

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر و تهيئة الساحل

Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER  
EN SCIENCES DE LA MER

OPTION : Aménagement du Littoral

Thème :

**Analyse statistique de l'évolution morphodynamique des  
plages (plage de Boumerdès Ouest)**

Présenté par :

**M. Mohammed Nadjib HAMMOUD**

Soutenu le : 05 /11 /2014 devant le jury suivant :

<b>M<sup>me</sup> MEHDID. S</b>	<b>Maître assistante A</b>	Présidente
<b>M. MEZOUAR. K</b>	<b>Maître de Conférences B</b>	Promoteur
<b>M. GUERFI. M</b>	<b>Maître de Conférences A</b>	Examineur

Promotion : 2014

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر و تهيئة الساحل

Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER  
EN SCIENCES DE LA MER

OPTION : Aménagement du Littoral

Thème :

**Analyse statistique de l'évolution morphodynamique des  
plages (plage de Boumerdès Ouest)**

Présenté par :

**M. Mohammed Nadjib HAMMOUD**

Soutenu le : 05 /11 /2014 devant le jury suivant :

<b>M<sup>me</sup> MEHDID. S</b>	<b>Maître assistante A</b>	Présidente
<b>M. MEZOUAR. K</b>	<b>Maître de Conférences B</b>	Promoteur
<b>M. GUERFI. M</b>	<b>Maître de Conférences A</b>	Examineur

Promotion : 2014

## Remerciements

*Au terme de ce travail, je remercie Dieu le Tout Puissant pour m'avoir donné la force dans les moments difficiles d'éditer ce mémoire.*

*Je tiens à exprimer ma reconnaissance à tous les membres de ce jury, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail.*

*Je remercie Mr Khoudir MEZOVAR d'avoir accepté de diriger et de suivre constamment la progression de ce travail par ses suggestions, sa disponibilité et son aide.*

*Je tiens à remercier Mme MEHDID. S d'avoir accepté de présider le jury de cette soutenance.*

*Je tiens à remercier Mr GUERFI. M d'avoir pris le temps d'examiner ce travail.*

*Je souhaitais adresser mes remerciements les plus sincères au personnel de l'ENNSMAL qui m'ont apporté leurs aides et encouragements.*

*Je tiens aussi à remercier vivement Khazimi O, Adjal M pour leurs contributions à réaliser ce travail.*

*C'est un plaisir autant qu'un devoir d'exprimer ma gratitude et ma reconnaissance à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin, pour la réalisation de ce modeste travail.*

*Je suis reconnaissant à tous nos enseignants qui ont contribué à ma formation et à toute personne qui m'a appris une lettre ou une phrase, qu'ils trouvent ici mes reconnaissances et un petit fruit de leurs sueurs.*

**Merci à tous et à toutes**

# Dédicaces

Mes chaleureuses dédicaces vont à mes parents, à ma mère qui a été toujours là pour moi, mon père qui a toujours eu confiance en moi. Je ne les remercierai jamais assez pour leur présence à mes côtés durant tous les moments de ma vie.

Je dédie ce travail aussi à mon oncle **Said** et sa famille qu'on m'a bien accueilli pendant ces cinq ans, et je les remercie pour leur encouragements et inestimable soutien.

À Ka3bool

Mes frères : Islam & Miro

Mes cousins : Hichem, Zinou, Moob & Reda

Ma cousine : Souad

Mes grandes mères

Mes sweeties Bagrates: Hannouche, Sibem et la méchante Soum

& à Mes très chères yeux : Batata Lyn & Souris ♥♥♥

Je remercie vivement et profondément toutes personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire et en particulier les membres du **CEE** avec qui j'ai passé des moments inoubliables qui resteront à jamais gravé dans ma mémoire.

Je ne saurais oublier de remercier Mendil, Ho, Marwa & Ouss, pour leurs aides et précieuses conseils, des moments inoubliables avec eux.

À Ns, Hamza 13, Lamine, So, Elbadi, Nassim, Amine, Moob, Nazim, TamTam, Na's, Abola, Faycal, Didja, Chabbus, Yacine, MJ, Hichem, Chan, Soussou, Abir, Wafa, Rach, Nezhly, Nana, Mnl, Yasmine, Bina, Fair, Nada, Wissem, Youss, Khalida, Ania, Cyria & Marwa

Les mariées Cherif & Yamm

Et biensur Farchita ☺ qui m'ont constamment aidé avec leurs conseils, leurs encouragements et leur soutien moral.

Sans oublier tous mes amis surtout la promotion Aménagement et ceux qui ont participé avec moi à Injaz & FIE

À

Zak, Lakh, Malik, Salah, Minou, Chin, Romaiissa, Kovi, Mois, Aicha, Mab, Fatchy, Cher, Tina

À Djzeera & Explorer & Nildou production

Je n'oublierai pas de remercier mes amis : Zinou, Saber, Smsoume & Amine MB

& À Sidah & Nabilo

& à la fin : À vous cher lecteur d'avoir consacré votre temps à lire ce travail.

Najeeb 🎵☺

*La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne.  
La pratique, c'est quand tout fonctionne  
et que personne ne sait pourquoi.*

*Albert Einstein*

# SOMMAIRE

<b>Introduction Générale</b> .....	12
<b>Chapitre I : Généralités sur le Processus hydro-sédimentaires des plages sableuses</b>	
<b>I.1</b> Le système littoral .....	14
<b>I.2</b> L'évolution morphodynamique .....	16
<b>I.3</b> Relation spatio-temporelles en morphodynamique côtière .....	17
<b>I.4</b> Profil général d'une côte sableuse .....	18
<b>I.5</b> Zonation hydrodynamique du littoral .....	19
<b>I.6</b> Processus hydrosédimentaire .....	21
<b>Chapitre II : Présentation de la zone d'étude</b>	
<b>II.1</b> Présentation générale du site d'étude .....	25
<b>II.2</b> Facteurs hydrodynamiques .....	26
<b>II.2.1</b> Les vents .....	26
<b>II.2.2</b> La houle .....	28
<b>II.3</b> Modélisation morpho dynamique .....	30
<b>II.3.1</b> Modèle spectral de vague SWAN .....	30
<b>Chapitre III : Transport sédimentaire et morphodynamique</b>	
<b>III.1</b> Transport sédimentaire sur les plages sableuses .....	35
<b>III.2</b> Mécanismes de transport solide .....	35
<b>III.3</b> Transport sédimentaire sous l'action de la houle déferlante et les courants engendrés .....	39
<b>III.3.1</b> Transport sédimentaire sous l'action de la houle .....	39
<b>III.3.2</b> Transport sédimentaire sous l'action des courants engendrés .....	39
<b>III.4</b> Validation des formules de transport longitudinal .....	40
<b>III.4.1</b> Quantification du débit solide du littoral de Boumerdès .....	40
<b>Chapitre IV : Répartition spatiale et dynamique des dépôts sédimentaires</b>	
<b>IV.1</b> Le modèle McLaren/Gao et Collins .....	46
<b>IV.1.1</b> Principe du model .....	46
<b>IV.1.2</b> Principe et limites du calcul des tendances de transport sédimentaire..	47
<b>IV.1.3</b> Interprétation des résultats (GSTA) .....	49

**Chapitre V: Analyse statistique de l'évolution morphologique des plages sableuses.**

<b>V.1</b>	Introduction .....	52
<b>V.2</b>	L'analyse factorielle unidimensionnelle .....	52
<b>V.2.1</b>	Principe de la méthode .....	52
<b>V.2.2</b>	Revue bibliographique de l'utilisation de la méthode .....	53
<b>V.3</b>	L'analyse factorielle bidimensionnelle .....	54
<b>V.3.1</b>	Principe de la méthode .....	54
<b>V.3.2</b>	Revue bibliographique de l'utilisation de la méthode .....	56
<b>V.4</b>	Résultats de l'analyse factorielle .....	56
<b>V.5</b>	Conclusion .....	60
	<b>Conclusion générale</b> .....	63
	<b>Bibliographie</b> .....	66
	<b>Annexes</b> .....	70

<b>Figure n°01 :</b> Schéma d'un système littoral de plage sableuse .....	04
<b>Figure n°02 :</b> Relations spatio-temporelle des systèmes morpho-dynamiques côtiers .....	05
<b>Figure n°03 :</b> Terminologie utilisée pour la description du profil de plage .....	07
<b>Figure n°04 :</b> Représentation schématique des différents termes adoptés lors de l'étude du système littoral .....	08
<b>Figure n°05 :</b> Echelles spatio-temporelles des processus hydrodynamiques en zone de surf.....	09
<b>Figure n°06 :</b> Processus hydrodynamiques dans la zone côtière .....	10
<b>Figure n°07 :</b> Représentation des paramètres caractéristique des vagues .....	11
<b>Figure n°08 :</b> Formation d'une dépression et vent associé à partir d'un conflit entre masses d'air chaud et froid générant des trains de houle.....	11
<b>Figure n°09 :</b> Situation géographique de la plage de Boumerdès Ouest .....	12
<b>Figure n°10 :</b> Carte bathymétrique de la plage de Boumerdès Ouest .....	13
<b>Figure n°11 :</b> Rose annuelles des vents au large des côtes algériennes .....	14
<b>Figure n°12:</b> Simulation de la houle pour une direction 45°N et une période de 10s .....	19
<b>Figure n°13:</b> Simulation de la houle pour une direction 360°N et une période de 08s .....	19
<b>Figure n°14:</b> Simulation de la houle pour une direction 315°N et une période de 06s .....	19
<b>Figure n°15:</b> Les trois modes de transport sédimentaire .....	24
<b>Figure n°16:</b> Modélisation du transport sédimentaire dans la plage de Boumerdès Ouest ..	35
<b>Figure n°17 :</b> Variabilité morphologique du profil de la plage de Boumerdès Ouest .....	40
<b>Figure n°18 :</b> Premiers modes issus de l'analyse factorielle 1D de la plage de Boumerdès Ouest .....	42
<b>Figure n°19:</b> Seconds modes issus de l'analyse factorielle 1D .....	43
<b>Figure n°20:</b> Troisiemes modes issus de l'analyse factorielle 1D .....	44

<b>Tableau n°01</b> : Amplitude des houles en fonction des directions .....	16
<b>Tableau n°02</b> : Conditions de houles retenues dans le cadre de cette étude .....	18
<b>Tableau n°03</b> : Comparaison des volumes obtenus d'après les trois formules .....	30
<b>Tableau n°04</b> : Relations entre les paramètres granulométriques (en unité de phi) de deux station A et B, pour un transport sédimentaire de A vers B, de type FB- et CB+ .....	32
<b>Tableau n°05</b> : Inertie et variance expliquées par les modes issus de l'analyse factorielle 1-D .....	41

**Liste des abréviations :**

<b>1D :</b>	Unidimensionnelle
<b>2D :</b>	Bidimensionnelle
<b>A.F :</b>	Analyse Factorielle
<b>D<sub>CR</sub> :</b>	Distance critique
<b>Dir. :</b>	Direction
<b>G.P.S :</b>	Global Positioning System.
<b>GSTA:</b>	Grain Size Trend Analysis.
<b>H<sub>s</sub> :</b>	Hauteur significative.
<b>ISMAL:</b>	Institut des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.
<b>K.N.M.I :</b>	Institut Météorologique Royal Néerlandais.
<b>L.E.M:</b>	Laboratoire des Etudes Maritimes.
<b>O.N.M :</b>	Office National de Météorologie.
<b>P.E.A.I.Z.C :</b>	Le Programme Européen pour l'Aménagement Intégré des Zones Côtières.
<b>S.S.M.O:</b>	Summary of Synoptic Meteorological Observations.
<b>S.W.A.N :</b>	Simulating Waves Nearshore
<b>S<sub>k</sub> :</b>	Skewness de Trask
<b>S<sub>o</sub> :</b>	Sorting de trask.
<b>USSMO:</b>	US Naval Weather Service Command.

# INTRODUCTION

## GÉNÉRALE

Le littoral est un lieu de rencontre, où s'expriment avec la plus grande diversité des écosystèmes façonnés par l'action des houles, du vent et des embruns. **(Paskoff, 2001)**.

Ce lieu de convergence et de compétition entre de nombreuses activités humaines, quelquefois concurrentes (industrie, agriculture, transport, tourisme), constitue aussi un patrimoine biologique et paysager de première importance où les équilibres écologiques sont sans cesse fragilisés par les aléas naturels mais également par l'Homme. **(Mezouar, 2009)**

De nos jours, les littoraux, et les plages en particulier, reculent. Entre les pressions économiques et environnementales, la préservation du trait de côte est devenue un enjeu essentiel de ces prochaines années. Il faut pour cela avoir une meilleure compréhension des processus d'érosion. A grande échelle, le recul des plages peut s'expliquer en effectuant un bilan sédimentaire global. Certaines côtes sableuses sont plus affectées par l'érosion. En Algérie par exemple 80% des plages reculent, à différentes vitesses. Depuis quelques années la situation devient inquiétante sur les plages sableuses, comme le cas de ce travail, la zone de Boumerdès.

La plage de Boumerdès dénote un recul de l'ordre de 02 mètres avec une vitesse de recul qui varie entre 0.8 à 2.5 mètres par an. **(Mezouar, 2009)**

Le but de ce projet de mémoire de Master portant sur : « L'analyse statistique de l'évolution morphodynamique des plages sableuses », sera d'apporter des éléments de réponses sur la dynamique sédimentaire et la variabilité morphologique à travers la maîtrise de certaines connaissances et l'analyse des paramètres et des caractéristiques morphosédimentaires. Un autre point sera abordé, il s'agit de la modélisation des phénomènes hydrodynamiques et des mouvements sédimentaires par l'application du modèle **GSTA** (*Gao et Collins, 1994*). Cette méthode est une approche semi-quantitative du transport sédimentaire qui permet d'expliquer les directions des flux sédimentaires entre les différents compartiments constituant cette partie de la plage.

En s'appuyant sur le résultat de modèle dérivé, nous avons élaboré une cartographie descriptive, synthétique et simplifiée.

Notre travail englobe dans ses ailes cinq chapitres :

- ✓ Le premier chapitre est consacré à décrire des généralités sur le processus hydro-sédimentaire.
- ✓ Le second chapitre présente la zone d'étude, ses propriétés essentielles ainsi que les phénomènes qui se produisent dans la zone de déferlement à travers les caractéristiques hydrodynamiques.
- ✓ Le troisième chapitre parle du transit sédimentaire sur les plages sableuses et ses mécanismes.
- ✓ Le quatrième chapitre discute la répartition spatiale et dynamique des dépôts sédimentaires, qui se porte sur les modèles de *Gao et Collins*.
- ✓ Enfin, le cinquième chapitre définit l'analyse statistique de l'évolution des plages à l'aide de l'application de ses analyses factorielles.

CHAPITRE I :

# GÉNÉRALITÉS

SUR LE PROCESSUS HYDRO-SEDIMENTAIRES  
DES PLAGES SABLEUSES

La zone littorale est définie comme « *une bande terrestre et marine dont la largeur varie en fonction du milieu et des besoins de l'aménagement. Elle correspond rarement à des entités administratives ou de planifications existantes. Les systèmes naturels côtiers et les zones dans lesquelles les activités humaines sont liées à l'exploitation des ressources littorales peuvent donc s'étendre bien au-delà des eaux territoriales et à des kilomètres à l'intérieur des terres* » (P.E.A.I.Z.C, 1992)

La proximité de l'eau développe un environnement particulier : dunes, galets, falaises, estuaires. Il se développe un microclimat spécifique au littoral.

Sur les plages exposées aux houles et où les courants de marée sont faibles, l'action des vagues est le moteur des mouvements des masses d'eau et du transport sédimentaire.

La zone littorale est une zone complexe où se produisent de nombreuses interactions entre les agents dynamiques responsables des circulations hydrodynamiques.

### **I.1. Système littoral :**

D'après (Mezouar, 2009 ; Desmazes, 2005) 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. 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 leurs 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.

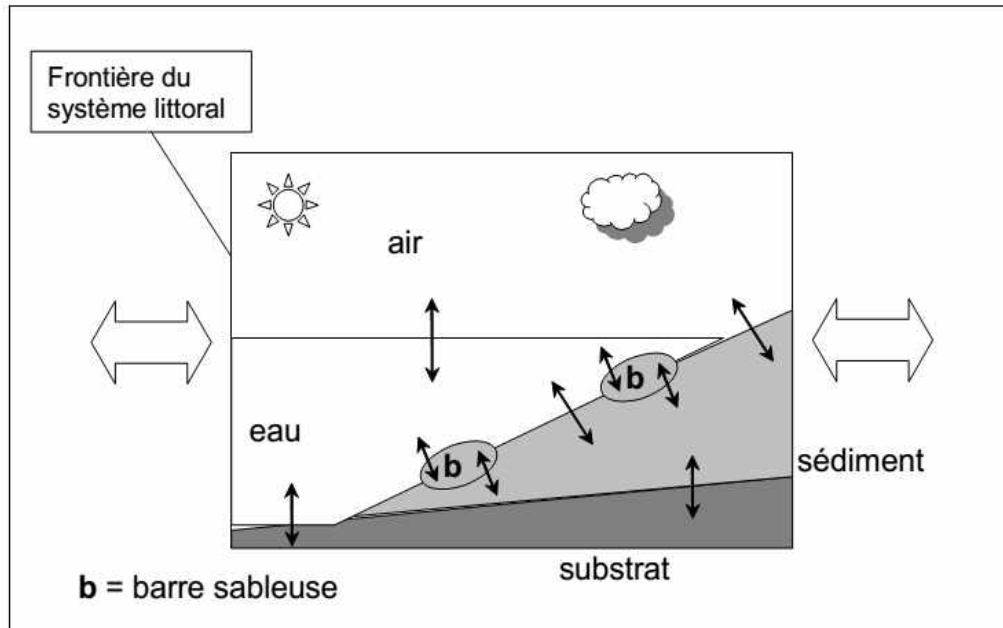
Le fonctionnement du système est dirigé par des phénomènes dépendant du temps, on distingue :

- Les flux d'énergie ou d'éléments qui circulent entre les réservoirs par les réseaux de communication.
- Les « délais » résultent des vitesses de circulation entre les réservoirs.
- 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.

Les environnements littoraux peuvent être considérés comme des systèmes (Figure1). Ils forment une zone géographique complexe, à la limite du continent, de l'océan et de l'atmosphère. 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 : géotechnique, 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 n°01** : 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. (Desmazes, 2005).

### I.1.1 Plusieurs facteurs contribuent à fragiliser le littoral :

Les pressions anthropiques croissantes ; telles que l'urbanisation, la pollution, la densité élevées de population, le développement des activités industrielles et touristiques, les mouvements géomorphologiques naturels, notamment le recul du trait de côte, et l'occurrence des phénomènes climatiques externes liés aux changements climatiques.

Dans notre périmètre d'étude, nous avons déterminé la partie du littoral l'objet de notre étude et cela en conformité avec les définitions suivantes et la nature même du site.

- a. Le littoral, un espace attractif ;
- b. L'espace littoral est un espace commandé ;
- c. L'espace littoral est un espace inégalement aménagé et urbanisé ;
- d. L'espace littoral est convoité.

(Description voir Annexe A).

### I.2. L'évolution morphodynamique :

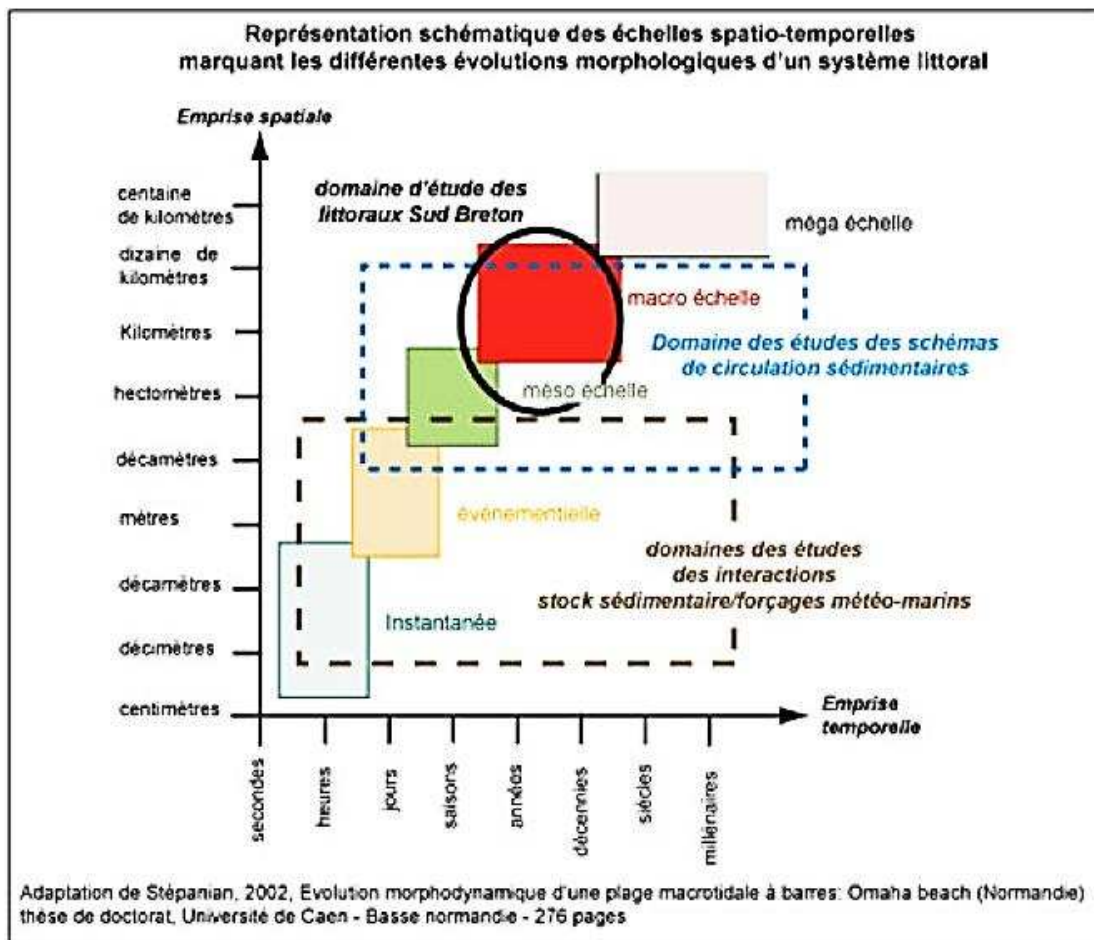
L'évolution morphodynamique d'un système côtier est classiquement décrite comme une évolution markovienne, définie comme une succession d'états morphologiques (Wright & Thom, 1977). Ce concept est la base théorique de développement de modèles d'évolution des plages (Sonu, 1973 ; Short, 1979 ; Wright & Short, 1984 ; Horikawa, 1988 ; Short & Aagaard, 1993 in Mezouar, 2009).

Dans ces modèles supportés par un paramétrage hydrodynamique, le système morphodynamique subit des variations graduelles et réversibles entre deux états extrêmes. Les états intermédiaires dépendant de l'état précédent, l'évolution morphodynamique d'un système doit donc être étudiée en prenant en fonction de celui-ci (notion héritage morphologique, *state dependant*).

**I.3. Relations spatio-temporelles en morphodynamique côtière :**

L'étude de l'évolution morphodynamique des littoraux consiste à relier leur développement morphologique et les forçages aux différentes échelles de temps (**Wright & Thom, 1977**).

En fonction de l'échelle de temps à laquelle il est étudié, le comportement d'un système morphodynamique côtier (plage, embouchure, dune, estuaire) peut être très variable. A chaque échelle de temps est associée une représentativité spatiale se référant à l'amplitude volumique des changements morphologique mis en jeu (*De Vriend, 1991* in **Djouder et Smaoun, 2011**). L'examen des relations spatio-temporelles qui conditionnent le devenir d'un système côtier constitue une mesure de la stabilité du système aux variations de forçage (**Kroon, 1994**).



**Figure n°02 :** Représentation des différentes échelles spatio-temporelles associées à l'analyse en géomorphologie littorale (d'après les travaux de *Cowell et Thom, 1994* in **Pian, 2010**).

Selon la nomenclature de (**De Vriend, 1991**), on peut en particulier distinguer les échelles suivantes :

**La micro-échelle** (échelle des processus) qui concerne les processus physiques, constitutifs de la houle, des courants ou du transport sédimentaire, et agissant à une échelle plus courte que celle du comportement morphodynamique correspondant.

**La méso-échelle** (échelle dynamique) qui concerne le comportement morphodynamique dû à l'interaction entre les processus physiques et la topographie. Elle permet de dater, entre autre, la propagation de corps sédimentaires ou encore la migration des barres.

**La macro-échelle** (échelle de tendance) qui concerne les tendances ayant lieu à une échelle de temps plus longue que celle des comportements morphodynamiques primaires. Ces tendances peuvent être dues aux variations saisonnières de comportement ou à l'évolution progressive des forçages extérieurs (évolution du marnage, élévation du niveau moyen de la mer)

#### **I.4. Profil général d'une côte sableuse :**

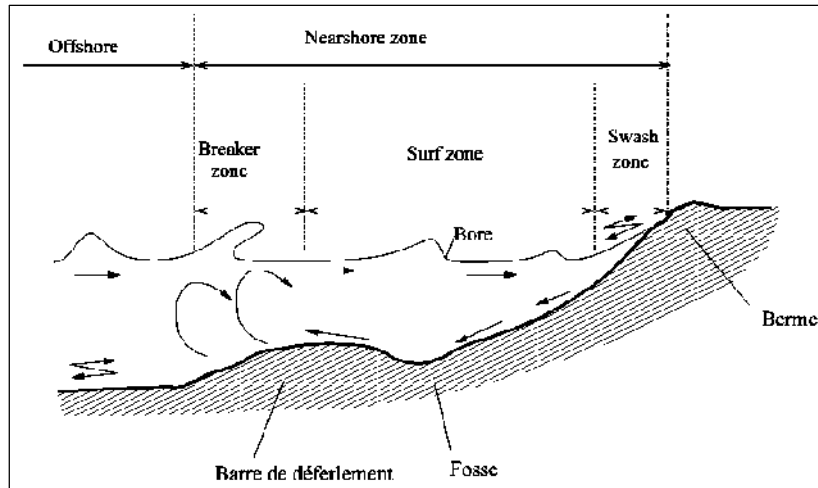
**L'avant-côte** (ou "plage sous-marine", "avant-plage" ou encore "offshore") s'étend depuis le niveau des basses mers jusqu'à la plate-forme continentale (Figure n°03). En réponse aux variations subies par l'estran, l'avant-côte est mobile et ses limites varient temporellement et spatialement selon les apports en sédiments et les conditions morphodynamiques. La pente de l'avant-côte est généralement faible, inférieure à celle du bas de plage. Une grande part de l'énergie des houles est consommée sur ces petits fonds, ce qui réduit d'autant l'attaque de l'estran ou de la dune. Une côte recule donc théoriquement d'autant moins vite que son avant-côte est large et en pente douce. Les avant-côtes rocheuses à écueils jouent également un rôle de barrière, d'une part en provoquant un premier déferlement dans les côtes très battues, d'autre part en freinant les exportations de sable.

**La plage ou estran** ("beach" ou "shore" des anglo-saxons) est la partie du littoral sableux qui s'étend de la ligne des hautes mers jusqu'à celle des basses mers. On distingue généralement le haut de plage du reste de l'estran, quotidiennement soumise au balancement des marées. L'estran est au centre du système : le démaigrissement de la plage fait engraisser l'avant-côte et reculer la dune. Si les sédiments, la pente et le plan de la plage sont en équilibre avec la houle, toute modification de la houle entraîne un changement dans le profil de la plage, donc de l'ensemble du système, ces perturbations pouvant jouer à diverses échelles de temps.

**Les dunes littorales** sont des accumulations éoliennes de sable marin, où la végétation joue un rôle de piège à sédiments en ralentissant les filets d'air. Le massif dunaire littoral fait partie intégrante du système avant-plage / plage / dune. Il est attaqué par la mer lorsque la plage est en érosion : le profil d'équilibre laisse alors sa place à une falaise entretenue par la mer et le vent. L'attaque et le recul durent jusqu'à ce que la plage ait reçu de nouveaux apports sédimentaires (apports transversaux par les houles constructrices, ou longitudinaux par la dérive littorale) et retrouvé son équilibre.

La figure n°03 présente le profil type d'une plage de sédiments sableux. La profondeur décroît du large vers la plage jusqu'à une barre immergée située à la limite de la zone de déferlement. Elle croît ensuite pour former une cuvette, avant de diminuer à nouveau jusqu'au trait de côte matérialisé par l'interface air-eau.

Une berme plus ou moins marquée constitue une structure sédimentaire subaérienne non consolidée présentant une marche à son pied et une plage quasi horizontale à son sommet. Lorsque cette berme est érodée par la houle, il reste une petite structure escarpée qui sépare le haut de plage des dunes qui constituent une réserve sédimentaire.



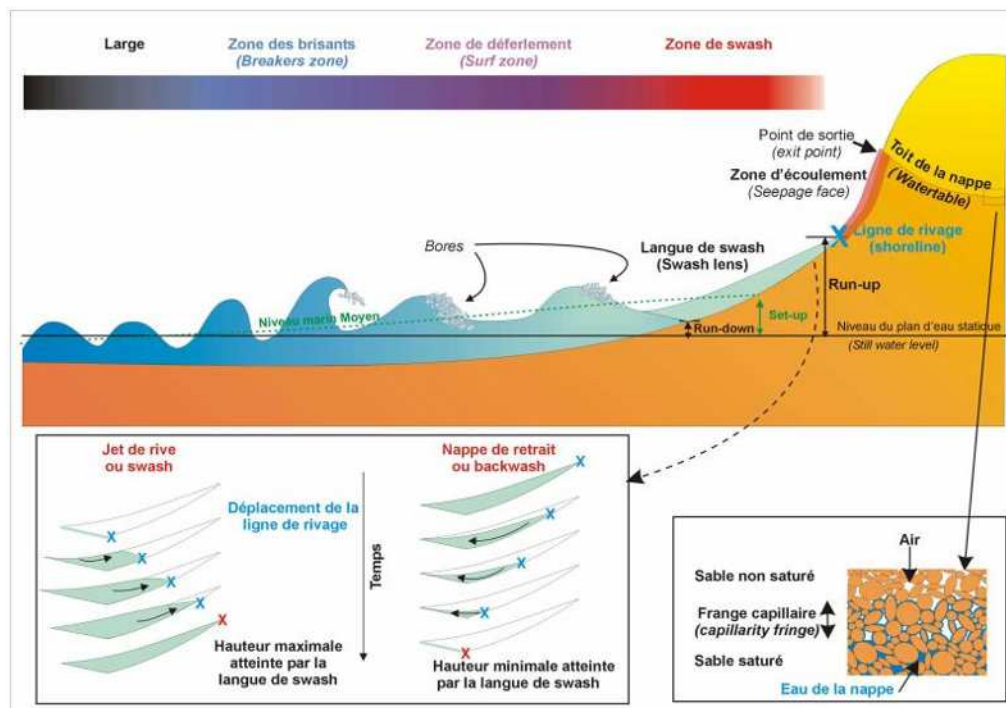
**Figure n°03 :** Terminologie utilisée pour la description du profil de plage (Komar, 1976)

### I.5. Zonation hydrodynamique du littoral

Il en résulte une zonation du domaine côtier et de la plage en fonction des processus hydrodynamiques liés aux transformations des vagues lors de leur propagation :

- **La zone de swash (swash zone) :** cette zone est caractérisée par l'oscillation périodique d'une mince couche d'eau sur la plage sous la forme du jet de rive (uprush ou swash) et de la nappe de retrait (backwash). La périodicité des oscillations est modulée à la fois par la période des vagues déferlantes, mais aussi par les ondes infragravitaires qui ont une influence notable sur l'hydrodynamique de cette zone (Butt & Russel, 2000).
- **La zone de déferlement (surf zone) :** Cette zone marque la transition entre le déferlement des vagues et leur amortissement total sur la plage. C'est une région particulièrement complexe où les vagues, après s'être brisées, se propagent sous forme de fronts d'ondes (bores) et peuvent se reformer pour à nouveau déferler près de la plage. Un courant orienté vers le large compense l'afflux d'eau dans cette zone. Ce courant de retour (undertow) est proportionnel à la hauteur des vagues dans la zone de déferlement (Svendsen, 1984 ; Greenwood & Osborne, 1990). Un courant d'obliquité est également présent dans le cas d'incidence oblique des houles à la côte.

- **La zone des brisants (breaker zone) :** Cette zone très dynamique est le lieu de dissipation maximale de l'énergie des vagues incidentes. Le déferlement des vagues se produit lorsque la profondeur d'eau devient trop faible comparée à leur hauteur. Dans le cas d'une onde monochromatique, le déferlement se produit quand  $h_b = H_b/\gamma$  avec  $\gamma$  comme critère de déferlement ( $\gamma = 0,78$ , *Mc Cowan, 1894*). calculé à partir de mesures in situ, s'avère plus adéquat pour déterminer la hauteur d'eau critique (*Thornton & Guza, 1982 ; Sallenger et al., 1985*). Le type de déferlement est fonction de la pente de la plage, déferlements glissants (spilling breaker) sur des pentes faibles, déferlements plongeants (plunging breaker) et frontaux (surging breaker) sur des fonds à forte pente (**Bonnefille, 1992**).
  
- **La zone de shoaling (shoaling wave zone) :** Il n'existe pas d'équivalent français de shoaling, ce terme anglo-saxon sera donc utilisé dans ce mémoire. Dans cette zone, la profondeur d'eau est telle qu'il se produit une perte d'énergie des vagues par friction sur le fond. Cette friction entraîne une augmentation de la hauteur des vagues et une réduction de la longueur d'onde. Tout au long de la propagation des crêtes vers la côte, il se produit donc une augmentation de la cambrure des vagues ( $H/L$ ) s'accompagnant d'une augmentation de l'asymétrie des courants orbitaux au niveau des fonds ( $U_{on} > U_{off}$ ), qui participent à un transport sédimentaire résiduel vers le haut de plage, dans les conditions d'agitation les plus courantes (*Komar & Miller, 1973, Soulsby, 1997, in Stépanian, 2002*).
  
- **La zone du large (offshore zone) :** Dans cette zone située au niveau de la plateforme continentale, les vagues ne subissent aucune transformation liée à la topographie des fonds, la profondeur d'eau étant trop importante. Cependant, elle peut être épisodiquement affectée par les courants orbitaux des vagues de tempêtes.



**Figure n°04 :** Représentation schématique des différents termes adoptés lors de l'étude du système littoral (**Kulkarni, 2002**)

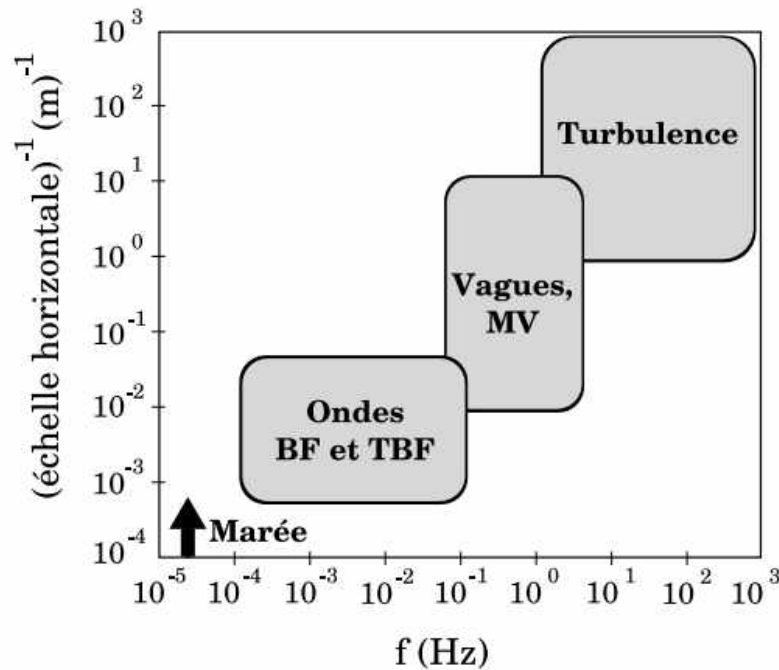
**I.6. Processus hydro-sédimentaire**

Sur les plages exposées aux houles et où les courants de marée sont faibles, l'action des vagues est le moteur des mouvements des masses d'eau et du transport sédimentaire. La vague est une onde progressive qui, en arrivant près des côtes, va subir l'influence du fond. Lorsque la profondeur d'eau diminue, la vitesse de propagation diminue. Dans le cas des fonds rapidement variables, les vagues peuvent être réfléchies ou diffractées. On peut également observer la diffraction du champ de vagues après le passage au-dessus d'un haut-fond.

Les processus hydro-sédimentaires concernent la réponse des particules sédimentaires à l'action des agents hydrodynamiques (courant, vagues). Ils constituent le maillon entre les phénomènes hydrodynamiques et l'évolution morphologique qui reflète l'ajustement des fonds marins à la variabilité spatiale des flux sédimentaires.

Dans le cadre de cette étude nous nous intéressons aux plages sableuses présentant des pentes faibles tel le cas de notre site d'étude (plage de Boumerdes), pour laquelle les processus de diffraction et de réflexion sont souvent négligeables. Par contre, au-dessus de fonds lentement variables, les vagues vont être réfractées. Lorsque le rapport de la hauteur des vagues sur la profondeur d'eau atteint une valeur critique, les vagues deviennent instables et le déferlement bathymétrique est observé. En arrivant en eau peu profonde l'onde primaire va également transférer une partie de son énergie vers les harmoniques.

La figure n°05 illustre les différentes échelles spatio-temporelles des processus hydrodynamiques en zone surf.



**Figure n°05 :** Echelles spatio-temporelles des processus hydrodynamiques en zone de surf. Extrait de *Bonneton (2003)*. **MV** = Mer du vent, **BF** = basse-fréquence (infragravitaire) et **TBF** = très basse-fréquence

### I.6.1 L'hydrodynamique :

#### Les vagues :

La vague est une onde progressive qui, en arrivant près des côtes, va subir l'influence du fond. Lorsque la profondeur d'eau diminue, la vitesse de propagation diminue. Dans le cas des fonds rapidement variables, les vagues peuvent être réfléchies ou diffractées. On peut également observer la diffraction du champ de vagues après le passage au-dessus d'un haut-fond. (Castelle, 2004)

Les ondes progressives correspondent à un phénomène de propagation d'une perturbation depuis un endroit d'un milieu matériel jusqu'à un autre, qui n'engendre pas de « mouvement global » du milieu lui-même. Cette propagation d'une perturbation se traduit par un transport d'énergie, à une vitesse (vitesse de groupe) qui n'est pas forcément identique à celle de la perturbation (vitesse de phase). Concernant les ondes se propageant à l'interface eau/atmosphère (appelées ondes de surface), les forces de rappel (qui s'opposent à la perturbation) sont essentiellement les effets de tension superficielle pour les très faibles longueurs d'ondes (ondes capillaires), et les forces de pression ainsi que la gravité pour les grandes longueurs d'ondes (ondes de gravité). Les tailles caractéristiques des ondes de gravité s'étendent de quelques centimètres à plusieurs kilomètres.

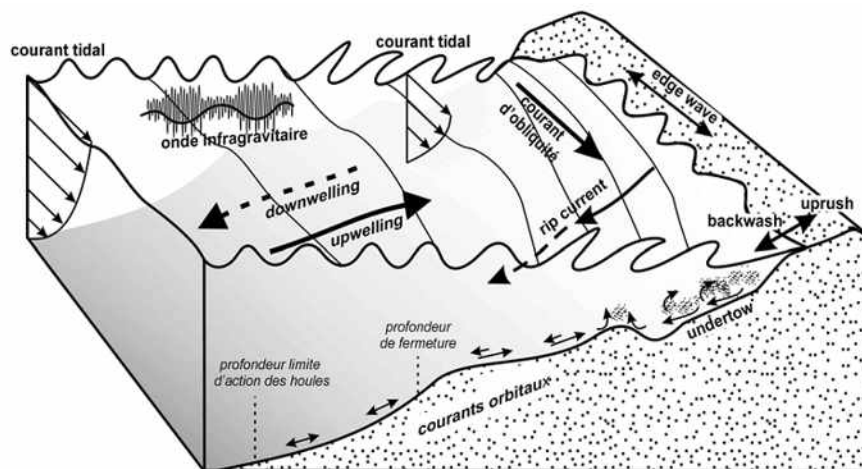
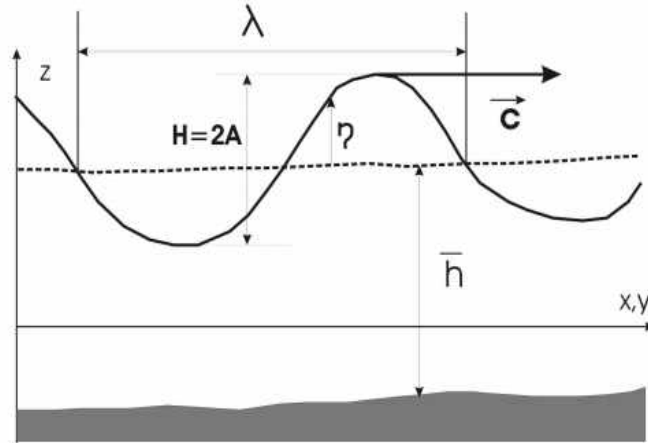


Figure n°06 : Processus hydrodynamiques dans la zone côtière.

Dans cette étude, nous étudierons les ondes de gravité de surface dont les tailles caractéristiques sont de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de mètres. Elles sont plus connues sous le nom de « vagues ». Notre objectif est d'étudier les vagues en zone littorale, c'est à dire là où elles subissent l'influence de la bathymétrie. La figure n°07 montre la schématisation d'un champ de vagues et les différents paramètres qui nous permettent de le caractériser. L'onde a une hauteur  $H$  ( $H = 2A$ , où  $A$  est l'amplitude), une période  $T$ , une longueur d'onde  $\lambda$ , un nombre d'onde  $k$  (avec  $k = 2\pi/\lambda$ ) et se propage dans une profondeur d'eau moyenne à une vitesse  $c$ . On note la côte de la surface libre.

Nous nous intéresserons à des ondes de gravité dont les périodes se situent entre 5 s et 16 s, et qui sont formées par l'action du vent (au large ou à la côte) sur la surface de la mer; Mais nous évoquerons également les ondes de basses fréquences ( $T > 20$  s) dont la formation n'est pas généralement liée à l'action du vent sur la surface de la mer mais à des processus physiques qui affectent les vagues lors de leur propagation en zone littorale.



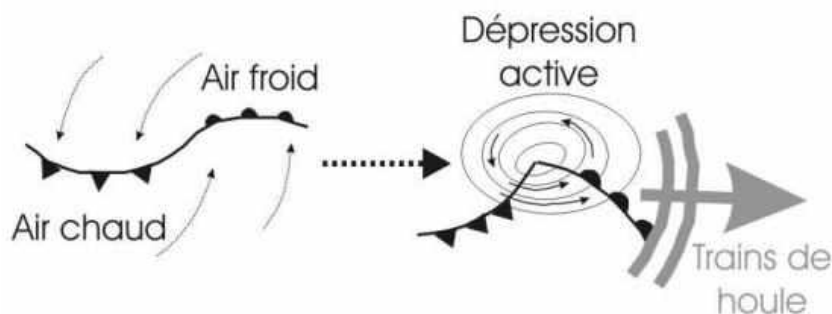
**Figure n°07 :** Représentation des paramètres caractéristique des vagues

À partir des paramètres caractérisant la dynamique des vagues, on peut introduire deux termes adimensionnés  $\varepsilon$  et  $\mu$  qui renvoient respectivement aux effets non linéaires et aux effets de dispersion et sont définis par les relations suivantes :

$$\varepsilon = \frac{H}{d} \quad \mu = \frac{d}{L}$$

**Note sur la formation des vagues au large :**

Le transfert de quantité de mouvement et d'énergie de l'air vers l'eau est à l'origine de la formation des vagues. Les tensions de cisaillement et les gradients de pression locale vont contraindre la surface libre et conduire à la formation d'une superposition d'ondes propagatives qui vont s'amplifier ou se dissiper selon les conditions atmosphériques.



**Figure n°08 :** Formation d'une dépression et vent associé à partir d'un conflit entre masses d'air chaud et froid générant des trains de houle

Classiquement, la présence du vent est due à la présence d'une dépression induite par les conflits de masses d'air polaire (froid) et subtropical (chaud). La figure n°08 montre une schématisation de la formation de vagues en présence d'une dépression.

## CHAPITRE II :

---

# PRÉSENTATION

DE LA ZONE D'ÉTUDE

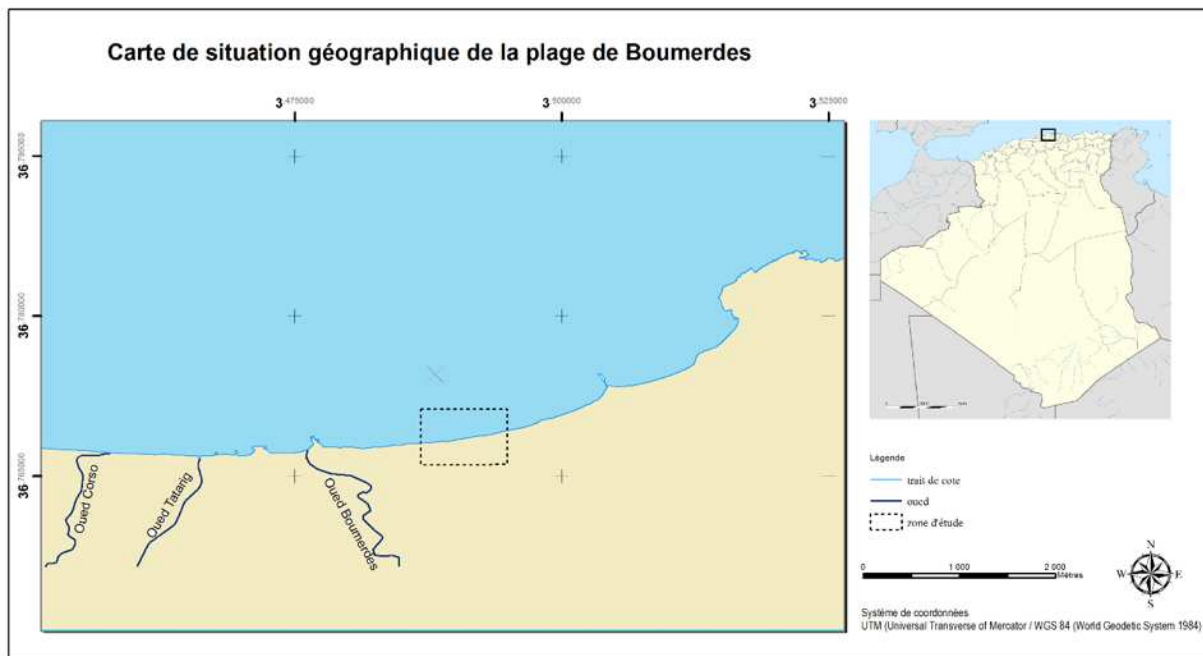
---

## II. 1 Présentation générale de site d'étude :

La ville de Boumerdès est située à 50 Km de l'Est d'Alger ; la plage qui fait l'objet de ce travail est une bande littorale d'un linéaire d'environ 700 m et d'une largeur d'environ 25m (la plage de Boumerdès Ouest).

Délimité par l'Oued de Boumerdès et le Rocher noir à l'Ouest, le Rocher pourri à l'Est, le plateau de Boumerdès et des habitations au Sud et la mer Méditerranée au Nord (**Figure n°09**).

Elle est représenté dans un rectangle où le rivage est orienté SW-NE situé entre les longitudes 3°29'10.65"E et 3°29'40.95"E



**Figure n°09** : Situation géographique de la plage de Boumerdès Ouest. (HAMMOUD, 2014)

(Catre plus grande Voir Annexe A)

### Bathymétrie de la zone :

La carte bathymétrique (**Figure n°10**) montre des isobathes plus au moins irrégulières, espacées à la côte avec une pente douce. La morphologie sous-marine au large est régulière jusqu'à la profondeur de 8m.

Les données de bathymétrie sont fournies par le L.E.M et la carte et réalisée à l'aide du logiciel Surfer 11.

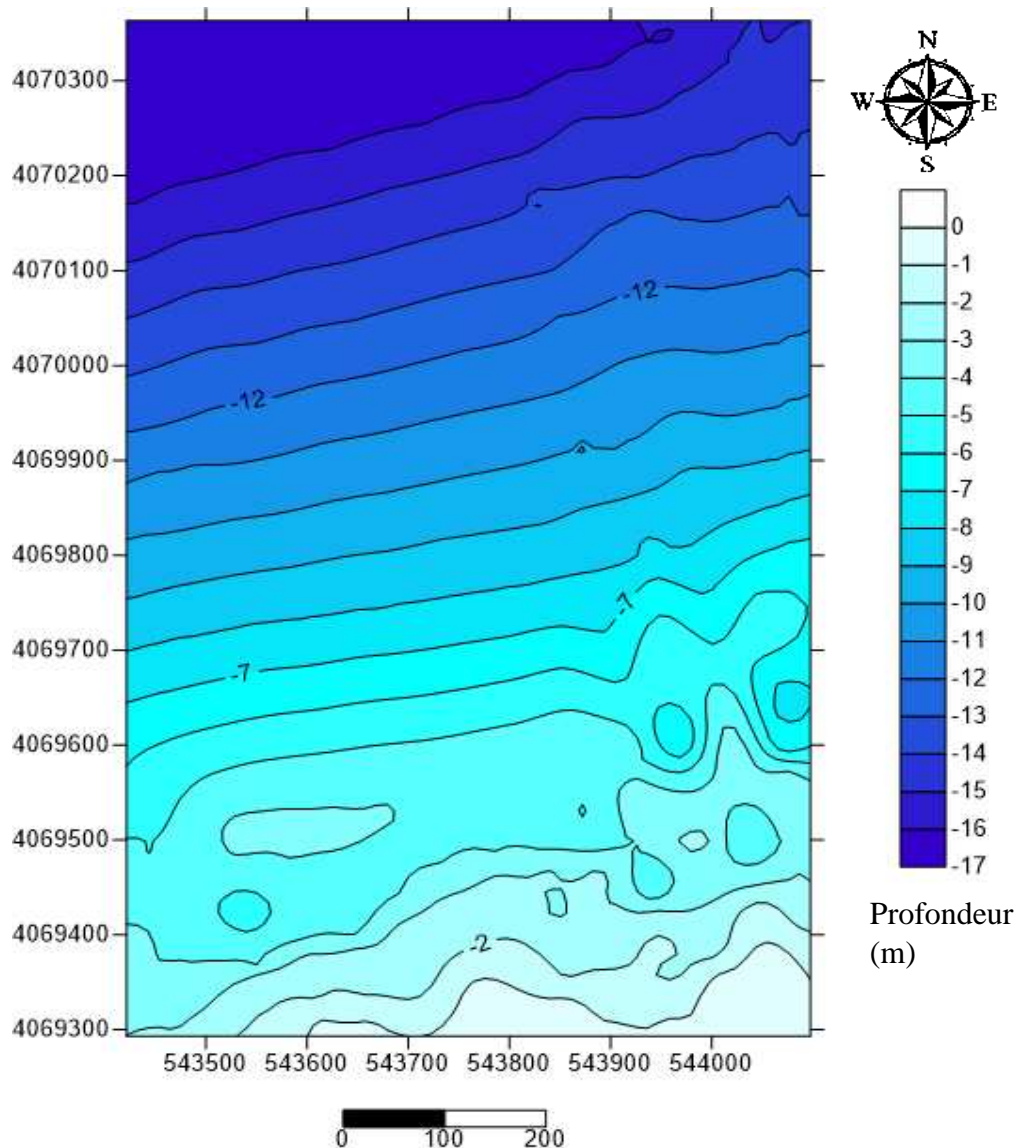


Figure n°10 : Carte bathymétrique de la plage de Boumerdès Ouest (HAMMOUD, 2014)

## II. 2 Facteurs hydrodynamiques :

### II.2.1 Les vents :

Pour une région côtière, la connaissance des régimes des vents est une extrême importance. En effet ils sont des générateurs de vagues et de courants superficiels, leur impact croit avec leur vitesse (*Moulin, 1978 in Mezouar, 2009*). Ils jouent donc un rôle considérable dans l'évolution géomorphologique des milieux littoraux, surtout les côtes basses d'accumulations des régions à climat sec (**Boutiba, 1996**). Ce facteur joue un rôle considérable dans les transferts sédimentaires directement sur la partie aérienne et par les différents agents hydrodynamiques générés par celui-ci sur la partie immergée.

### II.2.1.a. Vent et sédimentologie :

Du point de vue sédimentologique, l'action des vents se manifeste de trois manières :

- En engendrant la houle ;
- En provoquant les transports éoliens ;
- En engendrant des courants.

Dans le cas de la zone de Boumerdès, les deux premiers facteurs (houles, transports éoliens) sont les plus importants. On doit particulièrement souligner le rôle des transports éoliens dans la dynamique sédimentaire de la majeure partie du littoral.

### II.2.1.b. Vent et courant :

Lorsque le vent souffle sur un plan d'eau calme, engendre un courant dont la vitesse et en premier approche de 1 à 2% de celle du vent. S'il existe déjà des courants, ceux-ci sont renforcés ou atténués selon que le vent souffle dans la même direction ou dans le sens contraire.

Ces courants agissant :

- En créant des rigoles d'écoulement.
- En entraînant les matériaux.

L'analyse des régimes de vent (**Tableau B-3 Annexe B**) a été évaluée d'après des mesures effectuées au niveau de l'oued ISSER (1973-1975) par l'USSMO. À travers la lecture de ces données, nous notons que les houles les plus fréquentes sont de secteur Ouest, Est et Nord-est avec des fréquences d'apparitions respectives de 25,20% 23,08% et 18,51%. En période hivernale, les houles d'Ouest prédominent, par contre, en période estivale, ce sont les houles d'Est et Nord-est qui sont les plus dominantes.

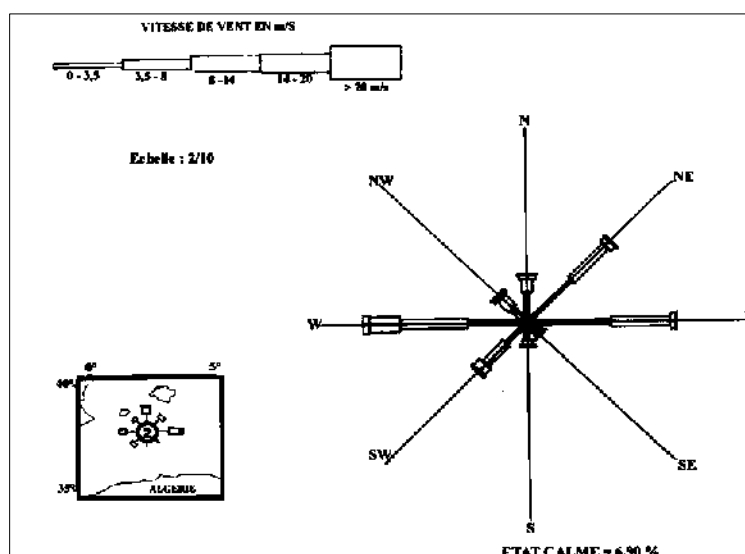


Figure n°11 : Rose annuelles des vents au large des côtes algériennes (données relatives) (USSMO, 1974).

La rose annuelle fait apparaître trois directions essentielles des vents dominants, Ouest, Est et Nord-est avec des fréquences d'apparition respectives de 21.9% , 18.9%, 16.18%. Ils ont une intensité comprise entre 2,5 et 8 m/s. En revanche, lors des tempêtes, les vents d'Ouest peuvent atteindre une vitesse de 20 m/s.

### II.2.2 Les houles :

Avant d'entamer l'analyse des données de houles, il s'avère très important d'avoir certaines notions sur la houle.

La houle est un agent fondamental des transports sédimentaires. En effet, d'une part, elles peuvent provoquer une remise en suspension et un déplacement des matériaux déposés sur les fonds et, d'autre part, elles engendrent, lorsqu'elles sont obliques au rivage, un courant littoral qui transporte des matériaux. Sur l'estran, après le déferlement des vagues, il s'effectue un transport dit en « dents de scie » qui est un mode de transport fondamental pour les galets.

La connaissance des caractéristiques de la houle au large : direction, amplitude, période, énergie...permettent de :

- Mieux analyser les constatations faites quant à l'évolution de littoral,
- déterminer le dimensionnement des ouvrages de protection à réaliser,
- mieux estimer le transit sédimentaire.

Les données concernant les houles proviennent principalement de deux sources :

Les données qui proviennent du **K.N.M.I**, constituées de 20.000 observations " synoships" (observations visuelles à bord des navires) sur une période de 20 ans allant de 1961 à 1980.Ces observations portent sur une zone qui s'étale entre 37° et 38° de latitude Nord et de 2° et 4° de longitude Est.

Les données du **S.S.M.O**. Ces observations couvrent une zone au large des côtes algériennes situées entre 2° et 5° de longitude Est et de 36.5° et 38° de latitude Nord, constituées de 30.000 observations sur une période de 08 ans, allant de 1963 à 1970.

#### II.2.2.1 Houle au large :

Une analyse statistique des données de base des houles permet de définir les secteurs des houles prédominantes et leurs amplitudes respectives.

##### a- Fréquences mensuelles de la houle au large par direction :

**Tableau B-2** : Fréquences mensuelles de la houle au large par direction ( **Annexe B**)

L'exploitation statistique de ces données nous a permis d'établir, d'une part, les roses des fréquences d'apparition des houles au large en fonction des directions et des amplitudes de la houle, et d'autre part de calculer l'énergie de la houle en fonction de ces directions.

On constate que : les houles de secteur Ouest, Est et Nord-Est sont les plus fréquemment observées. Les fréquences d'apparition sont plus faibles pour le secteur Nord et Nord-Ouest.

Ce régime saisonnier se caractérise par une rose annuelle où l'on observe deux directions privilégiées : - Ouest-Nord-Ouest (300°)

- Nord-Nord-Ouest (20°-40°).

- En hiver, les houles prédominantes sont de secteur Ouest- Nord-Ouest (>80%) avec une période moyenne de 8 à 9 secondes ; les périodes supérieures à 10s sont relevées lors des grandes tempêtes et pouvant atteindre 13s.

L'amplitude moyenne la plus fréquente est de 2 à 3m ; avec des houles pouvant atteindre une amplitude de 4m voir 6m comme valeur maximale.

La longueur d'onde, des houles d'hiver les plus fréquentes, est de 150 à 170m avec une célérité de 14 m/s.

Par "gros temps" les valeurs sont plus élevées (L=200m et C=17m/s). Dans ces conditions, la profondeur de déferlement peut être estimée entre 6 et 9m.

- Les houles de la période estivale, de direction Nord-Nord-Est se caractérisent par une période moyenne de 6 à 7 secondes et une amplitude de 0.5m à 1.5m ; 50% de ces houles ont une période de 6 à 9s et n'atteignent que très rarement 3m d'amplitude. Pour une période de 6s, ces houles se caractérisent par une longueur d'onde de 130m et une célérité de 10m /s.

**Statistiques de la houle au large :**

Direction de la houle période de retour	E	NE	N	NO	O	Toutes directions
Biennale	4.12	4.93	4.90	6.10	7.36	7.44
Quinquennale	4.70	5.65	5.75	4.87	8.43	8.34
Décennale	5.14	6.23	6.38	5.40	9.22	9.02
Vingtennale	5.59	6.79	7.02	5.94	10.02	9.70
Cinquantennale	6.17	7.53	7.87	6.65	11.08	10.60
Centennale	6.62	8.08	8.50	7.18	11.88	11.27

**Tableau n° 01 :** Amplitude des houles en fonction des directions

D'après ce tableau, les fortes amplitudes proviennent essentiellement des directions Ouest et Nord-Est, les plus faibles amplitudes proviennent essentiellement du secteur Est avec des amplitudes de 4 m pour la houle vingtennale.

- **Pour la période hivernale :** les houles les plus importantes et les plus violentes viennent du secteur Ouest et Sud-Ouest, ce régime dur environ sept mois avec un maximum d'apparition pour le mois de novembre 40,04%.

- **Pour la période estivale** : les houles les plus importantes viennent du secteur Est 31,78% et Nord-Est 26,21%, les autres secteurs présentent des fréquences de houles de moins de 7%.

- **La rose annuelle** : fait ressortir quatre directions prédominantes, le Nord-Est, L'Est, L'Ouest et le Sud-Ouest avec des fréquences d'apparition respectives de 15,24%, 18,69%, 22,19% et 9,39%.

L'état de calme représente 16,14%.

### II.3. Modélisation morpho dynamique :

La modélisation morphodynamique a pour objet l'exploitation des caractéristiques de la houle au large pour définir les caractéristiques de la houle à la côte (direction et hauteur).

La connaissance des caractéristiques de la houle (direction, amplitude, période) permettent d'apprécier et de comprendre les phénomènes qui se produisent dans la zone de déferlement et serviront de données d'entrée pour le dimensionnement des ouvrages maritimes.

La propagation de la houle entre le large et la côte, étudiée avec le modèle numérique **SWAN** (développé par l'université de DELFT), est basée sur les données bathymétriques.

#### II.3.1. Modèle spectral de vague SWAN :

Il s'agit d'un modèle numérique permettant le calcul des paramètres des vagues, dans les régions côtières, les lacs et les estuaires, à partir d'informations fournies sur la bathymétrie, les courants et le vent. Le modèle résout l'équation de transport de l'énergie (ou de l'action d'onde, en présence de courants). Pour cela, le spectre est discrétisé en un certain nombre de fréquences et de directions et l'équation est résolue sur une grille en " différence finie ". **SWAN** est un modèle de " troisième génération ", avec la possibilité de le faire fonctionner en mode première ou seconde génération ; cela permet, en fonction des besoins, des gains en ressources informatiques.

Les calculs des caractéristiques de la houle entre le large et la côte sont effectués par ce modèle pour différentes conditions de houle au large (hauteur significative, période et direction). Le logiciel modélise la propagation de la houle en prenant notamment en compte les phénomènes.

Le modèle est basé sur une équation dite WABE : "l'équation de balance d'action des vagues", définit par (**STIVE et al, 2006**) comme suit :

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad \dots(\text{II.1})$$

Où:

N (σ, θ) = densité de l'action des vagues:

T = temps (s)

x = distance dans la direction x (m)

$y$  = distance dans la direction  $y$  (m)

$\sigma$  = fréquence relative (Hz) comme on l'observe dans un cadre de référence se déplaçant avec la vitesse du courant

$\theta$  = direction de la vague [degrés]

$c_x, y, \sigma, \theta$  = vitesses de propagations (m/s) pour respectivement  $x, y, \sigma$  et  $\theta$

$S$  = source / puits terme en termes de densité d'énergie

(Génération par le vent, dissipation et non-linéaire onde interactions)

La densité de l'action  $N(\sigma, \theta)$  est égale à la densité d'énergie divisée par la fréquence relative :  $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$ .

### II.3.1.1 Acquisition des données :

- Les données bathymétriques sont fournies par le **LEM**.
- Les données de houles au large : données du **SSMO**.
- Un traitement statistique de ces données a permis de déterminer les fréquences d'apparition de houle par direction et par période.

Le choix des périodes est fait en fonction de la répartition des probabilités de dépassement d'une houle d'amplitude donnée. Les houles de fortes amplitudes ( $>10S$ ), ont une probabilité d'apparition relativement faible. Les périodes de houle considérées dans le cadre de cette étude sont : 6, 8 et 10 secondes pour les houles annuelles (tableau n°2).

	La hauteur significative <b>Hs (m)</b>	La période <b>T(s)</b>	Direction de la houle
<b>Cas 1</b>	<b>3,74</b>	<b>10</b>	<b>45° N</b>
<b>Cas 2</b>	<b>2,65</b>	<b>08</b>	<b>360° N</b>
<b>Cas 3</b>	<b>0,72</b>	<b>06</b>	<b>315°N</b>

**Tableau n°02** : Conditions de houles retenues dans le cadre de cette étude.

Choix du secteur angulaire : Le secteur angulaire considéré correspond aux limites naturelles imposé d'une part, par la configuration géographique du site d'étude, et d'autre part, par le secteur d'intérêt des houles du large.

Ainsi trois (03) directions ont été retenues en tenant compte des tableaux de fréquence par direction des houles au large ainsi que l'incidence de ces houles par rapport à la zone d'étude.

- Une direction de houle à incidence oblique (45°N).
- Une direction approximativement perpendiculaire à la côte pour mesurer les effets d'une houle frontale (360°N).
- La direction de (315°N) qui est la plus au moins énergétique peut atteindre notre zone.

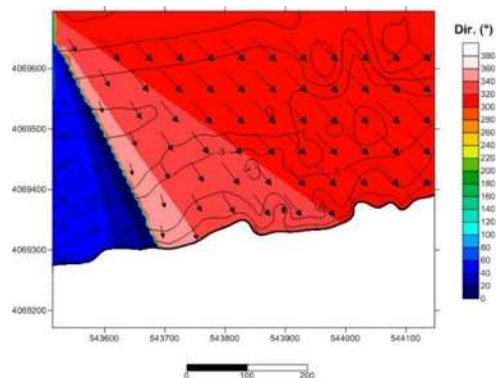
### II.3.1.2. Déroulement des étapes de la réalisation de la réfraction :

Afin de procéder à l'étude de la réfraction deux logiciels sont couplé il s'agit du logiciel des SIG *Mapinfo* 8.0 comme surface de saisie de données et d'acquisition de résultats, ainsi que le logiciel **SWAN** comme calculateur.

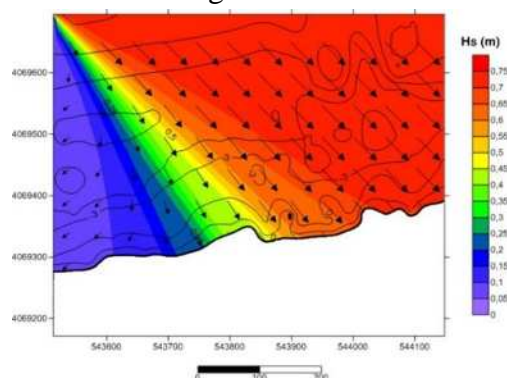
### II.3.1.3. Résultats de la simulation :

**Premier Cas : (Hs= 3,74m ; T=10s ; Direction 45° N)**

Direction :



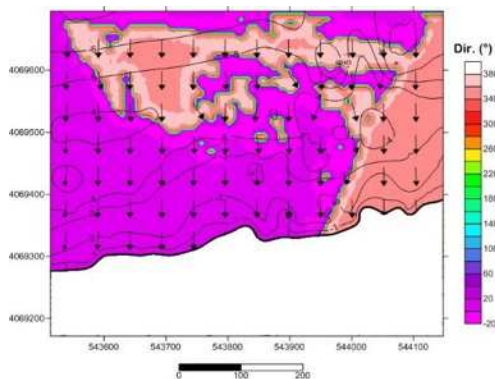
Hauteur significative :



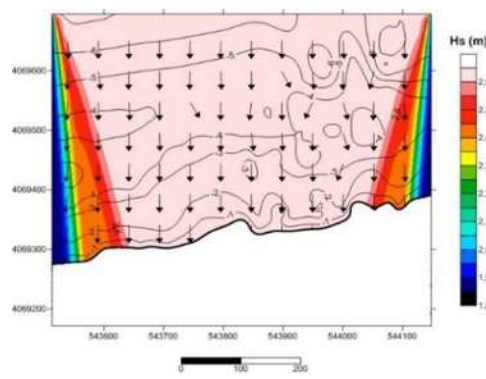
**Figure n°12 :** Simulation de la houle pour une direction 45°N et une période de 10s.

**Deuxième Cas : (Hs= 2,65m ; T=08s ; Direction 360° N)**

Direction :



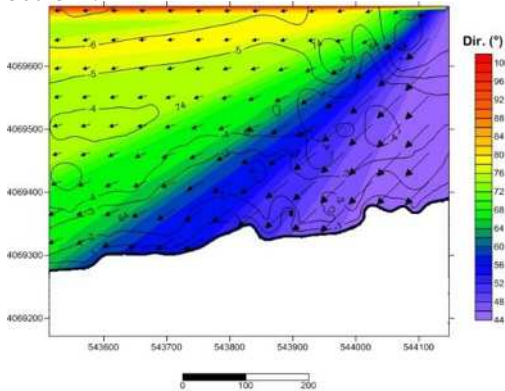
Hauteur significative :



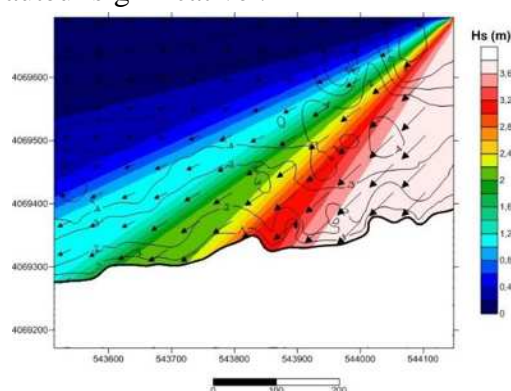
**Figure n°13 :** Simulation de la houle pour une direction 360°N et une période de 08s.

**Troisième Cas : (Hs= 0,72m ; T=06s ; Direction 315° N)**

Direction :



Hauteur significative :



**Figure n°14 :** Simulation de la houle pour une direction 315°N et une période de 06s.

(Cartes grands formats voir Annexe C).

### **Interprétation des résultats :**

#### **Figure n°12 :**

Les résultats de l'étude de la réfraction pour une houle de secteur Nord (N45°) avec une période de 10 secondes.

La propagation se fait d'une façon oblique. Les vagues de cette direction atteignent la côte avec une énergie maximum (environ 04 mètres) sur la partie Est, puis elles dissipent en allant vers l'Ouest.

#### **Figure n°13 :**

La propagation de ces houles de secteur Nord (N360°) se fait d'une façon perpendiculaire (frontale) et très énergétique par rapport au trait de côte. Les hauteurs significatives estimées à environ trois (03) mètres dans la partie centrale et diminuent en allant vers les deux côtés. Ces houles atteignent la zone d'étude sans changer de direction.

#### **Figure n°14 :**

Présent les résultats de l'étude de la réfraction pour une houle de secteur Nord (N315°) avec une période de six (06) secondes, la propagation se fait de façon oblique. Les houles deviennent faibles sur la partie Ouest, mais sur le reste de la zone elles conservent son énergie.

Ces houles atteignent la zone d'étude sans changer de direction, mais en termes d'énergie elles sont beaucoup moins importantes que les houles précédentes (elles n'atteignent pas un (01) mètre.

## CHAPITRE III :

---

# TRANSPORT

SÉDIMENTAIRE ET MORPHODYNAMIQUE

---

### III.1. Transport sédimentaire sur les plages sableuses :

De nombreux processus physiques contrôlent le transport sédimentaire. Ce transport sédimentaire dépend de l'intensité et de la structure des courants dans la colonne d'eau. Or comme nous venons de le voir, en zone côtière les variations des vitesses couvrent une gamme d'échelle temporelle très large. Ainsi, les sédiments vont être transportés au gré du mouvement orbital des vagues, des courants moyens (courant de retour sagittal ou de dérive), ou encore des ondes longues. A cela s'ajoute la turbulence induite par le déferlement qui peut favoriser la remise en suspension des sédiments.

### III.2. Mécanismes de transport solide :

#### III.2.1. Les différents modes de transport :

Les résultats décrits dans ce chapitre ont été établis pour des sédiments relativement uniformes, représentés par leur diamètre moyen  $D_{50}$

##### a. Le transport total :

Le taux de transport total, noté  $Q_t$ , est classiquement décomposé en une composante  $Q_c$  qui représente le transport par charriage et une composante  $Q_s$  qui représente le transport en suspension :

$$Q_t = Q_c + Q_s \dots \text{(III.1)}$$

Le taux de transport représente le volume de matériaux transportés par unité de temps et par unité de longueur. Il s'exprime en  $m^2/s$  et peut être interprété comme le flux des concentrations, intégré sur la hauteur d'eau.

##### b. Transport par charriage :

Le transport par charriage s'effectue dans une sous-couche concentrée près du fond, dont l'épaisseur, notée  $a$ , est typiquement de l'ordre de plusieurs fois le diamètre des particules ( $a \sim ks$ ). Ce mode de transport, qui s'effectue par contacts intermittents avec la surface du lit mobile, est considéré comme dominant pour des particules relativement grossières et des courants modérés.

Les forces exercées par l'écoulement sur les particules sont essentiellement les forces de frottement et de portance. La dissipation d'énergie s'effectue par contacts inter-granulaires (collisions, frottement et pression inter-granulaire...). La vitesse de déplacement des particules transportées est de l'ordre de grandeur de la vitesse de frottement  $u_*$ , qui caractérise l'écoulement au niveau du fond.

### c. Transport en suspension :

#### 1. Hypothèse de scalaire passif

En présence de courants plus intenses, les particules fines sont transportées en suspension dans la colonne d'eau. Les mécanismes de diffusion turbulente permettent de contrebalancer l'effet des forces de gravité. Dans la direction horizontale, on considère en général que les particules suivent l'écoulement moyen et turbulent. Cette hypothèse dite de « scalaire passif » est strictement valable pour des suspensions diluées, dont la concentration volumique  $C$  est inférieure à 01% environ. A l'extérieur de la sous-couche de charriage, on peut donc négliger les processus d'interaction entre l'écoulement turbulent et les particules (effets des collisions, vitesses de chute entravée, stratification...).

#### 2. Equation de transport-diffusion

On est amené dans le cas général, à résoudre une équation de transport-diffusion pour calculer la concentration des sédiments en suspension. Cette équation est identique à celle de la température ou salinité, hormis la prise en compte d'un terme d'advection supplémentaire, qui représente l'effet de la vitesse de chute des sédiments. Elle s'écrit :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \text{div}\left(\left(\vec{U} + \vec{W}_s\right)C\right) = \text{div}\left(\gamma_t \cdot \vec{\nabla} C\right) \dots \text{(III.2)}$$

$\vec{U}$  : étant le champ de vitesses 3D,

$\vec{W}_s = -W_s \vec{Oz}$  : Le vecteur vitesse de chute dirigée vers le bas,

$\gamma_t$  : Le coefficient de diffusivité turbulente des sédiments.

Dans le cas simple d'un écoulement uniforme et permanent, l'équation de transport-diffusion se simplifie ( $\delta / \delta_t = 0, \delta / \delta_x, \delta / \delta_y = 0$ ) et s'intègre une première fois en utilisant une condition de flux nul en surface ( $z=h$ ) pour donner :

$$w_s C = -\gamma_t \frac{\partial C}{\partial z} \dots \text{(III.3)}$$

Cette équation traduit l'équilibre entre le flux de sédiments par diffusion turbulente et la chute par gravité.

#### 3. Profil de Rouse des concentrations

On fait alors l'hypothèse supplémentaire que le coefficient diffusivité turbulente des sédiments est égal au coefficient de viscosité turbulente ( $\gamma_t = \nu_t$ ) et vérifie le profil parabolique. L'équation (III.3) peut s'intégrer analytiquement, en utilisant la condition au fond  $C = C_a$  en  $z = a$ , pour aboutir au résultat suivant :

$$C = C_a \left[ \frac{a(h-z)}{z(h-a)} \right]^R \dots(\text{III.4})$$

La concentration de référence  $C_a$  est définie à la limite de la sous-couche de charriage (typiquement,  $a \sim 2D_{50}$ ) et  $R$ , le nombre de Rouse, est défini par :

$$R = \frac{w_s}{ku_*} \dots(\text{III.5})$$

Le taux de transport en suspension peut ensuite être calculé en intégrant le flux des concentrations sur toute la colonne d'eau, de  $z = a$ , épaisseur de la sous-couche de charriage, jusqu'à la surface libre ( $z = h$ ) :

$$Q_s = \int_a^h C(z)U(z)dz \dots(\text{III.6})$$

$U(z)$  est donné par le profil logarithmique des vitesses

#### 4. Critères d'entraînement

Pour une même valeur du courant, les particules fines sont plus facilement mises en mouvement puis transportées préférentiellement en suspension, tandis que les particules grossières sont transportées par charriage sur le fond.

#### 5. Contrainte critique d'entraînement

La contrainte critique d'entraînement est, par définition, la valeur limite de la contrainte de frottement en deçà de laquelle les particules au repos restent immobiles. La valeur de la contrainte critique augmente avec la taille des particules. Cette propriété est mise en évidence sur le diagramme de *Shields*. La contrainte critique d'entraînement, noté  $\theta_{cr}$ , varie en fonction du nombre de Reynolds particulaire  $Re$ , défini par :

$$Re = u_* D_{50} / \nu \dots(\text{III.7})$$

$u_*$  étant la vitesse de frottement et  $\nu$ , la viscosité du fluide.

Le nombre de *Shields* critique est approximativement constant ( $\theta_{cr} \sim 0.05$ ) ; la contrainte critique d'entraînement augmente donc linéairement avec le diamètre des particules. Le paramètre de *Shields* critique peut aussi être relié au diamètre adimensionnel  $D_*$ . On peut utiliser par exemple une formule proposée par *Soulsby (1997)* et recommandée pour des particules fines :

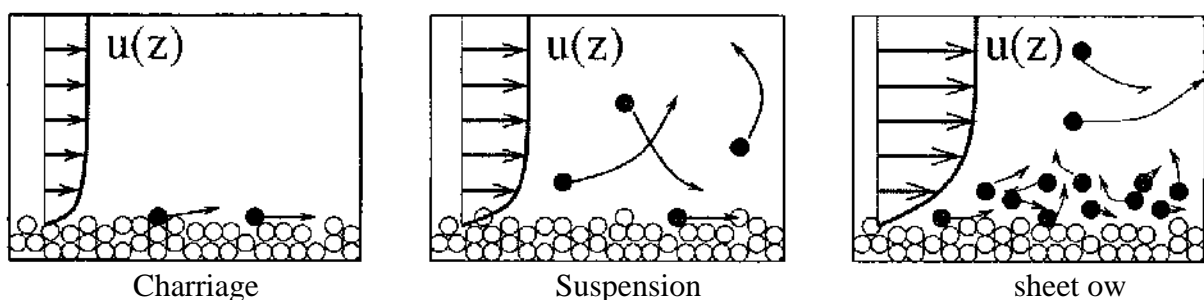
$$\theta_{cr} = \frac{0.30}{1 + 1.2D_*} + 0.055[1 - \exp(-0.020D_*)] \dots(\text{III.8})$$

## 6. Critère de mise en suspension

Le critère de mise en suspension fait intervenir la vitesse de chute des particules élémentaires,  $W_s$ . On considère que le transport en suspension devient possible, lorsque la vitesse de chute des particules est de l'ordre de grandeur ou inférieure à celle des fluctuations turbulentes. Le critère retenu est le suivant :

$$W_s < 0.8u_* \dots(\text{III.9})$$

D'après *Laursen (1958)*, les matériaux sont transportés en suspension seulement pour  $u^*/W_s > 10$ . Les matériaux sont transportés par charriage seulement pour  $u^*/W_s < 0,4$ . Entre ces deux valeurs, le transport s'effectue à la fois par charriage et en suspension. Dans le cas des plages sableuses, on s'attardera uniquement sur les processus physiques affectant le transport des sédiments non-cohésifs. On distingue trois modes de transport sédimentaire : le transport par charriage, par suspension, et par "sheet ow". La Figure III.1 montre une schématisation de ces trois modes de transport d'après *Fredsoe and Deigaard (1994)*.



**Figure n°15** : Les trois modes de transport sédimentaire (*Camenen, 2002*) d'après *Fredsoe and Deigaard (1994)* : transport par charriage, transport par suspension, transport par "sheet ow"

Tout d'abord, les grains de sable peuvent être transportés par le courant en glissant sur le fond, en roulant ou encore en faisant des petits "sauts". Dans ce mode de transport, les sédiments sont en contact avec le fond (sauf pour de très courtes durées pendant le "saut"). Ce mode de transport sédimentaire est appelé transport par charriage. Sur les plages sableuses, ce mode sera favorisé par la présence de conditions peu énergétiques et/ou de sédiments grossiers.

Les sédiments peuvent être aussi arrachés du fond (par turbulence ou par la présence d'un courant suffisamment intense), les grains de sable sont advectés par l'écoulement et sont transportés dans la colonne d'eau. Lors de ce transport par suspension, le sédiment ne touche plus le fond pendant de longues périodes. Ce mode est favorisé par la présence de conditions énergétiques et de sédiments fins. Le dernier mode de transport est le transport par "sheet ow". On observe ce mode de transport en présence de courants intenses et de sédiments relativement grossiers. Les sédiments au fond sont soumis à de très fortes

contraintes et se déplacent à l'intérieure d'une couche très fine (de l'ordre de quelques diamètres de sable) de manière désorganisée.

### **III.3. Transport sédimentaire sous l'action de la houle déferlante et les courants engendrés :**

#### **III.3.1. Transport sédimentaire sous l'action de la houle :**

La détermination du climat de la houle requiert une estimation du transport sédimentaire littoral induit par les différentes catégories de houle.

Selon la vitesse et la direction de la houle, les courants générés par celle-ci auront un effet destructif ou constructif vis-à-vis de la plage (**Gerrard, 1999**). L'effet de la houle sera d'autant plus important sur la mobilité du sédiment au fond que la période et l'amplitude sont plus grande et que les fonds sont plus élevés. Les houles provoquent des transports :

- ***Perpendiculairement à la ligne de rivage*** : provoqué par le frottement des vagues sur le fond, le jet de rive et la nappe de retrait dans la zone de déferlement. En période d'été, il se forme des accumulations en haut de plage, tandis qu'en hiver l'entraînement des sédiments se fait vers la plage avec une érosion de la plage et engraissement des barres pré littorales.
- ***Parallèlement au rivage*** : résulte du courant de dérive littorale, des sédiments sont arrachés en bas de plage et remontes lors du déferlement dans la direction de propagation de la houle. Le jet de retour qui suit le déferlement redescend le sable suivant la plus grande pente, perpendiculairement à la ligne de rivage. IL en résulte un mouvement en zigzag des sédiments, créant un déplacement sédimentaire le long du littoral.

#### **III.3.2. Transport sédimentaire sous l'action des courants engendrés :**

Lorsque l'incidence de la houle est oblique, les vagues induisent un courant de dérive, ce courant contribue donc au transit sédimentaire en déplaçant des volumes importants de sédiments d'un endroit à un autre le long de la côte, que l'on appelle "dérive littorale", cette dernière contrôle ainsi les apports sédimentaires le long de la côte.

Le courant de retour peut également induire un intense transport sédimentaire vers le large en particulier pendant les épisodes de tempête. Il peut ainsi exposer la plage à l'érosion et provoquer des mouvements importants des barres sédimentaires perpendiculairement à la côte. Les courants sagittaux peuvent transporter une grande quantité de sédiments loin au large. La zone où ce courant agit étant étroite, le courant sagittal contribue à couper les barres sédimentaires et donc aux instabilités des bancs de sable le long de la côte. Ce système de courants va alors contribuer à des échanges sédimentaires importants entre la zone de déferlement et la plage sous-marine.

### III.4. Validation des formules de transport longitudinal :

En géomorphologie et/ou en ingénierie côtière, la quantification du transit littoral est très souvent utile pour la compréhension et la quantification des déplacements sédimentaires à macro-échelle dans le système des cellules littorales (**Kumar et al., 2000**) ou dans des perspectives de modélisations simples d'évolution du rivage (**Komar, 1998**). Pouvoir quantifier les transits longitudinaux est fondamental, mais il existe un grand nombre de formules empiriques, qui contiennent toutes un coefficient empirique d'ajustement (K). Nous avons donc choisi de mener une étude comparative des formules les plus couramment utilisées pour le calcul du transport dans notre zone d'étude.

Les travaux expérimentaux restent encore cependant nécessaires pour intégrer les forçages locaux. Par exemple, les mesures des vitesses de courants saisonniers ont révélé des variations importantes du transport longshore le long des côtes indiennes (**Kumar et al., 2000**). Les auteurs démontrent que les formules de vitesse du courant surestiment les mesures de 6,5 à 32 %. *Schoonees et Theron (1996)* ont réalisé une étude statistique à partir de la formule de *Kamphuis (1991)*, en utilisant plusieurs données antérieures et en différenciant les plages exposées aux houles avec des granulométries inférieures à 1 mm et des plages abritées à granulométries plus grossières. Récemment, **Miller (1999)** a validé « l'ancienne » formule de *Inmam et Bagnold (1963)* pour calculer le transit longitudinal pendant les tempêtes sur une côte à barres de l'Atlantique. En Méditerranée, certaines formules de transport ont été proposées par **Jiménez et Sanchez-Arcilla (1993)**, mais leur validation ne repose sur aucune mesure in situ. La validation des formules de transport existantes demeure donc toujours d'actualité compte tenu des lacunes existantes et des différences géomorphologiques des sites étudiés.

#### III.4.1. Quantification du débit solide du littoral de Boumerdès :

##### III.4.1.1 Calcul du débit solide par la méthode de Kamphuis (1991)

Cette formule était obtenue après le développement de celle de 1986 du même auteur, qui traduit le transit sédimentaire parallèle à la côte.

Particularités : Distinction entre le transport par charriage et en suspension. Les résultats de l'expérience reflètent deux pics de distribution du transport, l'un dans la zone de déferlement provenant exclusivement du transport par charriage, et l'autre sur la ligne du déferlement provenant du couplage des transports par charriage et en suspension.

$$S = 2.27(H_{br})^2 (T)^{1.5} (\beta)^{0.75} (d)^{-0.25} (\sin 2\alpha_0)^{0.6} \dots \text{(III.10)}$$

Avec : **S** : débit solide (m<sup>3</sup>/an)

**H<sub>br</sub>** : hauteur de la houle au déferlement (m).

**T** : période de la houle (s).

**β** : pente de la plage (°).

**d** : diamètre moyen du grain (m).

$\alpha_0$  : angle d'incidence de la houle (°).

Le transport sédimentaire est ici exprimé en (m<sup>3</sup>) de sédiments immergés par an. Le transport est proportionnel au carré de la hauteur de la houle et dépend plus de la pente de la plage que de la taille des grains. *Kamphuis* a introduit la puissance 0.6 sur les sinus afin de modéliser l'interaction entre la houle et le courant que l'on néglige dans les approches énergétiques classiques.

**Les résultats obtenus :**

Les résultats du modèle *Kamphuis* sont regroupés dans les tableaux **D-1** et **D-2 (Annexe D)**.

Ces tableaux donnent un transport sédimentaire total vers l'Ouest de l'ordre de 389370 m<sup>3</sup>/an, un transport brut vers l'Est qui est d'environ 52064 m<sup>3</sup>/an et un transport résultant total vers l'Ouest qui est d'environ de 337306 m<sup>3</sup>/an. Nous remarquons que le transit sédimentaire prédominant est provoqué par les houles du secteur Ouest, Ouest-Nord-Ouest avec des volumes respectifs de l'ordre de 75740 m<sup>3</sup>/an, 84002 m<sup>3</sup>/an. Secteur Nord-Est d'environ 9033 m<sup>3</sup>/an.

**III.4.1.2. Calcul de débit solide par la formule de *Bijker* (1971) :**

Une des premières formulations du transport des sédiments qui est encore souvent utilisé dans les applications d'ingénierie a été proposée par *Bijker* (1971). Elle est dérivée de la formule de *Frijlink* (1952) qui tient en compte que de l'action du courant, avec une modification de la base de cisaillement en utilisant un modèle de vagues-courant. La direction du flux sédimentaire est toujours celle de courant étant donné que cette formule a été proposée pour estimer les taux du transit sédimentaire littoral (longshore).

$$q_{sb} = C_b d \sqrt{\frac{\mu_c \tau_c}{\rho}} \exp\left(-0.27 \frac{(\rho_s - \rho) g d}{\mu_c \tau_{cw}}\right) \dots \text{(III.11)}$$

$$q_{ss} = 1.83 q_{sb} \left( I_1 \ln \left[ \frac{33h}{\delta_c} \right] + I_2 \right) \dots \text{(III.12)}$$

Où  $q_{sb}$  : transport sédimentaire par charriage,  $q_{ss}$  transport sédimentaire en suspension,  $d$  la taille du grain moyen,  $h$  la profondeur d'eau,  $C_b$  paramètre de la vague déferlante,  $\mu_c$  paramètres des rides marines (ripple marks),  $\tau_c$  paramètre de cisaillement dû au courant,  $\tau_{cw}$  paramètre de cisaillement dû à l'interaction vague-courant,  $\rho_s$  densité des sédiment,  $\rho$  densité de l'eau,  $I_1$ ,  $I_2$  Einstein intégral et  $\delta_c = 100d/h$  épaisseur de la couche de charriage.

Les paramètres des ondulations introduits par *Bijker*, sont définis par l'équation suivante :

$$\mu_c = \left( \frac{f_{ct}}{f_c} \right)^{3/2} \dots \text{(III.13)}$$

$f_{ct}$  : est le coefficient de frottement total dû au courant et  $f_c$  est le coefficient de frottement superficiel dû au courant. Le coefficient de la vague déferlante est défini par :

$$\begin{aligned} C_b &= 2 && \text{if } H_w / h < 0.05 \\ &= 2 + 3(H_w / h - 0.05) && \text{if } 0.05 < H_w / h < 0.4 \\ &= 5 && \text{if } 0.4 < H_w / h \end{aligned}$$

Où  $H_w$  est la hauteur de la vague et  $h$  la profondeur d'eau.

Le paramètre de cisaillement dû à l'interaction vague-courant est calculé suivant la méthode proposée par *Bijker* introduisant le facteur de suspension suivant :

$$\tau_{cw} = \left[ 1 + 0.5 \left( \xi_B \frac{U_w}{U} \right)^2 \right] \tau_{cf} \dots \text{(III.14)}$$

Avec  $\xi_B = \sqrt{f_{wt} / f_{ct}}$  paramètre due à l'interaction vague-courant,  $f_{wt}$  le coefficient de frottement total dû au vague,  $U_w$  la valeur maximale de la vitesse orbitale de la vague,  $U_c$  est la vitesse moyenne du courant. Einstein intégral pour le transit en suspension est obtenu

$$\text{par : } I_1 = \int_{\delta}^1 \left( \frac{1-y}{y} \right)^A dy \dots \text{(III.15)} \quad I = \int_{\delta}^1 \left( \frac{1-y}{y} \right)^A \ln y dy \dots \text{(III.16)}$$

Avec :

$A = W_s / k(\tau_{cw} / \rho)^{0.5}$  est une fonction qui détermine le taux du transport en suspension,  $k = 0.41$  est la constante de *Von Karman* et  $W_s$  est la vitesse des sédiments

### Résultats obtenus :

L'analyse des tableaux (D-3 et D-4, Annexe D) montrent que la direction du transit sédimentaire dominant dans la région de Boumerdès, se fait d'Est vers l'Ouest avec un débit solide net d'environ  $10075.10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  ( $317725 \text{ m}^3/\text{an}$ ). Ce transport se répartit en un transport brut vers l'Ouest d'environ de  $368546 \text{ m}^3/\text{an}$  et un transport brut vers l'Est de l'ordre de  $50804 \text{ m}^3/\text{an}$ . Les courants associés à ces houles ont des vitesses moyennes qui varient entre  $0.5\text{m/s}$  et  $1.2\text{m/s}$  et charrient des cubatures de sédiments plus importantes dans le sens des houles les plus dominantes.

### III.4.1.3. Calcul du débit solide par la méthode de CERC (1984)

La formule du CERC [1984] est la plus utilisée à travers le monde. Sa définition originale provient des travaux d'*Inman et Komar (1970)* à partir de traceurs fluorescents. Cette formule s'appuie sur la composante énergétique des vagues en relation avec l'incidence des houles déferlantes avec le rivage.

$$Q = K \cdot \frac{\rho \sqrt{g}}{16 \sqrt{\gamma} (\rho_s - \rho) (1-n)} H_b^{5/2} \cdot \sin 2\alpha_b \dots \text{(III.17)}$$

**Q** = transport longitudinal en  $m^3 \cdot s^{-1}$

**n** = facteur de porosité (0,4)

**K** = 0,39 (*CERC, 1984*) ; 0,375 (*Amin et Davidson-Arnott, 1997*), 0,31 (*Stone et al., 1992*), 0,21 moyen avec  $0,17 < K < 0,27$  (*Caviglia et al., 1991*)

**K** =  $1,4 e^{(-2,5 D^{50})}$  (*Del Valle et al., 1993 dans CEM, 1998*).

La hauteur au déferlement (**H<sub>b</sub>**) est calculée à partir de la formule de *Goda (1970)* récemment validée et améliorée par *Rattanapitikon et Shibayama (2000)* :

$$H_b = 0,17 L_0 \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{\pi d_b}{L_0} \cdot K \right] \right\} \dots \text{(III.18)}$$

$$K = 16,21 \tan \beta^2 - 7,07 \tan \beta - 1,55$$

Les valeurs calculées sont interprétées en termes de transport et de bilan sédimentaire potentiel. Les dynamiques à moyen terme, c'est à dire le transport annuel résultant et son interprétation en termes de bilan sédimentaire, sont effectuées de la manière suivante.

#### Résultats obtenus :

Il ressort de l'analyse des tableaux (**D-5 et D-6, Annexe D**), que la direction dominante du transit sédimentaire dans la région de Boumerdès, s'effectue d'Est en Ouest avec un volume de matériaux déplacé vers l'Ouest de l'ordre de 3002647 m<sup>3</sup>/an. Ce transport se répartit en un transport brut vers l'Ouest d'environ 3054266 m<sup>3</sup>/an et un transport brut vers l'Est de l'ordre de 51619 m<sup>3</sup>/an.

Le transport sédimentaire le plus important, s'effectue vers l'Est, est provoqué essentiellement par les houles de secteur Ouest (280° - 290°). Des volumes charriés associées à ces houles sont de l'ordre de 632408 m<sup>3</sup>/an et 563235 m<sup>3</sup>/an. La cubature des sédiments charriés vers l'Ouest sont dus aux houles du secteur Nord (50°, 60°). Cette valeur du transit littoral net reste élevée et ne représente pas les quantités réelles qui transitent le long de la zone. La raison en est que la valeur de la constante K utilisée reste trop élevée, ne convient pas à la morphologie de la zone d'étude.

**III.4.1.4. Comparaison des résultats obtenus par les trois (03) formules :**

L'étude comparative des résultats du transit sédimentaire obtenus dans la région de Boumerdès, selon les trois formules, sont représentés dans le tableau suivant.

Formules empiriques	Volumes (m <sup>3</sup> /an)	Direction des transits.
<i>Kamphuis</i>	337306	Est vers Ouest
<i>Bijker</i>	317725	Est vers Ouest
<i>CERC</i>	3002647	Est vers Ouest

**Tableau n°03 :** Comparaison des volumes obtenus d'après les trois formules.

L'étude comparative de l'estimation du transit sédimentaire selon la formule de *Kamphuis*, *Bijker* et celle de *CERC* donne un ordre de grandeur très rapproché qui peut être pris comme quantités réelles qui transitent le long de la côte de Boumerdès. Du fait que ces trois formules sont basés sur les paramètres les plus importants dans un transport sédimentaire (caractéristiques de la houle, vitesse du courant littoral, la taille du grain et la pente de la plage).

Les formules des *Kamphuis*, de *Bijker* et *CERC* de surestiment systématiquement le transport sédimentaire dans la côte de Boumerdès. Pour bien quantifier ce transit, il faut déployer une instrumentation lourde et coûteuse (traceurs radioactifs ou des pièges à sédiments) et procéder par la suite à une comparaison entre débit calculé et mesuré.

## CHAPITRE IV :

---

# RÉPARTITION

SPATIALE ET DYNAMIQUE  
DES DÉPÔTS SÉDIMENTAIRES

---

Les paramètres de la dimension d'un grain subissent des variations spatiales dans une combinaison de plusieurs paramètres ; ces variations traduisent une réponse à une variété de processus tel que le frottement de particules sédimentaires ; transport sélectif et l'addition de particules sédimentaires localement produites.

#### IV.1. Le modèle McLaren/Gao et Collins :

Ces derniers temps de nombreuses études (*McLaren et Bowles, 1985; Lanckneus, 1992; Gao et al., 1994; Ehrhold, 1994*) ont utilisé un modèle de transport sédimentaire semi-quantitatif dont les principes émis par *McLaren (1981)* reposent sur la comparaison entre échantillons de trois paramètres sédimentologiques les plus usuels; la moyenne des grains, l'indice de tri ("Sorting") et l'indice de dispersion ("Skewness").

Ces auteurs constatent qu'il est possible de remarquer une augmentation de la taille de ces sédiments dans le sens du transport lorsque l'intensité du courant augmente dans la même direction. McLaren et al (1985), indiquent que classement des sédiments peut s'améliorer en raison d'un tri sélectif du matériel sous l'action des processus de transport.

La méthode d'analyse de *Gao et Collins (1991, 1992, 1994a et 1994b)* consiste à effectuer des prélèvements de sédiments superficiels selon un quadrillage régulier. Cette méthode est basée sur la probabilité d'occurrence d'une direction nette de transport en fonction des points de prélèvements adjacents. (**Bertier, 2009**). Ce qui permet pas d'estimer le mouvement du sédiment.

##### IV.1.1. Principe du model :

Le principe du modèle repose sur le postulat que la répartition des sédiments sur le fond résulte des processus de transport sédimentaire (*Mc Laren, 1981 ; Mc Laren et Bowles, 1985 ; Gao et Collins, 1990, 1992 in Cordier, 2007*).

Le modèle développé par *McLaren (1981, 1985)* est basé sur le principe suivant : les variations dans la répartition granulométrique d'un sédiment depuis sa source jusqu'au moment du dépôt dépendent de la dynamique hydrosédimentaire. L'érosion, le transport par traction, saltation ou suspension, le dépôt sélectif ou total ainsi que le mélange de sédiments en provenance de différentes sources, sont à l'origine de la variation de la distribution spatiale des paramètres granulométriques. Cette dynamique (érosion, transport, tri et depot selectif) peut traduire les directions du transport résiduel. (**McLaren et Bowles, 1985**).

Les directions privilégiées du transport sédimentaire peuvent être décrites par l'évolution de la taille moyenne ( $M_z$ ), du tri ( $S_o$ ) et de la symétrie de la distribution sédimentaire ( $S_k$ ) (**Mc Laren, 1981**).

Par comparaison de (3) paramètre,  $2^3$  cas possibles peuvent apparaitre entre un échantillon et son voisin, reconnu par le modèle de Gao et Collins (1992)

- 1  $Mz_1 \geq Mz_2 ; So_1 \geq So_2 ; Sk_1 \leq Sk_2$
- 2  $Mz_1 \leq Mz_2 ; So_1 \geq So_2 ; Sk_1 \geq Sk_2$
- 3  $Mz_1 \geq Mz_2 ; So_1 \geq So_2 ; Sk_1 \geq Sk_2$
- 4  $Mz_1 \leq Mz_2 ; So_1 \geq So_2 ; Sk_1 \leq Sk_2$
- 5  $Mz_1 \geq Mz_2 ; So_1 \leq So_2 ; Sk_1 \leq Sk_2$
- 6  $Mz_1 \leq Mz_2 ; So_1 \leq So_2 ; Sk_1 \geq Sk_2$
- 7  $Mz_1 \geq Mz_2 ; So_1 \leq So_2 ; Sk_1 \geq Sk_2$
- 8  $Mz_1 \leq Mz_2 ; So_1 \leq So_2 ; Sk_1 \leq Sk_2$

Partant du principe que le dépôt est mieux trié dans la direction du transport sédimentaire, deux cas d'évolution peuvent alors être rencontrés, qui représentent avec une plus grande probabilité les réelles tendances de transport sédimentaire, les transports de type **FB-** et **CB+** (*Gao et al, 1994 in Mezouar, 2009*).

Le tableau n°04 définit ces deux cas de transport et présente les relations requises par les paramètres granulométriques, exprimés en unité phi ( $\phi$ ), pour un transport allant d'une station A vers une station B.

Cas	Définition	Relations
<b>CB-</b>	Le sédiment est érodé à sa source, transporté puis totalement déposé. Le sédiment résultant du dépôt est plus fin, mieux trié et présente une asymétrie vers les particules grossières (asymétrie $< 0$ en unité $\phi$ ).	<b><math>Mz_1 \leq Mz_2</math> <math>So_1 \geq So_2</math> <math>Sk_1 \geq Sk_2</math></b>
<b>FB+</b>	Le sédiment érodé à sa source est transporté et subit un dépôt sélectif le long du trajet de son transport du fait d'une diminution de l'énergie de l'agent de transport. Le sédiment qui résulte de ce transport est plus grossier, mieux trié avec une asymétrie vers les particules fines (asymétrie $> 0$ en unité $\phi$ ).	<b><math>Mz_1 \geq Mz_2</math> <math>So_1 \geq So_2</math> <math>Sk_1 \leq Sk_2</math></b>

**Tableau n°04:** Relations entre les paramètres granulométriques (en unité de phi) de deux station A et B, pour un transport sédimentaire de A vers B, de type FB- et CB+.

Le cas FB- correspond à des processus de transport de faible énergie et le cas CB+, des processus de forte énergie.

#### IV.1.2. Principe et limites du calcul des tendances de transport sédimentaire :

- Déterminer les paramètres granulométriques (Mz, So et Sk).
- Déterminer une distance critique ( $D_{CR}$ ) entre les échantillons ; Cette distance définie comme étant l'écart minimal entre deux sites avoisinants (c'est-à-dire, la diagonale pour une maille carrée). Il faut que la distance qui les sépare soit inférieure à cette distance critique.
- Comparaison entre les trois (03) paramètres (Mz, So et Sk) entre les deux échantillons.

- Le calcul des tendances de transport se fait en comparant les valeurs des paramètres granulométriques entre des stations échantillonnées voisines.
- Quand la relation pour un transport **FB-** ou **CB+** est respectée (Tableau 1), un vecteur de transport est assigné au point de calcul.
- Le transport total est obtenu en sommant et en moyennant tous les vecteurs de transport obtenus pour une même station.

GAO et COLLINS considèrent que seul les cas 1 et 2 sont susceptibles de représenter un transport d'un site **a** vers un site **b**, car une amélioration du tri se fait dans le sens du transport, et il faut que l'indice du tri diminue à partir de l'amont du transport.

- Si une autre relation est observée entre les échantillons (cas 3 à 8), il n'y aurait pas de transport entre les deux (02) points.
- Si le cas 1 et 2 est détecté entre deux sites voisins, une première carte vectorielle sera dessinée. La longueur de ce vecteur est fixée arbitrairement comme unité. GAO et COLLINS nommèrent ce vecteur : Vecteur tendance.
- Déterminer les vecteurs sommes, Il se peut qu'un même site ait plusieurs vecteurs tendances (plusieurs vecteurs qui ont une origine commune).
- Dans ce cas, on ne retiendra que la résultante **R** de ces vecteurs. **R** peut s'exprimer :

$$\vec{R}(x, y) = \sum_1^n \vec{r}(x, y)_i \dots \text{(IV.1)}$$

Avec :

**n** : nombre de vecteurs tendances identifié pour le site.

$\vec{r}(x, y)$  : vecteur tendance.

$\vec{R}(x, y)$  : vecteur résultant (somme des vecteurs de tendance).

$(x, y)$  : coordonnées du vecteur.

#### ➤ Les vecteurs transports (modèle résiduel) :

Cette étape permet aux autres sites sans vecteurs, qui ne dépendent pas au deux cas, de leur allouer des vecteurs, le calcul de ces vecteurs est obtenu par l'équation suivante :

$$\vec{R}_{av}(x, y) = \frac{1}{K+1} \left( \vec{r}(x, y)_i + \sum_1^k \vec{R}_j \right) \dots \text{(IV.2)}$$

Avec : **K** : nombre totale de sites voisins ayant impérativement un vecteur

$\vec{R}_j$  : les vecteurs voisins

$\vec{R}(x, y)_i$  : le vecteur des points sélectionnés.

- Le vecteur  $\vec{R}_{av}$  est alors appelé vecteur transport.

- L'ensemble de ces vecteurs forme un modèle résiduel, dans ce modèle on ne trouve que les modèles de transport les plus fréquents du modèle initial établi à partir des vecteurs tendances.
- Fiabiliser les résultats obtenus par la carte vectorielle filtrée, afin de se débarrasser des vecteurs qui ont de petits modules.

$$L = \sum_i^n | \overrightarrow{Rav}(x, y)_i | \quad \dots(IV.3)$$

Avec : n : le nombre de sites formant la modèle de transport

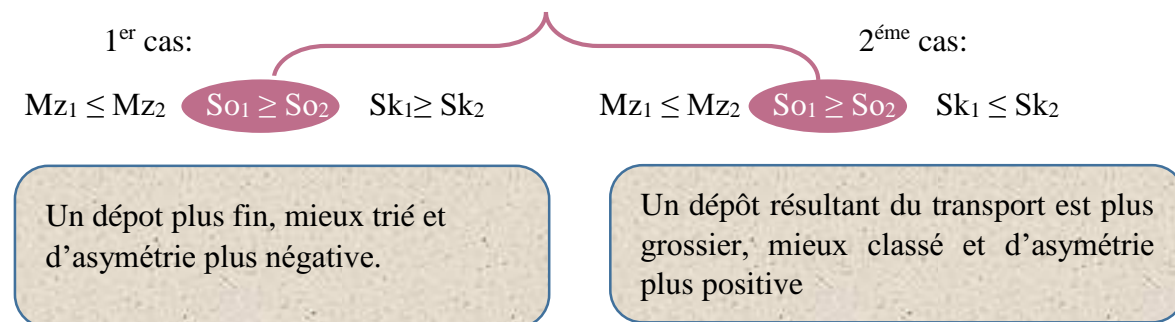
### IV.1.3. Interprétation des résultats (GSTA):

#### Etape n°1 : Utilisation du GSTA (Shu 1996) (Voir Annexe E).

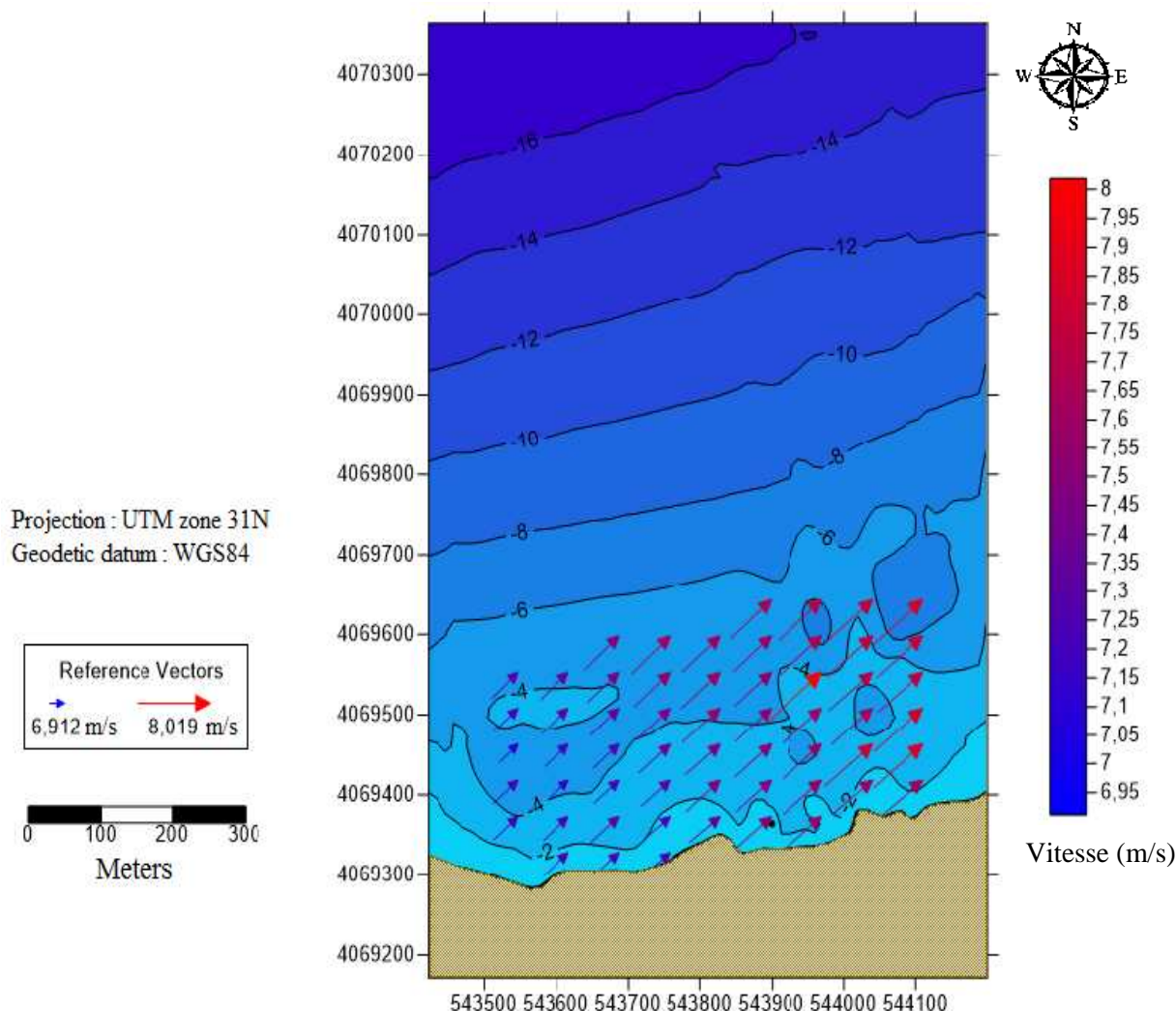
La valeur de la distance critique employée dans notre modèle est égale à 50m, obtenue en mesurant à l'aide de la règle dont dispose le logiciel MapInfo 8.0 sur la figure de Situation des stations de prélèvements. (Figure E-1 Annexe E).

#### Etape n°2 : Application et résultat :

Dans les deux cas le tri s'améliore dans la direction du transport



La simulation des tendances au transport sédimentaire par le modèle **GSTA** est illustrée dans la figure suivante :



**Figure n°16:** Modélisation du transport sédimentaire dans la plage de Boumerdès Ouest à l'aide de l'approche de GSTA. (HAMMOUD, 2014)

### Etape n°3 : Interprétation des résultats :

Un premier regard sur la carte des vecteurs résiduels (figure n°16), fait ressortir que la plage de Boumerdès Ouest se trouve comme étant le siège d'une dynamique sédimentaire active. Les déplacements sédimentaires les plus dominants s'effectuent vers le large, c'est à dire de l'Ouest vers l'Est orienté vers le Nord Est.

Mais le plus intéressant reste le transit qui se fait de la côte vers le large, dû aux courants de retour qui sont à l'origine de l'érosion du côté Est de cette plage.

Ces déplacements peuvent être influencés par la géométrie de la côte et sa morphologie sous-marine. L'usage des indices granulométriques (moyenne, indice d'asymétrie et indice de dispersion) à travers une analyse analytique descriptive et vectorielle avec méthode statistique, donne des résultats acceptables.

## CHAPITRE V :

# ANALYSE STATISTIQUE

## DE L'ÉVOLUTION MORPHOLOGIQUE DES PLAGES SABLEUSES

## V.1 Introduction :

Le premier objectif de cette partie est d'analyser les données topographiques à l'aide des méthodes connues telle que : l'analyse descriptive de la variabilité morpho-sédimentaire des profils basée sur des paramètres statistiques simples, une analyse factorielle de l'évolution morphologique des plages.

Dans un second temps, on s'intéresse à la variabilité morphologique de la plage sous-marine et à la profondeur de fermeture du profil.

Dans cette partie nous essayâmes de traiter la morphodynamique de la plage de Boumerdès Ouest à l'échelle saisonnière (moyen terme). Premièrement les méthodes d'observation mises en œuvre pour mesurer l'évolution topographique et bathymétrique de la plage sont exposées. Les méthodes statistiques d'analyse des données morphologiques sont introduites. Suivées par une analyse de la variabilité morpho-sédimentaire de la plage, à l'échelle saisonnière et événementielle. Enfin, on explore les résultats de l'analyse factorielle unidimensionnelle à fin de qualifier la morphodynamique de cette plage sur des caractères morphologiques, sédimentologiques et hydrodynamiques.

Avant d'entamer l'analyse factorielle il est nécessaire de faire les suivis de l'évolution morphosédimentaire à l'aide l'analyse descriptive classique afin d'analyser les paramètres morphologiques tels que :

- Méthodologie du suivi morpho-sédimentaire
  - Résolutions temporelle et spatiale
  - Le suivi bathymétrique
  - Résolution temporelle du suivi bathymétrique
- ( Détails voir Annexe F)

## V.2. L'analyse factorielle unidimensionnelle :

Chercher à extraire l'information qualitative contenue dans les séries morphologiques à l'aide d'une analyse factorielle unidimensionnelle, après avoir réalisé une analyse statistique classique dans le but de mettre en évidence les zones de fort remaniement sédimentaire et les morphologies caractéristiques.

### V.2.1. principe de la méthode :

La démarche consiste à établir un modèle morphologique empirique à partir de la variabilité naturelle des profils. Les composantes spatiales et temporelles de ce modèle identifieront la dynamique des corps et figures sédimentaires, les échanges transversaux dans le profil, les échelles et les cycles temporels associés (pluri-annuel, saisonnier, événementiel).

Avant d'effectuer l'analyse factorielle, chaque série de données morphologiques est préparée sous la forme d'une matrice de profils re-échantillonnées et de même longueur. La longueur de

coupure des profils est choisie de manière à garder le maximum de levés possible et de façon à représenter au mieux la variabilité des données. Ainsi, 80 à 100 % des profils sont pris en compte dans l'analyse factorielle. Néanmoins, en adoptant une longueur commune relativement courte, on écarte automatiquement de l'analyse la variabilité morphologique du bas de plage. Les données sont mises en forme et analysées en utilisant une boîte à outils sous MATLAB permettant de créer la matrice des données brutes avec chaque jeu de profils et de calculer ses fonctions empiriques.

A l'issue de l'analyse factorielle, on retient les trois fonctions empiriques (modes 1 à 3) rassemblant le maximum de l'inertie des profils. Le mode principal (mode 1) associé au profil moyen, explique plus de 99 % de l'inertie des profils. Les modes secondaire et tertiaire représentent les fluctuations de l'élévation autour du profil moyen et comptent à eux deux pour 80 à 95 % de la variance résiduelle.

### V.2.2. Revue bibliographique de l'utilisation de la méthode

De nombreux auteurs ont discuté les résultats de l'Analyse Factorielle unidimensionnelle (AFC 1-D) et les différences d'interprétations sont généralement dues aux différences spatiotemporelles des données analysées.

Tout d'abord, *Winant et al. (1975)*, et *Aubrey (1979)* appliquèrent l'analyse factorielle à des séries temporelles, d'une durée respective de deux et cinq ans, de profils cross-shore de la plage de Torrey Pines, Californie, USA. Ainsi, ils ont mis en avant les évolutions saisonnières des systèmes barres-bermes d'une plage microtidale dominée par les forçages de houle.

Peu après, *Clarke et Eliot (1982)*, utilisèrent l'analyse factorielle 1-D pour analyser les transferts sédimentaires longshore le long de la plage de Warilla, Nouvelle-Galles du Sud, Australie. Ainsi, 18 profils espacés de 100 m ont été mesurés durant 6 années le long des 2 km de cette plage microtidale, dominées par les forçages de vague issus d'une superposition de mer du vent et de houle provenant de l'océan Austral. Ces données furent ensuite réduites en données volumétriques par cinq coupes horizontales correspondantes aux différents processus de swash identifiés par *Duncan (1964)*. Ainsi, cette procédure a permis l'étude de l'évolution du trait de côte et des zones de transfert longshore. De plus, l'utilisation de l'analyse de *Fourier* pour étudier les modes temporels, a permis la mise en évidence de pertes sédimentaires long-terme et de flux de périodes de 6, 12 et 24 mois.

L'équipe de l'institut d'Ingénierie Hydraulique de l'Académie des Sciences Polonaise, qui possède des jeux de données topographiques et bathymétriques des côtes polonaises de la mer Baltique et des côtes bulgares de la mer Noire, a également travaillé avec les techniques d'analyse factorielle 1-D.

Ainsi, *Ostrowski et al. (1990)* ont étudié le comportement de ces littoraux microtidaux, soumis à des mers de vents de fetch court, à des échelles temporelles annuelle, pluriannuelle et décennale. Cette étude a permis de comparer les résultats d'AFC 1-D appliquées à des

plages à barre simple et berme, à des plages à barres multiples, et ce, à différentes échelles de temps. Plus tard, sur la base du même jeu de données, *Pruszek (1993)* a combiné l'analyse factorielle 1-D et le concept de profil d'équilibre de *Dean (1977)* pour étudier l'évolution des plages décrites ci-avant.

De même, le site expérimental de *Duck*, Caroline du nord, USA, qui a fait l'objet d'un suivi pluri-mensuelle pendant plus d'une décennie, a été étudié par analyse factorielle 1-D (*Larson & Kraus, 1994*).

Enfin, la base de données JARKUS, du département des travaux publics hollandais, constituée de profils bathymétriques espacés de 250 m, mesures tous les ans depuis 1963 le long de 120 km de la cote hollandaise, fut l'objet des travaux de thèse de *K.M. Wijnberg (1995)*.

Ces travaux, qui font appel aux techniques d'AFC (*Wijnberg & Terwindt, 1995*), font aujourd'hui référence en terme d'analyse factorielle 1-D pour étudier l'évolution morphologique long-terme des plages à barres.

Cette liste présente les principales équipes qui utilisent les techniques d'analyse factorielle pour caractériser la morphodynamique de leurs sites d'étude. Cependant, cette liste n'est pas exhaustive et les équipes présentées ci-avant utilisent souvent l'analyse factorielle unidimensionnelle en complément d'autres techniques statistiques (*Aubrey, 1980 ; Larson et al., 2000 ; Rozynski, 2003*). (**Mezouar, 2009**)

### V.3. L'analyse factorielle bidimensionnelle :

Les mouvements sédimentaires en zone côtière peuvent être décomposés en une composante longshore et une composante cross-shore. Les mouvements longshore sont définis comme les transports parallèles à la ligne de cote et les mouvements cross-shore comme les transports transverses à la plage. Ces deux composantes interviennent à des échelles spatio-temporelles différentes et il est nécessaire de les découpler pour décrire avec précision l'évolution bathymétrique des plages.

#### V.3.1 Principe de la méthode :

Dans ce cas, le principe de la méthode consiste à déterminer les modes propres représentant les variations bathymétriques au cours du temps d'une surface  $(x,y)$ . Ainsi, la profondeur  $h(x,y,t)$  s'exprime :

$$h(x, y, t) = \sum_k e_k(x, t) e_k(y, t) \dots \text{(V.1)}$$

Où :  $x$  : la distance longshore,

$y$  : la distance cross-shore,

$t$  : le temps et  $k$  le mode considéré.

$e_k(x, t)$  et  $e_k(y, t)$  sont respectivement les modes propres longshore et crossshore.

*Uda et Hashimoto (1982)* sont les premiers qui ont proposé un modèle d'analyse factorielle 2-D. Cependant, leur modèle considérait les modes propres cross-shore moyennes dans le temps et seuls les modes propres longshore variaient au cours du temps. Pour pallier à cette déficience, *Hsu et al. (1986)* proposèrent un modèle d'analyse factorielle 2-D prenant en compte les variations temporelles des modes cross-shore et longshore :

$$e_k(x, t) = \sum_m e_k^m(x) c_{kx}^m(t) \dots(\mathbf{V.2})$$

$$e_k(y, t) = \sum_n e_k^n(y) c_{ky}^n(t) \dots(\mathbf{V.3})$$

Où :  $e_k^m(x)$  : les modes propres spatiaux longshore  
 $c_{ky}^m(t)$  : les modes propres temporels longshore,  
 $e_k^n(y)$  : les modes propres spatiaux cross-shore,  
 $c_{ky}^n(t)$  : les modes propres temporels cross-shore.

*Hsu et al. (1986)* ont montré aussi la validité de cette approche pour décrire les mouvements cross-shore et longshore. Cette approche donne de bons résultats mais tend à compliquer les calculs et l'interprétation des résultats. *Hsu et al., (1994)*, ont ensuite proposé une évolution de leur modèle faisant actuellement référence en terme de modèle d'analyse factorielle 2-D de données bathymétriques. La profondeur  $h(x, y, t)$  s'exprime alors:

$$h(x, y, t) = \sum_k e_k(x) e_k(y) c_k^*(t) \dots(\mathbf{V.4})$$

Où :  $e_k(x)$  : les modes propres spatiaux longshore,  
 $e_k(y)$  : les modes propres spatiaux crossshore,  
 $c_k^*(t)$  : les modes propres temporels.

L'analyse factorielle bidimensionnelle comporte un défaut majeur : le calcul des  $e_l(x, t)$  et  $e_l(y, t)$ , qui consiste en un moyennage longshore et cross-shore des morphologies considérées, constitue une perte d'information importante. Cependant, *Winant et al., (1975)*, avaient déjà insisté sur l'inertie expliquée par les différents modes. Ainsi, l'un des résultats fondamentaux de l'analyse factorielle 2D réside dans le fait que l'amplitude des valeurs propres correspond à l'importance du transport dans la direction cross-shore ou longshore et indique la prédominance d'un phénomène par rapport à l'autre.

### V.3.2. Revue bibliographique de l'utilisation de la méthode :

Dans la littérature, l'utilisation de l'analyse factorielle 2-D est souvent limitée aux modèles morphodynamiques tridimensionnels (*Uda et Hashimoto, 1982 ; Hsu et al., 1986 ; Hsu et al., 1994*). Cependant, quelques auteurs l'ont utilisée pour des analyses d'évolutions de plage (*Ostrowski et al., 1990*), de banc de sable (*Reeve et al., 2001*) et d'estuaire (*Horrillo-Caraballo et al., 2002*). (**Mezouar, 2009**)

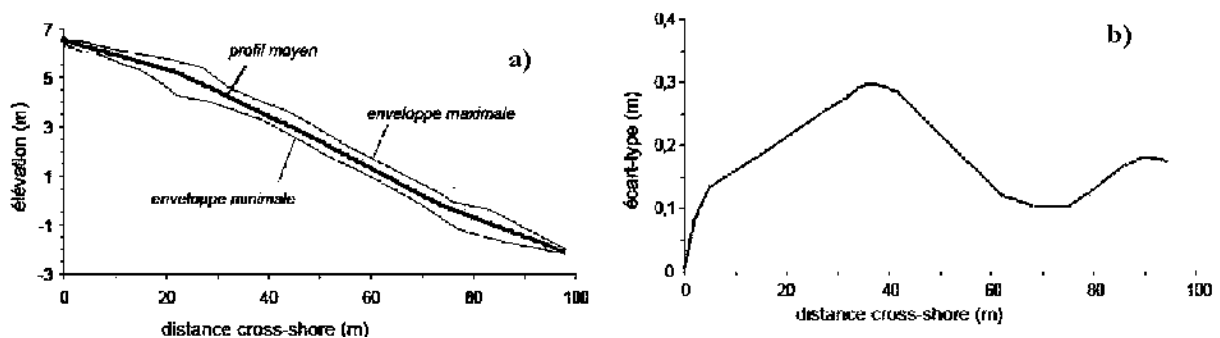
### V.4. Résultats de l'analyse factorielle :

Nous présentons les résultats obtenus dans le cadre du suivi morpho-sédimentaire à moyen terme de la zone d'étude. Le travail de *Mezouar 2009*.

Sur le littoral de Boumerdès, on constate une variabilité maximale du profil repartis en deux endroits, sur le haut de plage (1,8 m à 23 m depuis la tête de profil) et sur le bas de plage

(1 m à 80 m), associées aux maxima de l'écart-type (variabilité moyenne de 20 à 25 cm autour du profil moyen). Seuls quelques profils isolés expliquent ces pics de variabilité maximale et sont associés aux enveloppes minimale et maximale. Dans l'ensemble, la variabilité sédimentaire est relativement forte varie entre 0,6 et 1,3 m et homogène sur l'estran.

Néanmoins, les deux zones de forte variabilité induisent des ruptures de pente, sur le bas de plage et l'estran.



**Figure n°17 :** Variabilité morphologique du profil de la plage de Boumerdès Ouest  
a) profil moyen et enveloppe b) écart-type des altitudes

Une série temporelle de profils cross-shore (70 profils) a été analysée par analyse factorielle 1D. Le signe des modes issus de l'A.F étant arbitraire la procédure décrite dans la section précédente est appliquée pour garder une cohérence longshore des résultats.

Les trois premières valeurs propres, qui représentent un certain pourcentage de l'inertie des données initiales, montrent que les trois modes associés expliquent en moyenne 99,56% de l'inertie des données initiales (**Tableau III.8**). Le premier mode, qui représente la topographie moyenne au cours de la période d'étude, explique 97,11 % de l'inertie initiale.

Mode	Inertie (%)	Inertie cumulée (%)	Variance (%)	Variance cumulée (%)
1	97,11	97,11	--	--
2	1,54	98,67	45,00	45,00
3	0,89	99,56	43,00	79,00

**Tableau n°05** : Inertie et variance expliquées par les modes issus de l'analyse factorielle 1-D

Les deux modes d'ordre supérieur, qui représentent les fluctuations autour de la topographie moyenne, représentent presque 79% des variations au cours de la période d'étude.

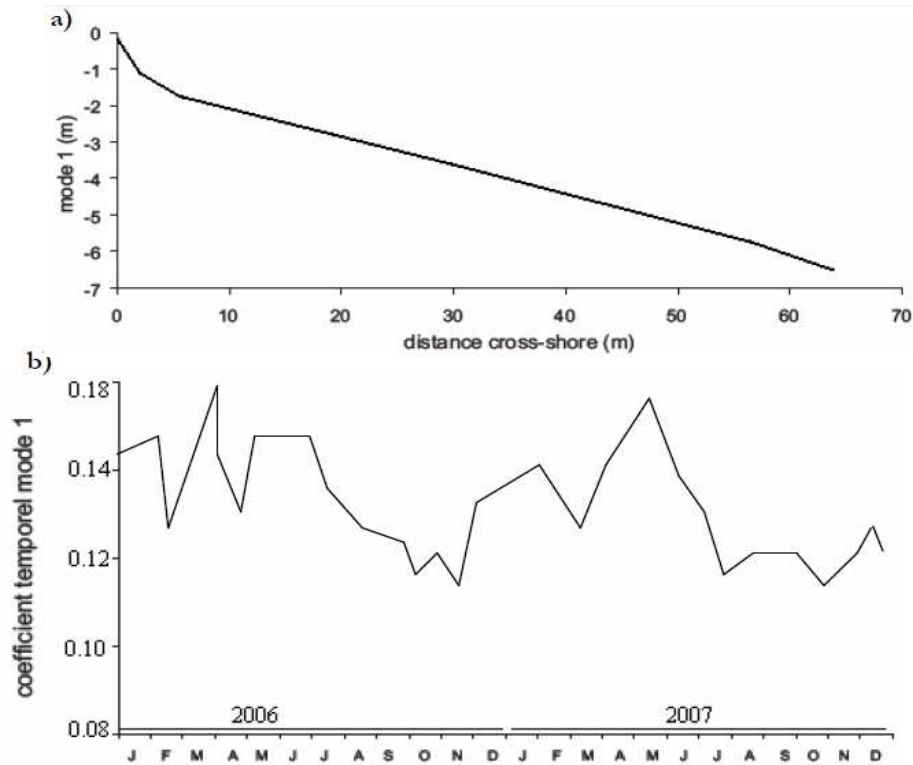
Le second mode et le troisième mode prennent respectivement en compte 45 % et 37,71% de la variance résiduelle.

### *Analyse des modes propres*

Le premier mode spatial  $e_1(y)$ , qui représente la bathymétrie moyenne au cours de la période d'étude est identique à la bathymétrie moyenne calculée. Le mode temporel associé  $C_1(t)$ , appelé généralement pondération temporelle, représente les variations de la profondeur moyenne. Les faibles valeurs de  $C_1(t)$ , ici représentées, correspondent à des périodes où la profondeur du profil considéré à cet instant est moins importante que celle du profil moyen.

Inversement, les fortes valeurs de  $C_1(t)$ , correspondent à des périodes où la profondeur du profil considéré à cet instant est plus importante que celle du profil moyen.

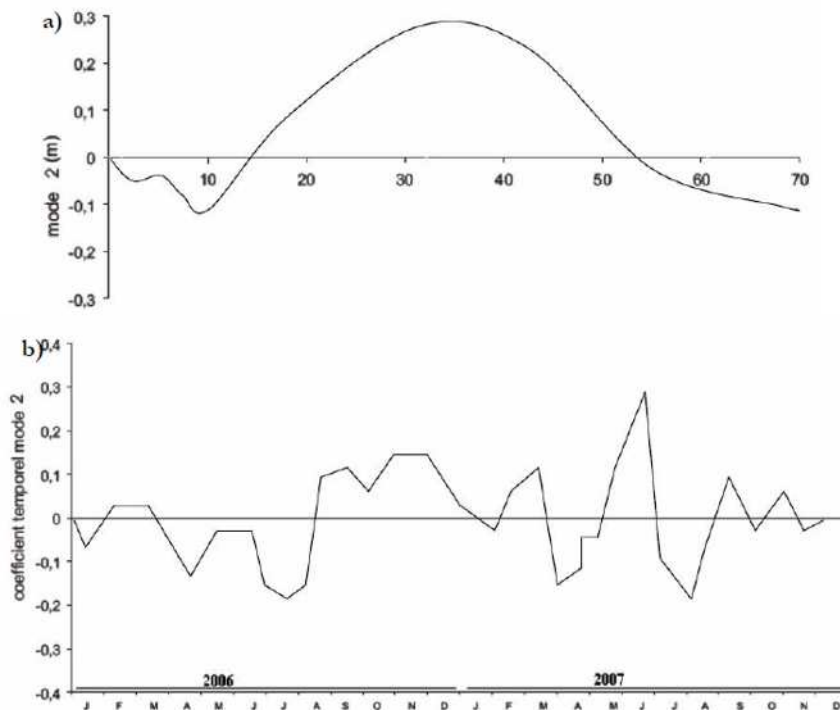
Le deuxième et le troisième modes morphologiques (**figures n°19 & n°20**) présentent presque les mêmes caractéristiques spatiales, le mode 3 étant décalé d'une dizaine de mètres vers l'aval de la plage. Ils mettent en évidence des zones d'accumulation sédimentaire sur le haut de plage matérialisées par des maxima à 35-40 m (mode 2) et 45- 55 m (mode 3). Ils correspondent à l'emplacement des bermes de plage et formation des barres de swash. Chaque mode morphologique est associé à la dynamique d'un système de barres de swash, le mode 2 au système localisé sur les niveaux de vives eaux, le mode 3 à celui sur les niveaux de mortes eaux.



**Figure n°18 :** Premiers modes issus de l'analyse factorielle 1D de la plage de Boumerdès Ouest ; **a)** mode spatial **b)** mode temporel

Les fluctuations des coefficients temporels des modes 2 et 3 (**figure n°19**) illustrent la variabilité de la forme du profil cross-shore en fonction d'apparition des bermes et les barres de swash

A la fin du printemps et début de l'été 2006, les coefficients temporels restent stables du fait d'une agitation limitée de la plage due aux faibles actions des agents de forçage. Dès le début d'action des vents et des vagues au début d'automne, la partie aval du système de barres de swash est lessivée et ça l'explique la décroissance du mode 3 puis la partie supérieure est ensuite partiellement érodée donc une chute du mode 2, lors de niveaux d'eau plus hauts.

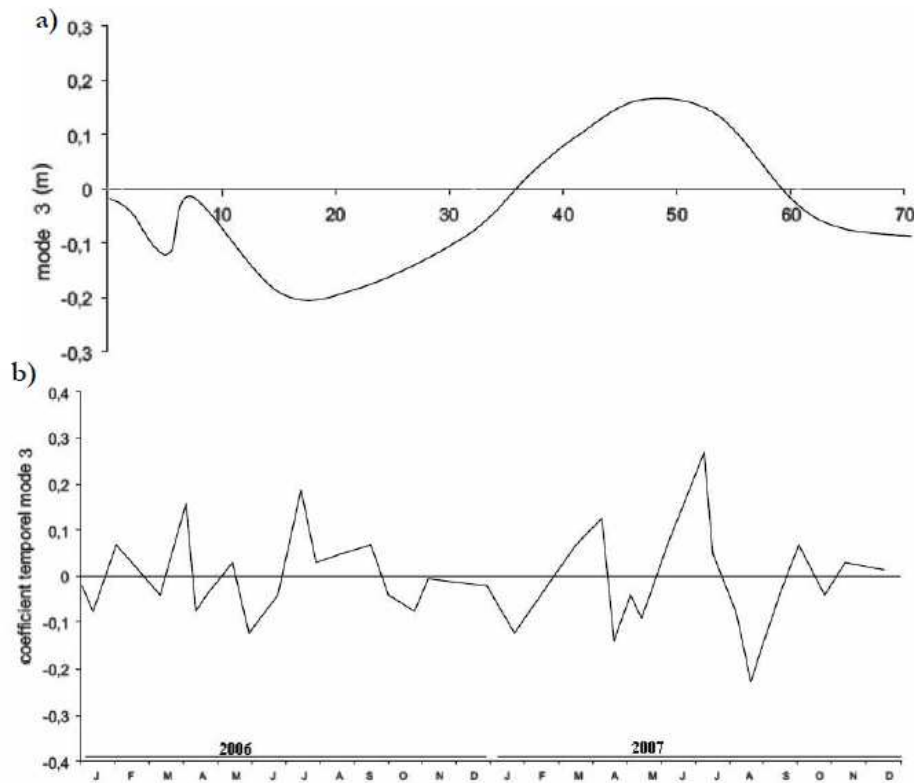


**Figure n°19:** Seconds modes issus de l'analyse factorielle 1D ; **a)** mode spatial **b)** mode temporel

A la faveur de périodes de calme, le mode 3 augmente rapidement suggérant le développement d'un nouveau système lors de début avril 2007. Quant au mode 2, sa progression graduelle vers des coefficients temporels positifs juillet 2007 représente la formation d'un autre système sur les niveaux de vives eaux.

La contrainte majeure de cette analyse est la difficulté à interpréter de façon réaliste les pics négatifs simultanés des modes 2 et 3. Sans les observations de terrain, on ne peut distinguer l'absence totale des barres de swash, d'un profil localisé dans une plage sableuse.

Par ailleurs, les résultats de l'analyse factorielle sont assez confus dans la mesure où la description de la dynamique de plage implique de nombreuses variables qui se superposent (Conditions d'agitation, formation des barres et des bermes, longueur d'onde variable, migration longitudinale).



**Figure n°20:** Troisièmes modes issus de l'analyse factorielle 1D  
 a) mode spatial b) mode temporel

## V.5 Conclusion :

L'observation de l'évolution morphosédimentaire des plages est réalisée par la mise en place d'un suivi topographique et bathymétrique. Le suivi morphologique est fondé sur l'acquisition de séries temporelles de mesures topographiques des estrans à l'aide d'un GPS.

L'analyse factorielle a mis en évidence l'évolution de la morphologie du site d'étude, de ses formes et des figures sédimentaires à des échelles de temps variées. La mise en place et l'évolution de ces formes doivent être interprétées de concert avec la variabilité événementielle des conditions d'agitation sur la plage.

Cependant, ces modèles empiriques linéaires 1D ont révélé leur incapacité à décrire avec efficacité la migration de formes progressives (barre à Boumerdès).

Les tendances d'évolution du profil, un recul à Boumerdès Ouest, semble être liée au degré de disponibilité de matériel sédimentaire au large, à l'agitation locale et au degré d'exposition de la plage aux houles, à la balance entre l'intensité, la récurrence des tempêtes hivernales et les périodes de calme relatif (sans tempête majeure) à l'échelle pluriannuelle (*Lee et al., 1998*).

En ce sens, l'observation de la dynamique de la plage à Boumerdès par un suivi bathymétrique saisonnier a permis d'établir la profondeur de fermeture du profil à -3.42m d'après la méthode de *Hanson (1989)*, et de souligner le caractère non conservatif du système crossshore avec des flux longitudinaux entrants et sortants (bilans sédimentaires positifs en période estivale, négatifs en période hivernale). (**Mezouar, 2009**).

# CONCLUSION

## GÉNÉRALE

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 du fond.

La nouveauté de sujet traité, et les insuffisances en équipement de mesures proches du site ont constitué des contraintes à notre travail et peuvent expliquer une partie des incertitudes qui restent à la fin de cette étude.

Les divers résultats obtenus dans les différents chapitres traités, dans lesquels on a essayé de décortiquer l'ensemble complexe des processus côtiers qui déterminent l'évolution en agissant sur les différentes parties de la zone, plusieurs thèmes principaux ont été abordés dans cette recherche. Nous en rappellerons l'essentiel des résultats.

- Premièrement nous avons synthétisé les principaux paramètres qui influencent potentiellement la partie comprise entre la zone de surf et la zone de swash. L'hydrodynamique littorale a pour but de décrire les phénomènes physiques et l'origine de la dynamique littorale. Son intérêt est d'une part fondamental pour une meilleure compréhension et modélisation en océanographie physique littorale,

- Deuxièmes nous avons décrit les unités géographiques du littoral de Boumerdès, analyser les facteurs de la mise en place de ce paysage, et aborder les agents de forçage de la dynamique côtière. La modélisation numérique de la réfraction de la houle démontre que la houle de secteur Nord-Ouest responsable de transport sédimentaire dans le profil.

-Dans le Troisième chapitre, nous avons montré l'importance des transports longitudinaux à court terme et à l'échelle de l'ensemble des trois littoraux. Nous avons analysé les processus sédimentaires longitudinaux et transversaux par différentes formules empiriques (*Kamphius*, *Bijker*, *CERC*,...). Et par conséquent un préalable nécessaire à l'étude de la dynamique hydrosédimentaire.

-Dans le chapitre qui suit, l'application de la méthode GSTA de Gao & Collins (1992) est choisie dans ce but. Cette méthode est une approche semi-quantitative du transport sédimentaire qui permet d'expliquer les directions des flux sédimentaires entre les différents compartiments constituant cette partie de la plage. Et ont montré que les sédiments sont transportés vers le large.

-Dans le dernier chapitre, l'application de l'analyse factorielle 1D et 2D, ces modèles empiriques linéaires ont révèlé leur incapacité à décrire avec efficacité la migration de formes progressives et ont montré aussi la validité de cette approche pour décrire les mouvements cross-shore et longshore.

Nous jugeons qu'il est indispensable de prendre en compte les deux sens des transports sédimentaires longitudinal et transversal (cross-shore), avec les variations morphologiques

résultantes. Alors, une étude plus approfondie sur la l'évolution morphodynamique est impérativement nécessaire pour une meilleure compréhension de cette partie du littoral. Dans l'attente de solutions, efficaces à long terme, basées sur des études plus concrètes et plus approfondies qui mettront la lumière sur tous les processus susceptibles d'influencer sur la morphologie.



# BIBLIOGRAPHIE

- ASSASSI, C., OTMANI, H. (2010).** Etude de protection de la zone de Club des Pins. Mémoire d'ingénieur, ENSSMAL, Alger. 93 p.
- BERTIER, J. (2009).** Analyse multi-échelles de la morphodynamique d'une plage artificielle, avant-port Ouest de Dunkerque (Nord de la France). Thèse de Doctorat, Université du Littoral Côte d'Opale, Dunkerque. 303 p.
- BONNEFILLE, R. (1992).** Cours d'Hydraulique Maritime. 3<sup>e</sup> éd. Paris : 208 p.
- BONNETON, P. (2003).** Dynamique non-linéaire des vagues en zone de surf interne. Revue Française de Génie Civil, numéro spécial 'Génie-Côtier'.
- BOUTIBA, M. (1996).** Etude en vraie grandeur du mode de fonctionnement des ouvrages de protection de la plage Est de Sidi Fredj (Ouest d'Alger). Thèse de magister ISMAL. pp. 122-123.
- BUTT, T., & RUSSELL, P.E. (2000).** Hydrodynamics and crossshore sediment transport on natural beaches: a review. *Journal of Coastal Research*. vol. 16(2). pp. 255-268.
- 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 de doctorat. Université Bordeaux I*. 342 p.
- CORDIER, E. (2007).** Dynamique hydrosédimentaire du récif frangeant de l'Hermitage/La Saline (La Réunion) : Processus physiques et flux sédimentaires. Thèse de Doctorat, Université De la Reunion, la Reunion, 193 p.
- DEHOUCK, A. (2006).** Morphodynamique des plages sableuses de la mer d'Iroise (Finistère). Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Ecole Doctorale des Sciences de la Mer, Brest. 263 p.
- DESMAZES, F. (2005).** Caractérisation des barres sableuses d'une plage de la côte aquitaine. Exemple de la plage du truc vert. *Thèse de doctorat. Université Bordeaux I*. 291 p.
- DE VRIEND, H.G. (1991).** Mathematical modelling and large-scale behaviour. Part 1: Physical processes. *Journal of Hydraulic Research*. vol. 29(6). pp. 727-740.
- DJOUDER, F., SMAOUN, A. (2011).** Évaluation de la vulnérabilité à l'élévation du niveau de la mer dans la partie Ouest du golfe de Béjaia, entre Cap Carbon et Cap Aokas. *Mémoire de Master, USTHB, Alger*.
- EHRHOLD, A., & AUFFRET, J.P. (1996).** Approche bidimensionnelle des transports sédimentaires à partir des variations granulométriques des sédiments superficiels : Exemple de la partie occidentale de la baie du Mont Saint-Michel, Laboratoire de Géologie Marine, Université de CAEN.
- GAO, S. (1996).** A Fortran program for grain-size analysis to define net sediment transport. *Computers and Geosciences*. vol. 22(4). pp. 449-452.

- GAO, S., & COLLINS, M. (1991).** A critique of the "McLaren method" for defining sediment. *Journal of Sedimentary Petrology*. vol. 61. pp. 143-146.
- GAO, S., & COLLINS, M. (1992).** Net sediment transport patterns inferred from grain-size. *Sedimentary Geology*. vol. 80. pp. 47-60.
- GAO, S., & COLLINS, M. (1994a).** Analysis of grain-size trends for defining sediment transport. *Journal of Coastal Research*. vol. 10 (1). pp. 70-78.
- GAO, S., & COLLINS, M. (1994b).** Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors"-reply. *Sedimentary Geology*. vol. 90. pp. 157-159.
- GREENWOOD, B., & OSBORNE, P.D. (1990).** Vertical and horizontal structure in cross-shore flows: An exemple of undertow and set-up on barred each. *Coastal Engineering*. vol. 4. pp. 543-580.
- HADEF, R. (2008).** Quel projet urbain pour un retour de la ville a la mer ? Cas d'étude : Skikda. Mémoire de Magister, Université de Constantine, 330 p.
- JIMENEZ, J.A. and SANCHEZ-ARCILLIA, A. (1993).** Medium-term coastal response at the Ebro delta, Spain. *Marine Geology*. vol. 114. pp. 105-118.
- KOMAR, P., & INMAN, D. (1970).** Longshore sand transport on beaches. *Journal of Geophysical Research*. vol. 75. pp. 227-230.
- KOMAR, P.D. (1998).** *Beach Processes and Sedimentation*. Prentice- Hall, New Jersey, USA.
- KROON, A. (1994).** Sediment transport and morphodynamics of the beach and nearshore zone, near Egmond, The Netherlands. These de Doctorat, Univ. Utrecht (NL), 275 p.
- KULKARNI, (2002).** Morphodynamique de zone de swash, doctorat de l'université de Caen.
- KUMAR, V.S., CHANDRAMOHAN, P., KUMAR, K.A., GOWTHAMAN, R. and PEDNEKAR, P., (2000).** Longshore currents and sediment transport along Kannirajapuram coast, Tamilnadu, India. *Journal of Coastal Research*. vol. 16(2). pp. 247-254.
- LAYOUNE, A., TIGUERCHA, D. (2011).** Application de la modélisation numérique pour l'étude de l'ensablement du port de cap Djinet. Mémoire d'ingénieur, ENSSMAL, Alger, 80 p.
- Le Programme Européen pour l'Aménagement Intégré des Zones Côtières. Luxembourg : 1992. office des publications officielles des communautés européennes. p11
- MEZOUAR, K. (2009).** Etude comparative entre les méthodes de protection des deux littoraux Algerien et Roumain. Thèse de doctorat. Université Technique de Construction de Bucarest. 404 p.

- MCLAREN, P. (1981).** An interpretation of trends in grain size. *J. Sed. Pet.* vol. 51. pp. 611-624
- MCLAREN, P., & BOWLES, D. (1985).** The effect of sediment transport on grain-size distribution. *Journal of Sedimentary Petrology.* vol. 55 (4). pp. 457-470
- Météo France ; 1989-2008 -** Direction de la production, département services.
- MILLER, H.C. (1999).** Field measurements of longshore sediment transport during storm. *Coastal Engineering.* vol. 36. pp. 301-321.
- PASKOFF, R. (1993).** Côtes en danger. Ed Masson. Paris, p250.
- PASKOFF, R. (2001).** L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers.
- PIAN, S. (2010).** Analyse multiscalaire et multifactorielle de l'évolution et du comportement géomorphologique des systèmes côtiers sud bretons. Thèse de Doctorat. Université de Rennes 2 Haute Bretagne, France.
- S.S.M.O ; 1963-1970 -** Tome II. Zone Algérienne.
- STEPANIAN, A. (2002).** Evolution morphodynamique d'une plage macrotidale à barres : Omaha beach (Normandie), Thèse de doctorat, Université de Caen.
- SVENDSEN, I.A. (1984).** Wave heights and set-up in the surf zone. *Coastal Engineering.* vol. 8. pp. 303-329.
- WRIGHT, L.D., & THOM, B.G. (1977).** Coastal depositional landforms: a morphodynamic approach. *Progress in Physical Geography.* vol. 1(3). pp. 412-459.
- ZEMENZER, S. (2004).** Ensablement du port par transport sédimentaire : simulation et application du modèle de Gao et Collins (1994) au port de Sidi-Fredj. Mémoire d'ingénieur, ISMAL, Alger, 51 p.



**ANNEXES**

### **a. Le littoral, un espace attractif :**

Il convient de bien cerner les caractéristiques suivantes :

- *L'originalité*
- L'espace littoral est un milieu original, singulier. Original, donc il est naturellement attractif, car l'espace littoral est un espace de contact entre deux milieux terrestre et maritime, entre :
  - o *Un avant* : la mer, à la nature influente par ses vagues, ses marées, ses courants, son autre rivage.
  - o *Un arrière* : pays tout aussi influant par sa profondeur, son développement, ses propres dynamiques naturelles.
- Enfin attractif, par sa définition déjà, mais aussi pour d'autres raisons qui tiennent à la double nature de ses composantes qui lui confèrent d'autres dynamiques ; ressources alimentaires ; avantages climatiques (douceur, modération, humidité) ; site favorable.

### **b. L'espace littoral est un espace commandé**

Le littoral est comme les montagnes, un espace où la nature prime, mais où l'homme détermine, et c'est toute la géographie...! C'est un espace contradictoire en apparence du sujet ! C'est l'homme en effet qui détermine, s'il occupe, aménage, pour quelles raisons et pour quoi faire.

### **c. L'espace littoral est un espace inégalement aménagé et urbanisé :**

Les différents types d'aménagement : portuaires, industrialo- portuaires, touristiques, liés à la pêche, à l'aquaculture, expliquent l'intense activité de certaines façades maritimes.

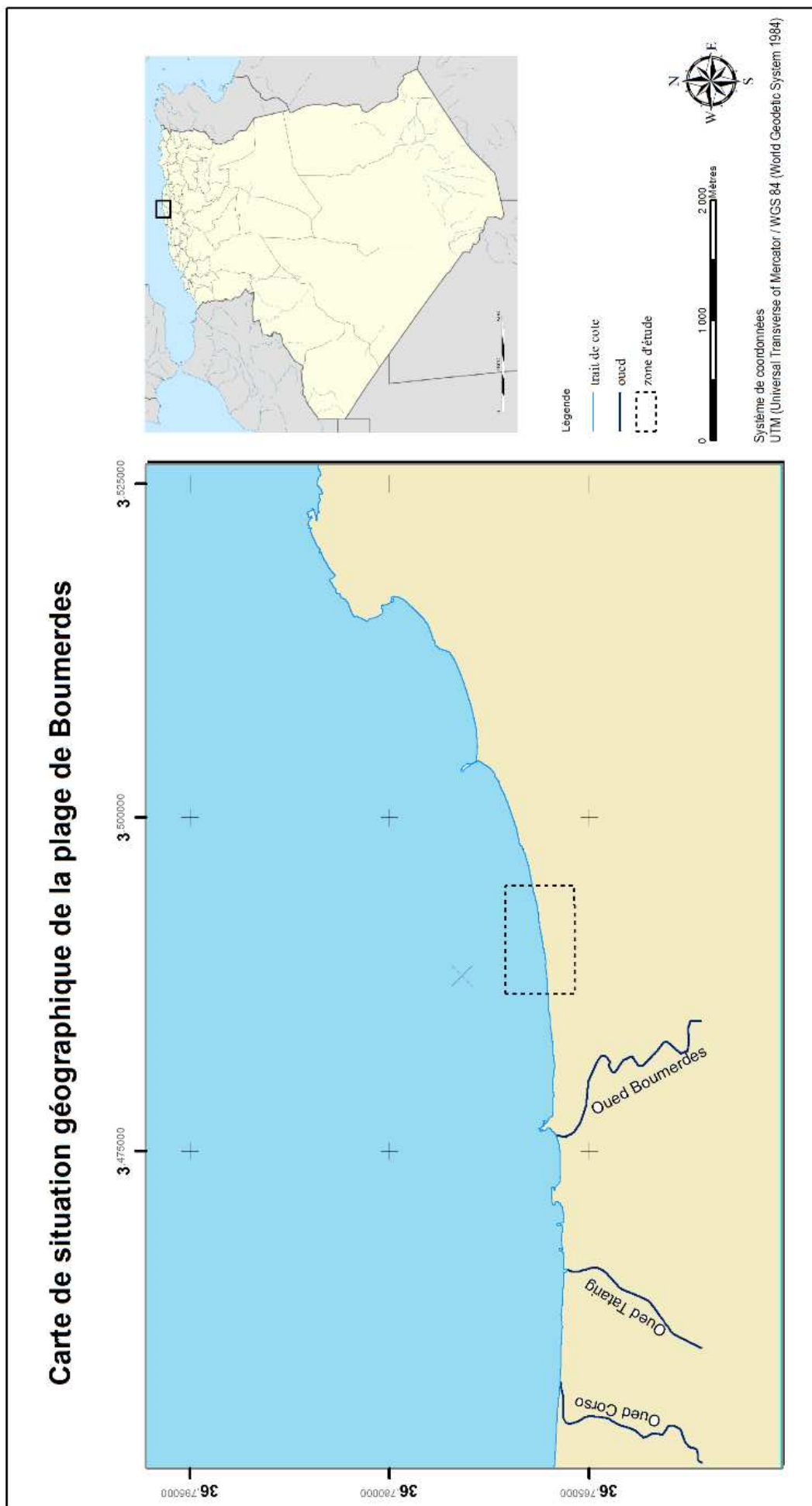
Ces aménagements se traduisent par une forte urbanisation et s'y traduisent des volontés d'acteurs :

- les habitants.
- les pêcheurs qui veulent plutôt conserver.
- les écologistes.
- les touristes qui souhaitent un cadre agréable, mais aussi de pouvoir installer village et font de mer.
- les industriels, commerçants, marchands de tourisme.

Ce sont ces actes qui, pour des enjeux parfois contradictoires, ont modifié moult littoraux et cela se traduit par des paysages qui évoluent en traduisant la compétition des activités.

### **c. L'espace littoral est convoité :**

C'est un espace modifié, menacé : convoité, il est le lieu de nombreux enjeux où s'affrontent, où se conjugue l'action des différents acteurs pour une artificialisation croissante.



**Figure n°09 : Situation géographique de la plage de Boumerdes Ouest. (HAMMOUD, 2014)**

**Les vents :****Station :** ALGER DAR-EL-BEIDA**Altitude :** 25 m - **Latitude :** 36°41 N - **Longitude :** 03°13 E**Tableau B-1 :** Vitesse des vents, moyenne mensuelles et annuelles en (m/s).

	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	An
<b>1995</b>	23	17	21	20	22	28	24	23	22	12	24	29	<b>22</b>
<b>1996</b>	29	36	28	28	24	24	22	20	22	13	24	20	<b>24</b>
<b>1997</b>	26	12	15	21	21	21	27	23	20	18	29	19	<b>21</b>
<b>1998</b>	22	12	14	26	21	21	21	21	25	17	18	13	<b>19</b>
<b>1999</b>	20	22	20	16	28	28	28	32	28	26	24	33	<b>25</b>
<b>2000</b>	12	19	21	43	25	25	32	32	28	28	33	32	<b>28</b>
<b>2001</b>	33	24	31	30	33	33	31	25	30	19	20	14	<b>27</b>
<b>2002</b>	15	20	28	27	31	31	31	24	29	24	30	28	<b>27</b>
<b>2003</b>	40	34	20	27	25	28	27	25	24	20	25	33	<b>27</b>
<b>2004</b>	24	20	23	32	31	24	24	24	20	16	16	32	<b>24</b>
<b>2005</b>	20	26	21	30	27	28	35	31	24	20	21	23	<b>26</b>

**Tableau B-2:** Fréquences mensuelles de la houle au large par direction :

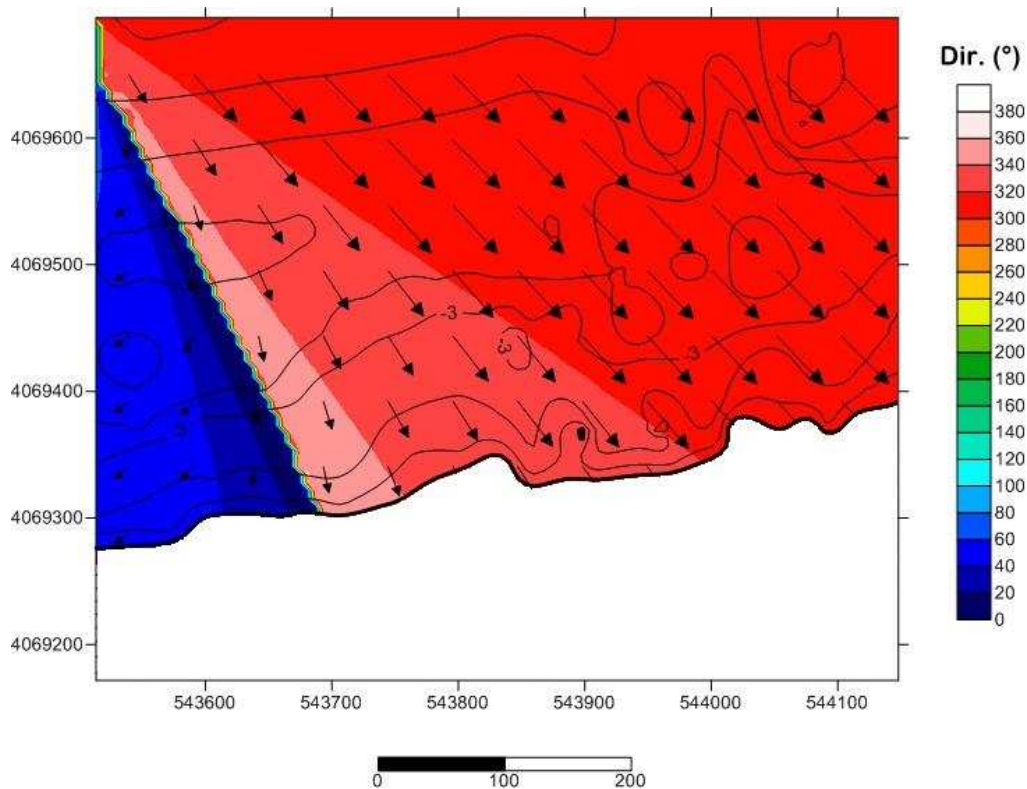
<b>Direction</b> <b>Mois</b>	<b>N</b>	<b>NE</b>	<b>E</b>	<b>SE</b>	<b>S</b>	<b>SW</b>	<b>W</b>	<b>NW</b>
<b>J</b>	8.10	12.90	18.20	5.60	6.50	13.20	28.80	7.30
<b>F</b>	8.80	10.30	12.60	4.00	6.10	16.90	35.60	5.80
<b>M</b>	11.30	12.60	15.80	3.60	4.50	12.30	30.50	9.20
<b>A</b>	11.70	15.40	16.00	2.00	4.40	13.70	26.70	10.20
<b>M</b>	8.20	26.30	31.90	3.00	3.30	7.20	13.90	6.20
<b>J</b>	9.20	29.10	29.80	1.80	1.40	8.20	16.40	4.20
<b>J</b>	5.90	32.50	35.10	1.40	1.00	5.90	16.30	2.00
<b>A</b>	8.80	27.70	37.30	1.90	1.10	5.00	13.40 ;	4.90
<b>S</b>	6.70	26.40	40.50	2.20	2.30	4.60	14.80	10.50
<b>O</b>	7.80	14.10	20.30	3.20	4.20	14.80	28.80	6.80
<b>N</b>	5.50	5.80	10.00	5.10	8.00	15.90	40.40	9.40
<b>D</b>	10.20	6.20	9.40	4.60	7.50	15.00	37.10	01.00
<b>Annuel</b>	8.50	18.30	23.10	3.20	4.20	11.10	55.20	5.62

**Tableau B-3 :** Analyse des régimes de vent :

<b>Echelle de Beaufort</b>	<b>Vitesse de vents (Km/h)</b>	<b>Terme descriptif</b>	<b>Effets observés sur la mer</b>
0	Moins de 1	Calme	La fumée s'élève verticalement, la mer est comme un miroir.
1	1-5	Très légère brise	La fumée est déviée, la mer est sans écume.
2	6-11	Légère brise	Les vaguelettes sont courtes.
3	12-19	Petit brise	Les petites vagues déferlent.
4	20-28	Jolie brise	Le vent soulève la poussière sur les vagues, les moutons sont nombreux.
5	29-39	Bonne brise	Les vagues sont modérées.
6	39-49	Vent frais	Des lames se forment.
7	50-61	Grand frais	La marche contre le vent est pénible, lamer grossit
8	62-74	Coup de vent	Des tourbillons d'embrun se détachent Des lames.
9	75-88	Fort coup de vent	La crête des lames déferle en rouleaux.
10	89-102	Tempête	Les lames déferlent et réduisent la visibilité.
11	103-117	Violente	La mer est recouverte d'écumes.
12	118 et plus	Ouragan	La visibilité est très réduite.

Premier Cas : (Hs= 3,74m ; T=10s ; Direction 45° N)

Direction :



Hauteur significative :

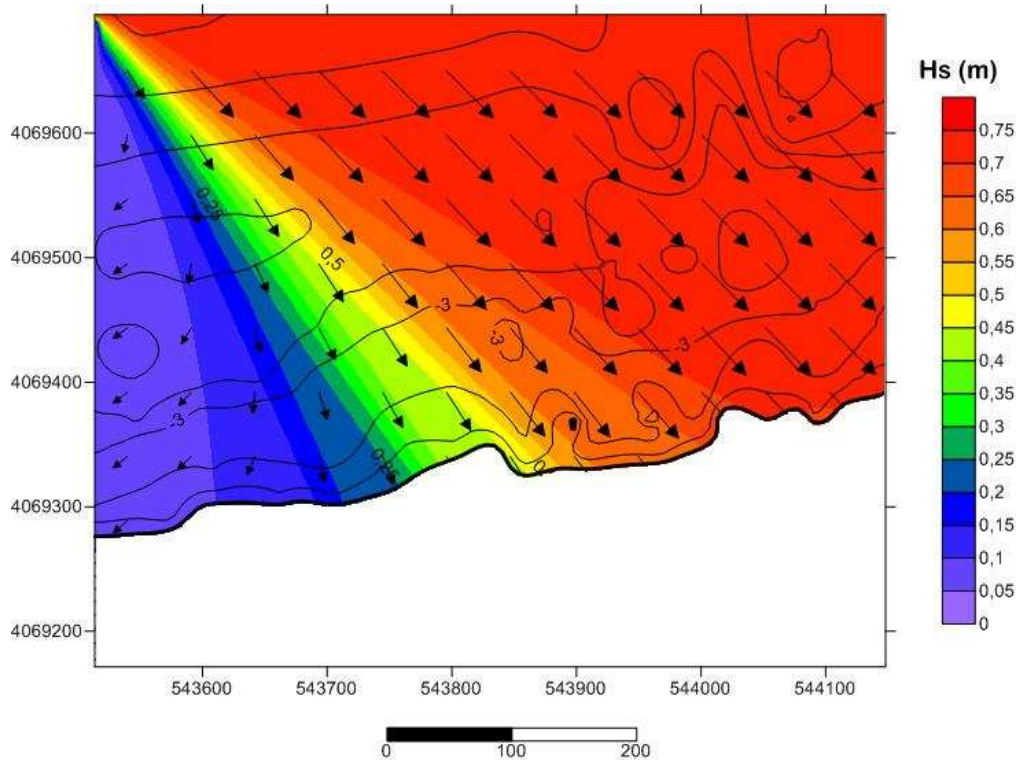
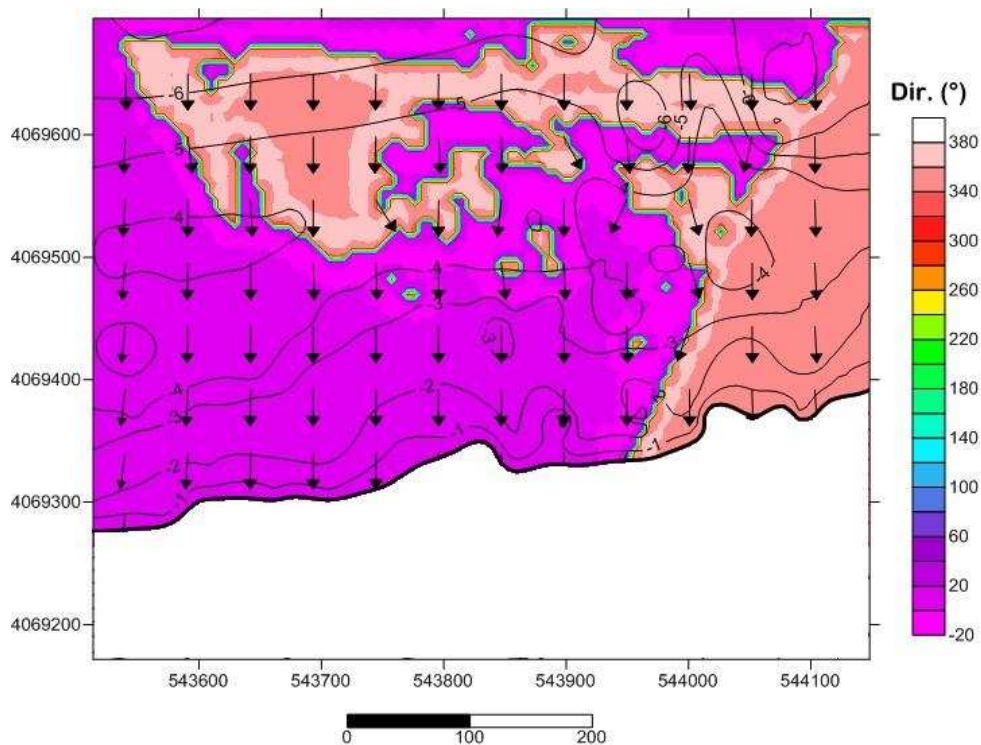


Figure n°12 : Simulation de la houle pour une direction 45°N et une période de 10s.

Deuxième Cas : (Hs= 2,65m ; T=08s ; Direction 360° N)

Direction :



Hauteur significative :

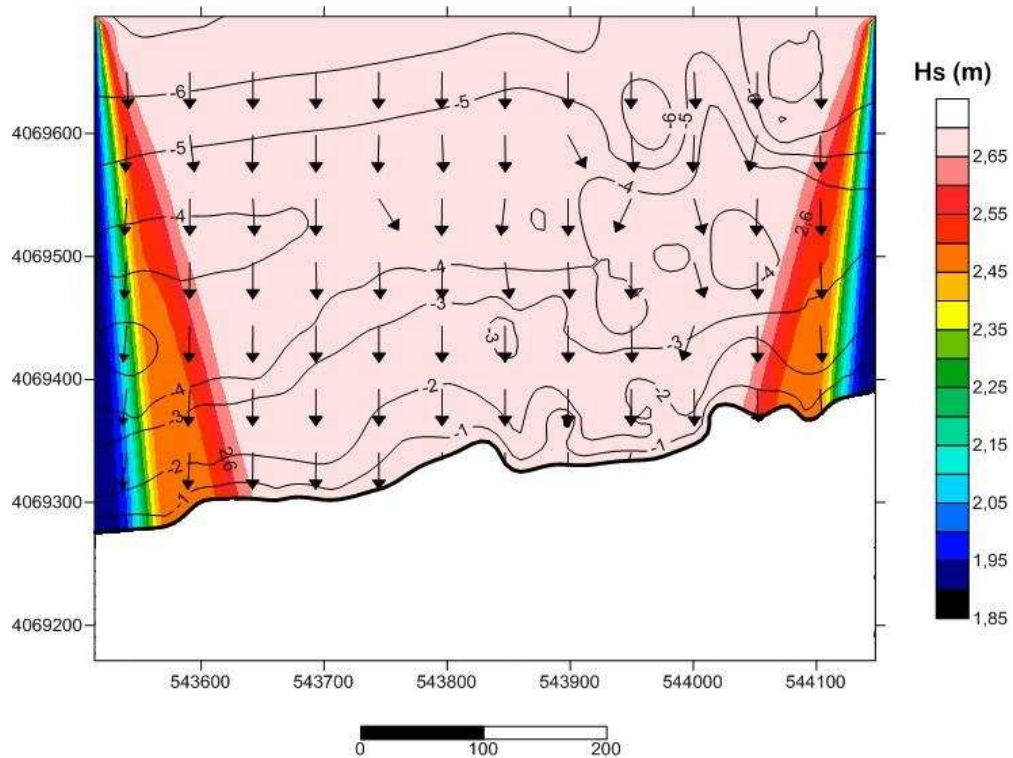
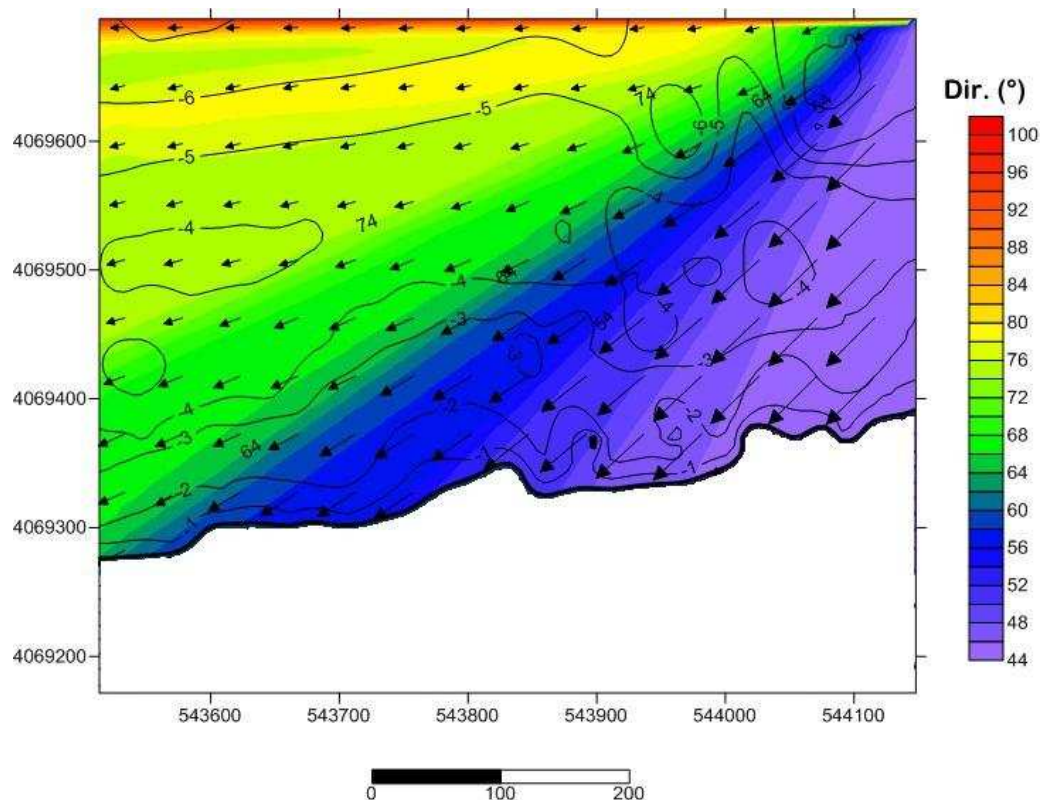


Figure n°13 : Simulation de la houle pour une direction 360°N et une période de 08s

Troisième Cas : (Hs= 0,72m ; T=06s ; Direction 315° N)

Direction :



Hauteur significative :

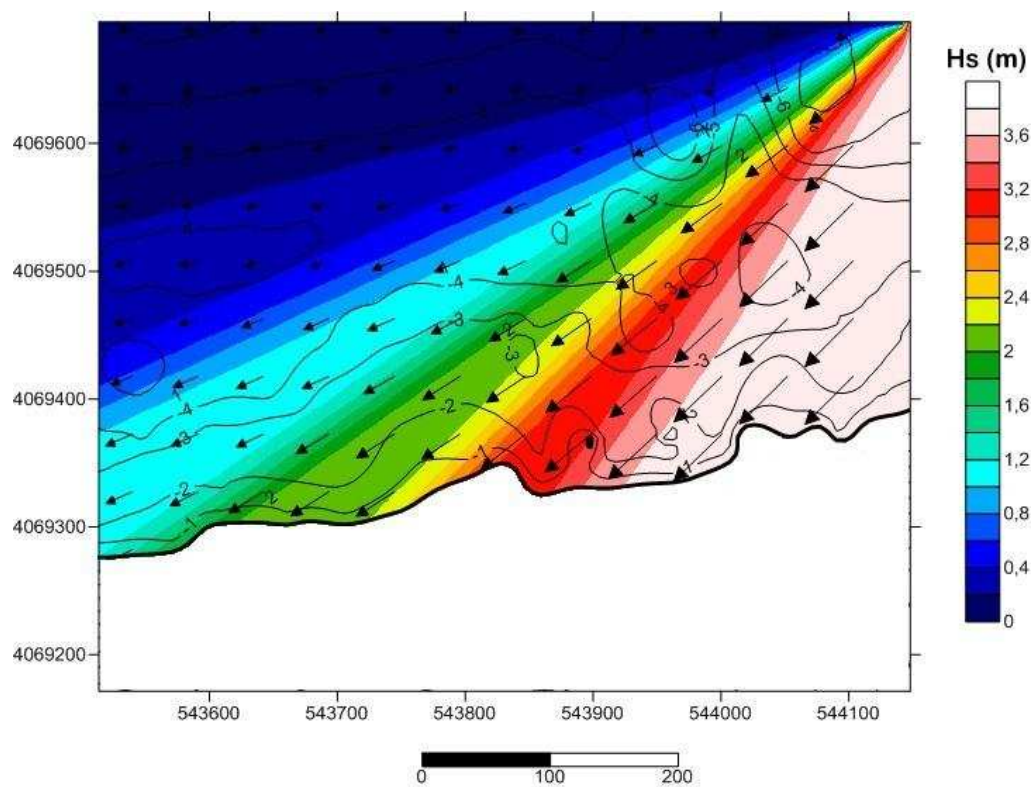


Figure n°14 : Simulation de la houle pour une direction 315°N et une période de 06s.

Ho = 1.2m T = 6s			Ho = 2.2m T= 8s			Ho = 3m T = 9s			Ho =4.5m T =11s		
Øbr (°)	Hbr (m)	S (m³/an)	Øbr (°)	Hbr (m)	S (m³/an)	Øbr (°)	Hbr (m)	S (m³/an)	Øbr (°)	Hbr (m)	S (m³/an)
-2	1.30	-38221	-2	2.38	-197553	-2	4.91	-434878	-2	7.36	-434878
-6	1.29	-78719	-6	2.36	-405993	-7	3.18	-895725	-7	4.77	-2722076
-10	1.27	-101913	-11	2.31	-525655	-11	3.12	-1159886	-11	4.67	-3524890
-14	1.23	-113129	-14	2.23	-583544	-15	3.01	-1285271	-15	4.51	-3906005
17	1.16	-113064	17	2.12	-584450	18	2.86	-1287373	18	4.28	-3912411
20	1.07	-102781	20	2.96	-530204	20	2.64	1170204	20	3.96	-3556312
21	0.95	-83179	21	1.74	-429007	21	2.35	-946555	22	3.52	-2876561
20	0.79	-55948	20	1.44	-288441	21	1.93	-634455	21	2.89	-1927995
17	0.53	-22908	17	0.86	-11803	18	1.29	-259066	18	1.94	-789419
16	0.44	15696	16	0.84	80840	16	1.09	177891	16	1.64	540495
20	0.74	49653	20	1.35	256603	21	1.83	564238	21	2.74	1714583
21	0.93	78354	21	1.69	404082	22	2.27	889590	22	3.41	2703439
20	1.05	99560	20	1.92	513578	21	2.59	1133468	21	3.88	3444659
18	1.15	111887	18	2.99	577179	19	2.82	1273905	19	4.23	3871470
15	1.21	113905	15	2.21	587572	16	2.99	1296758	16	4.48	3940902
11	1.26	104995	11	2.29	545572	12	3.10	1195079	12	4.64	3631858
7	1.29	84400	7	2.35	435301	7	3.17	960425	7	4.75	2918707

Tableau D-1 : Transit littoral en fonction de Øbr, Hbr et selon *Kamphuis*.

Direction de compas.	Ø <sub>0</sub> (°)	T = 6s S (m³/an)	T = 8s S (m³/an)	T = 9s S (m³/an)	T = 11s S (m³/an)	Total (m³/an)
260°	-40°	-5447	-8673	-4648	-3174	-21942
270°	-14°	-11218	-17824	-9584	-19871	-58497
260°	-24°	-14523	-23076	-12410	-25731	-75740
290°	-34°	-16121	-25616	-13752	-28973	-84002
300°	-44°	-7463	-13560	-11328	-14475	-46826
310°	-54°	-6784	-12300	-10297	-13158	-42539
320°	-64°	-5490	-9952	-8329	-10643	-34414
330°	-74°	-3693	-6692	-5583	-7133	-23101
340°	-84°	-1512	-274	-129	-394	-2309
350°	86°	518	485	88	270	1361
360°	76°	1639	1539	282	514	3974
10°	66°	2585	2424	445	811	6265
20°	56°	3285	2208	1020	1033	7546
30°	46°	4083	2481	1146	1161	8871
40°	36°	4157	2527	1167	1182	9033
50°	26°	3832	2328	1075	1089	8324
60°	16°	3080	1871	864	875	6690

Tableau D-2 : Transit littoral total selon la formule de *Kamphuis* (1991)

Ho = 1.2m T = 6s			Ho = 2.2m T = 8s			Ho = 3m T = 9s			Ho = 4.5m T = 11s		
θ <sub>br</sub> (°)	H <sub>br</sub> (m)	S (m <sup>3</sup> /s) 10 <sup>-6</sup>	θ <sub>br</sub> (°)	H <sub>br</sub> (m)	S (m <sup>3</sup> /s) 10 <sup>-6</sup>	θ <sub>br</sub> (°)	H <sub>br</sub> (m)	S (m <sup>3</sup> /s) 10 <sup>-6</sup>	θ <sub>br</sub> (°)	H <sub>br</sub> (m)	S (m <sup>3</sup> /s) 10 <sup>-6</sup>
-2	1.30	-1155	-2	2.38	-6502	-2	4.19	-13889	-2	7.36	-14039
-6	1.29	-2497	-6	2.36	-13073	-7	3.18	-28513	-7	4.73	-86556
-10	1.27	-3181	-11	2.31	-16868	-11	3.12	-36899	-11	4.67	-112033
-14	1.23	-3587	-14	2.23	-18704	-15	3.01	-40885	-15	4.51	-124158
-17	1.16	-3535	-17	2.12	-18782	-18	2.86	-40972	-18	4.28	-124311
-20	1.07	-3259	-20	1.96	-17012	-20	2.64	-37266	-20	3.96	-113019
-21	0.95	-2587	-21	1.74	-13813	-21	2.35	-30185	-22	3.52	-91385
-20	0.79	-1774	-20	1.44	-9296	-21	1.93	-20318	-21	2.89	-61356
-17	0.53	-716	-17	0.96	-494	-18	1.29	-8424	-18	1.94	-25232
16	0.44	432	16	0.84	2763	16	1.09	5840	16	1.64	17288
20	0.74	1574	20	1.55	8336	21	1.83	18051	21	2.74	54529
21	0.93	2408	21	1.69	13063	22	2.27	28358	22	3.45	85885
20	1.05	3057	20	1.92	16435	21	2.59	36122	21	3.88	109429
18	1.15	3500	18	3.99	18502	19	2.82	40520	19	4.23	12286
15	1.21	3456	15	2.91	18831	16	2.99	41299	16	4.48	125085
11	1,26	3234	11	2.29	17373	12	3.10	38035	12	4.64	115165
7	1.29	1035	7	2.35	13953	7	3.17	30614	7	4,75	92701

Tableau D-3 : Transit littoral selon Bijker.

Direction de compas (°)	θ° (°)	T = 6s 10 <sup>-6</sup>	T = 8s 10 <sup>-6</sup>	T = 9s 10 <sup>-6</sup>	T = 11s 10 <sup>-6</sup>	Total 10 <sup>-6</sup>
260	-4	-164.12	-285.42	-148.06	-102.49	-700.09
270	-14	-355.23	-573.07	-305.18	-631.86	-1865.34
280	-24	-453.37	-740.16	-394.21	-817.84	-1605.58
290	-34	-511.08	-821.16	-437.08	-906.35	-2675.67
300	-44	-233.11	-435.42	-360.13	-459.95	-1488.69
310	-54	-215.13	-394.33	-327.12	-415.17	-1351.75
320	-64	-170.02	-320.91	-265.01	-338.12	-1094.06
330	-74	-177.81	-215.42	-178.02	-266.87	-838.12
340	-84	-47.13	-3.37	-4.21	-12.61	-67.32
350	86	14.22	17.81	0.12	5.45	37.6
360	76	52.17	50.06	9.02	27.26	138.51
10	66	79.16	78.12	14.17	42.94	214.39
20	56	111.21	71.09	32.50	32.82	247.62
30	46	127.06	79.13	36.46	36.85	279.51
40	36	126.07	80.12	37.16	37.52	280.87
50	26	118.01	74.24	34.23	34.54	261.02
60	16	37.20	59031	27.55	27.81	151.47

Tableau D-4 : Transit littoral selon la formule de Bijker.

**Tableau D-5** : Transit littoral selon la formule de CERC (1984).

Direction de compas (°).	$\theta^\circ$ (°)	T = 6s Qt (m <sup>3</sup> /an)	T = 8s Qt (m <sup>3</sup> /an)	T = 9s Qt (m <sup>3</sup> /an)	T = 11s Qt (m <sup>3</sup> /an)	Total
260	-4	-2677	-3714	-1901	-3683	-11979
270	-14	-8941	-12521	-6445	-12303	-40224
280	-24	-14027	-19642	-10268	-19302	-63263
290	-34	-1710	-24059	-12696	-2386	-40885
300	-44	-8418	-13327	-10946	-12681	-45416
310	-54	-771	-12331	-10035	-11625	-34816
320	-64	-6039	-9653	-7858	-9103	-32717
330	-74	-3690	-5900	-4850	-5619	-20133
340	-84	-596	-493	-891	-243	-2307
350	86	368	305	54	150	963
360	76	1603	1313	237	653	3882
10	66	2794	2310	417	1149	6736
20	56	3725	3079	550	1517	8927
30	46	461	2470	1109	1018	5104
40	36	4514	2417	1085	996	9048
50	26	3810	2040	1005	841	7722
60	16	2585	1384	621	570	5176

**Tableau D-6** : Transit littoral en fonction de  $\theta_{br}$ ,  $H_{br}$  et selon CERC (1984).

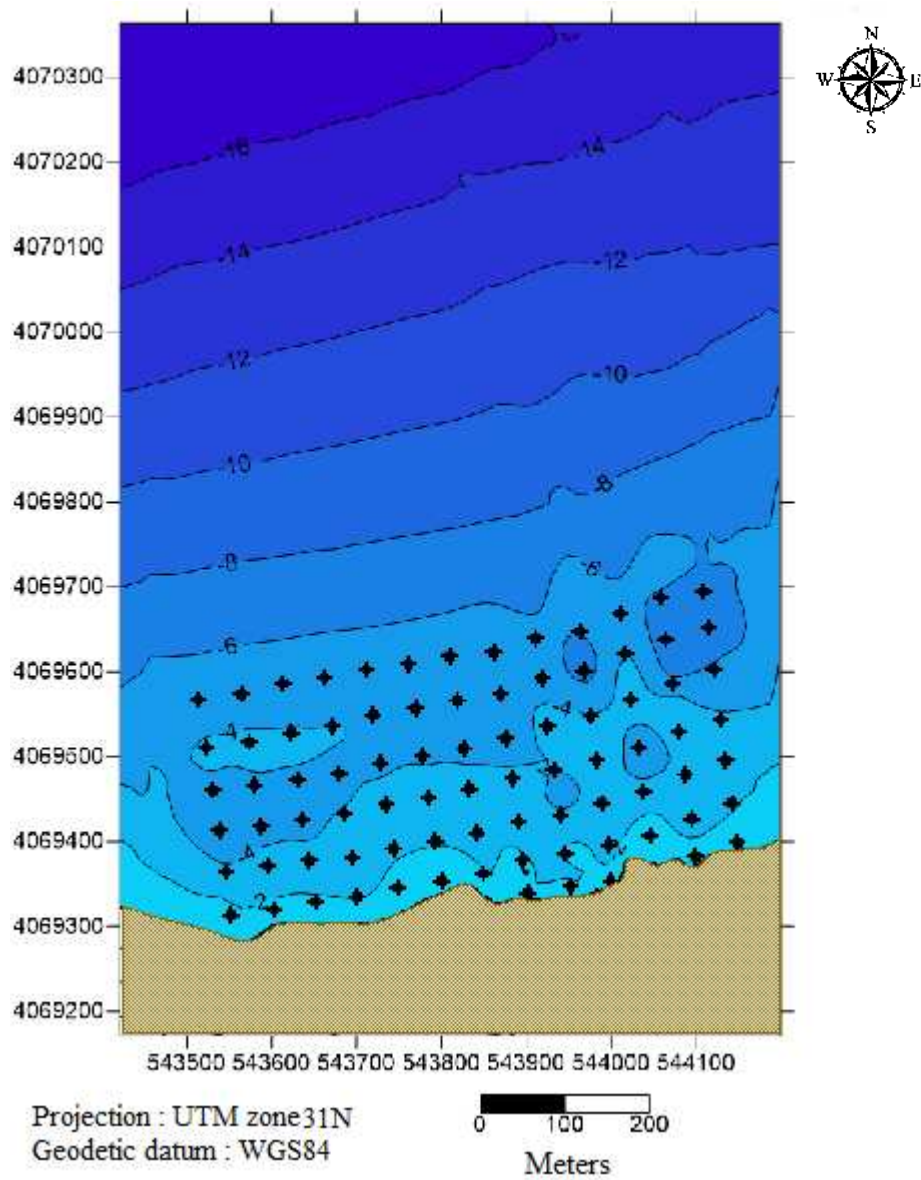
Ho = 1.2 T = 6s			Ho = 2.2 T = 8s			Ho = 3 T = 9s			Ho = 11.5 T = 11s		
$\theta_{br}$ (°)	$H_{br}$ (m)	Qt (m <sup>3</sup> /an)	$\theta_{br}$ (°)	$H_{br}$ (m)	Qt (m <sup>3</sup> /an)	$\theta_{br}$ (°)	$H_{br}$ (m)	Qt (m <sup>3</sup> /an)	$\theta_{br}$ (°)	$H_{br}$ (m)	Qt (m <sup>3</sup> /an)
-2	1.30	-18786	-2	2.38	-84601.4	-2	3.09	-177664	-2	4.80	-504521
-6	1.29	-62743.9	-6	1.29	-285216	-7	3.18	-602336	-7	4.74	-1685342
-10	1.27	-98435.1	-11	1.27	-447426	-11	3.12	-959626	-11	4.64	-2644110
-14	1.23	-12000	-14	2.29	-548041	-15	3.01	-1186542	-15	4.51	-326849
-17	1.16	-127545	-17	2.12	-574440	-18	2.86	-1243864	-18	2.28	-3427297
-20	1.07	-11681.8	-20	1.96	-531509	-20	2.64	-1140341	20	3.96	-3141892
-21	0.96	-91500	-21	1.74	-416078	-21	2.35	-892955	22	3.52	-2460270
-20	0.79	-55909.1	-20	1.44	-254310	-21	1.93	-551136	21	2.89	-1518649
-17	0.53	-18060.6	-17	0.96	-82166.7	-18	1.29	-1782000	18	1.94	-486000
16	0.44	11151.52	16	0.81	50833.33	16	1.09	108000	16	1.64	300000
20	0.74	48575.76	20	1.36	218833.3	21	1.83	474000	21	2.74	1306000
21	0.93	84666.67	21	1.69	385000	22	2.27	834000	22	3.41	2298000
20	1.05	112878.8	20	1.92	513166.7	21	2.59	1100000	21	3.88	3034000
18	1.15	12630.14	18	2.09	411666.7	19	2.82	2218000	19	4.23	2036000
15	1.21	123671.2	15	2.21	562093	16	2.99	1205556	16	4.48	3320000
11	1.26	104383.6	11	2.29	474418.6	12	3.10	1116667	11	4.64	2803333
7	1.29	70821.92	7	2.35	321860.5	7	3.17	690000	7	4.75	1900000

### **L'utilisation du GSTA (Shu 1996) :**

Le logiciel GSTA est un programme de Fortran dédié pour l'analyse de transport sédimentaire. Il suffit de spécifier le fichier d'entrée nommé GSTA.dat et le nom de sorti, pour qu'à la fin on obtienne un fichier qui contient les coordonnées des stations avec les directions de transport sédimentaire.

Le modèle mathématique GSTA est programmé pour faire les opérations suivantes :

- Premièrement, les paramètres d'un échantillon sont comparés avec ceux des sites environnants tels que la distance entre les deux points soit inférieure ou égale à une Distance Critique d'échantillonnage (Dcr) qui correspond à la distance maximum séparant deux points adjacents. Un vecteur de grandeur unitaire ou vecteur de tendance  $r(x,y)$  est dessiné à chaque fois que l'un des 2 cas sont observés entre 2 points, dans les 2 cas le tri s'améliore de l'amont vers l'aval du transport, qu'il s'agisse d'une diminution des tailles des grains ou d'une augmentation.
- Le principe est de faire une comparaison unidirectionnelle entre deux prélèvements, et puisque on a trois paramètres à comparer, on se trouve avec 8 cas possibles, or les différentes applications en nature ont mené les deux auteurs à ne considérer comme significatif d'un transport sédimentaire que deux cas possibles. Lorsqu'un des deux cas est identifié entre les deux sites, un vecteur de tendance  $r(x,y)$  est dessiné.



**Figure E-1** : Situation des stations de prélèvements (HAMMOUD, 2014)

### Méthodologie du suivi morpho-sédimentaire :

L'observation de l'évolution morphosédimentaire des plages est réalisée par la mise en place d'un suivi topographique et bathymétrique.

Le suivi morphologique est fondé sur l'acquisition de séries temporelles de mesures topographiques des estrans à l'aide d'un GPS sur la plage. Le protocole de levé se décompose en plusieurs étapes. Des clous topographiques sont installés sur des invariants de manière à identifier sans aucun doute possible le point de mise en station, la tête de profil, les points de calage à chaque levé. On effectue le rattachement du point de mise en station local (mobile DGPS) à une borne IGN-NTF (coordonnées géographiques connues) sur laquelle est disposée la station de référence.

La station DGPS ou le tachéomètre est positionné sur le clou topographique de mise en station en prenant soin de s'assurer de l'horizontalité de la plateforme de mesure, de définir le système de référence (sélection de l'azimut) et de paramétrer les coordonnées du point de mise en station, la hauteur du réflecteur ou du mobile DGPS sur la canne topographique. Le levé topographique consiste à mesurer la topographie de l'estran le long d'un profil depuis le haut de plage jusqu'à la ligne de rivage.

#### 1. Résolutions temporelle et spatiale

La fréquence des levés topographiques est hebdomadaire lors des deux années (juin 2006 – septembre 2008) du suivi morphologique de plage de Boumerdès Ouest.

Le rythme exigeant des levés, facilite autorise l'analyse de la variabilité morphologique à l'échelle saisonnière et événementielle. Au terme d'une dizaine de mois de suivi.

	Nombre de levés topographiques	Période de levés
<b>Boumerdès Ouest</b>	<b>42</b>	Avril 2006- Aout 2008

**Tableau F-1:** Caractéristiques des séries morphologiques à moyen terme

La plage semble avoir une faible variabilité longitudinale, on a restreint les levés à quelques profils au centre.

#### 2. Le suivi bathymétrique

Les levés bathymétriques sont plus difficiles à mettre en œuvre comparativement à un levé topographique terrestre, du fait de la multiplicité des moyens à mobiliser et des contraintes inhérentes à la mesure. Une série de levés bathymétriques sur le site d'étude. L'observation d'une dynamique morphologique forte de l'estran a motivé le prolongement des levés topographiques jusque sur la plage subtidale.

Une embarcation stable, à coque rigide et à faible tirant d'eau pour favoriser les conditions d'acquisition de la mesure jusqu'à proximité de la ligne de rivage, avec un échosondeur pour obtenir les différentes profondeurs à différents points localisés par un GPS. Les mesures sont fortement conditionnées par les conditions météorologiques puisqu'une agitation faible du plan d'eau et l'absence de clapot sont nécessaires pour obtenir une bonne précision.

### 3. Résolution temporelle du suivi bathymétrique

D'une fréquence initiale fixée à un levé bathymétrique mensuel, ce sont les créneaux de mer calme pendant l'hiver qui ont décidé du rythme des levés. Ainsi on dispose d'une série de levés bathymétriques s'échelonnant d'octobre 2006 à mars 2007 au rythme d'un levé mensuel au début de l'automne et au printemps, et d'un levé unique au cours de l'hiver. Malgré une fréquence hétérogène.

On dispose d'une série de levés bathymétriques sur la plage (Boumerdès Ouest) effectué par le **L.E.M.**, et l'**ISMAL**. Les premiers levés en juin et juillet lieu consécutivement à une longue période d'agitation très faible pendant le printemps et au début de l'été. Les levés bathymétriques se sont déroulés en suivant une radiale depuis la plage vers le large jusqu'à des profondeurs de 7 à 10m. Les données acoustiques, de positionnement absolu et relatif sont assimilées par la chaîne de traitement numérique. Les traitements sont ajustés de manière à obtenir en sortie des données facilement assimilables aux profils topographiques (élevations fonction d'une distance transversale). Seules les sondes acquises dans une bande de 10 m de part et d'autre de la radiale sont conservées, réduites à une moyenne et projetées sur une grille régulière.

Cette dernière partie de ce chapitre présente les résultats obtenus dans le cadre du suivi morpho-sédimentaire à cours et à moyen terme, l'analyse des données topographiques est conduite à l'aide des méthodes introduites précédemment : une analyse descriptive de la variabilité morpho-sédimentaire des profils basée sur des paramètres statistiques simples, une analyse factorielle donnant lieu à des modèles empiriques locaux de l'évolution morphologique des plages. Dans un second temps, on s'intéresse à la variabilité morphologique de la plage sous-marine et à la profondeur de fermeture des profils.