

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



**MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME
D'INGÉNIEUR EN SCIENCES DE LA MER**

Spécialité : AMÉNAGEMENT DU LITTORAL



Présenté par:

-BOUALILI Nassim

Soutenu le 24/06/2015 devant le jury suivant :

M. GUERFI S.	Maître de conférences A (ENSSMAL)	Président
M. MEZOUAR K.	Maître de conférences B (ENSSMAL)	Promoteur
M. HEMDANE Y.	Maître de conférences A (ENSSMAL)	Examineur
Mme. MEHDID S.	Maîtresse Assistante A (ENSSMAL)	Examinatrice

Promotion : 2015

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents : Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études. Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux. Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

A mes très chères sœurs.

A toute ma famille.

Et à tous mes amis (es).

BOUALILI Nassim.

REMERCIEMENTS

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier le BON DIEU de m'avoir procuré : santé, patience et amour ainsi aux membres de ma familles qui m'ont soutenu durant ce petit séjour pour réaliser ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Monsieur **MEZOUAR K.**, maître de conférences B, pour avoir accepté de diriger ce travail. Je le remercie pour avoir toujours été présent et pour ses conseils et ses encouragements.

J'adresse mes remerciements à Monsieur **GUERFI S.**, maître de conférences A (ENSSMAL), pour avoir accepté de présider le jury de mon mémoire.

Je remercie également Monsieur **HEMDANE Y.** maître de conférences A et Madame **MEHDID S.** Maîtresse Assistante A pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je tiens également à exprimer mes remerciements à mes amis pour leur soutien et leur aide : **AOUDJ CHERIF, DAGHBADJ AHMED...**

Ensuite, j'adresse mes profondes reconnaissances au personnel de la bibliothèque de l'ENSSMAL.

Je remercie également tous mes amis pour leur soutien durant la période de travail, pour les moments de détente, de rire et d'action.

Enfin, Je remercie tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin pour finaliser ce mémoire.

SOMMAIRE

Sommaire

Introduction générale.....	20
----------------------------	----

Chapitre I : Généralités

1. L'hydrodynamique côtière.....	23
1.1. Concepts généraux de morphodynamique.....	23
1.2. Echelle spatiotemporelle de l'évolution morphologique des systèmes côtiers.....	23
1.3. Processus morphodynamiques côtiers.....	24
2. Processus d'érosion de la plage.....	26
2.1. Définition générale des plages.....	26
2.2. Hydrodynamique des plages.....	26
2.3. Les différents types des plages en fonction de leur morphologie.....	27
2.3.1. Plages bloquées, ou adossées.....	27
2.3.2. Plages à pointe(s) libre(s).....	27
2.4. Classification morphodynamique des plages.....	27
2.4.1. Les plages dissipatives.....	27
2.4.2. Les plages réfléchissantes.....	28
2.4.3. Les plages intermédiaires.....	29
2.5. Morphologie des plages.....	29
2.6. Budget sédimentaire d'une plage.....	30

CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1. Introduction.....	32
2. Cadre géographique.....	32
3. Contexte géomorphologique et géologique.....	33
3.1. Cadre géologique.....	33
3.2. Cadre géomorphologique.....	33
4. Données climatologiques et hydrologiques.....	34
4.1. Données climatologiques.....	34
4.2. Données hydrologiques.....	36
5. Contexte hydrodynamique.....	36
5.1. Les données météorologiques (vent).....	36
5.2. Les données océanographiques.....	38
5.2.1. La houle.....	38
5.2.1.1. Houle au large.....	39

Sommaire

5.2.2. Les courants.....	42
5.2.2.1. Les courants généraux.....	42
5.2.2.2. Les courants de retour.....	43
5.2.2.3. Les courants de dérive littorale.....	43
5.2.3. Les marées.....	44

CHAPITRE III : ETUDE DE LA VARIATION DU TRAIT DE COTE DE LA PLAGE BOUMERDES ENTRE 1993 ET 2015

1. Introduction.....	46
2. Les facteurs d'évolution du trait de côte.....	47
3. Etude et analyse de l'évolution du trait de côte.....	48
3.1. Méthodes et techniques utilisées.....	48
3.1.1. Les documents utilisés.....	48
3.1.2. Moyens et procédure.....	48
3.1.2.1. Aperçu du logiciel ArcGIS 10.....	48
3.1.2.2. Procédure et discussion.....	49
4. Les variations de la ligne de côte de Boumerdès entre 1993 et 2015.....	52
5. Interprétation des résultats.....	54
6. Synthèse.....	56
7. Représentation des bilans sédimentaires par des histogrammes.....	56
8. analyse des bilans sédimentaires (surfaces gagnées - surfaces perdues) pour la plage de Boumerdès entre 1993 et 2015.....	57
9. Facteurs principales de l'évolution du trait de côte du littoral de Boumerdès entre 1993 et 2015.....	58
Conclusion.....	59

CHAPITRE IV : ETUDE HYDRODYNAMIQUE ET BATHYMETRIQUE DE LA PLAGE DE BOUMERDES

A. Etude hydrodynamique.....	61
1. Introduction.....	61
2. Zonation hydrodynamique du littoral.....	61
3. Modélisation de la réfraction des houles par le model SWAN.....	63
3.1. Description du modèle SWAN.....	63
3.2. Le but d'étude de la réfraction.....	64
3.3. Discussion.....	64

Sommaire

3.4. Choix de secteur angulaire.....	65
3.5. Les étapes à suivre.....	66
4. Interprétation des résultats.....	73
Conclusion.....	74
B. Etude bathymétrique.....	75
1. Le levé bathymétrique.....	75
2. La carte bathymétrique.....	75
3. Description du logiciel.....	75
4. Manipulation sur surfer.....	75
5. Résultats d'analyses bathymétriques.....	76
6. Les profils transversaux.....	77
Conclusion.....	79

CHAPITRE V : TRANSPORT SEDIMENTAIRE

1. Introduction.....	81
2. Les agents de transport sédimentaire.....	81
3. Les différents modes de transport sédimentaire.....	82
4. Mouvement d'entraînement des sédiments sur le fond.....	83
4.1. Les paramètres essentiels dans le mécanisme d'entraînement.....	84
4.2. Le début d'entraînement.....	84
5. Transport sous l'action des houles.....	85
6. Transport sédimentaire par jet de rive.....	86
7. Transport sédimentaire par courant littoral.....	86
8. Quantification du débit solide.....	87
8.1. Calcul du débit solide par la méthode de Kamphuis (1991).....	87
8.2. 8.2 Calcul du débit solide par la méthode de CERC (1973).....	89
8.3. Calcul de débit solide par la formule de Bijker (1971).....	90
8.4. Comparaison des résultats obtenus par les trois (03) formules.....	94
9. Modélisation du transport sédimentaire.....	95
9.1. Calcul des tendances du transport sédimentaire.....	95
9.2. Limites du calcul des tendances de transport sédimentaire.....	97
9.3. Les différentes étapes à suivre pour manipuler avec le modèle GSTA.....	98
9.4. Interprétation des résultats.....	100
Conclusion.....	100

CHAPITRE VI : TECHNIQUES ET METHODES DE PROTECTION CONTRE L'EROSION

1. Introduction.....	102
2. Nécessité d'une étude d'aménagement.....	102
3. Les ouvrages envisageables.....	103
3.1. La première variante.....	103
3.1.1. Les brise-lames.....	103
3.1.2. Dimensionnement.....	104
3.1.2.1. La distance de la brise lame par rapport à la côte L_c	104
3.1.2.2. La longueur du brise- lame.....	104
3.1.2.3. Espacement entre deux brises- lames.....	105
3.1.2.4. Hauteur de la houle au pied de l'ouvrage.....	105
3.1.2.5. La largeur en crête du brise-lames (B).....	106
3.1.2.6. La hauteur du brise-lames.....	106
3.1.2.7. Stabilités des ouvrages de protection.....	106
3.1.2.8. Impact des brise-lames sur la ligne de rivage.....	109
3.2. La deuxième variante.....	110
3.2.1. Apport artificiel.....	110
3.2.1.1. Les conditions de rechargement.....	110
3.2.1.2. Procédés et mise en place des sédiments.....	111
3.3. La troisième variante.....	112
3.3.1. Epis en arc.....	112
3.3.1.1. Définition.....	112
3.3.1.2. Principe de fonctionnement des épis.....	113
3.3.1.3. Prédimensionnement des épis.....	113
3.3.1.4. Avantages des épis en arc.....	115
3.3.1.5. Inconvénients.....	116
3.4. La quatrième variante.....	116
3.4.1. Les Géo-containers.....	116
3.4.1.1. Composition et caractéristiques.....	117
3.4.1.2. Examen de la stabilité des containers de sable.....	117
3.4.1.3. Application de cette variante pour notre site d'étude.....	119
Conclusion.....	120

Sommaire

Conclusion générale.....	122
Références bibliographiques.....	125
Annexes.....	129

LISTE DES ABREVIATIONS

Liste des abréviations

ANRH :	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
°C :	Degré Celsius
cm :	Centimètre
J/an :	Jour par an
h :	Heure
Km :	Kilomètre
L :	Longueur
Lat :	Latitude
LCHF :	Laboratoire Centrale d'Hydraulique Français
LEM :	Laboratoire d'Etudes Maritimes
m :	Mètre
m² :	Mètre carrée
m³ :	Mètre cube
ml	Mètre linéaire
mm :	Millimètre
m/an :	Mètre par an
m/s :	Mètre par seconde
m/s² :	Mètre par seconde carrée
m³/s :	Mètre cube par seconde
N :	Nord
NW :	Nord-Ouest
ONM :	Office National de la Météorologie
P :	Profil
s :	Seconde
SE :	Sud-Est
SSMO:	Summary of Synoptic Meteorological Observations
T :	Période

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

Figure I.1 : Relation spatio-temporelle des systèmes morphodynamique côtier.....	25
Figure I.2 : Système morphodynamique côtier.....	25
Figure I.3 : Caractéristiques hydrodynamiques en milieu littoral.....	26
Figure I.4 : Le profil d'une plage dissipative.....	28
Figure I.5 : Le profil d'une plage réfléchissante.....	28
Figure II.1 : situation géographique de notre site d'étude.....	33
Figure II.2 : Coupe lithologique de la falaise de Boumerdès.....	34
Figure II.3 : Moyennes mensuelles des précipitations de 1985 à 2008 dans la région.....	35
Figure II.4 : Rose des vents dans la région de Boumerdès.....	37
Figure II.5 : Roses saisonnières des directions des houles.....	40
Figure II.6 : Rose annuelle des directions des houles.....	40
Figure II.7 : Profil d'un courant de retour.....	43
Figure II.8 : Profil d'un courant de dérive littorale.....	44
Figure III.1 : Création des couches sous ArcCatalog 10.....	49
Figure III.2 : Digitalisation du trait de côte sous ArcMap 10.....	50
Figure III.3 : Mesure de surface par la règle numérique sous ArcMap 10.....	50
Figure III.4 : Carte de l'évolution historique du trait de côte du littoral de Boumerdès entre 1993 et 2015.....	51
Figure.III.5 : Mesure des distances de recul et avenacé du trait de côte sous ArcMap.....	52
Figure III.6 : Localisation des 21 transects suivis pour l'étude de l'évolution du trait de côte entre 1993 et 201.....	52
Figure.III.7 : bilans sédimentaires (surface) du littoral de Boumerdès pour la période (1993-2015).....	57
Figure IV.1 : Zonation hydrodynamique du littoral.....	62
Figure IV.2 : Choix des directions défavorable au site d'étude.....	65
Figure IV.3 : Insertion de fichier " Input".....	67
Figure IV.4 : Itération et conception du fichier "Output".....	67
Figure IV.5 : le choix des deux paramètres (Hs, Dir) à partir de fichier " Output" sous l'Excel.....	68
Figure IV .6 : Manipulation sous Surfer 11.....	68
Figure VI.7 : Résultats de la réfraction pour le 45N° et T=6s.....	69
Figure IV.8 : Résultats de la réfraction pour le 45N° et T=8s.....	69
Figure IV.9 : Résultats de la réfraction pour le 45N° et T=10s.....	70
Figure IV.10 : Résultats de la réfraction pour le 360N° et T=6s.....	70

Liste des figures

Figure IV.11 : Résultats de la réfraction pour le 360N° et T=8s.....	71
Figure IV.12 : Résultats de la réfraction pour le 360N° et T=10s.....	71
Figure IV.13 : Résultats de la réfraction pour le 315N° et T=6s.....	72
Figure IV.14 : Résultats de la réfraction pour le 315N° et T=8s.....	72
Figure IV.15 : Résultats de la réfraction pour le 315N° et T=10s.....	73
Figure IV.16 : Carte bathymétrique de la plage de Boumerdès.....	77
Figure IV.17 : Carte bathymétrique et localisation des profils transversaux.....	78
Figure IV.18 : Profil bathymétrique n°1.....	78
Figure IV.19 : Profil bathymétrique n°2.....	78
Figure IV.20 : Profil bathymétrique n°3.....	79
Figure IV.21 : Profil bathymétrique n°4.....	79
Figure V.1 : Schéma probable de la dynamique sédimentaire de notre zone d'étude.....	82
Figure V.2 : Les trois modes du transport sédimentaire.....	83
Figure V.3 : Schéma des transports par jet de rive et par courant littoral.....	86
Figure V.4 : les données d'entrées dans le modèle GSTA sous Excel.....	98
Figure V.5 : conception du fichier "Output".....	98
Figure V.6 : Le fichier output réalisé par le modèle GSTA.....	99
Figure V.7 : Modélisation du transport sédimentaire par le modèle GSTA.....	99
Figure VI.1 : Schématisation de l'action des Brise-lames.....	103
Figure.VI.2 : Hauteur maximale de déferlement en fonction de la profondeur en pied de l'ouvrage.....	105
Figure VI.3 : Schéma du brise-lame immergé proposé pour la plage de Boumerdès.....	109
Figure VI.4 : Installation d'une série de trois brise-lames et un apport artificiel au niveau de la zone d'étude.....	112
Figure VI.5 : Schéma d'un épi proposé pour la plage de Boumerdès.....	115
Figure VI.6 : Installation des déférents ouvrages de protection au niveau de la zone d'étude.....	116
Figure VI.7 : a) bathymétrie de la zone protégée, b) taux du transit sédimentaire par jour....	120
Figure VI.8 : Installation une série de trois épis en Géo-containers au niveau de la zone d'étude.....	120

LISTE DES TABLEAUX

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Analyse des régimes de vent.....	38
Tableau II. 2 : Fréquences mensuelles de la houle au large par direction.....	39
Tableau II.3 : Fréquences d'apparition des différents états de la mer au large par direction.....	41
Tableau II.4 : Les statistiques des houles du large.....	42
Tableau II.5 : Caractéristiques de la houle à la côte.....	42
Tableau III.1 : Bilan des taux de surface d'érosion et d'accumulation du trait de côte de Boumerdès entre 1993 et 2015.....	51
Tableau.III.2 : Taux de recul et avancé du trait de cote du littoral de Boumerdès (m/an) entre 1993 et 2003.....	53
Tableau IV.1 : Les moyennes des résultats obtenus par direction et par période de la houle vingtennale à -10.00m.....	66
Tableau V.1 : Ramette à effectuer une classification en fonction des paramètres R^* et τ^*	84
Tableau V.2: Transit littoral en fonction de θ_{br} , H_{br} et selon Kamphuis.....	88
Tableau V.3 : Transit littoral total selon la formule de Kamphuis (1991).....	89
Tableau V.4 : Transit littoral selon la formule de CERC (1971).....	92
Tableau V.5 : Transit littoral en fonction de θ_{br} , H_{br} et selon CERC (1971).....	92
Tableau V.6 : Transit littoral selon Bijker.....	93
Tableau V.7 : Transit littoral selon la formule de Bijker.....	93
Tableau V.8 : Comparaison des volumes obtenus d'après les trois formules.....	94
Tableau V.9 : Synthèse non exhaustive des applications de la méthode de calcul des tendances de transport sédimentaire. (Mezouar, 2009).....	95
Tableau V.10 : Relations entre les paramètres granulométriques (en unité F) de deux stations A et B, pour un transport sédimentaire de A vers B, de type FB- et CB+....	96
Tableau VI.1: Résultats de prédimensionnement du brise-lames immergés.....	109
Tableau VI.2 : Carrières et sablières à prospector pour la protection de la plage de Boumerdès.....	112
Tableau VI.3 : Résultats de prédimensionnement d'un épi en arc.....	115

INTRODUCTION
GENERALE

Introduction générale

Le domaine littoral forme une interface complexe entre continent et océan. Il constitue une frontière particulière qui reste encore mal connue à l'heure actuelle. De nos jours, la mondialisation des échanges et l'expansion touristique font des océans et des zones littorales un espace géostratégique de première importance.

En effet, environ 70 % de la population mondiale vit à moins de 60 km des côtes et 80 % du linéaire côtier mondial est en cours d'érosion (Pilkey and Hume, 2001). Cette tendance, causée en partie par la transgression holocène débutée il y a environ quinze mille ans, est accélérée ces dernières décennies par l'impact des activités humaines : directement, via les aménagements et les extractions de sédiments ; et indirectement, via l'accroissement de la température mondiale induite par l'émission des gaz à effet de serre (Pethick, 2001).

Les littoraux sableux, qui représentent environ 34 % (Hardisty, 1994) des côtes mondiales, soit 170000 km, sont au centre de cette étude. Résultant d'une accumulation de grains provenant de l'érosion des reliefs continentaux, les côtes sableuses constituent des zones complexes et très dynamiques. La tendance érosive naturelle de ces environnements est accélérée par les activités anthropiques. Tout d'abord, les modifications (barrages, stabilisation des berges) de la dynamique naturelle des sédiments fluviaux, entravent la principale source d'alimentation des côtes. De plus, l'équilibre naturel des plages est perturbé par la construction d'ouvrages côtiers (port, digues, épis) et par l'extraction de sédiments marins (dragages, extraction de matériaux pour les constructions).

Le linéaire côtier du littoral de Boumerdès s'étend sur une dizaine de km, aujourd'hui fortement investi, cet espace devient un territoire à risque, subissant une dégradation côtière très intense. Le danger de voir ses plages perdre leur biodiversité et disparaître est très réel et inquiétant.

L'une des raisons qui nous a motivés à choisir comme sujet de mémoire la région de Boumerdès est le recul spectaculaire du trait de côte, qui a considérablement régressé. A travers ce travail, nous allons dresser un bilan général sur le fonctionnement et l'évolution morphodynamique de la côte de Boumerdès et calculer les taux nets d'évolution du trait de côte sur une période de 22 ans. Nous aborderons également les mécanismes d'érosion et de transfert de sédiment.

Pour atteindre ces objectifs, nous adopterons une démarche simplifiée et concrète. Elle se résume en ces six Chapitres :

Introduction générale

Dans le premier chapitre, nous avons abordé les généralités sur l'hydrodynamique et les processus d'érosions côtière ;

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des différentes caractéristiques de notre zone d'étude à savoir : sa topographie, sa géologie, sa géomorphologie et son environnement bioclimatique ;

Le troisième chapitre est réservé à l'étude de la variation de la ligne de côte depuis 1993 jusqu'à l'année 2015 (une période de 22 ans) ;

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude bathymétrique et hydrodynamique de notre site d'étude, ainsi la modélisation numérique de la réfraction des houles par le modèle SWAN ;

Le cinquième chapitre porte sur l'étude de transport sédimentaire et la modélisation de transit littoral par le modèle GSTA ;

Le sixième chapitre est réservé pour la proposition des techniques de lutte contre le phénomène d'érosion ;

Enfin, on va clôturer notre travail par une conclusion, dans la quelle on a résumé les différents chapitres.

CHAPITRE I :
GENERALITES

1. L'hydrodynamique côtière

1.1. Concepts généraux de morphodynamique

Les environnements côtiers sont des milieux dynamiques contrôlés par un large spectre spatio-temporel de forçages :

- la tectonique, responsable de la dynamique des bassins, contrôle l'évolution du littoral à l'échelle géologique (10⁶ ans),
- l'eustasie, évolution d'ensemble du niveau marin, contrôle l'évolution du littoral à l'échelle « pluriséculaire » (10⁴ ans),
- l'hydrodynamique, caractérisée par les processus côtiers (vagues, marées, courants) fonction de la climatologie locale (vents dominants, fréquence des tempêtes), contrôle l'évolution du littoral à l'échelle du « temps historique ».

1.2. Echelle spatiotemporelle de l'évolution morphologique des systèmes côtiers

Les littoraux sont des environnements particulièrement dynamiques soumis à de nombreux forçages d'origine tectonique, eustatique ou encore hydrodynamique agissant à des échelles de temps différentes. Ainsi, à l'échelle des temps géologiques, l'évolution du littoral est principalement contrôlée par des facteurs tectoniques et eustatiques. A l'échelle des temps historiques, les environnements côtiers subissent l'influence de la climatologie locale (fréquence des tempêtes, vents dominants) et des processus côtiers de haute fréquence (marée, courants, vagues et turbulence). L'étude de l'évolution morphodynamique des littoraux consiste à relier leur développement morphologique et les forçages aux différentes échelles de temps (Wright & Thom, 1977).

En fonction de l'échelle de temps à laquelle il est étudié, le comportement morphodynamique d'un système côtier peut être très variable. A chaque échelle de temps est associée une échelle spatiale fonction de l'amplitude volumique des changements morphologiques mis en jeu. Dans le cas d'un système côtier, l'existence d'une relation linéaire entre l'amplitude des évolutions spatiales du système et l'échelle temporelle associée peut être supposée (De Vriend, 1991). Il découle de cette relation une hiérarchisation spatio-temporelle (Kroon, 1994) des processus dynamiques qui contrôlent l'évolution de la zone côtière (Figure I.1).

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

- **phénomènes à micro-échelle et instantanés** : tels que l'évolution des rides sédimentaires au passage d'une vague ou la construction de figures sédimentaires par les courants ;
- **phénomènes à méso-échelle et moyen terme** : tels que l'évolution des barres littorales qui répondent à des processus de type événementiel (tempête) ou périodiques (cycle tidal et cycle météorologique saisonnier) ;
- **phénomènes à macro-échelle, annuel à pluriannuel** : tels que l'évolution du trait de côte ou d'une embouchure incluant les variations environnementales long terme et l'action anthropique.

A chaque échelle de temps est associée une échelle spatiale fonction de l'amplitude des changements morphologiques considérés. En supposant que les échelles de temps et d'espace sont liées par des relations linéaires croissantes (De Vriend, 1991), on peut conceptualiser les systèmes côtiers et leurs évolutions comme un emboîtement (Figure I-1) de compartiments spatio-temporels (Kroon, 1994).

1.3. Processus morphodynamiques côtiers

A l'échelle des processus, le comportement d'un système côtier résulte des mouvements à l'interface eau/sédiments. Schématiquement, les conditions hydrodynamiques (vagues, courant, marée) induisent un transport sédimentaire responsable de l'évolution morphologique de la plage (**Figure I.2**). Cependant, les conditions hydrodynamiques locales sont fonction des forçages au large mais sont également influencées par la topographie locale. Ces interactions non linéaires rétroactives (**Phillips, 1992 ; Cowell & Thom, 1994**) constituent une des propriétés principales des évolutions morphodynamiques des systèmes côtiers.

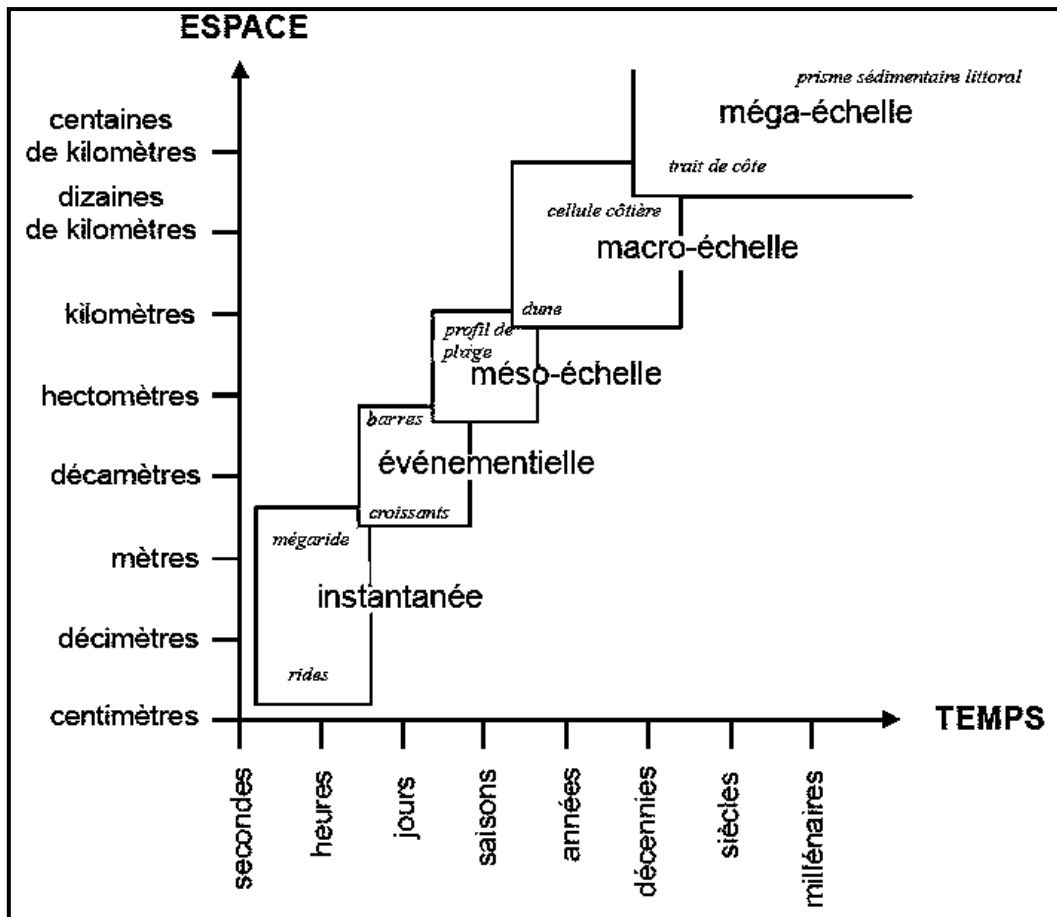


Figure I.1 : Relation spatio-temporelle des systèmes morphodynamique côtier (Stepanian., 2002, in Brière, C. ; 2003)

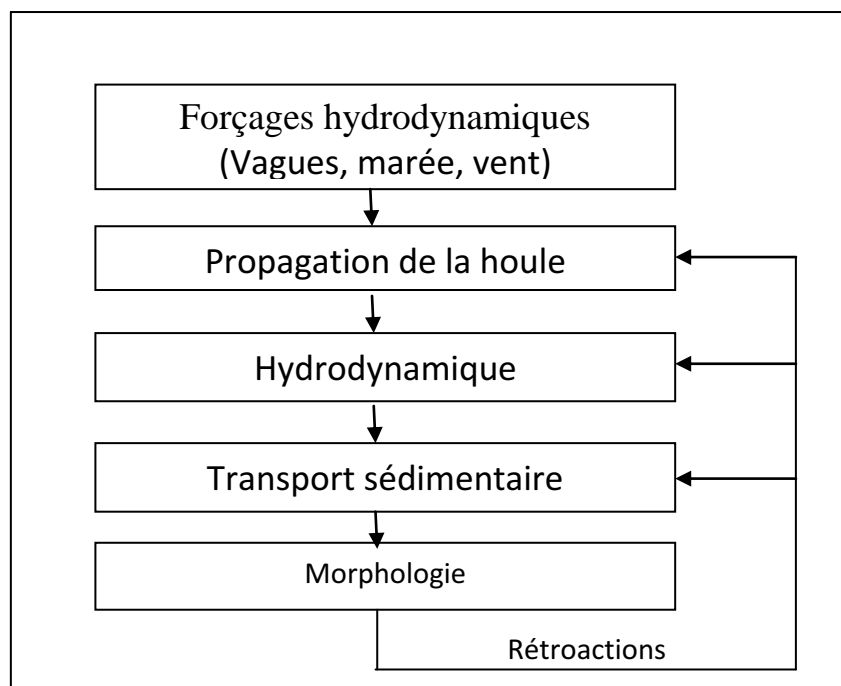


Figure I.2 : Système morphodynamique côtier (De Vriend et al., 1993).

2. Processus d'érosion de la plage

2.1. Définition générale des plages

Les plages sont des accumulations littorales de sédiments qui vont des sables fins (de 0.063 à 0.2 millimètre) aux blocs (supérieures à 20 centimètres), les accumulations de galets étant parfois appelées grèves (Guilcher, 1954). Ainsi, il se forme une plage dès lors que le volume de sédiments disponibles est supérieur au volume transporté par les vagues et les courants littoraux. Il existe de nombreux types de plages, auxquels sont parfois associées des dunes, résultat du transport éolien des sables depuis l'estran vers l'intérieur des terres.

2.2. Hydrodynamique des plages

Les zones littorales sont des environnements dynamiques et complexes où se produisent de nombreuses interactions entre les agents responsables des différentes circulations hydrodynamiques. La majorité de ces agents sont des phénomènes oscillatoires qui se manifestent à différentes échelles spatio-temporelles : les ondes de gravité ou vagues (s), les ondes infragravitaires ou ondes longues ($204 << T << 30030 << T_s$) et les ondes de marée (h). Le vent, à l'origine de la génération des ondes de gravité, est également responsable de circulations hydrodynamiques.

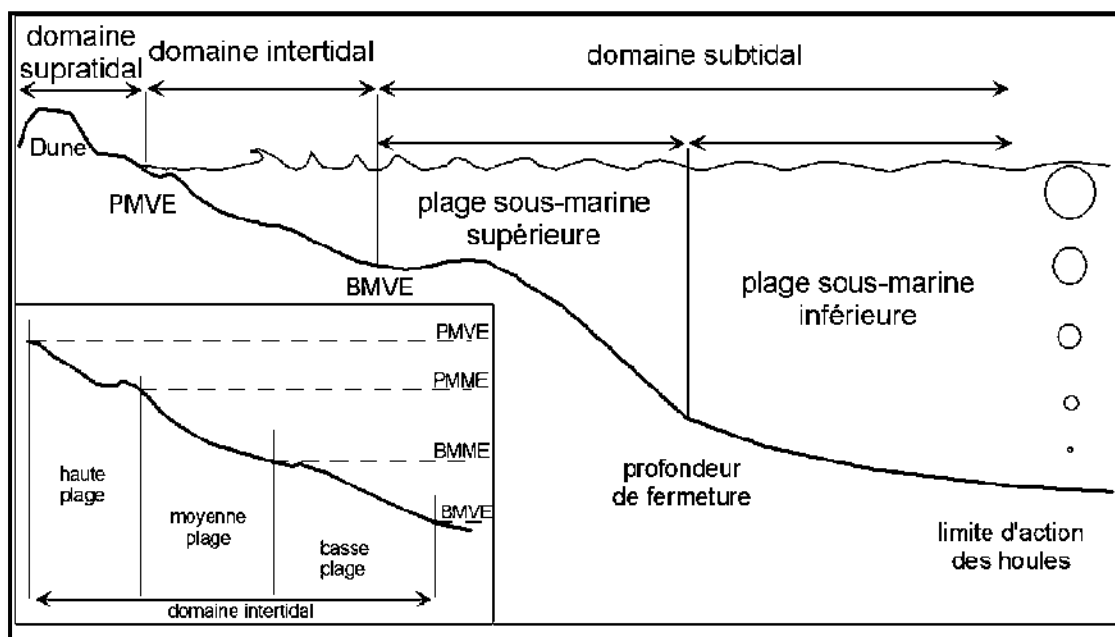


Figure I.3 : Caractéristiques hydrodynamiques en milieu littoral (Berni, 2011).

2.3. Les différents types des plages en fonction de leur morphologie

Les caractéristiques morphologiques des plages dépendent de l'exposition de ces dernières aux houles et des caractéristiques morphologique de l'arrière-pays. Ainsi, distingue-t-on des plages bloquées, ou adossées, et des plages à pointes libres.

2.3.1. Plages bloquées, ou adossées

Parmi ces formes d'accumulation, on trouve les plages dites rectilignes (même si elles peuvent être légèrement arquées). Ces accumulations sont ouvertes à la houle et relient parfois deux pointements rocheux isolant des lagunes. En position d'abri, ces accumulations dites de fond de baie peuvent prendre une forme en arc. Ces plages sont induites par la configuration de l'arrière-cote et par la réfraction divergente de la houle .il arrive parfois que la dérive littorale se fasse alternativement(ou simultanément) dans deux sens convergents formant un saillant triangulaire.

2.3.2. Plages à pointe(s) libre(s)

Le deuxième grand type de plage concerne celles dont une extrémité, une partie ou la totalité se détache du rivage, comme par exemple à l'abri d'un obstacle (queue de comète).il s'agit de formes libres qui s'étendent dans le sens de la dérive littorale dominante et doivent leur existence à une forte alimentation en sédiment .Ainsi, les matériaux venant de la partie amont de ces formes libres alimentent l'aval. Pour décrire ce phénomène, certains auteurs parlent de « cannibalisme ».Par conséquent période de crise sédimentaire, cette dynamique peut aboutir à la rupture ou à la disparition de la partie amont de la forme libre, à savoir sa racine .Parmi ces formes, se rangent les flèches accrochées au rivage par une seule extrémité.

2.4. Classification morphodynamique des plages

2.4.1. Les plages dissipatives

Les plages dissipatives sont caractérisées par leur faible pente transversale et par la présence, sur l'avant –plage, de barres et de sillons peu développés qui favorisent les déferlements multiples. Les vagues se brisent assez loin du rivage, parfois à plusieurs centaines de mètres, et peuvent se reformer plusieurs fois, avec des dimensions moindres, pour se briser à nouveau, d'où une dissipation progressive de la houle incidente et le qualitatif de dissipatif donné à ce type de plage .Le bas de plage

présente une pente généralement inférieure à 1° , et la zone du va-et-vient de la vague qui se brise sur la plage, ou zone du swash, est large de plusieurs dizaines de mètres. Les plages dissipatives se rencontrent sur des cotes où les houles peuvent être hautes et de période plutôt courte.



Figure I.4 : Le profil d'une plage dissipative (*Carlos Ley, 2012*)

2.4.2. Les plages réfléchissantes

Les plages réfléchissantes sont étroites, leur pente est forte, supérieure à 3° , et elles sont constituées de sables grossiers et de galets. Les houles sont généralement de faible hauteur et de période plutôt longue. Il n'existe pas de système de barres et de bâches sur l'avant-plage dont la profondeur est suffisante pour que les vagues arrivent à proximité de l'estran avant de déferler. Une partie de l'énergie est alors réfléchi vers la mer, d'où le qualificatif de réfléchissant donné à ce type de plage. La zone du swash est étroite, quelques mètres seulement, et elle présente souvent une berme élevée à laquelle sont associés des croissants de plage. Il s'agit de formes d'accumulation, liées aux mouvements de va-et-vient liés au jet de rive et à la nappe de retrait, d'aspect semi-circulaire ou triangulaire, ouvertes vers la mer, se terminant par des pointes effilées et jointives.

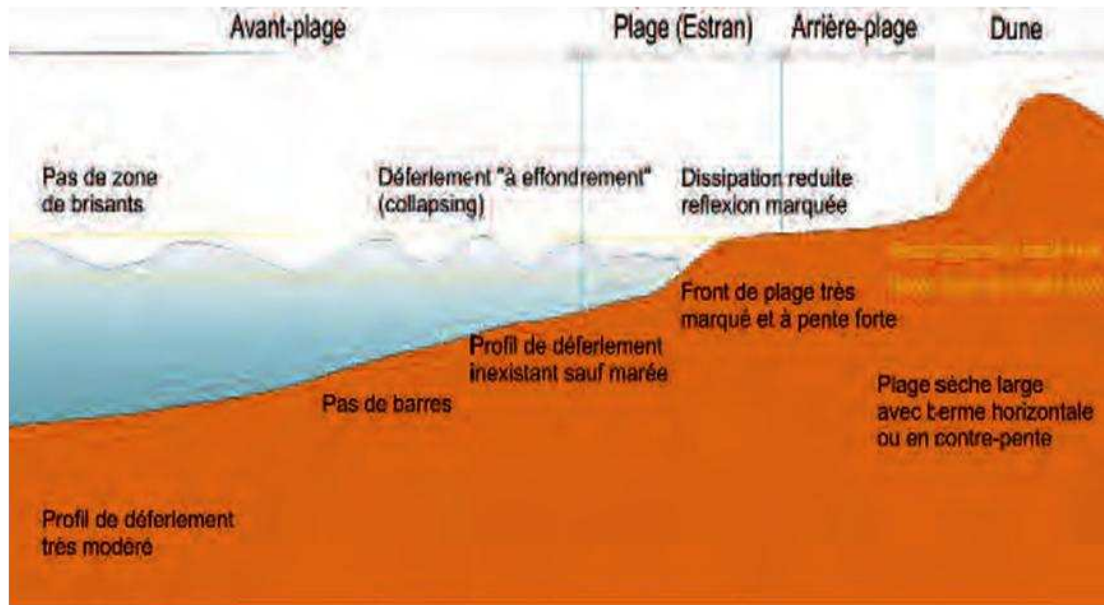


Figure I.5 : Le profil d'une plage réfléchissante (*Carlos Ley, 2012.*)

2.4.3. Les plages intermédiaires

Entre ces deux types opposés, le dissipatif et le réfléchissant, il existe bien sur des plages dites intermédiaires. Leurs pentes sont comprises entre 1° et 3° , elles présentent souvent des barres et des sillons dans la zone intertidale, ainsi que des systèmes complexes de circulation hydrodynamique (chenaux de vidange, rides, zone de débordement, bermes, etc....).

2.5. Morphologie des plages

Les plages présentent généralement un profil transversal plus ou moins concave. Leur pente varie en fonction du calibre des sédiments qui les constituent et des caractéristiques des vagues qui y déferlent. Elle est forte quand les sédiments sont grossiers. En effet, le jet de rive apporte dans ce cas davantage de matériaux que la nappe de retrait n'en emporte car celle-ci est affaiblie par l'infiltration de l'eau plus importante sur un estran de galets que sur un estran de sable fin. L'équilibre est établi lorsque le profil est suffisamment raide pour que les effets du jet de rive, freiné par la pente, et ceux de la nappe de retrait, renforcée par elle, s'annulent. Les plages abritées, frappées par des vagues courtes et peu cambrées, sont plus pentues que celles exposées aux larges et atteintes par des houles longues.

2.6. Budget sédimentaire d'une plage

Le budget sédimentaire d'une plage correspond à la somme algébrique du volume de sédiments qui lui arrivent et du volume de sédiments qui en partent pendant une période déterminée. Si cette somme est égale à zéro, la plage est stable. Si elle est positive, elle engraisse et élargit. Si elle est négative, elle démaigrit et se rétrécit. Dans ce cas, si le déficit se poursuit, la plage peut finir par disparaître.

On calcule le budget sédimentaire d'une plage par des levés de profils topographiques perpendiculaires au rivage depuis l'avant-dune jusqu'à l'avant-plage, à intervalles réguliers d'espaces, par exemple tous les cent mètres, et de temps, au minimum deux fois par an, à la fin de l'hiver et à la fin de l'été. Ils doivent être répétés pendant plusieurs années, au moins une décennie, pour que le résultat obtenu soit significatif.

CHAPITRE II :
PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1. Introduction

Boumerdès est l'une des Wilaya côtières de l'Algérie avec 100 Km de profil littoral, elle est subdivisée en trente-deux(32) communes dont dix(10) côtières et possède un linéaire côtier très sableux avec quelques promontoires comme le Rocher Noir.

Cette nouvelle vocation qu'a connue la zone lui a valu de très grandes mutations. La ville est rapidement urbanisée au détriment des espaces verts et des plages. Les Autorités ont procédé au déboisement des lieux afin de créer de l'espace et à l'extraction abusive du sable nécessaire à la construction.

La situation actuelle nous informe que 80% des plages sont en voie de démaigrissement, et le futur est à craindre. Alors une collecte des données sur cette zone est très nécessaire pour connaître son état d'évolution.

2. Cadre géographique

La ville de Boumerdès occupe la partie centrale de la baie de Zemmouri à environ 50 km à l'est d'Alger.

Notre site d'étude s'étend sur une longueur d'environ 800m, limitée par l'oued Corso à l'ouest, le plateau de Boumerdès au sud et la mer méditerranée au nord.

Notre plage est incluse dans le rectangle situé entre les longitudes 36°46'01.32"N et 3°28'25.47"E.



Figure II.1 : Situation géographique de notre site d'étude (Google earth, 2015).

3. Contexte géomorphologique et géologique

3.1. Cadre géologique

La wilaya de Boumerdès 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.
- Des terrains métamorphiques (gneiss et micaschistes) formant des points rocheux (Rocher Noir et Rocher Pourri).

3.2. Cadre géomorphologique

Le relief de la wilaya de Boumerdès se divise en plusieurs unités physiques : les plaines et les vallées au nord, les collines et plateaux dans la partie intermédiaire et les montagnes au Sud. On distingue deux unités morphologiques caractérisant la zone côtière de Boumerdes:

-**La falaise** : Elle s'étend sur environ 250 m, avec une hauteur de 25 à 32 m du sud au nord. Elle présente un étagement du relief, le contact du plateau avec la zone basses

effectue par l'intermédiaire d'un talus à pente rectiligne par endroit et convexe dans d'autre, et des dénivellations ne dépassant pas les 8 à 15m environ.

-La plage : la largeur de la plage peut atteindre 25 à 35 mètres en moyenne en période hivernal.

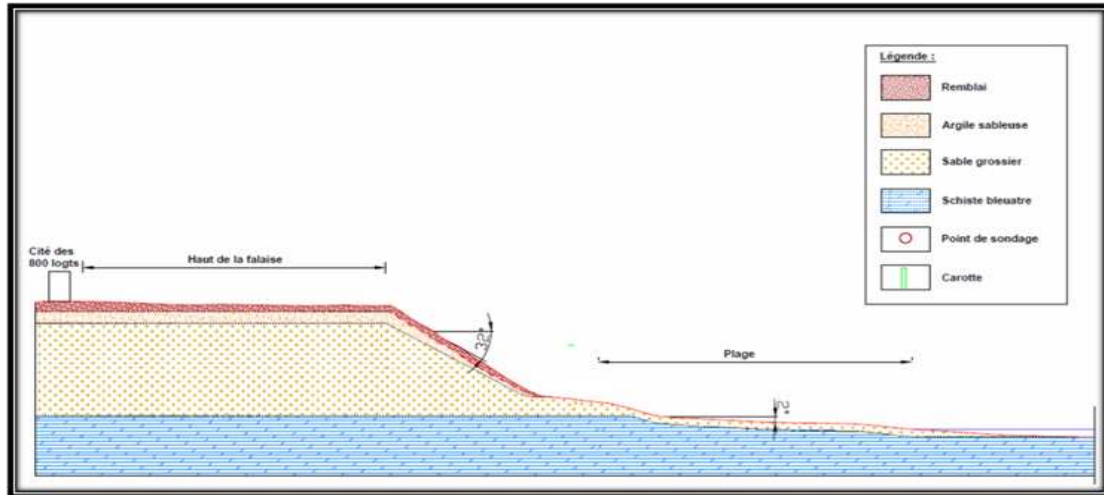


Figure II.2 : Coupe lithologique de la falaise de 800 logements (LEM, 2014).

4. Données climatologiques et hydrologiques

4.1. 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 (pluies, températures....) s'est effectuée en fonction de la disponibilité des informations au niveau de la station de Dar El Baida (ONM), la période étudiée s'étale sur 10 ans (1993-2003).

a. Les 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 103.20 mm au mois de décembre 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.

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

- Une saison humide, avec 542.16mm qui s'étale du mois de septembre au mois de mai, avec une moyenne mensuelle enregistrée de 30.45mm, cette moyenne s'élève progressivement jusqu'au mois de décembre où elle atteint le maximum de 103.20mm. Elle diminue par la suite graduellement jusqu'au mois de mai, avec une moyenne mensuelle de 33.34mm.
- Une saison sèche, avec 22.61mm, relativement plus courte que la précédente, qui s'étale du mois de juin avec une moyenne mensuelle de 7.12mm, au mois d'août avec une moyenne mensuelle de 13.58mm.
- Au mois de juillet, les précipitations se font très rares avec une moyenne de 1.19mm.

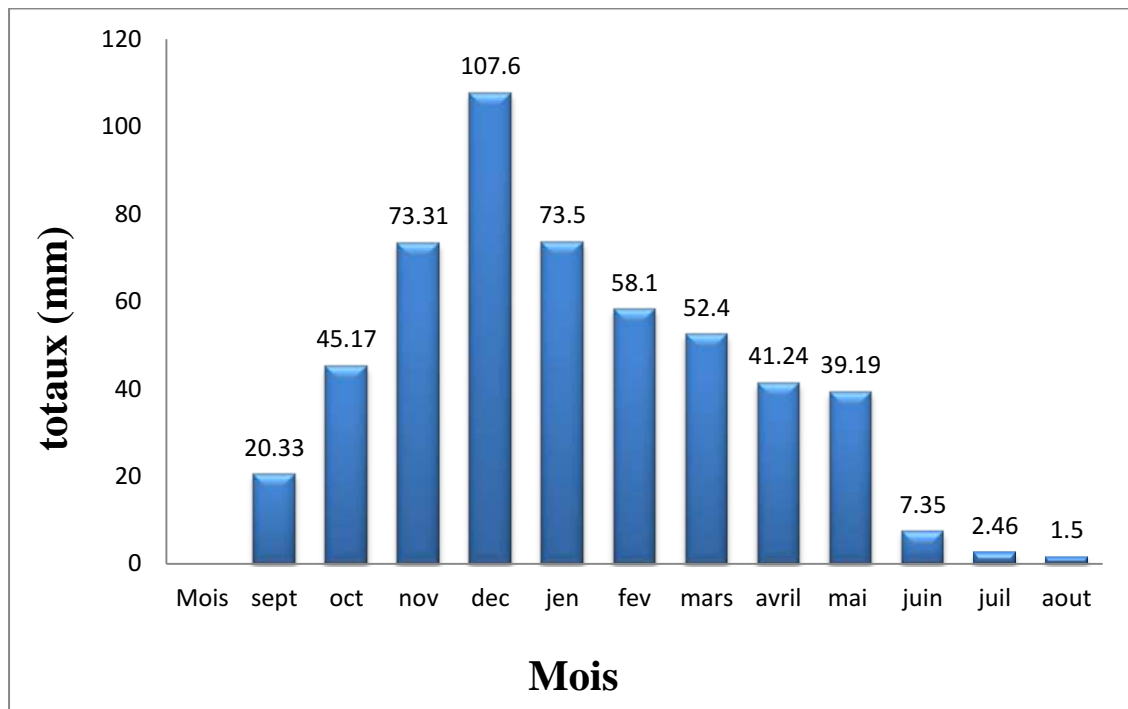


Figure II.3 : Moyennes mensuelles des précipitations de 1985 à 2008 dans la région de Boumerdès (A.N.R.H, 2014).

b. Les 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 11.19°C et 26.22°C. En été, la température moyenne est de 30°C. Le sirocco souffle en moyenne 25J/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.

4.2. Données hydrologiques

La zone littorale de Boumerdès 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 : a un bassin versant d'une superficie de 95km². 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 3615km². Les apports solides inter- annuel entre 1954-1978 ont été évalués à 6332.444millions de tonnes.

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

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

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

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 qui est sous-alimenté.

5. Contexte hydrodynamique

5.1. Les données météorologiques (vent)

Pour une région côtière, la connaissance des régimes des vents est une extrême importance. En effet ils sont des générateurs de vagues et de courants superficiels, leur impact croit avec leur vitesse (Moulin, 1978).

Ils jouent donc un rôle considérable dans l'évolution géomorphologique des milieux littoraux, surtout les côtes basses d'accumulations des régions à climat sec (Boutiba, 1996).

Ce facteur joue un rôle considérable dans les transferts sédimentaires directement sur la partie aérienne et par les différents agents hydrodynamiques générés par celui-ci sur la partie immergée.

a. Données de Medatlas (1999-2004)

Les résultats de cette étude mettent en évidence une prédominance des vents provenant des directions Est-Nord-est et Ouest-Sud-ouest, avec des vitesses maximales qui atteignent 20 m/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. (LEM).

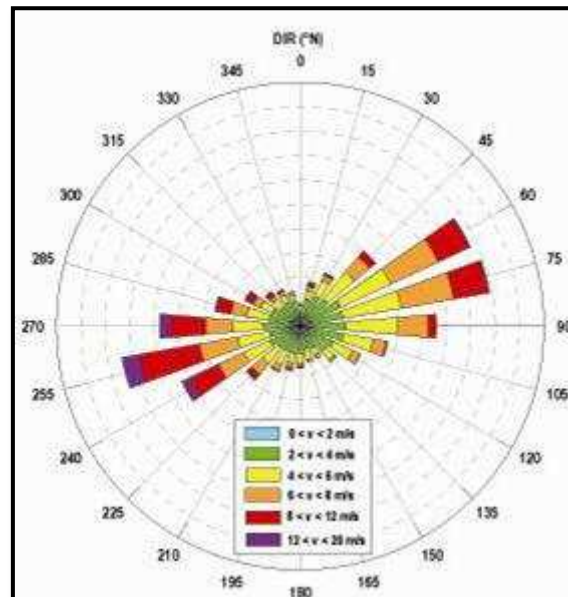


Figure II.4: Rose des vents dans la région de Boumerdès (Medatlas, région centre 31N, 1999- 2004).

b. Vent et sédimentologie

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

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

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

c. Vent et courant

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

Ces courants agissant :

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

L'analyse des régimes de vent a été évaluée d'après des mesures effectuées au niveau de l'oued ISSER (1973-1975) par l'U S Naval weather service command.

Tableau II.1 : analyse des régimes de vent.

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

5.2. Les données océanographiques

5.2.1. La houle

La houle est un agent fondamental des transports sédimentaires. En effet, d'une part, elle peut provoquer une remise en suspension et un déplacement des

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

matériaux déposés sur les fonds et, d'autre part, elle engendre, lorsqu'elle est oblique au rivage, un courant littoral qui transporte des sédiments (Mezouar, 2009). Sur l'estran. La connaissance des caractéristiques de la houle au large : direction, amplitude, période, énergie.

Les données de la houle au large sont reprises d'un document intitulé « Summary of Synoptic Meteorological Observation » (S.S.M.O). Ces données s'étalent sur une période de 8ans de 1963 à 1970.

Une analyse statistique de ces données de base permet de définir les secteurs de la houle prédominants et leurs amplitudes respectives dans la région de Boumerdes. Des roses de houles sont établies saisonnièrement et annuellement. (Figure ci-dessous).

5.2.1.1. Houle au large

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

a. Fréquences mensuelles de la houle au large par direction

Tableau II. 2 : Fréquences mensuelles de la houle au large par direction :

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

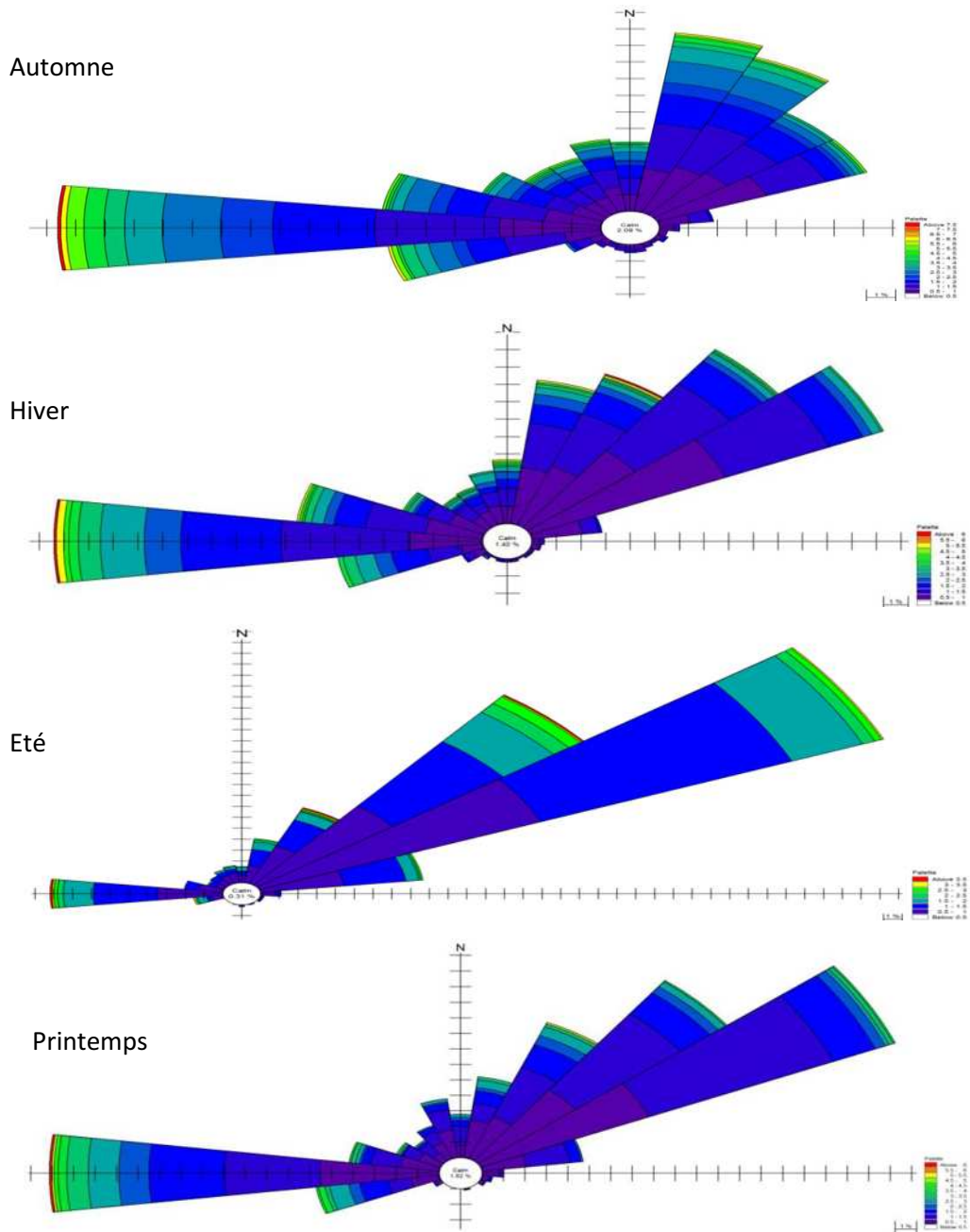


Figure II.5: Roses saisonnières des directions des houles (Source ; S.S.M.O).

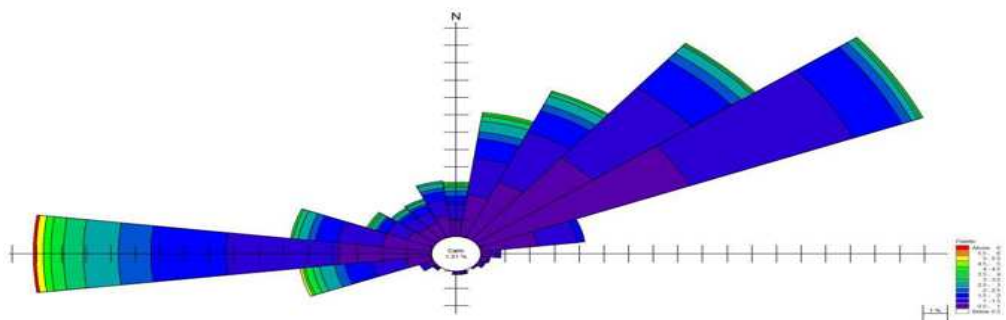


Figure II.6: Rose annuelle des directions des houles (Source ; S.S.M.O).

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

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

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

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

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

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

b. Relation amplitude-direction de la houle

Tableau II.3 : Fréquences d'apparition des différents états de la mer au large par direction

Direction de la houle /Etat de la mer	W	NW	N	NE	E
Calme	2.90	1.10	2.00	2.70	4.00
0	6.20	2.00	2.90	7.00	9.30
1	10.90	2.70	2.60	7.50	9.10
2	4.30	0.60	0.70	1.20	0.90
3	0.90	0.10	0.10	0	0.10
4	0.30	0	0	0	0
Total	25.50	6.50	8.30	18.40	23.40

D'après le tableau II.3 on constate que :

- l'agitation provenant du secteur Est et Ouest est la plus fréquente ;
- l'agitation provenant des secteurs Nord et Nord Ouest est moins fréquente ;
- les fortes houles proviennent essentiellement du secteur Ouest.

C. Caractéristiques de la houle au large

Tableau II.4 : Les statistiques de la houle au large

Direction de la houle /période de retour	E	NE	N	NO	O	Toutes directions
Biennale.	4.12	4.93	4.90	6.10	7.36	7.44
Quinquennale	4.70	5.65	5.75	4.87	8.43	8.34
décennale	5.14	6.23	6.38	5.40	9.22	9.02
Vingtennale	5.59	6.79	7.02	5.94	10.02	9.70
Cinquantennale	6.17	7.53	7.87	6.65	11.08	10.60
centennale	6.62	8.08	8.5	7.18	11.88	11.27

d. Caractéristiques de la houle au voisinage de la côte

Tableau II.5: Caractéristiques de la houle à la côte.

	Temps de retour associe	360° Nord	45° Nord	315° Nord
Biennal	02	3.64m	3.57m	3.14m
Quinquennal	05	5.25m	4.11m	3.68m
Décennal	10	4.71m	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

5.2.2. Les courants

L'importance des courants n'est pas à exclure, surtout ceux induits par la houle car ils engendrent deux situations de cas, soit un engraissement, bénéfique pour le développement de notre site, soit un amaigrissement, résultat à éviter complètement. (Kelai. F, 2005).

5.2.2.1. Les courants généraux

Le courant atlantique pénétrant par le détroit de Gibraltar forme des tourbillons anticycloniques de 100km de diamètre, se déplaçant vers l'Est à une vitesse moins de 7 nœuds. A son arrivé à la côte de Boumerdes, il a une vitesse de 0.5 à 2.5 nœuds. Il crée alors des courants résiduels se dirigeant vers la côte dont la vitesse est inférieure à 0.5 nœud (Millot, 1985).

5.2.2.2. Les courants de retour

Au contact de la côte, le courant existant au lieu du déferlement engendre des courants de retour, leurs vitesses dépendent de l'énergie de la houle et de la pente de la plage. (Mezouar, 2004).

Les sables de la plage et les sédiments arrachés aux falaises sont repris par ces courants pour être déposés au large et créer de ce fait une situation d'amaigrissement. (Kelai. F, 2005).

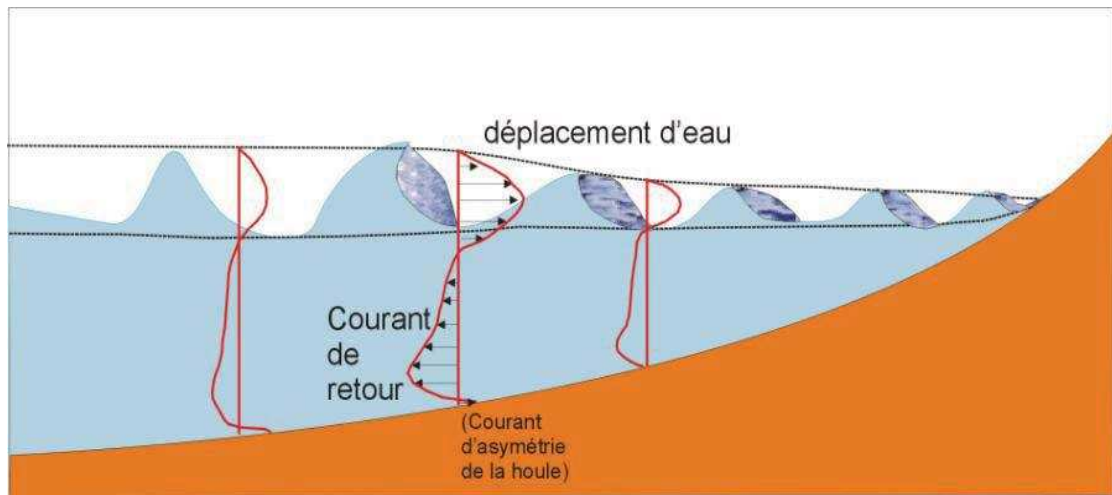


Figure II.7: Profil d'un courant de retour (Castelle, 2004).

5.2.2.3. Les courants de dérive littorale

Les courants de dérive littorale prennent naissance au niveau de la zone de déferlement où l'énergie est maximale. Ils permettent la mise en suspension des sédiments et leur transit le long de la côte.

Les vents de secteur Ouest et Nord-Ouest d'hiver et les houles induites Nord-Ouest provoquent une dérive littorale Ouest-Est avec une érosion intense de la plage Ouest de Boumerdes (Mezouar.K, 2009).

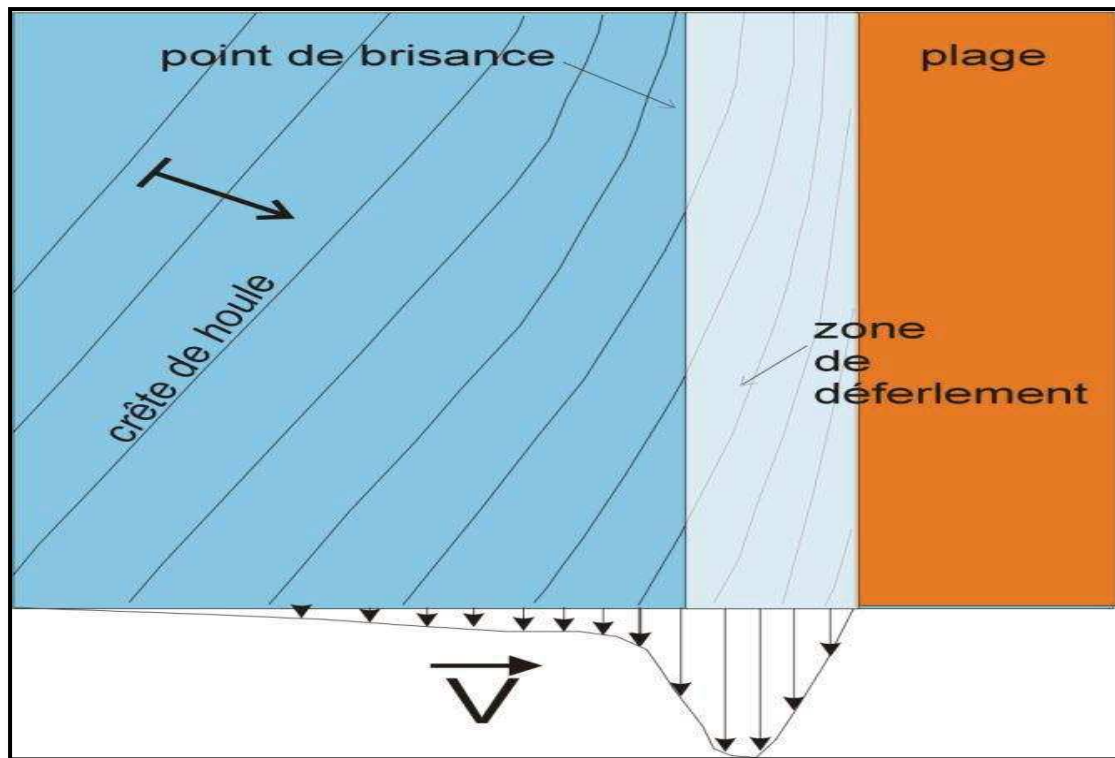


Figure II.8 : Profil d'un courant de dérive littorale (Castelle, 2004).

5.2.3. Les marées

La marée est un phénomène périodique, prévisible entraînant des variations connues du niveau de l'eau. La marée méditerranéenne sur les côtes algériennes est très faible et dépasse rarement 0.20m avec des périodes de 12h et 24h. Leurs effets sont négligeables. (Mezouar, 2004).

CHAPITRE III :
ETUDE DE LA VARIATION DU TRAIT DE COTE
DE LA PLAGE BOUMERDES ENTRE 1993 ET
2015

1. Introduction

Le premier objectif de cette partie est d'étudier l'évolution du trait de côte de la plage de Boumerdès, afin de comprendre comment le site a évolué et d'observer, analyser les variabilités morpho-sédimentaire de ce dernier, a une échelle spatiotemporelle à long terme (pluriannuelle) par un suivie topographique et bathymétrique.

Pour ce faire, nous avons utilisé l'analyse diachronique de photographies aériennes du secteur, nous permettre donc d'identifier ces tendances évolutives a l'échelle décennale, définies en termes d'avancée et de recul, et les variations de surface des unités morphologiques. Les photographies aériennes verticales sont à l'heure actuelle les documents qui restituent au mieux la physionomie d'une côte à un moment donne.

L'évolution du trait de côte résulte de la conjonction de nombreux facteurs anthropiques, naturels et particulièrement la variation du niveau de la mer, le vent, la houle, la pluviosité, les courants et l'importance des apports sédimentaires des fleuves.

La problématique d'érosion côtière ou le recul du trait de côte est devenue un enjeu socio-économique qui menace plus de la moitié des cotes à l'échelle du globe. La cote algérienne, sur toute son étendue méditerranéenne, n'est pas à l'abri de ce phénomène, en particulier le littoral de Boumerdès qui supporte une surcharge économique et urbanistique très intense.

2. Définition d'un système morphodynamique

Un système morphodynamique est constitué d'un objet géomorphologique qui réagit aux variations d'une composante dynamique par un ajustement morphologique .Cette réponse est une tentative de mise à l'équilibre de la morphologie par rapport aux nouvelles conditions de forçages. Dans le cas des systèmes littoraux, la topographie des fonds côtiers est en constant ajustement avec la dynamique du milieu fluide. Cet ajustement morphologique est le résultat d'un gradient de transport sédimentaire.

Une modification des forçages génère une modification de la dynamique des fluides, du transport sédimentaire et l'interaction de ces processus avec la morphologie initiale est à l'origine de la construction d'une nouvelle morphologie. Des phénomènes de rétractions sur la dynamique des fluides et le transport sédimentaire peuvent être soit positifs (autocontrôle, self organization), ou négatifs (autorégulation, self regulation) (Cowell & Thom, 1994).Un processus d'autocontrôle renforce la tendance d'évolution du système en augmentant le

déséquilibre, alors qu'un processus d'autorégulation inverse la tendance et amène le système vers un équilibre.

3. Les facteurs d'évolution du trait de côte

La mobilité de la côte provient des processus marins (houles, marées, courants...), climatologiques (vent, gel...) et anthropiques qui agissent sur les matériaux et déplacent les sédiments (sable, galets...). Les sédiments peuvent se déplacer soit par :

- charriage : les matériaux sont roulés ou glissent ;
- saltation : le transport s'effectue par sauts successifs ;
- suspension : les sédiments sont dispersés dans l'eau ou l'air sous l'effet de la turbulence.

- **Les courants locaux liés à la houle près de la côte** : la houle est à l'origine de courants longitudinaux (dérive littorale) et transversaux susceptibles de transporter des sédiments et de modeler le paysage littoral.

- **Les courants de marée** : ces courants sont prépondérants au large mais, à l'approche de la côte, ils sont dominés par les courants de houle.

- **Les processus d'érosion continentaux** : la mobilité du littoral résulte du rapport de force entre le type de roches (formations plus ou moins meubles) et le contexte bioclimatique qui induit des processus pouvant libérer des particules puis les mobiliser. La production de débris mobilisables est complexe et variée.

On distingue divers modes de déplacement des sédiments : les mouvements individuels (chutes de pierres, écroulements...), les mouvements de masse (glissements de terrain et éboulements) et le ruissellement.

- **Les précipitations** : dont le phénomène est renforcé sur les côtes, contribuent fortement, par écoulement ou infiltration, à faire évoluer les formes littorales. En outre, les régions littorales se caractérisent par la fréquence et la violence du vent. Au-delà de son influence sur la houle, les courants de surface ou les transports d'embruns, le vent transporte également les sables.

- **Le réchauffement climatique** : aujourd'hui, des interrogations sur l'ampleur exacte de l'élévation du niveau de la mer et sur le rythme qu'elle pourrait avoir dans les prochaines décennies demeurent. Néanmoins, tous les travaux s'accordent à dire qu'en relation avec le réchauffement actuel des températures atmosphériques, le niveau moyen de la mer s'élève.

4. Etude et analyse de l'évolution du trait de côte

4.1. Méthodes et techniques utilisées

4.1.1. Les documents utilisés

L'analyse diachronique de l'évolution du littoral de Boumerdès a été déterminée grâce à la comparaison de différentes images satellitaires obtenus à l'aide de Google Earth, qui est un logiciel SIG, et cela sur une période allant de 1993 jusqu'à 2015. Ces documents (missions aériennes et cartes) ont sélectionnés d'une manière à couvrir l'ensemble du linéaire côtier. Afin d'obtenir des résultats plus significatifs et fiable concernant l'évolution de notre site d'étude, avec un espacement de 22 ans.

Cette étude a été réalisée grâce a la superposition des photos aériennes entre 1993 et 2015.

4.1.2. Moyens et procédure

Pour étudier l'évolution du trait de côte du littoral de Boumerdès, nous avons utilisé le logiciel ArcGIS 10.

4.1.2.1. Aperçu du logiciel ArcGIS 10

ArcGIS est l'un des logiciels SIG les plus utilisés. Ce logiciel offre de nombreuses potentialités pour la manipulation, la gestion, l'analyse et l'édition des données spatiales.

Différentes couches d'informations spatiales peuvent être manipulées offrant la possibilité d'analyser une ou plusieurs couches sous le contrôle des autres. Le seule lien entre ces différentes couches est le lien spatial, c'est-à-dire, l'appartenance au même espace géographique et ayant le même système de coordonnées.

Le logiciel ArcGIS 10 comprend trois applications principales : ArcCatalog, ArcMap, et ArcToolbox.

-ArcCatalog: est un explorateur de données tabulaires et cartographiques offrant des outils de gestion et d'organisation analogues à ceux offerts par les systèmes d'exploitation comme WINDOWS ou DOS (copier, renommer, effacer, créer des icônes, etc.).

ArcCatalog présente ces informations dans une arborescence et vous permet de sélectionner un élément SIG, d'afficher ses propriétés et d'accéder à des outils permettant d'intervenir sur le ou les éléments sélectionnés.

-ArcMap : ArcMap est la principale application d'ArcGIS. Elle permet d'effectuer un large éventail de tâches SIG courantes, ainsi que des tâches spécialisées spécifiques à l'utilisateur.

Chapitre III : Etude de la variation du trait de côte de la plage de Boumerdès entre 1993 et 2015

-**ArcToolbox** : est le module dans ArcGis 10 qui permet d'accéder à toutes les fonctionnalités puissantes de traitement et d'analyse. La boîte à outils fournit un ensemble très riche de fonctions de géotraitement. Il convertit aussi les formats de données pour l'importation ou l'exportation de fichiers, ainsi que les changements de projection.

4.1.2.2. Procédure et discussion

Sous ArcCatalog, nous avons créé six (06) couches "layers" pour chaque année.

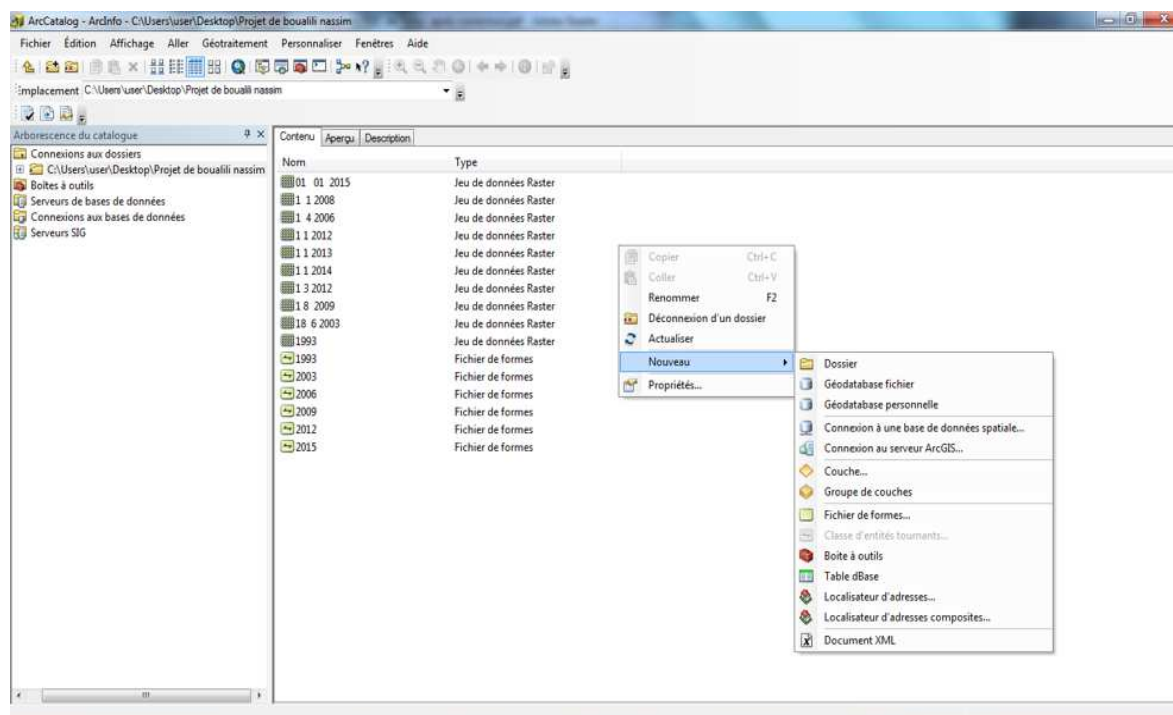


Figure III.1 : Création des couches sous ArcCatalog 10

Puis, nous les avons géoréférencées sous le système de coordonnées horizontales projetées: Nord_Sahara_1959_ UTM_Zone_31N.

A l'aide d'ArcMap, nous avons pu digitaliser les traits de côte des six cartes (1993, 2003, 2006,2009, 2102 et 2015).

Chapitre III : Etude de la variation du trait de côte de la plage de Boumerdès entre 1993 et 2015

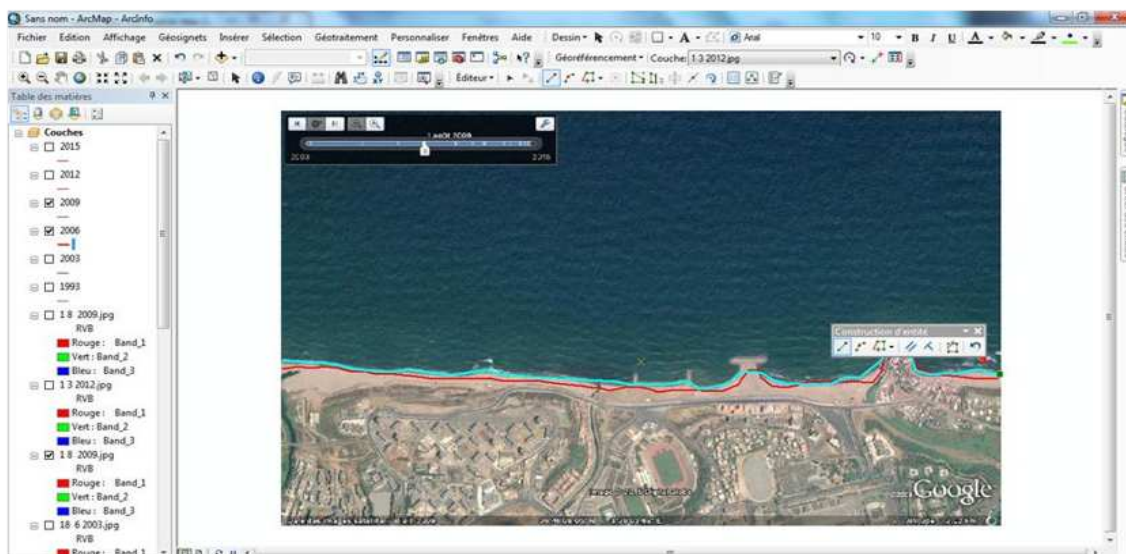


Figure III.2 : Digitalisation du trait de côte sous ArcMap 10.

Une autre couche, sous le nom "*évolution.shp*", a été créée dans le but de réunir et superposer les six traits de côte issus de la digitalisation (Fig.III.4 et annexe 1).

Afin d'obtenir les taux d'érosion et d'accrétion, nous avons rajouté des transects (au nombre de 21) établis perpendiculairement au rivage (Fig.III.3).

Une autre couche, sous le nom "*évolution.shp*", a été créée dans le but de réunir et superposer les tracés des polygones issus de la digitalisation deux à deux.

À l'aide de la règle numérique, nous avons obtenus les différentes surfaces des polygones, représentant les surfaces d'érosion et d'accumulation, issues lors de la superposition des six traits de côte (six polygones). Les résultats sont portés sur le **tableau III.1**.

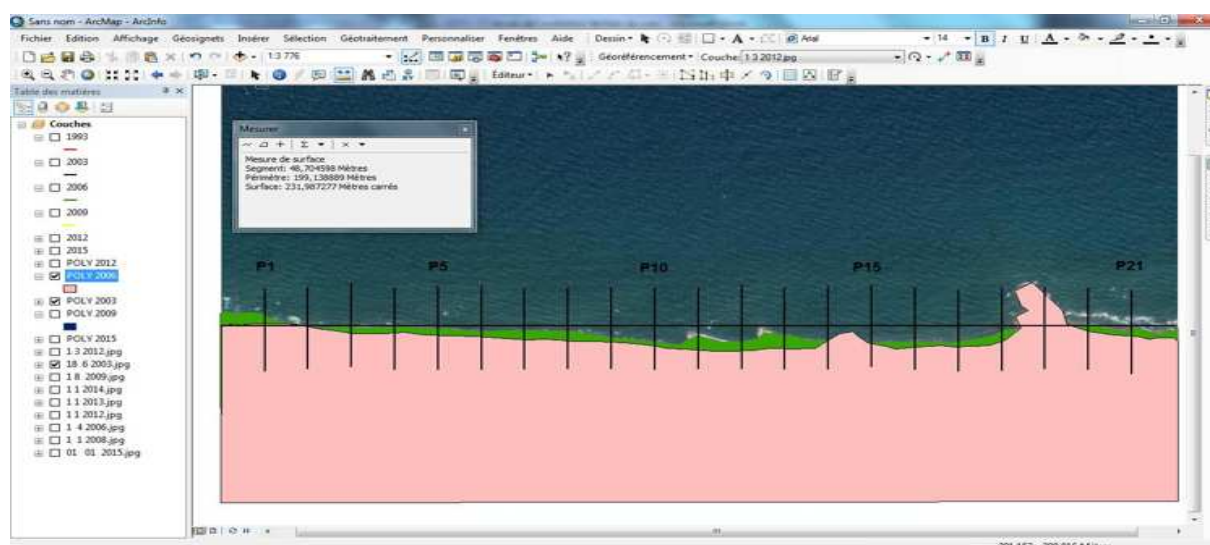


Figure III.3: Mesure de surface par la règle numérique sous ArcMap 10.

Chapitre III : Etude de la variation du trait de côte de la plage de Boumerdès entre 1993 et 2015

Tableau III.1 : Bilan des taux de surface d'érosion et d'accumulation du trait de côte de Boumerdès entre 1993 et 2015.

Périodes	Taux d'érosion (m ²)	Taux d'accumulation (m ²)	Bilan (m ²)	Taux d'érosion par an (m ² /an)
1993-2003	449866.5	19833.3	-430033.2	44986.65
2003-2006	4408.31	1616.38	-2791.93	1469.44
2006-2009	2980.46	1652.33	-1328.13	993.49
2009-2012	2910.83	1817.06	-1093.77	970.28
2012-2015	3958.6	2989.04	-969.56	1319.53
1993-2015	464124.7	27908.11	-436216.59	21096.58

D'après le tableau ci-dessus, le bilan général de l'état d'évolution des surfaces est estimé à une perte de **436216.59m²**, durant une période de **22 ans** soit **(-) 21096.58 m²/an**.

Ainsi expriment les différents taux d'érosion annuels estimés, dont le taux minimum est de (993.49 m²/an) durant une période de trois ans (2006-2009) d'une part. D'autre part le taux maximum est de (44986.5 m²/an) s'étale sur une période de dix ans (1993-2003). À partir de 1939 les taux d'érosion restent quasiment stables, tournant autour (10000 m²/an).

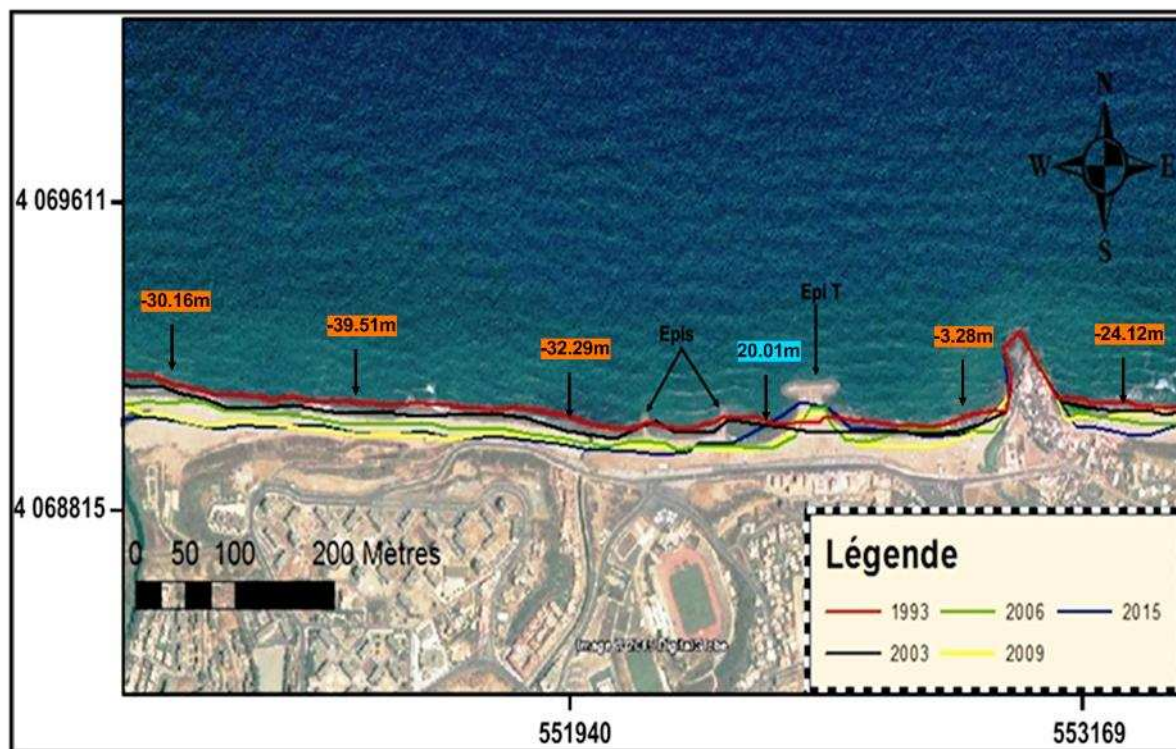


Figure III.4 : Carte de l'évolution historique du trait de côte du littoral de Boumerdès entre 1993 et 2015 (Boualili, 2015).

5. Les variations de la ligne de côte de Boumerdès entre 1993 et 2015

Les variations de la ligne de la côte de Boumerdès entre 1993 et 2015 sont analysées à partir de 21 profils établis perpendiculairement au rivage (figure III.6). Et pour bien montrer les différents points de calcul de ce recul et avancé de trait de cote, sous ArcMap on a mesuré cette distance par rapport à chaque transect au nombre de 21, cette mesure (à l'aide de la règle numérique d'ArcMap) se fait à chaque fois par la superposition de deux traits de cote avec des périodes déférentes (**figure.III.5**), Les résultats sont représentés dans le tableau **III.2**. Alors, nous distinguons cinq périodes distinctes :

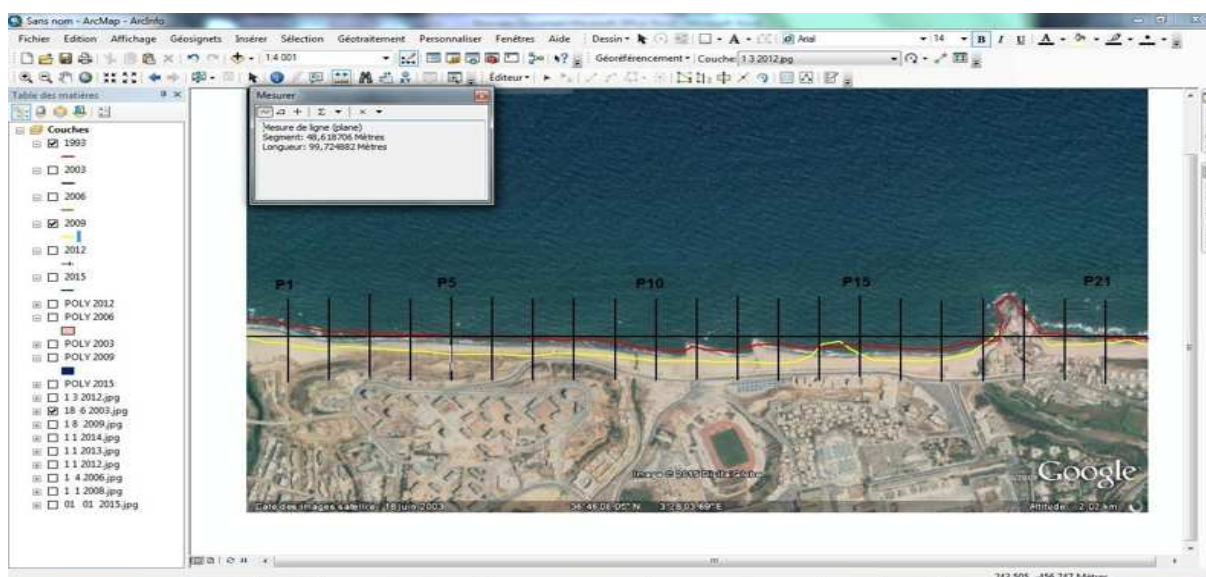


Figure.III.5 : Mesure des distances de recul et avanacé du trait de côte sous ArcMap.

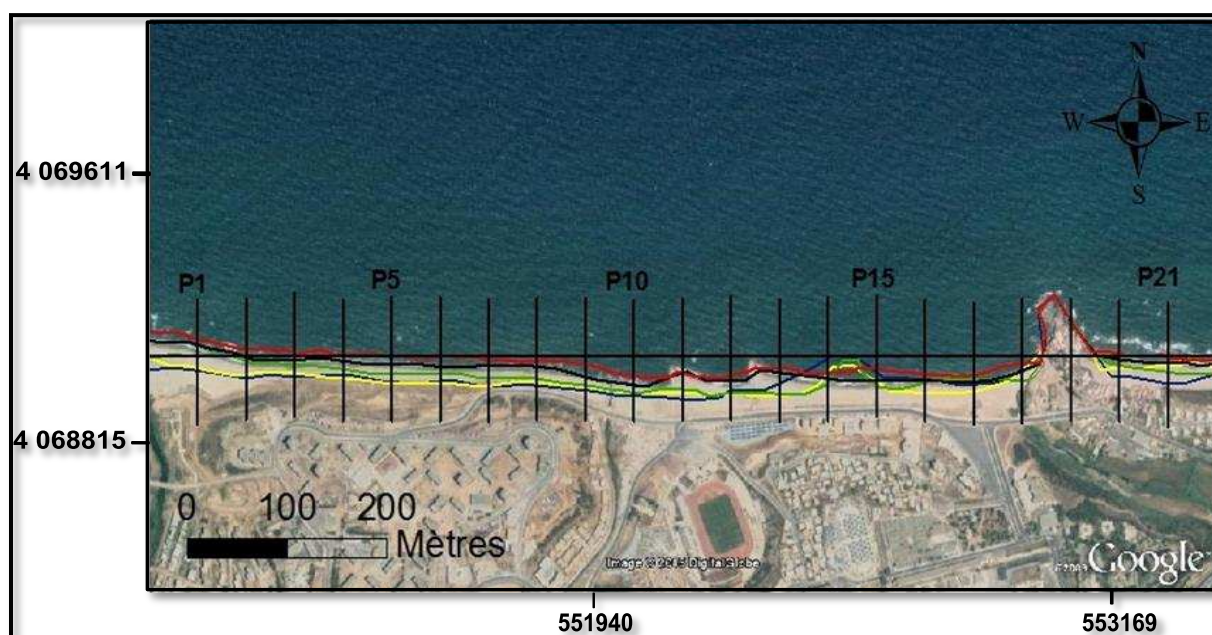


Figure III.6 : Localisation des 21 transects suivis pour l'étude de l'évolution du trait de côte entre 1993 et 2015.

Chapitre III : Etude de la variation du trait de côte de la plage de Boumerdès entre 1993 et 2015

Tableau.III.2 : Taux d'évolution du trait de côte du littoral de Boumerdès (m/an) entre 1993 et 2015.

Profils	Taux d'évolution n 1993-2003 (m)	Vitesse d'évolution n 1993-2003 (m/an)	Taux d'évolution n 2003-2006 (m)	Vitesse d'évolution n 2003-2006 (m/an)	Taux d'évolution n 2006-2009 (m)	Vitesse d'évolution n 2006-2009 (m/an)	Taux d'évolution n 2009-2012 (m)	Vitesse d'évolution n 2009-2012 (m/an)	Taux d'évolution n 2012-2015 (m)	Vitesse d'évolution n 2012-2015 (m/an)	Taux d'évolution 1993-2015 (m)	Vitesse d'évolution 1993-2015 (m/an)
p1	-5,73	-0,57	-10,1	-3,37	-11,35	-3,78	1,44	0,48	-4,42	-1,47	-30,16	-2,51
p2	-16,53	-1,65	-3,25	-1,08	-13,11	-4,37	2,55	0,85	-6,21	-2,07	-36,55	-3,05
p3	-19,73	-1,97	-6,5	-2,17	-6,12	-2,04	-2,49	-0,83	-0,78	-0,26	-35,62	-2,97
p4	-21,22	-2,12	-8,36	-2,79	-8,5	-2,83	-1,64	-0,55	5,25	1,75	-34,47	-2,87
p5	-22,86	-2,29	-9,81	-3,27	-8,37	-2,79	0,59	0,20	0,94	0,31	-39,51	-3,29
p6	-19,5	-1,95	-6,82	-2,27	-8,63	-2,88	-2,07	-0,69	4,39	1,46	-32,63	-2,72
p7	-20,23	-2,02	-11,58	-3,86	-6,54	-2,18	-1,12	-0,37	0,69	0,23	-38,78	-3,23
p8	-23,6	-2,36	-11,5	-3,83	-3,33	-1,11	1,8	0,60	-4,65	-1,55	-41,28	-3,44
p9	-29,48	-2,95	-7,6	-2,53	-1,3	-0,43	-9,97	-3,32	6,74	2,25	-12,13	-1,01
p10	-22,11	-2,21	-7,96	-2,65	0,98	0,33	-9,75	-3,25	6,55	2,18	-32,29	-2,69
p11	11,57	1,16	-14,66	-4,89	-3,83	-1,28	-7,56	-2,52	1,18	0,39	-13,3	-1,11
p12	-4,66	-0,47	-12,12	-4,04	-1,27	-0,42	2,74	0,91	1,24	0,41	-14,07	-1,17
p13	-3,34	-0,33	-20,66	-6,89	-1,56	-0,52	1,31	0,44	10,71	3,57	-13,54	-1,13
p14	-5,07	-0,51	1,53	0,51	9,83	3,28	2,42	0,81	11,3	3,77	20,01	1,67
p15	-9,11	-0,91	-3,6	-1,20	2,61	0,87	-2,44	-0,81	11,77	3,92	-0,77	-0,06
p16	-5,57	-0,56	1,06	0,35	-10,21	-3,40	2,01	0,67	10,31	3,44	-2,4	-0,20
p17	-6,74	-0,67	2,02	0,67	-10,75	-3,58	9,45	3,15	-2,81	-0,94	-8,83	-0,74
p18	-7,35	-0,74	-8,83	-2,94	11,8	3,93	1,1	0,37	0	0,00	-3,28	-0,27
p19	0,46	0,05	1,4	0,47	0	0,00	0	0,00	-0,51	-0,17	1,35	0,11
p20	-5,47	-0,55	-5,49	-1,83	-4,32	-1,44	4,35	1,45	-11,7	-3,90	-22,63	-1,89
p21	-5,41	-0,54	-8,69	-2,90	4,86	1,62	-0,5	-0,17	-14,38	-4,79	-24,12	-2,01

6. Interprétation des résultats

Pour une meilleure étude de l'évolution du trait de côte on a devisé notre site d'étude en trois parties (occidentale, centrale et orientale).

-Période de 1993 à 2003

Cette période voit l'aggravation de la situation avec une perte d'une surface de 430033.2 m², et le taux d'érosion et la vitesse de recul s'accélère pendant cette période. La partie orientale a connu un recul moins aggravé que les deux autres parties avec un retrait de -9.11m (-0.91 m/an) au niveau de P15 et de -7.35 m (-0.74m/an) au niveau de P18. La partie centrale a enregistré des vitesses de recul les plus fortes avec un retrait de -23.6m soit (-2.36 m/an) au niveau de P8 et de -29.48m soit (-2.95 m /an) au niveau de P9. La partie occidentale se caractérise par des valeurs qui varient entre -5,73 m soit (-0.57 m/an) et -22,86 m (-2.29 m/an), donc cette période représente les valeurs les plus importantes de recul du trait de côte du littoral de Boumerdès.

Durant cette période, l'action anthropique se trouve être la plus grande cause de l'érosion. Ce recul rectiligne (1993-2003) est dû à l'extraction abusive des sables, l'urbanisation, le piétinement, accentuée par la construction de la route front de mer et l'arasement des dunes qui n'ont fait qu'empêcher et freiner les échanges, et ensuite aggraver la situation au niveau du secteur central dont le recul.

-Période de 2003 à 2006

L'évolution du linéaire côtier de la plage de Boumerdès, pour la période qui s'étend entre 2003 et 2006, est caractérisée par un fort recul surtout dans la partie centrale. La partie orientale a connu un recul moins aggravé que les deux autres parties avec un retrait de -3.6 m (-1.2 m/an) au niveau de P15 et un avancé +2.02m (+0.67 m /an) au niveau de P17. Le rivage de la partie centrale a enregistré des vitesses de recul les plus fortes entre P11 et P13, -14.66 m (-4.89 m/an) et -20.66 m (-6.89 m/an). Au niveau de la partie occidentale on note que le recul s'est accentué de P2 -3.25m (-1.08 m/an) jusqu'au P7 avec un retrait de -11.58 m (-3.86 m/an).

Durant cette période la cause principale de l'érosion revient à des activités humaines importantes au niveau de littoral et l'action de la dérive littorale qui a engendré une accumulation en amont et une érosion en aval de ces derniers. Ainsi, le bilan général de ce secteur fait état d'amaigrissement de la zone côtière.

-Période de 2006 à 2009

L'évolution du linéaire côtier de la plage de Boumerdès, pour la période qui s'étend entre 2006 et 2009, est caractérisée par un faible recul. La succession des périodes d'érosion et d'accumulation a engendré des taux d'évolution très faibles surtout après l'installation des deux épis et l'autre épi en (T) au niveau de la partie central du rivage. On note des retraits de -11,35 m (-3,78 m/an) au niveau de P1 et de -13,11m (-4,37 m/an) au niveau de P2. La partie centrale a connu des accrétions considérables au niveau de P14 +9,83m d'environ

(+3,28 m/an) et des recules -3,33 au niveau de P8. La partie orientale est subit un recul continu et remarquable au pied de la falaise avec des valeurs de -10,21m (-3,40 m/an) et de -10,75m (-3,58 m/an) au niveau des profils P16 et P17.

-Période de 2009 à 2012

Les variations du trait de côte de la plage de Boumerdès, pour la période qui s'étend entre 2009 et 2012, est caractérisée par un fort recul au niveau de la partie centrale. On observe que durant cette période la partie orientale a connu une avancée importante du trait de côte atteignant +9,45m (+3,15 m/an) au niveau de P17 et +4,35m (+1,45 m/an) au niveau de P20, mais parallèlement des faibles reculs sont observés entre P15 et P21, -2,44m (-0,81 m/an) et -0,5m (-0,17 m/an). la partie centrale est en recul considérable du trait de côte avec un retrait de -9,97m soit (-3,32 m/an) au niveau de P9 et -9,75m soit (-3,25 m/an) au niveau de P10. la partie occidentale est en légère avancée, +1,44m au niveau de P1 soit +0,48 m/an, et +2,55m au niveau de P2 soit 0,85 m/an, mais aussi il y a un faible recul au niveau de P3 avec une valeur de -2,49m soit -0,83 m/an et un autre au niveau de P6 avec un retrait de -2,07m (-0,69 m/an).

Comme nous venons de le voir, le trait de côte a connu de grands bouleversements au cours de cette période avec la mise en place des épis qui ont favorisé l'avancée du trait de côte (accrétion).

-Période de 2012 à 2015

Au cours de la période de 2012 à 2015, l'évolution du trait de côte se caractérise par des avancées très importantes que les reculs durant le long des profils surtout au niveau de la partie centrale. la partie occidentale à connu un recul du trait de côte avec un retrait de -4,42m soit (-1,47 m/an) au niveau de P1 et de -6,21m soit (-2,07 m/an) à P2, mais cette partie à enregistré aussi des avancés du trait de côte (accrétion) entre P4 et P6 avec des valeurs de

Chapitre III : Etude de la variation du trait de côte de la plage de Boumerdès entre 1993 et 2015

+5.25m (+1.75 m/an) et +4.39m (+1.46 m/an).la partie centrale à enregistré des avancées du trait de côte durant le long des profils (de P9 à P14) avec une valeur moyenne de +6.28m soit(+2.09 m/an),(une avancée maximale de +11.3m et une avancée minimale de +1.18m).la partie orientale est caractérisée par la présence des reculs et des avancées du trait de côte, on note que les avancées sont enregistrés au niveau de P15 et P16, avec des accrétions de +11.77 m(+3.92 m/an) et +10.31m (+3.44 m/an),alors que les reculs sont observés au niveau de P20 et P21, avec des retraits de -11.7 m soit (-3.90 m/an) et -14.38m soit (-4.79 m/an).

Le trait de côte a connu une évolution très faible par rapport aux reculs recensés lors des périodes précédentes. C'est au cours de cette période que l'avancée du trait de côte est la plus importante, Ces avancées sont exclusivement anthropiques et liées à la présence des épis au niveau de la partie centrale qui a engendré une accumulation en amont de ces derniers.

7. Synthèse

Les résultats de l'évolution du littoral de Boumerdès entre 1993 et 2015 sont présentés dans le tableau III.2. L'évolution du linéaire côtier de ce rivage, pour cette période est caractérisée par un grand recul avec des vitesses d'érosion très élevées jusqu'a 2003, puis la succession des périodes d'érosion et d'accumulation a engendré des taux d'évolution très faibles. L'évolution observée entre 1993 et 2015 dans cette partie du littoral fournit un bon exemple des ces mouvements d'avancée et de recul du trait de côte et reflète l'impact des processus morpho-sédimentaires.

8. Représentation des bilans sédimentaires par des histogrammes

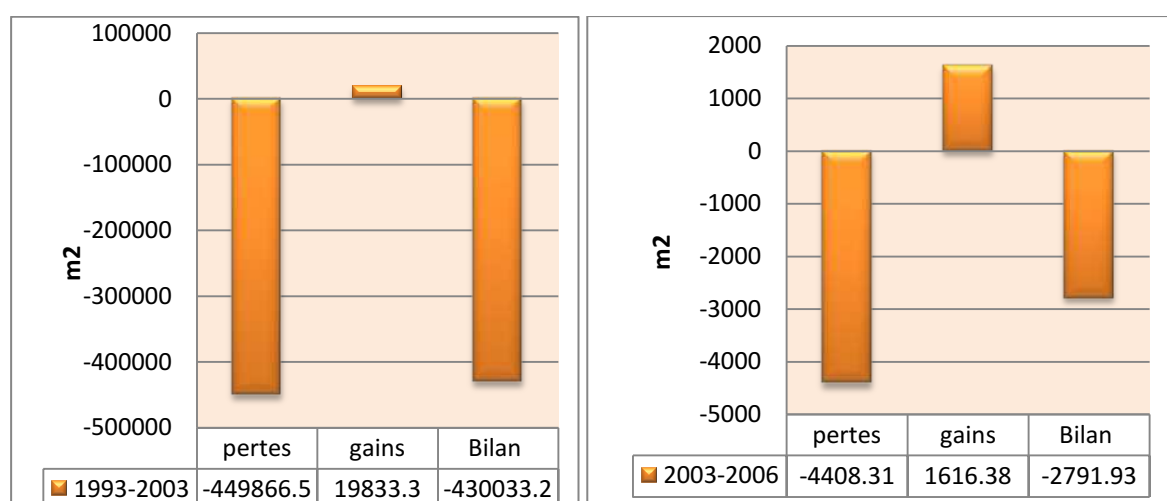




Figure.III.7 : bilans sédimentaires (surface) du littoral de Boumerdès pour la période (1993-2015)

9. analyse des bilans sédimentaires (surfaces gagnées - surfaces perdues) pour la plage de Boumerdès entre 1993 et 2015

L'évolution et l'équilibre dynamique du littoral de Boumerdès reposent sur les échanges sédimentaires entre l'estran et le domaine aérien (plages et dunes). Ces mouvements sédimentaires dans le système plage aérienne et estran se trouvent révélés par des changements dans la position de la ligne de rivage et par l'évolution des unités morphologiques de ce littoral. L'ampleur des changements n'est pas identique sur toute la plage. Les résultats de l'évolution cette frange littorale entre 1993 et 2015 sont présentés dans le tableau. III-1.

Chapitre III : Etude de la variation du trait de côte de la plage de Boumerdès entre 1993 et 2015

L'analyse des bilans sédimentaires pour la plage de Boumerdès a connu un recul important pendant la période (1993-2015).

-Durant la période (1993-2003) Le bilan sédimentaire est négatif de -430033.2 m^2 avec des grandes valeurs de pertes/gains (-449866.5 m^2 et $+19833.3 \text{ m}^2$) soit un taux d'érosion de $-44986.65 \text{ m}^2/\text{an}$. Cette valeur élevée de perte est due au déséquilibre du transit littoral à cause des activités anthropique et l'action de la dérive littorale.

- La période qui s'étant entre 2003 et 2006 se caractérise par un bilan sédimentaire négatif de -2791.93 m^2 , les valeurs de pertes et de gains sont inférieures à celles de la période précédente (-4408.31 m^2 et $+1616.38 \text{ m}^2$) soit un taux d'érosion annuel de -1469.44 m^2 .

-Durant la période (2006-2009) le bilan sédimentaire est négatif de -1328.13 m^2 il est inférieur à celui de la période précédente avec un taux d'érosion annuel de -993.49 m^2 . Les pertes des surfaces sont diminuées durant cette période et ça dus à la construction des ouvrages de protection contre la mer (houle).

-La quatrième période, de 2009 à 2012, a connu un bilan faiblement négatif de -1093.77 m^2 , ce bilan est diminué par rapport à celui de la période précédente est ça est dus à l'action et le rôle des épis qui ont brisé et atténué l'énergie des houles, ainsi la dérive littorale.

-la dernière période de 2012 à 2015, la plage de cette zone d'étude a marqué une perte de -969.56 m^2 soit un taux d'érosion de -1319.53 m^2 par an. On a constaté une forte diminution de cette perte qui affecte le littoral durant cette dernière période, et ça revient à l'installation des aménagements au niveau de la partie centrale de notre site d'étude.

10. Facteurs principales de l'évolution du trait de côte du littoral de Boumerdès entre 1993 et 2015

Plusieurs facteurs entrent en jeu dans cette évolution, liés aux rôles des houles sur la morphogénèse et les contraintes locales (géomorphologie et relations sédimentaires entre les secteurs proches, équipements de défense côtière) ou générales la variabilité des apports fluviaux.

La rose des houles annuelle de la cote de Boumerdès montre une prédominance des houles de secteur Ouest, Est et Nord-est sont les plus fréquemment observées. Ces houles engendrent des courants de dérive littorale Est-Ouest avec un flux sédimentaire dans la même direction, et un transport sédimentaire vers le large par les courants de retours. Les houles

Chapitre III : Etude de la variation du trait de côte de la plage de Boumerdès entre 1993 et 2015

d'Ouest, moins fréquentes mais plus énergiques, apparaissent cependant déterminantes en termes de bilan global.

Les activités anthropiques et les extractions de matériaux aggravent sérieusement le déficit sédimentaire côtier, ainsi les différents aménagements et la mauvaise conception des ouvrages de défense (épis) responsable des modifications dans le transport sédimentaire.

Conclusion

En effet, l'évolution du trait de côte dans la plage de Boumerdès est marquée par une érosion très intense notamment au niveau de la zone occidentale. Ceci pourrait bien être expliqué par des facteurs régissant la dynamique sédimentaire de la zone et les facteurs anthropiques.

Les variations (gains - pertes) deviennent plus importantes et le bilan sédimentaire négatif, les vitesses de recul diminuent sur la partie Est de la zone d'étude suite à l'implantation de deux épis qui favorisent l'engraissement de la plage en aval et le recul en amont. Malgré un effort d'équipements des côtes, le rivage n'est pas stabilisé et il est toujours en perpétuelle érosion.

CHAPITRE IV :

**ETUDE HYDRODYNAMIQUE ET
BATHYMETRIQUE DE LA PLAGE DE
BOUMERDES**

A. Etude hydrodynamique

1. Introduction

L'hydrodynamique littorale a pour but de décrire et de modéliser les phénomènes physiques à l'origine de la dynamique des fluides en milieu littoral. Son intérêt est d'une part fondamental pour une meilleure compréhension et modélisation en océanographie physique littorale, d'autre part appliqué à des problèmes d'environnement (étude de rejets, dispersion des polluants), de gestion et d'aménagement du littoral (protection du littoral, influence d'ouvrages, équilibre dynamique de la côte....), état sanitaire des plages et de sécurité pour la baignade.

Pour les fonds sableux, comme c'est le cas le long des côtes aquitaines, s'ajoutent les problèmes d'ensablement (gênants pour la navigation : à titre d'exemple, on peut citer l'embouchure du bassin d'Arcachon) ou d'affouillements (à l'origine de fragilisations d'ouvrages).

La compréhension de l'hydrodynamique littorale, associée à une meilleure compréhension des processus de types petites échelles (physiques, biogéochimiques) et des transports particulaires et sédimentaires associés, permettra par la suite de développer des modèles longs termes de comportement, qui ont pour but le suivi de la morphologie du fond et de la position de la ligne de côte.

Les vagues jouent un rôle particulièrement important dans l'hydrodynamique littorale, elles agissent en effet comme un « moteur » pour la circulation, notamment dans la zone de déferlement. En effet les conditions hydrodynamiques liées aux vagues se trouvent fortement modifiées en faible profondeur, sous l'action combinée de multiples processus (influence de la bathymétrie, réflexion, réfraction, déferlement, effets non-linéaires...) dont la plupart contrôle la dissipation ou la concentration d'énergie de la houle incidente. La connaissance fine et la compréhension de ces phénomènes sont un préalable obligatoire pour la prédiction de la dynamique sédimentaire.

2. Zonation hydrodynamique du littoral

En termes de comportement hydrodynamique, le littoral est subdivisé en quatre zones différenciées : le domaine soumis à l'action des houles du large, la zone des brisants, la zone de déferlement et enfin la zone de swash, qui constitue une véritable frontière entre la partie marine et la partie continentale.

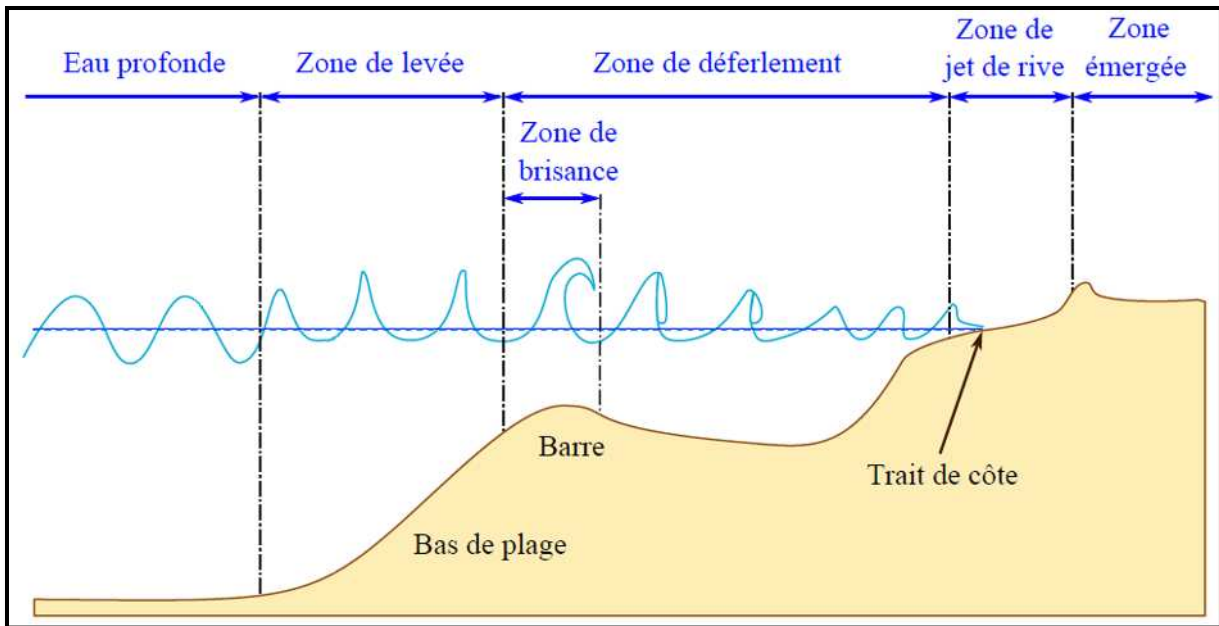


Figure IV.1 : Zonation hydrodynamique du littoral (Berni, 2011)

❖ Définition de la zone de swash (Swash zone)

La zone de swash correspond à la partie de la plage exposée au balayage successif des vagues. Elle est aussi nommée zone de jet de rive ou zone de ressac. La zone de swash est située entre la ligne de rivage (Shoreline) et la zone de déferlement (Surf zone). Ces limites varient dans le temps et dans l'espace et se déplacent sur l'estran en suivant les fluctuations du cycle tidal, de ce fait la largeur de la zone de swash est difficile à percevoir.

❖ La zone de déferlement (Surf zone)

Cette zone marque la transition entre le déferlement des vagues et leur amortissement total sur la plage. C'est une région particulièrement complexe où les vagues, après s'être brisées, se propagent sous forme de fronts d'ondes (bores) et peuvent se reformer pour à nouveau déferler près de la plage. Des effets de turbulence et de vortex contribuent à la complexité des écoulements dans ce milieu. Un courant orienté vers le large compense l'afflux d'eau dans cette zone. Ce courant de retour est proportionnel à la hauteur des vagues dans la zone de déferlement.

❖ La zone des brisants (Breaker zone)

Cette zone très dynamique est le lieu de dissipation maximale de l'énergie des vagues incidentes. Le déferlement des vagues se produit lorsque la profondeur d'eau devient faible comparée à leur hauteur. Dans le cas d'une onde monochromatique, le

déferlement se produit lorsque $hb=Hb/\gamma$ avec γ comme critère de déferlement ($\gamma = 0.78$, Mc Cowan, 1894).

❖ La zone de shoaling (Shoaling wave zone)

Dans cette zone, la profondeur d'eau est telle qu'il se produit une perte d'énergie des vagues par friction sur le fond. Cette friction entraîne une augmentation de la hauteur des vagues et une réduction de la longueur d'onde. Tout au long de la propagation des crêtes vers la côte, il se produit donc une augmentation de la cambrure des vagues (H/L) s'accompagnant d'une augmentation de l'asymétrie des courants orbitaux au niveau des fonds ($U_{on} > U_{off}$), qui participent à un transport sédimentaire résiduel vers le haut de plage, dans les conditions d'agitation les plus courantes.

3. Modélisation de la réfraction des houles par le model SWAN

3.1. Description du modèle SWAN

Le modèle spectral de propagation des états de mer SWAN (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.

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

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial CxN}{\partial x} + \frac{\partial CyN}{\partial y} + \frac{\partial C\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial C\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \text{IV.1}$$

Où:

$N(\sigma, \theta)$ = densité de l'action des vagues:

T = temps [s]

x = distance dans la direction x [m]

y = distance dans la direction y [m]

σ = fréquence relative [Hz] comme on l'observe dans un cadre de référence se déplaçant avec la

vitesse du courant

θ = direction de la vague [degrés]

c_x, y, σ, θ = vitesses de propagations [m / s] pour respectivement x, y, σ et θ

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

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

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

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.

3.2. Le but d'étude de la réfraction

La réfraction représente un phénomène très important pour comprendre l'évolution des littoraux car elle explique pourquoi, sur une côte donnée et pour un même type de houle, l'énergie libérée par les vagues est plus considérable en certains secteurs qu'en d'autres. Ainsi, en fonction de la topographie sous-marine qui précède le rivage, il peut se produire une concentration ou une dispersion de cette énergie.

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

3.3. Discussion

Cette étude a nécessité l'utilisation des données statistiques de houle au large et des données bathymétriques.

Un traitement statistique des données du Summary of Synoptic Meteorological Observations (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 10s.

Le but étant ici de percevoir comment les changements morphologiques des petits-fonds agissent sur le comportement des houles (vagues) et l'action de ces dernières à la côte lors d'épisodes d'intense énergie.

3.4. Choix de secteur angulaire

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

Ainsi trois (03) directions ont été retenues en tenant compte des tableaux de fréquence par direction des houles au large ainsi que l'incidence de ces houles par rapport à la zone d'étude (figure IV.2):

- 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.

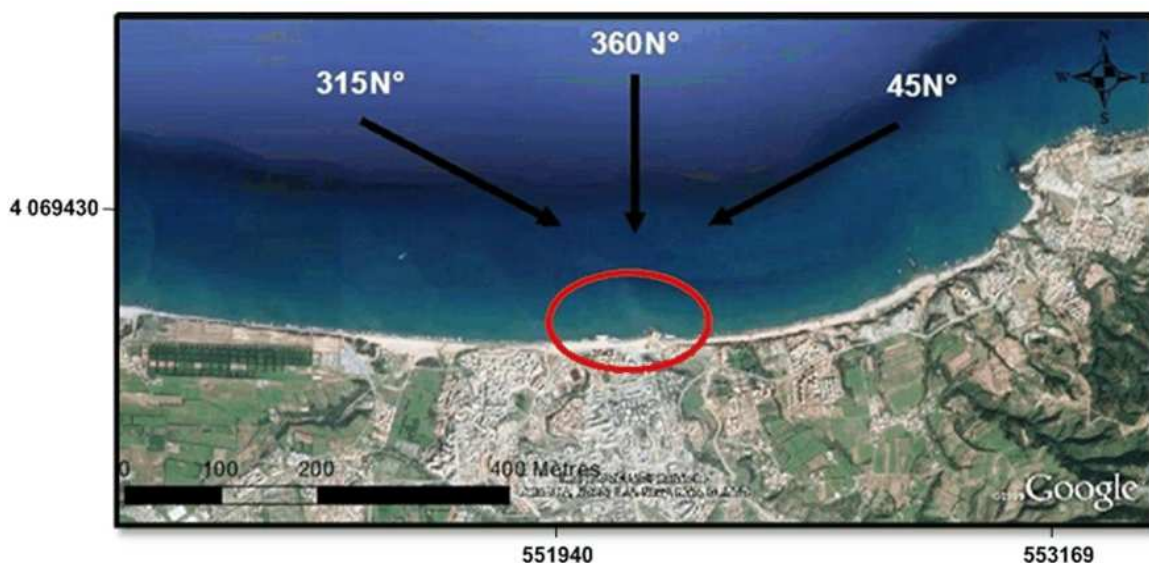


Figure IV.2 : Choix des directions des houles défavorable au site d'étude (Google Earth, 2015)

Chapitre IV : Etude hydrodynamique et bathymétrie de la plage de Boumerdès

Le coefficient de réfraction (K_r) pour les houles vintennales a été calculé pour chaque direction retenue à une profondeur d'environ -10 m, profondeur limite de la dynamique sédimentaire (voir le tableau IV.1).

Tableau IV.1 : Les moyennes des résultats obtenus par direction et par période de la houle vintennale à -10.00m.


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

On remarque parmi ces trois secteurs que ce sont les houles de direction Nord 315° qui conservent leur énergie et attaquent le site frontalement.

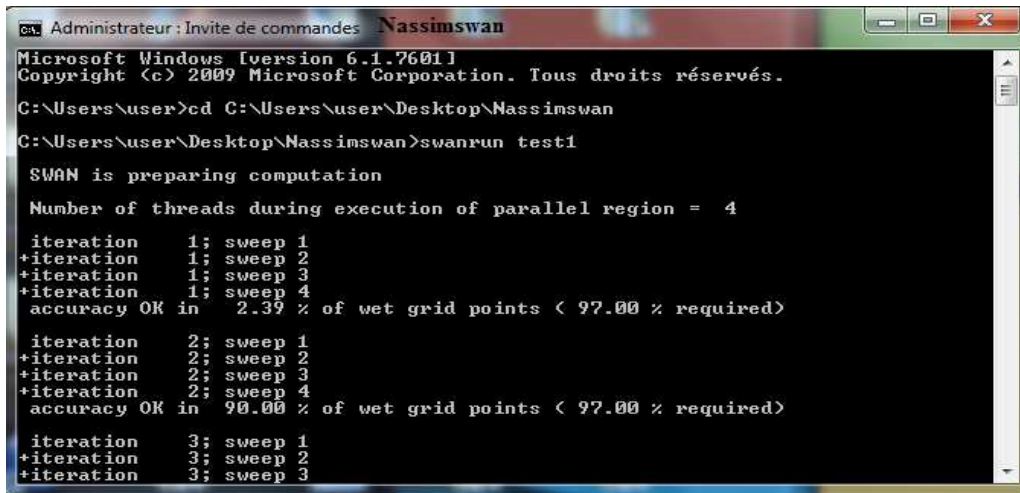
3.5. Les étapes à suivre

- 1-La création du fichier d'entrée : on fait introduire les points de prélèvement (altitude + longitude) associés par leurs bathymétries dans un tableur Excel ;
- 2-Ouvrir ce fichier dans surfer pour créer le fichier d'entrée.dat ;
- 3-Enregistrer sous le format.DAT ;
- 4-Ouvrir ce fichier avec Excel ;
- 5-Sélectionner la dernière colonne, puis la copier dans un fichier block note ;



6-Pour commencer, le travail avec Swan il faut un fichier d'entrée  SWAN sous le nom de "test1" comprenant en plus de l'algorithme, les données de bases qui sont : la délimitation de la zone d'étude (coordonnées géographiques en UTM), la hauteur de la houle, l'angle du vent, la période (voir annexe 2) ;

7-En ouvrant l'application "swan.exe", on insère : "swanrun test1" comme dans cette figure ;



```
ca. Administrateur : Invite de commandes Nassimswan
Microsoft Windows [version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. Tous droits réservés.

C:\Users\user>cd C:\Users\user\Desktop\Nassimswan
C:\Users\user\Desktop\Nassimswan>swanrun test1

SWAN is preparing computation

Number of threads during execution of parallel region = 4

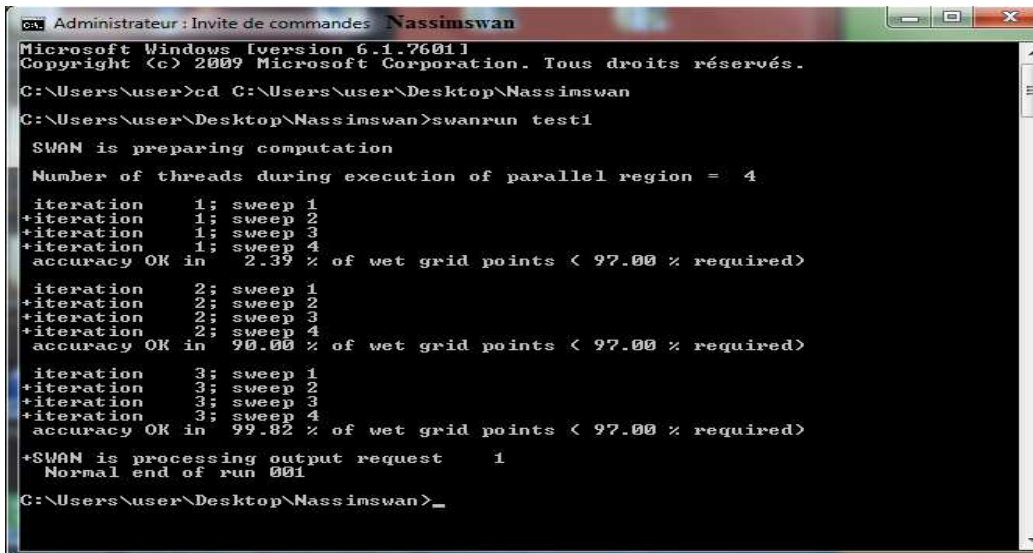
iteration    1; sweep 1
+iteration   1; sweep 2
+iteration   1; sweep 3
+iteration   1; sweep 4
accuracy OK in 2.39 % of wet grid points < 97.00 % required>

iteration    2; sweep 1
+iteration   2; sweep 2
+iteration   2; sweep 3
+iteration   2; sweep 4
accuracy OK in 90.00 % of wet grid points < 97.00 % required>

iteration    3; sweep 1
+iteration   3; sweep 2
+iteration   3; sweep 3
```

Figure IV.3 : Insertion de fichier "Input".

Après itération y aura ce fichier comme résultante, qu'on pourra ouvrir à l'aide d'Excel.



```
ca. Administrateur : Invite de commandes Nassimswan
Microsoft Windows [version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. Tous droits réservés.

C:\Users\user>cd C:\Users\user\Desktop\Nassimswan
C:\Users\user\Desktop\Nassimswan>swanrun test1

SWAN is preparing computation

Number of threads during execution of parallel region = 4

iteration    1; sweep 1
+iteration   1; sweep 2
+iteration   1; sweep 3
+iteration   1; sweep 4
accuracy OK in 2.39 % of wet grid points < 97.00 % required>

iteration    2; sweep 1
+iteration   2; sweep 2
+iteration   2; sweep 3
+iteration   2; sweep 4
accuracy OK in 90.00 % of wet grid points < 97.00 % required>

iteration    3; sweep 1
+iteration   3; sweep 2
+iteration   3; sweep 3
+iteration   3; sweep 4
accuracy OK in 99.82 % of wet grid points < 97.00 % required>

+SWAN is processing output request    1
Normal end of run 001

C:\Users\user\Desktop\Nassimswan>_
```

Figure IV.4 : Itération et conception du fichier "Output".

8- Ouvrir ce fichier avec Excel et choisir les deux paramètres qui nous intéressent à savoir : la hauteur significative (H_s) de chaque point ainsi que la direction de propagation des vagues (Dir). (figure.VI.5) ;

Xp [m]	Yp [m]	Hsig [m]	Dir [degr]	Depth [m]	X-Vel [m/s]	Y-Vel [m/s]	TDir [degr]	X-WForce [N/m2]	Y-WForce [N/m2]	X-Transp [m3/s]	Y-Transp [m3/s]	Steepn []	Wlen []	Ubot [m]	Period [m/s]
543513	4069171	-9.00000	-999.000	-99.00000	0.000000	0.000000	-999.000	-9.00000	-9.00000	0.00000	0.00000	-9.000000	-9.0000	-10.000000	-9.000
543519	4069171	-9.00000	-999.000	-99.00000	0.000000	0.000000	-999.000	-9.00000	-9.00000	0.00000	0.00000	-9.000000	-9.0000	-10.000000	-9.000
543526	4069171	-9.00000	-999.000	-99.00000	0.000000	0.000000	-999.000	-9.00000	-9.00000	0.00000	0.00000	-9.000000	-9.0000	-10.000000	-9.000
543532	4069171	-9.00000	-999.000	-99.00000	0.000000	0.000000	-999.000	-9.00000	-9.00000	0.00000	0.00000	-9.000000	-9.0000	-10.000000	-9.000
543538	4069171	-9.00000	-999.000	-99.00000	0.000000	0.000000	-999.000	-9.00000	-9.00000	0.00000	0.00000	-9.000000	-9.0000	-10.000000	-9.000
543545	4069171	-9.00000	-999.000	-99.00000	0.000000	0.000000	-999.000	-9.00000	-9.00000	0.00000	0.00000	-9.000000	-9.0000	-10.000000	-9.000
543551	4069171	-9.00000	-999.000	-99.00000	0.000000	0.000000	-999.000	-9.00000	-9.00000	0.00000	0.00000	-9.000000	-9.0000	-10.000000	-9.000
543557	4069171	-9.00000	-999.000	-99.00000	0.000000	0.000000	-999.000	-9.00000	-9.00000	0.00000	0.00000	-9.000000	-9.0000	-10.000000	-9.000
543564	4069171	-9.00000	-999.000	-99.00000	0.000000	0.000000	-999.000	-9.00000	-9.00000	0.00000	0.00000	-9.000000	-9.0000	-10.000000	-9.000
543570	4069171	-9.00000	-999.000	-99.00000	0.000000	0.000000	-999.000	-9.00000	-9.00000	0.00000	0.00000	-9.000000	-9.0000	-10.000000	-9.000
543576	4069171	-9.00000	-999.000	-99.00000	0.000000	0.000000	-999.000	-9.00000	-9.00000	0.00000	0.00000	-9.000000	-9.0000	-10.000000	-9.000
543583	4069171	-9.00000	-999.000	-99.00000	0.000000	0.000000	-999.000	-9.00000	-9.00000	0.00000	0.00000	-9.000000	-9.0000	-10.000000	-9.000
543589	4069171	-9.00000	-999.000	-99.00000	0.000000	0.000000	-999.000	-9.00000	-9.00000	0.00000	0.00000	-9.000000	-9.0000	-10.000000	-9.000
543596	4069171	-9.00000	-999.000	-99.00000	0.000000	0.000000	-999.000	-9.00000	-9.00000	0.00000	0.00000	-9.000000	-9.0000	-10.000000	-9.000
543602	4069171	-9.00000	-999.000	-99.00000	0.000000	0.000000	-999.000	-9.00000	-9.00000	0.00000	0.00000	-9.000000	-9.0000	-10.000000	-9.000
543608	4069171	-9.00000	-999.000	-99.00000	0.000000	0.000000	-999.000	-9.00000	-9.00000	0.00000	0.00000	-9.000000	-9.0000	-10.000000	-9.000
543615	4069171	-9.00000	-999.000	-99.00000	0.000000	0.000000	-999.000	-9.00000	-9.00000	0.00000	0.00000	-9.000000	-9.0000	-10.000000	-9.000
543621	4069171	-9.00000	-999.000	-99.00000	0.000000	0.000000	-999.000	-9.00000	-9.00000	0.00000	0.00000	-9.000000	-9.0000	-10.000000	-9.000
543627	4069171	-9.00000	-999.000	-99.00000	0.000000	0.000000	-999.000	-9.00000	-9.00000	0.00000	0.00000	-9.000000	-9.0000	-10.000000	-9.000
543634	4069171	-9.00000	-999.000	-99.00000	0.000000	0.000000	-999.000	-9.00000	-9.00000	0.00000	0.00000	-9.000000	-9.0000	-10.000000	-9.000

Figure IV.5 : le choix des deux paramètres (Hs, Dir) à partir de fichier " Output" sous l'Excel.

9-Enregistrer ces deux paramètres (Hs, Dir) associés par les points de prélèvements (altitude Xp, longitude Yp) dans un autre fichier Excel pour les utiliser dans Surfer 11.

10-Ouvrir ce dernier par Surfer 11 pour créer des fichiers GRID de la hauteur significative et direction **(Figure IV .6).**

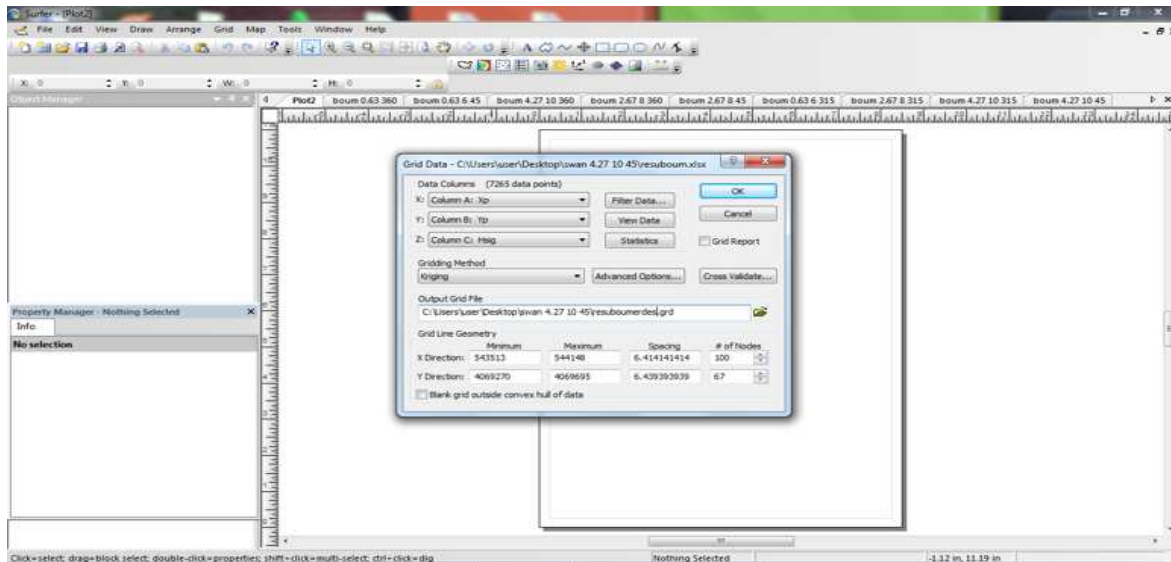


Figure IV .6 : Manipulation sous Surfer 11.

À l'aide du logiciel "Surfer 11", on a créé les couches suivantes: la bathymétrie, la houle significative et la direction de propagation des vagues.

Après la superposition de ces grilles on passe au traitement et modification des couleurs, pour arriver à cartographier six (09) cartes suivantes :

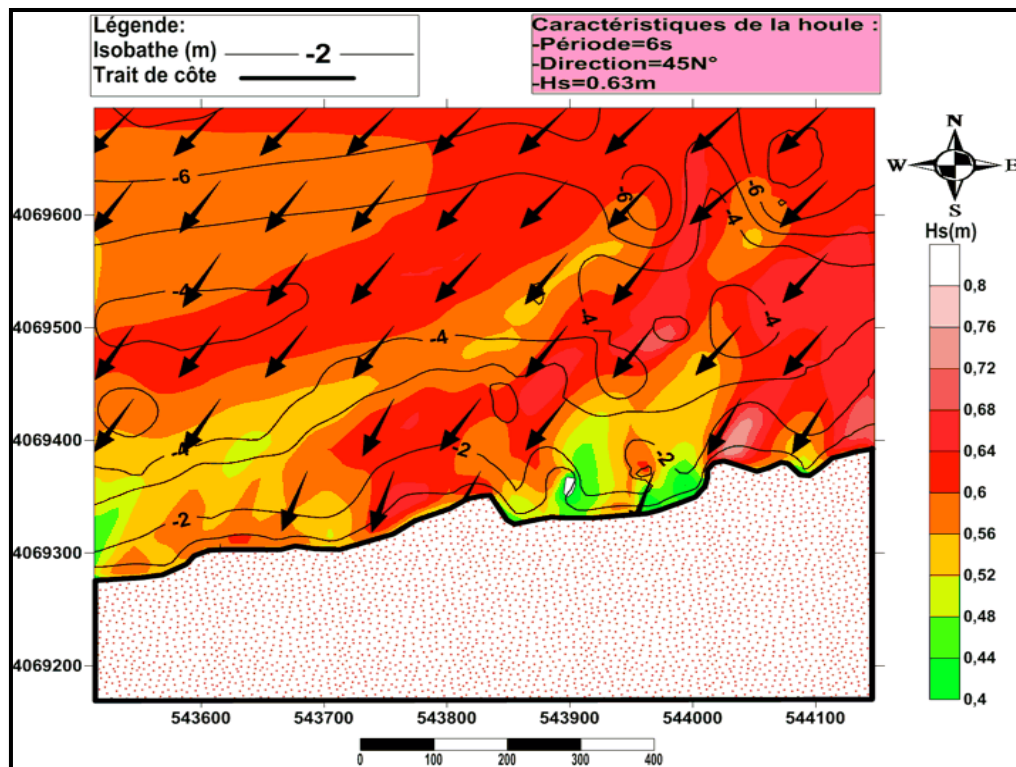


Figure VI.7 : Résultats de la réfraction pour le 45N° et T=6s (Boualili, 2015).

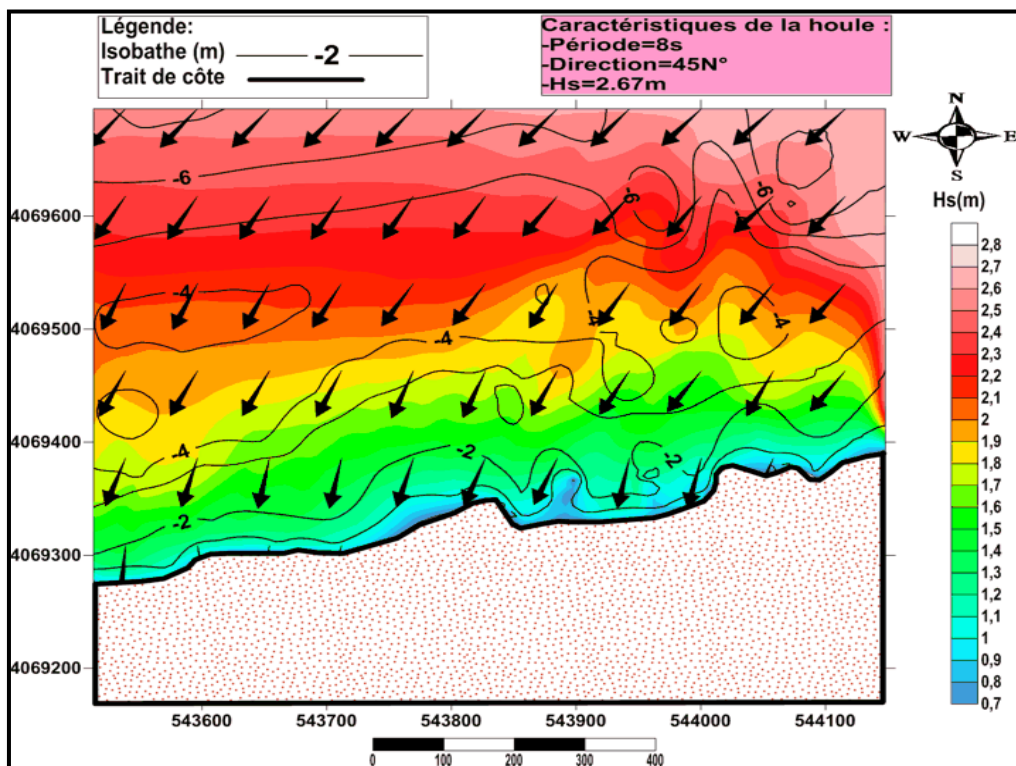


Figure IV.8 : Résultats de la réfraction pour le 45N° et T=8s (Boualili, 2015).

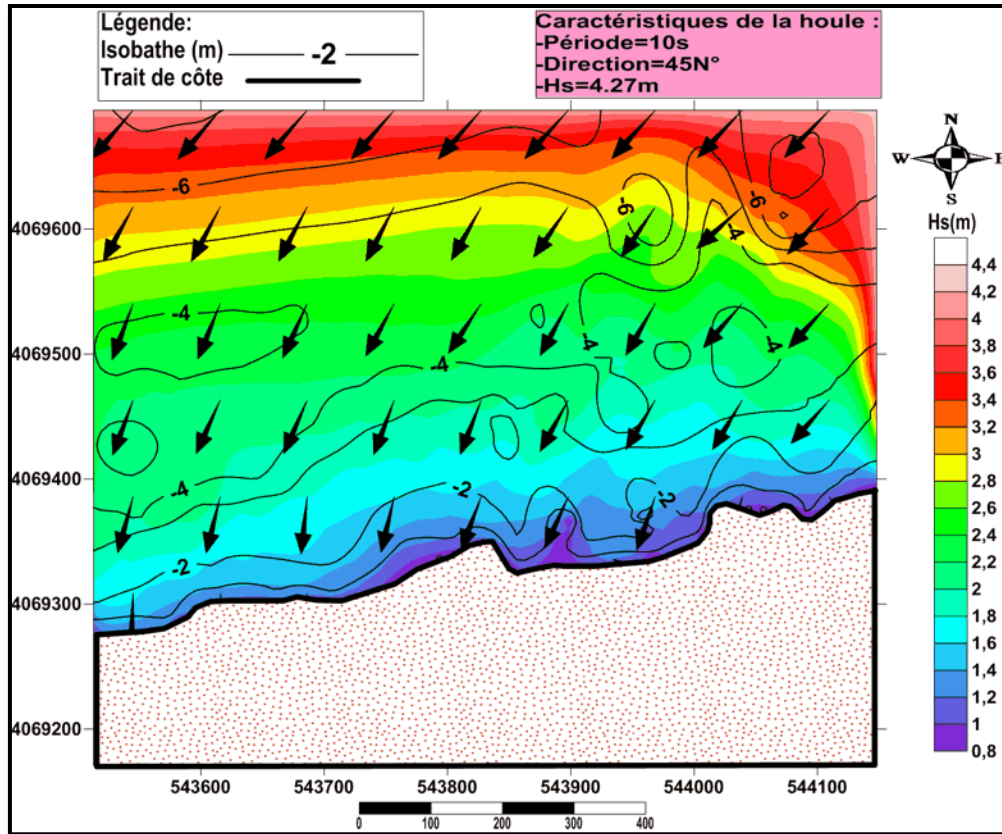


Figure IV.9 : Résultats de la réfraction pour le 45N° et T=10s (Boualili, 2015).

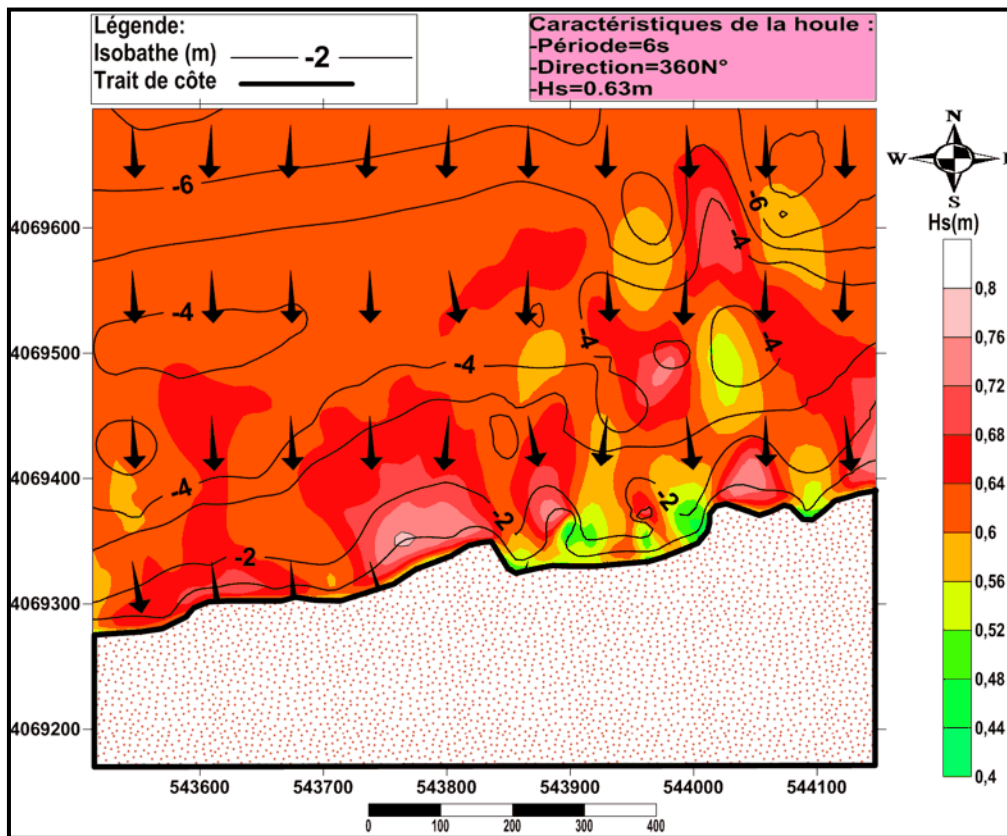


Figure IV.10 : Résultats de la réfraction pour le 360N° et T=6s (Boualili, 2015).

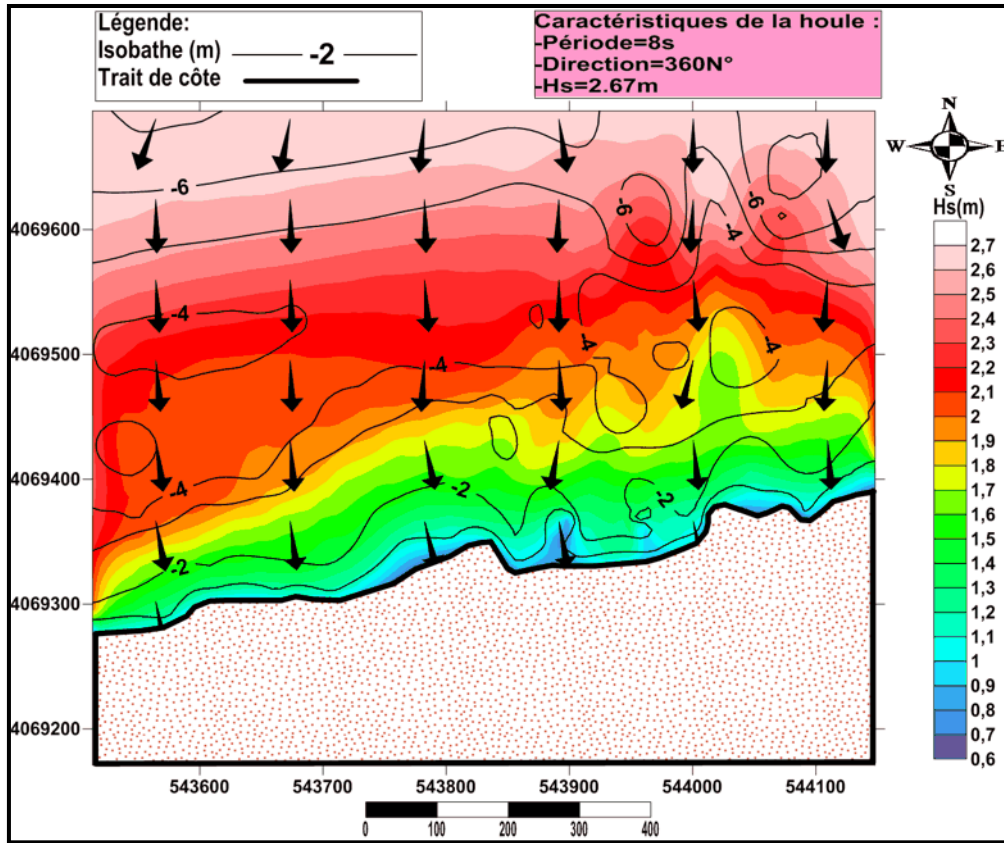


Figure IV.11 : Résultats de la réfraction pour le 360N° et T=8s (Boualili, 2015).

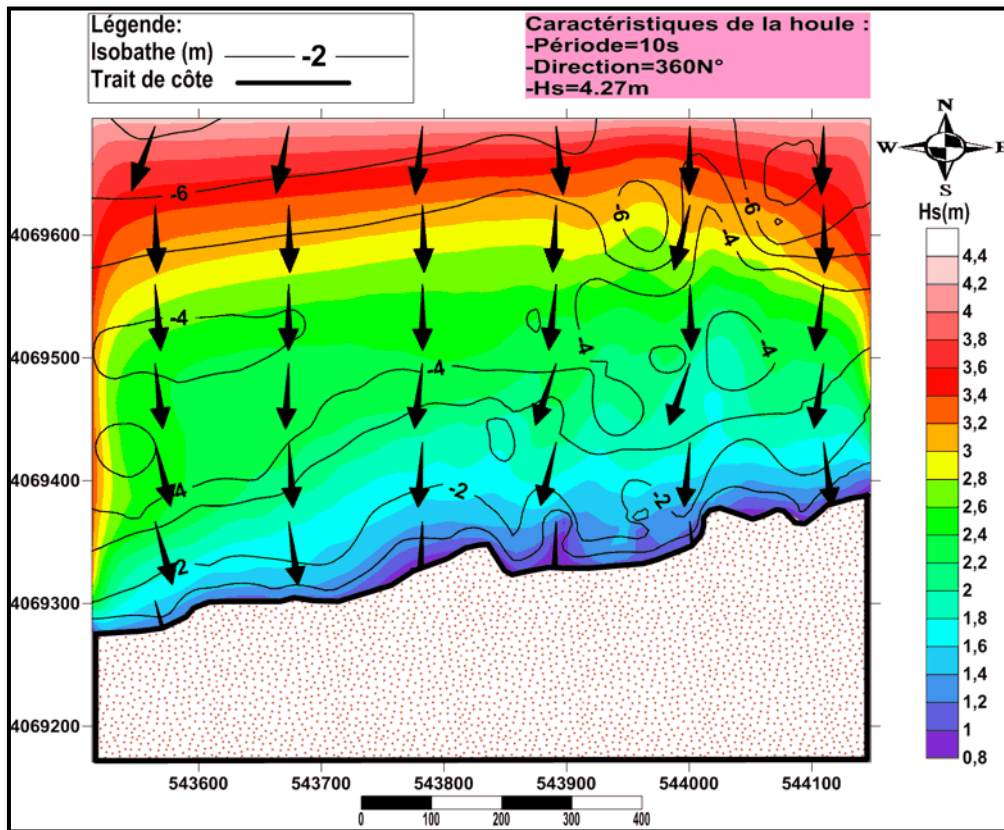


Figure IV.12 : Résultats de la réfraction pour le 360N° et T=10s (Boualili, 2015).

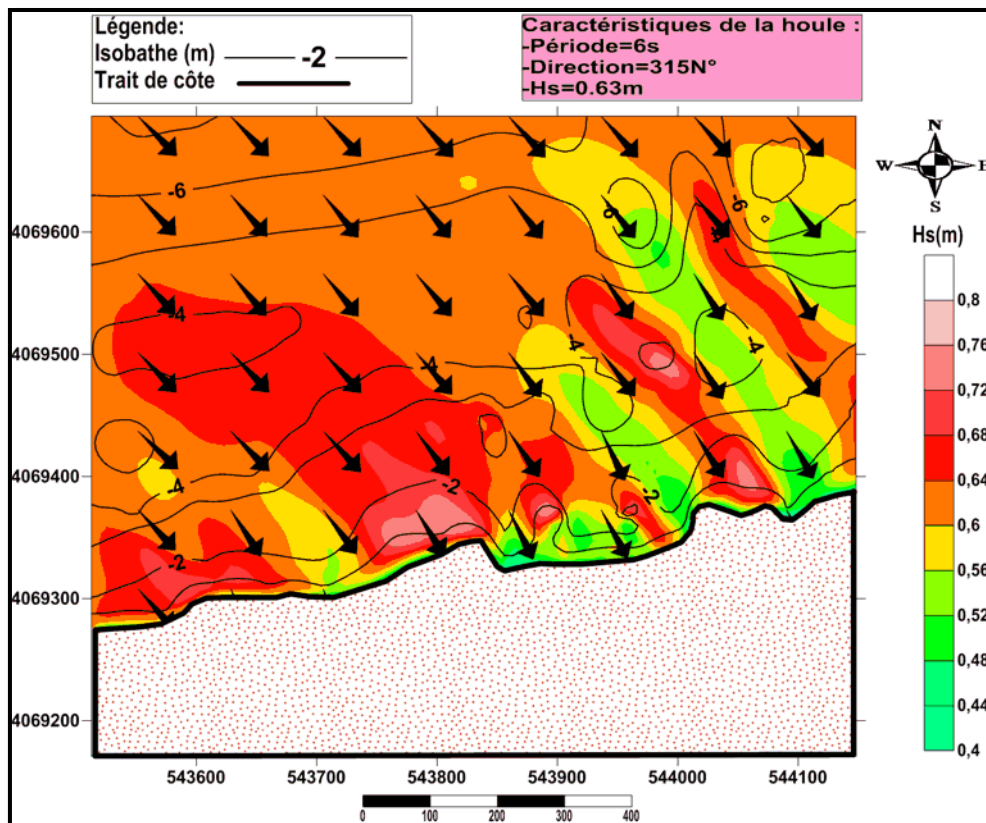


Figure IV.13 : Résultats de la réfraction pour le 315N° et T=6s (Boualili, 2015).

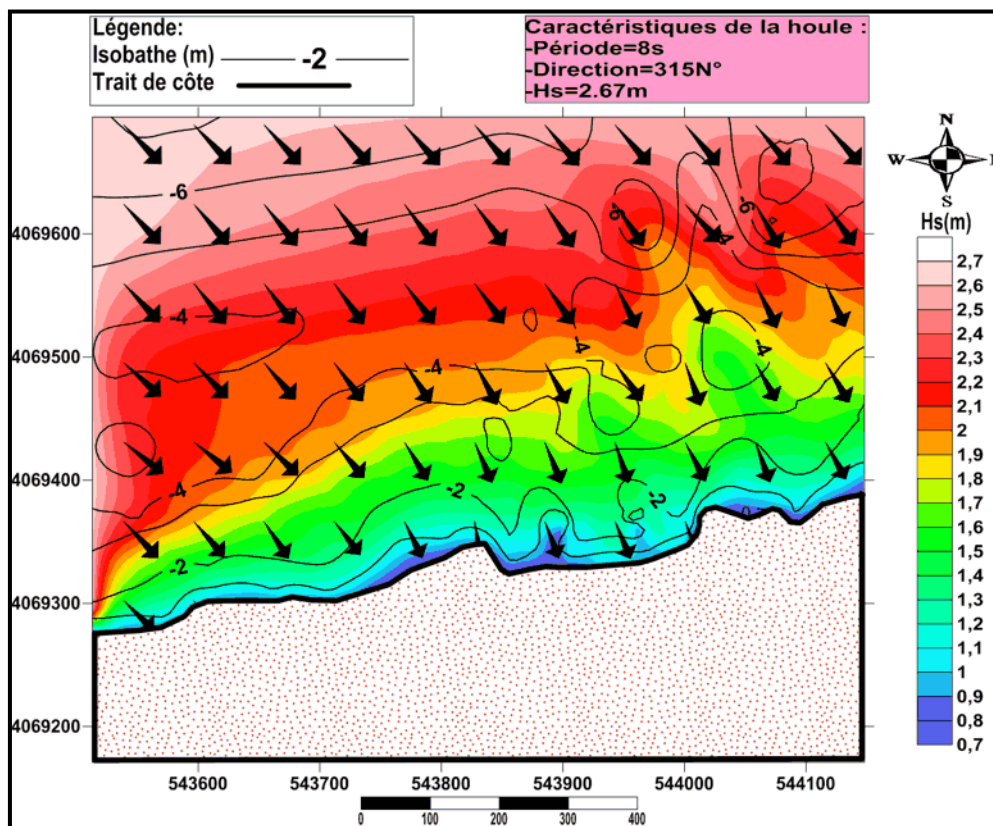


Figure IV.14 : Résultats de la réfraction pour le 315N° et T=8s (Boualili, 2015).

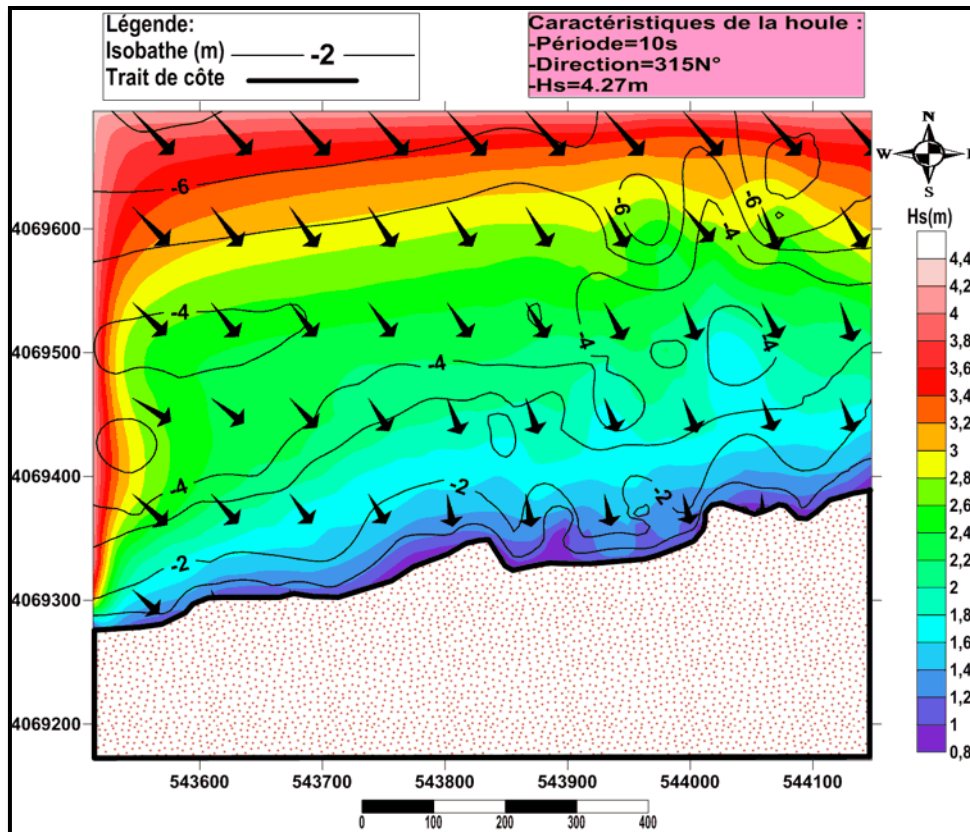


Figure IV.15 : Résultats de la réfraction pour le 315N° et T=10s (Boualili, 2015).

4. Interprétation des résultats

❖ Pour la direction 45N°

Les figures IV.7, IV.8, IV.9 représentent les résultats issus de l'application du programme SWAN pour une houle de (45°) avec les périodes de 6, 8, 10 secondes. A l'approche de la côte, lorsque les vagues commencent à « sentir » le fond, elles subissent des modifications qui affectent leur direction et leurs caractéristiques. En effet, dès que la profondeur devient inférieure à la moitié de leur longueur d'onde, elles sont freinées dans leur propagation. On constate que leur énergie de propagation diminuée au fur à mesure de son évolution vers la côte.

Pour les hauteurs significatives varient entre 0,4 m et 0,8 m pour la période de 6 secondes, et entre 0,7 m et 2,8 m pour la période de 8 seconde, mais pour la période de 10 secondes varient entre 0,8 m et 4,4 m, se répartissent d'une façon asymétrique.

Le coefficient de réfraction est en moyenne égal à 0,60. Donc elles ne conservent que la moitié de leur énergie de large. La dissipation de l'énergie se présente par un pivotement des orthogonales en direction Nord à Nord – Est, avec un angle moyen de 35°.

❖ Pour la direction 360N° :

Les figures **IV.10**, **IV.11**, **IV.12** représentent les résultats issus de l'application du programme SWAN pour une houle de (360°) avec les périodes de 6, 8, 10 secondes. La propagation se fait de façon quasi frontale, le coefficient de réfraction est en moyenne égal à 0.84, de ce fait ces houles atteignent le trait de côte sans qu'elles changent de direction, donc les houles ne perdent que un peu de leur énergie. Les orthogonales ne pivotent que légèrement à l'approche du rivage.

L'énergie des houles diminue au fur à mesure de leurs avancements vers la côte. Pour les hauteurs significatives varient entre 0.4 m et 0.8 m pour la période de 6 secondes, et entre 0.6 m et 2.7 m pour la période de 8 secondes. Pour la période de 10 secondes les hauteurs significatives se trouvent entre 0.8 m et 4.4 m.

❖ Pour la direction 315N°

Les figures **IV.13**, **IV.14**, **IV.15** représentent les résultats issus de l'application du programme SWAN pour une houle de (315°) avec les périodes de 6, 8, 10 secondes. La propagation se fait de façon frontale.

Le coefficient de réfraction est en moyenne égal à 0.86, les houles ne perdent que très peu de leur énergie, Ces houles atteignent la zone d'étude sans changer de direction.

Mais en termes d'énergie des houles elle diminue en fonction de leurs propagations de large vers la côte, elles sont beaucoup moins importantes que celles des houles de direction Ouest.

Pour les hauteurs significatives varient entre 0.4 m et 0.8 m pour la période de 6 secondes, et entre 0.7 m et 2.7 m pour la période de 8 secondes. Quoique les hauteurs significatives pour la période de 10 secondes se situent entre 0.8 m et 4.4 m.

Conclusion

L'application du modèle de vague SWAN sur le domaine de la plage de Boumerdès afin d'étudier la réfraction des houles, montre que les houles les plus énergétiques qui peuvent influencer sur notre zone sont les houles de secteur Nord- Ouest, et elles vont être prises dans le dimensionnement des ouvrages de protection.

B. Etude bathymétrique

1. Le levé bathymétrique

Le levé bathymétrique consiste à déterminer les coordonnées tridimensionnelles des points du fond marin dans le système géodésique WGS84 à l'aide d'un GPS et d'un échosondeur.

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 fournies par le LEM.

2. La carte bathymétrique

La carte bathymétrique constitue un document de base nécessaire pour la reconnaissance de la morphologie sous-marine.

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.

3. Description du logiciel

Le logiciel Surfer 11, conçu par Golden Software, permet de réaliser des modèles numériques de terrain (MNT) issus des données récoltées sur le terrain via GPS, théodolite....Le principe de Surfer est le suivant :

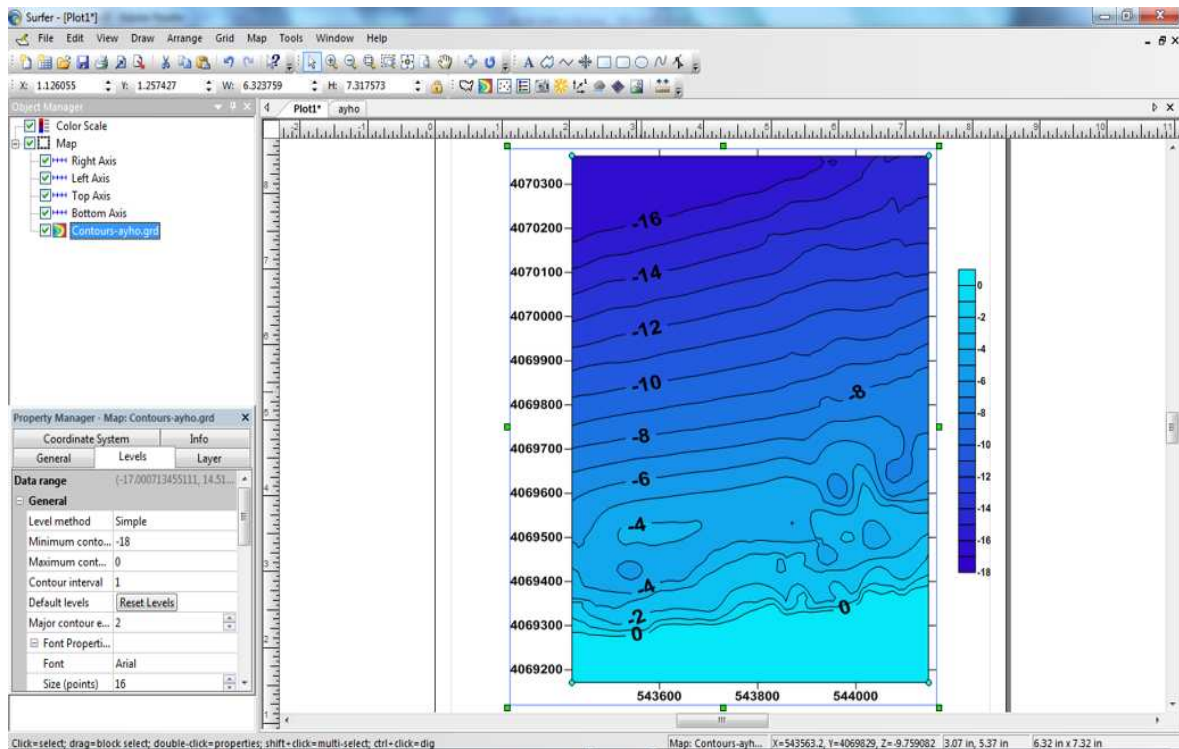
Le logiciel crée des grilles qui interpolent les données irrégulières des points (x, y, z) afin de les ordonner, c'est à partir de ces grilles que l'on pourra obtenir plusieurs types de cartes : Base Map, Contour Map, 3D surface, Vector et bien d'autres.

4. Manipulation sur surfer

1-Préparer les données bathymétriques et topographiques dans une feuille d'Excel (respecter les valeurs négatives pour la bathymétrie et positives pour la topographie, ainsi que le format mettre des virgules non pas des points et surtout mettre le fichier au format Excel 2003 pour éviter les problèmes de comptabilité entre les différentes versions de Surfer 8, 9,10 et 11).

2-Créer une grille en allant dans :

Grid=>Data et parcourir le fichier Excel puis cliquer sur ok.



3- Une fois la grille est créée, aller dans « Toolbar Options ».

4- Pour l'obtention des cartes des isobathes en 2D cliquer sur l'icône n°1 et parcourir la grille obtenue en 2 et pour les cartes bathymétriques en 3D cliquer sur l'icône n° 3. Enfin pour localiser les stations de mesure, cliquer sur l'icône n°2 et là on doit parcourir le fichier Excel directement et stations apparaissent.

5. Résultats d'analyses bathymétriques

L'analyse globale de la carte bathymétrique indique que entre -7m et -15m les lignes isobathes sont plus ou moins régulières, espacées et parallèles à la côte presque elles ont les mêmes distances. Elles s'élargissent traduisant ainsi l'adoucissement de la pente en allant vers le large et en deçà, on note un espacement de plus en plus réduit entre de ces derniers de l'Est vers l'Ouest.

A l'approche du rivage entre 0 et -7m la bathymétrie est faible et variation de la morphologie sous-marine ou présence des petites cavités et la plupart de ces dernières se trouvent dans la partie Est, aussi il y a une élévation de 1m entre les isobathes -4m et -5m qui a participé à son tour à ce décalage de distance. Cette partie est caractérisée par une morphologie rocheuse avec des pentes douces et qui témoigne d'une mobilité relativement importante sous l'action hydrodynamique.

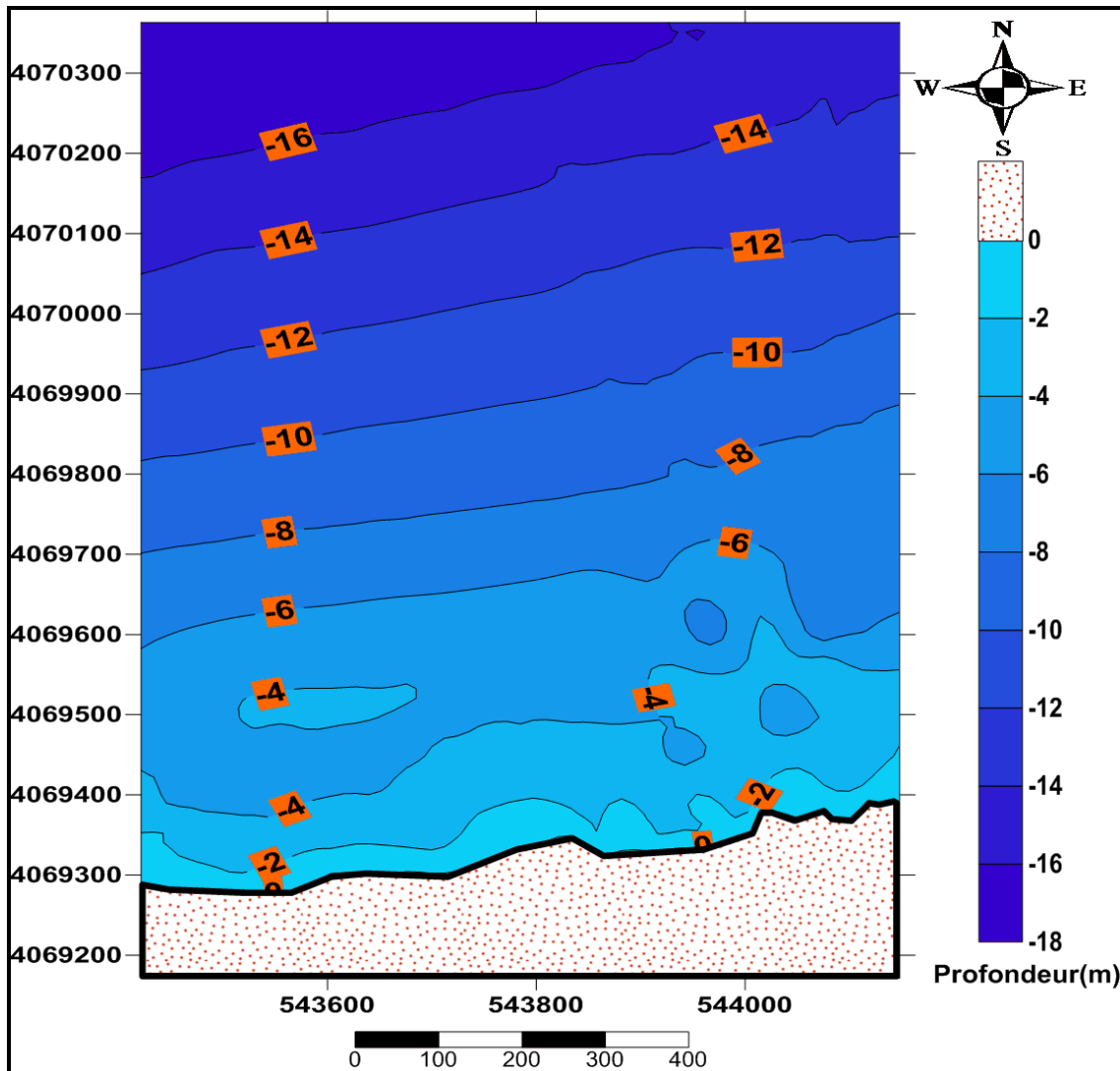


Figure IV.16 : Carte bathymétrique de la plage de Boumerdès.

6. Les profils transversaux

Quatre profils sont tracés sur la carte bathymétrique afin d'étudier au mieux la morphologie sous-marine et comprendre l'évolution du fond de la côte vers le large.

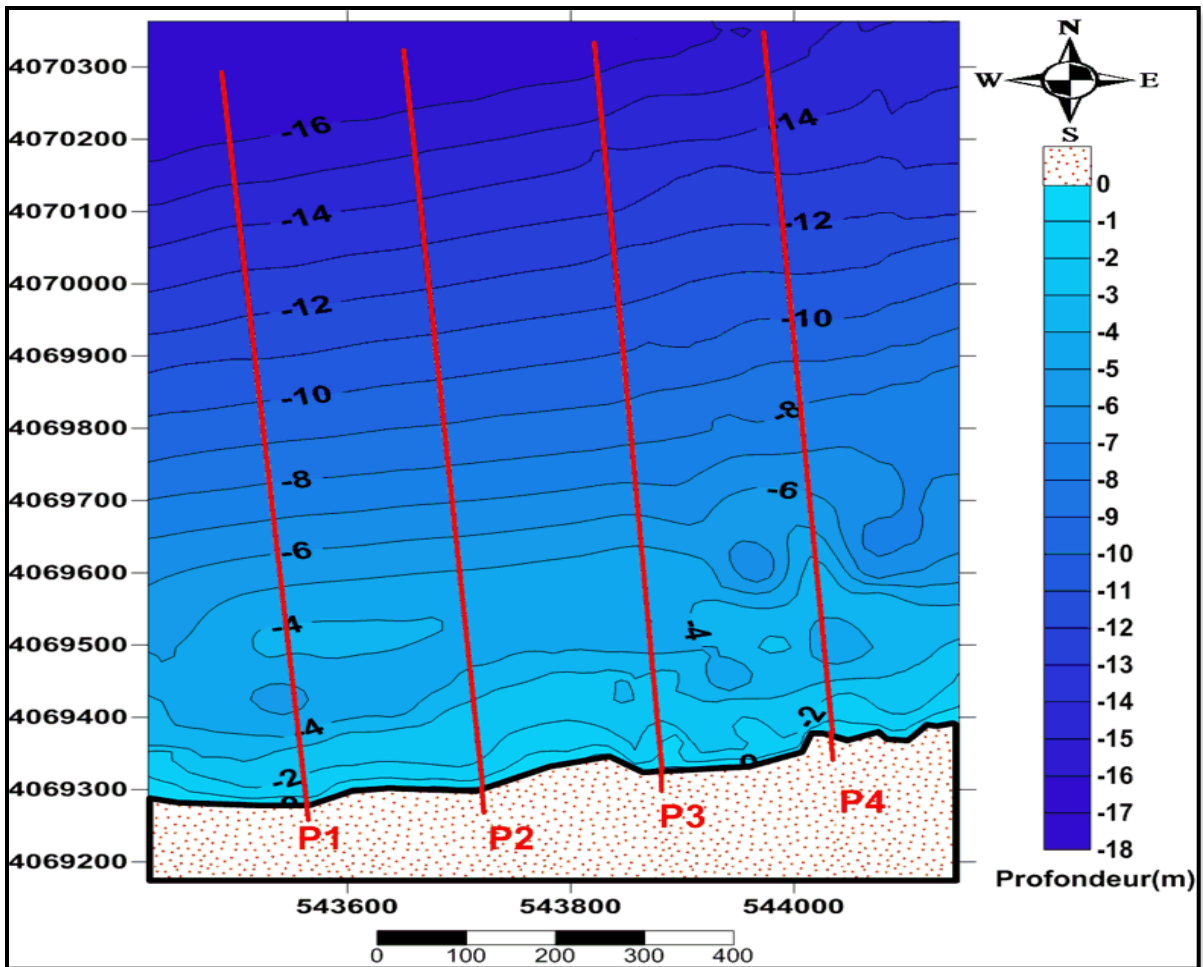


Figure IV.17 : Carte bathymétrique et localisation des profils transversaux.

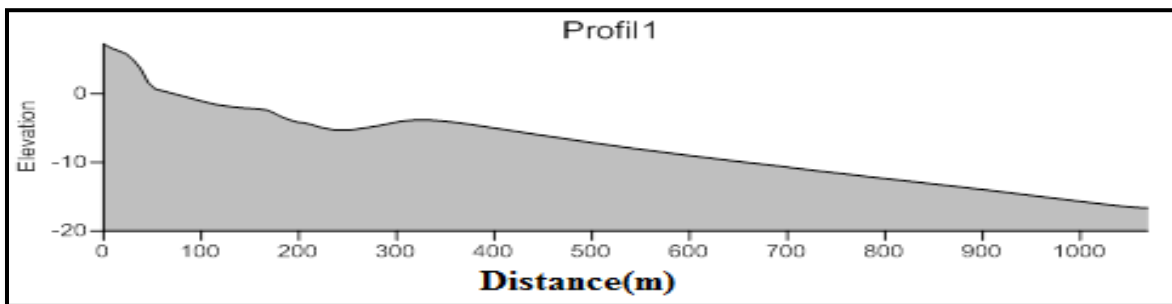


Figure IV.18 : Profil bathymétrique n°1

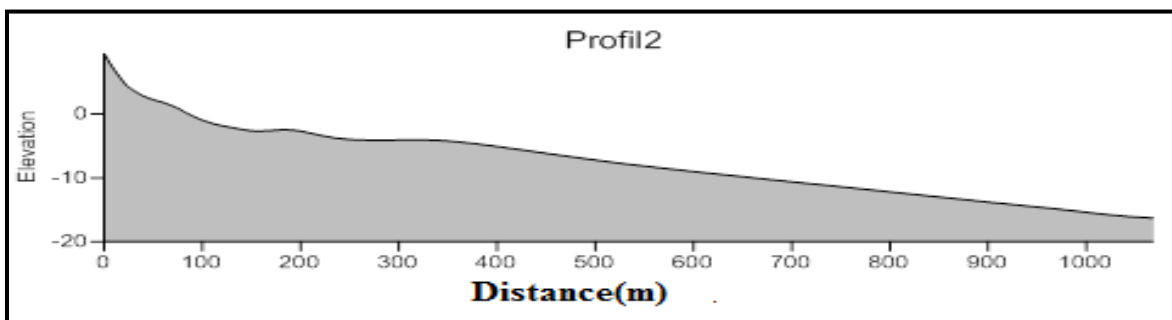


Figure IV.19: Profil bathymétrique n°2

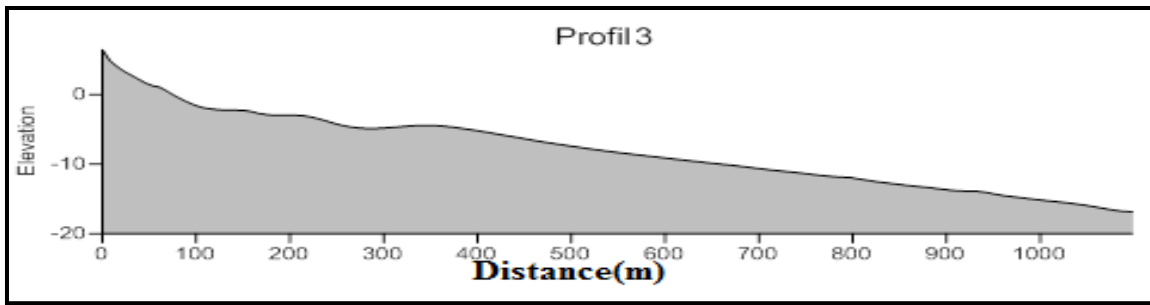


Figure IV.20 : Profil bathymétrique n°3

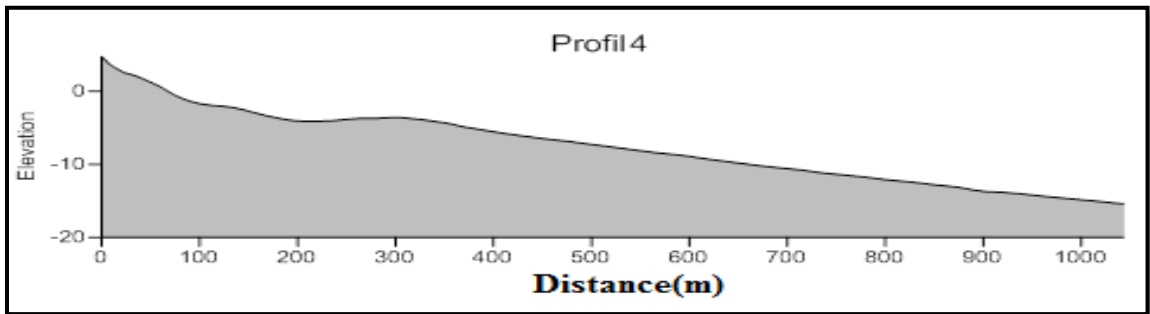


Figure IV.21: Profil bathymétrique n°4

- **Profil 1 et 2 (partie Ouest)**

Le niveau marin commence à 2 ou 3 m de profondeur ; il est représenté par un replat s'étendant sur 80 m par rapport à la côte. Il entame sa descente avec une pente estimée à 4% jusqu'à environ 7 ou 8 m de profondeur puis s'accroît en poursuivant sa descente vers le large avec une pente moyenne de 8%.

- **Profil 3**

Le profil descend en pente douce jusqu'à 2 m de profondeur, on distingue une cavité étroite, à 270 m de la côte et d'une pente assez douce estimée à 3%.

- **Profil 4 (Partie Est)**

Le profil évolue normalement en pente douce de 4%, elle s'adoucit à partir de 5 mètres de profondeur où la pente est estimée à 0,8% jusqu'à 8 m de profondeur. Une cavité observée à 140 m de la côte. Au-delà de 8 m de profondeur la pente moyenne est de 3,5%.

Conclusion

D'une manière générale, la morphologie sous-marine du site se caractérise par un talus à pente moyenne évaluée à 5% jusqu'à environ 6 m de profondeur, cette pente s'accroît vers le large et atteint une moyenne de 10% avec toutefois la présence de rides d'avant côtes et des fosses peu profondes à l'approche de la côte.

CHAPITRE V :
TRANSPORT SEDIMENTAIRE

1. Introduction

Sous l'action des courants, des houles et des vents, agissant seuls ou se superposant les uns aux autres, les particules solides qui forment les sédiments que l'on rencontre dans les fleuves, les estuaires et le long des littoraux, peuvent être arrachées des fonds, entraînées en suspension ou en charriage sur des distances plus ou moins grandes et déposées dans les zones calmes.

De nombreux processus physiques contrôlent le transport sédimentaire. Ce transport sédimentaire dépend de l'intensité et de la structure des courants dans la colonne d'eau.

Il résulte des déplacements alternatifs des sédiments suivant les deux directions propres au littoral. La direction longitudinale localement parallèle au trait de côte et la direction transversale localement perpendiculaire au trait de côte.

La variation spatiale des taux de transport entraîne des phénomènes d'érosion ou d'accrétion, avec des conséquences importantes pour la gestion du littoral. Il est nécessaire de construire des outils de modélisation permettant de prédire précisément les taux de transport et les évolutions morphodynamiques qui en résultent.

Les interventions humaines, qu'elles soient dues à la réalisation d'ouvrages portuaires, à des dragages ou des extractions d'agrégats, à des barrages sur les rivières, à la protection des bassins versants contre les dégradations des sols ou à des aménagements touristiques littoraux... pourront augmenter les risques de ce déséquilibre sédimentaire et créer ou accentuer certains phénomènes d'érosion et de sédimentation s'ils n'ont pas été soigneusement étudiés dans un contexte général d'aménagement du littoral.

2. Les agents du transport sédimentaire

Le transport sédimentaire littoral se fait par voie maritime sous l'effet de la houle et du courant et sous forme éolienne.

- **La houle** : est le principal acteur responsable du transport des sédiments le long des rivages. Son action dépend du type du littoral et de l'obliquité de sa propagation par rapport à la direction générale du trait de côte. Elle se manifeste par deux mécanismes qui sont le transport par jet de rive et le transport par courant littoral.
- **Le courant** : les houles de cambrure importante déferlent avant d'arriver sur le haut de plage. Leur courant de retour crée alors une barre de sable parallèle au rivage. En déferlant sur cette barre, l'eau remet le sable en suspension et l'entraîne dans le

canal formé entre la barre et la plage. Les sédiments sont ensuite emportés par charriage et suspension par le courant littoral qui circule dans ce canal.

- **Le vent** : lorsque la vitesse du vent atteint un seuil critique, les grains d'une surface de sable sec non consolidée commencent à bouger. Si la vitesse du vent augmente, le sable se déplace alors en nuages dont la partie supérieure est bien délimitée. L'essentiel du mouvement du sable se situe à proximité du sol, et la plupart des grains de sable ne s'élèvent pas beaucoup en l'air.

Ainsi, le transport du sable par le vent se fait essentiellement par saltation, dans une moindre mesure par charriage, et relativement peu par mise en suspension.

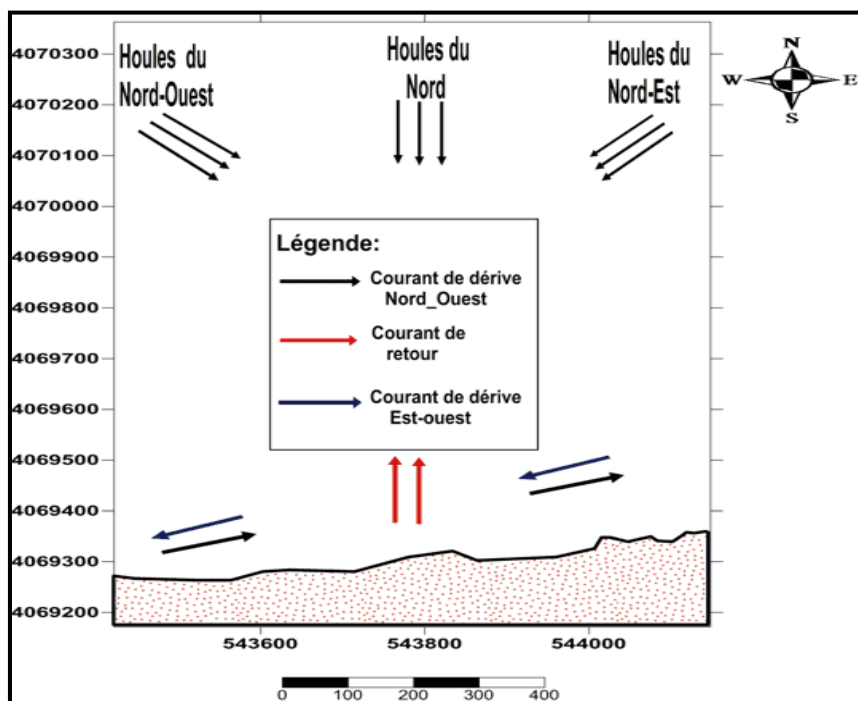


Figure V.1 : Schéma probable de la dynamique sédimentaire de notre zone d'étude.

3. Les différents modes du transport sédimentaire

Il existe trois modes de transport des particules : le roulement ou charriage, la saltation et la suspension. Ces trois modes peuvent être simultanés et les particules concernées par chaque mode dépendent des conditions d'écoulement (i.e. contrainte de cisaillement sur le fond).

- **Le transport par roulement ou charriage** concerne les grains de la couche superficielle des sédiments non-cohésifs qui roulent sur le fond dans le sens de l'écoulement jusqu'à trouver une nouvelle position d'équilibre. Ce mode de

transport se produit essentiellement lorsque la contrainte de frottement est proche de la contrainte critique de mouvement.

- **Le transport par saltation** apparaît lorsque le seuil de mouvement est dépassé. L'impulsion fournie par le fluide fait sauter les particules au-dessus du fond suivant une trajectoire balistique. La hauteur maximale atteinte par les grains est de l'ordre de grandeur du diamètre de celle-ci.
- **Le transport en suspension** se produit lorsque l'écoulement est suffisamment fort pour maintenir en suspension les particules sans que celles-ci ne se redéposent. Les particules concernées par ce mode de transport sont les sables, les silts et les argiles. La taille et le poids des particules transportées sont en relation directe avec l'intensité de l'écoulement.

Lorsque les forces hydrodynamiques dominent, on parle de transport en suspension.

C'est généralement le cas du transport des sédiments fins. Lorsque la force de gravité est suffisamment grande pour confiner le transport dans une couche à la surface du lit de grains, on parle de charge de fond. Ce type de transport concerne les sédiments les plus grossiers (sable, galets, blocs rocheux).

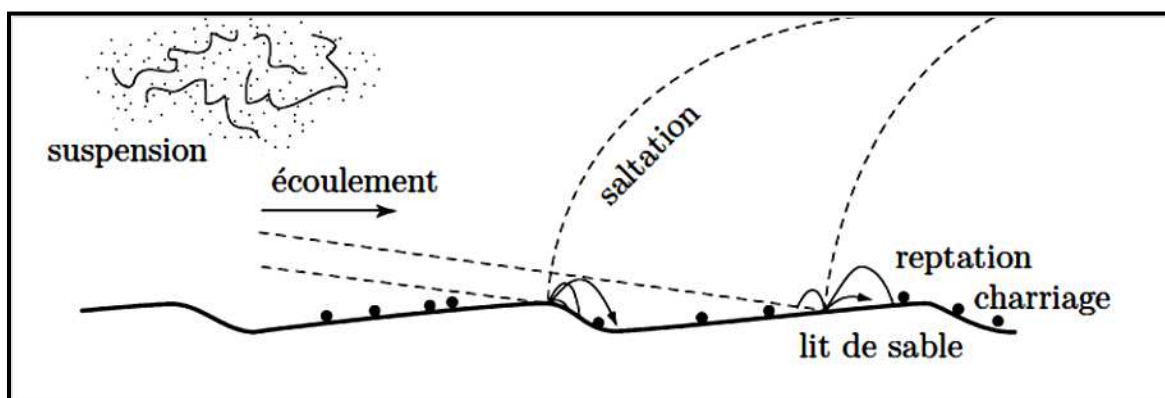


Figure V.2 : Les trois modes de transport sédimentaire (Fourrière. A, 2010)

4. 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. Enfin, 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 des dunes.

Tableau V.1 : Ramette à effectué une classification en fonction des paramètres R^* et τ^*

lit au repos	lit plat	Rides	dunes	Suspension	
τ^*	< 0.03	de 0.03 à 0.055	> 0.03	> 0.055	début > 0.25 total > 2.5
R^*		> 10	> 10	> 16	

4.1. Les 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_o ou la vitesse de cisaillement.

$$\tau_0 = A(\rho_1 - \rho_0)Dg$$

Avec : A : paramètre compris entre 0.04 et 0.06.

D : diamètre du grain.

$$U_* = \sqrt{\tau_0 / \rho} \quad \text{V.1}$$

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

4.2. Le 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

$$G = \left(\frac{\rho'gD^3}{\nu^2} \right) \quad \rightarrow \quad D^* = \left(\frac{\rho'g}{\nu^2} \right)^{1/3} D \quad \text{V.2}$$

ρ : densité spécifique du matériaux.

ν : viscosité de fluide.

- Nombre de Reynolds de frottement:

$$R^* = U^*D/\nu \quad \text{V.3}$$

U^* : vitesse de cisaillement.

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

$$D^* = f(R^*) \quad \text{V.4}$$

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

$$S_1 R^* < 12, D^* = 2$$

$$S_1 12 < R^* < 100$$

$$S_1 R^* > 1000, D^* =$$

Remarque : la valeur critique de $R^*=12$ est atteinte quand le diamètre du grain est égal à l'épaisseur de la couche limite définie par : $U^*e/\nu \approx 12$

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

5. 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 (Gerard, 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 remontés 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.

6. Transport sédimentaire par jet de rive

En déferlant, les lames arrachent des sédiments au fond et les ramènent en surface vers le haut de plage dans la direction de propagation de la houle. Après le déferlement, l'eau redescend sur la plage en entraînant les sédiments selon la ligne de plus grande pente (**figure V.3**). Ainsi, sous l'action de lames déferlantes obliques, les sédiments suivent un chemin en dents de scie et progressent parallèlement au rivage dans le sens d'obliquité de la houle.

L'efficacité de ce mode de transport dépend de l'obliquité de la houle mais aussi de son énergie au moment du déferlement. Il est très important si la houle ne déferle pas avant d'arriver sur la plage, ce qui implique que sa cambrure soit suffisamment faible.

7. Transport sédimentaire par courant littoral

Les houles de cambrure importante déferlent avant d'arriver sur le haut de plage. Leur courant de retour crée alors une barre de sable parallèle au rivage. En déferlant sur cette barre, l'eau remet le sable en suspension et l'entraîne dans le canal formé entre la barre et la plage. Les sédiments sont ensuite emportés par charriage et suspension par le courant littoral qui circule dans ce canal.

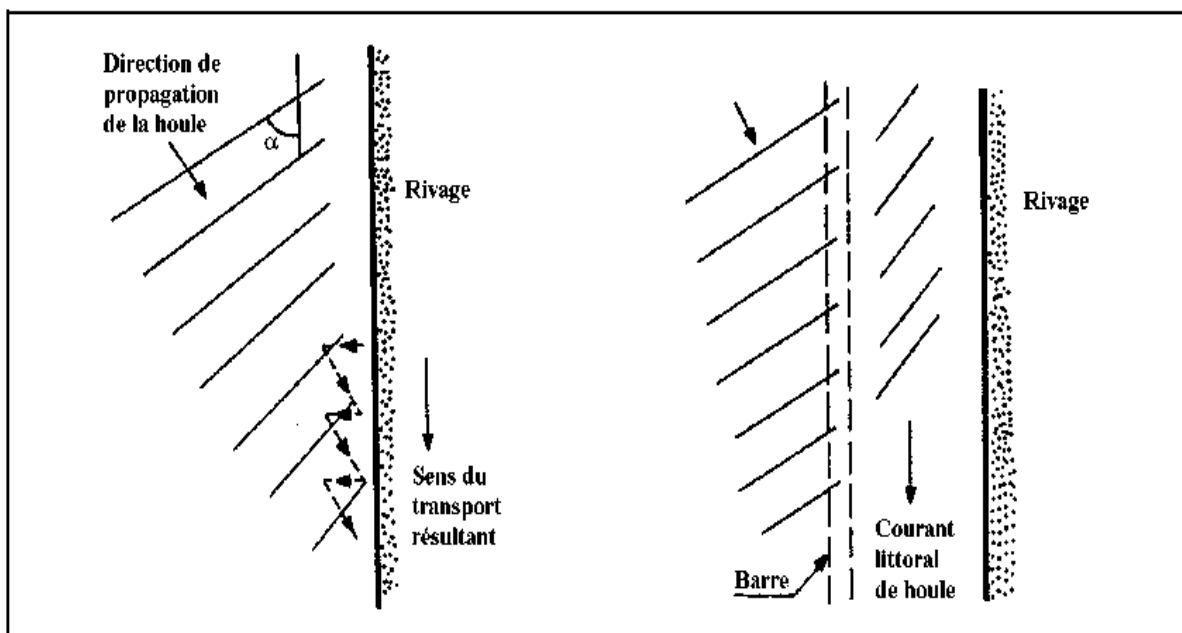


Figure V.3 : Schéma des transports par jet de rive et par courant littoral (Jean Bougis, 2000).

8. Quantification du débit solide

Il existe deux (02) 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.

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

8.1. 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.

$$S = 2.27(Hb_r)^2 \cdot (T)^{1.5} \cdot (\beta)^{0.75} \cdot (d)^{-0.25} \cdot (\sin 2\alpha_0)^{0.6} \quad V.5$$

Avec : $S = 2.27(Hb_r)^2$

S: débit solide (m³/an)

H_{br}: hauteur de la houle au déferlement (m).

T : période de la houle (s).

β : pente de la plage (°).

d : diamètre moyen du grain (m).

α₀ : 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. Les résultats obtenus

Ces résultats sont regroupés dans le tableau **V.2** et **V.3**.

Ces tableaux 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 constatons 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**.

Tableau V.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} (°)	Hbr (m)	S (m ³ /an)	θ_{br} (°)	Hbr (m)	S (m ³ /an)	θ_{br} (°)	Hbr (m)	S (m ³ /an)	θ_{br} (°)	Hbr (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

Tableau V.3 : Transit littoral total selon la formule de Kamphuis (1991) :

Direction de compas.	θ_0 (°)	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

8.2 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.

$$Q_t = 0,025 \cdot H_{br} \cdot n_{br} \cdot C_{br} \cdot \sin(2\theta_{br}) \quad V.6$$

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 **V.4** et **V.5**, que la direction dominante du transit sédimentaire dans la région de Boumerdés, 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

repartit 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 dus aux houles du secteur Nord (50°, 60°). Cette valeur du transit littoral net reste élevée et ne représente pas les quantités réelles qui transitent le long de la zone. La raison en Est que la valeur de la constante K utilisée reste trop élevée, ne convient pas à la morphologie de la zone de Boumerdés.

Généralement, ces valeurs obtenues pour la période de 11 secondes (période des tempêtes) se produisent rarement.

8.3. 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 en 1971 annonce que : $S = S_b + S_s$.

S_b : transport par charriage qui s'écrit :

$$S_b = b \cdot D_{50} \frac{V}{C} \sqrt{g e^*}$$

$$\text{Avec : } x : x = (-0.27 \Delta D_{50} C^2) / (\mu V^2 \cdot 1 + 1/2 (\xi \cdot U_b / V)^2) \quad V.7$$

$$= -0.27 \Delta D_{50} / \mu / g \cdot U^2$$

Ou :

S_b : Transport par charriage (m³ / 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 :

$$S_s = 1.83 S_b [I_1 \cdot \ln(33d/\gamma + I_2)] \quad \text{V.8}$$

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

$$V = 5\pi/8 \xi m/cf U m \sin \alpha \quad \text{V.9}$$

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 : $V_1 = 2.7 U m \sin \alpha b \cos \alpha b$.

Puis modifier par Komar en 1979.

$$V_1 = 1.17(gHb)^{1/2} \sin \alpha b \cos \alpha b \quad \text{V.10}$$

b. Résultats obtenus

L'analyse de ces tableaux (**V.6** et **V.7**) montre que la direction du transit sédimentaire dominant dans la région de Boumerdès, se fait d'Est vers l'Ouest avec un débit solide net d'environ **10075.10 10⁻⁶ m³/s** (317725 m³/an). Ce transport se répartit en un transport brut vers l'Ouest d'environ de 368546 m³/an et un transport brut vers l'Est de l'ordre de **50804 m³/an**.

Chapitre V : transport sédimentaire

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.

Tableau V.4 : Transit littoral selon la formule de CERC (1971).

Direction de compas (°).	θ° (°)	T = 6s Qt (m ³ /an)	T = 8s Qt (m ³ /an)	T = 9s Qt (m ³ /an)	T = 11s Qt (m ³ /an)	Total.
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 V.5 : 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}	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

Chapitre V : transport sédimentaire

Tableau V.6 : 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 V.7 : 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

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

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

Tableau V.8: 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 Boumerdès.

Du fait que ces deux formules sont basées 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 (Hs) de la houle au lieu de ($H_{rms} = 1/\sqrt{2} \cdot H_s$). Donc il conviendrait de diviser la valeur de la constante par deux (2).

Donc le transit obtenu par la formule du CERC 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 Boumerdès.

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 Boumerdès.

Pour bien quantifier ce transit, il faut déployer une instrumentation lourde et coûteuse (traceurs radioactifs ou des pièges à sédiments) et procéder par la suite à une comparaison entre débit calculé et mesuré.

9. Modélisation du transport sédimentaire

9.1. Calcul des tendances du 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 V.9**).

Tableau V.9: 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	(McLaren & 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) .

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 (Sk) 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

- $\mu_1 \geq \mu_2 \quad \sigma_1 \geq \sigma_2 \quad Sk_1 \leq Sk_2$
- $\mu_1 \leq \mu_2 \quad \sigma_1 \geq \sigma_2 \quad Sk_1 \geq Sk_2$
- $\mu_1 \geq \mu_2 \quad \sigma_1 \geq \sigma_2 \quad Sk_1 \geq Sk_2$
- $\mu_1 \leq \mu_2 \quad \sigma_1 \geq \sigma_2 \quad Sk_1 \leq Sk_2$
- $\mu_1 \geq \mu_2 \quad \sigma_1 \leq \sigma_2 \quad Sk_1 \leq Sk_2$
- $\mu_1 \leq \mu_2 \quad \sigma_1 \leq \sigma_2 \quad Sk_1 \geq Sk_2$
- $\mu_1 \geq \mu_2 \quad \sigma_1 \leq \sigma_2 \quad Sk_1 \geq Sk_2$
- $\mu_1 \leq \mu_2 \quad \sigma_1 \leq \sigma_2 \quad Sk_1 \leq Sk_2$

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

Tableau V.10 : Relations entre les paramètres granulométriques (en unité F) de deux stations A et B, pour un transport sédimentaire de A vers B, de type FB- et CB+.

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).	$\mu_1 \geq \mu_2$ $\sigma_1 \geq \sigma_2$ $Sk_1 \leq Sk_2$

9.2. Limites du calcul des tendances de transport sédimentaire

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

$$\mu = \sum fm/n, \sigma = \sqrt{\frac{\sum fm(m-x)^2}{100}}, SK = \frac{\sum fm(m-x)^3}{100 \cdot S_0^3} \quad V.11$$

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 V.10**), 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.

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

1-Préparation du fichier input on fait introduire les points de prélèvement (altitude + longitude) associés par leurs diamètres moyens D_{50} et les indices Sk et So dans un tableur Excel (figure V.4).

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	100	1,00	250,00					
2	1	543 549,00	4 069 275,00	290,10	1,30	1,10		
3	2	543 552,94	4 069 313,02	291,90	1,30	1,10		
4	3	543 545,49	4 069 364,43	284,40	1,30	1,10		
5	4	543 538,55	4 069 412,48	206,40	1,20	1,00		
6	5	543 531,36	4 069 460,51	229,50	1,30	1,00		
7	6	543 522,93	4 069 510,08	217,40	1,20	1,00		
8	7	543 513,96	4 069 567,97	218,20	1,20	1,00		
9	8	543 565,00	4 069 574,00	236,10	1,30	1,00		
10	9	543 573,00	4 069 517,00	226,80	1,30	1,00		
11	10	543 580,00	4 069 466,00	220,50	1,30	1,00		
12	11	543 588,00	4 069 418,00	225,20	1,30	1,00		
13	12	543 595,00	4 069 371,00	279,70	1,30	1,10		
14	13	543 603,00	4 069 320,00	294,10	1,30	1,10		
15	14	543 609,00	4 069 280,00	286,00	1,30	1,00		
16	15	543 658,00	4 069 289,00	284,20	1,30	1,10		
17	16	543 652,00	4 069 328,00	305,60	1,30	1,10		
18	17	543 644,00	4 069 377,00	205,40	1,20	1,00		
19	18	543 637,00	4 069 425,00	223,20	1,30	1,00		
20	19	543 630,00	4 069 473,00	230,20	1,20	1,00		
21	20	543 622,00	4 069 527,00	228,60	1,20	1,00		
22	21	543 614,00	4 069 586,00	220,90	1,20	1,00		
23	22	543 663,00	4 069 593,00	237,60	1,20	1,10		

Figure V.4 : les données d'entrées dans le modèle GSTA sous Excel.

2-Puis ouvrir ce fichier avec Surfer 11 et enregistrer le sous forme (.dat).

3-Ouvrir GSTA.exe pour introduire le fichier input (boumerdes.dat), ensuite nommer le fichier output (resultat) (voire la figure V.5).



Figure V.5 : conception du fichier "Output"

4-Ouvrir le fichier output (figure V.6), ensuite enregistrer ce dernier sous forme Excel pour manipuler avec le logiciel Surfer 11.

6-Ouvrir avec Surfer 11 le fichier output (résultat) pour crée les différents fichiers Grid(Long, dir).

7-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 de la hauteur significative.

RESULTAT - Notepad2 (Administrateur)

Fichier Edition Affichage Paramètres ?

OUTPUT DATA

TRENDS OF TYPES 1 AND 2

DC = 250.0

NUMBER	POSITION	LENGTH	DIRECTION (N)
1	543559.01 4069274.90	7.10	44.41
2	543552.93 4069313.10	7.14	44.59
3	543545.48 4069364.30	6.10	53.64
4	543538.57 4069412.30	5.59	62.21
5	543531.35 4069460.60	4.99	76.57
6	543522.95 4069510.10	6.00	93.49
7	543513.95 4069567.90	7.17	107.65
8	543564.97 4069573.80	6.11	115.80
9	543573.02 4069516.90	4.74	98.36
10	543579.99 4069465.90	4.24	70.15
11	543587.98 4069418.00	4.40	61.42
12	543595.01 4069370.90	5.27	54.11
13	543603.00 4069319.90	6.61	36.60
14	543609.02 4069280.00	6.27	41.76
15	543658.01 4069288.90	6.41	31.73
16	543651.99 4069328.00	5.96	35.07
17	543644.01 4069376.80	4.42	55.55
18	543636.97 4069424.80	3.82	62.85
19	543630.00 4069472.80	3.98	69.06
20	543622.01 4069527.00	4.17	91.41
21	543613.97 4069586.00	5.80	118.48
22	543663.02 4069592.90	5.62	114.25
23	543671.01 4069535.10	4.10	87.49
24	543678.99 4069480.00	4.29	66.43
25	543685.97 4069432.00	4.23	59.05
26	543694.01 4069381.00	4.39	53.07
27	543700.99 4069334.80	5.64	36.00
28	543705.99 4069297.00	5.98	30.53
29	543753.98 4069308.00	5.58	30.47
30	543748.97 4069345.80	4.98	43.13
31	543743.01 4069392.00	4.25	55.96
32	543735.02 4069443.00	4.33	66.08

Figure V.6 : Le fichier output réalisé par le modèle GSTA.

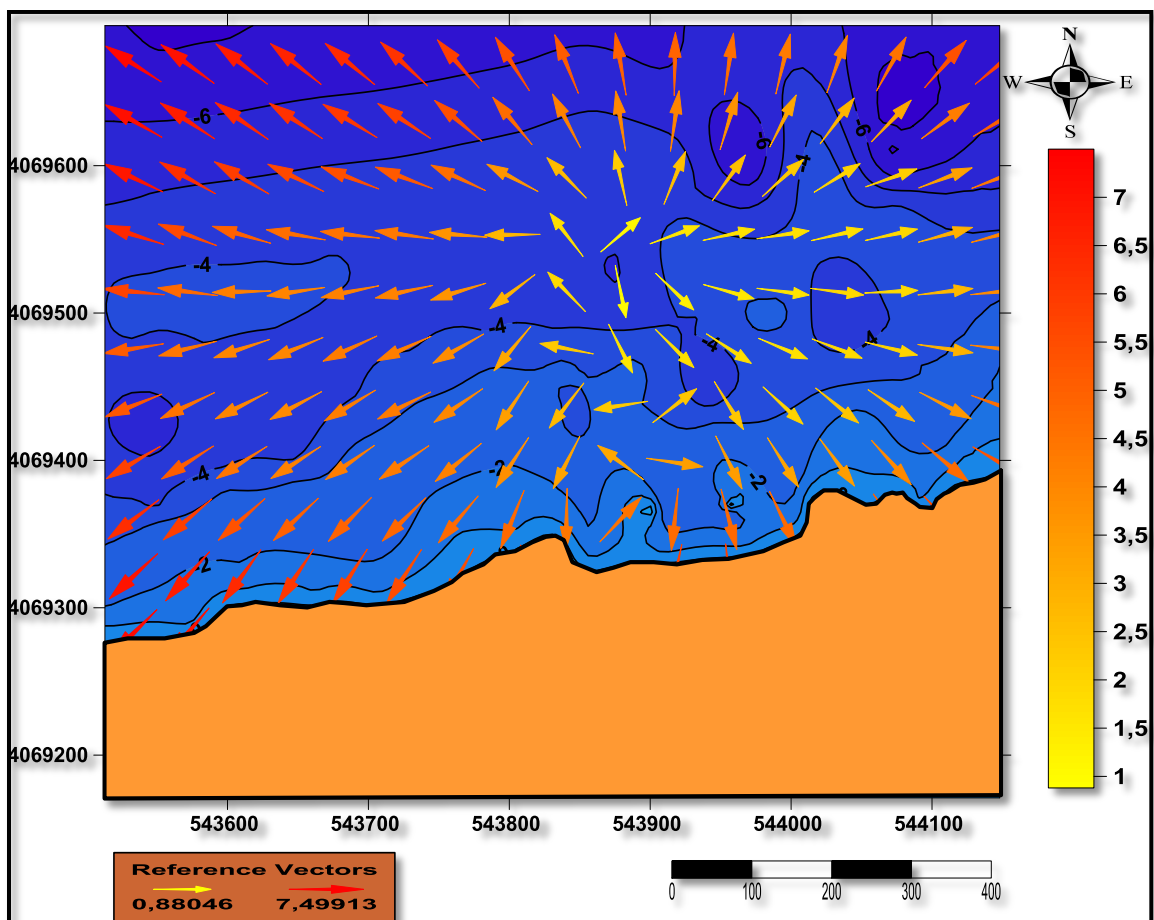


Figure V.7 : Modélisation du transport sédimentaire par le modèle GSTA (Boualili, 2015)

9.4. Interprétation des résultats

La carte des vecteurs résiduels (**figure V.7**), montre que la plage de Boumerdès se caractérise par une forte dynamique sédimentaire.

A partir des résultats obtenus de la modélisation du transport sédimentaire avec le modèle de McLaren / Gao et Collins, nous déduisons Le transit sédimentaire le plus dominant s'effectue de l'Est (Rocher Noir) vers l'Ouest (oued Tatareg).en plus il y a aussi la présence d'un transit sédimentaire qui s'effectue 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.

Conclusion

Les résultats obtenus par les différentes techniques et méthodes de calcul du transit littoral confirment que la plage de Boumerdès est un siège d'une dynamique sédimentaire active, ainsi un transit littoral dominant de l'Est vers l'Ouest.

Toutes les études qui ont été faites suivant différentes méthodes déjà citées, nous ont orienté sur le type de protection qu'on va utiliser pour la protection et la gestion de notre site d'étude.

CHAPITRE VI :
TECHNIQUES ET METHODES DE
PROTECTION CONTRE L'EROSION

1. Introduction

Actuellement le pourcentage des côtes meubles d'érosion atteint 20 à 40% selon les pays. Lorsque l'Homme, par des aménagements inconsidérés, n'est pas la cause première de l'érosion, celle-ci s'explique par l'action des facteurs naturels sur le milieu. La remontée progressive du niveau marin est de l'ordre de 1.5 à 2 mm/an, ce qui correspond à une perte de sédiments de 1 à 3 m³/ml/an (Sogreah, 1990).

L'agitation engendre des mouvements sédimentaires dans les profils de plage prélevant 50 à 500 m³ de sable par mètre linéaire et par an, ainsi que des transports par dérive littorale.

Les courants et les vents, dont l'action de déflation concerne 2 à 10 m³/ml/an, jouent également un rôle important dans le déplacement des sédiments.

Sans intervention, la disparition de nombreux secteurs littoraux est donc inéluctable et l'Homme tente de lutter contre l'érosion, processus naturel qui vient menacer des zones d'habitation ou des secteurs d'intérêt économique, touristique ou écologique.

La diversité des phénomènes à l'origine de l'érosion littorale conduit à une diversité de moyens de protection qui ne s'opposent pas forcément les uns aux autres, mais sont souvent complémentaires. En effet, pour améliorer l'efficacité des interventions de protection, on adopte souvent des défenses de natures mixtes (aménagement d'épis stabilisateurs et engraissement avec des matériaux naturels).

On distingue ainsi les réponses techniques basées sur :

_ **Les méthodes « passives »** (aménagements statiques) basées sur la construction d'ouvrages lourds en mer et sur le rivage. Ces ouvrages demandent un investissement plus élevé que les solutions qui composent avec le milieu, mais leur cout d'entretien est plus faible.

_ **Les méthodes « actives »** (aménagements dynamiques) utilisant et agissant sur les matériaux naturels. Ces méthodes sont plus généralement dénommées méthodes « douces ». Ces techniques sont utilisées de préférence à des ouvrages massifs, car d'une part leur impacts sur l'environnement sont sans comparaison avec des ouvrages massifs et d'autre part, ils sont moins onéreux à l'investissement, mais coutent plus chers à l'entretien.

2. Nécessité d'une étude d'aménagement

Notre site d'étude est en état d'érosion, afin de le protéger une étude d'aménagement est nécessaire pour essayer de cesser l'érosion.

Notre objectif principal est la mise en œuvre des moyens de protection avant que la situation ne devienne catastrophique.

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.

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 ou freiner les processus côtiers.

3.1. La première variante

Elle comporte une série de trois brise-lames immergés en enrochements.

3.1.1. Les brise-lames

Il s'agit d'ouvrages dont l'axe principal est orienté parallèlement, ou est peu incliné, par rapport à la côte. Ils ont pour but de provoquer une dissipation de l'énergie de la houle avant son déferlement sur la plage et de s'opposer à l'entraînement vers le large des matériaux.

Cet ouvrage exerce deux types d'action sur les houles arrivant à la cote :

- Il diminue l'énergie des houles atteignant le plan d'eau et la zone côtière situés à son abri en réfléchissant ou absorbant l'énergie des houles qui le frappent directement.
- Il provoque la diffraction à ses extrémités ce qui entraîne une modification du tracé des orthogonales et des crêtes de houle en arrière de l'ouvrage.

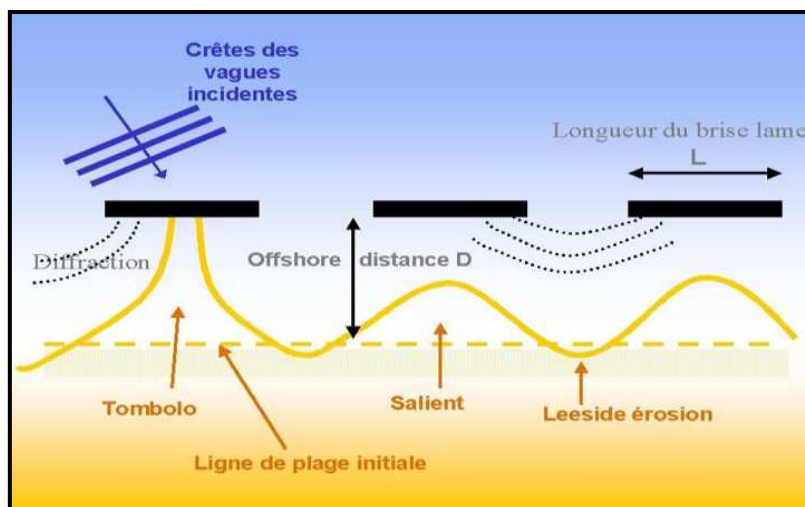


Figure VI.1 : Schématisation de l'action des Brise-lames (Caminades, 1995 modifié)

3.1.2. Dimensionnement

3.1.2.1. La distance de la brise lame par rapport à la côte L_c

Des études faites par LCHF montrent que pour qu'un brise-lame puisse provoquer la formation d'un tombolo se raccordant à l'ouvrage, il faut que les limites d'expansion de la houle, issues de chacune des extrémités de l'ouvrage, se croisent sur le trait de côte, ce qui conduit dans le cas d'une houle normale à la côte, à la relation :

Avec :

$$l > 1.2 (L_c + 0,3 L)$$

VI.1

l : longueur de brise- lame.

L_c : distance de brise lame à la cote.

L : longueur d'onde de la houle au point considéré.

Le CERC montre que la formation d'un tombolo peut habituellement être évitée si $l < l_c$. En revanche, si la longueur de l'ouvrage devient supérieure à sa distance à la côte, la probabilité de formation d'un tombolo augmente, et pour $l > 2 l_c$, un tombolo se forme.

Avec :

$$L_0 = 1,56 T^2 \quad \text{et que } T = 11,96 \text{ s}$$

VI.2

L_0 : la longueur d'onde au large

AN : $L_0 = 1,56 (11,96)^2$ donc $L_0 = 223,144 \text{ m}$

$L_c = L/2$

AN : $L_c = 223.144/2$ donc

$$L_c = 111 \text{ m}$$

3.1.2.2. La longueur du brise- lame

C'est à partir de la longueur d'onde qu'on va déduire la longueur du brise-lame.

On a au large :

$$L_0 = 1,56 T^2 \quad L_0 = 223,144 \text{ m}$$

Au pied de l'ouvrage :

$$L = \frac{g T^2}{2\pi} \tanh \sqrt{\left(\frac{4\pi^2 d_p}{T^2 g} \right)}$$

VI.3

L : La longueur d'onde au pied de l'ouvrage

d_p : la profondeur au pied de l'ouvrage

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

A la côte : $I > 1,2 (Lc + 0,3 L)$

La distance de brise-lame par rapport à la cote est : $lc=111\text{m}$

AN: $I > 1,2(111 + 0,3 \times 64)= 156\text{m}$

$I > 156\text{m}$

- On a choisi **$I=160\text{m}$** .

-Donc la longueur du brise-lames $I = 160\text{m}$

3.1.2.3. Espacement entre deux brises- lames

Le LCHF recommande pour qu'il n'y ait pas d'érosion du rivage entre deux brises lames successifs un espacement entre eux tel que :

$e < 0.83 Lc + 0.5 L$

VI.4

Application numérique

$Lc=111\text{m}, L=64\text{m}$ → $e < 124\text{m}$ donc : $e=110\text{m}$.

3.1.2.4. Hauteur de la houle au pied de l'ouvrage

A partir de l'abaque représenté au niveau de la (figure. VI.2), on va déterminer la hauteur H_b de dimensionnement de l'ouvrage.

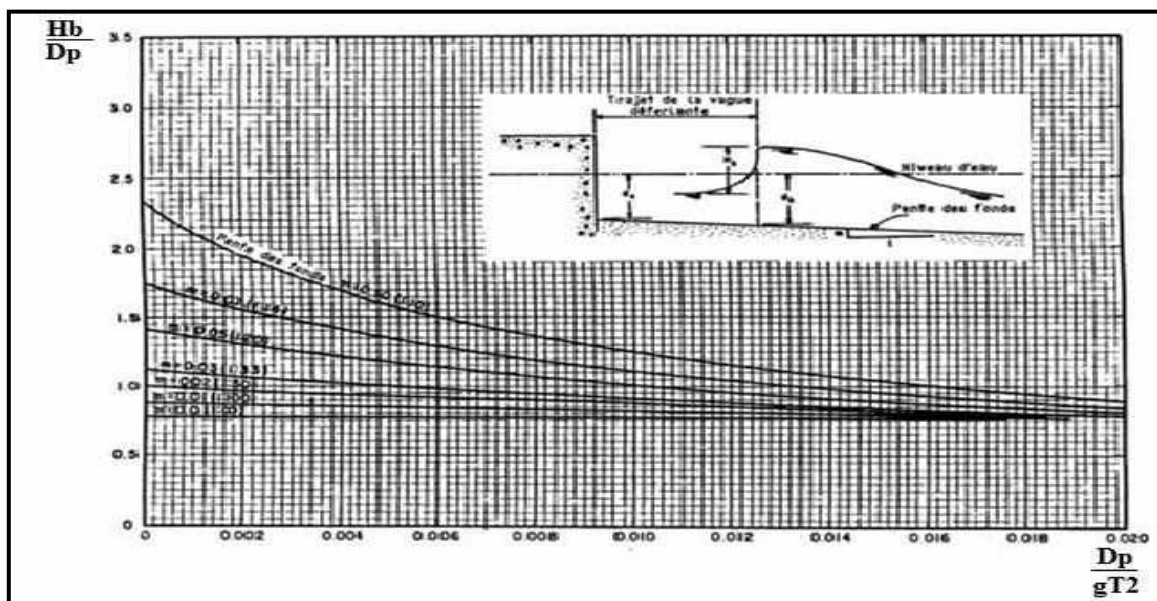


Figure VI.2 : Hauteur maximale de déferlement en fonction de la profondeur en pied de l'ouvrage (D'après Waggel, 1972).

Le calcul de H_b :

On a :

D_p : La profondeur au pied de l'ouvrage, $D_p = 3m$.

g : La force de gravité, $g=9,81$.

$$AN : \frac{D_p}{gT^2} = \frac{3}{9,81.(11,98)^2} = 0,002.$$

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

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

Donc : $H_b = D_p \times 1$.

AN : $H_b = 3 \times 1 = 3$.

Donc **$H_b = 3$**

3.1.2.5. La largeur en crête du brise-lames (B)

La largeur en crête du brise-lames est calculée par la formule suivante :

$B=3 \times 4$ donc $B=12m$

$B = H_b \times 4$

3.1.2.6. La hauteur du brise-lames

La hauteur à donner à un brise-lames dépend de l'objectif poursuivi, dans la mesure où son efficacité dépend en grande partie de sa côte d'arase, qui conditionne la hauteur des houles qui le franchissent sans déferler.

Pour un brise-lames submersible, on peut estimer que l'amortissement de la houle qu'il provoque est égal à 50% si l'ouvrage est arasé à une cote voisine du niveau de l'eau au repos.

Dans notre zone d'étude, Nous avons choisis la hauteur de la surface libre de l'ouvrage ($F= -0,5m$) à une profondeur (H_b) de 3m, alors la hauteur **$h=2,5m$** .

3.1.2.7. Stabilités des ouvrages de protection

Globalement les ouvrages à talus comprennent au minimum 3 couches de matériaux de granulométrie différente ayant des fonctions bien spécifiques. La carapace en enrochements naturels ou artificiels à fort indice de vides support directement l'action de la houle, le noyau (généralement massif en tout venant) constitue le corps de la digue, enfin le filtre disposé entre le noyau et la carapace, assure la transition entre ces 2 couches et le poids des ses éléments ne doit pas être inférieure 1/10 de ceux constituant la carapace.

❖ La carapace

C'est la partie déterminante pour la stabilité de la digue. Le poids unitaire W des blocs est déterminé par la formule d'HUDSON.

a- Le poids de la carapace

$$w = \frac{\gamma_s \cdot H^3}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right)^3 \cdot KD \cdot \cot \alpha}$$

VI.5

Avec :

W : poids unitaire des blocs de la carapace en tonne (t).

γ_s : densité du matériau du bloc en (t/ m³).

γ_w : densité de l'eau de mer (1,026 t/ m³).

H : hauteur de la houle de dimensionnement en (m).

α : angle du talus en enrochements.

KD : coefficient adimensionnel qui dépend de la nature du bloc, du type d'aménagement et de la pente.

On prenant :

H = 3 m.

$\cot \alpha = 3/2$.

KD = 3,5

$\gamma_s = 2,65 \text{ t/m}^3$.

$\gamma_w = 1,026 \text{ t/ m}^3$

• Application numérique
$$W = \frac{2,65 \cdot (3)^3}{\left(\frac{2,65}{1,026} - 1\right)^3 \cdot 3,5 \cdot 1,5}$$

$$W = \frac{71,55}{20,81} = 3,438 \text{ t} \text{ Donc } w = 3,44 \text{ t.}$$

b. L'épaisseur de la carapace

L'épaisseur de la carapace est déterminée par la formule suivante :

$$e = n \cdot Kt(W \cdot \gamma_s)^{1/3}$$

Kt : coefficient de couche (1,15 pour l'enrochement anguleux).

n : nombre de couche (n=2).

γ_s : densité du matériau du bloc en (t/ m³) (2.65t/m³).

- **Application numérique**

$$e = 2.1,15.(3,44/2,65)^{1/3}.$$

$$e = 2,50\text{m.}$$

❖ **Partie musoir**

b. Le poids (Partie musoir)

En prenant :

$$H = 3 \text{ m.}$$

$$\cot \alpha = 3/2.$$

$$\gamma_s = 2,65 \text{ t/m}^3.$$

$$\gamma_w = 1,026 \text{ t/m}^3$$

-Mais pour cette partie on prend $KD=2,5$.

$w = \frac{\gamma_s \cdot H^3}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right)^3 \cdot KD \cdot \cot \alpha}$
--

- **Application numérique**

$$w = \frac{2,65 \cdot (3)^3}{\left(\frac{2,65}{1,026} - 1\right)^3 \cdot 2,5 \cdot 1,5}$$

$$W = \frac{71,55}{14,87} = 4,81 \text{ t} \quad \text{donc} \quad w = 4,81 \text{ t.}$$

b. L'épaisseur (Partie musoir)

- **Application numérique**

$$e = 2.1,15.(4,81/2,65)^{1/3}.$$

$$e = 2,8\text{m.}$$

❖ **La première sous couche**

a. Le poids de la première sous couche

Le poids de la première sous couche est donnée par la formule suivante :

$W_{moy} = W_c$

VI.6

- **Application numérique**

$$W_{moy} = 3,44 / 10 \quad \text{Donc} \quad W_{moy} = 0,34 \text{ t}$$

b. L'épaisseur de la première sous couche

$$e = n \cdot Kt(W_{moy}/\gamma_s)^{1/3}$$

- **Application numérique**

$$e = 2.1,15.(0,34/2,65)^{1/3}$$

$e=1,16m$ donc $e=1m$.

On résume les résultats de dimensionnements dans le tableau VI.1.

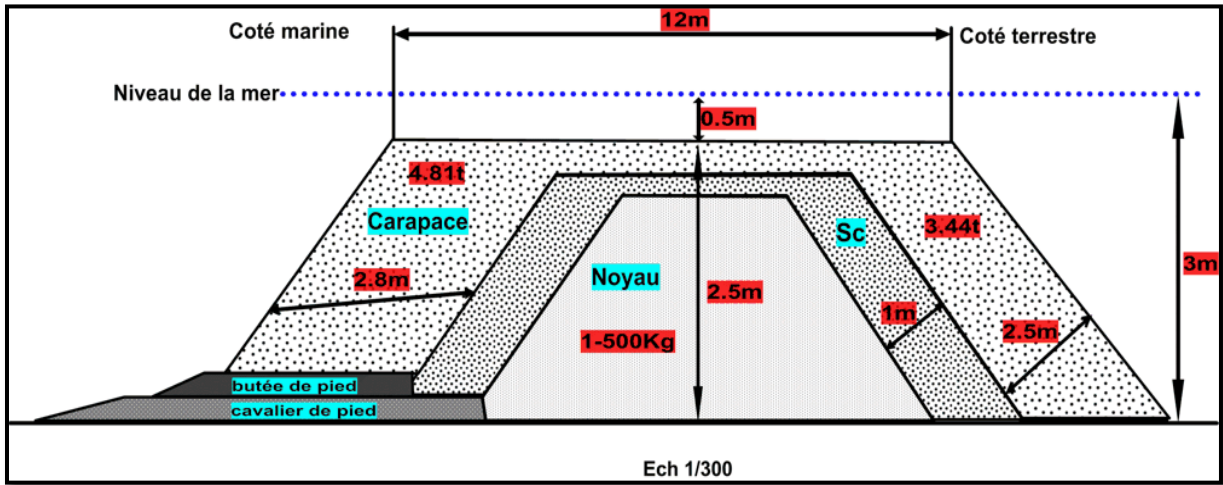


Figure VI.3 : Schéma du brise-lame immergé proposé pour la plage de Boumerdès.

Tableau VI.1: Résultats de prédimensionnement du brise-lames immergés.

Brise-lames immergé	Partie de l'ouvrage	La formule	Application numérique	Résultats
	Carapace	$w = \frac{\gamma_s \cdot H^3}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right)^3 \cdot KD \cdot \cot \alpha}$ $e = n \cdot Kt \cdot (W/\gamma_s)^{1/3}$	$w = \frac{2,65 \cdot (3)^3}{\left(\frac{2,65}{1,026} - 1\right)^3 \cdot 3,5 \cdot 1,5}$ $e = 2 \cdot 1,15 \cdot (3,44/2,65)^{1/3}$	<p>W=3.44t</p> <p>e=2.5m</p>
	Partie musoir	$w = \frac{\gamma_s \cdot H^3}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right)^3 \cdot KD \cdot \cot \alpha}$ $e = n \cdot Kt \cdot (W/\gamma_s)^{1/3}$	$w = \frac{2,65 \cdot (3)^3}{\left(\frac{2,65}{1,026} - 1\right)^3 \cdot 2,5 \cdot 1,5}$ $e = 2 \cdot 1,15 \cdot (4,81/2,65)^{1/3}$	<p>W=4.81t</p> <p>e=2,8m</p>
	La première sous couche	$W_{moy} = Wc / 10$ $e = n \cdot Kt \cdot (W_{moy}/\gamma_s)^{1/3}$	$W_{moy} = 3,44 / 10$ $e = 2 \cdot 1,15 \cdot (0,34/2,65)^{1/3}$	<p>W=0.34t</p> <p>e=1m</p>
	La largeur en crête	$B = Hb \times 4$	$B = 3 \times 4$	B=12m
	Noyau	Généralement entre 1-500Kg		

3.1.2.8. Impact des brise-lames sur la ligne de rivage

La construction d'un brise-lames déplace l'équilibre du trait de côte. Son impact sur l'évolution de la ligne de rivage est essentiellement gouverné par l'accélération locale qu'il

produit sur le transport sédimentaire longitudinal, et dans une moindre mesure par le transport solide dans le profil.

Un point fondamental dans le dimensionnement des brise-lames découle de l'évolution du trait de côte en réaction à sa mise en place. Il s'agit de savoir si la forme d'équilibre recherchée inclut ou non le rattachement du brise-lames au rivage par la création d'un tombolo.

Les deux configurations présentent des avantages et des inconvénients. De manière générale, les évolutions de la ligne de rivage sans tombolo sont préférées. En effet, en formant, un tombolo peut fixer une grande quantité de sédiments et générer une érosion importante en aval du transport sédimentaire. Par ailleurs, lors du changement saisonnier de secteur des houles dominantes, une évolution en point de rebroussement s'oppose beaucoup moins qu'un tombolo à l'inversion du transport solide.

A noter également que la formation d'un tombolo permet d'augmenter considérablement la superficie disponible pour les activités humaines récréatives, et qu'elle facilite grandement l'entretien du brise-lames par l'accès qu'il offre aux engins. Toutefois, l'utilisation du brise-lames pour les plongeurs peut représenter un danger pour la sécurité publique.

3.2. La deuxième variante

La deuxième variante elle comporte des brise-lames immergés avec un apport artificiel de sable.

3.2.1. Apport artificiel

Le rechargement artificiel est considéré comme une approche efficace de lutte contre l'érosion côtière en composant de manière artificielle le déficit du budget sédimentaire du littoral (**Jean-Louis Borloo, 2010**).

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, sans impact sur les côtes avoisinantes. On compense ainsi par des apports extérieurs la réduction des apports naturels (**RAMOGE, 2002**).

3.2.1.1. Les conditions de rechargement

Afin de rendre plus stables les sédiments ajoutés artificiellement aux plages, la recherche et l'expérimentation se sont orientées vers :

-L'utilisation de sédiments à granulométrie assez grossière qui présentent une plus grande porosité que le sable et qui absorbent plus efficacement l'énergie de la houle.

- Le choix des carrières de prélèvement situées en mer ou sur terre il faut tenir compte des caractéristiques pétrographiques et de la granulométrie du sédiment et, plus particulièrement, du pourcentage de sédiments fins.

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

-Il faut en outre considérer les modalités d'engraisement de la plage, notamment en ce qui concerne le nombre de points d'alimentation,

-Pour obtenir un engraissement rapide et uniforme sur toute l'étendue de la plage, il est préférable d'envisager plusieurs points d'alimentation.

3.2.1.2. Procédés et mise en place des sédiments

- L'objectif est celui de couvrir toute la plage sur 800 m, jusqu'à une profondeur de 1m (ayant une pente de 1/30) nécessitant un volume de rechargement estimé à 8 000 m³.

Le volume est estimé par la formule suivante :

$$AN : V=800.10 (2/2)$$

$$\text{Donc } V=8000 \text{ m}^3$$

-La pente (S) de rechargement $S=1/30$.

-L'épaisseur (d) de rechargement $d = 2\text{m}$.

-La largeur (C) de la berme $C = 10\text{m}$.

-La longueur de rechargement totale : $L = 800\text{m}$.

- 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 protection à long terme.
- Pour des 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 de 500 μm à 1000 μm de diamètre.
- Les caractéristiques de profils de rechargement sont comme suite : **(figure. VI.4)**.

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

Tableau VI.2 : Carrières et sablières à prospector pour la protection de la plage de Boumerdès (Directeur des carrières d'exploitation, 2011 in mémoire **Mouhoubi N, 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 Kedarra	Granulat concassés	Kedarra	Boumerdes	1 000 000 t/j

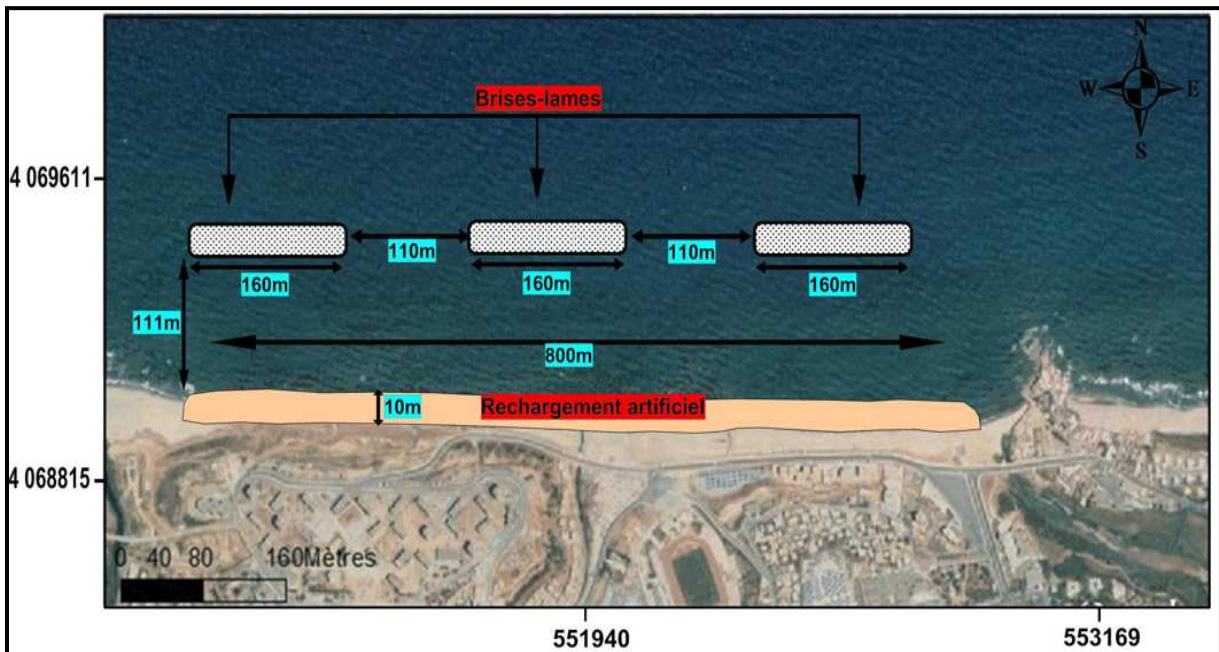


Figure VI.4 : Installation d'une série de trois brise-lames et un apport artificiel au niveau de la zone d'étude.

3.3. La troisième variante

La troisième variante elle comporte un épi en arc associé à deux brise-lames et un apport artificiel de sable.

3.3.1. Epis en arc

3.3.1.1. Définition

Les épis sont des ouvrages de défense transversaux par rapport au trait de côte. Ils constituent des obstacles, généralement perpendiculaires au rivage, parfois obliques lorsque l'incidence des houles dominantes est forte, qui ont pour but de retenir une partie de la charge sédimentaire véhiculée par la dérive littorale en freinant ce courant. Ils permettent d'élargir une plage ou de la stabiliser si elle est en état de recul. (**Pasckoff, 1992**).

L'objectif principal de ces ouvrages est l'interruption du transit sédimentaire littoral. On obtient donc un élargissement de la plage en amont de l'ouvrage qui peut être rapide si la dérive littorale locale est importante. Cette accumulation à l'amont s'effectue toutefois au détriment de la zone où l'érosion est accrue.

3.3.1.2. Principe de fonctionnement des épis

Les épis n'agissent que sur les déplacements fluides et solides longitudinaux par rapport au trait de côte. Ils ne sauraient donc s'opposer aux actions érosives des courants de retours ("undertow-currents") ou des courants sagittaux ("rip-currents") qui opèrent dans la section verticale normale au trait de côte.

Les épis les plus courts n'agissent que sur le transport par jet de rive, tandis que les plus longs agissent également sur le transport par courant littoral s'ils barrent la zone de déferlement.

Pour stabiliser une portion de trait de côte, les épis doivent être disposés en séries. Leur installation doit commencer par le côté aval du transport solide, et se continuer vers l'amont du transport solide au fur et à mesure qu'ils sont contournés. Le long de la défense, les épis doivent tous être de la même longueur.

3.3.1.3. Prédimensionnement des épis

a).Hauteur

D'une manière générale, la hauteur de l'épi au dessus de la plage doit être suffisante pour éviter qu'il ne soit enseveli par une arrivée massive de sable. Elle doit cependant rester suffisamment limitée pour ne pas créer de réflexion de houle génératrice d'érosion et d'affouillement.

Dans le but de contourner le sable, on adopte une hauteur de l'épi entre 0,5 et 1 m du niveau moyen de la mer. Dans notre cas on prend : $h = 1 \text{ m}$.

$$h=1\text{m}$$

b).Longueur

La longueur d'un épi en arc pour former une plage en poche et couvrir toute notre plage (de 800 m de longueur) va être calculée de la manière suivante :

- La longueur représente le quart d'un cercle d'un diamètre D de 400 m ;
- Le périmètre (p) de ce cercle égale $\pi \cdot D$: $P=1256 \text{ m}$
- On prend alors : $L = 1256/4 = 314 \text{ m}$.

$$L=314\text{m}$$

c). Paramètres structuraux (stabilités des ouvrages)

Pour la partie courante des épis en arc ; ainsi que pour sa partie musoir on va utiliser les mêmes relations prises pour les brise-lames, en prenant une amplitude égale à $H_b = 3$ m, puisque c'est la hauteur réfractée au pied de l'ouvrage ($d= 3$ m).

❖ **La carapace**

$$w = \frac{\gamma_s \cdot H^3}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right)^3 \cdot KD \cdot \cot \alpha}$$

L'application numérique a donné les résultats suivants :

En prenant :

$H = 3$ m.

$\cot \alpha = 3/2$.

$KD = 3,5$

$$w = \frac{2,65 \cdot (3)^3}{\left(\frac{2,65}{1,026} - 1\right)^3 \cdot 3,5 \cdot 1,5}$$

Donc $w=4,44$ t

Et pour l'épaisseur de la carapace :

$W50 = 3,44$ t.

$n = 2$.

$Kt = 1,15$.

$$e = n \cdot Kt \cdot (W/\gamma_s)^{1/3}$$

AN : $e = 2 \cdot 1,15 \cdot (3,44/2,65)^{1/3}$ $e=2.50$ m

❖ **La partie musoir**

Le musoir protège l'ouvrage des houles frontales et le coude le protège des houles obliques, leurs stabilités peut être vérifiées par la formule de Hudson, et un KD égal à 2,5

En prenant :

$H = 3$ m.

$\cot \alpha = 3/2$.

$KD = 2,5$.

$$w = \frac{2,65 \cdot (3)^3}{\left(\frac{2,65}{1,026} - 1\right)^3 \cdot 2,5 \cdot 1,5}$$

Donc $w=4,81$ t

Pour l'épaisseur de cette partie :

$$W = 4,8t \quad n = 2. \quad Kt = 1,15.$$

$$AN : \quad e = 2. 1,15.(4,81/2,65)^{1/3}$$

Les calculs obtenus pour les paramètres structuraux sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau VI.3 : Résultats de prédimensionnement d'un épi en arc.

Epi en arc	Partie de l'ouvrage	La formule	Application numérique	Résultats
	Carapace	$w = \frac{\gamma_s \cdot H^3}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right)^3 \cdot KD \cdot \cot \alpha}$ $e = n \cdot Kt (W/\gamma_s)^{1/3}$	$w = \frac{2,65 \cdot (3)^3}{\left(\frac{2,65}{1,026} - 1\right)^3 \cdot 3,5 \cdot 1,5}$ $e = 2. 1,15.(3,44/2,65)^{1/3}$	W=3.44t e=2.5m
	Partie musoir	$w = \frac{\gamma_s \cdot H^3}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right)^3 \cdot KD \cdot \cot \alpha}$ $e = n \cdot Kt (W/\gamma_s)^{1/3}$	$w = \frac{2,65 \cdot (3)^3}{\left(\frac{2,65}{1,026} - 1\right)^3 \cdot 2,5 \cdot 1,5}$ $e = 2. 1,15.(4,81/2,65)^{1/3}$	W=4.81t e=2.8m
	La largeur en crête	$B = Hb \times 4$	B=3x4	B=12m
Noyau	Généralement entre 1-500Kg			

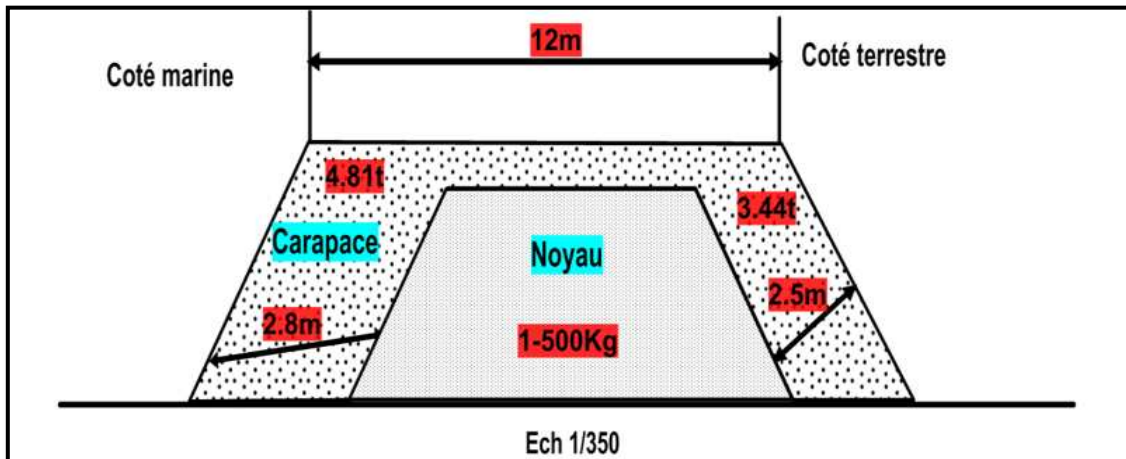


Figure VI.5: Schéma d'un épi proposé pour la plage de Boumerdès.

3.3.1.4. Avantages des épis en arc

- Formation d'une zone calme à l'intérieur, ce qui permet un arrêt de dégraissage de la plage, et augmente la stabilité.
- Minimiser les effets de la réflexion de la houle sur la cote concave de l'épi.

-Permettre une accessibilité à la plage quelque soit la direction de la houle même si la mer est très agitée.

-Le sable injecté ne risque pas d'être perdu.

3.3.1.5. Inconvénients

- L'inconvénient majeur des épis est de provoquer à l'aval du dernier ouvrage un déficit sédimentaire, d'où un déclenchement ou une aggravation de l'érosion dans ce secteur.

- De plus, il faut savoir que les épis peuvent engendrer, lorsque la houle est forte, des courants d'arrachement dangereux pour les baigneurs.

-modification des paysages.

-Impacts environnementaux négatifs (augmentation de la turbidité).

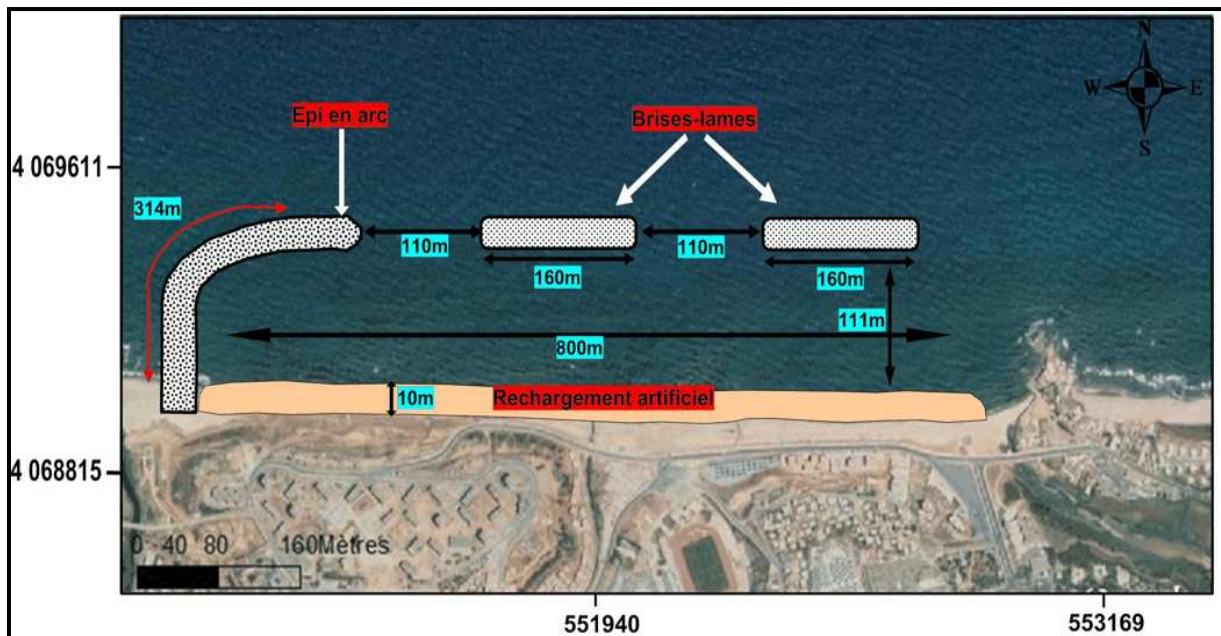


Figure VI.6 : Installation des déférents ouvrages de protection au niveau de la zone d'étude.

3.4. La quatrième variante

La quatrième variante elle comporte une série de trois épis simple en Géo-containers avec un apport artificiel de sable.

3.4.1. Les Géo-containers

Ces nouvelles structures ont moins d'impact écologique et visuel que les structures, telles que les digues et revêtements. Toutefois, en raison de l'augmentation des tempêtes associées aux changements climatiques, des structures existantes de mer doivent être protégées. En outre, le renforcement et la protection de ces mesures doivent être rentables, qui implique

l'utilisation de matériaux locaux, sans matériel lourd, en particulier lorsque les infrastructures nécessaires ne sont pas disponibles.

Le 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.

3.4.1.1. 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 :

- du type de bateau
 - du matériau de remplissage
 - de 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 sur piqûres 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.

1. La barge ouvrante amène le Géo-container à l'endroit du déchargement.
2. La barge s'ouvre.
3. Le Géo-container et son contenu (sable ou boue de dragage) sont déchargés sur le fond marin de manière contrôlée.

3.4.1.2. Examen de la stabilité des containers de sable

a. Premier essai avec des containers de 150L

L'analyse des données provenant d'un premier essai utilisant de géotextile de 150 L (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.

$$N_s = \frac{H_s}{(\rho_E/\rho_W-1).D} = \frac{2.75}{\sqrt{\xi_0}} \quad \text{VI.7}$$

D : caractéristique du diamètre des géotubes définie comme $D = l.\sin\alpha$.

l : longueur des contenir de sables.

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

r_w : densité de l'eau de mer.

r_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 (**voir annexe 2**).

$$N_s = \frac{H_s}{(\rho_E / \rho_W - 1).D} < 0.79 + 0.09 \cdot \frac{R_c}{H_s} \quad \text{VI.8}$$

Avec R_c = free board (m).

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 (**voir annexe 2**).

$$N_s = \frac{H_s}{(\rho_E / \rho_W - 1).D} < 1.1 \quad \text{VI.9}$$

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 .

$$N_s = \frac{H_s}{(\rho_E / \rho_W - 1)D} < 0.885 + 0.05 \cdot \frac{R_c}{H_s} \quad \text{VI.10}$$

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

Sur note site affectée par l'érosion on peut utiliser ce type d'ouvrage de différente manière:

- Installation d'une batterie de trois épis construits à partir des Géo-containers en géosynthétiques, de 2,5 m de hauteur par 150 m de long qui peut supporter de hautes vagues 3m afin de stopper les pertes de sédiments. La longueur des épis est déterminée selon les recommandations du STCPMVN-LCHF (**figure VI.9**).

Les épis doivent être construits en utilisant une succession des conteneurs de sables 2.5m³, ces épis sont espacés d'une distance de 300m (espacement est deux fois la longueur). La structure est stable en face des attaques les vagues violente, est facile à utiliser, esthétiquement acceptable. Un autre critère important est que le géotextile doit fournir une certaine forme de résistance.

3.4.1.3. Application de cette variante pour notre site d'étude

La protection de la côte par des ouvrages en Géo-containers par une implantation d'une batterie de trois épis perpendiculaires au rivage. Cette variante est testée sous le programme Mike 21. La propagation de la houle au voisinage de ces ouvrages est simulée (**voir la figure VI.9 et annexe 2**) à deux périodes de (6s et 7s) qui sont plus observées au niveau du littoral de Boumerdes. Les vagues de période de 6s sont les plus fréquentées durant l'année et sont la cause principale de l'érosion du rivage, tandis que les vagues de période de 7s 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 de vents dominants.

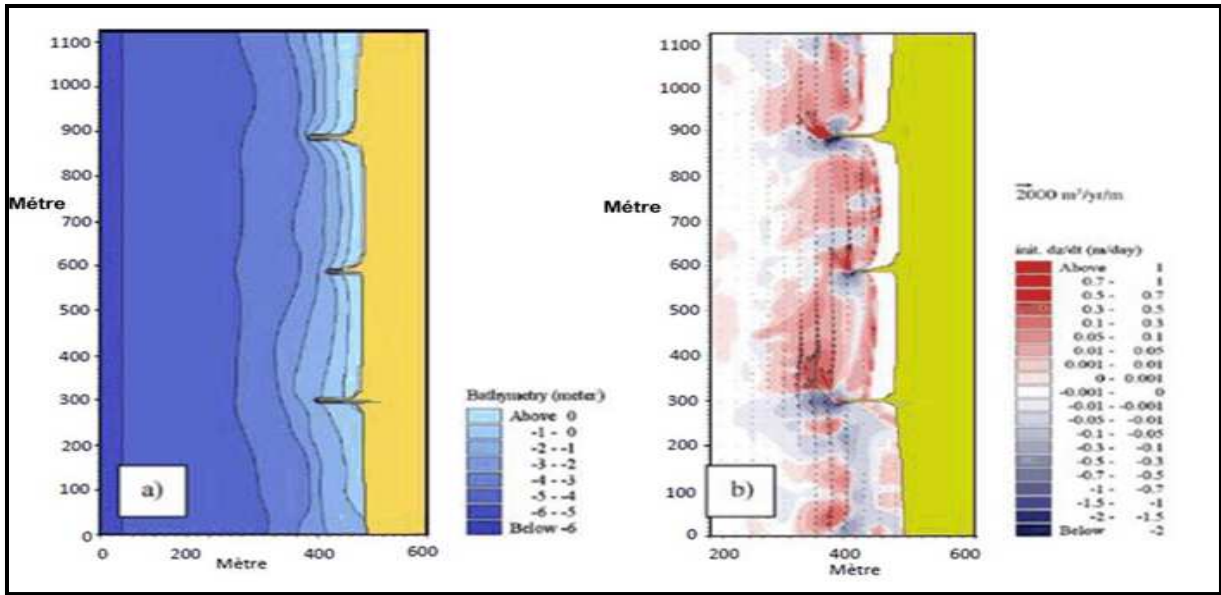


Figure VI.7: a) bathymétrie de la zone protégée, b) taux du transit sédimentaire par jour (Mezouar, 2009).

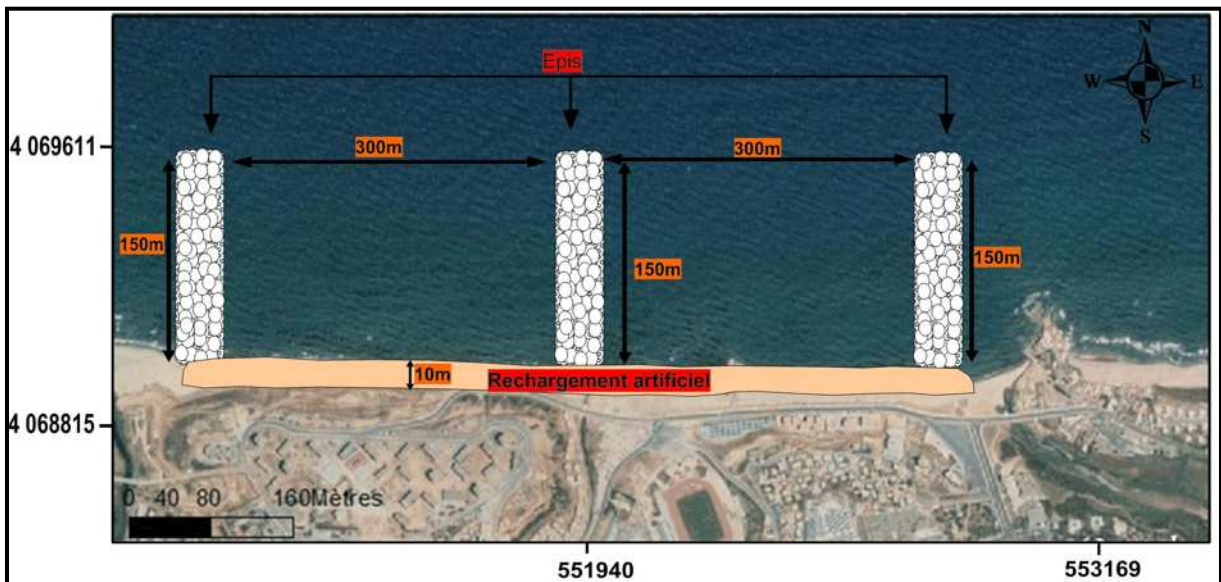


Figure VI.8 : Installation une série de trois épis en Géo-containers au niveau de la zone d'étude.

-Pour mieux apprécier les avantages et les inconvénients de chaque variante (voir annexe 2).

Conclusion

L'objectif global de toutes ces variantes proposées précédemment, est de lutter contre l'érosion d'une part et la protection de notre zone d'étude d'une autre part.

Le choix des techniques de protection dépend de la nature hydrodynamique de site d'étude ainsi les moyens et l'objectif final à rechercher. Donc pour une meilleure gestion et protection de la plage de Boumerdès il faut choisir un aménagement qui lui convient tout en préservant ses potentialités et ses richesses naturelles.

CONCLUSION
GENERALE

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail était une meilleure compréhension des processus responsables de l'évolution morphodynamique et d'en observer les spécificités propres de la plage de Boumerdès.

D'après les études qui ont été faites précédemment on peut constater que l'érosion de notre zone d'étude résulte en effet d'une combinaison de plusieurs facteurs, à la fois d'origine naturel et humaine, opérant à plusieurs échelles de temps et d'espace. Les paramètres naturels tels que la houle, les courants, les vagues, la marée, le vent, l'érosion des sols, l'augmentation du niveau de la mer, et anthropiques tels que les activités de l'homme et les différentes infrastructures implantées au niveau du littoral, qui ont fortement modifié la dynamique du littoral et tendent à supplanter les causes naturelles.

L'étude de l'évolution du trait de côte, faite selon une méthode photogrammétrique qui se repose sur le traitement de la photographie aérienne par le logiciel ArcGis10 sur une période de 22 ans. La superposition des traits de côte relevés des images satellitaires montrent un recul de ligne du rivage sur toute la période d'étude (1993-2015) avec une perte de 436216.59 m^2 , durant une période de 22 ans soit $(-) 21096.58 \text{ m}^2/\text{an}$.

L'étude bathymétrique notamment la géomorphologie sous-marine indique la présence de deux zones morphologiques bien distinctes, une zone chahutée comprise entre 0 m et -6 m caractérisée par la présence de petites fosses et de barres avec une pente de l'ordre de 0.05, alors que la deuxième présente un fond marin relativement uniforme à partir des -6 m vers le large dont la pente est très douce.

La modélisation numérique de la réfraction de la houle par le modèle SWAN a montré que la plage de Boumerdès est exposé aux houles du secteur Nord, Nord-Est et Nord-Ouest qu'est la plus menaçante sur la zone d'étude et responsable de transit littoral de la plage, 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. Pour cela ces résultats vont être pris en considération dans le dimensionnement des ouvrages de protection.

L'étude des différents processus sédimentaires longitudinaux et transversaux est réalisée par différentes formules empiriques (Kamphius, Bijker, CERC,...). Le volume du transit sédimentaire selon la formule de Kamphius $337306 \text{ m}^3/\text{an}$, Bijker $317725 \text{ m}^3/\text{an}$, CERC $3002647 \text{ m}^3/\text{an}$ et la direction du transit sédimentaire est de l'Est vers Ouest. Mes

Conclusion générale

données confirment donc les travaux antérieurs en ce qui concerne l'importance de l'énergie de la houle et la vitesse des courants sur le transport.

La modélisation du transport sédimentaire par le modèle GSTA donne des résultats satisfaisants et en concordance avec les résultats obtenus précédemment. Cette modélisation a démontré que le déplacement des sédiments se fait de l'Ouest vers l'Est. En effet, cette dérive est due à une prédominance des vents de secteurs Nord- Ouest, elle induit par conséquent des courant de retour qui arrache les sédiments de la plage et les déposent vers le large.

A la fin de ce travail, nous exposons des solutions envisageables pour mettre un frein à la régression que connaisse la côte de Boumerdès. En effet, pour améliorer l'efficacité des interventions de protection sur le site d'étude, on a opté pour des défenses de natures mixtes à savoir :

- des brise-lames Des brise-lames immergés en enrochement avec un apport artificiel.
- Epi en arc associé à un brise-lame et un apport artificiel de sable.
- des épis en géo-containers et un apport artificiel de sable.

Mais comme tout ouvrage côtier, l'ensemble de ces propositions présentent des avantages et des inconvénients qu'il faudrait évaluer plus précisément pour affiner les choix. Parmi les critères de choix qui devraient être pris en considération, de manière forte, il y a la protection durable de la nature et le coût des ouvrages.

En fin 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.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- Aoudj, Cherif. (2014).** Évolution morphodynamique du trait de côte du littoral Est de Béjaïa. Cas de Tichy plages. Mémoire de Master. ENSSMAL.
- Aoudj, Cherif. (2014).** Évolution morphodynamique du trait de côte du littoral Est de Béjaïa. Mémoire d'ingénieur. ENSSMAL.
- Balouin, Y. et al. (2012).** Etude générale pour la protection de la Plaine orientale de la Corse – Préconisation de gestion. p. 16.
- Berni, C. (2011).** Processus de mobilisation et de transport de sédiments dans la zone de déferlement. PhD thesis. Université de Grenoble.
- Bijker, E. (1968).** Littoral drift as function of waves and current. 11th Coastal Eng. Conf. Proc. ASCE. London. UK. p. 415–435.
- Borloo, J. (2010).** La gestion du trait de côte. Paris. p.189.
- Bougis, Jean. (2000).** Sédimentologie littorale. Cours de formation continue. pp. 2-9.
- Bougis, Jean. (2000).** Ouvrages de défense des littoraux, cours de formation continue .pp. 1-8.
- Bourti, Hayat. (2014).** Evolution et dynamique de la falaise Est de Boumerdès et proposition des solutions. Mémoire d'ingénieur. ENSSMAL.
- Boutiba, M. (1996).** Etude en vraie grandeur du mode de fonctionnement des ouvrages de Protection de la plage Est Sidi-Fedj (Ouest Algérois). thèse de magister. ENSSMAL. p.123.
- Briere, C. (2003).** Etude de la dynamique de la zone côtière anthropisée. l'embouchure de l'Adour et les plages adjacentes d'Anglet. Université de Pau et des pays de l'Adour.
- Carlos, Ley. et All. (2012).** Commission UICN de la Gestion des Ecosystèmes (CEM). 29590 Campanillas. Malaga. Espagne.
- Castelle, B. (2004).** Modélisation de l'hydrodynamique sédimentaire au-dessus des barres sableuses soumises à l'action de la houle. Application à la côte aquitaine. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux I. p.282.
- Chaibi, Mohamed. (2003).** Dynamique sédimentaire et morphogénèse actuelle du littoral d'el jadida (maroc). Université Aix-Marseille I. p.142-158.
- Collin, M. et Gao, S. (1992).** Net sediment transport patterns inferred from grain size trends, based upon definition of transport vectors. Journal of sedimentology. Vol 80. p.47-60.
- Cowell, P, J. et Thom, B, G. (1994).** Morphodynamique of coastal. In: R.G.W, evolution. Cambridge. University Press cambridge. p.33.
- De vriend, H. (1991).** Mathematical modelling and large-scale coastal behavior. Part I. Physical processes. Journal of Hydraulic Research .p.727-740.

Références bibliographiques

- Drevard, Déborah. (2006).** Etude expérimentale et numérique de la propagation d'ondes de gravité en zone de déferlement. Thèse de Doctorat. Université du Sud Toulon-Var.
- Fourrière, A. et al. (2010).** Bedforms in a turbulent stream: formation of ripples by primary linear instability and of dunes by non-linear pattern coarsening. *J Fluid Mech.*p. 328.
- Gerard, B. (1999).** Le littoral, problèmes et pratiques de l'aménagement, manuel et méthodes n° 32. p .351.
- Hardisty, J. (1994).** Beach and nearshore sediment transport. *Sediment transport and depositional processes*, K. Pye. Blackwell Scientific. p .219-255.
- Kamphuis, J, W. (1991).** Alongshore sediment transport rate. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 117 (6). p. 624–641.
- Kelai , Foudil. (2005).**Contribution à l'analyse de durabilité d'un littoral sableux (plage ouest de boumerdès). Mémoire d'ingénieur. ENNSMAL.
- Kroon, A. (1994).** Sediment transport and morphodynamics of the beach and nearshore zone near Egmond, The Netherlands. Doctoral Thesis. Department of Physical Geography. University of Utrech. The Netherlands.
- Maspataud, A. (2011).** Impacts des tempêtes sur la morphodynamique du profil côtier en milieu macrotidal. Thèse de doctorat. Université du Littoral Côte d'Opale. France.
- Mathieu, Gervais. (2012).** Impacts morphologiques des surcotes et vagues de tempêtes sur le littoral méditerranéen.
- Mc laren, P. et Bowles, D. (1985).** The effects of sediment transport on grain-size distributions. *Journal of Sedimentary Petrology* 55(4).p .457-470.
- Mezouar, K. (2004).**Modélisation du transport sédimentaire dans le littoral de Boumerdès. Mémoire d'ingénieur.
- Mezouar, K. (2009).**Etude comparative entre les méthodes de protection des deux littoraux Algérien et Roumain. Thèse de doctorat. Université Technique de Construction de Bucarest.
- Milliot, C. (1985).** Some features of the algerian current. Edition Masson paris. p. 259.
- Mouhoubi, N. (2012).** Etude d'une solution de protection pour la plage centre de Sidi Ghiles (Cherchell). Mémoire d'ingénieur. ENSSMAL.
- Moulin. et al. (1978).** Météo, vents, naiges, tempêtes. Edition Maritime d'ouï très mer.p. 150.
- Senechal, N. (2003).** Etude de la propagation des vagues au-dessus d'une bathymétrie complexe en zone de surf. Thèse de l'Université de Bordeaux I. France. p .8-15.
- Paskoff, R. (1992).** Les côtes en danger. Paris.p. 250.

Références bibliographiques

- Paskoff, R. (1994).** Les littoraux, impact des aménagements sur leur évolution .2^{ème} édition. Paris .p. 255.
- Pethick, J. (2001).** Coastal management and sea-level rise. *Catena*, 42.p 307-322.
- Phillips, D. (1992).** Nonlinear dynamical systems in geomorphology: revolution or evolution. *Geomorphology*. 5. P. 219-229.
- Pilkey, H. et Hume, T. (2001).** Coastal Research. The Shoreline erosion problem, lessons from the past. *Water & Atmosphere*, 9(2). Water Institute of Water and Atmosphere. New Zealand.
- Ramoge. (2002).** La défense des plages contre l'érosion. RAMOGE. p. 7-10.
- Rihouey, D. (2004).** Analyse statistique de l'évolution morphodynamique des plages sableuses, Application aux sites d'étude du Programme National d'Environnement Côtier et aux plages d'Anglet. Thèse de Doctorat. Université de Pau et des Pays de l'Adour. p. 22-28.
- Sogreah. (1990).** Notice d'impact concernant le programme de travaux de défense contre la mer à la Tranche-sur-Mer. p. 9-15.
- SSMO. (1970).**Summary of Synoptic Meteorological Observations. U.S Naval Weather Service Command. Mediterranean marine. Volume 2.p. 632.
- Wright, L, D. et Thom, B, G. (1977).** Coastal depositional landforms: a morphodynamic approach. *Progress in Physical Geography* 1.p. 412-459.

ANNEXES

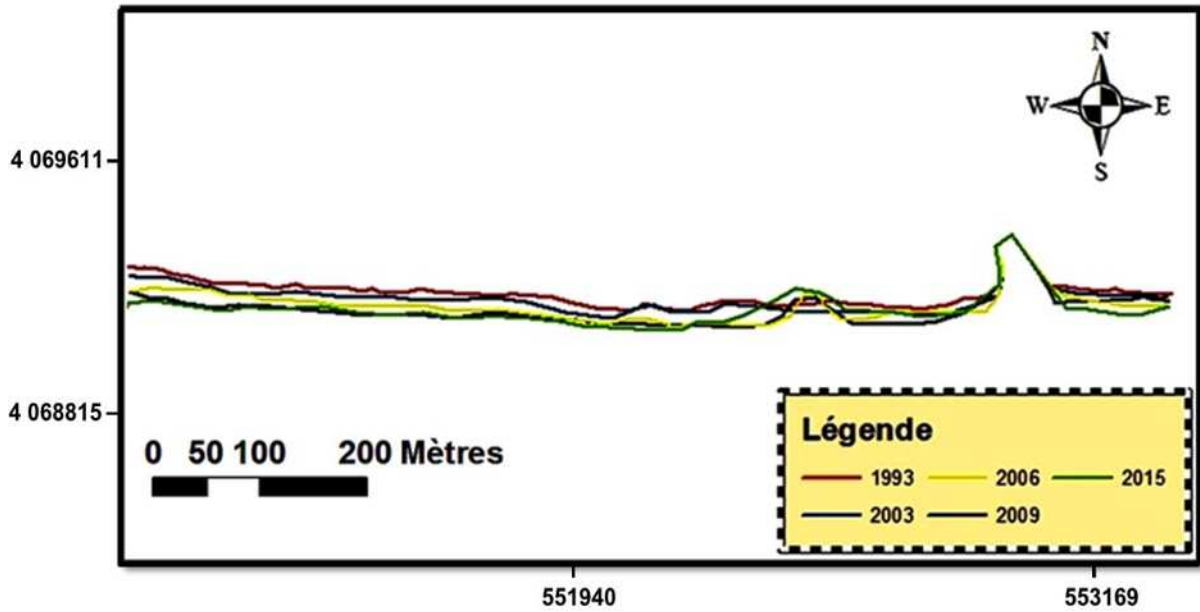


Figure : Carte de l'évolution historique du trait de côte du littoral de Boumerdès entre 1993 et 2015.

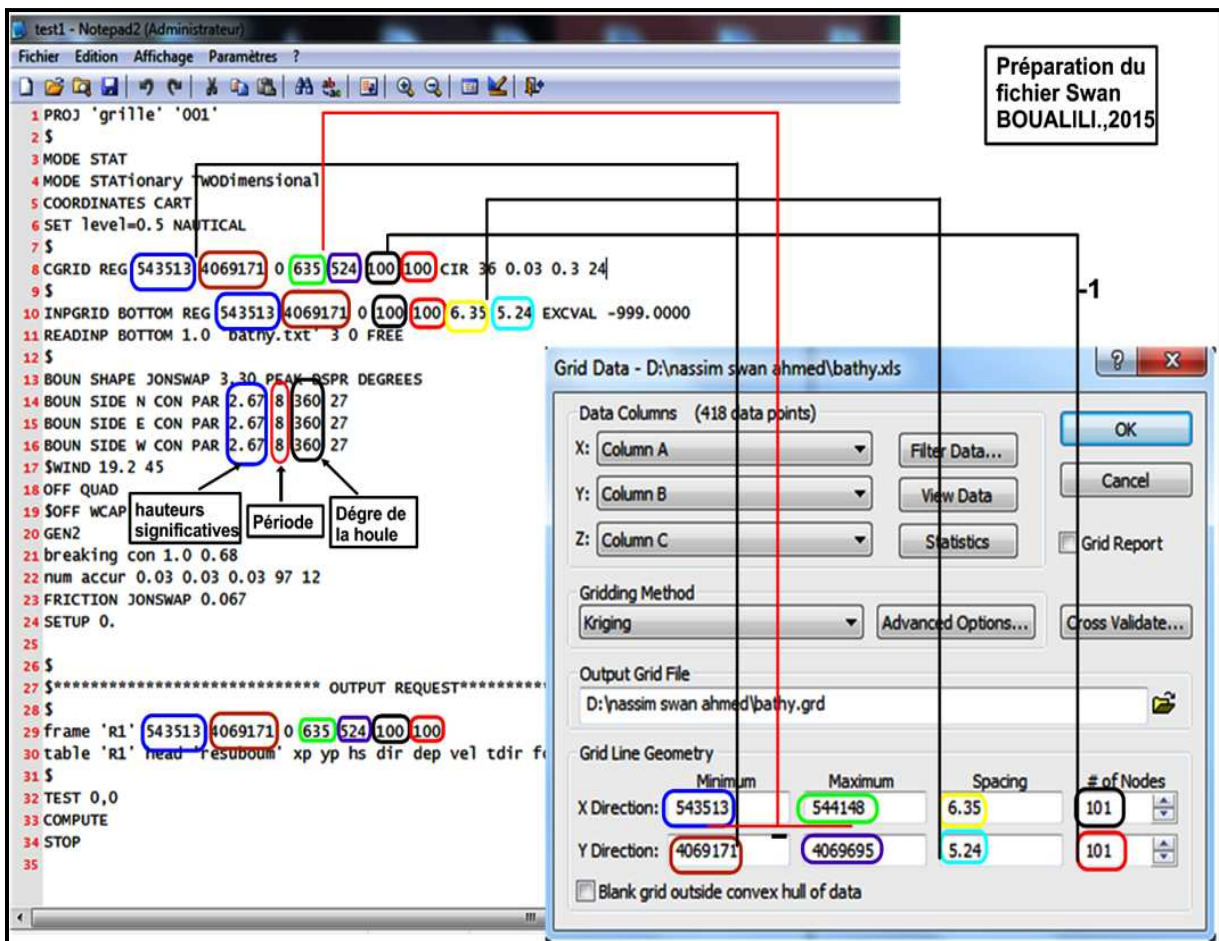


Figure : Préparation du fichier Swan (test1).

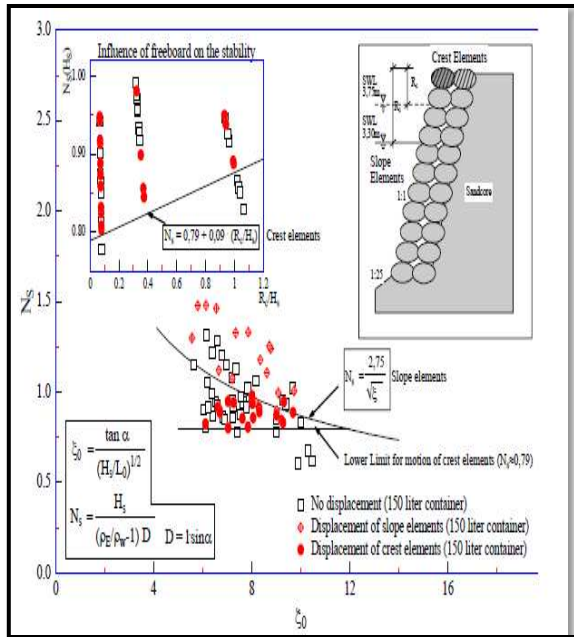


Figure : Stabilité des containers de sable de 250L.

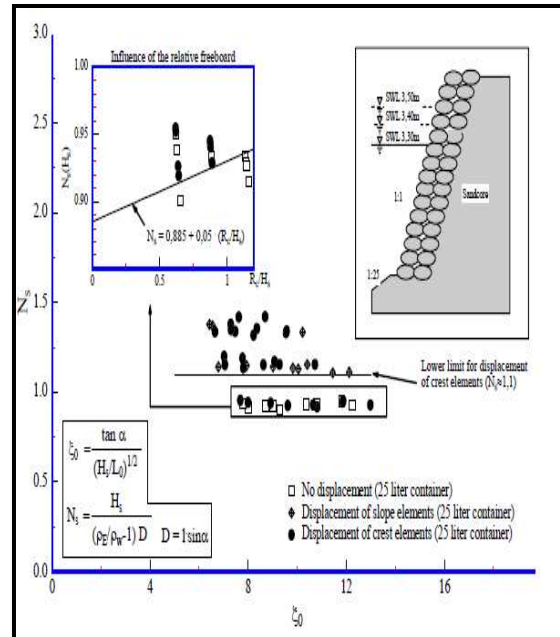


Figure : Stabilité des containers de sable de 25L

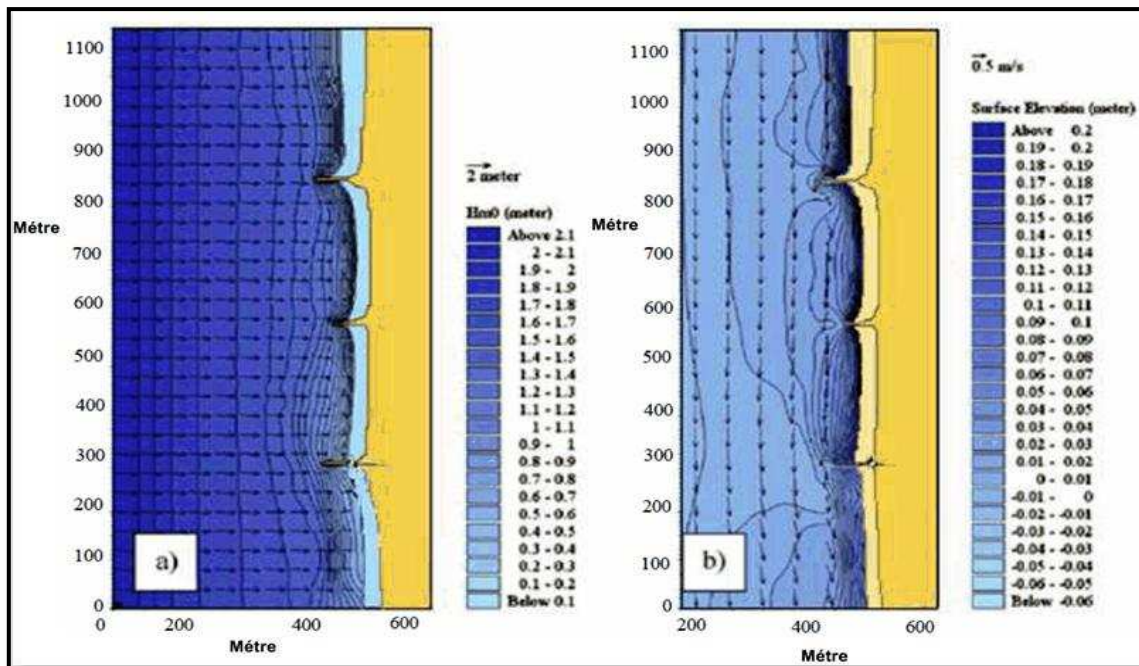


Figure : a) amplitude de la houle pour la période 6s, b) courant de surface induit par cette houle.

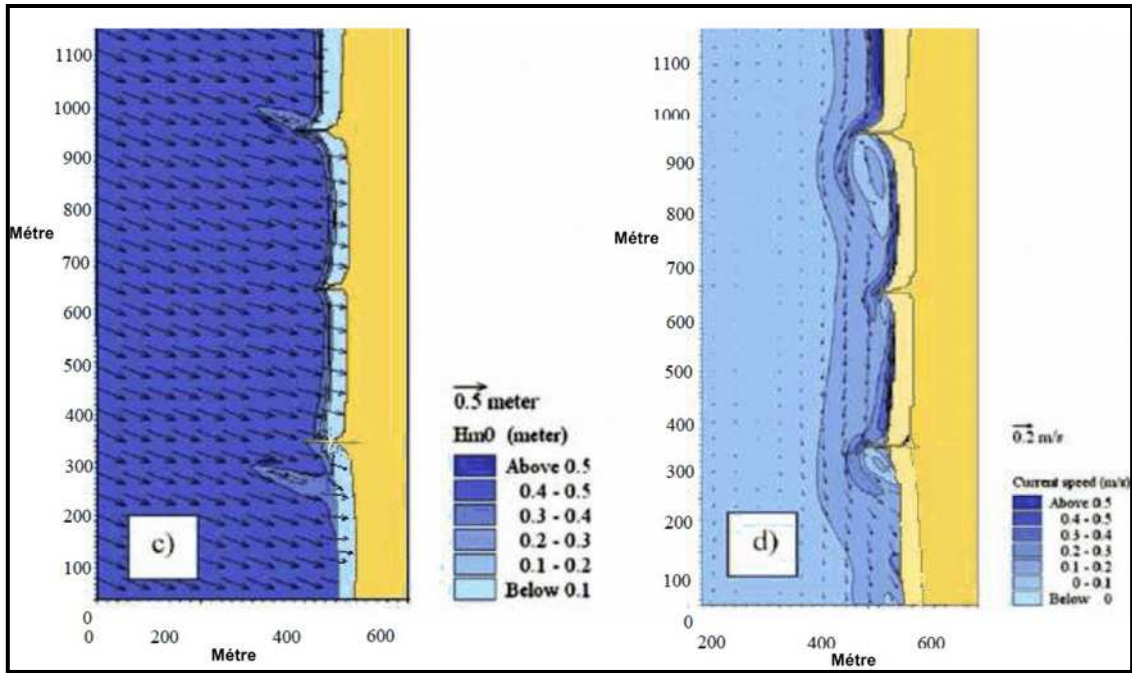


Figure :a) amplitude de la houle pour la période 7s, b) courant de surface induit par cette houle.

Tableau : Comparaison des variantes proposées.

Variantes	Avantages	Inconvénients	coût
Variante n°1	<ul style="list-style-type: none"> -Création d'un gradient longitudinal des hauteurs des houles du côté de la plage. - Favorisation de l'engraissement du trait de côte 	<ul style="list-style-type: none"> -Impacts environnementaux négatifs par l'augmentation de la turbidité. - L'agitation est réduite du côté de la plage ce qui défavorise le renouvellement des eaux. -Protection uniquement locale. -Impact possible pour la navigation 	A
Variante n°2	<ul style="list-style-type: none"> -permet de stabiliser ou d'agrandir une plage menacée d'érosion. - absorbe l'énergie de la houle 	<ul style="list-style-type: none"> - difficulté de trouver le matériau approprié en grandes quantités et à un coût acceptable. -nécessité d'une alimentation périodique. 	2A
Variante n°3	<ul style="list-style-type: none"> - Minimisation des effets de la réflexion des houles sur le côté concave de l'épi. - La plage est accessible même lorsque la mer est agitée. - Les risques des pertes du sable injecté sont minimales. 	<ul style="list-style-type: none"> - Impact sédimentaire possible sur les zones avoisinantes. - Affectation de la qualité du paysage naturel. - Le renouvellement des eaux est défavorisé. 	3A
Variante n°4	<ul style="list-style-type: none"> - Facilité d'exécution. - Intégration facile dans le paysage 	<ul style="list-style-type: none"> -Risque important de déchirement de l'enveloppe. - Les conditions du vieillissement des Géo-containers ne sont pas convenablement connues. 	A/4