaillent avec les ondes L1 et L2. En sachant que le ralentissement d'un signal radio qui traverse l'ionosphère est inversement proportionnel à sa fréquence, le traitement consiste à comparer les heures d'arrivée des deux signaux afin d'estimer avec précision le délais de propagation. Les corrections ionosphériques sont effectuées rapidement par les récepteurs bi-fréquences, qui limitent alors largement les temps d'initialisation du système GPS et de stationnement des points topographiques. Les mesures sont dites cinématiques car les points topographiques peuvent être réalisés très rapidement. De plus, le calcul en temps réel des positions est possible en ajoutant une liaison radio entre le récepteur mobile et la base de référence. Ces méthodes de topographie GPS cinématique en temps réel sont idéales pour le levé rapide d'une zone, avec une précision de 2 à 3 cm.

2.4. Intérêts des mesures GPS sur la plage du Truc Vert

Depuis 1999, les outils GPS sont utilisés sur la plage du Truc Vert. De petits GPS simples sont notamment utilisés pour suivre la forme longshore des structures sableuses intertidales. Cette méthode permet d'observer plusieurs barres et baines sur une longueur d'environ 2 Km de littoral (Annexe 2, sur 1 Km longshore). Mais le repérage des contours est particulièrement subjectif et nécessiterait de sérieux tests méthodologiques pour être validé comme une méthode de quantification fiable.

Des outils plus perfectionnés, utilisant la méthode différentielle sur le code, ont été employés depuis 1998 lors de mesures bathymétriques de la plage sous-marine. La technique de bathymétrie sera détaillée dans la prochaine partie de ce chapitre.

Depuis 2004, des mesures topographique ont été effectuées régulièrement grâce à un GPS différentiel bi-fréquence permettant le positionnement en temps réel. Cette technique possède plusieurs points communs avec la tachéométrie :

- Une mise en station précise doit être opérée ;
- La mesure de points de contrôle fixes dans le temps est nécessaire pour vérifier la qualité des données ;
- Les erreurs sont du même ordre de grandeur (centimétrique) ;
- Le travail du porteur de mire et du porteur de récepteur GPS mobile est identique.

Mais le GPS cinématique est un outil plus moderne que le tachéomètre, et il possède certaines caractéristique avantageuse pour l'étude des plages :

- Un seul opérateur est nécessaire
- Un code et une description peuvent être ajouté à la mesure afin de faciliter l'analyse ultérieure des points caractéristiques de la morphologie
- La connaissance en temps réel de la position du récepteur mobile permet de se positionner très précisément sur un profil préétabli.

Cette caractéristique rend possible la mise en place un suivi multi-profil efficace sur la plage du Truc Vert. Les levés topographiques sont constitués de 13 profils cross-shore, espacés de 25 m sur une zone de 300 m longshore (Figure II.14). La quantité d'informations collectées au cours de ce type de levé est bien plus importante et complète que les mesures en profil unique. Cette stratégie d'échantillonnage a été établie pour plusieurs raisons :

- 1) Il semblait important de poursuivre les analyses cross-shore de la plage ;
- 2) Il était également nécessaire d'améliorer la qualité des mesures longshore ;
- 3) Le nombre de profil est la largeur de la zone ont été dictée avant tout par un compromis entre le temps d'émersion de la plage intertidale et le nombre de points qu'un opérateur peut mesurer pendant cette période.

L'analyse de ces levés multi-profil est une perspective directe des travaux présentés dans cette thèse (Annexes 2, 3 et 4).

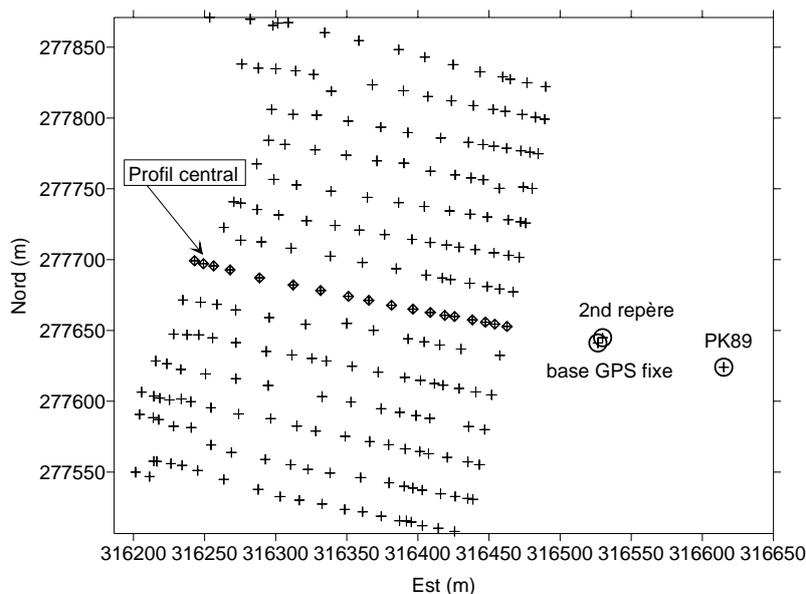


Figure II.14 : Exemple d'un levé multi-profil sur la plage du Truc Vert. Coordonnées exprimées en Lambert 3 Sud.

D'autres avantages de la topographie par GPS permettent de faire progresser les observations et la stratégie d'échantillonnage sur les plages de la côte aquitaine.

- Les mesures GPS sont directement positionnées dans un référentiel géodésique. Cette caractéristique permet de travailler sur de très grandes zones du littoral girondin et de comparer les informations avec d'autres sites d'étude.
- De plus, la possibilité de mesures cinématiques continues donne la possibilité d'installer le récepteur GPS mobile sur un véhicule, afin d'augmenter considérablement la surface mesurée.

Enfin, nous verrons dans la prochaine partie que le GPS cinématique peut aussi faire progresser la qualité des mesures bathymétriques.

B) Mesures géomorphologiques de la plage sous-marine

L'étude morphologique du domaine sous-marin nécessite la mise en place de méthodes bathymétriques. Classiquement, la bathymétrie consiste à mesurer la profondeur fond grâce à un échosondeur. Cet instrument analyse le temps de l'aller-retour d'une onde acoustique se réfléchissant sur le fond. Le levé bathymétrique s'effectue alors en positionnant géographiquement toutes une série de mesures. L'analyse et le traitement des résultats fournissent ensuite une carte morphologique. La bathymétrie s'effectue depuis une embarcation. C'est donc une méthode moins directe que la topographie, où l'opérateur se place sur le point à étudier, en fonction de son observation de terrain. Cette caractéristique implique également une étape supplémentaire pour corriger les mouvements de la mer et du bateau provoqués par les houles et les marées.

Ce chapitre a pour but de décrire les techniques de mesures et le traitement des données collectées au cours des différentes missions océanographiques qui ont eu lieu sur la plage sous-marine du Truc Vert. Pour cette étude, plusieurs types de mesures bathymétriques sont utilisés.

- 1) Une carte ancienne du SHOM, datant de 1967.
- 2) Des mesures par échosondeur monofaisceau de 1998 et 1999.
- 3) Un levé par sondeur multifaisceaux de 2002.

Les mesures d'imagerie par sonar latéral présentées dans le chapitre I.C.4 ont un principe proche de la bathymétrie. L'acquisition et le traitement de ces données seront présentés dans une quatrième partie.

1) Analyse d'une carte marine ancienne

1.1. Collecte des données

Les campagnes bathymétriques sont rares sur la côte Aquitaine car les conditions de mesures y sont difficiles. Un unique levé est disponible dans les archives du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine). Il date de 1967, mais est toujours utilisé actuellement pour les cartes marines. Les observations bathymétriques de l'hydrographe sont reportées sur la minute de sonde, qui est une carte en coordonnées géographiques (Figure

II.15). Les indications complémentaires sont synthétisées dans le rapport de mission conservé à l'EPSHOM. La campagne de mesure a eu lieu pendant l'été 1967, à une saison où les conditions d'études sont les plus clémentes. Le rapport de mission signale néanmoins la présence systématique d'une houle résiduelle qui affecte la qualité des données. Le positionnement du navire dans un repère géographique en 2 dimensions est effectué à l'aide d'un système Trident, avec une précision de 5 m. Cette technique repose sur des principes similaires au système GPS, elle est basée sur la réception d'ondes radios émises depuis des balises situées à terre, à des coordonnées connues. La position du navire est calculée par triangulation, à partir du traitement de la phase des ondes reçues. Un marégraphe situé au large d'Arcachon a permis la correction des hauteurs de marée durant la mission pour référencer les sondes par rapport au zéro marin.

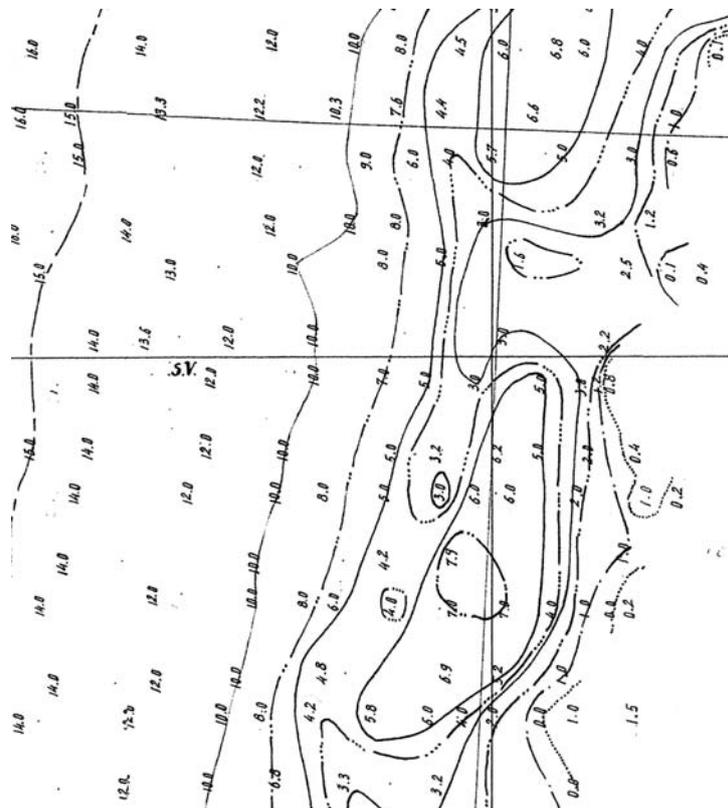


Figure II.15 : Détail de la minute de sonde de la mission SHOM de 1967 au large du Cap Ferret. La position des sondes est représentée par le point des décimales de la valeur de profondeur. Quadrillage droit en projection Lambert 3 Sud. Les lettres S.V. représente les initiales de l'hydrographe qui a tracé la carte.

1.2. Maillage des données

L'étude de données anciennes passe tout d'abord par la numérisation de la minute de sonde. A l'aide d'une table à digitaliser, les coordonnées de chaque point sont saisies sur un ordinateur dans la projection plane Lambert 3 sud. Pour la zone d'étude du Truc Vert, plus de 300 points de sondes ont été digitalisés. Une fois les données sauvegardées, une étape de reconstruction de la forme générale de la plage est nécessaire avant l'analyse. En effet, contrairement à la topographie, la répartition des points de mesure n'est pas décidée par un opérateur qui analyse directement le relief du terrain. Pour extraire des points caractéristiques et des formes réalistes, un modèle morphologique doit donc être déduit des mesures disponibles. Cette étape de traitement ne crée pas une représentation de la réalité, mais une approximation de la vérité terrain et des mesures ; c'est un passage qui reste néanmoins absolument nécessaire pour mener à bien une analyse morphologique correcte. Dans cette étude, les traitements ont été effectués à l'aide du logiciel SURFER dont le principe premier consiste à créer une grille régulière représentant au mieux les données brutes. L'établissement de ce tableau numérique, aussi appelé MNT (Modèle Numérique de Terrain) se nomme l'étape de maillage. Différents algorithmes calculent des moyennes et des interpolations entre les données brutes pour déterminer une valeur de profondeur à chaque nœud de la grille.

Plusieurs étapes précèdent la mise en place du MNT. Une première décision à prendre concerne la taille de la maille. Les méthodes d'échantillonnage et les statistiques de densité de points et de séparation entre voisin calculées sont des indications importantes pour définir la maille élémentaire du MNT (Tableau II.1).

Densité		1 point pour	
surface	nbre de points	un carré de	
4650000	312	122,08	m de côté
Distance entre plus proche voisins			
minimum	maximum	moyenne	
25,86	181,82	88,89	m

Tableau II.1 : Statistiques sur le jeu de données de la bathymétrie SHOM 1967.

Le temps de calcul, la taille finale de la grille et le rendu visuel des isobathes tracés par le logiciel sont également des points à prendre en considération. Pour ces données, une maille carré de 10 m a été choisie et semble être un compromis acceptable. Les points peuvent ensuite être moyennés ou filtrés selon des critères paramétrables. Dans le cas de la

bathymétrie Shom 1967, le nombre de points de mesure n'est pas assez important pour utiliser des moyennes. De plus, la taille des mailles a été établie pour correspondre au mieux à la répartition de ces sondes. La dernière étape du maillage est primordiale, elle consiste à définir et à paramétrer le mode de calcul de la profondeur des nœuds du MNT. En général, les algorithmes sont utilisés pour pondérer la valeur des points de mesures situés à proximité des nœuds à déterminer. Les modalités de calcul des pondérations varient entre les algorithmes. Le type d'échantillonnage et la répartition des points de mesure influencent également très fortement les résultats. Dans cette étude, 2 algorithmes de maillage ont été testés.

a) Triangulation et interpolation linéaire

Cette méthode a pour but de créer une mosaïque de triangles qui relie les points de mesure (Figure II.16 b). L'algorithme teste la forme des triangles pour qu'ils soient le plus fin possible (méthode Delaunay). Parfois, certains points de mesure peuvent être « oubliés » entre les triangles, afin de permettre une meilleure configuration ; c'est un désavantage non négligeable pour l'interpolation de données peu nombreuses. Lorsque la mosaïque de triangles est en place, le calcul de la profondeur des nœuds de la grille débute. Pour un triangle donné, la valeur des mailles se trouvant entre les sommets est définie en pondérant les 3 points de mesures du triangle, en fonction de leur distance. Le nœud se trouve ainsi sur la surface linéaire du triangle. Le principal inconvénient de cette méthode réside dans une représentation parfois trop anguleuse de la morphologie du terrain, lors du tracé des isobathes (Figure 2.16 a). En revanche, elle est très rapide et préconisée pour un nombre de données importantes (< à 1000 observations), avec une répartition régulière des mesures.

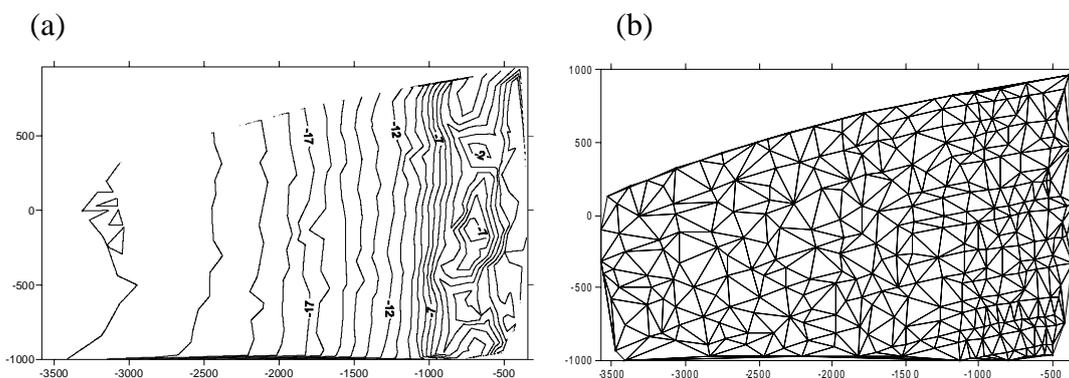


Figure II.16 : (a) Carte bathymétrique Shom 1967 basée sur une grille obtenue par triangulation et interpolation linéaire. Equidistance des isobathes = 1m. Projection Lambert 3 sud.

(b) Mise en place des triangles à partir des points de mesures pour le calcul de valeur des nœuds de la grille.

b) Kriging

Les méthodes d'interpolation géostatistique ont été développées par Matheron et Krige dans le but d'analyser les données des sondages effectuées dans des mines d'or d'Afrique du Sud (Swan et Sandilands, 1995). Ces méthodes puissantes sont très employées en géologie, même si leur mise en place reste complexe. Le logiciel SURFER facilite leur utilisation dans un module nommé « Kriging » et un menu appelé « Variogram ». Dans la suite de l'étude, nous emploierons le terme de « kriging » pour exprimer un maillage établi selon les méthodes géostatistiques.

Le principe du kriging est basé sur l'analyse des tendances de la surface mesurée, sur le calcul de semi-variance et l'élaboration d'un variogramme. L'analyse de tendance permet de simplifier la forme d'une surface en l'exprimant par une formule mathématique simple. La semi-variance est ensuite utilisée pour comparer les variations de profondeur (z) des points de mesures éloignés d'une distance (h). Le variogramme représente alors l'ensemble des semi-variances pour des distances (h) croissantes. Sur une surface géologique, dont la valeur des points de mesures n'est pas uniquement le fruit du hasard, on constate de faibles valeurs de semi-variance pour des distances h faibles : les mesures proches possèdent une certaine homogénéité. Lorsque la distance de comparaison augmente, la semi-variance augmente jusqu'à un seuil qui représente la variance totale des mesures. Plusieurs variogrammes peuvent être calculés selon différentes directions, afin d'établir le degré d'anisotropie des mesures. Ce type d'approche permet donc une description précise de la répartition des données dans l'espace. Les variogrammes sont ensuite utilisés pour établir les pondérations sur les noeuds de grille, en fonction de la distance aux points mesurés. Le but des méthodes géostatistiques et du kriging est d'obtenir un variogramme complet qui décrit correctement la répartition des données, afin d'obtenir des valeurs de grilles relativement réalistes. L'utilisation et l'optimisation de cette méthode demande cependant beaucoup de travail et une connaissance parfaite de son jeu de données. Pour cette étude, seules les options par défaut du module « Kriging » du logiciel SURFER ont été utilisés.

Le calcul des valeurs résiduelles, soustraction des mesures et des estimations du MNT montre que le kriging est une méthode réellement plus efficace pour décrire les données de topographie sur une plage. L'erreur moyenne du kriging est de 2,5 cm alors qu'elle atteint 4,5 cm pour la triangulation. Les différences maximales sont encore plus significatives : 22 cm pour

la méthode kriging, 1,5 m pour la triangulation. De plus, la représentation par lignes de niveaux semble plus lissée et plus satisfaisante (Figure II.17).

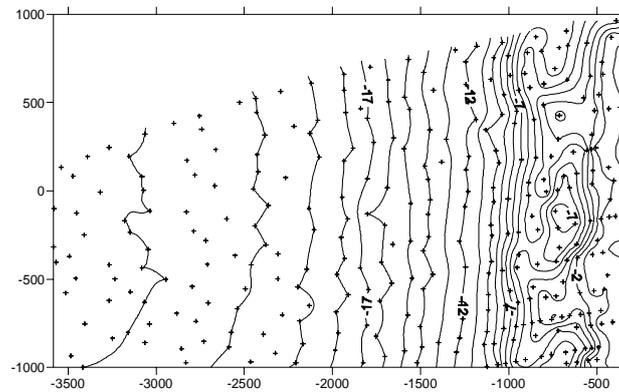


Figure II.17 : Carte bathymétrique Shom 1967 basée sur une grille obtenue par kriging, sur une maille de 10 m de côté. La carte finale a été recoupée pour éviter les interpolations hasardeuses dans les zones sans mesure (en haut à gauche). Projection Lambert 3 sud, centrée sur le PK89 du Truc Vert, avec rotation de 10°.

2) Bathymétrie monofaisceau

2.1. Acquisition des données

Les missions PNOC 98 et PNEC et PHES 99 ont permis la mesure de bathymétries sur le site du Truc Vert, par une technique de sondeur monofaisceau. Les sondeurs employés pour les petits fonds utilisent des fréquences élevées. Ce type d'instrument favorise une précision importante ; de plus, l'amortissement rapide de l'onde peu énergétique émise n'est pas un problème pour les fonds faibles. Les sondes sont positionnées au mètre près grâce à un GPS différentiel. Le système bathymétrique doit également intégrer un ordinateur qui synchronise et sauvegarde les signaux des capteurs. Cet aspect de la mesure est déterminant pour la précision des résultats et la mise en place de traitements ultérieurs.

Les bathymétries PNOC 98 et PNEC 99 ont été menées sur un zodiac, dans une zone de plage sous-marine peu profonde. Le zodiac est muni d'un sondeur Tritech PA 500 d'une fréquence de 500 kHz. L'acquisition est gérée à une vitesse de 2 Hz par un PC portable équipé du logiciel Bathy développé au DGO par Rodrigo Pedreros. Les mesures PHES 99 ont été obtenues dans une zone plus profonde avec le navire océanographique Côte de la Manche et les moyens de l'INSU. Les mesures sont réalisées sur des profils plus ou moins perpendiculaires à la côte, afin d'observer les variations de pente de la côte vers le large.

2.2 Précision et erreurs sur la mesure

Une donnée importante concernant la résolution des sondeurs est fournie par l'angle d'ouverture du faisceau. Cet angle permet de calculer la taille de la zone « insonifiée » sur le fond. Pour un sondeur Tritech PA 500 d'ouverture 6° , entre 10 et 20 m de profondeur, la surface de mesure représente alors un cercle de 1 à 2 m de diamètre (Figure 2.19 A). Le sondeur fournit donc une information moyenne pour cette zone. Par mer plate et mouvement nul de l'embarcation, il sera inutile de chercher une résolution supérieure avec ce type de sondeur.

D'autres erreurs dues à la position de l'embarcation dans l'espace dégradent également la qualité des mesures. Ces erreurs d'attitude sont généralement provoquées par la houle qui

soulève et abaisse le navire autour du niveau moyen de la mer (pilonnement) et provoque des variations d'angle (roulis et tangage). Par exemple, une houle de 1 m provoquera une erreur de pilonnement maximale de ± 50 cm autour du niveau moyen de la mer, dans le cas idéalisé d'une embarcation qui reste horizontale. Plusieurs solutions peuvent éviter ces imprécisions :

- Stationner le point mesuré suffisamment longtemps pour obtenir une mesure moyenne correcte.
- Appliquer une correction instantanée en mesurant une altitude à l'aide d'un GPS différentiel cinématique de précision centimétrique.

Dans le cas de mesures en zones côtières, à proximité de vagues déferlantes, les angles de roulis (balancement de côté) et de tangage (oscillation d'avant en arrière) peuvent vite devenir importants avec une petite embarcation. Pour une profondeur $P1$ de 10 m, un roulis de 10° provoquera une erreur de 1,75 m sur le positionnement de la sonde, de plus l'erreur de profondeur ($P2-P1$) est de 15 cm dans le cas d'un fond supposé plat (Figure II.18 b). Pour une profondeur $P1$ de 20 m et un roulis de 20° , l'erreur de positionnement est de 7,25 m et l'erreur de profondeur atteint 1,3 m. Ces erreurs ne sont pas compensées par la largeur de la zone insonifiée et ne doivent donc pas être négligées. Pour corriger ces imprécisions, il faut avoir recours à une centrale d'attitude qui mesure à très haute fréquence l'orientation du navire dans l'espace.

Les corrections fines d'angles d'attitude et de houle n'ont pas été mises en place pour les bathymétries étudiées. Le jeu de données présente donc une imprécision difficilement estimable.

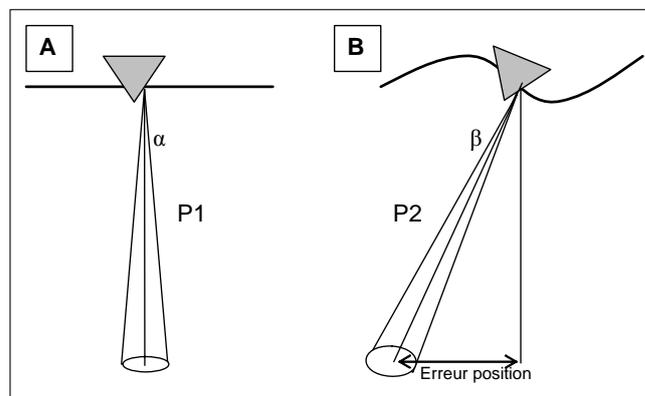


Figure II.18 : A) Surface de la zone mesuré en fonction de la profondeur $P1$ et de l'angle α d'ouverture du faisceau.

B) Erreur de positionnement et de mesure de profondeur $P2$ due à un angle de roulis β . Le pilonnement de la houle n'est pas pris en compte dans cet exemple.

2.3. Traitement des données

Une fois les missions de terrain terminées, une première étape de traitement consiste à lire les mesures et à formater ces informations dans des fichiers facilement exploitables pour les opérations ultérieures. Plusieurs corrections sont ensuite apportées aux données brutes. Tout d'abord, la profondeur du sondeur sous la surface de l'eau (le « sabot ») est ajoutée aux profondeurs mesurées. Cette profondeur est de -2,8 m sur le Côte de la Manche et -0,65 m sur le zodiac du DGO, dans le cas d'une embarcation équilibrée sur une surface d'eau horizontale.

Ensuite, il est nécessaire de corriger la hauteur de l'onde de marée. Pendant la mission Pnoc 98, les hauteurs d'eau ont été enregistrées par un capteur de pression S4. Après avoir déterminé la profondeur du capteur sous le zéro marin, les données ont été moyennées sur 5 min pour établir la hauteur moyenne du plan d'eau. Les corrections sont alors appliquées aux mesures de profondeur. Elles permettent de prendre en compte la marée, mais aussi l'effet combiné du vent, de la houle et de la pression atmosphérique sur le niveau de l'eau. Pour les missions PNEC 99 et PHES 99, la correction apportée est moins précise. Les hauteurs de marée ont été établies grâce aux simulations du logiciel WXtide corrigé (voir partie I.C.3.3).

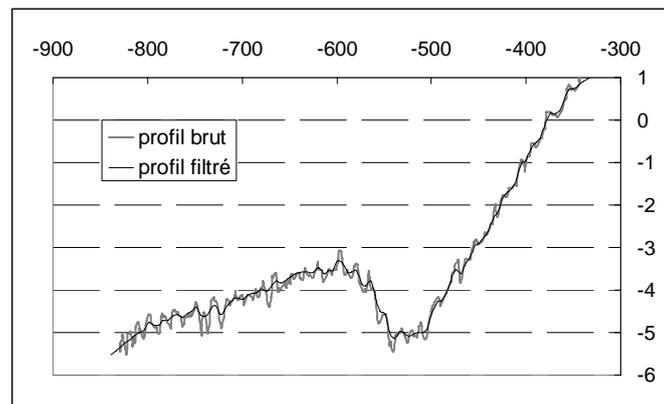


Figure II.19 : Comparaison du profil brut Nord 90 de la mission Pnoc 98 (trait noir) avec le profil filtré par moyenne dans une fenêtre de 5 m et interpolé par kriging, selon une maille de 10 m (trait gris). Le résultat montre des pics locaux réduits, mais les ondulations sont encore visibles : structures sédimentaires ou pilonnement due à la houle ?

Les erreurs de pilonnement et d'attitudes de l'embarcation dégradent aussi largement la qualité des données. La méthode employée pour limiter cet important bruit de fond consiste à filtrer les mesures en moyennant les informations dans un périmètre de 2,5 m tout autour des

points de mesures. Sur les profils bathymétriques très densément mesurés, on obtient alors une donnée représentative tous les 5 m (Figure II.19). Ce type de traitement permet de compenser légèrement l'effet de la houle sur les mesures, mais en contrepartie, il supprime des informations sur les morphologies de petites longueurs d'onde. Enfin, la suppression d'un grand nombre de données facilite l'interprétation et le maillage des fichiers moins volumineux.

Les tests pour le maillage des données PNOG 98 montrent que la méthode de kriging est la plus efficace. Les valeurs résiduelles calculées entre les mesures par des mailles de 5 ou 10 m sont inférieures à 10 cm en moyenne pour le kriging (77 cm d'erreur maxi) et dépasse 13 cm en triangulation (1,65 m d'erreur maxi).

3) Bathymétrie multifaisceaux

3.1. Acquisition des données

La bathymétrie par sondeur multifaisceaux est un moyen très efficace pour établir rapidement une cartographie complète de la morphologie du fond. Cette technologie permet en effet de couvrir l'intégralité d'une zone de mesure et de limiter ainsi au maximum les opérations d'interpolation. Elle repose sur l'analyse du signal d'une antenne perfectionnée, située sous la coque du bateau (Figure II.20). Cette antenne permet l'émission et la réception d'un certain nombre de faisceaux d'ondes sonores, qui balayent le fond perpendiculairement à la route du navire. Le temps d'émission-réception de l'onde est mesuré pour déterminer la sonde.

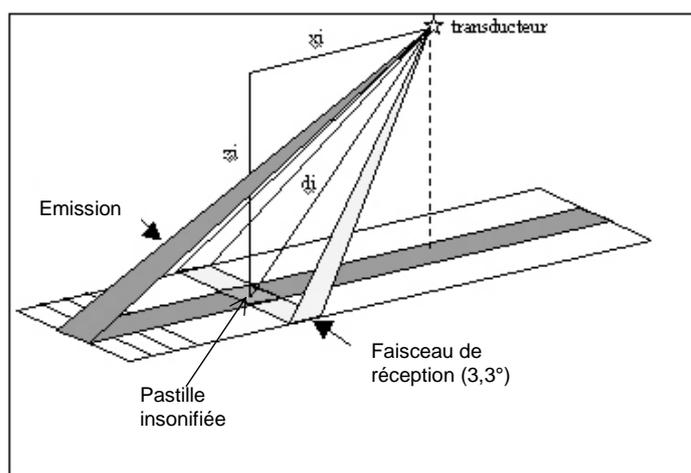


Figure II.20 : Principe du sondeur multifaisceaux basé sur la technique des faisceaux croisés. Une impulsion sonore est émise au travers d'un lobe d'émission étroit dans la direction longitudinale ($3,3^\circ$ pour EM 1000) et large transversalement (150 degrés, bande grise). La réception se fait à l'aide de faisceaux étroits dans le plan transversal ($3,3^\circ$ pour EM 1000, bande blanche). Pour chaque faisceau de réception, la zone du fond explorée ("pastille insonifiée") est l'intersection entre le lobe d'émission et le faisceau de réception.

Pour cette étude, un levé par sondeur multifaisceaux a été mise en œuvre au cours de la mission Itsas 6 de juillet et août 2002, à bord de navire océanographique Thallia de l'IFREMER. Le sondeur utilisé est de type Simrad EM 1000 à 60 faisceaux d'ondes ultrasonores émises à la fréquence de 95 kHz. Un cycle de mesures correspond donc à l'acquisition d'un ensemble de 60 sondes fournies par les faisceaux de l'instrument. Chaque cycle est enregistré à bord avec la position, le cap et l'attitude du navire grâce au logiciel Caraibes Temps Réel. Cette acquisition représente une masse de données considérables qui sont stockées sur CD ou bandes magnétiques.

3.2. Traitement des données

Le traitement de données s'effectue ensuite grâce au logiciel Caraibes Temps Différé. L'objectif principal du traitement est de replacer chaque sonde dans un repère géographique. La première étape consiste à positionner spatialement les 60 sondes d'un cycle, dans un référentiel centré sur le bateau, pour chaque cycle pris individuellement. Ce positionnement dépend principalement de la géométrie de l'antenne du sondeur et de l'attitude du navire. Pour le sondeur EM 1000, la zone de couverture représente 90 à 140 m entre 10 et 20 m de profondeur. De plus, chaque faisceau explore une zone de 0,5 à 1 m sur le fond. La précision de la mesure est estimée par le logiciel PAMES (Ifremer) entre 10 et 40 cm. La correction de marée peut être effectuée à ce stade du traitement. La seconde étape importante permet de replacer les sondes corrigées dans le repère géographique, grâce aux informations de navigation qui positionnent le navire à chaque cycle de mesure. La bathymétrie du Truc Vert représente ainsi près de 60 000 cycles, soit 3 600 000 mesures à positionner. Ce traitement informatique crée un fichier énorme qu'il est difficile d'utiliser en l'état pour la représentation en carte. La dernière étape consiste alors à établir un MNT qui va simplifier les informations disponibles. Pour ce type de maillage, l'interpolation n'est que rarement nécessaire, le but principal est de moyennner et de filtrer le nombre d'informations. Pour la carte établie, nous avons moyennné les mesures sur des mailles de 10 et de 20 m.

4) Sonar latéral à balayage

4.1. Principe et acquisition des données

Le sonar à balayage latéral fournit une image précise des fonds marins. Le principe de l'instrument est également basé sur l'émission et la réception d'un signal sonore dans le temps. Sur le sonar, les faisceaux sont très minces dans le plan horizontal et les fréquences d'émission relativement élevée (100 ou 500 kHz). De plus, le capteur est placé à proximité du fond pour obtenir des échos rasants. Ces particularités donnent un très bon pouvoir de résolution à ces instruments, qui peuvent mesurer la présence d'objets de faibles tailles (de 10 à 20 cm environ dans cette étude). Cette méthode est donc complémentaire de toutes les techniques de sondage employées précédemment, car elle permet de détecter la présence de figures sédimentaires de petites tailles qui sont filtrées habituellement. La nature sédimentologique du fond affecte aussi le signal du sonar.

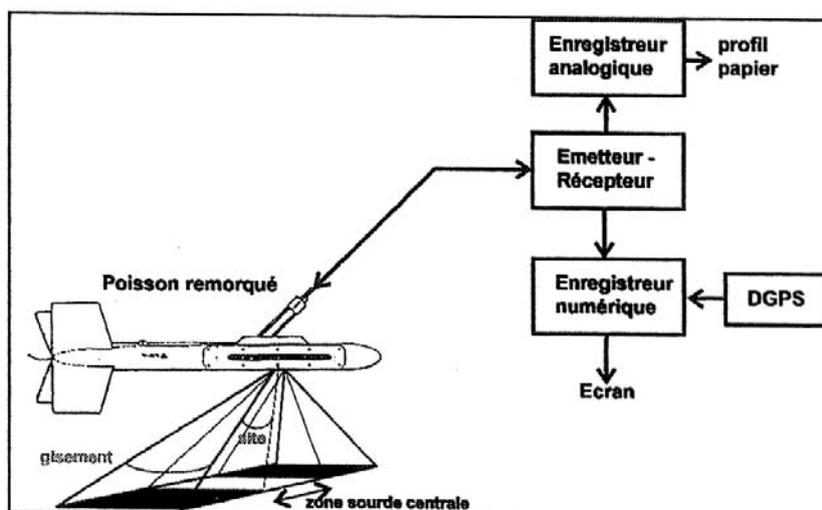


Figure II.21 : Chaîne d'acquisition des données de sonar latéral (Etchegaray, 2004).

Durant la mission Prislit 2 de mai 2003, un sonar de type EdgeTech 272 TD a été utilisé pour observer la zone sous-marine du Truc Vert (Figure II.21). Cet instrument est constitué de 2 transducteurs (émetteur récepteurs de signaux sonores) montés sur un châssis hydrodynamique (« le poisson ») qui assure la stabilité de l'instrument sous l'eau. Le sonar est relié au navire par un câble électro-porteur dont la longueur doit être prise en compte pour déterminer la position du poisson. L'acquisition est effectuée à la fois par un enregistreur

analogique sur papier et par un enregistreur numérique. Celui-ci est constitué d'un PC à grande capacité de stockage et d'une carte DELPH qui numérise le signal sonar reçu par le sonar. L'enregistrement analogique imprime un sonogramme qui représente l'intensité du signal sonore en fonction du temps sur le papier. L'acquisition numérique est gérée par le logiciel ISIS SONAR qui mémorise simultanément la position GPS du navire.

4.2. Traitement des données

Le traitement des données s'effectue quasiment de la même manière en numérique et en analogique. Une première étape permet de limiter la taille de la zone sans information interprétable située au centre de l'image (dite « zone sourde »), en détectant la hauteur d'eau. En effet, le temps de trajet de l'onde vers le fond ne doit pas être pris en compte dans la cartographie. Une correction de portée est aussi appliquée, elle consiste à limiter la zone de mesure autour de l'instrument, car le signal est bien souvent très affaibli, passé une certaine distance. Une portée de 100 m de part et d'autre du sonar a été appliquée sur nos données. La correction d'obliquité a pour but de transformer le signal de réflectivité selon le temps, en une fonction dépendante de la distance à l'instrument (Figure II.22). Le sonar mesure en effet un temps d'aller-retour direct entre le fond et l'instrument, or la cartographie nécessite de positionner les valeurs de réflectivité dans un repère, par rapport à la position du sonar au dessus du fond. La correction d'obliquité peut aussi prendre en compte l'effet d'une pente sur la position des mesures, dans le cas de bathymétries connues.

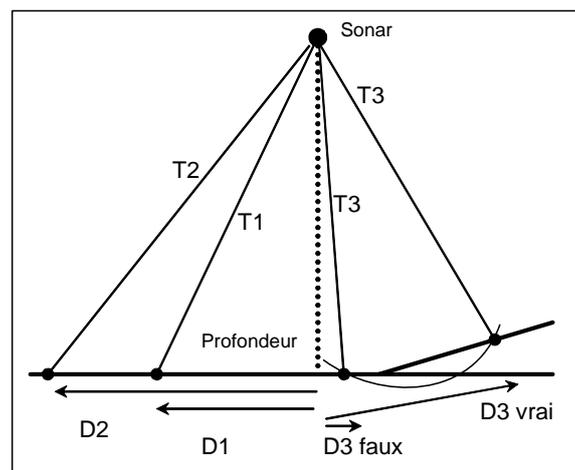


Figure II.22 : Principe de la correction d'obliquité.

Le sonogramme original enregistre la valeur de réflectivité du fond en fonction d'un temps d'aller-retour vers le sonar (T). La correction d'obliquité permet d'exprimer la réflectivité en fonction de la distance (D). Les zones en pente doivent être considérées avec attention car elles génèrent des erreurs sur le calcul de la distance (D3).

A ce stade, les valeurs de réflectivités du fond mesurées par le sonar peuvent être placées dans un repère centré sur l'instrument : en acquisition analogique, chaque cycle de mesure est une ligne très fine de 200 m de largeur ; en numérique, le cycle est une ligne de pixel de taille unitaire (25 cm dans le cas de cette étude). Une autre correction peut ensuite être menée pour synchroniser la vitesse du navire avec les cycles, afin de déterminer l'épaisseur de la ligne de mesures. On obtient alors une image rectiligne du fond. La dernière étape est numérique et permet de replacer l'image rectiligne sur la navigation du navire, afin d'obtenir une carte de réflectivité dans un repère géographique. Pour la zone du Truc Vert, les traitements informatiques ont été effectués sur les logiciels ISIS SONAR et CARAIBES TD. Les deux systèmes ont la même finalité, mais sont très différents dans leur approche. Isis sonar est un logiciel simple d'utilisation qui permet de réaliser des cartes rapidement, en un minimum d'étapes ; Caraibes est beaucoup plus complexe à mettre en œuvre, mais il offre une large gamme de traitements entièrement paramétrables par l'utilisateur.

4.3. Artefacts

L'analyse des cartes de réflectivité a ensuite pour but de repérer les figures sédimentaires remarquables et les variations de faciès sédimentologiques dans l'espace. Certains artefacts inhérents à la méthode doivent toutefois être connus pour pouvoir interpréter correctement les résultats (Figure II.23).

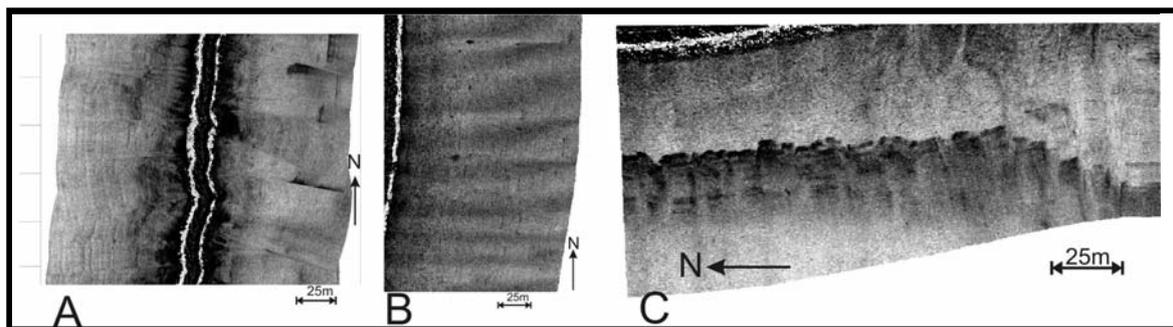


Figure II.23 : Bruits et distorsions des sonogrammes : (A) : dilatations et compressions dues au mouvement de lacet ou au tangage ; (B) : traces claires liées au roulis ; (C) : effet du sillage, d'après Etchegaray (2004).

- Les mouvements de lacets

Provoqués par les à-coups de remorquage du navire tracteur, les mouvements de lacets se traduisent sur les enregistrements par des dilatations et des compressions perpendiculaires au trajet du bateau. Ils sont d'autant plus fréquents que la longueur du câble porteur est courte. Ces mouvements peuvent également résulter de l'effet de la houle sur l'ensemble du dispositif (tangage). Ils seront partiellement éliminés lors du traitement des données de navigation.

- Le roulis

Le roulis affecte le poisson en provoquant des variations d'inclinaison du faisceau ultrasonore. Les enregistrements sont alors parcourus de traces claires espacées régulièrement.

- Le sillage du bateau

En sortie de virage, le poisson peut croiser le sillage provoqué par le bateau durant le profil précédent. Les turbulences traversées créent alors une trace sombre très contrastée sur le profil qui pourrait être attribuée à une forme sédimentaire allongée. Néanmoins, cette structure sombre s'estompe rapidement sur les sonogrammes et apparaît à leurs extrémités, ce qui la rend facilement identifiable.

C) Développement d'une technique d'observation des plages à barres par télédétection vidéo

Ce chapitre a pour but de décrire les démarches entreprises pour développer une technique d'observation des plages à barres par télédétection vidéo. Dans une première partie, les intérêts de ces méthodes seront expliqués grâce au cas exemplaire des recherches menées sur la plage du Duck (USA). La seconde partie présente une série de techniques qui permettent l'observation du littoral grâce aux images vidéo. Parmi ces techniques, une solution particulière a été retenue pour initier un projet de mesures vidéo des plages de la côte aquitaine. La mise au point de cet outil est détaillée dans la troisième partie. La dernière partie de ce chapitre est consacrée aux premiers tests effectués sur la plage du Truc Vert.

1) Intérêt des techniques de télédétection vidéo pour l'étude des barres sableuses

Les méthodes d'observation vidéo participent depuis plus de 15 ans aux progrès de la recherche sur le milieu côtier en facilitant l'étude des barres sableuses. Si l'on compare avec des mesures plus classiques (voir parties précédentes), ces techniques présentent des intérêts déterminant pour l'étude des systèmes littoraux (Holman et al., 1993) :

- Les observations sont effectuées sur une échelle spatiale relativement grande en comparaison d'une étude en profil cross-shore unique ;
- L'acquisition des images ne nécessite pas d'effort particulier au contraire d'un levé bathymétrique ou topographique ;
- La fréquence d'acquisition peut être très élevée ;
- La résolution est souvent meilleure qu'une image satellite ;
- Une installation fixe permet en plus la mise en place d'un suivi de longue durée.

La capacité de ces outils vidéo a permis des résultats très significatifs sur le site du Duck (USA). Cette plage, située sur le littoral sableux de Caroline du Nord, est un lieu d'expérimentation intensive où de gros moyens technologiques sont déployés régulièrement pour faire progresser la recherche. Elle est caractérisée par deux barres sableuses en domaine sous-marin, une énergie de houle modérée et un marnage micro-tidal.

Grâce à leur système vidéo, Lippmann et Holman (1990) ont établis une classification morphodynamique de la barre sableuse interne. Une série de critères de sélection permet de définir huit types de morphologie (Figure II.24) :

- Présence ou absence de barre ;
- Echelle de taille dominante ;

Elle correspond à la distance du rivage. Cette échelle est définie en fonction de la longueur d'onde des houles gravitaires moyennes ou des mouvements infragravitaires.

- Variabilité longshore ;
- Aspect continu ou discontinu de la fosse pré-littorale.

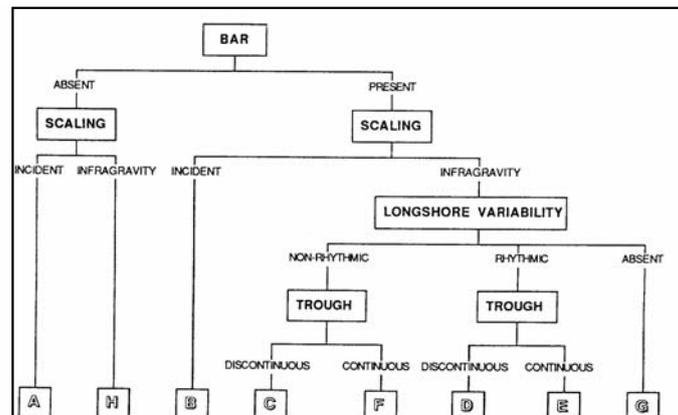


Figure II.24 : Critères de distinction des barres pré-littorales internes de la plage du Duck. D'après Lippmann et Holman (1990).

En fonction de ces critères, un suivi quotidien de deux ans a montré que la barre sableuse interne était toujours présente. Six états morphodynamiques ont été distingués (Figure II.25) :

- Une barre sableuse linéaire réfléchive (B) ;
- Une barre discontinue et irrégulière associée à une fosse discontinue (C) ;
- Une barre en croissants réguliers et une fosse discontinue (D) ;
- Une barre festonnée régulière et une fosse continue (E) ;
- Une barre irrégulière et une fosse continue (F) ;
- Une barre linéaire dissipative (G).

La barre en croissants réguliers est observée dans la majorité des cas. Autour de cet état moyen, des évolutions de morphologies sont observées. La mesure simultanée des conditions hydrodynamiques permet de relier les séquences évolutives avec l'énergie qui entre dans le système. En cas de fortes houles, la barre en croissants réguliers (D) se transforme rapidement en barre linéaire dissipative (G). Cet état est instable car son temps de résidence est faible (2 jours). En cas de conditions modérées, la barre en croissant se reforme au bout de 5 à 16 jours

en passant par tous les stades intermédiaires. Plus généralement, lors d'une tempête, Lippmann et Holman (1990) ont constaté une évolution brusque vers un état plus dissipatif. Dans le cas de conditions de houles modérées ou faibles, la barre sableuse évolue vers une forme plus réfléchive en passant par tous les états intermédiaires déterminés dans la classification.

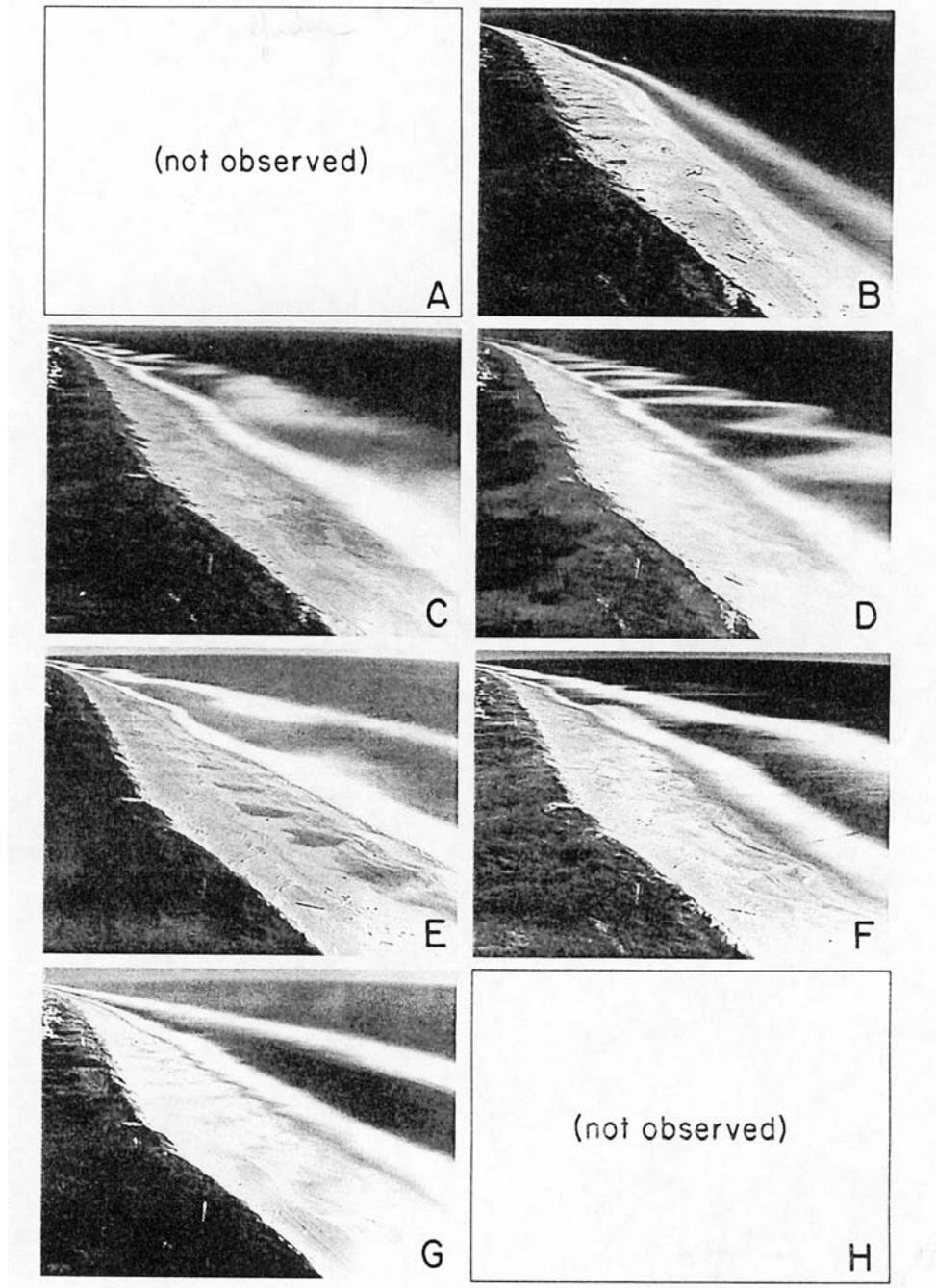


Figure II.25 : Classification de la barre sableuse interne de la plage de Duck. Etude basée sur des images vidéo moyennées, d'après Lippmann et Holman (1990).

Après cinq années de suivis vidéo quotidiens, Lippman et al. (1993) ont également analysés le comportement de la barre sableuse externe de la plage de Duck. Ils ont montré l'influence déterminante des tempêtes sur l'évolution du système (Figure II.26). Ainsi, la barre sableuse a été détruite sous l'action de fortes houles en mars 1988. La reformation de la structure est observée en février et mars 1989 à la suite de deux événements énergétiques qui ont provoqués la migration vers le large de la barre interne et la création d'une nouvelle barre à proximité du rivage

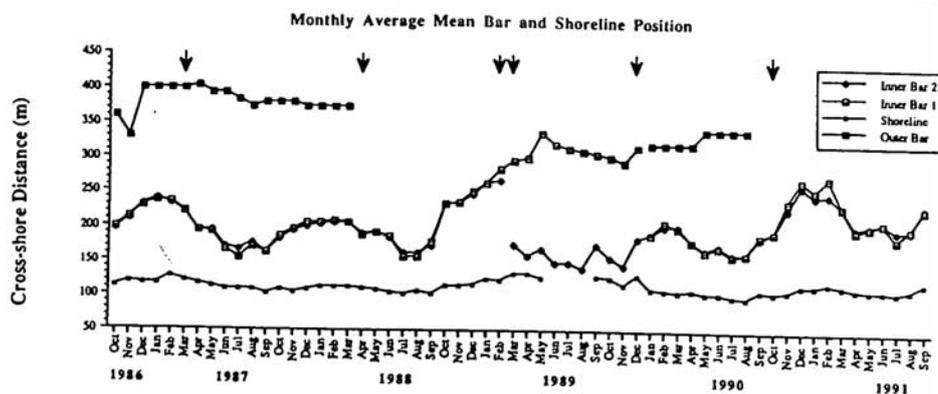


Figure II.26 : Position moyenne du rivage, de la barre interne et de la barre externe sur la plage du Duck (USA). Chaque point est une moyenne mensuelle qui exprime la distance cross-shore. Les flèches noires indiquent la date des principales tempêtes.
D'après Lippmann et al., (1993).

Ces résultats montrent l'intérêt des méthodes d'observation vidéo pour l'étude des plages à barres. Ce sont des cas exemplaires qu'il convient de suivre. C'est donc pour permettre l'observation de séquences évolutives des barres sableuses et faciliter la détermination d'une classification morphodynamique des plages aquitaine que la mise en place de techniques de télédétection vidéo a été décidée au sein du laboratoire.

2) Principes de mesure vidéo en milieu côtier

Depuis 1987 et les premiers essais d'une méthode d'observation vidéo par Holman et Lippmann de l'université d'Oregon (USA), la technologie de mesure vidéo des milieux côtiers n'a cessée d'être améliorée et développée. Une série de techniques associées aux images vidéo ont été testées et mises au point pour mesurer la morphologie et l'hydrodynamique des plages, elles seront présentées dans cette partie. En 1998, cette technologie vidéo a atteint une certaine maturité et une bonne fiabilité (Holland et al., 1997). Holman et son équipe du Coastal Imaging Lab d'Oregon crée alors un système fonctionnel nommé ARGUS. Ce système intègre des caméras qui acquièrent les images, un ordinateur et des programmes informatiques qui traitent, stockent et diffusent les images via internet (Figure II.27).

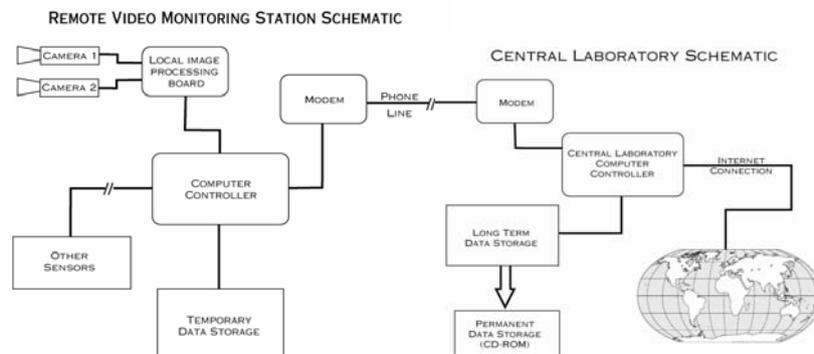


Figure II.27 : Schéma du système ARGUS.
 Observation des milieux côtiers par télédétection vidéo.

Grâce à ce système, un nombre croissant de zones d'études côtières est équipé en caméras vidéo et une communauté scientifique, chaque jour plus vaste, participe à l'amélioration des techniques. Dans ce chapitre, les principes du système seront présentés, ainsi que plusieurs exemples venant des Etats-Unis, de Hollande ou d'Australie.

2.1. Cartographie des zones de déferlement

a) Principe du système ARGUS

En fonction de leur taille, les vagues déferlent majoritairement au-dessus de zones peu profondes, en formant une mousse blanche bien repérable. Holman et Lippmann (1987) sont les premiers à avoir essayé de positionner précisément ces zones à partir d'images. Le système vidéo mis en place est installé en hauteur et prend des images obliques de la plage,

puis la relation qui associe le déferlement et les petits fonds est utilisée pour détecter les barres sableuses et le trait de côte. Un cliché unique ne permet pourtant pas le repérage précis des structures, car les vagues incidentes ne se brisent pas en même temps sur l'ensemble du haut fond (Figure II.28 a). Par contre, la moyenne de nombreuses images facilite la distinction entre les zones de faibles profondeurs, très claires, et les domaines plus profonds, où les vagues ne déferlent pas (Figure II.28 b).

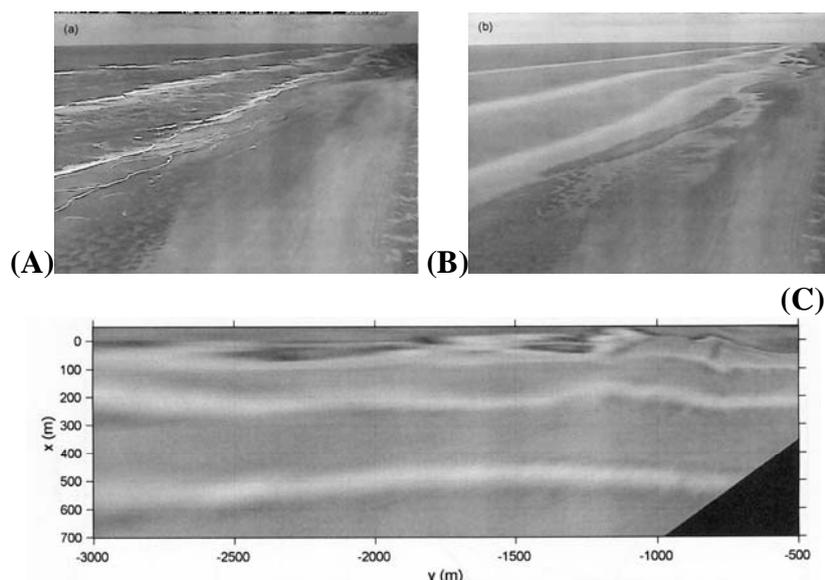


Figure II.28 : (A) Cliché vidéo de la plage d'Egmond aan Zee, Pays-Bas. (B) image moyennée qui montre les zones de déferlement : au bord, sur une barre interne et sur une barre externe. (C) Redressement de l'image moyennée dans un repère géographique. (d'après Van Eckevort et Ruessink, 2001).

A ce stade du traitement, on peut déterminer la présence de barres sableuses et estimer une évolution qualitative des formes dans le temps (Lippman et Holman, 1990). Pour quantifier la longueur d'onde d'une structure ou la distance à la côte, il est en plus nécessaire d'effectuer des calculs géométriques sur la position réelle des éléments de l'image (Figure II.28 c). Ces calculs visent à corriger l'obliquité et le rapport d'échelle entre le terrain et l'image. L'objectif est de replacer chaque élément de l'image dans une position connue et réaliste d'un référentiel géographique. Ce traitement sera désigné comme l'étape de redressement de l'image. Les principes de calcul seront présentés dans un cas simple théorique.

b) Etalonnage de la caméra et redressement des pixels de l'image

La première étape de traitement consiste à étalonner la caméra. Il s'agit de déterminer les paramètres nécessaires aux calculs du redressement. Deux types de paramètres sont distingués (Holland et al., 1997) :

- les paramètres intrinsèques, qui quantifient les caractéristiques physiques de la caméra (objectif et optique, construction et capteur)
- les paramètres extrinsèques, qui décrivent la position géométrique de la caméra et son orientation relative par rapport au repère géographique.

Pour cette description simple des techniques de redressement, nous ne considérerons qu'un nombre limité de paramètres déjà connus. Ainsi, pour les paramètres intrinsèques, la caméra est une boîte noire dont le centre optique "C" (lieu de convergence de tous les rayons) se trouve à la distance focale "f", perpendiculairement au capteur photosensible que nous nommerons plus simplement "image" (Figure II.29). Le capteur CCD est l'élément fondamental du système vidéo, il est composé de lignes et de colonnes de capteurs élémentaires de lumière, nommés pixels. Les paramètres extrinsèques correspondent à la position du centre optique (x_c, y_c, z_c) et aux angles que forment l'axe optique et les axes du repère géographique. L'axe optique est une droite formée par le centre optique et sa projection "O" sur le capteur, considérée orthogonale et au centre de l'image dans notre cas théorique. Les angles d'orientation de la caméra sont au nombre de 3 (Figure II.30). L'angle Tilt est défini comme le basculement de l'axe optique par rapport à l'horizontale. L'angle Pan correspond à la direction de cet axe par rapport au Nord du repère géographique. L'angle Roll représente le basculement des lignes de l'image par rapport à l'horizontale.

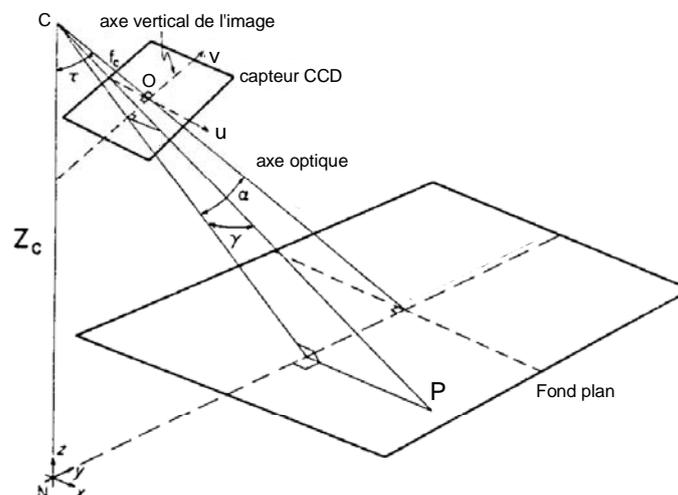


Figure II.29 : Géométrie d'un système vidéo et principaux paramètres utiles (d'après Holman et Lippmann, 1987).

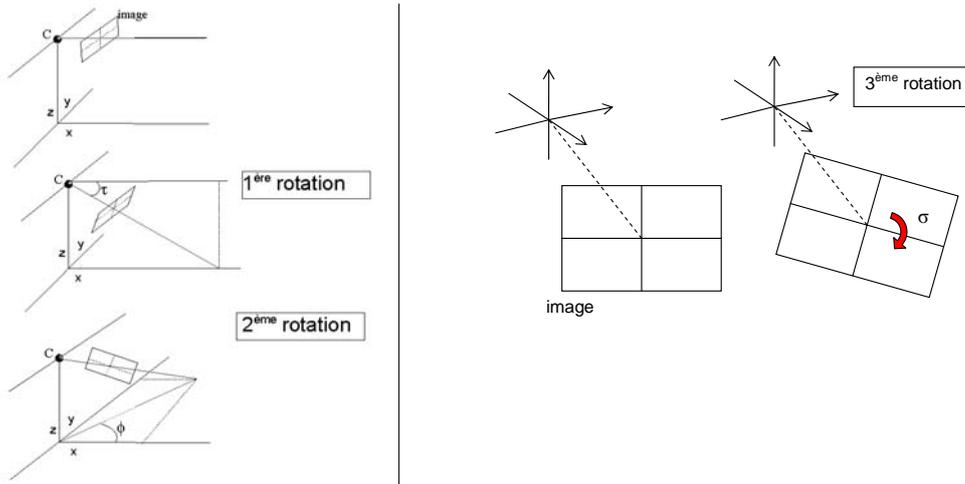


Figure II.30 : Angles de rotation de la caméra dans le repère (x, y, z) . 1^{ère} rotation = angle Tilt, 2^{ème} rotation = angle Pan, 3^{ème} rotation = angle Roll.

Considérons un repère géographique (x_1, y_1, z_1) centré en C, centre optique de la caméra et un angle unique d'orientation de la caméra (Figure II.29). L'axe horizontal de l'image est nommé "u" (ligne passant par le centre "O" du repère image). Son vecteur directeur est colinéaire au vecteur directeur de l'axe y_1 du repère géographique, les deux droites ont la même direction. L'axe vertical de l'image, colonne nommée "v", définit un repère orthonormé pour l'image. L'axe optique forme un angle τ (angle Tilt) dans le plan (C, x_1, z_1) par rapport au plan horizontal (C, x_1, y_1) . Le redressement consiste à retrouver la position X_1, Y_1 dans le repère géographique d'un point P, dont la hauteur Z est connue, et dont les coordonnées "image" sont "U" et "V". Dans le plan (C, x_1, z_1) , les droites (CO) et (CX_1) forme un angle α . L'axe v de l'image est perpendiculaire à (CO), donc, connaissant f, V et Z :

(eq. 2.1)

$$\alpha = \text{atan} \frac{V}{f} \quad \text{et} \quad X_1 = Z \cdot \tan (\tau + \alpha)$$

Dans l'espace, les droites (CX_1) et (CP) forment un angle γ , dans le triangle rectangle CX_1P .

Connaissant Z et U, Y_1 est déduit de γ et de CX_1 :

(eq. 2.2)

$$Y_1 = CX_1 \cdot \tan \gamma$$

(eq. 2.3)

$$\tan \gamma = \frac{U}{\sqrt{f^2 + V^2}} \quad \text{et} \quad CX_1 = \frac{Z}{\cos (\tau + \alpha)}$$

(eq. 2.4)

$$\text{d'où} \quad Y_1 = \frac{Z}{\cos (\tau + \alpha)} \cdot \frac{U}{\sqrt{f^2 + V^2}}$$

c) Validation de la relation entre le déferlement des vagues, le maximum d'intensité de l'image et la présence d'une barre sableuse

Le principe de l'étude vidéo des barres sous-marines provient des USA, où le système Argus a été inventé. Les premières validations ont été effectuées sur le site de Duck, en Caroline du Nord, grâce aux bathymétries d'un engin amphibie, le CRAB (Birkemeier et al., 1984). Les résultats de la campagne Duck 85 (Holman et Lippman, 1987) montrent une bonne corrélation entre la position de la barre sur un profil bathymétrique et les estimations de la méthode vidéo. Il apparaît qu'avec les houles rencontrées, les résultats sont meilleurs à marée basse pour cette zone microtidale. A l'aide d'un modèle de transformation des vagues à la côte (Thorton et Guza, 1983) et des données de Superduck 86, Lippmann et Holman (1989) ont aussi montré que les pics d'intensité sur les images étaient de bons marqueurs des barres sous-marines à Duck, pour de faibles hauteurs de houle. En revanche, le déferlement se fait au large de la crête pour des houles plus fortes. Ainsi, dans de bonnes conditions de vagues, les comparaisons entre profils vidéo et bathymétriques montrent de nouveaux de très bonnes corrélations (Figure II.31). Seule la persistance de mousse blanche en surface, aux abords des zones de déferlement, réduit les performances du système. Ce biais est rectifiable en calculant des images de variance des pixels, qui montrent bien les zones de mousse persistante et les zones de déferlement aux couleurs très variables.

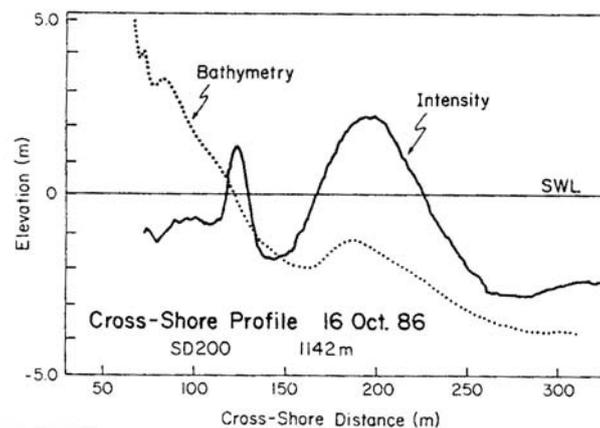


Figure II.31 : Comparaison d'un profil vidéo d'intensité de couleur (les pics « Intensity », représentent des couleurs claires, valeurs indicatives) avec une bathymétrie CRAB (Elevation en mètre). SWL = niveau moyen des mers (d'après Lippmann et Holman, 1989).

Van Enckevort et Ruessink (2001) ont testé cette méthode lors de la campagne Coast3D sur la plage d'Egmond aan Zee (Pays-Bas), qui possède un double système de barres sableuses

(Figure II.28). Leur objectif était de quantifier les biais de la méthode d'observation des barres pré-littorales par imagerie vidéo. Les conclusions montrent qu'en règle générale, la station vidéo Argus utilisée est un bon outil d'étude du comportement des crêtes des structures sous-marines. Le positionnement de l'intensité maximum des pixels (x_i) est assimilé à la zone de dissipation d'énergie modélisable numériquement. Il correspond bien à la perturbation maximum de la bathymétrie par rapport au profil moyen (x_p) ou au sommet de la barre (x_d) (Figure II.32). Mais des différences pouvant dépasser 10 m apparaissent entre la position x_i observée par vidéo ou calculée numériquement et la position x_p du profil bathymétrique. Ces variations se modifient dans le temps en fonction de la hauteur des vagues au large, de la marée, de la bathymétrie locale ou au large.

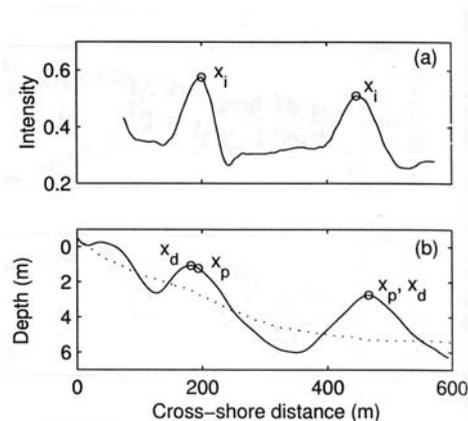


Figure II.32 : a) Profil d'intensité de pixel avec les maximums locaux (x_i)
 b) Bathymétrie CRAB (en trait plein) et bathymétrie moyenne depuis 34 ans (pointillés) avec les maximums locaux (x_d) et les maximums de perturbation (x_p)
 (d'après Van Eckevort et Ruessink, 2001).

Le modèle numérique (Battjes et Janssens, 1978 ; Nielsen, 1983) produit des observations virtuelles pour des gammes de houles plus larges que lors de la campagne de mesure ; il permet de distinguer un état saturé du champ de vague près des barres, d'un état non saturé. En condition non saturée, les vagues ne déferlent pas au large de la zone d'étude, un renforcement de la taille des vagues provoquera alors une augmentation de la houle locale et la distance x_i observée aura tendance à croître vers le large. Le phénomène est identique pour une diminution du niveau de la mer à cause de la marée. Dans un champ de vagues saturées, le déferlement se produit au large de la zone d'étude ; une augmentation des hauteurs significatives ne provoquera pas l'augmentation des vagues locales. La réponse de x_i dépendra donc seulement du niveau marin. Mais il faut noter aussi que l'influence tidale sur la position du point de déferlement dépend de la profondeur de la barre sous-marine. Ainsi, les

variations de x_i changent avec la profondeur ou l'amplitude de la barre (Plant et Holman, 1998) et sont moins importantes pour une crête plus profonde. De plus, comme l'avait prédit Lippmann et al. (1993), le changement de profondeur d'une barre externe va modifier la variabilité de x_i pour toute barre interne : l'érosion de la barre externe permet alors l'approche de houles plus grandes sur la barre interne, favorisant la variabilité de x_i , en relation avec la marée. Enfin, la forme de la barre sous-marine (en plateau ou en cloche gaussienne) influence les différences constatées entre x_i , point d'intensité lumineuse maximale et x_p , sommet de la barre.

La méthode de positionnement des zones de déferlement permet de repérer la présence de barres sableuses sous l'eau. Il semble cependant nécessaire de valider la méthode pour chaque lieu de mesure. L'utilisation de modèles numériques peut permettre d'exploiter au mieux et de connaître les limites de ce type d'observation vidéo. En contrepartie, les mesures sur de longues périodes de temps peuvent favoriser l'évaluation des résultats d'un modèle morphodynamique.

2.2. Amélioration des techniques vidéo pour la mesure des zones intertidales et sub-aériennes

L'étude du déferlement concerne exclusivement des zones situées sous l'eau. C'est une première limite à l'utilisation de cette approche. La comparaison directe pour validation doit donc être faite par des techniques de bathymétrie qui ne sont pas toujours faciles à mettre en œuvre. Pour compléter cette technique, plusieurs méthodes vidéo ont été développées pour observer la morphologie des zones sub-aériennes et intertidales, elles sont décrites dans cette partie.

Une seconde limite à la mesure vidéo est liée à la nature même de l'acquisition d'image : une image est une représentation en plan d'un espace tridimensionnel. Or l'étude complète des morphologies nécessite l'obtention de la dimension d'altitude. Pour le cas des zones de déferlement, elles sont positionnées dans un repère géographique en insérant une hauteur d'eau connue dans les équations. Il s'agit d'une cartographie en 2 dimensions dont la précision dépend beaucoup du paramètre de hauteur d'eau. Deux techniques présentées dans ce paragraphe ont été mises au point pour limiter l'importance de ce paramètre.

a) Estimation de la morphologie de la plage intertidale par l'utilisation d'images moyennées

Les images moyennées ont pour but d'observer les zones de déferlement préférentielles. Elles caractérisent alors la présence d'une barre sableuse sous-marine mais aussi la ligne de rivage, avant que les vagues ne perdent leurs dernières énergies dans le jet de rive. Dans le cas des plages sableuses influencées par la marée, cette zone de déferlement au bord nommée LIM (Ligne d'Intensité Maximale) change de position en fonction de la hauteur de l'eau. L'extraction précise de la LIM a fait l'objet de tests pour obtenir un algorithme efficace (Madsen et Plant, 2001), car c'est le positionnement précis de sa forme qui permettra la cartographie de la zone intertidale. Le principe de la technique de redressement consiste ensuite à estimer la hauteur de la marée pour évaluer la coordonnée Z des points de la zone de déferlement. Une fois cette coordonnée obtenue, il est possible de calculer les positions en abscisse et en ordonnée. Le positionnement successif de la LIM durant un cycle entier de marée permet alors d'établir une carte de contour de la morphologie de la plage intertidale sur une vaste zone (1000 m longshore).

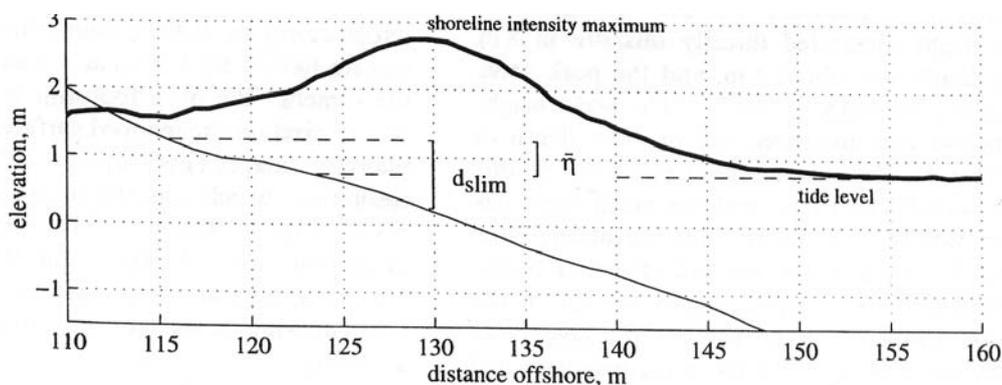


Figure II.33 : Profil d'intensité de pixels (trait gras) en comparaison avec la bathymétrie (trait fin). Le problème consiste à déterminer la profondeur de la LIM (d_{slim}) en fonction de la marée (tide level) et du set-up (η) (d'après Plant et Holman, 1997).

Cette technique a été initiée sur la plage de Duck aux USA où la hauteur de marée est mesurée par un capteur situé au bout d'un wharf. La figure II.33 montre la nécessité de connaître la profondeur d'eau sous la LIM avant d'établir la carte de contours. Plusieurs paramètres permettent d'expliquer et de corriger cette hauteur d'eau.

- Le déferlement des vagues

La correspondance simple entre hauteur de la marée et position de la ligne de rivage considère en effet une plage sans vague, où la LIM serait la limite entre la surface de l'eau et la plage.

En fait, la LIM correspond à une zone où les vagues déferlent dans une certaine profondeur d'eau. Cette profondeur nommée h_b change selon la hauteur de la houle. On estime que :

(eq.2.5)

$$H_b = \gamma \cdot h_b$$

où H_b correspond à la hauteur des vagues et γ est le coefficient de saturation de la houle, dépendant des caractéristiques de la plage étudiée (Komar, 1998).

- La réflectivité de la plage

L'erreur sur la hauteur estimée et la position de la LIM dépend aussi de la réflectivité de la plage. La réflectivité peut être exprimée par le nombre d'Iribaren tel que :

(eq 2.6)

$$\xi = \beta \cdot \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-1/2}$$

où H_0 et L_0 sont les hauteurs et longueur d'onde de la houle en eau profonde, et β est la pente de la plage. Pour $\xi < 1$, la plage est dissipative (cas de forte houle et/ou une pente faible), tandis que pour $\xi > 1$, la plage est réfléchive (faible houle et/ou pente forte). Plant et Holman (1997) ont montré que l'erreur sur la mesure dépend fortement du caractère réfléchif de la plage.

Dans le cas d'une plage réfléchive à Duck, la houle est très faible et la hauteur de la marée est seulement corrigée par la profondeur de la LIM, estimée grâce à l'équation 2.6. Si la plage est dissipative, la présence de barres sableuses et de vagues importantes rend le problème plus complexe. En effet, la houle crée un "set-up", c'est à dire une accumulation d'eau à la côte qu'il faut calibrer selon la plage et les conditions environnementales (Bowen et al., 1968 ; Guza et Thornton, 1981 ; Holman et Sallenger, 1985 ; Holland et al., 1995). De plus, quand la houle est suffisamment forte, elle déferle au large sur la barre sous-marine. Les vagues sont alors saturées car leur hauteur est limitée quand elles viennent déferler de nouveau sur le rivage. On exprime la hauteur de la houle arrivant au rivage par :

(eq.2.7)

$$H_{\text{rivage}} = \gamma \cdot h_{\text{barre}}$$

où h_{barre} est la profondeur de la barre sous-marine, qui varie en fonction de la marée.

La hauteur de la marée pour déterminer la profondeur de la LIM est donc corrigée par l'estimation du set up et de la hauteur de la houle saturée.

Cette méthode de mesure de la morphologie de la plage intertidale est très intéressante mais elle nécessite une connaissance approfondie des paramètres caractérisant une plage. Des corrections précises donnent des résultats précis à 10 cm. Par contre, dans le cas d'une plage peu connue, l'erreur sur la mesure peut atteindre 40 cm.

D'autres techniques de mesure vidéo permettent d'obtenir des informations sur la morphologie des zones intertidale et subaérienne. Ces méthodes sont directement issues de la photogrammétrie, science qui a pour but l'étude des formes et du relief à partir d'images aérienne. Elles ont pour objectif de retrouver l'altitude Z des points de l'image, pour pouvoir positionner les pixels dans le repère géographique.

b) Technique de l'ombre portée pour mesurer un profil de plage

- Théorie

Il est possible d'observer un profil de plage sur une image prise par une caméra pointée sur la zone littorale. Mais comme la topographie de la zone est tridimensionnelle, tandis que l'image n'est que bidimensionnelle, les équations de X_1 et Y_1 (eq. 2.1 et 2.4) ne peuvent être résolues pour un point P du profil. Cette limitation majeure est dépassée si l'une des inconnues est découverte. Pour cela, on peut imaginer qu'une ligne de coordonnées connue soit dessinée sur la plage pour "mettre en relief" un profil précis. Ainsi, le plan "D", qui coupe l'axe géographique y en " Y_{0D} " en formant un angle μ , dessine cette ligne sur l'image, à l'intersection avec la topographie. D s'exprime tel que :

(eq. 2.8)

$$Y_D = Y_{0D} + X_D \cdot \tan \mu$$

Le but de la transformation est de trouver l'altitude du point P , puis d'en déduire X et Y . Dans le cas d'une rotation unique de la caméra et d'un repère centré en C , les coordonnées X_1 et Y_1 du point P sont exprimées par les équations 2.1 et 2.4. Connaissant la valeur Y_1 grâce à l'équation de D (eq. 2.8), on peut dire que $Y_1 = Y_D$

- Dans le cas où $\mu = 0$, la droite est perpendiculaire à l'axe y , donc sur la ligne d'intersection du plan D , $Y_D = Y_{0D}$.

D'après les équations 2.4 et 2.8

(eq. 2.9)

$$Y_{0D} = \frac{Z}{\cos(\tau + \alpha)} \cdot \tan \gamma \Leftrightarrow Z = \frac{Y_{0D} \cdot \cos(\tau + \alpha)}{\tan \gamma}$$

- Test et résultats

Le procédé a été testé sur la plage de Duck en Caroline du Nord (USA) par Holman et al. (1991). L'intersection du plan D avec la topographie a été matérialisée par un tuyau d'incendie bleu foncé, très facilement repérable sur les images. Selon la plage, il est aussi possible d'utiliser l'ombre portée d'un pylône ou un rayon de lumière (permettant la mesure de nuit). Les résultats obtenus par la méthode vidéo sont comparés à des mesures classiques de tachéométrie théodolite effectuées tous les 5 m le long du tuyau. La figure II.34 montre une très bonne précision de la technique -de l'ordre de 5 cm-. Ce type de redressement permet de mesurer un profil de plage de manière précise. Il fournit surtout un nombre beaucoup plus important de points que les instruments traditionnels de mesure topographique. Cependant, la mise en place du tuyau ou d'une source de lumière peut s'avérer aussi fastidieuse que la mesure classique. L'option consistant à utiliser l'ombre portée d'un pylône peut toutefois se révéler avantageuse, à condition d'étudier une plage qui soit ensoleillée, sans être orientée vers le Sud. De plus, l'exemple présenté ne prend en compte que la plage subaérienne ; cette partie ne représente qu'une petite fraction du profil littoral, surtout sur les plages méso à macro-tidale. Malgré tout, l'observation de la partie subaérienne est nécessaire car c'est un domaine qui peut subir de fortes érosions en agissant notamment comme tampon, lors de l'attaque de la dune ou de la falaise littorale par les houles de tempête.

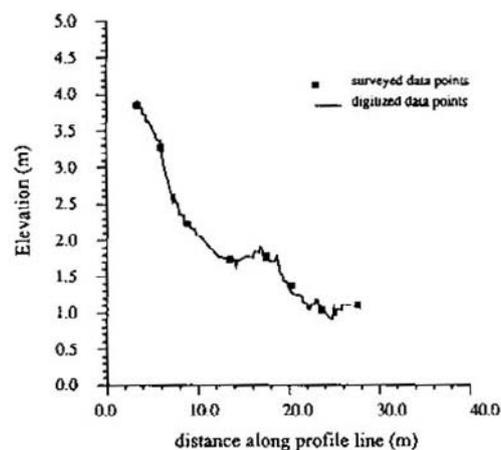


Figure II.34 : Comparaison d'un profil de plage sub-aérienne mesuré par vidéo grâce à la technique de l'ombre portée (trait continu) et de points topographiques obtenus par tachéométrie (points noirs) (d'après Holman et al., 1991).

c) Stéréoscopie

- Théorie

La stéréoscopie consiste à observer le relief d'une zone, à partir de deux images prises depuis des points de vue différents. Le principe de calcul est le même que précédemment : il s'agit de trouver l'une des inconnues des coordonnées d'un point en combinant deux équations. Ainsi, à partir de deux caméras dont la position du centre optique et l'orientation dans l'espace sont connues, on peut exprimer l'altitude Z d'un point.

L'équation de position du point P peut s'exprimer tel que :

(eq. 2.10)

$$X = x_c + z_c \cdot F - Z \cdot F$$

avec F , fonction des paramètres de caméra et de la position du point étudié sur l'image et x_c , z_c position de la caméra.

Si P est mesuré par 2 caméras, on obtient :

(eq. 2.11)

$$x_{c1} + z_{c1} \cdot F_1 - Z \cdot F_1 = x_{c2} + z_{c2} \cdot F_2 - Z \cdot F_2 \quad \Leftrightarrow \quad Z = \frac{x_{c1} + z_{c1} \cdot F_1 - x_{c2} - z_{c2} \cdot F_2}{F_1 - F_2}$$

Une fois Z obtenu, on peut facilement calculer X et Y dans le référentiel géographique à partir des équations 2.1 et 2.4.

Cette technique peut permettre la mesure topographique de la plage subaérienne et de la plage intertidale à marée basse. Une fois les deux caméras positionnées et calibrées, elle ne nécessite pas la mise en place de repères (tuyau et autre rayon lumineux). De plus, les résultats sont intéressants car ils concernent une zone entière de plage, et non plus un unique profil : la mesure stéréoscopique favorise donc l'élaboration des cartes morphologiques utiles aux études d'évolution tridimensionnelle de la plage. En revanche, une limite majeure empêche son application sur de nombreuses côtes sableuses. Il est en effet presque impossible de déterminer des points précis et nettement discernables sur deux images différentes. Les plages sableuses ont des couleurs trop homogènes et ne possèdent généralement pas suffisamment de structures permettant de caractériser efficacement un nombre de points suffisant. L'exception se trouve dans les zones à rides ou mégarides très distinctes. Il faut alors pouvoir coupler les équations de redressement avec un puissant algorithme de reconnaissance des formes.

- Test et résultat

Pour résoudre ce problème de reconnaissance de points similaires sur les 2 images, Holland et Holman (1997) ont utilisé les caractéristiques du jet de rive (Figure II.35). La limite mobile du jet de rive forme un contraste fort avec le sable de la plage ; elle possède des angles, des coins et des lignes caractéristiques sur lesquelles de nombreux points précis peuvent être repérés. Cependant, des difficultés de reconnaissances ont nécessité l'amélioration de la méthode :

- Trois caméras sont utilisées pour plus de précision ;
- Les caméras sont calibrées à l'avance par des points de contrôle connus ;
- Une droite (A), reliant un point sélectionné sur la limite du jet rive et le centre optique de la première caméra (C1) est définie.

L'expression de cette droite nommée "ligne épipolaire", dans les référentiels des 2 autres caméras grâce à l'étalonnage du système permet de déterminer très précisément le point choisi sur plusieurs images. L'application de l'équation 2.11 fourni alors l'altitude du point.

Les tests effectués sur la plage de Gleneden en Oregon (USA), pour une zone de 10 m sur 10 m permettent d'estimer une précision de la méthode allant de 1 à 3 cm, par comparaison avec les moyens classiques de mesure topographique. Ces mesures peuvent être très intéressantes pour le suivi vague après vague de la morphologie d'une plage. Les fluctuations peuvent en effet être rapides. Ainsi, l'ajustement continu d'un profil de plage a pu être observé sous l'action du swash, entraînant une modification non négligeable de la zone sur un cycle de marée (Duncan , 1964). De la même façon, des modifications inférieures à 5 cm peuvent être observées à l'arrivée d'une vague (Sallenger et Richmond, 1984 ; Howd et Holman, 1987). Pour ce type d'observation, la technique vidéo présentée ne demande aucune intervention humaine, une fois les caméras calibrées. Elle permet surtout une résolution suffisante et une grande fréquence d'acquisition (à chaque vague) pour observer les modifications morphologiques.

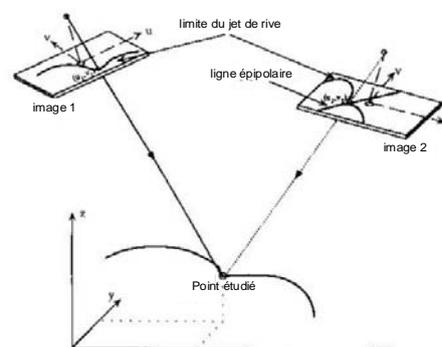


Figure II.35 : Utilisation de la limite du jet de rive pour appliquer la technique de stéréoscopie à l'étude morphologique de la plage (d'après Holland et Holman, 1997).

d) Conclusion

Plusieurs méthodes d'observation des morphologies littorales viennent d'être présentées : zones de déferlement préférentielles, techniques de photogrammétrie et de stéréoscopie fournissent des résultats intéressants. Deux points semblent tout particulièrement importants pour exploiter au mieux les techniques vidéo. D'un côté l'étalonnage des paramètres de la caméra est une condition nécessaire pour la précision des calculs ; de l'autre, une connaissance préalable de l'environnement d'étude semble capitale pour ne pas se tromper lors des analyses. Ainsi, la mesure des morphologies nécessite souvent l'étude de certains processus hydrodynamiques comme :

- Le déferlement des vagues pour positionner les barres sableuses.
- La hauteur d'eau à chaque heure de la marée pour la cartographier la zone intertidale LIM,
- Le mouvement du jet de rive pour observer des points similaires par stéréographie.

Les mesures par télédétection vidéo nécessitent donc une approche globale de l'environnement côtier pour mener à bien des observations morphologiques. En retour, le développement de certains aspects de l'imagerie vidéo permet l'étude des phénomènes hydrodynamiques de la plage.

2.3. Imagerie des processus hydrodynamiques du domaine littoral

La dynamique littorale est guidée par les forçages hydrodynamiques et leur relation avec la morphologie. La connaissance des paramètres hydrodynamiques (le mouvement du fluide) est nécessaire pour la compréhension du déplacement des barres et plus généralement du milieu littoral dans son ensemble. De façon classique, ces mesures s'effectuent ponctuellement dans l'espace et le temps, à l'aide de capteurs de pression et de courantomètres. Le développement de techniques modernes d'imagerie permet maintenant de proposer des alternatives à ce type de mesures coûteuses et logistiquement difficiles à mettre en place dans les zones à forte énergie. Elles assurent en outre une mesure en continu, nécessaire à la compréhension des changements morphologiques à moyen et long terme. Les techniques d'imagerie vidéo permettent d'exploiter la signature visuelle de certains processus hydrodynamiques comme les vagues, le jet de rive et les courants. Les pixels d'une image, repositionnés spatialement, sont alors comparables à autant de capteurs in situ. Cette partie permet de faire la synthèse des

techniques vidéo de mesures hydrodynamiques. Dans un premier temps, nous verrons les méthodes utilisées pour la caractérisation des vagues se transformant près de la côte. Puis, nous préciserons l'étude par l'observation des mouvements de jet de rive (ou swash), souvent influencés par l'énergie infragravitaire. Enfin, nous nous intéresserons aux moyens d'étude des courants littoraux par les méthodes d'imagerie.

a) Observation des vagues

- Intérêts et principe

Les zones côtières sableuses sont souvent des environnements dominés par l'énergie de la houle. Le déferlement des vagues, détecté par les techniques vidéo est un phénomène d'une importance extrême pour le milieu. D'ailleurs, les modèles utilisés pour comprendre et décrire le transport sédimentaire dans la zone littorale sont largement basés sur l'action du déferlement des vagues sur le fond. Ainsi, les simulations cross-shore nécessitent de connaître la vitesse des vagues (Bagnold, 1963 ; Bowen, 1980). Pour les modèles prenant en compte le transport longshore (Komar et Inman, 1970), il faut estimer l'angle d'approche de la houle. Ces enjeux sur l'étude de la houle et la difficulté de mesure en milieu côtier ont favorisé depuis longtemps le développement des études de télédétection par capteurs optiques et photos (Barber, 1949 ; Stilwell, 1969 ; Stilwell et Pilon, 1974 ; Lubard et al., 1980) ou à l'aide de capteurs infra-rouge (Dugan et al., 1996) et de radars (Young et al., 1985).

Lippmann et Holman (1991) ont pour leur part caractérisé la vitesse et l'angle d'approche de vagues déferlantes à partir de caméras vidéo montées sur une tour à Duck (USA). Simultanément, plusieurs capteurs de pression sont utilisés pour comparer l'intensité des pixels correspondant (Figure II.36). Pour cette étude, la reconnaissance des vagues déferlantes est simple dans une série temporelle d'intensité de lumière : la face avant de la vague est très blanche à cause de la mousse et elle forme un pic d'intensité dans la série, comparable aux mesures de capteur de pression. Dans le cas de vagues observées depuis la terre, ne déferlant pas encore, la face avant peut être plus sombre en fonction des conditions d'ensoleillement et de réflexion. Pour l'observation de la houle sur toute la zone littorale, il est donc nécessaire de définir une fonction de transfert traduisant le signal d'intensité de la caméra en fonction de la variation d'amplitude d'une houle se propageant (Stockdon et Holman, 2000).

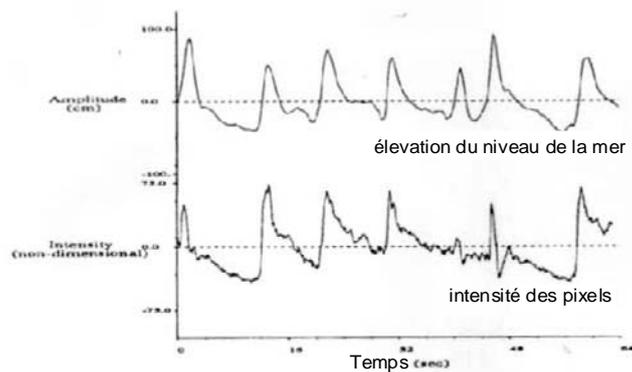


Figure II.36 : Comparaison d'un capteur de pression et de l'intensité des pixels correspondants (d'après Lippmann et Holman, 1991)

- Traitement des données et résultats

Pour illustrer la propagation de la houle sur la plage, il est pratique d'utiliser l'image d'un profil perpendiculaire à la côte, en fonction du temps – le « timestack » ou image temporelle (Figure II.37). La reconnaissance individuelle des vagues s'effectue ensuite par des méthodes classiques de type « zero-up-crossing » (Pradal et al., 2002) qui permettent la localisation dans le temps et l'espace des crêtes de vagues (Figure II.38), même si dans les zones les plus côtières, la formation d'harmoniques peut perturber la détection automatique des crêtes primaires. Les propriétés des vagues (vitesse de phase et période) sont alors calculées pour chaque trajectoire de crête reconstituée. La pente temporelle des trajectoires fournit la vitesse de phase. La distance entre crêtes donne la longueur d'onde.

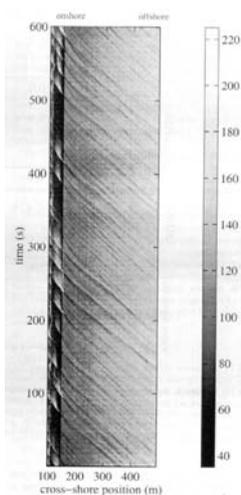


Figure II.37 : Image temporelle ou « timestack » qui montre la variation d'intensité d'un profil de pixels cross-shore en fonction du temps (d'après Stockdon et Holman, 2000).

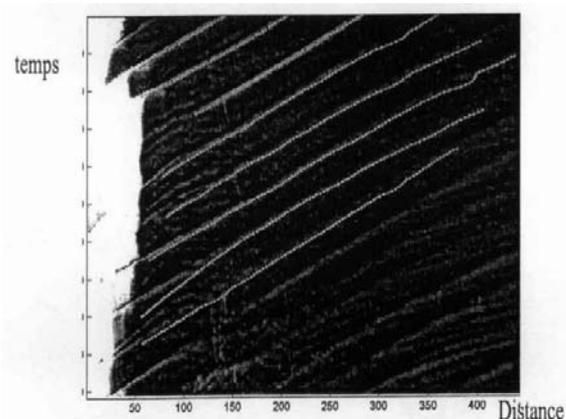


Figure II.38 : Résultat d'une reconnaissance automatique des crêtes des vagues (lignes blanches), sur une image temporelle (d'après Pradal et al., 2002)

Les études de Lippmann et Holman (1991), à partir des spectres d'intensité de pixels précisément situés au-dessus d'un carré de capteur de pression de 4 m de côté, ont permis de déterminer la vitesse de phase et l'angle d'approche d'une houle. Stockdon et Holman (2000) ont utilisé le même principe en utilisant des profils d'intensités cross-shore et longshore sur une plus grande zone. Les résultats de ces études montrent que les techniques vidéo de mesures sont efficaces car les corrélations avec les capteurs de pression sont très bonnes. Outre l'observation du comportement de la houle en milieu littoral et la calibration de modèles numériques, la mesure des paramètres de vitesse et de longueur d'onde sont utiles pour estimer la profondeur d'eau.

- Estimation de la profondeur d'eau par l'étude des caractéristiques de la houle

La connaissance de la profondeur d'eau est une information nécessaire pour l'étude de la morphologie tridimensionnelle des barres sableuse. L'estimation de la profondeur est possible à partir d'une analyse minutieuse des caractéristiques de la houle. A l'aide d'une image vidéo temporelle on peut déterminer la vitesse et la période des vagues sur un profil de plage de position connue. La profondeur de la plage immergée est ensuite estimée par une inversion des équations exprimant la vitesse de la houle. Dans le cas de la théorie linéaire, la vitesse "c" de la houle est exprimée par :

(eq. 2.12)

$$c = \frac{\sigma}{k}$$

où σ , est la fréquence de la houle et k , le nombre d'onde

De plus, l'équation de dispersion exprime la fréquence en fonction du nombre d'onde, de la gravité "g" et de la profondeur d'eau "h" :

(eq. 2.13)

$$\sigma^2 = g \cdot k \cdot \tanh(k \cdot h)$$

Connaissant les caractéristiques locales de la houle en un point, la profondeur de ce point s'obtient en inversant l'équation 2.13, ainsi :

(eq. 2.14)

$$h = \frac{\tanh^{-1}\left(\frac{\sigma^2}{g \cdot k}\right)}{k}$$

Les résultats obtenus sur la plage de Duck (Figure II.39) montrent une erreur moyenne comparée aux bathymétries CRAB de -35 cm (13 % de la profondeur mesurée). En excluant les zones où les vagues ont un comportement non-linéaire, l'erreur tombe à 20 cm. Enfin, lors de conditions idéales de houles inférieures à 1 m, l'erreur moyenne n'est plus que de 12 cm (Stockdon et Holman, 2000).

Ces résultats intéressants peuvent encore être améliorés en utilisant des équations d'inversion qui expriment le caractère non-linéaire de la houle à l'approche de la côte (Grilli, 1998). Des tests ont été effectués pour des mesures aéroportées (Dugan et al., 2001 ; Pradal et al., 2002) mais pas encore pour des caméras fixes. Cette méthode d'avenir peut encore être développée pour détecter efficacement la bathymétrie d'une plage sous-marine. C'est une perspective de recherche intéressante pour l'étude des barres sableuses sub-tidale, car elle relie observations vidéo et modélisation de la houle en zone côtière.

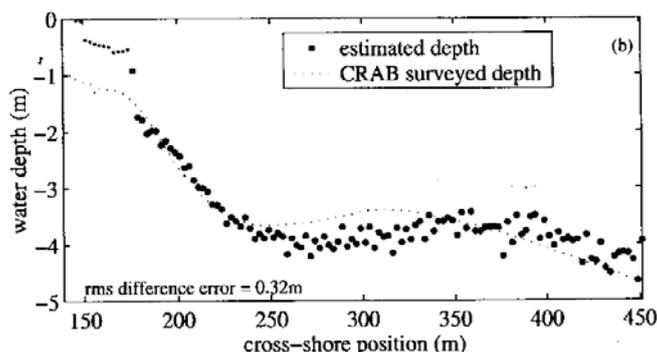


Figure II.39 : comparaison des estimations de profondeur par analyse vidéo des vagues (points noirs) et d'une bathymétrie CRAB (pointillés) (d'après Stockdon et Holman, 2000).

b) Observation du jet de rive

- Enjeux de l'étude du jet de rive

Le « run-up » est défini comme le niveau limite entre la zone humide touchée par les vagues et la zone de sable sec. Il est induit par 2 composantes le « set-up » et le « swash ». Le « set-up » représente l'élévation moyenne de la surface de l'eau, sous l'action de la houle et du vent. Le swash ou jet de rive correspond au flux et reflux des vagues sur la plage. Son étude est nécessaire pour la compréhension du fonctionnement hydrodynamique de la plage. En effet, le jet de rive peut avoir une action érosive très importante sur les structures du haut de plage. De plus, ses pulsations peuvent être associées à la transformation des vagues dans la

zone de surf, le jet de rive peut ainsi permettre d'observer des composantes stationnaires du champ de vagues incidentes. Au niveau du rivage, il peut aussi exprimer les mouvements des ondes de bord infragravitaires (Holman et Bowen, 1984) qui influencent probablement la répartition rythmique des corps sableux littoraux et peuvent devenir prépondérantes dans la zone de surf durant les tempêtes (Guza et Thornton, 1982 ; Wright et al., 1982).

- Méthode d'observation vidéo du swash

Holman et Guza (1984) ont utilisé une technique vidéo pour observer le battement du swash. A partir d'une caméra analogique, ils ont digitalisé manuellement la position de la vague sur la plage en pointant image par image la position limite de cette fine lame d'eau. La comparaison des données obtenues par vidéo à des mesures classiques par capteurs de résistivité montre une bonne similarité des résultats (Figure II.40). Les petites différences entre les deux méthodes peuvent être expliquées par le fait que les mesures de résistivité sont influencées par la hauteur des capteurs, tandis que les mesures vidéo sont soumises à la subjectivité de la digitalisation manuelle. Mais l'amélioration de la digitalisation, la visualisation des données sous la forme d'image temporelle et l'apport de techniques plus modernes de seuillage automatique (Aagaard et Holm, 1989) permettent d'éliminer ce facteur subjectif de l'étude vidéo de Holman et Guza (1984). Ainsi, Holland et al. (1995) montrent que les techniques vidéo détectent mieux les fines couches d'eau qui remontent loin sur la plage, marquant les mouvements infragravitaires aux plus basses fréquences.

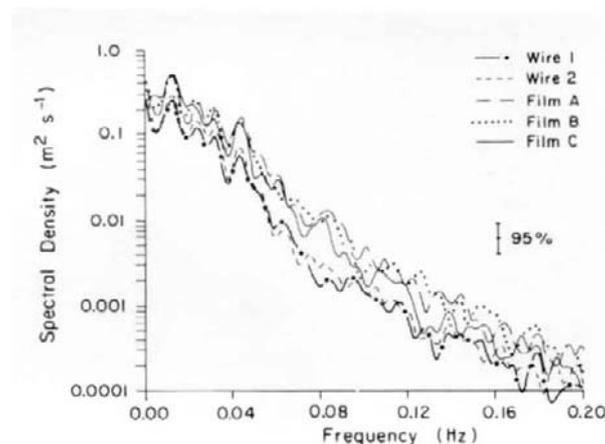


Figure II.40 : Comparaison des spectres d'énergie du swash obtenus par technique vidéo et mesures classiques de résistivité (d'après Holman et Guza, 1984).

Par rapport aux méthodes classiques utilisant des capteurs de résistivité, la technique d'imagerie est donc avantageuse :

- elle permet de relever aisément plusieurs profils cross-shore simultanément ;
 - elle n'est pas perturbée par les tempêtes et les morceaux d'algues pouvant se prendre dans les capteurs ;
 - elle n'est pas influencée par les modifications morphologiques de la zone de jet de rive et la hauteur des capteurs.
-
- Résultats

Sur le site de Duck, Holland et Holman (1996) ont étudié la formation des croissants de plage, structures sableuses rythmiques qui se forment en haut de la zone intertidale. Le but de l'étude est de relier la formation de ces structures aux mouvements du swash mesurés par vidéo. La démarche adoptée consiste à tester les modèles théoriques de formation des croissants à partir des observations de terrain (topographie, vagues incidentes, mouvement du swash). Pour ces recherches, deux événements de formation de croissants de tailles différentes ont été suivis. Les périodes théoriques des ondes de bords stationnaires (Guza et Inman, 1975) ayant pu former ces structures ont été déterminées à partir des conditions de houles et de la mesure des croissants de plage. Cette période peut être soit synchrone au champ de houle incidente, soit subharmonique. La comparaison de ces estimations avec les spectres du swash obtenus par technique vidéo montre des points de convergence entre la fréquence théorique de l'onde de bord synchrone et le pic d'énergie du spectre mesuré. Malheureusement, la structure longshore du swash ne permet pas d'affirmer la présence d'une onde de bord stationnaire de fréquence synchrone lors de la formation des premiers croissants. Un processus encore indéterminé est donc probablement à l'origine de ces premières structures sur la plage de Duck (auto-organisation, ondes plus complexes...).

En revanche, une fois les premiers croissants bien développés, les images vidéo de la plage ont mis en évidence une interaction entre le fluide et la topographie : l'eau du jet de rive se concentre au milieu des croissants, puis redescend en interférant avec la lame d'eau suivante (Figure II.41). Les auteurs font l'hypothèse que cette interaction est responsable de la génération des seconds croissants de plage, espacés de la moitié des croissants préexistants. Ces résultats encore partiels montrent que l'étude longshore du swash grâce à la vidéo permet

d'améliorer les analyses et la comparaison des modèles avec la réalité du terrain. Ils prouvent aussi que ce domaine de recherche est très prometteur pour la compréhension de la zone littorale, mais que les techniques d'observations et de traitement restent à améliorer pour pouvoir efficacement relier les structures sédimentaires rythmiques (barres sous-marines et croissants de plage) avec les processus hydrodynamiques infragravitaires.

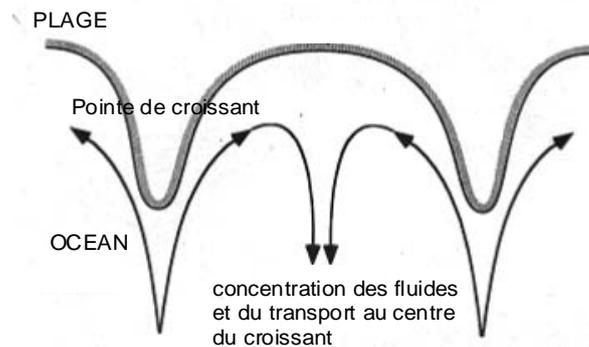


Figure II.41 : Schéma de l'observation vidéo d'une concentration du fluide au centre du croissant, lors de la redescente de la lame d'eau (d'après Holland et Holman, 1996).

c) Observation des courants littoraux

- Intérêt de l'étude des courants littoraux par télédétection

La transformation de la houle sur le fond à l'approche de la côte induit des courants. En fonction de leur puissance, les courants côtiers peuvent devenir les acteurs majeurs du déplacement des corps sédimentaires littoraux. Pour les étudier, les mesures classiques de courantométrie fournissent des résultats précis, mais les données sont ponctuelles et limitées pour l'observation de la variabilité spatiale des phénomènes côtiers. Les études de télédétection permettent par contre une vaste échelle spatiale. D'ailleurs, le développement des techniques utilisant les radars hautes fréquences par effet Doppler (Teague, 1986) permet actuellement d'exploiter les résultats des radars OSCAR -Ocean Surface Current Radar- et CODAR -Coastal Ocean Radar- pour étudier les courants de surface. Mais leur faible résolution spatiale limite leur application dans la zone littorale, contrairement aux radars utilisant des micro-ondes (Young et al., 1985 ; Mc Gregor et al., 1997, 1998) qui peuvent être utilisés pour la mesure de courants côtiers.

- Mesure vidéo des courants

Concernant la vidéo, Dugan et al. (2001) ont utilisé une caméra aéroportée pour estimer le spectre de houle et déduire le courant de surface de l'asymétrie du spectre. De leur côté, Holland et al. (2001) ont mis au point une méthode utilisant une caméra montée en haut d'une tour qui permet d'observer les courants de surface dans la zone proche du littoral, en détectant de petits mouvements de la mousse d'une image sur l'autre (Figure II.42). Cette technique appelée PIV (Particle Image Velocimetry) est complexe et utilisée de façon préférentielle en laboratoire. Mais elle peut fournir des mesures à haute résolution de la force et de la direction des courants de la zone de surf, à condition que le vent soit nul.

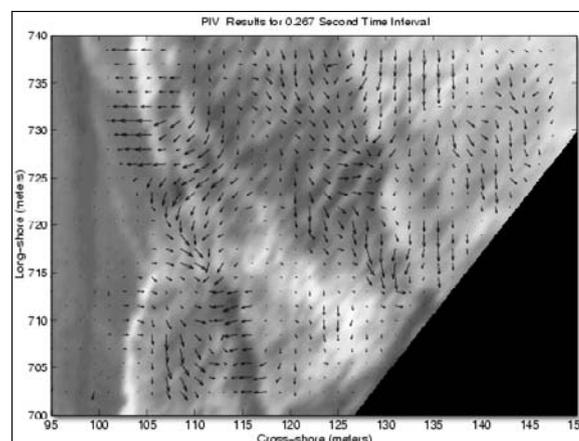


Figure II.42 : Estimation des courants instantanés de la zone de surf interne par la méthode du PIV. Les vecteurs noirs symbolisent le courant mesuré tous les 80 cm, la direction est indiquée par la flèche, la vitesse est proportionnelle à la longueur du vecteur. (d'après Holland et al., 2001)

- Observation des courants sagittaux (rip currents)

Enfin, la méthode classique d'imagerie moyennée permet de repérer une catégorie très importante de courants de la zone littorale, les courants sagittaux ou « rip currents » (Ranasinghe et al., 1999). Ces courants de retour sont souvent associés à une morphologie complexe de barres sableuses ou de croissants de plage. Ils peuvent être très violents et provoquer un transport sédimentaire important vers le large. Leur signature visuelle est remarquable : l'eau transportant des sédiments a une couleur différente et le courant vers le large a un effet sur les vagues incidentes (Komar, 1998). Sur les images moyennées, les « rip currents » forment des zones sombres, entre deux parties plus claires (Figure II.43). L'étude de Ranasinghe et al. (1999) porte sur des images collectées durant 2 ans sur la plage de Palm Beach, Sydney, Australie. Les méthodes de redressement du système Argus permettent de

positionner les courants sagittaux et de quantifier leurs déplacements éventuels en liaison avec la morphologie. L'espace mesuré entre les zones de rip current montre que le modèle de formation de Bowen (1969), basé sur l'action d'ondes de bord, ne fonctionne pas. Le modèle de Dalrymple (1975) qui s'appuie sur l'interaction de trains de houles de directions différentes ne prédit pas non plus correctement l'espace des cellules de circulation de la plage de Palm Beach. De plus, cette étude a montré que la zone d'action des rip currents pouvaient migrer sous l'action de courants longshore.

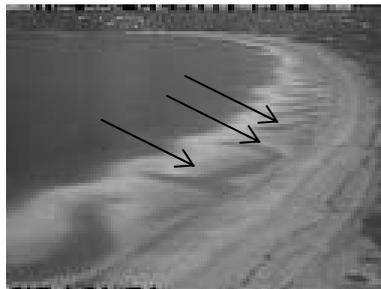


Figure II.43 : Visualisation de la position des courants sagittaux, chenaux sombres qui entrecoupent la zone de déferlement blanche, image moyennée de la plage de Palm Beach, Australie (image Argus, <http://cil-www.oce.orst.edu:8080/>).

Conclusion

Cette partie avait pour but de présenter les vastes potentialités des techniques de télédétection vidéo. Les principales méthodes développées depuis près de 20 ans ont été détaillées et notamment le système ARGUS, qui se base sur le positionnement des zones de déferlement préférentiel des vagues. Des travaux de validation ont montré que c'est un outil efficace pour déterminer la position des barres sableuses pré-littorales. D'autres méthodes de mesures morphologiques de la plage intertidale et sub-aérienne ont également été expliquées. Enfin, les images vidéo peuvent aussi être exploitées pour observer la houle, les courants ou le jet de rive. Pour chacun des cas développés dans cette partie, les exemples utilisés ont permis de mieux cerner les avantages et les inconvénients des différentes méthodes. Ce catalogue technique présente donc des principes pour utiliser la télédétection vidéo en domaine littoral. Il doit servir de base de réflexion pour le système à mettre au point sur la côte aquitaine.

3) Développement d'un système vidéo pour l'observation des plages d'Aquitaine

3.1. Choix d'un système de mesures vidéo

Les potentialités de l'imagerie vidéo en milieu côtier ont été présentées dans les parties précédentes. Ces nouvelles technologies fournissent rapidement de précieuses mesures sur les structures sédimentaires côtières et les paramètres hydrodynamiques. De telles méthodes peuvent s'avérer très intéressantes pour compléter des données de géomorphologie plus classiques. Les parties II.A et II.B ont effectivement montré plusieurs limites des méthodes de topographie et de bathymétrie employées dans l'étude des plages. L'imagerie vidéo peut y apporter des solutions.

- Mesure en domaine sub-tidal

L'observation des barres sableuses sous-marines par les méthodes de bathymétrie classique est rendue bien souvent impossible dans les zones à forte énergie. Le déferlement des houles rend la mesure dangereuse, de plus, le mélange d'air et d'eau dans la zone de surf biaise le signal de l'échosondeur. Enfin, la pente des vagues et leur cambrure provoquent un roulis considérable du bateau, ce qui détériore fortement les données en l'absence de correction d'attitude. L'imagerie vidéo pour sa part permet une observation à distance, basée précisément sur le positionnement des zones de déferlement.

- Echelle spatiale de mesure

D'un côté, les mesures classiques ne produisent que difficilement des observations sur une échelle spatiale souvent inférieure au kilomètre. De l'autre, la télédétection par satellite fournit des informations moins précises, mais sur une grande échelle. Les techniques vidéo se situent à mi chemin entre la précision des mesures classiques et la grande échelle spatiale des images satellites.

- Echelle temporelle des études

La répétitivité des bathymétries sur une plage à haute énergie n'est pas bonne, car les conditions permettant les mesures sont rares. La fréquence des données topographiques de la plage intertidale est également dépendante des conditions de mer et du niveau de l'eau à marée basse. En fonction du mode d'installation du système d'observation vidéo, il est possible d'obtenir une très grande fréquence de mesure, sur de longues périodes.

A la suite de ces constats et au vu des résultats obtenus sur la plage de Duck (voir partie II.C.1), la mise en place de techniques vidéo sur la côte aquitaine a été décidée. A l'heure de débiter le projet, le seul système exploitable rapidement pour la recherche côtière était la station ARGUS, dont les caractéristiques ont été détaillées dans la partie précédente. Mais l'installation de cette technologie sur la plage du Truc Vert était trop lourde et onéreuse. En effet, le bon fonctionnement d'une station Argus basique nécessite un point haut fixe, un branchement électrique et une connexion internet. Ces trois conditions ne sont pas réunies sur la plage du Truc Vert. Ce travail de thèse a donc pour objectif d'initier le développement d'une technique de mesure vidéo spécifique à la côte aquitaine, mais largement inspirée du système Argus.

Un cahier des charges succinct a été dressé.

- Le système a pour objectif principal la détection des barres sableuses ;
- La station de mesure doit être mobile et légère. La côte étant sauvage et déserte, il faut un système autonome, démontable et transportable sur un véhicule 4x4.
- Une étape de post-traitement doit permettre le redressement des images pour positionner les pixels dans un repère géographique.
- Le système doit être évolutif et flexible. Il doit pouvoir s'adapter à de futurs besoins et de nouvelles techniques d'analyse.

3.2. Architecture du système

Le système vidéo développé a pour objectif principal l'observation du domaine littoral et la cartographie des structures sédimentaires. Plusieurs étapes vont guider son fonctionnement, depuis l'installation du matériel jusqu'à la visualisation des résultats. L'organisation de ces étapes forme l'architecture du système. La figure II.44 est un organigramme qui présente cette organisation.

Le travail de développement consiste à trouver des solutions pour mettre au point chaque élément du système. Ces solutions sont en majeure partie constituées de modules informatiques programmés spécifiquement dans le cadre de ce projet. Les paragraphes suivants présentent l'ensemble des moyens et des programmes informatiques mis en place au cours de ce travail de thèse.

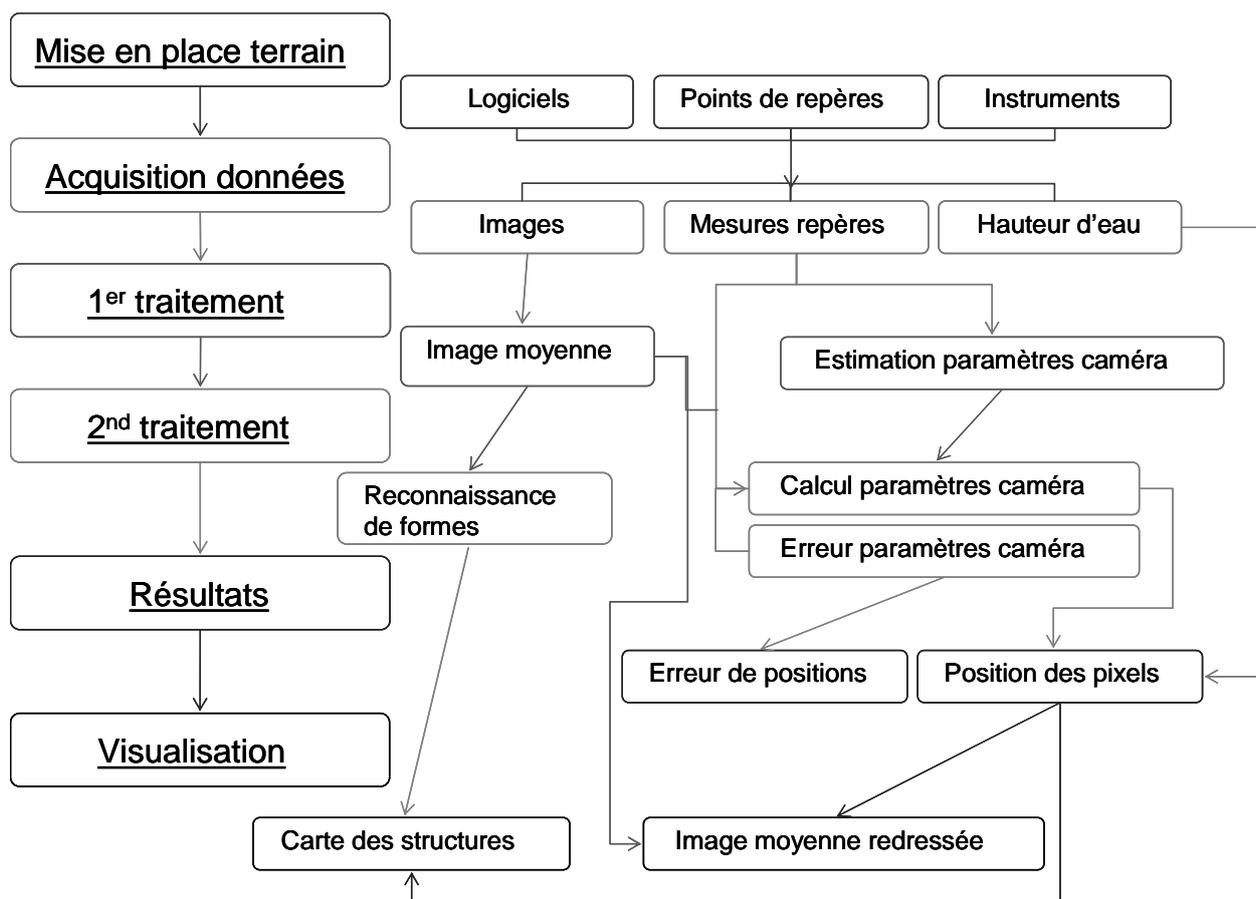


Figure II.44 : Architecture du système vidéo en développement.

Les étapes de travail sont indiquées à gauche de l'organigramme, à droite se trouvent les moyens matériels, les mesures et les traitements à mettre en place à chaque étape.

- Mise en place sur le terrain

Cette mise en place consiste tout d'abord à choisir les instruments de mesures (caméra, optique, appareil de mesure de distances, ordinateur) et les outils adaptés à la zone d'étude. Les logiciels assurant l'acquisition et le stockage des données doivent être fiables et paramétrés. L'installation des instruments sur le terrain est également un point important qui conditionne la mise en place de points de repère connus.

- Acquisition des données

Tout d'abord, cette partie du travail vise à enregistrer des images de la plage, pendant un temps et à une fréquence déterminés. Ensuite, le positionnement précis des points de repère dans un système géoréférencé est un élément fondamental pour la suite des traitements. Enfin, il convient de déterminer précisément l'altitude de la mer dans ce système.

- 1^{ère} phase de traitement

La première phase de traitement va permettre, d'une part, la création d'une image moyenne, où l'on observe les zones de déferlement préférentiel. D'autre part, elle donne une estimation

des angles et de la position du centre optique à partir de points de repères situés sur le boîtier de la caméra.

- 2^{nde} phase de traitement

Durant cette seconde phase, les formes distinctes de l'image moyenne peuvent être extraites. Ensuite, la position des points de repère sur cette image, leur mesure dans le système géoréférencé et l'estimation des angles de la caméra vont permettre le calcul capital des paramètres de caméra. Ces paramètres constituent l'étalonnage du système. La détermination des intervalles d'erreurs sur ces paramètres est aussi un point clé de cette phase de traitement.

- Résultats

Les résultats des 2 premières phases d'analyses permettent de calculer la position des quatre coins des pixels de l'image situés au niveau de la mer. Ce calcul prend donc en compte les paramètres de caméra, mais aussi l'altitude de la mer. Les erreurs sur le positionnement des pixels sont également estimées.

- Visualisation

La dernière partie du système a pour but de visualiser les résultats. Ce travail peut consister à créer une carte géoréférencée des structures grâce aux pixels extraits de la reconnaissance de forme. Il est possible aussi de concevoir une image redressée (en plan) à partir de l'image moyennée et du tableau de position des pixels.

3.3. Choix du matériel et techniques d'acquisition des données

a) Mise en place du matériel sur le terrain

Le matériel nécessaire à la mesure vidéo sur la plage du Truc Vert a été défini avec soin. Pour l'initiation du projet, une caméra unique sera testée. Plus tard, on peut imaginer l'ajout de caméras pour augmenter l'échelle spatiale d'observation. Le modèle choisi est entièrement numérique, du type Sony DFW-X700. Les images en couleurs sont faites par une cellule CCD de 1024 x 720 pixels qui peut prendre 15 images par seconde. Elles sont transférées vers un ordinateur portable via une connexion de norme IEEE 1394. Ce type de liaison permet un très grand taux de transfert (400 MBit/s). La caméra est alimentée directement par le câble IEEE 1394 relié à une batterie, sa consommation d'énergie est minime. Elle est protégée des intempéries et du sable par un boîtier résistant, dont le support est orientable dans les 3 directions de l'espace. Les objectifs optiques montés sont interchangeables. Pour les tests,

nous avons choisi un objectif grand angle de focale 6 mm. Pour améliorer la portée du système, les images peuvent être prises depuis un point haut. Dans le cadre de ce projet, un mat télescopique a été acquis. Il mesure environ 15 m déployé et pèse une trentaine de kilo. Deux modes sont possibles pour assurer sa stabilité : par un trépied et des haubans ou fixé sur un véhicule par un collier de serrage. Le mat replié mesure 4m et peut être facilement transporté sur la galerie d'un véhicule. Le dispositif est donc entièrement transportable et autonome, ce qui donne une grande souplesse dans l'utilisation et les tests du système. Il permet de développer l'aspect exploratoire de la technique vidéo, pour des plages et des milieux littoraux peu accessibles.

b) Acquisition des données

L'acquisition des images est gérée sur ordinateur, par le pilote de la caméra et le logiciel de capture d'images associé. L'avantage des caméras 1394 vient du transfert entièrement numérique de l'information. Sur les caméras classiques à CCD, l'image est envoyée sous forme analogique. La conversion numérique lors de l'acquisition sur disque dur provoque alors une perte d'informations et des problèmes de synchronisation qui n'ont pas lieu sur les modèles 1394. Ce type de caméra permet également une meilleure définition que les caméscopes numériques du commerce. Les images des caméscopes sont transmises par port 1394 au format « DV », qui limite la qualité de l'image à 720 x 576 pixels. Dans le cas du système développé, le format des images est défini par l'utilisateur dans le logiciel de capture. Généralement, les images sont compressées pour limiter la taille des fichiers. Ici, les images brutes peuvent être sauvegardées sans aucune perte d'information. Cette méthode assure une qualité optimale, mais oblige à de grandes capacités de stockage dans le cas d'une acquisition en définition maximale. Ainsi, 1 minute d'enregistrement à 15 images par seconde représente environ 1 Go d'espace disque.

Sur le terrain, en plus de l'enregistrement des images, il faut mesurer la position de points de repère fixes qui servent à étalonner une partie des paramètres de la caméra. Ces repères sont situés sur le boîtier de la caméra et sur la zone filmée. La mesure est effectuée par un tachéomètre laser qui ne nécessite pas de mire. Un tel instrument fournit le positionnement des points de repère inaccessibles situés sur le boîtier de caméra, en haut du mat télescopique (Figure II.45). La visée exacte au centre des cibles de terrain est également appréciable pour obtenir une précision centimétrique. Le niveau de la mer dans le système de coordonnées doit

être mesuré également. Différents types de détermination sont possibles et doivent être testés en fonction du domaine d'étude : marégraphe, utilisation de modèle, mesure d'un niveau apparent avec les techniques de topographie.

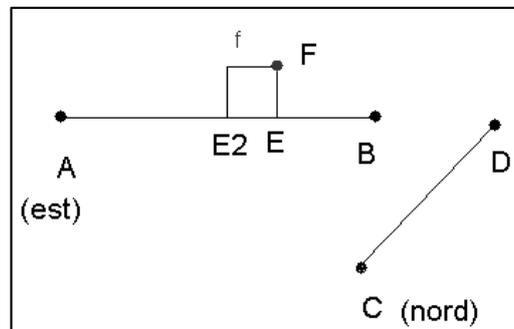


Figure II.45 : Schéma des points de repère du boîtier de caméra. A et B sont parallèles à l'axe optique, C et D aux lignes du capteur CCD, AB et CD sont de longueurs connues. F représente la position estimée du centre optique. f est la longueur focale.

3.4. Programmation des modules de traitements d'images

a) 1^{ère} phase de traitement

Une fois le travail de terrain effectué, le traitement des données s'effectue en plusieurs étapes. La première étape consiste à moyenner les images obtenues. Sur un film d'environ 10 min, 500 images sont extraites à une fréquence de 1 Hz. Elles sont sauvegardées sur un CD et sont moyennées par un premier module nommé MOYIMAGE, programmé avec le logiciel PV-WAVE. Le nombre d'images a été choisi a priori, par commodité pour la sauvegarde et peut être discuté en fonction du fonctionnement hydrodynamique de la plage. En effet, les 500 images qui représentent une durée de 8min et 20 s doivent permettre d'observer un nombre suffisant de vagues déferlantes. La durée de la mesure doit également être relativement courte pour limiter les variations tidales du niveau de l'eau. L'image moyenne qui résulte de ce premier traitement est composée de 3 tableaux de chiffres compris entre 0 et 255, représentant l'intensité de couleurs des pixels (en rouge, vert et bleu). Elle peut être aisément simplifiée en une matrice unique en niveau de gris.

Le premier niveau de traitement permet aussi une estimation de certains paramètres de caméra. Le calcul est mis en place par l'intermédiaire du module POSICAM programmé spécialement. Il détermine la position du centre optique, à partir d'une estimation des angles de l'axe optique dans le repère de référence. L'estimation est effectuée grâce aux mesures des

points de repère du boîtier, dont la géométrie autour du centre et de l'axe optique est connue par des mesures préalables (Figure II.45). Grâce à cette méthode, la position du centre de la caméra est obtenue très rapidement à ± 1 ou 2 cm. Les angles estimés vont permettre l'initialisation des programmes de la seconde phase de traitement.

b) 2nde phase de traitement

Le second niveau de traitement a pour objectif l'étalonnage complet de la caméra, afin de permettre le redressement de l'image moyenne. Les paramètres à connaître sont : la taille des pixels, la longueur focale, les 3 angles d'orientation de l'axe optique dans l'espace, la position de la caméra. La taille du côté des pixels carrés est fournie par le constructeur et mesure $6,25 \mu\text{m}$. La position du centre optique a été déterminée dans la première étape de traitement. La longueur focale et les angles d'orientation sont connus approximativement, l'une est fournie par le constructeur de l'objectif (focale de 6mm), les autres sont estimées par l'étape précédente. Cette nouvelle phase doit donc déterminer très précisément ces paramètres. Le principe repose sur le positionnement des points de repère du terrain par le calcul et l'étude des images. Le traitement se base sur l'emplacement des cibles à l'image et l'utilisation des paramètres de caméra, selon une équation dont la base a été présentée dans le paragraphe II.C.2.1. Le module PARACAM a été développé spécifiquement pour tester par itération une grande série de combinaisons des paramètres. La solution affichée par PARACAM est la combinaison qui fournit un écart de distance minimale entre les estimations et la mesure de position des points de repère.

La précision de cet étalonnage est dépendante de 2 critères principaux : l'erreur résiduelle entre les points calculés et les points mesurés sur le terrain, et la précision de résolution des équations.

L'erreur résiduelle entre points calculés et points mesurés doit être la plus petite possible. Elle est fonction de la précision de mesure des points de repère sur le terrain et de la détermination du positionnement du centre optique, de la reconnaissance du point de repère sur l'image et de la parfaite adéquation entre le pixel à positionner et le point mesuré. Pour l'instant, la reconnaissance des 3 à 4 points de repère sur l'image se fait manuellement, à l'aide de zooms numériques permettant une précision de l'ordre du pixel. Mais des programmes de reconnaissances de formes automatiques peuvent parfaitement s'adapter à cette

problématique. Ils pourraient également extraire rapidement les formes sédimentaires des images moyennées. En résumé, le nombre de points de repère, la configuration des cibles, le mode de visée sur le terrain et la digitalisation sur l'image sont autant de détails qui ont été travaillé pour obtenir les meilleurs résultats possibles. Des améliorations importantes sont cependant encore envisageables.

La précision de résolution des équations est également capitale pour garantir un redressement efficace. Les angles de l'axe optique et la focale doivent être connus précisément afin d'obtenir une estimation acceptable de la position des pixels les plus éloignés. En contrepartie, le nombre d'itérations augmente considérablement ; la précision croissante provoque alors des calculs plus longs. A l'heure actuelle, les paramètres d'étalonnage sont déterminés à 0,01 près. Différentes méthodes informatiques peuvent toutefois être adaptées au module PARACAM pour accroître la qualité de résolution des algorithmes du programme.

3.5. Résultats et visualisation

Une fois les paramètres de caméra connus, les coordonnées des pixels situés au niveau de la mer peuvent être calculées très rapidement par le module POSIPIX. Ce module a été programmé pour fournir la position des pixels dans un repère centré sur la caméra, en fonction du niveau de l'eau. Selon la qualité de résultat recherchée, il est possible de déterminer la position du centre du pixel, ou bien l'emplacement de ces quatre coins. Les coordonnées obtenues sont valables précisément à l'altitude du niveau de la mer, tandis que des distorsions apparaissent pour les pixels de la plage subaérienne : plus on s'éloigne du niveau marin mesuré, plus les erreurs sont grandes. Le résultat du redressement d'image calculé par POSIPIX se trouve alors sous la forme de 2 matrices de chiffres. L'une représente la position en abscisse des pixels, l'autre, les valeurs en ordonnées. Ces tableaux sont très lourds et encore inexploitable en l'état. Il faut donc définir des moyens pour visualiser ces résultats.

La première méthode de visualisation consiste à afficher la position d'une série de point caractérisant les figures sédimentaires. Ces points peuvent être extraits de l'image moyenne lors de la seconde phase de traitement. Cette technique a l'avantage de proposer une visualisation très simple et facilement superposable à des données de topographie ou de

bathymétrie. Elle dépend cependant beaucoup de la qualité de la reconnaissance de forme et supprime un grand nombre d'informations contenues dans l'image. La seconde méthode utilise la position des pixels et interpole leurs valeurs selon une grille de taille définie. Cette méthode est semblable à la mise en place de MNT. Elle permet une représentation de l'ensemble de l'image redressée, dans son repère géographique. Deux images provenant d'angles de vue différents peuvent même être superposées ou fusionnées pour obtenir une zone d'étude de plus grande taille. La reconnaissance des formes sédimentaires peut alors être menée efficacement sur cette image non déformée par la perspective de la caméra.

Les points extraits devront cependant prendre en compte les incertitudes moyennes et maximales de la technique de redressement. Il semble en effet très important d'effectuer un travail de quantification des erreurs et des imprécisions de la méthode de télédétection vidéo développée au cours de cette thèse. Des estimations sur les intervalles de détermination des paramètres de caméra et sur les erreurs maximales de positionnement des pixels seront indiquées dans la partie suivante qui présente les premiers tests du système sur la plage du Truc Vert.

3.6. Bilan du travail effectué pour le développement d'un système de mesure vidéo des plages de la côte aquitaine.

Cette thèse a pour but de décrire les barres sableuses de la côte aquitaine. Le développement d'un outil de télédétection vidéo est donc en premier lieu destiné à améliorer les observations sur les barres sableuses. Après un travail bibliographique et une réflexion méthodologique (voir parties précédentes), il a été décidé de mettre en place un système basé sur le principe des stations ARGUS.

La configuration particulière de la côte aquitaine et de la plage du Truc Vert a nécessité la rédaction d'un cahier des charges spécifique. L'aspect transportable et autonome est devenu une priorité. Il était donc nécessaire de choisir un matériel capable de répondre à ces besoins. Notre choix s'est porté sur une caméra numérique SONY DFW-X700. Sa qualité première est de transmettre des images entièrement numérique à l'aide d'une connexion performante de

norme 1394. Cet instrument est le gage d'une excellente qualité des mesures et surtout d'une grande souplesse d'utilisation.

Autour de la caméra, tout un système a été mis en place pour permettre la mesure et le traitement des images. Un travail de programmation a permis de mettre au point quatre modules capables de créer une image moyenne redressée :

- MOYIMAGE produit une image moyenne à partir de 500 clichés instantanés ;
- POSICAM positionne le centre optique de la caméra dans un repère géographique ;
- PARACAM calcul les paramètres de calibrage de la caméra ;
- POSIPIX établit la position des pixels de l'image dans le repère géographique.

En novembre 2004, une expérience a été effectuée sur la plage du Truc Vert pour valider les choix et tester la qualité des programmes développés. Les résultats de ces premiers tests sont présentés dans la prochaine partie.

4) Premiers tests d'un système d'observation vidéo sur la plage du Truc Vert

4.1. Mise en place sur le terrain et acquisition des données

Le système de mesure vidéo a été testé le 24 novembre 2004 sur la plage du Truc Vert. La caméra était positionnée en sommet de dune, sur une zone dégagée et plate, en haut du mât télescopique non déployé. Les images ont été enregistrées à marée haute avec de bonnes conditions de vent et d'éclairage. L'acquisition s'est effectuée à 15 images par seconde, avec une résolution maximale et un mode de compression des données sans perte de qualité. Sur la figure II.46 qui représente un cliché unique, on observe du bas vers le haut : la dune, la plage subaérienne, la plage intertidale et sous-marine immergée. Les zones blanches indiquent une vague déferlante ou bien la position résiduelle de mousse. Un tachéomètre sans mire a fourni les positions de 3 points de repère sur la plage et la dune et de 4 points de repères sur le boîtier de la caméra (Tableau II.2). Le niveau d'eau a également été déterminé par tachéométrie, à environ -14,5m sous l'instrument.



Figure II.46 : Cliché vidéo de la plage du Truc Vert, le 24 novembre 2004. Les positions des points de repère terrain (Pt1, Pt2, Pt3) sur l'image ont été repérés manuellement grâce au zoom numérique.

POINT	mesure terrain			Position image	
	Est	Nord	Z	Ligne	Colonne
Pt 1	-54,245	4,031	-8,291	-173	-80
Pt 2	-36,115	17,181	-6,703	66	-111
Pt 3	-56,396	42,686	-8,674	360	-68
A	11,127	9,139	3,71	origine au centre de l'image	
B	10,83	9,16	3,678		
C	10,943	9,278	3,61		
D	10,935	9,151	3,612		

repère centré sur l'instrument

Tableau II.2 : Récapitulatif des informations collectées sur les points de repère. Les valeurs (Est, Nord, Z) sont des mesures par tachéométrie concernant les 3 points de repère sur la plage et les 4 points de repère sur le boîtier caméra. La position des points sur l'image correspond au lignes et colonnes du pixel situé au centre de la cible.

4.2. Traitement des images

a) 1^{ère} phase de traitement

500 clichés enregistrés à 1 Hz ont été moyennés pour obtenir l'image de la situation du 24 novembre 04 à marée haute (Figure II.47). Cette image montre clairement une zone très blanche de déferlement préférentielle située sur le rivage. On remarque également deux zones claires positionnées plus au large. La partie gauche de l'image est également éclaircie : il s'agit de l'effet du soleil qui provoque une légère saturation des contrastes.



Figure II.47 : Image moyennée du 24 novembre 2004 obtenue avec le module MOYIMAGE.

Au cours de cette phase de traitement, la position du centre optique de la caméra est estimée, ainsi que certains paramètres de caméra nécessaires à l'étalonnage (Tableau II.3). Le programme informatique POSICAM se base sur la mesure des 4 points de repère du boîtier de caméra et leur agencement spatial. Les résultats montrent que la caméra a été placée à une quinzaine de mètres dans le Nord-est de la station de référence. Le centre optique se situe à 3,7 m au-dessus du tachéomètre, positionné pour sa part sur un trépied à 1,3 m du sol. La qualité des mesures est contrôlée par comparaison avec 2 segments mesurés au laboratoire ; les écarts sont minimes et inférieurs au millimètre. On estime que les coordonnées sont calculées à ± 1 cm. La connaissance de la position de la caméra permet maintenant le recentrage du référentiel d'étude pour les prochains traitements. Dans un même temps, les angles d'orientation de la caméra sont estimés. Le calcul est rendu possible car les 4 points de repère du boîtier forment des droites orthogonales à l'axe optique. Les valeurs sont indicatives puisque certains écarts entre mesures de distances sont de l'ordre de l'erreur interne du tachéomètre (1 cm). Ainsi, la différence d'altitude entre les points C et D (Tableau II.2) est inférieure au centimètre et empêche par conséquent la résolution précise de l'angle Roll. Les paramètres d'angle de visée seront affinés au cours de la prochaine étape de traitement et ne remettent pas en cause le positionnement du centre de caméra.

	Est	Nord	altitude
centre optique	10,8966	9,20942	3,68568
<i>Vérification</i>	terrain	labo	
segment AB	0,299456	0,3005	
segment EF	0,0540076	0,054	
<i>Approximation</i>	PAN	TILT	ROLL
angle caméra	-4,00728	83,88702	0,861663

Tableau II.3 : Détermination de la position du centre optique et approximation des angles de caméra au cours de la 1^{ère} étape de traitement. La mesure de terrain de AB et de EF permet de vérifier la précision des mesures.

b) 2^{nde} phase de traitement

Cette partie de l'analyse permet un étalonnage précis de la caméra, basé sur l'observation de points de repère situés sur la plage. Le programme informatique développé (PARACAM) consiste à tester des combinaisons de paramètres, puis à sélectionner la solution qui détermine au mieux les positions (Tableau II.4). Pour ce travail, les paramètres ont été définis pour une résolution de $\pm 0,005$ (en mm ou en degrés). Les intervalles de recherches sont restreints au maximum pour limiter le nombre de combinaisons et de boucles de calcul qui augmentent les temps de traitement. Les résultats donnent une longueur focale de 6,05 mm, la différence de

0,05 mm par rapport aux données du constructeur de l'optique est tout à fait normale. L'angle Tilt obtenu est de 84,13°, à 0,25° de la valeur estimée par les mesures de la 1^{ère} phase d'analyse. Comme prévu, les différences entre les résultats de ces 2 phases de traitement sont plus importantes pour les angles Pan et Roll, déterminés respectivement à -5,78° et -0,22°. L'erreur totale de positionnement des 3 points de repère est de 46 cm, mais on constate que le point 2 est très mal estimé (44 cm d'erreur). Ces résultats montrent que l'utilisation de 3 points de référence reste limitée car une légère imprécision sur l'un d'eux affecte trop lourdement la qualité des paramètres. Un travail sur un nombre plus important de points est une perspective d'avancée à mener sérieusement après ce test.

boucles de calcul		0,01	
	mini	maxi	
Focale	6,00	6,15	mm
Tilt	84,05	84,15	°
Pan	-5,85	-5,75	°
Roll	-0,25	-0,15	°
résultats			
Focale	Tilt	Pan	Roll
6,05	84,13	-5,78	-0,22
comparaison estimation - mesure			
PR1	PR2	PR3	somme
0,016	0,436	0,009	0,461

Tableau II.4 : Détermination de 4 paramètres de caméra par le module PARACAM. Les paramètres minimum et maximum des boucles de calcul sont indiqués, le pas est de 0,01. La comparaison estimation – mesure représente la distance entre les points mesurés et les points calculés en m.

Afin d'améliorer le système et de mieux comprendre la sensibilité des différents paramètres de caméra, une partie du traitement est basée sur l'étude des erreurs. Le développement de cet aspect doit être poursuivi dans le cadre plus général de la validation de la méthode. L'approche entreprise prend en compte des intersections d'intervalles entre les mesures de terrain et les estimations calculées. Le traitement informatique est donc beaucoup plus lourd que dans la recherche d'une minimisation de distance. Le tableau II.5 indique les erreurs considérées qui vont conditionner la largeur des intervalles d'étude : $\pm 0,5$ pixels pour la détermination des points de repère sur l'image et ± 2 cm pour leurs coordonnées dans un référentiel centré sur la caméra. Le positionnement des points de repère est alors résolu par 149 combinaisons de paramètres dans un cadre de 0,04° pour l'angle Tilt, 0,09° pour l'angle Pan, 0,07° pour l'angle Roll et 0,04mm pour la focale. L'étape de résultat qui positionne les pixels permettra de calculer l'erreur induite sur le positionnement des pixels.

ERREUR

repère image	I	J	
pixel	0.50000000	0.50000000	
mesure terrain	X	Y	Z
mètre	0.020000000	0.020000000	0.020000000

boucles de calcul

	mini	maxi
Focale	6.0500000	6.1400000
Tilt	84.100000	84.180000
Pan	-5.8000000	-5.7000000
Roll	-0.28000000	-0.17000000

combinaison de résultats

nombre 149.000

	Tilt	Pan	Roll	Focale
mini	84.120000	-5.7900000	-0.26000000	6.0700000
maxi	84.160000	-5.7000000	-0.19000000	6.1100000

Tableau 2.5 : Utilisation des erreurs sur la mesure pour obtenir une série de combinaisons de paramètres de caméra valables à l'aide d'une évolution du programme PARACAM.

4.3. Résultats

A partir des paramètres d'étalonnage de la caméra, le programme POSIPIX calcule la position dans le référentiel géographique de chaque pixel de l'image, organisée en ligne et colonne d'éléments. La figure II.48 montre la position des pixels en abscisse (vers le Nord) et en ordonnée (vers l'Ouest) en fonction des lignes et des colonnes de l'image. Le programme limite ses calculs de position à la zone plane de l'océan en repérant les lignes situées au-delà de l'horizon théorique (ligne 286). On remarque que la position des pixels en ordonnée s'éloigne très rapidement à l'approche de cette limite, pour dépasser largement une portée de 500m. En revanche, les abscisses restent proches autour de l'axe optique, même pour des points éloignés en ordonnée. Les distances en abscisse augmentent rapidement et dépassent 100 m sur les bords éloignés (colonne minimum et maximum, pour des lignes supérieures à 150).

Ces résultats rendent possible le calcul de la taille des pixels. Ce paramètre est particulièrement important pour connaître la surface caractérisée par un élément de l'image et définir les limites d'utilisation de la technique vidéo. La figure II.49 représente la taille des pixels en fonction de leur position redressée. En ordonnée, on observe que la taille des pixels dépasse 10 m au-delà de 400 m et 30 m à 700 m de l'origine du repère. En abscisse, la taille des pixels augmente rapidement et dépasse 5 m au-delà de 200 ou 300 m vers le Nord ou le Sud. On peut également remarquer que les zones situées à moins de 200 m de la caméra sont mesurées très efficacement par des pixels de petites tailles (inférieure à 1m), positionnés précisément. Ces résultats sont en tout point comparable avec les capacités d'une station ARGUS (Van Enckevort, 2001).

Le calcul des positions fournit les résultats du redressement. L'estimation des erreurs est également nécessaire pour connaître les limites de la méthode et travailler sur des améliorations. Pour ce test, la détermination des erreurs avait pour but de comparer la position des pixels calculés avec l'ensemble des combinaisons de paramètres de caméra obtenu à l'étape précédente. La figure II.49 présente les résultats d'une étude sur les erreurs maximales. Elle montre que les erreurs maximales dépassent rapidement 10 m en abscisse et en ordonnée. De tels écarts n'ont qu'une faible probabilité d'existence, mais ils démontrent parfaitement que les méthodes vidéo sont extrêmement sensibles à la moindre imprécision. Un résultat comparable a également été obtenu par Van Enkevort (2001) au cours d'une étude de précision d'une station ARGUS. Il faut cependant préciser que les résultats de ce test ne prennent pas en compte l'erreur d'altitude de la mer, ni les imperfections de l'objectif optique de la caméra. Finalement, les calculs d'imprécision montrent la nécessité de mener une campagne importante de validation de la technique sur le terrain, afin de limiter les risques d'erreurs lors de l'interprétation des images.

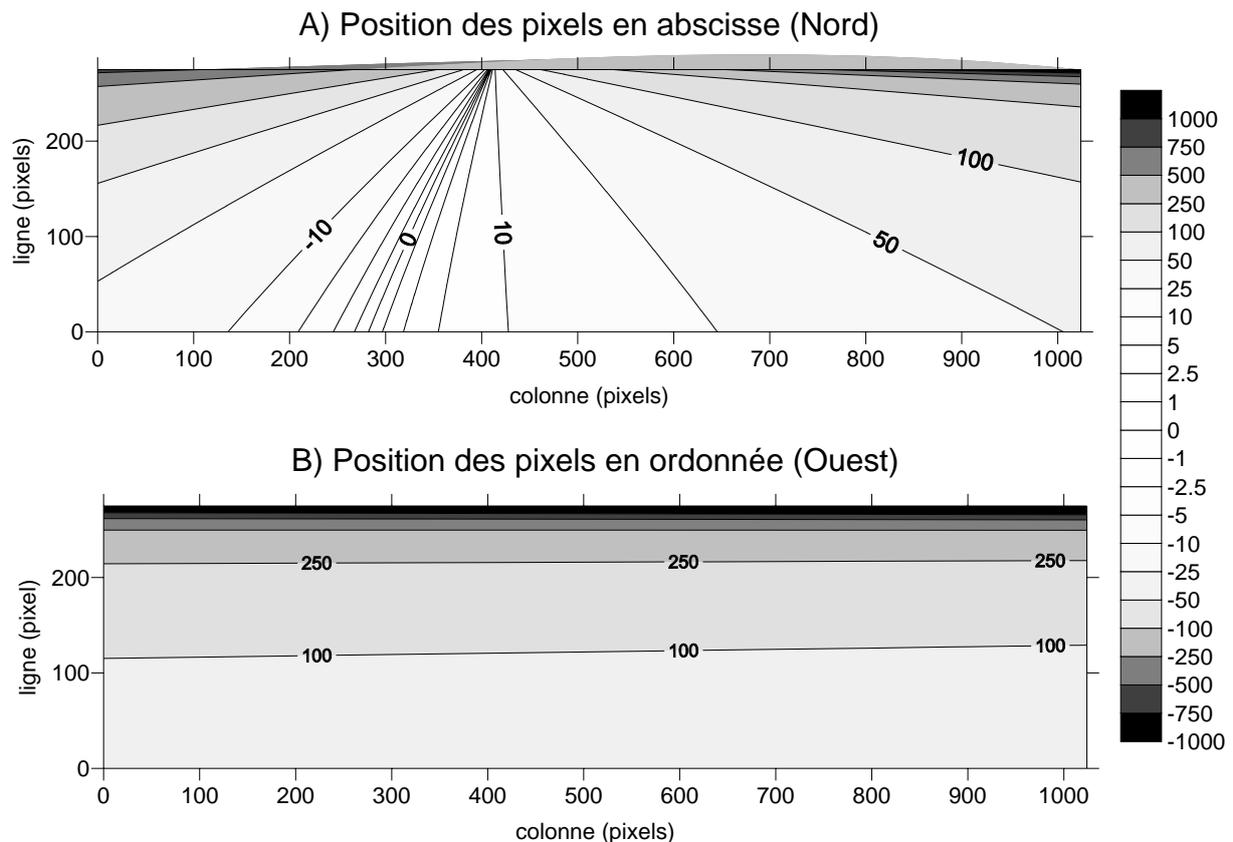


Figure II.48 : Position des pixels de l'image du 24 novembre 2004 en abscisse (A) et en ordonnée (B), à l'altitude de la mer. La limite des lignes de pixels est obtenue en fonction de la position de l'horizon. La légende indique la position des pixels en mètres, dans le repère géographique de la plage du Truc Vert.

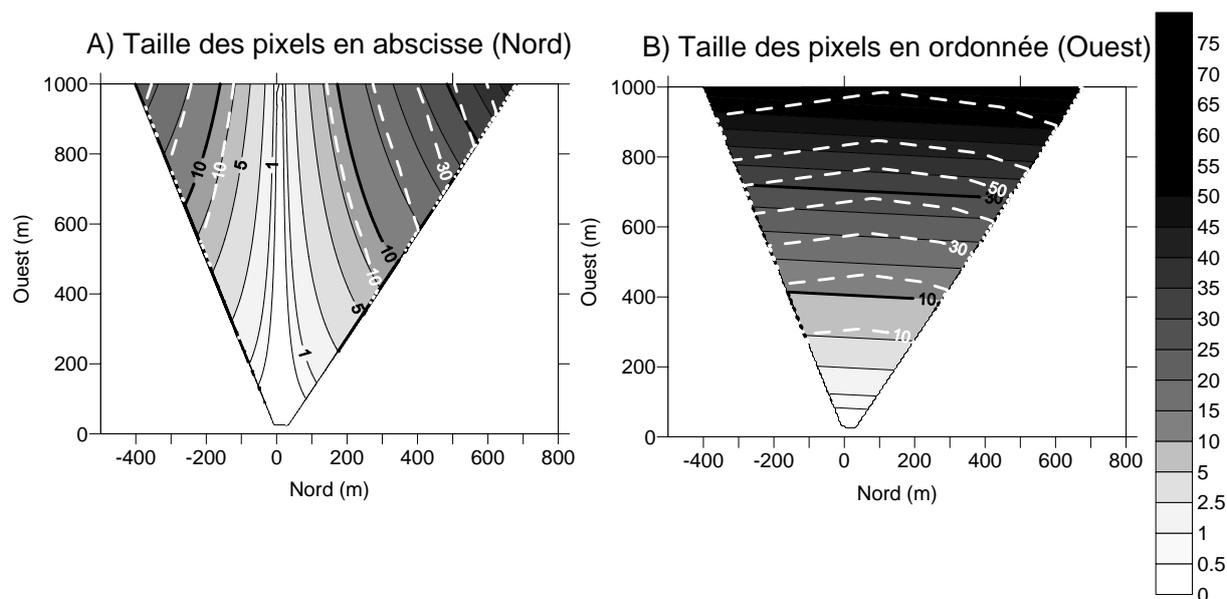


Figure II.49 : Taille des pixels en abscisse (A) et en ordonnée (B) en fonction de la position des pixels dans le repère géographique, à l'altitude de la mer.

La légende indique la taille des pixels en mètres.

Le pointillé blanc correspond à l'erreur maximale de positionnement des pixels.

4.4. Visualisation

La dernière étape du traitement vidéo consiste à visualiser les résultats. Il faut donc créer une image moyenne qui remplace chaque élément dans le repère géographique choisi. L'image à construire est tout d'abord une vaste matrice vide constituée de pixels de taille unitaire (1m² pour ce test). En fonction de la position des pixels, des opérations d'interpolation ou de moyenne sont effectuées pour remplir la matrice. Le résultat est une image redressée, équivalent à une vue d'avion à la verticale de la zone d'étude. La figure II.50 montre la situation du 24 novembre 2004 à marée haute. On distingue nettement la ligne de rivage qui forme une zone très claire à l'intersection du niveau d'eau à marée haute et de la plage. Elle se situe entre 110m et 120m à l'Ouest de l'origine. Plus au large, un domaine sombre indique que les vagues ne déferlent pas, il s'agit d'une baine localisée entre 115 et 170 m dans l'Ouest. Enfin après cette structure, on peut également observer une partie légèrement plus claire qui signe la présence d'une barre sableuse sur laquelle quelques vagues déferlent. Cette barre se situe entre 150 et 200 m vers l'Ouest. On peut remarquer aussi un gradient d'intensité des pixels à gauche de l'image, mais ce phénomène ne représente pas une structure sédimentaire. Il est dû à la lumière du soleil qui éclaire plus intensément la partie sud du plan d'eau. Ce résultat est très encourageant. Il nous montre que les structures sédimentaires de la plage du Truc Vert peuvent être détectées et positionnées par la méthode des zones de

déferlement moyen. Le choix de cette méthode pour améliorer les observations sur les barres sableuses de la côte aquitaine est donc justifié.

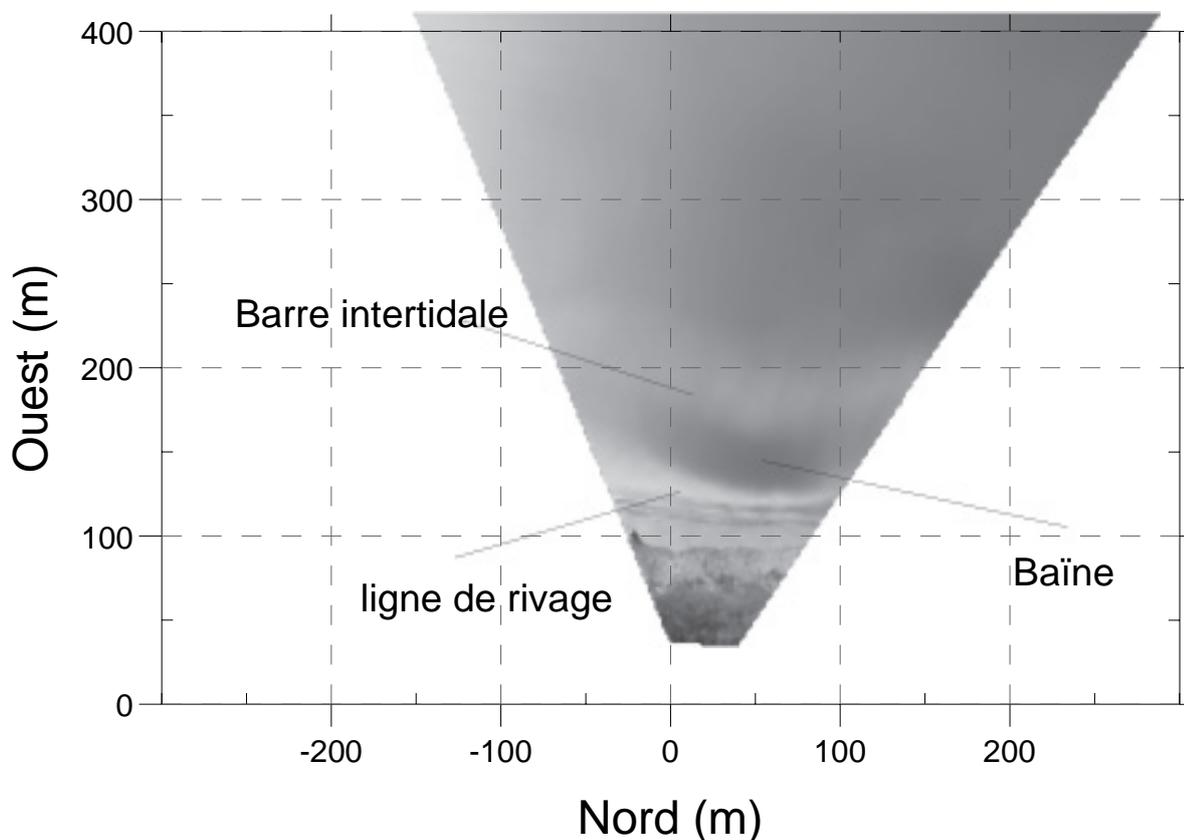


Figure II.50 : Image moyenne redressée de la plage du Truc Vert, le 24 novembre 2004 à marée haute. La résolution de l'image est de 1m. Entre les pixels, les valeurs sont interpolées de façon linéaire.

Les perspectives immédiates de cette étude doivent maintenant se focaliser sur la validation de la méthode. Il est en effet nécessaire de comparer les résultats d'une image vidéo à des mesures classiques de terrain (bathymétrie ou topographie). La réalisation de plusieurs images moyennes à des angles différents est aussi une évolution intéressante pour augmenter la taille de la zone observée. La figure II.51 montre les résultats d'un test effectué à marée basse le 26 novembre 2004. Cette image moyenne redressée provient de 2 prises de vues de 10 min. La différence d'intensité qui permet de distinguer les 2 images superposées provient d'un réglage automatique de la caméra car les conditions d'éclairage ont changées pendant les mesures. Cependant, la continuité entre les 2 images est visuellement très correcte à proximité du plan d'eau. La zone de dune littorale en revanche présente un grand décalage. C'est un effet normal car la seconde image a été réalisée en haut du mat déployé, contrairement à la

première ; de plus, le redressement ne concerne que les points situés au niveau de l'océan. La figure II.51 présente aussi le premier essai de comparaison avec une topographie GPS. Ce test est très encourageant, car les lignes de niveaux de la barre intertidale correspondent visuellement à des variations d'intensité des pixels ; de plus, la forme des lignes de niveau les plus basses épouse correctement la ligne de rivage de l'image vidéo.

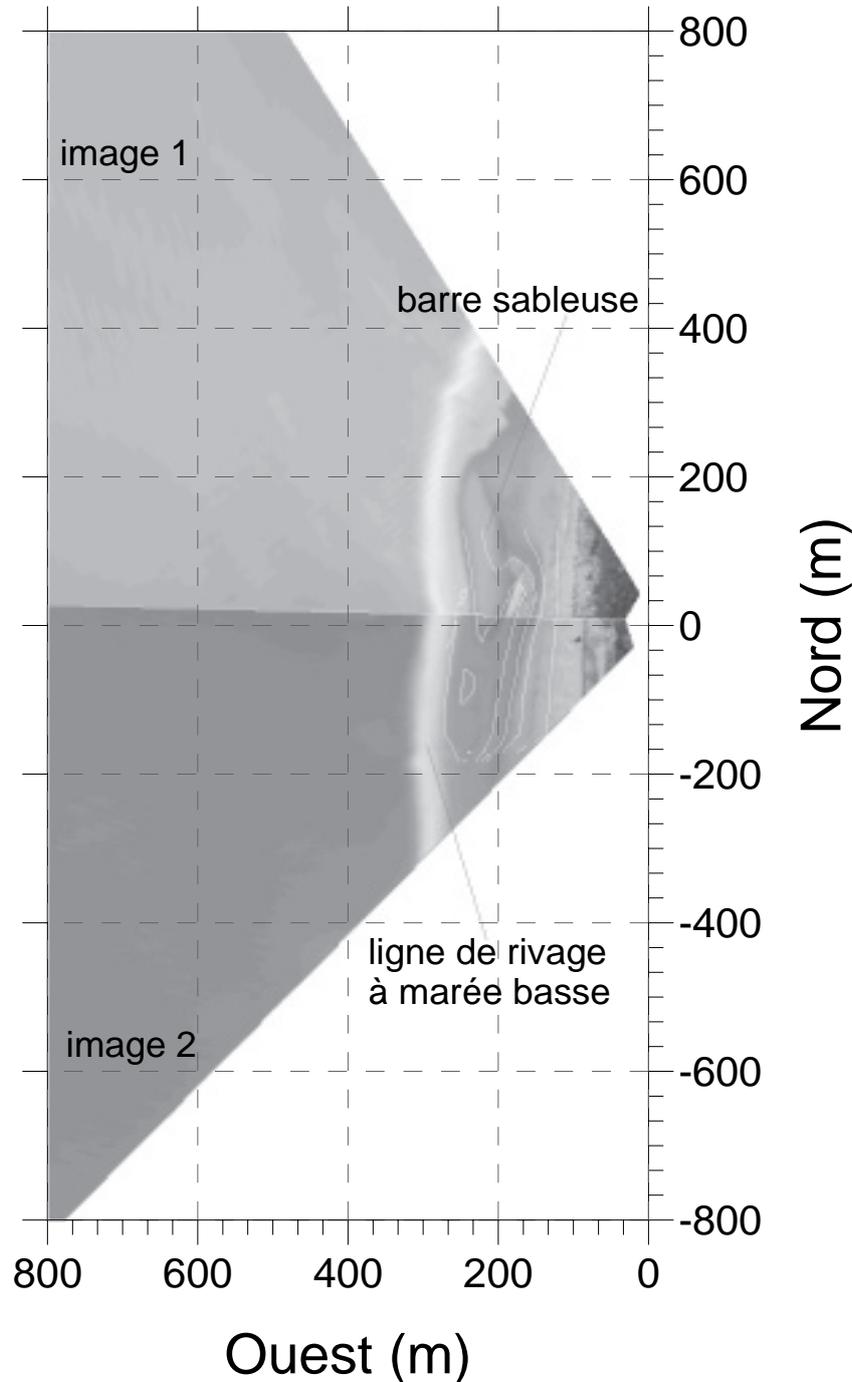


Figure II.51 : Image moyenne redressée, test du 26 novembre 2004. 2 images prises à marée basse sont superposées. Les lignes de niveau d'une topographie GPS effectuée simultanément sont représentées en trait blanc, pour comparaison.

4.5. Bilan des premiers tests d'observation vidéo de la plage du Truc Vert

Les premiers tests d'observation vidéo de la plage du Truc Vert ont montré que le système développé au cours de ce travail de thèse fonctionne bien dans son ensemble. Les différentes étapes définies s'enchaînent sans problème, depuis la mise en place du matériel sur le terrain jusqu'à la visualisation des résultats. La fonctionnalité du système peut toutefois être améliorée en regroupant les différents modules d'acquisition et de traitement dans une interface informatique plus simple et conviviale à utiliser.

Le choix d'un outil d'observation des zones de déferlement préférentiel des vagues est validé. L'image du 24 novembre 2004 (Figure II.50) prise à marée haute montre clairement la présence d'une zone de déferlement au-dessus d'une barre intertidale. L'existence de cette barre a été confirmée par des observations à marée basse. En revanche, aucune structure sous-marine n'a pu être repérée sur l'image établie le 26 novembre (Figure II.51) à marée basse, dans des conditions de mer particulièrement calmes. La détection de toutes les barres de la plage du Truc Vert semble impossible lorsque la houle est trop faible. Il apparaît donc primordial de renouveler les tests pour des conditions d'agitation et de marée variées, afin de mieux cerner les potentialités d'étude vidéo des structures sous-marines.

Au niveau de la plage intertidale, les premiers tests sont très satisfaisants. La résolution de l'image et la taille des pixels sont comparables aux résultats d'une station ARGUS. La largeur de la zone observée semble adaptée à l'étude des barres sableuses, à la condition d'associer deux prises de vue, comme le montre l'image du 26 novembre 2004 (Figure II.51). Les méthodes vidéo sont avantageuses sur ce point, par rapport aux techniques de topographie qui n'ont pas permis un suivi complet de la barre sableuse au cours de la marée basse. De plus, l'ajout de caméras au système peut permettre d'accroître aisément la surface d'observation.

La comparaison entre la carte topographique et l'image moyenne redressée de la zone intertidale semble indiquée que certaines structures morphologiques possèdent des signatures visuelles particulières. Ainsi, l'image vidéo redressée et les lignes de niveau établies par topographie montrent une très bonne correspondance. Des validations basées sur des analyses quantitatives doivent cependant être programmées pour confirmer ces premiers tests positifs menés sur la plage du Truc Vert.

CHAPITRE III : MORPHOLOGIE DES BARRES SABLEUSES DE LA PLAGE DU TRUC VERT

PLAN DU CHAPITRE

A) Etude du haut de plage.....p 184

- 1) La dune embryonnaire.....184**
 - 1.1. Analyse cross-shore.....185
 - 1.2. Le pied de dune et la transition vers la berme.....188

- 2) La berme.....190**
 - 2.1. Morphologie simplifiée de la berme.....190
 - 2.2. Points caractéristiques et paramètres des bermes.....192
 - a) Position des points caractéristiques des bermes.....192
 - b) Etude des paramètres descriptifs.....194
 - c) Bermes marquées et ondulations.....196
 - 2.3. Analyses statistiques multivariées des bermes de la plage du Truc Vert 197
 - a) Principe de l'Analyse en Composante Principale des données morphologiques.....197
 - b) Résultat de l'ACP pour les bermes de la plage du Truc Vert201
 - c) Typologie des bermes.....205

B) Etude du bas de plage intertidale.....p 210

- 1) Morphologie de la plage intertidale.....211**
 - 1.1 Forme convexe de la plage intertidale et présence de barres sableuses...211
 - 1.2. Observation d'ondulations morphologiques sur la plage intertidale.....211

- 2) Forme du système de barre et baie.....218**
 - 2.1. Etude des paramètres morphologiques.....218
 - 2.2. Classification des barres sableuses du bas de plage intertidale.....221
 - 2.3. Description précise des formes du système barre et baie.....224

C) Etude de la plage sous-marine.....p 227

- 1) Analyse cross-shore.....229**
- 2) Analyse tridimensionnelle de la plage sous-marine.....233**
 - 2.1. Zone de transition.....233
 - a) Analyse de la carte PNOC 98.....235
 - b) Barres sableuses de la zone de transition.....238
 - 2.2. Barre sableuse sous-marine.....241
 - a) Modèle morphologique de barre sous-marine.....242
 - b) Analyse des cartes PNEC 99 et SHOM 67.....246
 - c) Volume de la barre sous-marine.....247
 - d) Bilan de l'étude de la barre sableuse sous-marine.....251
 - 2.3. Plage sous-marine inférieure.....252

CHAPITRE III : MORPHOLOGIE DES BARRES SABLEUSES DE LA PLAGE DU TRUC VERT

Ce chapitre a pour but de décrire la morphologie de la plage du Truc Vert et des barres sableuses qui la constitue. Le premier objectif de ce chapitre est d'obtenir des résultats quantifiés et précis pour chacun des compartiments de la plage. La précision des analyses est un aspect primordial de cette étude pour envisager des perspectives de travail concernant :

- L'étude des petites évolutions temporelles, à l'échelle de la journée ou de la marée ;
- L'observation des modifications progressives de morphologie dans l'espace, liées à la forme tridimensionnelle des barres sableuses.

Le second objectif de ce chapitre vise à établir une classification des formes observées pour permettre de futures études portant sur :

- La classification morphodynamique de la plage et des barres sableuses ;
- L'évolution morphologique à plus long terme et les cycles saisonniers ;
- La comparaison de la morphologie des plages à l'échelle de la côte aquitaine.

Ce chapitre est organisé en trois parties, chacune décrivant les barres sableuses d'un compartiment de la plage du Truc Vert.

Les deux premières parties concernent le haut de plage et la plage intertidale. Elles exploitent les informations de profils topographiques dont les mesures ont été décrites dans le chapitre II.A. La base de données topographiques est constituée d'un ensemble de 104 profils cross-shore établis entre 1997 et 2004 au niveau du point de référence de la plage du Truc Vert (Tableau III.1). Cette grande quantité de mesures est un atout capital pour une bonne description des barres sableuses et pour produire des interprétations de qualité. Néanmoins, ces données ne permettent pas d'observer de variation longshore de la morphologie. De plus, leur fréquence et leur répartition dans le temps ne sont pas strictement régulières. Ainsi, la période entre chaque levé est de 25 jours en moyenne, mais un écart-type de 23 jours illustre l'existence de longs moments sans mesure. La répartition mensuelle des données (Figure III.1) illustre le manque relatif de suivi pendant la période estivale. Cette hétérogénéité devra être prise en compte pour les interprétations. Ainsi, s'il existe des barres sableuses spécifiques

aux mois estivaux, leur fréquence sera sous-estimée par les analyses issues de cette base de données.

année	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
nb	2	8	20	15	12	14	16	17
date	02/09/1997	11/02/1998	04/01/1999	11/01/2000	10/01/2001	31/01/2002	21/01/2003	22/01/2004
	13/11/1997	29/04/1998	21/01/1999	21/01/2000	09/02/2001	14/02/2002	04/02/2003	09/02/2004
		21/05/1998	18/03/1999	21/02/2000	27/02/2001	04/03/2002	18/02/2003	20/02/2004
		29/05/1998	01/04/1999	08/03/2000	25/04/2001	15/03/2002	03/03/2003	09/03/2004
		08/10/1998	06/04/1999	21/03/2000	23/05/2001	30/03/2002	20/03/2003	22/03/2004
		06/11/1998	15/04/1999	06/04/2000	06/06/2001	12/04/2002	02/04/2003	06/04/2004
		03/12/2003	17/05/1999	19/04/2000	22/06/2001	26/04/2002	17/04/2003	19/04/2004
		22/12/1998	31/05/1999	04/05/2000	23/07/2001	13/05/2002	16/05/2003	05/05/2004
			01/07/1999	31/08/2000	04/09/2001	23/09/2002	16/06/2003	18/05/2004
			16/07/1999	18/09/2000	19/09/2001	07/10/2002	16/07/2003	02/07/2004
			31/07/1999	14/10/2000	19/10/2001	22/10/2002	29/08/2003	20/07/2004
			01/09/1999	27/10/2000	14/12/2001	05/11/2002	10/09/2003	31/08/2004
			13/09/1999	14/11/2000		05/12/2002	26/09/2003	16/09/2004
			26/09/1999	28/11/2000		19/12/2002	14/10/2003	29/09/2004
			12/10/1999	12/12/2000			28/10/2003	14/10/2004
			25/10/1999				10/11/2003	12/11/2004
			09/11/1999					26/11/2004
			26/11/1999					
			09/12/1999					
			22/12/1999					

Tableau III.1 : Dates de mesure du profil topographique de la plage du Truc Vert. Les cases grisées indiquent les levés multi-profils.

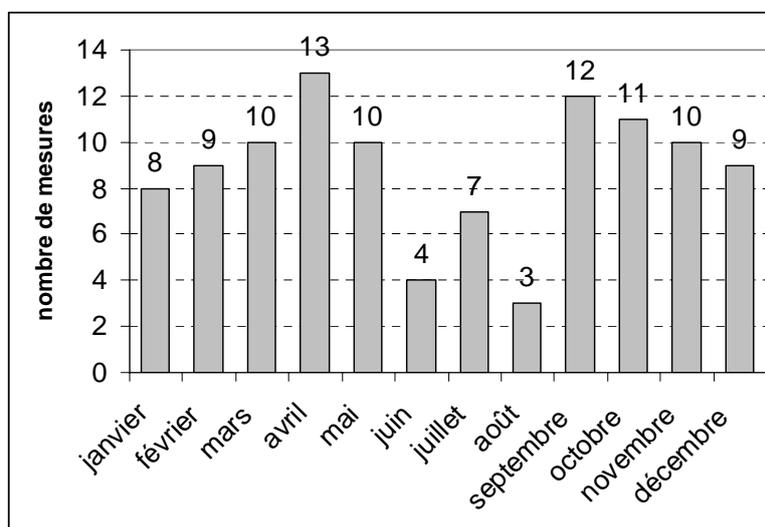


Figure III.1 : Répartition mensuelle des mesures topographique entre 1997 et 2004.

Il faut donc prendre des précautions dans l'interprétation des tendances et des évolutions temporelles. C'est pourquoi l'objectif principal de ce chapitre sera avant tout d'utiliser le grand nombre d'observations disponibles pour décrire la diversité des structures sédimentaires

de la plage. Pour y parvenir, nous avons mis au point une méthode d'analyse morphologique spécifique aux profils cross-shore bidimensionnels. Cette méthode d'analyse 2D consiste tout d'abord à observer attentivement la position et l'altitude des points mesurés par l'opérateur de terrain ; elle vise ensuite à déterminer des pentes entre les points et à calculer des variations de pentes. L'extraction de points caractéristiques permet alors le calcul de paramètres synthétiques et de statistiques afin d'interpréter les résultats.

Les levés topographiques multi-profils ne seront pas exploités dans cette thèse, mais des pistes de traitement de ces données seront présentées dans la troisième partie de ce chapitre (III.C.2), ainsi que dans les annexes 2, 3 et 4.

La troisième partie est une étude des mesures bathymétriques de la plage sous-marine (voir chapitre II.B pour la méthodologie). Elle est basée, dans un premier temps, sur une analyse bidimensionnelle de profils cross-shore. Dans un second temps, une étude en pseudo-3D est effectuée en combinant les observations extraites de plusieurs profils parallèles. De plus, l'analyse en pseudo-3D va permettre un travail original sur la zone de transition entre la plage intertidale et la plage sous-marine, en associant des mesures topographiques et bathymétriques. Enfin, les potentialités de l'analyse 3D seront également présentées en calculant des paramètres morphologiques à partir des MNT de la plage sous-marine.

A) Etude du haut de plage

Le haut de plage est un domaine qui s'étend à la fois sur la plage intertidale et sur la plage subaérienne. Il est compris entre le niveau moyen de la mer et la limite supérieure d'action des vagues. L'altitude moyenne de la mer a été estimée à + 0,35 m NGF (cf partie I.C.3.3). La limite d'action des vagues est une frontière encore moins évidente à établir car elle dépend du marnage, de la hauteur des houles, des surcotes et de l'intensité du jet de rive. Pedreros (2000) l'avait estimée à 5,70 m NGF en observant l'altitude des laisses de hautes mers, mais cette valeur n'est qu'indicative car elle ne prend pas en compte l'action des vagues de tempête. Sur la plage du Truc Vert, deux formes sédimentaires remarquables prennent place sur le haut de plage. A la limite supérieure du domaine, on trouve une dune embryonnaire, également nommée « banquette à agropyrum ». Cette structure est intégrée dans l'environnement de dune littorale car elle est en partie végétalisée ; elle est cependant très nettement différenciée de la dune blanche par une rupture de pente importante. Son évolution sera étudiée à partir des profils topographiques. Plus bas, on observe une berme sur près de 75 % des suivis. Cette barre sableuse caractéristique prend des formes variées qui seront décrites en détail.

1) La dune embryonnaire

La zone de liaison entre la plage et la dune littorale est un domaine d'étude particulièrement important pour l'océanographie et la sédimentologie côtière. C'est généralement à cet endroit que l'érosion commence à toucher directement les constructions et le travail des hommes (dune artificielle, infrastructure, habitation). Sur la plage du Truc Vert, l'érosion ne pose pas de problèmes humains majeurs, de plus, la présence de la dune embryonnaire est le signe d'une bonne stabilité, voire d'une tendance à l'engraissement de la dune. En effet, la banquette sableuse protège la dune blanche de l'érosion en limitant les échanges sédimentaires directs avec la mer. Le vent est donc l'agent dynamique majoritaire, mais les vagues peuvent parfois atteindre le bas du système lors de tempêtes ou de vives-eaux exceptionnelles, ce qui permet d'inclure cette structure sableuse dans l'environnement du haut de plage.

1.1. Analyse cross-shore

Sur la dune embryonnaire, les mouvements sédimentaires sont a priori peu importants (voir partie I.C.3.1), ce qui rend difficile l'analyse d'une évolution temporelle. Dans la base de données en profils, il manque malheureusement un suivi régulier de quelques points d'abscisse fixe qui aurait permis des comparaisons tout à fait rigoureuses. Néanmoins, des tendances franches peuvent être dégagées à partir des profils les plus complets.

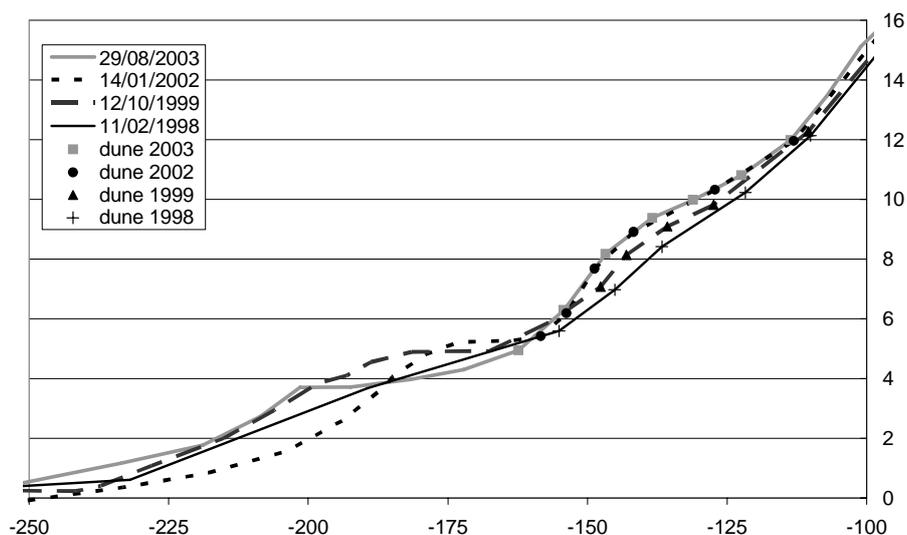


Figure III.2 : Evolution temporelle du profil central au niveau du haut de plage et du début de la plage subaérienne du Truc Vert. Abscisse = Est (m) ; Ordonnée = Altitude NGF (m).

La figure III.2 montre l'évolution du haut de plage entre février 1998 et août 2003. La dune embryonnaire débute au niveau d'une importante rupture de pente située à $X = -110$ m et +12 m d'altitude, accolée à la dune blanche. Ce point semble plutôt stable dans le temps. Le pied de la structure est situé entre -150 et -160 m à environ +5 m d'altitude. La banquette sableuse s'étend donc sur une quarantaine de mètres cross-shore, selon une pente importante (entre 10 et 20 %). Sa forme générale est relativement peu marquée, ce qui explique la difficulté de repérer précisément la crête et de suivre son évolution. Toutefois, les coupes montrent clairement une tendance à l'engraissement entre 1998 et 2002 et une stabilité relative entre 2002 et 2003. Ainsi, la dune s'est engraisée de plus d'un mètre autour de -145 m (Est). Il faut remarquer que la forme de la berme, située plus bas sur la plage, ne suit pas cette tendance et que l'évolution de cette barre sableuse ne peut pas être traitée avec aussi peu de données.

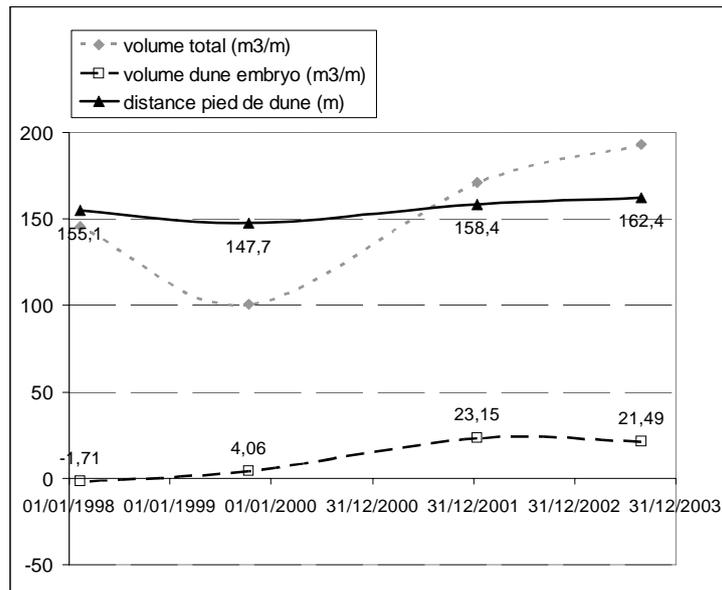


Figure III.3 : Estimation des volumes du profil central de la dune embryonnaire. Deux méthodes de calcul sont utilisées. La position du pied de dune est mise en relation avec les volumes calculés.

Une estimation de volume a été entreprise pour quantifier l'évolution de ce système (Figure III.3). Le calcul de volume de la forme stricte (volume dune embryonnaire) prend en compte les sédiments situés au-dessus d'une ligne de base reliant la rupture de pente de début jusqu'au pied de la structure. Les résultats confirment la tendance à l'accrétion entre 1998 et 2002, puis la stabilité entre 2002 et 2003. Le volume calculé en 1998 est négatif ($-1,71 \text{ m}^3$ par mètre linéaire de côte), ce qui peut paraître surprenant. En fait, il reflète la forme peu marquée de la banquette sableuse : en moyenne, la structure se trouve sous la ligne de base en 1998. Un autre calcul (volume total) a été testé, mais ne semble pas convaincant pour cet exemple. Cette estimation prend en compte les sédiments situés au-dessus de l'altitude la plus basse de la structure (le pied de dune). Il existe donc un lien entre le volume total calculé et la position du pied de dune : plus cette limite est éloignée et basse, plus le volume est grand. Les figures III.2 et III.3 montrent que la position du pied de dune est relativement variable, ce qui complique l'interprétation de l'évolution générale de la dune embryonnaire. Une telle mobilité est normale car cette partie de plage peut-être soumise aux effets combinés de la marée et des vagues. D'ailleurs, c'est souvent sur cette zone que la mer laisse de gros débris après les marées de vives-eaux.

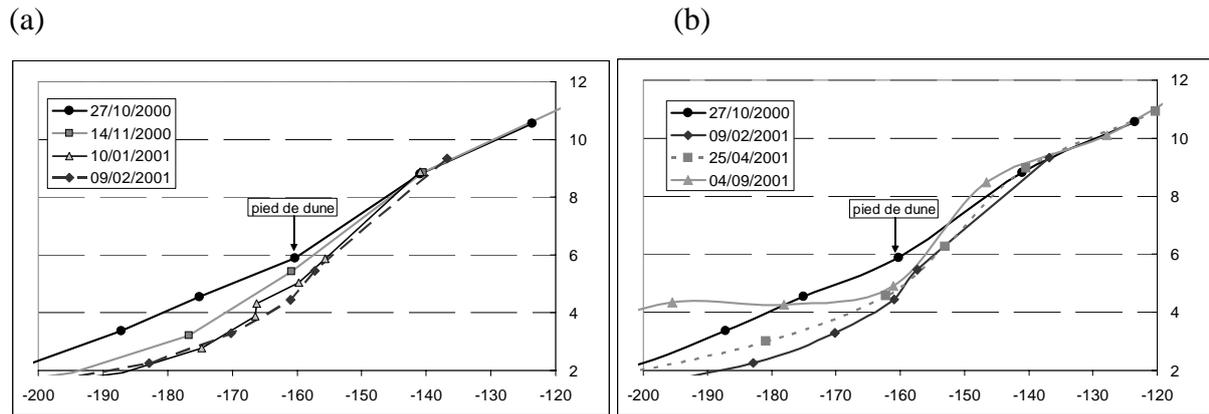


Figure III.4 : Evolution du pied de dune embryonnaire entre 2000 et 2001. (a) Période d'érosion durant l'hiver 2000. (b) Période d'accrétion en 2001. Abscisses et ordonnées en mètres.

A une échelle temporelle plus courte, les mesures de 2000 et 2001 confirment la variabilité du flanc externe de la dune embryonnaire et du pied de la structure. La figure III.4.a montre l'amaigrissement du haut de plage en quelques mois : entre le 27 octobre 2000 et le 9 février 2001, le pied de dune est resté à la même abscisse, mais a subi une érosion de 1,5 m. De petites falaises caractéristiques sont même observées en janvier et février 2001. Cet état de vulnérabilité de la dune est marqué avant toute chose par la disparition complète de la berme sur le profil entre octobre et novembre 2000. Dans ce cas précis, le calcul de volume défini précédemment n'apporte aucune information sur l'évolution de la structure sédimentaire. En effet, l'érosion a décalé la ligne de base de la banquette et a abaissé le pied de dune, ce qui augmente paradoxalement le volume de la structure et le volume total calculé. Les mesures effectuées lors des mois suivant cet épisode érosif montrent que le pied de dune est resté en position basse, tandis que la banquette semble néanmoins s'être rapidement engraisée durant l'été 2001 (Figure III.4.b).

1.2. Le pied de dune et la transition vers la berme

La position du pied de dune est un paramètre très important pour caractériser la forme générale de la plage. Elle est fréquemment utilisée pour établir des taux d'érosion sur des photos aériennes ou des suivis par GPS. Mais il convient de bien distinguer la limite morphologique et la limite de végétation. La première limite s'obtient par l'analyse de la topographie des plages et l'étude des courbes de différence de pente, elle permet d'initier des calculs de volume et d'interpréter la forme des morphologies. La seconde limite se repère très bien à de grandes échelles spatiales, sur des images issues de la télédétection. Elle représente une zone de relative stabilité, mais n'a pas forcément de réalité morphologique forte, liée au fonctionnement à court ou moyen terme de la plage. Dans le cadre de l'étude des barres sableuses de la plage du Truc Vert, le pied de dune est d'autant plus important qu'il constitue bien souvent le point de début de la berme.

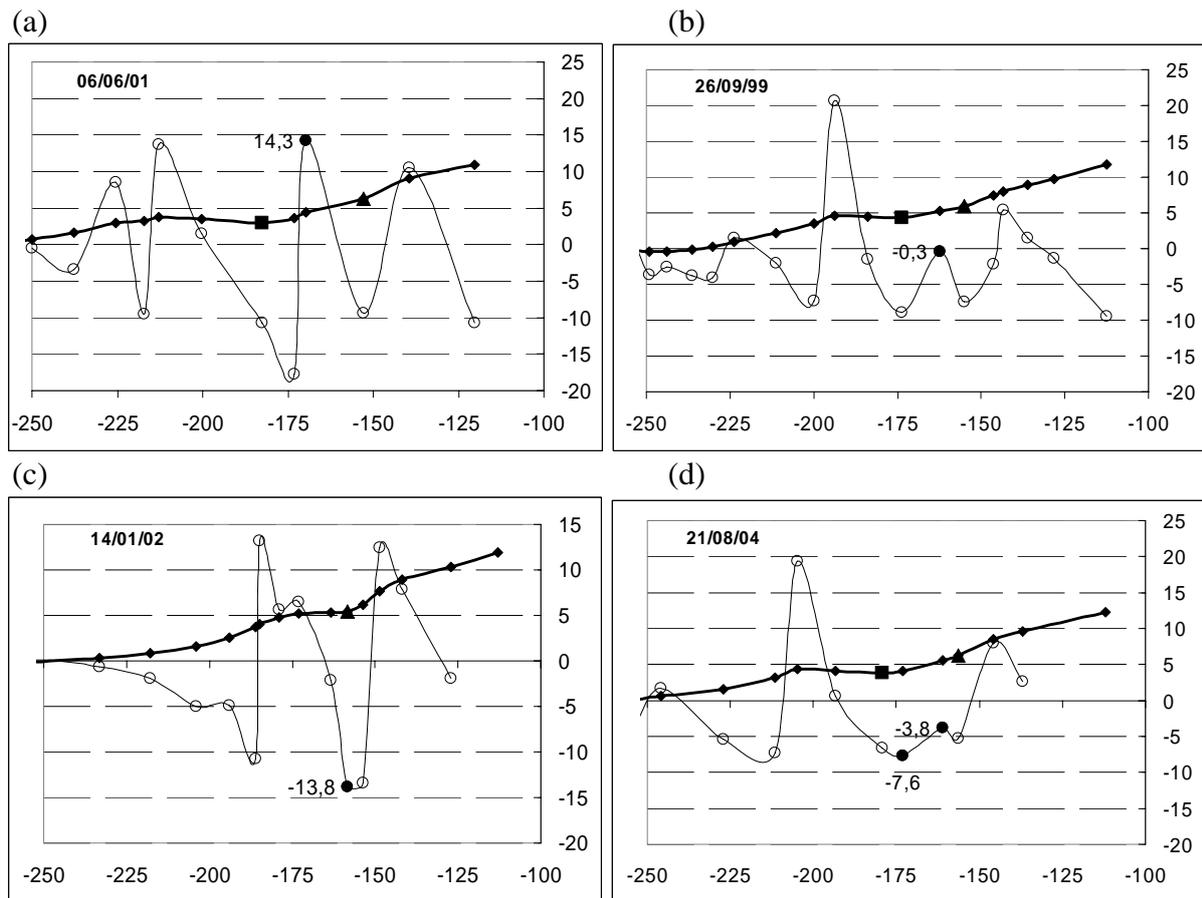


Figure III.6 : Etude de la zone de transition séparant la dune de la berme.
 Le triangle noir positionne le pied de dune ; le carré noir, le début de berme.
 Les losanges noirs correspondent aux points de mesures topographiques.
 Les ronds représentent la différence de pente, de part et d'autre des points de mesures.
 Abscisse : Est (m) ; Ordonnées : Altitude NGF (m) et différence de pente (%).

La figure III.6 montre que le pied de dune embryonnaire est marqué par un pic négatif de différence de pente autour de l'abscisse -150 m, c'est une rupture dans la topographie. Le début de berme correspond pour sa part, soit à un minimum local de topographie, soit à un pic négatif de différence de pente. L'analyse de la base de donnée sur le profil maître indique que pour la moitié des suivis, pied de dune et début de berme sont confondus en une rupture de pente unique (Figure III.6.c). Ce constat s'effectue très fréquemment sur des profils peu denses en points, qui montrent une observation synthétique de l'opérateur de terrain. Si les 2 points sont distincts, une zone de transition existe entre la dune embryonnaire et le début de berme. 3 types de morphologies ont été déterminés pour cette zone de transition :

- Une morphologie convexe, caractérisée par la présence d'une ondulation du profil. Cette morphologie induit un pic positif de différence de pente (Figure III.6.a).
- Une morphologie concave, qui voit la pente diminuer du pied de dune au début de berme. La courbe de différence de pente reste nettement négative (Figure III.6.b).
- Une pente régulière vers le début de berme (Figure III.6.d). La courbe de différence de pente est proche de 0, car la pente ne varie pas.

2) La berme

2.1. Morphologie simplifiée de la berme

La berme est une barre sableuse située en haut de plage, après la dune littorale (vers le large). Elle est caractérisée par une crête séparant un versant interne généralement plat, d'une face externe, en pente marquée vers la mer. Les trois points principaux de la barre sableuse étudiée sont : le début de la berme, la crête et le pied de la structure. La méthode d'analyse utilisée consiste à définir les points caractéristiques en fonction des minimums, des maximums locaux et des ruptures de pente du haut de plage (Figure III.7).

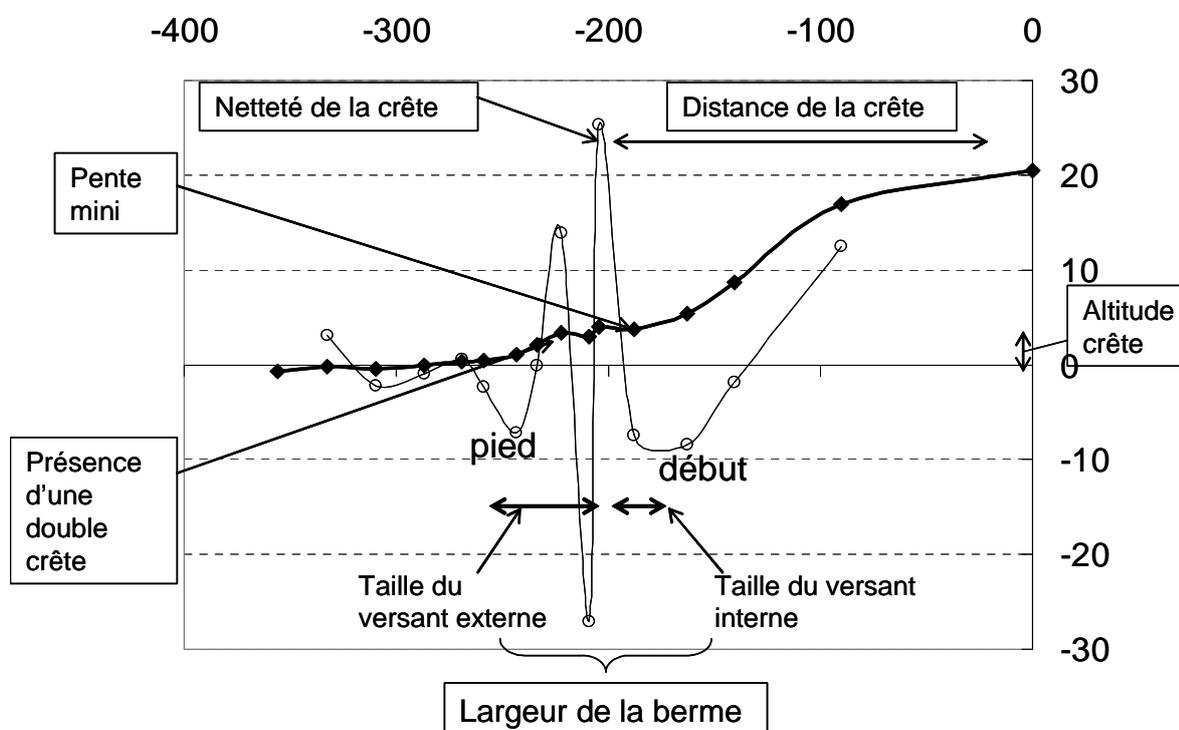


Figure III.7 : Les variables descriptives de la berme. En gras et losange noirs : profil topographique du 18/09/2000, altitude en m (NGF). En trait fin et ronds : différence de pente, de part et d'autre du point mesuré en %. Abscisse : Est (m).

La berme est définie comme la structure sédimentaire la plus marquée du haut de plage. Lorsque la crête forme un maximum local, sa reconnaissance est simple. Lorsqu'il s'agit de ruptures de pentes qui sont identifiées, plusieurs critères entrent en jeu pour choisir le plus objectivement possible les mesures correspondant aux trois points principaux de la berme.

- Critères de choix de la crête :

1) La crête correspond au plus important pic positif de différence de pente après la dune, c'est-à-dire à la rupture de pente la plus marquée. Un pic positif signifie que la pente est faible et qu'elle augmente brutalement après la crête.

2) Entre deux pics de différence de pente de même valeur, la crête de berme est le point le plus élevé en altitude.

- Critère de choix du point de début de berme

1) Le début de la berme correspond au pic négatif de différence de pente situé avant la crête. Sa reconnaissance dépend donc de l'observation préalable de la crête.

2) Le point de début de berme peut être confondu avec la rupture du pied de dune, mais pas systématiquement.

- Critère de choix du pied de berme

1) Il s'agit du pic négatif de paramètre DP situé après la crête.

2) Des ruptures de pentes importantes peuvent apparaître après la crête en cas d'érosion ponctuelle, ces petites falaises ne représentent pas forcément le pied de la berme.

D'autres cas litigieux sont apparus lors de l'analyse de la base des données :

- Des pics secondaires de différence de pente peuvent apparaître lorsque le versant externe de la berme présente une forme convexe.
- Certains cas de crêtes situées loin de la dune posent le problème de la limite morphologique du haut de plage.
- D'autres cas litigieux concernent les structures possédant 2 crêtes marquées.

Ces cas complexes obligent à des choix souvent subjectifs, dont les justifications doivent être gardées à l'esprit pour interpréter correctement les résultats. La rencontre d'un certain nombre de ces problèmes d'analyse a amené à définir deux points supplémentaires qui décrivent encore plus précisément la structure sédimentaire. Il s'agit d'une part, du point de pente minimale du versant interne et d'autre part, de la position de l'éventuelle crête secondaire d'un système double ou d'un versant convexe. L'extraction de ces 3 à 5 points caractéristiques des bermes de la plage permet de proposer une vision simplifiée mais précise de la structure sédimentaire étudiée (Figure III.7). Sur la base de ce modèle morphologique, de nombreuses informations (longueur, largeur, hauteur, pente, distance entre point caractéristiques etc.) peuvent facilement être calculées pour mieux caractériser la morphologie.

2.2. Points caractéristiques et paramètres des bermes

Un effort important a été fourni pour mettre en forme les mesures topographiques de la base de données et permettre une comparaison aisée entre les différents levés de la plage du Truc Vert. L'extraction systématique des points caractéristiques de la berme et le calcul de paramètres morphologiques simples permettent de travailler précisément, sans avoir recours à l'interpolation des mesures. Il faut néanmoins admettre qu'une certaine subjectivité existe parfois dans le choix et l'analyse de quelques points caractéristiques particulièrement délicats à établir.

Sur 104 profils mesurés entre 1997 et 2004, les analyses montrent la présence d'une berme dans plus de 70 % des cas (73 bermes repérées). Ce résultat nous prouve que l'étude de cette barre sableuse est primordiale pour décrire la morphologie du haut de plage.

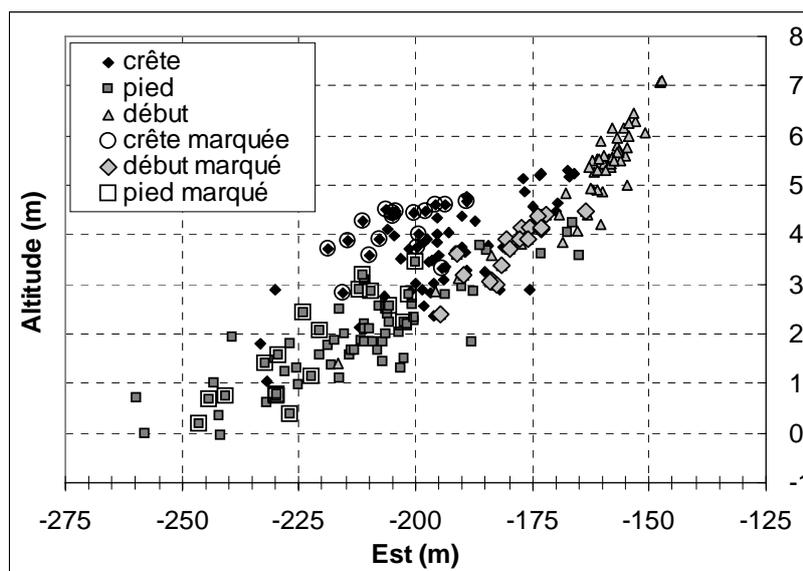


Figure III.8 : Positions du début, de la crête et du pied de berme extraites des profils topographiques réalisés entre 1997 et 2004 sur la plage du Truc Vert. Les systèmes dont la crête est située au-dessus du début de berme sont dits « marqués ».

a) Position des points caractéristiques des bermes

La position des 3 points caractéristiques principaux (début, crête et pied) de chaque berme est représentée par la figure III.8. La répartition des points est extrêmement large et couvre l'ensemble du haut de plage, depuis l'altitude 7,1 m à une distance de -147 m pour un début de structure, jusqu'à 0 m NGF à -260 m de distance pour un pied de berme. Les crêtes de

bermes se situent en moyenne à 193,2 m à l'Ouest du point de référence, à une altitude de 3,9 m NGF (Tableau III.2). Les écarts-types sont importants et signalent une grande variété de positions. Ainsi, les crêtes se situent majoritairement dans un intervalle de ± 16 m en distance autour de la moyenne, et de $\pm 0,9$ m en altitude ; mais on trouve des systèmes plus éloignés (exemple du profil mesuré le 23/05/2001 dont la crête est située à -230 m, Figure III.9.a) ou très proche de la dune (profil du 31/02/2002, dont la crête de berme est observée à -158,5 m, Figure III.9.b). La position moyenne du début de berme se situe à 4,8 m d'altitude et -167,7 m de distance. L'écart type en altitude ($\pm 1,16$ m) est particulièrement important. Pour sa part, le pied de berme est positionné à -212 m en moyenne à une altitude de 2 m. L'écart-type en position, calculé à $\pm 20,2$ m, est considérable. Ces observations sur les écarts-types des points caractéristiques aux limites de la berme sont logiques sur une plage dont la pente diminue vers le large. A proximité de la dune embryonnaire, les pentes sont fortes (entre 5 et 10 %, parfois plus) ; chaque modification de position implique alors une évolution importante en altitude. En bas de plage, les pentes sont plus faibles (entre 2 et 5%) et la variation de position d'un point se traduit par un grand changement en distance.

		moyenne	e-t	min	max	médiane
DEBUT	distance	-167,7	13,5	-147,4	-216,6	-162,4
	altitude	4,8	1,2	1,4	7,1	4,9
CRETE	distance	-193,2	16,0	-158,5	-231,8	-195,4
	altitude	3,9	0,9	1,0	5,5	3,9
PIED	distance	-212,0	20,2	-165,1	-259,9	-211,0
	altitude	2,0	1,0	-0,1	4,4	1,9

Tableau III.2 : Statistiques décrivant la position des 3 points caractéristiques principaux de la berme (valeurs en m). « e-t » est l'abréviation d'écart-type.

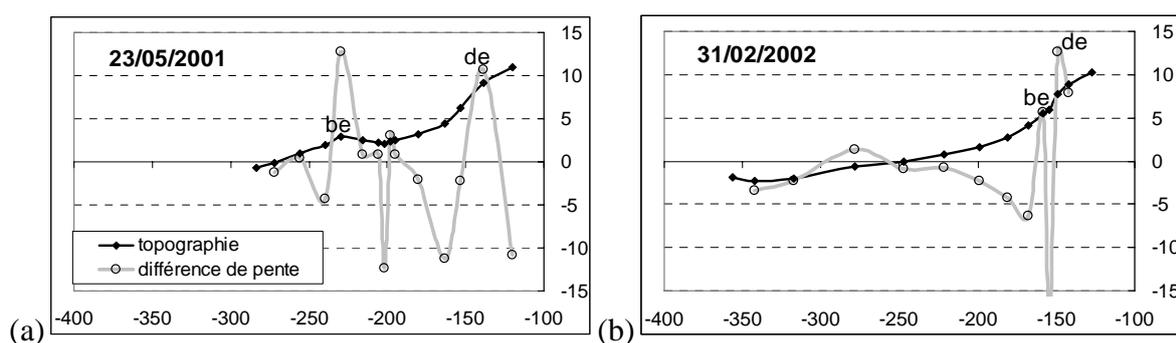


Figure III.9 : Illustration de la grande variété de positions des crêtes de bermes sur le haut de plage. En trait noir et losanges : profil topographique ; en trait gris et ronds noirs : courbe de différence de pente. Les abscisses représentent la distance vers l'Est, les ordonnées correspondent à l'altitude NGF (m) et à la différence de pente (%).

a) Crête de berme (be) située en position très éloignée de la dune embryonnaire (de). La crête de berme forme ici un sommet topographique.

b) Berme en position rapprochée, la crête est déterminée grâce au pic positif de la courbe de différence de pente.

	moyenne	e-t	mini	maxi
taille de la berme (m)	44,27	16,19	7,99	80,27
pente mini (%)	2,41	4,94	-5,84	18,31
netteté de la crête (%)	9,19	6,94	0,16	29,91
distance crête (m)	193,22	16,05	158,55	233,28
altitude crête (m)	3,88	0,89	1,05	5,53
rapport versant	1,89	1,59	0,35	8,66
double crête	11 cas observés			

Tableau III.3 : Synthèse des résultats du calcul et de la détermination des 7 paramètres de description des bermes de la plage du Truc Vert.

b) Etude des paramètres descriptifs

Le calcul de certains paramètres descriptifs apporte des précisions sur la forme de la barre sableuse (Figure III.7 et Tableau III.3).

- Taille de la berme.

La taille de la berme représente la distance entre le début et le pied de la structure. La taille moyenne est de 44 m (\pm 16 m), une différence d'un facteur 10 existe entre la plus petite structure (8 m) et la plus grosse (80 m, Figure III.10.b).

- Rapport de taille des versants (symétrie)

Le rapport de taille des versants donne une idée de la symétrie de la forme sédimentaire : un rapport de 1 indique que les versants interne et externe sont de même taille. La moyenne de ce rapport est égale à 1,8 ; il signifie que le versant interne est généralement plus grand que le versant externe. Mais des différences très importantes sont observées entre les systèmes car le paramètre de symétrie des versants varie de 0,35 (versant externe 3,5 fois plus grand, exemple du 14/12/2001, Figure III.10.c) à 8,5 (rapport interne 8,5 fois plus grand, cas du 31/08/2000, Figure III.10.d).

- Netteté de la crête (différence de pente)

Le paramètre de netteté de la crête correspond à la valeur de différence de pente au niveau de la crête. C'est à la fois un moyen de déterminer précisément la position de la crête, mais aussi une façon de décrire une limite dans la morphologie. Ainsi, plus ce paramètre est grand, plus la crête sera marquée sur la plage. En général, les bermes se distinguent nettement car la moyenne du paramètre de différence de pente au niveau de la crête est de 9,2 %.

Certaines structures sont très clairement visibles grâce à une crête qui forme une petite falaise (Figure III.10.f). D'autres ne sont pas observées à l'œil nu et seule l'analyse des mesures peut détecter l'existence d'une ondulation sur le profil de plage (Figure III.10.e).

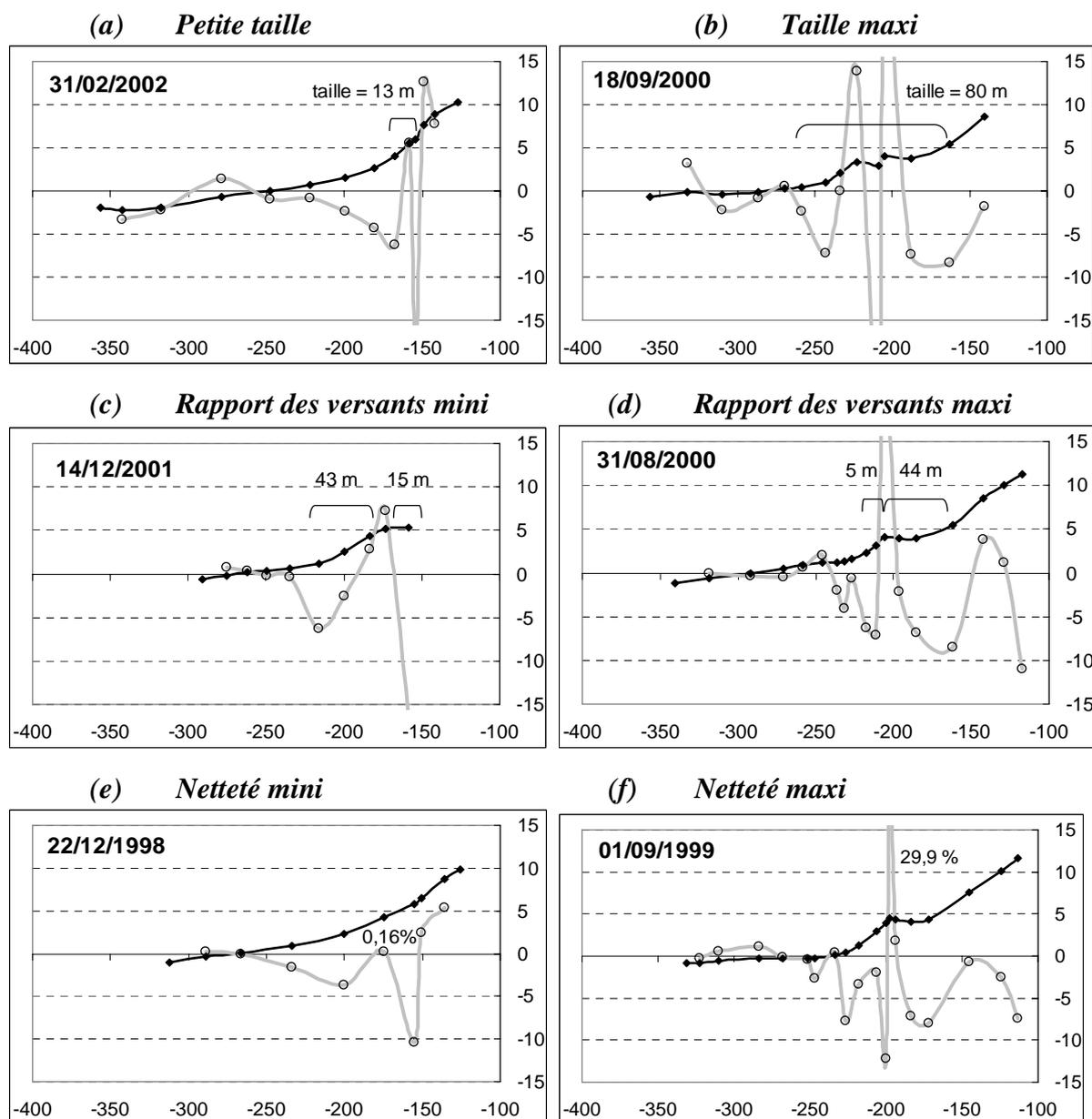


Figure III.10 : Profil topographiques (m) et courbe de différence de pente (%) illustrant les valeurs extrêmes de 3 paramètres descriptifs de la berme. Abscisse : distance Est (m). (a-b) : Taille de la berme ; (c-d) : rapport de taille des versants ; (e-f) : Netteté de la crête

- Double crête

L'existence de doubles crêtes est également un élément majeur pour différencier la morphologie des structures étudiées. Elle est détectée dans 15 % des cas (11 doubles bermes observées).

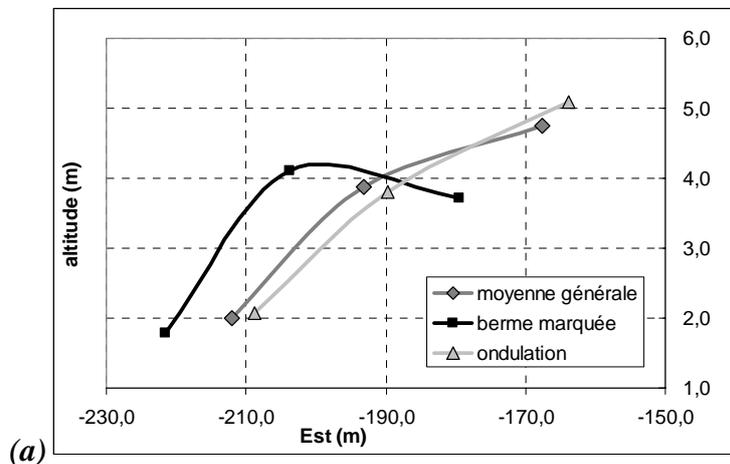
- Pente minimum du versant interne

Enfin, le paramètre de pente minimum est utile pour décrire le versant interne de la berme. En cas de valeur négative, la pente est orientée vers la dune. C'est le signe d'une berme bien formée.

c) Bermes marquées et ondulations

Un autre critère simple permet aussi de différencier des structures sédimentaires bien formées en haut de plage. Ainsi, lorsque le début de la berme se situe sous le niveau de la crête, la plage présente un relief marqué. L'observation du profil topographique permet de déterminer facilement l'existence de cette structure (Figure III.11.a). Quand au contraire, le début de berme se trouve au-dessus de la crête, la structure forme seulement une ondulation sur le profil. Ce type de forme sédimentaire peut être repérée par un pic de différence de pente.

Parmi les 73 structures analysées, 25 % (18 bermes) sont particulièrement bien marquées dans le relief.



(b)

type	moyenne générale		berme marquée		ondulation	
	distance	altitude	distance	altitude	distance	altitude
début	-167,7	4,8	-179,5	3,7	-163,9	5,1
crête	-193,2	3,9	-203,8	4,1	-189,8	3,8
pied	-212,0	2,0	-221,6	1,8	-208,8	2,1

Figure III.11 : Positions moyennes des points caractéristiques des bermes de l'ensemble de la base de donnée (moyenne générale), des bermes marquées et des bermes en forme d'ondulations de haut de plage. (a) Représentation graphique ; (b) Tableau récapitulatif.

En moyenne, les bermes bien marquées ont une crête et un pied situés entre 10 et 15 m à l'ouest des systèmes de type « ondulation ». Pourtant, l'altitude de ces points caractéristiques reste très proche entre les 2 types de morphologies (Figure III.11.b). La différence la plus importante se situe au niveau du début de berme, situé aussi à une quinzaine de mètres plus à l'ouest, mais positionné 1,4 m plus bas sur le profil de plage.

Cette première analyse basée sur l'extraction de points caractéristiques et le calcul de paramètres descriptifs montre clairement une grande variabilité des formes de bermes de la plage du Truc Vert. Avant même de comprendre leur mise en place et leur évolution, il est nécessaire de classer les morphologies observées. Les premiers critères utilisés permettent de distinguer l'existence de systèmes marqués, d'ondulations et de doubles bermes. Dans la suite de cette étude, les techniques de statistiques multivariées vont être utilisées pour préciser la morphologie des bermes et établir une typologie plus complète des formes sédimentaires.

2.3. Analyses statistiques multivariées des bermes de la plage du Truc Vert

Les informations extraites de la base de données sont très nombreuses. De 1997 à 2004, elles caractérisent 73 structures observées sur le profil central du Truc Vert. Le modèle morphologique établi pour la berme permet une représentation à la fois simple et efficace de la barre sableuse, mais aussi le calcul de nombreux paramètres morphologiques utiles pour la comparaison des structures. Au final, la quantité d'informations utiles devient très importante. Les statistiques descriptives univariées et les représentations graphiques traditionnelles sont vite limitées car le nombre de paramètres à prendre en compte est trop grand (Fénélon, 1981).

a) Principe de l'Analyse en Composante Principale des données morphologiques

- **Principe de calcul d'une ACP**

Les statistiques multivariées facilitent l'étude précise et efficace des données complexes (Escofier et Pages, 1988 ; Swan et Sandilands, 1995). Dans le cadre de ce travail sur la berme, une analyse en composante principale (ACP) a été entreprise. Cette méthode simplifie l'interprétation de grands tableaux de données composés d'individus (en lignes) et de variables (en colonnes). Pour cette étude, les individus seront les 73 bermes observées, nommées par date. Les variables sont : la distance de la crête par rapport à l'abscisse d'origine, son altitude, sa valeur de différence de pente (Netteté), la largeur de la berme, le rapport de largeur des versants, la pente minimale de la berme sur le versant interne et la présence d'une crête secondaire. La précédente partie de ce travail a montré que ces 7 paramètres sont pertinents pour décrire de façon précise la forme de la structure sédimentaire. Avant l'analyse, il est impossible de représenter graphiquement cet ensemble d'informations,

car il faudrait disposer d'un espace multidimensionnel pour positionner les individus sur les 7 axes représentant les variables. L'ACP a donc pour but de simplifier le nombre de variables qui caractérise les données. La difficulté consiste à conserver au maximum l'intégrité du nuage de point original (Figure III.12). Pour évaluer la qualité des nouvelles variables de l'ACP, on utilise un paramètre nommé variance. La variance peut être assimilée à la distance totale qui sépare chaque individu dans le nuage de point. La réduction des variables est permise par la puissance de calcul des ordinateurs qui peuvent définir rapidement la position des directions préférentielles d'allongement du nuage de point. La projection des individus sur ces axes d'allongement nommés « composantes principales » restitue alors un maximum de variance. De plus, la projection des variables sur les composantes principales montre les corrélations entre les variables d'origine.

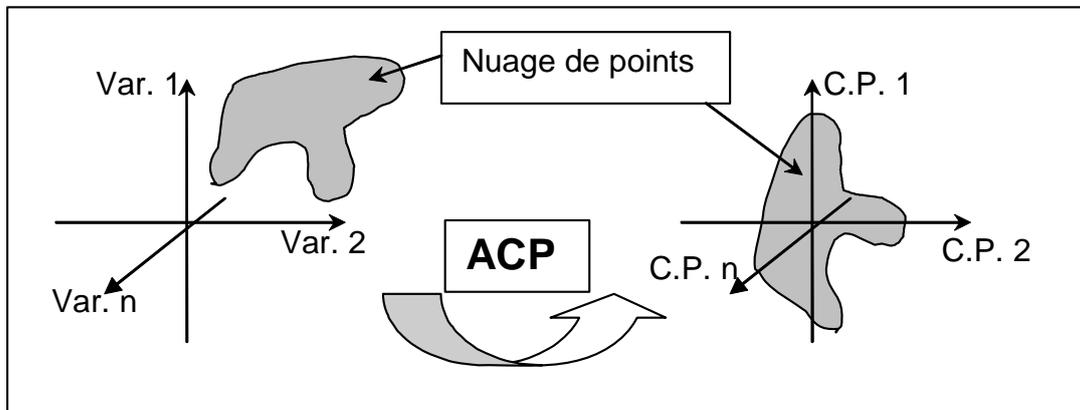


Figure III.12 : Les analyses en composantes principales (ACP) ont pour objectif de simplifier la représentation d'un nuage de points en déterminant des directions d'allongement préférentielles.

- **Utilisation des statistiques multivariées pour l'analyse des profils de plages**

Les traitements basés sur les statistiques multivariées et l'étude de variance sont très fréquemment employés pour l'analyse de la forme des plages. Winant et al. (1975) ont été les premiers à utiliser ces techniques facilitant l'exploitation d'une série temporelle de profils de plages. Ils ont proposé une méthode qui décrit de façon synthétique une série d'individus en fonction de plusieurs variables. Les individus correspondent aux profils de plage par date de mesure. Les variables sont définies par la position cross-shore des points topographiques. Les valeurs analysées sont des altitudes. Dans un premier temps, les résultats sont constitués d'une valeur par position cross-shore, pour chaque composante principale calculée, nommée « mode » dans ce type d'analyse. Le regroupement des valeurs de toutes les positions cross-shore permet de construire un profil synthétique par mode, illustrant alors les résultats de l'analyse. Chaque profil créé en fonction du mode est nommé « fonction empirique ». Dans le

domaine spatial, ces profils synthétiques représentent donc une partie des tendances des données mesurées. Les fonctions empiriques doivent être interprétées pour donner un sens aux résultats de l'analyse. Dans le domaine temporel, chaque individu peut également être « projeté » sur les axes des composantes principales. Les profils de plage mesurés aux différentes dates sont donc simplifiés en plusieurs valeurs associées chacune à un mode. Afin de comprendre la contribution de chaque mode dans la forme du profil, il faut alors utiliser l'interprétation des fonctions empiriques. Ainsi, une interprétation précise et claire des résultats de la méthode de Winant et al. (1975) a été proposée par Aubrey (1979), à partir de données mesurées sur 3 plages de Californie (Figure III.13). La fonction empirique représentant le mode 1 est clairement assimilée à un profil moyen. La fonction caractéristique du mode 2 montre des valeurs positives au niveau du haut de plage et de la position de la berme. Les autres modes sont plus délicats à interpréter et expriment des variations moins importantes de la morphologie. La représentation temporelle montre que le mode 1 reste relativement constant dans le temps, preuve d'une stabilité de la plage. Le mode 2 en revanche se voit marqué de fortes variations cycliques, qui indiquent l'existence saisonnière d'une berme sur les plages étudiées.

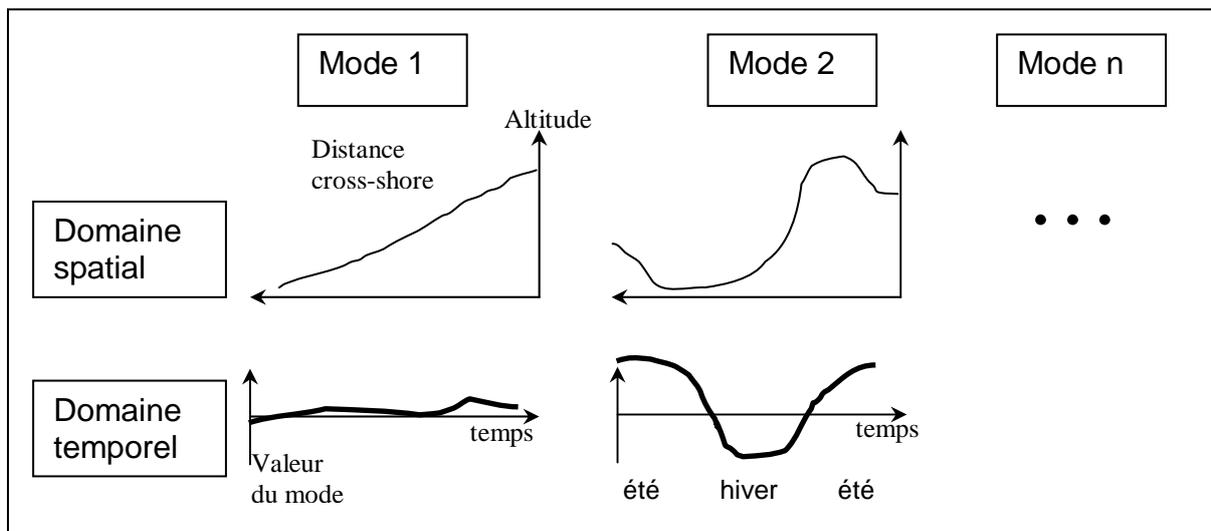


Figure III.13 : L'analyse statistique (type ACP) des profils de plage permet d'obtenir des fonctions empiriques qui représentent les caractéristiques importantes des données, dans les domaines spatial et temporel.

- **Discussion**

La technique des « fonctions empiriques » est maintenant très commune pour le traitement de longues séries temporelles de profils cross-shore, elle est souvent employée dans la littérature. Mais certaines limites apparaissent pour l'application aux données du Truc Vert. Il est en effet nécessaire d'utiliser une longueur constante de plage, afin d'avoir le même nombre de

variables pour tous les profils de l'analyse. Or sur la plage du Truc Vert, la longueur des profils mesurés est particulièrement variable (aspect développé dans la partie III.B). De plus, une mesure régulière dans le temps est importante pour faciliter les interprétations d'évolutions saisonnières. Cet aspect également n'est pas parfaitement respecté dans la base de données à notre disposition. Enfin, les conclusions des statistiques multivariées de Winant et al. (1975) et Aubrey (1979) n'ont pas pour but de détailler la morphologie et l'évolution d'une barre sableuse particulière. Les informations obtenues restent très générales (évolution saisonnière, position moyenne des barres sableuses) et concernent l'ensemble du profil de plage. Pour la plage du Truc Vert, ce type d'observations sur la position et l'évolution des barres ont déjà été formulées par De Melo (2003) qui a observé notamment la croissance de la berme en haut de plage, lors des épisodes de faible énergie.

L'analyse en composantes principales qui va être mise en place dans le cadre de ce chapitre présente des originalités, en comparaison avec les méthodes utilisées plus communément pour l'étude des plages. Elle a pour objectif prioritaire de décrire la morphologie de la berme. Les résultats ne seront donc pas focalisés sur les notions d'évolutions temporelles de la structure. Les variables utilisées ne forment pas non plus un ensemble de points interpolés d'un profil, il s'agit au contraire de paramètres morphologiques précis, calculés ou extraits des mesures topographiques. Les variables analysées ont donc déjà subi un niveau de traitement. En général, les variables traitées sont analysées par des moyens plus traditionnels (voir paragraphe précédent : étude de moyennes et d'écart types, représentations graphiques et corrélations) ; mais la mise en place d'une ACP va permettre une synthèse objective des données et permettra de donner encore plus de sens à tous les résultats. Les interprétations seront riches d'enseignements sur la morphologie de la berme car les résultats obtenus seront analysés plus simplement. Des regroupements entre bermes de caractéristiques proches seront également tentés en utilisant une technique de classification automatique.

b) Résultat de l'ACP pour les bermes de la plage du Truc Vert

Dans cette étude, l'analyse en composantes principales a été menée grâce au logiciel STATISTICA qui a permis les calculs et les représentations graphiques autour des données centrées et réduites. Les 3 premières composantes principales obtenues (appelé aussi « facteurs » ou « axes ») représentent 79 % de la variance totale du nuage de point (Figure III.14). Ces trois axes expliquent donc une grande majorité de la structure des données. A l'inverse, les composantes principales d'ordre supérieur à 3 et de valeur propre inférieure à 1 ne vont pas mettre en lumière des caractéristiques primordiales de la forme des bermes.

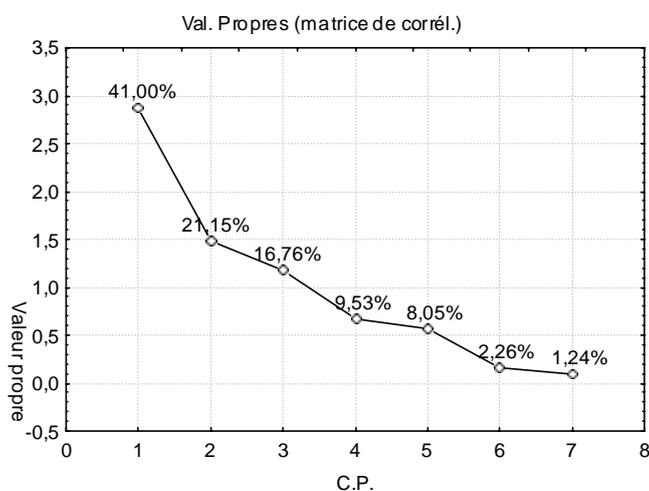


Figure III.14 : Valeurs propres et % de variance représentées par les composantes principales.

La première composante représente à elle seule 41 % de la variance. La projection des variables sur cet axe, en abscisse de la figure III.15 a, b et d, montre une corrélation négative entre la distance de la crête et la pente minimale de la berme. Dans les faits, plus la crête se situe loin de la dune, plus la pente minimale du versant interne sera faible ; ainsi, la chance d'observer un versant interne inversé (en pente vers la dune) sera importante pour une crête éloignée. Inversement, si la crête de la structure est proche de la dune, la pente du versant interne sera importante. Cette première composante principale montre aussi, dans une moindre mesure, une corrélation entre les variables de taille de la berme, de présence de double crête, de netteté. Cette corrélation signifie qu'il existe une bonne chance pour que les plus grandes bermes possède une crête bien marquée, voire une double crête.

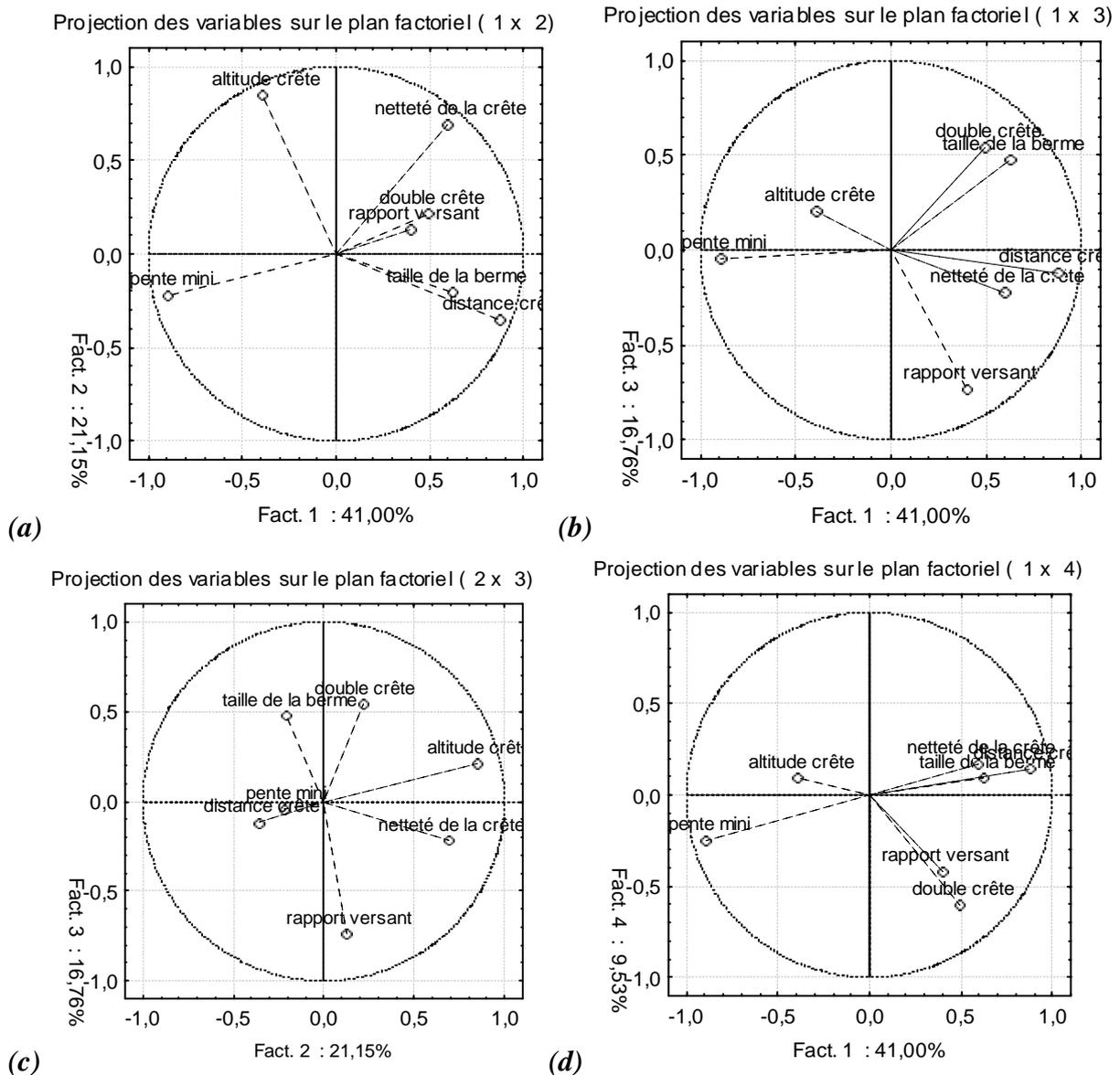


Figure III.15 : Projection des variables sur les 3 premières composantes principales. La valeur des positions est normalisée (entre -1 et 1). Le cercle indique les valeurs mini et maxi.
 a) Projection des variables sur les axes 1 et 2. b) Projection des variables sur les axes 1 et 3.
 c) Projection des variables sur les axes 2 et 3. d) Projection des variables sur les axes 1 et 4.

La seconde composante principale représente 21 % de la variance, elle rend compte d'une direction d'allongement non négligeable dans le nuage de points caractérisant les bermes de la base de données du Truc Vert. Elle montre la corrélation entre la variable de netteté de la crête et son altitude (Figure III.15.a), et représente l'existence d'un certain nombre d'individus qui possèdent une crête peu nette, située relativement bas en altitude. La troisième composante principale qui concerne encore 17 % de la variance confirme la corrélation entre la taille de la berme et l'existence d'une crête double, elle indique en outre une corrélation

négative entre ces variables et le rapport de longueur des versants (Figure III.15.b). Ce résultat implique qu'un certain nombre de structures de grandes tailles, possédant éventuellement une double crête, sont caractérisées par un versant externe plutôt grand et donc un rapport de taille faible. La quatrième composante principale n'est pas très significative car sa valeur propre est inférieure à 1 (0,66, Figure III.14). Elle ne représente pas un pourcentage important de variance et n'est donc pas caractéristique de tendances fortes dans la morphologie des bermes. On peut remarquer cependant que cette composante présente une corrélation positive entre la variable de rapport des versants et la présence d'une crête double (Figure III.15.d), au contraire de l'axe 3 décrit précédemment.

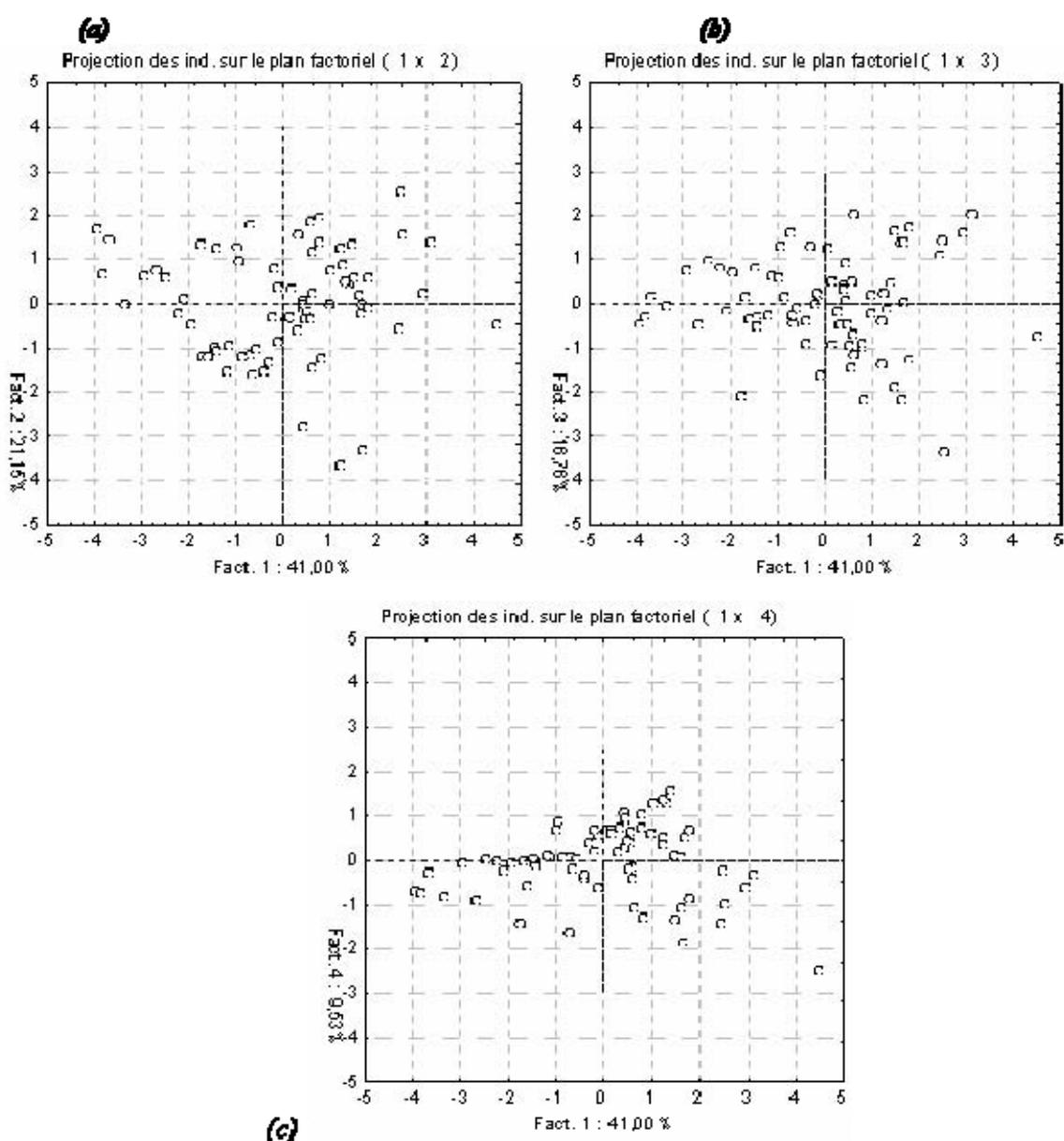


Figure III.16 : Projection des individus sur les composantes principales.
 (a) Plan factoriel défini par les composantes principales 1 et 2. (b) CP 1 et 3. (c) CP 1 et 4.

La projection des individus (berme mesurée à une date précise) sur les trois premières composantes principales montre des directions d'allongement autour de ces axes (Figure III.16 a et b). En revanche, seuls quelques individus sortent timidement du lot sur l'axe 4 (Figure III.16.c). La suite de l'analyse sera donc principalement basée sur la représentation simplifiée et la classification des bermes sur les trois premières composantes principales. A ce stade de l'étude, le nuage de point qui représente la forme des bermes du Truc Vert, définie à l'origine par 7 variables, est décrit de façon synthétique par 3 directions préférentielles. Ces composantes principales représentent chacune un certain nombre de variables corrélées. La projection des individus dans un espace défini par les 3 premières composantes principales (Figure III.17) constitue donc une représentation simplifiée, mais cohérente du nuage de points. La suite de l'analyse a pour objectif de regrouper les morphologies proches en classes et de décrire leurs caractéristiques grâce aux composantes principales et aux paramètres descriptifs.

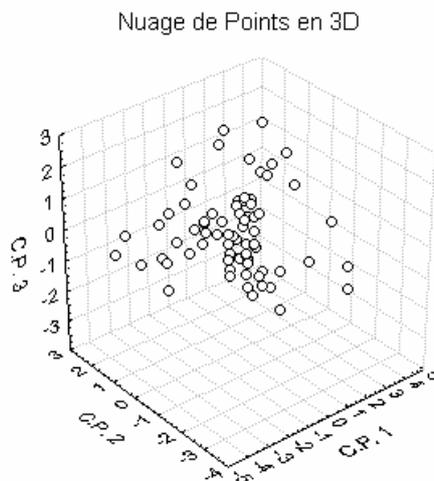


Figure III.17 : Projection des bermes dans un espace défini par les 3 composantes principales.

c) Typologie des bermes

Grâce à des méthodes statistiques multivariées de classifications automatiques, il est possible d'associer les bermes qui possèdent des caractéristiques proches (Benzecri, 1973). Dans cette étude, nous utiliserons la technique de Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) du logiciel STATISTICA. Le programme calcule tout d'abord des distances entre les individus. Puis, les individus les plus proches sont associés pour former une classe. Au fur et à mesure du déroulement du calcul, des individus de plus en plus distants sont agrégés aux classes initiales pour former des groupes plus importants. Le travail de décryptage de ce type de traitement consiste à utiliser des classes cohérentes, caractérisées par une distance d'agrégation correcte. La classification entreprise prend en compte la projection des bermes sur les 3 premières composantes principales. La figure III.18 montre que les distances d'agrégation sont plutôt stables avant 5 et augmente très rapidement après 12, preuve d'une perte de cohérence des classes constituées. Les résultats d'une CAH sont présentés sous forme d'un arbre (dendrogramme, Figure III.19). Pour l'établissement d'une typologie cohérente des bermes, une distance d'agrégation maximale de 10 a été choisie ; elle définit 5 classes distinctes.

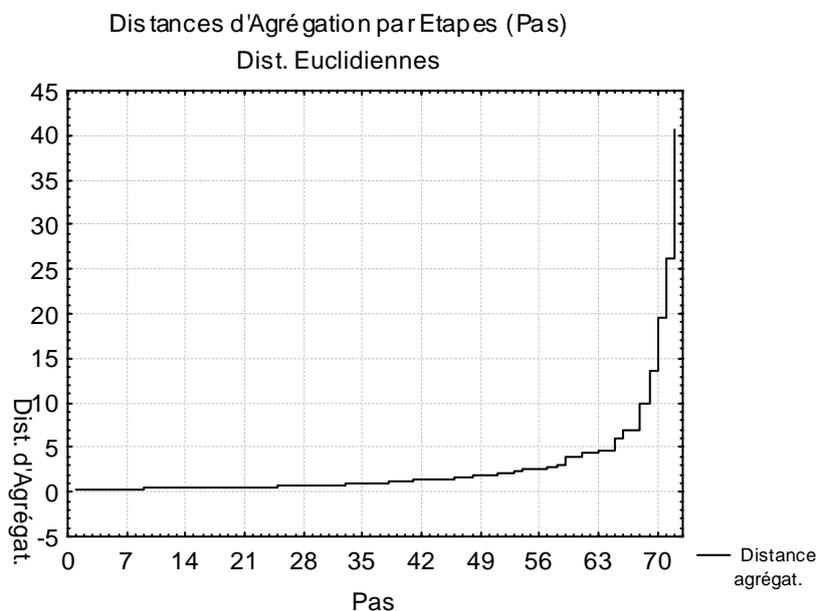


Figure III.18 : Distance d'agrégation des classes en fonction des étapes de calcul (Pas).

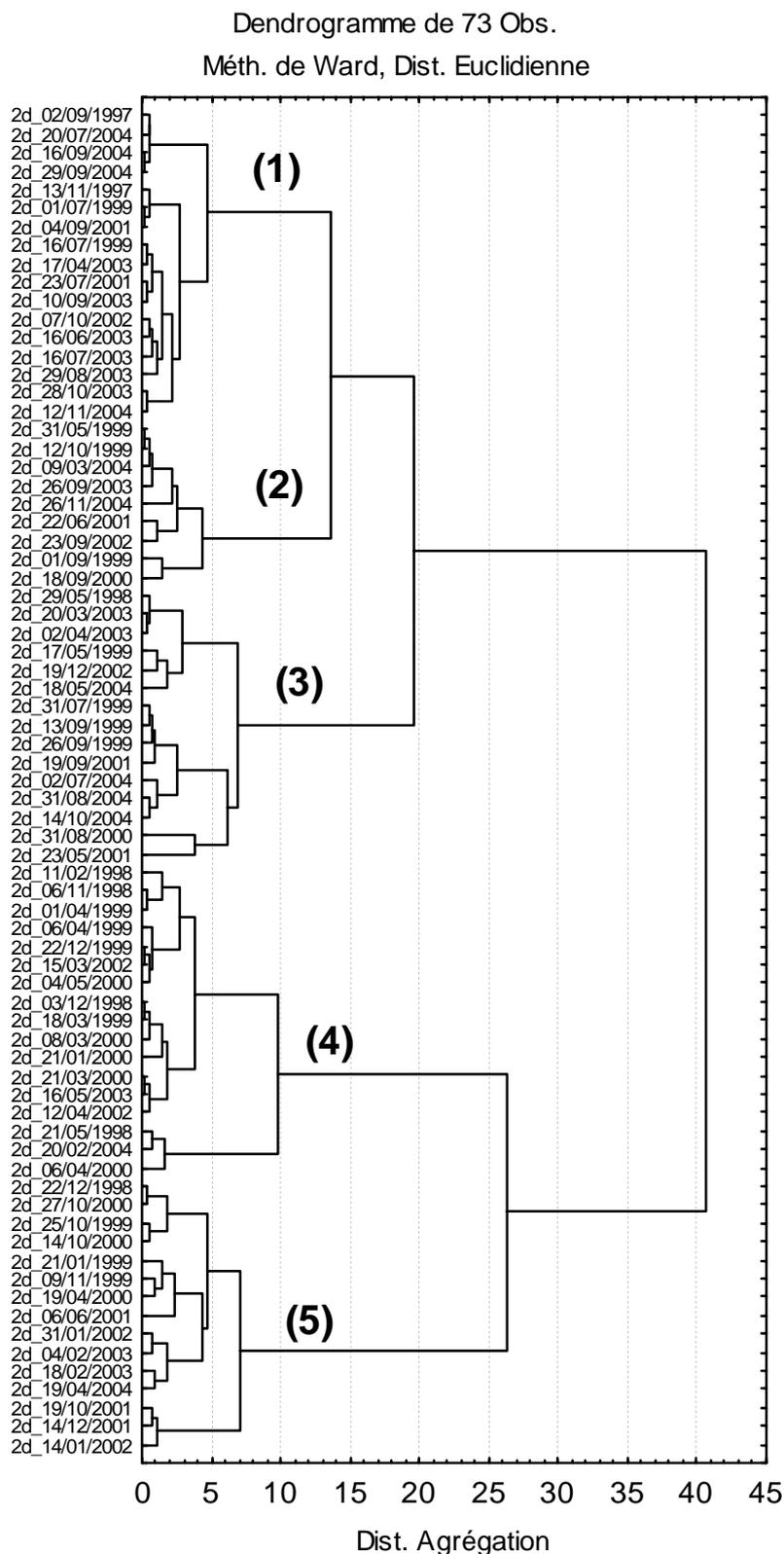


Figure III.19 : Résultat de la classification des bermes (CAH) en fonction de leurs coordonnées sur les 3 premières composantes principales. Dendrogramme présentant l'assemblage des bermes nommées par dates, en fonction de la distance d'agrégation.

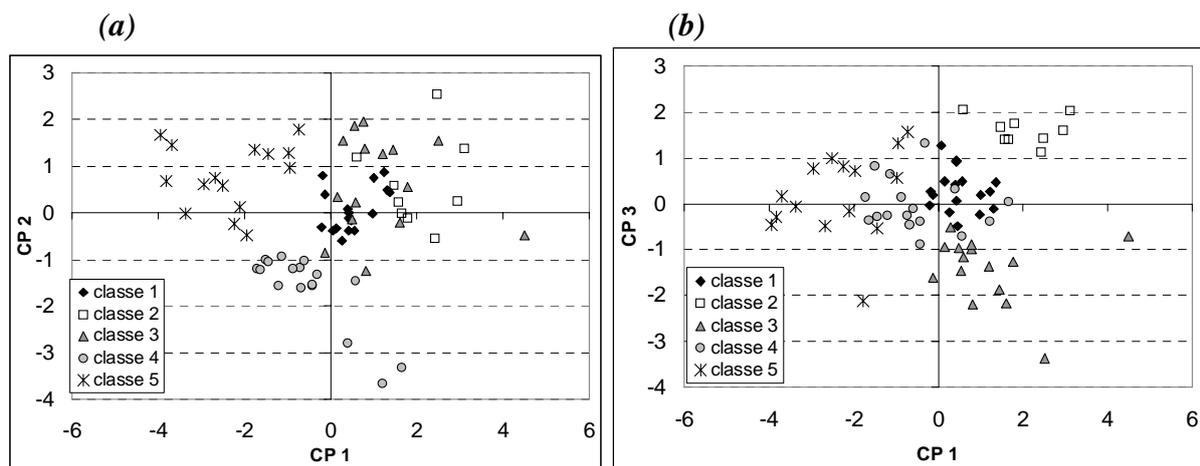


Figure III.20 : Projection des classes de bermes sur les composantes principales.
(a) CP 1 et CP 2. (b) CP 1 et CP 3.

	Fact 1	Fact 2	Fact 3	Fact 1	Fact 2	Fact 3
	moyenne			écart-type		
classe 1	0,499	0,070	0,292	0,513	0,469	0,456
classe 2	2,009	0,608	1,599	0,801	0,949	0,304
classe 3	1,157	0,607	-1,432	1,151	1,035	0,734
classe 4	-0,516	-1,625	-0,040	0,979	0,821	0,562
classe 5	-2,343	0,790	0,187	1,064	0,704	0,929

Tableau III.4 : Valeurs moyennes et écarts-types des classes de berme pour les 3 premières composantes principales.

Les individus de chaque classe sont représentés en fonction de leur projection sur les 3 premières composantes principales (Figure III.20 et Tableau III.4). Certains points de ressemblance ou de différence peuvent déjà être mis en évidence. Ainsi, sur le premier axe, on observe que la classe 5 se situe vers les valeurs négatives, les classes 2 et 3 se positionnent plutôt vers les valeurs positives. Sur la seconde composante principale, la classe 4 est nettement négative. Pour le facteur 3, la classe 2 se situe vers les valeurs positives, la classe 3 vers les valeurs négatives. Grâce à la connaissance des caractéristiques des composantes principales, il est possible de décrire globalement la morphologie des classes de berme. La reprise des paramètres descriptifs qui influencent chaque facteur permettra de préciser encore mieux les détails et les différences entre les classes (Tableau III.5).

VARIABLES	taille berme	pente mini	netteté crête	distance crête	altitude crête	rapport versant	double crête
moyenne générale	44,27	2,41	9,19	193,22	3,88	1,89	0,151
classe 1	54,71	-0,18	10,93	197,74	4,05	1,33	0
classe 2	58,92	-2,16	14,14	202,64	3,85	1,42	1
classe 3	38,61	-1,25	15,87	202,07	3,79	4,02	0
classe 4	43,62	5,26	2,18	196,63	2,89	1,31	0
classe 5	30,06	8,51	5,50	169,71	4,93	1,31	0

Tableau III.5 : Valeurs moyennes des paramètres descriptifs des 5 classes de bermes (m et %).

- Classe 1

La classe 1 se situe toujours au centre des graphiques, elle représente donc plutôt des morphologies moyennes. Nous la nommerons donc classes des « bermes moyennes » (Figure III.21.a). Ces structures présentent une taille légèrement supérieure à la moyenne générale (54 m). Le versant interne oscille autour de l'horizontal (pente mini moyenne de -0,2 %), il est sensiblement plus grand que le versant externe (rapport de 1,3).

- Classe 2

Les valeurs positives de la classe 2 pour le facteur 1 s'expliquent par une pente minimale négative (-2,15 % en moyenne), preuve de structures bien marquées. Les valeurs positives du facteur 3 signifient que la taille des structures est importante (59 m), mais elles indiquent surtout la présence systématique d'une crête double. Cette catégorie sera appelée classe des « bermes à double crêtes » (Figure III.21.b).

- Classe 3

Sur le facteur 1, les barres de la classe 3 sont relativement semblables à la classe 2 : les pentes mini plutôt négatives en font des structures bien marquées. En revanche, ces 2 classes s'opposent sur l'axe 3, ce qui s'explique d'une part, par une plus petite taille des bermes de la classe 3 (38,6 m), et d'autre part, par un rapport des versants très grand (4 en moyenne, versant interne plus long que le versant externe). Cette classe est nommée classe des « bermes marquée » (Figure III.21.c).

- Classe 4

La classe 4 montre des valeurs négatives sur la composante principale 2, car l'altitude et la netteté des crêtes de bermes y est faible (2,9 m en moyenne et 2,2 % de différence de pente). Cette catégorie correspond aux « ondulations de haut de plage » (Figure III.21.d).

- Classe 5

Les bermes de la classe 5 sont également caractérisées par de petites valeurs sur l'axe 1. . La pente minimale du versant interne y est très forte en moyenne (8,5 %), et la crête se situe à proximité immédiate de la dune embryonnaire (à 169,7 m dans l'Ouest du point de référence). La taille de ces structure est petite (30,5 m en moyenne). Cette classe a déjà été repérée dans l'étude de la dune embryonnaire (§ III.A.1.3), elle est nommée « ondulation de pied de dune » (Figure III.21.e).

Les 5 classes de bermes ont été obtenues grâce à une analyse objective et quantifiée des données. La liste des bermes de chaque classe est fournie par l'arborescence, résultat de la CAH (Figure III.19). Les différentes catégories obtenues possèdent des caractères propres, synthétisés par leur position sur les composantes principales. L'étude des paramètres descriptifs des classes peut fournir des informations encore plus précises, c'est aussi un moyen de dégager les caractéristiques fondamentales des classes étudiées et de les nommer concrètement (Figure III.21).

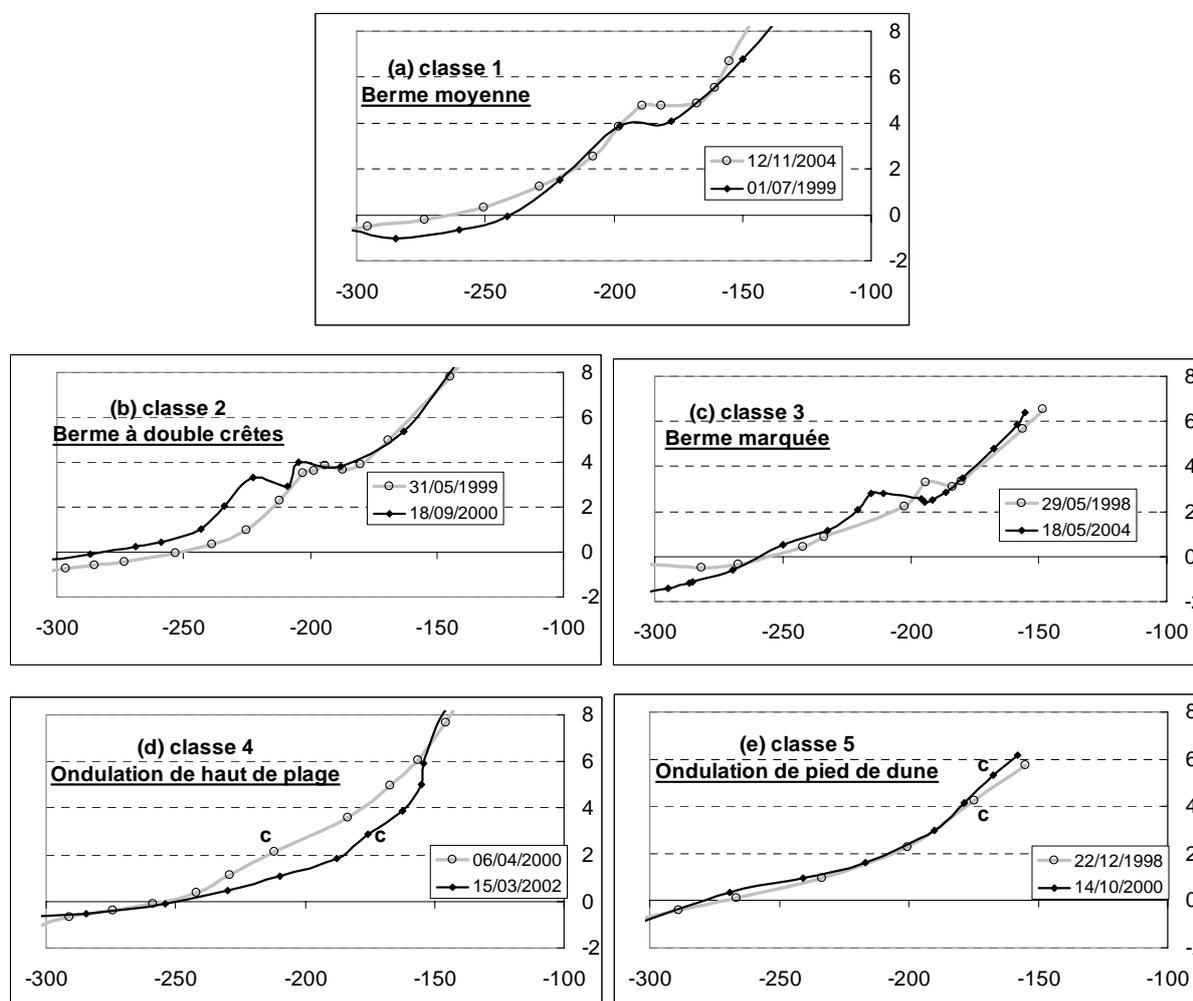


Figure III.21 : Exemples illustrant les 5 classes de bermes observées sur la plage du Truc Vert. En abscisse : distance à l'Est du point de référence (m), en ordonnée : altitude (m NGF). La lettre c indique la position des crêtes pour les classes 4 et 5 (ondulations).

B) Etude du bas de plage intertidale

Ce chapitre a pour objectif de décrire les barres sableuses du bas de plage intertidale. Ces structures sont situées à l'ouest de la berme, en général au-dessous du niveau moyen des mers (+0,35 m NGF). Il faut savoir que la description de cette partie de plage est limitée par les méthodes de mesures topographiques, car la plage intertidale n'est pratiquement jamais mesurée dans son intégralité. En effet, le niveau de l'eau reste souvent très supérieur au zéro hydrographique (-2,15 m NGF), pour des raisons liées aux conditions de marée, de houle et de météo.

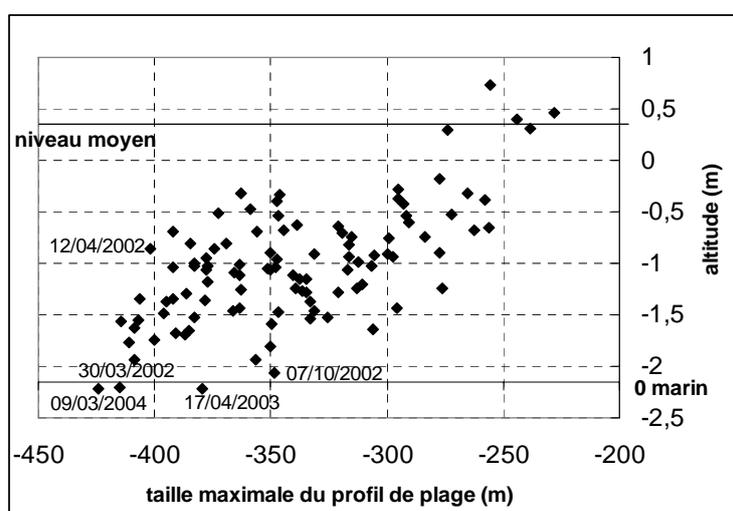


Figure III.22 : Position du point mesuré le plus à l'Ouest pour chaque profil topographique. Les abscisses représentent une distance à l'Est du point de référence, les valeurs négatives signifient une direction orientée vers l'Ouest.

La figure III.22 montre une très grande variation dans l'échantillonnage de la plage intertidale. En moyenne le profil cross-shore central atteint une longueur de 340 m et une altitude de -1 m NGF. Mais certains cas extrêmes de profils ne dépassent même pas le niveau moyen des mers ; dans ces conditions, il n'est pas possible de travailler sur le bas de plage intertidale. Les levés les plus complets qui permettent d'observer la totalité de la plage intertidale sont rares (09/03/04, 17/04/03, 30/03/02, 07/10/02). De plus, certaines configurations de plages permettent d'observer la totalité de la zone intertidale sur un profil de 350 m (07/10/02), tandis que d'autres cas dépassant 400 m de longueur n'arrive qu'à la moitié du domaine en altitude (12/04/02). Dans un environnement de plage intertidale mesurée de façon souvent incomplète, l'analyse, la description et la comparaison vont s'avérer particulièrement difficiles entre des zones de tailles différentes. Pour la suite du travail, il est donc nécessaire de toujours rester prudent sur les interprétations formulées.

1) Morphologie de la plage intertidale

1.1 Forme convexe de la plage intertidale et présence de barres sableuses

Malgré ces difficultés liées à la complexité des mesures topographiques dans le milieu, différentes méthodes d'étude sont mises en œuvre. Le premier moyen employé pour décrire la forme de la plage intertidale à partir de profil cross shore consiste à utiliser un paramètre synthétique : le pourcentage de convexité. Sur une plage, la forme convexe est le signe d'une morphologie bombée, d'une tendance possible à l'engraissement ou de la présence de barres sableuses. Les formes concaves représentent les ruptures de pente qui peuvent être les témoins d'une morphologie creusée et d'une zone d'érosion possible. En fait, ce paramètre exprime le pourcentage de terrain caractérisé par une forme convexe, c'est-à-dire par une valeur de différence de pente supérieure à 0. Pour une différence de pente positive, la pente augmente après le point considéré. Il en résulte une forme de « bosse », dont la crête se situe au niveau du pic de différence de pente. Le pourcentage de convexité est calculé pour les points topographiques situés à l'ouest de la berme. En cas d'absence de berme, le paramètre est calculé après la dune embryonnaire.

Pour un point N du profil topographique,

C : paramètre exprimant la convexité de la morphologie en fonction de la longueur du profil.

D_n : distance du point N.

D_{max} : taille du profil de plage.

DP : paramètre de différence de pente.

$$\text{Si } DP(n) > 0, \text{ alors : } C(n) = \frac{((D_n - D_{n-1})/2) + ((D_{n+1} - D_n)/2)}{D_{\max}} * 100 \quad \text{puis} \quad C = \sum_n C(n)$$

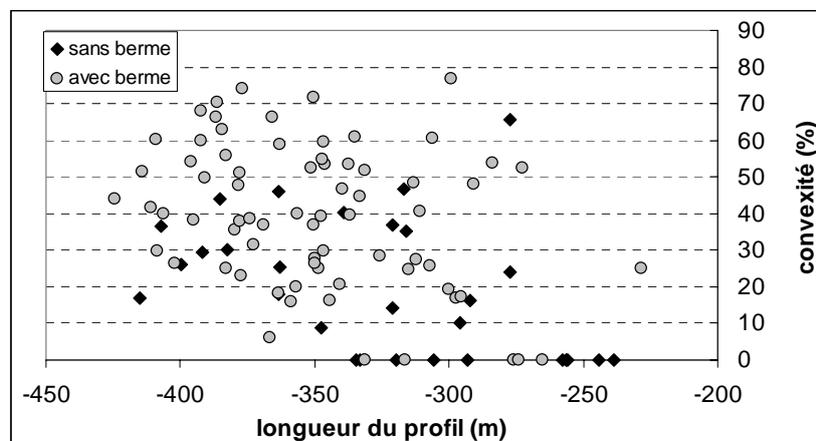


Figure III.23 : Pourcentage de convexité en fonction de la longueur du profil topographique.

La figure III.23 montre la grande variabilité du pourcentage de convexité, entre 0% pour des profils entièrement concave, jusqu'à 77 % pour une plage de forme convexe. De plus, ce graphique prouve qu'il n'existe pas de lien entre la taille de la plage mesurée et la convexité du profil. Certains grands profils sont concaves, d'autres convexes ou plats ; il en est de même pour les mesures sur de petites distances. Cette observation laisse augurer une grande variabilité dans la forme des plages.

Le repérage de points caractéristiques sur les profils topographiques permet de préciser cette idée. La présence d'un maximum local est le signe de l'existence d'un système de barre et baie. Le sommet de la barre est localisé au niveau du maximum local de topographie. La baie forme une dépression dont le fond se situe au niveau d'un minimum local. Parmi les 104 profils mesurés, 4 grands types de plages sont distingués, en fonction de la présence ou l'absence de barre et de berme (Figure III.24) :

- Pas de berme, ni de barre dans 20,4 % des cas.
- Pas de berme, 1 barre, pour 7,8 % des profils.
- 1 berme, pas de barre, 35,9 % des cas.
- 1 berme et 1 barre, pour 35,9% également.

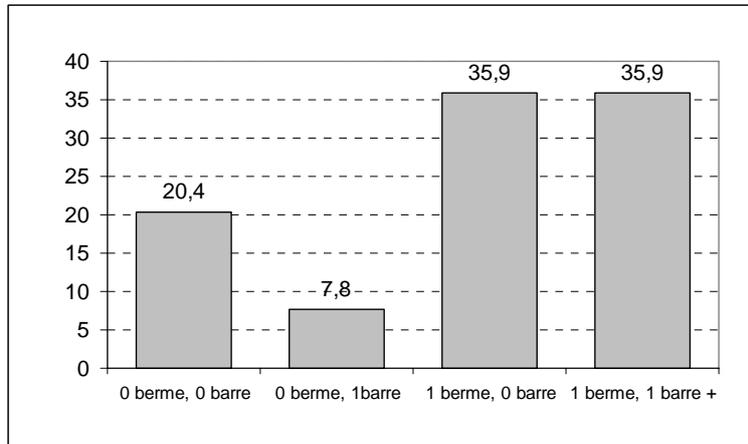


Figure III.24 : *Fréquence d'observation (%) des 4 principales catégories de plages observées par des méthodes topographiques.*

Les profils sans berme ni barre sont généralement courts (305 m de moyenne) et plutôt concave (16 % de convexité, Figure III.25). Ces profils ont été levés la plupart du temps dans des conditions de marée ou de météo difficiles ; ils ne permettent pas de conclure sur l'absence d'une barre sableuse en bas de plage. Cette remarque s'applique aussi aux profils avec berme mais sans barre, qui mesurent 325 m en moyenne, et sont légèrement plus convexes (28,5 % de convexité). Les profils à barre et sans berme, sont rares, mais possèdent

une convexité moyenne équivalente (29 %), qui s'explique par l'aspect concave du haut de plage, à partir du pied de la dune embryonnaire. De manière générale, on constate que les profils permettant l'étude et l'observation des barres intertidales sont les plus longs (plus de 370 m en moyenne). Les profils à barres dont le calcul de convexité débute au pied de berme sont de loin les plus convexes (49 % de convexité).

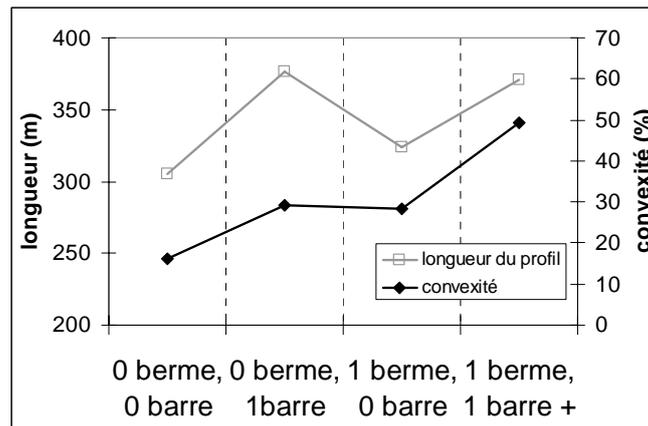
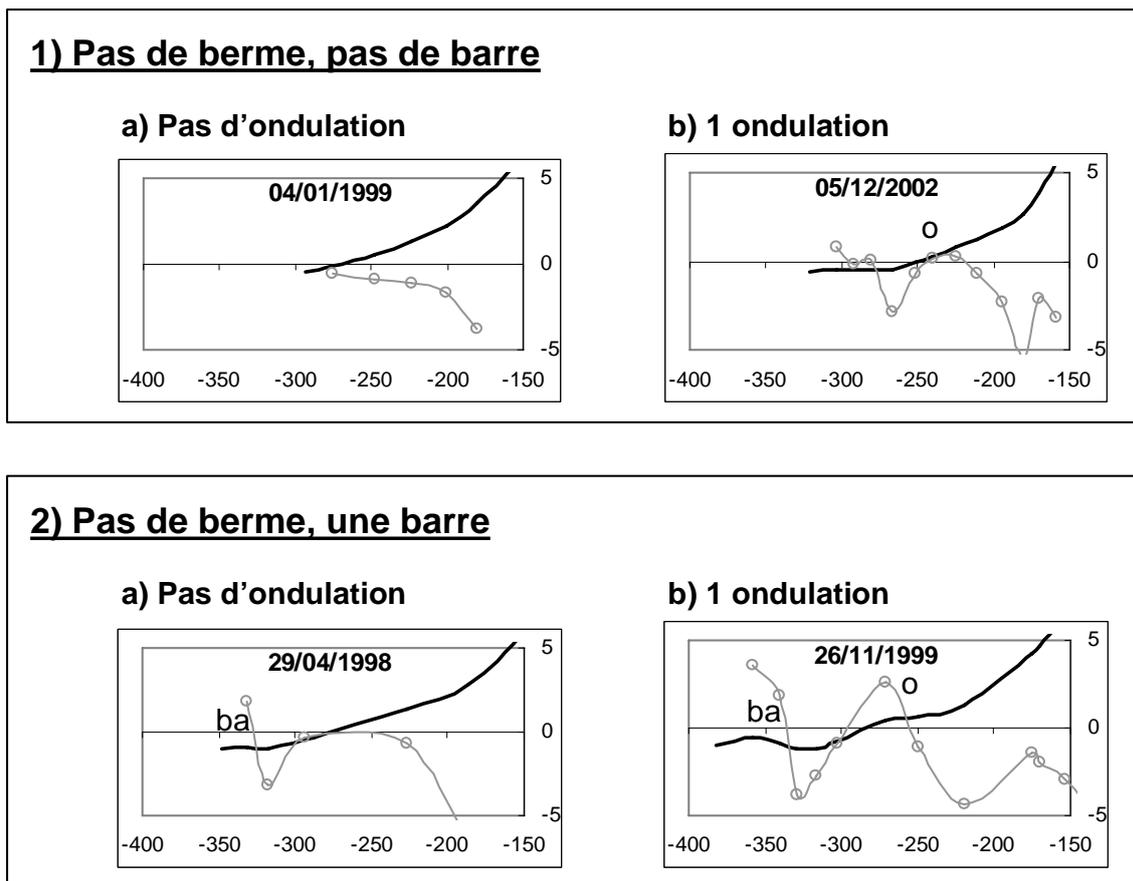


Figure III.25 : Convexité moyenne (%) et longueur moyenne des profils (m) pour les 4 catégories principales de plages observées par des méthodes topographiques.

1.2. Observation d'ondulations morphologiques sur la plage intertidale

Le travail à partir des courbes de différence de pente est un moyen intéressant pour observer certains points caractéristiques qui forment la crête d'ondulations convexes de la plage. Ces ondulations de plage sont caractérisées par un pic local de différence de pente, bien qu'elles ne forment pas de sommet dans la topographie. Au-dessus du niveau moyen des mers, ces structures ont déjà été observées lors de l'étude des bermes, elle ont été nommées « ondulations du haut de plage ». Mais ces formes n'ont pas été analysées systématiquement car parfois elles sont surmontées par des bermes beaucoup plus nettes. De plus, on retrouve également ces structures sur le bas de la plage intertidale, c'est pourquoi elle seront nommées de façon plus générale « ondulations de plage intertidale » dans ce chapitre. L'observation des ces formes sédimentaires permet de préciser les 4 classes de plages intertidales présentées précédemment à partir de la figure III.24.



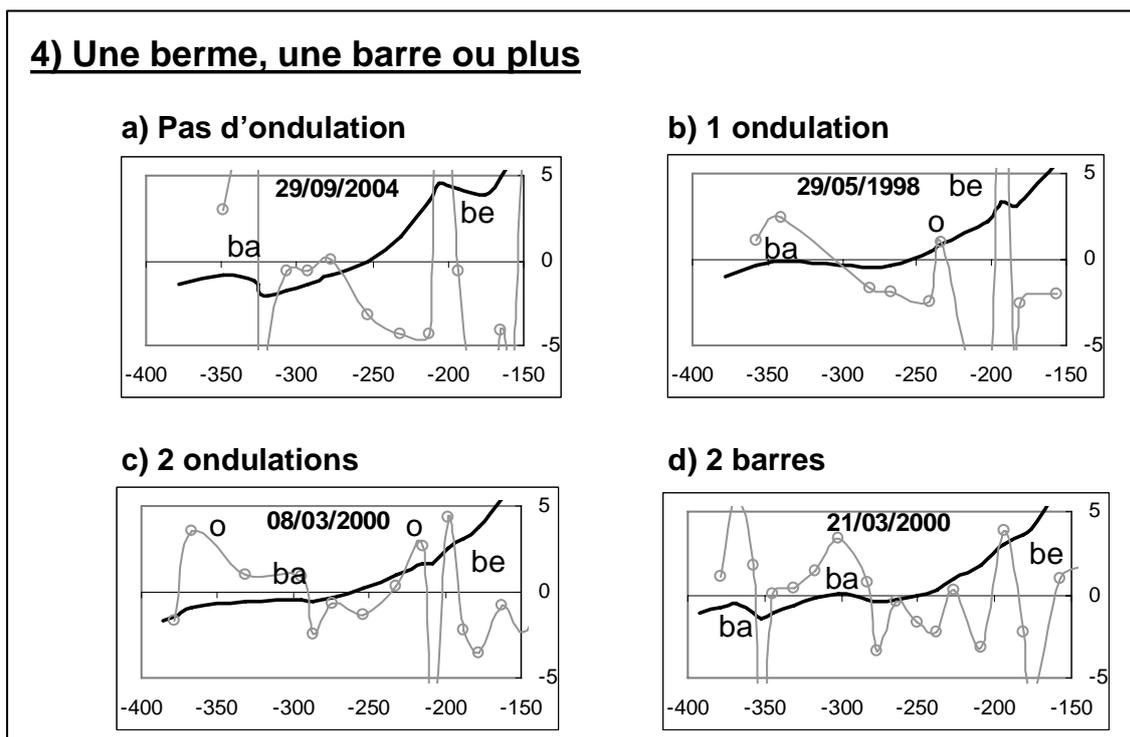
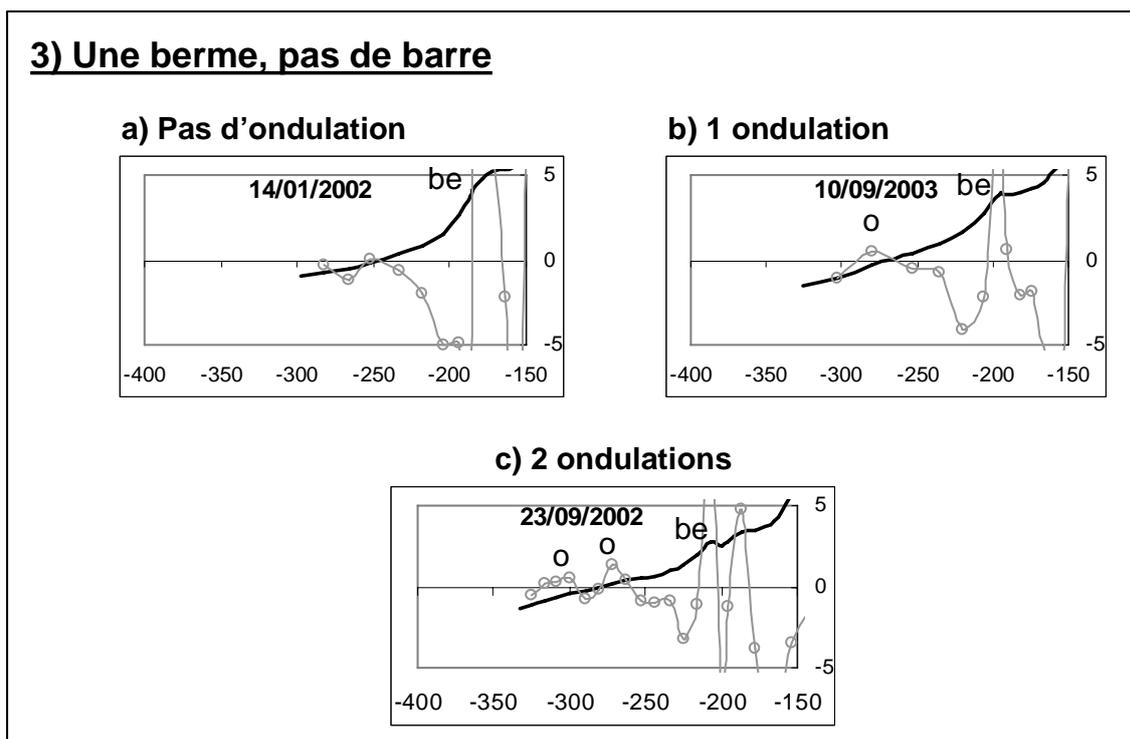


Figure III.26 : Exemples de 11 types de plages mesurées par topographie (profils topographiques en trait noir). Les 4 grandes catégories sont distinguées de 1 à 4 en fonction de la présence ou l'absence de berme (be) et de barre (ba). Les sous-catégories sont obtenues en observant la présence d'ondulations de plage intertidale (o) à partir de la courbe de différence de pente (trait gris clair et ronds). Les abscisses représentent la distance vers l'Est (m) ; les ordonnées, l'altitude (m) et la différence de pente en %.

Ainsi, on distingue 11 nouveaux types de plages mesurées par un profil topographique cross shore (Figure III.26 et III.27) :

- Pas de berme, pas de barre, ni d'ondulation, 11,7 % des cas, exemple du 04/01/1999.
- Pas de berme, pas de barre, 1 ou 2 ondulations, 8,7 % des cas, exemple du 05/12/2002 (1 ondulation).
- Pas de berme, 1 barre, pas d'ondulation, 1,9 % des cas, exemple du 29/04/1998.
- Pas de berme, 1 barre, 1 ou 2 ondulations, 5,8 % des cas, exemple du 26/11/1999 (1 ondulation).
- 1 berme, pas de barre, pas d'ondulation, 9,7 % des cas, exemple du 14/01/2002.
- 1 berme, pas de barre, 1 ondulation, 18,4 % des cas, exemple du 10/09/2003.
- 1 berme, pas de barre, 2 ou 3 ondulations, 7,8 % des cas, exemple du 23/09/2002.
- 1 berme, 1 barre, pas d'ondulation, 8,7 % des cas, exemple du 29/09/2004
- 1 berme, 1 barre, 1 ondulation, 21,4 % des cas, exemple du 19/05/1998.
- 1 berme, 1 barre, 2 ondulations, 3,9 % des cas, exemple du 08/03/2000.
- 1 berme, 2 barres, 1,9 % des cas (2 cas observés), exemple du 21/03/2000.

Il faut noter que les courbes de différence de pente présentent souvent un maximum au niveau des barres. Mais cet aspect sera abordé ultérieurement, lors de la description précise des formes du système de barre et baie.

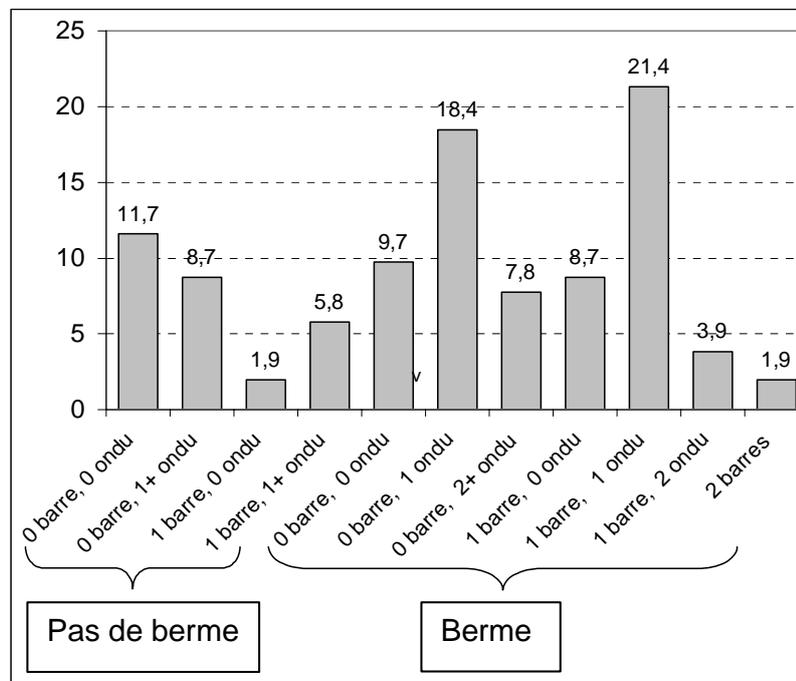


Figure III.27 : Fréquence (%) des 11 types de plages avec ou sans ondulation.

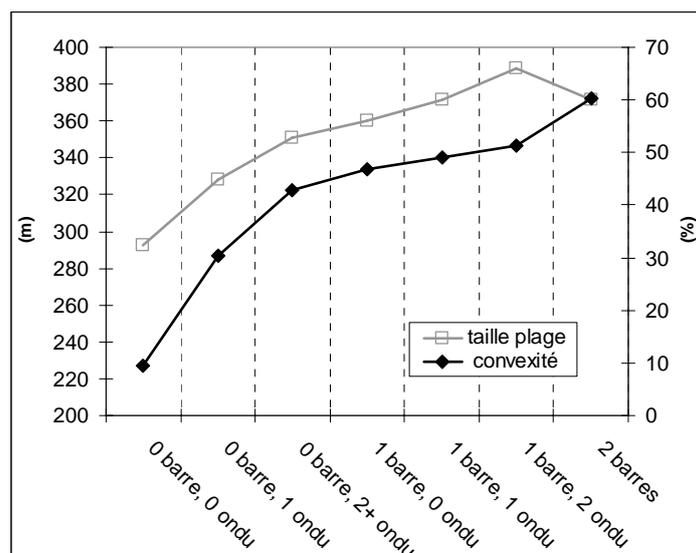


Figure III.28 : Convexité moyenne (%) et taille moyenne (m) des plages à bermes, mesurée en topographie. Le calcul du pourcentage de convexité débute au pied de la berme. L'écart type des valeurs est compris entre 10 à 15 % pour la convexité et 15 à 40 m pour la taille de plage mesurée.

L'utilisation du pourcentage de convexité est tout à fait indiquée pour décrire le bas de plage intertidal des profils à berme. La figure III.28 montre clairement la croissance de ce paramètre entre les profils sans barre ni ondulation (9,5 % de convexité), les profils à barre unique (de 46,8 % à 51,3 %), et les profils à barre double (60,2 % de convexité en moyenne). Le pourcentage de convexité est donc un bon paramètre synthétique pour décrire la forme d'un profil topographique et l'existence potentielle de structures sédimentaires. La relation forte qui existe aussi entre ce paramètre, le type de morphologie et la longueur de plage mesurée doit également être considérée. Ainsi, les morphologies sans barre ni ondulation (faible convexité) sont généralement observées sur de petits profils topographiques (290 m en moyenne) ; au contraire, les structures plus nombreuses sont mesurées sur des profils beaucoup plus longs (au-dessus de 350 m). La plage intertidale doit donc absolument être mesurée dans sa quasi-intégralité (sur 400 m de longueur et jusqu'à -2,15 m NGF) pour pouvoir décrire sans erreur sa morphologie. En l'absence d'observation complète, l'analyse des structures sédimentaires reste partielle et il est nécessaire de garder une certaine réserve sur la forme générale de l'environnement.

2) Forme du système de barre et baie

2.1. Etude des paramètres morphologiques

Les problèmes de longueur de profils constituent bien sûr une limite à la description morphologique du système de barre et baie. Ainsi, le versant externe de la barre n'est jamais observé dans sa totalité sur les levés topographiques. Cependant, cette partie du travail a pour objectif de décrire au mieux les structures sédimentaires en s'appuyant sur les données disponibles. 48 profils montrent la présence de barres sableuses dans le bas de la plage intertidale. Dans un premier temps, 2 points caractéristiques peuvent être utilisés pour synthétiser la forme du système : la sommet de barre intertidale et le fond de la baie.

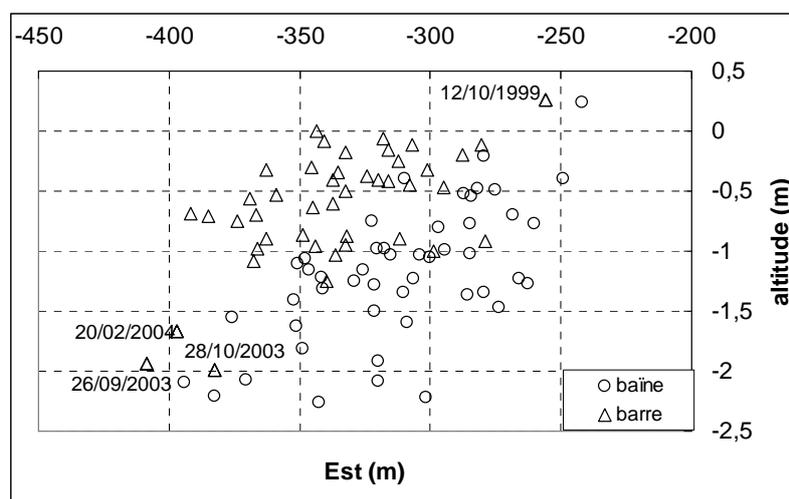


Figure III.29 : Position du sommet des barres (triangles) et du fond des baines (ronds).

	BAÏNE		BARRE		taille	amplitude	pente (%)
	distance	altitude	distance	altitude			
moyenne	311,57	-1,18	-336,51	-0,63	27,53	0,50	1,86
médiane	310,02	-1,19	-336,72	-0,55	26,36	0,40	1,35
min	241,71	-2,26	-408,47	-1,99	7,72	0,01	0,13
max	394,29	0,24	-255,66	0,26	58,80	1,41	5,12
e-t	35,66	0,56	33,47	0,48	12,29	0,36	1,35

Tableau III.6 : Statistiques sur les positions (m) et les paramètres (m et %) des barres et baines. « e-t » est l'abréviation du terme écart-type.

La figure III.29 présente la position de l'ensemble des points caractéristiques observés. En moyenne, le sommet de barre se situe à -337 m de distance et -0,6 m d'altitude (Tableau III.6). Le fond de la baie est repéré à -312 m à l'ouest du point de référence et à une altitude de -1,2 m NGF. Les écarts types sont relativement importants, de l'ordre de 35 m pour les

distances et 0,5 m pour les altitudes ; ils montrent la grande diversité des systèmes. On observe que les points caractéristiques se répartissent sur toute la surface du bas de plage intertidale, entre -250 m et -400 m. De plus, entre -300 et -350 m, la variabilité morphologique est particulièrement importante car les différences d'altitudes peuvent dépasser 2 m. L'étude des valeurs minimales et maximales de positions de la barre permet de distinguer trois emplacements pour les structures intertidales (Figure III.30) :

- La position intermédiaire est située autour des valeurs moyennes des points caractéristiques, elle concerne la majorité des observations.
- La position haute n'est observée qu'une fois (12/10/99) sur le profil central et situe le système autour de -250m, à l'altitude du niveau moyen des mers.
- La position éloignée est observée à 3 reprises vers -400m, à proximité de la limite des plus basses mers théoriques (26/09/03, 28/10/03, 20/02/04). Ce type de structure sera décrit plus en détail dans le chapitre suivant (voir § III.C) comme une barre sableuse appartenant à la zone de transition entre la plage intertidale et le domaine sous-marin.

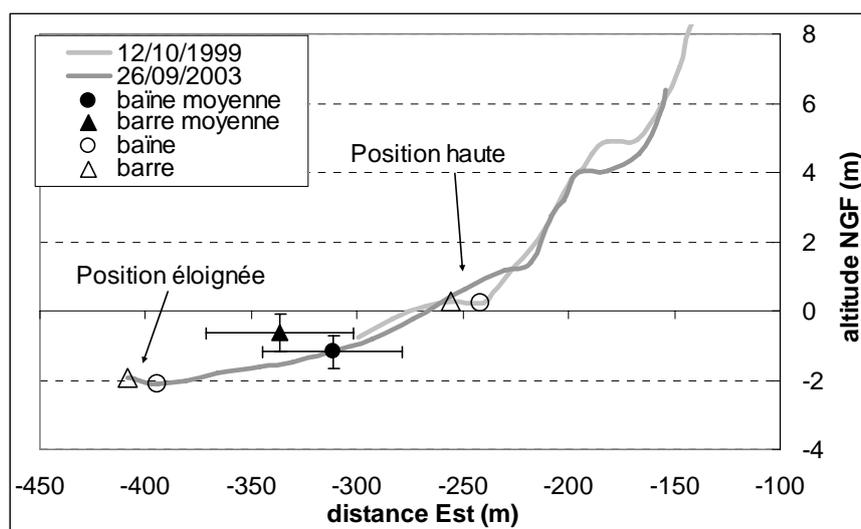


Figure III.30 : Profils topographiques caractérisés par un système de barre et baie en position haute (gris clair) et en position éloignée (gris foncé). La moyenne et l'écart type de position de tous les systèmes observés dans la base de données sont représentés en noir.

L'utilisation des points caractéristiques « sommet de barre » et « fond de baie » rend possible le calcul de plusieurs paramètres de description du versant interne de la barre intertidale. La largeur du versant correspond à la différence de distance entre les 2 points caractéristiques ; la différence entre l'altitude des 2 points représente l'amplitude du versant interne. Le calcul de la pente moyenne prend en compte ces 2 nouveaux paramètres pour exprimer une synthèse des informations. Plusieurs tentatives de corrélation des données

montrent qu'il n'existe pas de relation entre la pente moyenne et la taille du versant, ni entre la pente moyenne et la distance du système. En revanche, on observe une certaine proportionnalité entre la pente et l'amplitude du versant interne, preuve de l'importance prépondérante de l'amplitude dans la morphologie de la barre intertidale (Figure III.31).

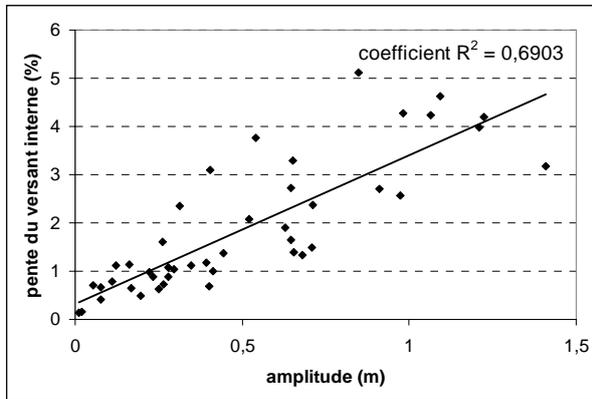


Figure III.31 : Corrélation linéaire entre l'amplitude et la pente moyenne du versant interne des barres intertidales.

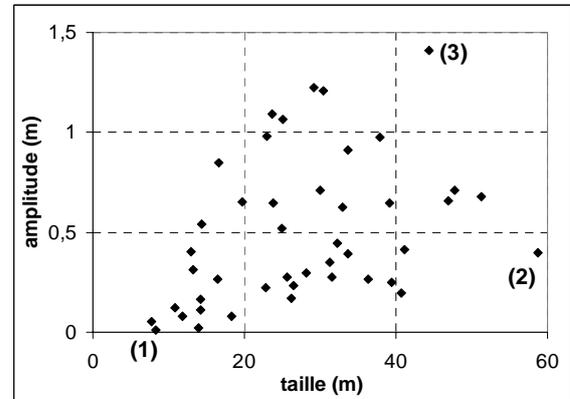


Figure III.32 : Représentation de l'amplitude du versant interne des barres intertidales, en fonction de leur taille. Mise en évidence de 3 formes distinctes de systèmes.

Le graphique représentant la taille du versant en fonction de son amplitude ne montre pas de corrélation (Figure III.32), mais il permet de distinguer 3 pôles illustrés par la figure III.33 :

- 1) un versant de petite taille et de faible amplitude,
- 2) un versant de grande taille et d'amplitude moyenne,
- 3) un versant de grande taille et de forte amplitude.

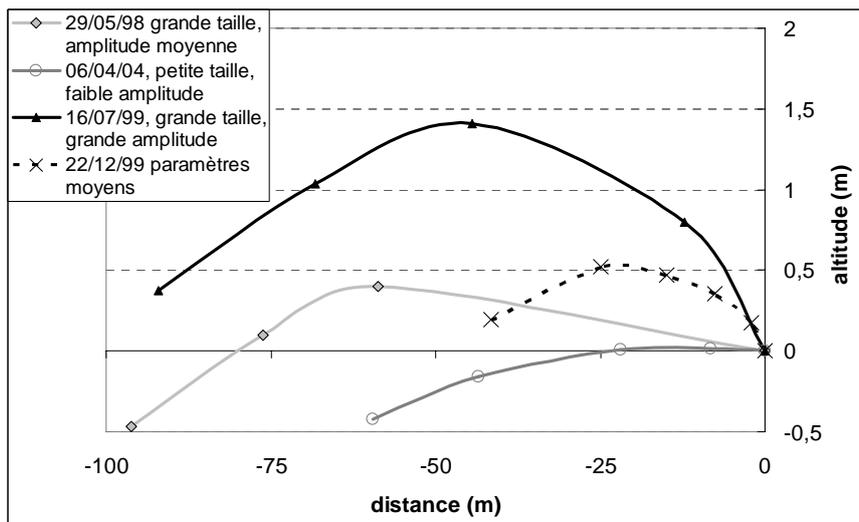


Figure III.33 : Exemples illustrant 4 types de morphologies pour le versant interne des barres intertidales. L'origine du graphique correspond au fond des baines. Après le sommet de la barre (maximum local d'altitude), le début des versants externes est représenté.

2.2. Classification des barres sableuses du bas de plage intertidale

L'étude du versant interne des barres intertidales a permis de distinguer plusieurs paramètres pertinents pour différencier les morphologies : l'amplitude, la taille et la position du sommet de barre. L'utilisation de la méthode statistique de classification ascendante hiérarchique (CAH) est un moyen efficace pour rapprocher les systèmes se ressemblant et créer une typologie. La classification est mise en place à partir de données centrées et réduites ; la méthode de Ward est utilisée pour le rapprochement des individus en classes, grâce à la comparaison de distances Euclidiennes. Les résultats sont exposés sous forme d'un arbre (dendrogramme) qui associe les individus proches (Figure III.34).

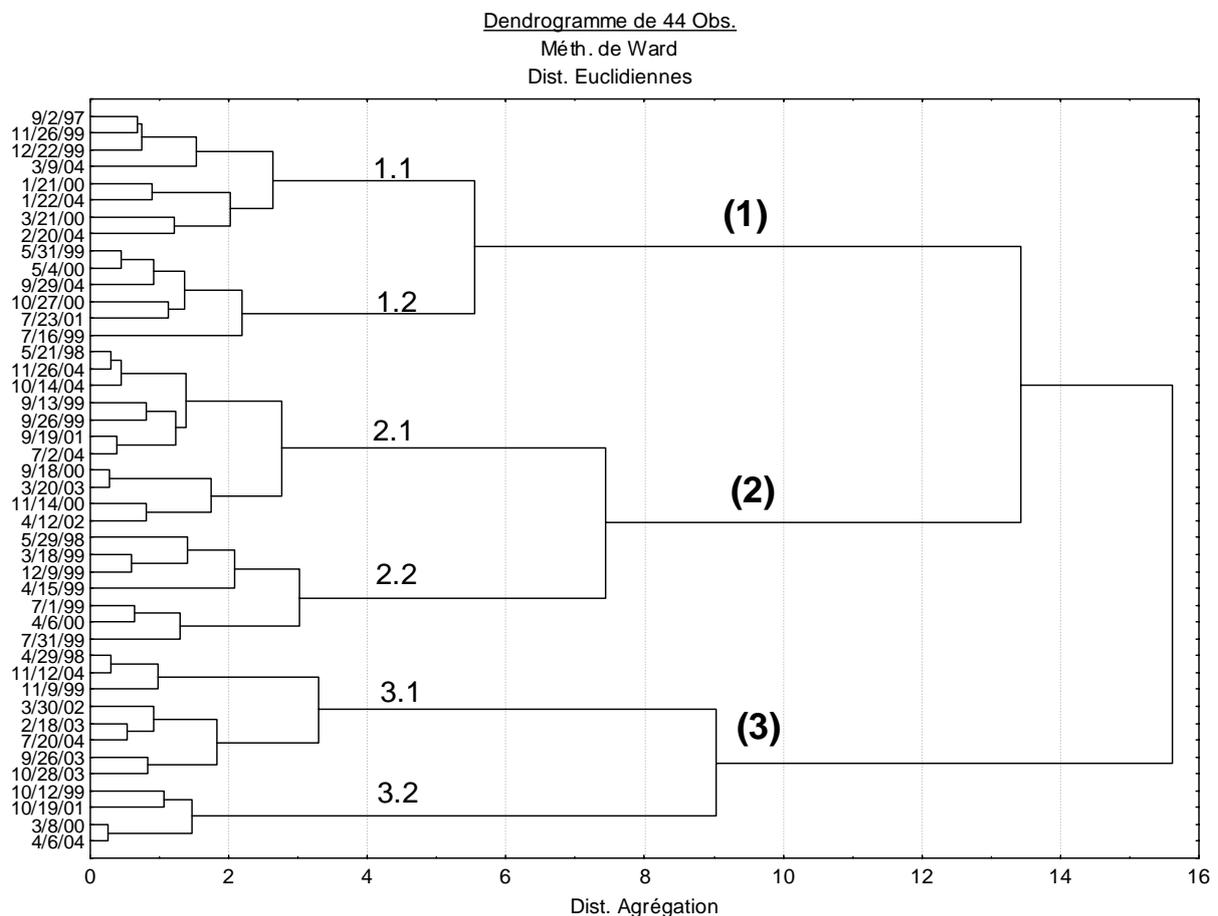


Figure III.34 : Résultats de la classification ascendante hiérarchique des structures du bas de plage intertidale, mesurées aux dates indiquées en ordonnée. Dendrogramme qui montre le rapprochement des morphologies de mêmes caractéristiques (taille et amplitude du versant interne, distance du sommet de la barre). 3 classes et 6 sous-classes ont été dégagées.

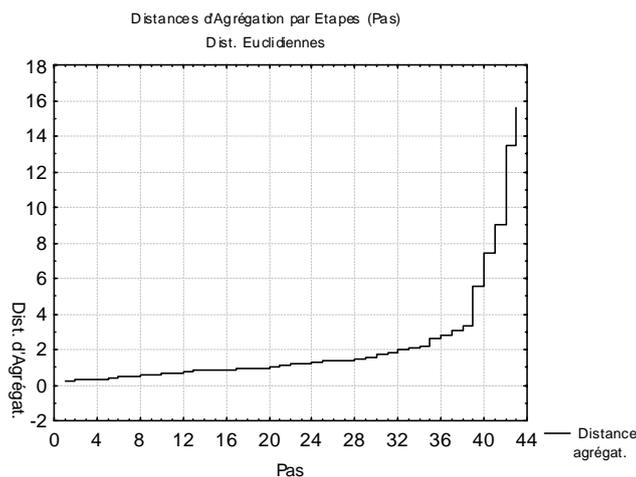


Figure III.35 : Représentation des distances d'agrégation entre les structures. Chaque pas du calcul a pour objectif d'agréger aux classes préexistantes une mesure aux caractéristiques proches. Au départ de la classification, chaque mesure représente une classe isolée, à la fin du calcul, les individus sont rapprochés en une classe unique.

Pour obtenir des associations de morphologies synthétiques et exploitables, il faut analyser des distances d'agrégation des classes obtenues. La figure III.35 qui présente ces distances au fur et à mesure de l'agrégation des individus montre une relative stabilité avant 4, une légère augmentation avant 10 et une forte croissance après 10. Concrètement, les classes les plus intéressantes seront obtenues pour des distances d'agrégation situées entre 4 et 10. Ainsi, on observe 3 classes subdivisées chacune en 2 sous-classes sur le dendrogramme des résultats (Figure III.34). Les 3 classes principales se distinguent par des différences importantes entre les paramètres de taille du versant et d'amplitude (Tableau III.7). Ces 2 critères sont primordiaux dans la description des systèmes. On distingue donc une première classe de versants de grande amplitude (32 % des cas, exemple du 16/07/99), une deuxième classe de grande taille (41 %, exemple du 29/05/98) et une troisième de structures plus petite et de faibles amplitudes (27 % des cas, exemple du 06/04/04). La différence entre ces 3 classes principales est parfaitement illustrée par la figure III.33 décrite précédemment.

	CLASSES	générale	1	2	3
	fréquence (%)	100	31,8	40,9	27,3
distance (m)	moyenne	-336,51	-350,98	-326,90	-334,06
	e-t	33,47	25,22	26,05	46,42
taille (m)	moyenne	27,53	26,91	37,00	14,04
	e-t	12,29	8,12	9,61	4,96
amplitude (m)	moyenne	0,50	0,91	0,40	0,15
	e-t	0,36	0,27	0,18	0,12

Tableau III.7 : Caractéristiques moyennes et écart-types (e-t) des 3 classes principales de barres sableuses intertidales, observées par topographie.

	CLASSES	1,1	1,2	2,1	2,2	3,1	3,2
	fréquence (%)	18,2	13,6	25,0	15,9	18,2	9,1
distance (m)	moyenne	-364,43	-333,04	-315,92	-344,15	-361,39	-279,40
	e-t	23,84	13,50	19,07	25,32	26,47	17,09
taille (m)	moyenne	23,53	31,40	31,63	45,43	15,67	10,80
	e-t	6,50	8,35	5,70	7,85	5,01	3,24
amplitude (m)	moyenne	0,74	1,15	0,29	0,59	0,18	0,10
	e-t	0,19	0,17	0,08	0,12	0,11	0,14

Tableau III.8 : Caractéristiques moyennes et écart-types (e-t) des 6 classes de barres sableuses intertidales établies par CAH.

L'étude des sous-classes établies par CAH est indispensable pour décrire encore plus précisément les morphologies observées sur le bas de la plage intertidale du Truc Vert (Tableau III.8 et Figure III.36).

- La classe 1.1 représente 18 % des systèmes.

Elle est caractérisée par un sommet éloigné (-364 m en moyenne), une taille moyenne à faible (23,5 m) et surtout une grande amplitude (0,7 m).

- La classe 1.2 est observée dans 14 % des cas.

Le sommet se trouve à une distance moyenne (-333 m), la taille du versant est moyenne à grande (31,5 m) et l'amplitude est très importante (1,2 m).

- La classe 2.1 est obtenue pour 25 % des mesures.

Elle est caractérisée par un sommet plutôt proche (-315 m), une taille moyenne à grande (31,5 m) et une amplitude plutôt faible (0,3 m).

- La classe 2.2 correspond à 16 % des cas observés.

Elle est surtout marquée par une très grande taille (45,5 m). La position du sommet et son amplitude sont aussi plus importantes que la moyenne (-344 m et 0,6 m).

- La classe 3.1 (18 % des cas) représente les barres intertidales de tailles et d'amplitudes faibles (15,6 m et 0,18 m), situées relativement loin sur la plage (-361 m).
- La classe 3.2 (9 % des mesures) est caractérisée par des systèmes encore plus petits (taille de 10,8 m et amplitude de 0,1m), situés à faible distance sur la plage intertidale (-279 m).

La méthode statistique de classification (CAH) est un moyen très intéressant pour regrouper les barres sableuses intertidales ressemblantes. Cette association est effectuée grâce à trois paramètres (distance du sommet, taille et amplitude) qui décrivent précisément les caractéristiques du versant interne des barres sableuses du bas de plage intertidale. Six

catégories nettement différenciées ont été décrites. Elles illustrent la grande variabilité des barres sableuses observées par les techniques de topographie sur la plage du Truc Vert.

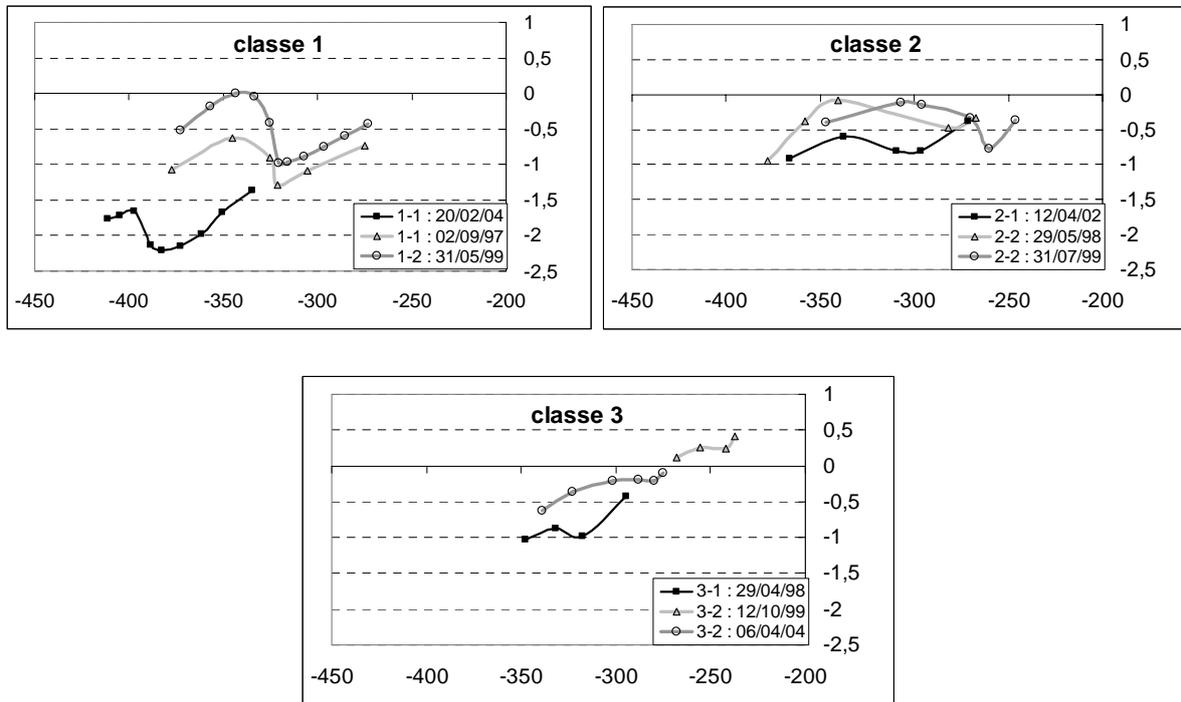


Figure III.36 : Exemples des 3 classes et 6 sous-classes de barres sableuses intertidales.

Classe 1 : grande amplitude ; 1.1 : grande amplitude, 1.2 : très grande amplitude.

Classe 2 : grande taille ; 2.1 : assez grande taille et faible amplitude, 2.2 : très grande taille.

Classe 3 : petites barres ; 3.1 : sommet éloigné, 3.2 : sommet proche.

Abscisses : distance Est (m), ordonnée : altitude NGF (m).

2.3. Description précise des formes du système barre et baine

Une description encore plus précise des systèmes de barres et baines est possible en observant très attentivement les profils topographiques et les courbes de différence de pente. Des caractéristiques morphologiques particulières peuvent être repérées avant le fond de la baine, entre le fond de la baine et le sommet de la barre, puis après le sommet de barre à la limite de la plage intertidale (Figure III.37).

- Avant le fond de baine

Entre le haut de plage et le fond de la baine, la plage peut avoir une forme concave, caractérisée par une courbe de différence de pente négative (exemple du 09/03/04, Figure III.37.b). Dans le cas de forme convexe (75 % des mesures), l'existence d'un pic de différence de pente représente la crête d'une ondulation qui renforce l'aspect encaissé de la baine (cas du 21/01/00 et du 20/07/04 Figure III.37 a et c).

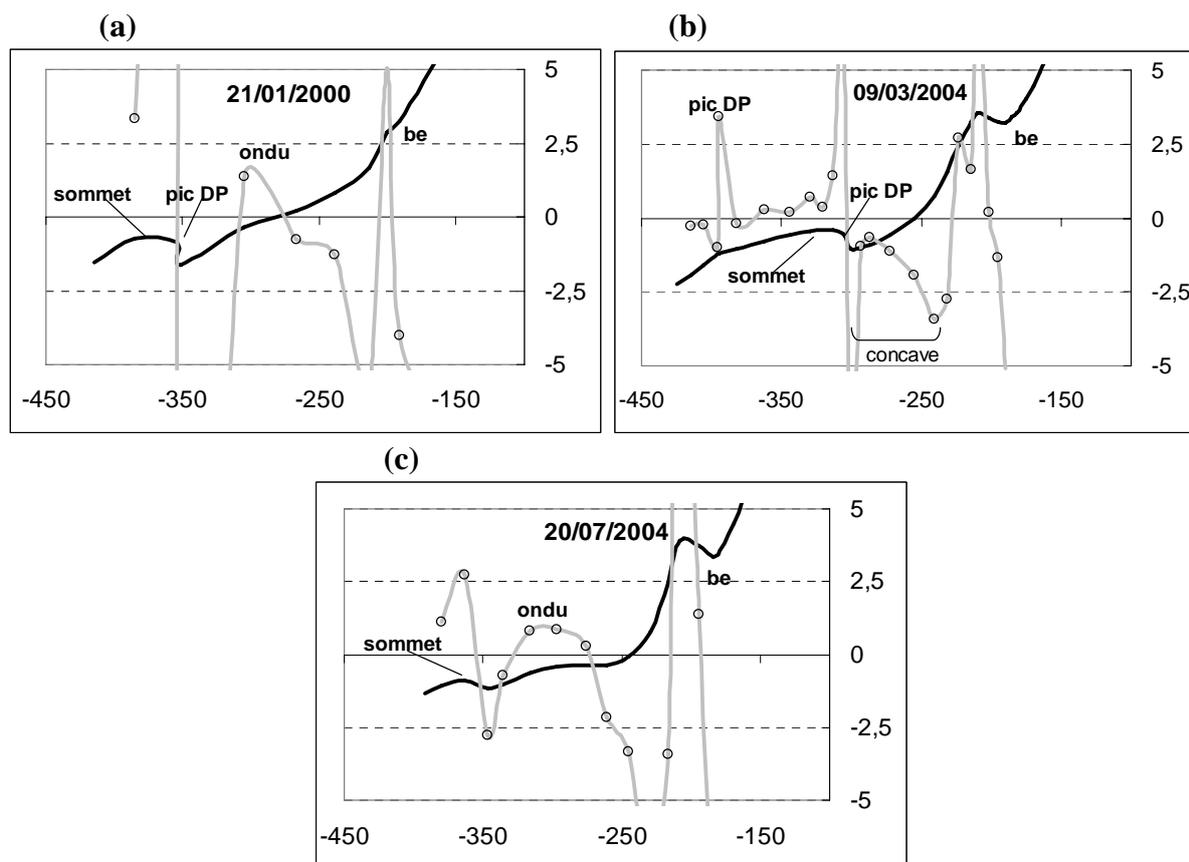


Figure III.37 : Prise en compte de la morphologie globale du bas de plage intertidale pour décrire la forme du système barre-bâine, à partir du profil topographique (trait noir) et de la courbe de différence de pente (trait gris clair et ronds). Après la berme (be), on peut trouver une morphologie concave ou une ondulation (ondu). Le sommet de barre peut être précédé ou non d'un pic de différence de pente (pic DP). Le flanc externe de la barre peut lui aussi être marqué par la présence d'un pic de différence de pente. Les abscisses représentent la distance vers l'Est (m) ; les ordonnées, l'altitude (m) et la différence de pente en %.

- Après la bâine et avant la crête

Le pic de différence de pente peut être localisé sur le sommet de la barre. Dans ce cas, la barre sableuse intertidale a une forme arrondie et plutôt régulière (62 % des cas, exemple du 20/07/04, Figure III.37.c). En revanche, si le pic de différence de pente est situé entre le sommet de barre et le fond de la bâine, le versant interne de la structure prend une forme en aile d'avion (exemples du 21/01/00 et du 09/03/04, Figure III.37 a et b). Cette forme n'est pas décrite par les paramètres précédemment étudiés, elle est cependant très importante pour les processus qui agissent sur la zone. Ainsi, des observations de terrain nous ont montré qu'au moment de la montée des eaux et du remplissage de la bâine par les vagues déferlantes, une vague stationnaire particulièrement puissante pouvait être créée à cet endroit précis. Cette configuration pourrait être un signe de mises en suspension, de transport sédimentaire et de

modifications morphologiques très rapides de la barre, à un moment précis de la marée. Cette hypothèse reste cependant à vérifier.

- A la limite inférieure de la plage intertidale

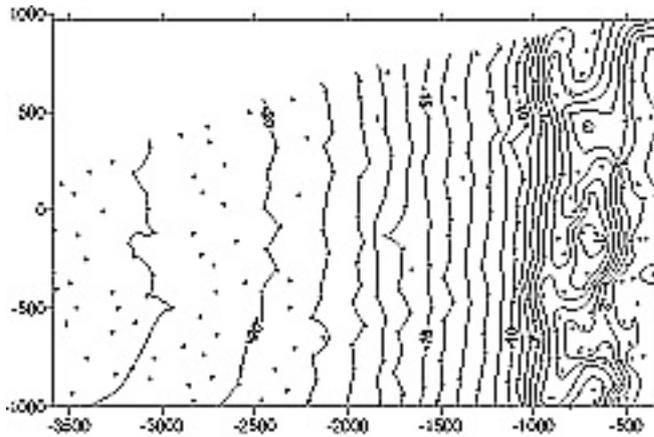
Quelques cas rares de levés topographiques particulièrement complets permettent de détecter un pic de différence de pente très bas sur la plage intertidale, au niveau du versant externe de la barre sableuse (cas du 09/03/04, Figure III.37.b). La formation d'une ondulation à ce niveau peut être interprétée comme une résultante de l'action du déferlement et du jet de rive à marée basse, bien que cette hypothèse ne soit pas démontrée. De la même façon, il n'est pas prouvé que cette rupture de pente ait une importance dans la morphologie générale du système. Cependant, sa position en bas de plage intertidale pourrait représenter une limite claire avec la plage sous-marine.

C) Etude de la plage sous-marine

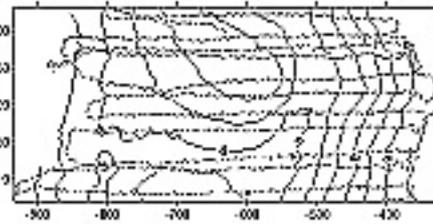
La plage sous-marine correspond à la zone côtière qui reste sous l'eau en permanence. La limite inférieure de ce domaine marque la frontière du système littoral. La limite théorique supérieure se situe pour sa part au niveau du zéro hydrographique. Mais la position des plus basses mers est encore mal connue sur la zone du Truc Vert, car la marée n'a pas encore été observée de façon suffisante (voir partie I.C.3.3). Dans le cadre de cette étude, la frontière supérieure de la zone sous-marine est avant tout méthodologique. Elle est définie par un changement de technique de mesure : la topographie n'est plus utilisable, les observations sont donc effectuées par bathymétrie. Cette limite entre plage intertidale et plage sous-marine est très importante pour la collecte des données d'observation, car elle sépare une zone relativement accessible lors des basses mers de vives-eaux, d'un domaine où la mesure morphologique est particulièrement complexe. En effet, les techniques classiques de bathymétrie embarquées sont difficiles à mettre en œuvre sur la côte Aquitaine car les houles déferlantes rendent la navigation souvent dangereuse. Malgré ces difficultés, un nombre suffisant de mesures est disponible pour l'étude des barres sableuses. La base de données analysée est composée d'une carte ancienne (SHOM 1967), de 3 bathymétries monofaisceau (PNOC 98, PHES 99 et PNEC 99) et d'une bathymétrie multifaisceaux (ITSAS 6, 2002). La collecte et la mise en forme de ces informations ont été décrites précédemment (voir chapitre II.B).

La figure III.38 présente les cartes bathymétriques établies dans le repère du Truc Vert, selon la projection Lambert 3. Parallèlement à la côte, les cartes du SHOM 67, PHES 99 et ITSAS 2002 permettent d'observer une zone de 2000 m longshore, de part et d'autre de l'origine du repère. Les missions PNOC 98 et PNEC 99 n'ont pas permis de mesurer une surface aussi grande (respectivement 300 et 800 m longshore). Perpendiculairement à la côte, ces deux cartes caractérisent une zone située entre 400 et 1000 m à l'est du point de référence du repère. Les autres levés bathymétriques représentent des surfaces plus importantes vers le large de la plage. La carte SHOM est comprise entre -400 et -3500 m, ITSAS 6 (2002) entre -1000 et -2500 m, tandis que la mission PHES 99 a permis d'observer les limites de la plage et du plateau continental, à plus de 5000 m de l'origine du repère, situé en sommet de dune.

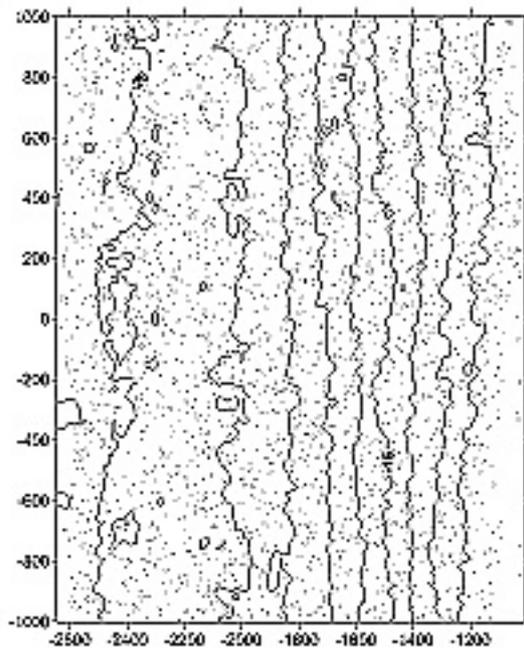
SHOM 1967



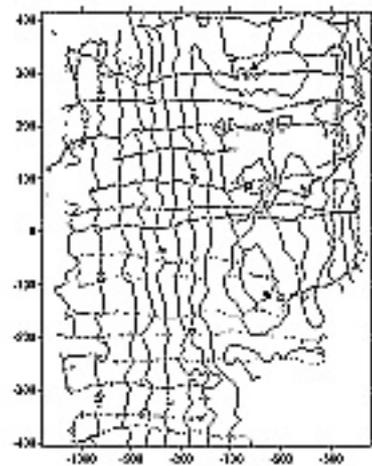
PNOC 1998



ITSAS 6 SMF 2002



PNEC 1999



PHES 1999

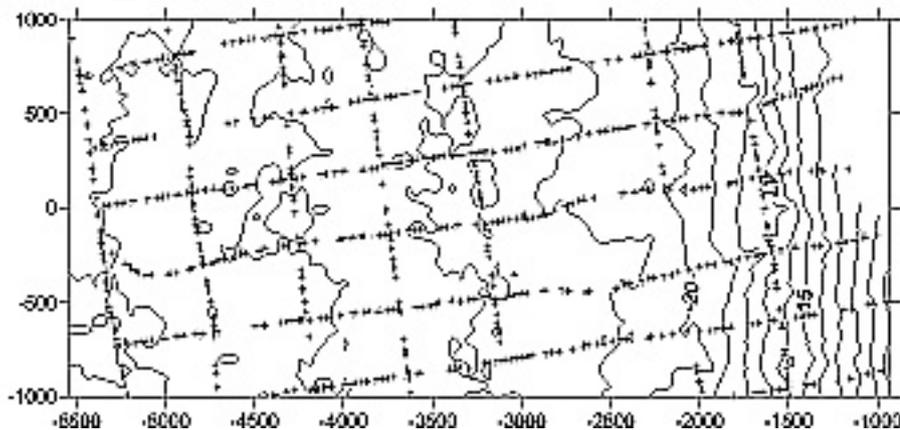


Figure III.38 : Cartes bathymétriques de la plage sous-marines du Truc Vert. Le système utilisé est basé sur la projection Lambert 3, les données sont centrées sur le repère local du Truc Vert, après une rotation de 10° correspondant à la direction du littoral. Les points de mesures sont représentés (croix ou points) ; pour les mesures au sondeur multifaisceaux de ITSAS 6, 10% des mesures sont reportées sur la carte.

La figure III.38 donne également une idée du mode d'échantillonnage des mesures. La carte SHOM présente une répartition de points régulière, mais clairsemée. Les bathymétries PNOC 98, PNEC et PHES 99 sont caractéristiques de levés en profils par sondeur monofaisceau. Les radiales de PHES 99 sont très peu resserrées pour la zone d'étude. En revanche, le levé par sondeur multifaisceaux (ITSAS 6, 2002) est caractérisé par une densité de points sans commune mesure avec les autres données.

Dans un premier temps, l'analyse va consister à décrire la forme simplifiée de la plage à partir d'un profil cross-shore unique situé au centre de la zone de mesure (profil maître, $Y=0$). Puis, l'ensemble des cartes sera observé afin de dégager les caractéristiques tridimensionnelles de l'environnement.

1) Analyse cross-shore

L'analyse de profils bathymétriques simplifie considérablement la description du domaine sous-marin. Un certain nombre d'informations importantes peuvent être déduites de cette façon. Les profils sont extraits des cartes et plus précisément des MNT définis à l'aide du logiciel SURFER (Figure III.39). Le travail d'analyse a pour but de décrire et de comparer les coupes effectuées sur le profil maître ($Y = 0$) de la plage sous-marine du Truc Vert. Le profil SHOM 1967 est une mesure très complète, qui débute au niveau du 0 marin jusqu'aux profondeurs supérieures à 20 m. Les bathymétries PNOC 98 et PNEC 99 sont comprises entre 0 et -8 à -10 m environ, en haut de plage sous-marine. Les radiales ITSAS 6 et PHES 99 correspondent à des observations situées entre -10 et -20 à -25 m, en bas de plage sous-marine. La campagne PHES 99 a même permis d'atteindre -25 m, à plus de 5000 m du point de référence de la zone du Truc Vert, sur le plateau continental. Les profils SHOM 67, PNOC 98 et PNEC 99 montrent clairement l'existence d'un système de barre sableuse et de fosse, en haut de plage sous-marine. Autour de cette structure, trois parties distinctes peuvent être observées :

- Du zéro marin au fond de la fosse, se trouve une zone de transition entre la plage intertidale et la plage sous-marine
- La barre sableuse se développe ensuite ; son sommet se situe entre -700 et -800 m environ.
- Plus bas, les coupes SHOM 67, PHES 99 et ITSAS 6 montrent l'amortissement de la pente générale du bas de la plage sous-marine, entre -10 et -20 m.

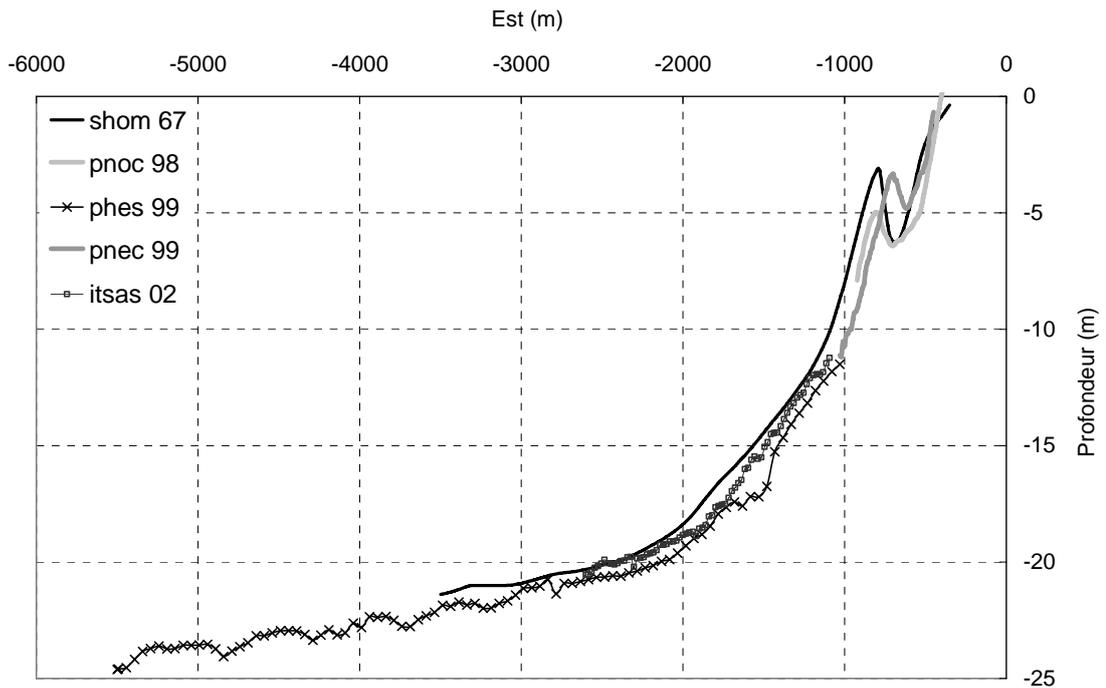


Figure III.39 : Profils maîtres de la plage sous-marine du Truc Vert. Il s'agit de coupes bathymétriques perpendiculaires à la côte, l'origine est le point de référence du repère local.

L'observation détaillée des profils permet ensuite de préciser les coordonnées des points caractéristiques de l'environnement. Ces points correspondent :

- a) Aux ruptures de pentes, obtenues en observant les courbes de variation de pente, à partir de données plus ou moins filtrées (Figure III.40).
- b) Aux sommets des barres et aux fonds des fosses, déterminés par l'extraction de minimum et maximum locaux.

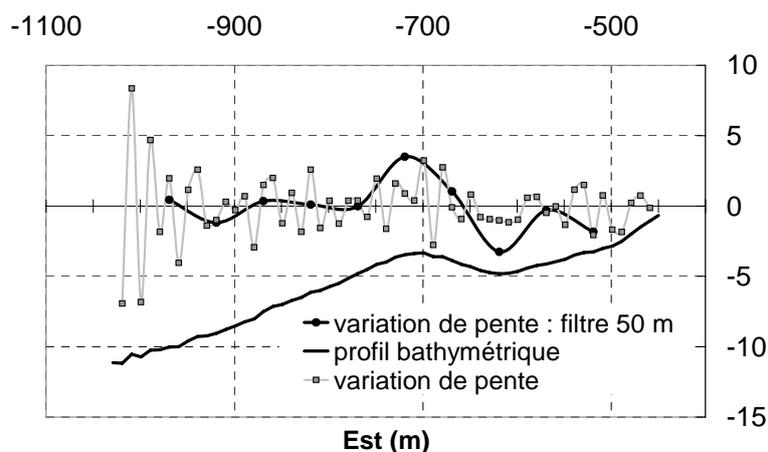
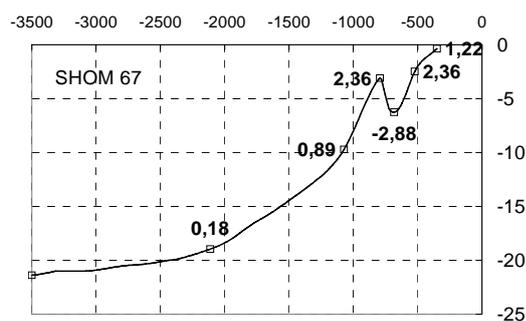
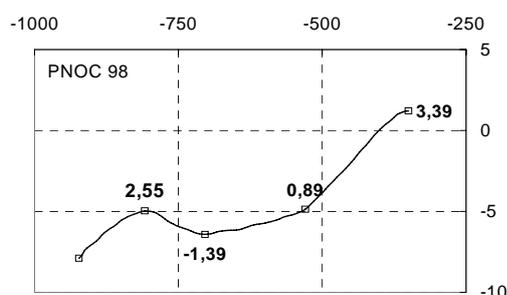


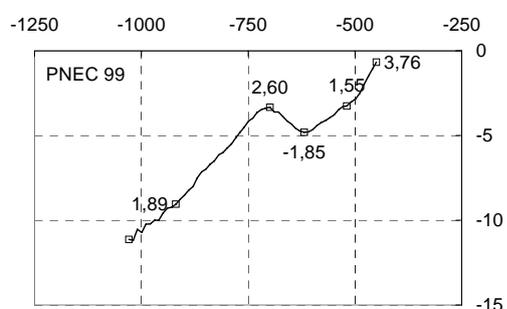
Figure III.40 : Etude du profil bathymétrique PNEC 99. La courbe de variation de pente est aussi nommé paramètre de différence de pente. C'est l'équivalent de la dérivée seconde d'une fonction continue, elle permet de repérer les ruptures de pente. Le filtre de 50 m utilise 1 point sur 5 pour le calcul de la pente et simplifie l'observation des points caractéristiques.



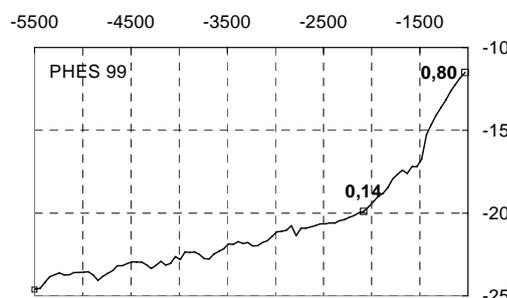
shom 67	distance	profondeur	pente
début	-350	-0,36	1,22
rupture 1	-523	-2,48	2,36
fosse	-683	-6,25	-2,88
barre	-793	-3,09	2,36
rupture pied barre	-1073	-9,70	0,89
rupture 2	-2112	-18,96	0,18
fin	-3500	-21,39	



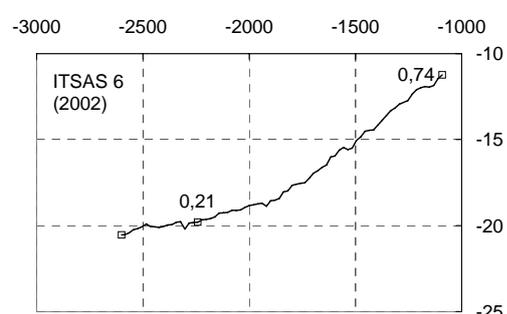
pnoc 98	distance	profondeur	pente
début	-350	1,20	3,39
rupture 1	-529	-4,87	0,89
fosse	-704	-6,43	-1,39
barre	-808	-4,97	2,55
fin	-923	-7,89	



pnec 99	distance	profondeur	pente
début	-450	-0,67	3,76
rupture 1	-519	-3,26	1,55
fosse	-619	-4,81	-1,85
barre	-699	-3,33	2,60
rupture pied barre	-919	-9,05	1,89
bathy	-1029	-11,13	



phes 99	distance	profondeur	pente
début	-1030	-11,51	0,80
rupture 2	-2083	-19,89	0,14
fin	-5500	-24,62	



itsas 02	distance	profondeur	pente
début	-1092	-11,23	0,74
rupture 2	-2242	-19,80	0,21
fin	-2600	-20,54	

Figure III.41 : Profils maître de la plage sous-marine du Truc Vert. Les points caractéristiques sont indiqués par de petits carrés, leur position est détaillée dans les tableaux adjacents. Les valeurs de pente sont indiquées dans les tableaux et sur les graphiques.

Note : Pour des raisons d'échelles de mesures différentes, les profils maîtres ne peuvent pas être comparés directement, c'est pourquoi les points caractéristiques sont établis

Les 3 paragraphes suivants (zone de transition et fosse pré-littorale, barre sous-marine et plage sous-marine inférieure) s'appliquent à décrire la Figure III.41.

- **Zone de transition et fosse pré-littorale**

La zone de transition est représentée sur les profils SHOM 67, PNOC 98 et PNEC 99. Le premier point de chacune de ces bathymétries est très variable entre les missions et la position du zéro marin n'est mesurée que sur la coupe PNOC 98. Il est donc difficile d'observer précisément la limite théorique entre les domaines intertidaux et sous-marins, autour du zéro marin. Certaines caractéristiques morphologiques de cette zone de transition peuvent néanmoins être décrites. Ainsi, les données PNOC 98 et PNEC 99 montrent une forme similaire : la pente est d'abord forte (autour de 3,5%) puis diminue après une première rupture située après -500 m. Une pente inférieure à 2% rejoint ensuite le fond de la fosse. Dans le cas du profil SHOM 67, la pente est faible en début (1,22 %), puis augmente de plus d'1 % après une rupture située à -520 m.

Le fond de la fosse se situe autour -700 m pour PNOC 98 et SHOM 67. Il est plus près du domaine intertidal (-620 m) pour PNEC 99. De la même façon, la profondeur est moins importante (-4,8 m) pour les données PNEC, tandis qu'elle dépasse 6m pour les 2 autres missions.

- **Barre sous-marine**

Le sommet de la barre est localisé à -800 m pour PNOC 98 et SHOM 67. Dans le cas du profil PNEC 99, comme pour la localisation de la fosse, ce point caractéristique se trouve 100 m plus à l'est. En revanche, la profondeur de la barre est comparable entre PNEC 99 et SHOM 67, autour de -3m. La coupe PNOC 98 montre un sommet de barre plus profond (-5 m environ). En conséquent, la pente qui relie la fosse et le sommet de la barre, orientée vers la côte, est variable entre les bathymétries : de -2,9 % pour SHOM 67 à -1,4 % pour PNOC 98.

Au large, la limite morphologique de ce système de barre sableuse semble plus complexe à déterminer. Des ruptures assez peu marquées ont cependant été observées sur les profils SHOM 67 et PNEC 99, respectivement à -1080 m (-9,70m de profondeur) et -920 m (-9,05 m de profondeur, Figure III.40). On peut faire l'hypothèse que cette limite morphologique marque la transition entre un environnement de plage sous-marine supérieure, caractérisée par la présence d'une barre sableuse, et la plage sous-marine inférieure. La pente qui relie le

sommet de barre à cette limite (ou à la limite de la bathymétrie pour PNOC 98) est forte, autour de 2,5 % et homogène entre les 3 profils étudiés.

- **Plage sous-marine inférieure**

Les profils SHOM 67, PHES 99 et ITSAS 6 fournissent des indications sur la forme de la plage sous-marine inférieure. Cette zone constitue la frontière entre le prisme littoral de la plage et le plateau continental. Elle débute approximativement à -10m, et plonge avec une pente de 0,8 % environ jusqu'à 20 m de profondeur environ. L'inclinaison de la plage sous-marine inférieure est homogène entre les 3 profils (de 0,89 % pour SHOM 67 à 0,74 % pour ITSAS 6). Une rupture de pente est localisée entre -18,96 m et -19,89 m et marque le passage vers le plateau continental, caractérisé par une déclivité faible comprise entre 0,14 et 0,21 %. Sur le profil PHES 99, une rupture de pente très nette est également observable entre -16,5 et -17,5 m. L'étude approfondie des données montre que cette brusque variation de topographie est un artefact des méthodes de traitement. En effet, les profils de PHES 99 ne sont pas suffisamment resserrés et le profil extrait du MNT montre ici une erreur d'interpolation du logiciel Surfer.

2) Analyse tridimensionnelle de la plage sous-marine

Cette partie a pour objectif de décrire précisément la morphologie tridimensionnelle de la plage, à partir des MNT, des cartes bathymétriques et des profils de la base de données. L'analyse cross-shore a déterminé 3 secteurs distincts qui seront détaillés successivement : la zone de transition, le système de barre et fosse pré-littorale et enfin la plage sous-marine inférieure.

2.1. Zone de transition

Dans un premier temps, les caractéristiques de la zone de transition entre le domaine intertidal et sous-marin seront étudiées. Ce domaine est très mal connu et les mesures y sont excessivement rares. La bathymétrie SHOM 67 par exemple ne présente pas une densité de point suffisante pour permettre une description correcte de cette zone. De plus, l'observation est largement dépendante de l'état de la mer et du niveau de la marée. En bathymétrie, seule de très faibles houles permettent la mesure à marée haute sur cette zone. En topographie, il est

possible d'atteindre le haut de ce domaine lors de condition de mer calme, de fort vent d'Est et de marée basse de vives-eaux. Dans les faits, l'observation complète de cet environnement nécessite de relier les mesures bathymétriques à des observations topographiques. Cette obligation pose un problème de référentiel sur une plage où l'altitude NGF du zéro hydrographique n'est pas connue très précisément. Malgré les difficultés de mesures liées au déferlement, des tests ont cependant été menés lors des missions PNOC 98 et PNEC 99. La répartition des mesures montre que les données de PNEC 99 ne sont pas exploitables pour décrire la zone de transition. Il manque des informations sur environ 200 m, entre -300 -500m à l'Est du point de référence (Figure III.42). En revanche, la mission PNOC 98 a permis une cartographie presque complète d'une zone de 200 m parallèlement à la côte (Figure III.43).

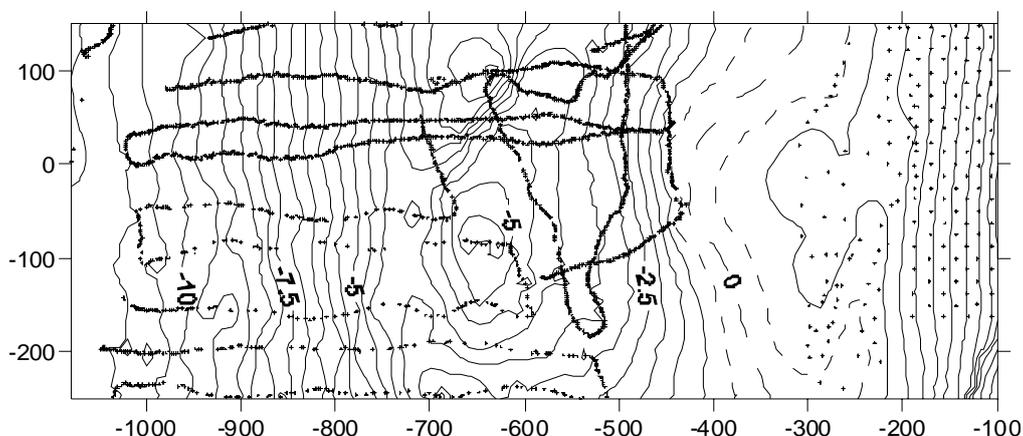


Figure III.42 : Carte topographique et bathymétrique de la plage du Truc Vert établie lors de la mission PNEC 99, les 9 et 10 avril 1999. Le 0 hydrographique estimé représente l'origine des altitudes. Les pointillés correspondent aux lignes de niveau interpolées entre les zones de mesures. Abscisse = Est (m) ; Ordonnée = Nord (m).

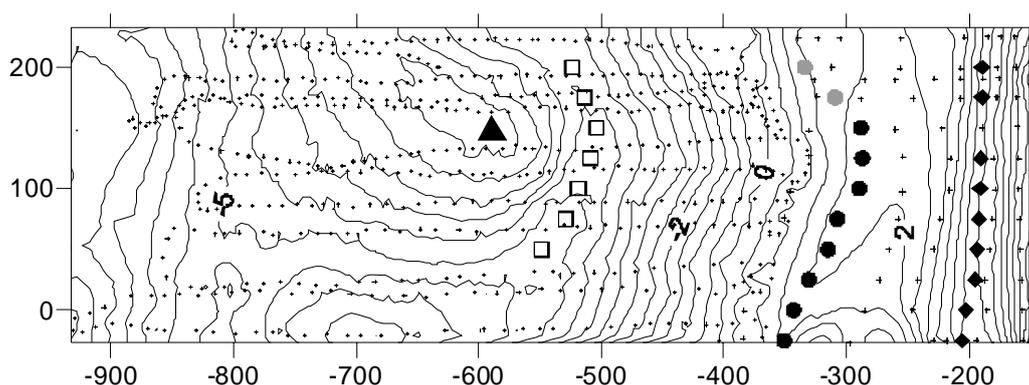


Figure III.43 : Carte topographique et bathymétrique de la plage du Truc Vert établie lors de la mission PNOC 98, les 22 et 23 mai 1998. Analyse pseudo-3D à partir de profils cross-shore : les losanges représentent la crête de berme ; les ronds noirs et gris, la crête de barre intertidale ; les carrés, le fond du sillon (fosse) pré-littoral ; le triangle noir, le sommet de la barre sous-marine. Abscisse = Est (m) ; Ordonnée = Nord (m).

Note : Les mesures PNOC 98 et PNEC 99 n'ont pas été effectuées à la même échelle spatiale, les figures III.42 et III.43 ne peuvent donc pas être comparées directement.

a) Analyse de la carte PNOC 98

- analyse pseudo-3D et 3D de la zone de transition PNOC 98

L'analyse en pseudo-3D, par une série de profils cross-shore espacés de 25 m, est une méthode efficace pour positionner les structures sédimentaires du domaine littoral. Du haut de plage jusqu'en limite de mesure, la carte PNOC 98 montre la présence d'une berme, d'un système de barre et baie et d'un système de barre et fosse pré-littorale (Figure III.43). La zone de transition est située entre la crête de barre intertidale et le fond de la fosse. Sur les profils successifs de ce domaine, 2 formes apparaissent. Au nord du profil +50 m, la zone de transition est comprise entre -350 m et -550 m vers l'Est, elle présente une légère ondulation située autour de -400m, à proximité du 0 marin (Figure III.44.b). Au sud (profil 0 et 25), le domaine de transition est beaucoup plus élargi car la fosse se situe autour de -700 m dans l'Est. Une rupture nette marque la morphologie à l'abscisse -550m, comme il a été décrit sur le profil maître (§ III.C.1 et Figure III.44.a).

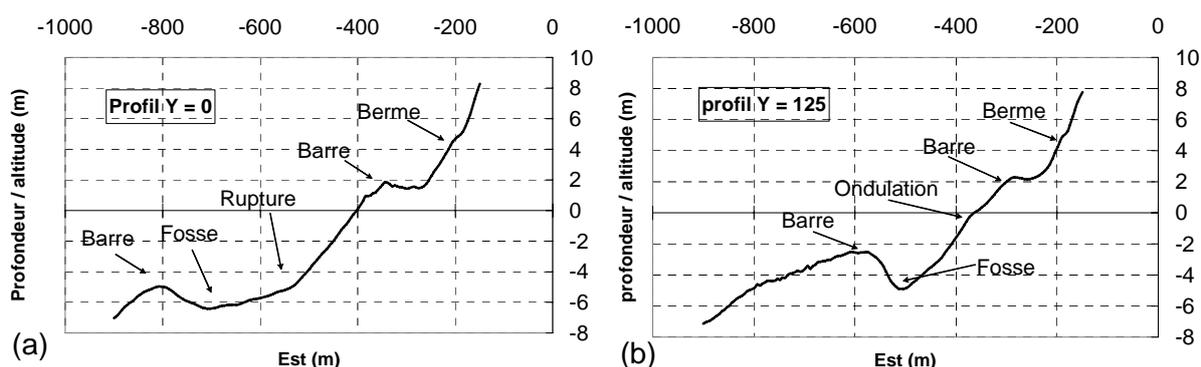


Figure III.44 : Analyse morphologique des profils topo-bathymétriques pour le profil central $Y = 0$ (a) et $Y = 125$ (b), carte PNOC 98. Profondeurs et altitudes sont exprimées par rapport au 0 hydrographique estimé.

La comparaison des formes de la zone de transition avec les systèmes adjacents donne des résultats intéressants (Figure III.43). Ainsi, les deux morphologies distinguées précédemment sont en relation directe avec l'allure de la fosse pré-littorale. Au nord (profil 75 à 200), la fosse forme un chenal étroit (sillon pré-littoral), tandis qu'au sud, la fosse est plus large, plus profonde et plus arrondie. Morphologiquement, la limite supérieure de la zone de transition se situe au niveau de la crête de barre intertidale. Celle-ci présente une orientation sud sud-ouest entre le profil -25 m et le profil 100 m, l'orientation est franchement sud entre 100 m et 150 m. Enfin au sud de la zone, la crête disparaît et le système bien marqué de barre et baie est remplacé par une ondulation d'orientation sud sud-est (par rapport au repère géographique

local). Ces variations de direction sont également valables pour la fosse pré-littorale, dont la direction semble reliée à la position du sommet de la barre sous-marine située sur le profil +150 m à l'abscisse -600 m, vers l'Ouest. Pour la zone de transition, les résultats du calcul 3D de la direction de plus grande pente sont tout à fait comparables avec ces observations sur profils. L'analyse du MNT PNOC 98 avec le logiciel SURFER permet d'établir une carte de direction de pente pour la zone de transition (Figure III.45). Au sud du sommet de la barre sous-marine, la pente est orientée entre le nord-ouest et l'ouest ; au nord, la pente est dirigée entre l'ouest et le sud-ouest. Ces observations sont la preuve d'une interaction forte entre les morphologies des différents domaines de la plage lors de la mission PNOC 98.

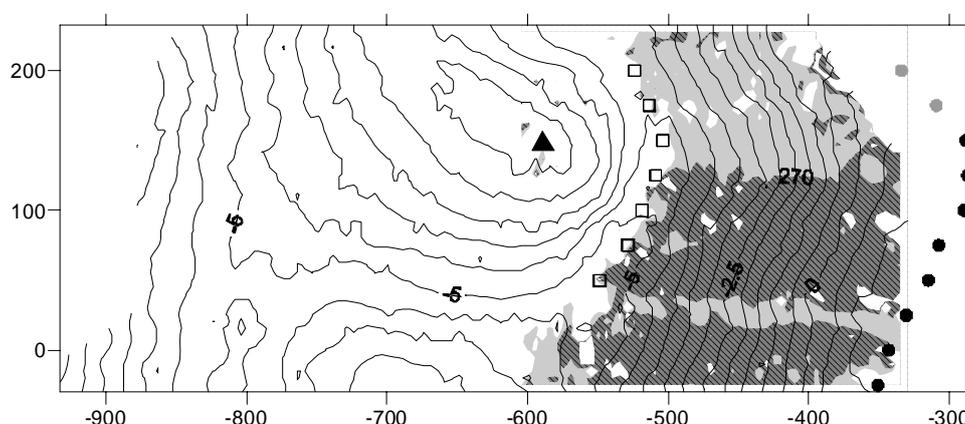


Figure III.45 : Direction de la pente sur la zone de transition, bathymétrie PNOC 98. En gris foncé, la direction est comprise entre 270° et 315° (W à NW) ; en gris clair, entre 225° et 270° (SW à W). Le triangle représente le sommet de la barre sous-marine ; les carrés, le fond du sillon pré-littoral ; les ronds, la crête de la barre intertidale. Abscisse = Est (m) ; Ordonnée = Nord (m).

- **calcul du volume des profils**

En plus des analyses 3D sur le MNT et pseudo-3D avec les profils, le calcul de volume est un moyen utile pour synthétiser la description de morphologies et leurs évolutions. Dans le cadre de l'étude de la carte PNOC 98 en profils cross-shore, la surface de chaque coupe de la zone de transition a été établie par la méthode des trapèzes. Cette surface est exprimée en m^3 / m linéaire de côte et représente donc le volume du profil uniquement. Les erreurs d'estimation de volume sont difficiles à déterminer car les méthodes de mesures sont multiples et les profils étudiés sont issus d'une interpolation. Les tests pratiqués évaluent une marge d'erreur allant de 2 % à 7 %. La figure III.46 illustre l'évolution du volume des coupes en fonction de leur ordonnée (Nord). Le stock sédimentaire de la zone de transition diminue régulièrement du sud au nord, en suivant l'amortissement de la fosse pré-littorale. Les zones où la fosse est

éloignée et profonde sont les plus volumineuses (1038 et 956 m³/m pour les profils 0 m et 25 m Nord). Une étude attentive de ces 2 profils montre que la rupture de pente observée à -550 m marque le début du sillon pré-littoral (Figure III.44.a). En utilisant cette nouvelle limite (au lieu du fond de la fosse) pour recalculer le volume des profils 0 m et 25 m, on constate alors que la zone de transition y est moins engraisée (entre 660 et 730 m³/m) que pour les profils au nord, situés entre 50 m et 150 m (entre 760 et 880 m³/m). Cette différence s'explique d'un côté par l'absence d'ondulation sur la pente comprise entre 0 et -5 m, contrairement aux profils Nord (Figure III.44.b) ; et d'un autre côté, par une barre intertidale nettement moins développée. Au nord du sommet de la barre sous-marine (entre 150 et 200 m), le volume de la zone de transition baisse également très nettement. Cette diminution est due à la fois à l'absence de barre intertidale marquée, mais aussi à la configuration de la fosse pré-littorale qui devient beaucoup moins profonde (-4,37 m sur le profil 200 m, contre -5,33 m à 75 m).

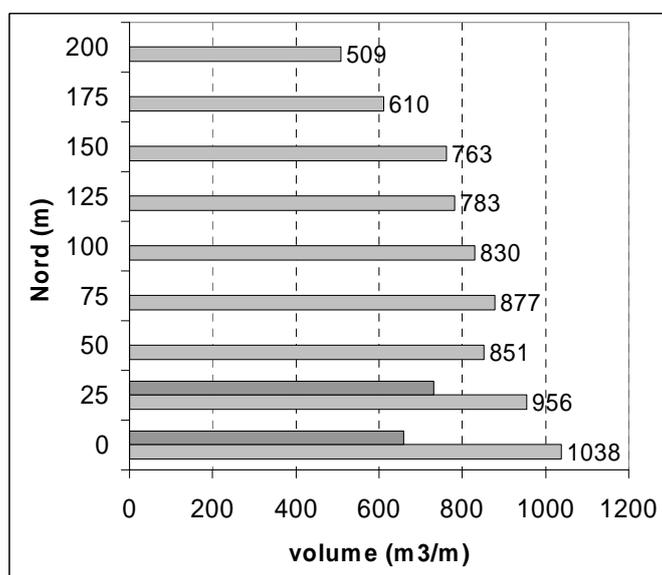


Figure III.46 : Volumes des profils de la carte PNOC 98 en m³/m linéaire de côte (longshore). La méthode employée pour le calcul est celle des trapèzes. La surface de base correspond à la profondeur du fond de la fosse sur le profil étudié. En gris sombre, calcul de volume pour les profils 0 m et 25 m limités à la première rupture de pente observée autour de -550m (Est).

La carte topo / bathymétrique PNOC 98 est une bonne illustration de la nécessité d'observer l'ensemble du système littoral pour pouvoir décrire et comprendre la morphologie des structures sédimentaires. Dans ce cas de figure, qui reste encore restreint en taille, la zone de transition entre les domaines intertidaux et sous-marins forme le flanc externe de la barre intertidale. Sa forme est clairement influencée par la disposition de la fosse pré-littorale, de la barre sous-marine associée et de la barre intertidale.

b) Barres sableuses de la zone de transition

- **mesures topographique et suivi de contours par GPS**

Le paragraphe précédent a montré la nécessité de coupler les méthodes de mesures pour observer correctement la morphologie tridimensionnelle de la zone de transition qui relie les plages intertidale et sous-marine. La carte PNOC 98 est le seul exemple complet de mesures topographiques et bathymétriques sur ce domaine mystérieux. Cependant, d'autres observations ont été effectuées sur cette zone, à l'aide de photographies aériennes ou satellites. Ainsi, Froidefond et al. (1990), De Melo (2003) et Castelle (2004) ont déjà décrit la présence en Aquitaine d'une barre sableuse dans la zone située entre la plage intertidale et la barre sableuse sous-marine. Des observations effectuées durant ce travail de thèse ont également montré l'existence possible d'une barre sableuse intermédiaire sur la plage du Truc Vert. Mais la description morphologique reste compliquée et hasardeuse, en l'absence de mesure topo-bathymétriques complète.

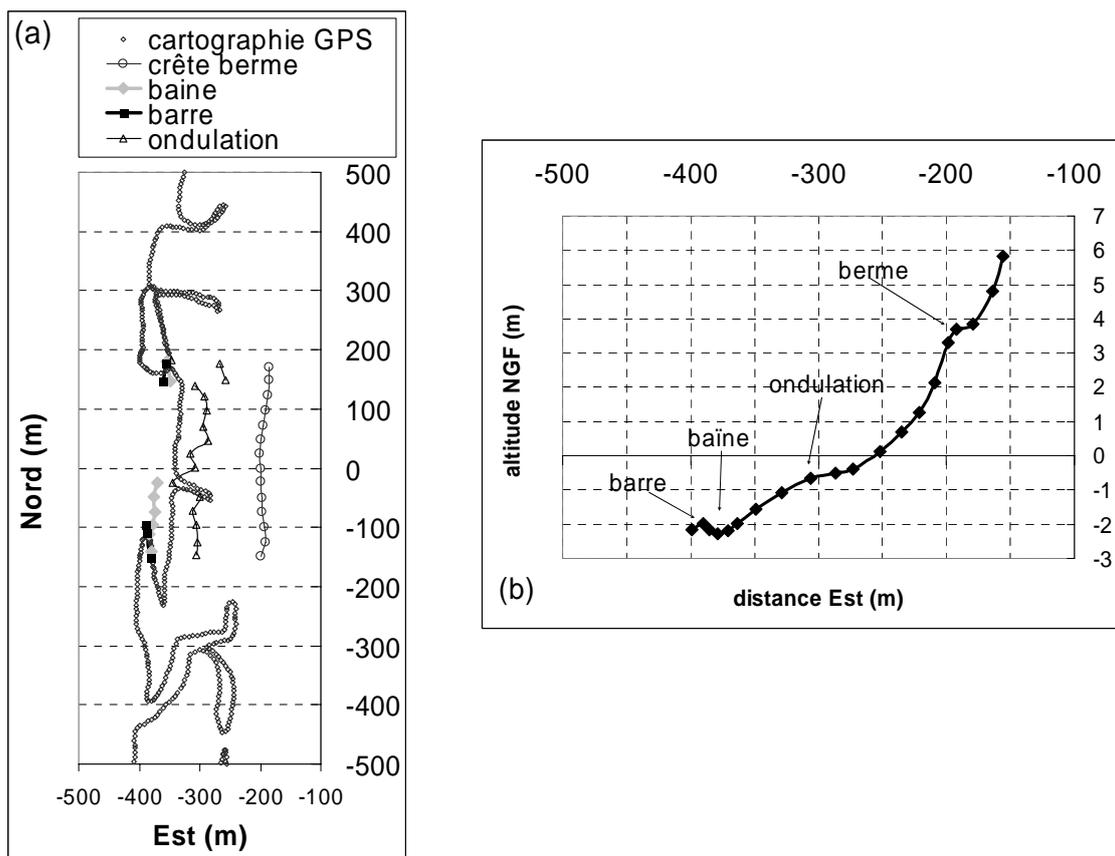


Figure III.47 : Observations topographiques du 17 avril 2003, plage du Truc Vert.
 (a) Synthèse de l'étude multi-profils de 300 m longshore (analyse pseudo-3D) et du suivi de contours par GPS.
 (b) Exemple de profil (Y = -100 m Nord) montrant la présence d'une barre pré-littorale, à la limite externe du domaine intertidal.

Le levé topographique et le suivi des contours par GPS du 17 avril 2003 montrent néanmoins clairement la présence d'une barre sableuse située à la limite externe de la plage intertidale (Figure III.47). Le profil cross-shore $Y = -100$ m (Nord) positionne la crête à environ 400 m du point de référence en sommet de dune. Le fond de la baie (-2,30 m NGF) se situe sous le 0 hydrographique estimé (-2,15 m NGF). Cette barre sableuse pré-littorale se situe donc à la frontière entre le domaine intertidal et la plage sous-marine. Sa forme n'a pas pu être bien mesurée par l'opérateur de terrain, car une grande partie de la structure est restée largement immergée. Le suivi de contours par GPS montre cependant 2 zones qui forment la connexion de la barre à la côte, entre + 200 m et +300 m et entre -200 m et -300 m. Cette observation permet d'estimer la longueur d'onde du système à environ 500 m. En raison de cette dimension supérieure à la zone de mesures topographiques, les interactions morphologiques de ce système avec les autres structures de la plage ne peuvent pas être analysées. Dans ce cas précis, il est simplement possible de constater que la barre sableuse pré-littorale coexiste avec une berme bien développée et une ondulation de plage intertidale.

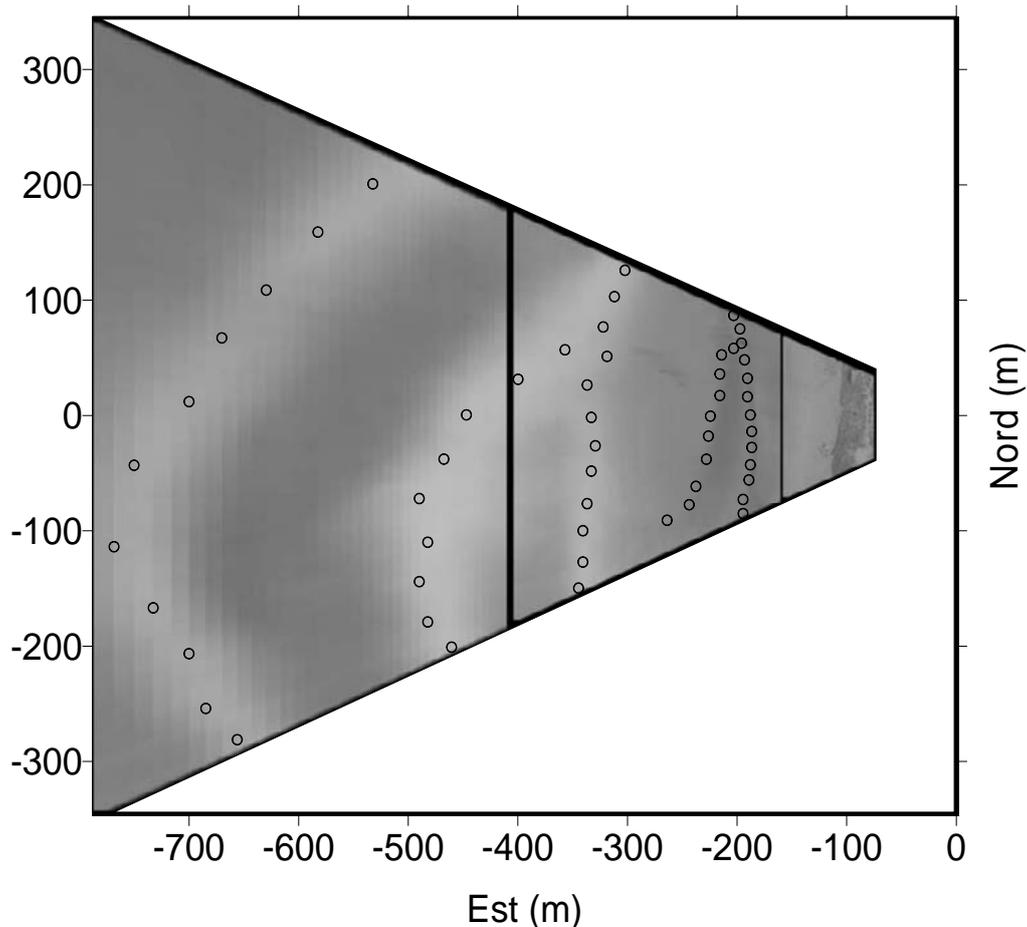


Figure III.48 : Image vidéo moyennée et redressée, test de 10 min effectué à marée basse de vives-eaux, durant la campagne PNEC 01, le 17 octobre 2001. Le déferlement des vagues montre l'existence de 2 barres sableuses en croissant dans le domaine sous-marin. Un système de barre et de baie est également repéré sur la plage intertidale.

- **Intérêts de la télédétection vidéo pour l'observation de la zone de transition**

Les méthodes vidéo peuvent représenter une très bonne alternative pour observer la morphologie de cette zone. Un test effectué en octobre 2001, durant la mission PNEC 01 confirme cette capacité (Figure III.48). Ainsi, les conditions énergétiques ont permis d'observer la position du déferlement des vagues sur 2 systèmes de barres sous-marines de forme arquée. Le premier système, situé au large, forme la barre sableuse sous-marine qui a déjà été repérée sur les profils cross-shore unique (§ III.C.1) et qui sera décrit en détail dans la partie suivante. Le second système, de longueur d'onde moins importante, est une barre pré-littorale, située dans la zone de transition. L'image redressée présentée dans la figure III.48 montre un résultat de cartographie beaucoup moins abouti que le test du 26 novembre 04 (voir chapitre II.C.4). Mais les estimations de distance permettent de situer correctement la plage intertidale et son système de barre et baine relativement marquée entre -200 et -300 m en abscisse (Est). Plus au large, au-delà de la limite de basse mer (-350 m), la zone de transition vers la plage sous-marine est caractérisée par la présence de la barre sableuse pré-littorale qui provoque le déferlement des vagues. Cette barre prend la forme d'un croissant, dont la partie nord vient se connecter à la plage intertidale entre l'ordonnée 0 et + 100m (Nord), à environ -400 m Est. Cette partie de barre pré-littorale est tout à fait comparable au système observé le 17 avril 2003. La partie sud de la barre n'est pas observée sur l'image vidéo, même si quelques photographies aériennes, prises au même moment (mais difficilement exploitables), laissent penser qu'une connexion au sud est possible. La crête de la barre intermédiaire est séparée de la côte par une fosse où les vagues ne brisent pas. Perpendiculairement à la côte, cette zone plus profonde mesure une centaine de mètre au maximum.

L'étude de la zone de transition pré-littorale nous a révélé toute la complexité de ce domaine et son importance dans l'étude des barres sableuses. C'est une zone charnière qui reste constamment immergée et qui subit donc un déferlement très important. Dans le cas de la carte PNOC 98, la zone de transition forme le flanc externe de la barre intertidale. Sa forme générale est clairement influencée par les structures morphologiques adjacentes. D'autres observations ont prouvé l'existence de barres sableuses spécifiques à ce domaine. Les observations topo / bathymétriques et vidéo sont maintenant indispensables pour étudier en détail ces systèmes, les relations morphologiques avec l'ensemble de la plage et les cycles d'apparition / disparition.

2.2. Barre sableuse sous-marine

Au large de la zone de transition, au-delà de la fosse pré-littorale, les cartes SHOM 67, PNOG 98 et PNEC 99 indiquent la présence d'une structure sédimentaire sous-marine, généralement appelée barre en croissant. Cette dénomination provient de travaux précédents basés sur l'observations par télédétection (aérienne ou satellite) qui montre effectivement une forme générale festonnée et rythmique (voir chapitre I.C). Chaque motif de croissant est plus ou moins relié à la côte par l'intermédiaire de cornes (Figure III.49). Entre 2 cornes, prend place la fosse pré-littorale. Cette barre sableuse est clairement tridimensionnelle, elle est donc difficile à décrire. Son aspect rythmique permet de détailler chaque croissant les uns après les autres. Dans la suite de l'étude, les motifs unitaires qui se répètent tout au long de la côte seront nommés « système longshore de barre sous-marine (ou subtidale) ».

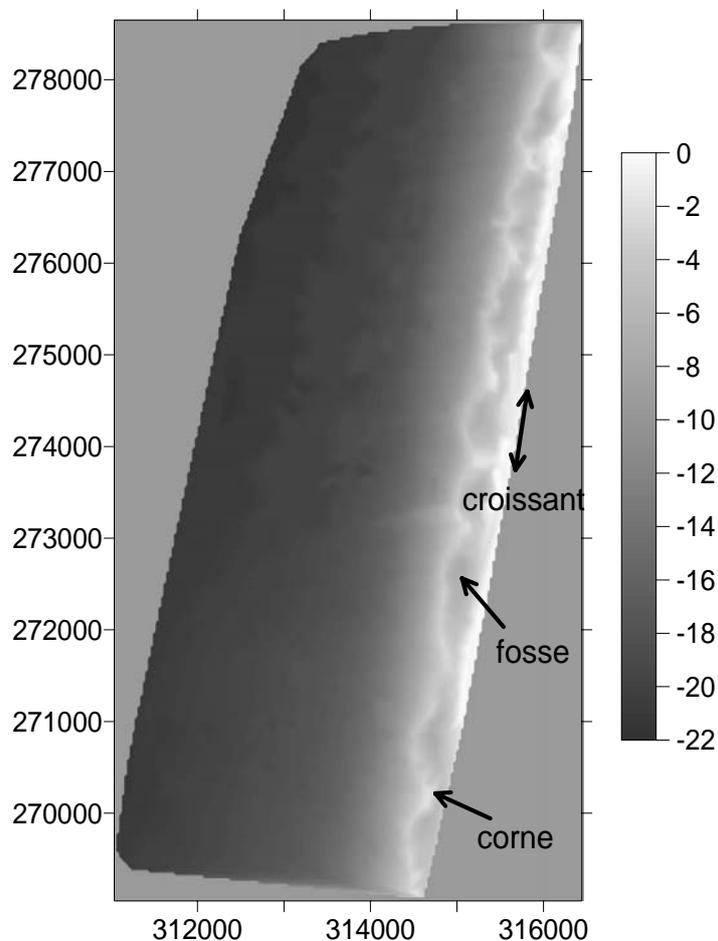


Figure III.49 : Mise en image de la bathymétrie complète SHOM 1967. La barre sableuse sous-marine festonnée est clairement visible, on distingue des formes en croissant. Coordonnées : Lambert 3 Sud, Est (X) et Nord (Y) en mètres. Les niveaux de gris représentent les profondeurs par rapport au 0 hydrographique.

a) Modèle morphologique de barre sous-marine

Ce paragraphe a pour objectif de détailler la morphologie complexe de la barre sableuse sous-marine à partir de cartes bathymétriques. Les analyses seront ensuite focalisées sur les cartes PNEC 99 et SHOM 67 qui permettent toutes deux d’observer respectivement un et deux systèmes longshore complets sur le site du Truc Vert.

Dans un premier temps, la méthode d’analyse pseudo-3D a été utilisée pour déterminer les points caractéristiques de la barre sableuse, à partir de profils cross et longshore multiples. Elle vise tout d’abord à positionner la crête, les limites de la barre sableuse vers la côte, puis au large. Le travail consiste ensuite à décrire la morphologie grâce à ces points synthétiques. Dans un second temps, une étude 3D à partir des MNT complets est envisageable pour compléter les informations recueillies. L’étude du système Nord de la carte SHOM 67 illustre la méthode d’analyse employée pour décrire la barre sous-marine.

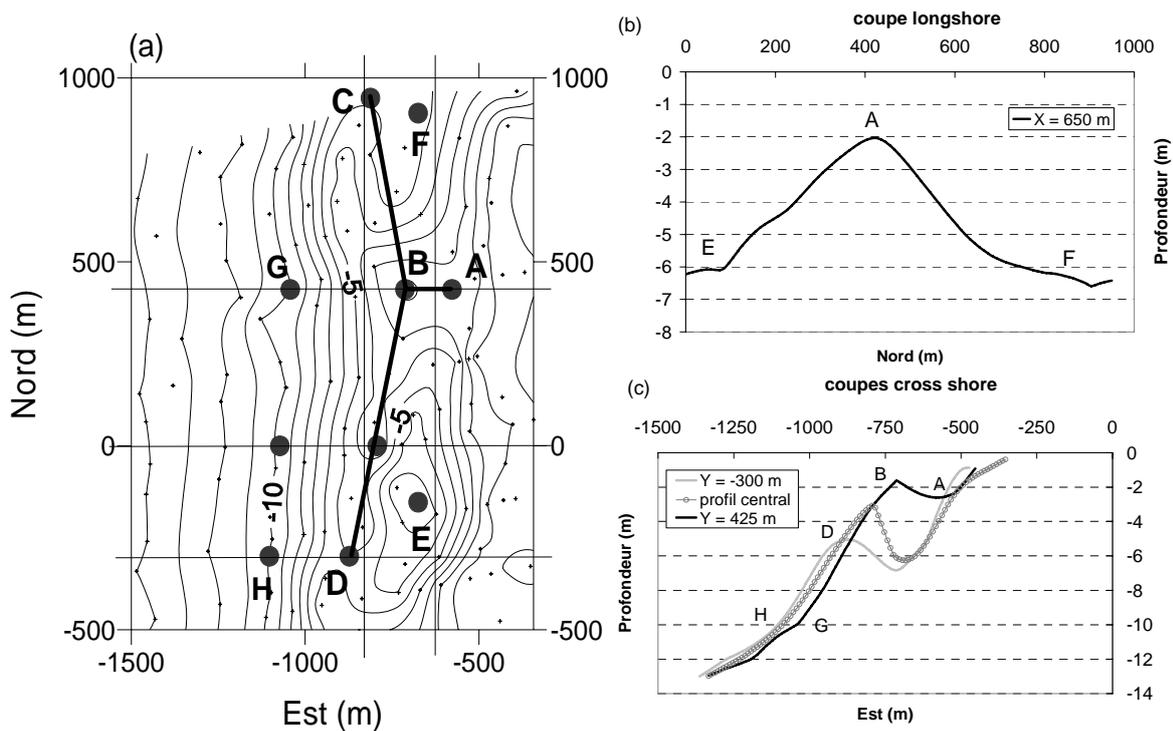


Figure III.50 : Analyse du système de barre sous-marine au Nord de la carte SHOM 67.

(a) Position des points caractéristiques et des profils sur la carte bathymétrique
 (b) Coupe longshore, X = -650 m (Est). (c) Coupes cross-shore pour Y = -300, 0 et 425 m.

• **Forme de la barre sous-marine**

La crête de la barre sableuse prend une forme festonnée particulièrement difficile à décrire à partir de profils. Néanmoins, on constate qu’elle est perpendiculaire au littoral au niveau de la corne, et tend à être parallèle entre les cornes (Figure III.50). Le point de crête situé au plus

proche de la côte est positionné sur la corne (A). Sur une coupe longshore, on voit bien que ce point est placé sur la crête de corne, entre 2 fosses (Figure III.50.b). La coupe cross-shore montre clairement que le point (A) marque la limite onshore de la corne car il constitue un prolongement de la fosse (Figure III.50.c). Le sommet du système se trouve aussi sur la corne (point B). De part et d'autre de ce point, la crête se sépare en 2 branches, l'une dirigée vers le sud, l'autre vers le nord. Chaque branche descend en pente douce vers un minimum qui forme la limite du système (C au nord et D au sud). La crête de la barre en croissant est donc entrecoupée par de petits chenaux marquant la limite longshore de chaque système. Entre ces limites, les cornes forment les sommets des systèmes. Selon cette description objective, la morphologie d'une barre pré-littorale se rapprocherait donc beaucoup plus d'un Y que d'un croissant. Cette remarque est un changement important dans la façon d'observer et d'analyser cette structure sédimentaire remarquable. Auparavant, chaque système était décrit autour d'une fosse pré-littorale entourée de 2 cornes. Dans cette étude basée sur des observations bathymétriques, nous proposons qu'un système soit centré sur une corne. Chaque corne forme un sommet qui se divise ensuite en une branche nord et une branche sud.

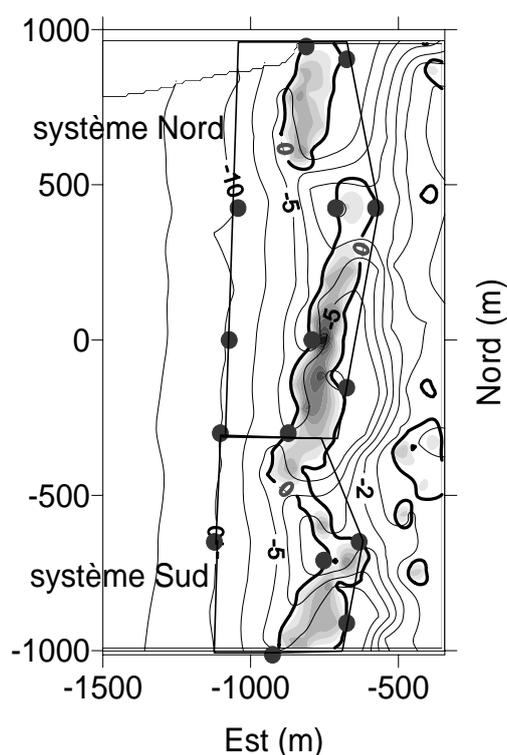


Figure III.51 : Analyse des limites vers la côte et au large de la barre sableuse sous-marine, carte SHOM 67. Les points caractéristiques repérés par l'analyse multi-profil sont représentés. Ils permettent de déterminer la limite des 2 systèmes longshore (Nord et Sud). La carte des dérivées en direction de l'Oues) est superposée : en dégradé gris, les valeurs de dérivée sont négatives ; le trait gras représente une dérivée nulle (crête ou talweg).

- **Forme de la fosse pré-littorale**

Le fond de la fosse pré-littorale marque la limite à la côte de la barre sous-marine. Le talweg correspondant peut être repéré précisément par un travail en 3D sur le MNT. La figure III.51 montre une carte des dérivées dans le sens cross-shore, calculée avec le logiciel SURFER. Les valeurs négatives correspondent à une pente dirigée vers la côte, les valeurs positives à une pente vers le large. La crête et le talweg du système sont caractérisés par une dérivée nulle. Le fond de la fosse pré-littorale sépare la zone de transition du versant interne de la barre sous-marine. Il passe par les points caractéristiques A, E, F (Figure III.50.b). De part et d'autre de la corne, la fosse pré-littorale est elliptique et profonde, les points E et F y matérialisent les points bas. A l'approche de la corne, la fosse devient moins profonde et se transforme en un sillon plus ou moins marqué qui sépare la corne de la zone de transition. La carte PNOC 98 (voir § III.-C.2.1) illustre bien la modification de forme de la fosse.

Plus au large, la limite morphologique du système n'est pas évidente à observer (Points G, H). L'utilisation de profils filtrés a toutefois facilité la détection d'une rupture de pente autour de 10 m de profondeur.

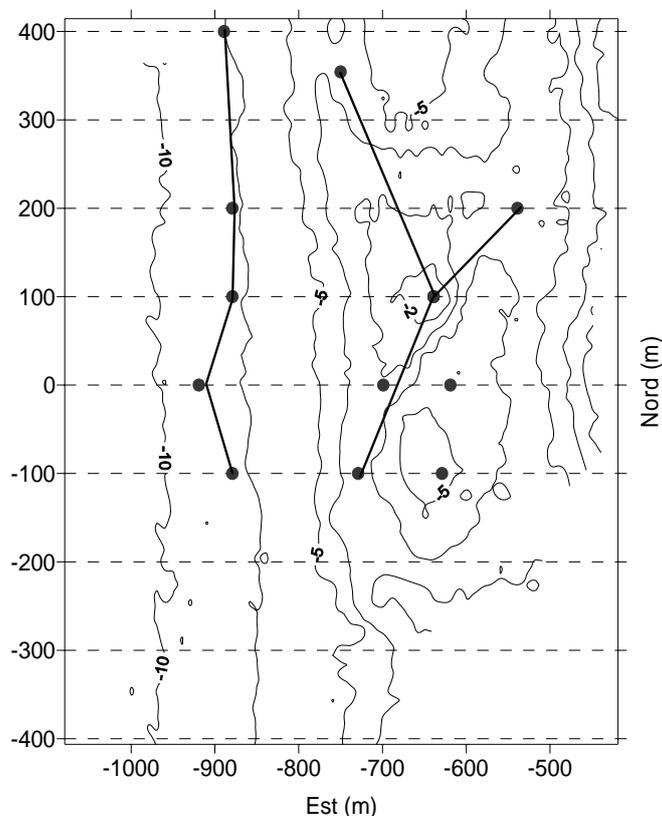


Figure III.52 : Analyse pseudo-3D d'un système longshore de barre sous-marine établie à partir de plusieurs profils de la carte PNEC 99.

CORNE						
		debut (m)	sommet (m)	direction (°)	pente (%)	taille (m)
SHOM 67						
système sud	Est	-632,9	-752,9	243,4	-0,6	134,1
	Nord	-650,0	-710,0			
	profondeur	-2,8	-2,0			
système nord	Est	-577,5	-712,9	270,0	-0,7	135,4
	Nord	425,0	425,0			
	profondeur	-2,6	-1,6			
PNEC 99	Est	-538,9	-639,0	225,0	-1,6	141,5
	Nord	200,0	100,0			
	profondeur	-3,8	-1,4			

Tableau III.9 : Points caractéristiques et paramètres calculés pour les 3 cornes observées.

BRANCHE SUD					
		chenal (m)	direction (°)	pente (%)	taille (m)
SHOM 67					
système sud	Est	-926,2	209,7		349,5
	Nord	-1013,6			
système nord	Est	-875,0	191,8	-0,4	794,6
	Nord	-352,8			
	profondeur	-5,1			
PNEC 99	Est	-729,0	204,2	-1,1	219,3
	Nord	-100,0			
	profondeur	-3,8			

BRANCHE NORD					
		chenal (m)	direction (°)	pente (%)	taille (m)
SHOM 67					
système sud	Est	-872,8	343,7	-0,7	427,2
	Nord	-300,0			
	profondeur	-5,0			
système nord	Est	-812,2	349,2		529,5
	Nord	945,1			
PNEC 99	Est	-750,0	336,4	-1,0	277,5
	Nord	354,3			
	profondeur	-4,4			

Tableau III.10 : Limite et paramètres calculés pour les 6 branches observées.

FOSSE PRELITTORALE				
	shom 67			pneec 99
	fosse sud	fosse centre	fosse nord	fosse sud
Est	-675	-675	-675	-650
Nord	-911,5	-153,3	904,1	-96,1
profondeur	-6,9	-7,5	-6,6	-5,6

Tableau III.11 : Position du fond des fosses pré littorales.

b) Analyse des cartes PNEC 99 et SHOM 67

L'étude des cartes bathymétriques a permis d'extraire les informations concernant 3 systèmes longshore de barres sous-marines (Figures III.50, 51 et 52). A partir des points caractéristiques, plusieurs paramètres sont calculés pour décrire la corne, la branche nord et la branche sud de chaque système. La taille des cornes est définie entre le sommet et le début de la barre vers la côte (Tableau III.9). Elle est homogène pour les 3 cornes observées, mesurée entre 135 et 140 m. La direction par rapport à la côte varie de 270° dans le cas de la corne nord de la carte SHOM 67 à 225° pour la corne PNEC 99. Il existe donc des structures nettement obliques par rapport au littoral. Le point de début de corne n'est pas fixe lui non plus. Sa position est comprise entre -630 m (Est) et -540 m (PNEC 99), sa profondeur entre -2,6 m et -3,7 m (PNEC 99). Ainsi, la corne PNEC 99 est séparée de la côte et de la zone de transition par un chenal bien plus profond que sur la carte SHOM 67. Le sommet est donc plus isolé du littoral, mais il est également plus marqué car il a été mesuré sous 1,44 m d'eau tandis que la carte SHOM indique -2 m et -1,65 m. Il faut cependant nuancer ces différences de bathymétrie car l'étude porte sur des profils extraits des MNT interpolés. Les valeurs de profondeurs possèdent donc une marge d'erreur qu'il est difficile de quantifier clairement, mais qui peut dépasser 20 cm (voir § II.B).

La taille des branches est relativement variable (Tableau III.10). Elle est comprise entre 220m et 795 m pour les branches sud des systèmes, de 275 m à 530 m pour les branches nord. Ce paramètre est calculé entre le sommet de la corne et le chenal qui coupe la crête de barre. Le chenal est un point caractéristique remarquable car il forme une limite commune entre deux systèmes au nord et au sud (comme dans le cas du point (D) de la carte SHOM 67, Figure III.50). C'est également le point de crête situé le plus au large, entre -710 m et -850 m à l'Est de l'origine du repère local. Sa profondeur varie entre -3,8 m (PNEC 99) et -5,1 m (branche sud de la corne sud, SHOM 67), ce qui implique une pente non négligeable, de l'ordre de 0,5 à 1 %, jusqu'au sommet de la barre. La pente des branches est orientée entre 190° et 210° pour les branches sud. Elle est moins variable pour les branches nord, entre 335° et 345° par rapport à l'orientation de la côte. Il faut cependant remarquer que la forme de la branche est arquée, la mesure de direction est donc une simplification de la réalité.

La position du fond des fosses est plutôt homogène, autour de -650 m (Est) ; par contre, la profondeur est variable allant -7,5 m à -5,6 m pour la carte PNEC 99 (Tableau III.11). Les

cornes de la carte SHOM 67 sont donc bien marquées dans le sens longshore, au contraire de la carte PNEC 99. De telles différences impliquent un potentiel de transport et de stockage sédimentaire important dans la fosse pré-littorale. Au large, la limite morphologique des systèmes a été repérée à 10 m de profondeur sur la carte SHOM 67, et -8,5 m pour le levé PNEC 99. Ces différences peuvent induire des variations dans le calcul du volume sédimentaire de la barre sableuse. La largeur totale de la barre (cross-shore), calculée du fond de la fosse à la limite au large, est aussi affectée (Figure III.53). Pour le système PNEC 99, elle est comprise entre 250 m au niveau des chenaux et 340 m pour la corne. Dans le cas des barres SHOM 67, les largeurs sont plus importantes, allant de 390 m pour les branches et chenaux à 490 m sur les cornes.

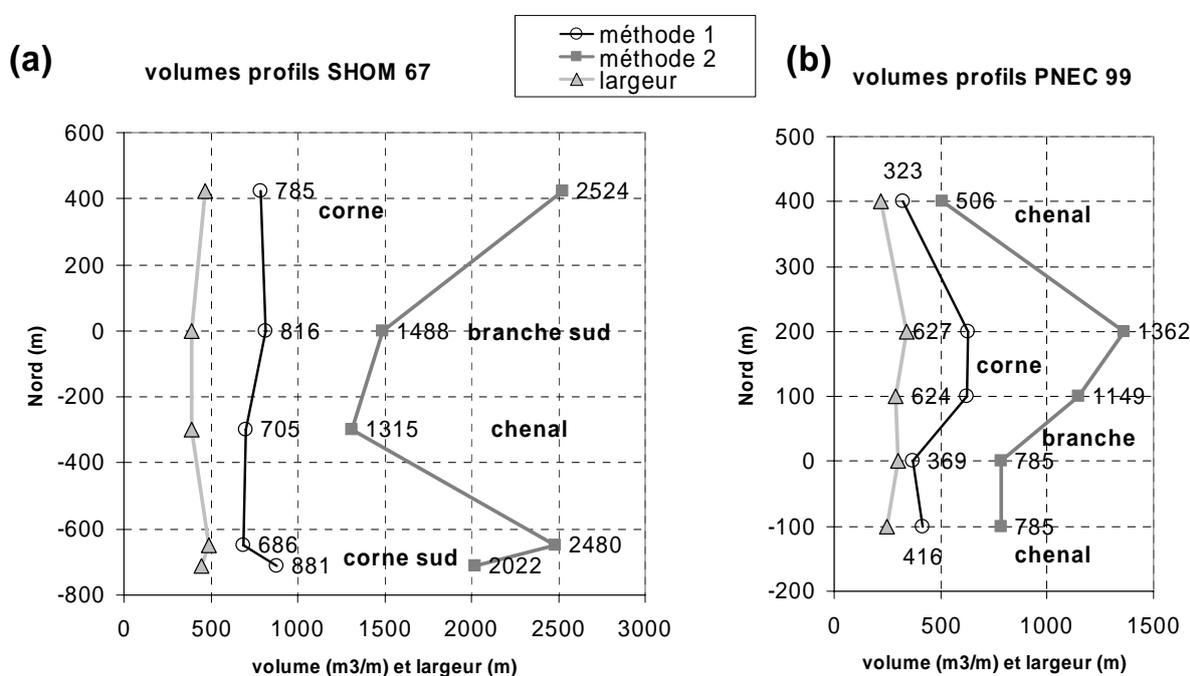


Figure III.53 : Volume et largeur de la barre sableuse sous-marine, établis à partir des profils cross-shore. (a) Carte SHOM 67. (b) carte PNEC 99.

c) Volume de la barre sous-marine

Le volume d'un corps sédimentaire est un paramètre de description très synthétique, qui facilite les comparaisons dans l'espace et dans le temps. Plusieurs méthodes de calcul ont été employées :

i) L'analyse en profil cross-shore détermine un volume par mètre de côte longshore. La base de la barre sableuse est définie, soit par la droite reliant la limite externe à la frontière interne (méthode 1), soit par l'horizontale passant par la limite externe (méthode 2).

ii) Le travail sur MNT et l'utilisation du logiciel SURFER rend possible le calcul du volume total d'un système longshore de barre sableuse sous-marine.

- **Calcul du volume des barres sableuses par analyse pseudo-3D**

La première méthode de calcul de volume en profil fournit d'intéressants résultats pour la barre PNEC 99 (Figure III.53.b). Les profils +100 et + 200 m Nord qui caractérisent la corne sont bien plus engraisés ($625 \text{ m}^3/\text{m}$ linéaire) que les profils effectués sur les branches ou dans les chenaux (entre 323 et $416 \text{ m}^3/\text{m}$ linéaire). Cette méthode est moins efficace pour décrire les variations de volumes dans le cas des cornes peu marquées (dans le sens cross-shore) de la carte SHOM 67 (Figure III.53.a), où elle montre une relative homogénéité de l'ensemble de la barre sous-marine. En revanche, les variations volumiques sont très bien visualisées avec les résultats de la méthode 2. Les quantités de sédiments sont beaucoup plus importantes au niveau des cornes (environ $2500 \text{ m}^3/\text{m}$ linéaire pour la carte SHOM 67) ; les branches et surtout les chenaux possèdent un stock sédimentaire moindre (1500 à $1300 \text{ m}^3/\text{m}$ linéaire pour la carte SHOM 67). Il faut noter la grande différence constatée entre PNEC 99 et SHOM 67, quelle que soit la méthode employée. Le volume calculé est presque 2 fois plus important pour la carte SHOM 67. De tels écarts entre les cartes s'expliquent principalement par une différence morphologique importante entre les systèmes, comme le montre la figure III.54, la description des points caractéristiques et des paramètres de la barre sous-marine.

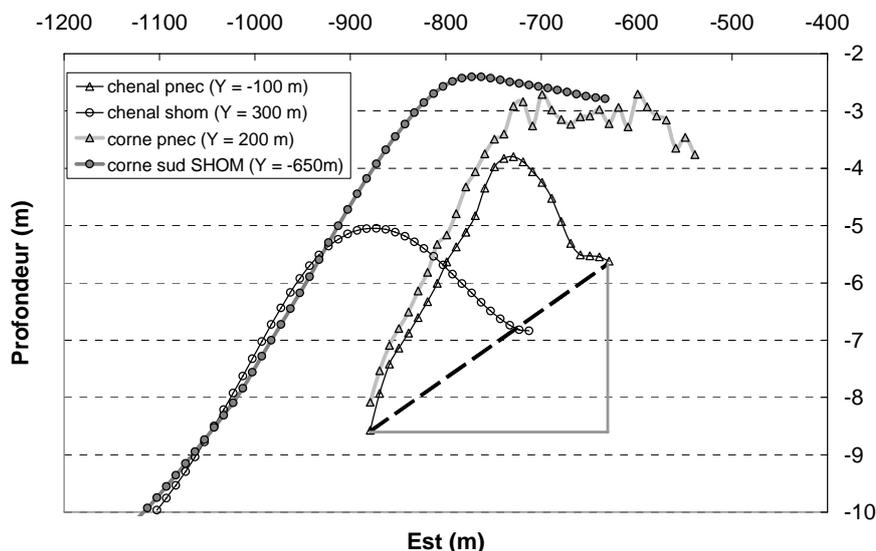


Figure III.54 : Comparaison de la morphologie des barres sableuses entre la carte SHOM 67 et PNEC 99. Les profils comparés correspondent à des parties « équivalentes » de la barre (corne et chenal). Le trait pointillé sous le profil « chenal pnec », correspond à la droite de référence pour la méthode 1 de calcul du volume ; les traits gris matérialisent le volume pris en compte avec la méthode 2.

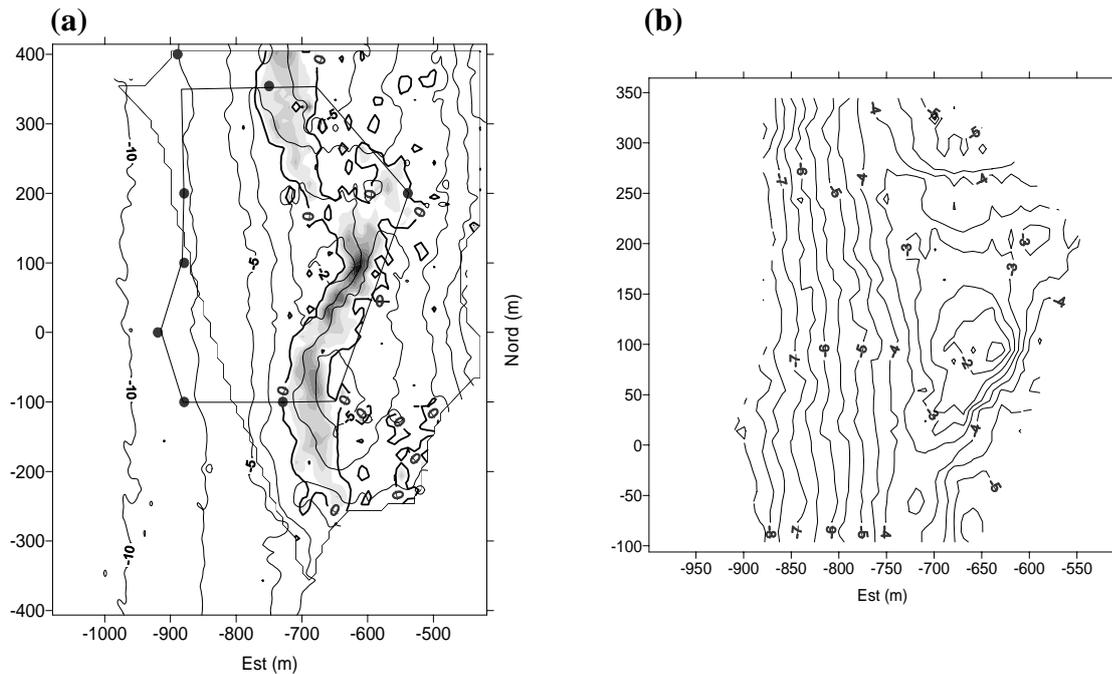


Figure III.55 : Préparation au calcul du volume 3D de la barre sous-marine, carte PNEC 99. (a) Les points caractéristiques et le fond de la fosse pré littorale délimitent le système de barre sous-marine. La carte de dérivée vers l'Ouest permet de localiser précisément la position de la fosse. Le dégradé gris représente les valeurs négatives de dérivée. (b) La découpe du MNT autour du système de barre étudié est un préalable au calcul de volume précis.

- **Calcul du volume des barres sableuses par analyse 3D**

Dans le but d'améliorer la comparaison des barres sous-marines, des tests ont été entrepris pour calculer le volume total d'un système complet (Figure III.55). Les approches utilisées s'apparentent aux techniques employées pour les calculs des profils. Elles visent à établir le volume compris entre la surface bathymétrique et un niveau de base. La définition du niveau de base est bien sûr au cœur de la réflexion méthodologique. Dans le cadre de cette étude, des tests ont d'abord été effectués à partir de surfaces de références horizontales (-8,5 m et -10 m). D'autres essais ont ensuite été menés pour mettre en place des surfaces de référence différentes, basées sur l'étude préliminaire des formes de la barre. Un premier type de surface de référence (a) est ajusté pour passer par tous les points bas de la barre sableuse : début de corne, chenaux, fond de fosse et limite externe. La surface obtenue par interpolation possède donc déjà un certain nombre de caractéristiques morphologiques ; par exemple, la surface créée sous la barre PNEC 99 montre deux dépressions au niveau des fosses et une bosse sous la corne (Figure III.56.a). Le second type de surface ajustée est plus plane car elle est établie à partir des points caractéristiques les plus bas de la barre sableuse (limite externe et fond de fosse uniquement, Figure III.56.b).

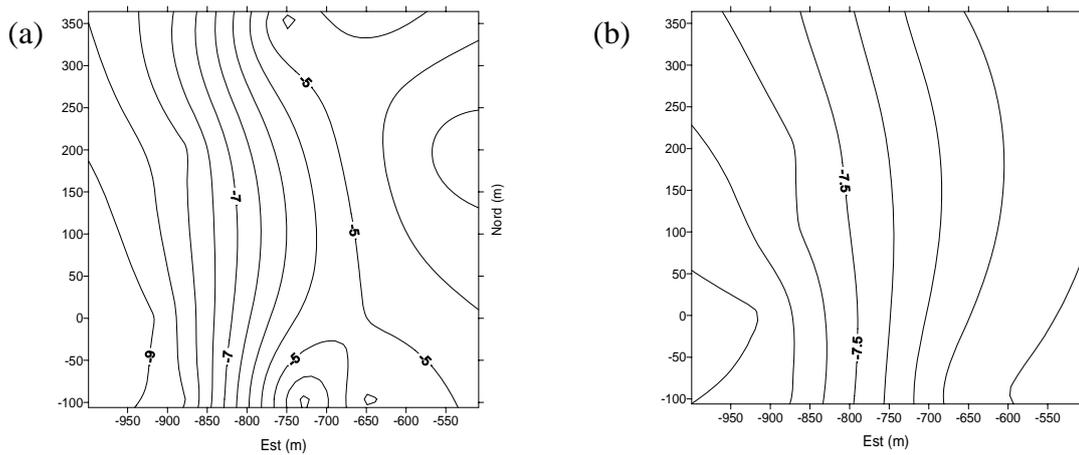


Figure III.56 : Deux exemples de surface de référence ajustée aux points caractéristiques, pour le calcul de volume de la barre sous-marine PNEC 99.

Les résultats des calculs tridimensionnels nous montrent que la longueur des systèmes est un facteur prépondérant dans l'expression du volume total (Figure III.51). En conséquence, la barre la plus grande (barre nord, SHOM 67) représente le volume le plus important (entre 712 000 et 2 047 000 m³) ; la barre la plus petite (PNEC 99) est caractérisée par un volume plus faible (entre 143 000 et 699 000 m³). Au vue des résultats, l'interprétation de détail sur la forme est compliquée. En effet, les variations sont énormes selon la méthode de calcul employée. Le choix de la surface de référence est donc un point crucial à définir avant d'estimer correctement le volume des barres sableuses. Ainsi, les résultats sont multipliés par 3 ou 4 entre l'utilisation d'une surface interpolée et un plan horizontal à -10 m. Les tests doivent être poursuivis dans ce sens, sur une base de données plus large, afin de définir les bons paramètres de calcul de volume.

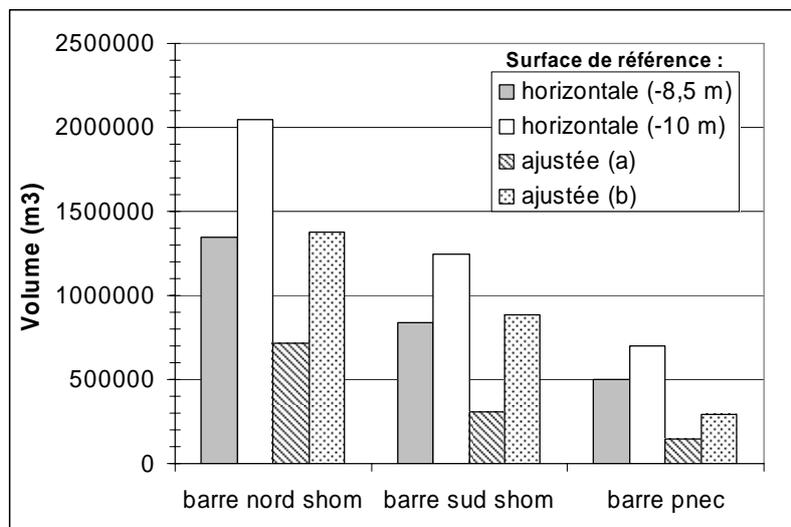


Figure III.51 : Calcul du volume 3D des systèmes de barres sous-marines observées.

d) Bilan de l'étude de la barre sableuse sous-marine

La barre sableuse sous-marine est une structure tridimensionnelle complexe, dont les constituants (corne et branches) ne suivent pas forcément les directions cross et longshore de la plage. Ainsi, les cornes peuvent être obliques par rapport à la côte. De plus la forme arquée des branches induit un décalage de plusieurs degrés (10° à 30°) avec la direction générale du littoral. L'étude bathymétrique nous montre que la forme globale d'une entité se rapproche plus du Y que d'un croissant.

La variabilité morphologique des systèmes sous-marins est importante, tant en longueur d'onde qu'en profondeur. Sur les 3 systèmes mesurés, la taille parallèlement à la côte varie de 450 m pour PNEC 99, à 700 m pour le système sud de la carte SHOM 67 et dépasse 1300 m pour la barre nord. Il faut noter que ces résultats diffèrent sensiblement des mesures utilisées en télédétection, basées sur le calcul des distances entre 2 sommets de cornes (1135 m entre les cornes sud et nord SHOM 67). L'analyse des points caractéristiques a également permis de distinguer une corne bien individualisée, séparée de la côte par un sillon profond (PNEC 99), des systèmes en transition plus douce (SHOM 67).

Cette grande variabilité morphologique est le signe annonciateur d'un environnement dynamique où les transferts sédimentaires sont importants. Des calculs de volumes ont été testés, afin d'initier une comparaison simple des systèmes. Les quelques résultats sont sans surprise. Le calcul en profil prouve l'accumulation préférentielle des sédiments dans les cornes qui forment le sommet des barres. La comparaison du volume entre plusieurs systèmes montre que les plus grandes barres représentent les plus gros stocks sédimentaires. Les valeurs calculées diffèrent grandement en fonction de la surface de référence choisie, mais elles correspondent toutes à des volumes gigantesques, pouvant atteindre et dépasser le million de m³.

2.3. Plage sous-marine inférieure

L'étude de la plage sous-marine inférieure ne présente pas les mêmes difficultés que l'analyse de la plage supérieure, car les barres tridimensionnelles y sont absentes. Les cartes SHOM 67, ITSAS 6 et PHES 99 sont caractérisées par des isobathes s'espacant régulièrement, signe d'une pente douce qui s'amortie vers le large (Figure III.52.c, par exemple).

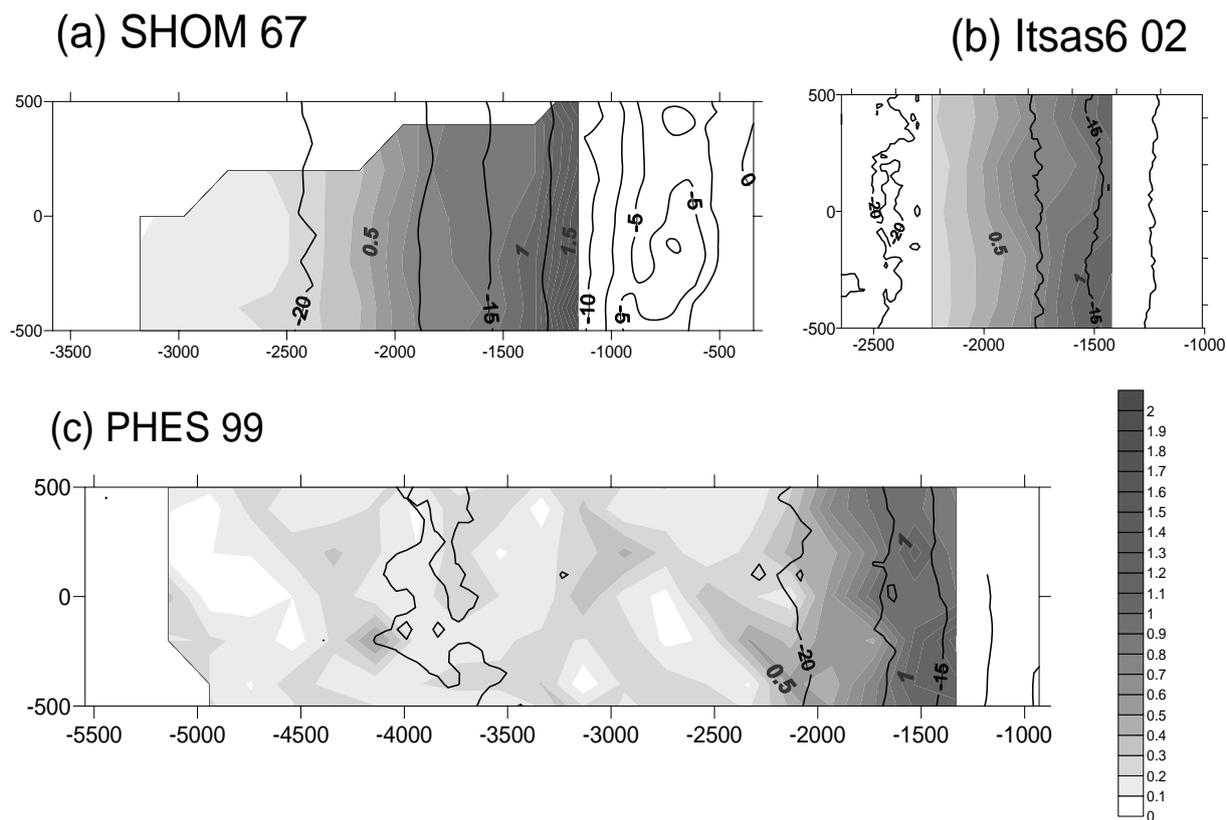


Figure III.52 : Morphologie de la plage sous-marine inférieure et valeur de la plus grande pente en % (dégradé gris). (a) Carte SHOM 67. (b) Carte ITSAS 6 (c) Carte PHES 99.

Pour aller au-delà de ces généralités qui ont déjà été données dans la partie III.C.1, il faut utiliser des paramètres plus sensibles, qui vont aider à détecter les variations fines de la morphologie tridimensionnelle. A partir de MNT, le logiciel SURFER permet le calcul des valeurs de plus grandes pentes et la représentation rapide des résultats sous forme de cartes (Figure III.52). Les cartes ITSAS 6 et SHOM 67 montrent que l'évolution de la pente n'est pas homogène sur un domaine de 1000 m longshore (Figure III.52.a et b). Dans les deux cas, la morphologie du sud présente une pente en diminution régulière, tandis qu'au nord, la déclivité reste constante autour de -15 m (SHOM 67) et -17 m (PHES 99). Après 17 m de profondeur, les pentes sont inférieures à 0,5 % et suivent une décroissance plus uniforme tout

au long de la côte. Cette observation laisse présager de l'existence d'un domaine d'accumulation ou de transport sédimentaire entre -15 m et -17 m.

L'hypothèse est confirmée par l'étude de la carte de comparaison des bathymétries ITSAS 6 et SHOM 67 (Figure III.53), qui montre une érosion pouvant dépasser 1 mètre dans la zone située entre -15 et -17 m. Une érosion est également constatée à proximité de l'isobathe -10 m, à la limite de la plage sous-marine supérieure. Ces observations en frontière de grille sont à prendre avec précaution en raison des imperfections de l'interpolation, mais elles s'expliquent probablement par des échanges sédimentaires et des modifications morphologiques sous l'influence de la barre sous-marine.

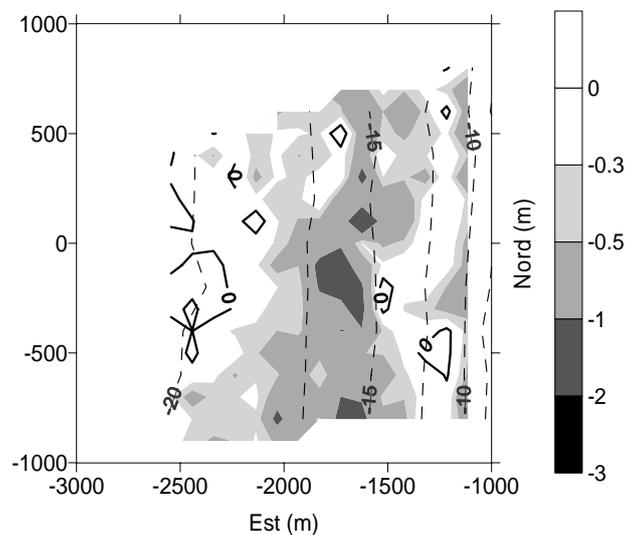


Figure III.53 : Carte de comparaison des bathymétries Itsas 6 et Shom 67. Les isobathes sont en pointillés ; l'érosion (m) est représentée en niveaux de gris.

Ces hypothèses de fonctionnement de la plage sous-marine doivent absolument être confirmées par des mesures plus fréquentes sur la plage sous-marine, avec des techniques de mesures parfaitement comparables et adaptées. Mais la difficulté d'observation restera tout de même un facteur important à prendre en compte pour la compréhension de cet environnement. En revanche les observations par sonar à balayage latéral présentées dans le chapitre I.C.4.4 permettent une observation très fine de la morphologie. Les résultats ont clairement montré l'existence de mégarides sur la plage sous-marine inférieure (Figure I.50). Ces structures sédimentaires plus petites que les barres sableuses sont le signe d'une réelle dynamique du domaine. Leur suivi dans le temps grâce au sonar représente une perspective intéressante pour une observation précise de ce domaine sous-marin.

CONCLUSION

CONCLUSION

Les plages de la côte aquitaine sont des systèmes complexes

Les plages sableuses sont des systèmes complexes. Leur fonctionnement est dominé par l'interaction de différents forçages qui apportent de l'énergie et transportent des éléments entre les compartiments du système. La compréhension globale des processus mis en jeu est bien souvent délicate et nécessite des études pluridisciplinaires. Le résultat du fonctionnement complexe des plages sableuses s'observe généralement par une modification du volume des compartiments et par une évolution de la morphologie des interfaces.

Sur la côte aquitaine, l'étude des plages est particulièrement difficile. Le forçage des houles y est très important et certaines zones dominées par le déferlement sont pratiquement inaccessibles. Cette importante énergie délivrée par les vagues est le moteur de ce milieu très dynamique. Elle est de plus modulée par la marée qui déplace le domaine d'action des houles sur une vaste zone. De cette interaction de forçages puissants, il résulte des plages à la morphologie complexe et évolutive, structurées par des barres sableuses tridimensionnelles.

Observation des barres sableuses de la plage du Truc Vert

Le but de cette thèse était de caractériser la morphologie des barres sableuses de la plage du Truc Vert située sur la côte nord-aquitaine. Ce domaine est étudié depuis plusieurs années par les équipes du DGO de l'Université Bordeaux 1 et certaines barres sableuses ont déjà été observées au cours de précédents travaux. Ainsi, De Melo (2003) et Lafon et al. (2002) ont analysé la forme et la longueur d'onde longshore des barres intertidales à l'aide de données de précisions moyennes issues d'images satellites ou de suivis de contours par GPS. De leur côté, Castelle (2004) et Lafon et al. (2004) ont observé la forme et la longueur d'onde des barres sous-marines en croissants, à partir d'images satellites et aériennes, de précision moyenne également.

Dans cette thèse, la plage du Truc Vert a été découpée en trois compartiments pour permettre une étude de l'ensemble du système littoral. Des barres sableuses ont été observées dans chacun des compartiments :

- La berme en haut de plage ;
- Les barres et baïnes en bas de plage intertidale ;
- Les barres en croissants sur la plage sous-marine.

D'autres structures ont été étudiées comme le pied de la dune embryonnaire en haut de plage, les ondulations morphologiques de la plage intertidale et la barre sableuse pré-littorale située à la transition entre la plage intertidale et sous-marine. Des figures sédimentaires de plus petites tailles (mégarides) ont également été mesurées au niveau de la plage sous-marine inférieure. D'autres mégarides ont été repérées assez fréquemment dans les baïnes de la plage intertidale, mais elles n'ont pas fait, dans cette thèse, l'objet d'un travail particulier.

Analyse des profils topographiques cross-shore

Un des premiers objectifs de cette étude visait à améliorer la qualité des descriptions morphologiques des barres sableuses de la plage du Truc Vert. Pour le haut de plage et la plage intertidale, les données proviennent de mesures topographiques effectuées sur un profil cross-shore. Ces données ne permettent pas la description complète d'une barre sableuse tridimensionnelle, mais leur analyse est complémentaire des études longshore précédentes. De plus, la réflexion menée dans le chapitre II sur la technique de mesure topographique par tachéométrie, permet d'affirmer la bonne qualité relative des données utilisées. La méthode développée pour analyser les 104 profils topographiques de la base de données est nommée « analyse 2D cross-shore ». Elle peut s'appliquer à l'étude des bermes ou des barres intertidale. L'analyse 2D cross-shore consiste tout d'abord à définir un modèle morphologique de la barre sableuse à étudier. Ce modèle permet de représenter simplement la forme de la barre, à partir d'un nombre limité de points. Pour chaque barre sableuse, les points caractéristiques sont extraits des profils topographiques de la base de données. Des paramètres morphologiques synthétiques peuvent alors être déterminés.

Le modèle simplifié de la berme se base sur trois points caractéristiques : le début de berme, la crête et le pied de la structure. Les paramètres morphologiques retenus sont : la taille de la

berme, le rapport de symétrie des versants, la netteté de la crête, la présence d'une double crête et la pente minimum du versant interne. Pour la barre intertidale, ce modèle est incomplet car le versant externe de la structure n'est presque jamais mesuré dans son intégralité. Seuls deux points caractéristiques sont retenus pour l'analyse des profils cross-shore : le fond de la baie et le sommet de la barre. Les paramètres morphologiques déterminés correspondent à la description du versant interne de la barre intertidale : amplitude, largeur et pente.

Cette méthode de traitement permet l'observation de petites modifications dans la forme des barres sableuses qui peuvent être repérées grâce à l'évolution d'un point caractéristique ou d'un paramètre morphologique. La finesse et la précision des analyses 2D cross-shore ouvrent des perspectives pour l'étude quantifiée du fonctionnement des barres sableuses à court terme, à l'échelle d'une journée ou d'un cycle de marée (Annexe 3). De plus, elles peuvent faciliter la description d'une structure tridimensionnelle mesurée par un levé topographique multi-profil (Annexes 2, 3 et 4).

Typologie des barres intertidales et des bermes

Ce travail d'analyse basé sur les profils topographiques cross-shore de la plage du Truc Vert a permis d'extraire un grand nombre d'informations très précises au sujet de la forme des bermes et des barres intertidales. L'utilisation de statistiques multivariées (ACP, Analyse en Composantes Principales et CAH, Classification Ascendante Hiérarchique) a facilité la synthèse objective des résultats.

Cinq formes caractéristiques ont été définies pour classer les 73 barres sableuses observées en haut de plage. D'un côté, on distingue trois classes de bermes : les bermes moyennes, les bermes à double crêtes et les bermes marquées, qui possèdent un flanc interne dirigé vers la dune. D'un autre côté, deux familles d'ondulations sont observées : les ondulations de haut de plage, formes à peine visible positionnées au-dessus du niveau moyen de la mer, et les ondulations de pied de dune, situées très haut sur la plage.

Pour les 44 barres et baïnes intertidales analysées, trois classes principales ont été différenciées : les barres de grande amplitude, les systèmes de grande taille et les structures de petite taille et de faible amplitude.

Ces résultats sont simples d'utilisation bien qu'ils soient basés sur des analyses quantifiées et des données précises. Ils permettent d'envisager l'amélioration des séquences d'évolution saisonnière (Annexe 5) et la comparaison morphologique sur une plus grande échelle (Annexes 3 et 4), ou entre plusieurs plages de la côte aquitaine.

Analyse tridimensionnelle de la barre sableuse sous-marine

Pour la plage sous-marine, ce travail de thèse a donné lieu à une étude poussée des mesures bathymétriques disponibles. Les données étant rares, l'accent a été mis sur la description de la morphologie tridimensionnelle de la barre sableuse. Une analyse dénommée « pseudo-3D » a été mise en place. Elle s'appuie sur la détermination de points caractéristiques de la structure, à partir de l'étude de plusieurs profils cross-shore. Le modèle morphologique établi pour la barre sous-marine définit un système en forme de Y. La structure de cette barre très particulière s'organise autour d'une corne orientée plus ou moins perpendiculairement à la côte. Vers le large, la corne se sépare en deux branches qui s'orientent parallèlement à la côte en s'amortissant. Cette observation d'une barre tridimensionnelle présente des différences importantes avec les précédentes études qui ont décrit une barre constituée de motifs en croissant à partir d'images satellites.

Un travail méthodologique a également été effectué sur les mesures bathymétriques pour obtenir des Modèles Numérique de Terrain (MNT). Les MNT permettent une étude tridimensionnelle plus poussée que la méthode pseudo-3D qui reste très synthétique et essentiellement destinée à décrire une barre sableuse simple. Plusieurs paramètres morphologiques ont été calculés à l'aide du logiciel SURFER : la valeur de la pente, sa direction, la dérivée seconde cross-shore qui permet de positionner précisément la crête de barre ou le fond de la fosse pré-littorale et le volume total de la structure.

Cette thèse a donc permis d'établir une méthodologie fiable et précise pour décrire la morphologie de la barre sous-marine. Ce savoir-faire doit maintenant être utilisé pour exploiter de futurs levés bathymétriques et faciliter la comparaison avec les simulations du modèle MORPHODYN utilisé par Castelle (2004).

Vers une observation de la plage du Truc Vert dans son ensemble

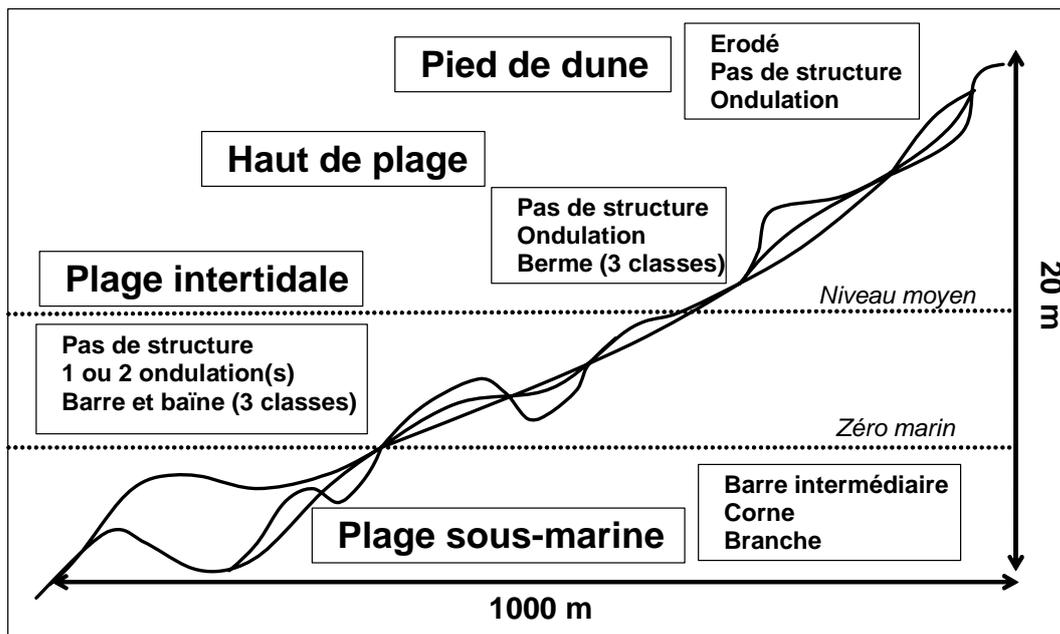


Figure IV.1 : Représentation synthétique du profil de la plage du Truc Vert

Au cours de ce travail, un effort particulier a été entrepris pour décrire le système littoral dans sa globalité (Figure IV.1). Même si la complexité morphologique de la plage a nécessité un découpage en compartiments, il est apparu clairement que l'ensemble du domaine devait être pris en compte. Ainsi, les analyses morphologiques ont été centrées sur les trois barres sableuses principales, mais les connexions avec les compartiments adjacents ont été détaillées à chaque fois. En haut de plage, la forme cross-shore de la berme a été analysée tandis qu'un travail sur la dune embryonnaire et la liaison dune-berme a également été entrepris. Entre la berme et le bas de la plage intertidale, une étude spécifique a été effectuée pour observer les ondulations morphologiques de la plage intertidale. Une classification de la plage intertidale a été proposée en fonction de la présence ou de l'absence de berme, d'ondulation ou de barre intertidale. Une analyse de la zone de transition entre la plage intertidale et sous-marine a ensuite été présentée avant de décrire la forme de la barre sableuse sous-marine. Enfin, les

caractéristiques du domaine qui relie la plage au plateau continental ont été abordées par l'étude morpho-sédimentaire de la plage sous-marine inférieure. Cette thèse, centrée sur la caractérisation des barres sableuses, a donc également permis d'établir une description complète de la morphologie de la plage du Truc Vert. De nombreuses précisions peuvent encore être apportées à cette vision globale de la plage. Des études plus poussées pourront être menées grâce aux développements méthodologiques apportés. Plus précisément, les suites immédiates de ce travail sont basées sur l'amélioration des techniques de topographie et sur le développement d'une méthode de télédétection vidéo.

Ainsi, les mesures topographiques ont permis l'étude de nombreuses situations morphologiques sur la plage subaérienne et intertidale. Mais l'analyse de profils cross-shore bidimensionnels a simplifié considérablement la vision des choses en négligeant la dimension longshore. Pour améliorer la qualité des observations parallèlement à la côte, des levés topographiques multi-profils par GPS cinématique ont été effectués depuis 2004. L'analyse de ces mesures par des méthodes pseudo-3D est une perspective très intéressante pour compléter la description de la plage du Truc Vert (Annexes 2, 3 et 4).

La barre sableuse sous-marine a été décrite très précisément dans un repère à trois dimensions. Mais par contre, le manque de mesures limite considérablement la connaissance de cette structure sableuse. A ce stade, il semble donc capital de multiplier les observations de la plage sous-marine et de la zone de transition avec le domaine intertidal pour mieux connaître la forme des barres sableuses sous-marines. Pour répondre à ce besoin, le développement d'un système de mesure vidéo a été initié pendant ce travail de thèse. La technique retenue se base sur le positionnement des zones de déferlement préférentiel observées à l'aide d'images vidéo moyennées. Une image obtenue en octobre 2001 a montré que cette méthode permettait d'observer la forme des barres sableuses sous-marines. Un test effectué en novembre 2004 sur la plage du Truc Vert a montré que le système vidéo développé au cours de ce travail de thèse permet d'observer les caractéristiques morphologiques de la plage intertidale avec précision, sur une zone du même ordre de grandeur que les barres sableuses observées. Des tests doivent maintenant être menés pour valider la relation entre le déferlement et le positionnement précis d'une barre sableuse sur la plage du Truc Vert. De futurs essais devraient aussi permettre d'établir les conditions de houles idéales pour observer les structures sous-marines.

Perspectives

Ces travaux ont permis de réelles avancées sur le thème de la mesure et de l'analyse de la morphologie des barres sableuses des plages d'Aquitaine. Chaque amélioration a été menée avec l'objectif de progresser vers une méthode d'étude optimale, qui soit à la fois précise et tridimensionnelle, qui recouvre l'ensemble du domaine littoral et permette des observations à une grande fréquence temporelle.

A la suite de cette thèse, les perspectives de travail concernent surtout la fréquence temporelle des études. Il apparaît en effet primordial de mieux suivre les événements qui affectent la morphologie de la plage et des barres sableuses. Une plus grande fréquence de mesure devrait permettre de proposer des séquences évolutives précises et quantifiées. Les relations avec les conditions environnementales et l'hydrodynamique pourront alors être plus aisément corrélées. La collecte de ces informations reliant l'évolution morphologique et l'hydrodynamique doit faciliter la mise en place à moyen terme d'une classification morphodynamique de la plage du Truc Vert (Annexe 5). Cette classification doit être une synthèse présentant les principaux états de la plage et les conditions environnementales qui favorisent les évolutions. Elle doit être un outil de référence qui simplifie le fonctionnement de l'environnement et qui cadre les simulations des modèles mathématiques.

BIBLIOGRAPHIE

- Aagaard T. et Holm J.** 1989. Digitization of wave run-up using video records. *Journal of Coastal Research*, 53, 547-551.
- Arbouille D.** 1987. La sédimentation de la plate-forme continentale nord-aquitaine au Quaternaire terminal : un exemple de système transgressif, thèse de 3^{ème} cycle, université de Bordeaux 1.
- Aubié S. et Tastet J. P.** 2000. Coastal erosion, processes and rates : an historical study of the gironde coastline, Southwestern France. *Journal of Coastal Research*, 163, 756-767.
- Aubrey D. G.** 1979. Seasonal Patterns of Onshore/Offshore Sediment Movement. *Journal of Geophysical Research*, 84, 6347-6354.
- Bagnold R. A.** 1963. Mechanics of marine sedimentation. *The Sea*, M. N. Hill, ed., Wiley, New York, 507-528.
- Bailard J. A. et Inman D. L.** 1981. An energetics bedload model for a plane sloping beach : Local transport. *Journal of Geophysical Research*, 86, 10938-10954.
- Ballay A., Simon B. et Wöppelmann G.** 2002. Détermination du zéro hydrographique dans un système de référence terrestre mondial. 7^{ème} journées nationales Génie Civil - Génie Côtier, Anglet, France.
- Barber N. F.** 1949. A diffraction analysis of a photograph of the sea. *Nature*, 164, 485.
- Battjes J. A. et Janssen J. P.** 1978. Energy loss and setup due to breaking in random waves. 16th International Coastal Engineering Conference, 569-587.
- Bellec V.** 2003. Evolution morphostructurale et morphosédimentaire de la plate-forme Aquitaine depuis le Néogène., thèse, Université Bordeaux 1.
- Benzecri J. P.** 1973. L'analyse des données : la taxinomie, tome 1, Dunod.
- Birkemeier W. A. et Mason, C.** 1984. The CRAB : a unique nearshore surveying vehicle. *Journal of Surveying Engineering*, 110 (1), 1-7.
- Bonneton P. et Dupuis H.** 2001. Transformation of irregular waves in the inner surf zone. 27th International Conference on Coastal Engineering., 745-754.
- Bonneton P., Marieu V., Dupuis H., Sénéchal N. et Castelle B.** 2004. Wave transformation and energy dissipation in the surf zone : Comparison between a non-linear model and field data. *Journal of Coastal Research*, SI 39.

- Bowen A. J.** 1980. Simple models of nearshore sedimentation. Beach profiles and longshore bars. Dans *The coastline of Canada, littoral processes and shore morphology*, S. B. McCann, ed., Geological Survey of Canada, Ottawa, 1-11.
- Bowen A. J. et Inman D. L.** 1969. Rip currents 2. Laboratory and field observations. *Journal of Geophysical Research*, 74 (23), 5479-5490.
- Bowen, A. J. et Inman, D. L.** 1971. Edge waves and crescentic bars. *Journal of Geophysical Research*, 76, 8662-8671.
- Bowen A. J., Inman D. L. et Simmons V. P.** 1968. Wave "Set-Down" and Set-Up. *Journal of Geophysical Research*, 73, 2569-2577.
- Brabant M.** 2000. *Maîtriser la topographie, des observations au plan*, Eyrolles.
- Bruun P.** 1962. Sea level rise as a cause of shore erosion. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 88, American Society Civil Engineers, 117-130.
- Butel R., Dupuis H. et Bonneton, P.** 2002. Spatial variability of wave conditions on the French Atlantic coast using in situ data. *Journal of Coastal Research*, SI 36, 96-108.
- Castelle B.** 2004. *Modélisation de l'hydrodynamique sédimentaire au-dessus des barres sableuses soumises à l'action de la houle : application à la côte aquitaine*, thèse, université Bordeaux 1.
- Castelle B., Bonneton P. et Butel, R.** 2004. *Modélisation de la morphodynamique des barres en croissant de la côte Aquitaine*. 8ème journées nationales Génie Civil, Génie Côtier, Compiègne.
- Castelle B., Bonneton P., Senechal N., Dupuis H., Butel R. et Michel D.** sous presse. Dynamics of wave-induced currents over an alongshore non-uniform multiple-barred sandy beach on the aquitanian coast, France. *Continental Shelf Research*.
- Certain R.** 2002. *Morphodynamique d'une côte sableuse microtidale à barre, le Golfe du Lyon, Languedoc-Roussillon.*, thèse, université de Perpignan.
- Chapalain G. et Duveillbourg E.** 2003. Processus hydro-sédimentaires sur la plage du Truc Vert littoral aquitain. 9è^m congrès français de sédimentologie, Bordeaux, 124-125.
- Cirac P., Berné S., Castaing P. et Weber O.** 2000. Processus de mise en place et d'évolution de la couverture sédimentaire superficielle de la plate-forme nord-aquitaine. *Océanologica Acta*, 236, 663-686.
- Cowell P. J., Hanslow D. J. et Meleo J. F.** 1999. *The Shoreface. Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*, A. D. Short, ed., John Wiley and Sons, New York, 39-71.
- Dalrymple R. A.** 1975. A mechanism for rip current generation on an open coast. *Journal of Geophysical Research*, 80, 3485-3487.

- Davis R. A.** 1985. Beach and neashore zone, Springer-Verlag, New York.
- De Melo Apoluceno D.** 2003. Morphodynamique des plages à barres en domaine meso à macrotidal : exemple de la plage du Truc Vert, Gironde, France., thèse, Bordeaux 1.
- De Rosnay J.** 1975. Le macroscope, vers une vision globale, Edition du Seuil.
- Desmazes F.** 2000. Etude relative à la caractérisation et la répartition des barres sableuses pré-littorale. rapport SHOM, 36 p.
- Desmazes F.** 2001. Evolution morpho-sédimentaire du prisme littoral aquitain. Mémoire de DEA , université Bordeaux 1, DGO.
- Desmazes F. et Michel D.** 2002. Sedimentation of a high energetic lower shoreface : example of the beach of Truc Vert, Aquitaine Coast, France. 8th International Symposium on Oceanography of the Bay of Biscay, Gijon, Espagne.
- Desmazes F., Michel D., Garlan T., Howa H. et Oggian G.** 2003. Morphodynamique d'une plage sableuse à barres, exemple du littoral girondin, plage du Truc Vert. Hauts niveaux marins et dynamiques géomorphologiques, Rennes, France.
- Desmazes F., Michel D. et Howa H.** 2001. Etude morphologique et hydro-sédimentaire du domaine pré-littoral aquitain. 8^{ème} Congrès Français de Sédimentologie, Orléans, 95.
- Desmazes F., Michel D., Howa H. et Pedreros R.** 2002. Etude morphodynamique du domaine pré-littoral nord aquitain, site atelier du Truc Vert. 7^{ème} journées nationales Génie Civil - Génie Côtier, Anglet, France, 155-162.
- Dolan T. J. et Dean R. G.** 1985. Multiple Longshore Sand bars in the upper Cheseapeake Bay. Estuarine Coastal Shelf Science, 21, 727-743.
- Dugan J. P., Piotrowski C. C. et Williams J. Z.** 2001. Water depth and surface current retrievals from airborne optical measurements of surface gravity wave dispersion. Journal of Geophysical Research, 106(C8), 16 903-16 915.
- Dugan J. P., Suzukawa H. H., Forsyth C. P. et Farber M. S.** 1996. Ocean wave dispersion surface measured with airborne IR imaging system. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 34 (5), 1282-1284.
- Duncan J. R.** 1964. The effects of water table and tide cycle on swash-backwash sediment distribution and beach profile development. Marine Geology, 2, 168-187.
- Dupuis H., Goasguen G., Michel L., Michard B. et Bretel P.** 2004. Inter-comparaisons de mesures de vagues au large du Cap Ferret. 7^{ème} journées nationales du Génie Côtier / Génie Civil, Compiègne.
- Escoffier B. et Pages J.** 1988. Analyses factorielles simples et multiples ; objectifs, méthodes et interprétation, Dunod, Paris.

- Etchegaray A.** 2004. Caractérisation morpho-sédimentaire des plages sous-marines nord aquitaines. Mémoire de Mastere 2, Université Bordeaux 1.
- Fenelon J. P.** 1981. L'art et la manière dans la pratique du dépouillement. Qu'est-ce que l'analyse des données ?, Lefonen, Paris.
- Froidefond J. M., Gallissaires J. M. et Prud'Homme R.** 1990. Spatial variation in sinusoidal wave energy on a crescentic nearshore bar ; application to the Cap-Ferret Coast, France. *Journal of Coastal Research*, 64, 927-942.
- Gallagher E. L., Boyd W., Elgar S., Guza R. T. et Woodward B.** 1996. Performance of a sonar altimeter in the nearshore. *Marine Geology*, 133 (3-4), 241-248.
- Gallagher E. L., Elgar S. et Thornton E. B.** 1998. Megaripple migration in a natural surf zone. *Nature*, 394, 165-168.
- Gao S. et Collins M.** 1991. A critique of the "McLaren Method" for defining sediment transport paths. *Journal of Sedimentary Petrology*, 61, 143-146.
- Greenwood B. et Davidson-Arnott R. G. D.** 1979. Sedimentation and equilibrium in wave-formed bars : a review and case study. *Canadian Journal of Earth Science*, 16, 312-332.
- Grilli S. T.** 1998. Depth inversion in shallow water based on nonlinear properties of periodic waves. *Coastal Engineering*, 35, 185-209.
- Grunnet N. M. et Hoekstra P.** 2004. Alongshore variability of the multiple barred coast of Terschelling, The Netherlands. *Marine Geology*, 203, 23-41.
- Guza, R. T. et Inman, D. L.** 1975. Edge waves and beach cusps. *Journal of Geophysical Research*, 80(21), 2997-3012.
- Guza R. T. et Thornton D. B.** 1982. Swash Oscillations on a Natural Beach. *Journal of Geophysical Research*, 87 (C1), 483-491.
- Guza R. T. et Thornton E. B.** 1981. Wave set-up on a natural beach. *Journal of Geophysical Research*, 86 (C5), 4133-4137.
- Hesp P. A.** 1999. The beach backshore and beyond. *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*, A. D. Short, ed., Wiley and Sons.
- Holland K. T.** 1998. Beach cusp formation and spacing at Duck, USA. *Continental Shelf Research*, 18, 1081-1098.
- Holland K. T. et Holman R. A.** 1996. Field observations of beach cusps and swash motions. *Marine Geology*, 134, 77-93.
- Holland K. T. et Holman R. A.** 1997. Video estimation of foreshore topography using trinocular stereo. *Journal of Coastal Research*, 131, 81-87.

- Holland K. T., Holman R. A., Lippmann T. C., Stanley J. et Plant N. G.** 1997. Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 22 (1), 81-92.
- Holland K. T., Puleo, J. A. et Kooney T. N.** 2001. Quantification of swash flows using video-based particle image velocimetry. *Coastal Engineering*, 44, 65-77.
- Holland K. T., Puleo J. A., Plant N. G. et Kaihatu J. M.** 2002. Littoral environmental nowcasting system LENS. *IEEE Oceans*, 1234-1239.
- Holland K. T., Raubenheimer B., Guza R. T. et Holman R. A.** 1995. Run up kinematics on a natural beach. *Journal of Geophysical Research*, 100 (C3), 4985-4993.
- Holman R. A. et Guza R. T.** 1984. Measuring run-up on a natural beach. *Coastal Engineering*, 8, 129-140.
- Holman R. A. et Lippmann T. C.** 1987. Remote sensing of nearshore bar systems- Making morphology visible. *Coastal Sediments'87*, 929-944.
- Holman R. A., Lippmann T. C., O'Neill P. V. et Hathaway K.** 1991. Video estimation of subaerial beach profiles. *Marine Geology*, 97, 225-231.
- Holman R. A. et Sallenger A. H., Jr.** 1985. Set-up and swash on a natural beach. *Journal of Geophysical Research*, 90 (C1), 945-953.
- Holman R. A., Sallenger A. H., Lippmann T. C. et Haines J. W.** 1993. The application of video image processing to study of nearshore processes. *Oceanography*, 63, 78-85.
- Howa H.** 2003. Environnements littoraux silico-clastiques dominés par les houles. Mémoire HDR, Université d'Angers.
- Howd P. A. et Holman R. A.** 1987. A simple model of beach foreshore response to long period waves. *Marine Geology*, 11-22.
- Komar P. D.** 1998. *Beach processes and sedimentation*, Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Komar P. D. et Inman D. L.** 1970. Longshore sand transport on beaches. *Journal of Geophysical Research*, 75, 5514-5527.
- Konicki K. M. et Holman R. A.** 2000. The statistics and kinematics of transverse bars on an open coast. *Marine Geology*, 169, 69-101.
- Lafon V., De Melo Apoluceno D., Dupuis H., Michel D., Howa H. et Froidefond J. M.** 2004. Morphodynamics of nearshore rhythmic sandbars in a mixed-energy environment SW France : I. Mapping beach changes using visible imagery. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 61, 289-299.
- Lafon V., Dupuis H., Howa H. et Froidefond J. M.** 2002. Determining ridge and runnel longshore migration rate using SPOT imagery. *Océanologica Acta*, 25, 149-158.

- Le Nindre Y. M., Benhammouda S., Rouzeau O., Haas H. et Quessette J. A.** 2001. Elaboration d'un outil de gestion prévisionnelle de la côte Aquitaine. , BRGM.
- Leica Geosystem.** 2001. Notion de base du GPS.
- Levoy F. et Montfort O.** 2002. Les transports sédimentaires sur les côtes sableuses, retour d'expériences sur la fiabilité des principales techniques de mesures. 7^{ème} journées nationales Génie Civil - Génie Côtier, Anglet, France, 393-400.
- Lippmann T. C. et Holman R. A.** 1989. Quantification of sand bar morphology : a video technique based on wave dissipation. *Journal of Geophysical Research*, 94 (C1), 995-1011.
- Lippmann T. C. et Holman R. A.** 1990. The spatial and temporal variability of sand bar morphology. *Journal of Geophysical Research*, 95 (C7), 11575-11590.
- Lippmann T. C. et Holman R. A.** 1991. Phase speed and angle of breaking waves measured with video techniques. *Coastal sediments' 91*, 542-556.
- Lippmann T. C., Holman R. A. et Hathaway K.** 1993. Episodic, nonstationary behavior of a double bar system at Duck, North Carolina, USA, 1986-1991. *Journal of Coastal Research*, 15, 49-75.
- Lubard S. C., Krimmel J. E., Thebaud L. R., Evans D. D. et Shemdin O. H.** 1980. Optical image and laser slope meter comparison of high-frequency waves. *Journal of Geophysical Research*, 85, 4996-5002.
- Madsen A. J. et Plant N. G.** 2001. Intertidal beach slope predictions compared to field data. *Marine Geology*, 173, 121-139.
- Masselink G. et Hegge B.** 1995. Morphodynamics of meso- and macrotidal beaches : examples from central Queensland, Australia. *Marine Geology*, 129 (1-2), 1-23.
- Masselink G. et Short A. D.** 1993. The effect of tide range on beach morphodynamics. A conceptual beach model. *Journal of Coastal Research*, 9, 785-800.
- Mc Laren P.** 1981. An interpretation of trends in grain-size measures. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51, 611-624.
- McGregor J. A., Poulter E. M. et Smith M. J.** 1997. Ocean surface currents obtained from microwave sea-echo Doppler spectra. *Journal of Geophysical Research*, 102, 227-25 236.
- McGregor J. A., Poulter E. M. et Smith M. J.** 1998. S band Doppler radar measurements of bathymetry, wave energy fluxes, and dissipation across an offshore bar. *Journal of Geophysical Research*, 103, 18 779- 18 789.
- Michel D.** 1997. Evolution morphodynamique d'un littoral sableux situé à l'aval d'une embouchure lagunaire, thèse, université de Bordeaux 1.

- Michel D. et Howa H.** 1999. Short term morphodynamic response of a ridge and runnel system on a mesotidal sandy beach. *Journal of Coastal Research*, 15, 428-437.
- Nielsen P.** 1983. Analytical determination of nearshore wave height variation due to refraction, shoaling and friction. *Coastal Engineering*, 7, 233-251.
- Pedreros R.** 2000. Quantification et modélisation du transport éolien au niveau des zones côtières-application au littoral girondin, thèse, université de Bordeaux 1.
- Pedreros R., Howa H. et Michel D.** 1996. Application of grain size trend analysis for the determination of sediment transport pathways in intertidal areas. *Marine Geology*, 135, 35-49.
- Penin F.** 1980. Le prisme littoral aquitain : histoire holocène et évolution récente des environnements morphosédimentaires., thèse 3^{ème} cycle, université de Bordeaux 1.
- Plant N. G. et Holman R. A.** 1997. Intertidal beach profile estimation using video images. *Marine Geology*, 140 (1-2), 1-24.
- Plant N. G. et Holman R. A.** 1998. Extracting morphologic information from field data. 26th International Coastal Engineering Conference, 2773-2784.
- Pradal M. A., Grilli S., Dugan J. P. et Williams Z.** 2002. Application des algorithmes d'inversion de la profondeur à des données de terrain. 7^{ème} journées nationales du Génie Côtier, Génie Civil, Anglet, France.
- Ranasinghe R., Symonds G. et Holman R. A.** 1999. Quantitative characterisation of rip dynamics via video imaging. *Coastal sediments*, 987-1002.
- Reading H. G.** 1986. *Sedimentary environments and facies*, Blackwell scientific, Oxford.
- Ruessink B. G., van Enckevort I. M. J., Kingston K. S. et Davidson M. A.** 2000. Analysis of observed two- and three-dimensional nearshore bar behaviour. *Marine Geology*, 169, 161-183.
- Sallenger A. H. Jr et Richmond B. M.** 1984. High-frequency sediment-level oscillations in the swash zone. *Marine Geology*, 60, 155-164.
- Sénéchal N.** 2003. Etude de la propagation des vagues au-dessus d'une bathymétrie complexe en zone de surf., thèse, université Bordeaux 1.
- Sénéchal N., Abadie S., Bonneton N., Bonneton P., Brière C., Butel R., Capobianco R., Castelle B., Chapalain G., Desmazes F., Dulou C., Dupuis H., Howa H., Larroudé P., Maron P., Malengros D., Michel D., Mory M., Oggian G., Pedreros R., Rey V.** 2002. Présentation de la campagne de mesures intensives du PNEC : Truc Vert 2001. 7^{ème} journées nationales Génie Civil - Génie Côtier, Anglet, France, 381-392.
- Short A. D.** 1999. *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*, Wiley.

- Short A. D. et Aagaard T.** 1993. Single and multi-bar beach change models. *Journal of Coastal Research*, SI 15, 141-157.
- Statistica.** 2002. logiciel d'analyse des données, Statsoft.
- Stépanian A.** 2002. Évolution morphodynamique d'une plage macrotidale à barres : Omaha beach Normandie, thèse, université de Caen-Basse Normandie
- Stilwell D.** 1969. Directional energy spectra of the sea from photographs. *Journal of Geophysical Research*, 74, 1974-1986.
- Stilwell D. et Pilon R. O.** 1974. Directional spectra of surface waves from photographs. *Journal of Geophysical Research*, 79, 1277-1284.
- Stockdon H. F. et Holman R. A.** 2000. Estimation of wave phase speed and nearshore bathymetry from video imagery. *Journal of Geophysical Research*, 105C9, 22015-22033.
- Surfer.** 1999. Surfer User Guide, Golden Software.
- Swan A. R. H. et Sandilands M.** 1995. Introduction to Geological Data Analysis, .
- Teague C. C.** 1986. Multifrequency HF radar observations of currents and current shear. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, OE-11, 258-269.
- Thornton E. B. et Guza R. T.** 1983. Transformation of wave height distribution. *Journal of Geophysical Research*, 88C10, 5925-5938.
- Van Enckevort I.** 2001. Daily to yearly nearshore bar behaviour, thèse, Utrecht, Pays-Bas.
- Van Enckevort I. M. J. et Ruessink B. G.** 2001. Effect of hydrodynamics and bathymetry on video estimates of nearshore sandbar position. *Journal of Geophysical Research*, 106 (C8), 16 969-16 979.
- Weber O.** 1978. Transits sédimentaires et évolution saisonnière de la zone littorale à la Salie Gironde, thèse, université de Bordeaux 1.
- Winant C. D., Inman D. L. et Nordstrom C. E.** 1975. Description of Seasonal Beach Changes Using empirical Eigenfunctions. *Journal of Geophysical Research*, 80, 1979-1986.
- Wright L. D., Guza R. T. et Short A. D.** 1982. Dynamics of a high energy dissipative surf zone. *Marine Geology*, 45, 41-62.
- Wright L. D. et Short A. D.** 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches : a synthesis. *Marine Geology*, 56, 93-118.
- Young I. R., Rosenthal W. et Ziemer F.** 1985. A three-dimensional analysis of marine radar images for the determination of ocean wave directionality and surface currents. *Journal of Geophysical Research*, 90, 1049-1059.

ANNEXES

ANNEXE 1.....p 274

Base de données morpho-sédimentaire.
Plage intertidale du Truc Vert, profil central.

ANNEXE 2.....p 276

Analyse géomorphologique de la plage du Truc Vert.

ANNEXE 3.....p 283

Exemples d'évolutions spatiales et temporelles de la forme
des bermes sur la plage du Truc Vert.

ANNEXE 4.....p 286

Formes des barres intertidales.
Analyse de 2 exemples de levés topographiques à profils multiples.

ANNEXE 5.....p 288

Hypothèse de deux états morphodynamiques de la plage du Truc Vert.

ANNEXE 6.....p 290

Répartition du travail fourni pour cette thèse.

ANNEXE 1

**Base de données morpho-sédimentaire.
Plage intertidale du Truc Vert, profil central.**

Base de données morpho-sédimentaire.

Date	Echantillons	Analyse granulométrique	Méthode topographique
14/12/2001	10	tamissage	Profil unique théodolite
14/01/2002	8	tamissage	Profil unique théodolite
31/01/2002	3	tamissage	Profil unique théodolite
14/02/2002	4	tamissage	Profil unique théodolite
15/03/2002	5	tamissage	Profil unique théodolite
12/04/2002	13	tamissage	Profil unique théodolite
26/04/2002	7	tamissage	Profil unique théodolite
13/05/2002	7	tamissage	Profil unique théodolite
07/10/2002	5	tamissage	Profils multiples théodolite
05/11/2002	6	tamissage	Profils multiples théodolite
21/01/2003	9	tamissage	Profils multiples théodolite
04/02/2003	6	tamissage	Profil unique théodolite
18/02/2003	8	tamissage	Profils multiples théodolite
20/03/2003	6	laser Malvern	Profils multiples théodolite
02/04/2003	5	tamissage+ laser Malvern	Profils multiples théodolite
16/06/2003	7	tamissage+ laser Malvern	Profils multiples théodolite
16/07/2003	6	tamissage+ laser Malvern	Profil unique théodolite
10/09/2003	5	laser Malvern	Profils multiples GPS + théodolite
26/09/2003	7	tamissage+ laser Malvern	Profils multiples GPS + théodolite
28/10/2003	4	tamissage+ laser Malvern	Profils multiples GPS
10/11/2003	6	tamissage+ laser Malvern	Profils multiples GPS
24/11/2003	7	tamissage+ laser Malvern	Profils multiples GPS
22/01/2004	4	laser Malvern	Profils multiples GPS
20/02/2004	5	tamissage+ laser Malvern	Profils multiples GPS
09/03/2004	6	tamissage+ laser Malvern	Profils multiples GPS

25 dates de mesures, 159 échantillons analysés.

Le travail d'analyse granulométrique a été effectué par G. Chabaut, technicien du DGO, et par C. Lucas, N. Zergaoui et G. Laisne, étudiants stagiaires au laboratoire.

Référence :

Laisne, G. 2003. Analyse Morpho-sédimentaire de la plage du Truc Vert. Mémoire de Maîtrise, université Bordeaux 1, DGO.

ANNEXE 2

Analyse géomorphologique de la plage du Truc Vert.

Analyse géomorphologique de la plage du Truc Vert

Représentation du suivi des structures de bas de plage et de l'analyse des levés topographiques à profils multiples

Cette annexe vient poursuivre et compléter le travail de De Melo (2003).

LEGENDE

◆	suivi GPS
—■	crête berme
—▲	ondulation
—●	crête barre
—✕	rupture de pente

Le suivi GPS consiste à positionner les structures de bas de plage grâce à un GPS Garmin 12. Crêtes, ondulations et ruptures de pente sont des points caractéristiques extraits des profils topographiques par analyse morphologique (voir chapitre III).

Synthèse des données présentées dans l'annexe 2

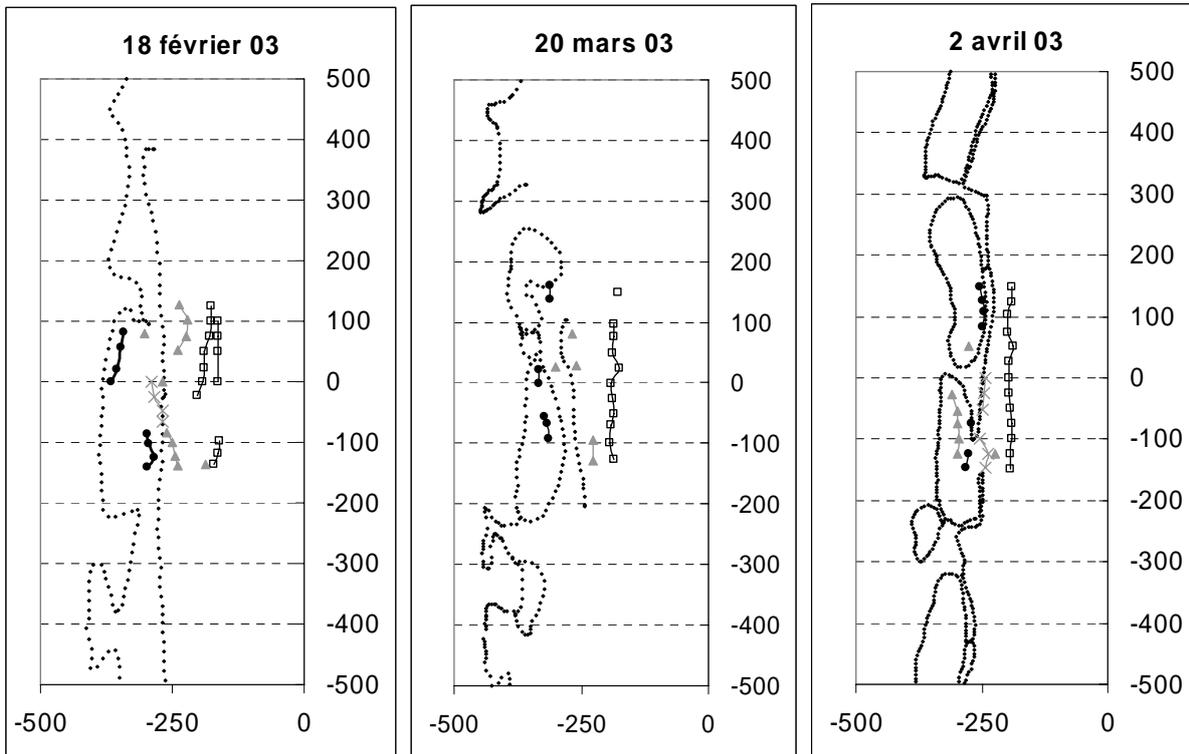
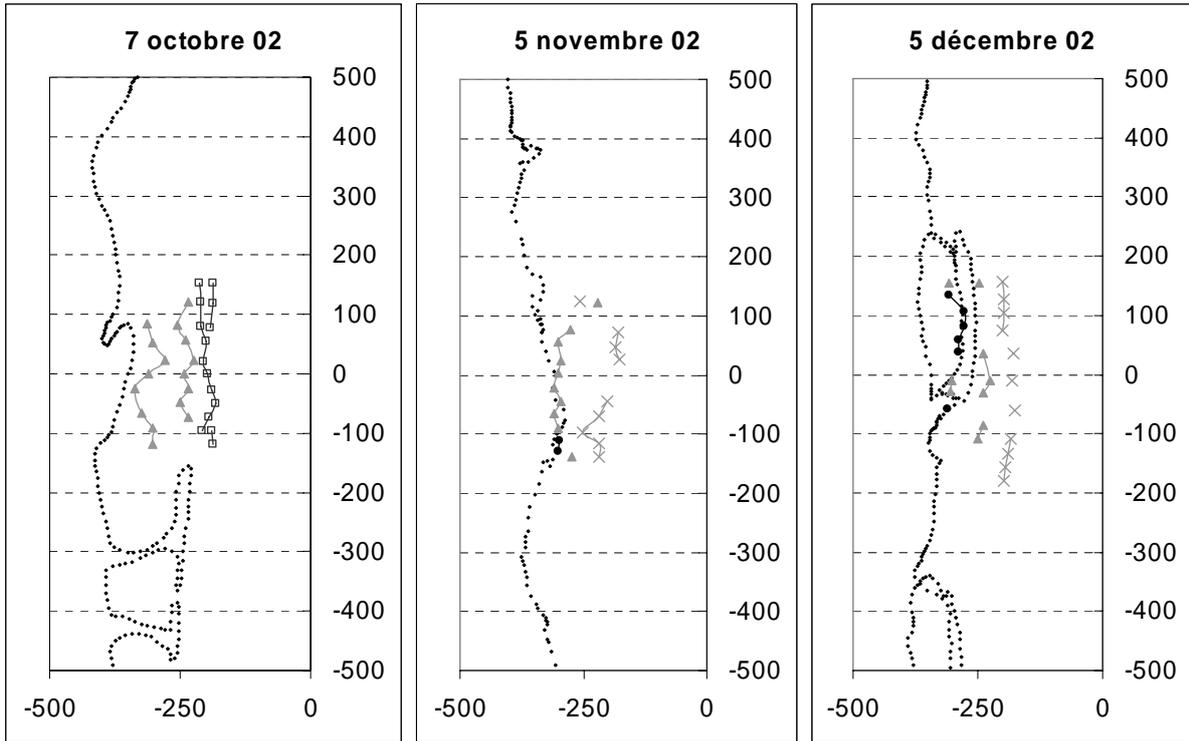
2002	7-oct.	5-nov.	5-déc.						
2003	18-févr.	20-mars	2-avr.	17-avr.	16-juin	10-sept.	26-sept.	14-oct.	28-oct.
début 2004	22-janv.	9-févr.	20-févr.	9-mars	22-mars	6-avr.	19-avr.	18-mai	
fin 2004	2-juil.	20-juil.	31-août	16-sept.	29-sept.	14-oct.	12-nov.	26-nov.	

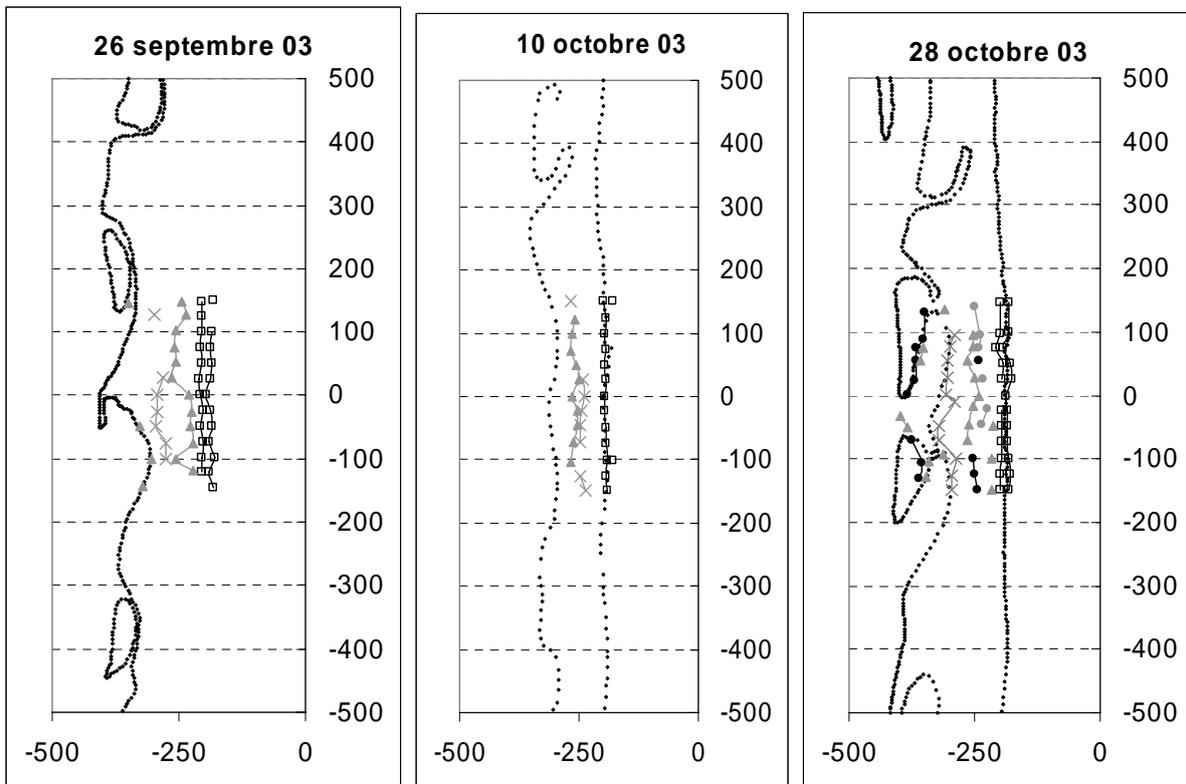
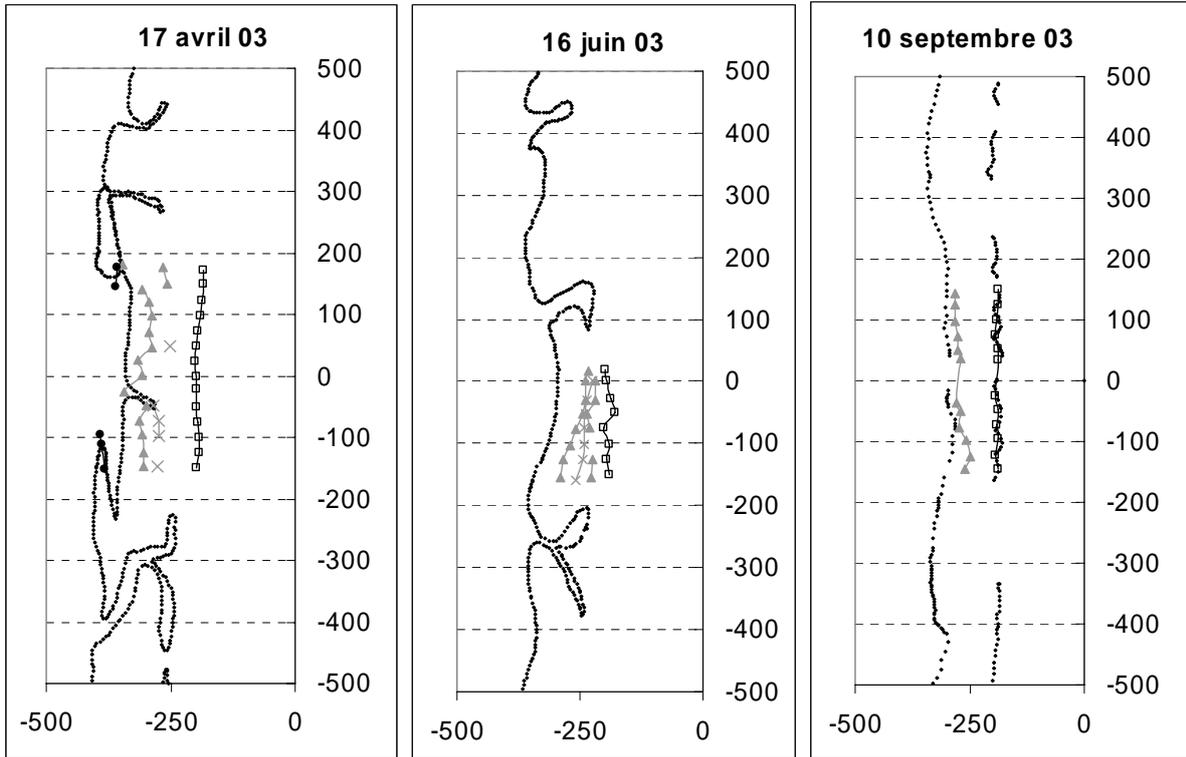
En blanc, topographie par tachéomètre laser Leica Wild TC 500

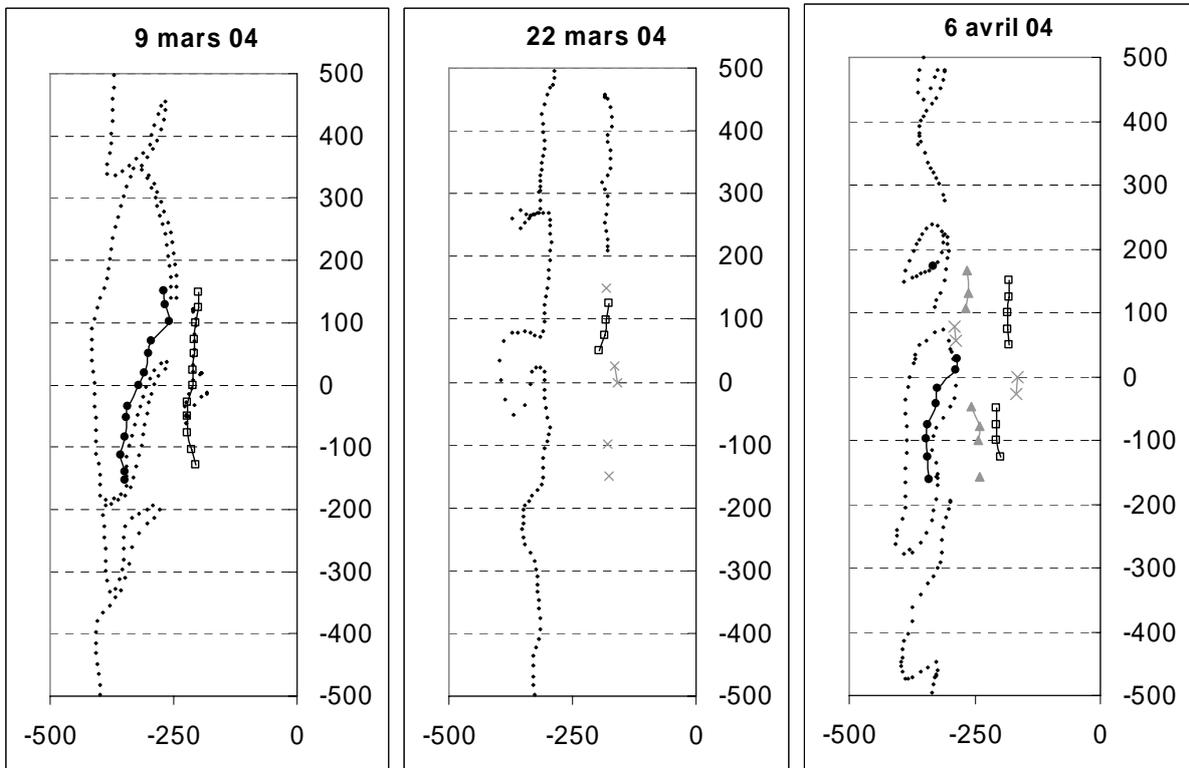
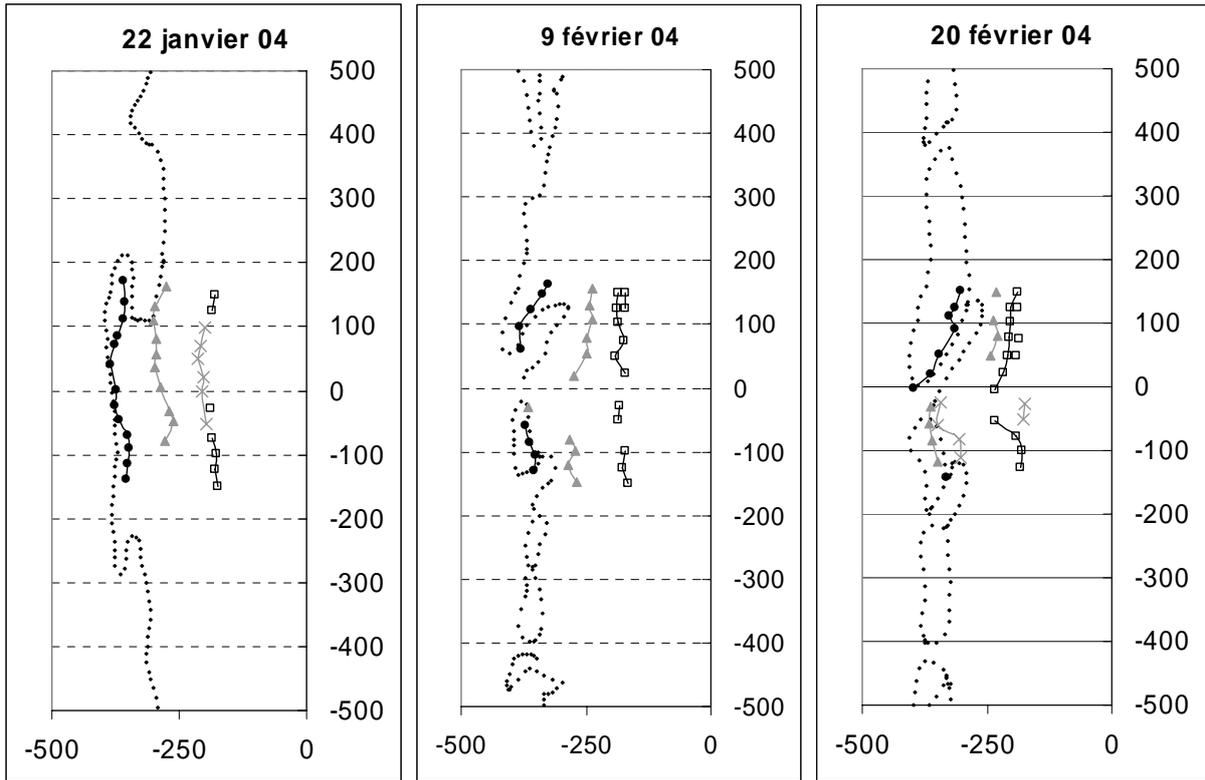
En gris, topographie par GPS différentiel cinématique Trimble 5700

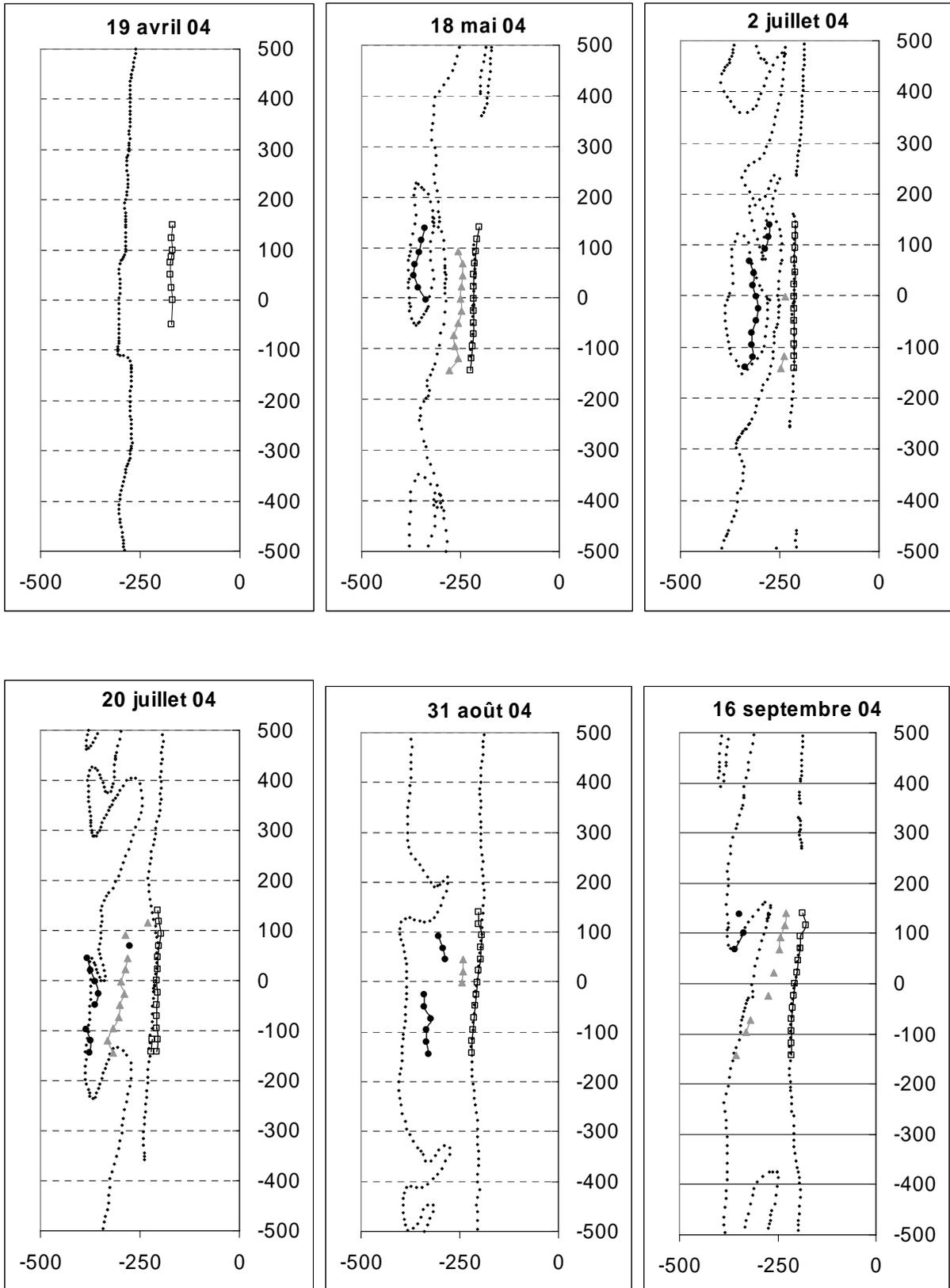
Opérateurs : F. DESMAZES, G. OGGIAN, S. BUJAN, P. BRETTEL, D. MICHEL.

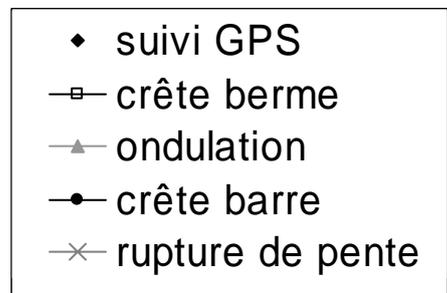
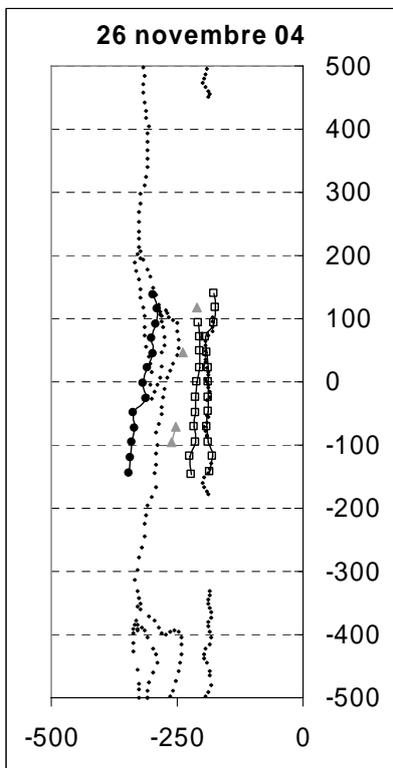
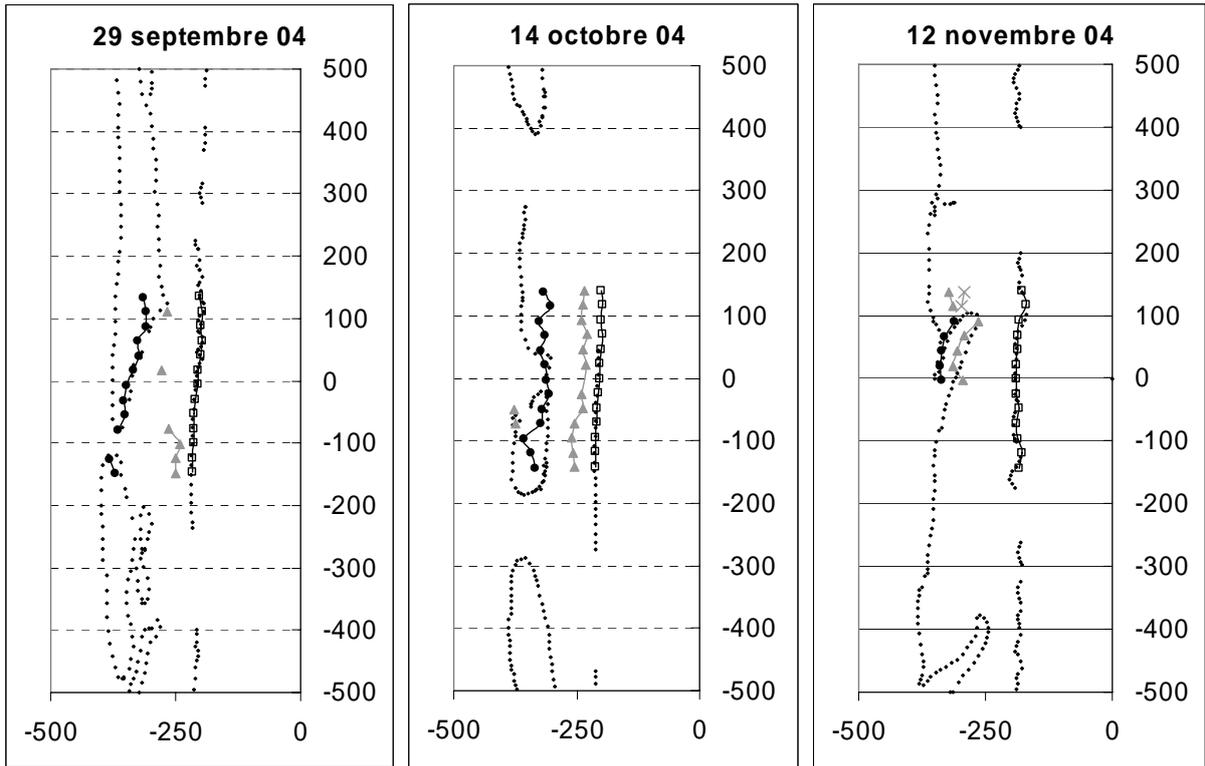
Le suivi GPS des structures n'a pas été effectué pour les levés à profils multiples des 21 janvier 03, 10 novembre 03 et 05 mai 04.











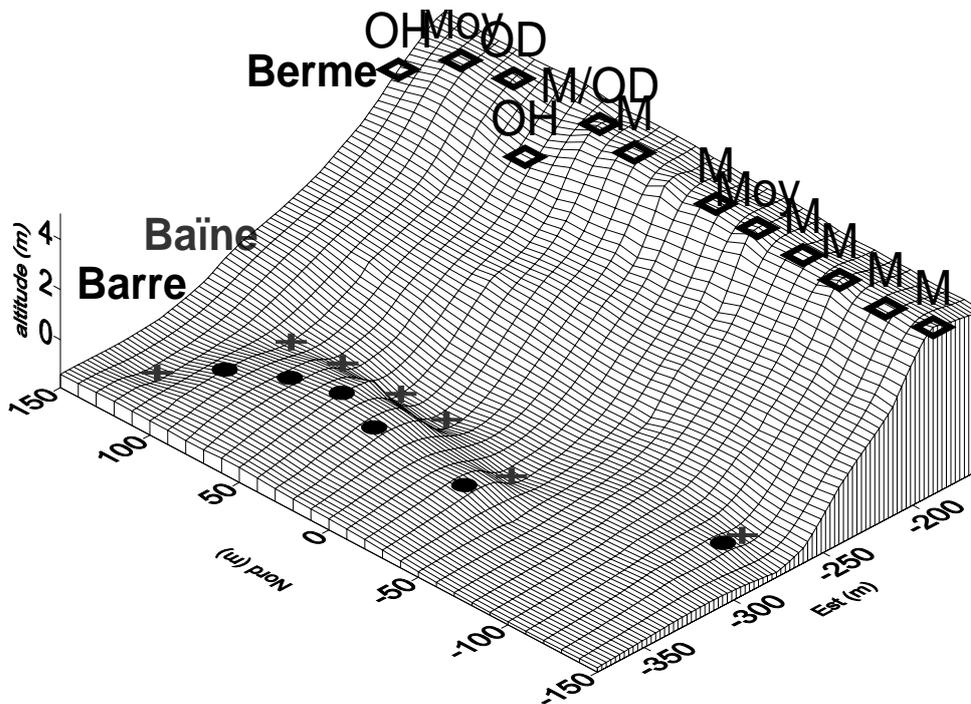
ANNEXE 3

**Exemples d'évolutions spatiales et temporelles de la
forme des bermes sur la plage du Truc Vert.**

Exemples d'évolutions spatiales et temporelles de la forme des bermes sur la plage du Truc Vert

Evolution spatiale de la forme d'une berme

Cas du 15 octobre 2001, mission PNEC 2001.
Analyse pseudo-3D du levé multi-profil et représentation du MNT.

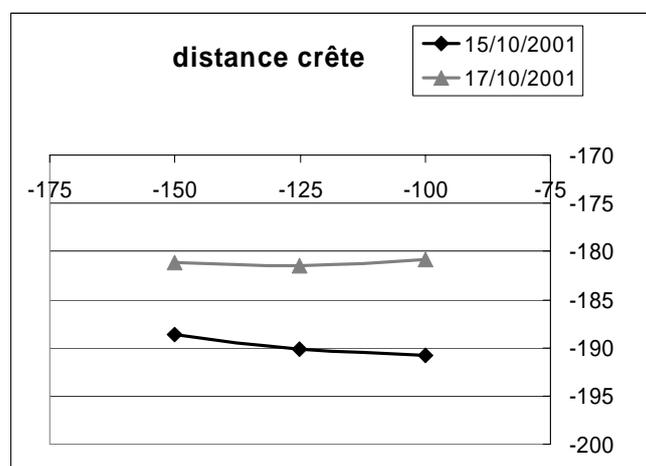


LEGENDE

OH = ondulation du haut de plage ; **OD** = ondulation du pied de dune ; **Moy** = berme moyenne ; **M** = berme marquée
Carré = crête de berme ; croix = fond de baigne ; rond = sommet de barre intertidale.

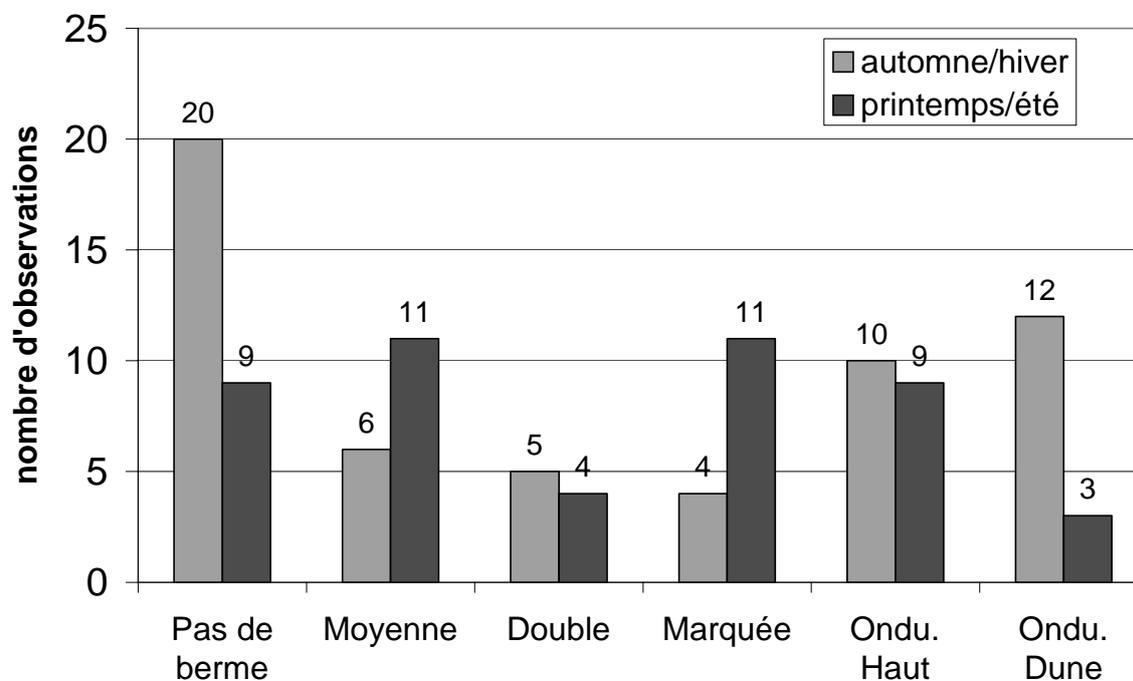
Evolution de la berme à court terme.

Cas de la crête de berme pour 3 profils mesurés durant la mission PNEC 2001.



Evolution saisonnière de la berme

Histogramme établi à partir des analyses de l'ensemble des profils centraux mesurés sur la zone d'étude du Truc Vert depuis 1997 (voir chapitre III).



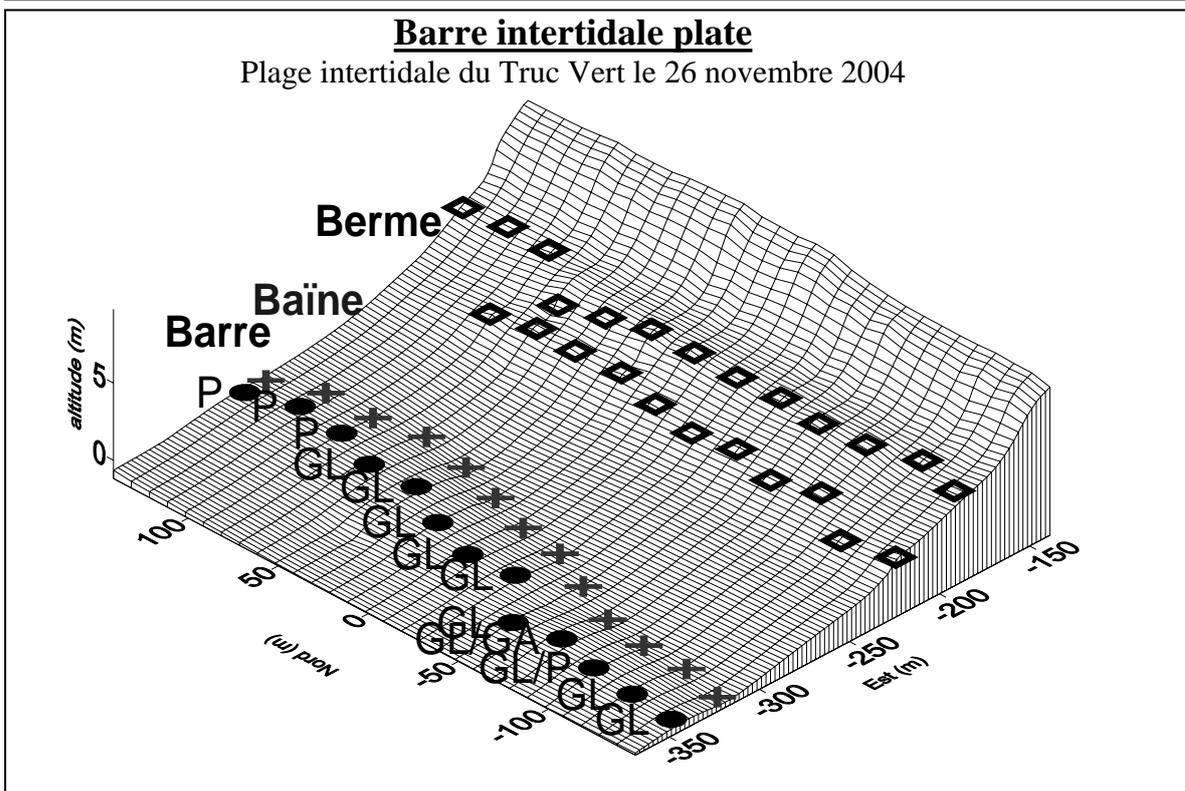
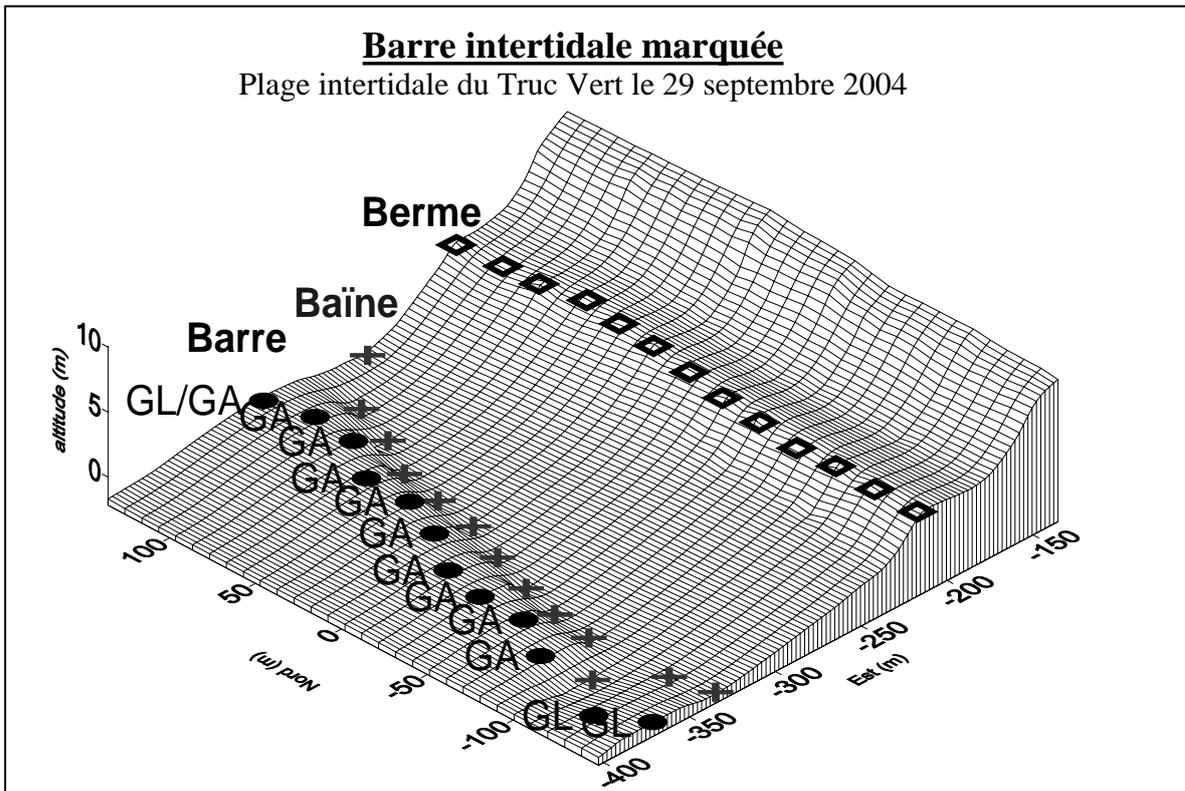
ANNEXE 4

**Formes des barres intertidales.
Analyse de 2 exemples de levés topographiques à
profils multiples.**

Formes des barres intertidales, analyse pseudo-3D

LEGENDE

GA = versant interne de grande amplitude ; **GL** = versant interne de grande largeur ; **P** = versant interne de petite amplitude et petite largeur.

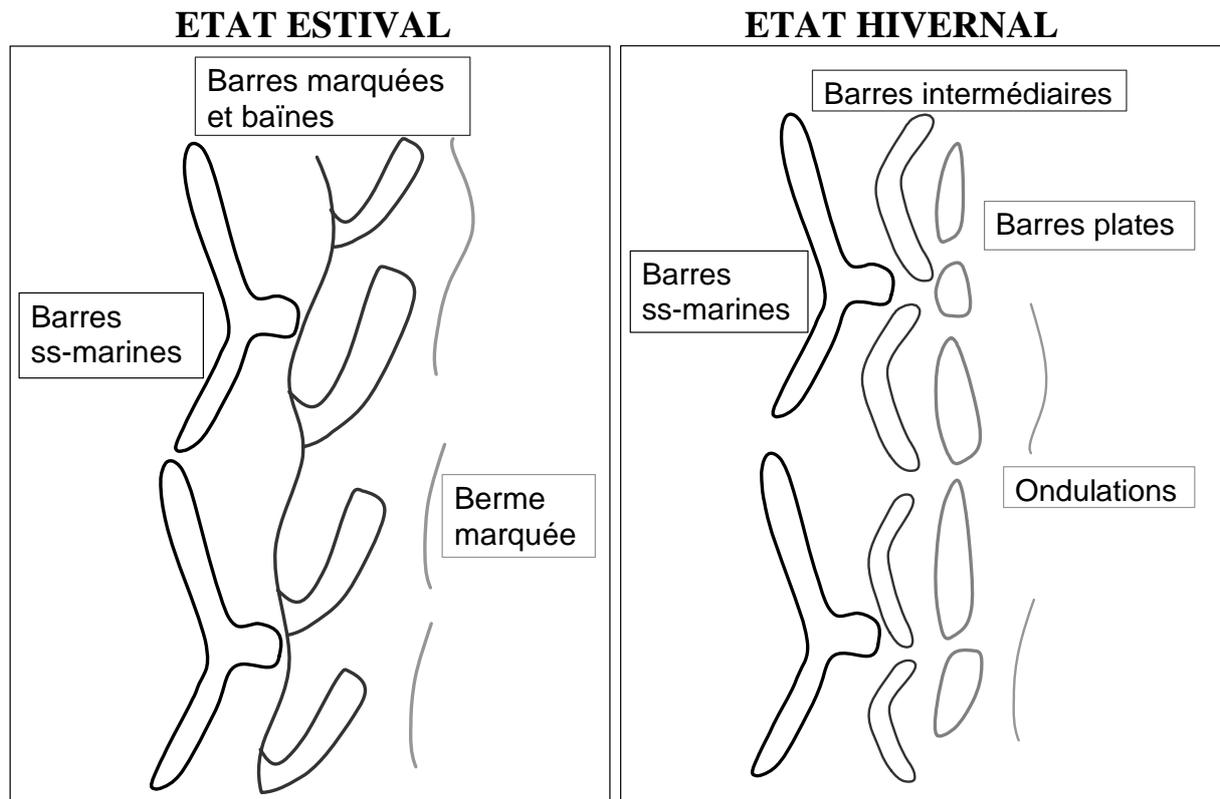


ANNEXE 5

**Hypothèse de deux états morphodynamiques
de la plage du Truc Vert.**

Hypothèse de deux états morphodynamiques de la plage du Truc Vert

Ces hypothèses s'appuient sur les observations effectuées durant plus de 3 ans sur la plage du Truc Vert. L'existence de ces 2 états de la plage doit cependant être vérifiée par la mesure.



Ces schémas constituent des pistes de travail pour mieux comprendre et mieux mesurer cet environnement littoral.

Ils représentent une zone de 2000 m longshore et de 1000 m cross-shore.

L'état estival est réfléchif, caractéristique de conditions de houle plutôt faibles.

L'état hivernal est dissipatif, résultat de l'action de fortes houles.

Les états intermédiaires doivent également être observés et mesurés.

ANNEXE 6

Répartition du travail fourni pour cette thèse.

Répartition du travail fourni pour cette thèse

Traitement et analyse des données :8 mois

Développement du système vidéo (veille technologique, acquisition du matériel, écriture des programmes informatiques, mise au point) :8 mois

Rédaction de la thèse :6 mois

Monitorat :4 mois

Terrain et missions en mer :3 mois

Rédaction des rapports trimestriels pour le SHOM :3 mois

Formation, congrès, colloques :2 mois

Bibliographie :2 mois

Caractérisation des barres sableuses d'une plage de la côte aquitaine.

Exemple de la plage du Truc Vert.

Resumé

Les plages de la côte aquitaine sont structurées par trois types de barres sableuses : la berme en haut de plage, le système de barre et baie en bas de plage intertidale et la barre sous-marine. Cette thèse a pour objectif de décrire la morphologie de ces formes sédimentaires modelées par les processus hydrodynamiques. La base de données utilisée est composée de 104 profils topographiques perpendiculaires à la côte et de 5 levés bathymétriques de la zone sous-marine.

La berme est observée sur 73 profils. Un traitement statistique basé sur une analyse en composantes principales (ACP) et une classification ascendante hiérarchique (CAH) a permis de mettre en évidence 5 classes différentes. Les barres et baies sont observées plus difficilement avec les techniques de topographie. Seul le versant interne des structures peut être étudié sur 48 profils perpendiculaires. Les analyses indiquent que trois types de structures peuvent être distinguées. Enfin, la forme tridimensionnelle des barres sous-marines a pu être décrite à partir des mesures bathymétriques. Le modèle morphologique simplifié montre que chaque système a une forme en « Y ».

A ce travail d'analyse des données, s'ajoute aussi la mise au point d'un système de télédétection vidéo. Cet outil doit permettre d'observer l'ensemble des structures sédimentaires de la plage, à une fréquence temporelle élevée. Le développement de cette technique et les premiers tests sont présentés.

Mots clés : littoral, plage, barres sableuses, géomorphologie, statistiques multivariées, développement technique, télédétection vidéo.

Sand bars of Truc Vert Beach, Aquitaine, France.

Abstract

The beaches along the Aquitaine coast are formed by three types of sandbars : 1) berm (on the foreshore or backshore), 2) ridge and runnel system (inshore) and 3) nearshore bars (offshore). The aim of this thesis is to describe the morphology of these sedimentary structures patterned by hydrodynamic processes. The data base is made up of 104 cross-shore beach profiles and five bathymetric surveys on the nearshore zone.

The berm is observed on 73 beach profiles. A principal components analysis and a cluster analysis focus on five different berm states. Measurements of ridge and runnel systems have been performed with more difficulty using topographic methods. Only the inside slope of the structures can be studied through the use of 48 cross-shore beach profiles. The analyses show that three types of structures can be perceived. Finally, three-dimensional nearshore bars can be observed through a bathymetric survey. The morphological model of this structure shows that each system is Y-shaped.

The work of analyzing the data was enhanced through a video-imaging system. This tool should enable a high frequency study of all beach sediment structures. This thesis presents and explains the technological development as well as the first tests.

Keywords : Coastal zone, beach, sand bars, geomorphology, multivariate statistics, technical development, video imagery.