

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

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

Littoral



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME

D'INGENIEUR EN SCIENCES DE LA MER

OPTION : Aménagement

Thème :

ETUDE DE PROTECTION DU RIVAGE DE SIDI GHILES

Présenté par :

Mehareb Amine

Bousaidi Mohamed Amine

Soutenu le 09/01/2020 devant le jury suivant :

Mr	BOULAHDID .M	Professeur	ENSSMAL	Président
Mr	MEZOUAR .K	Maître de conférences A	ENSSMAL	Promoteur
Mr	CHENITI	Ingénieur	DTP(TIPAZA)	Co-promoteur
Mme	SALEM CHERIF .Y	Doctorante	ENSSMAL	Examinatrice
Mr	DAHMANI .A	Maître assistant B	ENSSMAL	Examineur

Promotion 2019

Remerciement

Un mémoire de fin d'étude est souvent seulement perçu comme l'aboutissement de cinq ans d'étude. Nous, nous le considérons plutôt comme la clé qui permet d'ouvrir une porte sur une nouvelle expérience. Grâce à tous ceux que nous avons pu rencontrer au cours de toutes ces années, nous espérons être les mieux préparées à la vie professionnelle à venir.

*Nos premiers remerciements vont au **bon Dieu** le tout puissant, pour nous avoir accordé la force, la volonté et la patience jusqu'à l'accomplissement de ce modeste travail.*

*Nous voudrions également exprimer nos vifs remerciements aux membres du jury qui ont bien voulu juger ce travail, notamment **M. BOULLAHIDJ M.** qui a accepté de présider le jury, **M. DAHMANI A.** et **Mm. SALEM CHERIF Y.** d'avoir accepté d'examiner ce manuscrit et de participer à ce jury.*

*Nous tenons à exprimer notre grande reconnaissance à **M. MEZOUAR K.** et **M. Cheniti** qui nous ont fait l'honneur d'avoir accepté d'encadrer et co-encadrer ce travail. Leur disponibilité durant toutes les étapes de ce travail, leurs remarques pertinentes et leurs suggestions ont sans cesse permis l'amélioration de la qualité de ce document.*

Ils ne sont pas les seuls que nous devons remercier. Nous avons eu la chance d'être guidé par plusieurs personnes qui ont chacun amené leur pierre à l'édifice.

*Nous remercions encore une fois **Mm. SALEM CHERIF** en tant qu'un enseignant à l'**ENSSMAL** pour son aide à résoudre certains problèmes rencontrés avec le logiciel DSAS. et **M. MEZOUAR.** pour son aide sur le logiciel MIK 21*

*Nous finissons par un immense merci à nous **parents** qui nous ont soutenus pendant toutes nos études.*

Dédicace

Sommaire :

Chapitre I : Généralités.....	3
I.1. Système littoral :.....	4
I.2. Situation géographique de la zone d'étude.	4
I.2.1. La commune de Sidi Ghiles.....	4
I.2.2. Situation générale du site d'étude	5
I.3. Cadre géologique de la région.....	6
I.3.1. Cadre géologie régionale.....	6
I.3.2. Cadre géologie locale.	7
I.4. Caractéristiques sédimentologies des dépôts superficiels.	8
I.5. Données bathymétriques.....	8
I.6. Données climatiques et hydrographiques.....	10
I.6.1. Cadre hydrographique.....	10
I.6.2. Cadre climatique.....	11
I.6.2.1. Précipitations.....	12
I.6.2.2. Températures	12
I.6.2.3. Le vent local :.....	14
I.7. Données océanographiques.....	14
I.7.1. Houle au large.....	14
Chapitre II : Modélisation de l'hydrodynamique sédimentaire du littoral de Sidi Ghiles	17
I.8. Présentation de la modélisation	18
I.8.1. Principe de la modélisation	18
I.9. Construction du modèle.....	21
I.9.1. Emprise et bathymétrie.....	21
I.9.2. Création 2D Bathymétries sous le maillage.....	21
I.9.3. Configuration du module SW :	23
I.9.4. Configuration du module HD.....	24
I.9.5. Configuration du module ST.....	25
I.9.6. Résultats simulation hydro sédimentaire.....	26
I.9.6.1. Propagation de la houle	26
I.9.6.2. Résultats des simulations HD et interprétations.....	29
I.9.6.3. Résultats des simulations HD et interprétations.....	32
Chapitre III : évolution spatiotemporelle de la côte de Sidi Ghiles	34
I.10. Méthodes et techniques utilisées.	35

I.10.1.	Les logiciels utilisés.....	35
I.10.2.	Utilisation de l'extension DSAS pour l'analyse de l'évolution du trait de côte.....	36
I.10.3.	Méthode de digitalisation :	37
I.10.4.	Méthode de génération de transects :.....	37
I.11.	Méthode de digitalisation.	40
I.11.1.	Volet cartographique.....	40
I.11.2.	Volet graphique et statistique.....	41
I.12.	Visualisation des résultats.....	41
I.12.1.	L'End Point Rate EPR :	42
I.12.1.1.	Période 2003-2018.	46
I.12.2.	Net Shore Mouvement (NSM) (période 2003-2018).....	47
I.12.3.	Linear Regression Rate-of-change (LRR) (Période 2003-2018)	48
CHAPITRE IV :	Solutions d'Aménagement.....	49
I.13.	Les ouvrages de protection envisageables.....	50
I.13.1.	Variante N°1	50
I.13.1.1.	Brise-lames immergés en géotubes	50
I.13.2.	Variante N°2	54
I.13.3.	Variante N°3	56
Chapitre V :	Conclusion	66

Liste des figures

Figure I. 1 : Zonation bathymétrique du littoral et de la plate-forme continentale. HMM=hautes mers moyennes; BMM=basses mers moyennes. (Université de Liège, cours de géologie sédimentaire, 2017).	4
Figure I. 2 : Situation géographique du site d'étude (Google Earth 2019).	5
Figure I. 3 : Carte géologique régionale extraite depuis la carte géologique d'Algérie (SOURCE 2ème édition, 1987). Echelle 1/500 000.....	7
Figure I. 4 : Répartition spatiale de la médiane granulométrique entre Cherchell et Sidi Ghiles (LEM, 2004).	8
Figure I. 5 : La carte bathymétrique dans la zone d'étude.....	9
Figure I. 6 : Evolution mensuelle du débit liquide de l'Oued el Ghobrini (ANRH, 2011)	11
Figure I. 7 : Précipitations annuelles en mm (ANRH, 1994-2004).	12
Figure I. 8 : Diagramme ombrothermique de la commune de Sidi Ghiles durant la durée (ANRH-ONM, 1995-2004).....	13
Figure I. 9 : Rose des vents annuelle de Ténès (ONM, 1995-2004).....	14
Figure I. 10 : Roses trimestrielle et annuelle des houles au large (SSMO 1963-1970).....	15
Figure II. 1 : organigramme de la modélisation des trois modules du Mike 21	20
Figure II. 2 : Organigramme de création d'une bathymétrie.	22
Figure II. 3 : Emprise et maillage du modèle côtier (Mesh) de la zone de Sidi Ghiles	22
Figure II. 4 : Carte bathymétrique de la zone de Sidi Ghiles	22
Figure II. 5 : Champs de houles (MWD=45°) sur le littoral de Sidi Ghiles.....	27
Figure II. 6 : Champs de houles (MWD=300°) sur le littoral de Sidi Ghiles.....	28
Figure II. 7 : Champs de houles (MWD=340°) sur le littoral de Sidi Ghiles.....	29
Figure II. 8 : Champs des courants sur le littoral de Sidi Ghiles pour : MWD= 45°.	30
Figure II. 9 : Champs des courants sur le littoral de Sidi Ghiles pour : MWD= 300°.	31
Figure II. 10 : Champs des courants sur le littoral de Sidi Ghiles pour : MWD= 340°.....	32
Figure II. 11 : Dynamique sédimentaire sur le littoral de Sidi Ghiles: MWD= 45°.....	33
Figure II. 12 : Dynamique sédimentaire sur le littoral de Sidi Ghiles: MWD= 300°.....	33
Figure II. 13 : Dynamique sédimentaire sur le littoral de Sidi Ghiles: MWD= 340°.....	33
Figure III. 1 : Les données créées dans ArcCatalog et ArcMap (ArcGIS 10.2).....	38
Figure III. 2 : Le concept du DSAS (Digital Shoreline Analysis System) sous ArcMap.	38
Figure III. 3 : La table attributaire issue lors du traitement sous ArcMap	39
Figure III. 4 : Schéma du fonctionnement de l'extension DSAS.....	40
Figure III. 5 : Évolution de la ligne du rivage dans la région de Sidi Ghiles pour les années 2003/2009/2013/2018.....	40
Figure III. 6 : Digitalisation des traits et création d'une ligne de base	40
Figure III. 7 : Évolution de la ligne du rivage dans la région de Sidi Ghiles pour les années 2003/2009/2013/2018.....	42
Figure III. 8 : Illustration du rythme d'évolution du trait de côte en m/an entre 2003-2009 .43	

Figure III. 9 : Variation de la vitesse de déplacement du trait de côte selon les transects au niveau de la zone Sidi Ghiles 2003-2009	43
Figure III. 10 : Illustration du rythme d'évolution du trait de côte en m/an entre 2009-2013	44
Figure III. 11 : Variation de la vitesse de déplacement du trait de côte selon les transects au niveau de la zone Sidi Ghiles 2009-2013	44
Figure III. 12 : Illustration du rythme d'évolution du trait de côte en m/an entre 2013- ... 2018	45
Figure III. 13 : Variation de la vitesse de déplacement du trait de cote selon les transects au niveau de la zone Sidi Ghiles 2013-2018	45
Figure III. 14 : Illustration du rythme d'évolution du trait de côte en m/an entre 2003-2018	46
Figure III. 15 : Variation de la vitesse de déplacement du trait de cote selon les transects au niveau de la zone Sidi Ghiles 2003-2018	46
Figure III. 16 : Visualisation l'évolution du trait de côte en m/an entre 2003 et 2018	47
Figure III. 17 : Evolution de trait de côte selon les transects ai niveau de la de Sidi Ghiles en m entre 2003 –2018	47
Figure III. 18 : Visualisation de la tendance d'évolution du trait de côte en m/an 2003-2009-2013-2018	48
Figure III. 19 : Représentation graphique des variations des paramètres d'évolution de trait de côte LLR et EPR en m/an	48
Figure IV. 1 : Coupe type classique d'un tube posé sur un tapis anti-affouillement	51
Figure IV. 2 : Emplacement des brise-lames en géotubes (Mehareb et Boussaidi 2019).	53
Figure IV. 3 : Principe de fonctionnement du système Ecoplage (Ecoplage ®, 2012).	54
Figure IV. 4 : Schématisation de la mise en œuvre du système Ecoplage (Ecoplage ®, 2012).	55
Figure IV. 5 : Emplacement de brise-lames et épi immergés en enrochement. (Mehareb et Boussaidi 2019)	56
Figure IV. 6 : Hauteur de lahoule à la côte, direction Nord-Est($H_0= 2.40$ m Teta = 20° T= 8s). Etat projeté-Brise lames et épi en T.	63
Figure IV. 7 : Nord-Ouest ($H_0= 2.55$ m Teta = 340° T= 8s). Etat projeté- Brise lames et un épi en T.Ces ouvrages apportent une amélioration appréciable en terme d'atténuation des effets du courant de retour et tourbillonnaire.	64
Figure IV. 8 : Hauteur de la houle à la côte, direction Ouest ($H_0= 2.55$ m Teta = 300° T= 8s). Etat projeté- Brise lames et épi en T	64

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Variation des températures maximales, minimales et moyennes (ANRH, 1995-2004).....	13
Tableau I. 2 : Répartition annuelle des vents selon la direction et l'intensité (ONM, 1995-2004).....	14
Tableau I. 3 : Fréquences mensuelles de la houle au large par direction(LEM 2009)	16
Tableau II. 1 : Sortants du modèle SW.....	24
Tableau II. 2 : des Données de houle au large :.....	24
Tableau IV. 1 : Détermination des caractéristiques des géotubes implantés (LEM, 2012)....	51
Tableau IV. 2 : Propositions pour la longueur des brise-lames (Chapon et al, 1987)	58

Liste des abréviations

NRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
°C : Degré Celsius
cm : Centimètre
DTP : Direction des Travaux Publics
E : Est
Km : Kilomètre
LEM : Laboratoire d'Etudes Maritimes
m : Mètre
m³ : Mètre cube
m/an : Mètre par an
m/s : Mètre par seconde
N : Nord
NW : Nord-Ouest
ONM : Office National de la Météorologie
SE : Sud-Est
SSMO : Summary of Synoptic Meteorological Observations
SW : Sud-Ouest
T : Temps

Introduction

Le littoral n'est pas seulement le rivage des océans, c'est aussi le point de contact entre les deux compartiments terrestres que sont l'hydrosphère, la lithosphère. En ce point, les lois physiques de chacun des compartiments se cumulent et interagissent, l'étude de ce milieu en devient complexe. (**Raphaël CERTAIN, 2002**)

C'est aussi un milieu très dynamique, la force des vagues et la vigueur des courants en témoignent, et le rendent parfois hostile et dangereux pour l'Homme. (**Raphaël CERTAIN, 2002**)

C'est un territoire à la fois complexe et fragile, limité spatialement par les communes riveraines des mers côté terre, et par le plateau continental côté mer. Son exploitation est donc très large et les pressions induites sur cet écosystème le rend de plus en plus vulnérable et exige une attention particulière.

Le recul du trait de côte n'est pas un phénomène récent mais son ampleur s'est accrue au cours des dernières décennies. Ce recul est notamment dû à l'érosion marine qui peut prendre plusieurs formes et qui se généralise actuellement sur la plupart des rivages maritimes algériens : les causes sont diverses et font généralement appel à la conjonction de facteurs naturels et humains. Ses conséquences sont souvent difficiles à observer dans les conditions dynamiques les plus habituelles, mais les tempêtes, en accélérant les processus érosifs de manière spectaculaire et en mettant en péril des espaces urbanisés ou naturels, viennent régulièrement nous rappeler la fragilité de l'espace littoral.

La plage centre de Sidi Ghiles qui s'étend sur 1,5 de km, connaît depuis quelques années un réel problème d'érosion qui a pour cause notamment les aléas naturels (forçage des houles, changement climatique) et implantation de l'homme sur ce littoral. Ainsi et en conformité avec la loi 02- 2 du 05 Février 2002 relative au littoral, cette agglomération a été touchée par la servitude interdisant la construction dans les 300 m depuis la mer. Mais ceci n'est malheureusement pas respecté au niveau de sa bande littorale.

Sur demande de la Direction des travaux publique de la wilaya de Tipaza, une étude en vue de l'élaboration d'une solution de protection pour cette plage a été effectuée.

Le but de notre étude est non seulement d'évaluer l'érosion au niveau de cette zone mais aussi de trouver des solutions d'aménagements adéquats, répondant aux critères exigés par la DTP et en tenant en compte les caractéristiques de la commune de Sidi Ghiles, qui est connue par sa richesse culturelle et agricole depuis des décennies.

Ainsi, pour élaborer cette étude, nous avons suivi le plan de travail suivant ; des généralités sur la commune et sur la zone d'étude dans le premier chapitre, l'évolution spatiotemporelle de la côte dans le second. Le troisième chapitre comporte la Modélisation hydrodynamique. Le quatrième chapitre s'intitule solutions d'aménagement, dans lequel on parlera des ouvrages maritimes et des aménagements proposés, une étude d'impact a été aussi programmée.

Chapitre I : Généralités

I.1. Système littoral :

Un système est un ensemble d'éléments en interaction. Pour décrire ce type d'objet complexe, il est utile de combiner des études analytiques classiques à une approche systémique. Tandis que les analyses traditionnelles visent à détailler chaque constituant de façon séparée, les études systémiques considèrent la globalité de l'environnement et les relations entre les éléments de l'ensemble. Avant de présenter les constituants communs à tout système, il est toutefois important d'expliquer « pourquoi ces objets sont complexes ? ». (Desmazes, 2005).

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

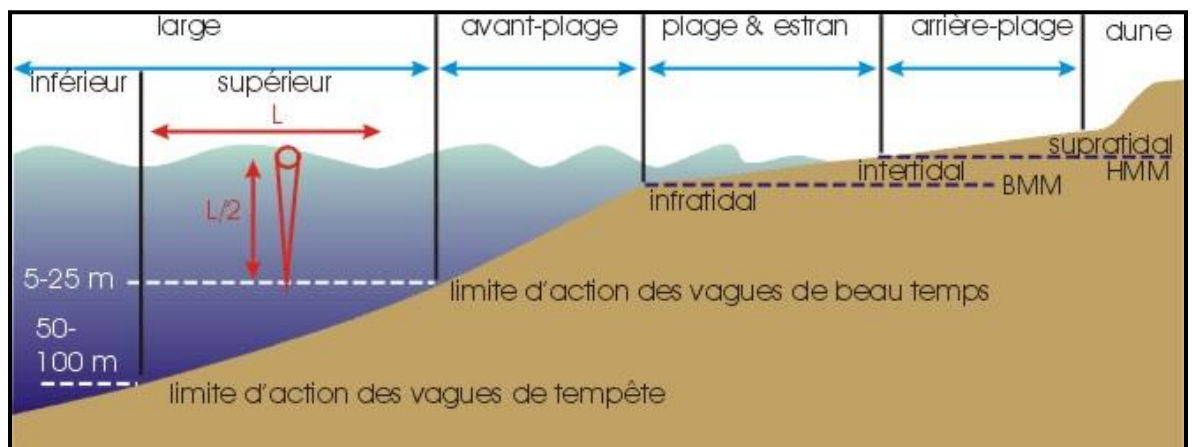


Figure I. 1 : Zonation bathymétrique du littoral et de la plate-forme continentale. HMM=hautes mers moyennes; BMM=basses mers moyennes. (Université de Liège, cours de géologie sédimentaire, 2017).

I.2. Situation géographique de la zone d'étude.

I.2.1. La commune de Sidi Ghiles.

Le site de Sidi Ghiles (anciennement appelée Novi pendant la colonisation française), est une commune de la wilaya de Tipaza.

Elle s'étend sur une superficie de 3715 Ha dans la partie Ouest de Tipaza. Elle est située à une distance d'environ 130 km d'Alger, de 7,5 km de Cherchell et de 30 km de Tipaza. Cette partie du littoral Cherchellois est, en effet, délimitée à l'Est par la commune de

Cherchell, à l'Ouest par la commune de Hadjret Ennous, au Sud par la commune de Sidi Semiane et au Nord par la mer Méditerranéenne. Elle s'allonge sur une côte de 1,5 Km dont le rivage est orienté Sud Est-Nord Ouest, et ses coordonnées Lambert sont :

- Longitude Est $2^{\circ} 07'39.36''$ et $2^{\circ} 06'47.52''$.
- Latitude Nord $36^{\circ} 35'12.44''$ et $36^{\circ}35'5.22''$

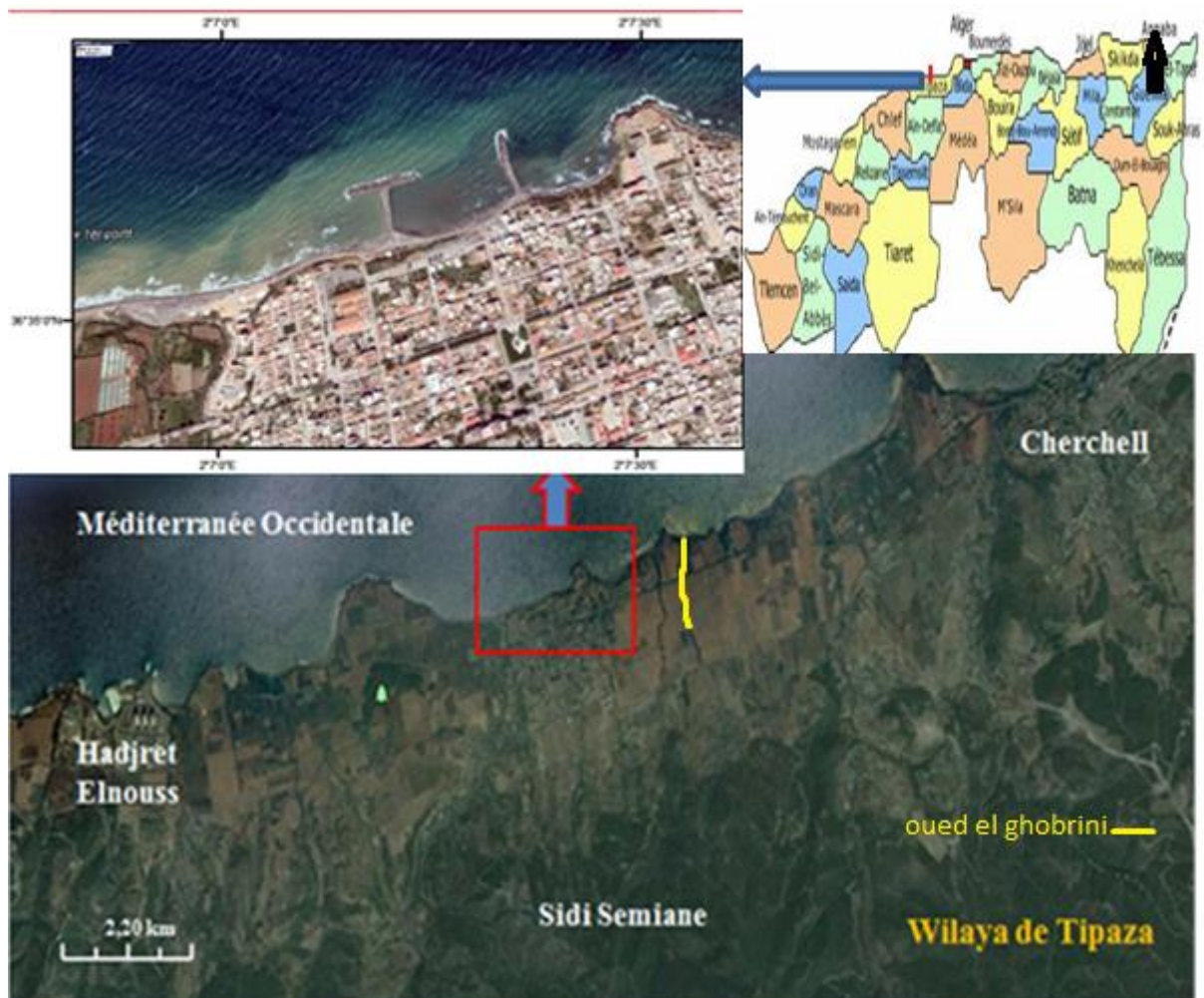


Figure I. 2 : Situation géographique du site d'étude (Google Earth 2019).

I.2.2. Situation générale du site d'étude

La zone d'étude est située dans la partie Est du front côtier de Sidi Ghiles entre un promontoire rocheux escarpé à l'Est et l'Oued de Sidi Ghiles. Elle s'étend sur une longueur de 300 m linéaire côtier, délimitée à l'Est par une habitation et à l'Ouest par le point de croisement de la route menant à la plage. Du côté Nord, on note la présence d'une zone terrassée qui surplombe la plage attenante aux habitations.

La plage centre de Sidi Ghiles représente notre zone d'étude, qui connaît actuellement une érosion très importante, c'est une bande littorale d'un linéaire de 300 m. Les habitants de cette commune

sont très simples et modestes, ils vivent essentiellement des revenus de l'agriculture et de l'artisanat, ainsi que des quelques commerces traditionnels, ou aussi de la location d'une partie de leur maison pour les estivants en été. Ces caractères sont à prendre en considération surtout lors de la proposition des variantes, pour ne pas perturber les coutumes de la zone et de lui booster pour lancer la culture du tourisme avec des espaces bien aménagés pouvant même constituer une source de divertissement et de détente pour les enfants de Sidi Ghiles.

I.3. Cadre géologique de la région.

I.3.1. Cadre géologie régionale.

La diversité des formes morphologiques, le long des côtes algériennes rappelle la richesse des formes et des formations côtières qui caractérisent les milieux littoraux. Les 1625 km de côtes sont en grande partie constitués par des reliefs rocheux, de plus ou moins forte dénivellation par rapport au niveau marin. Dans ce linéaire caractérisé, comme partout ailleurs, par la jeunesse de son relief s'insèrent des formes de côtes basses d'accumulation, comme les plages et les dunes, qui constituent un enrichissement avéré de notre patrimoine côtier.

La commune de Sidi Ghiles est située dans la Wilaya de Tipaza, elle est comprise dans le secteur centre. Sachant que Sidi Ghiles est localisée entre la baie de Bou-Ismaïl à l'Est et Cap Ténès à l'Ouest, on va développer les grands traits morphologiques et géomorphologiques de toute cette zone :

De Sidi Fredj vers le Mont Chenoua (baie de Bou-Ismaïl), se rencontre une succession de plages (de part et d'autre des rives du Mazafran). A partir de Douaouda-Marine, c'est le début des zones rocheuses à falaises plus ou moins abruptes, taillés dans des grès quaternaires assez friables et sensibles à l'érosion chimique de l'eau de mer (création de lapiés) ; toute la zone comprise entre Fouka-Marine et Tipaza est essentiellement composée :

- De ravins très rapprochés, profondément encastrés et parallèles, taillés dans des grès quaternaires et se jetant à la mer (ravin des Voleurs à Berard) ;
- De petites criques et d'anses successives taillées dans des grès à fonds sableux sur lesquels reposent des posidonies ;
- D'une plage dans la baie du Chenoua (complexe touristique de Tipaza) dont les sédiments proviennent en partie de l'Oued Nador ; le reste est le résultat de l'érosion des gros blocs affaissés (Corne d'or et secteur des ruines romaines)

Le secteur compris entre le mont Chenoua et la ville de Cherchell est formé de falaises et de zones rocheuses. Des grèves et des plages à sédiment gris foncé apparaissent à certains endroits (la plage bleue). Ces sédiments sont fournis par l'érosion des roches schisteuses du Dévonien. Le secteur de l'Oued Messelmoun (à l'Ouest de Cherchell) termine cette succession de falaises (niveau de Sidi Ghiles) ;

A partir de la rive Ouest de l'Oued jusqu'au Cap de Ténès, c'est le domaine de très hautes falaises atteignant parfois 300 m de dénivelé et plongeant à des profondeurs importantes. C'est le secteur en Algérie où le talus continental est très réduit et où l'isobathe des 50 m se rapproche très près de la côte. Ces falaises sont taillées dans des roches dures volcaniques ou sédimentaires. (Mouhoubi N Ouabel kh,2012)

I.3.2. Cadre géologie locale.

Le littoral de Sidi Ghiles est caractérisé par un mélange entre accumulation sableuse au centre et des formations rocheuses à l'Est et à l'Ouest. Il s'étale sur 1,6 km de longueur et une largeur variable entre 10 et 50 m, elle peut atteindre 65 m et ceci est observé dans la portion étudiée. (Voir Figure I. 3).

A partir de la carte géologique de l'Algérie (2^{ème} édition), à l'échelle 1/500000, on a reporté les formations locales rencontrées au niveau du site d'étude et ses alentours.

A l'Ouest, les dépôts actuels (récents) sont constitués essentiellement de calcaire, grès et argile observables sur toute la zone d'étude, qui résultent du miocène supérieur marin, ainsi que des roches ignées granitiques vers l'arrière-pays, qui apparaissent sous formes de formations rocheuses. A l'Est, des faciès marins normaux sont bien apparents du crétacé inférieur.

La géologie et la géomorphologie de la zone étudiée classe le site comme très vulnérable, sans aucune protection et face aux violentes tempêtes ; la plage Ouest de Sidi Ghiles pourrait subir des érosions et des submersions très importantes du à son exposition à l'action frontale des vagues, causant des pertes dans le profil et menaçant ainsi les agglomérations à proximité.

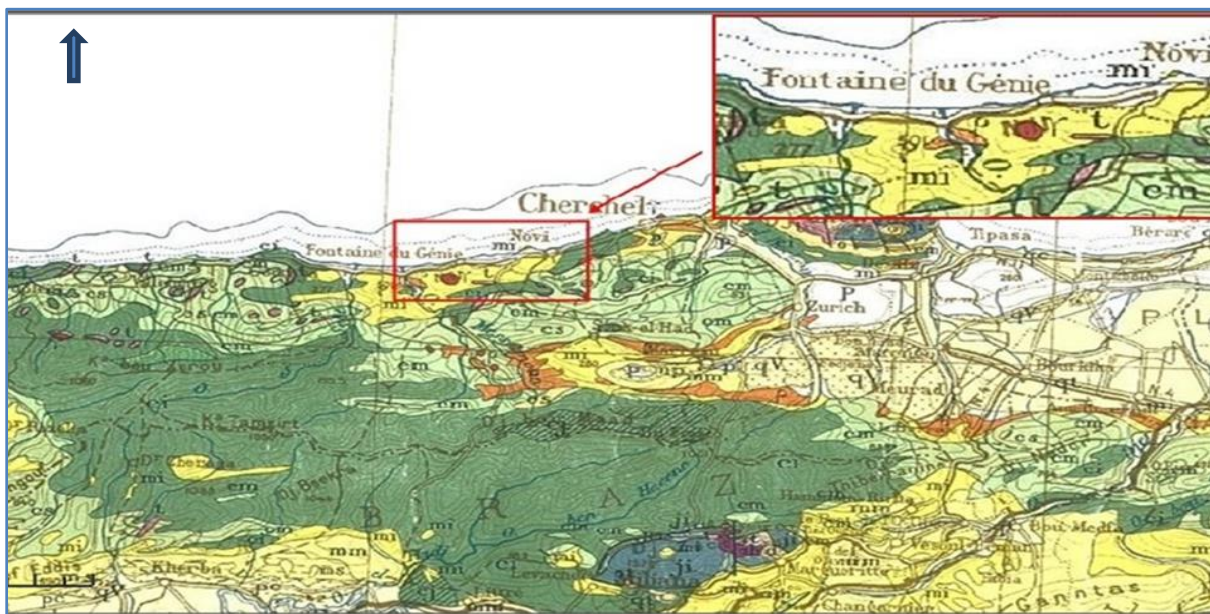


Figure I. 3 : Carte géologique régionale extraite depuis la carte géologique d'Algérie (2ème édition, 1987). Echelle 1/500 000.

I.4. Caractéristiques sédimentologiques des dépôts superficiels.

D'après la carte de la répartition spatiale du diamètre médian (D50) du site de Cherchell et Sidi Ghiles effectuée dans le cadre de l'élaboration de la carte sédimentaire de la wilaya de Tipaza (2004), Le secteur de la zone d'étude présente un espace meuble avec une prédominance d'un sable grossier dont le diamètre moyen (D50) est compris entre 500 et 2000 μm (Voir Figure I. 4).

On note un sable très grossier ($2000 \mu\text{m} < \text{D50} < 10500\mu\text{m}$) au niveau de la partie Ouest de la zone d'étude qui est plaqué contre la côte au niveau des profondeurs comprises entre les isobathes 0 et -5m.

La répartition des sédiments en place correspond à une répartition classique des sédiments en mer à savoir la diminution graduelle de la taille des sédiments de la côte vers le large (tri granulométrique dans le profil).

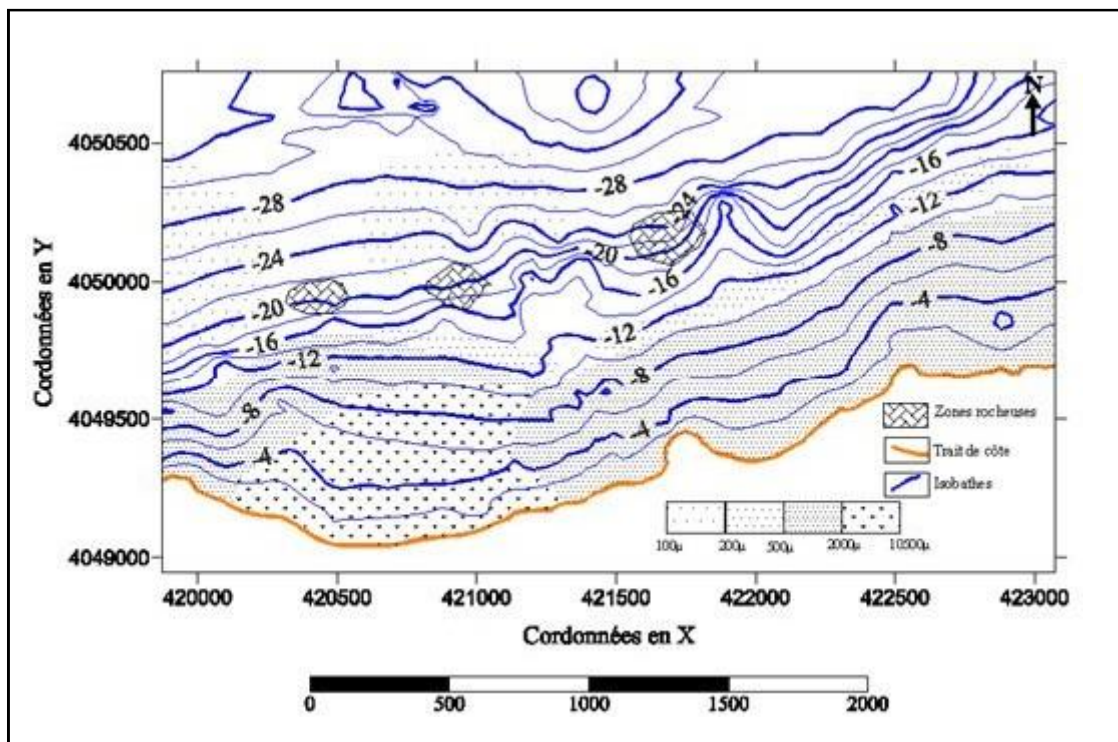


Figure I. 4 : Répartition spatiale de la médiane granulométrique entre Cherchell et Sidi Ghiles (LEM, 2004).

I.5. Données bathymétriques.

L'analyse globale de la bathymétrie de la zone d'étude indique une morphologie irrégulière marquée par endroits par des resserrements des isobathes et des incurvations vers la côte. La pente moyenne générale est de l'ordre de 2 %.(Voir Figure I. 5).

L'analyse globale de la bathymétrie de la zone d'étude indique une morphologie irrégulière marquée par des endroits par des resserrements des isobathes et des incurvations vers la côte. Ces resserrements sont constatés surtout dans la partie centrale entre les isobathes

0 m et -18 m, ce qui indique une formation d'un point de convergence sous l'effet de la concentration de l'énergie de la houle à cet endroit.

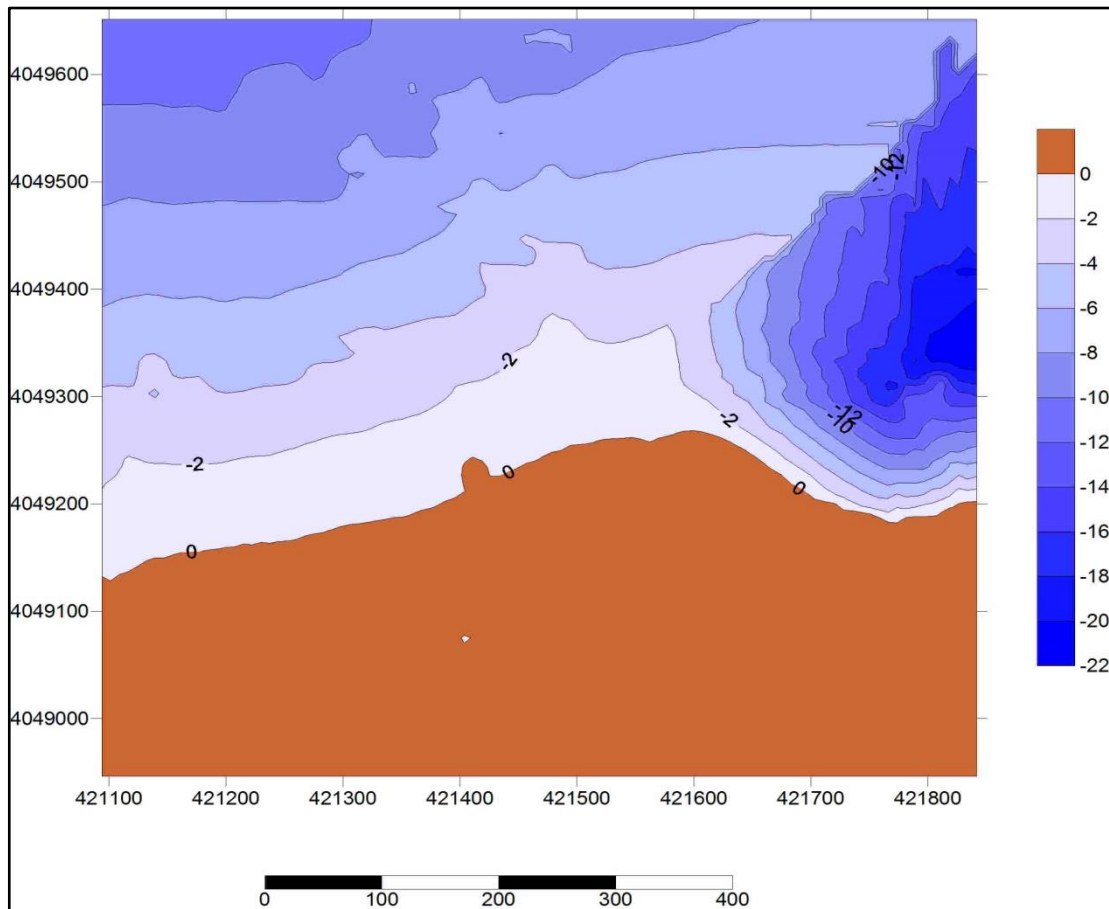


Figure I. 5 : La carte bathymétrique dans la zone d'étude

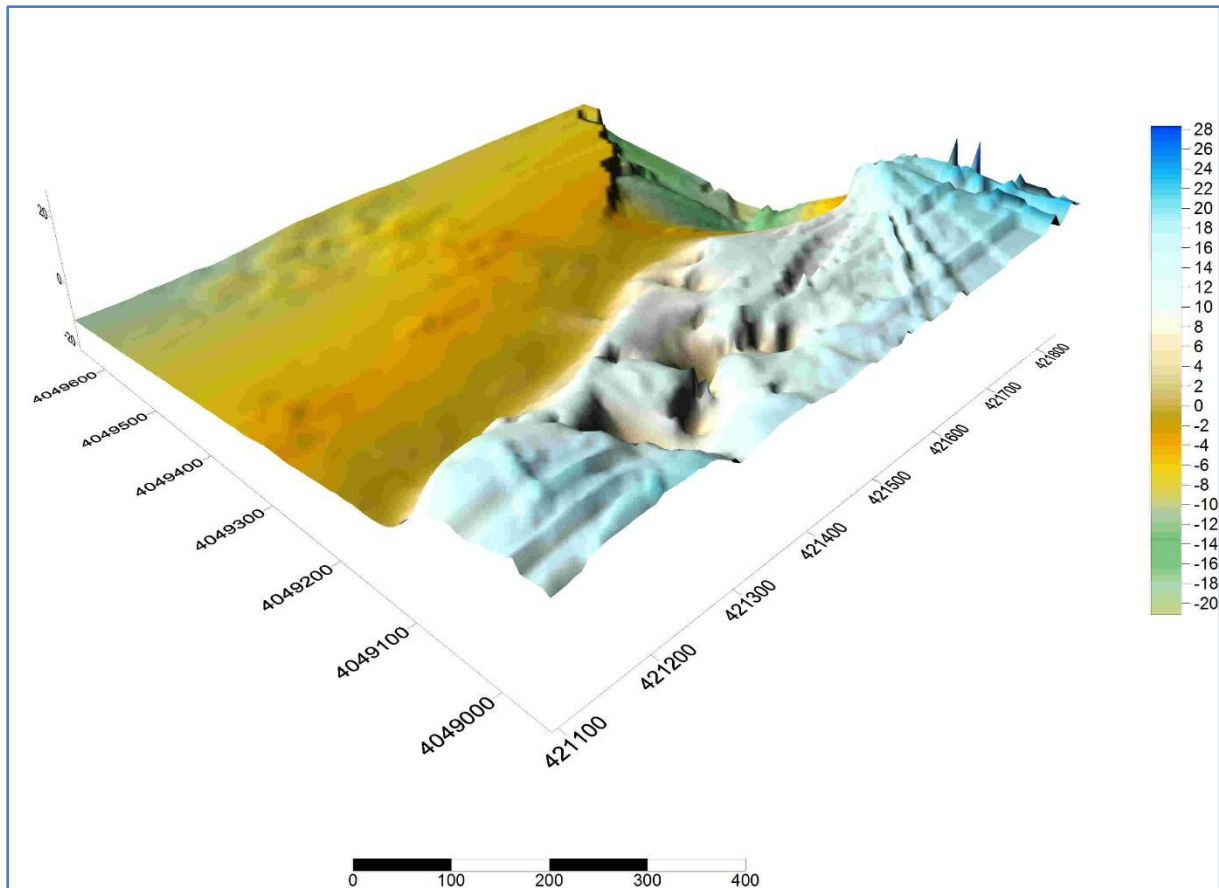


Figure I. 6 : modèle en 3D de la zone d'étude

I.6. Données climatiques et hydrographiques.

I.6.1. Cadre hydrographique.

L'origine des sédiments marins est en grande partie terrigène. Les oueds alimentent le plateau continental en sédiments sont ensuite répartis par les courants marins, pour notre site d'étude, on a choisit d'étudier l'oued Ghobrini pour des raisons de localisation (proche de Sidi Ghiles).

Avant d'entamer les études sur la répartition de ces sédiments, il est nécessaire de connaître la nature de ce oued (topographie, débit liquide et solide...) et son climat qui est la cause de l'ablation et transport des matériaux de l'amont vers l'aval jusqu'à la mer.

Oued el Ghobrini se situe à l'Ouest de Cherchell à une altitude maximale de 1417 m, il est long de 34 Km sur un périmètre de 63 Km. Les débits de l'Oued el Ghobrini augmentent progressivement depuis le mois de septembre pour atteindre $2 \text{ m}^3/\text{s}$ en mois de Mars, puis ils diminuent subitement vers le début du mois d'Avril jusqu'à des valeurs nulles en mois de Juillet et d'Aout, ceux-ci est due principalement à la diminution des précipitations et à l'absence des sources qui alimentent l'oued. (Voir Figure I. 6).

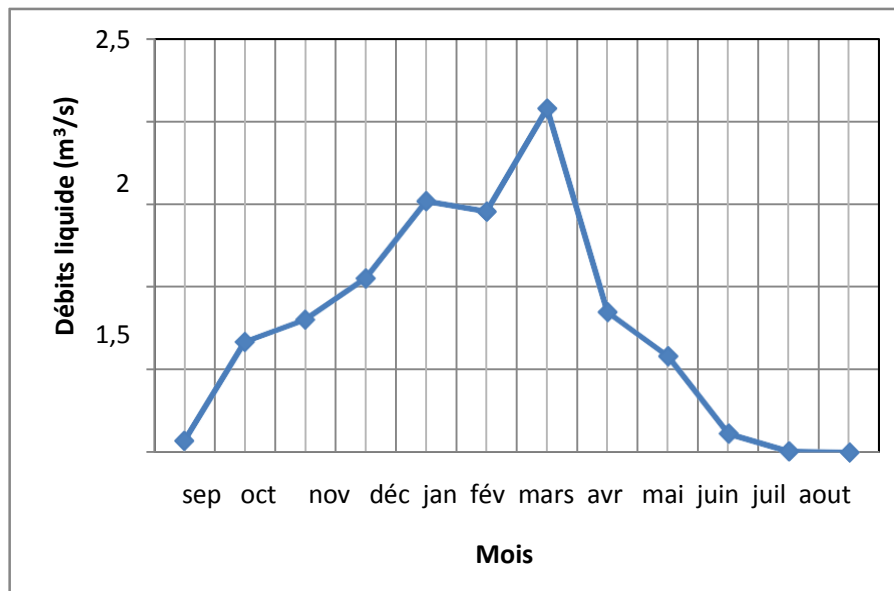


Figure I. 7 : Evolution mensuelle du débit liquide de l'Oued el Ghobrini (ANRH, 2011)

I.6.2. Cadre climatique.

L'étude climatique porte sur l'analyse des températures, des précipitations et des vents au large, chacun de ces facteurs a un rôle déterminant l'évolution du bassin versant, donc des apports liquides et solides alimentant les plages, mais aussi influençant directement les régimes hydrodynamiques régnant sur la zone d'étude.

Sidi Ghiles se situe sur le 36^{ème} parallèle Nord et appartient au domaine méditerranéen sub-humide. Les précipitations y sont encore assez élevées sans créer une humidité comparable à celle du domaine humide. Cette légère tendance à la sécheresse suffit à déterminer des changements dans la couverture pédologique et végétale.

Les données de climat local sont fournies par O.N.M :

Observations allant de 1995 jusqu'à 2005.

-Station : Ténès

-Altitude : 17 m

-Latitude : 36°30 N

-Longitude : 01°20 E

Pour les données au large, elles sont fournies par U.S Naval Weather Command pour la période de 1963 à 1970.

I.6.2.1. Précipitations

En raison de la présence de la mer, les climats côtiers, souvent humides, modifient localement les modalités de l'hydrologie continentale superficielle et profonde. Ainsi, les processus d'érosion dont l'intervention dépend de l'eau trouvent des conditions favorables.

Ces données de pluviométrie ont été représentées dans le diagramme suivant :

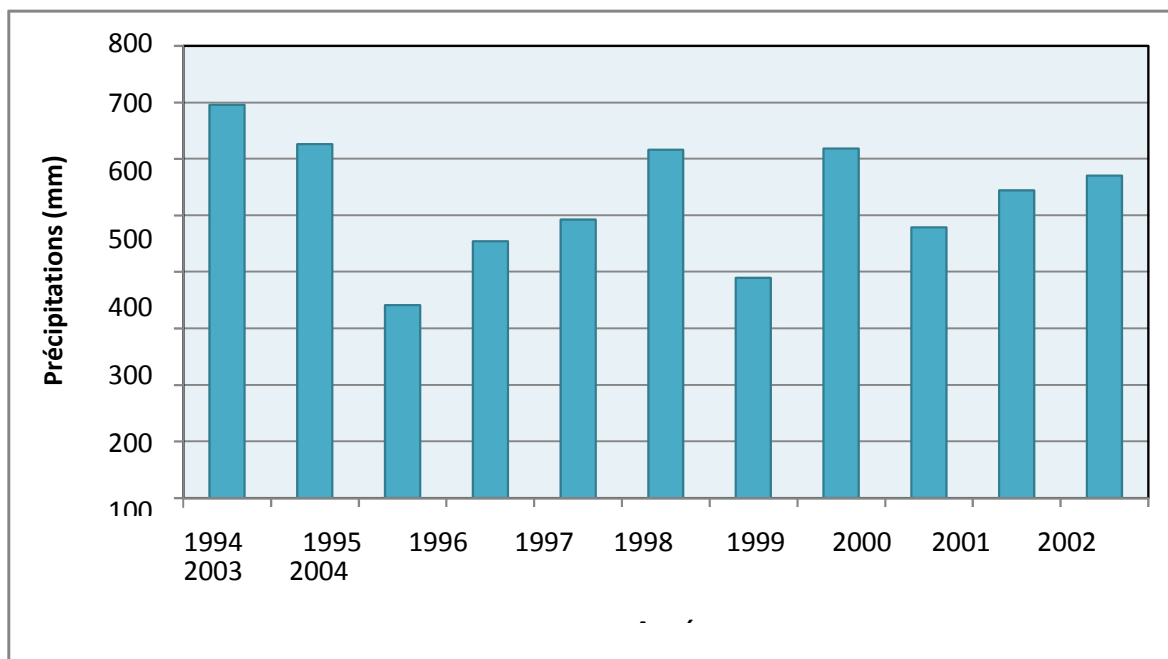


Figure I. 8 : Précipitations annuelles en mm (ANRH, 1994-2004).

Dans notre zone d'étude, les précipitations, de 2 à 45 mm, se répartissent d'une manière irrégulière sur l'année. Les mois de Septembre à Mai et plus particulièrement de Novembre à Février sont les plus arrosés. On remarque aussi que les précipitations, pour le même mois au fil des années sont variables depuis 1994, il y'a des années très humides et d'autres beaucoup plus sèches.

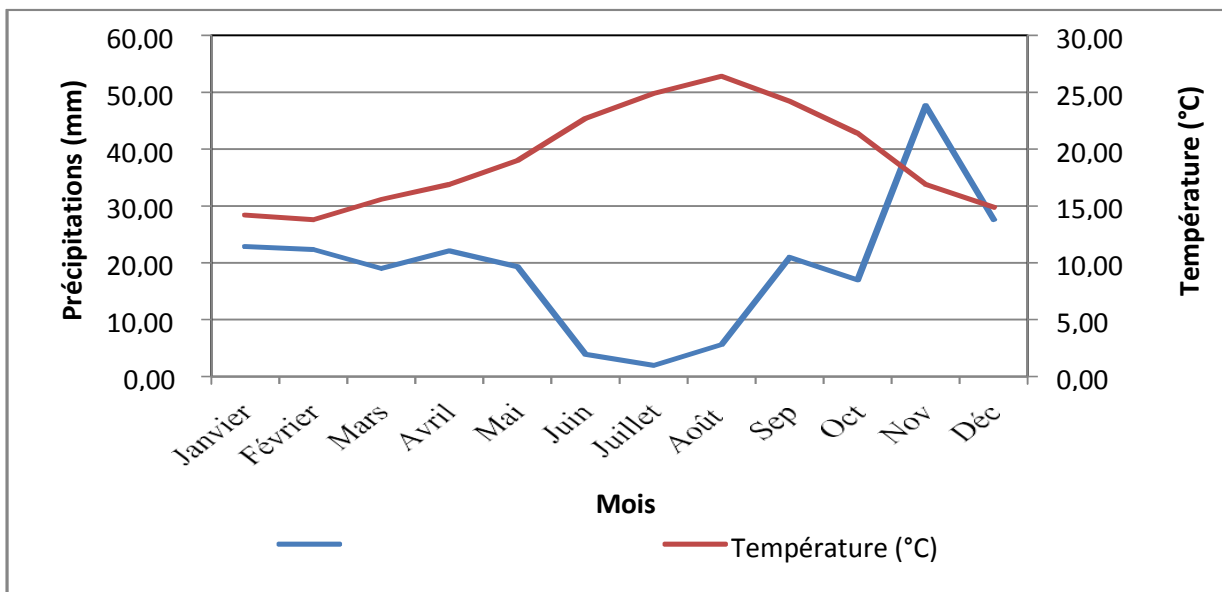
I.6.2.2. Températures

L'inertie thermique de la mer atténue les contrastes thermiques quotidiens ou saisonniers, ainsi un traitement des données concernant les températures est nécessaire. Les données de températures ne sont pas enregistrées au niveau de la station précédente, alors on a utilisé ceux de la région de Ténès vu qu'elle est la plus adéquate, le tableau suivant représente les températures moyennes annuelles maximales et minimales en (°C) :

Tableau I. 1 : Variation des températures maximales, minimales et moyennes (ANRH, 1995-2004)

	995	996	997	998	999	000	001	002	003	004
T°MAX	2	1,9	2,5	2,3	2,6	2,7	3,1	2,8	3,5	3,1
T°MIN	5	5,4	6,6	5,9	6,1	5,8	6,5	5,8	6,5	5,8
T° (moy)	7	8,6	9,5	9,1	9,4	9,3	9,8	9,3	0	9,5

Un traitement des données pluviométriques et thermiques peut nous informer sur la nature du climat dans notre zone, ainsi le digramme ombrothermique suivant est obtenu en portant sur les abscisses les mois, et sur les axes verticaux les précipitations et les températures mensuelles moyennes et ceci durant une décennie, le graphe obtenu est représenté par la Figure suivante:

**Figure I. 9 :** Diagramme ombrothermique de la commune de Sidi Ghiles durant la durée (ANRH-ONM, 1995-2004)

On distingue deux périodes : une période sèche et une période chaude s'étalant du mois de Janvier jusqu'à la fin Octobre, avec des températures variant entre 15 °C en hiver et dépassant les 25 °C en été et de faibles pluies qui ne dépassent pas les 20 mm. Ainsi qu'une période humide est plus ou moins douce où les températures ne descendent pas au-dessous de 15°C, avec des pluies assez importantes dépassant les 40 mm en Novembre.

I.6.2.3. Le vent local :

L'action du vent sur la surface de l'eau génère les vagues; sur la plage il déplace les particules pour les déposer ailleurs. Les mesures effectuées par la station de Ténès, une fois traitées nous donnent le tableau suivant :

Tableau I. 2 : Répartition annuelle des vents selon la direction et l'intensité (ONM, 1995-2004)

Années	995	996	997	998	999	000	001	002	003	004
Direction	90	300	260	260	260	260	300	300	340	140
Intensité (m/s)	6	8	7	6	6	1	7	3	7	3

Ces résultats portés sur un diagramme sont représentés dans le diagramme suivant :

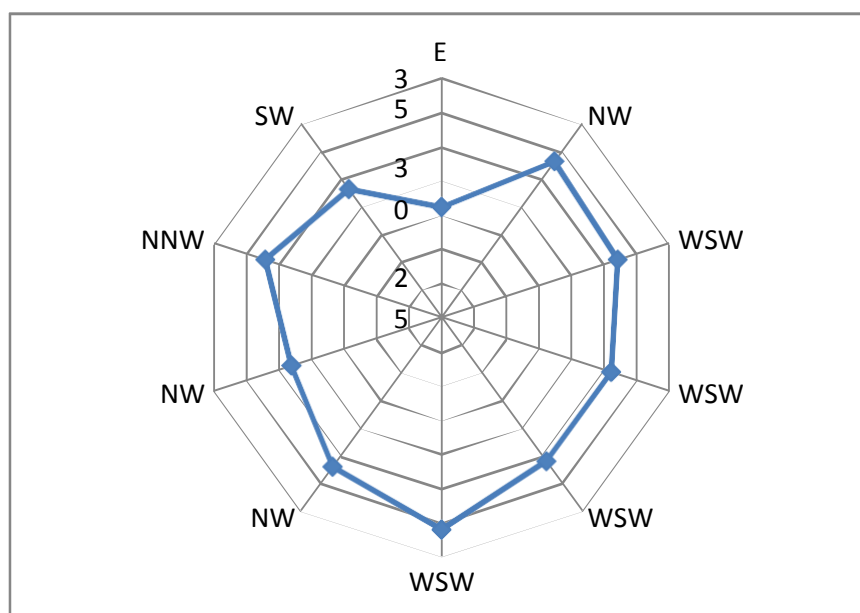


Figure I. 10 : Rose des vents annuelle de Ténès (ONM, 1995-2004).

On remarque que les vents les plus dominants sont de direction Ouest-Sud-Ouest et Nord-Ouest (WSW = N260 et NW = N300) avec des intensités dépassant les 30 m/s surtout en l'an 2000, en 2004 les vents Sud-Est sont apparents avec une vitesse de 23 m/s.

I.7. Données océanographiques

I.7.1. Houle au large

Le principe de l'analyse de la houle au large est basé sur les observations faites par les navires (données du SSMO - Summary of Synoptic Meteorological Observations) et s'étalant sur une période de 8 ans (1963 à 1970).

Une analyse statistique de ces données permet de définir les secteurs des houles dominants.

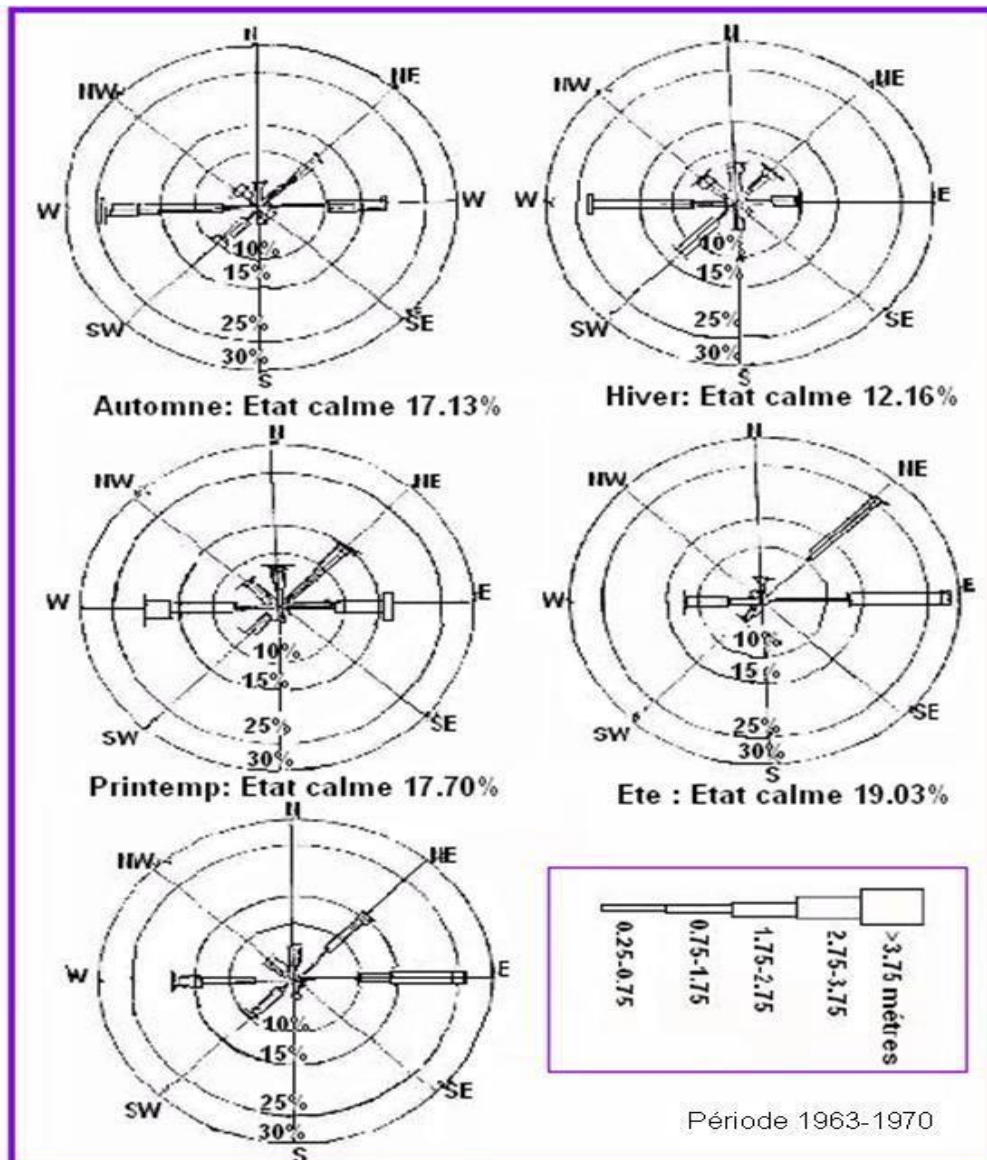


Figure I. 11 : Roses trimestrielle et annuelle des houles au large (SSMO 1963-1970)

Interprétation :**Tableau I. 3 :** Fréquences mensuelles de la houle au large par direction(LEM 2009)

<i>Mois</i>	<i>N</i>	<i>NE</i>	<i>E</i>	<i>SE</i>	<i>S</i>	<i>SO</i>	<i>O</i>	<i>NO</i>
<i>Janvier</i>	8.10	12.90	18.20	5.00	6.50	13.20	28.80	7.30
<i>Février</i>	8.80	10.30	12.60	4.00	6.10	16.90	35.60	5.80
<i>Mars</i>	11.30	12.60	15.80	3.60	4.50	12.30	30.50	9.20
<i>Avril</i>	11.70	15.40	16.00	2.00	4.40	13.70	26.70	10.20
<i>Mai</i>	8.20	26.30	31.90	3.00	3.30	7.20	13.90	6.20
<i>Juin</i>	9.20	29.10	29.80	1.80	1.40	8.20	16.40	4.20
<i>Juillet</i>	5.90	32.50	35.10	1.40	1.00	5.90	16.30	2.00
<i>Août</i>	8.80	27.70	37.30	1.90	1.10	5.00	13.40	4.90
<i>Septembre</i>	6.70	26.40	40.50	2.20	2.30	4.60	14.80	2.50
<i>Octobre</i>	7.80	14.10	20.30	3.20	4.20	14.80	28.80	6.80
<i>Novembre</i>	5.50	5.80	10.00	5.10	8.00	15.90	40.40	9.40
<i>Décembre</i>	10.20	6.20	9.40	4.60	7.50	15.00	37.10	10.00

Les résultats de cette analyse groupés dans le tableau ci-dessus dénotent ce qui suit :

Les houles les plus fréquemment observées appartiennent aux secteurs Ouest, Est et - Nord Est.

La fréquence d'observations sur l'année des houles d'Est et d'Ouest sont sensiblement identiques avec toutefois une légère prédominance du secteur Ouest.

En été, les houles d'Est prédominent.

En hiver, les houles d'Ouest prédominent.

Le secteur Nord a une répartition assez régulière durant l'année.

Conclusion :

◆ Les houles provenant des secteurs Ouest et Est sont les plus fréquentes, néanmoins pour les fortes houles, le secteur Ouest prédomine.

◆ Les houles de tempêtes proviennent essentiellement du secteur Ouest.

Chapitre II : Modélisation de l'hydrodynamique sédimentaire du littoral de Sidi Ghiles

Introduction :

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. Le déferlement des vagues engendre des courants (de dérive, de retour, d'arrachement) qui vont à leur tour agir sur le processus de déferlement et ainsi de suite. La zone de déferlement est le siège d'une intense activité sédimentologique.

La dérive littorale des sédiments est un résultat direct des propriétés des sédiments et le courant de dérive généré par l'incidence de la houle oblique. Les houles associées aux courants côtiers sont les facteurs générateurs du transport côtier du sable. Les estimations de la dérive littorale des sédiments doivent reposer sur des études analytiques de l'évolution du trait de côte prenant en compte le régime des houles et des courants dans le secteur d'étude sur une période assez longue.

Afin de comprendre le fonctionnement hydrosédimentaire du littoral de Sidi Ghiles , une modélisation véritablement bidimensionnelle de la propagation de la houle, de la courantologie et du transport sédimentaire est mise en œuvre.

I.8.Présentation de la modélisation

I.8.1. Principe de la modélisation

L'approche modélisatrice est basée sur l'utilisation de modèles numériques pour la simulation de propagation de la houle, le flux énergétique et le transport sédimentaire, construits à l'aide des codes de calcul Mike 21 (SW, HD et ST) avec une approche double.

La construction du modèle de simulation a été effectuée à partir d'un levé bathymétrique détaillé réalisé durant la période estivale de 2018. Les données de houles au large ont été extraites du Summary of Synoptique Météorologiques Observation (SSMO) couvrant une période de huit ans qui s'étalent de 1963-1970.

Le modèle numérique nous permet d'illustrer les houles, le courant dû aux vagues et les modes de transport du littoral. Le modèle morpho dynamique repose sur un couplage des modèles de propagation de la houle et du modèle de circulation et du modèle de transport sédimentaire dans MIKE21 (Than, 2015).

Le principe général et les phases de la modélisation mises en œuvre pour étudier les mouvements sédimentaires dans la zone d'étude :

- La première partie consiste à déterminer le climat de houle qui règne dans la zone de déferlement à travers la simulation de différents climats de houle au large des grandes aux très faibles profondeurs ;
- La seconde partie consiste à déterminer la courantologie générée par les vents et les houles dans les alentours de notre zone d'étude ;

- La troisième partie consiste à estimer les taux de transports sédimentaires sous l'effet de la dérive littorale générée par les houles obliques approchant le site d'étude.

Le modèle numérique utilisé dans le cadre de cette étude est le MIKE21-DHI de l'institut hydraulique Danois qui est un puissant système de modélisation numérique des phénomènes physiques (Houle, Courant et Transport sédimentaire), il permet de faire des simulations à grande échelle et d'augmenter la résolution des mailles de calculs à certains endroits du domaine simulé à l'aide de grilles imbriquées.

Mike 21 est un modèle de houle spectrale basé sur la conservation de la densité de l'action d'onde qui permet de simuler la propagation des états de mer dans les domaines offshore et côtier. Le modèle inclus les effets de la réfraction et de shoaling liés aux variations de bathymétrie, la génération de la houle par action du vent, la dissipation de la houle. La résolution par méthode des volumes finis se base sur le maillage flexible composé d'élément triangulaire dans le plan horizontal. Ces éléments peuvent être affinés dans les zones d'études d'intérêt particulier (DHI, 2014).

Une étude bidimensionnelle de la propagation de la houle, de la courantologie et du transport sédimentaire est mise en œuvre ; celle-ci est effectuée avec les modules HD, SW et ST, respectivement, de la suite du logiciel MIKE 21. Une courte description de ces modules est donnée ci-après.

Dans un premier temps, il s'agit de déterminer à l'aide du modèle SW le climat de houles dans la région d'intérêt. Les sortants de ce module ainsi que les niveaux d'eau aux frontières ouvertes de la grille de calculs hydrodynamiques et les vents en surface permettront de calculer les courants causés par l'effet combiné des vents et des houles au moyen du module HD. Finalement, les courants générés par le module HD et les données de houles générées par le module SW seront pris en entrée par le modèle de transport de sédiment ST qui calcul alors le transport de sédiments à chaque pas temporel des simulations hydrodynamiques ainsi que le transport net de sédiments durant la période de simulation.

MIKE 21 SW

MIKE 21 SW est le module de propagation de la houle spectrale. Le modèle simule la propagation, l'évolution et la transformation des vagues générées par les vents et des houles au large et dans les zones côtières (DHI,2014).

MIKE 21 SW prend en compte la génération de la houle par action du vent, les interactions non linéaires vague-vague ; la Dissipation due au frottement sur le fond ; la Dissipation due au déferlement ; la Réfraction et le Shoaling due à la variation de la profondeur ; les Interactions vagues-courants et les effets de la variation temporelle de la profondeur

MIKE 21 HD

MIKE 21 HD constitue le noyau de la suite logicielle MIKE 21 en fournissant les paramètres hydrodynamiques nécessaires aux autres modules. C'est un modèle bidimensionnel pour les calculs hydrodynamiques à surface libre qui permet de simuler les variations du niveau d'eau et des écoulements, moyennés sur la colonne d'eau, en fonction des paramètres de forçage des zones côtières et du large (DHI, 2014). Le modèle hydrodynamique de MIKE 21 est utilisé pour simuler de nombreux phénomènes hydrauliques dont la marée, les courants induits par le vent et la houle ainsi que les surcotes. MIKE 21 HD prend également en compte les phénomènes d'immersion et émergence des côtes.

MIKE 21 ST

MIKE 21 ST calcule le transport sédimentaire sur le fond et en suspension sous l'action combinée des courants et de la houle. Dans la zone de déferlement, les courants de retour sont inclus. Le modèle est déterministe et demande un minimum de calibration. Les taux initiaux de sédimentation/érosion sont calculés sur base de l'équation de conservation de la masse sédimentaire.

MIKE21/3 FM

Le modèle couplé MIKE21/3 FM comprend différents modules tels que HD, ST, et SW, etc. Nous pouvons les choisir dans la simulation. Le modèle comprend également un couplage dynamique entre les modules HD et SW.

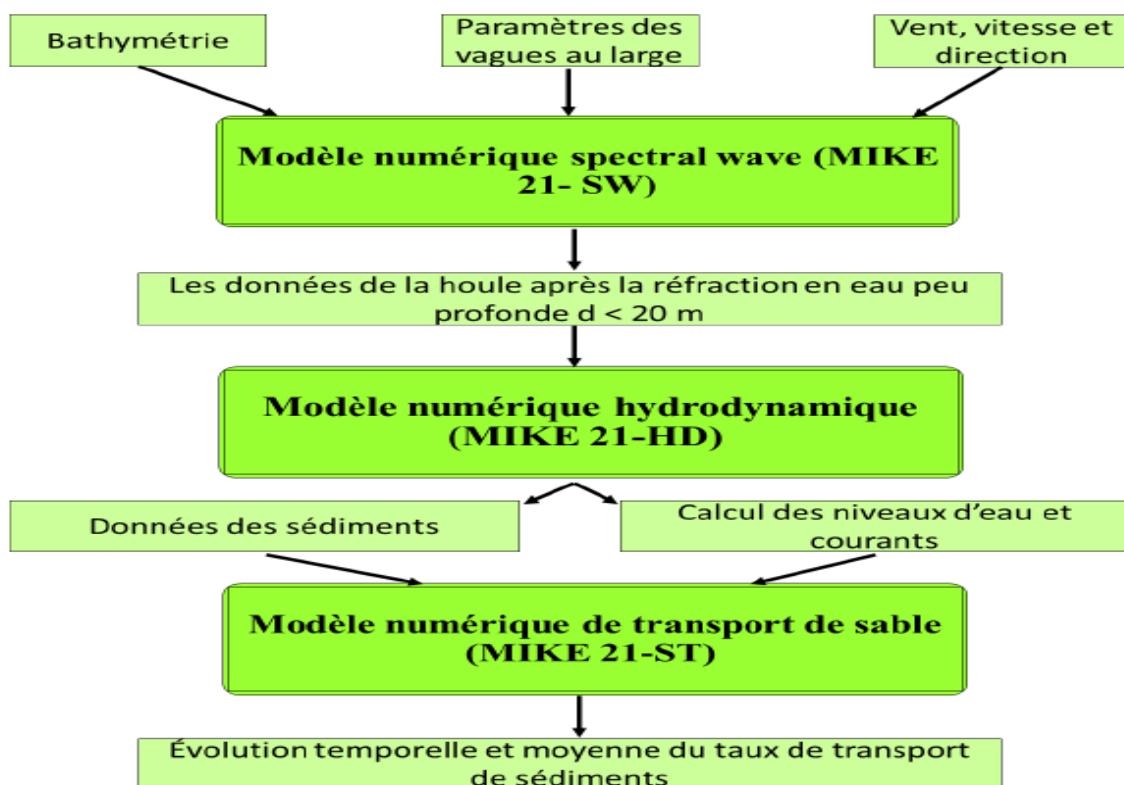


Figure II. 1 : organigramme de la modélisation des trois modules du Mike 21

I.9. Construction du modèle

I.9.1. Emprise et bathymétrie

Les changements morphologiques du domaine marin et les migrations longitudinales et/ou transversales des corps sédimentaires ont pu être observés sur des cartes bathymétriques.

L'étude bathymétrique est une étude primordiale dans notre domaine afin de reconnaître et interpréter la morphologie sous-marine, pour cela nous avons procédé à une analyse bathymétrique pour essayer d'obtenir un résultat fiable et précis et cela en adoptant la méthode de récolte sur terrain.

Une carte bathymétrique a été acquise pour la zone d'étude à partir de plusieurs levés réalisés durant le mois de juillet 2018, afin d'obtenir une carte globale de la région à partir de la ligne de cote jusqu'à la profondeur de -15m.

I.9.2. Création 2D Bathymétries sous le maillage

Le module '*Mesh Generator*' nous offre un environnement pour la création, l'édition et la présentation de bathymétries numériques 2D détaillées. '*Mesh Generator*' génère un format souple de maillage (*.MESH).

Le programme nous fournit les utilitaires pour importer des données du trait de côte, notamment les bathymétries. Pour faciliter le processus d'élaboration manuelle des données et leur présentation, des cartes graphiques des images de fond peuvent être importées et superposées aux données bathymétriques.

Diverses options d'interpolation sont disponibles pour fournir la meilleure méthode possible pour notre type de données. Lorsque la bathymétrie a été préparée, nous pouvons utiliser les utilitaires d'exportation de données bathymétriques de sortie dans différents formats.

La création d'une bathymétrie est généralement divisée en les phases suivantes : le choix du système de projection, le traitement des données bathymétriques XYZ, la génération du maillage et l'interpolation des valeurs bathymétriques sur le maillage.

L'emprise et le maillage du modèle sont illustrés dans la (Figure II. 3) Le maillage est composé d'éléments triangulaires dont la taille a été ajustée suivant les évolutions bathymétriques et la précision souhaitée. Le pas de maille est de l'ordre de 10m dans la zone côtière comprise entre l'isobathe -15 m et la cote.

La carte bathymétrique du modèle est obtenue par interpolation des sondes bathymétriques et des levés topographiques sur le maillage ainsi définis. La bathymétrie obtenue (Figure II. 4) présente des valeurs comprises entre -15m et 0m par rapport au zéro hydrographique.

- Les étapes de cette étude sont résumées dans l'organigramme suivant :

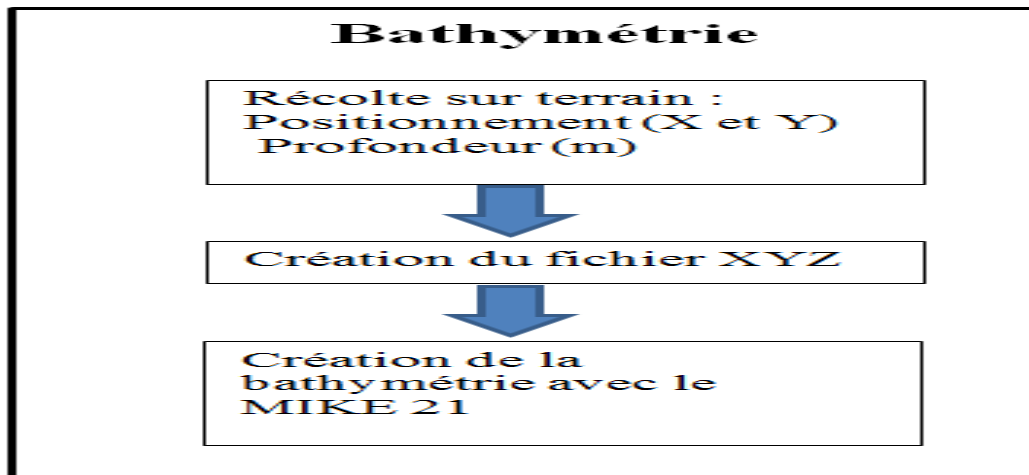


Figure II. 2 : Organigramme de création d'une bathymétrie.

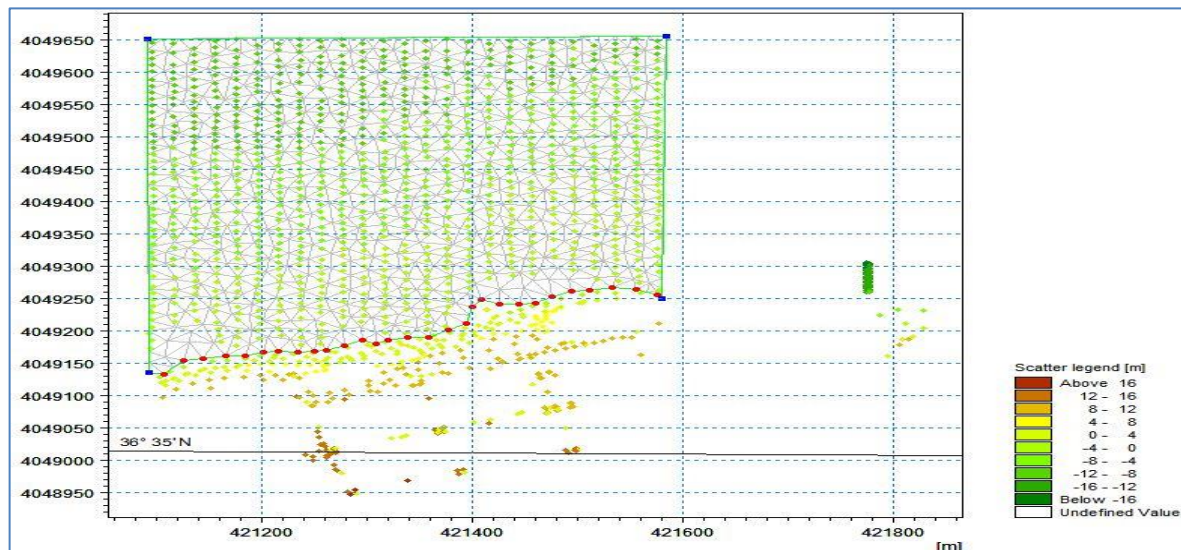


Figure II. 3 : Emprise et maillage du modèle côtier (Mesh) de la zone de Sidi Ghiles

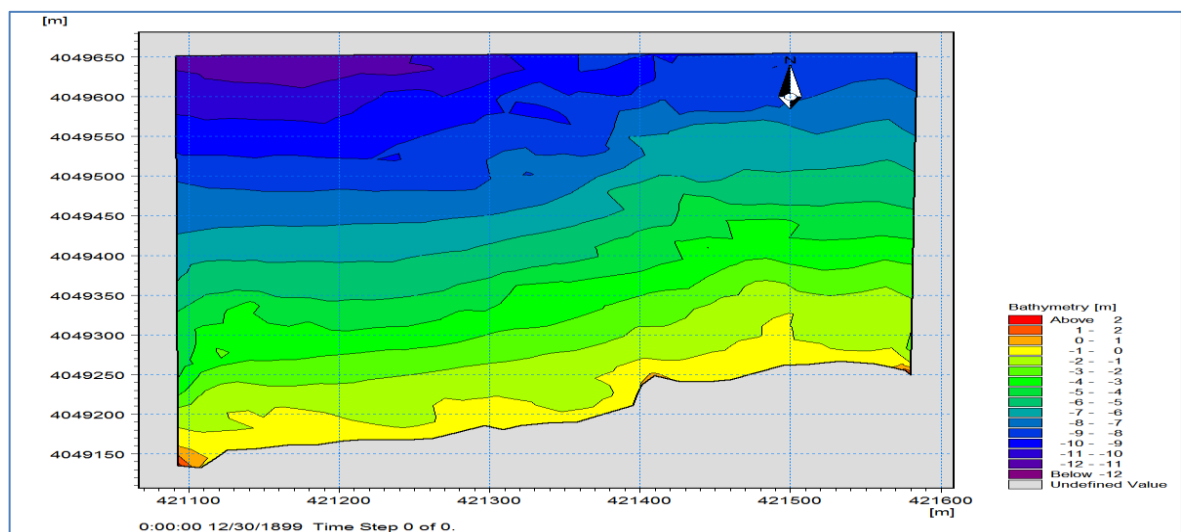


Figure II. 4 : Carte bathymétrique de la zone de Sidi Ghiles .

L'analyse de la carte bathymétrique de la zone de Sidi Ghiles, fait ressortir deux zones morphologiques bien distinctes sont mises en évidence :

- **La zone côtière :** montre des isobathes généralement perturbées (entre 1 à 5 m) et une morphologie particulière caractérisée par la présence de rides d'avant côte discontinue (séparés par un sillon), bien développée à l'approche de la côte. Ce type de morphologie témoigne d'une mobilité de ces fonds sous l'action des houles et les courants engendrés avec ses houles. Par conséquent, cette zone est caractérisée par une topographie complexe et la nature du fond marin dépend essentiellement des fluctuations hydrométéorologiques.
- **La zone au large :** présence des isobathes parallèles au rivage, elles sont relativement espacées traduisant ainsi un fond régulier. Ce fond est moins actif par rapport à la zone côtière.

I.9.3. Configuration du module SW :

Afin de simuler la propagation de la houle du large vers la cote, l'équation choisie est la formule directionnelle dans le domaine spectral et la formule quasi-stationnaire dans le domaine temporel. L'algorithme d'itération Newton-Raphson avec les valeurs par défaut a été utilisé.

- **Données d'entrée et calibration :**

Plusieurs types de données sont nécessaires pour cette étude. Celles-ci seront insérées en entrée du modèle de MIKE 21 Spectral Waves FM . Les différentes données utilisées sont mentionnées ci-dessous :

- Bathymétrie ;
- Des Directions des houles dominantes ; ici on la direction Nord, Nord Est et Nord Ouest.
- Des données sur le vent on a choisi des valeurs constantes ; une vitesse de 6m/s et une direction a 45°.

La procédure de calibration est ensuite exposée. On a choisi le déferlement et le frottement du fond comme paramètres de calibration. Le déferlement est spécifié en utilisant un gamma constant $\gamma = 0.8$. Le frottement du fond marin est spécifié en utilisant la rugosité de Nikuradse (kN en mètre) égale à 0.04, les deux paramètres sont déterminés par défaut.

Pour calibrer le modèle hydrodynamique, deux facteurs ont été pris en compte. Ils sont la viscosité et la rugosité du fond. La constante de Smagorinsky varie de 0,24 à 0,9 (DHI, 2014). Le nombre de Manning est de 24 à 35 (mètre un tiers par 212 seconde). L'estimation qu'on l'a choisi pour les deux paramètres, était par défaut 0.8 et 32 respectivement.

Après avoir introduit la bathymétrie et la données d'entrées et définir les conditions limites, la simulation a été lancée. La durée d'un effort de simulation varie dans le temps, selon la complexité des objectifs, des processus impliqués et de leur saisonnalité.

Les données sortantes sélectionnées qui représentent le climat de houle à la côte sont les suivantes : (Tableau II 1)

Tableau II. 1 : Sortants du modèle SW.

Name	Symbole	unité
Hauteur Significative	H_{m0}	mètre
Période pique	T_p	seconde
Direction moyenne	MWD	degrés
Ecart-type	DSD	degrés
Contraintes de radiation	S_{xx}, S_{xy}, S_{yy}	m^3/s^2

Les données de houle au large utilisées pour le calcul de la réfraction de la houle au L.E.M sont celles du Summary of Synoptic Meteorological Observations (SSMO) de 1963 à 1970. Ainsi trois (03) directions ont été retenues en tenant compte des tableaux de fréquence par direction des houles au large ainsi que l'incidence de ces houles par rapport à la zone d'étude :

Une direction approximativement perpendiculaire à la côte pour mesurer les effets d'une houle frontale (**45°N**).

Une direction de houle (**340°N**).

La direction de (**300°N**).

Tableau II. 2 : des Données de houle au large :

Direction (deg)	N300	N340	N45
Période (s)	8	8	8
Hauteur (m)	2.67	2.61	2.56

I.9.4. Configuration du module HD

L'objectif de cette partie est de modéliser les champs de courants générés par les houles approchant le rivage, au moyen du module HD. Les contraintes de radiation étant calculées par le module SW elles nous ont servi à modéliser la courantologie au niveau de la zone d'étude.

Le niveau de la mer est considéré constants (0.34 m). Les flux tout au long des limites ouvertes sont considérés perpendiculaires par rapport aux limites. Par conséquent la surface initiale est considérée nulle aussi. La viscosité et la résistance sont considérées comme valeurs par défaut (0.5 et $32 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivement). Les contraintes de radiations incluses dans chaque grille de calcul sont calculées par le module SW.

I.9.5. Configuration du module ST

La modélisation intégrée du transport de sédiments doit tenir compte à la fois des courants de vent et des courants associées aux vagues. Dans ce cas, l'approche est complexe et doit faire appel à un système de modélisation intégrée comprenant trois modèles numériques : un modèle hydrodynamique, un modèle de vagues et un modèle de transport de sédiments non-cohésifs (sables) sous l'effet combiné des vagues et des courants.

Le critère de choix pour la houle représentative concerne donc sa capacité à induire une dérive littorale conforme à la dérive mesurée ou estimée. Ce chapitre consiste à modéliser le transport sédimentaire induit par les courants et les houles simulés durant les trois périodes citées précédemment au moyen du module ST de la compilation MIKE 21.

Sous l'action combinée des courants et des vagues, le modèle Mike 21 ST calcule les taux de transport de sédiments non cohésifs. Les courants qui transportent les sédiments sont causés par les vents, les vagues ou une combinaison des deux. L'effet des vagues déferlantes et non déferlantes est inclus dans le calcul des taux de transport.

Les taux de transport de sédiments sont calculés à partir de données bathymétriques, des profondeurs instantanées de l'eau, les tailles et la gradation spatiale des sédiments et les variations spatio-temporelles des courants et des vagues dans la région étudiée.

L'érosion et la déposition des sédiments peuvent ensuite être calculées par l'utilisateur à partir des gradients spatiaux des taux de transport de sédiments fournis par le modèle ST. Dans la zone de déferlement, les courants de retour sont inclus.

Pour calculer le débit sédimentaire dans chaque point, Deux méthodes de simulation sont disponibles dans les conditions combinées de la houle et du courant (DHI, 2014g) : la méthode Bijkeret la méthode STP du DHI.

La méthode STP traite les différences de phase de l'écoulement oscillatoire, la tension du cisaillement sur le fond et la concentration sédimentaire en suspension dans sa formulation pour le calcul du transport sédimentaire. Deux méthodes de simulation sont disponibles pour le calcul des taux de transport : modèle 2DH et modèle STPQ3D.

Le modèle 2DH est une approche de plan bidimensionnel horizontal (2DH). Les taux de transport sont calculés dans le sens du courant moyen, avec une composante transversale résultante de la pente des fonds.

Le modèle STPQ3D est une quasi-tridimensionnelle (Q3D) de l'hydrodynamique et du transport de sédiment. Il calcule l'hydrodynamique instantanée et moyenne dans le temps et le

transport des sédiments dans deux directions horizontales : perpendiculaire et parallèle au rivage. Comme le modèle calcule le transport par charriage et par suspension séparément, les valeurs de la table de transport des sédiments sont le transport total.

Avant la simulation des valeurs de transport des sédiments non cohésifs, une « table de sédiment » doit être générée à l'aide d'utilitaires de génération de table de sédiment offerts avec le module MIKE 21-ST. Les valeurs de transport interpolées au préalable sont utilisées au cours de la simulation numérique et évitent l'effort de calcul additionnel si les mêmes transports doivent être calculés chaque fois que les mêmes paramètres de grains de sable, de vagues et de courants se présentent aux différents pas temporels de calcul. Un sable de diamètre médian 0.2 mm, de gradation 1.4 et de porosité 0.4 est considéré sur l'ensemble du modèle. Les sortants du module PMS (Hm0 – Tp – Dir) et HD (Vitesses et directions des courants) simulés pour les trois périodes précédentes sont utilisés dans le module ST.

I.9.6. Résultats simulation hydro sédimentaire

Les résultats de simulation numérique sont présentés ci-après ; les directions considérées sont Nord 300, Nord 45 et Nord 340.

I.9.6.1. Propagation de la houle

L'étude de la réfraction montre que notre zone d'étude est exposée aux houles des secteurs Nord Est, Nord et Nord-Ouest. Cela est justifié par la configuration du trait de côte qui est parallèle au Nord-Ouest et qui reçoit l'énergie de ces trois directions dominantes.

Pour chaque simulation, il est alors possible d'extraire en tout point du maillage les caractéristiques de la houle (période, hauteur, direction). Les caractéristiques de la houle sont également disponibles sous forme de carte présentant la direction (vecteurs) et les contours des isohauteurs ou des isopériodes.

- **Propagation des houles de direction Nord-Est (45°)**

Les houles 45°N (Figure II. 5) sont très fréquentes, elles apparaissent surtout lors des tempêtes printanière, elles arrivent avec une obliquité de 25 à 40° par rapport au rivage, en engendrant des courants de dérive parallèles a la cote et des courants de retours dans le sens opposé. Les cartes montrent que les orthogonales sont peu réfractées. Au large, les houles de direction Nord –Est ne subissent aucune modification et gardent leurs caractéristiques initiales (Hs de 2.56m), mais au fur et à mesure, qu'elles propagent vers la cote et l'effet de fond commence à être ressenti, la hauteur de la houle diminue en rapprochant de la cote pour atteindre des valeurs inférieures varient en fonction de la morphologie des fonds.

La houle atteint la cote avec des hauteurs variables selon la bathymétrie, des valeurs entre 0.5m et 1.25m enregistrées dans la partie Ouest et l'extrême Est de la zone d'étude.

Au niveau de la partie centre, a l'approche de la côte jusqu'à -1m de profondeur, une diminution moyenne des hauteurs varie de 0.45 et 0.7 m de hauteur au voisinage de certaines plages, cela signifie que la houle perd une partie de son énergie presque trois quarts $\frac{3}{4}$ lors

de son évolution vers la côte. Cette dissipation d'énergie est accompagnée par un pivotement très faible des orthogonales de direction NNE et NEE.

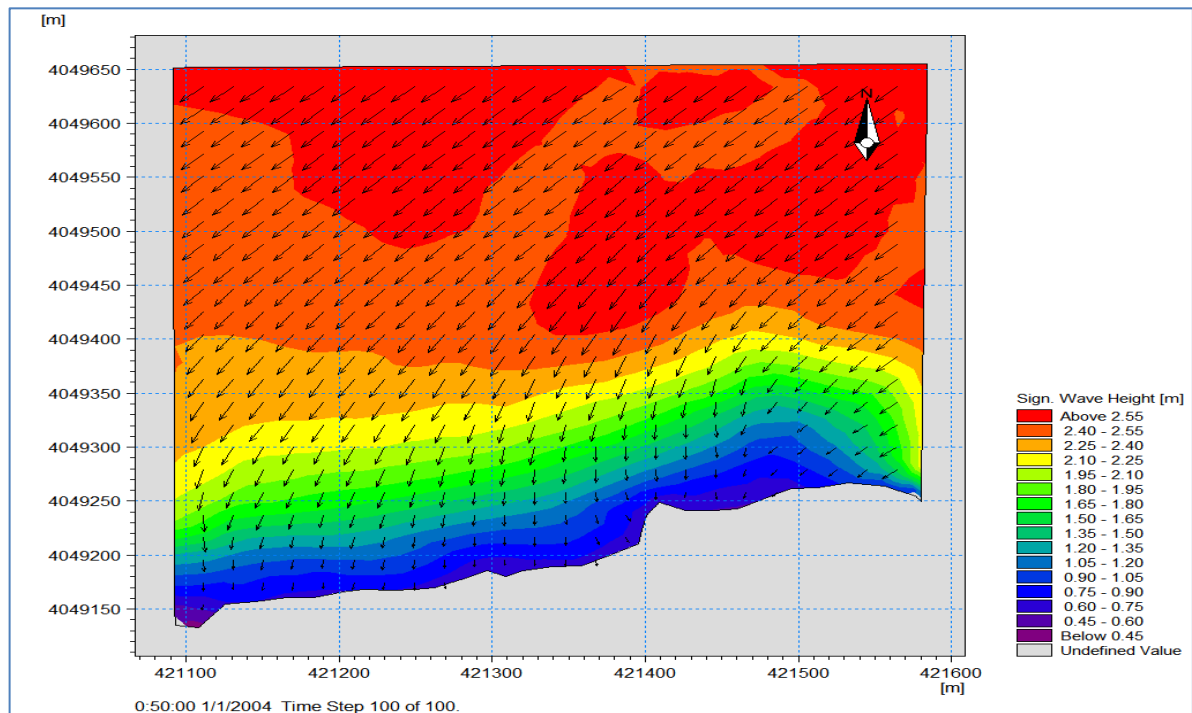


Figure II. 5 : Champs de houles (MWD=45°) sur le littoral de Sidi Ghiles

- **Propagation des houles de direction Nord Ouest au large (300°)**

La Figure II. 6 représente les résultats obtenus de l'étude de la réfraction de la houle de 300°N et cela pour une seule période (8s) et une hauteur de houle de 2.64m.

Au large, ces houles de direction (300°) ne subissent aucune modification, mais au fur et à mesure, lorsque la houle commence à ressentir le fond, la hauteur de la houle diminue considérablement. Au voisinage des profondeurs de 10m, on observe que la hauteur de la houle ne varie, elle est de 2m environ, au-delà de cette profondeur on observe une diminution de cette hauteur avec une valeur de 1m à -2m de profondeur, marquant qu'il y a un léger pivotement des orthogonales.

A l'approche de la côte à des profondeurs inférieures à -1m, une diminution remarquable des hauteurs des vagues (H_s varie entre 0.25 m et 0.75 m), avec des coefficients de réfraction relativement faible entre 0.15 à 0.19 et des angles d'incidences de direction moyenne vers le Nord- Nord-Ouest le long de la cote, et cela signifie que la houle perd une grande partie de son énergie presque 4/5 lors de son évolution vers la côte. Cette dissipation d'énergie est accompagnée par un pivotement des orthogonales vers le Nord-Nord-Ouest avec un faible degré.

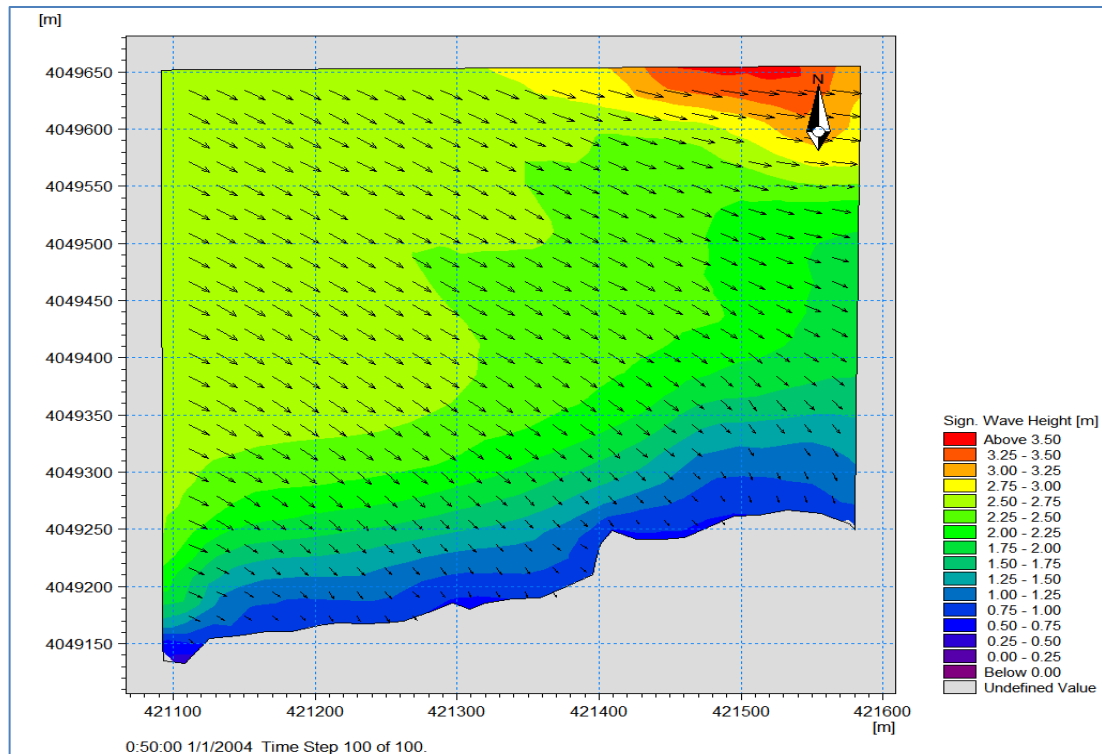


Figure II. 6 : Champs de houles (MWD=300°) sur le littoral de Sidi Ghiles.

- **Propagation des houles de direction Nord-Nord-Ouest au large (340°)**

La Figure II. 7 représente les résultats obtenus de l'étude de la réfraction de la houle de 340°N et cela pour une seule période (8s) et une hauteur de houle de 2.61m.

Au large, ces houles de direction Nord- Nord -Ouest ne subissent aucune modification, mais au fur et à mesure, lorsque la houle commence à ressentir le fond, la hauteur de la houle diminue considérablement, elles sont légèrement réfractées au voisinage de la cote. Les orthogonales de la houle abordent la côte en subissant une rotation entre 3° et 10°.

Pour la houle de période (8s), nous marquons que les hauteurs significatives sont au-dessous de 2.6 m au large, en revanche, près des côtes nous avons des hauteurs plus faibles où elles sont comprises entre 0,2 - 0,6 m le long de la cote.

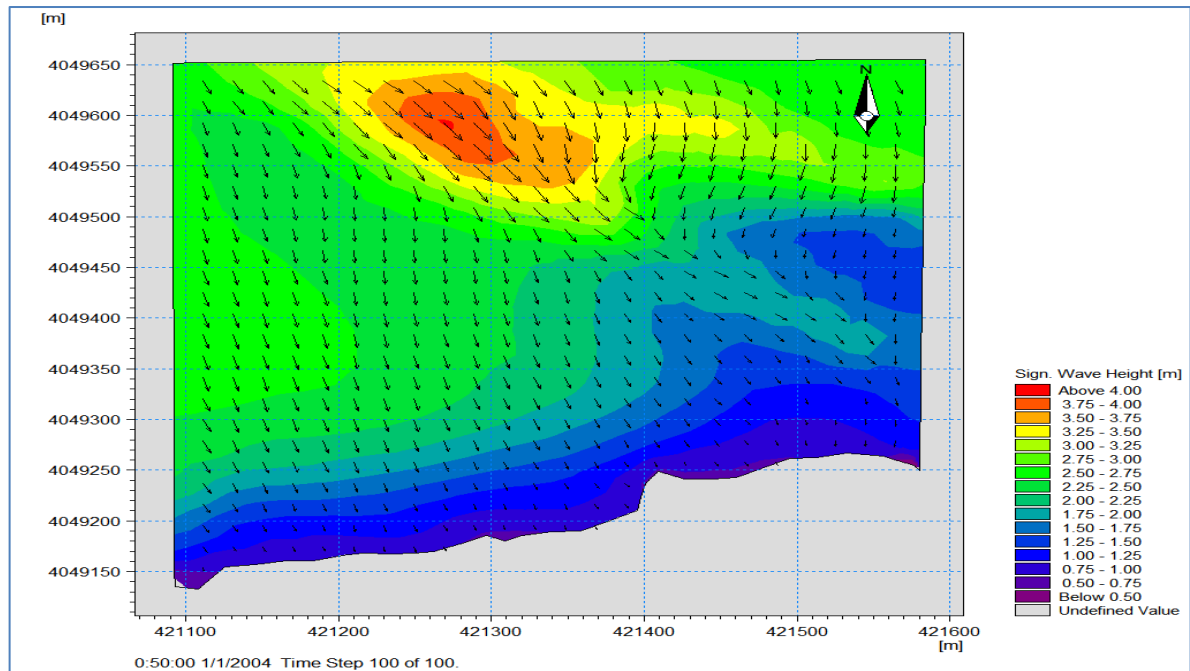


Figure II. 7 : Champs de houles (MWD=340°) sur le littoral de Sidi Ghiles.

I.9.6.2. Résultats des simulations HD et interprétations

Les figures ci-après (Figure II.8 ; Figure II.9 ; Figure II.10) montrent les champs de courants induits par les vagues calculées au moyen du modèle numérique MIKE21-HD pour les trois directions de houles sélectionnées.

Les vagues venant du secteur Nord-Est génèrent un courant de dérive littorale parallèle à la côte et orienté d'Est en Ouest. Des vitesses importantes varient entre 0.4m/s à 0.7m/s enregistrées dans la partie Ouest de la zone. Ces vitesses diminuent en allant vers l'Est qui ne dépasse pas 0.3m/s. Ces vitesses sont à l'origine du transport sédimentaire vers l'Ouest en favorisant l'érosion des cotes sableuses exposées à ses courants.

Les houles issues du secteur Nord-Ouest et Nord Nord Ouest donnent naissance près de la côte à un courant de dérive dirigé vers l'Est. Au niveau de la zone Est des vitesses relativement faibles d'environ 0.3m/s. Par contre dans la partie Ouest, au niveau des plages sableuses, on observe des champs de courant importants avec des vitesses qui dépassent 0.5m/s. ce courant joue un rôle important dans la redistribution des sédiments le long de la cote. Ces courants aussi sont à l'origine de l'érosion des cotes sableuses.

Loin au large, ce courant de direction 340 prend une direction nettement opposée mais avec des vitesses nettement faibles dans la partie Est ou les vitesses des courant de retour ne dépassent pas 0.4m/s.

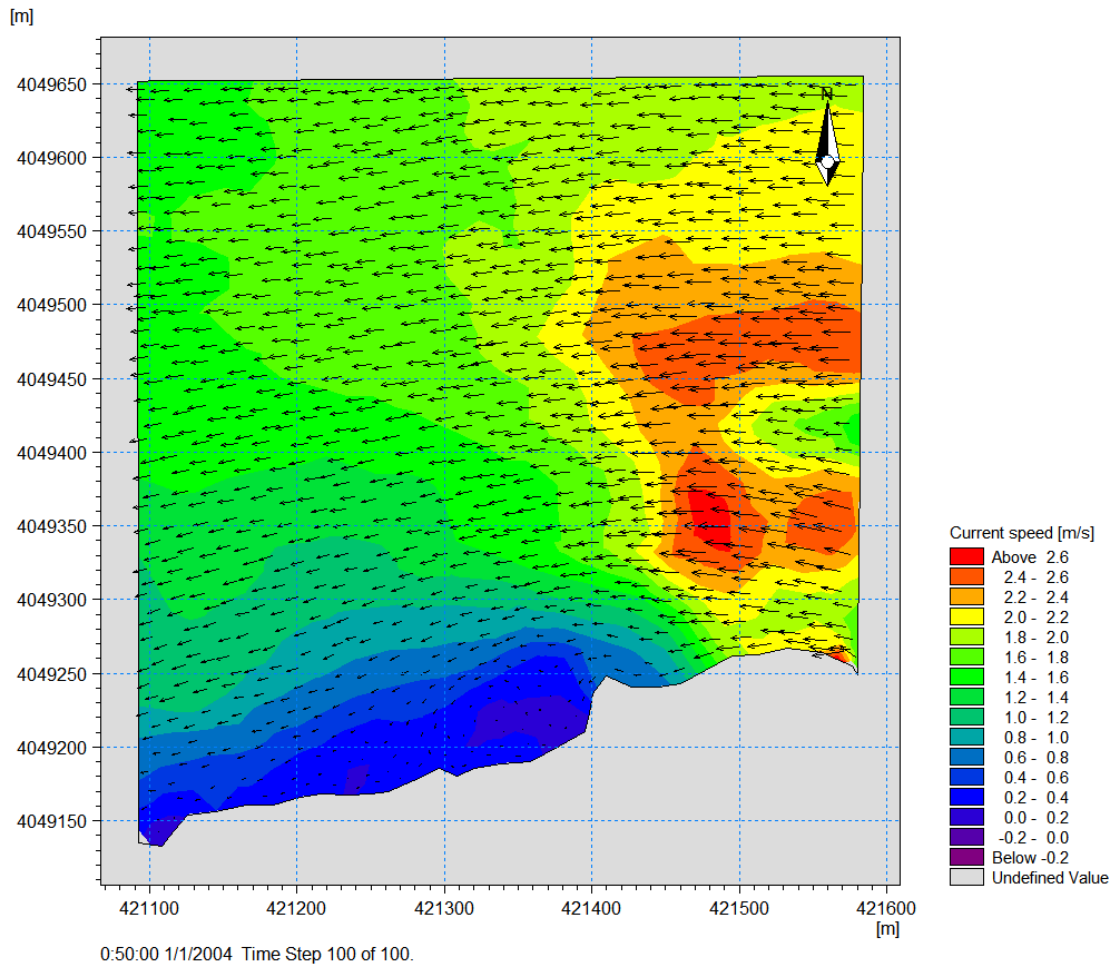


Figure II. 8 : Champs des courants sur le littoral de Sidi Ghiles pour : MWD= 45°.

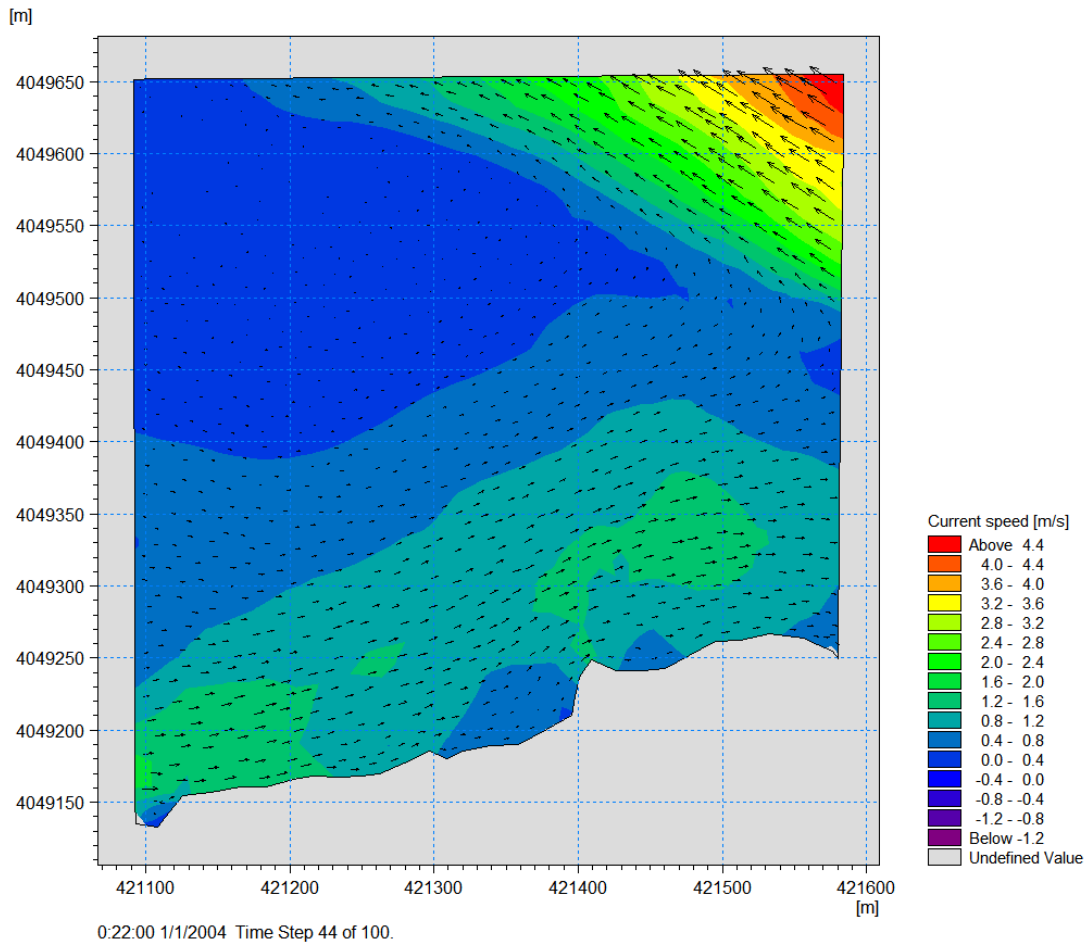


Figure II. 9 : Champs des courants sur le littoral de Sidi Ghiles pour : MWD= 300°.

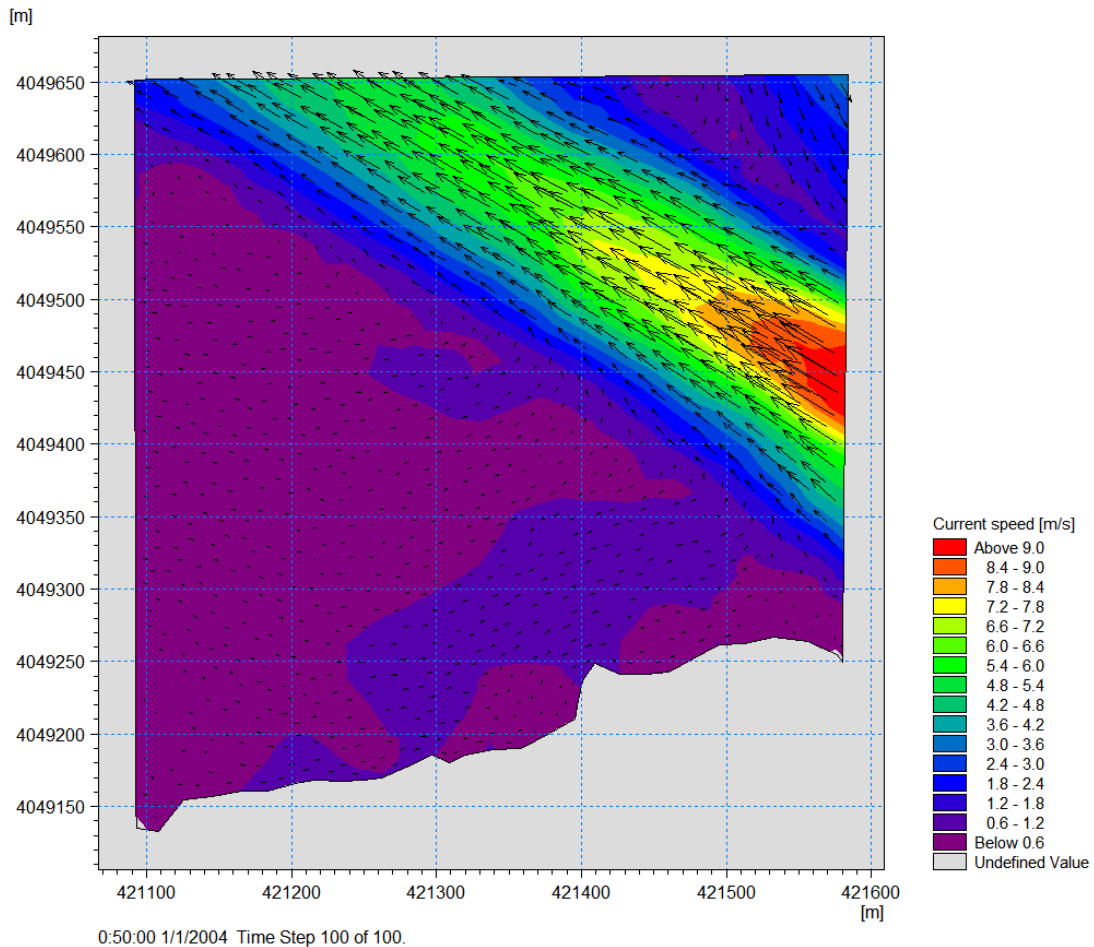


Figure II. 10 : Champs des courants sur le littoral de Sidi Ghiles pour : MWD= 340°.

I.9.6.3. Résultats des simulations ST et interprétations

Les transports des sédiments calculés dans la zone d'étude adoptent des unités de $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ sous l'effet des vagues, des courants de dérive, de retours et des vents d'Est. L'interprétation de ces transports est basée sur le changement de l'intensité du transport d'une maille à l'autre. Par exemple, une diminution des vecteurs de transport d'une maille à l'autre indique une zone de convergence ou de dépôt potentiel des sédiments à cet endroit alors qu'une augmentation des vecteurs adjacents indique une divergence ou un potentiel d'érosion à cet endroit.

De façon générale le long du littoral de Sidi Ghiles, une tendance de dérive littorale de l'Est vers l'Ouest semble persister pour les houles de 45°N et Ouest vers Est pour les houles de 300°N et 340°N. Le bilan sédimentaire est complexe, et résulte de la contribution de chaque houle.

L'analyse qualitative des écoulements et du transport nous a permis de déterminer le cheminement de la dérive littorale le long de la zone, elle s'effectue globalement du Est Vers l'Ouest pour la houle du Nord-Est avec un débit d'environ $1000 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$. pour les houles du secteur Nord-Ouest et Nord-Nord-Ouest, le transport est orienté vers l'Est, provoquant le un déplacement des sédiments plus un import en comparaison avec celui de la direction Nord-Est avec un taux varie entre $2000 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$ et $7000 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$.

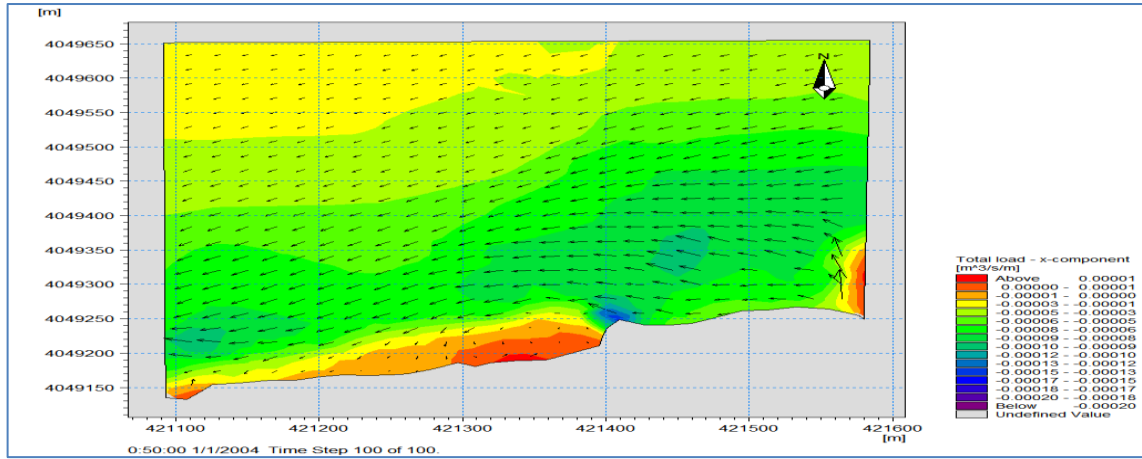


Figure II. 11 : Dynamique sédimentaire sur le littoral de Sidi Ghiles: MWD= 45°.

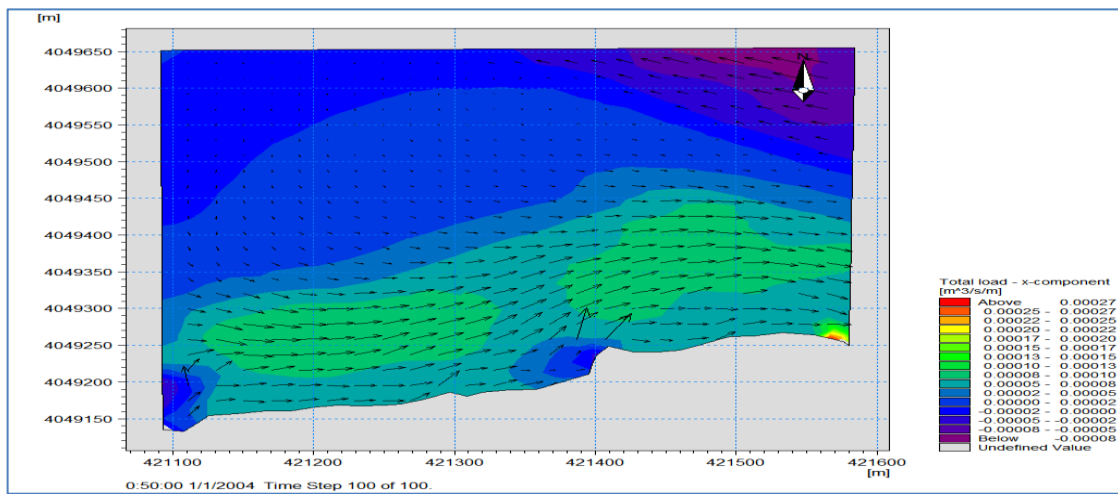


Figure II. 12 : Dynamique sédimentaire sur le littoral de Sidi Ghiles: MWD= 300°.

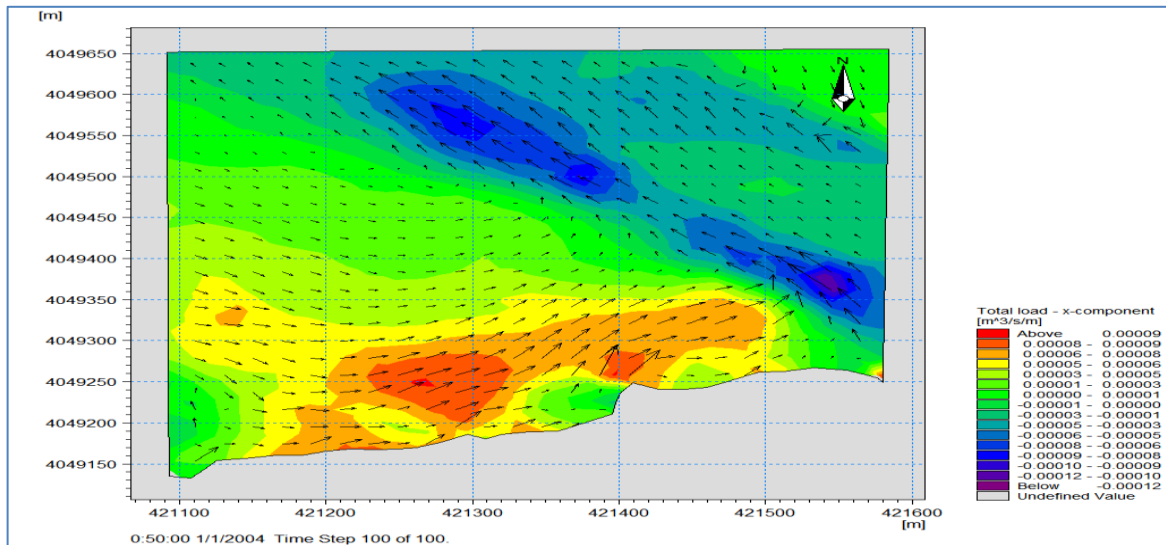


Figure II. 13 : Dynamique sédimentaire sur le littoral de Sidi Ghiles: MWD= 340°.

Chapitre III : évolution spatiotemporelle de la côte de Sidi Ghiles

Introduction :

L'étude de l'évolution du littoral se base sur le suivi de la dynamique du trait de côte. Les mesures et les analyses des changements observés sur la côte permettent une évaluation précise et globale de la morphodynamique littorale. **(Jego, 2003)**

Afin de réaliser ce suivi, l'étude d'évolution historique du trait de côte est mise en compte. Elle permet de décrire son changement morphologique à l'échelle spatio-temporelle et de déterminer les variations de sa position.

L'étude de la mobilité du trait de côte a souvent été abordée sous l'angle qualitatif : érosion, engraissement ou stabilité du linéaire côtier. **(Jego, 2003)**

Le but est de présenter les résultats préliminaires d'une étude faisant appel aux documents cartographiques et à l'imagerie satellitaire multi date pour mesurer l'évolution du trait de côte du littoral de Sidi Ghiles.

I.10. Méthodes et techniques utilisées.

I.10.1. Les logiciels utilisés.

- **Google Earth**

Google Earth pro est une mappe monde virtuelle qui vous permet de visualiser les images, enregistrées par des satellites, de la plupart des endroits de la Planète. C'est un logiciel qui contient des images de grande résolution de l'ordre de 30m à 60cm (SPOT, Quickbird, Ikonos,...). Ces images sont issues d'entreprises de commercialisation d'images et sont archivées sur le serveur de Google Earth Pro qui est accessible par connexion à l'internet. Elles sont mises à jour au fur et à mesure.

- **Logiciel ArcGis 10.2**

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 seul 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 (Asbai, 2013).

Le logiciel ArcGis 10.2 est un système d'information géographique développé par la société ESRI (Environmental Systems Research Institute). C'est un outil pour manipuler, gérer, visualiser, cartographier, interroger et analyser toutes les données disposant d'une composante spatiale.

Différentes couches d'informations spatiales peuvent être manipulées offrant la possibilité d'analyser une ou plusieurs couches sous le contrôle des autres. Le seul 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 (Asbai, 2013).

ArcGis Desktop se compose de quatre applications intégrées : ArcMap, ArcCatalog, ArcToolBox et ArcGlobe. ArcCatalog est l'application de gestion des données, qui permet de parcourir l'ensemble de données et des fichiers sur l'ordinateur, la base de données, ou autres sources. En plus de montrer les données disponibles, ArcCatalog permet aussi aux utilisateurs de prévisualiser les données sur une carte, offre aussi la possibilité de visualiser et gérer les métadonnées de l'aménagement de l'ensemble de données. ArcMap est l'application utilisée pour visualiser, éditer des données géospatiales, et créer des cartes. ArcToolbox contient des outils de géotraitement, la conversion et d'analyse des données, ainsi que la plupart des fonctionnalités dans ArcInfo. ArcGlobe permet d'afficher de grandes quantités de données SIG à la surface d'un globe (visualisation 3D).

- **L'extension DSAS :**

Le système d'analyse Shoreline Digital (DSAS) est une application logicielle disponible gratuitement qui travaille dans le (ESRI) Système d'information géographique (ArcGIS). DSAS calcule les statistiques de taux de changement pour une série chronologique des données vectorielles du littoral. Les méthodes utilisées peuvent être décrites comme suit :

La méthode des points extrêmes (End Point Rate - EPR) : l'EPR est la distance sur le transect entre deux traits de côte le plus récent et le plus ancien divisé par le nombre d'années séparant ces traits de côte. (Himmelstoss, 2009; Jamont, 2014)

La méthode de la régression linéaire (LinearRegression - LRR) : une droite de régression linéaire des moindres carrés est établie grâce à toutes les intersections des traits de côte historique pour un transect. La pente de cette droite est le taux de régression linéaire en mètres par an. (Himmelstoss, 2009; Jamont, 2014)

La méthode de la régression linéaire pondérée (WeightedLinearRegression - WLR) : une régression linéaire aux moindres carrés est utilisée avec prise en compte de la pondération en fonction de l'incertitude des données. La régression linéaire aux moindres carrés est utilisée en pondérant chaque valeur. La pente de la droite de régression est le taux en mètres par an. (Himmelstoss, 2009; Jamont, 2014)

La méthode de Shoreline Change Envelope (SCE) : l'enveloppe de la modification du littoral signale une distance, pas un taux. Le SCE est la distance entre la plus éloignée du littoral et de plus proche de la ligne de base à chaque transect. Cela représente la variation totale de mouvement de rivage pour toutes les positions du rivage disponibles et n'est pas lié à leurs dates. (Himmelstoss, 2009)

I.10.2. Utilisation de l'extension DSAS pour l'analyse de l'évolution du trait de côte.

L'idée de base dans la détermination du déplacement de la ligne de côte de Sidi Ghiles est de superposer les traits de côte numérisés, et de mesurer la distance entre eux à différents points le long du littoral. Cela permet de calculer des taux de changement annuels (en mètre par an).

- **Choix de la ligne de référence**

L'étude de la dynamique du trait de côte commence par le choix de la ligne de référence. Dans le cas des côtes sableuses, l'ados de plage s'avère être le plus fiable (Robin, 2002). C'est la ligne de contact entre le haut de la plage et l'arrière plage. Cette ligne est facilement reconnaissable sur les photos aériennes puisqu'elle représente la limite des surfaces mouillées (sur les photos elles apparaissent en gris foncé) (Dolan et al., 1992). Nous avons adopté la ligne de rivage de 2016 qui a été cartographié, étant plus précise et plus récente.

- **Choix de la ligne de base**

En vue de caractériser l'évolution à moyen terme de la côte, il est important de pointer un marqueur physique, proche de la ligne des plus hautes eaux (proche de l'interface milieu terrestre/ milieu marin) mais présentant surtout une faible variabilité journalière, saisonnière ou infra-annuelle. Ce marqueur doit être identifiable sur les photographies aériennes et les images satellitaires pour faciliter la génération des transects.

En ce qui concerne spécifiquement les côtes meubles et les plages sableuses, la ligne de base a été définie comme limite de végétation qui marque généralement la transition entre le système de plage marin et l'arrière-plage soumis à des processus éoliens, où se développent les dunes littorales si les apports sableux sont suffisants. Cette limite est considérée comme le marqueur le plus probant des évolutions côtières à moyen et long terme sur les littoraux sableux (UNESCO-CSI).

I.10.3. Méthode de digitalisation :

Sous Google Earth Pro, le trait de côte a été digitalisé pour chaque année et pour chaque zone d'étude, manuellement, à l'aide de l'extension '*Ajouter un trajet*' puis enregistrer au format KML. Nous avons choisi de prendre toutes ces traits de côte à une altitude de 300 mètres afin qu'ils aient tous la même échelle et qu'ils nous donnent le même niveau de précision.

Les traits de côte enregistrés en KML dans Google Earth Pro ont été intégrés dans ArcGIS puis convertis en Shapefile, en utilisant l'extension '*KML To Layer*' dont les entités en sortie sont générées dans le système de coordonnées géographique WGS84. Ces dernières ont été reprojétés dans un autre système de coordonnées WGS84_UTM à l'aide de l'outil '*Project*'. Pour les deux photographies aériennes, nous avons utilisé le logiciel SIG, qui est ArcGis 10.2 afin de digitaliser le trait de côte.

I.10.4. Méthode de génération de transects :

ArcGIS 10.2 a été utilisé pour créer et traiter les données pour cette étude. Toutes les données créées seront stockées dans une géodatabase dans laquelle un jeu de classe d'entité (*feature dataset*) a été créé. Il permet de regrouper toutes les classes d'entités (traits de côte) qui seront créées et qui auront le même système de coordonnées projeté (WGS84_UTM) et le même type de géométrie (une ligne « shapefile »). La géodatabase, le jeu de classe d'entité et les classes d'entité sont créés dans ArcCatalog (Figure III.1), avec une classe d'entité pour

chaque trait de côte. En plus, deux autres classes d'entité sont créées, une pour la ligne de base et l'autre pour les transects ayant aussi le même type géométrique (une ligne).

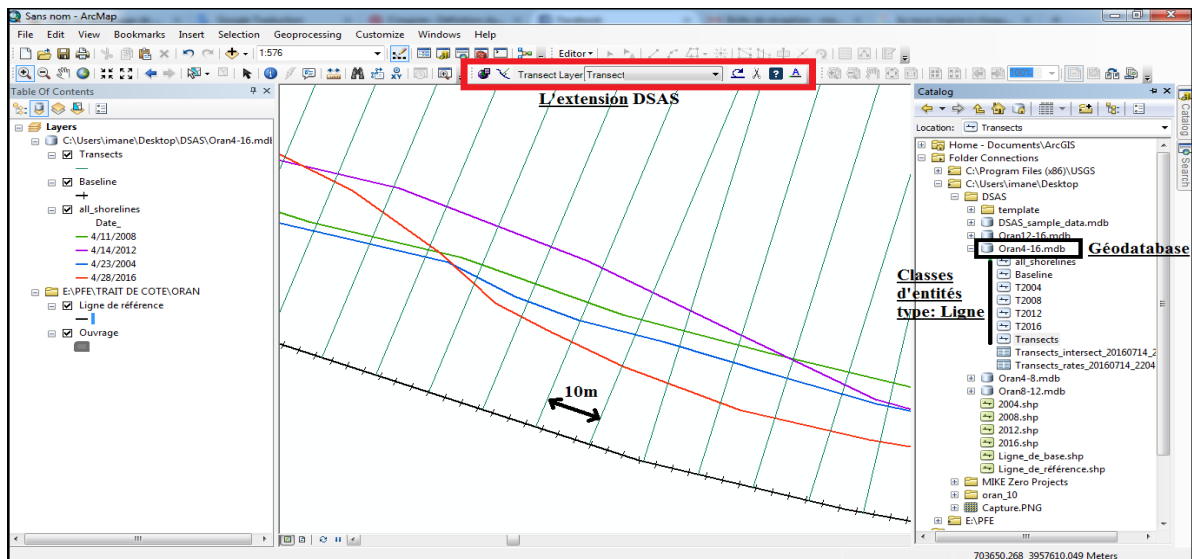


Figure III. 1 : Les données créées dans ArcCatalog et ArcMap (ArcGIS 10.2)

La génération des transects perpendiculaires sur la ligne de base a été réalisée à l'aide de l'extension Digital Shoreline Analysis System (DSAS) conçue par Thieler et Danforth (1994).

L'emploi de ce outil a nécessité de définir une ligne de base (limite de végétation), une longueur pour les transects (300 m) ainsi qu'un pas de mesure (10 m) et de disposer de traits de côte projetés dans le même système de coordonnées. Ces transects ont été numérisés et numérotés de l'Est à l'Ouest (Figure III.2).

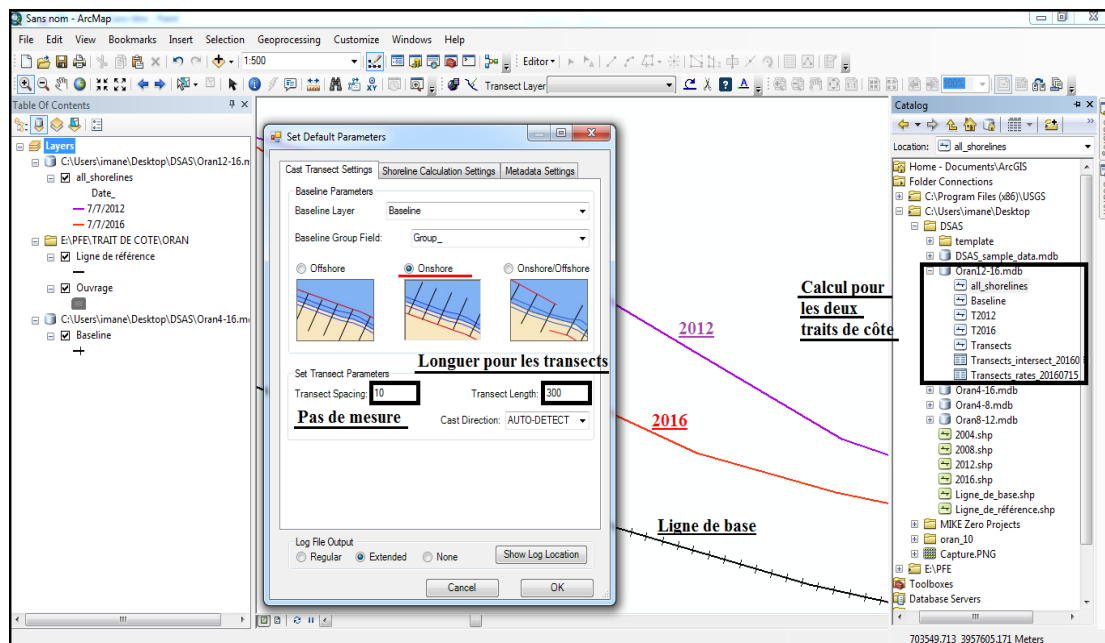


Figure III. 2 : Le concept du DSAS (Digital Shoreline Analysis System) sous ArcMap.

Lorsque tous les paramètres d'entrées sont correctement saisis, DSAS génère automatiquement, selon le pas de mesure défini, des transects perpendiculaires aux linéaires côtiers, mesure les écarts entre les traits de côte et calcule les taux moyens de déplacement le long de chaque transect. Cette analyse automatique de tous ces transects permet de définir des secteurs d'évolution type et d'en calculer les valeurs moyennes. Dans les tables attributaires des transects, on dispose, à l'issue du traitement, en plus des attributs géographiques, des attributs statistiques dont deux, au moins, sont à retenir.

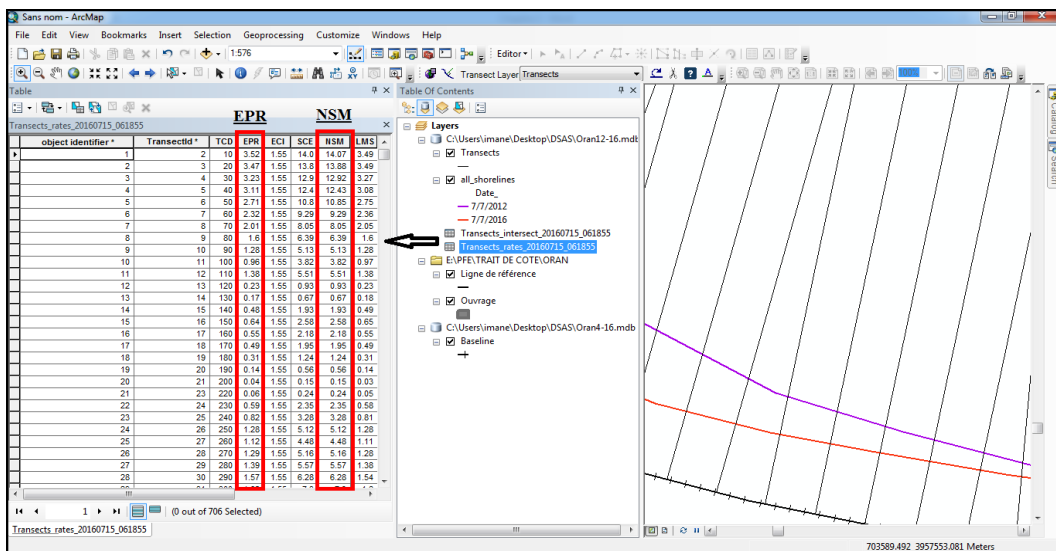


Figure III. 3 : La table attributaire issue lors du traitement sous ArcMap

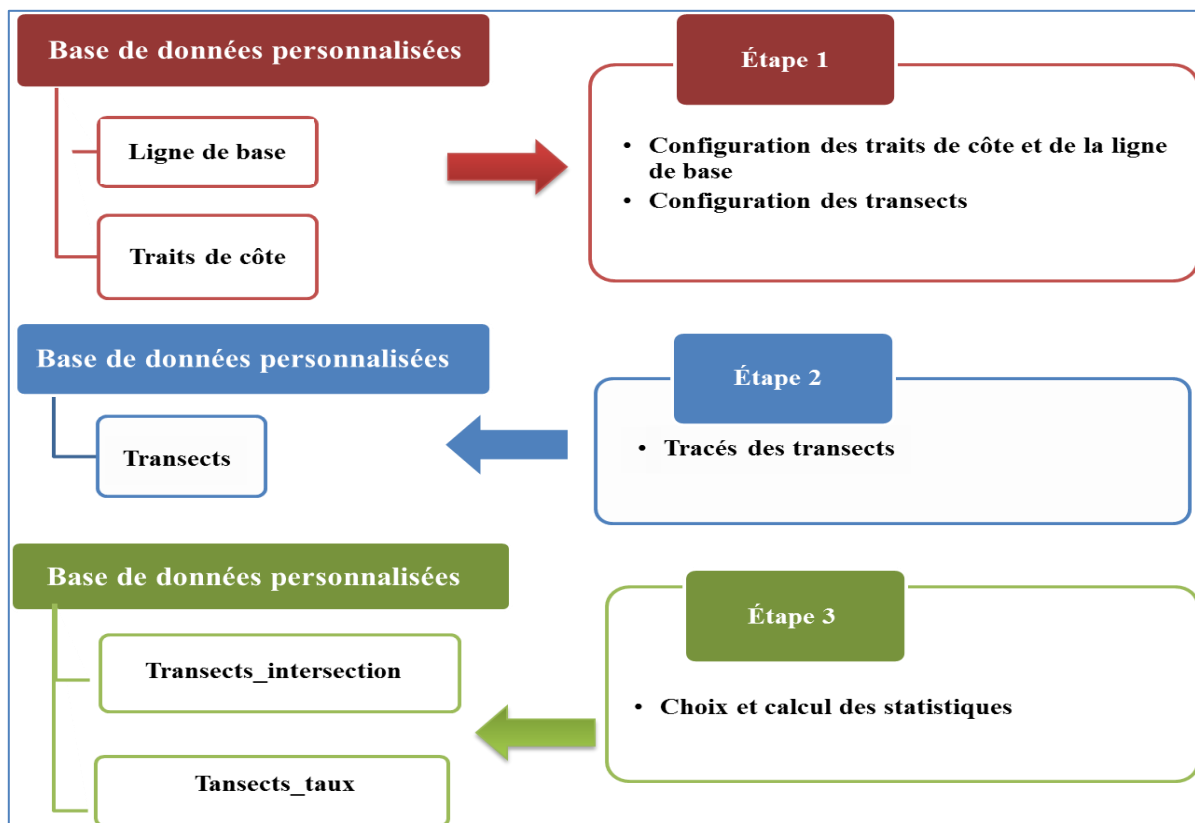


Figure III. 4 : Schéma du fonctionnement de l'extension DSAS

I.11. Méthode de digitalisation.

I.11.1. Volet cartographique.

A partir de Google Earth pro nous avons extraite des défilantes images correspondant aux différentes dates 2003, 2009, 2013 et 2018.

Après avoir géoréférencé ces cartes et digitaliser les différents traits de côte sous Arcgis en choisissant le système de projection WGS UTM Nord 31 nous avons créé une ligne de base est entièrement parallèle au changement moyenne des différents rivages.

La digitalisation de la ligne de rivage sur les images a permis la superposition des tracés ; le résultat obtenu est présenté ci-dessous



Figure III. 5 : Évolution de la ligne du rivage dans la région de Sidi Ghiles pour les années 2003/2009/2013/2018

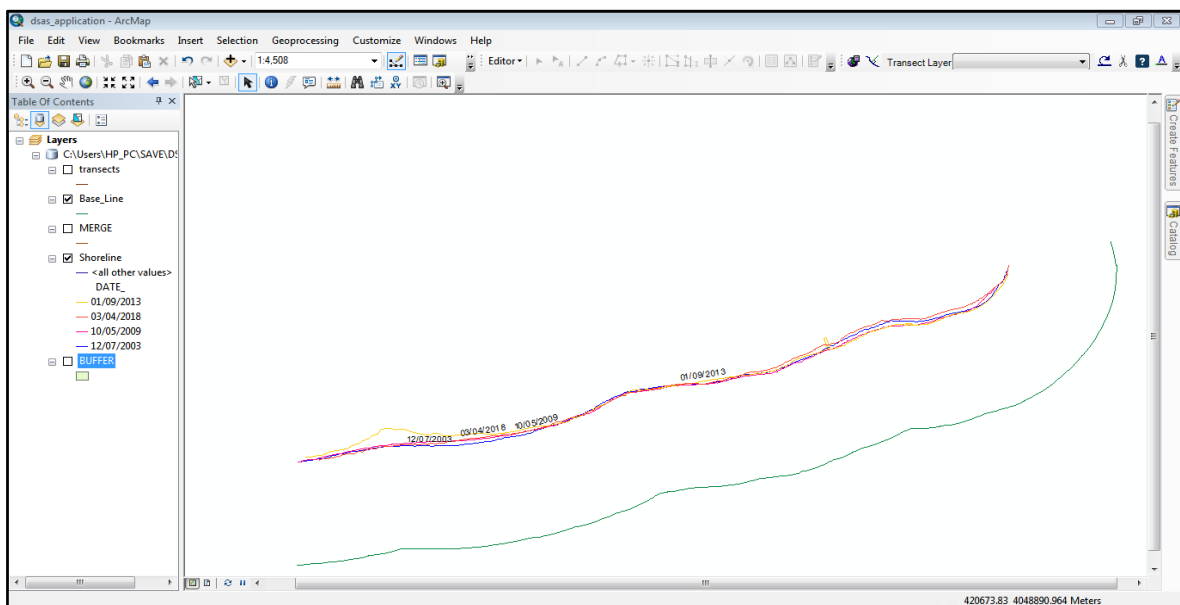


Figure III. 6 : Digitalisation des traits et création d'une ligne de base

I.11.2. Volet graphique et statistique.

Après la digitalisation des différents traits de côte et génération des transects perpendiculaires à la ligne de base avec une longueur de 150 m et une espace de 50m à l'aide de l'extension de DSAS, un support statistique de cette extension va nous permettre d'avoir une analyse détaillée sur la variation de la ligne de rivage et contient les indicateurs de taux d'évolution que nous avons défini NSM,EPR et LPR qui affichent après une exécution sur le DSAS.

DSAS calcule les statistiques de taux de variation pour une série chronologique du trait de côte. Les méthodes utilisées peuvent être décrites comme suit:

➤ **Net Shore Movement (NSM)**

Le mouvement du littoral net signale une distance, pas un taux. Le NSM est associé aux dates de seulement deux rives. Il rend compte de la distance totale entre les rivages les plus anciens et les plus jeunes pour chaque profil (Faye, 2012).

➤ **End Point Rate (EPR)**

Le taux des points extrêmes (EPR) est la distance sur le transect entre deux traits de côtes, le plus récent et le plus ancien divisé par le nombre d'années séparant ces traits de côtes. (Himmelstoss. 2009 ; Jamont. 2014). Les principaux avantages de l'EPR sont la facilité de calcul et exigence minimale de seulement de dates de littoral (Faye, 2012).

➤ **Linear Regression Rate-of-change (LRR)**

Le taux de changement de la régression linéaire est une droite de régression linéaire des moindres carrés est établie grâce à toutes les intersections des traits de côtes historiques pour un transect. La pente de cette droite est le taux de régression linéaire en mètres par an, (Himmelstoss. 2009 ; Jamont. 2014). Il traduit également le taux d'évolution annuelle de la ligne de référence le long de chaque transect, est intéressant si l'on analyse la cinématique

Littoral pour plus de deux dates, car la méthode de calcul tient compte de la tendance évolutive du trait de côte sur toute la période considérée (Faye, 2012).

I.12. Visualisation des résultats.

L'évolution et la visualisation des résultats ont été sur l'intégralité des quatre traits de côte du site d'étude de Sidi Ghiles 2003,2009, 2013 et 2018.

Afin d'avoir ces résultats, une ligne de base qui suit l'orientation générale de la côte a été créé. Ensuite dans le cadre de ce travail il a été choisi de générer des transects perpendiculaires à cette ligne de base tous les 15 mètres, l'ensemble de la côte de Sidi Ghiles est donc couverte par 23 transects avec une longueur de 150 mètres pour chacun.

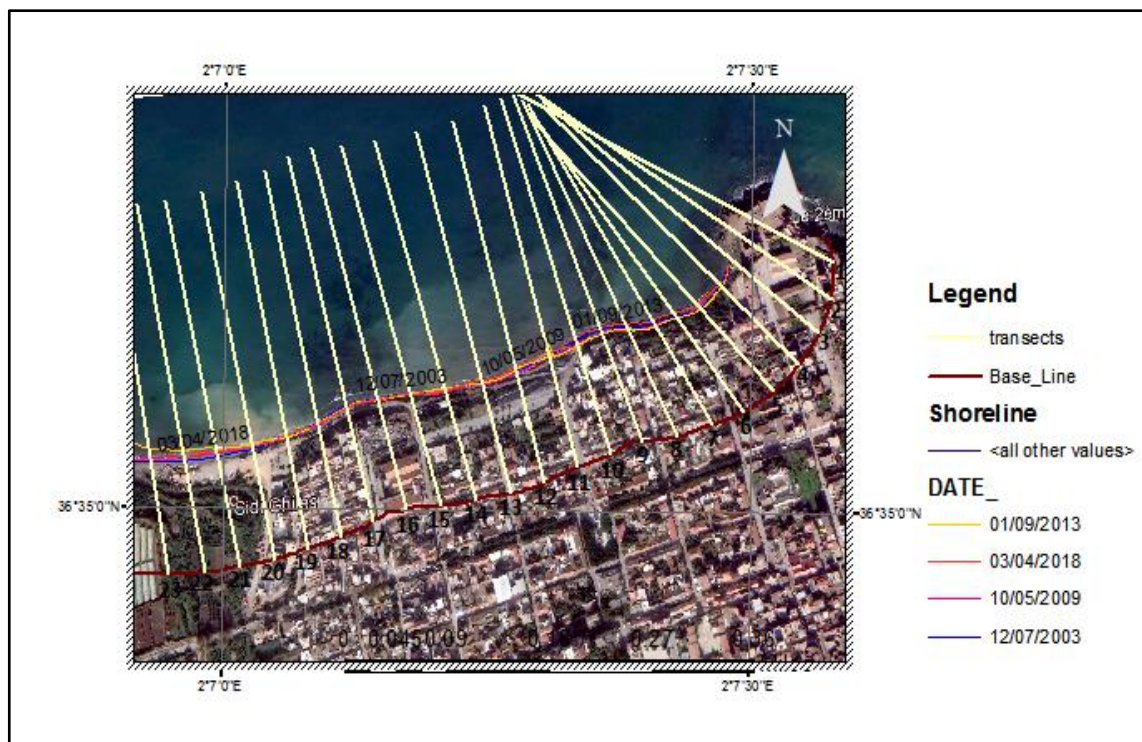


Figure III. 7 : Évolution de la ligne du rivage dans la région de Sidi Ghiles pour les années 2003/2009/2013/2018

I.12.1. L'End Point Rate EPR :

➤ Période 2003-2009

L'analyse de l'évolution du trait de côte de la première zone sur 23 transects nous a permis d'aboutir aux résultats suivants (figure III. 8 et III. 9) :

La zone côtière Est de Sidi Ghiles est sujette à l'érosion marine. En effet, le trait de côte est déstabilisé par l'érosion côtière, et ne cesse de croître vu l'amplification de la pression socio-économique sur le littoral. Le taux moyen de recul est de -0,6 m/an si on tient compte de toutes les mesures. La partie Ouest enregistre une accrétion de 1 m/an au niveau du transect 4 et 7 dû aux apports terrigène d'Oued Ghobrini.

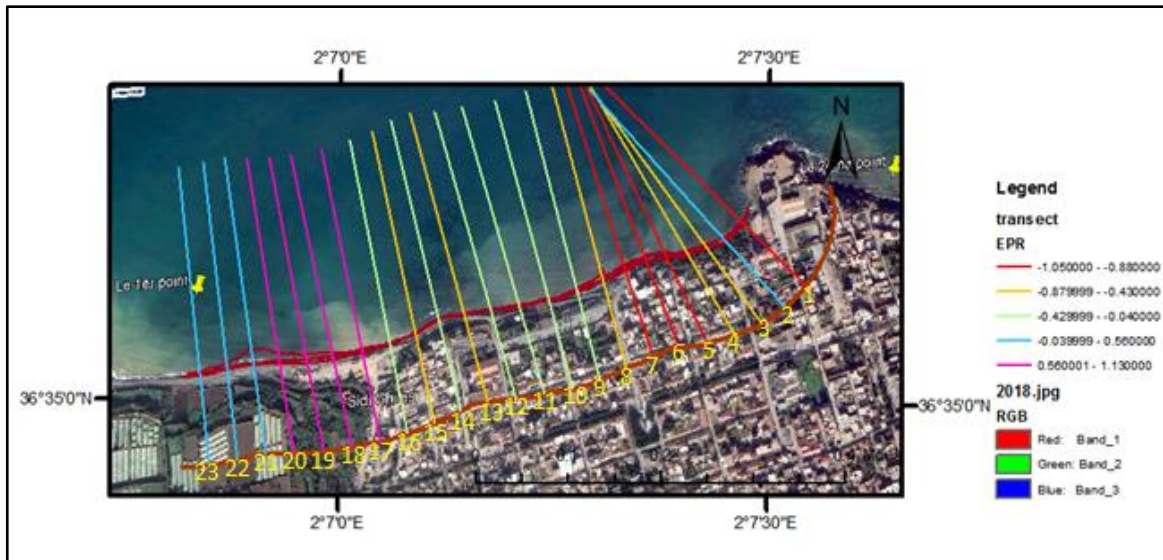


Figure III. 8 : Illustration du rythme d'évolution du trait de côte en m/an entre 2003-2009

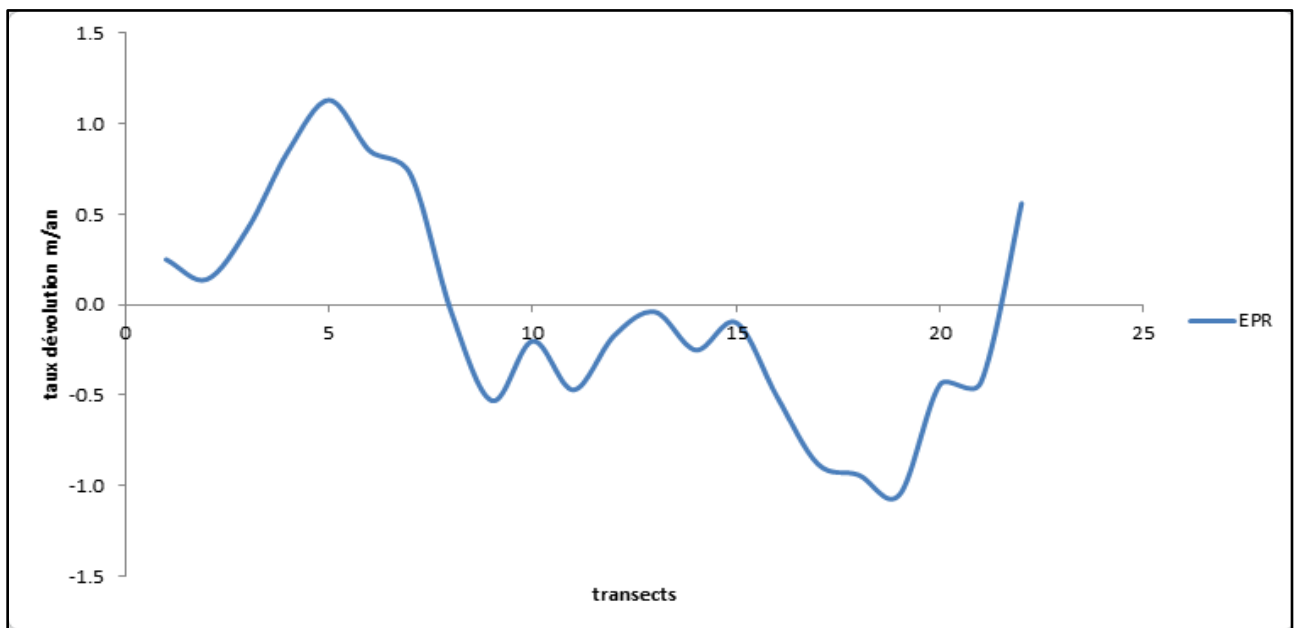


Figure III. 9 : Variation de la vitesse de déplacement du trait de côte selon les transects au niveau de la zone Sidi Ghiles 2003-2009

➤ **Période 2009-2013**

L'analyse de l'évolution du trait de côte de la zone d'étude sur 23 transects nous a permis d'aboutir aux résultats suivants (figure III. 10 et III. 11) :

La zone Est enregistré une érosion d'une moyenne de $-0,57 \text{ m.an}^{-1}$, avec une valeur maximale de -5 m.an^{-1} au niveau de transect 6, quant au la plus parts des transects on a pu remarquer une érosion avec une valeur maximale de -1 m/an au niveau des transects 1,3et6.

La zone Ouest entre le transect 7 et 23 contrairement à la zone Est, elle enregistre une accrétion d'une moyenne de $1,58 \text{ m.an}^{-1}$, avec une valeur maximale de 2 m.an^{-1} au niveau de transect 13 quant au la plus parts des transects on a pu remarquer une accrétion avec une valeur moyenne de $1,58 \text{ m/an}$.

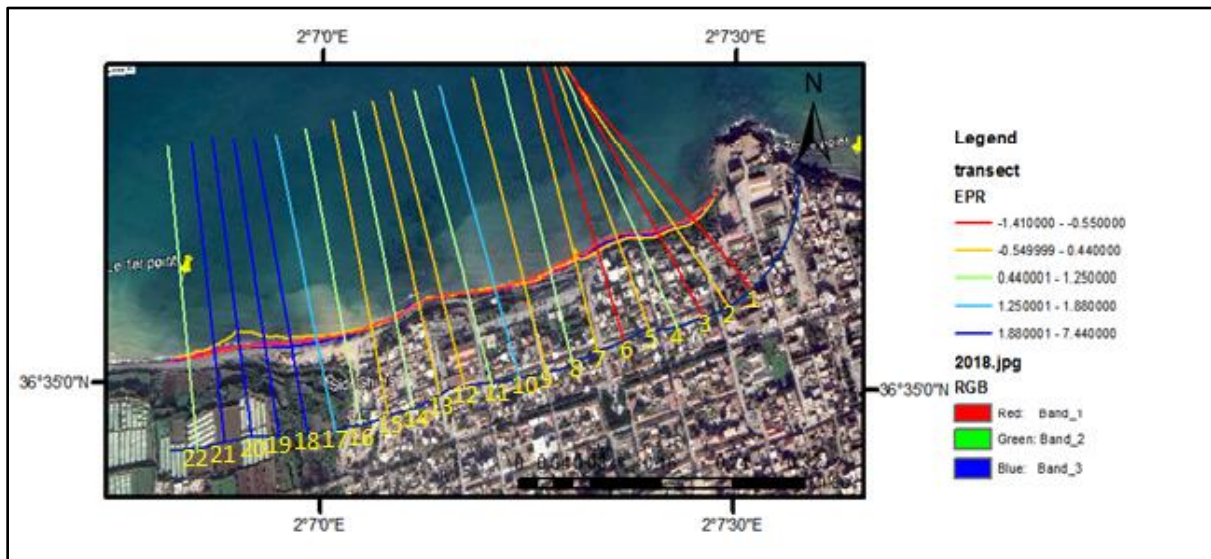


Figure III. 10 : Illustration du rythme d'évolution du trait de côte en m/an entre 2009-2013

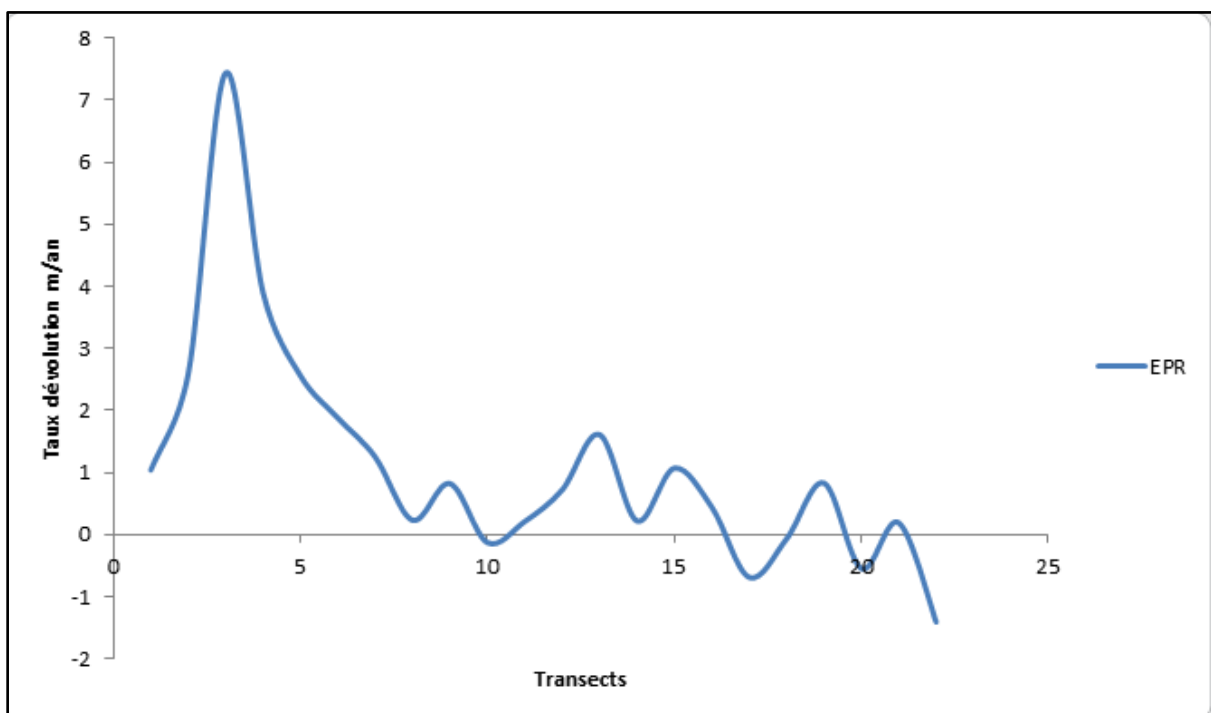


Figure III. 11 : Variation de la vitesse de déplacement du trait de côte selon les transects au niveau de la zone Sidi Ghiles 2009-2013

➤ **Période 2013-2018**

L'analyse de l'évolution du trait de côte de la zone sur 23 transects durant la période 2013-2018 nous a permis d'aboutir aux résultats suivants (figure III. 12 et III. 13) :

Durant cette période, la zone centre et Est enregistrent entre le transect 1 et 13, une moyenne d'évolution de $-1,56\text{m.an}^{-1}$ avec une valeur maximale de l'ordre 2 m.an^{-1} au niveau de transect 17 quant au reste de la zone on a pu remarquer une accrétion plus au moins forte d'une valeur maximale de 1 m.an^{-1} due a la mise en place du chantier. Par contre la partie Ouest entre le transect 17 et 23, on observe un recul du trait de côte d'une moyenne de 3 m.an^{-1} , avec un maximum de -5 m.an^{-1} au niveau du transect 21.

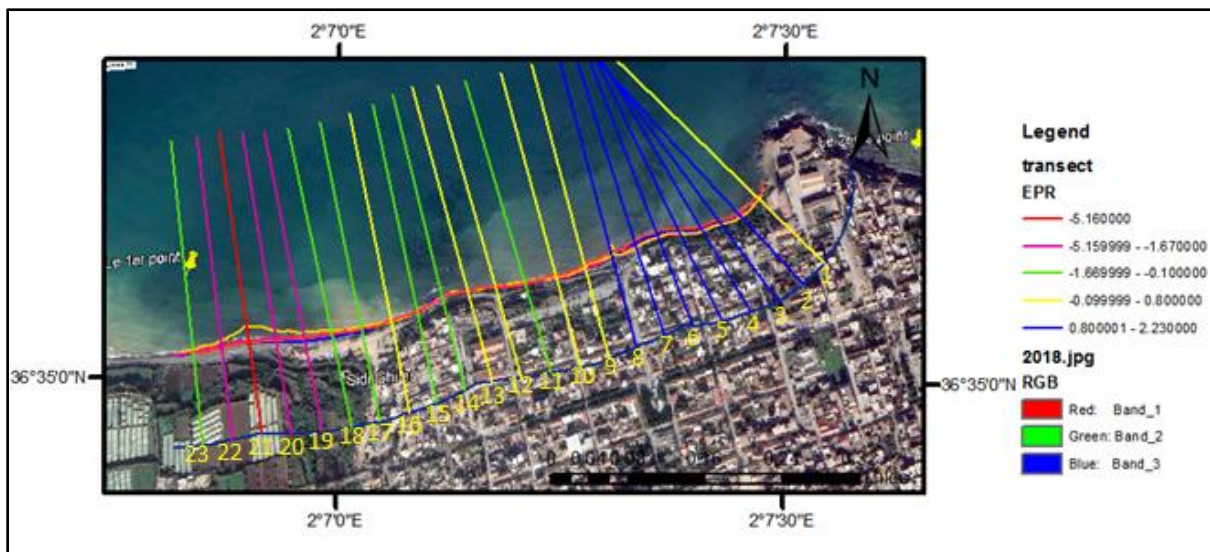


Figure III. 12 : Illustration du rythme d'évolution du trait de côte en m/an entre 2013-2018

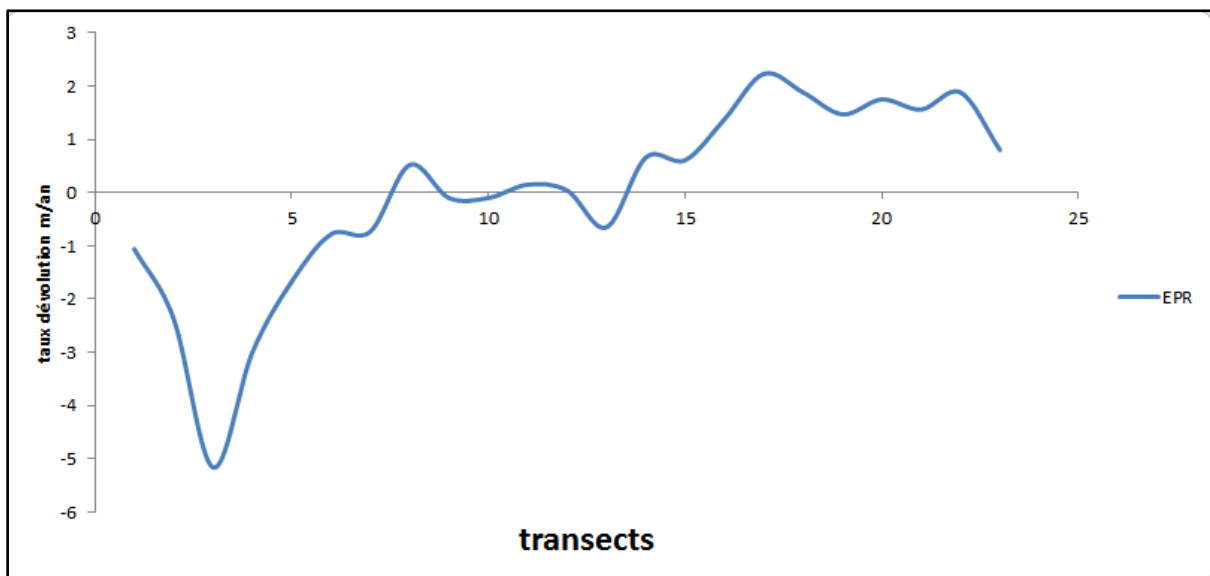


Figure III. 13 : Variation de la vitesse de déplacement du trait de cote selon les transects au niveau de la zone Sidi Ghiles 2013-2018

I.12.1.1. Période 2003-2018.

L'analyse de l'évolution du trait de côte de la zone sur 23 transects durant la période 2003-2018 nous a permis d'aboutir aux résultats suivants (figure III. 14 et III. 15) :

La comparaison des traits de côte de 2003 et de 2018 témoigne d'une progradation du littoral intervenue entre ces deux dates. Le taux moyen d'évolution est de 0,2 m/an si on tient compte de toutes les mesures. Les plus forts taux d'érosion sont localisés au niveau du transect 14 et 22 avec un taux de 0.20 m/an et entre le transect 8 et 11 avec une moyenne de 0.10 par contre le reste de la cote connait une évolution positive avec un taux positif d'une moyenne 0,26 m/an. Un maximum de progradation (+0.55m/an) est enregistrée au niveau du transect 22 dans partie extrême Est et de (0.45m/an) au niveau du transect 7 dans la partie Ouest.

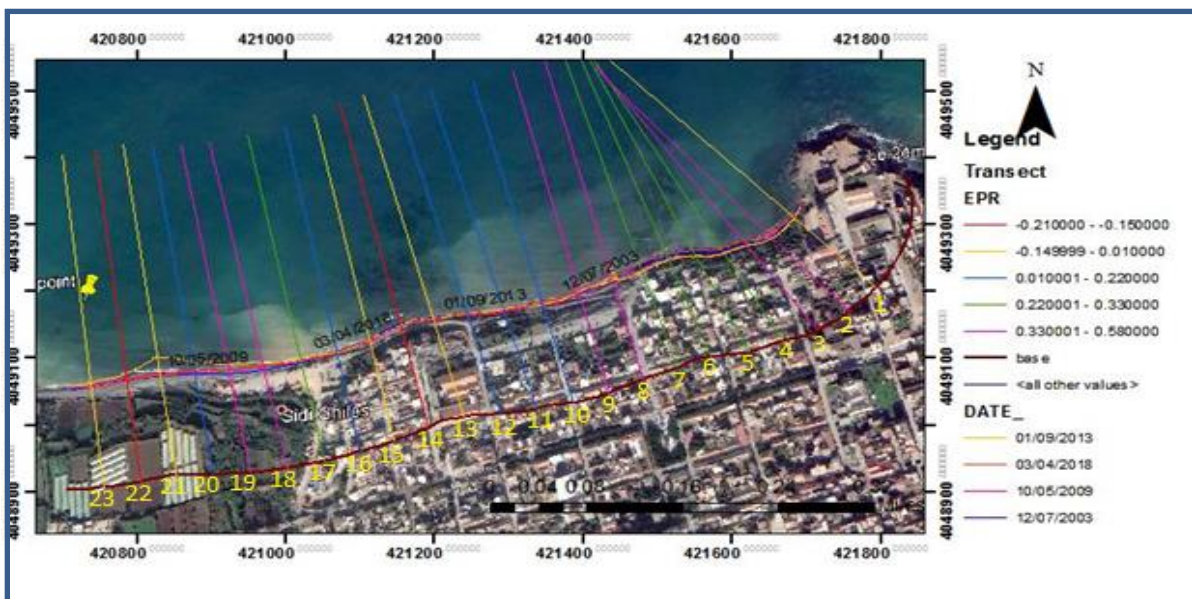


Figure III. 14 : Illustration du rythme d'évolution du trait de côte en m/an entre 2003-2018

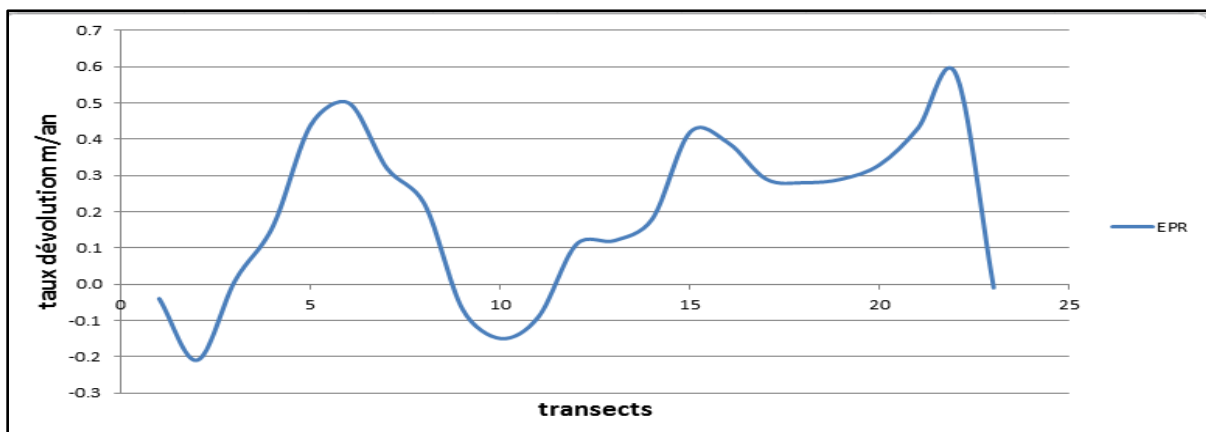


Figure III. 15 : Variation de la vitesse de déplacement du trait de cote selon les transects au niveau de la zone Sidi Ghiles 2003-2018

I.12.2. Net Shore Movement (NSM) (période 2003-2018)

La Figure III. 16 et III. 17 représentent les résultats de NSM obtenus à partir de l'extension DSAS pour la zone de Sidi Ghiles (Nouvi). les transects en rouge et bleu indiquent une accumulation qui varie entre 4.17 et 8.32m et en vert faible (-0.35et 2m) régression et en jaune forte régression (-2.95 et -0.35).

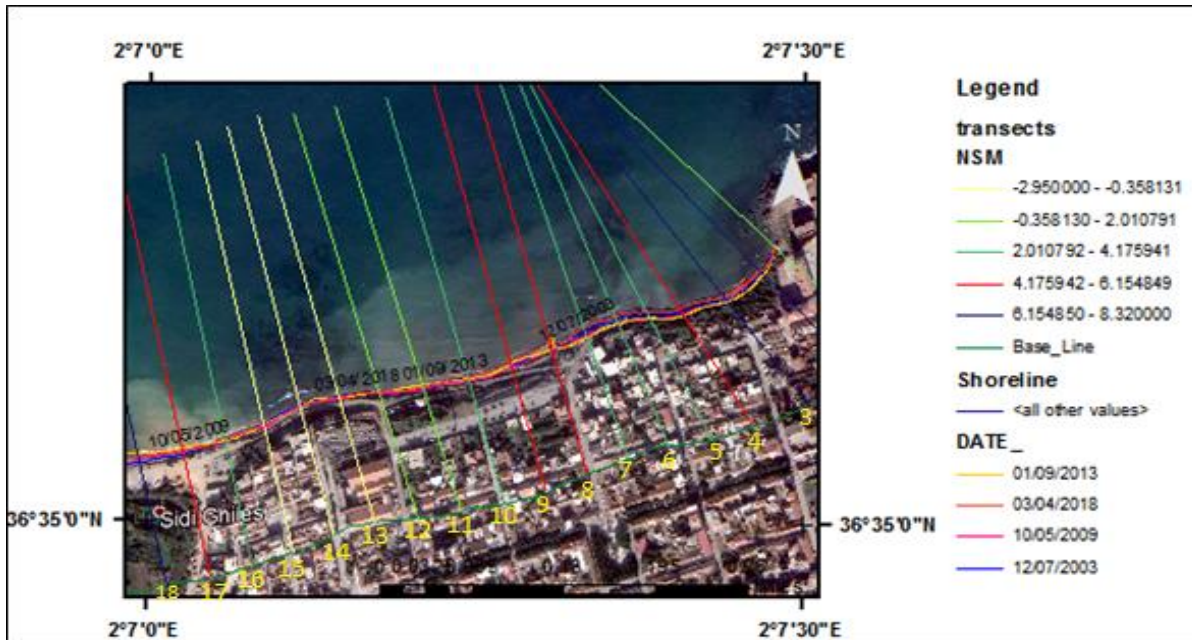


Figure III. 16 : Visualisation l'évolution du trait de côte en m/an entre 2003 et 2018

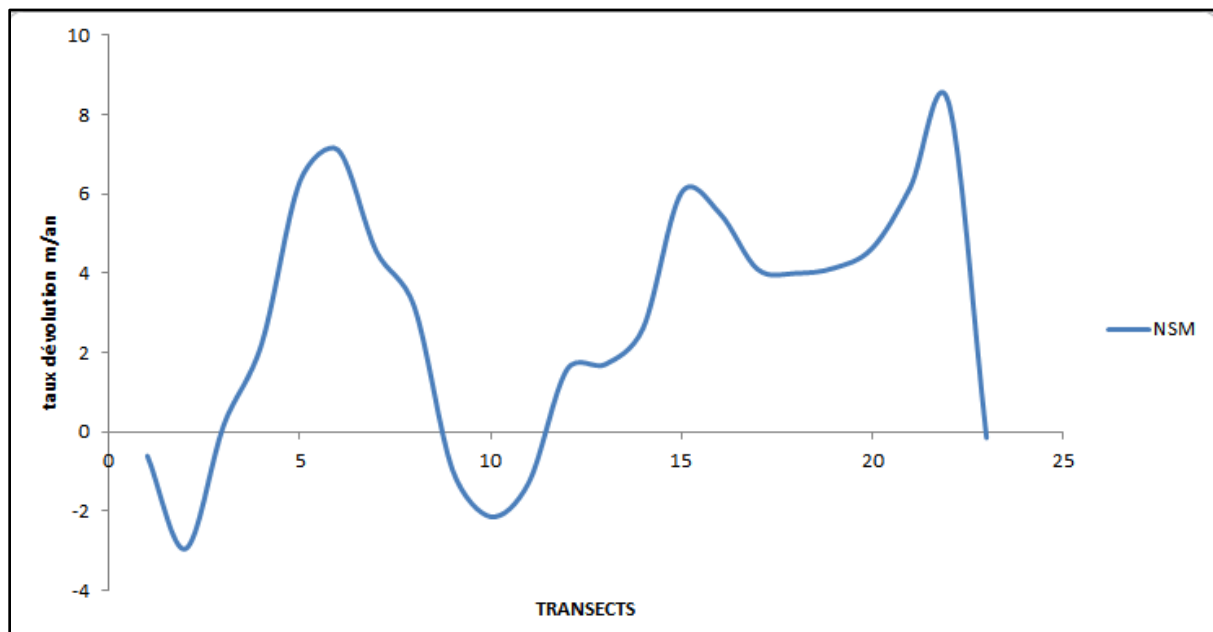


Figure III. 17 : Evolution de trait de côte selon les transects ai niveau de la de Sidi Ghiles en m entre 2003 –2018

I.12.3. Linear Regression Rate-of-change (LRR) (Période 2003-2018)

Les résultats des taux de changement du trait de côte obtenus par les deux approches statistiques (LLR et EPR) ont été comparés entre eux. La Figure III. 19 démontre une forte corrélation entre les deux courbes au cours de la période 2003 et 2018. Les valeurs des taux de changement de position de trait de côte obtenus par EPR et LRR sont très proches au long de la zone de Sidi Ghiles.

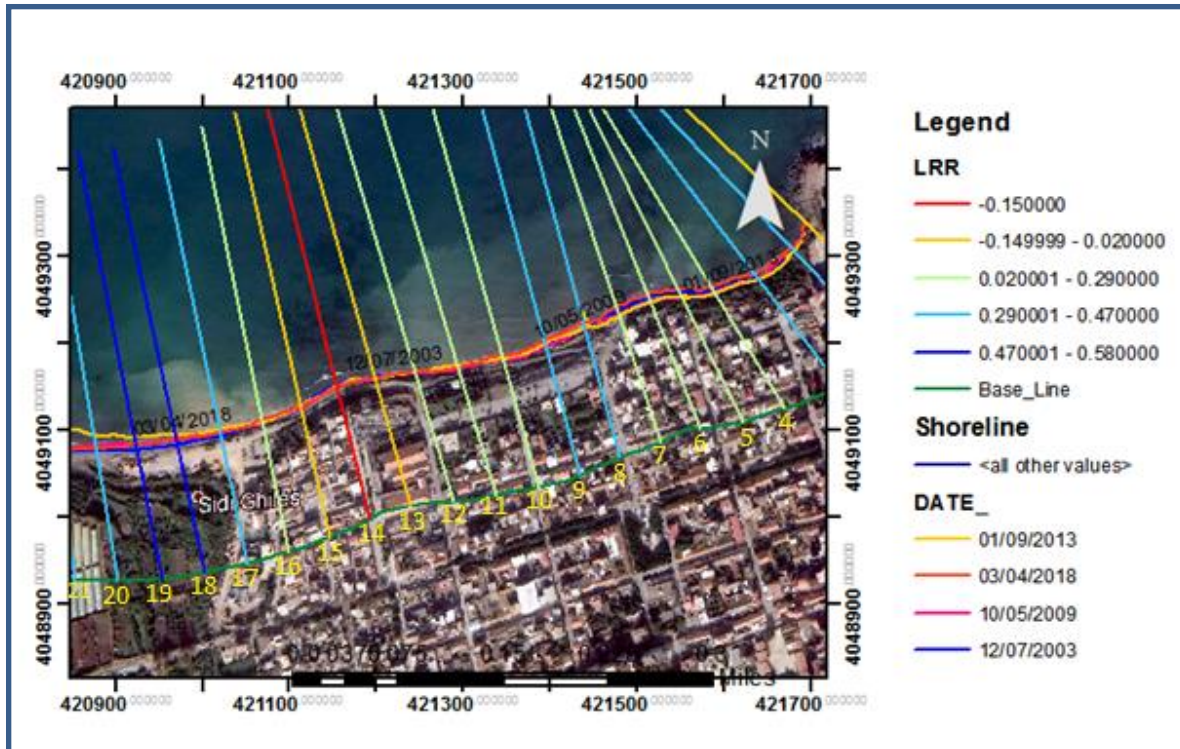


Figure III. 18 : Visualisation de la tendance d'évolution du trait de côte en m/an 2003-2009-2013-2018

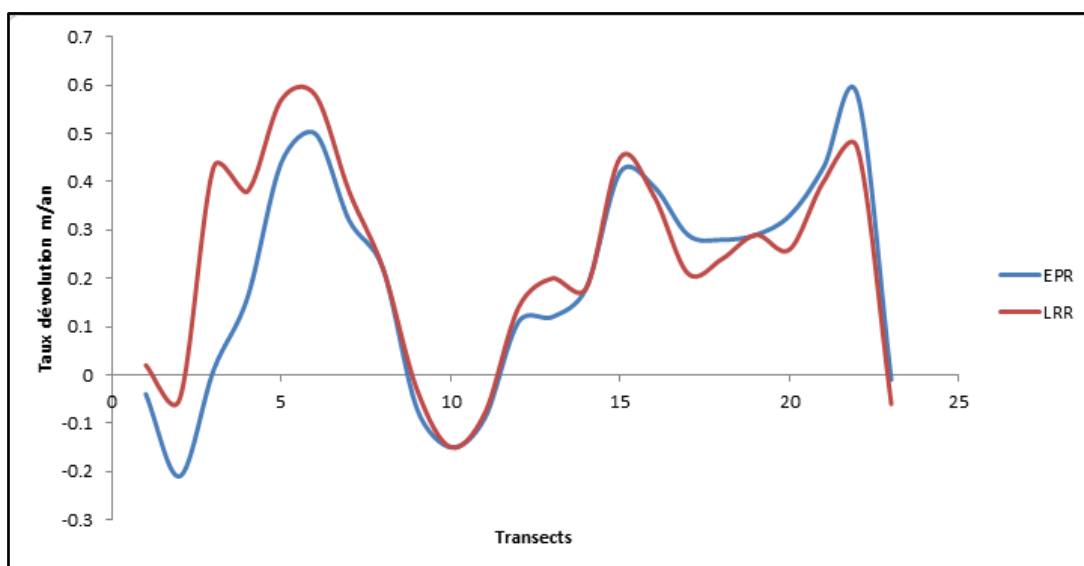


Figure III. 19 : Représentation graphique des variations des paramètres d'évolution de trait de côte LLR et EPR en m/an

CHAPITRE IV :Solutions d'Aménagement.

Introduction

Le problème de l'érosion représente ainsi, non seulement une menace pour le développement touristique, mais aussi une forte atteinte à la pérennité des infrastructures, ce qui impose aux collectivités, une protection et une gestion intégrée du littoral qui ne saurait faire abstraction de la connaissance approfondie des causes du phénomène érosif.

La défense d'une côte consiste en l'établissement d'ouvrages capables de s'opposer à l'attaque de la mer et de protéger les hauts des plages (*Benoit et al., 2009*).

Suite aux différents résultats issus des chapitres précédents, nous allons aborder dans ce chapitre quelques solutions techniques en fonction des particularités du site.

Notre zone d'étude subit une érosion remarquable, une étude d'aménagement alors s'impose, elle doit être conduite avec rigueur afin d'obtenir la meilleure synthèse possible pour la région.

I.13. Les ouvrages de protection envisageables

La plage, absorbant graduellement l'énergie de la houle par les déferlements successifs qu'elle provoque, constitue le meilleur ouvrage de défense du littoral contre l'érosion. C'est en effet la dynamique naturelle des plages qui est fondamentale pour la survie physique de la plage et pour la diversité de ses habitats biologiques (*Ramoge, 2002*).

Pour toute défense contre l'érosion, il est plus efficace de se diriger vers des ouvrages de défense souples qui vont en harmonie avec les dynamiques naturelles en jeu. Toutefois, la diversité des phénomènes à l'origine de l'érosion, conduit à une diversité de réponses techniques. Ainsi, pour améliorer l'efficacité des interventions de protections, on adopte souvent des défenses de natures mixtes.

Suite aux différents résultats obtenus lors des études élaborées sur la zone d'étude, on a pu retenir les trois variantes suivantes :

I.13.1. Variante N°1

Elle comporte des brise-lames immergé en géotubes avec un apport artificiel de sable.

I.13.1.1. Brise-lames immergés en géotubes

Les géotubes sont des structures tubulaires fabriquées de géotextile, ce sont des mis au point spécialement pour l'érosion.

Le géotube est composé d'une matière géotextile tissée en forme d'un long cylindre malléable qu'on remplit avec du sable hydraulique. Il est fabriqué à partir d'un géotextile très solide et perméable à l'eau grâce à ses orifices plus au moins ouverts pour retenir les éléments fins (sable) et laisser passer l'eau.

La mise en place du géotube est réalisée par pompage hydraulique avec matériau sableux (grâce à son incompressibilité).

Lorsqu'on place des géotubes sous forme de brise-lames, on s'attend au même principe de fonctionnement, celui d'atténuer la houle, donc les géotubes font le travail d'un brise-lame avec une matière première différente.

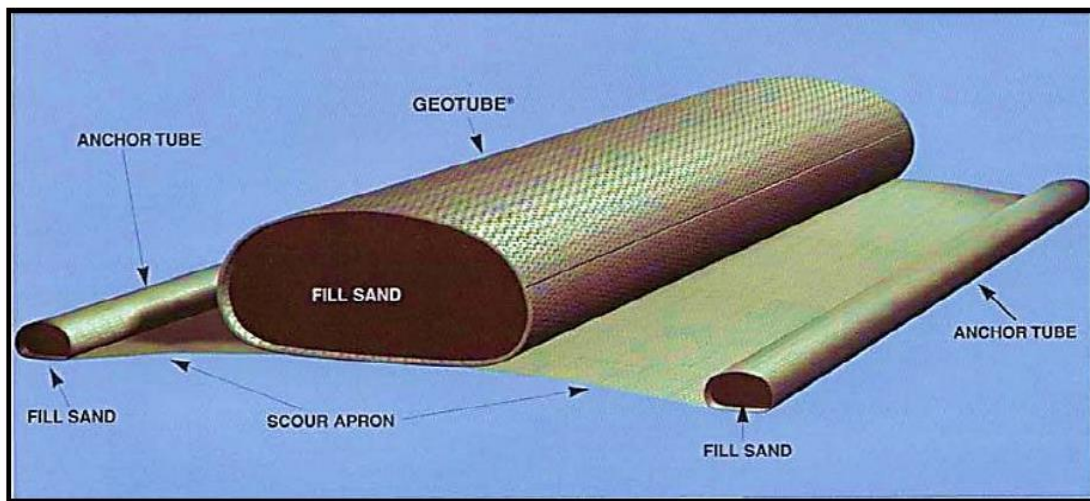


Figure IV. 1 : Coupe type classique d'un tube posé sur un tapis anti-affouillement.

➤ Paramètres d'implantation

On a choisi d'implanter les géotubes à 3 m de profondeur, chaque géotube aura une hauteur de 2 m c'est-à-dire une côte d'arase égale à 1 m. En utilisant le tableau suivant, qui est une référence lors de l'implantation du géotube, on détermine les caractéristiques du géotube qu'on peut utiliser selon la hauteur de l'ouvrage précédemment choisie :

Tableau IV. 1 : Détermination des caractéristiques des géotubes implantés (LEM, 2012)

Diamètre	Circonférence	Hauteur	Volume	Largeur max	Largeur base	Géosynthétique recommandé
D	C	H	F	W	W _b	
m	m	M	m ³ /ml	M	m	
1,60	5,0	1,0	1,7	2,0	1,7	PP 120 S
2,50	7,9	1,1	4,1	3,2	2,7	PP 120 S
3,25	10,2	2,0	6,9	4,2	3,5	PP 200 S
4,00	12,6	2,4	10,4	5,1	4,3	PP 200 S
5,00	15,7	3,0	16,3	6,4	5,4	PP 200 S

Donc : la largeur maximale des géotubes utilisés est de 4,2 m.

A ce stade, on va utiliser les caractéristiques des brise-lames immergés en enrochement précédemment dimensionné à savoir :

$$\left\{ \begin{array}{l} l_c = 110 \text{ m} \\ l = 150 \text{ m} \\ B = 12 \text{ m} \\ E = 110 \text{ m} \end{array} \right.$$

Chaque géotube à une largeur maximale de 4,2 m donc pour obtenir un brise-lame de 12 m de largeur il faut poser trois géotubes. Pour la longueur, le brise-lame conçu à 150 m de longueur et chaque géotube a une longueur standard de 50 m ce qui nous oblige à mettre plusieurs boudins avec une couverture de 1 à 2 m l'une devant l'autre pour arriver à 150 m de longueur.

➤ Paramètres de stabilité

Pour vérifier la stabilité des géotubes, on utilise la formule de Pylarczyk (2000):

$$\frac{H_s}{\Delta B} \leq 1$$

Avec :

H_s = amplitude de la houle au pied de l'ouvrage (en mètres). B = largeur maximale du géotube (en mètres).

Δ = qui s'écrit sous la forme suivante : $\Delta = (1 - n) \times \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$ où :

n = porosité du sable égale à 0,5

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

$\rho_w = 1,028 \text{ t/m}^3$.

Application numérique

En prenant : $H_s = 3 \text{ m}$. $B = 4,2 \text{ m}$. $n = 0,5$.

On trouve que :

$$\Delta = (1 - 0.5) \times \frac{(2.65 - 1.028)}{1.028} = 0.78$$

Ce qui fait que le rapport :

$$\frac{H_s}{\Delta B} = \frac{3}{4.2 \times 0.78} = 0.9$$

Donc $\Delta \leq 1 \Rightarrow$ les géotubes sont stables.

Conclusion

Pour concevoir un ouvrage assez efficace, il nous faut trois géotubes implantés comme suit (Figure IV. 2) en plus ce nombre se multiplie par deux ; pour concevoir le deuxième brise-lame à côté, on rajoute aussi un tapis anti-affouillement et des petites défenses en géotubes aussi agissant comme des butées en pied de part et d'autre l'ouvrage (l'espacement ainsi que les dimensions de ces derniers sont bien illustrés dans la figure suivante :



Figure IV. 2 : Emplacement des brise-lames en géotubes (Mehareb et Boussaidi 2019).

➤ Impacts des géotubes

Ils offrent de nombreux avantages, parmi lesquels :

- Remplacement de tout ou partie des enrochements et des matériaux de carrière ;
- Utilisation du sable comme matériau principal (sable de dune, résidus de certaines carrières, sable de dragage etc.) ;
- Réduction importante des coûts de construction ;
- Moyens matériels beaucoup moins importants pour la mise en œuvre ;
- Diminution ou suppression des incidences de transport terrestre ;
- Solutions facilement réversibles à moindre coût, par rapport aux solutions traditionnelles ;
- Solution environnementale.

Cependant, le géotextile peut être endommagé volontairement par des objets tranchants (vandalisme), ou même accidentellement par les bateaux....

I.13.2. Variante N°2

Elle consiste à un système d'Ecoplage.

➤ Définition et principe

Il s'agit d'un système mécanique qui absorbe, à l'aide d'une pompe, l'énergie de la houle (Figure IV. 3). Il draine ainsi l'eau par dépression dans une canalisation souterraine et permet l'engraissement de la plage par les sables en suspension portés par la houle. Il présente l'avantage d'être invisible car il est enterré sous la plage (Ramoge, 2002). Il constitue ainsi un frein au processus d'érosion et permet la reconstitution plus rapide de la plage après une tempête.

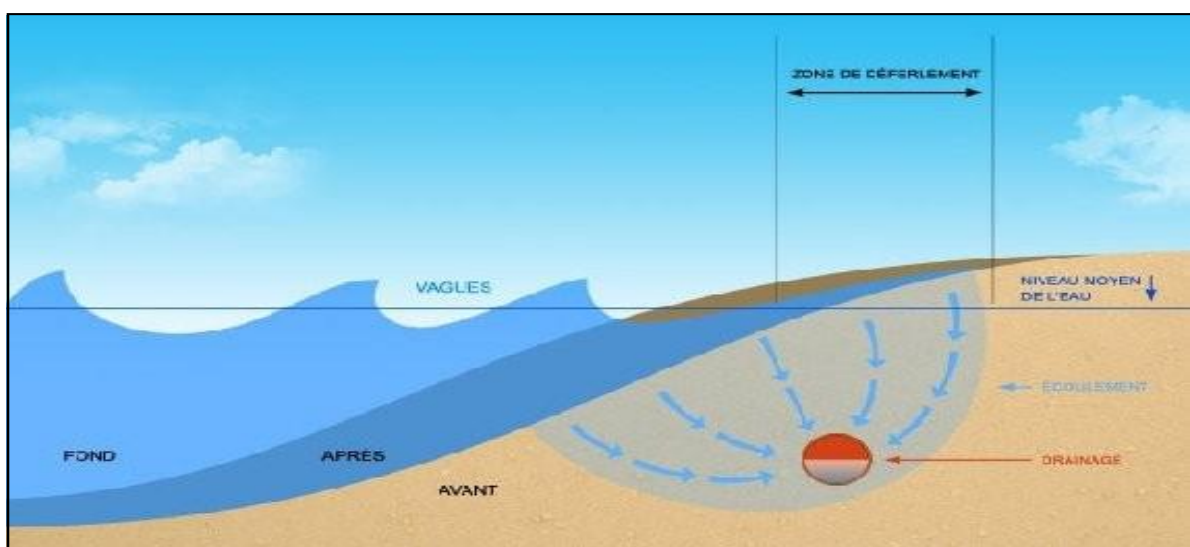


Figure IV. 3 : Principe de fonctionnement du système Ecoplage (Ecoplage ®, 2012).

➤ Mis en œuvre

Le système se compose de :

- Un ou plusieurs drains: installés parallèlement au trait de côte, ils permettent à l'eau de la vague de s'infiltrer par dépression, assurant ainsi une désaturation du sable et permettant ainsi une bonne captation des sédiments sur le haut de plage ;
- De puits collecteurs et canalisations de transports qui permettent à l'eau captée par les drains de s'écouler, par gravité, jusqu'à une station de pompage ;
- Une station de pompage: elle a pour rôle d'évacuer l'eau de mer filtrée. Cette eau, parfaitement propre, peut-être, selon le cas, rejetée à la mer ou bien utilisée pour des activités situées à proximité et nécessitant un approvisionnement en eau de mer filtrée (unité de dessalement, piscine, aquarium, thalasso, pisciculture, ...).

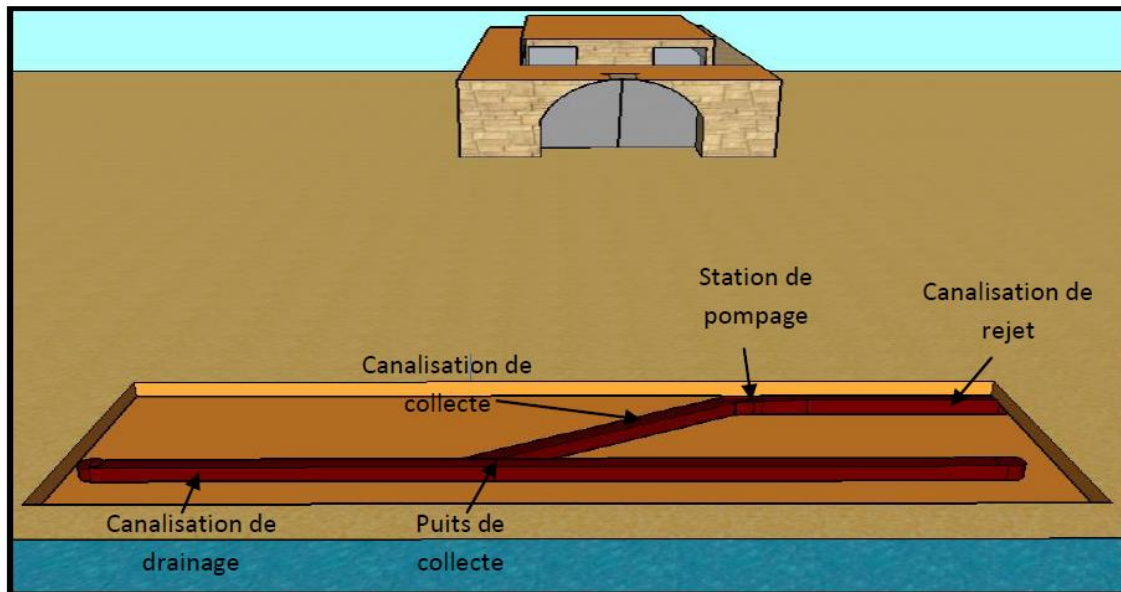


Figure IV. 4 : Schématisation de la mise en œuvre du système Ecoplage (Ecoplage ®, 2012).

➤ **Applicabilité au site d'étude**

Le système Ecoplage est adapté au site de Sidi Ghiles Centre et pourrait avantageusement venir compléter une défense de haut de plage qui permettrait de fixer le rivage aux endroits les plus menacés.

➤ **Impacts du système Ecoplage**

Il possède énormément d'avantages, on cite :

- Stabilisation des sédiments sur la surface de la plage : les sédiments sont "plaqués au sol";
- Diminution de la force de reflux des vagues (les vagues repartent avec moins d'énergie, puisqu'une partie de l'eau est absorbée par la plage) ;
- Diminution des exports de sédiments causés par les écoulements des eaux issues de la nappe phréatique (des terres vers la mer) ;
- Augmentation des dépôts de sédiments transportés par les vagues sur la plage

Ainsi, le procédé permet l'arrêt de l'érosion et favorise même, selon les conditions, un engraissement de la plage, ce qui enrichit le "cercle vertueux" de deux effets positifs supplémentaires :

- Création d'une pente plus longue sur laquelle les vagues perdront encore plus de leur énergie ;

- Constitution d'une réserve de stock sableux qui constituera une zone "tampon" contre l'érosion lors de la tempête suivante.

Cependant son coût reste assez élevé vu que c'est une nouvelle technique qui n'a vu le jour que depuis quelques années, il est estimé à 1 300 000 euros en plus de son entretien annuel qui revient aussi à 10 000 euros. Elle reste donc une solution qui ne peut être utilisée que lorsqu'on est face à une protection d'une plage touristique qui pourrait nous faire bénéficier des rentrés très importante ; ainsi on pourra couvrir son cout d'installation.

I.13.3. Variante N°3

Elle consiste à une série de brise-lames et épi immergés en enrochement.

➤ Principe

Des brise-lames et des épis en enrochement peuvent être la solution dans notre cas, en provoquant une dissipation de l'énergie de la houle avant son déferlement sur la plage, ce qui va créer une opposition à l'entraînement des matériaux vers le large, il peut même y avoir un réengraissement naturel de cette dernière. Par contre l'épi joue un rôle d'obstacle pour le transport sédimentaire longitudinal.

Les brise-lames agissent selon deux modes. Le premier réside dans la diminution de l'énergie des lames, qui arrivent au rivage, consécutive à la réflexion et au déferlement de la houle. Le second réside dans l'étalement de l'énergie de la houle derrière eux dû aux phénomènes de diffraction autour de leurs extrémités et de réfraction sur les fonds qu'ils modifient. Il en résulte de ces modes de fonctionnement que l'action des brises lames reste limitée à leur voisinage (Figure IV. 5).

L'épis joue un rôle principal dans la diffraction de la houle frontale, freiner les courants longitudinaux et piège les sédiments transportés à l'amont de cet épi.



Figure IV. 5 : Emplacement de brise-lames et épi immergés en enrochement. (Mehareb et Boussaidi 2019).

Paramètres d'implantation

Ce sont les caractéristiques des brise-lames à savoir sa longueur, sa largeur, sa hauteur ; ils sont déterminés en utilisant les résultats de l'étude de la réfraction, donc en utilisant le $T_p = 8s$ et son H_s correspondant de la direction la plus défavorable la $N315^\circ$ (Nord-Ouest) , en plus de la profondeur d'implantation qui est choisie à 3 m de profondeur et les formules proposées par LCHF et d'autres auteurs spécialisés dans ce domaine. Le calcul des paramètres d'implantation des brise-lames s'est effectué selon les étapes suivantes :

a)- Longueur d'onde L_0 (à la côte).

En prenant $T_m = T_{large} = 8s \Rightarrow T_m = T_p/1,1$

Avec la formule : $L_0 = \frac{gT_m^2}{2}$ (Où : g = gravité) la longueur d'onde L_0 au large est déterminée :

- **Application numérique :**

$$L_0 = 9,81 \times (8)^2 / 2 \times 3,14 = 99,97 \text{ m} \approx 100 \text{ m.}$$

En utilisant par la suite l'abaque dans l'annexe IV, on détermine la longueur d'onde au pied de l'ouvrage : on veut l'implanter à $h = 3m$ de profondeur et $\lambda_0 = 100 \text{ m}$:

Donc le rapport $h/L_0 = 3/100 = 0,03$; En projetons cette valeur sur l'abaque, on trouve : $h/L = 0,06 \Rightarrow L = h / 0,06 \Rightarrow L = 42 \text{ m}$

b)- Longueur du brise-lames.

La longueur du brise-lames est le paramètre qui conditionne le plus directement la longueur de rivage protégée, elle est liée à deux autres longueurs qui sont la distance à la plage l_c et la longueur d'onde de la houle L .

Selon les auteurs, différentes formules sont proposées pour choisir la longueur globale à donner à un brise-lames, Charpentier (1920) propose la relation⁽²⁾ qui est en accord avec le fait que la formation des tombolos dépend de la distance relative et de la longueur d'onde relative :

$$l \geq 1,2 (l_c + 0,3L) \dots\dots\dots(2)$$

Avec : l = longueur du brise-lames

l_c = distance du brise-lames à la côte.

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

Sogreah propose de rattacher la longueur d'onde du brise-lames à la longueur d'onde de la houle (dans le cas de petits fonds) par une expression⁽³⁾ de la forme :

$$l = 1,25 L \dots\dots\dots(3)$$

Par contre, Chapon (1987) conseille de donner au brise-lame une longueur équivalente à plusieurs longueurs d'ondes ce qui recoupe les idées de Toyoshima (1984) où il préconise les longueurs suivantes en fonction de la profondeur d'implantation des brise-lames :

Tableau IV. 2 : Propositions pour la longueur des brise-lames (Chapon et al, 1987)

Ouvrage	Près de la côte	Faible profondeur	Moyenne profondeur	Grande Profondeur
Profondeur d (en m)	< 1	1 à 2	1 à 6	> 6
Longueur l (en m)	2 à 3L	3 à 5 L	3 à 10 L	3 à 10 L

- **Application numérique**

Puisqu'on va implanter le brise-lames à -3 m, l_c est égale à 110 m (trouvée par Mapinfo) et en utilisant la formule de LCHF : $l \geq 147,12$ m. Ce qui fait que la longueur du brise-lames est égale à 150 m.

c)- Largeur de la berme

Briganti et al. (2004) ont calibré la relation élaborée par d'Angremond et al. (1997), il en résulte la formule⁽⁴⁾ conçu pour les ouvrages larges (B qui met en relation le coefficient de transmission du brise-lames (C_t), la largeur de sa berme (B), le coefficient de Battjes (ζ_p), ainsi que la hauteur de la surface d'eau libre du brise-lames (R_c) et l'amplitude de la houle au pied de l'ouvrage (H_s) ; puis c'est à l'ingénieur de fixer une valeur pour la transmission qui lui convient :

$$C_t = -0,4 (R_c / H_s) + 0,64 (B / H_s)^{-0,31} (1 - \exp(-0,5 \zeta_p)) \dots\dots\dots (4)$$

Le coefficient de Battjes peut se calculer à l'aide de la relation⁽⁵⁾ :

$$\zeta_p = \tan \alpha / \sqrt{s_p} \dots\dots\dots (5)$$

Avec :

$\tan \alpha$ = pente de l'ouvrage.

S_p = cambrure typique (hauteur de la houle au pied de l'ouvrage/ longueur d'onde pic ;

$$S_p = H_s / L_p)$$

La valeur optimale de transmission est généralement prise entre 40 à 50%.

- **Application numérique**

On les valeurs suivantes :

$$C_t = 0,50.$$

$$R_c = -1 \text{ m.}$$

$$H_s = 2,84 \text{ m.}$$

$$\tan \alpha = 2/3 \sim 0,67.$$

$$L_0 = 100 \text{ m.}$$

Donc : $\zeta_p = \tan \alpha / \sqrt{S_p} = 0,67 / \left(\frac{H_s}{L}\right) = 3,94 \sim 4$ (Une transition entre un déferlement gonflant et à L'effondrement)

==> $B = 11,37 \text{ m} \sim 12 \text{ m}$; la largeur de la berme correspondante à une transmission de 50% est de 12m.

d)- Influence des distances entre brise-lames

En considérant que la limite d'expansion de la houle se croise sur le trait de côte, Carpentier (1987) préconise la relation⁽⁶⁾ qui donne un espace 'e' entre deux brise-lames tel que :

$$e \leq 0.83lc + l/2 \dots \dots \dots (6)$$

- **Application numérique**

$$lc = 110 \text{ m et } L = 42 \text{ m} \implies e \leq 112,3 \text{ m}$$

Donc : $e \sim 110 \text{ m}$

e)- Conclusion

Les brise-lames immergés qu'on va implanter sont au nombre de deux, espacés de 110 m et ayant chacun les caractéristiques suivantes :

- Une longueur de 150 m
- Une largeur de 12 m
- Une distance par rapport à la côte de 110 m

Dimensionnement des épis

Profil en long des épis

La cote d'arase d'un épi est fonction du mode de transport sédimentaire qui prédomine (charriage ou suspension). Elle est d'autant plus élevée que le transport en suspension est plus important et qu'on souhaite l'interrompre.

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.

Le profil en long d'un épi peut être décomposé en trois tronçons :

- _ Le tronçon horizontal de haut de plage,
- _ Le tronçon incliné intermédiaire,
- _ Le tronçon final.

Dans la pratique, les épis sont donc souvent arasés à une cote de l'ordre de 0.5 à 1.0 mètre au-dessus du niveau des plages de sable ; le double pour les plages à galets.

Longueur des épis

La longueur des épis est essentiellement déterminée par le degré d'interruption du transport littoral souhaité, par le type de profil de plage recherché et par la nouvelle ligne de rivage attendue.

Espacement des épis

L'espacement entre deux épis consécutifs dépend de l'obliquité de la houle dominante, et plus généralement de l'enveloppe des obliquités des houles représentatives du comportement hydrosédimentaire local et en particulier de l'orientation de la ligne de rivage entre les épis.

Entre deux épis, la ligne de rivage tend vers un équilibre dans lequel elle est parallèle aux crêtes des houles dominantes. Elle part donc d'un point situé en retrait de l'extrémité de l'épi aval au transport solide pour aller s'arrêter en un point de l'épi amont au transport solide. Pour éviter le déchaussement de l'épi amont au transport solide, ce point doit être situé

Entre sa racine et son extrémité. A la distance entre la racine de l'épi et le trait de côte moyen recherché, la longueur L de l'épi, et l'espacement E entre deux épis doivent vérifier la relation suivante,

$$E < (L - A) \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{\operatorname{tg} \alpha}$$

Obtenue à partir d'une approche théorique simplifiée :

L'angle α est d'autant plus petit que la ligne de rivage est plus proche de

L'équilibre avant la mise en place des épis. Il est donc généralement

Inférieur à un angle de l'ordre de 15° à 25° . C'est la raison pour laquelle

L'espacement entre les épis est souvent de l'ordre de 1.5 à 4.0 fois leur

Longueur $L-A$.

Paramètres structuraux (stabilité de l'ouvrage)

Dans tous ce qui va suivre, l'amplitude de la houle considérée est celle de la houle vintennale, du secteur le plus défavorable « N340° », les calculs vont se faire en utilisant $H = 3 \text{ m}$; c'est l'amplitude maximale de la houle réfractée au pied de l'ouvrage.

a)- Carapace

Pour le dimensionnement des ouvrages de défense en enrochement (ou éventuellement en blocs artificiels en béton), Hudson (1958-1959) a donné une formule⁽⁷⁾ basée sur les résultats des travaux de l'U.S.Army Engineer Waterways Experiment Station à Vicksbury (Chapon, 1978), il s'agit de la formule la plus utilisée :

$$W_{50} = \frac{\rho_s g H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \alpha} \dots\dots\dots (7)$$

Où :

W_{50} = poids moyen du bloc/enrochement (en tonnes).

H = hauteur significative de la houle incidente au pied de l'ouvrage (houle de projet en mètres).

ρ_s = masse volumique du matériau.

$S_r = \rho_s / \rho_w$.

ρ_w = poids spécifique de l'eau de mer égale à 1,028 t/m³.

$\cot \alpha$ = pente du talus avec l'horizontal.

K_D = coefficient de stabilité sans dimension qui tient compte de la nature et de l'arrangement des enrochements ou des blocs.

Et pour l'épaisseur de la carapace, on utilise généralement la formule⁽⁸⁾ :

$$E = n k_t \times D_{50} \dots\dots\dots (8)$$

Où :

E = épaisseur de la carapace.

n = nombre de couches hormis la carapace, n doit être supérieure ou égale à 2 ($n \geq 2$).

K_D = coefficient des couches (égale à 1,15 pour les enrochements et 1 égale à 1 pour le béton).

Dans cette étude, nous avons fait l'hypothèse que la masse volumique des enrochements est de $\rho_s = 2,65 \text{ t/m}^3$, le coefficient de dommage $K_D = 3,5$ (ce K_D correspond à un dommage situé entre 0-5 % et ceci pour une forme angulaire et rugueuse des blocs et pour un emplacement aléatoire) et la pente de l'ouvrage est égale à 3/2. Ainsi qu'un coefficient de couches $K_t = 1,15$; tout en utilisant $n = 2$ couches.

- **Application numérique**

En prenant : $H = 3 \text{ m}$, $\cot \alpha = 3/2$, $K_d = 3,5$

$$W_{50} = \frac{2,65 \times 3^3}{3,5 \times \left(\frac{2,65}{1,025} - 1\right)^3 \times \frac{3}{2}} = 3,42 \text{ t}$$

Le tonnage moyen de la carapace sera égal à 3,42 tonnes, donc : $W_{50} \in [3 - 5\text{t}]$.

Et pour l'épaisseur de la carapace :

$W_{50} = 3,5 \text{ t}$ (puisque'on fait toujours la moyenne des enrochements disponible dans les carrières ainsi :

$$W_{50} = 3,5 \text{ t}, n = 2, \rho_s = 2,65 \text{ t/m}^3, E = 2 \times 1,15 \times (3,5 / 2,65)^{1/3} = 2,52 \text{ m}$$

- **b)- Premier filtre et noyau**

On utilise les deux formules suivantes pour déterminer le tonnage⁽⁹⁾ du premier filtre qui fonction du poids moyen de la carapace W_{50} , ainsi que son épaisseur⁽¹⁰⁾ :

$$0,04 W_{50} < W_{\text{filtr}} < 0,1 W_{50} \dots\dots\dots(9)$$

$$E = 1,6^3 W_{\text{filtr}} \dots\dots\dots(10)$$

- **Application numérique**

En utilisant les résultats obtenus pour la carapace, on obtient les valeurs suivantes :

$$0,14\text{t} < W_{\text{iltre}} < 0,35 \text{ t.}$$

$$E = 1,6^3 \times 0,35 = 1,43 \text{ m}$$

Donc : le premier filtre a un tonnage $\in [140 - 350 \text{ kg}]$ d'une épaisseur de 1,43 m

Il appartient déjà à la catégorie du tonnage traditionnel du noyau $W_{\text{filtre}} < 750 \text{ kg}$; donc il est inclus dans le noyau.

Le noyau est constitué généralement de sédiments du Tous venant Carrière (TVC), pour notre ouvrage ; le diamètre moyen sera compris entre $[1 - 500 \text{ kg}]$.

Mais pour sécuriser l'ouvrage, on rajoute une de géotextile de filtration, qui admet les infiltrations de l'eau de mer, tout en protégeant le TVC du noyau, surtout les particules fines.

c)- Musoir

Le musoir est l'extrémité côté mer à tracé circulaire d'une digue à talus connectée à la côte ou les deux extrémités d'une digue foraine. Les musoirs sont fortement exposés aux tempêtes à cause, d'une part, des vagues diffractées et, d'autre part, des franchissements ; il faut donc y prêter une attention particulière lors du choix de la taille des blocs d'enrochement.

Il doit être plus résistant que la partie courante, puisqu'il est le plus exposé aux houles frontales, la stabilité du musoir peut être vérifiée par la formule d'Hudson, telle qu'elle est en changeant la valeur du coefficient de stabilité K_D utilisée précédemment par celle de 2,5.

Donc : le premier filtre a un tonnage $\in [1-300 \text{ kg}]$ d'une épaisseur de 0,94 m

Il appartient déjà à la catégorie du tonnage traditionnel du noyau $W_{\text{filtre}} < 750 \text{ kg}$ il est inclus dans le noyau.

Le noyau est constitué généralement de sédiments du Tous venant Carrière (TVC) de diamètre moyen compris entre $[1 - 500 \text{ kg}]$.

Afin d'optimiser la protection proposé, deux brise-lames vont être implantés ayant les mêmes caractéristiques.

Modélisation numérique de l'impact de la troisième variante sur l'hydrodynamique de la zone.

□ Direction Nord-Est (20° N)

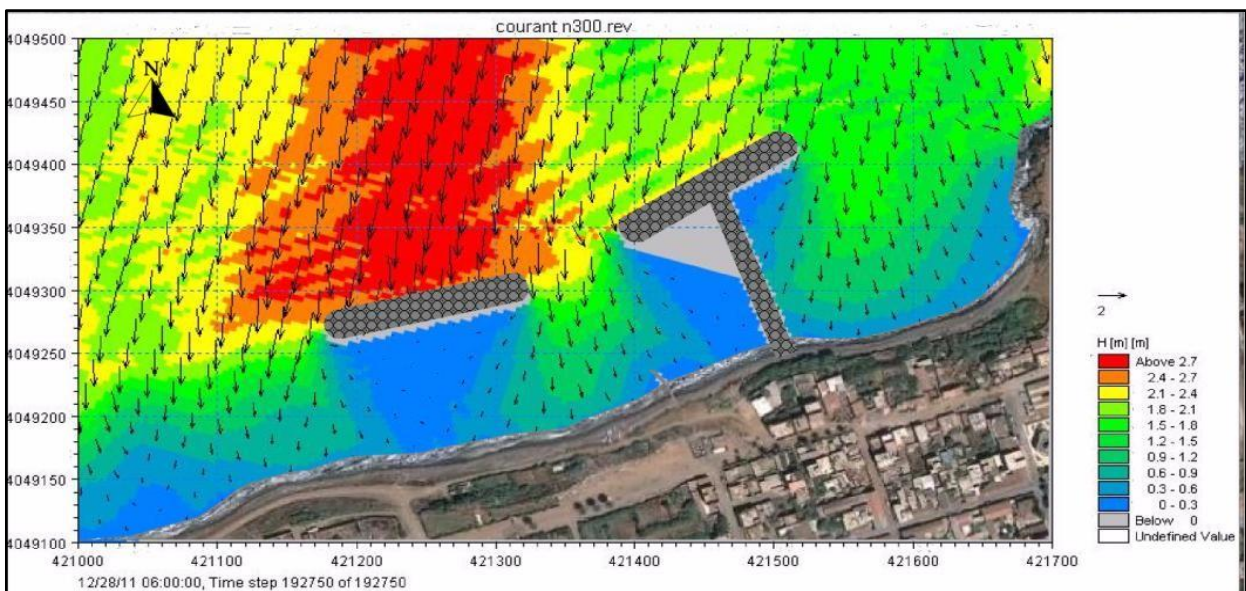


Figure IV. 6 : Hauteur de la houle à la côte, direction Nord-Est ($H_0 = 2.40 \text{ m}$, $\text{Teta} = 20^\circ$, $T = 8\text{s}$). Etat projeté-Brise lames et épi en T.

L'insertion de la variante retenue apporte de bons résultats en termes d'atténuation de l'énergie de la houle à la côte, notamment derrière le brise lames détaché de la côte.

Pour les courants, en présence de l'Épi en T, le champ de courant tourbillonnaire, constaté dans l'état initial est éparpillé vers le large, ainsi une nette réduction de l'effet des courants, au niveau de la partie centrale de la plage est observée.

□ **Direction Nord- Ouest (340°N)**

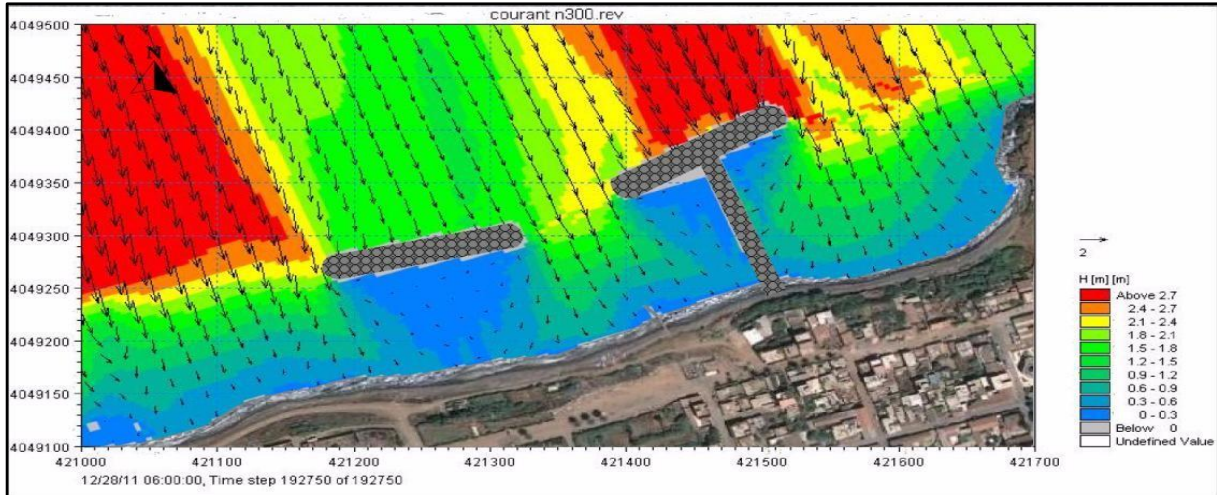


Figure IV. 7 : Nord-Ouest ($H_0= 2.55$ m Teta = 340° T= 8s). Etat projeté- Brise lames et un épi en T. Ces ouvrages apportent une amélioration appréciable en terme d'atténuation des effets du courant de retour et tourbillonnaire.

□ **Direction Ouest (300°N)**

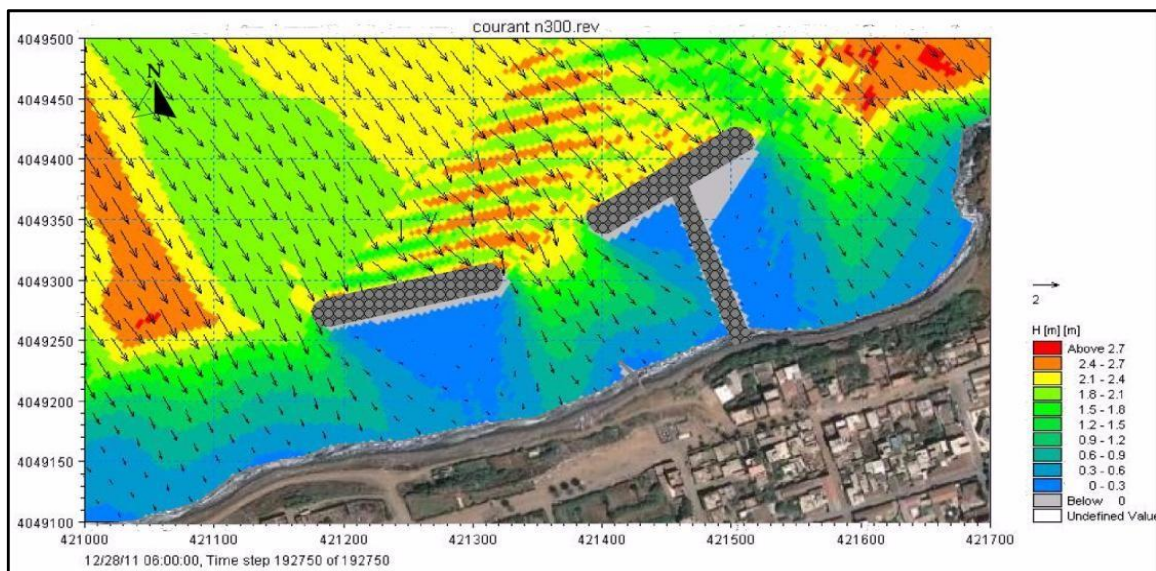


Figure IV. 8 : Hauteur de la houle à la côte, direction Ouest ($H_0= 2.55$ m Teta = 300° T= 8s). Etat projeté- Brise lames et épi en T

L'action de la houle Ouest en présence de ces ouvrages permet de constater ce qui suit:

- ✓ Le champ de protection des ouvrages est bien remarquable ;

- ✓ La vitesse des courants est nettement diminuée aux abords du rivage des côtés Est et Ouest ; □ Le renouvellement des eaux de baignade est assuré derrière les ouvrages.

Conclusion

-L'examen de l'état initial a permis de mettre en évidence ce qui suit :

-L'action de la houle de direction Nord-Ouest (340°N) induit un courant de retour qui est responsable de l'amaigrissement de la plage.

-Le sens de transit littoral est dirigé vers l'Est pour les houles de direction Ouest (300°N), et vers l'Ouest pour les houles de direction Nord-Est (20°N).

-L'examen de l'état projeté (en présence des ouvrages) a fait ressortir le constat suivant :

Les courants induits par les houles de direction 340°N sont atténués de manière remarquable par les ouvrages.

En termes d'efficacité, la variante retenue est plus efficace vis-à-vis de la protection et d'atténuation de l'énergie de la houle et répond mieux à l'objectif de l'étude.

Conclusion

Toutes les variantes proposées précédemment aident dans la lutte contre le phénomène d'érosion, avec des principes différents l'une de l'autre, le choix de l'une ou de l'autre dépend des moyens du chef de l'ouvrage ainsi que de l'objectif final à rechercher. Si on prévoit encore le réaménagement de l'avant plage, tout en déplaçant les déchets accumulés à son niveau, en plus de l'élimination du rejet ou à défaut son réorientation pour l'éloigner le maximum de la côte.

L'aménagement de la plage de Sidi Ghiles est une étape importante dans l'évolution de cette commune, qui reste jusqu'alors une commune très modeste aux richesses non négligeables. Ainsi, il faut choisir un aménagement qui lui convient tout en préservant ses potentialités.

Chapitre V : Conclusion

L'étude sur l'érosion côtière de la plage Centre de Sidi Ghiles nous a permis de dégager les points suivant :

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

L'étude de la réfraction avec le logiciel Mike 21(DHI) a montré que le site d'étude est exposé aux houles du secteur Nord, Nord-Est et Nord-Ouest, ceci est expliqué par la configuration de son trait de côte qui est parallèle au Nord et qui reçoit l'énergie des houles de ces trois secteurs.

La plage Ouest de Sidi Ghiles est caractérisée par la présence de plusieurs types de matériaux variant du moyen vers le grossier. C'est une plage sableuse à gravillons et galets, présentant quelques végétations du type halophiles.

Le transit littoral est dirigé de l'Est vers l'Ouest.

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

Pour toute défense contre l'érosion, il est donc plus efficace de se tourner vers des ouvrages de défense souples qui travaillent en harmonie avec les dynamiques naturelles en jeu et ont ainsi un moindre impact sur le littoral, plutôt que d'utiliser des ouvrages de défense rigides qui tendent à réprimer les processus côtiers.

Cependant, la diversité des phénomènes à l'origine de l'érosion littoral conduit à une diversité de réponses techniques qui ne s'opposent pas forcément les unes aux autres, mais qui sont souvent complémentaires. En effet, pour améliorer l'efficacité des interventions de protection sur le site de Sidi Ghiles, on a opté pour des défenses de natures mixtes à savoir :

- Des brise-lames immergés en enrochement avec un apport artificiel de sable.
- Des brise-lames immergés en géotubes avec un apport artificiel de sable.
- Une série de brise-lames immergés en enrochement.
- Une méthode nommée « Ecoplage » Pour mieux apprécier les avantages et les inconvénients de chaque méthode, un tableau récapitulatif a été élaboré :

Variantes	Avantages	Inconvénients
Variante N°1	<ul style="list-style-type: none"> -Facilité d'exécution. -Intégration facile dans le paysage 	<ul style="list-style-type: none"> -Le géotextile peut être facilement endommagé volontairement ou involontairement. -Les conditions du vieillissement du géotextile ne sont pas convenablement connues.
Variante N°2	<ul style="list-style-type: none"> -l'esthétique de la plage est conservée. -Utilisation de l'eau drainée dans plusieurs domaines (Agriculture, aquaculture, piscine, consommation humaine. 	<ul style="list-style-type: none"> -Vu que c'est méthode récente, son impact sur l'écosystème marin n'est pas encore déterminé.
Variante N°3	<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

En termes d'efficacité, la variante retenue est plus efficace vis-à-vis de la protection et d'atténuation de l'énergie de la houle et répond mieux à l'objectif de l'étude.

Références Bibliographiques

- Asbai, 2013** :International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based
Impact of Acoustic Echo Cancellation on Speaker Verification in Mobile Environment.
- ANRH, 2011**: Rapport,Agence Naionale des Ressources Hydriques,Alger .
- ANRH, 1995-2004**: Rapport,Agence Naionale des Ressources Hydriques,Alger .
- Benoit et al.,2009** : Mesures in situ de la sédimentation au front des schorres aux abords du Mont Saint-Michel, Journées Nationales Génie Civil- Génie Côtier, Anglet, France.
- Chapon (1987)** : François Chapon, Le Peintre et le livre, Paris, Flammarion, 1987. Lee, 1990 Jane Lee, Derain, Oxford, Phaïdon Press Limited 1990; éd. française, 1990, Phaidon Press Limited. Cabanne.
- Chapon, 1978** : Travaux maritimes Editions Eyrolles, Paris 1977.
- Desmazes, 2005** : Morphodynamique d'une plage sableuse à barres, exemple du littoral girondin, plage du Truc Vert. Hauts niveaux marins et dynamiques géomorphologiques, Rennes, France.
- DHI (2014) a.MIKE 21**Spectral Wave Module Scientific Documentation. Denmark: Hørsholm, p.385.
- **DHI (2014) c. MIKE 21/3** Coupled Model FM. Scientific Documentation.
 - **DHI (2014). MIKE ZERO**: Creating 2D Bathymetries. Bathymetry Editor & MeshGenerator. Denmark: Hørsholm, p.114.
- Dolan et al., 1992** :Temporal analysis of shoreline recession and accretion, Journal of Coastal Research, vol. 7. n° 3, Fort Lauderdale, Florida, pp. 723-744.
- Faye, 2012** : Probation, Intermediate Sanctions, and Community-Based Corrections.
- Hudson (1958-1959)**: Design of quarry stone cover layer for rubble mound breakwaters. Research Report No. 2-2, Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Centre, Vicksburg, MS.
- Jego, 2003** : Evolution du trait de côte : du suivi des érosions côtières .
- LEM, 2004** Etude de l'établissement de la carte sédimentaire du littoral Algérien (Mission 3- 1^{ère} tranche), p8-13.
- LEM 2009** : Fréquences mensuelles de la houle au large par direction .
- LEM, 2012** : Détermination des caractéristiques des géotubes implantés .
- MOUHOUBI N, OUABEL Kh, 2012**. Etude d'une solution de protection pour la plage centre de Sidi Ghiles (Cherchell).
- ONM, 1995-2004** : Bilan météorologique pour la wilaya d'Alger.

Pylarczyk (2000) : Stability of low-crested and reef breakwaters. Coastal Engineering. Aout.

Raphaël CERTAIN, 2002 Morphodynamique d'une côte sableuse microtidale à barre: le Golf du Lion (LANGUEDOC-ROUSSILLON). *Thèse de doctorat. Université de PERPIGNAN.*

Robin, 2002 : La télédétection, des satellites aux systèmes d'information géographiques, Nathan Université, Paris, 319 p.

Ramoge, 2002 La défense des plages contre l'érosion. RAMOGE, p9-10.

SSMO 1963-1970 Tome II. Zone Algérienne.

Thieler et Danforth (1994) :): Historical shoreline mapping(I) : improving technique and reducing positioning errors.journal of Coastal research,10,(3),549-563.

Université de Liège, cours de géologie sédimentaire, 2017.

Site web:

« ANRH ». [Online]. Available: <http://www.semide.dz/FR/themes/structures/anrh.htm>.

Résumé

Située dans la partie occidentale du littoral de Tipasa, à environ 32 km du centre ville de Tipaza, le site de Sidi Ghiles, est marqué par un rivage qui présente des atouts considérables, notamment sur le plan paysager, urbanistique et touristique. Le rivage est le siège d'une érosion importante qui a entraîné un recul du trait de côte d'une vingtaine de mètres au cours des vingt dernières années. L'objectif de l'étude est de protéger le front côtier contre les agressions liées à la mer et au ruissèlement des eaux, pour les besoins de cette étude, il a été réalisé un levé topographique, un levé bathymétrique. L'analyse globale de la bathymétrie de la zone d'étude indique une morphologie irrégulière marquée par endroits par des resserrements des isobathes et des incurvations vers la côte. L'étude de la réfraction de la houle a été effectuée pour objet de définir les caractéristiques de la houle à la côte. Ces caractéristiques ont été utilisées pour le prédimensionnement des ouvrages maritimes. Trois 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. L'analyse des résultats de la réfraction a montré pour les houles pluri annuelles de direction Ouest (300°N) sont les plus réfractées mais arrivent avec des houles plus importantes que celles des autres directions, d'où le choix de cette houle pour le prédimensionnement des ouvrages de protection.

يقع في الجزء الغربي من ساحل تيبازة ، على بعد حوالي 32 كم من وسط مدينة تيبازة ، يتميز موقع سيدي غيلز بشاطئ يقدم مزايا كبيرة ، لا سيما من حيث المناظر الطبيعية وتخطيط المدن والسياحة. تآكل كبير تسبب في تراجع الساحل بحوالي عشرين متراً خلال العشرين سنة الماضية. الهدف من الدراسة هو حماية الجبهة الساحلية من الاعتداءات المرتبطة بالبحر وجران المياه ، ولأغراض هذه الدراسة ، تم إجراء مسح طبوغرافي ، ومسح أعماق. يشير قياس الأعماق لمنطقة الدراسة إلى عدم انتظام التشكل. تم تمييزها في بعض الأماكن عن طريق تضييق التساويات والانحناءات باتجاه الساحل ، وقد أجريت دراسة انكسار الانتفاخ لتحديد خصائص الانتفاخ على الساحل واستخدمت الخصائص للتنبؤ بهذا الوصف للهياكل البحرية. تم الإبقاء على ثلاثة اتجاهات ، مع الأخذ بعين الاعتبار جداول التردد حسب اتجاه الانتفاخات البحرية وكذلك حدوث هذه الانتفاخات فيما يتعلق بمنطقة الدراسة ، وأظهر تحليل نتائج الانكسار أن الانتفاخات متعددة السنوات من اتجاه الغرب (300 درجة شمالاً) هي الأكثر انكساراً ولكنها تصل مع انتفاخات أكبر من تلك الموجودة في الاتجاهات الأخرى ، وبالتالي اختيار هذا الانتفاخ للأبعاد المسبقة للهياكل الحماية.

Located in the western part of the coast of Tipasa, about 32 km from the city center of Tipaza, the site of Sidi Ghiles is marked by a shore which presents considerable advantages, particularly in terms of landscape, town planning and tourism. The site of significant erosion which has caused the coastline to retreat by around twenty meters over the past twenty years. The objective of the study is to protect the coastal front against attacks linked to the sea and to water runoff, for the purposes of this study, a topographic survey, a bathymetric survey was carried out. The bathymetry of the study area indicates an irregular morphology marked in places by constrictions of the isobaths and curvatures towards the coast. The study of the refraction of the swell was carried out to define the characteristics of the swell at the coast. These characteristics were used for the pre-dimensioning of the maritime structures. Three directions were retained, taking into account the frequency tables by direction of the offshore swells as well as the incidence of these swells in relation to the study area. The analysis of the refraction results showed that multi-year swells from the West direction (300 ° N) are the most refracted but arrive with larger swells than those from other directions, hence the choice of this swell for the pre-dimensioning of the protection structures.