

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة 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 : AMENAGEMENT DU LITTORAL.

Thème :

Etude de protection de la plage Est de BOUMERDES.

Présenté par :

➤ **M. Amine MESSAOUD KHELIFI**

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

Mme. MEHDID S.

Maîtresse Assistante A (ENSSMAL)

Présidente

M. GUERFI S.

Maître de Conférences A (ENSSMAL)

Examineur

M. MEZOUAR K.

Maître de Conférences B (ENSSMAL)

Promoteur

Promotion : 2014

Remerciements

Au terme de ce travail, je remercie Dieu le tout puissant pour m'avoir donné la santé, le courage et la volonté, pour réaliser ce modeste travail.

Mes plus vifs remerciements à :

M. GUERFI S. Maître de Conférences A (ENSSMAL), qui m'a fait l'honneur d'accepter d'examiner ce manuscrit et de participer à ce jury.

Mme. MAHDID S. Maîtresse Assistante A (ENSSMAL) qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence de ce jury.

Je remercie **M. MEZOUAR K.** maître de conférences B pour avoir accepté d'encadrer ce travail, pour sa confiance, sa disponibilité, ses encouragements et ses précieux conseils au cours de la réalisation de ce mémoire.

Je remercie **M. ADJEL.M, MAOUJ.H, LAHMER.M** et **BENMHANIA.O** pour toutes leurs contributions.

Je remercie **Mlle. CHIKHI.M** pour son soutien moral et encouragements.

Mes profondes reconnaissances au personnel de la bibliothèque de l'ENSSMAL, ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont aidés du près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction Générale	9
I- Présentation de zone d'étude	
1. Données géographiques et géologiques	11
1.1 Cadre géographiques	11
1.2 Cadre géologique	12
2. Données climatologiques et hydrologiques	12
2.1. Données climatologiques	12
2.1.1. Précipitations	12
2.1.2. Température	13
2.2. Données hydrologiques	13
3. Données hydrodynamiques	14
3.1. Vent local	14
3.2. Houle au large	15
4. Modélisation morpho dynamique	16
4.1. Modèle spectral de vague SWAN	16
4.2. Principe de manipulation du modèle SWAN	17
4.3. Interprétation	17
5. Étude bathymétrique	18
5.1. Interprétation	18
6. Evolution du trait de côte	19
6.1. Méthodes et techniques utilisées	19
6.2. Interprétation	19
II- Transport sédimentaire et morphodynamique	
1. Aspects généraux de la dynamique sédimentaire	22
1.1. Agent de transport	22
1.2. Mouvement d'entraînement des sédiments sur le fond	22
1.3. Paramètres essentiels dans le mécanisme d'entraînement	22
1.4. Début d'entraînement	23
2. Transport sous l'action des houles	23
2.1. Quantification du débit solide	24
2.1.1. Calcul du débit solide par la méthode de Kamphuis (1991)	25
2.1.2. Calcul du débit solide par la méthode de CERC (1973)	26
2.1.3. Calcul de débit solide par la formule de Bijker (1971)	27
2.1.4. Comparaison des résultats obtenus par les trois (03) formules	28
3. Modélisation du transport sédimentaire	29
3.1. Calcul des tendances de transport sédimentaire	29
3.2. La méthode de McLaren /Gao et Collins	30
3.2.1. Principe du modèle	30
3.2.2. Limites du calcul des tendances de transport sédimentaire	31
3.2.3. Interprétation des résultats GSTA	32

III- Méthodes de protection contre l'érosion

1. Généralités sur les méthodes de protection	34
2. Nécessité d'une étude d'aménagement	34
3. Les ouvrages envisageable	34
3.1. Les géotubes	35
3.2. Les géo- containers	39
3.3. Apport artificiel	42

Conclusion générale	46
----------------------------	----

Bibliographie

Annexes

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Situation géographique de la zone d'étude (plage de Boumerdes Est).	11
Figure I.2 : Rose des vents (MEDATLAS).	14
Figure I.3 : Rose des houles (SSMO).	15
Figure I.4 : Carte bathymétrique de la plage Boumerdes Est (MESSAOUD KHELIFI, 2014).	19
Figure I.5 : L'évolution du trait de côte 2008 – 2014 (BOURTI, 2014).	20
Figure II.1 : La modélisation du transport sédimentaire par le modèle GSTA (MESSAOUD KHELIFI, 2014).	32
Figure III.1 : Caractéristiques dimensionnels des géotubes.	37
Figure III.2 : Emplacement des géotubes (MESSAOUD KHELIFI, 2014).	38
Figure III.3 : a) Bathymétrie de la zone protégée, b) Taux du transit sédimentaire par jour (Mezouar, 2009).	41
Figure III.4 : a) Amplitude de la houle pour la période 6s, b) Courant de surface induit par cette houle (Mezouar, 2009).	41
Figure III.5 : a) Amplitude de la houle pour la période (7s), b) Courant de surface induit par cette houle (Mezouar, 2009).	42
Figure III.6 : Emplacement de l'apport artificiel (MESSAOUD KHELIFI, 2014).	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : Fréquence d'apparition des houles selon différents états de la mer par direction.	23
Tableau II.2 : Condition aux limites prises pour la formule de Bijker et des C.E.R.C.	24
Tableau II.3 : Comparaison des volumes obtenus d'après les trois formules.	27
Tableau II.4 : Synthèse non exhaustive des applications de la méthode de calcul des tendances de transport sédimentaire. (Mezouar, 2009).	28
Tableau II.5 : Relations entre les paramètres granulométriques (en unité Φ) de deux stations A et B, pour un transport sédimentaire de A vers B, de type FB- et CB+ (Mezouar. K, 2009).	30
Tableau III.1 : Carrières et sablières à prospector pour la protection de la plage de Boumerdes Est (Directeur des carrières d'exploitation, 2011 in mémoire Sidi Ghiles, 2012).	42

LISTE DES ABREVIATIONS

ONM : Office National de la Météorologie.

ANRH : Agence National des Ressources Hydrauliques.

°C : Degré Celsius.

µm : Micro mètre.

Cm : Centimètre.

m : Mètre.

ml : Mètre linéaire.

LEM : Laboratoire d'étude maritime.

S0 : sorting de trask.

SK : skenwness de trask

S.S.M.O: Summary of Synoptic Météorological Observations.

INTRODUCTION
GÉNÉRALE

INTRODUCTION

Milieu littoral, frange littorale, zone côtière autant de terme pour désigner en effet une bande étroite de territoire située entre part et d'autre de la ligne de partage entre la mer et la terre, (**Shore protection manual, volume I**).

A la lumière des résultats obtenus par les recherches et les observations sur cet environnement littoral, il ressort que la majorité des plages du monde est actuellement en cours d'érosion, cette tendance régressive étant apparue en certains endroits il y a quelques années alors qu'en d'autres elle se manifeste depuis plusieurs siècles ; un déficit sédimentaire dû à l'épuisement des réserves de l'avant-côte et une élévation contemporaine du niveau de la mer et aggraver encore plus par l'action anthropique.

Le littoral de Boumerdes est en outre, soumis à un phénomène d'érosion qui résulte localement d'aménagement et d'activités humaines. Il occupe une place privilégiée pour la puissance des houles auxquelles il est soumis ; puisque c'est sur cette partie des côtes que l'on rencontre une dynamique sédimentaire non négligeable. Ces remaniements sédimentaires provoquent, dans certains cas, des érosions ou des dépôts préjudiciables à l'équilibre naturel de ce site, (**Mezouar. K, 2009**).

L'étude de cette portion du littoral s'inscrit dans le cadre général d'évaluation des phénomènes hydrodynamiques qui contrôlent cette dynamique sédimentaire ainsi que l'évolution morpho-dynamique en ce site.

En conséquence, le travail a été abordé selon les étapes suivantes : en premier lieu, nous avons décrit les aspects généraux de la zone d'étude : géographie, géologie, hydrologie, et climatologie pour mettre en évidence leur rôle dans l'évolution générale de la côte. Suivi par une étude bathy-sédimentaire dans laquelle une approche fondée sur l'observation et l'expérimentation de terrain et de laboratoire.

Le deuxième chapitre, consiste à quantifier le transit littoral par application de différentes formules et un essai de modéliser le transit sédimentaire par application du modèle **GAO** et **Collins** inspiré de celui de **McLaren**. Enfin nous proposons des solutions en utilisant des méthodes douces de protection du littoral.

ZONE D'ÉTUDE

1. Données géographiques et géologiques

1.1. Cadre géographique

La ville de Boumerdes est située à 50 Km de l'Est d'Alger, le site d'étude est situé à l'Est du Rocher noir et s'étend sur une longueur d'environ 700 mètres. Délimité par l'oued de Boumerdes à l'Est, l'oued Tatarreg à l'Ouest, le plateau de Boumerdes au Sud et la mer Méditerranée au Nord.

La plage de Boumerdes Est (**figure I.1**) fait l'objet de ce travail correspond au rectangle situé entre les latitudes $36^{\circ}46'$ et $36^{\circ}50'$ Nord et les longitudes $3^{\circ}21'$ et $3^{\circ}29'$ Est.

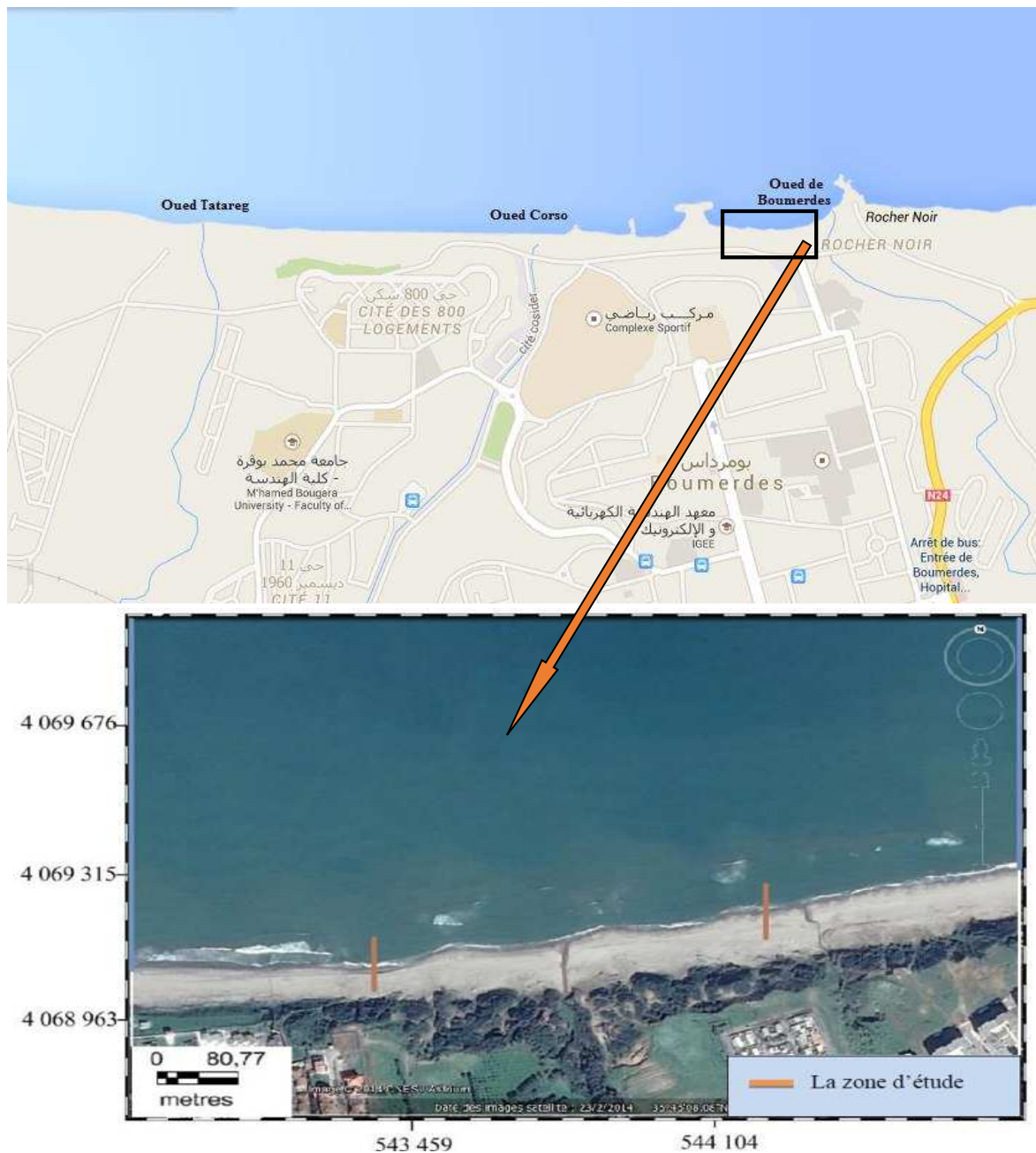


Figure I.1 : Situation géographique de la zone d'étude (plage de Boumerdes Est).

1.2. Cadre géologique

La wilaya de Boumerdes se caractérise par un littoral aux aspects variés (côte de falaises, côte rocheuse, côte dunaire à sable littoral) on distingue :

- Des terrains sablo-argileux de l'ère quaternaire occupée dans certains endroits par l'agriculture et dans d'autres endroits par des dunes sableuses.
- Des terrains sablo-limoneux qui forment la vallée au fond de laquelle coule l'oued Tatarreg (**Mezouar, 2009**).
- Des terrains métamorphiques (gneiss et micaschistes) formant des points rocheux (Rocher Noir et Rocher Pourri).

2. Données climatologiques et hydrologiques

2.1. Données climatologiques

La zone d'étude est caractérisée par un climat de type méditerranéen avec des étés chauds et secs et des hivers tempérés, doux et humides.

L'évaluation des différents paramètres climatologiques comme les pluies et les températures (**Annexe 1**) ont été effectuée en fonction de la disponibilité des informations au niveau de la station de DELLYS AFIR (**ONM**), la période étudiée s'étale sur 10 ans (1996 - 2005).

2.1.1. Précipitations

Les pluies sont importantes en automne et surtout en hiver souvent avec des régimes orageux.

La période pluvieuse s'étale du mois de septembre jusqu'au mois de mai avec une moyenne maximale de 128.8 mm au mois de Novembre alors que la période d'été est pratiquement sèche.

Les neiges et les gelées sont pratiquement inexistantes.

Les valeurs moyennes mensuelles des précipitations exprimées en mm mettent en évidence deux saisons :

- Une saison humide, avec 713.2 mm qui s'étale du mois de septembre au mois de mai, avec une moyenne mensuelle enregistrée de 43.6 mm, cette moyenne s'élève progressivement jusqu'au mois de Novembre où elle atteint le maximum de 128.8 mm. Elle diminue par la suite graduellement jusqu'au mois de mai, avec une moyenne mensuelle de 43.6 mm.

- Une saison sèche, avec 20.4 mm, relativement plus courte que la précédente, qui s'étale du mois de juin avec une moyenne mensuelle de 7.4 mm, au mois d'août avec une moyenne mensuelle de 9.9 mm.

Au mois de juillet, les précipitations se font très rares avec une moyenne de 3.1 mm.

2.1.2. Températures

D'une manière générale les températures dans la région côtière connaissent un adoucissement dû à la proximité de la mer. C'est le cas de notre zone d'étude. Les moyennes mensuelles des températures varient entre 12.5 °c et 25.7 °c.

En été, la température moyenne est de 30°C. Le sirocco souffle en moyenne 25 J/an, le relief isolé de la mer accentue les différences de températures, il fait froid en hiver sur les reliefs même à proximité de la côte. En été, ces reliefs sont surchauffés et ne bénéficient pas d'air marin.

2.2 Données hydrologiques

La zone littorale de Boumerdes est sillonnée par trois importants oueds :

Oued Keddara, oued Isser et oued sebaou, ils contribuent essentiellement aux apports liquides et solides à la mer, ainsi que par des petits oueds tels qu'oued Boudouaou et oued corso.

L'oued Keddara : à un bassin versant d'une superficie de 95 km². Les rapports solides inter-annuels entre 1968-1978 ont été évalués à 717,119 millions de tonnes (ANRH).

L'oued Isser présente un bassin versant d'une superficie de 3615 km². Les apports solides inter- annuel entre 1954-1978 ont été évalués à 6332.444 millions de tonnes(ANRH).

L'oued Sebaou présente un bassin versant d'une superficie de 2890 km².

L'oued Boudouaou a un bassin versant de 150 km² et un débit liquide moyen annuel de 37km³/an.

L'oued Corso présente un bassin versant d'une superficie de 82 km² et un débit liquide moyen annuel de 20 km³/an et un débit solide moyen de 0.1 km³/an.

La majeure partie des matériaux en suspension parvient à la mer, une partie des matériaux du type sableux produit par l'érosion reste stockée dans le bassin versant.

Il est bien évident que les extractions n'ont pues conduire qu'à une diminution des rapports solides à la mer, ceci contribue en suite à l'érosion du littoral.

3. Données hydrodynamiques

3.1. Vent local

L'analyse du régime des vents est effectuée à partir des données de **MEDATLAS** de 1999 à 2004.

- **Données de MEDATLAS (1999-2004)**

La reconstitution du climat de vents a été établie à partir des données de **MEDATLAS** (1999 - 2004) en modèle numérique d'un point situé en Méditerranée selon les coordonnées géographiques (3°00' E, 37°00'N).

Les résultats de cette étude (**figure I.2**) mettent en évidence une prédominance des vents provenant des directions Est-Nord-Est et Ouest-Sud-Ouest, avec des vitesses maximales qui atteignent 20m/s pour les directions comprises entre 240° et 270°N. Aussi pour les directions comprises entre 45° et 90°N on observe des vitesses de vent qui atteignent 16 m/s.

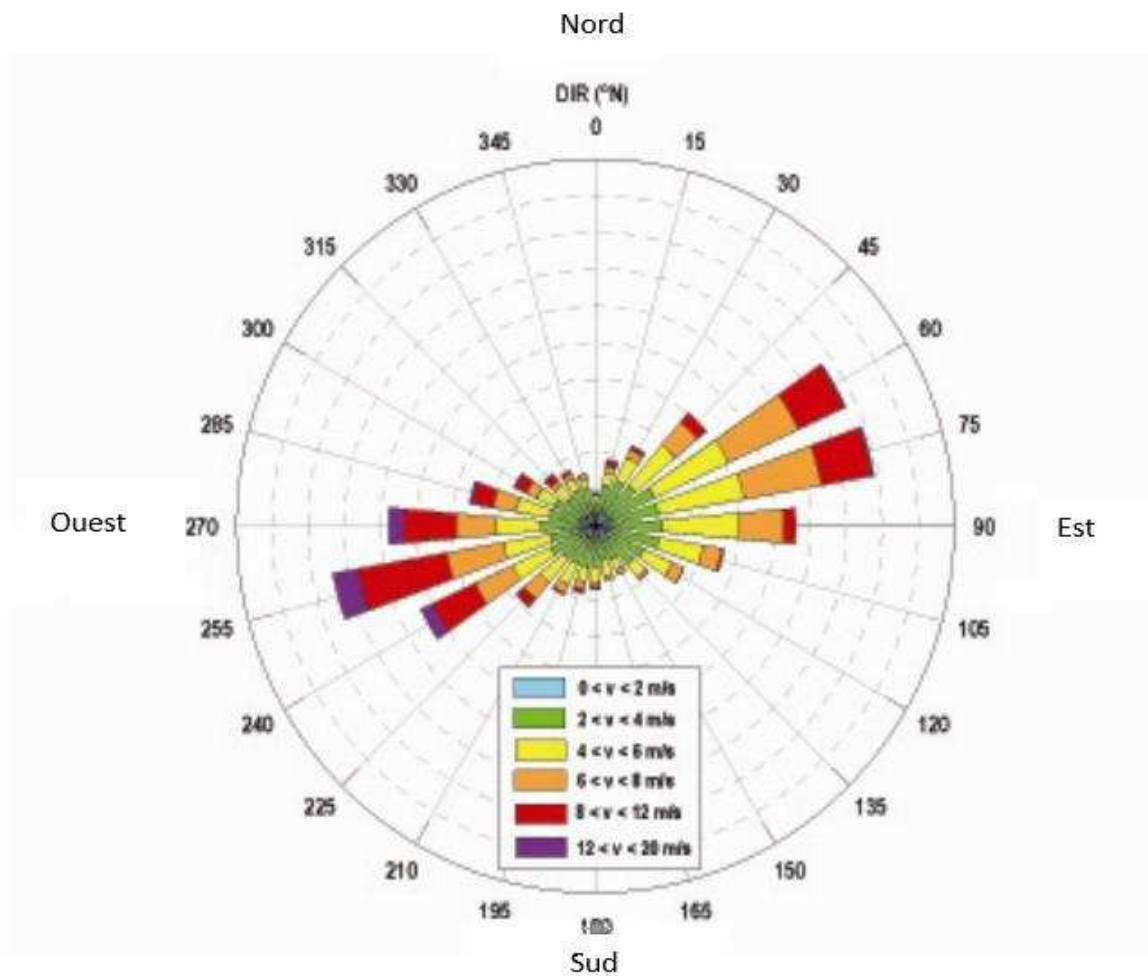


Figure I.2 : Rose des vents (MEDATLAS).

3.2. Houle au large

Selon les données de **SSMO** sur la période 1963 – 1970 :

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

L'amplitude moyenne la plus fréquente est de 2 à 3 m ; des houles peuvent atteindre des amplitudes maximales de 4 à 6 m.

La longueur d'onde des houles d'hiver les plus fréquentes est de 150 à 170 m avec une célérité de 14 m/s. Par "gros temps" les valeurs sont plus élevées : longueur d'onde de 200 m et célérité de 17 m/s. Dans ces conditions, la profondeur de déferlement peut-être estimée entre 5 et 8 m (**figure I.3**).

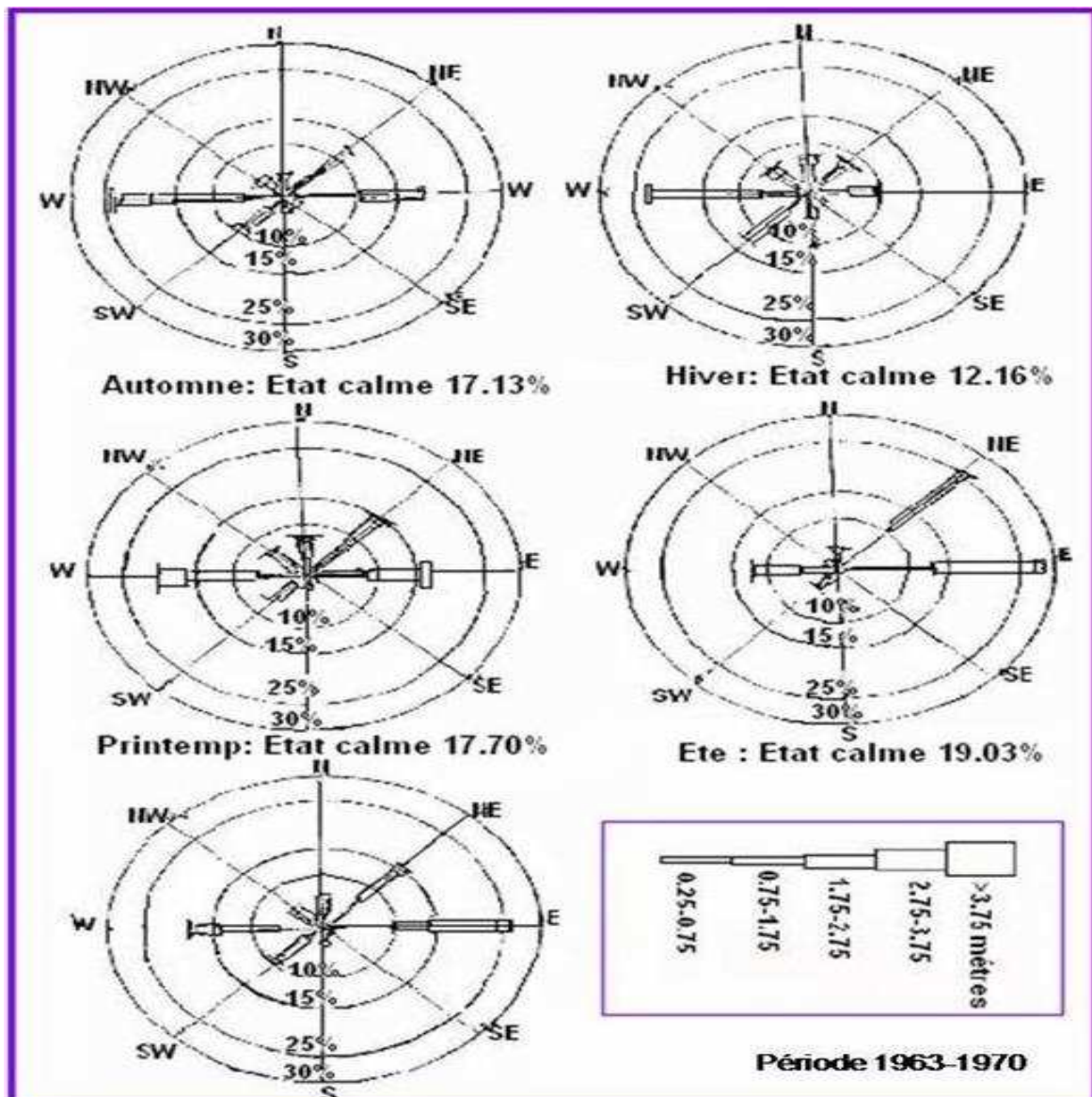


Figure I.3 : Rose des houles (SSMO).

4. Modélisation morphodynamique

4.1. Modèle spectrale de vague SWAN

Le modèle spectral de propagation des états de mer **SWAN** (acronyme de " Simulating Waves Nearshore ") est développé au sein de Delft University of Technology, aux Pays Bas.

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. Swan cycle III fonctionne en mode stationnaire et optionnellement en mode non-stationnaire.

Il couvre le spectre de houle complet en termes de fréquences et de direction ($0^\circ - 360^\circ$), ce qui signifie que des champs de vagues se propageant dans différentes directions simultanément (ainsi que leurs interactions) peuvent être modélisés.

Son intérêt par rapport aux modèles globaux est sa précision sur des maillages allant jusqu'à 20×20 m, mais surtout sur des régions de très faible profondeur, jusqu'à la zone de déferlement.

Les processus suivants peuvent être représentés dans SWAN :

- Réfraction et shoaling, sous l'effet des variations spatiales du fond et du courant,
- Réflexion et déferlement dus à des courants contraires,
- Génération par le vent,
- Dissipation par moutonnement,
- Dissipation par déferlement bathymétrique,
- Dissipation par frottement sur le fond,
- Interactions entre composantes spectrales (quadruplets et triades),
- Transmission d'énergie, blocage ou réflexion au travers d'obstacles.

La surélévation du niveau moyen induite par les vagues (SET-UP) peut être calculée dans Swan. Par ailleurs, les effets de la diffraction peuvent être modélisés dans certaines conditions ; cela permet l'utilisation du modèle dans des régions où les variations de la hauteur significative sont importantes sur l'échelle spatiale de quelques longueurs d'onde.

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

$N(\sigma, \theta)$ représente la densité du spectre, égale à la densité du spectre d'énergie divisé par la fréquence de vague, où le σ est la fréquence et θ est la direction.

La limite de premier terme dans l'équation 1 représente le taux de changement de N avec le temps. Les deuxièmes et troisième termes représentent la propagation dans l'espace avec c_x et c_y les vitesses de propagation dans les directions de x et de y . Le quatrième terme représente le décalage de la fréquence relative due aux variations de la profondeur et des courants. Le cinquième terme représente la réfraction causée par la profondeur. La limite de source d'énergie, S , du côté droit de l'équation explique la génération, la dissipation, et les interactions non linéaires entre les vagues.

4.2. Principe de manipulation du modèle SWAN

Un traitement statistique des données du **SSMO** a permis de déterminer les fréquences d'apparition de houle par direction et par période.

Afin d'optimiser les calculs sur le modèle **SWAN**, nous avons procédé au calcul d'une houle équivalente par période et par direction. Celle-ci correspond à la moyenne des amplitudes significatives pour une période donnée, les périodes de houle considérées dans le cadre de cette étude sont : 6,8 et 10 secondes.

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 approximativement perpendiculaire à la côte pour mesurer les effets d'une houle frontale (N 360°).
- Deux directions de houle à incidence oblique (N 315° et N 45°).

Les trois hauteurs significatives utilisées sont : 0.63, 2.67 et 4.27 m.

4.3. Interprétation

Les figures **I.1**, **I.2** et **I.3** (**Annexe 2**) présentent les résultats de l'étude de la réfraction pour une houle de secteur Nord (N360°) avec la période de 6 secondes, la propagation est frontale, le coefficient de réfraction est en moyenne égal à 0.84 (**Annexe 1**), donc la houle ne perde que un peu de son énergie.

Les figures **I.4**, **I.5** et **I.6** (**Annexe 2**) présentent les résultats de l'étude de la réfraction pour une houle de secteur Nord (N45°) avec la période de 8 secondes. On constate que la houle à diminuer son énergie en déplaçant vers la côte, avec un coefficient de réfraction est en moyenne égale à 0,60 (**Annexe 1**), donc elles ne conservent que la moitié de leur énergie de large.

Les figures **I.7**, **I.8** et **I.9** (**Annexe 2**) présentent les résultats de l'étude de la réfraction pour une houle de secteur Nord (N315°) avec la période 10 secondes, la propagation est frontale. Le coefficient de réfraction est en moyenne égal à 0.86 (**Annexe 1**), la houle ne perde que très peu de 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 de direction Ouest.

Les houles les plus énergétiques et qui peuvent influencer sur notre zone sont les houles de secteur Nord-Ouest (315° N), et elles vont être prises dans le dimensionnement des ouvrages de protection.

5. Etude bathymétrique

Les travaux sur le terrain ont consisté en un levé bathymétrique de la zone d'étude, exécutés suivant des profils parallèles réalisés avec un maillage de 500 * 1000 mètres et ceci sur 100 stations dans le cadre de l'élaboration de la carte sédimentaire de la wilaya de Boumerdes. Ce levé bathymétrique servira entre autre de bathymétrie d'approche entre 0 et -15 m à l'étude de réfraction de la houle, ces données ont été fourni par le **LEM**.

Les résultats obtenus par les levés bathymétriques et topographiques sont exploités dans l'élaboration des cartes bathymétriques en 2D ou en 3D à l'aide du logiciel **Surfer 11**.

5.1. Interprétation

La carte (**figureI.4**) indique que l'estran (la partie du littoral située entre les limites extrêmes des plus hautes et des plus basses marées) se prolonge en mer par une avant- plage en pente relativement douce. On note aussi des cavités peu profonde dans la partie Est.

La vue en relief met en évidences la présence de barres sous -marines appelées barres avant côtes.

Ces barres se constituent par le déferlement des houles longues ou la profondeur diminue pour provoquer ce déferlement. La morphologie sous-marine légèrement chahutée dans la partie Est entre les profondeurs -2 à -6 mètre.

6. Evolution du trait de côte

Le premier objectif de cette partie est d'observer et d'analyser les variabilités morpho-sédimentaire de notre site d'étude, à une échelle spatiotemporelle à court terme (pluriannuelle) par un suivie topographique et bathymétrique.

6.1. Méthodes et techniques utilisées

L'analyse diachronique de l'évolution du littoral de notre site d'étude a été déterminée grâce à la comparaison de différentes images satellitaires à différentes échelles.

On utilise des images satellitaires de **Google Earth** 2006, 2009, 2012 et 2014, pour obtenir des résultats plus significatifs concernant l'évolution de site, l'espacement (08 ans) pour la plage Est de Boumerdes.

Le traitement des images a été effectué par l'utilisation des techniques numériques de traitement d'images. Ces méthodes sont désormais régulièrement utilisées dans l'étude des variations de la ligne de rivage). Les démarches de cette méthode suivent les étapes établies

par **Thieller** et **Danforth**, 1994 (*in Courtaud*, 2000) : digitalisation de ces cartes satellitaires, corrections des distorsions, géo-référencement, restitution graphique et superposition multi-temporelle des traits de côte. L'ensemble des documents ont été numérisé sous le logiciel **map-info 8**.

Pour chaque photographie, on a saisi les coordonnées (X et Y) de chaque amer et les coordonnées(X et Y) sur le document de référence. La qualité du calage repose entièrement sur la sélection des amers et elle dépend de ces facteurs : la précision avec laquelle sont déterminés les amers, la répartition spatiale et le nombre des amers. Ces derniers doivent être suffisamment nombreux pour assurer un quadrillage spatial homogène. Pour chaque photographie aérienne, au moins 10 amers ont pu être régulièrement déterminés. Après cette étape de correction, les images sont ensuite mosaïquées par année, créant ainsi une table couvrant l'ensemble de la plage.

6.2. Interprétation

La carte (**figure I.5**) représente l'examen des images satellitaires de la plage de Boumerdes Est à différentes années qui a permis de voir une réduction de la largeur entre le trait de côte et la falaise.

On assiste à une évolution assez variable, marquant des périodes d'engraissement et d'amaigrissement depuis 2006 ; on a noté 1,7 m de régression du trait de côte vers l'ouest du site et un avancement de 1,8 m vers l'Est de la plage.

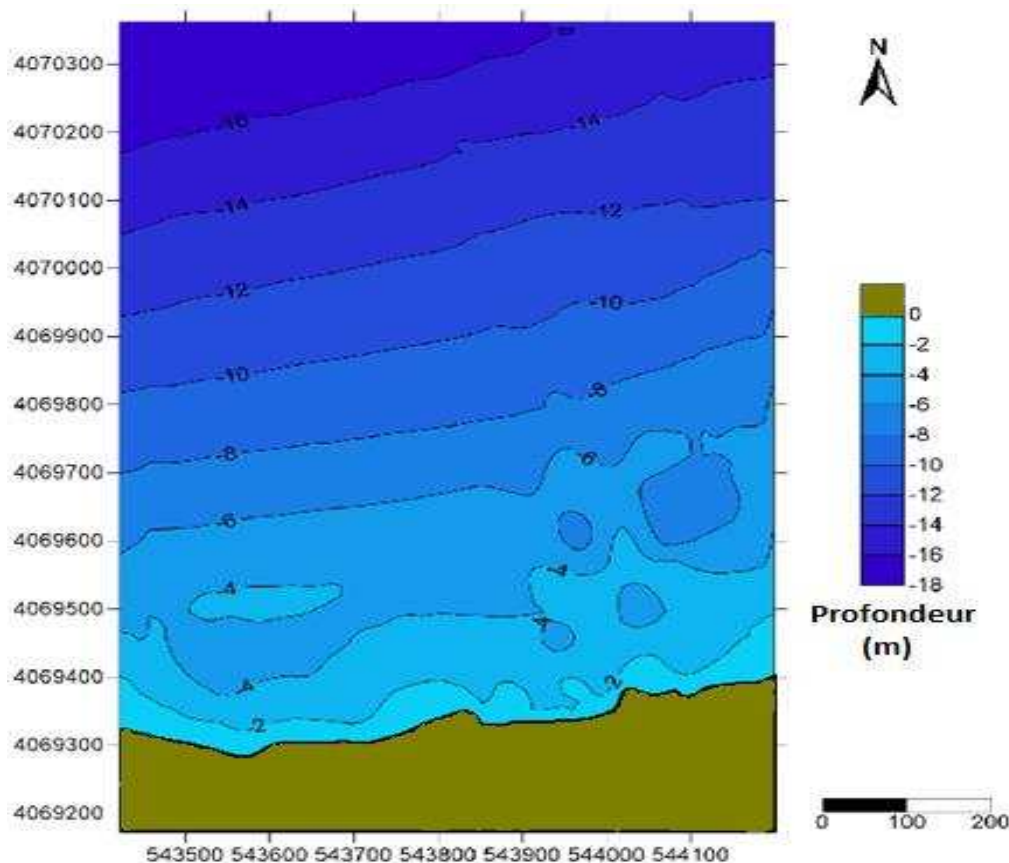


Figure I.4 : La bathymétrie de la plage Boumerdes Est (MESSAOUD KHELIFI, 2014).



Figure I.5 : L'évolution du trait de côte 2008 – 2014 (BOURTI, 2014).

TRANSPORT SÉDIMENTAIRE ET
MORPHO DYNAMIQUE

L'analyse des aspects dynamiques du littoral a été orientée surtout vers la détermination du transport littoral solide.

Sous l'action des courants, des vents ou des houles, les particules solides qui forment les sédiments que l'on rencontre le long des littoraux, peuvent être arrachés des fonds, entraînées en suspension ou en charriage sur des distances plus ou moins grandes et déposées dans les zones calmes. Donc il est important de connaître le sens et la quantité des sédiments qui transitent le long du littoral.

La quantification du transit sédimentaire le long de la côte a été abordée par plusieurs auteurs, qui proposent diverses formules pour calculer ce transit sédimentaire au niveau de la zone de déferlement sous l'effet combiné de houle - courant. Ces formules de transit sont issues de travaux en laboratoires sur un modèle réduit physique, qui ne tient en compte que des houles se propageant dans un même sens que le courant ou dans une direction diamétralement opposée. La quantification de ce transit sédimentaire sous l'interaction entre le courant et la houle reste un phénomène non linéaire et très difficile à quantifier.

1. Aspects généraux de la dynamique sédimentaire

Nous évoquerons successivement des considérations générales sur les propriétés physiques des sédiments et les conditions hydrodynamiques qui régissent transport et dépôt, ainsi que le régime de transport.

1.1. Agent de transport

Trois (03) agents de transport à prendre en compte sont : la houle, les courants et les vents.

- La houle est le facteur essentiel agissant sur les mouvements sédimentaires de la zone sédimentaire "active".
- Les courants ne sont à prendre en compte que dans les zones de déferlement
- Le vent joue un rôle fondamental dans les mouvements des sables de l'estran (haut estran) et bien sûr des dunes littorales.

1.2. Mouvement d'entraînement des sédiments sur le fond

Un débit minimum est nécessaire pour que les particules déposées au fond puissent commencer à se déplacer. Le mouvement d'ensemble n'est pas toujours le même suivant le diamètre et la nature des matériaux. Au départ, seuls les matériaux fins se mettent en mouvement et forment des rides qui progressent dans le sens de l'écoulement, si la vitesse augmente, il y a formation de dunes qui progressent dans le sens de l'écoulement. Puis le lit s'égalise, il y a mise en suspension des particules après saltation. En fin, on peut observer des anti-dunes qui remontent le courant. Ainsi, selon le régime, le charriage au fond peut s'effectuer sur le lit plat, sur des rides ou au-dessus de dunes.

1.3. Paramètres essentiels dans le mécanisme d'entraînement

Le paramètre essentiel dans le mécanisme du début d'entraînement des sédiments, qui restent en contact avec le fond et se déplacent sur le lit plat ; est la contrainte tangentielle sur le fond τ_0 ou la vitesse de cisaillement.

$\tau_0 = A (\rho_1 - \rho_0) D g$ Où A : paramètre compris entre 0.04 et 0.06, D : diamètre du grain.

$$U_* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$$

ρ_1, ρ_0 : poids volumique des matériaux et du fluide.

1.4. Début d'entraînement

Au moment du début de l'entraînement, la contrainte tangentielle τ est suffisante pour vaincre les forces de frottements et de cohésion sur le fond. Il est utile avant toute chose de définir deux (02) paramètres adimensionnels (**Mignot ; 1981**) :

- Diamètre sédimentologique des matériaux

$$G = (\rho' g D^3 / \nu^2) \quad \rightarrow \quad D^* = (\rho' g / \nu^2)^{1/3} D$$

ρ : Densité spécifique du matériaux.

ν : Viscosité de fluide.

- Nombre de Reynolds de frottement

$$R^* = \frac{U^* D}{\nu}$$

U^* : vitesse de cisaillement.

Les lois de début d'entraînement sont caractérisées par la relation :

$$D^* = f(R^*)$$

On peut établir une classification des lois en fonction de la valeur de R^* :

Si $R^* < 12$, $D^* = 2.5 R^{4/5}$;

Si $12 < R^* < 1000$, $D^* = 3.8 R^{5/8}$;

Si $R^* > 1000$, $D^* = 2.7 R^{2/3}$.

La valeur critique de $R^* = 12$ est atteinte quand le diamètre du grain est égal à l'épaisseur de la couche limite définie par :

$$U^* e / \nu \approx 12.$$

e : épaisseur de la couche limite.

Dans le cas des écoulements permanents uniformes, l'utilisation de la relation entre U^* et la vitesse moyenne U ($U^* = 0.15 (D/d)^{1/6} U$) permet d'évaluer la vitesse U qui occasionne le début d'entraînement en fonction de d et D.

2. Transport sous l'action des houles

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.

2.1. Quantification du débit solide

Il existe deux types de formules permettant de caractériser le transport de sable, le premier type faisant une estimation du transport à partir de paramètres ne caractérisant que la houle (hauteur, période, angle d'incidence de la houle), et le deuxième faisant apparaître en plus des paramètres relatifs à la plage et à la granulométrie.

Les calculs du transit ont été menés pour toutes directions des houles au large, entre 260° et 60° avec un pas de 10°. Pour chaque direction, le calcul a été effectué pour quatre combinaisons de hauteurs et de périodes [H = 1.2 m et T = 6 s, H = 2.2 m et T = 8 s, H = 3 m et T = 9 s, H = 4.5 m et T = 11 s] aux quelles est exposée la zone. Les volumes ainsi obtenus sont multipliés par les fréquences d'apparition des houles (**tableau II.1**).

Les transports vers l'Est sont précédés d'un signe positif et ceux vers l'Ouest d'un signe négatif.

Tableau II.1 : Fréquence d'apparition des houles selon différents états de la mer par direction.

Hauteur de houle (m)	Période (s)	W (%)	WNW (%)	NW (%)	N (%)	NNE (%)	NE (%)
1.2	6	14.25	6.60	6.60	3.30	3.65	3.65
2.2	8	4.39	2.32	2.32	0.60	0.43	0.43
3	9	1.07	0.88	0.88	0.05	0.09	0.09
4.5	11	0.73	0.37	0.37	0.05	0.03	0.03

Tableau II.2 : Condition aux limites prises pour la formule de **BIJKER** et des **C.E.R.C.**

Symbole	Valeur	dimension	Définition
Δ	0.8	-	Indice de déferlement.
U50	202 10	m	Diamètre caractéristique des grains de sable.
D90	300 10	m	
P _s	2650	kg/m ³	Densité spécifique du grain solide.
P _w	1020	kg/m ³	Densité spécifique de l'eau de mer.
R	0.06	(m)	Ondulation du fond.
B	1 à 5	-	Constante de Bijker.
K	440.000	-	Constante du C.E.R.C.

2.1.1. Calcul du débit solide par la méthode de **KAMPHUIS** (1991)

a- Principe de calcul

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.

$$S = 2.27(Hbr)^2 \cdot (T)^{1.5} \cdot (\beta)^{0.75} \cdot (d)^{-0.25} \cdot (\sin 2\alpha_0)^{0.6}$$

Avec : S : débit solide (m³/an) ;

Hbr : Hauteur de la houle au déferlement (m) ;

T : Période de la houle (s) ;

β : Pente de la plage (°) ;

d : Diamètre moyen du grain (m) ;

α_0 : angle d'incidence de la houle (°).

Le transport sédimentaire est ici exprimé en (m³) 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.

b- Résultats obtenus

Les tableaux II.1, II.2 (**Annexe 4**), donnent un transport sédimentaire total vers l'Ouest de l'ordre de 389370 m³/an, un transport brut vers l'Est qui est d'environ 52064 m³/an et un transport résultant total vers l'Ouest qui est d'environ de 337306 m³/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 m³/an, 84002 m³/an. Secteur Nord-Est d'environ 9033 m³/an.

2.1.2. Calcul du débit solide par la méthode de CERC (1973)

a- Principe du calcul

C'est une formule qui est purement empirique ; elle se base essentiellement sur les conditions énergétiques de la houle pour une côte rectiligne avec des pentes régulières.

$$Q_t = 0,025 \cdot H_{br} \cdot n_{br} \cdot C_{br} \cdot \sin (2 \theta_{br})$$

Avec : Q_t : sédiments transportés parallèlement à la cote en m³/an ;

H_{br} : hauteur de la houle significative à la ligne de déferlement ;

n_{br} : coefficient relatif à la ligne de déferlement ;

θ_{br} : angle d'incidence de la houle au niveau de la ligne de déferlement (°) ;

h_{br} : profondeur de l'eau dans la zone du déferlement (m).

Si on prend : $n_{br} \approx 1$, $n_{br} = (g \cdot h_{br})^{0.5}$ et $\gamma_{br} = H_{br} / h_{br}$

L'équation devient :

$$Q_t = 0.078 \cdot \gamma_{br} \cdot H_{br} \cdot \sin (2 \theta_{br})$$

b- Résultats obtenus

Il ressort de l'analyse des **tableaux II.3 et II.4 (Annexe 4)**, que la direction dominante du transit sédimentaire dans la région de Boumerdes, s'effectue d'Est en Ouest avec un volume de matériaux déplacé vers l'Ouest de l'ordre de 3002647 m³/an. Ce transport se répartit en un transport brut vers l'Ouest d'environ 3054266 m³/an et un transport brut vers l'Est de l'ordre de 51619 m³/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 m³/an et 563235 m³/an.

La cubature des sédiments charriés vers l'Ouest sont dues 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 de Boumerdes. Généralement, ces valeurs obtenues pour la période de 11 secondes (période des tempêtes) se produisent rarement.

2.1.3. Calcul de débit solide par la formule de BIJKER (1971)

BIJKER (1971) a proposé une formule qui permet, en tenant compte d'un certain nombre de conditions aux limites, de donner le débit solide charrié à l'action combinée de la houle et du courant, en se basant sur le concept de la formule de **Kalinse - Erijlink**, qui détermine le transport par charriage provoqué par les courants seulement, et sur la formule d'Einstein-Rouse qui traduit le transport en suspension provoqué par les houles.

BIJKER (1971) annonce que : $S = S_b + S_s$.

S_b : transport par charriage qui s'écrit :

$$S_b = b.D_{50} V/C \sqrt{ge^*}$$

$$\text{Avec : } x = (-0.27 \Delta D_{50} C^2) / (\mu V^2.1 + 1/2 (\xi. U_b/V)^2) \\ = -0.27 \Delta D_{50} / \mu/g.U^2.$$

Ou : S_b : Transport par charriage (m^3 / s) ;

b : Constante = 5 ;

D_{50} : Diamètre du grain moyen ;

V : Vitesse du courant ;

C : Coefficient de chezy = $18 \log (12 d/r)$;

d : Profondeur de l'eau ;

r : Rugosité ;

g : Accélération de la pesanteur ;

Δ : Densité spécifique = $(\rho_s - \rho_w) / \rho_w$;

ρ_s : Densité du sédiment ;

ρ_w : Densité de l'eau ;

ξ : $0.0575 C$;

U_b : vitesse orbital de la houle au fond ;

U : $[c/ 18 \log (12 d/D)]$.

S_s : la formule du transport en suspension (m^3/s) qui s'écrit :

$$S_s = 1.83 S_b [I_1.Ln (33d/\gamma + I_2)]$$

Pour le calcul du transit littoral dû à la houle, la vitesse du courant utilisée étant celle de Longuet Higuins (1970).

$$V = 5\pi / 8 \xi m /Cf U_m \sin \alpha.$$

Avec : V : Vitesse du courant en m/s.

ξ : L'élévation de la vague.

m : Pente de la plage.

Cf : Coefficient de traînée (drag coefficient).

Um : Vitesse orbitale horizontale de la houle.

α : Angle du talus.

Une autre formule a été obtenue par INMAN et KOMAR :

$$V1 = 2.7Um \sin \alpha b \cos \alpha b.$$

Puis modifier par Komar en 1979.

$$V1 = 1.17 (gHb)^{1/2} \sin \alpha b \cos \alpha b.$$

b- Résultats obtenus

L'analyse des **tableaux II.5** et **II.6 (Annexe 4)** montre que la direction du transit sédimentaire dominant dans la région de Boumerdes, 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 0.5m/s et 1.2m/s et charrient des cubatures de sédiments plus importantes dans le sens des houles les plus dominantes.

2.1.4. Comparaison des résultats obtenus par les trois (03) formules

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

Tableau II.3 : Comparaison des volumes obtenus d'après les trois formules.

Formules empiriques	Volumes (m^3/an)	Direction des transits.
KAMPHUIS	337306	Est vers Ouest
BIJKER	317725	Est vers Ouest
CERC	3002647	Est vers Ouest

L'étude comparative de l'estimation du transit sédimentaire selon la formule de **KAMPHUIS** et celle de **BIJKER** donne un ordre de grandeur très rapproché qui peut être pris comme quantités réelles qui transitent le long de la côte de Boumerdes.

Du fait que ces deux 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).

Cependant, le transit net calculé par la formule de **CERC (1973)** demeure trop élevé par rapport à ceux obtenus par la formule de **KAMPHUIS (1991)** et de **BIJKER (1971)**. Cette importante différence peut être expliquée par la constante K, prise pour le calcul, qui reste trop élevée et qui ne peut être déterminée avec exactitude à cause du caractère empirique de l'équation. Une autre explication pour cette surestimation, par le fait que la formule du **CERC** utilise la hauteur significative (H_s) de la houle au lieu de ($H_{rms} = 1/\sqrt{2} \cdot H_{1/3}$). Donc il conviendrait de diviser la valeur de la constante par deux (2).

Donc le transit obtenu par la formule du **CERC (1973)** n'est mentionné qu'à titre indicatif et ne doit en aucun cas être pris comme quantités réelles qui transitent le long de la côte de Boumerdes.

D'une manière générale, les formules de transport sédimentaire évoquées précédemment donnent des débits bruts instantanés. Concernant les débits solides calculés à partir de ces formules obtenues ($H_o = 1.5m$ et $T = 7.5$ s). Dans des conditions de tempête ($H_o = 3.2m$ et $T = 12$ s) ce rapport varie de 1 à 500.

Les formules des **KAMPHUIS**, de **CERC** et de **BIJKER** surestiment systématiquement le transport sédimentaire dans la côte de Boumerdes.

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.

3 Modélisation du transport sédimentaire

3.1. Calcul des tendances de transport sédimentaire

Si la méthode de **Gao & Collins (1992)** a fait l'objet de certaines controverses dans ses premiers développements (**Le Roux, 1994a, b**), ses applications en domaine marin sont maintenant courantes dans les problématiques de recherche scientifique (**Garnaud, 2003 ; Poizot et al., 2006**). La plupart des applications sont réalisées dans des environnements côtiers ouverts sur l'océan, depuis les plages aux canyons sous-marins en passant par les estuaires (**Tableau II.4**).

Tableau II.4 : Synthèse non exhaustive des applications de la méthode de calcul des tendances de transport sédimentaire. (**Mezouar, 2009**).

Domaines d'application	Auteurs
Ports	(Gao & Collins, 1992).
Estuaires	(Mc Laren & Little, 1987; Wu & Shen, 1999; Mallet et al., 2000; Chang et al., 2001).
Plages et zones intertidales	(Masselink, 1992 ; Pedreros et al, 1996 ; Mohd-Lokman et al, 1998).
Plateau continental	(Gao & Collins, 1994a; Gao et al., 1994; Garnaud, 2003).
Rivière	(Asselman, 1999).
Canyons sous-marins	(Liu et al, 2002).
Bancs sableux	(Lanckneus et al, 1992 ; Vanwesenbeeck & Lanckneus, 2000).

L'objectif ici n'est pas de reprendre en détail la méthode de calcul des tendances de transport sédimentaire déjà présentée par de nombreux auteurs. Les fondements, les principes et les apports de ce travail par rapport aux limites de cette méthode seront tout de même brièvement abordés.

3.2. Méthode de McLaren /Gao et Collins

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. Sur cette base, une technique développée par **Gao et Collins (1994)** pour la détermination du sens du transport sédimentaire a été mise en évidence, et ces derniers se basent sur la connaissance de trois (03) paramètres qui sont la taille moyenne D_{50} (1^{er} moments), l'indice de dispersion : le SORTING (2^{ème} moment) et l'indice d'asymétrie, le SKEWNESS (3^{ème} moment).

Dans cette étude nous allons utiliser le modèle proposé par **McLaren (1981)** et modifié par **Gao et Collins (1991, 1992)**. Ce modèle appliqué à plusieurs reprises dans des domaines différents (littoral, estuaire,...) (**Gao et Collins, 1994, Sabatier et, Balouin et al, 2000, et Mezouar, 2009**).

3.2.1 Principe du modèle

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 hydro sédimentaire. Cette dynamique (érosion, transport, tri et dépôt sélectif) peut traduire les directions du transport résiduel. Ce modèle repose sur la comparaison entre les échantillons des trois paramètres sédimentologiques ; la moyenne (μ), l'indice de classement (σ) et l'indice d'asymétrie (S_k) entre deux prélèvements. Par comparaison de (n) paramètres, deux cas possibles peuvent apparaître entre deux échantillons. Théoriquement, les cas possibles sont au nombre de huit (**McLaren et Bowles, 1985**) :

Cas Définition des cas en unité phi

-	$\mu_1 \geq \mu_2$	$\sigma_1 \geq \sigma_2$	$S_{k1} \leq S_{k2}$
-	$\mu_1 \leq \mu_2$	$\sigma_1 \geq \sigma_2$	$S_{k1} \geq S_{k2}$
-	$\mu_1 \geq \mu_2$	$\sigma_1 \geq \sigma_2$	$S_{k1} \geq S_{k2}$
-	$\mu_1 \leq \mu_2$	$\sigma_1 \geq \sigma_2$	$S_{k1} \leq S_{k2}$
-	$\mu_1 \geq \mu_2$	$\sigma_1 \leq \sigma_2$	$S_{k1} \leq S_{k2}$
-	$\mu_1 \leq \mu_2$	$\sigma_1 \leq \sigma_2$	$S_{k1} \geq S_{k2}$
-	$\mu_1 \geq \mu_2$	$\sigma_1 \leq \sigma_2$	$S_{k1} \geq S_{k2}$
-	$\mu_1 \leq \mu_2$	$\sigma_1 \leq \sigma_2$	$S_{k1} \leq S_{k2}$

Les expériences menées en laboratoire et sur le terrain ont conduit les auteurs à ne retenir que deux cas, comme représentatifs d'un transport sédimentaire dans un environnement marin non-extrême (**McLaren et Bowles, 1985**).

Tableau II.5 : Relations entre les paramètres granulométriques (en unité Φ) de deux stations A et B, pour un transport sédimentaire de A vers B, de type FB- et CB+. (Mezouar, 2009).

Cas de transport sédimentaire	Définition	Relations entre les paramètres granulométriques (en unité Φ)
FB-	Finner, Better sorted, negatively skewed. 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 Φ).	$\mu_1 \leq \mu_2$ $\sigma_1 \geq \sigma_2$ $Sk_1 \geq Sk_2$
CB+	Coarser, Better sorted and positively skewed. 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 Φ).	$\mu_1 \geq \mu_2$ $\sigma_1 \geq \sigma_2$ $Sk_1 \leq Sk_2$

3.2.2. Limites du calcul des tendances de transport sédimentaire

- Déterminer les paramètres granulométriques (μ , σ et Sk).

$$\mu = \sum fm / n, \sigma = \sqrt{\frac{\sum fm(m-x)^2}{100}}, SK = \frac{\sum fm(m-X)^3}{100 * So^3}$$

- Déterminer une distance critique (**DCR**) entre les échantillons. Cette distance définie comme étant l'écart minimal entre deux sites qui sont côte à côte (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 (grain moyen, SORTING et SKEWNESS) entre 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 II.5**), 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. La pertinence des vecteurs ainsi obtenus est évaluée par un test statistique, le test Z, de comparaison des proportionnalités des vecteurs. La sélection des stations voisines pour le calcul des vecteurs initiaux se fait dans un rayon inférieur ou égal à une distance critique DCR. Cette valeur représente généralement la distance maximale séparant deux points voisins afin d'inclure le maximum de points dans le calcul des vecteurs de transport.

Il apparaît alors évident que les caractéristiques de la grille d'échantillonnage influencent fortement les résultats du modèle. La pertinence du choix de DCR limite la méthode

de calcul des tendances de transport sédimentaire. Selon **Mc Laren & Bowles (1985)**, 9 points suffisent pour évaluer correctement une direction de transit sédimentaire.

Cependant, une grille non uniforme peut induire des erreurs dans la définition des directions des vecteurs de transport en fonction du nombre de stations voisines comprises dans le cercle de rayon DCR (**Le Roux, 1994a, 1994b**). **Gao & Collins (1994b)** recommandent alors l'utilisation d'une grille d'échantillonnage uniforme.

3.2.3. Interprétation des résultats GSTA

La carte des vecteurs résiduels (**figure II.1**), fait ressortir que la plage Est de Boumerdes se trouve comme étant le siège d'une dynamique sédimentaire active.

Le transit sédimentaire le plus dominant s'effectue de l'Est (Rocher Noir) vers l'Ouest (oued Tatareg). On a aussi le transit qui se fait de la côte vers le large, due 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 par rapport aux résultats de la quantification du transit sédimentaire.

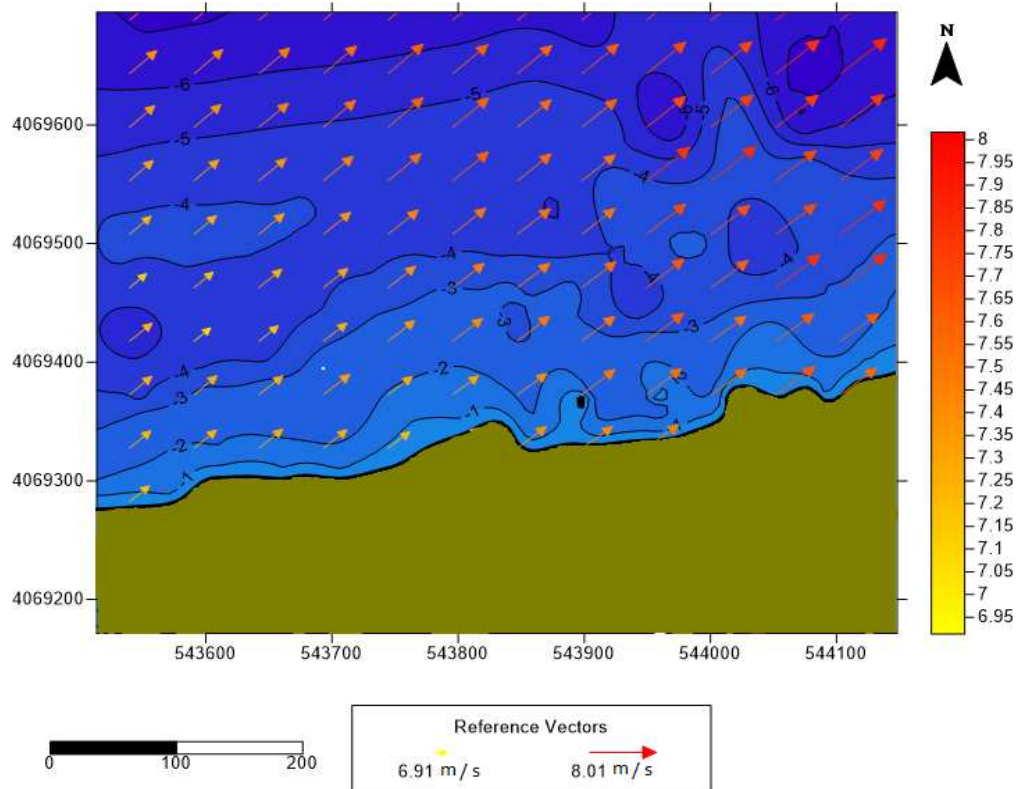


Figure II.1 : la modélisation du transport sédimentaire par le modèle GSTA (**MESSAOUD KHELIFI, 2014**).

MÉTHODES DE PROTECTION
CONTRE L'ÉROSION

1. Généralités sur les méthodes de protection

L'érosion des côtes est en soi un phénomène naturel : la mer vient chercher du matériel à un endroit pour venir le redéposer ailleurs. C'est de cette façon que nos plages se sont formées et qu'elles se maintiennent au fil des années. Cette érosion devient un problème lorsque les propriétés, (bâtiments ou infrastructures) sont touchées et génèrent des désagréments aux individus et à leur portefeuille ainsi qu'aux autorités responsables de la gestion du territoire. Dans le contexte où non seulement le niveau de la mer est à la hausse, mais que cette tendance prend de l'ampleur en regard des changements climatiques, il devient judicieux pour chacun d'avoir une meilleure compréhension des facteurs responsables de l'érosion de nos côtes et des impacts potentiels qui y sont liés.

Comme un essai pour régler ce problème l'homme a utilisé plusieurs moyens de défense pour protéger cette zone sensible. Les types d'ouvrage de défense retenus sont définis selon une description géométrique simple de leur structure.

Les ouvrages longitudinaux sont les plus nombreux et diversifiés. Au niveau du trait de côte, on retrouve essentiellement les **murs**, caractérisés par une pente verticale, et les **perrés**, caractérisés par une pente oblique simple ou multiple. Ces ouvrages sont construits contre le terrain "naturel". Du fait de leur forte réflexivité, l'abaissement de l'estran en pied d'ouvrage implique souvent une protection spécifique. Les **digues** constituent un échantillon des ouvrages longitudinaux, caractérisée par un apport de matériaux constituant un obstacle à l'écoulement de l'eau, et sont donc par définition imperméables et surélevées par rapport au terrain naturel. Sur l'estran ou "en mer" peuvent se trouver des **brise-lames**, dont la caractéristique principale est de modifier la propagation des houles afin de limiter leur impact sur le trait de côte. Ils ne sont pas rattachés au trait de côte par leur propre structure. Cette caractéristique est essentielle pour les distinguer des **épis** et **jetées portuaires**, dont l'orientation principale est transversale et dont les configurations géométriques peuvent être très diverses. Certaines structures ne sont pas caractérisées par une orientation particulière, notamment les **méthodes douces** et les **ouvrages portuaires**, (**Shore Protection Manual, Volume II**).

2. Nécessité d'une étude d'aménagement

Notre zone d'étude est en voie d'érosion, c'est pour ça qu'on a fait toutes ces études, notre objectif principale est de trouver une ou plusieurs solutions qui vont arrêter ce phénomène qui ne cesse pas de menacer notre. Donc l'étude d'aménagement s'impose, elle doit être cependant conduite avec rigueur afin d'obtenir la meilleure synthèse possible pour notre site.

3. Les ouvrages envisageables

La plage, absorbant graduellement l'énergie de la houle par les déferlements successifs qu'elle provoque, constitue le meilleur ouvrage de défense du littoral contre l'érosion. C'est en effet la dynamique naturelle des plages qui est fondamentale pour la survie physique de la plage et pour la diversité de ses habitats biologiques (**Ramoge, 2002**). Pour toute défense contre l'érosion, il est donc plus efficace de se tourner vers des ouvrages de défense souples qui travaillent en harmonie avec les dynamiques naturelles en jeu.

3.1. Les géotubes

Parmi les nouvelles méthodes de protection des plages, une large part est faite par l'utilisation des géotextiles. Ces utilisations consistent essentiellement, soit à conforter des mouvements de matériaux, soit à favoriser des phénomènes de transport et de dépôt estimés souhaitables, soit en utilisation sous forme d'ouvrages tels que des épis ou brise-lames.

Les Géotubes sont des Structures tubulaire constitué d'une enveloppe géotextile tissé de haute résistance remplie de matériaux spécialement mis au point pour l'application en protection contre l'érosion. Ils sont idéals pour une installation à sec ou à des profondeurs d'eau n'excédant pas 5 mètres, il a d'une durée de vie de 20 à 30ans.



Photo III.1 : Installation des géotubes (El KALA 2008).

3.1.1. Pré-dimensionnement

Les géotubes peuvent être utilisés pour la protection du site d'étude. Afin de proposer une solution légère, économique et réversible, on a opté pour la réalisation d'un atténuateur de houles en tubes. Pour le Pré-dimensionnement du géotube on s'est basé sur les caractéristiques suivantes :

A. Caractéristiques dimensionnels

Pour avoir la protection optimale de notre site d'étude on a utilisé les houles vingtennales de 315° et on a calculé les paramètres suivants :

- **La distance du géotube par rapport à la cote (X)**

$$X = \frac{L}{2} \quad (\text{W. Pilarczyk, 2000})$$

Avec :

L c'est la longueur d'onde au large, $L=1,56T^2$ et $T=11,96s$ donc AN : **L=223,144 m.**

Donc : $X = \frac{223,14}{2}$, $X=111 \text{ m}$.

A 111m la profondeur $d=-3\text{m}$ et à cette profondeur on a H_s (hauteur significatif de la houle) varie entre 1,88m et - 2,85m, On prend la moyenne alors on aura $H_s = 2,35\text{m}$ et que le diamètre du géotube doit être inférieur à H_s donc $D=2\text{m}$.

- **La longueur du géotube (L_G)**

C'est à partir de la longueur d'onde qu'on va déduire la longueur du géotube :

On a

- Au large :

$$L = 1,56 T^2 \quad L=223,144 \text{ m.}$$

- Au pied de l'ouvrage :

$$L_p = \frac{g+T^2}{2\pi} \sqrt{\tanh\left(\frac{4\pi^2 D_p}{T^2 g}\right)}$$

L_p La longueur d'onde au pied de l'ouvrage

D_p La profondeur au pied de l'ouvrage

AN : $L_p=223,144 \times 0,29=64\text{m}$ $L_p=64\text{m}$.

- A la cote :

$$L_c = 1,2 (X + 0,3L_p).$$

AN : $L_c = 1,2 (223,144 + 0,3 \times 64) = 155\text{m}$ $L_c = 155\text{m}$.

La longueur du géotube (L_G) doit être supérieure à la longueur de l'onde a la cote (L_c) donc $L_G = 160\text{m}$.

- **La largeur du géotube (B)**

$$B = H_b \times 4.$$

Le calcul le H_b

On a la longueur de la crête $L = \frac{D_p}{gT^2}$.

D_p La profondeur au pied de l'ouvrage, $D_p = 3\text{m}$ et g la force de gravite, $g = 9,81\text{m/s}^2$.

AN : $\frac{D_p}{gT^2} = \frac{3}{9,81 \times (11,96)^2} = 0,002$.

On prend la pente 0,02 et avec l'utilisation de l'abaque on aura :

$$\frac{H_b}{D_p} = 1$$

$H_b = D_p \times 1$ AN : $H_b = 3 \times 1 = 3\text{m}$. Donc la largeur du géotube est de : **B=12m**.

- **La hauteur du géotube (H)**

$$H = 1,5 H_b \text{ AN : } H = 1,5 \times 3 = 4,5 \text{ m.}$$

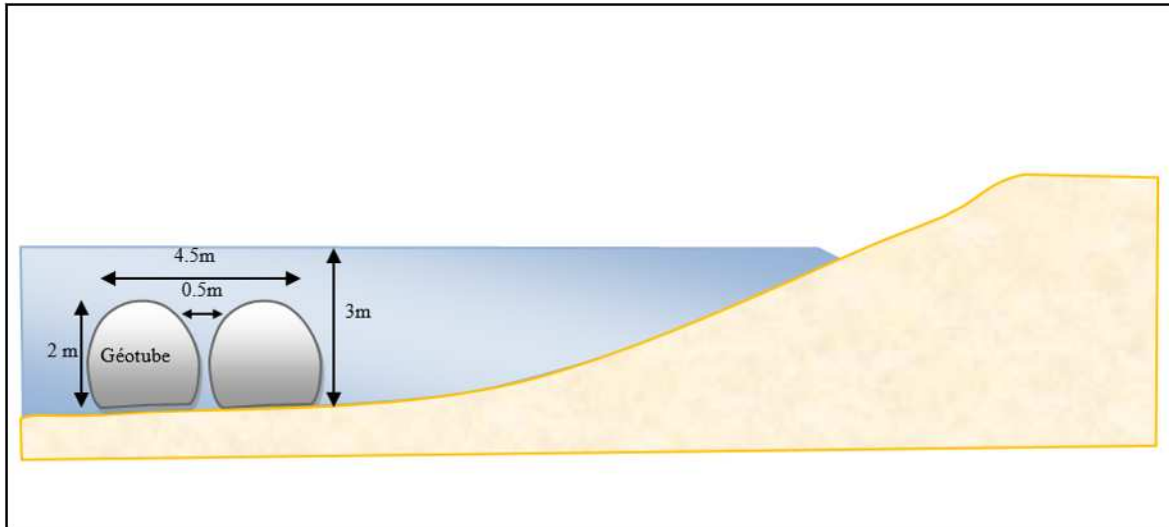


Figure III.1 : Caractéristiques dimensionnelles des géotubes.

B. Caractéristiques de stabilité

Pour la stabilité des géotubes on va utiliser la formule suivante (**Balouin, 2001**) :

$$\frac{Hs}{\Delta D} < 1 \text{ et que } \Delta = \left(\frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \right)$$

D : épaisseur du géotube,

γ_w : la masse volumique de l'eau de mer ; $\gamma_w = 1.028 \text{ t/m}^3$, γ_s : La masse volumique de sable utilisé pour remplir le géotube ; $\gamma_s = 2.65 \text{ t/m}^3$.

$$\text{AN : } \Delta = \frac{2,65 + 1,028}{1,028} \text{ , } \Delta = 1,57$$

Donc : $Hs/\Delta D = \frac{2,35}{3,14} = 0,74$, On a $Hs/\Delta D > 0$ donc on peut dire que notre géotube est stable.

D'après les résultats obtenus on suggère une protection par une batterie de 4 géotubes d'une longueur de 160m avec un espacement de 25 m (figure III.2).



Figure III.2 : Emplacement des géotubes (MESSAOUD KHELIFI, 2014).

3.1.2. Avantages et inconvénients des géotubes

- Avantages

- Vous n'avez pas besoin de digue de clôture de la zone de refoulement.
- En prévoyant une couche d'étanchéité inférieure, vous pouvez recycler l'eau.
- Vous pouvez juxtaposer les Géotubes ou les empiler selon une géométrie prédéfinie.
- Vous pouvez installer les Géotubes à des endroits qui ne sont pas reliés.
- Vous utilisez les boues déshydratées des Géotubes pour la consolidation et le rehaussement des digues.
- Les boues de dragage sont une alternative attirante pour les matériaux primaires (argile, sable, limon).
- Le rechargement facile des géotextiles en un matériau non spécifique et disponible localement.
- La facilité d'exécution de ce genre de protection qui ne demande pas des moyens humains et techniques considérables.
- Les matériaux géotextiles sont inertes aux acides et bases, donc plus résistants à l'attaque chimique de l'eau de mer, ils peuvent avoir une durée de vie de 100ans.
- L'intégration facile de ce procédé dans le paysage (les matériaux géotextiles existent en couleurs variées, selon les exigences du site concerné).

- Une solution par géotextiles coûtait un cinquième (1/5) du coût d'un ouvrage en enrochement ou en BCR.
- Grâce à ses propriétés couvrantes, il réduit le tassement différentiel et facilite ainsi la maintenance.
- **Inconvénients :**
- lorsque des affleurements rocheux sous l'eau sont présents, le placement des enrochements sur le géotextile occasionnera d'inévitables dommages au géotextile, en créant des trous, ce qui entraînera la perte des particules fines des zones voisines.
- Leur résistance aux actions brutales de la mer est en tout état de cause limitée et les conditions du vieillissement des matériaux géotextiles ne sont pas encore toujours convenablement connues (**Mezouar, 2009**).

3.2. Les géo-containers

Les Géo-containers sont des éléments de construction que vous utilisez par exemple pour amorcer le dispositif de protection d'une berge ou pour la construction d'une digue immergée. Le conteneur retient le sable ou la boue de dragage dont il est rempli.

3.2.1. Composition et caractéristiques

- Les Géo-containers de Texion sont réalisés en géotextile tissé.
- Le Géo-container est parfaitement adapté aux dimensions du compartiment que la barge réserve au chargement.

Sa conception dépend de :

- Type de bateau ;
- Matériau de remplissage ;
- La hauteur de déversement.

Pour éviter que le Géo-container se déchire lors de la décharge et de la réception sur le fond, le géotextile est muni de surpiqûres qui absorbent l'énergie. D'autres surpiqûres, beaucoup moins sollicitées, assurent que les particules de sol ne passent pas à travers le Géo-container.

Le Géo-container est muni de valves qui laissent échapper l'air quand celui-ci touche le fond. Ceci pour éviter que le Géo-container fermé explose suite à la surpression d'air créée par la descente.

Pour installer un Géo-container vous avez besoin d'une barge ouvrante. C'est une barque de poussage ou un chaland qui décharge son contenu en eau profonde par son fond ouvrant, la barge ouvrante amène le Géo-container à l'endroit du déchargement puis La barge s'ouvre.

Le Géo-container et son contenu (sable ou boue de dragage) sont déchargés sur le fond marin de manière contrôlée (**Mezouar, 2009**).

3.2.2. Stabilité des géo-containers

La comparaison des résultats des calculs de stabilité des containers de 150 L avec les résultats trouvés avec les conteneurs de sable de 25 L ont permis de conclure que les petits containers sont relativement plus stables (**Annexe 3**).

3.2.3. Application sur notre site d'étude

Notre site est affecté par l'érosion on peut utiliser ce type d'ouvrage par la manière suivante :

Installation d'une batterie de trois épis de 2,5 m de hauteur (Deux épis de 100 mètres et un épi intermédiaire de 80 mètres) qui peut supporter des vagues de 3m afin de stopper les pertes de sédiments. Les épis doivent être construits en utilisant une succession des conteneurs de sables 2.5 m³, ces épis sont espacés d'une distance de 100 m. La structure est stable en face des attaques les vagues violente, facile à utiliser et esthétiquement acceptable. Un autre critère important est que le géotextile doit fournir une certaine forme de résistance.

Cette variante est testée sous le programme Mike 21 (**figures : III.3, III.4, III.5**). La propagation de la houle au voisinage de ces ouvrages est simulée à deux périodes de (6 s et 7 s) qui sont plus observées au niveau du littoral de Boumerdes. Les vagues de période de 6 s sont les plus fréquentées durant l'année et sont la cause principale de l'érosion du rivage, tandis que les vagues de période de 7 s sont plus ou moins représentatif durant la période de calme, avec de faibles vagues venant de direction Nord-Est et Ouest qui ont été documentées pour induire le transport des sédiments à proximité de la ligne à partir de la rive Ouest. Cette simulation prend en compte à la fois une variation sinusoïdale de la marée dans la gamme de $\pm 0,35$ m ainsi que la vitesse et la fréquence des vents dominants.

3.2.4. Interprétation

- Variation du taux du transit sédimentaire par jours (l'érosion et disposition sont exprimées par l'intensité des couleurs bleu et rouge, et le flux sédimentaire par des vecteurs).
- Les valeurs des vagues sont mentionnées (l'amplitude des vagues avec les couleurs et des vecteurs).
- La houle de période (6 s) est la plus fréquentée sur la côte de Boumerdes, et affecte la stabilité de la ligne de côte et la stabilité des ouvrages de protection contre l'érosion, (les vagues déferlent au voisinage des épis et leur amplitude peut atteindre 1,6 m).
- La vitesse et la direction des courants engendrés par les houles de 6 s et 7 s sont représentées par des couleurs graduées pour les différentes intensités, et les directions par des vecteurs.

METHODES DE PROTECTION CONTRE L'EROSION

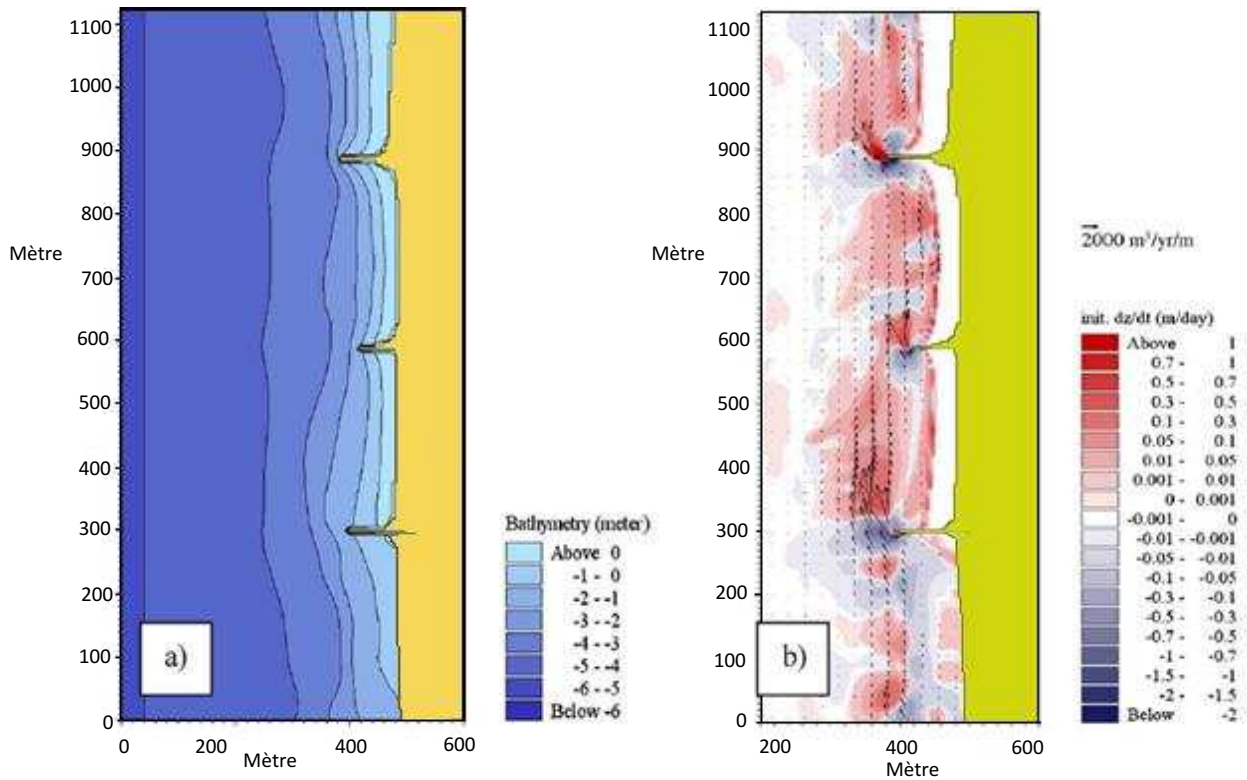


Figure III.3 : a) Bathymétrie de la zone protégée, b) Taux du transit sédimentaire par jour (Mezouar, 2009).

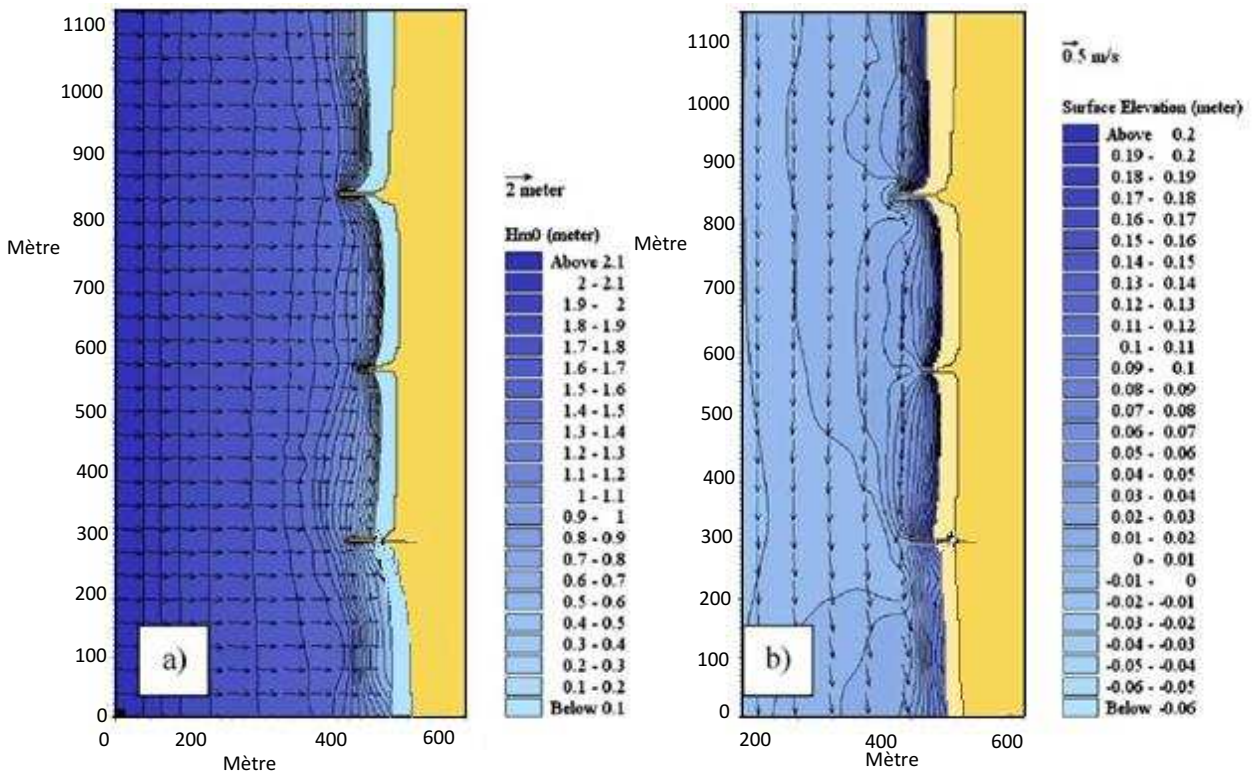


Figure III.4 : a) Amplitude de la houle pour la période 6s, b) Courant de surface induit par cette houle (Mezouar, 2009).

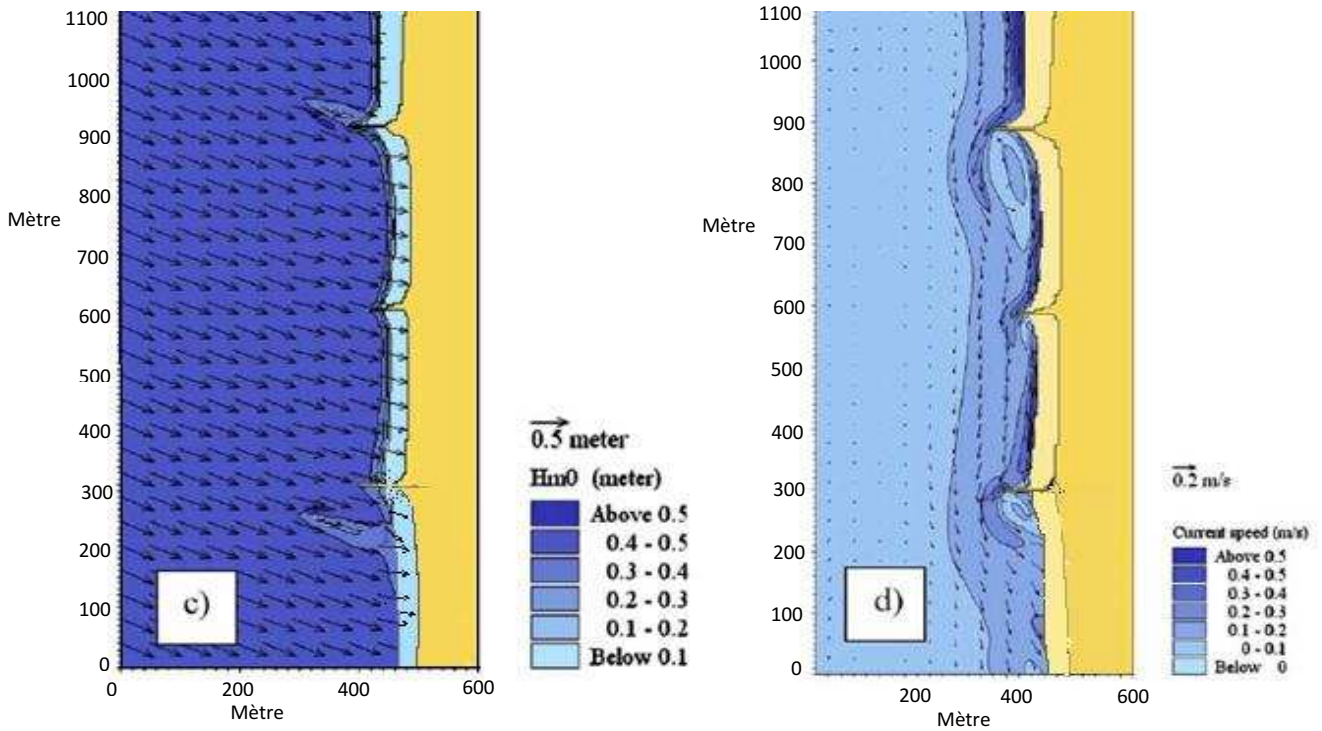


Figure III.5 : a) Amplitude de la houle pour la période (7s), b) Courant de surface induit par cette houle (Mezouar, 2009).

3.3. Apport artificiel

3.3.1. Principe et provenance

Le déversement sur le rivage de quantités importantes de sédiments provenant de carrières de prélèvement situées en mer ou sur terre, ou de déblais de construction, permet de stabiliser ou d'agrandir une plage menacée d'érosion ou de créer une nouvelle plage (Ramoge, 2002).

Outre l'évaluation de la compatibilité du sédiment d'un point de vue physique, il faut également évaluer les qualités chimiques et bactériologiques.

3.3.2. Procédés et mise en place des sédiments

Dans le cadre de l'étude bathymétrique, nous avons vu que les différents profils étudiés sont presque tous similaires avec une pente de l'ordre de 0,5 à 2 %.

L'objectif est celui de couvrir toute la plage sur 700 m, jusqu'à une profondeur de 1m (ayant une pente de 1/30) nécessitant un volume de rechargement estimé à 7000 m³ selon la formule suivante :

$$A = L * I * (Z/2).$$

A : volume du sable ajouté (m³) ;

L : longueur de la plage (700 m) ;

I : largeur de la plage (20 m) ;

Z : la profondeur d'implantation (1 m).

A l'aide des ouvrages proposés et des mouvements de la mer, le sable va être redistribué sur toute la zone à protéger, c'est la protection à long terme. Pour les rechargements ponctuels de sables, le matériau d'apport doit avoir une médiane plus forte que les matériaux naturels, ou une granulométrie plus étendue, dans notre cas on prévoit un sable grossier de 1000 à 1500 μm de diamètre pour la zone d'étude (**figure III.6**).



Figure III.6 : Emplacement de l'apport artificiel (MESSAOUD KHELIFI, 2014).

Concernant la source du sable d'apport, le tableau suivant détaille les carrières et sablières à prospecter pour cette protection :

Tableau III.1 : Carrières et sablières à prospecter pour la protection de la plage de Boumerdes Est (Directeur des carrières d'exploitation, 2011 in mémoire **Sidi Ghiles, 2012**).

Carrière	Matériaux	Commune	Wilaya	Capacité
Hadjret el Nour	Granulat concassés	Cherchell	Tipaza	1600 t/j
Azrou Concassaga	Granulat concassés	Kedarra	Boumerdes	500 000 t/j
ENOF	Granulat concassés	Kedarra	Boumerdes	1 000 000 t/j

Conclusion

On a donc vu que le choix du type d'ouvrage de protection dépend de la nature de la houle à l'endroit désigné et de l'usage que l'on veut faire de cet ouvrage.

Le dimensionnement de l'ouvrage à partir de ce choix ne nous paraît alors pas très compliqué dans la théorie, mais nous supposons que beaucoup de problèmes inattendus peuvent se poser lors de la mise en pratique.

METHODES DE PROTECTION CONTRE L'EROSION

Enfin, nous remarquerons que même pour la construction de tels ouvrages, qui semble être plutôt un problème de génie civil, de sérieuses connaissances en hydrodynamique marine sont nécessaires, notamment pour prévoir les phénomènes marins tels que la houle, la hauteur des vagues ou les courants.

CONCLUSION
GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

L'étude sur l'érosion côtière de la plage Boumerdes Est nous a permis de connaître le recul annuel moyen du trait de côte estimé à 0.21 m/an depuis 2008.

La carte bathymétrique montre des isobathes régulières, espacées et présentant des fonds assez réguliers avec une pente douce de l'ordre de 2 % et ne montrent pas d'accidents topographiques majeurs à partir de -5m de profondeur.

L'étude de la réfraction avec le logiciel Swan a montré que le site d'étude est exposé aux houles du secteur Nord, Nord-Est et Nord-Ouest, ceci est expliqué par la configuration de son trait de côte qui est parallèle au Nord et qui reçoit l'énergie des houles de ces trois secteurs.

Le transit littoral a été estimé à 337306 m³/an (valeur moyenne), dirigé de l'Est vers l'Ouest.

Les travaux d'ingénierie pour protéger les plages font aujourd'hui l'objet d'une réévaluation critique à la lumière des travaux des naturalistes. L'évolution naturelle d'une plage, qui n'est soumise à aucune contrainte d'aménagement, serait le moyen de défense le plus efficace, mais la forte anthropisation de la bande littorale a rendu nécessaire la lutte contre le phénomène érosif pour protéger les infrastructures construites à proximité des rivages.

Pour toute défense contre l'érosion, il est donc plus efficace de se tourner vers des ouvrages de défense souples qui travaillent en harmonie avec les dynamiques naturelles en jeu et ont ainsi un moindre impact sur le littoral, plutôt que d'utiliser des ouvrages de défense rigides qui tendent à réprimer les processus côtiers. Cependant, la diversité des phénomènes à l'origine de l'érosion littoral conduit à une diversité des techniques qui ne s'opposent pas forcément les unes aux autres, mais qui sont souvent complémentaires. En effet, pour améliorer l'efficacité des interventions de protection sur le site Boumerdes, on a opté pour des défenses de nature douce à savoir : Des Géotubes, des épis en géo-containers et un apport artificiel de sable.

BIBLIOGRAPHIE

- BALOUIN, Y. (2001).** Les embouchures mésotidales (tidal intels) et leur relation avec les littoraux adjacents – Exemple de la Barra, Nova, Sud Portugal. Thèse, université de Bourdeau, p. 297.
- BIJKER, E.W. (1971).** Longshore Transport Computations. Journal of Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, American Society of Civil Engineers, vol 9. pp. 112-145.
- CERC. (1984).** Shore **Protection Manual**. vol 2. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Centre, Washington.
- GAO, S. COLLINS, M. (1991).** A critique of the "McLaren method" for defining sediment transport paths - discussion. Journal of Sedimentary Petrology vol 1. pp. 143-146.
- GAO, S. COLLINS, M. (1992).** Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors". Sedimentary Geology vol 2. pp. 47-60.
- GAO, S. COLLINS, M. (1994).** Analysis of Grain Size Trends, for defining sediment transport pathways in marine environments. Journal of Coastal Research vol 1. pp. 70-78.
- GAO, S. COLLINS, M. (2001).** The Use Of Grain size Trends in Marine Sediment Dynamics: A Review. Chinese Journal of oceanology and Limnology vol 3. pp. 265-271.
- GARNAUD, S. (2003).** La sédimentation fine sur une plate-forme interne actuelle macrotidale : la Baie de Seine Sud-Orientale (France). Thèse de doctorat Université de Caen. p. 307.
- GERRARD, A. (1999).** Landsliding in the Likhu Khola drainage basin, Middle Hills of Nepal. Physical Geography vol 2. pp. 240–255.
- KAMPHUIS, J. (1991).** Alongshore sediment transport rate. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, vol 3. pp. 624-640.
- LE ROUX, P. (1994).** An alternative approach to the identification of net sediment transport paths based on grain-size trends. Sedimentary Geology vol 4. pp. 97-107
- MC LAREN, P. BOWLES, D. (1985).** The effects of sediment transport on grain-size distributions. Journal of Sedimentary Petrology vol 4. pp. 457-470.
- MC LAREN, P. LITTLE, D. (1987).** The effects of sediment transport on contaminant dispersal: An example from Milford Haven. Marine Pollution Bulletin. vol 1. pp. 586-594.
- MCLAREN, P. (1981).** An interpretation of trends in grain size measures. Journal of Sedimentary Petrology vol 2. pp. 611-624.
- MEZOUAR, K. (2009).** Etude comparative entre les méthodes de protection des deux littoraux Algérien et Roumain. Thèse Université technique de construction de Bucarest.
- POIZOT, E. MEAR, Y. (2006).** The application of geostatistics in defining the characteristic distance for grain size trend analysis. Computer & Geosciences, pp. 360-370.
- PYE, K. TSOAR, H. (1990).** Aeolian sand and sand dunes. UNWIN HYMAN, London, pp. 390 - 396.

- PYE, K. (1990).** Physical and human influences on coastal dune development between the Ribble and Mersey estuaries, northwest England. In: Nordstrom, K.F., Psuty, N. & Carter, R.W.G. (eds.) Coastal Dunes. Form and Process. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 339-359.
- RATTANAPITIKON, W. SHIBAYAMA, T. (2000).** Verification and modification of breaker height formulas. Coastal Engineering Journal, pp. 389-406.
- RIVIERE, A. (1977).** Méthodes granulométriques, techniques et interprétations. Masson, pp. 167.
- SABATIER, F. (2001).** Fonctionnement et dynamiques morpho-sédimentaires du littoral du delta du Rhône. Docteur de l'université Aix Marseille III.
- SCHOONEES, J. THERON, A. (1996).** Improvement of the most accurate longshore transport formula. In: ASCE (Editor), 25th Coastal Engineering Conference, pp. 3652-3665.
- SHAHBUDDIN, S. MOHD L. (1998).** Sediment accretion and variability of sedimentological characteristics of a tropical estuarine mangrove: Kemaman, terengganu, Malaysia. Mangroves and Salt Marshes, vol 5. pp. 1-8.
- SHERMAN, D. BAUER, B. (1996).** Wind blow sand at Castroville, California, Coastal Engineering, pp. 4214-4226.
- SHORT, A. AAGAARD, T. (1993).** Single and multi-bar beach change models. *Journal of Coastal Research*, pp. 141-157.
- SOULSBY, R. (1997).** Dynamics of marine sands. A manual for practical applications. Thomas Telford Publications, p. 249.
- STEPANIAN, A. (2002).** Evolution morphodynamique d'une plage à barres: Omaha beach (Normandie). Thèse de doctorat, Université de Caen, Basse-Normandie.
- STONE, G. STAPOR J. (1992).** Multiple sediment sources and cellular, non-integrated, longshore drift system: northwest Florida and southeast Alabama coast. Marine Geology, vol 1. pp. 141-154.
- VANHEE, S. (2002).** Processus de transport éolien à l'interface plage macrotidale-dune bordière : le cas des plages à barres intertidales, côte d'Opale, Nord de la France. Thèse, Université du Littoral Côte d'Opale.
- VANWESENBEECK, V. LANCKNEUS, J. (2000).** Residual sediment transport paths on a tidal sand bank : a comparison between the modified McLaren model and bedform analysis. *Journal of Sedimentary Research* vol 3. pp. 470-477.
- VANWESENBEECK, V. LANCKNEUS, J. (2000).** Residual sediment transport paths on a tidal sand bank: a comparison between the modified McLaren model and bedform analysis. *Journal of Sedimentary Research* vol 3. pp. 470-477.
- WHITE, B. (1979).** Soil transport by winds on Mars. *Journal of Geophysical Research*, vol 4. pp. 4643-4651.

BIBLIOGRAPHIE

- WRIGHT, L. SHORT, A. (1984).** Morphodynamics of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine Geology*, vol 5. pp. 93-118.
- WRIGHT, L. THOM, B. (1977).** Coastal depositional landforms: a morphodynamic approach. *Progress in Physical Geography*, vol 1. pp. 412-459.
- WU, X. SHEN, H. (1999).** Estuarine bottom sediment transport based on the "McLaren model": a case study of Huangmaohai estuary, South China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol 4. pp. 265-279.
- ZINGG, A. (1953).** Wind tunnel studies of the movement of sedimentary material, 5th Hydraulics Conf. Bull, Iowa, pp. 111-135.

ANNEXES

ANNEXE 1 : DONNEES METEOROLOGIQUES (ONM)

Station : DELLYS AFIR, Période : 1996 – 2005, Altitude : 08 m, Latitude : 36°55 N, Longitude : 03°57 E

1. Les précipitations (mm)

[Année | Janv. Févr. Mars Avril Mai Juin Juil. Aout Sept Oct. Nove Dèce | Annuel |

1996	110.3	174.5	56.0	165.9	29.2	8.7	7.1	15.4	41.6	134.4	40.7	55.8	839.6
1997	32.6	7.1	17.5	33.5	22.4	18.7	2.4	1	48.0	69.2	77.5	49.2	378.2
1998	53.5	103.8	75.0	56.9	212.2	1.4	-999.9	8.6	18.2	22.1	112.9	94.0	758.6
1999	164.2	102.1	56.2	17.2	15.8	.0	.0	1.2	62.6	30.7	255.4	285.5	990.9
2000	32.6	7.1	17.5	33.5	22.4	18.7	2.4	.1	48.0	69.2	77.5	49.2	378.2
2001	141.1	62.6	108.6	66.9	156.0	25.6	.3	25.2	15.4	50.8	95.6	164.2	912.3
2002	56.2	18.4	55.1	40.1	16.9	4.9	7.7	27.6	38.9	29.8	170.6	180.0	646.2
2003	228.7	90.2	43.7	105.4	15.9	.0	3.3	.4	55.9	53.9	55.9	105.5	758.8
2004	141.1	62.6	108.6	66.9	156.0	25.6	.3	25.2	15.4	50.8	95.6	164.2	912.3
2005	100.3	117.9	59.7	56.3	4.2	.0	1.0	.3	75.4	58.5	127.8	121.7	723.1

[Moyen | 103.3 76.0 59.0 67.8 59.1 7.4 3.1 9.9 43.6 49.9 128.8 | 125.7 | 751.0 |

2. Les températures (°c)

[Année | Janv. Févr. Mars Avril Mai Juin Juil. Aout Sept Oct. Nove Dèce | Annuel |

1996	15.5	12.2	14.1	15.3	17.6	20.8	23.2	25.1	21.6	18.0	16.7	15.0	17.9
1997	14.1	13.6	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9
1998	13.4	13.6	14.0	16.2	17.5	21.1	-99.9	24.8	23.8	19.3	15.9	12.8	17.5
1999	12.9	11.4	14.5	15.9	19.9	22.1	24.2	27.0	24.4	22.8	15.4	13.1	18.7
2000	11.2	13.3	14.1	16.9	19.3	21.1	25.2	25.8	23.6	19.5	16.9	15.2	18.5
2001	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	22.4	23.1	15.5	12.3	18.3
2002	12.6	13.2	14.7	15.6	18.2	21.5	23.0	24.2	23.1	20.5	17.3	15.4	18.3
2003	12.5	11.4	14.3	15.8	17.6	23.7	26.6	27.4	23.8	21.3	17.4	13.3	18.8
2004	13.2	13.4	13.7	15.1	16.5	21.0	23.4	26.2	23.8	23.1	15.2	13.7	18.2
2005	10.4	10.1	13.4	15.8	19.1	22.2	24.8	25.0	23.0	21.1	15.6	12.5	17.8

[Moyen | 12.9 12.5 14.1 15.8 18.2 21.7 24.3 25.7 23.3 21.0 16.2 13.7 | 18.2 |

1. **Tableau 1** : Fréquences mensuelles de la houle au large par direction. 2. **Tableau 2** : caractéristiques de la houle à la côte.

Directions	Nord	Nord-Est	Est	Sud-Est	Sud	Sud-Ouest	Ouest	Nord-Ouest
Mois								
Janvier	08,10	12,90	18,20	05,00	06,50	13,20	28,80	07,30
Février	08,80	13,30	12,60	04,00	06,00	16,90	35,60	05,80
Mars	11,3	12,60	15,80	03,60	04,50	13,30	30,50	09,20
Avril	11,70	15,30	16,00	02,00	04,40	13,70	26,60	10,20
Mai	08,40	26,30	31,90	03,00	03,30	17,20	13,90	06,20
Juin	09,20	29,10	29,80	01,80	01,40	18,20	16,30	02,00
Juillet	05,90	32,50	35,10	01,40	00,90	05,90	16,20	02,00
Août	08,90	27,70	37,40	01,90	01,10	05,00	13,40	04,90
Septembre	06,70	26,40	40,50	02,20	02,30	04,50	14,80	02,50
Octobre	07,80	14,10	20,30	03,20	04,30	14,80	28,80	06,90
Novembre	05,40	05,70	10,00	05,10	80,00	15,90	40,40	09,40
Décembre	10,20	06,20	09,30	04,60	07,40	15,00	37,10	01,00
Moyenne	8,57	19,01	23,51	2,98	10,50	12,76	24,87	5,46

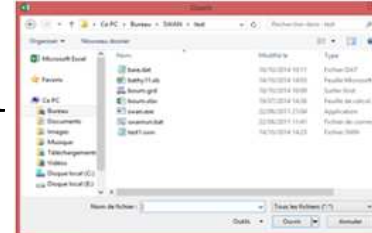
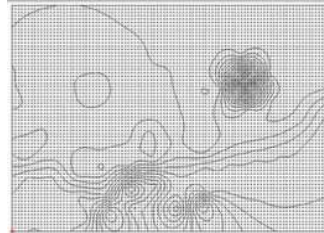
	Temps de retour associé (an)	360° Nord	45° Nord	315° Nord
Biennal	02	3.64m	3.57m	4.14m
Quinquennal	05	5.25m	4.11m	3.68m
Décennal	10	5.71m	4.50m	4.08m
Vingtennal	20	5.17m	9.91m	4.49m
Cinquantennal	50	5.78m	5.44m	5.02m
Centennal	100	6.24m	5.83m	5.42m

3. **Tableau 3** : résultats de la réfraction des houles vintennales.

Direction (°)	Période (s)	Amplitudes des houles au large (m)	Amplitudes des houles à -10m	Kr	Angle d'arrivée (°)
45° N	10	6,79	4,13	0,61	17,11
315° N	10	5,95	4,61	0,78	329,13
360° N	10	7,02	5,19	0,74	349,48

1. Les différentes étapes à suivre pour manipuler avec le modèle SWAN

	A	B	C
1	543 559,00	4 069 275,00	299,10
2	543 552,94	4 069 313,02	291,90
3	543 545,49	4 069 364,13	284,40
4	543 538,55	4 069 412,48	200,10
5	543 531,36	4 069 460,51	229,50
6	543 522,93	4 069 510,08	217,40
7	543 513,96	4 069 567,97	218,20



	A	B	C
1	543 559,00	4 069 275,00	299,10
2	543 552,94	4 069 313,02	291,90
3	543 545,49	4 069 364,13	284,40
4	543 538,55	4 069 412,48	200,10
5	543 531,36	4 069 460,51	229,50
6	543 522,93	4 069 510,08	217,40
7	543 513,96	4 069 567,97	218,20

La création du fichier input : on fait introduire les points de prélèvement (altitude + longitude) associés par leurs diamètres moyens D_{50} dans un tableur Excel.

Ouvrir ce fichier dans surfer pour créer le fichier input.dat

Enregistrer sous la format.DAT

Ouvrir ce fichier avec Excel .



```

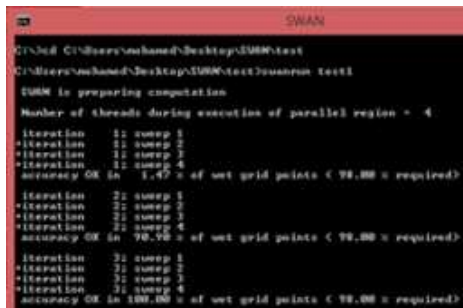
9 INPGRID BOTTOM REG 543513.96 4069263.27 0 99 67 6.4044 6.4437 EXCVAL -999.0000
10 READINP BOTTOM 1.0 'bathybaie.txt' 3 0 FREE
11 $
12 $BOUN SIDE H CON PAR 3,67 8 45 27
13 $BOUN SIDE E CON PAR 2,6 0 27
14 $BOUN SIDE W CON PAR 2,6 0 27
15 $BOUN SIDE N CON PAR 2,6 0 27
16 WIND 19.2 45
    
```

Fichier	Edition	Format	Affichage ?
208.6334461			
208.3414461			
208.0891958			
207.9060233			
207.7644533			
207.6387551			
207.5219292			
207.4148			
207.3207282			
207.249302			

Ouvre swan.exe en introduisant ce dernier par la commande SWAN RUN test1.

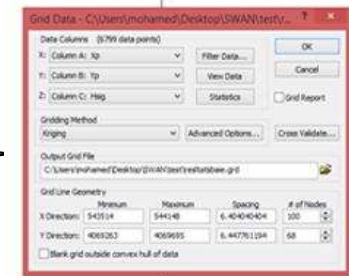
Ce dernier fait modifier le fichier test1.swn automatiquement. Puis on introduit la direction et hauteur significatifs et les périodes des houles dans test1.

Sélectionner la dernière colonne et le copier dans un fichier block note.



	A	B	C	D	E	F	G
2	%						
3	%	Run:001	Table:1	SWAN	version:40.85		
4	%						
5	%	Xp	Yp	Hsig	Dir	Depth	X-Val
6	%	[m]	[m]	[m]	[deg]	[m]	[m/s]
7	%						
8	%	543514	4069263	3.45202	42.207	297.882	
9	%	543520	4069263	3.45202	41.737	298.937	
10	%	543527	4069263	3.39845	41.432	299.6253	
11	%	543533	4069263	3.38844	41.137	300.2148	
12	%	543540	4069263	3.31099	40.801	300.7404	
13	%	543552	4069263	3.27249	40.454	301.0917	
14	%	543559	4069263	3.21525	40.109	301.1924	
15	%	543565	4069263	3.2007	39.78	300.9685	
16	%	543572	4069263	3.17018	39.483	300.4837	

	A	B	C	D	E
1	Xp	Yp	Hsig	Dir	Depth
2	[m]	[m]	[m]	[deg]	[m]
3	543514	4069263	3.45202	42.207	297.882
4	543520	4069263	3.45202	41.737	298.937
5	543527	4069263	3.42092	41.737	298.937
6	543533	4069263	3.39845	41.432	299.6253
7	543540	4069263	3.38844	41.137	300.2148
8	543546	4069263	3.31099	40.801	300.7404
9	543552	4069263	3.27249	40.454	301.0917
10	543559	4069263	3.21525	40.109	301.1924
11	543565	4069263	3.2007	39.78	300.9685
12	543572	4069263	3.17018	39.483	300.4837

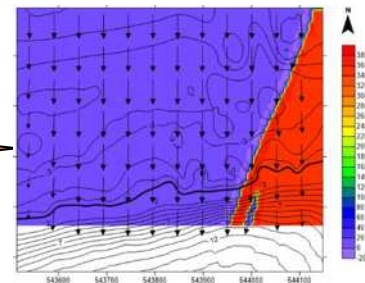
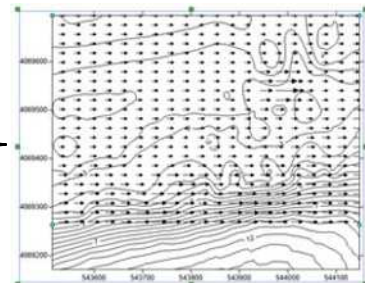
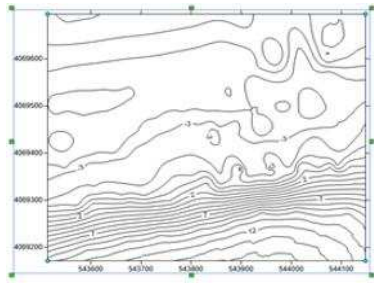


Le fichier qui résulte sera resultatbais.

Ouvrir ce dernier par Excel.

Déplacer la partie des résultats vers un autre fichier Excel pour les utiliser dans SURFER.

Ouvrir dans Surfer pour créer les fichiers .GRID de la hauteur significatif et la direction



```

9 INGRID BOTTOM REG 543513.96 4069263.27 0 99 67 6.4044 6.4437 EXCVAL -999.0000
10 READINF BOTTOM 1.0 'bathybale.txt' 3 0 FREE
11 $
12 $BOUN SIDE U CON DIR 370 100 100 DEGREES
13 $BOUN SIDE N CON PAR 3.67 8 45 27
14 $BOUN SIDE W CON PAR 6 0 27
15 $BOUN SIDE E CON PAR 6 0 27
16 WIND 19.2 45
    
```

Créer les cartes par surfer en respectant l'ordre de l'introduction des fichiers .GRID on commence par Bathymetrie.GRID

Introduire la direction.GRID et hauteur significatif.GRID en utilisant la commande sur SURFER : add puis two vector layer.

Une simple modification des couleurs pour avoir la carte finale.

Pour les autres directions et hauteurs significatives il faut juste modifier le fichier test1 puis l'introduit en SWAN pour avoir les résultats puis refaire le même travail.

2. Les différentes étapes à suivre pour manipuler avec le modèle GSTA

	A	B	C
1	100	1	900
2	1	543 559,00	4 069 275,00
3	2	543 552,94	4 069 313,02
4	3	543 545,49	4 069 364,13
5	4	543 538,55	4 069 412,48
6	5	543 531,36	4 069 460,51
7	6	543 522,93	4 069 510,08
8	7	543 513,96	4 069 567,97
9	8	543 505,00	4 069 574,00
10	9	543 573,00	4 069 517,00
11	10	543 580,00	4 069 466,00
12	11	543 588,00	4 069 418,00
13	12	543 595,00	4 069 371,00
14	13	543 603,00	4 069 320,00

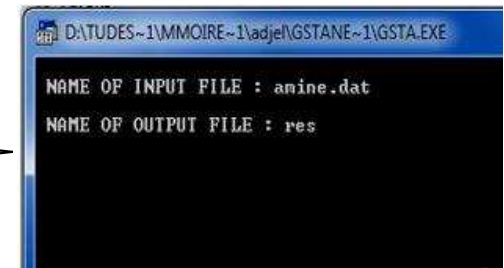
Création du fichier input on fait introduire les points de prélèvement (altitude + longitude) associés par leurs diamètres moyens D_{50} et les indices S_k et S_o dans un tableur Excel.

Plot1 dddd.xls					
		A1	100		
	A	B	C	D	
1	100	1	900		
2	1	543559	4069275	299,1	
3	2	543552,94	4069313,0	291,9	
4	3	543545,49	4069364,1	284,4	
5	4	543538,55	4069412,5	200,1	
6	5	543531,36	4069460,5	229,5	
7	6	543522,93	4069510,1	217,4	

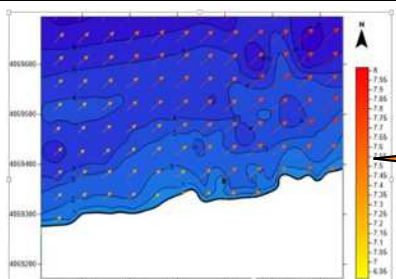
Ouvrir ce fichier dans surfer pour créer le fichier input.dat

	A	B	C
1	100,1,900		
2	1,543559,4069275,299,1,1,3,1,1		
3	2,543552,94,4069313,02,291,9,1,3,1,1		
4	3,543545,49,4069364,13,284,4,1,3,1,1		
5	4,543538,55,4069412,48,200,1,1,2,1		
6	5,543531,36,4069460,51,229,5,1,3,1		
7	6,543522,93,4069510,08,217,4,1,2,1		
8	7,543513,96,4069567,97,218,2,1,2,1		
9	8,543565,4069574,236,1,1,3,1		
10	9,543573,4069517,226,8,1,3,1		

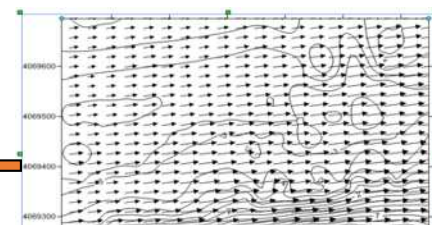
Enregistrer ce fichier en forme .DAT et ouvrir ce fichier avec Excel.



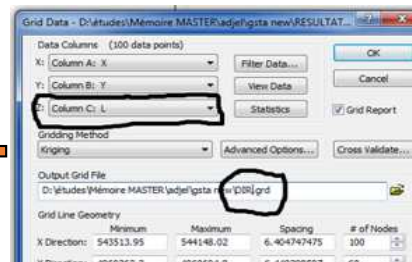
Ouvrir GSTA.EXE pour introduire le fichier input et nommer le fichier résultats.



Une simple modification des couleurs pour avoir la carte finale.



Enfin on ouvre en premier lieu le fichier GRID de la bathymétrie puis add 2 vector layer pour introduire les fichiers GRID de la direction puis la hauteur significative.

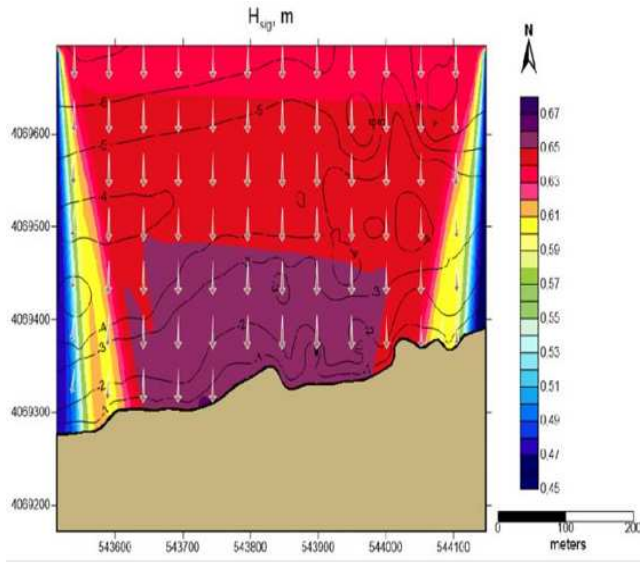


Ouvrir avec surfer le fichier resultats.XLSX pour produire les fichiers DIR.GRID et HSG.GRID qui représentent les directions et hauteur significatifs des houles.

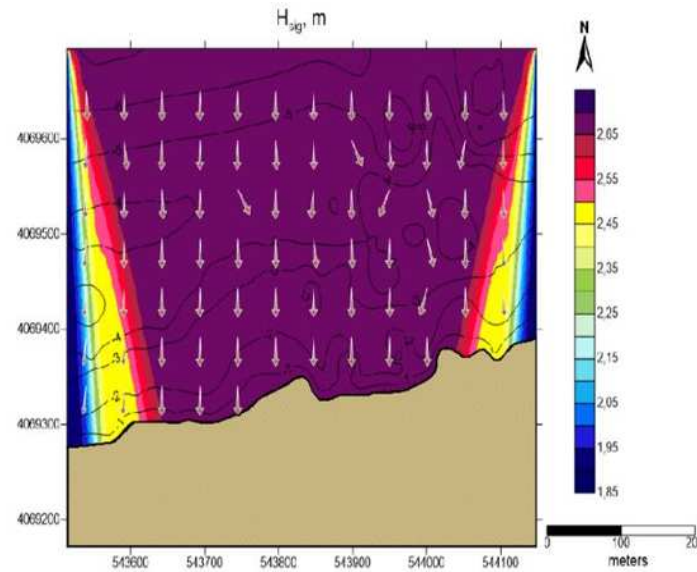
	A	B	C	D		
1	INPUT DATA					
2	1	543559,0	4069274,9	299,10	1,30	1,10
3	2	543552,9	4069313,1	291,90	1,30	1,10
4	3	543545,5	4069364,3	284,40	1,30	1,10
5	4	543538,6	4069412,3	200,10	1,20	1,00
6	5	543531,4	4069460,6	229,50	1,30	1,00

Ouvrir le fichier RES avec Excel et Puis enregistrer sous format XLSX.

1. $H_s = 0,63$ m et $T = 6$ s, selon 360° N.



2. $H_s = 2,67$ m, $T = 8$ s, selon 360° N.



3. $H_s = 4,27$ m et $T = 10$ s, selon 360° N.

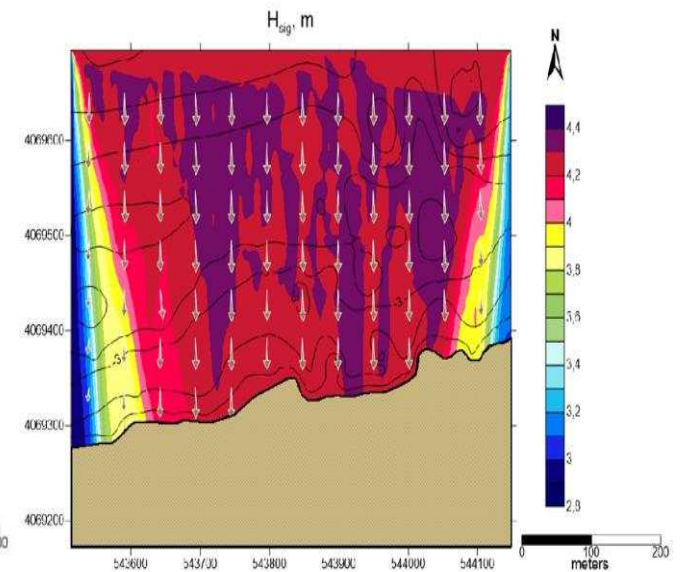
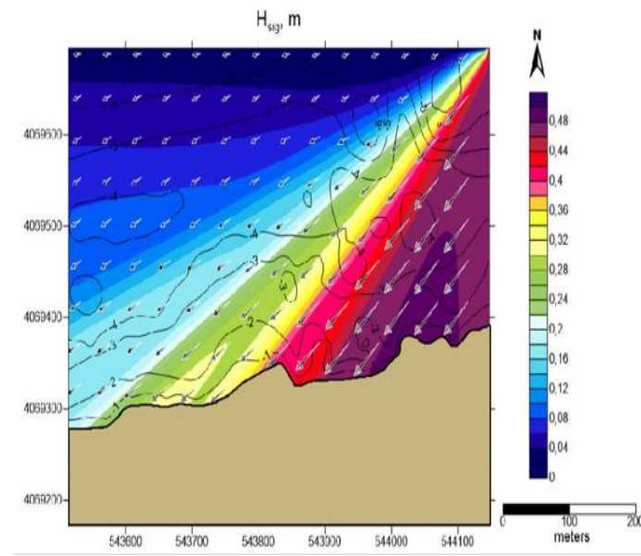


Figure I.1 : La propagation de la houle et sa direction réalisée avec SWAN.

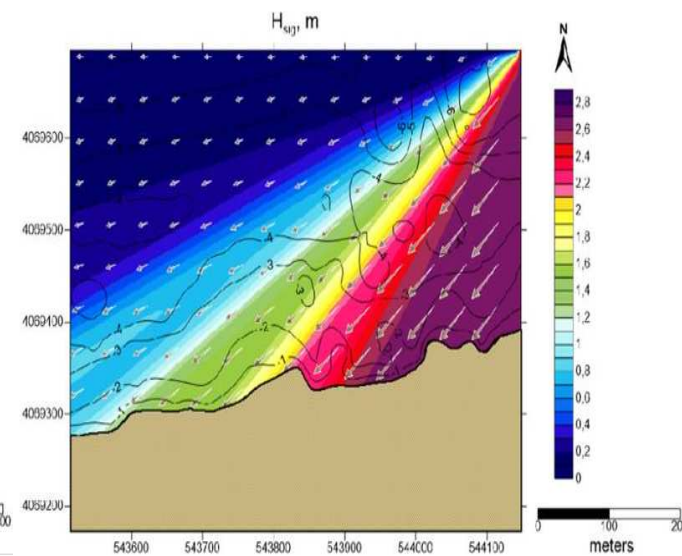
Figure I.2 : La propagation de la houle et sa direction réalisée avec SWAN.

Figure I.3 : La propagation de la houle et sa direction réalisée avec SWAN.

4. $H_s = 0,63$ m et $T = 6$ s, selon 45° NE.



5. $H_s = 2,67$ m et $T = 8$ s, selon 45° NE.



6. $H_s = 4,27$ m et $T = 10$ s, selon 45° NE.

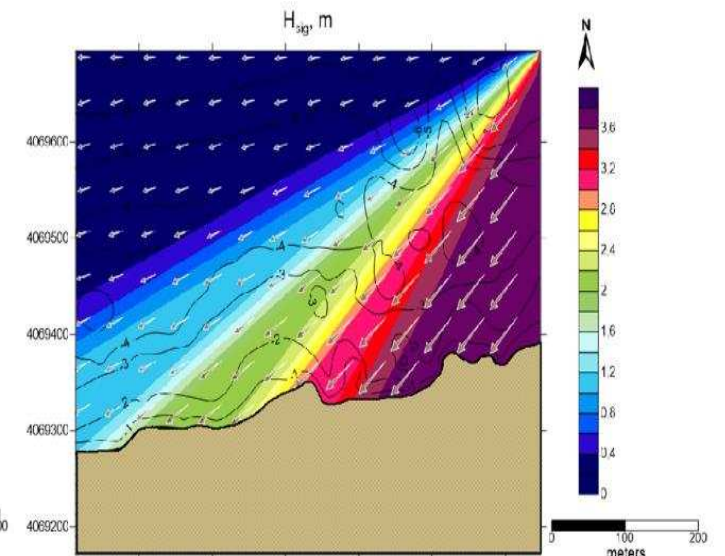
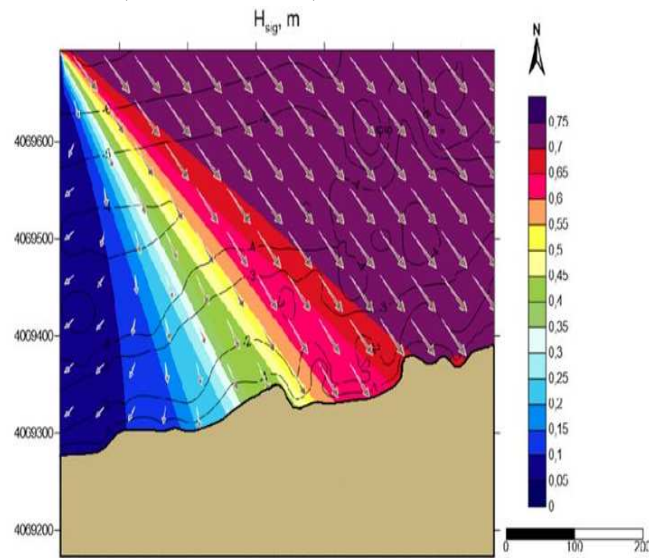


Figure I.4 : La propagation de la houle et sa direction réalisée avec SWAN.

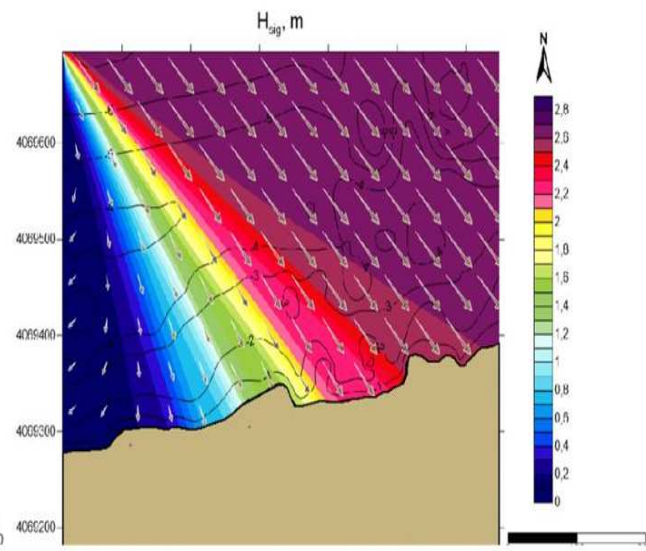
Figure I.5 : La propagation de la houle et sa direction réalisée avec SWAN.

Figure I.6 : La propagation de la houle et sa direction réalisée avec SWAN.

7. $H_s = 0,63$ m et $T = 6$ s, selon 315° NW.



8. $H_s = 2,67$ m et $T = 8$ s, selon 315° NW.



9. $H_s = 4,27$ m et $T = 10$ s, selon 315° NW.

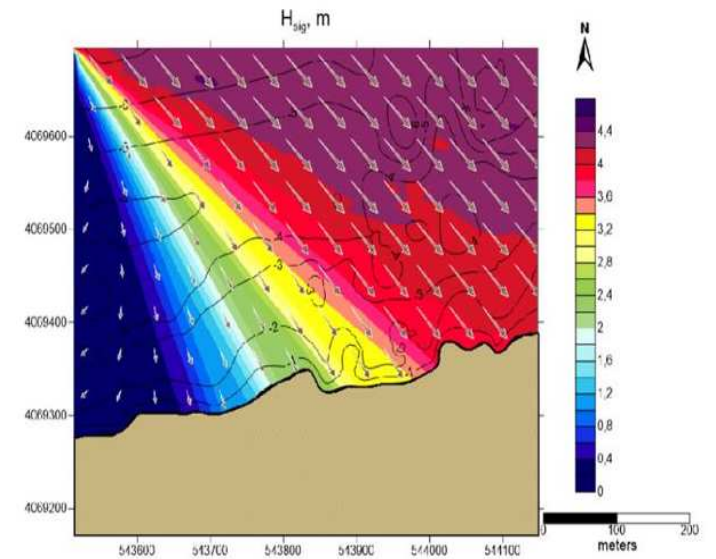


Figure I.4 : La propagation de la houle et sa direction réalisée avec SWAN.

Figure I.5 : La propagation de la houle et sa direction réalisée avec SWAN.

Figure I.6 : La propagation de la houle et sa direction réalisée avec SWAN.

Examen de la stabilité des containers de sable

1. Premier essai avec des containers de 150L

L'analyse des données provenant d'un premier essai utilisant de géotextile de 150L (1.50 m x 0.75 m) montré une grande dispersion du nombre stabilité N_s à partir de laquelle un seuil entre le mouvement et aucun mouvement peut être identifiée. Il existe une relation entre le début de mouvement des Géo-containers et le nombre de couche, il est possible d'obtenir une distinction à l'égard de la stabilité du comportement de la crête et la pente. Par conséquent, deux formules de la stabilité de cet ouvrage ont été élaborées afin de distinguer entre la stabilité de la crête et la pente éléments. Pour les éléments de pente la formule suivante a été obtenue.

$$N_s = \frac{H_s}{(\rho_E / \rho_W - 1)D} = \frac{2.75}{\sqrt{\xi_0}}$$

D : Caractéristique du diamètre des géotubes définie comme $D = l \cdot \sin \alpha$

l : Longueur des contenir de sables.

H_s : Hauteur significatives de la houle avant de la structure.

ρ_w : Densité de l'eau de mer.

ρ_E : Densité du Géo-container avec : $\rho_E = \rho_s(1-n) + \rho_w$

n = Porosité du sable,

ρ_s = Densité des grains de sable (2650 kg/m³)

ξ_0 = Indice de déferlement.

Comme déjà mentionné, les éléments de la crête commencent à se déplacer plus tôt que les éléments sur la pente. Il a été observé que la stabilité du comportement des éléments de la crête est clairement dépendante du rapport R_c/H_s .

A partir des observations (**Oumeraci et al, 2002**) ont obtenu une relation linéaire pour le nombre N_s à partir du rapport R_c/H_s .

$$N_s = \frac{H_s}{(\rho_E / \rho_W - 1)D} < 0.79 + 0.09 \cdot \frac{R_c}{H_s} \text{ Avec } R_c = \text{freeboard (m).}$$

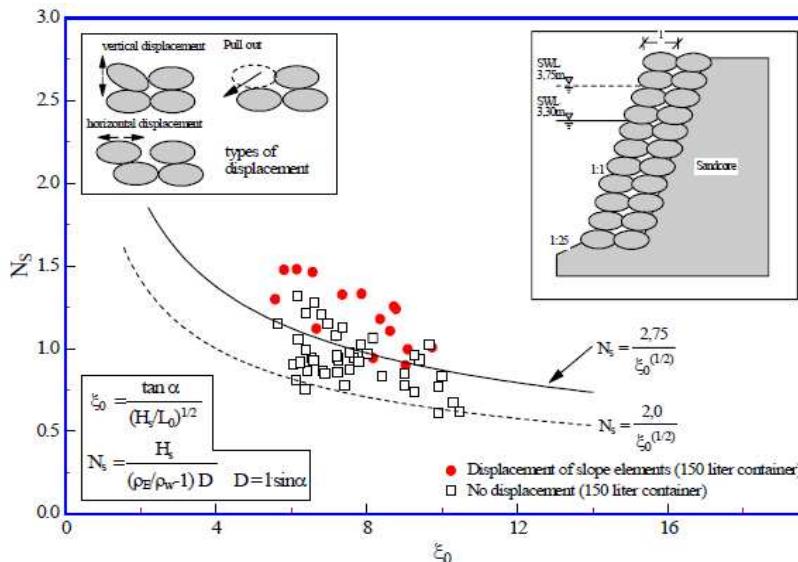


Figure IV.2 : Stabilité des géo-containers sur la structure de pente.

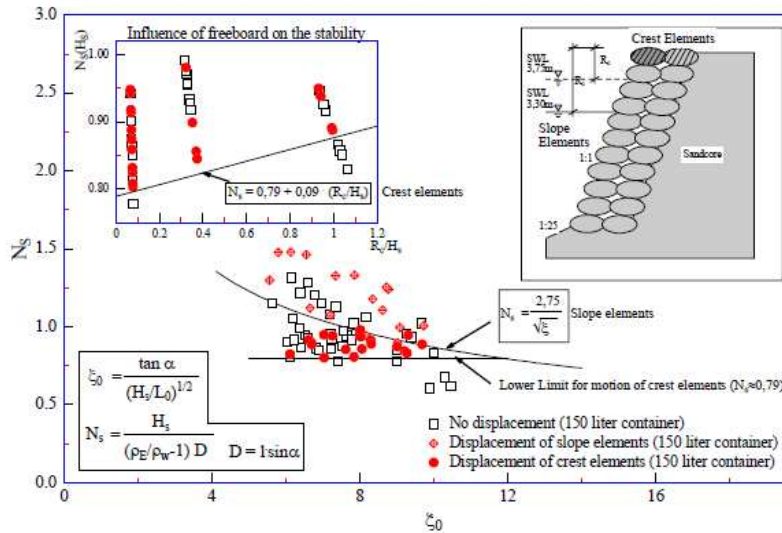


Figure IV.3 : Stabilité des containers de sable sur la structure de la crête.

b- Deuxième essai avec des containers de 25 L

En général, un comportement similaire des petits conteneurs de sable par rapport aux conteneurs de sable de 150 L, a été observé. Les éléments de la crête ont commencé à se déplacer plus tôt que les éléments de la pente. Pas d'effet de période de vague sur la stabilité peut être observé pour le nombre de stabilité des éléments la pente N_s .

$$N_s = \frac{H_s}{(\rho_E / \rho_W - 1)D} < 1.1$$

Une analyse plus détaillée du mouvement des éléments de la crête a montré que la même relation entre la stabilité nombre N_s et le rapport R_c/H_s .

$$N_s = \frac{H_s}{(\rho_E / \rho_W - 1)D} < 0.885 + 0.05 \cdot \frac{R_c}{H_s}$$

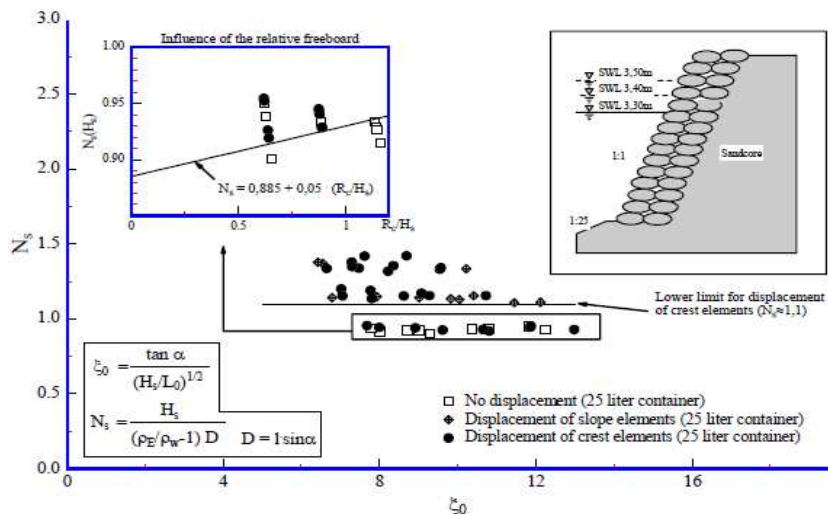


Figure IV.4 : Stabilité des containers de sable de 25L.

En comparant ces résultats avec les résultats trouvés avec les conteneurs de sable de 150 l, les petits conteneurs sont relativement plus stables.

ANNEXE 4 : RESULTATS DES CALCULS DU TRANSIT SEDIMENTAIRE

Tableau II.1 : Transit littoral en fonction de θ_{br} , H_{br}.

Tableau II.2 : Transit littoral en fonction de θ_{br} , H_{br} et selon Kamphuis.

Ho = 1.2m T= 6s			Ho = 2.2m T= 8s			Ho = 3m T= 9s			Ho =4.5m T=11s		
θ_{br} (°)	H _{br} (m)	S (m ³ /an)	θ_{br} (°)	H _{br} (m)	S (m ³ /an)	θ_{br} (°)	H _{br} (m)	S (m ³ /an)	θ_{br} (°)	H _{br} (m)	S (m ³ /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	11700204	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

Direction de compas.	θ (°)	T= 6s S (m ³ /an)	T= 8s S (m ³ /an)	T= 9s S (m ³ /an)	T= 11s S (m ³ /an)	Total (m ³ /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 II.3 : Transit littoral selon la formule de CERC (1971).

Direction de compas (°).	θ° (°)	T = 6s	T = 8s	T = 9s	T = 11s	Total.
		Qt (m ³ /an)	Qt (m ³ /an)	Qt (m ³ /an)	Qt (m ³ /an)	
260	-4	-26772	-37141	-19017	-36830	-119760
270	-14	-89418	-125211	-64453	-123033	-403115
280	-24	-140272	-196427	-102687	-193022	-632408
290	-34	-17108	-240599	-126962	-23866	-563235
300	-44	-84188	-133275	-109466	-126811	-453740
310	-54	-7715	-123310	-100353	-116256	-340634
320	-64	-60399	-96535	-78581	-91034	-326549
330	-74	-36909	-59002	-48505	-56194	-200610
340	-84	-5962	-4931	-891	-2431	-14215
350	86	3689	3051	546	1505	8791
360	76	16037	13133	2372	6536	38078
10	66	27942	23101	4170	11492	66705
20	56	37258	30798	5506	15173	88735
30	46	4612	24702	11091	10187	50592
40	36	45141	24174	10853	9967	90135
50	26	38100	20402	10059	8411	76972
60	16	25854	13844	6214	5707	51619

Tableau II.4 : Transit littoral en fonction de θ_{br} , H_{br} et selon CERC (1971).

Ho = 1.2 T = 6s			Ho = 2.2 T = 8s			Ho = 3 T = 9s			Ho = 11.5 T = 11s		
θ_{br} (°)	H _{br} (m)	Qt (m ³ /an)	θ_{br} (°)	H _{br} (m)	Qt (m ³ /an)	θ_{br} (°)	H _{br} (m)	Qt (m ³ /an)	θ_{br} (°)	H _{br} (m)	Qt (m ³ /an)
-2	1.30	-187876	-2	2.38	-846053	-2	3.09	-1777303	-2	4.80	-50455331
-6	1.29	-627498	-6	1.29	-2852201	-7	3.18	-6117163	-7	4.74	-16853916
-10	1.27	-984368	-11	1.27	-4474436	-11	3.12	-9596916	-11	4.64	-26441382
-14	1.23	-120671	-14	2.29	-5480629	-15	3.01	-1186565	-15	4.51	-3269322
-17	1.16	-1275586	-17	2.12	-5744634	-18	2.86	-1243940	-18	2.28	-34273468
-20	1.07	-1169105	-20	1.96	-5315120	-20	2.64	-1140384	20	3.96	-31420666
-21	0.96	-915145	-21	1.74	-4161032	-21	2.35	-8929665	22	3.52	-24604050
-20	0.79	-559235	-20	1.44	-2543193	-21	1.93	-5512006	21	2.89	-15187657
-17	0.53	-180673	-17	0.96	-821839	-18	1.29	-1782367	18	1.94	-4863597
16	0.44	111807	16	0.81	508623	16	1.09	1092519	16	1.64	3010451
20	0.74	485984	20	1.36	2188958	21	1.83	4744794	21	2.74	13073782
21	0.93	846751	21	1.69	3850195	22	2.27	8341901	22	3.41	22984631
20	1.05	1129051	20	1.92	5133125	21	2.59	11013794	21	3.88	30346054
18	1.15	126368	18	2.09	5744718	19	2.82	12324105	19	4.23	33955896
15	1.21	1236750	15	2.21	5621906	16	2.99	12059116	16	4.48	33225462
11	1.26	1043850	11	2.29	4744811	12	3.10	11176828	11	4.64	28039166
7	1.29	708332	7	2.35	3219627	7	3.17	6905211	7	4.75	19025142

Tableau II.5 : Transit littoral selon Bijker.

Ho = 1.2m T = 6s			Ho = 2.2m T = 8s			Ho = 3m T = 9s			Ho = 4.5m T = 11s		
θ_{br} (°)	H _{br} (m)	S (m ³ /s) 10 ⁻⁶	θ_{br} (°)	H _{br} (m)	S (m ³ /s) 10 ⁻⁶	θ_{br} (°)	H _{br} (m)	S (m ³ /s) 10 ⁻⁶	θ_{br} (°)	H _{br} (m)	S (m ³ /s) 10 ⁻⁶
-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 II.6 : Transit littoral selon la formule de Bijker.

Direction de compas (°)	θ (°)	T = 6s 10 ⁻⁶	T = 8s 10 ⁻⁶	T = 9s 10 ⁻⁶	T = 11s 10 ⁻⁶	Total 10 ⁻⁶
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