

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**



**Département Hydraulique**  
**École Nationale Supérieure Des Sciences De La Mer Et De**  
**L'aménagement Du Littoral**  
Mémoire de projet de fin d'études  
pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Hydraulique

---

***Modélisation des processus hydrosédimentaires***  
***de la plage de « Sidi Fredj »***

---

Présenté et soutenue publiquement le 21/06/2017 Par Mrs :

**ABDELLAOUI Aimen**  
**BENBETKA Youcef**

Composition du jury :

<b>Président</b>	M. Abdelmalek BERMAD	Professeur	ENP
<b>Promoteur</b>	M. Khoudir MEZOUAR	Maitre de conférences A	ENSSMAL
<b>Co-promoteur</b>	M. M.A BOUKHEMACHA	Docteur	ENP
<b>Examineur</b>	M. Houseyn OTMANI	Maitre-assistant A	ENSSMAL
<b>Examinatrice</b>	Mme. Sonia MEHDID	Maitre-assistant A	ENSSMAL

**ENP 2017**



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**



**Département Hydraulique**  
**École Nationale Supérieure Des Sciences De La Mer Et De**  
**L'aménagement Du Littoral**  
Mémoire de projet de fin d'études  
pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Hydraulique

---

***Modélisation des processus hydrosédimentaires***  
***de la plage de « Sidi Fredj »***

---

Présenté et soutenu publiquement le 21/06/2017 Par Mrs :

**ABDELLAOUI Aimen**  
**BENBETKA Youcef**

Composition du jury :

<b>Président</b>	M. Abdelmalek BERMAD	Professeur	ENP
<b>Promoteur</b>	M. Khoudir MEZOUAR	Maitre de conférences A	ENSSMAL
<b>Co-promoteur</b>	M. M.A BOUKHEMACHA	Docteur	ENP
<b>Examineur</b>	M. Houseyn OTMANI	Maitre-assistant A	ENSSMAL
<b>Examinatrice</b>	Mme. Sonia MEHDID	Maitre-assistant A	ENSSMAL

**ENP 2017**

## ملخص

يعتبر الشريط الساحلي مكان ديناميكي ومتغير بصفة دائمة وذلك راجع إلى عوامل طبيعية وبشرية مختلفة.

من خلال هذا العمل، حاولنا محاكاة التفاعل بين مختلف القوى الهيدروديناميكية وشاطئ "سيدي فرج" وذلك من أجل التنبؤ باتجاه تحرك الرواسب لتحديد أماكن التراكم وأماكن التآكل على مستوى الشريط الساحلي المدروس، وكل هذا لهدف ضمان الحفاظ على أشكال تراكم الترسبات وتوفير الاستقرار للساحل.

**الكلمات الدالة:** الشريط الساحلي، القوى الهيدروديناميكية، الرواسب.

## Abstract

The coastline is a very dynamic and variable place that can change its morphology from one day to the next, and this is due to a combination of natural and anthropogenic factors.

During this work, we study by means of numerical simulation the interaction between the hydrodynamic actions and the beach of "Sidi Fredj" in order to predict the directions of sediments transport, and to identify the zones of erosion and deposition to ensure the maintenance of forms of sedimentary accumulation and to provide stability to the coastline.

**Key words:** coastline, hydrodynamic forcings, sediment transport.

## Résumé

Le littoral est un endroit très dynamique et variable qui peut changer sa morphologie d'un jour à l'autre, et cela est dû à une combinaison de facteurs naturel et anthropique.

Dans le but d'assurer le maintien de formes d'accumulation sédimentaire et offrir une stabilité au littoral, nous étudions par biais de simulation numérique l'interaction entre les forçages hydrodynamiques et la plage de « Sidi Fredj » afin de prédire les directions du transport sédimentaire et d'identifier les zones d'accumulation et les zones d'érosion sur le littoral étudié.

**Les mots clé :** littoral, forçages hydrodynamiques, transport sédimentaire.

## REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions Allah le tout puissant qui nous a donné le courage, la volonté et la patience pour accomplir ce travail.

Nous souhaitons tout d'abord exprimer notre plus profond remerciement à notre promoteur **Mr. Khoudir MEZOUAR**, pour ses encouragements, sa disponibilité malgré ses engagements et ainsi pour toute la confiance qu'il a su nous témoigner à travers l'autonomie qu'il nous a accordée durant la réalisation de ce travail de fin d'études, il a sans doute été un promoteur exemplaire.

On voudrait remercier également notre co-promoteur **Mr. M.A BOUKHEMACHA**, pour son soutien, ses remarques pertinentes, sa patience, sa rigueur et pour ses critiques et ses conseils constructifs tout au long de l'élaboration de ce travail.

On tient à présenter notre gratitude à notre professeur et notre parent à l'Ecole Polytechnique **Mr. Abdelmalek BERMAD**, qui nous a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire. Il peut être assuré de notre sincère respect et de notre profonde gratitude. On a beaucoup appris à ses côtés tant au niveau académique qu'au niveau humain, on lui adresse toute notre reconnaissance.

On remercie les membres de jury d'avoir pris le temps et la patience d'examiner le présent travail et pour toutes leurs remarques qui aideront à améliorer notre modeste contribution à la bibliothèque scientifique de l'Ecole Nationale Polytechnique.

Nous adressons également nos vifs remerciements à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

On remercie aussi toutes les personnes intéressées par notre travail, en espérant qu'elles puissent trouver dans notre rapport des explications utiles pour leurs propres travaux.

Enfin, un grand remerciement destiné aux enseignants et enseignantes, qui ont contribué à notre formation, depuis le cycle primaire jusqu'au cursus universitaire.

Le meilleur reste à venir

## DEDICACE

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ceux qui m'ont soutenu au long de mes études, qui m'ont toujours poussé vers le chemin du savoir, au plus beau cadeau qu'offre dieu dans ma vie,*

*les deux êtres les plus chères au monde :*

*Mes Chers parents : Belaïd et Zahia que Dieu le*

*Tout Puissant les garde en bonne santé.*

*A mes deux sœurs : Chaïmaa et Ikram.*

*A mon petit frère : Amdjad « Douidi ».*

*A toute ma famille.*

*A mon Binôme : Youcef.*

*A tous mes amis de l'EPSTO et de l'ENP vous êtes les meilleurs !*

*Aïmen*

*A celle que j'aime et que j'aimerai à jamais, celle qui a toujours été présente à mes côtés, celle qui a sacrifié sa vie pour la réussite de sa famille, cette femme qui m'aura élevé et fait de moi ce que je suis aujourd'hui. Celle à qui je dois tous mes succès dans la vie, ma mère.*

*A cet homme qui m'aura toujours tout donné, qui ne m'a jamais privé de rien et qui s'est toujours sacrifié pour sa famille. Je lui en serais éternellement reconnaissant, mon père.*

*A mes frères : Salaheddine, Abdelaziz et Younes qui ont toujours été là pour moi.*

*A mon binôme Aïmen et sa famille qui ont mis à notre disponibilité toutes les conditions favorables pour mener à bien ce travail.*

*A tous mes amis d'enfance, de l'EPSTO qui ont rendu les 2 années de prépa inoubliables, de l'école nationale polytechnique et tous mes proches et toute personne à qui je tiens.*

*Et à toutes les personnes qui m'ont soutenu de près ou de loin.*

*Youcef*

# **Table des matières**

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction..... 13

## **Chapitre 1 : Généralité sur le milieu littoral sableux**

1.1. Généralité sur le milieu littoral sableux.....	16
1.1.1. Système littoral.....	16
1.1.2. Morphologie littorale.....	19
1.1.3. Morphodynamique côtière : principe et concepts.....	20
1.1.4. Hydrodynamique littorale.....	22
1.1.4.1. La houle : .....	22
1.1.4.2. Processus en eau peu profond .....	24
1.1.4.3. Les courants.....	25
1.1.4.3.1. Le courant de retour.....	26
1.1.4.3.2. Le courant de dérive ou "longshore current".....	26
1.1.4.3.3. Le courant sagittal ou "rip current".....	27
1.1.4.3.4. Courants de marée.....	28
1.1.5. Transport sédimentaire.....	29
1.1.5.1. Les différents modes de transport.....	29
1.1.5.1.1. Transport par charriage.....	30
1.1.5.1.2. Transport par suspension.....	30
1.1.5.1.3. Transport par « Sheetflow ».....	30
1.1.5.2. Le rôle des courants moyens dans le transport sédimentaire.....	31
1.1.5.3. Le rôle de l'asymétrie des vagues dans le transport sédimentaire.....	32

## **Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude "Sidi Fredj"**

2.1. Situation géographique.....	34
2.1.1. Baie d'El Djamila .....	34
2.1.2. Site d'étude.....	34
2.2. Caractéristiques climatologiques .....	35
2.2.1. L'étude des vents .....	36
2.2.1.1. Données locales .....	36
2.3. Caractéristiques hydrologiques.....	36
2.4. Caractéristiques océanographiques .....	37

2.4.1. La houle .....	37
-----------------------	----

## **Chapitre 3 : Etude granulo-sédimentaire**

Introduction.....	40
3.1. Prélèvement et échantillonnage.....	41
3.1.1. Prélèvement dans la partie terrestre : .....	41
3.1.2. Prélèvement dans la partie marine : .....	41
3.2. Etude au laboratoire.....	42
3.2.1. Protocole d'analyse :.....	42
3.2.1.1. Préparation du matériel : .....	43
3.2.2. Méthode d'analyse : .....	43
3.2.3. Calcul des paramètres granulométriques.....	44
3.2.3.1. Les paramètres de position :.....	44
Les quartiles : .....	45
Les quantiles .....	45
3.2.3.2. Les indices granulométriques :.....	45
3.2.3.3. Indice central .....	45
3.2.3.4. Les indices de dispersion ou de classement .....	46
3.2.3.5. Les coefficients d'asymétrie .....	46
3.3. Résultats et interprétations :.....	47
3.3.1. Analyse de la fraction fine :.....	47
3.3.1.1. Partie terrestre .....	47
3.3.1.2. Partie marine .....	48
3.3.2. Analyse de la fraction grossière .....	49
3.3.2.1. Le grain moyen .....	49
3.3.2.1.1. Partie terrestre .....	49
3.3.2.1.2. Partie marine : .....	50
3.3.3. Les indices granulométriques :.....	51
3.3.3.1. Partie terrestre : .....	51
3.3.3.2. Partie marine : .....	52

## **Chapitre 4 : Etude bathymétrique et hydro-sédimentaire**

### **"Approche numérique"**

Introduction.....	56
4.1. Etude bathymétrique .....	56
4.1.1. Méthodologie suivie.....	56
4.1.1.1. Présentation du modèle Mike 21.....	56



4.1.1.2. <i>L'exploitation des cartes marines sous Mike 21</i> .....	58
4.2. <i>La modélisation de la réfraction de la houle avec le modèle SW</i> .....	59
4.3. <i>La modélisation des champs de courants générés par la houle au moyen du modèle HD</i> .....	63
4.4. <i>La modélisation du transport sédimentaire avec le modèle ST</i> .....	67
<i>Conclusion</i> .....	70
<i>Bibliographie</i> .....	74
<i>Annexes</i> .....	77

# *Liste des tableaux*

<i>Tableau 2 : Les valeurs adoptées de <math>M_z</math> .....</i>	<i>45</i>
<i>Tableau 3 : Les valeurs adoptées de <math>S_o</math> pour le classement.....</i>	<i>46</i>
<i>Tableau 4 : Les valeurs adoptées de <math>SK</math> pour l'asymétrie avec l'interprétation des résultats .....</i>	<i>46</i>
<i>Tableau 5 : Calcule des indices granulométriques et interprétation des résultats partie terrestre ....</i>	<i>51</i>
<i>Tableau 6 : Calcule des indices granulométrique et interprétation des résultats partie marine .....</i>	<i>52</i>
<i>Tableau 7 : Les coordonnées géographiques des stations de prélèvement "terre ferme" .....</i>	<i>77</i>
<i>Tableau 8 : les coordonnées géographiques des stations de prélèvement "partie marine" .....</i>	<i>77</i>
<i>Tableau 9 : Calcul des indices granulométriques( en mm) de la partie terrestre et interprétation des résultats.....</i>	<i>78</i>
<i>Tableau 10 : Calcul des indices granulométriques( en mm) de la partie marine et interprétation des résultats.....</i>	<i>79</i>
<i>Tableau 11 : % des pélites pour la partie terrestre .....</i>	<i>80</i>
<i>Tableau 12 : % des pélites pour la partie marine .....</i>	<i>81</i>
<i>Tableau 13 : Configuration d'un fichier de simulation SW .....</i>	<i>82</i>
<i>Tableau 14 : Configuration d'un fichier de simulation HD.....</i>	<i>84</i>

# Liste des figures

Figure 1 : Schéma d'un système littoral de plage sableuse. Les lignes noires représentent les frontières et les interfaces du système. Les flèches correspondent aux échanges d'énergie et de matière entre les systèmes.....	18
Figure 2 : Zonation des milieux littoraux .....	20
Figure 3 : Relation spatio-temporelle des systèmes morphodynamique côtiers .....	21
Figure 4 : Les grandeurs caractéristiques des vagues.....	23
Figure 5 : Les différents domaines de propagations des vagues .....	24
Figure 6 : Courant de retour .....	26
Figure 7 : Le courant de dérive ou "longshore current" .....	27
Figure 8 : Le courant sagittal et le transport sédimentaire .....	28
Figure 9 : Courant de marée .....	29
Figure 10 : Transport sédimentaire .....	30
Figure 11 : Les trois modes de transport sédimentaire (transport par charriage, transport par suspension, transport par Sheetflow) avec $U(z)$ vecteur de vitesse selon l'axe $z$ .....	31
Figure 12 : Situation géographique du site d'étude .....	34
Figure 13 : Localisation géographique du site d'étude .....	35
Figure 14 : Répartition annuelle des directions des vents en % .....	36
Figure 15 : Réseaux hydrographique du site d'étude « Oued Beni Messous » et « Oued Boukara » .....	37
Figure 16 : Roses récapitulatives de direction des houles au large du secteur ( $275^{\circ}$ - $55^{\circ}$ ). Source : K.N.M.I adopté d'après .....	38
Figure 17 : Positionnement des points de prélèvement dans la partie terrestre .....	41
Figure 18 : Positionnement des points de prélèvement dans la partie marine .....	42
Figure 19 : Photos du matériels utilisés lors de l'analyse .....	43
Figure 20 : Les différentes étapes de l'analyse granulométrique.....	44
Figure 21 : Carte de la répartition des pélites (%) dans la partie terrestre .....	47
Figure 22 : Carte de la répartition des pélites (%) dans la partie marine.....	48
Figure 23 : Carte de la répartition du grain moyen (mm) dans la partie aérienne .....	49
Figure 24 : Carte de la répartition du grain moyen (mm) dans la partie marine.....	50
Figure 25 : Relation entre l'indice de classement et le diamètre moyen des grains de la partie marine .....	53

<i>Figure 26 : Relation entre l'indice d'asymétrie et le diamètre moyen des grains (en mm).....</i>	<i>53</i>
<i>Figure 27 : Digitalisation des points de bathymétrie sous Mike 21.....</i>	<i>58</i>
<i>Figure 28 : Carte bathymétrique de Sidi Fredj.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure 31 : La série temporelle des hauteurs de la houle au large entre 01/01/2016 et 31/01/2016. .....</i>	<i>60</i>
<i>Figure 30 : Carte de réfraction de la houle pour N360° et T=10s.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure 31 : Carte de réfraction de la houle pour N45° et T=10s.....</i>	<i>62</i>
<i>Figure 32 : Carte de réfraction de la houle pour N315° et T=10s.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure 33 : Direction et vitesse des courants pour 45°.....</i>	<i>64</i>
<i>Figure 34 : Direction et vitesse des courants pour 360°.....</i>	<i>65</i>
<i>Figure 35 : Direction et vitesse des courants pour 315°.....</i>	<i>66</i>
<i>Figure 36 : Transport sédimentaire pour 360°.....</i>	<i>67</i>
<i>Figure 37 : Transport sédimentaire pour 315°.....</i>	<i>68</i>
<i>Figure 38 : Transport sédimentaire pour 45°.....</i>	<i>69</i>
<i>Figure 39 : Carte de réfraction de la houle pour 45° et T=6s.....</i>	<i>85</i>
<i>Figure 40 : Carte de réfraction de la houle pour 45° et T=8s.....</i>	<i>85</i>
<i>Figure 41 : Carte de réfraction de la houle pour 315° et T=8s.....</i>	<i>85</i>
<i>Figure 42 : Carte de réfraction de la houle pour 315 et T=6s.....</i>	<i>85</i>
<i>Figure 43 : Carte de réfraction de la houle pour 360° et T=8s.....</i>	<i>85</i>
<i>Figure 44 : Carte de réfraction de la houle pour 360° et T=6s.....</i>	<i>85</i>

## *Liste des abréviations*

**SW** : Spectral Waves Module

**HD**: Hydrodynamic Module

**ST**: Sand Transport Module

**ONM** : Office Nationale Météorologie

**O.N.S.M** : Office National de Signalisation Maritime

**HS** : Hauteur Significative

**Mz** : Diamètre moyen du grain

**So** : Indice de classement

**SK** : Indice d'Asymétrie

**Mo** : Mode Granulométrique

**SWAN**: Simulating Waves Nearshore

**DHI**: Danish Hydraulic Institut

**MESH** : Maillage

**FM** : Flow Model

**SIG** : Système d'Information Géographique

**GPS**: Global Positioning System

**WGS**: World Geodetic System

**UTM**: Universal Transverse Mercator

**SSMO**: Summary of Synoptic Meteorological Observation

**KNMI** : Koninklijk Nederlands Meteorologisch Institut

**ENP** : Ecole Nationale Polytechnique

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

# *Introduction*

## ***Introduction***

Le littoral est un système complexe qui demande non seulement de prendre en considération plusieurs variables naturelles et anthropiques mais de ne pas oublier les interactions entre ces derniers. Vue la forte urbanisation qu'a connue le littoral ces dernières années à cause de multiples activités économiques et touristiques, ainsi que les facteurs naturels qui ont un comportement aléatoire ce qui pose un problème dans la prédiction de leur interaction avec le littoral. Tout cela nous mène à se poser des questions sur l'influence de ce développement sur le linéaire côtier et les causes des dégâts que peut engendrer ce type d'action.

Celui-ci est appelé 'érosion côtière', c'est une des menaces considérablement répandues qui alarme de nombreux sites côtiers algériens, le long des littoraux sableux plus précisément et ses dégâts sont nombreux. (Ahfir & Meziane, 2016)

Se fondant sur les travaux de la Commission sur l'Environnement Côtier de l'Union Géographique Internationale, (BIRD, 1985) conjecture que le processus de recul du trait de côte affectait à l'époque plus de 70 % des plages de la planète, c'est alors que, (BEER, 1997) précise que l'évolution des littoraux sableux se caractérise par une tendance plutôt régressive.

La dynamique du littoral en particulier l'érosion côtière est devenue un phénomène naturel très important qui a fait l'objet de plusieurs études à cause de la brutalité des dégâts qu'il peut engendrer.

L'objectif principal de ce projet est de mettre en évidence les processus physiques à l'origine du transport sédimentaire sur des plages sableuses (Sidi Fredj) et les mécanismes de rétroactions entre les forçages hydrodynamiques et les entités morphologiques à l'aide des modèles de MIKE 21 qui est un logiciel de modélisation 2D des écoulements à surface libre

De manière à traiter ces problématiques, ce mémoire s'articule autour de quatre principaux chapitres :

Le chapitre 1 présente des généralités sur la morphologie des plages sableuses, l'érosion côtière, les forçages hydrodynamiques, et le transport sédimentaire.

Le chapitre 2 présente la zone d'étude et ces différentes caractéristiques géologiques, géomorphologiques, climatologiques, hydrologiques et océanographiques.

Le chapitre 3 se focalise sur l'étude granulo-sédimentaire, donnant l'approche d'analyse utilisée lors de cette étude, le traitement des données à travers des logiciels (Matlab et Excel), la représentation et interprétation des résultats en vue de décrire la situation de la zone d'étude.

Le chapitre 4 est consacré à l'étude de la modélisation bathymétrique et hydrodynamique des processus hydro-sédimentaire à l'aide du logiciel MIKE 21 avec une interprétation des résultats ;

La première partie de ce chapitre se focalise sur l'étude bathymétrique à l'aide des outils de MIKE 21.

La deuxième partie de ce chapitre traite la réfraction de la houle propagée du large vers la cote avec le model SW

La troisième partie traite la simulation des champs de courants générés par la houle et les vents à l'aide du model HD.

La quatrième partie est consacré à la simulation du transport sédimentaire sous l'effet de houle et de courants au moyen du model ST.



# *Chapitre 1*

## *Généralité sur le milieu littoral sableux*

## ***1.1. Généralité sur le milieu littoral sableux***

La côte (ou littoral) définit la bande de terre comprise entre une étendue maritime et le continent. Selon les échelles retenues, cette zone peut s'étendre de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres de part et d'autre de la limite terre-eau. Les caractéristiques physiques de cet espace géographique changent sous l'influence combinée des eaux marines (niveau de la mer, houle, marées et courants), du climat global et des évolutions naturelles (structure géologique) et anthropiques.

A l'interface entre mer et continent, les littoraux sableux représentent environ 34 % du linéaire côtier mondial (HARDISTY, 1994). Dans ces environnements, la tendance érosive naturelle est parfois accélérée par des actions anthropiques qui introduisent des déséquilibres dans les processus côtiers en limitant l'accrétion du volume de sable nécessaire au maintien des plages et à la stabilité du trait de côte (PASKOFF, 1998). La dynamique naturelle des sédiments fluviaux, principale source d'alimentation des côtes, est entravée par l'aménagement des cours d'eau (barrages, stabilisation des berges). Localement, des effets néfastes d'ouvrages de protection (digues, épis, ouvrages portuaires) sont parfois ressentis, perturbant la dynamique sédimentaire naturelle. Enfin, l'extraction de granulats marins peut avoir des conséquences préjudiciables sur la stabilité du trait de côte en aggravant le déficit sédimentaire de la zone côtière.

L'érosion côtière est une grave menace pour de nombreux sites côtiers algériens, en particulier le long des littoraux sableux. Ces derniers qui constituent un milieu très mobile, sont au centre de cette étude. Ils résultent d'une accumulation de grains provenant de l'érosion des reliefs continentaux et transportés jusqu'à la côte sous l'action des fleuves. Ils transitent ensuite le long du rivage sous l'action de la houle et des courants qu'elle induit. Si ces grains sont suffisamment nombreux, les vagues viennent les déposer au-dessus du niveau de la mer, où ils sont repris par le vent, formant ainsi les plages. Si les apports ne sont pas suffisants, aucune plage ne peut être édifiée, la mer gagne alors du terrain en érodant la côte.

### ***1.1.1. Système littoral***

Un système littoral (*Figure 1*) est un ensemble d'éléments en interaction dans le temps et dans l'espace, ce qui rend la tâche de comprendre leur comportement très complexe. Pour décrire ce type de système, il est possible de combiner des approches analytiques classiques avec une modélisation numérique (2D et 3D). Avant de présenter les constituants communs à tout système littoral, il est toutefois important d'expliquer « pourquoi ces systèmes sont complexes ». (MEZOUAR, 2009; DESMAZES, 2004)

- Les systèmes littoraux 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 diverse nature.
- Ces interactions sont généralement non-linéaires car elles ne peuvent pas être expliquées par une simple relation de proportionnalité.

Afin de décrire la composition d'un système littoral complexe, il est nécessaire de distinguer entre caractéristiques spatiales et temporelles. La structure d'un littoral se caractérise spatialement :

- Une limite ou frontière ;
- Des éléments ou composants (sables, roches, falaise, ...etc.) ;
- Des réservoirs, dans lesquelles les éléments peuvent être rassemblés et stockés ;
- Un réseau de communication, qui prend des formes variées et permet des échanges d'éléments et d'énergie (vagues, vents, ...etc.).

Le fonctionnement d'un système littoral est contrôlé par des phénomènes dépendant du temps, on distingue :

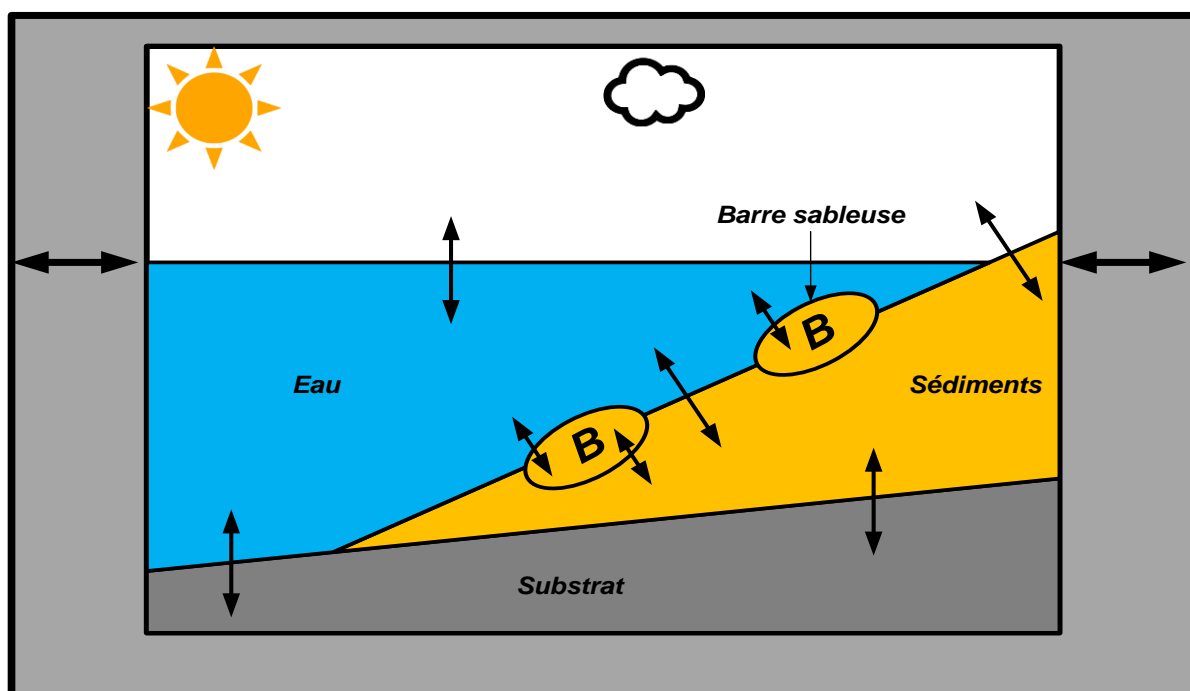
- Les flux d'énergie ou d'éléments qui circulent entre les réservoirs par les réseaux de communication. Ils représentent une quantité par unité de temps ; parfois, des « vannes » peuvent contrôler les flux.
- Les « délais » résultent des vitesses de circulation entre les réservoirs. Leur importance n'est pas à négliger. Dans certains systèmes complexes, les délais peuvent induire des phénomènes d'inhibition ou d'amplification.
- Enfin, les boucles de rétroaction qui jouent un rôle déterminant dans le fonctionnement des systèmes en combinant les effets des réservoirs, des flux, des vannes et des délais. Elles permettent une dynamique de croissance et d'évolution, ou bien au contraire un effet de stabilité et de régulation.

Les environnements littoraux forment une zone géographique complexe, à la limite du continent, de l'océan et de l'atmosphère. A l'intérieur de ce complexe système, des systèmes (de rangs inférieurs) et d'extension plus limitée peuvent être distingués. Les frontières de tous ces domaines sont bien

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

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

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



**Figure 1 :** Schéma d'un système littoral de plage sableuse. Les lignes noires représentent les frontières et les interfaces du système. Les flèches correspondent aux échanges d'énergie et de matière entre les systèmes. (DESMAZES, 2004)

### **1.1.2. Morphologie littorale**

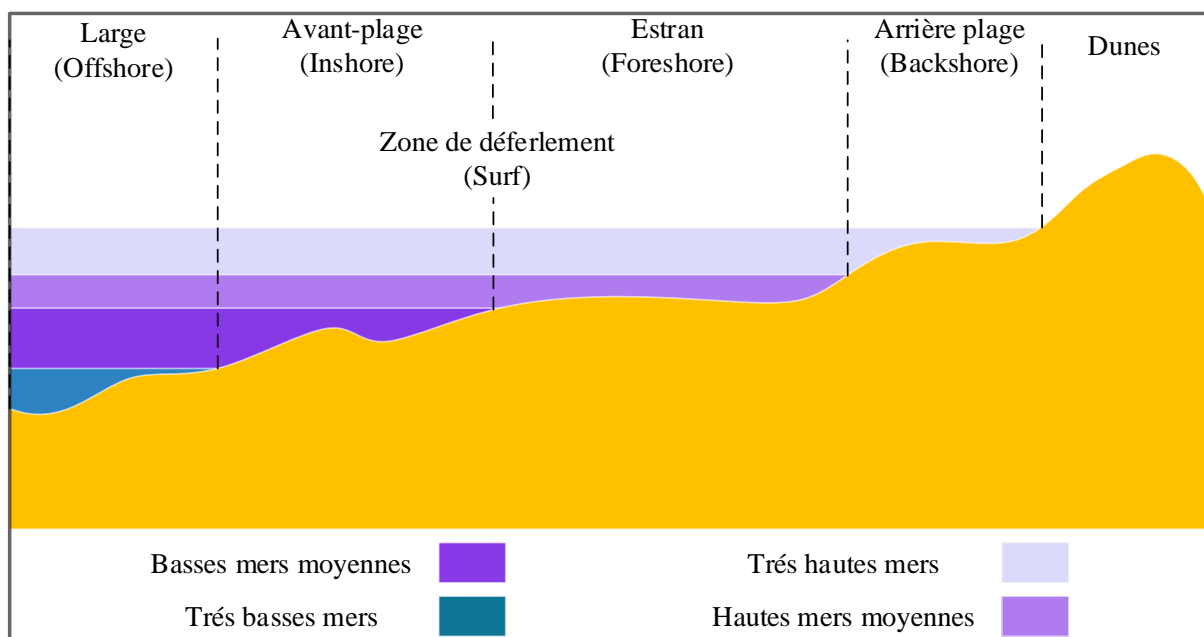
D'après la *Figure 2* on peut distinguer entre les différentes zones des milieux littoraux qui sont :

**L'avant-côte** (ou "plage sous-marine", "avant-plage" ou encore "offshore") s'étend depuis le niveau des basses mers jusqu'à la plate-forme continentale. En réponse aux variations subies par l'estran, l'avant-côte est mobile et ses limites varient temporellement et spatialement selon les apports en sédiments et les conditions morphodynamique. Lorsque la plage est en érosion, les sédiments sont entraînés vers le bas de plage et s'accumulent temporairement au niveau de l'avant-plage. Inversement, lorsque les houles redeviennent constructrices, les sables stockés sur l'avant-côte sont repris, et remontés sur la basse et moyenne plage souvent sous forme de rides péri-littorales qui viennent progressivement alimenter la plage qui est alors en situation d'engraissement. La pente de l'avant-côte est généralement faible, (c'est une caractéristique des plages sableuses algériennes) inférieure à celle du bas de plage. Une grande part de l'énergie des houles est consommée sur ces petits fonds, ce qui réduit d'autant l'attaque de l'estran ou de la dune. Une côte recule donc théoriquement d'autant moins vite que son avant-côte est large et en pente douce. Les avant-côtes rocheuses à écueils jouent également un rôle de barrière, d'une part en provoquant un premier déferlement dans les côtes très battues, d'autre part en freinant les exportations de sable. (MEZOUAR, 2009)

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

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

longitudinaux par la dérive littorale) et retrouvé son équilibre. Le plus souvent, différentes générations de dunes coexistent, les plus récentes chevauchant les plus anciennes.



**Figure 2 :** Zonation des milieux littoraux (BEAUCHAMP, 2005)

### 1.1.3. Morphodynamique côtière : principe et concepts

La morphodynamique des plages est l'évolution spatio-temporelle de la morphologie des plages sous l'effet du forçage hydrodynamique. Par l'intermédiaire du transport sédimentaire la plage évolue sous l'action de la mer, en retour modifiée par l'évolution du fond marin.

Le milieu côtier est contrôlé par trois facteurs environnementaux (AHFIR & MEZIANE, 2016):

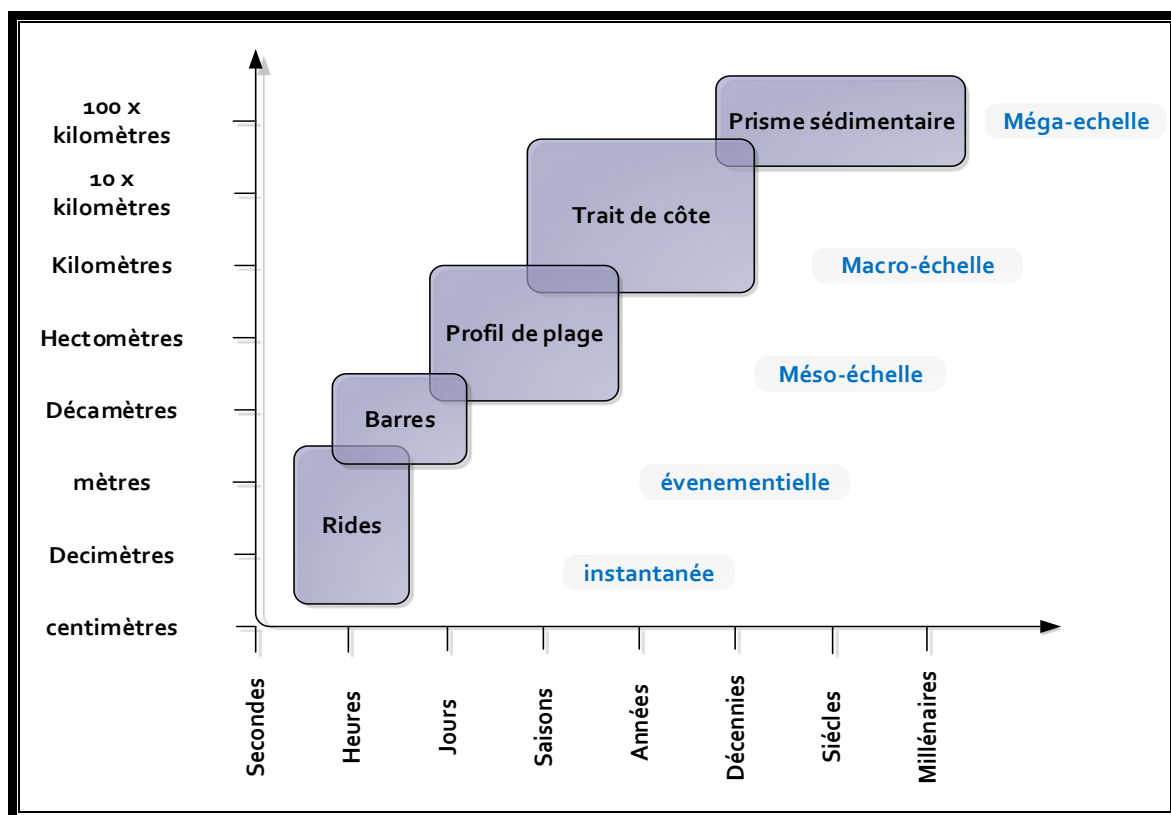
- Les volumes sédimentaires apportés par les fleuves, les bassins versants.
- La géologie régionale qui définit l'espace disponible pour l'évolution du littoral.
- Les forçages externes qui correspondent aux processus énergétiques (vagues, marées, vent...) responsables des changements morphologiques.

Les littoraux sont des environnements particulièrement dynamiques soumis à de nombreux forçages d'origine tectonique, eustatique ou encore hydrodynamique agissant à des échelles de temps différentes. Ainsi, à l'échelle des temps géologiques, l'évolution du littoral est principalement contrôlée par des facteurs tectoniques et eustatiques. A l'échelle des temps historiques, les environnements côtiers subissent l'influence de la climatologie locale (fréquence des tempêtes, vents dominants) et des

processus côtiers de haute fréquence (marée, courants, vagues et turbulence). L'étude de l'évolution morphodynamique des littoraux consiste à relier leur développement morphologique et les forçages aux différentes échelles de temps (WRIGHT & SHORT, 1977).

En fonction de l'échelle de temps à laquelle il est étudié, le comportement morphodynamique d'un système côtier peut être très variable. A chaque échelle de temps est associée une échelle spatiale fonction de l'amplitude volumique des changements morphologiques mis en jeu. Dans le cas d'un système côtier, l'existence d'une relation linéaire entre l'amplitude des évolutions spatiales du système et l'échelle temporelle associée peut être supposée (DE VRIEND, 1991). En fonction de l'échelle de temps à laquelle il est étudié, le comportement morphodynamique d'un système côtier peut être très variable. A chaque échelle de temps est associée une échelle spatiale fonction de l'amplitude volumique des changements morphologiques mis en jeu. Dans le cas d'un système côtier, l'existence d'une relation linéaire entre l'amplitude des évolutions spatiales du système et l'échelle temporelle associée peut être supposée (DE VRIEND, 1991).

Il découle de cette relation une hiérarchisation spatiotemporelle (KROON, 1994) des processus dynamiques qui contrôlent l'évolution de la zone côtière (Figure 3).



**Figure 3 :** Relation spatio-temporelle des systèmes morphodynamique côtiers. D'après la synthèse de **LEVOY (2000)**.

Selon la nomenclature de (DE VRIEND, 1991), on peut en particulier distinguer les échelles suivantes :

- La micro-échelle qui concerne les processus physiques, constitutifs de la houle, des courants ou du transport sédimentaire, et agissant à une échelle temporelle plus courte que celle du comportement morphodynamique correspondant.
- La méso-échelle qui concerne le comportement morphodynamique dû à l'interaction entre les processus physiques et la topographie. Elle permet de dater, entre autre, la propagation de corps sédimentaires ou encore la migration des barres.
- La macro-échelle qui concerne les tendances ayant lieu à une échelle de temps plus longue que celle des comportements morphodynamique primaires. Ces tendances peuvent être dues aux variations saisonnières de comportement ou à l'évolution progressive des forçages extérieurs (évolution du marnage, élévation du niveau moyen de la mer).

La problématique centrale de la morphodynamique des plages reste le couplage entre le forçage hydrodynamique des vagues et la réponse morphologique des plages.

#### ***1.1.4. Hydrodynamique littorale***

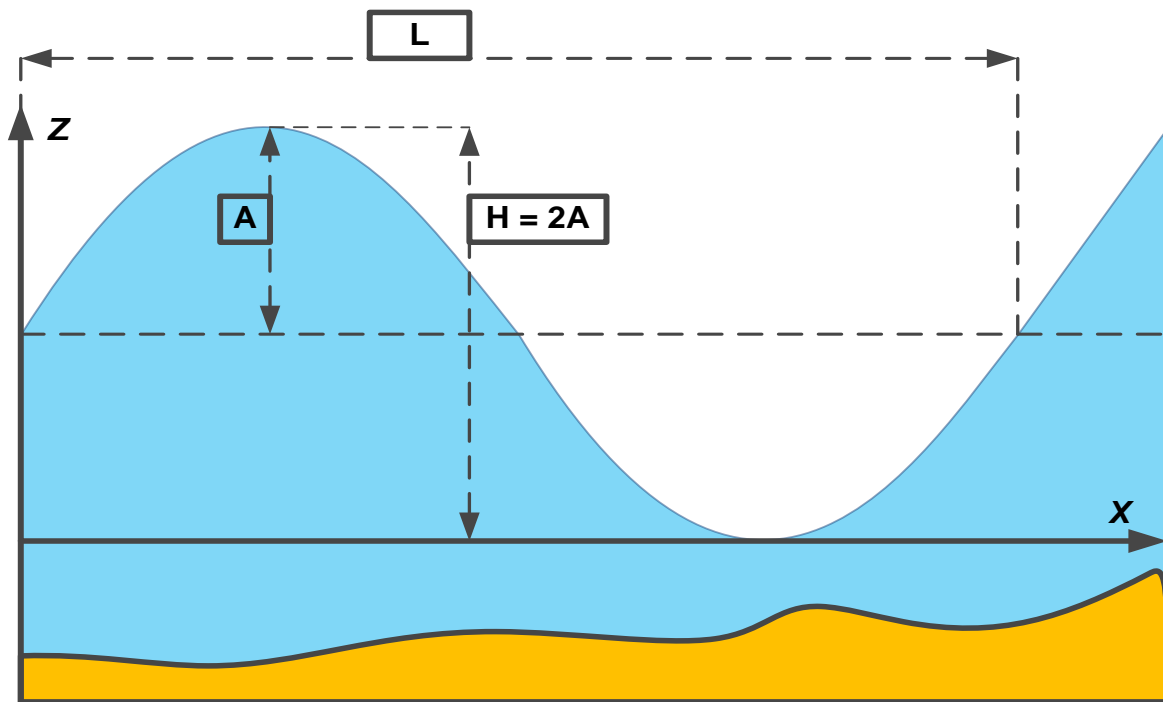
Les zones littorales sont des environnements dynamiques et complexes où se produisent de nombreuses interactions entre les agents responsables des différentes circulations hydrodynamiques. Ces derniers vont être brièvement résumés par la suite afin de nous donner les compréhensions de base.

##### ***1.1.4.1. La houle :***

La houle est un mouvement ondulatoire de la surface de la mer qui est formé par un champ de vent éloigné de la zone d'observation (vent lointain). C'est donc un cas particulier de vague non déferlante. La houle est une série de vagues qui se propagent le long de l'interface entre l'eau et l'air, et qui sont caractérisées par les grandeurs suivantes (*Figure 4*).

- **H : Hauteur** entre creux et crête ; double de l'**amplitude** de l'onde A.
- **L : Longueur d'onde** : distance entre deux crêtes successifs,
- **Nombre d'onde**,  $k (= 2\pi / L)$ .
- **Cambrure**,  $H/L$ .
- **Période**, T.
- **Fréquence**,  $f (= 1 / T)$ .
- **Pulsation**,  $\omega (= 2\pi / T)$ .





*Figure 4 : Les grandeurs caractéristiques des vagues.*

La houle est un forçage primordial, car sa transformation à l'approche du rivage libère une grande quantité d'énergie. Près de la surface de la mer, la houle est une onde qui provoque la rotation des particules d'eau lors de son passage. Vers le fond, ce mouvement devient elliptique, puis se transforme en courant alternatif susceptible de déplacer les sédiments. Les différentes phases d'évolution des vagues permettent de distinguer trois zones du littoral, qui forment autant de sous-systèmes définis par l'approche océanographique (ou hydrodynamique). Du large vers la côte, d'après la *Figure 5* on trouve :

- **Zone de génération des vagues** par le vent : Au large, en eau profonde ( $H > 2L$ ), les vagues se propagent sans ressentir l'influence du fond et gardent une symétrie d'amplitude crête-creux.
- **Zone de levée** : à l'approche de la plage la profondeur d'eau diminue, les vagues sont déformées par le fond et développent une asymétrie de forme avec de hautes crêtes et de larges creux.
- **Zone de déferlement**, Lorsque les vagues deviennent trop pincées, les crêtes (moins ralenties par les frottements du fond) se propagent plus rapidement que les creux et les vagues se brisent puis déferlent. Nous pouvons également classer la zone de déferlement en trois zones : premièrement, la zone de transition entre les vagues non-déferlantes et déferlantes ; deuxièmement, c'est l'inner zone où les vagues déferlent ; troisièmement, la zone de swash, c'est la partie entre les niveaux de la marée basse et de la marée haute.

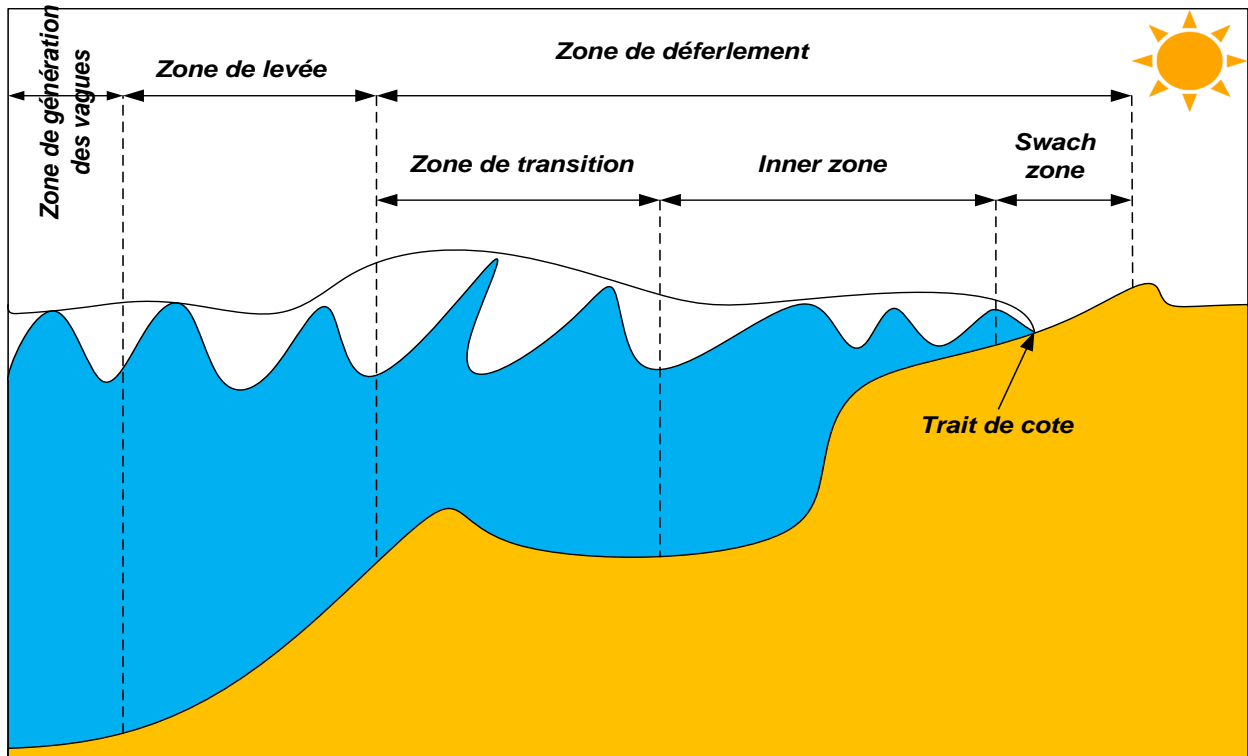


Figure 5 : Les différents domaines de propagations des vagues (TOURDIAT & CHEVALIER, 1998)

#### 1.1.4.2. Processus en eau peu profond

Si la houle pénètre dans les eaux peu profondes, ses paramètres changent. Les phénomènes physiques tels que la réflexion, la réfraction, la diffraction, l'effet d'eaux peu profondes, le déferlement, le frottement du fond, et la perméabilité sont appelés les processus en eaux peu profondes. Les paramètres de longueur  $L$ , de direction  $\theta$ , et de hauteur  $H$  de la houle incidente sont modifiés lors de sa propagation vers la côte

En effet, tant que la profondeur est grande, la houle se propage sans déformation majeure. Cependant, à l'approche du rivage ou contre des ouvrages immergés ou émergés, la propagation de la houle se trouve modifiée. Dans ce qui suit, nous présentons brièvement les phénomènes cités précédemment. (ZAKI; YOUNES; RAAD; YOUNES, 2003) (COURTAUD, 2000)

- **Réflexion**

La réflexion se produit quand deux houles en sens inverse se rencontrent ou si la houle rencontre un obstacle vertical tels que falaise, cordons littoraux, jetée, et digue, etc. .. La réflexion induit le « clapotis » qui est défini comme étant le mouvement produit par la réflexion de la houle frappant

perpendiculairement un rivage. La période du clapotis est supposée identique à la période des houles incidente et réfléchie.

- **Réfraction**

Quand la houle pénètre dans des fonds à profondeur variable, certaines caractéristiques (amplitude et célérité) de la houle sont modifiées à cause de la variation de la profondeur ; la période de la houle est conservée . L'interaction entre le fluide et le fond marin provoque le phénomène de réfraction de la houle. Elle est prédominante dans la zone de shoaling. Les lignes de crêtes de la houle sont parallèles entre elles. Près de la côte, la diminution de la profondeur conduit ces lignes à devenir parallèles aux isobathes (Blanc, 1971)

- **Diffraction**

Lorsqu'une houle arrive près d'obstacles émergés tels que des avancées rocheuses, des épis, des digues, des brise-lames, ou des jetées, etc. Les lignes de crêtes ont tendance à s'incurver en contournant ces obstacles. Les houles s'atténuent rapidement dans les zones d'abri à l'arrière de ces ouvrages. L'amplitude des vagues peut varier considérablement par rapport à la période et la longueur de la vague. Ce phénomène est connu sous le nom de diffraction de la houle.

- **Déferlement**

Le déferlement se produit lorsque la vitesse de propagation des vagues décroît à cause de la diminution de la profondeur de l'eau, et pour compenser cette diminution, la hauteur des vagues augmente atteignent une cambrure limite et le profil des vagues devient instable ce qui provoque une déformation rapide du profil de l'onde associé à la production de turbulence.

#### ***1.1.4.3. Les courants***

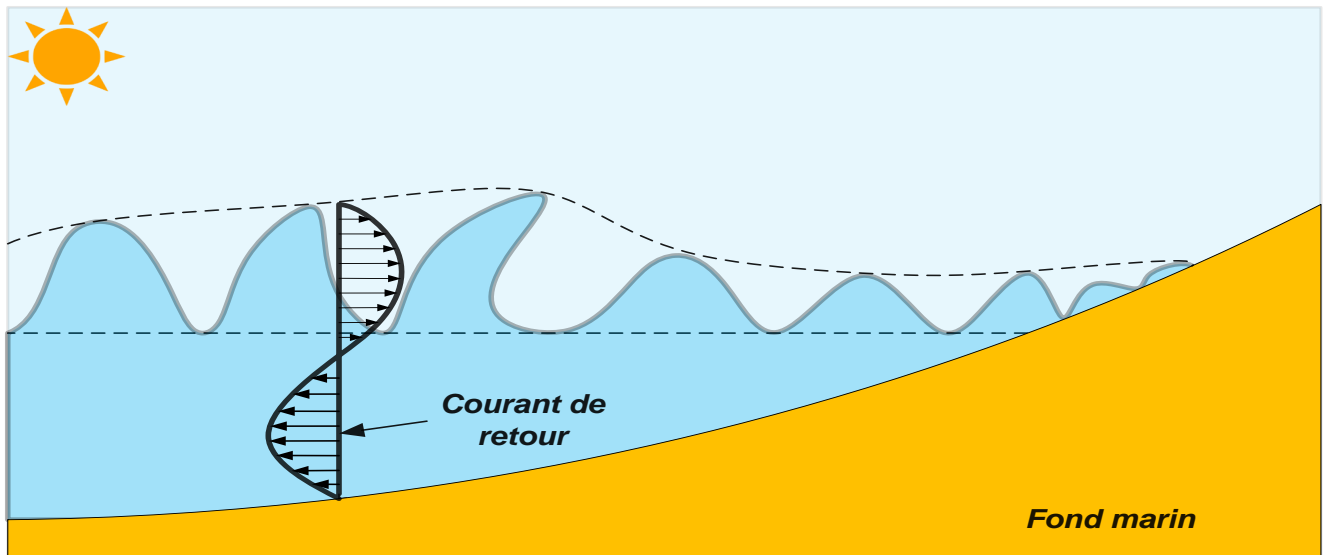
Selon (CASTELLE, 2004), les courants moyens sont les mouvements des masses dont les variations sont plus lentes que celles associées aux ondes infragravitaires et aux instabilités de courants.

Les principaux courants moyens induits par la houle peuvent être divisée de la manière suivante :

- Le courant de retour
- Le courant de dérive ou courant "longshore"
- Le courant sagittal ou "rip current"

#### **1.1.4.3.1. Le courant de retour**

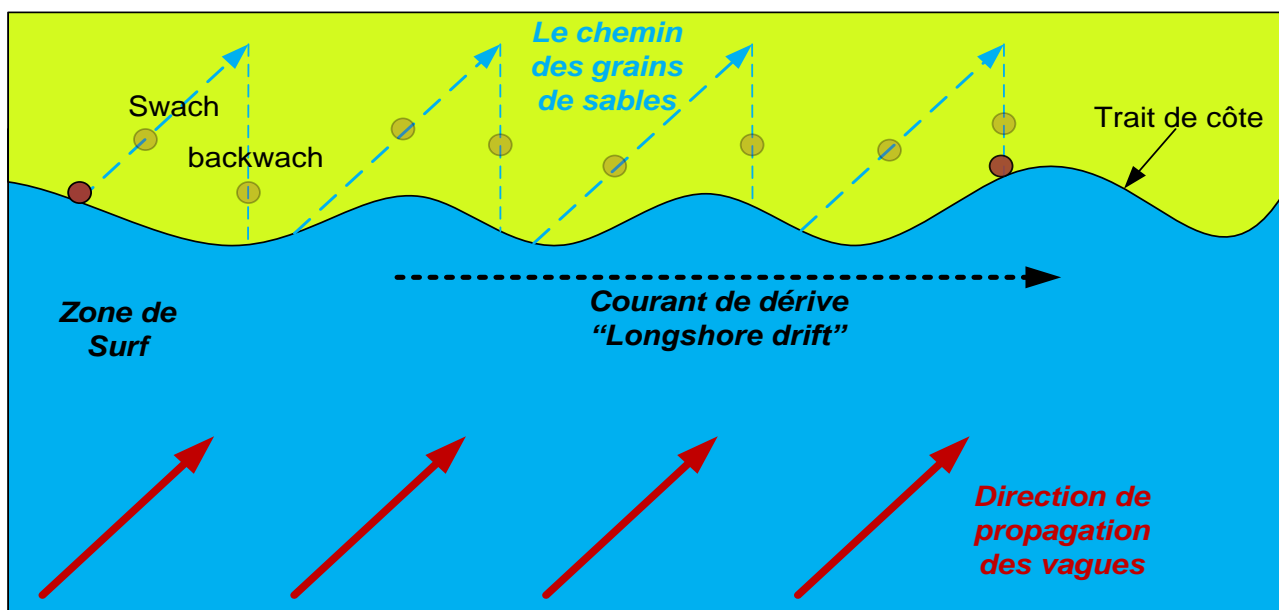
Le courant de retour, aussi appelé courant de compensation, est présent sur toutes les cotes exposées aux houles. En milieu côtier la houle transporte de l'eau dans sa direction de propagation. Cela est particulièrement vrai dans la zone de déferlement. Le courant de retour permet donc de compenser cet apport de masse en transportant les masses d'eau vers le large. La Figure 6 montre une schématisation du courant de retour sur une plage homogène. (CASTELLE, 2004)



**Figure 6 : Courant de retour (Castelle, 2004)**

#### **1.1.4.3.2. Le courant de dérive ou "longshore current"**

Dans le cas d'une plage plane et homogène dans la direction parallèle au trait de côte, les houles obliques vont générer un courant parallèle à la plage en déferlant. Ce courant est appelé courant de dérive, et son intensité est maximale derrière le point de déferlement. La Figure 7 montre une schématisation de ce courant. (LEYVA, 2005)



**Figure 7 :** Le courant de dérive ou "longshore current" (LEYVA, 2005)

#### **1.1.4.3.3. Le courant sagittal ou "rip current"**

Les courants sagittales sont des courants violents, intenses et étroits dirigés vers le large, qui sont observés sur de nombreuses plages (Figure 8). Ils ont longtemps été d'intérêt scientifique et sociétal principalement en raison du danger côtier qu'ils représentent. Leur flux est souvent soutenu sur des périodes temporelles suffisantes (heures-jours) et les vitesses moyennes (souvent N 0,5 m/s) permettent le transport de gros volumes de sédiments en mer. Cela peut accentuer l'érosion localisée des rives et des dunes en menaçant l'infrastructure du littoral et les communautés côtières. (Cook, 1970) (Inman, et al., 1971)

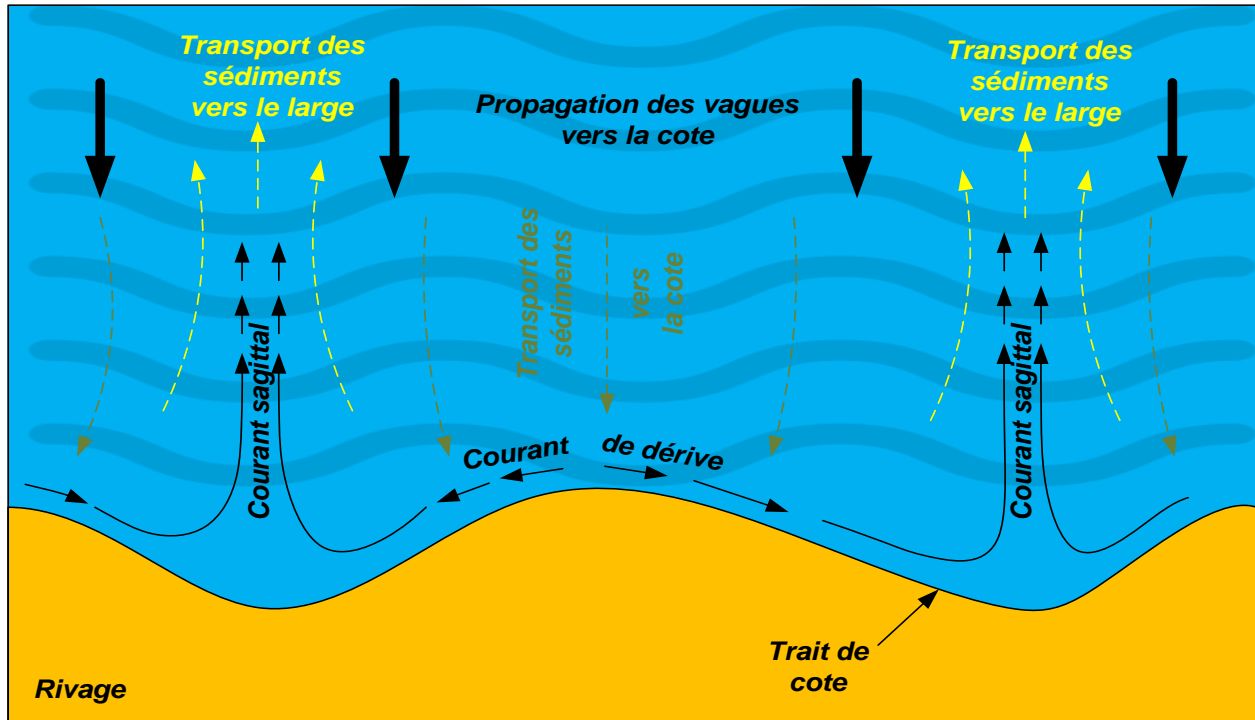
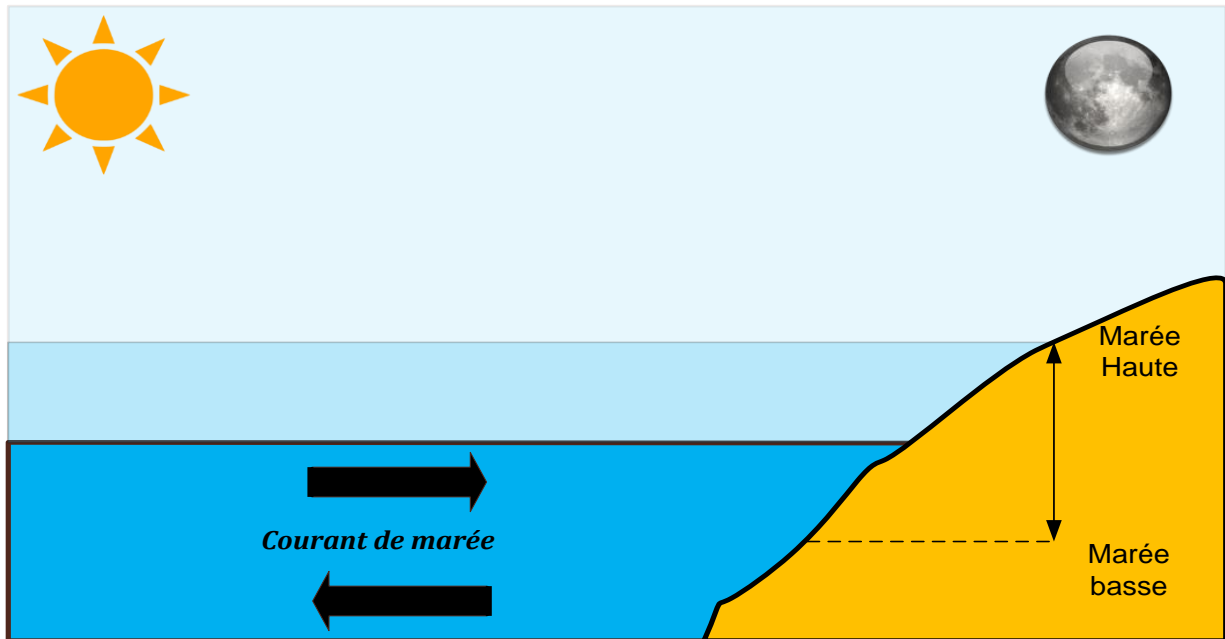


Figure 8 : Le courant sagittal et le transport sédimentaire (MEZOUAR, 2009)

#### 1.1.4.3.4. Courants de marée

La marée provoque des oscillations au niveau des mers et des océans accompagnés de courants fondamentaux, qui sont au faite une sorte de mouvements horizontaux de masses d'eaux. Sa force et sa direction évoluent avec le moment de la marée. La vitesse maximale du courant de marée en un lieu donné dépend à la fois du marnage de la marée (hauteur de marée) et de la configuration des fonds : ce courant peut atteindre parfois 12 nœuds, ce qui résulte une forte influence sur le relief sous-marin (Figure 9). (Ahfir & Meziane, 2016).



*Figure 9 : Courant de marée (AHFIR & MEZIANE, 2016)*

### **1.1.5. Transport sédimentaire**

La plupart des sédiments (plus de 90%) sont transportés en suspension, le reste est transporté près du fond par charriage. En raison des caractéristiques directionnelles, le transport des sédiments côtiers peut être divisé en transport transversal des sédiments (perpendiculaire à la côte) et dérive littorale des sédiments (parallèle à la côte). Le transport transversal des sédiments induit des changements morphologiques à court terme, par exemple en cas de tempête. La dérive littorale des sédiments provoque des changements morphologiques à long terme. Elle se produit dans les zones étroites des côtes. La direction et l'amplitude du transport des sables sont principalement déterminées par la hauteur, la direction et la période de la houle. En principe, sous l'effet de la houle incidente, les sédiments se voient transportés du large vers la côte et sous celui de la houle réfléchi, les sédiments sont déplacés dans la direction opposée. (VAN RIJN, 1993)

#### **1.1.5.1. Les différents modes de transport**

Le taux de transport solide total est calculé de la manière suivante (MEZOUAR, 2009) (*Figure 10*):

$$Q_t = Q_c + Q_s \quad \dots\dots (1)$$

$Q_t$  = Le taux de transport total (en m<sup>3</sup>/s/m)

$Q_c$  = Le transport par charriage (en m<sup>3</sup>/s/m)

$Q_s$  = Le transport en suspension (en m<sup>3</sup>/s/m)

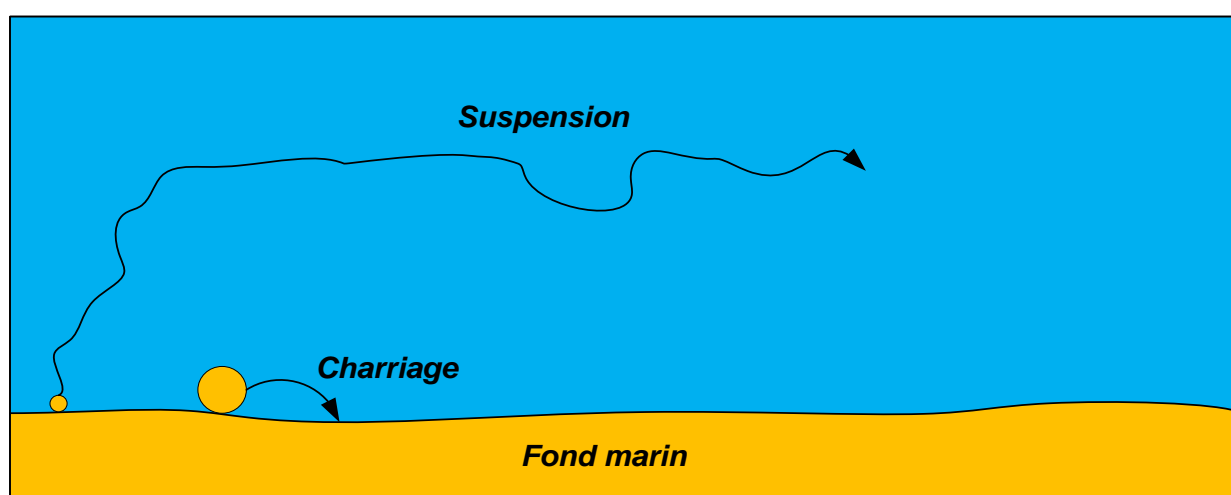
Le taux de transport représente le volume de matériaux transportés par unité de temps et par unité de longueur. Il s'exprime en  $m^3/s$  et peut être interprète comme le flux des concentrations, intègre sur la hauteur d'eau.

#### ***1.1.5.1.1. Transport par charriage***

Les grains de sable peuvent être transportés par le courant en glissant sur le fond, en roulant ou encore en faisant des petits « sauts ». Dans ce mode de transport, les sédiments sont en contact avec le fond (sauf pour de très courtes durées pendant le « saut »). Sur les plages sableuses, ce mode est généralement favorisé par la présence de conditions peu énergétiques et/ou de sédiments grossiers.

#### ***1.1.5.1.2. Transport par suspension***

Les sédiments peuvent être arrachés du fond (par turbulence ou par la présence d'un courant suffisamment intense), les grains de sable sont advectés par l'écoulement et sont transportés dans la colonne d'eau. Lors d'un tel transport, le sédiment ne touche plus le fond pendant de longues périodes. Ce mode est favorisé par la présence de conditions énergétiques et de sédiments fins.



***Figure 10 : Transport sédimentaire (Degoutte, 2012)***

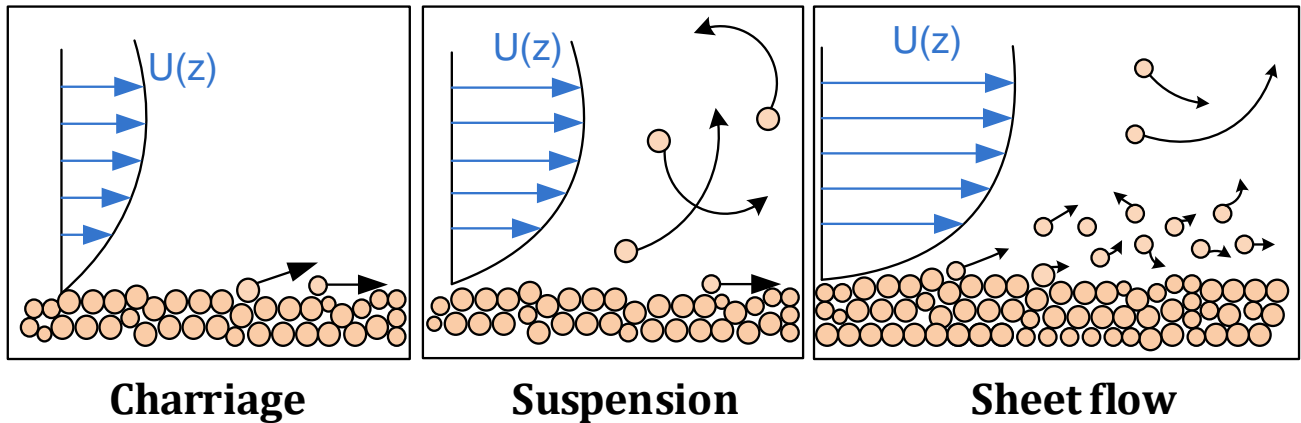
Le transport en suspension est possible lorsque la vitesse d'initiation du mouvement des sédiments est dépassée et surtout quand les forces verticales dirigées vers la surface engendrée par la turbulence et les vortex, sont supérieures à la vitesse de chute des particules. C'est pourquoi la fraction fine est facilement mobilisable mais nécessite un milieu quasiment immobile pour pouvoir se déposer.

#### ***1.1.5.1.3. Transport par « Sheetflow ».***

On observe ce mode de transport en présence de courants intenses et de sédiments relativement grossiers. Les sédiments au fond sont soumis à de très fortes contraintes et se déplacent à l'intérieure



d'une couche très fine (de l'ordre de quelques diamètres de sable) de manière désorganisée. Les modes de transport sédimentaire sont représentés dans la *Figure 11*.



**Figure 11** : Les trois modes de transport sédimentaire (transport par charriage, transport par suspension, transport par Sheetflow) avec  $U(z)$  vecteur de vitesse selon l'axe  $z$ . d'après (DEIGAARD, 1992)

#### 1.1.5.2. Le rôle des courants moyens dans le transport sédimentaire

Les différents courants décrits précédemment contrôlent une grande partie du transport sédimentaire. Lorsque l'incidence de la houle est oblique, les vagues induisent un courant de dérive. Ce courant contribue donc au transit sédimentaire en déplaçant des volumes importants de sédiments d'un endroit à un autre le long de la cote, que l'on appelle « dérive littorale ». Cette dérive littorale contrôle ainsi les apports sédimentaires le long de la cote. Le courant de retour peut également induire un intense transport sédimentaire vers le large en particulier pendant les épisodes de tempête. Il peut ainsi exposer la plage à l'érosion et provoquer des mouvements importants des barres sédimentaires perpendiculairement à la cote. Les courants sagittaux peuvent transporter une grande quantité de sédiments loin au large. La zone où ce courant agit étant étroite. Le courant sagittal contribue à couper les barres sédimentaires et donc aux instabilités des bancs de sable le long de la cote. De plus, les courants sagittaux sont généralement associés à des cellules de circulation des courants moyens. Un tel système de courants va alors contribuer à des échanges sédimentaires importants entre la zone de déferlement et la plage sous-marine (THAN, 2015).

### ***1.1.5.3. Le rôle de l'asymétrie des vagues dans le transport sédimentaire***

Les vitesses orbitales associées aux vagues peuvent aussi intervenir dans le transport sédimentaire, par les deux mécanismes suivants. Tout d'abord, la vitesse orbitale des vagues favorise la mise en suspension des sédiments dans la colonne d'eau. Ces sédiments sont ensuite transportés par les courants moyens. Les contraintes de cisaillement au fond sont bien plus importantes en présence d'un courant moyen et de mouvements orbitaux qu'en présence d'un courant moyen seul. La principale conséquence de la présence de ces vitesses orbitales est la formation d'un transport sédimentaire net vers le rivage. En effet, en arrivant en eau peu profonde la houle devient asymétrique. Ainsi hors de la zone de déferlement, il se forme une vitesse nette au fond dans la direction de la cote qui peut induire un transport sédimentaire important vers la plage. C'est ce mode de transport qui est responsable de l'état d'accrétion des plages pendant les épisodes des vagues peu énergétiques. Par contre, dans la zone de déferlement, le courant de retour induit souvent un transport sédimentaire vers le large plus intense que celui induit par l'asymétrie des vagues. (THAN, 2015)

# *Chapitre 2*

*Présentation de la zone d'étude*

*« Sidi Fredj »*

## 2.1. Situation géographique

### 2.1.1. Baie d'El Djamilia

La baie d'El Djamilia est une baie se situe à environ une vingtaine de kilomètre à l'Ouest de la wilaya d'Alger, elle représente le quart oriental de la baie de Bou-Ismaïl, c'est une baie relativement fermée limitée à l'Est par Ras Acrata et à l'ouest par la presqu'île de Sidi Fredj. (Figure 12)

Ses coordonnées sont les suivants :

- Port de Sidi Fredj [(36°45'49.77"N ;2°50'45.45"E) et (36°45'47.91"N ;2°50'56.77"E)]
- Ras Acrata [(36°48'15.02"N ;2°53'43.09"E) et (36°47'56.98"N ; 2°53'49.68"E)]

La cote de la baie d'El Djamilia est une cote sableuse avec un linéaire de 6Km.

### 2.1.2. Site d'étude

Sidi Fredj est considéré comme une presqu'île se situe à l'Ouest de la baie d'El Djamilia à environ 25Km d'Alger, notre étude va porter sur la partie Est de Sidi Fredj : Port de Sidi Fredj, Plage Est de Sidi Fredj et Plage hôtel Riad. (Figure 13)

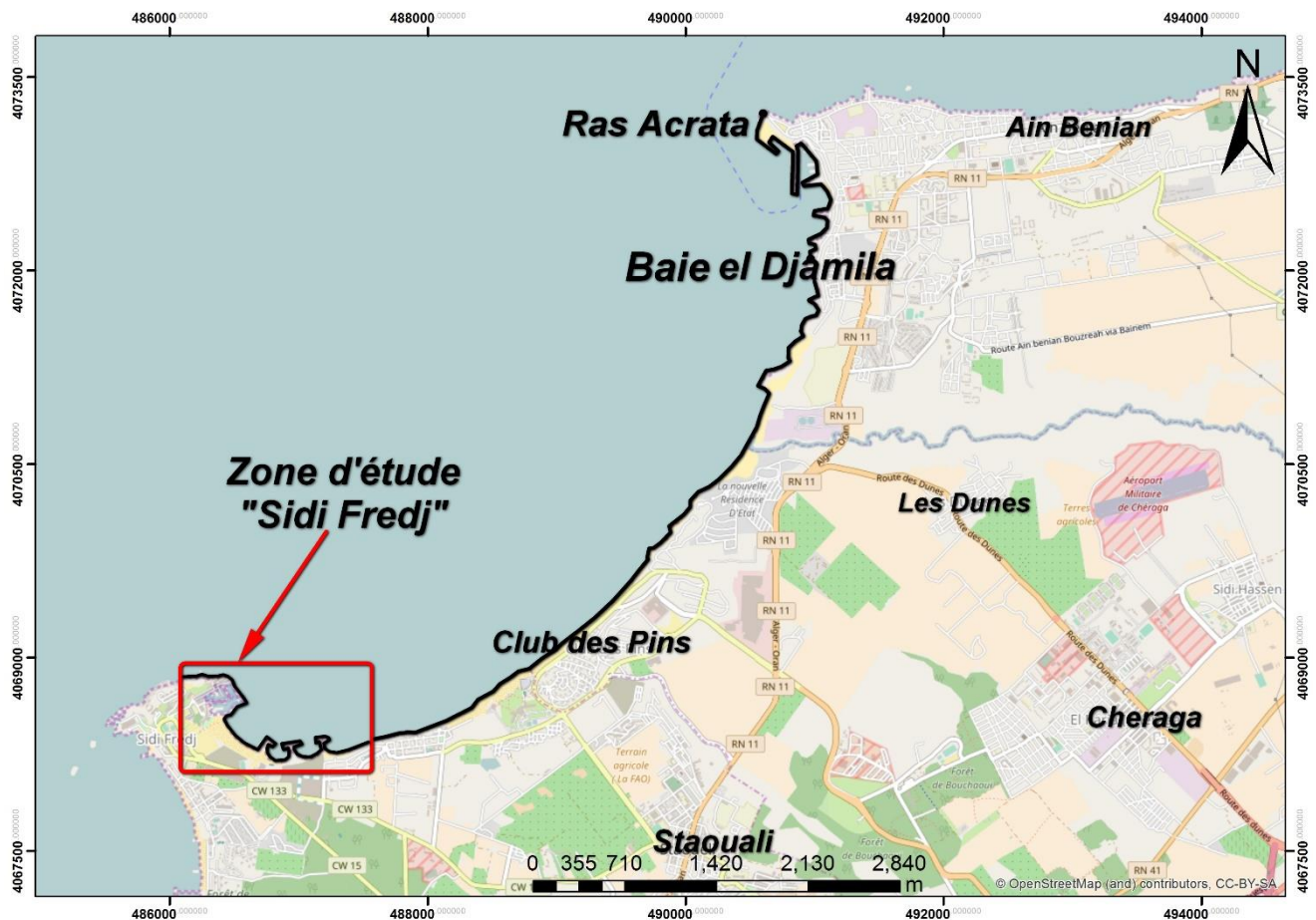
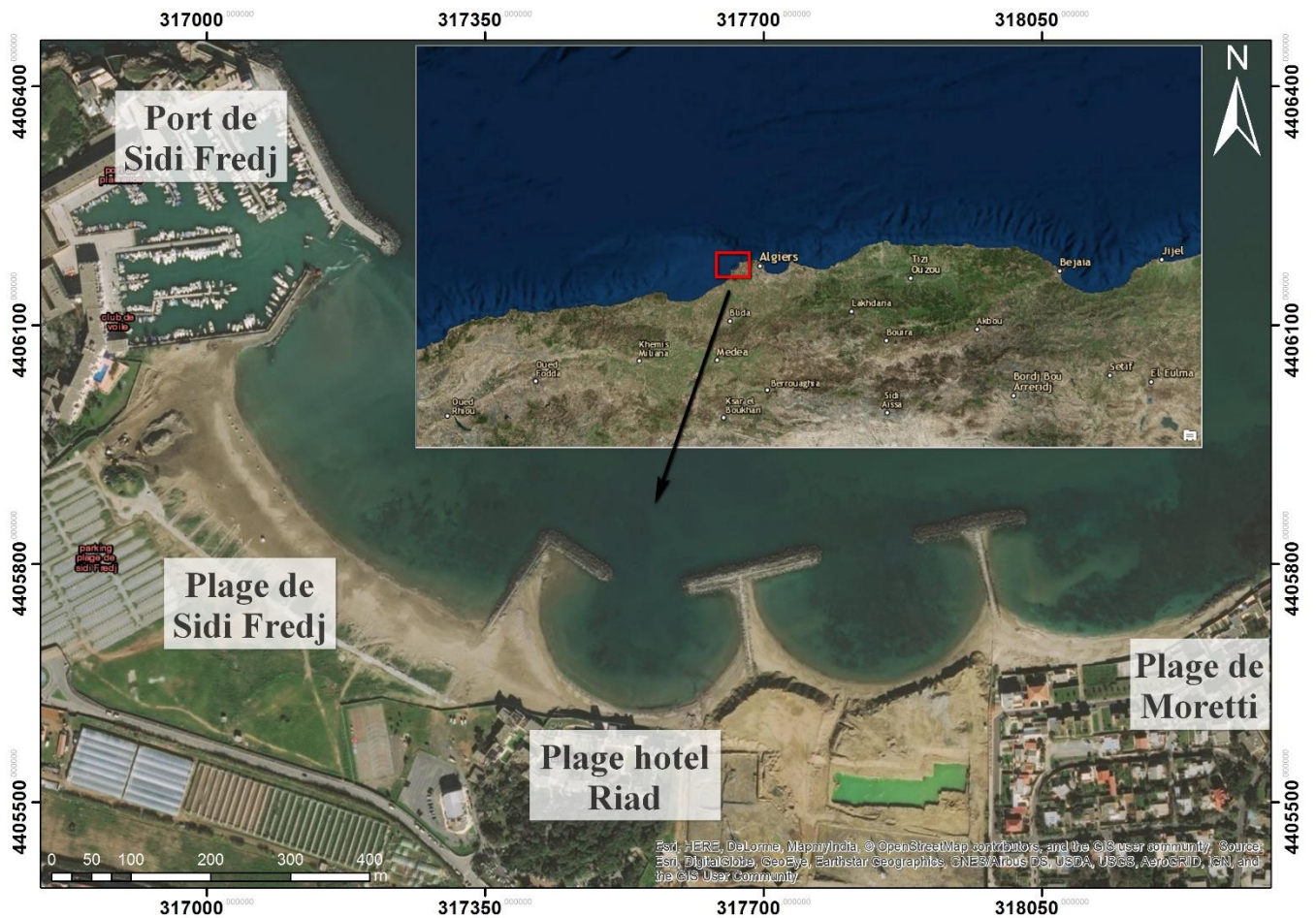


Figure 12 : Situation géographique du site d'étude (OpenStreetMap 2017)



*Figure 13 : Localisation géographique du site d'étude (Google Earth 2017)*

## **2.2. Caractéristiques climatologiques**

L'étude des caractéristiques climatologiques est importante pour mieux comprendre le régime hydrodynamique qui influence la morphologie sédimentaire de notre zone d'étude. Les données de climat local sont fournies par O.N.M : observations allant de 1995 jusqu'à 2005.

Station : Alger Dar-El-Beida

Altitude : 25 m - Latitude : 36°41 N - Longitude : 03°13 E

La baie d'El Djamilia comme l'ensemble de la côte algérienne est caractérisée par un climat méditerranéen tempéré (relativement froid et humide en hiver, chaud en été).

## 2.2.1. L'étude des vents

### 2.2.1.1. Données locales

Les mesures issues de la station de Dar El Beida indiquent que les vents soufflent environ 60% du temps dans la région. Cependant, les plus importants d'entre eux, de secteur Sud-ouest, ne soufflent que pendant 14 % du temps. (Figure 14)

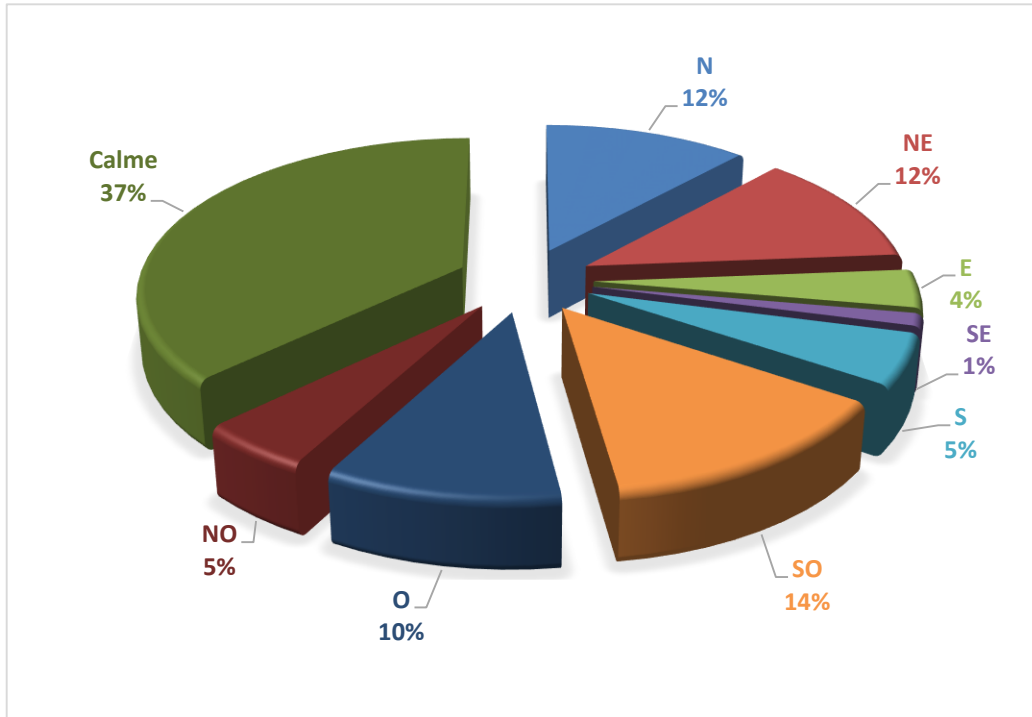
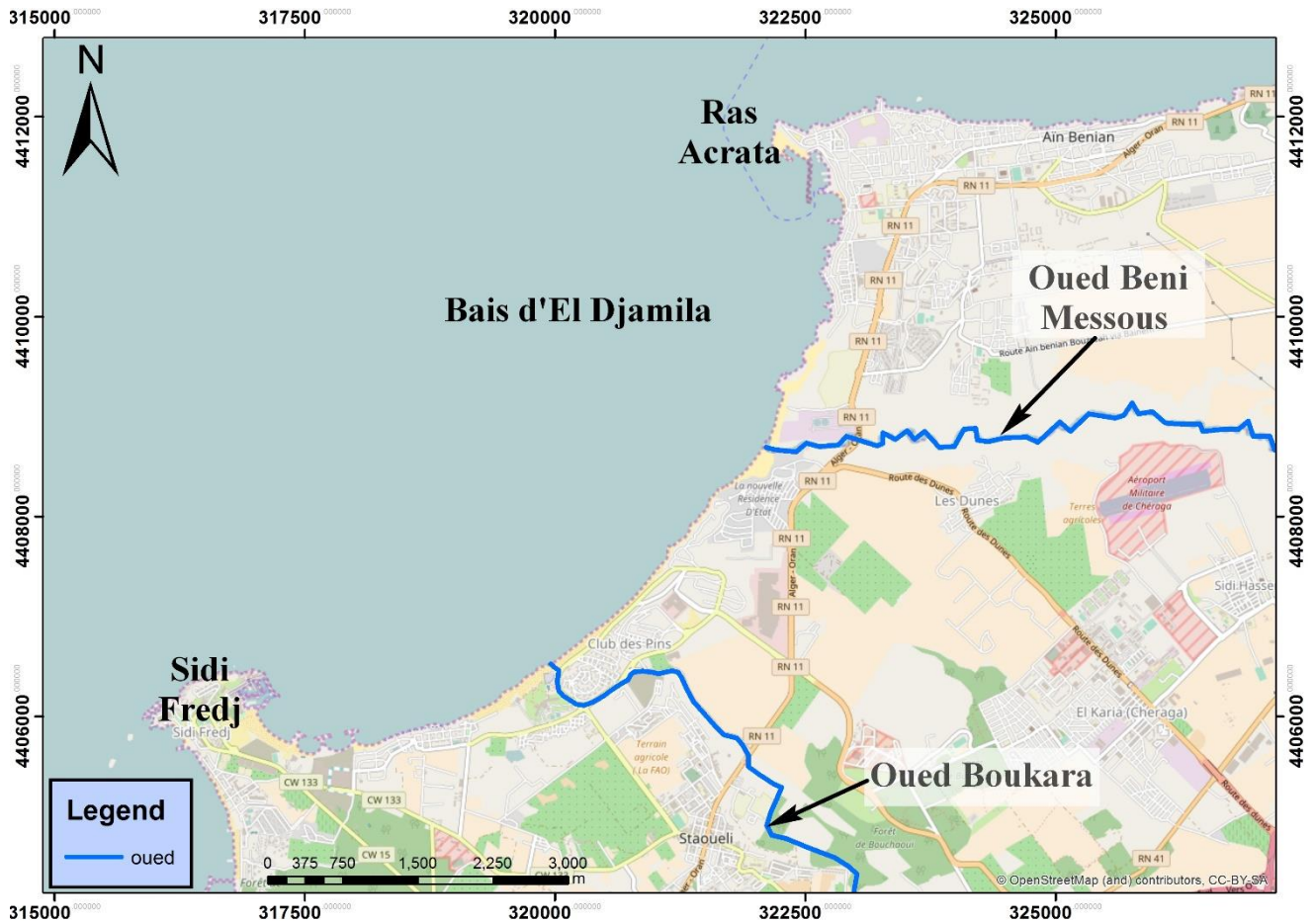


Figure 14 : Répartition annuelle des directions des vents en % (ONM, Dar-El-Beida, 1995-2005).

## 2.3. Caractéristiques hydrologiques

La baie d'El Djamila est alimentée par l'oued Beni Messous et oued Boukara, l'oued Beni Messous prend sources du massif de Bouzaréah et à un impact plus important sur la zone, il regroupe l'oued Defla et l'oued Bainem. L'oued de Beni-Messous est situé au niveau de la plage El Bahdja à 18 Km à l'ouest d'Alger. Son débit est faible, estimé à 7.7 millions m<sup>3</sup>/an (0.245 m<sup>3</sup>/s) (Benzohra, 1993).(Figure 15)

On n'a pas suffisamment de données concernant Oued Boukara, il est juste représenté sur la Figure 15 à cause de son probable faible contribution dans l'apport sédimentaire de la plage de Sidi Fredj.



**Figure 15 :** Réseaux hydrographique du site d'étude « Oued Beni Messous » et « Oued Boukara » (OpenStreetMap 2017)

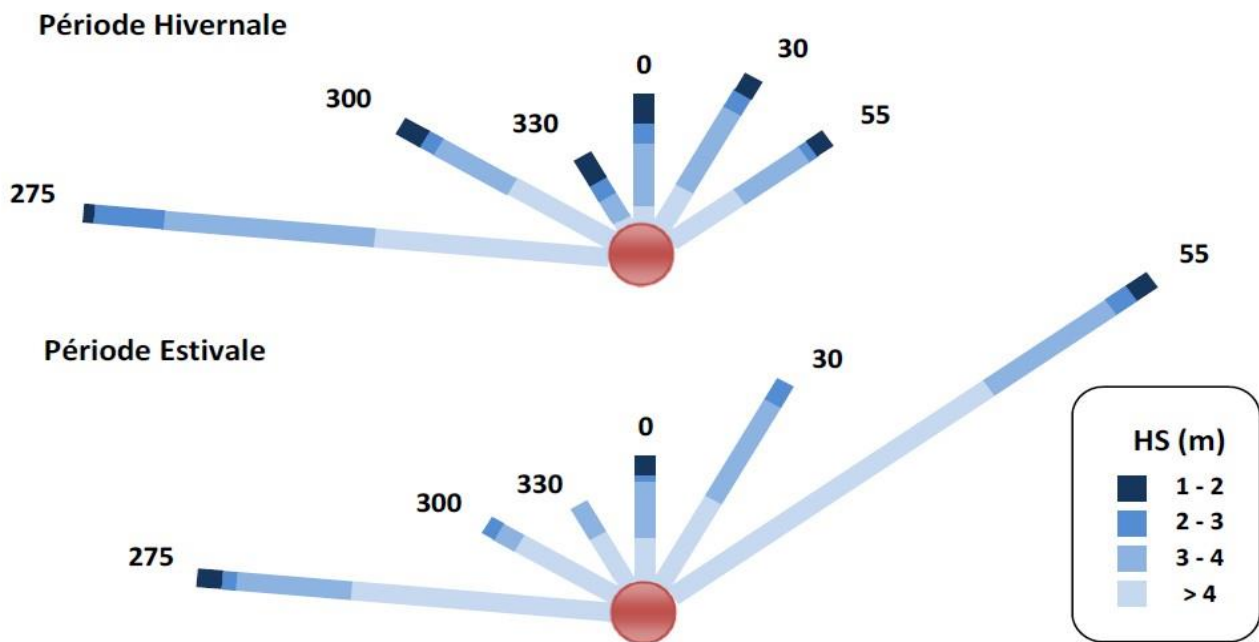
## 2.4. Caractéristiques océanographiques

### 2.4.1. La houle

Ce sont des oscillations qui dépendent du facteur vent, la houle joue un rôle prédominant dans la dynamique côtière.

Pour l'étude en main, nous avons pu disposer des données de vagues de l'U.S. Naval Weather Command intitulé Summary of Synoptic Meteorological Observation (SSMO) qui concerne une période qui s'étale de 1963 à 1970, et qui couvrent un secteur qui se situe :

- En longitude Est de 2° à 5°
- En latitude Nord de 36,5° à 38°



**Figure 16 :** Roses récapitulatives de direction des houles au large du secteur (275°-55°). Source : K.N.M.I adopté d'après (ZEMENZER, 2004)

A partir de la *Figure 16*, il est possible d'observer que la répartition des houles est globalement concordante avec le régime du vent.

**En hiver :** les houles d'Ouest dominent avec la majorité des amplitudes sont entre 1 et 3 m pouvant atteindre les 4m, elles engendrent des courants de retour qui entraînent les sédiments vers le large.

**En été :** les houles les plus dominantes sont issues du secteur Nord-Est avec des amplitudes plus faibles. Les houles du secteur Ouest sont assez importantes, ces derniers engendrent une dérive littorale. (BOUTIBA, 1996)



# *Chapitre 3*

## *Etude granulo-sédimentaire*

## ***Introduction***

Les sédiments reposant sur les fonds marins sont transportés lorsqu'ils sont soumis à de fortes sollicitations, provoqués par les mouvements des masses d'eau. Ces mouvements peuvent être produits par les courants de marée ou par les vitesses orbitales des vagues ou une combinaison des deux, ce dernier cas étant la situation où le transport est le plus important. (AHFIR & MEZIANE, 2016)

Le transport sédimentaire littoral est déterminé par :

- La hauteur, la période et la direction des vagues,
- Le déferlement : types, zone d'action,
- Les courants : vitesses et directions,
- L'épaisseur de la colonne d'eau,
- Les propriétés sédimentaires

Ce chapitre nous permet de présenter la méthodologie suivie lors de ce travail et le matériel utilisé, que ce soit des prélèvements, analyses faites au laboratoire ou des traitements de résultat par des logiciels spécifiques qui sont ArcGIS et Matlab. (Voir ENSSMAL pour les licences des deux logiciels)

### 3.1. Prélèvement et échantillonnage

#### 3.1.1. Prélèvement dans la partie terrestre :

A l'aide d'un GPS, l'étude sédimentologique a été effectuée sur 20 échantillons de sédiments superficiels prélevés sur la plage à la main. Les échantillons ont été ensuite mis dans des sacs en plastique et étiquetés. Les échantillons ont été réparti sur 10 profils (*Figure 17*).



*Figure 17 : Positionnement des points de prélèvement dans la partie terrestre (Google Earth 2017)*

#### 3.1.2. Prélèvement dans la partie marine :

A l'aide d'une benne preneuse de type « Van-Veen » attachée à un câble et envoyer sur le fond en mer, l'étude sédimentologique a été effectuée sur 28 échantillons de sédiments superficiels (*Figure 18*).

Une fois remontée, les échantillons ont été ensuite récupéré et mis dans des sacs en plastique et étiquetés.



*Figure 18 : Positionnement des points de prélèvement dans la partie marine (Google Earth 2017)*

## **3.2. Etude au laboratoire**

Cette étude a été effectuée au niveau du laboratoire de l'École Nationale Supérieure Des Sciences De La Mer Et De L'aménagement Du Littoral (ENSSMAL).

### **3.2.1. Protocole d'analyse :**

La technique de mesure la plus couramment utilisée est le tamisage à sec. Nous examinerons successivement ces différentes opérations en suivant les normes AFNOR.

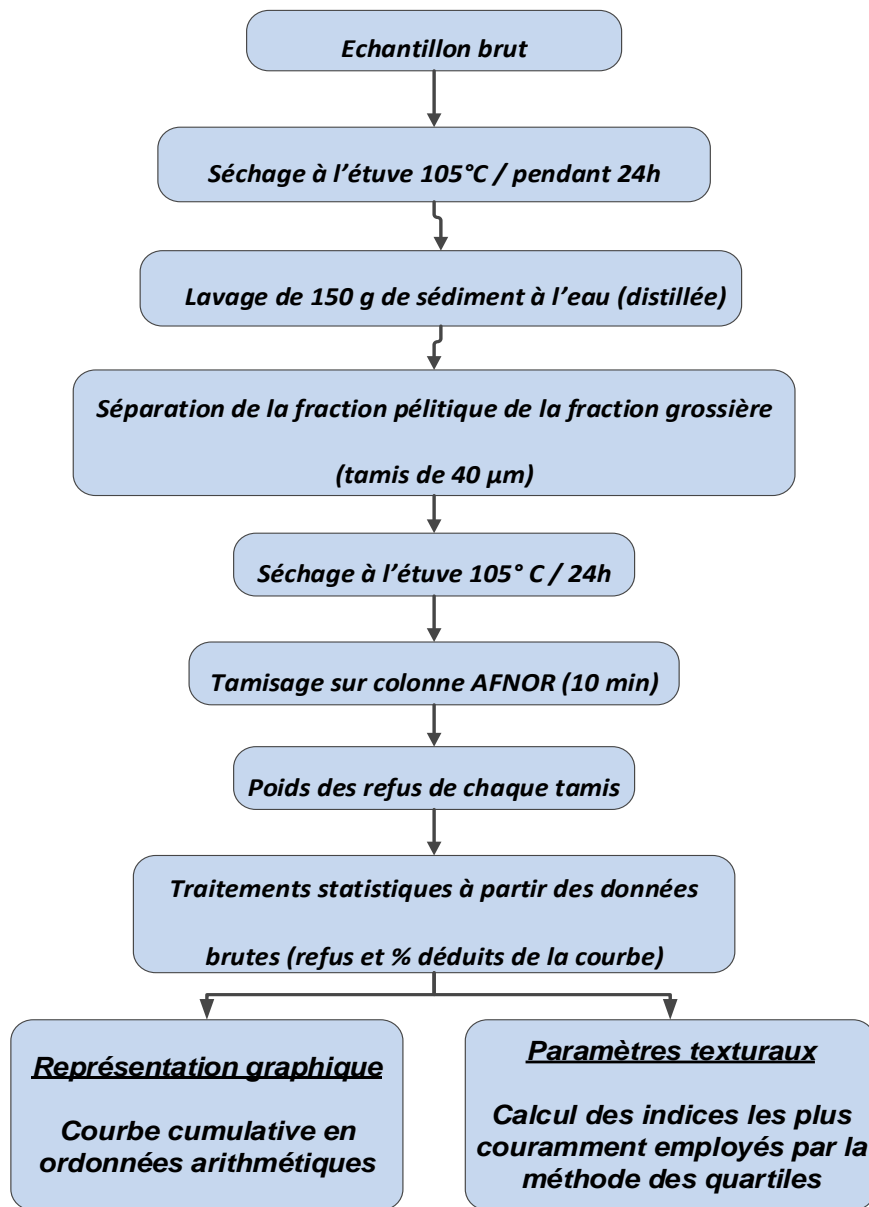
### 3.2.1.1. Préparation du matériel :



Figure 19 : Photos du matériels utilisés lors de l'analyse

### 3.2.2. Méthode d'analyse :

L'ensemble des prélèvements sédimentaires a été analysé au laboratoire selon les techniques classiques de tamisage (Figure 19). L'analyse granulométrique réalisée a passé par plusieurs étapes qui sont représentées par la Figure 20 ci-dessous



*Figure 20 : Les différentes étapes de l'analyse granulométrique*

### **3.2.3. Calcul des paramètres granulométriques**

Cette phase se traduit par une représentation sous forme de courbes cumulatives représentant le pourcentage des refus cumulés en fonction du logarithme des mailles des tamis utilisés. C'est à partir de ces courbes que les paramètres granulométriques sont déduits.

#### **3.2.3.1. Les paramètres de position :**

Les paramètres de position sont déduits à partir de la courbe cumulative en faisant une projection sur l'axe des pourcentages et déterminer le diamètre de tamis qui lui correspond. Ces paramètres vont servir à calculer les différents indices granulométriques.

### **Les quartiles :**

- D25 : diamètre du grain à l'ordonnée 25%, c'est le premier quartile.
- D50 : diamètre du grain à l'ordonnée 50%, c'est la médiane.
- D75 : diamètre du grain à l'ordonnée 75%, c'est le second quartile.

### **Les quantiles**

- D10 : diamètre du grain à l'ordonnée 10%, premier décile.
- D90 : diamètre du grain à l'ordonnée 90%, second décile.

### **3.2.3.2. Les indices granulométriques :**

Les indices granulométriques sont exprimés en unité ( $\phi$ ). L'échelle  $\phi$  est une unité de mesure définie par la relation suivante :

$$\phi = -\log_2(D) \quad \dots\dots (2)$$

D : diamètre des grains en mm.

### **3.2.3.3. Indice central :**

D'après Folk et Ward l'indice central est un positionnement global de l'échantillon sur l'échelle des dimensions des sédiments. Il traduit la puissance moyenne des paléo écoulements (LOSSON & CORBONNOIS, 2006).

$$M_z = (\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84})/3$$

**Tableau 1 : Les valeurs adoptées de  $M_z$  (MEZOUAR, 2009)**

Limite de $M_z$	Taille moyenne	Limite de $M_z$	Taille moyenne
$M_z < -6$	Galet	$0 < M_z < 1$	Sable moyen
$-6 < M_z < -2$	Granule	$1 < M_z < 2$	Sable fin
$-2 < M_z < -1$	Sable très grossier	$2 < M_z < 3$	Sable très fin
$-1 < M_z < 0$	Sable grossier	$3 < M_z < 3.98$	Vase

### 3.2.3.4. Les indices de dispersion ou de classement :

D'après Folk et Ward les indices de classement donnent une idée sur l'étalement de la courbe granulométrique autour de son grain moyen, et nous renseignent sur le degré de classement du sédiment.

$$So = [(\Phi_{84} - \Phi_{16}) / 4] + [(\Phi_{95} - \Phi_5) / 6,6] \dots\dots (3)$$

**Tableau 2 :** Les valeurs adoptées de *So* pour le classement

<i>Limite de So</i>	<i>Interprétation</i>
$So < 0,35$	<i>Très bien classé</i>
$0,35 < So < 0,5$	<i>Bien classé</i>
$0,5 < So < 0,7$	<i>Modérément bien classé</i>
$0,7 < So < 1$	<i>Modérément classé</i>
$1 < So < 2$	<i>Mal classé</i>
$2 < So < 4$	<i>Très mal classé</i>
$4 < So$	<i>Extrêmement mal classé</i>

### 3.2.3.5. Les coefficients d'asymétrie (FOLK et WARD) :

Ils indiquent la prédominance des sédiments fins ou des sédiments grossiers. Ils caractérisent le degré de symétrie de la courbe granulométrique par rapport à la médiane.

$$SKi = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)} \dots\dots (4)$$

**Tableau 3 :** Les valeurs adoptées de *SK* pour l'asymétrie avec l'interprétation des résultats (MEZOUAR, 2009)

<i>Limite de Ski</i>	<i>L'asymétrie</i>
$-1 < Ski < -0.3$	<i>Asymétrie très négative vers les grossiers</i>
$-0.3 < Ski < -0.1$	<i>Asymétrie négative vers les grossiers</i>
$-0.1 < Ski < 0.1$	<i>Symétrie</i>
$0.1 < Ski < 0.3$	<i>Asymétrie positive vers les fins</i>
$0.3 < Ski < 1$	<i>Asymétrie très positive vers les fins</i>



<i>Asymétrie</i>	<i>Interprétation</i>
<i>Négative</i>	<i>Courant fort ; le classement meilleur du côté des sables grossiers</i>
<i>Symétrie</i>	<i>Courant régulier ; autant de grossiers que de fins</i>
<i>Positive</i>	<i>Courant faible ; le classement meilleur du côté des sables fins</i>

Un programme MATLAB nous a permis d'effectuer le calcul de ces paramètres granulométriques. Ce programme utilise les trois formules de Folk & Ward citées précédemment pour effectuer le calcul et avoir les résultats présentés par la suite. Voir l'ENSSMAL pour avoir la licence de ce logiciel.

### 3.3. Résultats et interprétations :

#### 3.3.1. Analyse de la fraction fine :

Les teneurs en fraction fine ( $< 40 \mu\text{m}$ ), calculées pour l'ensemble des stations, nous ont permis d'établir la carte de répartition des pélites. Cependant, la fraction pélitique est représentée dans l'ensemble des échantillons avec des taux variables d'une station à une autre (*Figure 21 & Figure 22*)

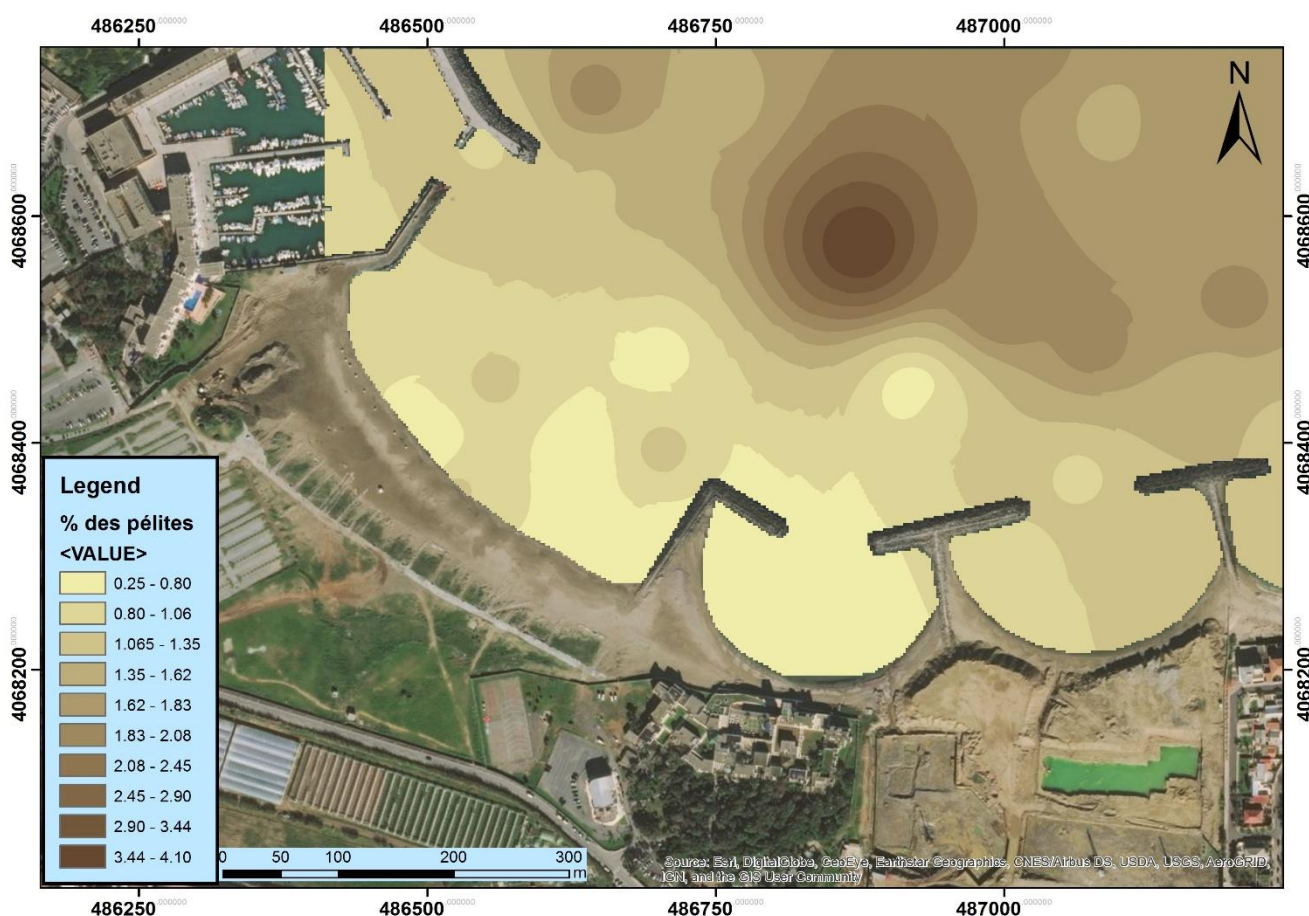
##### 3.3.1.1. Partie terrestre :



Figure 21 : Carte de la répartition des pélites (%) dans la partie terrestre (Google Earth 2017)

La distribution spatiale de % des pélites dans la partie terrestre montre que la teneur en fraction fine augmente en avançant vers le trait de côte. Les teneurs les plus élevées sont enregistrées dans la partie centre de la plage (stations 11 et 12) avec des valeurs de 1.13% et 1.46% respectivement, au-delà de cette zone on constate une diminution de cette teneur en allant vers les deux extrémités avec des valeurs de d'environ 0.6% au niveau de la station 3 (Ouest) et environ 0.4% au voisinage de l'épi (Est). Cette concentration de pélites est due généralement à la dissipation d'énergie de la houle sur la plage.

### 3.3.1.2. *Partie marine :*



**Figure 22 :** Carte de la répartition des pélites (%) dans la partie marine (Google Earth 2017)

La distribution spatiale de % des pélites dans la partie marine montre une distribution homogène de la fraction fine qui augmente de la cote vers le large, des valeurs faibles de (0.25-1.35 %) au voisinage de la cote jusqu'à des valeurs (1.83-4.1 %) vers le large, la station 9 localisée au centre, renferme la teneur la plus élevée, cela explique la redistribution des sédiments due à des courants de dérives littorales et des courants de retour qui transportent la fraction fine vers le large.

### 3.3.2. Analyse de la fraction grossière

#### 3.3.2.1. Le grain moyen

##### 3.3.2.1.1. Partie terrestre



**Figure 23 :** Carte de la répartition du grain moyen (mm) dans la partie aérienne (Google Earth 2017)

La distribution spatiale de grain moyen dans la partie terrestre représentés dans la *Figure 23* montre que la teneur en fraction grossière augmente en avançant de l'ouest de la zone d'étude (port) vers l'est (avant l'épi en L). Le faciès sédimentaire de la haute plage prospectée est dominé essentiellement par des sables très fins ( $160\mu\text{m} < Mz < 230\mu\text{m}$ ). La teneur la plus élevée qui se traduit par un sable fin tend vers le moyen ( $270\mu\text{m} < Mz < 450\mu\text{m}$ ) est enregistrée dans la partie Est de la plage (station 16), cela est dû à un rechargement artificiel observé lors des prélèvements sur terrain.

### 3.3.2.1.2. Partie marine :

La distribution spatiale de grain moyen dans la partie marine est représentée dans la (Figure 24) Les résultats montrent une prédominance d'une gamme de sable de l'ordre de (0.129 mm - 0.186 mm) au niveau de la partie Ouest au voisinage du port, cela engendre l'ensablement de la passe d'entrée du port.

Ces valeurs augmentent en allant vers l'Est où on enregistre les valeurs (0.25mm -0.71mm), ces valeurs élevées sont dues à la concentration d'énergie de la houle aux voisinage des ouvrages (Réflexion et diffraction des vagues).

La teneur la plus élevée (0.71mm) est enregistrée au niveau de la station 24.

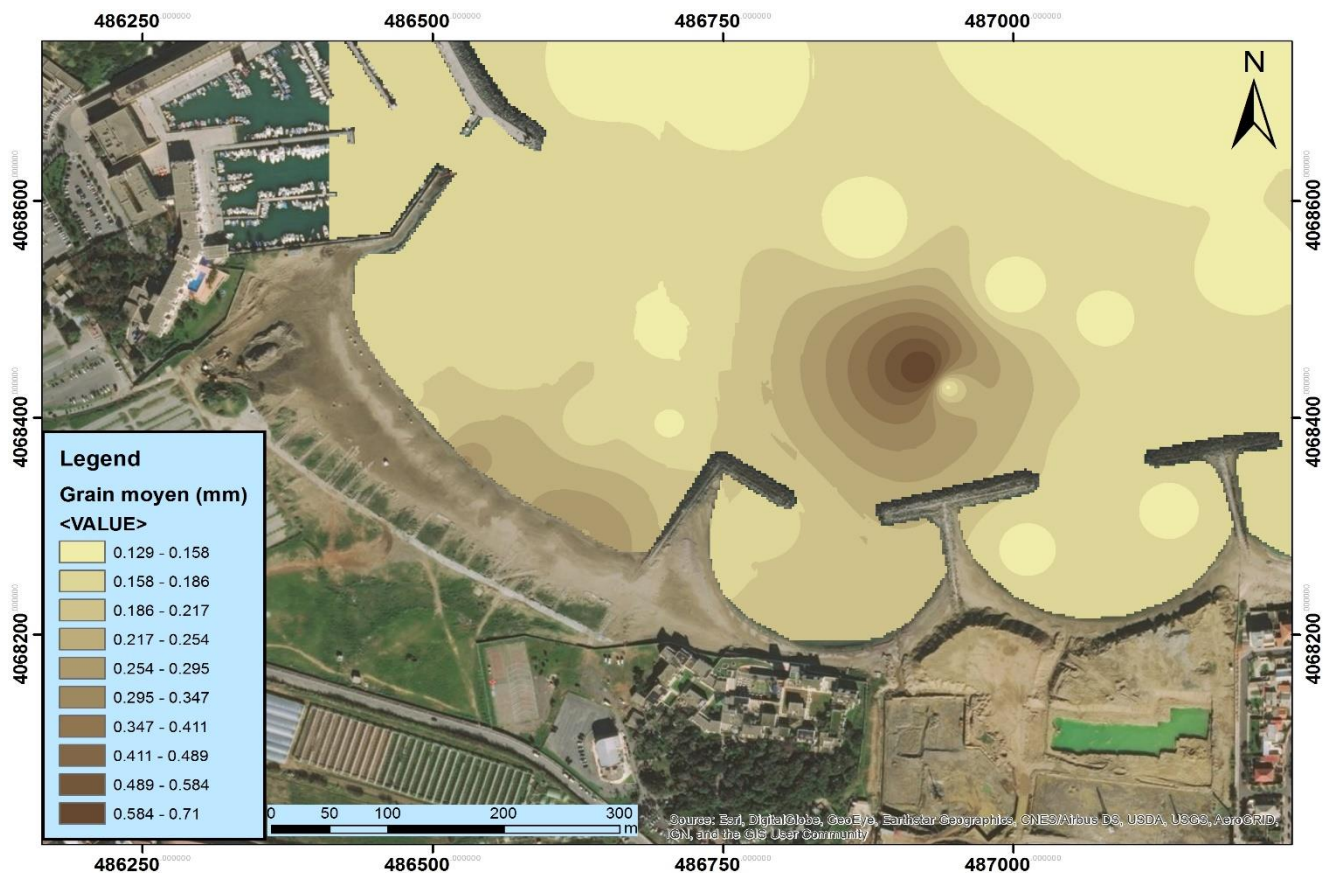


Figure 24 : Carte de la répartition du grain moyen (mm) dans la partie marine (Google Earth)

### 3.3.3. Les indices granulométriques :

#### 3.3.3.1. Partie terrestre :

Les résultats de calcul des indices granulométriques des échantillons prélevés de la partie terrestre sont synthétisés dans le Tableau 4 avec une interprétation des résultats.

**Tableau 4 :** Calcule des indices granulométriques et interprétation des résultats de la partie terrestre

N°	Mz ( $\phi$ )	So	Ski	Grain moyen	Classement	Asymétrie
1	2.6140	-0.2669	-0.0807	sable très fin	Très bien classé	Symétrie
2	2.5078	-0.3341	0.2033	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
3	2.4596	-0.2830	0.2904	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
4	2.4711	-0.2819	0.2702	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
5	2.5109	-0.2890	0.1379	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
6	2.5349	-0.2720	0.1329	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
7	2.5297	-0.2681	0.0982	sable très fin	Très bien classé	Symétrie
8	2.4679	-0.2942	0.2732	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
9	2.5428	-0.2500	0.1040	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
10	2.3602	-0.3943	0.4318	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie très positive vers les grossiers
11	1.6451	-0.7672	-0.0485	sable fin	Très bien classé	Symétrie
12	2.2328	-0.5227	0.5014	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie très positive vers les grossiers
13	1.9544	-0.7474	0.4635	sable fin	Très bien classé	Asymétrie très positive vers les grossiers
14	2.2898	-0.4774	0.5361	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie très positive vers les grossiers
15	2.0731	-0.7557	0.6091	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie très positive vers les grossiers
16	1.1661	-1.0403	-0.2823	sable fin	Très bien classé	Asymétrie négative vers les fines
17	2.5800	-0.2485	-0.0062	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie
18	2.4591	-0.3052	0.3053	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie très positive vers les grossiers
19	2.4342	-0.2700	0.2196	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
20	2.1277	-0.5178	0.2783	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers

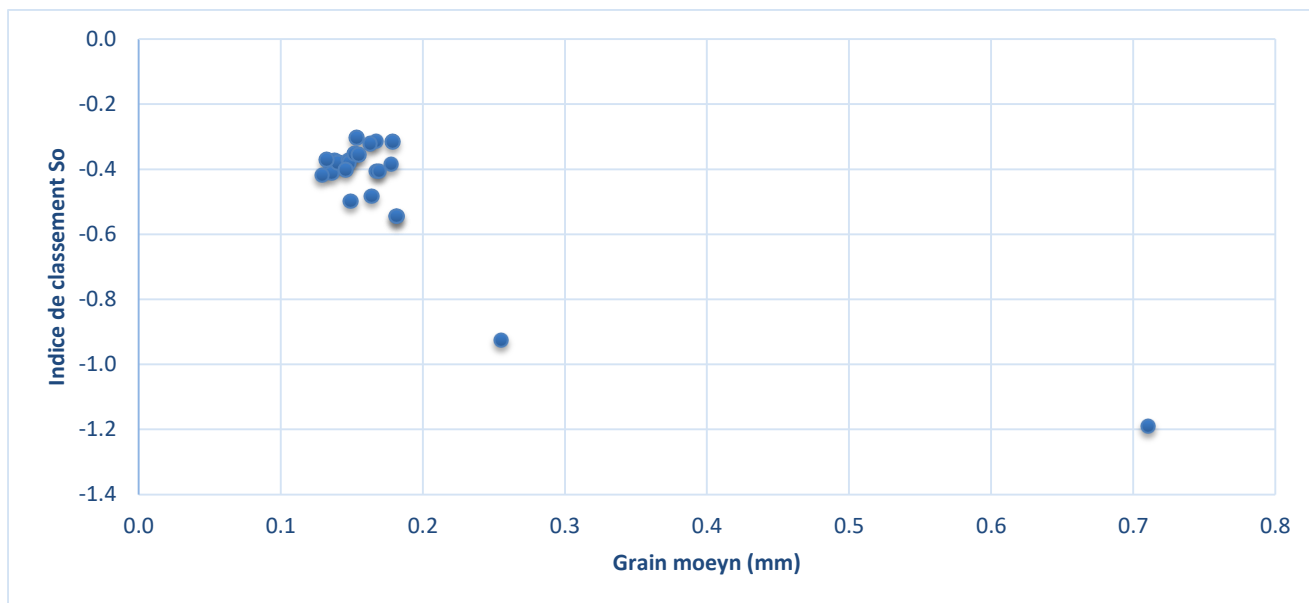
### 3.3.3.2. *Partie marine :*

Les résultats de calcul des indices granulométriques des échantillons prélevés de la partie marine sont synthétisés dans le Tableau 5 avec une interprétation des résultats.

**Tableau 5 :** *Calcul des indices granulométrique et interprétation des résultats de la partie marine*

N°	Mz( $\phi$ )	So	Ski	Grain moyen	Classement	Asymétrie
1	2.88715	-0.38427	-0.14130	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie négative vers les fines
2	2.87917	-0.41175	-0.13737	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie négative vers les fines
3	2.82715	-0.37973	-0.15678	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie négative vers les fines
4	2.85580	-0.37217	-0.01436	Sable très fin	Très bien classé	Symétrie
5	2.83537	-0.37918	-0.10648	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie négative vers les fines
6	2.46029	-0.54478	0.31741	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie très positive vers les grossiers
7	2.75906	-0.37150	-0.20764	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie négative vers les fines
8	2.91550	-0.37117	-0.08257	Sable très fin	Très bien classé	Symétrie
9	2.95411	-0.41781	-0.08719	Sable très fin	Très bien classé	Symétrie
10	2.75409	-0.37995	-0.14835	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie négative vers les fines
11	2.49265	-0.38471	0.29295	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
12	2.46029	-0.54478	0.31741	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie très positive vers les grossiers
13	2.58139	-0.31383	0.05655	Sable très fin	Très bien classé	Symétrie
14	2.48382	-0.31510	0.22314	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
15	2.60911	-0.48254	0.22329	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
16	2.57699	-0.40599	0.17273	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
17	2.70350	-0.30323	-0.16389	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie négative vers les fines
18	1.97007	-0.92645	0.54185	Sable fin	Très bien classé	Asymétrie très positive vers les grossiers
19	2.61865	-0.32135	-0.04068	Sable très fin	Très bien classé	Symétrie
20	2.71681	-0.35265	-0.01564	Sable très fin	Très bien classé	Symétrie
21	2.77833	-0.40098	0.01392	Sable très fin	Très bien classé	Symétrie
22	2.74652	-0.49733	0.06483	Sable très fin	Très bien classé	Symétrie
23	0.49291	-1.18973	-0.10004	Sable moyen	Très bien classé	Asymétrie négative vers les fines
24	2.68947	-0.35603	0.07388	Sable très fin	Très bien classé	Symétrie
25	2.56124	-0.40577	0.21317	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
26	2.46347	-0.49917	0.35246	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie très positive vers les grossiers
27	2.75429	-0.28345	-0.05297	Sable très fin	Très bien classé	Symétrie
28	2.72099	-0.29702	-0.19068	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie négative vers les fines

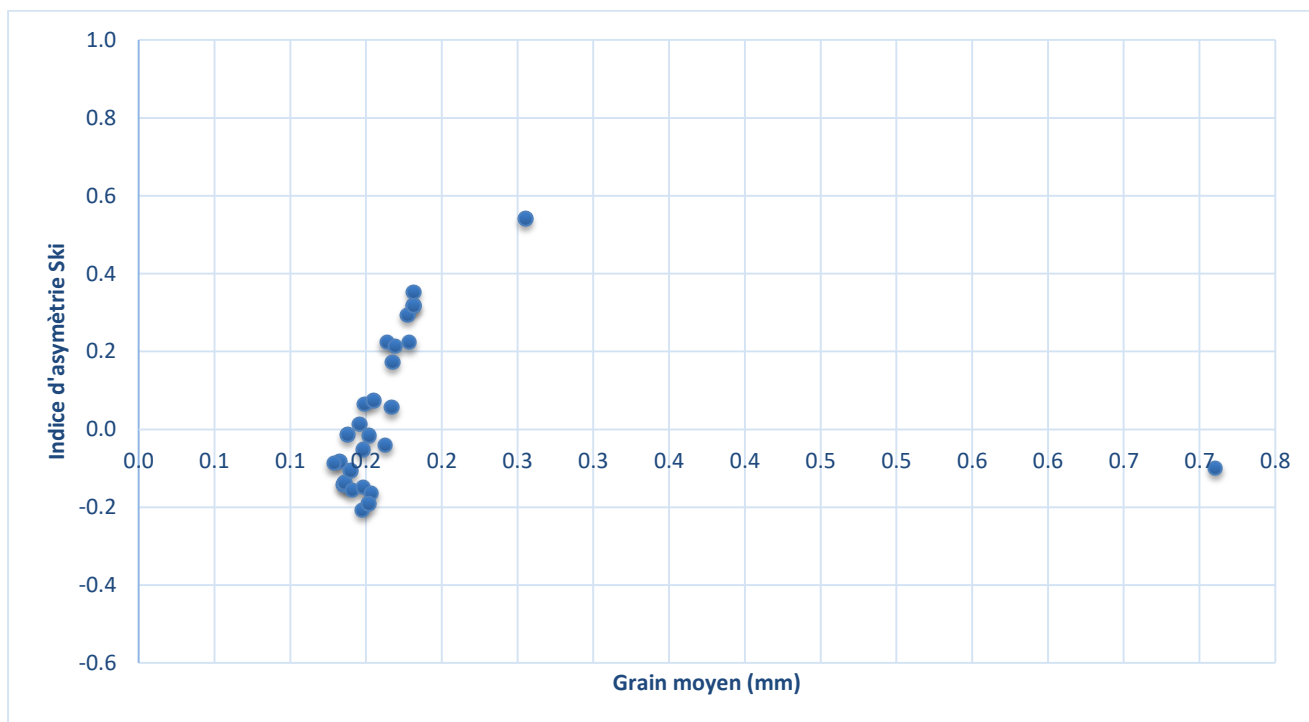
La figure ci-dessous représente la relation entre l'indice de classement  $S_o$  et le grain moyen pour avoir une idée sur la qualité de classement des grains de la partie marine de notre zone d'étude.



**Figure 25 :** Relation entre l'indice de classement et le diamètre moyen des grains de la partie marine

**Commentaire :**

La Figure 25 permet de constater que tous les échantillons de notre zone d'étude (partie marine) ont un  $S_o < 0,35$ , et cela signifie que les sédiments sont très bien classés.



**Figure 26 :** Relation entre l'indice d'asymétrie et le diamètre moyen des grains (en mm)

### **Commentaire :**

Les valeurs de l'indice d'asymétrie des échantillons prélevées présentent une variété importante selon 4 classes :

- La première classe varie sur un intervalle de  $-0,3 < \text{Ski} < -0,1$ , donc on peut dire qu'elle a une asymétrie négative (vers les fins) pour un ensemble des échantillons : 1, 2, 3, 5, 7, 10, 17, 23, 28.
- La deuxième classe comprend des valeurs de Ski entre  $-0,1$  et  $0,1$  avec des échantillons plus ou moins symétriques qui sont : 4, 8, 9, 13, 19, 20, 21, 22, 24, 27.
- Pour  $0,1 < \text{Ski} < 0,3$ , cette classe est asymétriquement positive pour les échantillons : 11, 14, 15, 16, 25.
- La dernière classe a une asymétrie très positive pour des valeurs de Ski supérieur à  $0,3$ , concernant le reste des échantillons : 6, 12, 18, 26.



# *Chapitre 4*

*Etude bathymétrique et*

*Hydro-sédimentaire*

*« Approche numérique »*

## ***Introduction***

Ce chapitre porte sur l'étude de l'interaction entre les différents forçages hydrodynamiques de notre zone d'étude afin de savoir les zones menacées par l'érosion et les zones d'accrétion en utilisant des simulations numériques sur DHI Mike 21.

Et pour ce faire, nous avons suivi les 4 étapes de modélisation suivantes :

- L'étude bathymétrique.
- La modélisation de la réfraction de la houle avec le modèle SW.
- La modélisation des champs de courants générés par la houle au moyen du modèle HD.
- La modélisation du transport sédimentaire sous l'effet de la houle et les courants à l'aide du modèle ST.

### ***4.1. Etude bathymétrique***

La bathymétrie est la mesure des profondeurs et du relief sous la surface de l'eau pour déterminer la topographie d'un fond marin.

L'étude bathymétrique est indispensable pour notre travail, et la précision de la modélisation des processus hydrosédimentaires dépend de cette dernière.

La bathymétrie de la zone d'étude a été obtenue par interpolation sur Mike 21 d'une série de valeurs mesurées de la profondeur du fond marin recueillie sur le terrain durant notre sortie en mer sur embarcation [11/04/2017]. L'emplacement des points de mesure a été enregistré par GPS.

#### ***4.1.1. Méthodologie suivie***

##### ***4.1.1.1. Présentation du modèle Mike 21***

MIKE 21 est une suite logicielle professionnelle de modélisation numérique 2D des écoulements à surface libre, développée par DHI Water & Environnement. Il permet la simulation de l'hydraulique et des phénomènes associés dans les rivières, les lacs, les baies, les zones côtières et les océans. MIKE 21 est ainsi particulièrement adapté pour traiter des problèmes relevant des principaux domaines d'application suivants :

- L'hydraulique fluviale ;
- L'hydraulique environnementale (qualité) ;
- Les processus sédimentaires ;

- L'hydraulique côtière et l'océanographie ;
- La houle.

Le logiciel MIKE 21 est composé de différents modules répondant à une problématique précise : le module hydrodynamique MIKE 21 HD, le module de réfraction des houles MIKE 21 SW, le module de transport des sédiments MIKE ST, Coupled Model FM, .... Etc. Les divers modules communiquent entre eux ; différents processus à simuler peuvent être ainsi combinés et superposés de manière souple.

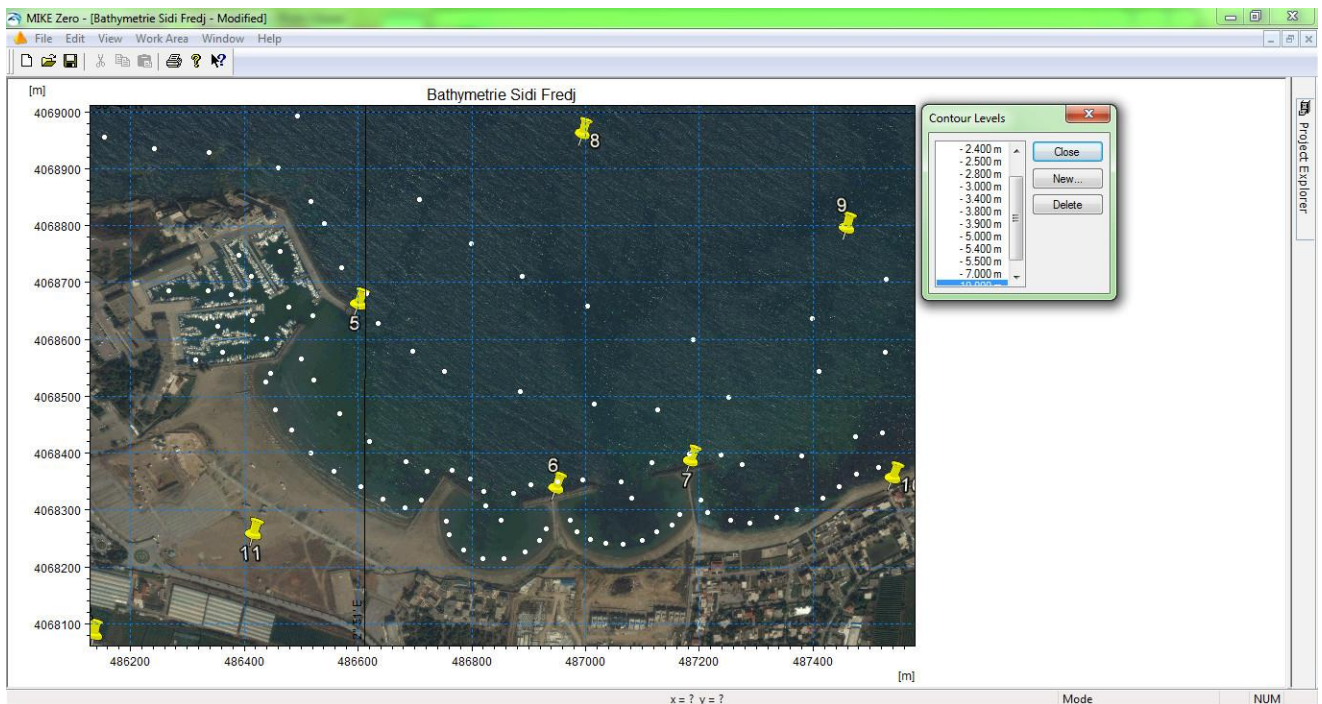
La licence du MIKE 21 utilisée appartient à l'ENSSMAL.

- ❖ **MIKE 21 SW** : modèle spectral de vague de 3<sup>ème</sup> génération, il simule : la croissance des vagues en présence du vent, l'interaction vague-vague non-linéaire, la dissipation par le déferlement et par la friction sur le fond, la réfraction par les changements de profondeur et l'interaction vague-courant. Les calculs du modèle MIKE21-SW utilisent une grille à maillage flexible.
- ❖ **Mike 21/3 HD** : modèles hydrodynamiques en 2D ou en 3D, chaque modèle peut être utilisé seul ou en mode couplé avec un ou plusieurs modèles de transport de matières dissoute et/ou particulaire. Un exemple de couplage typique en zone côtière est celui du modèle MIKE21-HD avec le modèle de réfraction de vague MIKE21-SW et le modèle de transport de sable MIKE21-ST et cela pour l'étude du transport de sable autour d'un port.
- ❖ **Mike 21 ST** : modèle de transport de sédiments non-cohésifs (sables). Il est normalement couplé au modèle hydrodynamique MIKE21/3-HD et au modèle de vagues MIKE21-SW. Il offre deux formulations pour le calcul du transport sédimentaire : la formulation de Bijker (courants seuls) et la formulation STP du DHI (courants et vagues). Cette méthode STP dite « intra-vague » permet de prendre en compte l'influence des différences de phase de l'écoulement oscillatoire, de la tension du cisaillement sur le fond et de la concentration de sédiment en suspension sur le transport du sédiment.

#### 4.1.1.2. L'exploitation des cartes marines sous Mike 21

Comme support cartographique de modélisation, nous avons utilisé une image satellitaire prise de Google Earth Pro qui a été géoréférencé sous Image Rectifier (ImgRec.exe).

Sous Mike 21, les cartes marines de notre zone d'étude ont été géoréférencés sous le système de coordonnées projetées WGS84\_UTM Zone 31 N. Les points de bathymétrie connus ont été digitalisés à l'aide de l'extension « set current contour level » sous le module « Bathymetries (.batsf) », puis exporter au format .xyz (un fichier texte qui contient le X,Y et la profondeur de chaque point).(Figure 27)



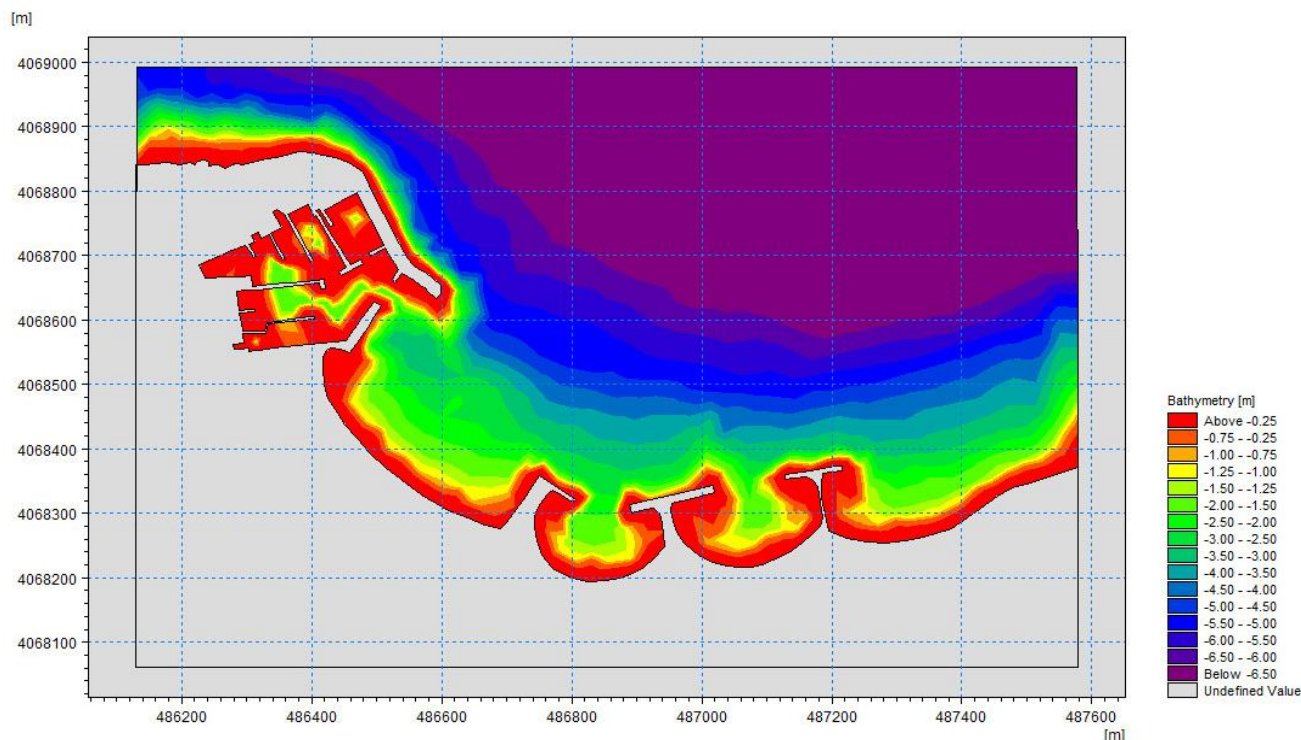
**Figure 27 :** Digitalisation des points de bathymétrie sous Mike 21.

Après la préparation des données bathymétriques, le module « Mesh Generator » a été utilisé afin d'importer ces données et définir les limites de la Mesh à générer. Le maillage issu est composé d'éléments triangulaires dont la taille a été ajustée suivant les évolutions bathymétriques et la précision souhaitée.

La carte bathymétrique a été réalisée par interpolation à l'aide de l'outil « Interpolate » de l'extension Mesh sous Mike par « Natural Neighbour ».

L'analyse de la carte bathymétrique obtenue met en évidence deux zones (*Figure 28*):

- Une zone avec des profondeurs comprises entre 0 et -4m avec une pente douce régulière, Elle est chahutée avec la présence de petites fosses et de barres d'avant cote et au voisinage des ouvrages, C'est une morphologie qui témoigne d'une mobilité relativement importante de ces fonds sous l'action hydrodynamique ;
- Une zone ou la profondeur dépasse -4m et plus, présente un fond relativement régulier avec des isobathes bien espacées parallèle au trait de côte.



*Figure 28 : Carte bathymétrique de Sidi Fredj*

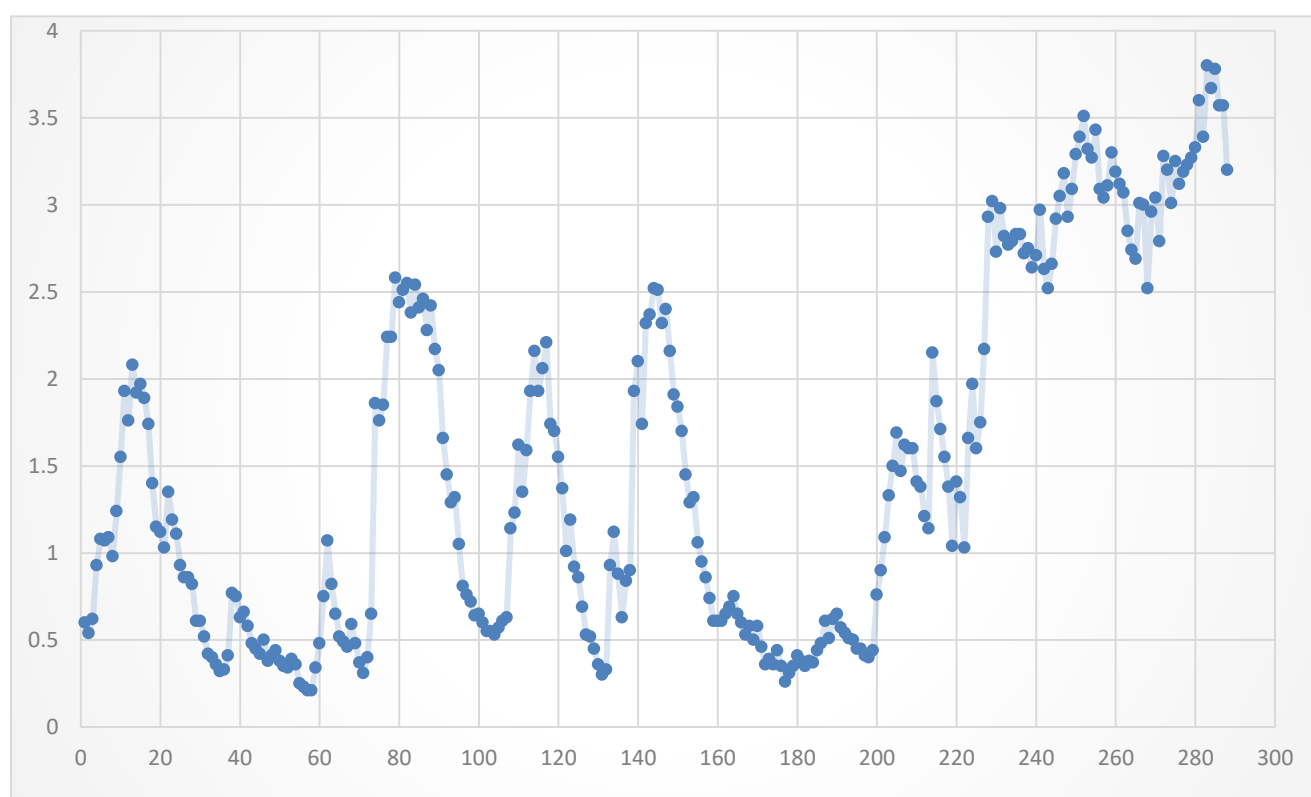
## **4.2. La modélisation de la réfraction de la houle avec le modèle SW**

La connaissance des conditions de houle à la côte est nécessaire pour quantifier leur contribution aux niveaux marins. La caractérisation des houles peut être fait par des calculs au moyen d'un modèle numérique la propagation et la génération des houles depuis le large, où elles sont connues, jusqu'au littoral. Pour notre étude un modèle numérique a été réalisé à l'aide du module Mike 21 SW (Spectral Waves).

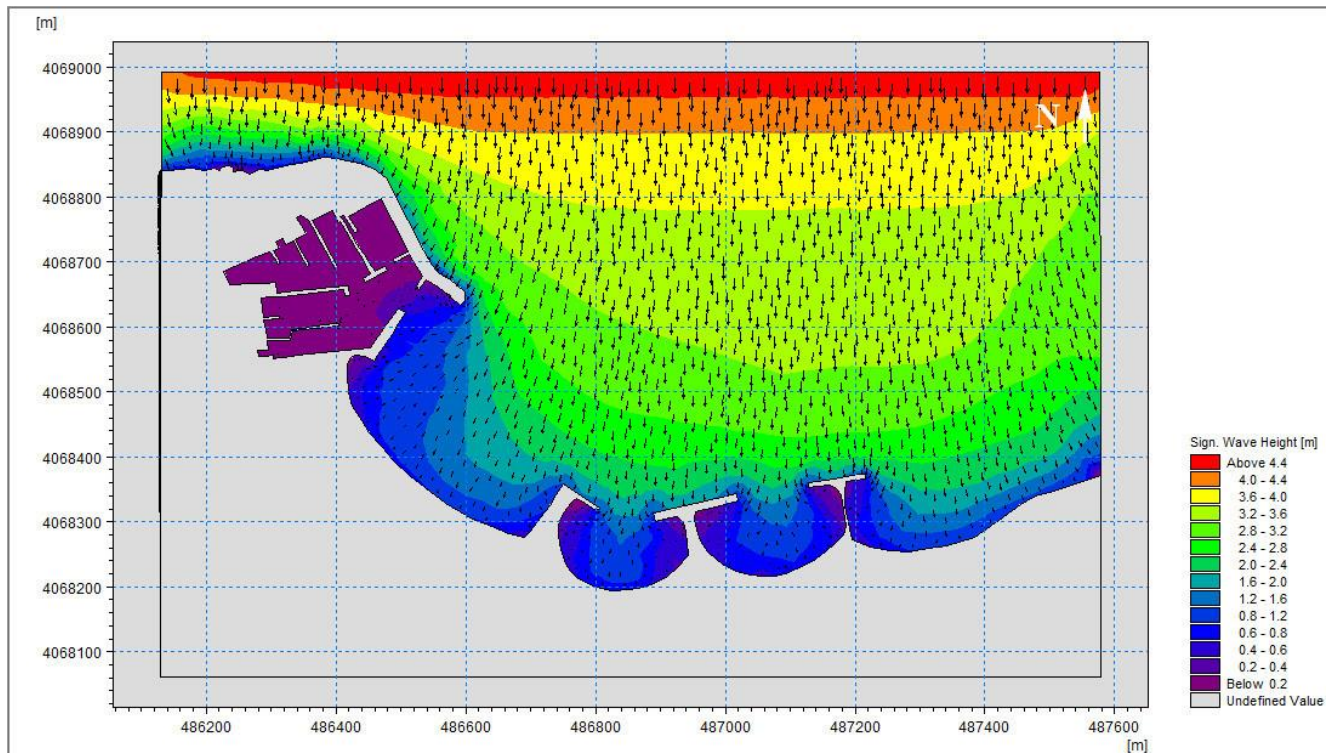
Plusieurs types de données sont nécessaires pour l'étude de la réfraction de la houle. Celles-ci seront insérées en entrée du module de MIKE 21 Spectral Waves FM. Les données utilisées sont mentionnées ci-dessous :

- Bathymétrie ;
- Des séries temporelles fournies par l'ONSM (temps d'enregistrement, date, heure et élévation Hs de la houle au large) ;
- Directions des houles dominantes ;

Après avoir introduit la bathymétrie (*Figure 28*), la série temporelle des hauteurs (*Figure 29*) et les données sur la direction et la vitesse du vent d'après le site (WINDFINDER, s.d.), les conditions des courants d'après le model HD et définir les conditions aux limites en prenant en considération la direction dominante de propagation des vagues selon le cas d'étude. La durée d'un effort de simulation peut attendre 2 jours selon la complexité des objectifs.



**Figure 29** : La série temporelle des hauteurs (en mètre) de la houle au large entre 01/01/2016 et 31/01/2016.



**Figure 30 :** Carte de réfraction de la houle pour  $N360^\circ$  et  $T=10s$

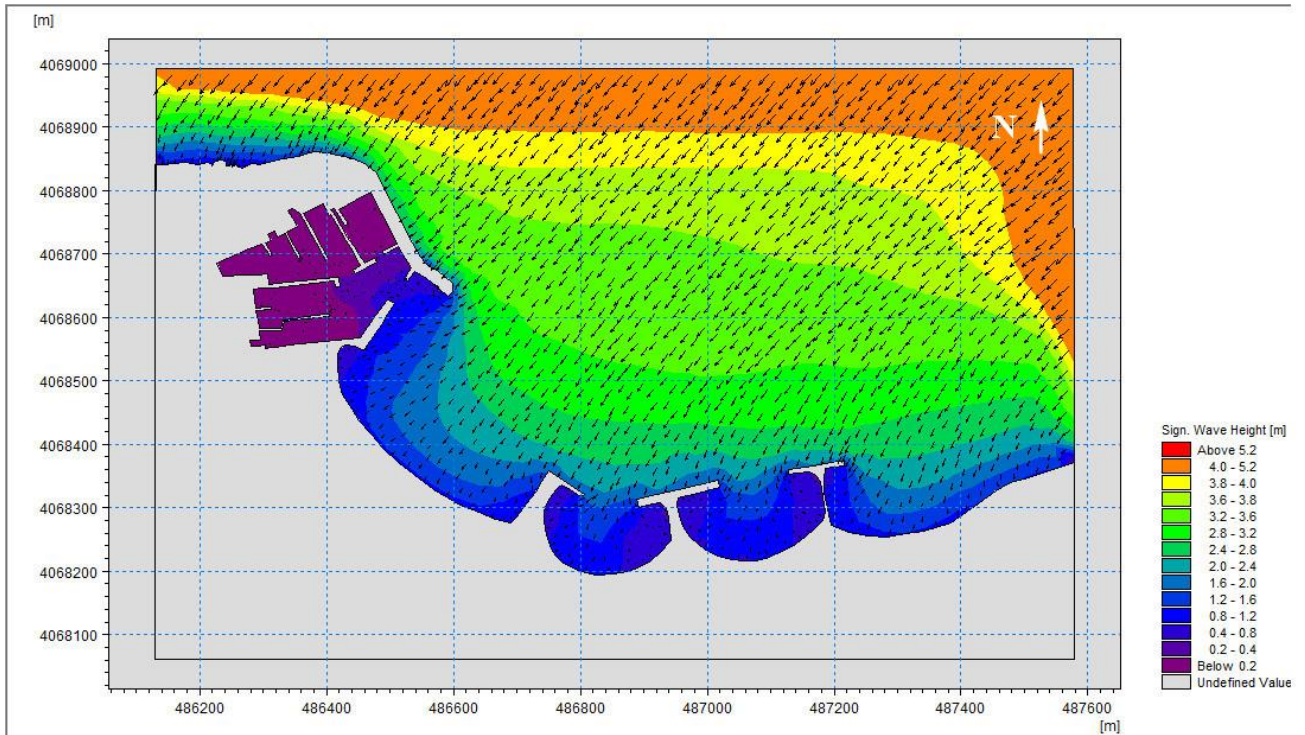
Les Figure 30 et (Figure 44 & Figure 43 dans l'annexe) représentent les résultats de la simulation numérique de la réfraction de la houle pour la direction  $360^\circ N$  et cela pour différentes périodes (6s, 8s, 10s).

L'analyse indique que les hauteurs significatives varient entre 0,08 à 1,12m pour une période de 6s, 0,2 à 2,6m pour une période  $T=8s$  et entre 0,2 à 4,4m pour une période de 10s.

La houle atteint la cote sans être déformée et conserve partiellement son énergie jusqu'à son arrivé au voisinage de la jetée principale du port et des trois épis qui diminuent énormément l'énergie de la houle incidente, l'agitation des vagues est presque nulle derrière ces ouvrages.

La propagation se fait d'une façon presque perpendiculaire aux isobathes jusqu'à une profondeur de réfraction (2 m), au-delà de cette profondeur les orthogonales commencent à se réorienter vers l'Ouest au niveau de la partie Ouest et vers l'Est dans la partie Est.

Au voisinage de la jetée principale du port on constate une forte diffraction de la houle qui cause le déplacement des sédiments vers l'intérieur du port et engendre un ensablement suite à cela.

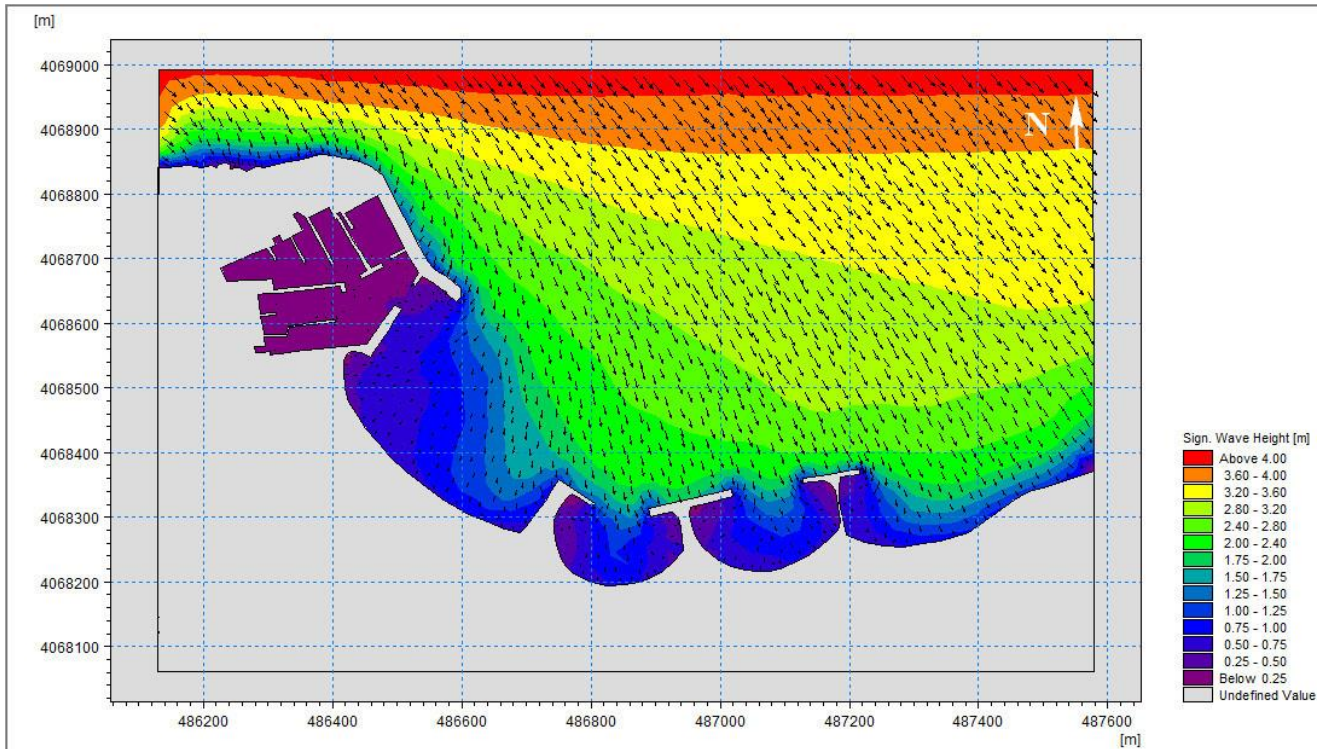


**Figure 31** : Carte de réfraction de la houle pour  $N45^\circ$  et  $T=10s$

Les Figure 31 et (Figure 39 & Figure 40 dans l'annexe) représentent les résultats obtenus de l'étude de la réfraction de la houle de  $45^\circ N$  et cela pour différentes périodes (6s, 8s, 10s). Dans ce cas, des hauteurs significatives varient de 0,2m à 1.2m pour une période de 6s, de 0,6m à 2,8m pour une période  $T=8s$  et de 0,8m à 5.2m pour une période de 10s.

Similairement à la direction précédente ( $360^\circ N$ ), la houle atteint la cote sans être déformée et conserve partiellement son énergie jusqu'à son arrivée au voisinage de la jetée principale du port et des trois épis qui diminuent énormément l'énergie de la houle incidente, l'agitation des vagues est presque nulle derrière ces ouvrages.





**Figure 32 : Carte de réfraction de la houle pour N315° et T=10s**

Les Figure 32 et (Figure 41 & Figure 42 dans l'annexe) représentent les résultats obtenus de l'étude de la réfraction de la houle de 315°N et cela pour différentes périodes (6s, 8s, 10s).

Les résultats obtenus de la réfraction de 315°N connaît des hauteurs significatives qui varient de 0,1m à 1.2m pour une période de 6s, de 0,2m a 2,6m pour une période T=8s et de 0,25m a 4m pour une période de 10s.

La houle atteint la cote sans être déformée et conserve partiellement son énergie jusqu'à son arrivé au voisinage de la jetée principale du port et des trois épis qui diminuent énormément l'énergie de la houle incidente, l'agitation des vagues est presque nulle derrière ces ouvrages.

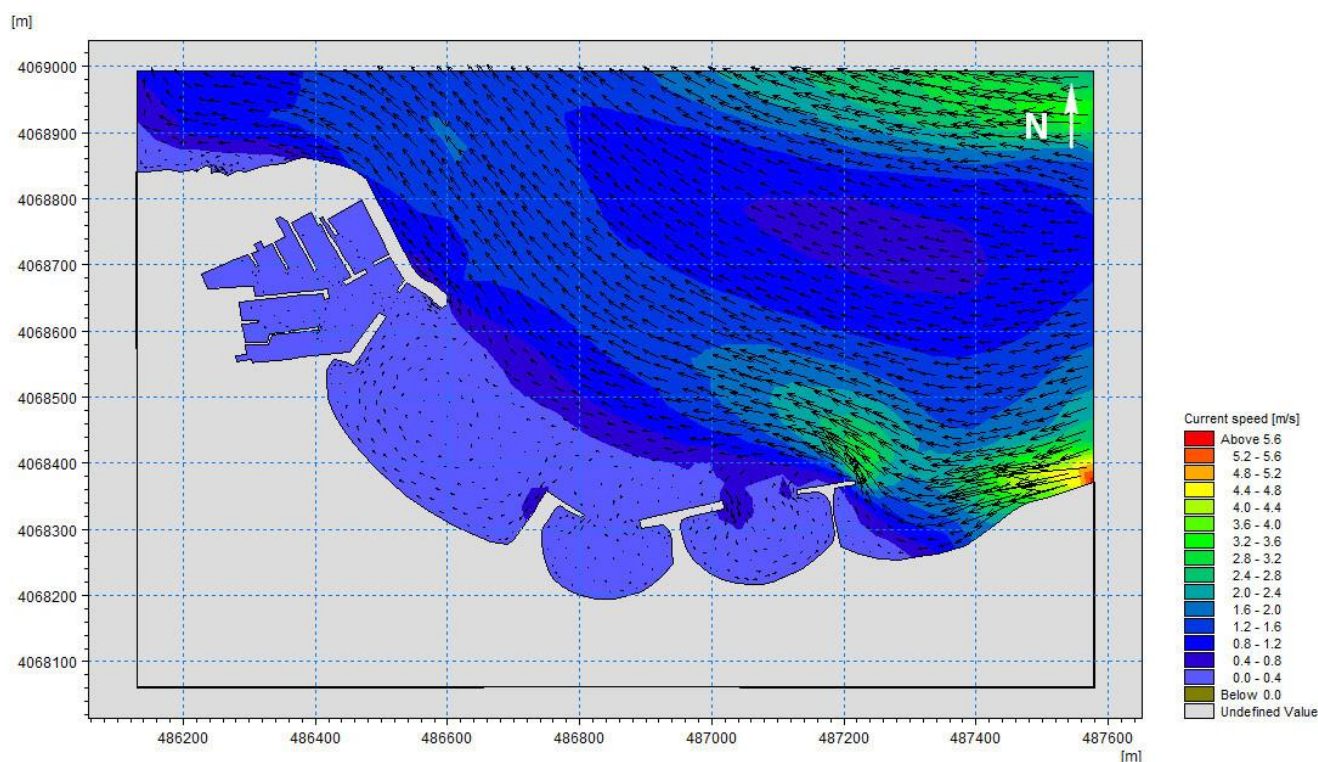
La propagation se fait d'une façon oblique au isobathes jusqu'à une profondeur de réfraction (2 m), au-delà de cette profondeur les orthogonales commencent à se réorienter vers l'Ouest

### ***4.3. La modélisation des champs de courants générés par la houle au moyen du modèle HD.***

La connaissance des conditions des courants à la côte est nécessaire pour quantifier leur contribution à la propagation de la houle et au transport sédimentaire. Et pour déterminer la nature de ces courants, nous avons simulé au moyen d'un modèle numérique la génération et le mouvement de ces derniers.

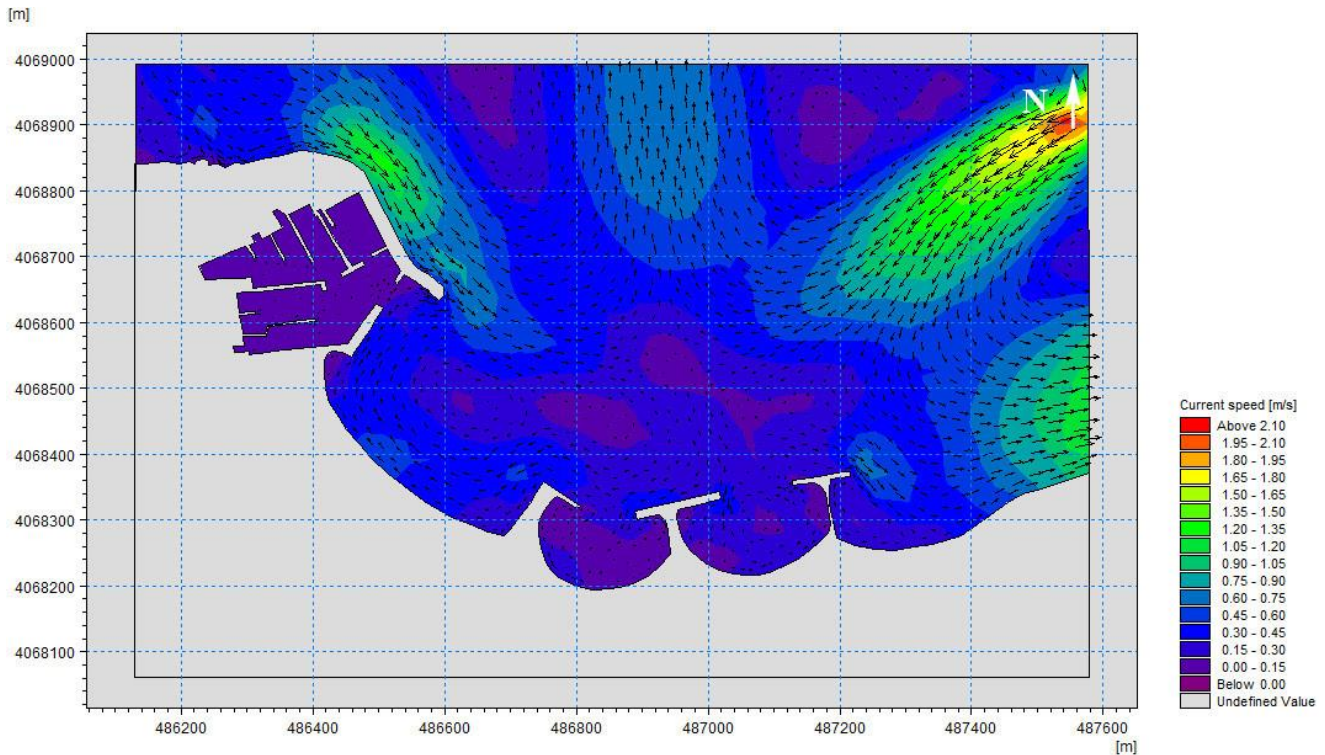
Le modèle numérique a été réalisé à l'aide du module Mike 21 HD (Hydrodynamique) avec les paramètres mentionnés dans le *Tableau 13* dans l'annexe.

### Résultats



**Figure 33 :** Direction et vitesse des courants pour 45°

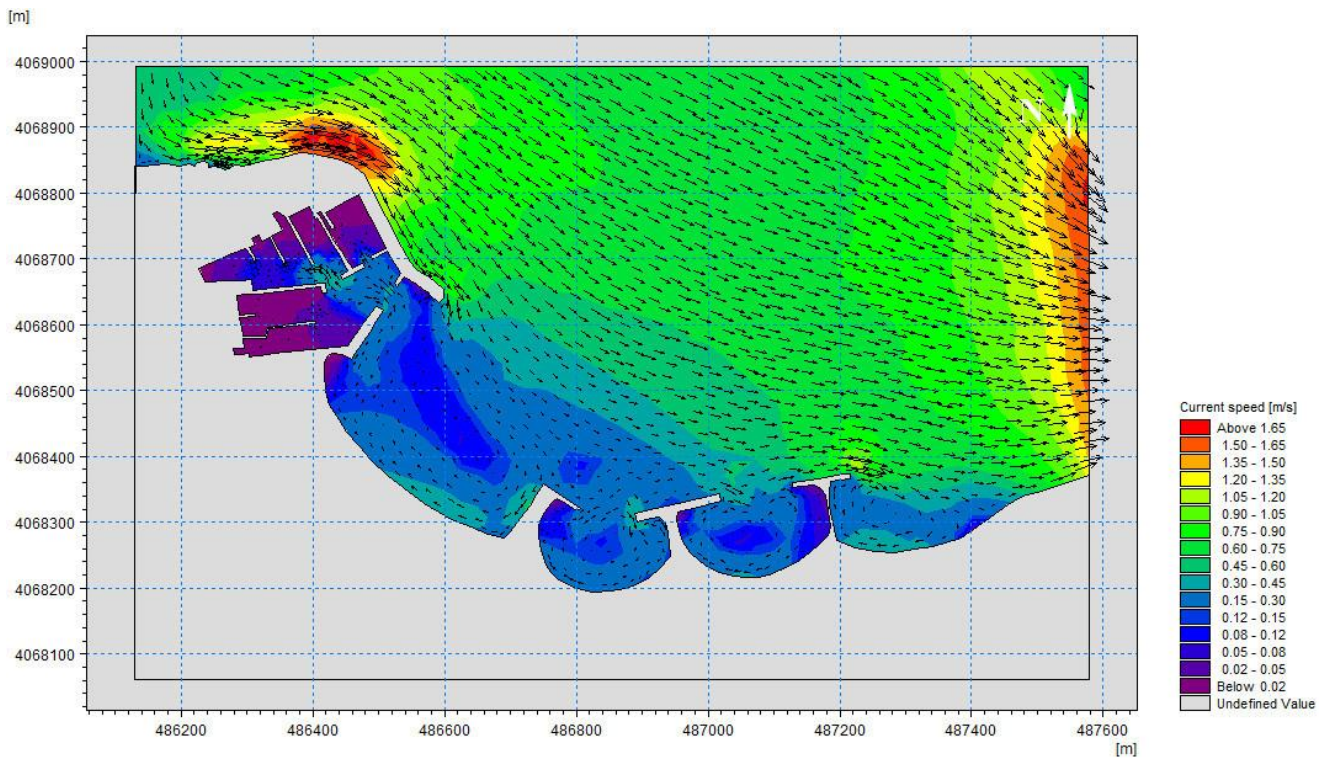
La *Figure 33* représente la direction et vitesse des courants générées par la réfraction de la houle Nord-Est. D'après cette figure, on observe que les champs des courants montrent des activités hydrodynamiques presque dans toute la zone, et surtout dans la partie exposée à la houle du côté Est (plage Moretti). Là il est possible d'observer un courant de dérive littoral important dirigé vers le NO°. Le gradient de vitesse atteint un maximum au niveau de la plage Moretti d'environ 4 - 5 m/s, ce que peut provoquer de fortes érosions dans cette partie. La vitesse des courants est minimale au niveau de la partie Ouest de la zone d'étude (de l'ordre de 0.2-0.8 m/s) et presque nulle au niveau des ouvrages ce que peut favoriser le dépôt des sédiments.



**Figure 34 :** *Direction et vitesse des courants pour 360°*

La *Figure 34* représente la direction et vitesse des courants générées par la réfraction de la houle Nord. D'après cette figure, on observe que les champs des courants montrent des activités hydrodynamiques presque dans toute la zone, et surtout dans la partie exposée du côté Est (plage Moretti), où on observe un courant littoral important qui est dirigé vers le Sud-Ouest, induit par la houle d'une direction frontale 360°, ce courant à une vitesse allant jusqu'à 1.6 m/s. Cette intensité diminue graduellement passant par des vitesses moyennes de l'ordre de 0.6 m/s à 0.75 m/s au niveau de la partie Ouest.

Ce gradient de vitesse est aussi remarquable, au niveau de la jetée principale, la plage Est et la passe d'entrée du port mais avec un degré moindre, où on note des circulations tourbillonnaires dans cette zone et aussi entre les ouvrages, avec des vitesses faibles d'environ de 0.3 m/s, ce qui est en accord avec la réalité. Pour le reste de la zone et au-dessus de ces ouvrages, les champs de courant se manifestent dans une direction majoritaire moyenne vers le Nord, avec un gradient de vitesse relativement faible d'environ de 0.3 m/s.



**Figure 35 :** Direction et vitesse des courants pour 315°

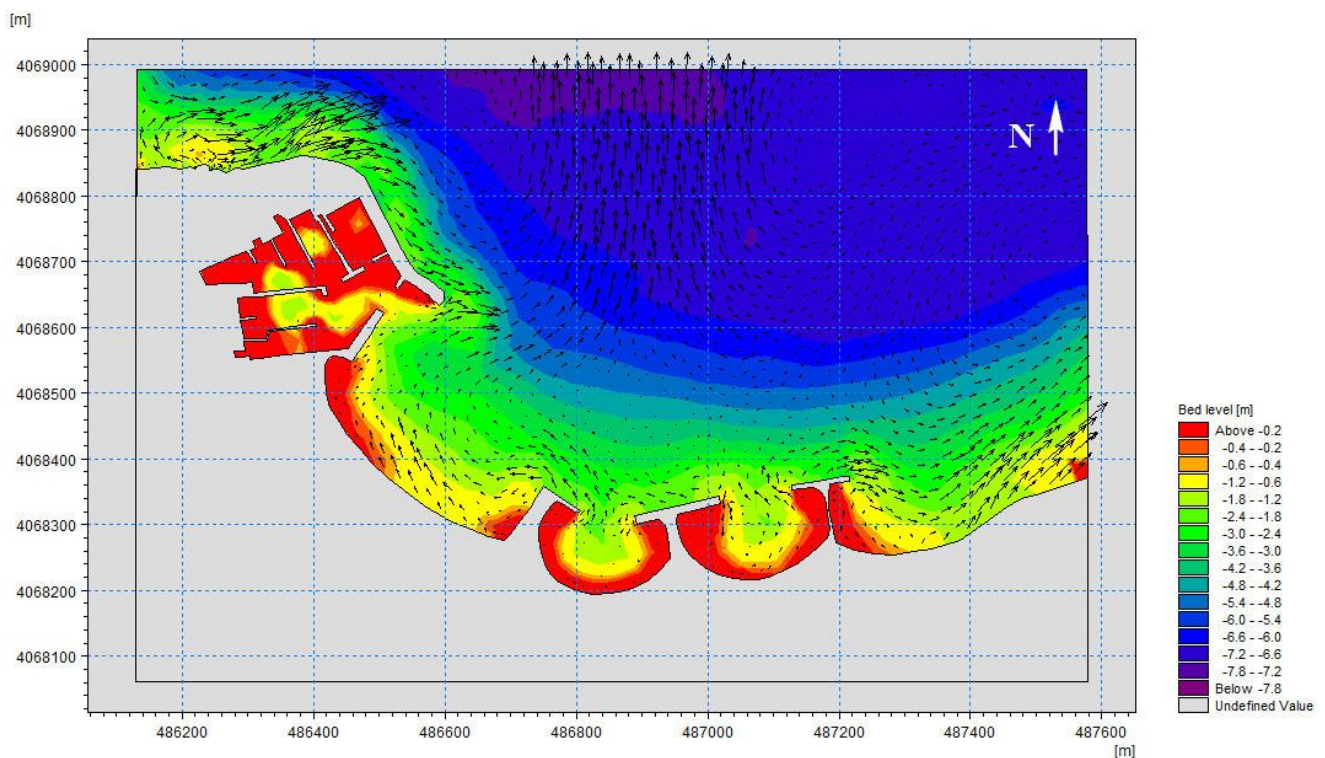
La *Figure 35* représente la direction et vitesse des courants générées par la réfraction de la houle Nord-Ouest. Pour les champs des courants, on constate au niveau de la plage Ouest et au voisinage du port une circulation identique à celle constatée précédemment, sauf que le gradient de vitesse est assez faible par rapport aux champs des courants pour la direction Nord (360°), et qui varie entre 0.32 m/s et 0.7 m/s. Par contre au niveau des ouvrages de protection on relève une circulation tourbillonnaire intense, avec des vitesses allant jusqu'à 0.6 m/s, ce qui est en accord avec la propagation de la houle (SW) de direction Nord-Ouest qui sont orientées à l'est. Lorsqu'on se déplace vers l'Est, ce gradient devient de plus en plus important, à peu près d'environ 0.72 m/s, à cause que cette partie du rivage est exposée frontalement à l'action de la houle de direction Nord-Ouest. La vitesse des courants est maximale au-delà de l'isobathe -4m. Le reste de la zone et au-dessus de ces ouvrages, les champs de courant se manifestent avec un gradient de vitesse relativement faible d'environ de 0.08 m/s à 0.16 m/s.

#### 4.4. La modélisation du transport sédimentaire avec le modèle ST.

Dans le cadre de notre projet, la modélisation du transport sédimentaire a été réalisée en utilisant le module MIKE 21/3 Coupled Model FM, qui est un modèle numérique développé par DHI. Il offre un couplage entre le modèle hydrodynamique MIKE21-HD avec le modèle de réfraction de vague MIKE21-SW et le modèle de transport de sable MIKE21-ST.

Après avoir introduire les paramètres de chaque modèle, une simulation a été effectuée des trois modèles en même temps pour avoir les données de la propagation de la houle et des courants directement des modèles SW et HD.

Le résultat obtenu sont les suivantes :

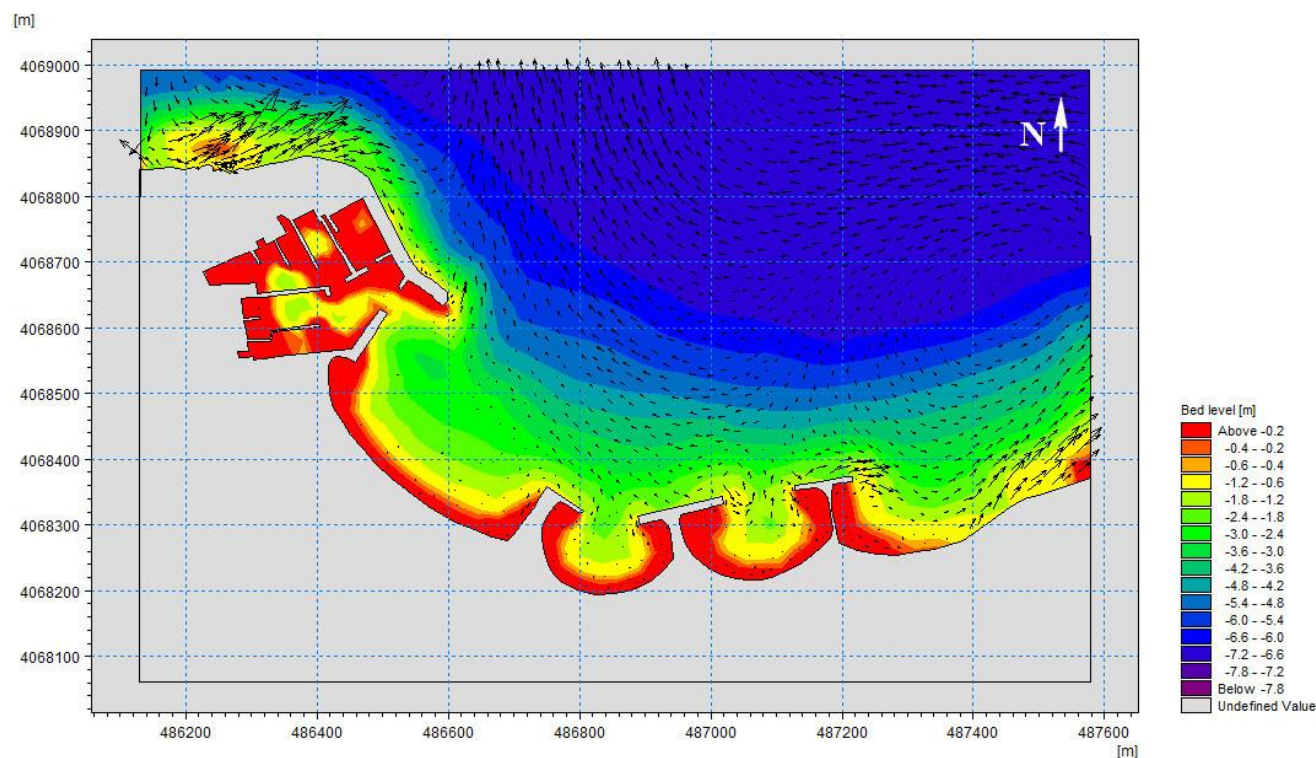


**Figure 36 : Transport sédimentaire pour 360°**

La Figure 36 représente le transport sédimentaire engendré par la houle et les courants qui proviennent du Nord. La direction des flèches représente la direction du transport sédimentaire et la longueur des flèches représente l'intensité du transit sédimentaire.

Le transit sédimentaire dans la zone d'étude reflète l'activité hydrodynamique observée dans les champs des courants. Les zones centrales caractérisent une grande capacité au transport vers le large à condition, bien sûr, que les quantités de sable suffisantes soient disponibles et cela du au courants de retours. Au voisinage du port et dans les zones abritées par les ouvrages, on observe une capacité de transport moins considérable du au faible agitation et aux vitesses faible des courants.

On relève aussi des moyennes perturbations juste au-dessus des ouvrages de protection Est, au niveau de la plage et la jetée principale, avec aussi une capacité de transport solide considérables. Alors que près de la passe d'entrée au port les perturbations sont négligeables.

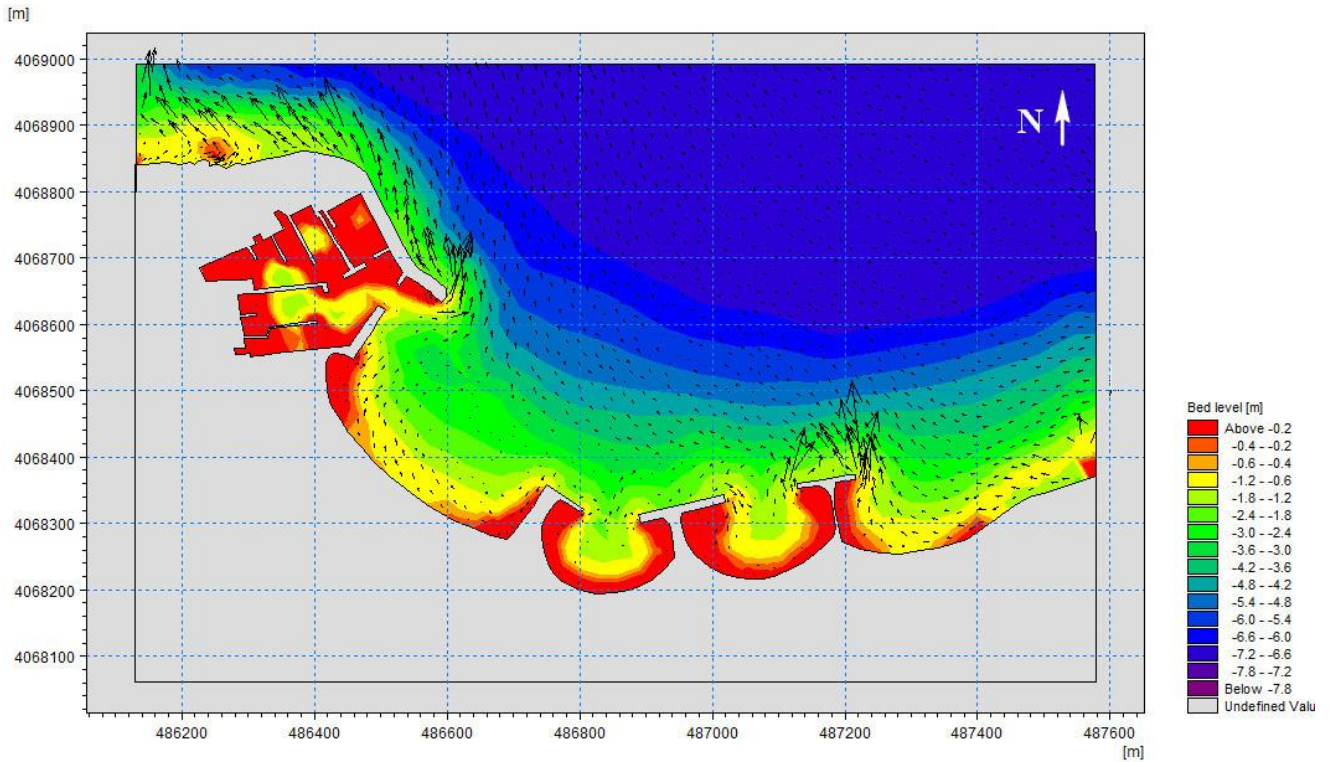


**Figure 37 : Transport sédimentaire pour 315°**

La Figure 37 représente le transport sédimentaire engendré par la houle et les courants qui proviennent du Nord-Ouest. La direction des flèches représente la direction du transport sédimentaire et la longueur des flèches représente l'intensité du transit sédimentaire.

Le transit sédimentaire dans la zone d'étude reflète l'activité hydrodynamique observée dans les champs des courants. Ce qui nous amène à conclure que la capacité de transport est assez faible, au niveau de la plage Ouest et du port, avec une capacité de transport négligeable ce qui favorise la formation d'une zone calme avec une plage sableuse, à condition, bien sûr, que les quantités de sable suffisantes soient disponibles.

Cette capacité augmente progressivement au niveau des ouvrages et surtout dans la partie Est exposée qui sont représentées par des vecteurs concentrés sur la carte, traduisant une capacité de transport forte, presque le double de la zone abritée. Ce flux sédimentaire provoque une érosion importante de la partie Est (zone de Moritti).



**Figure 38 : Transport sédimentaire pour 45°**

La Figure 38 représente le transport sédimentaire engendré par la houle et les courants qui proviennent du Nord-Est. La direction des flèches représente la direction du transport sédimentaire et la longueur des flèches représente l'intensité du transit sédimentaire.

Le transit sédimentaire dans la zone d'étude reflète l'activité hydrodynamique observée dans les champs des courants. Sur le plan sédimentologique, on constate la présence de zone de fort transit sédimentaire à l'Est des épis, au niveau de la jetée principale du port, traduisant des capacités de transport solide importante, et quand on s'éloigne de cette qui connaît une forte agitation hydrodynamique, cette capacité diminue graduellement suivant les vitesses des courants pour atteindre des faibles valeurs au niveau de la zone au-dessus l'hôtel d'El Riad, notant aussi que cette gamme de capacité caractérise la zone au-dessus des ouvrages de protection, la plage Est, la passe d'entrée du port et face à la jetée principale. Cela explique la formation de la plage sableuse dans la zone Ouest.

*Conclusion*



La présente étude intitulée « Modélisation des processus hydrosédimentaires de la plage de Sidi Fredj », elle est consacrée à l'étude et au diagnostic de l'état de la cote et des transports sédimentaires dans la zone d'étude.

L'étude granulo-sédimentaire réalisée sur la base de données expérimentales a permis la cartographie des caractéristiques granulométriques de la zone d'étude et cela dans les deux parties ; terrestre et marine.

L'étude bathymétrique et hydro-sédimentaire basée sur des simulations numériques sur logiciel Mike 21 nous a conduit au résultats :

- L'étude bathymétrique indique la présence de petites fosses et de barres d'avant cote. Au niveau de notre zone d'étude on remarque l'influence des infrastructures sur la morphologie sous-marine, cette dernière témoigne d'une mobilité relativement importante de ces fonds sous l'action hydrodynamique.

- La modélisation de la réfraction de la houle dans notre zone d'étude pour 03 directions (une direction approximativement perpendiculaire à la côte ( $360^{\circ}\text{N}$ ), une direction de houle à incidence oblique ( $45^{\circ}\text{N}$ ), une direction de ( $315^{\circ}\text{N}$ ) qui est plus au moins énergétique) à cause de la construction du port. Les houles proviennent des secteurs Nord et Nord-Est ont une influence importante sur la plage de Sidi-Fredj comparée aux autres directions qui ont une influence moins remarquable.

- La modélisation des champs de courants générés par la houle nous a renseigné sur la distribution des courants sur notre zone d'étude ainsi que leurs intensités et leurs vitesses.

- La modélisation du transport sédimentaire nous a permis d'identifier les zones d'accumulation des sédiments et les zones d'érosion. Le transit sédimentaire dans cette zone est dû principalement aux actions suivantes :

1. L'action des houles provoque un transit littoral d'Est vers l'Ouest, créant ainsi une zone d'engraissement à l'abri de la jetée Est du port de Sidi-Fredj. En effet les houles d'été qui proviennent de Nord-Est engendre un courant de dérive Est-Ouest c'est-à-dire vers le port provoquant ainsi une accumulation dans cette zone. En saison hivernale, la prédominance des houles du secteur Nord-Ouest engendre une dérive littorale Ouest-est et de forts courants de retour qui charrient les sédiments vers le large. Ces courants touchent

beaucoup plus la zone de Moretti que la zone située entre l'hôtel El Riad et la jetée sud du port de Sidi-Fredj.

2. La construction du port de Sidi-Fredj a entraîné un changement de l'angle d'approche de la houle dominante NO, ce qui a accélère la dérive littorale devant El Minzah, El Riad et Moretti, provoquant ainsi une zone d'érosion irréversible. Le sable arraché est charrié vers l'Est avant qu'il soit transporté vers le large par des courants de retour.

En continuation de ce travail ; une modélisation de la cinématique du trait de côte de la plage de Sidi Fredj autrement dit l'étude de l'évolution spatio-temporelle de la ligne de rivage dans le but de parvenir à l'identification et la description des taux nets et les zones d'érosion et d'accrétion tout le long de ce linéaire côtier sera traiter dans la partie Master relative à ce sujet de mémoire par Mr ABDELLAOUI Aimen.

En ce qui concerne les méthodes de protection de la plage de Sidi Fredj des aménagements lourds (Epis) ont été déjà réalisés mais vue que ces ouvrages n'ont pas répondu aux résultats escomptés une nouvelle étude semble nécessaire qui est la valorisation des résultats de l'étude hydro sédimentaires par une analyse des solutions de protections, cela fera l'objet du deuxième master qui sera réalisé par Mr BENBETKA Youcef.

# ***Bibliographie***

# Bibliographie

- AHFIR & MEZIANE, 2016. *Memoire fin d'étude: modélisation numérique de la cinématique du trait de côte et la dynamique sédimentaire des plages sableuses (Oran, Bou-Ismaïl, Alger, Bejaia, Skikda) Cas d'étude : Sidi Fredj*, Alger: ENSSMAL.
- AMGHAR, L. & SAHRAOUI, E., 2005. *Etude géologique et géotechnique d'un projet de complexe hôtelier à Staoueli (Alger)*, Alger: s.n.
- BEAUCHAMP, J., 2005. *COURS DE SEDIMENTOLOGIE*. [En ligne]  
Available at: <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/cours-sed/sed-7.htm>
- BEER, T., 1997. *Environmental oceanography*. London: CRC press.
- BELLAHSENE, Y. & MESSAOUDI, S., 2005. *Etude bathymétrique, sédimentologique et pollution par les métaux lourds de la baie d'El Djamila*, s.l.: s.n.
- BENALLAL & OURABIA, K., 1989. *Etude hydrogéologique et géotechnique de la zone côtière de Staoueli-Sidi Fredj (Ouest Algérois)*, Alger: s.n.
- BIRD, E., 1985. *Coastal changes, a global review*. London: Wiley. Chichester.: s.n.
- BLANC, J.-J., 1971. *Mouvements de la mer et notes de sédimentologie littorale*. s.l.:Laboratoire de géologie de Luminy.
- BOUTIBA, 1996. *Etude en vraie grandeur du mode de fonctionnement des ouvrages de protection*, Algiers: ENSSMAL.
- CASTELLE, B., 2004. *Modélisation de l'hydrodynamique sédimentaire au-dessus des barres sableuses*, Bordeaux: s.n.
- COOK, D., 1970. The occurrence and geologic work of rip currents off southern California. Dans: *Marine Geology*. s.l.:s.n., pp. 173-186.
- COURTAUD, J., 2000. *Dynamiques geomorphologiques et risques littoraux cas du tombolo*, Marseille: s.n.
- DE VRIEND, H., 1991. *Large-scale coastal evolution concept*. New York: ASCE.
- DEGOUTTE, G., 2012. *Diagnostic, aménagement et gestion des rivières : Hydraulique et morphologie fluviales appliquées*. 2eme éd. s.l.:Tec et Doc - Lavoisier.
- DEIGAARD, R., 1992. *Mechanics of coastal sediment transport*. s.l.:World Scientific Publishing Co Inc.
- DESMAZES, F., 2004. *Caractérisation des barres sableuses d'une plage de la côte Aquitaine : exemple de la plage du truc vert*, France: s.n.
- GLAGEAUD, 1932. *Etude géologique de la région littorale de la province d'Alger*, Alger: s.n.
- GLANGEAUD, L. et al., 1952. *Histoire géologique de la province d'Alger. publ. XIX ème CGI. Monogr. Région, 1ère sér. Algérie. n° 25*.
- GRIMES, S., 2003. *Plan d'action national pour protection des sites sensibles naturels marins du secteur Cap Djinet au Mont Chenoua*, Alger: s.n.
- HARDISTY, J., 1994. *Beach and Nearshore sediment Transport*. Oxford: lackwell Scientific Publications.

- INMAN, D., TAIT, R. & NORDSTROM, C., 1971. Mixing in the surf zone. *Journal of Geophysical Research* 76 (C15).
- KHALDI, N., 2015. *Modélisation de l'hydrodynamique sédimentaire soumise*, Delly Brahim: s.n.
- KOMEN, et al., 1996. *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. UK: Cambridge University Press.
- KROON, A., 1994. *Sediment transport and morphodynamics of the beach and nearshore zone, near Egmond*, Netherlands: s.n.
- LEVOY, F., 2000. *Interaction dune-plage : dynamique éolienne et application aux aménagements dunaires*, France: Colloque Génie Civil - Génie côtier.
- LEYVA, S., 2005. *Coastal Processes Lesson*. [En ligne]  
Available at: [http://geophile.net/Lessons/coasts/coasts\\_02.html](http://geophile.net/Lessons/coasts/coasts_02.html)
- LOSSON & CORBONNOIS, 2006. Interprétation paléoclimatique des remplissages endokarstiques de la vallée de la Moselle à Pierre-la-Treiche.
- MEZOUAR, K., 2009. *Etude comparative entre les méthodes de protection des deux littoraux algérien et roumain*, Roumanie: s.n.
- PASKOFF, R., 1998. *Les littoraux : impact des aménagements sur leur évolution*. 3rd éd. paris: Armand Colin.
- SHOM, s.d. *Glossaire sur les courants de marée*. [En ligne]  
Available at: <http://www.shom.fr/les-activites/activites-scientifiques/maree-et-courants/les-courants/glossaire-courants-de-maree/>
- THAN, V. V., 2015. *Modélisation d'érosion côtière : application à la partie ouest du tombolo de Giens*, MARSEILLE: s.n.
- TOURDIAT & CHEVALIER, 1998. [En ligne]  
Available at: [hmf.enseiht.fr/travaux/CD9598/travaux/optsee/hym/nome55/hydromar/chetou/p3.htm](http://hmf.enseiht.fr/travaux/CD9598/travaux/optsee/hym/nome55/hydromar/chetou/p3.htm)
- VAN RIJN, L., 1989. Handbook Sediment Transport by Currents and Waves. *Delft Hydraulics*, p. 203-260.
- VAN RIJN, L., 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. *Aqua Publications*, p. 34-44.
- WINDFINDER, s.d. *Windfinder - wind, wave & weather reports, forecasts & statistics*. [En ligne]  
Available at: <https://www.windfinder.com/#12/36.7592/2.8293>
- WRIGHT, L. & SHORT, A., 1977. *Morphodynamics of surf zones and beaches*. Canada: Marine Geology.
- ZAKI; YOUNES; RAAD; YOUNES, 2003. *Modélisation de la houle au port de Beyrouth*, Beyrouth Liban: s.n.
- ZEMENZER, 2004. *Ensablement du port par transport sédimentaire simulation et application du modèle de Gao et Collins (1994) au port de Sidi Fredj*. Algiers: ENSSMAL.

# **Annexes**

## Annexes

**Tableau 6 :** Les coordonnées géographiques des stations de prélèvement "terre ferme"

Station de prélèvement	X (métrique)	Y (métrique)	Station de prélèvement	X (métrique)	Y(métrique)
1	486424	4068536	11	486527	4068357
2	486412	4068535	12	486517	4068347
3	486425	4068498	13	486561	4068331
4	486413	4068496	14	486548	4068323
5	486437	4068467	15	486629	4068290
6	486426	4068463	16	486618	4068278
7	486452	4068434	17	486739	4068252
8	486449	4068426	18	486733	4068249
9	486494	4068391	19	486784	4068202
10	486480	4068378	20	486784	4068196

**Tableau 7 :** les coordonnées géographiques des stations de prélèvement "partie marine"

Station de prélèvement	X(métrique)	Y(métrique)	Station de prélèvement	X(métrique)	Y(métrique)
1	486753	4068703	15	486558	4068454
2	487025	4068746	16	486633	4068394
3	487096	4068683	17	486703	4068394
4	487147	4068682	18	486821	4068336
5	487199	4068522	19	486784	4068304
6	487186	4068462	20	486860	4068271
7	487077	4068489	21	486589	4068564
8	486997	4068518	22	486699	4068477
9	486875	4068574	23	486922	4068444
10	486645	4068708	24	486944	4068428
11	486646	4068627	25	487065	4068370
12	486522	4068615	26	487241	4068409
13	486547	4068658	27	487011	4068281
14	486479	4068529	28	487132	4068316

**Tableau 8 : Calcul des indices granulométriques( en mm) de la partie terrestre et interprétation des résultats**

N°	Mz	So	Ski	Grain moyen	Classement	Asymétrie
1	0.16334	1.2032	1.0575	sable très fin	Très bien classé	symétrie
2	0.17582	1.2606	0.86856	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
3	0.1818	1.2167	0.81765	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
4	0.18035	1.2158	0.82923	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
5	0.17545	1.2218	0.90884	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
6	0.17255	1.2075	0.91199	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
7	0.17318	1.2042	0.93417	sable très fin	Très bien classé	symétrie
8	0.18075	1.2262	0.8275	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
9	0.17161	1.1892	0.93047	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
10	0.19477	1.3143	0.74132	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie très positive vers les grossiers
11	0.31972	1.702	1.0342	sable fin	Très bien classé	symétrie
12	0.21275	1.4366	0.70644	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie très positive vers les grossiers
13	0.25802	1.6788	0.72522	sable fin	Très bien classé	Asymétrie très positive vers les grossiers
14	0.20451	1.3922	0.68961	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie très positive vers les grossiers
15	0.23765	1.6885	0.65561	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie très positive vers les grossiers
16	0.44562	2.0567	1.2161	sable fin	Très bien classé	Asymétrie négative vers les fines
17	0.16724	1.188	1.0043	sable très fin	Très bien classé	symétrie
18	0.18186	1.2356	0.80928	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie très positive vers les grossiers
19	0.18503	1.2058	0.85879	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
20	0.22883	1.4318	0.82458	sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers



**Tableau 9 : Calcul des indices granulométriques( en mm) de la partie marine et interprétation des résultats**

N°	Mz(mm)	So	Ski	Grain moyen	Classement	Asymétrie
1	0.13517	1.3052	1.1029	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie négative vers les fines
2	0.13592	1.3303	1.0999	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie négative vers les fines
3	0.14091	1.3011	1.1148	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie négative vers les fines
4	0.13814	1.2943	1.01	Sable très fin	Très bien classé	symétrie
5	0.14011	1.3006	1.0766	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie négative vers les fines
6	0.18171	1.4588	0.80251	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie très positive vers les grossiers
7	0.14772	1.2937	1.1548	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie négative vers les fines
8	0.13254	1.2934	1.0589	Sable très fin	Très bien classé	symétrie
9	0.12904	1.3359	1.0623	Sable très fin	Très bien classé	symétrie
10	0.14823	1.3013	1.1083	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie négative vers les fines
11	0.17768	1.3056	0.81623	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
12	0.18171	1.4588	0.80251	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie très positive vers les grossiers
13	0.16708	1.243	0.96156	Sable très fin	Très bien classé	symétrie
14	0.17877	1.2441	0.8567	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
15	0.1639	1.3972	0.85661	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
16	0.16759	1.325	0.88716	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
17	0.15352	1.2339	1.1203	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie négative vers les fines
18	0.25524	1.9006	0.68689	Sable fin	Très bien classé	Asymétrie très positive vers les grossiers
19	0.16282	1.2495	1.0286	Sable très fin	Très bien classé	symétrie
20	0.15211	1.2769	1.0109	Sable très fin	Très bien classé	symétrie
21	0.14576	1.3204	0.9904	Sable très fin	Très bien classé	symétrie
22	0.14901	1.4116	0.95606	Sable très fin	Très bien classé	symétrie
23	0.71059	2.2811	1.0718	Sable moyen	Très bien classé	Asymétrie négative vers les fines
24	0.15502	1.2799	0.95008	Sable très fin	Très bien classé	symétrie
25	0.16943	1.3248	0.86264	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie positive vers les grossiers
26	0.18131	1.4134	0.78325	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie très positive vers les grossiers
27	0.14821	1.2171	1.0374	Sable très fin	Très bien classé	symétrie
28	0.15167	1.2286	1.1413	Sable très fin	Très bien classé	Asymétrie négative vers les fines

**Tableau 10 : % des pélites pour la partie terrestre**

<b>Station</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>% des pélites</b>
<b>1</b>	486424	4068536	0.88
<b>2</b>	486412	4068535	0.87
<b>3</b>	486425	4068498	0.87
<b>4</b>	486413	4068496	0.88
<b>5</b>	486437	4068467	1.17
<b>6</b>	486426	4068463	0.71
<b>7</b>	486452	4068434	0.97
<b>8</b>	486449	4068426	0.38
<b>9</b>	486494	4068391	0.52
<b>10</b>	486480	4068378	0.12
<b>11</b>	486527	4068357	1.13
<b>12</b>	486517	4068347	1.47
<b>13</b>	486561	4068331	0.95
<b>14</b>	486548	4068323	0.43
<b>15</b>	486629	4068290	0.73
<b>16</b>	486618	4068278	0.45
<b>17</b>	486739	4068252	0.76
<b>18</b>	486733	4068249	0.36
<b>19</b>	486784	4068202	0.25
<b>20</b>	486784	4068196	0.21

**Tableau 11 : % des pélites pour la partie marine**

<b>Station</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>% des pélites</b>
1	486753	4068703	1.52
2	487025	4068746	1.89
3	487096	4068683	1.48
4	487147	4068682	1.81
5	487199	4068522	1.95
6	487186	4068462	1.59
7	487077	4068489	2.01
8	486997	4068518	2.08
9	486875	4068574	4.09
10	486645	4068708	1.95
11	486646	4068627	1.33
12	486522	4068615	1.35
13	486547	4068658	0.99
14	486479	4068529	1.63
15	486558	4068454	1.19
16	486633	4068394	0.62
17	486703	4068394	1.18
18	486821	4068336	2.09
19	486784	4068304	0.78
20	486860	4068271	2.27
21	486589	4068564	2.05
22	486699	4068477	0.67
23	486922	4068444	0.51
24	486944	4068428	1.03
25	487065	4068370	0.99
26	487241	4068409	1.23
27	487011	4068281	0.98
28	487132	4068316	1.19

**Tableau 12 : Configuration d'un fichier de simulation SW**

Paramètre d'entrée	Par défaut	Choisi	Remarques
« <b>Basic Equations</b> »	« <i>Spectral formulation</i> » = « <i>Fully spectral formulation</i> » « <i>Time formulation</i> » = « <i>Instationary formulation</i> »	« <i>Spectral formulation</i> » = « <i>Directionally decoupled parametric formulation</i> » « <i>Time formulation</i> » = « <i>Quasi stationary formulation</i> »	Le temps et la qualité des résultats indiquent que « <i>Fully spectral formulation</i> » était nécessaire
« <b>Time parameters</b> »	-	le pas de temps est de 9326 secondes	
« <b>Spectral Discretization</b> »	« <i>Frequency Discretization</i> » « <i>Discretization type</i> » = « <i>Equidistant</i> », « <i>Number of frequencies</i> » = 25, « <i>Minimum Frequency</i> » = 0,055hz « <i>Frequency interval</i> » = 0,02hz « <i>Directional Discretization</i> » « <i>Discretization type</i> » = « <i>360 degree rose</i> » « <i>Number of directions</i> » = 16	Par défaut	Efforts de calibration indiquent que l'augmentation du "number of directions" de 16 à 32 a marginalement affecté les résultats du modèle
« <b>Solution Technique</b> »	« <i>Geographical space discretization</i> » = « <i>Higher order</i> » « <i>Max. number of levels of transport</i> » = 32 « <i>Number of steps in source</i> » = 1 « <i>Min time step</i> » = 0,01 sec « <i>Max time step</i> » = 30 sec	Par défaut	aucun
« <b>Water Level Conditions</b> »	« <i>Specify water level variation</i> »	Données des marées comme constante dans le site d'étude.	aucun
« <b>Current Conditions</b> »	« <i>No current</i> »	Par défaut	Il est entendu que le courant ne devrait pas avoir un effet important sur la transformation de la hauteur des vagues du large à la côte.

Paramètre d'entrée	Par défaut	Choisi	Remarques
« <i>Wind Forcing</i> »	« <i>No wind</i> »	« <i>Wind, speed and direction</i> » constant	vitesse = 5 m/s et direction = 22°
« <i>Ice Coverage</i> »	« <i>No ice coverage</i> »	Par défaut	« <i>Ice Coverage</i> » n'est pas prévu dans la zone d'étude
« <i>Wave Breaking</i> »	« <i>Model</i> » = « <i>Wave breaking</i> » « <i>Type of gamma</i> » = « <i>Specified gamma</i> » « <i>Format</i> » = « <i>Constant</i> » « <i>Constant value</i> » = 0,8 « <i>Alpha</i> » = 1	Par défaut	aucun
« <i>Bottom Friction</i> »	« <i>Model</i> » = « <i>Nikuradse roughness, kn</i> » « <i>Format</i> » = « <i>Constant</i> » « <i>Constant value</i> » = 0,04 m	Par défaut	aucun
« <i>Initial Conditions</i> »	« <i>Type</i> » = « <i>Spectra from empirical formulas</i> » « <i>Type de formulas</i> » = « <i>JONSWAP fetch growth</i> » « <i>Maximum fetch</i> » = 100 000 m « <i>Max peak Frequency</i> » = 0,4Hz « <i>Max Philips constant</i> » = 081 « <i>Shape Parameter</i> » = 0,07 « <i>Shape Parameter</i> » = 0,09 « <i>Peakness parameter</i> » = 3,3	Par défaut	Efforts de calibration indiquent que la modification des « <i>initial conditions</i> » n'affecte que les premiers phénomènes de vagues.

**Tableau 13 : Configuration d'un fichier de simulation HD**

Paramètre d'entrée	Par défaut	Choisi	Remarques
« <b>Solution Technique</b> »	« <i>Time integration</i> » = « <i>Higher order</i> » « <i>Space discretization</i> » = « <i>Higher order</i> » « <i>Minimum time step</i> » = 0,01 (s) « <i>Maximum time step</i> » = 60 (s)	Par défaut	aucun
« <b>Time parameters</b> »	-	le pas de temps est de 9326 secondes	
« <b>Flood and dry</b> »	« <i>Drying depth</i> » = 0,005 (m) « <i>Flood depth</i> » = 0,05 (m) « <i>Wetting depth</i> » = 0,1 (m)	Par défaut	aucun
« <b>Density</b> »	« <i>Barotropic</i> »	Par défaut	aucun
« <b>Eddy Viscosity</b> »	« <i>No Eddy</i> »	Par défaut	Il est entendu que la viscosité ne devrait pas avoir un effet important sur le courant.
« <b>Bed Resistance</b> »	« <i>No bed resistance</i> »	« <i>Manning number</i> » = 24 (type constant)	
« <b>Coriolis Forcing</b> »	« <i>No Coriolis force</i> »	Par défaut	aucun
« <b>Wind Forcing</b> »	« <i>No wind</i> »	« <i>Wind, speed and direction</i> » constant	vitesse = 5 m/s et direction = 22°
« <b>Ice Coverage</b> »	« <i>No include coverage</i> »	Par défaut	« <i>Ice Coverage</i> » n'est pas prévu dans le site d'étude
« <b>Tidal Potential</b> »	« <i>No include tidal potential</i> »	Par défaut	aucun
« <b>Precipitation-Evaporation</b> »	« <i>No include precipitation-evaporation</i> »	Par défaut	aucun
« <b>Wave radiation</b> »	<i>Wave radiation from SW simulation</i>	Par défaut	aucun
« <b>Source</b> »	« <i>No sources</i> »	Par défaut	aucun
« <b>Initial Conditions</b> »	« <i>Surface elevation</i> » = 0	Par défaut	Efforts de calibration indiquent que la modification des « <i>initial conditions</i> » n'affecte que les premiers phénomènes de vagues, courants.
« <b>Decoupling</b> »	« <i>No decoupling</i> »	Par défaut	aucun
« <b>Boundry condition</b> »	-	« <i>Specified water level</i> »	Les données du niveau d'eau sont entrées pour Nord, Est et Ouest.

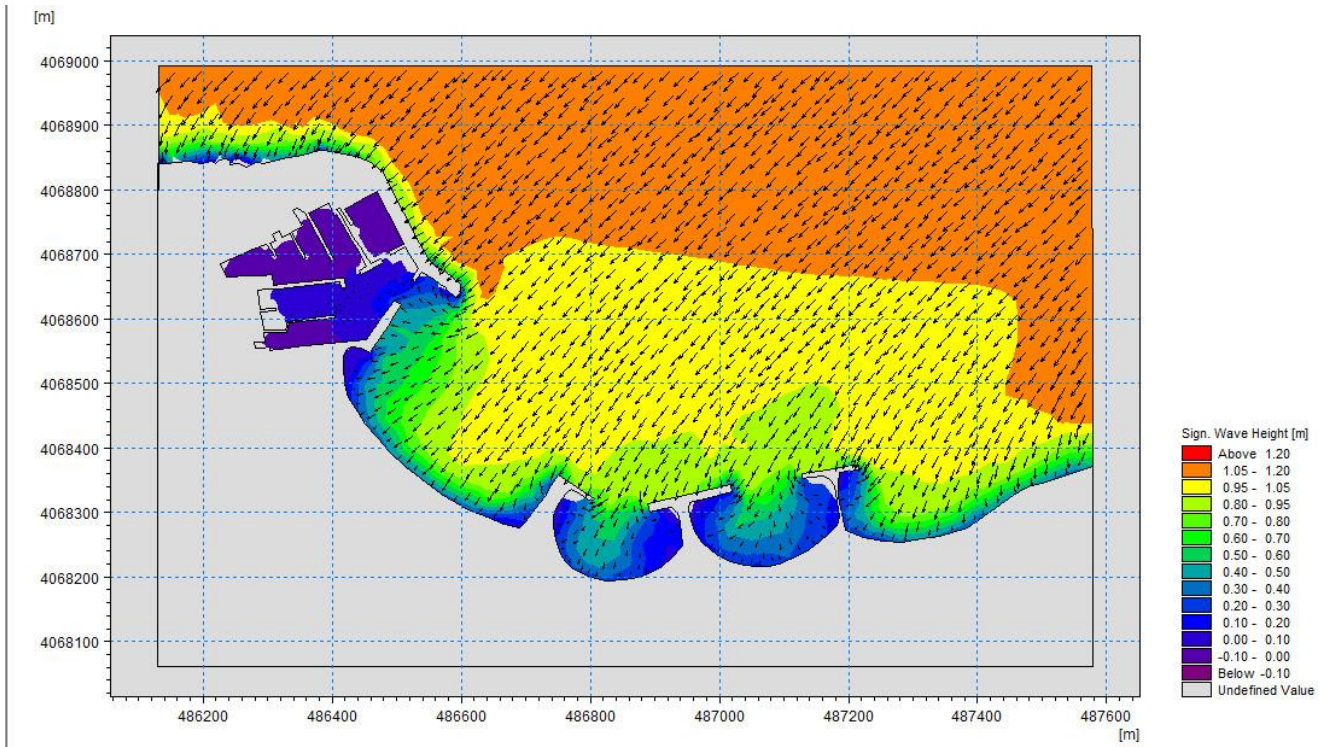


Figure 39 : Carte de réfraction de la houle pour 45° et T=6s

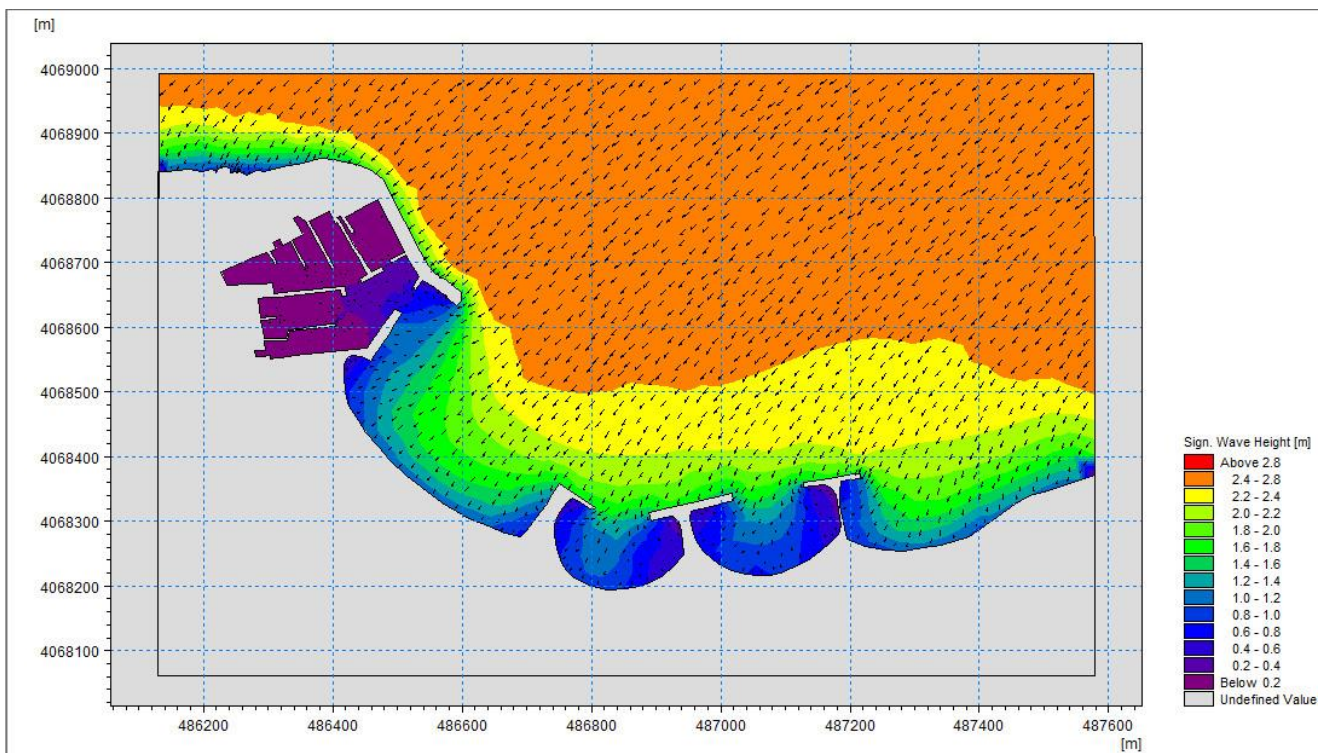


Figure 40 : Carte de réfraction de la houle pour 45° et T=8s

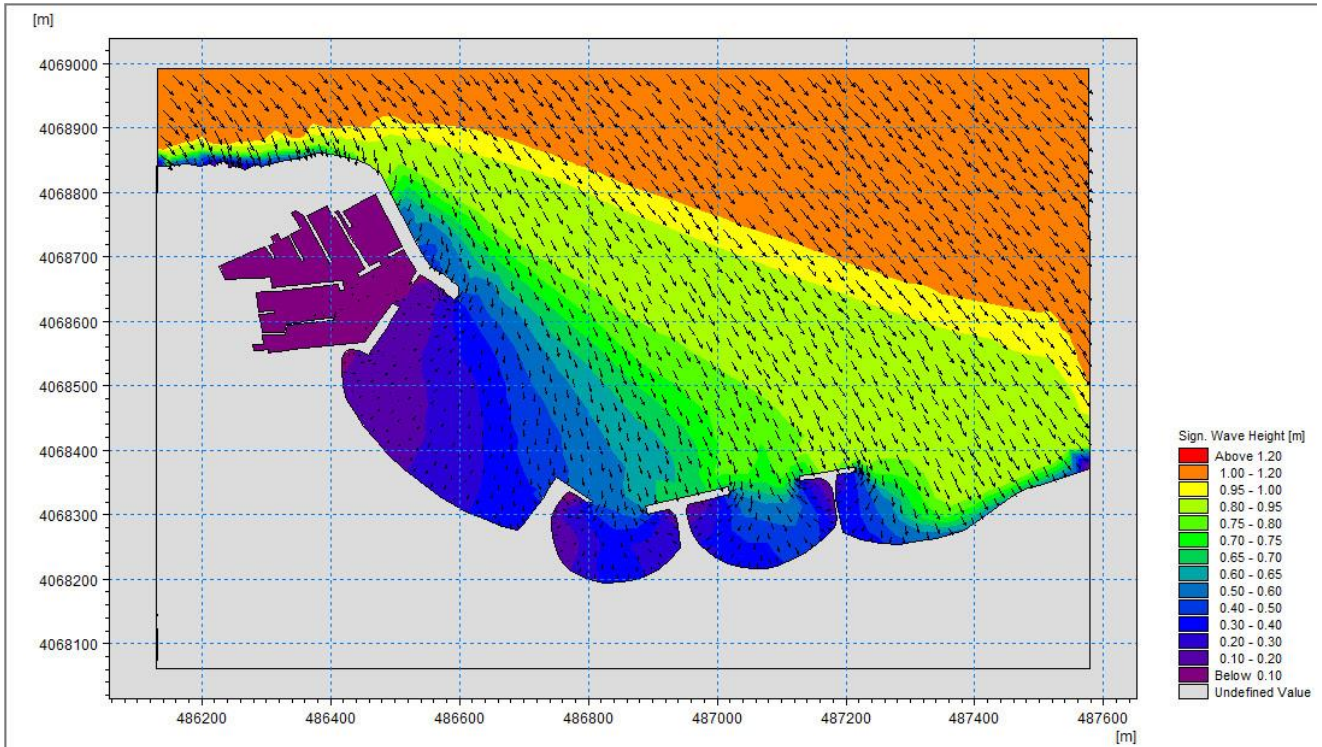


Figure 42 : Carte de réfraction de la houle pour 315 et  $T=6s$

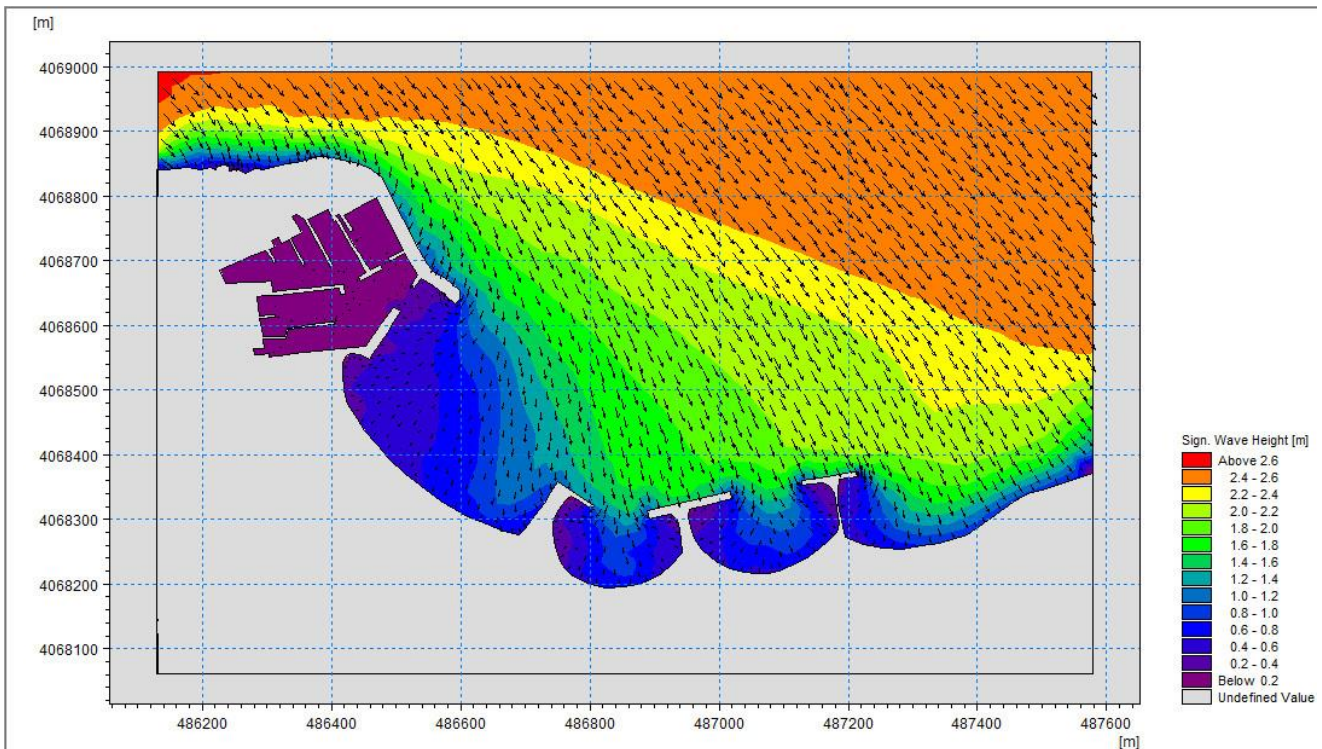
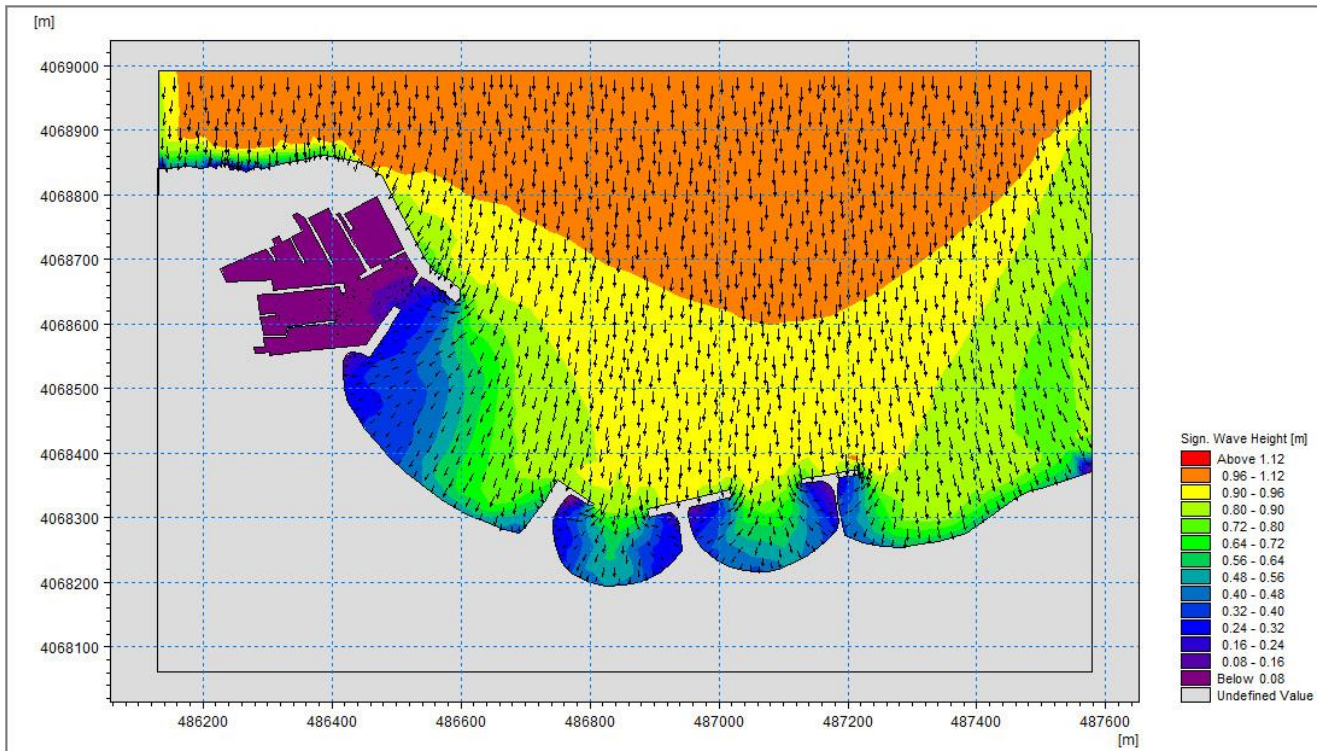
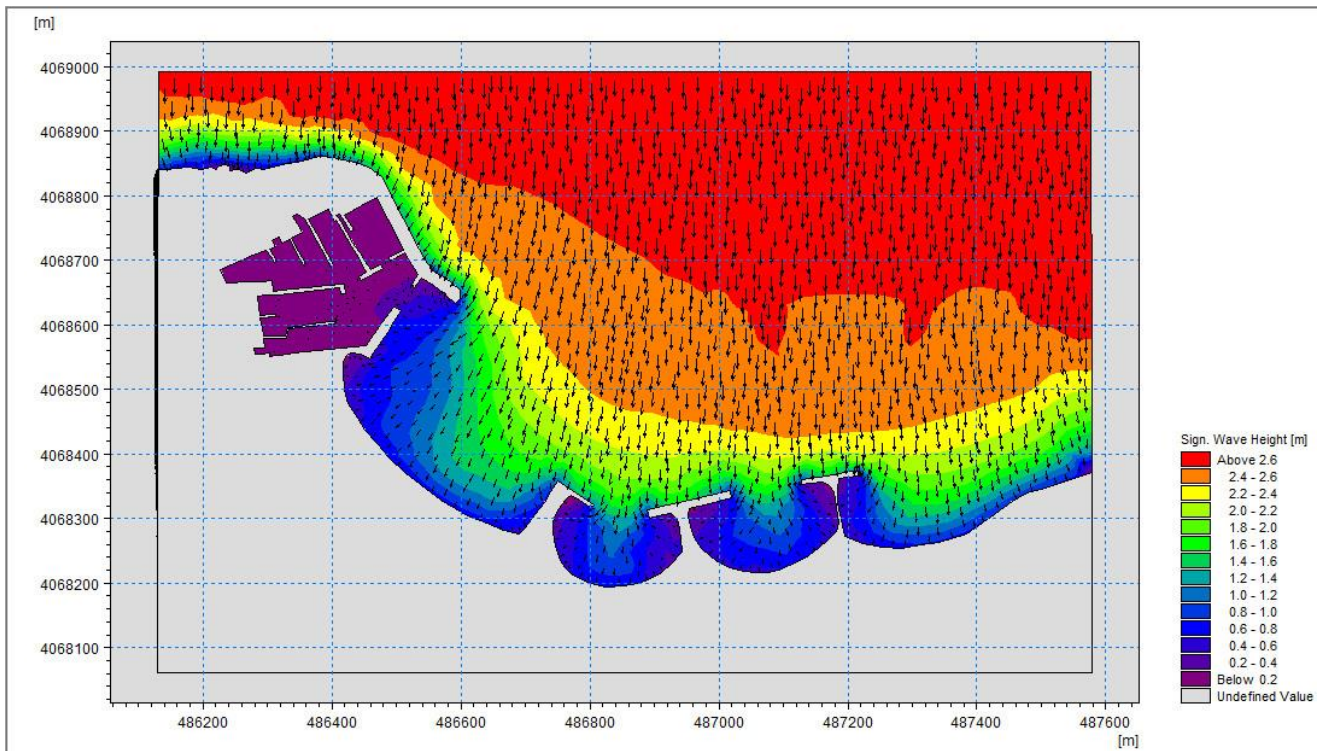


Figure 41 : Carte de réfraction de la houle pour 315° et  $T=8s$





*Figure 44 : Carte de réfraction de la houle pour 360° et  $T=6s$*



*Figure 43 : Carte de réfraction de la houle pour 360° et  $T=8s$*

## Modèle SW

**L'équations de base :** l'équation de base de ce modèle est l'équation de conservation de l'action de vague. (KOMEN, et al., 1996)

L'équation de conservation pour l'action des vagues peut être écrite comme :

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \dots\dots\dots (5)$$

**Avec :**  $N(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$  densité d'action,  $t$  le temps,  $\vec{x} = (x, y)$  les coordonnées cartésiennes,  $\vec{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$  Est la vitesse de propagation d'un groupe de vagues dans l'espace de phase à quatre dimensions, et  $S$  est le terme source pour l'équation de l'équilibre énergétique.  $\nabla$  est l'opérateur différentiel à quatre dimensions dans l'espace  $x, y, \sigma, \theta$ . Les quatre vitesses de propagation caractéristiques sont données par :

$$(c_x, c_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}_g + \vec{U} \dots\dots\dots (6)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[ \frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla_{\vec{x}} d \right] - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \dots\dots\dots (7)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right] \dots\dots\dots (8)$$

Ici,  $s$  est la coordonnée de l'espace dans la direction de l'onde  $\theta$ , et  $m$  est une coordonnée perpendiculaire à  $s$ .  $\nabla_x$  est l'opérateur différentiel bidimensionnel dans l'espace  $x, y$ .

Le terme source d'énergie,  $S$ , représente la superposition des fonctions sources décrivant divers phénomènes physiques.  $S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \dots\dots\dots (9)$

Ici  $S_{in}$  représente la génération d'énergie par le vent,  $S_{nl}$  est le transfert d'énergie dû à une interaction vague-vague non linéaire,  $S_d$  est la dissipation de l'énergie des vagues due à la couverture blanche des vagues,  $S_{bot}$  est la dissipation due au frottement avec fond et  $S_{surf}$  est la dissipation de l'énergie des vagues en raison de la rupture induite par la profondeur.

## Modèle HD

Les équations suivantes, la conservation de la masse et la dynamique intégrée à la verticale, décrivent les variations du débit et de l'eau :

Les symboles suivants sont utilisés dans ces équations :

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ & + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_q \\ & - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \quad \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ & + \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] + \Omega_p \\ & - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \quad \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

$h(x,y,t)$  : profondeur de l'eau (m).

$d(x,y,t)$  : variation temporelle de la profondeur de l'eau (m).

$\zeta(x,y,t)$  : l'élévation de surface (m).

$p, q(x,y,t)$  : densités de flux dans les directions x et y ( $m^3/s/m$ ).

$C(x,y)$  : coefficient de Chezy ( $m^{1/2}/s$ ).

$g$  : l'accélération de la pesanteur ( $m/s^2$ ).

$f(V)$  : facteur de frottement de vent.

$V, V_x, V_y(x,y,t)$  : vitesse et composantes du vent dans les directions x et y (m/s).

$\Omega(x,y)$  : parametre de Coriolis ( $s^{-1}$ ).

$P_a(x,y,t)$  : pression atmosphérique ( $kg/m/s^2$ ).

$\rho_w$  : masse volumique de l'eau (kg/m<sup>3</sup>).

$\tau_{xx}$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yy}$  : composantes de l'effort de cisaillement effective.

## **Modèle ST**

On est amené à résoudre cette équation de transport-diffusion pour calculer la concentration des sédiments transportés.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathit{div} \left( (\vec{U} + \vec{W}_s) C \right) = \mathit{div}(\gamma_t * \vec{\nabla} C) \dots\dots\dots (13)$$

**Avec :**

$\vec{U}$  : étant le champ de vitesse 3D ;

$\vec{W}_s$  : vecteur vitesse de chute des particules dirigé vers le bas ;

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

## Analyse granulométrique des échantillons prélevés sur terrains

Echantillon	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20
Tamis (µm)	Masse (g)																			
2000	0	0	0	0	0	0	0.03	0	0	0.01	0.05	0.05	0.04	0.07	0.41	1.1	0.44	0.1	0.05	0.08
1600	0.05	0	0	0.01	0	0	0.01	0	0	0.02	0.05	0.03	0.04	0.04	0.23	1.06	0.2	0.07	0.12	0.27
1400	0.03	0.01	0	0.01	0	0	0.01	0	0.01	0.02	0.05	0.02	0.06	0.02	0.25	1.47	0.11	0.07	0.07	0.2
1250	0.02	0.01	0.04	0.01	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03	0.07	0.06	0.11	0.06	0.35	2.16	0.06	0.04	0.03	0.09
1000	0.02	0.01	0.01	0.02	0.05	0.01	0.01	0.01	0.03	0.06	0.53	0.1	0.5	0.13	1.08	7.63	0.07	0.08	0.04	0.16
800	0.03	0.13	0.05	0.04	0.08	0.02	0.03	0.08	0.03	0.18	2.88	0.38	2.54	0.39	2.92	19.74	0.05	0.06	0.04	0.17
630	0.04	0.09	0.05	0.07	0.07	0.03	0.02	0.04	0.02	0.48	8.76	0.96	5.93	1.12	4.95	21.45	0.04	0.07	0.07	0.4
500	0.14	0.31	0.2	0.15	0.17	0.08	0.05	0.19	0.04	1.58	22.86	3.68	12.17	3.79	9.19	25.5	0.06	0.21	0.13	2.11
400	0.07	0.75	0.58	0.44	0.34	0.22	0.15	0.6	0.08	2.71	21.01	6.82	9.07	5.54	7.12	13.08	0.13	0.57	0.27	7.21
315	0.4	3.05	2.5	2.24	1.58	1.17	0.66	2.74	0.42	7.58	21.95	11.19	12.51	9.36	8.8	11.91	0.5	2.84	1.47	20.16
250	1.96	7.04	6.71	6.93	4.77	4.84	3.59	7.31	2.98	12.21	15.05	10.89	14.02	11.27	9.33	7.95	1.87	7.88	6.98	20.31
200	16.01	25.24	31.35	28.7	26.73	20.89	24.83	28.72	21.36	33.24	20.6	32.37	29.93	32.18	25.25	10.41	16.67	31.14	40.09	34.51
180	14.47	18.56	21.92	21.41	18.73	20.36	21.32	23.15	19.57	20.27	8.86	16.76	12.44	15.82	13.9	4.17	17.11	19.74	24.06	14.01
160	58.1	51.53	56.48	57.63	60.24	58.8	57.32	54.35	62.11	47.74	16.82	43.62	32.68	48.96	41.17	11.84	65.01	55.61	49.68	32.67
140	29.86	23.37	18.59	19.94	18.21	26.18	23.59	20.81	26.74	15.69	5.77	13.54	9.92	13.45	14.37	5.55	26.13	18.87	17.59	11.98
125	17.55	12.14	7.9	6.93	11.16	10.87	12.01	8.26	11.29	6.09	2.35	4.7	4.9	5.31	7.23	2.96	14.97	9.15	6.4	3.92
100	8.62	5.06	2.08	3.17	5.59	4.2	4.38	2.42	3.87	1.6	0.05	1.86	1.12	1.38	1.74	0.83	5.09	2.52	1.61	1.07
80	1.12	0.92	0.17	0.57	0.37	0.61	0.34	0.33	0.29	0.12	0.02	0.42	0.1	0.26	0.24	0.17	0.29	0.21	0.1	0.08
63	0.13	0.29	0.03	0.24	0.05	0.23	0.04	0.14	0.05	0.05	0.02	0.19	0.04	0.1	0.09	0.11	0.03	0.02	0.03	0.02
50	0.02	0.14	0.02	0.13	0.03	0.12	0.02	0.06	0.02	0.02	0.02	0.06	0.02	0.04	0.03	0.04	0.01	0.01	0.01	0.02
40	0.01	0.05	0.01	0.04	0.02	0.06	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0	0
Σ	148.14	148.58	148.69	148.46	148.15	148.7	148.45	149.24	148.93	149.72	147.79	147.72	148.15	149.31	148.66	149.15	148.85	149.27	148.84	149.44
Poids après séchage(g)	148.68	148.7	148.69	148.68	148.24	148.94	148.55	149.43	149.22	149.82	148.3	147.8	148.58	149.36	148.91	149.32	148.86	149.46	149.62	149.68
Taux de pétilite (%)	0.88	0.8666667	0.8733333	0.88	1.1733333	0.7066667	0.9666667	0.38	0.52	0.12	1.1333333	1.4666667	0.9466667	0.4266667	0.7266667	0.4533333	0.76	0.36	0.2533333	0.2133333

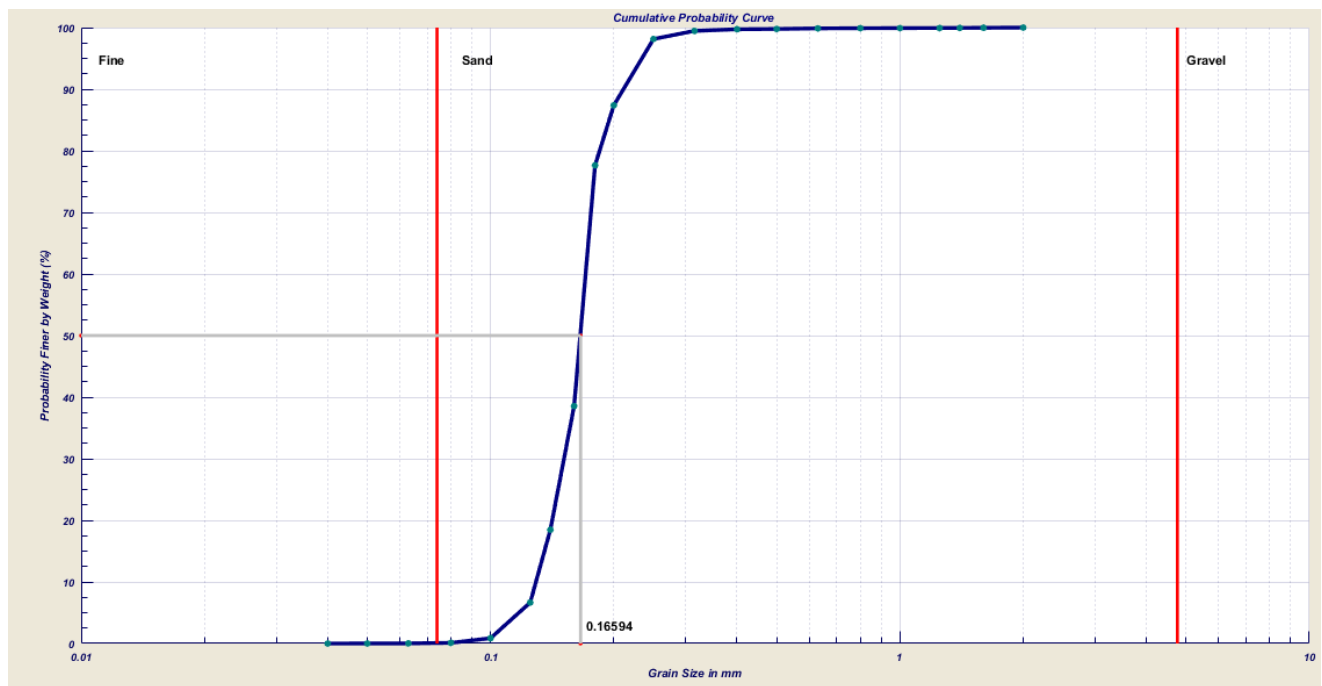
## Analyse granulométrique des échantillons prélevés sur terrains

Echantillon	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
<b>Tamis (µm)</b>	<b>Masse (g)</b>													
<b>3150</b>	0.12	0.18	0.44	0.03	0.12	0	0	0.03	0.17		0.02	0	0	0
<b>2000</b>	0.18	0.08	0.18	0.09	0	0.07	0.07	0.03	0.1	0.06	0.09	0.08	0.01	0.03
<b>1600</b>	0.08	0.02	0.12	0.08	0.04	0.17	0.03	0.1	0.09	0.01	0.04	0.04	0.04	0.03
<b>1400</b>	0.03	0.01	0.03	0.07	0.03	0.13	0.05	0.02	0.04	0.04	0.04	0.01	0.02	0.07
<b>1250</b>	0.04	0.01	0.02	0.09	0.03	0.11	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.08
<b>1000</b>	0.06	0.03	0.11	0.13	0.05	0.32	0.07	0.07	0.07	0.07	0.1	0.05	0.07	0.16
<b>800</b>	0.07	0.09	0.15	0.23	0.09	0.7	0.13	0.06	0.11	0.15	0.21	0.08	0.15	0.4
<b>630</b>	0.07	0.11	0.19	0.29	0.16	1.37	0.12	0.08	0.15	0.23	0.38	0.17	0.26	0.65
<b>500</b>	0.18	0.26	0.38	0.45	0.29	2.92	0.21	0.14	0.26	0.53	0.87	0.48	0.62	1.71
<b>400</b>	0.23	0.43	0.43	0.47	0.34	3.5	0.32	0.2	0.34	0.76	1.93	0.81	1.12	2.3
<b>315</b>	0.5	0.82	0.73	0.74	0.69	5.51	0.94	0.42	0.57	1.51	3.91	1.96	2.55	3.92
<b>250</b>	1.06	1.55	1.48	1.44	1.54	9.31	2.36	0.96	1.09	2.72	7.5	3.93	5.65	5.43
<b>200</b>	5.55	7.02	7.73	6.83	7.97	26.78	7.14	4.64	4.87	9.98	26.12	17.02	28.74	14.8
<b>180</b>	5	5.34	5.65	5.06	6.11	13.1	38.25	3.47	3.36	7.57	14.52	12.14	20.02	7.3
<b>160</b>	28.08	32.23	33.27	29.06	32.92	36.76	30.25	24.12	21.61	41.03	49.2	58.6	55.09	36.02
<b>140</b>	30.13	25.25	32.34	26.69	27.55	20.53	22.71	27.66	24.66	24.66	23.96	26.87	19.31	37.09
<b>125</b>	27.18	26.26	22.31	30.44	27.14	13.44	21.58	29.74	25.99	26.26	12.17	15.72	9.06	16.61
<b>100</b>	29.87	26.99	27.66	30.61	27.56	9.97	7.33	35.93	35.16	20.33	5.93	8.1	4.58	15.07
<b>80</b>	13.62	14.12	10.95	10.41	9.86	2.07	2.74	13.77	17.79	7.65	0.74	1.55	0.95	4.68
<b>63</b>	4.35	4.59	2.69	2.79	3.15	0.48	0.76	3.83	5.55	2.26	0.16	0.29	0.2	1.06
<b>50</b>	0.74	0.89	0.5	0.52	0.9	0.14	0.46	0.92	1.37	0.61	0.06	0.08	0.02	0.18
<b>40</b>	0.42	0.36	0.16	0.04	0.33	0.04		0.37	0.48	0.29	0.02	0.04	0.02	0.08
<b>Σ</b>	147.56	146.64	147.52	146.56	146.87	147.42		146.58	143.74	146.75	148	148.03	148.5	147.67
<b>Poids après séchage(g)</b>	147.72	147.16	147.78	147.29	147.07	147.61	146.99	146.88	143.86	147.08	148	147.97	148.52	147.55
<b>Taux de pétilite (%)</b>	1.52	1.89333333	1.48	1.80666667	1.95333333	1.59333333	2.00666667	2.08	4.09333333	1.94666667	1.33333333	1.35333333	0.98666667	1.63333333

Echantillon	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P26	P27	P28
<b>Tamis (µm)</b>	<b>Masse (g)</b>													
<b>3150</b>	0	0	0.34	0.01	0.76	0.06	0	0	5.78	0.1	0	0	0	0
<b>2000</b>	0.02	0.08	1.04	0	0.52	0.07	0.21	0.02	9.02	0.07	0.09	0.06	0.04	0.01
<b>1600</b>	0.03	0.04	0.66	0	0.39	0.05	0.09	0.02	6.12	0.07	0.04	0.05	0.02	0
<b>1400</b>	0.02	0.04	0.58	0.01	0.38	0.02	0.09	0.03	3.95	0.03	0.05	0.05	0.03	0
<b>1250</b>	0.05	0.02	0.73	0.01	0.38	0.03	0.07	0.07	5.71	0.07	0.04	0.06	0.01	0.01
<b>1000</b>	0.08	0.05	2.24	0.01	0.46	0.07	0.2	0.14	13.98	0.26	0.1	0.14	0.04	0.02
<b>800</b>	0.22	0.21	5.44	0.03	0.37	0.12	0.43	0.34	23.98	0.52	0.27	0.35	0.05	0.02
<b>630</b>	0.39	0.21	6.9	0.02	0.28	0.16	0.61	0.82	17.78	0.65	0.47	0.7	0.07	0.01
<b>500</b>	1.16	0.36	10.46	0.09	0.45	0.34	1.19	2.52	18.02	1.22	1.08	2.45	0.12	0.03
<b>400</b>	1.81	0.41	9.73	0.24	0.58	0.65	1.65	3.74	12.57	1.43	1.58	3.86	0.14	0.04
<b>315</b>	3.55	0.81	8.95	1.09	1.1	1.7	2.48	4.87	9.17	2.06	3.5	6.23	0.32	0.24
<b>250</b>	5.17	1.95	8.83	3.75	2.24	3.9	3.95	5.75	5.91	2.94	6.17	9.19	1.16	1.42
<b>200</b>	16.05	10.28	18.86	16.8	9.71	10.98	11.13	16.95	1.72	8.84	19.45	23.27	8.45	10.81
<b>180</b>	11.39	9	9.58	11.3	7.58	7	6.63	11.45	4.69	7.32	11.09	13.44	6.91	8.51
<b>160</b>	47.27	48.01	30.45	50.98	40.23	29.82	30.25	47.69	2.35	43.32	44.87	40.36	40.71	46.8
<b>140</b>	31.5	30.98	17.36	29.59	34.79	28.82	27.82	26.96		33.11	27.94	23.88	32.91	30.57
<b>125</b>	14.85	25.23	10.1	17.85	23.93	26.14	24.4	14.13	1.19	28.17	19.19	13.81	32.73	26.23
<b>100</b>	11.17	16.73	4.82	11.67	19.13	26.18	22.34	10.08	0.6	14.23	11.06	7.94	20.99	18.29
<b>80</b>	2.78	3.66	0.85	2.26	4.07	7.63	8.61	2.64	0.11	2.9	1.25	1.45	3.18	3.82
<b>63</b>	0.38	0.68	0.21	0.66	0.77	2.13	3.92	0.55		0.36	0.19	0.31	0.5	0.86
<b>50</b>	0.09	0.11	0.08	0.25	0.19	0.54	0.72	0.09		0.1	0.06	0.12	0.11	0.22
<b>40</b>	0.05	0.06	0.02	0.1	0.12	0.19	0.13	0.03		0.04	0.01	0.08	0.04	0.13
<b>Σ</b>	148.03	148.92	148.23	146.72	148.25	146.55	146.9	148.89		147.81	148.5	147.8	148.51	148.04
<b>Poids après séchage(g)</b>	148.22	149.07	148.23	146.87	148.83	146.6	146.92	148.99	149.23	148.46	148.52	148.15	148.53	148.22
<b>Taux de pépite (%)</b>	1.186667	0.62	1.18	2.086667	0.78	2.266667	2.053333	0.673333	0.513333	1.026667	0.986667	1.233333	0.98	1.186667

Exemple de résultats :

Courbe et indices granulométriques de l'échantillon 1 (partie terrestre)



8. Sieve Analysis - Results

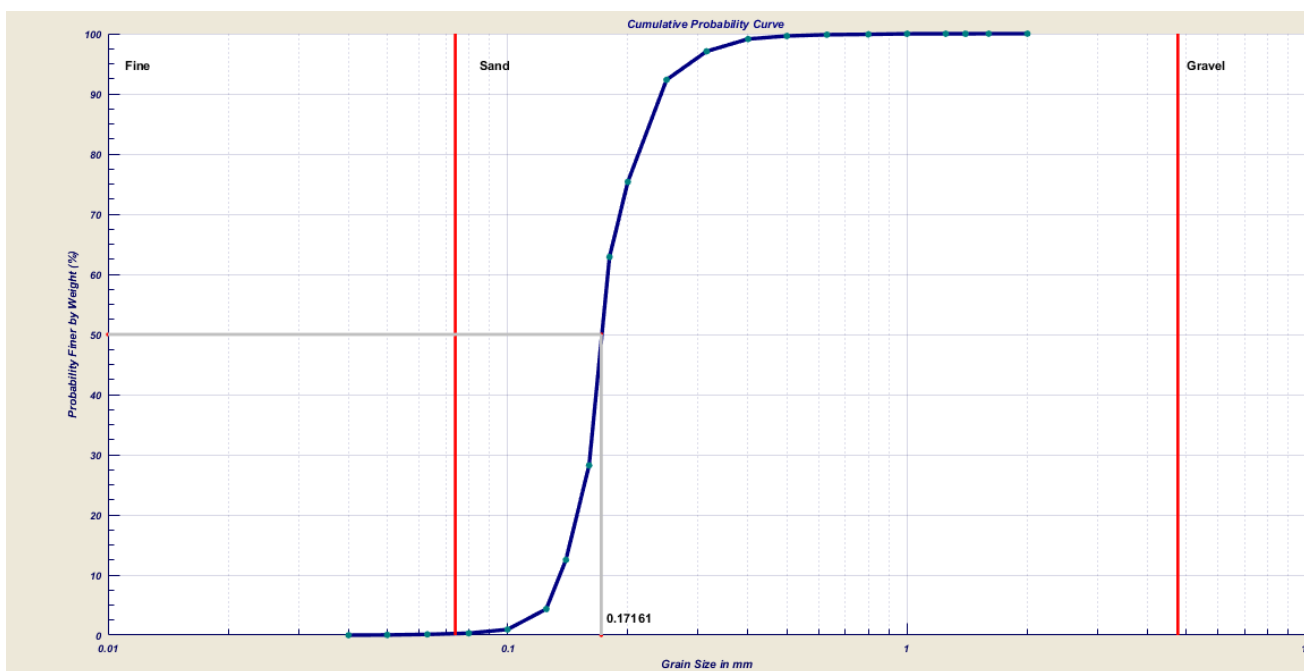
File Edit View Insert Tools Desktop Window Help

The main results of sieve analysis were:

- D 5 (mm) = 0.12134
- D 10 (mm) = 0.13075
- D 16 (mm) = 0.13742
- D 30 (mm) = 0.15259
- D 50 (mm) = 0.16594
- D 60 (mm) = 0.16957
- D 75 (mm) = 0.17772
- D 84 (mm) = 0.19109
- D 95 (mm) = 0.22449
- Mean Grain Size (mm) = 0.16334
- Standard Deviation 1.2032
- Skewness = 1.0575
- Kurtosis = 0.39386
- Coefficient of uniformity (Cc) = 1.0502
- Coefficient of curvature (Cu) = 1.2969
- Standard Deviation Classification = Very well sorted
- Skewness Classification = Near symmetrical
- Kurtosis Classification = Leptokurtic (peaked)
- ASTM Classification = Fine sand
- % of Gravel = 0
- % of Sand = 99.8924
- % of Fine = 0.10764
- Wentworth classification = Fine sand
- USCS classification = SP



Courbe et indices granulométriques de l'échantillon 2 (partie terrestre)

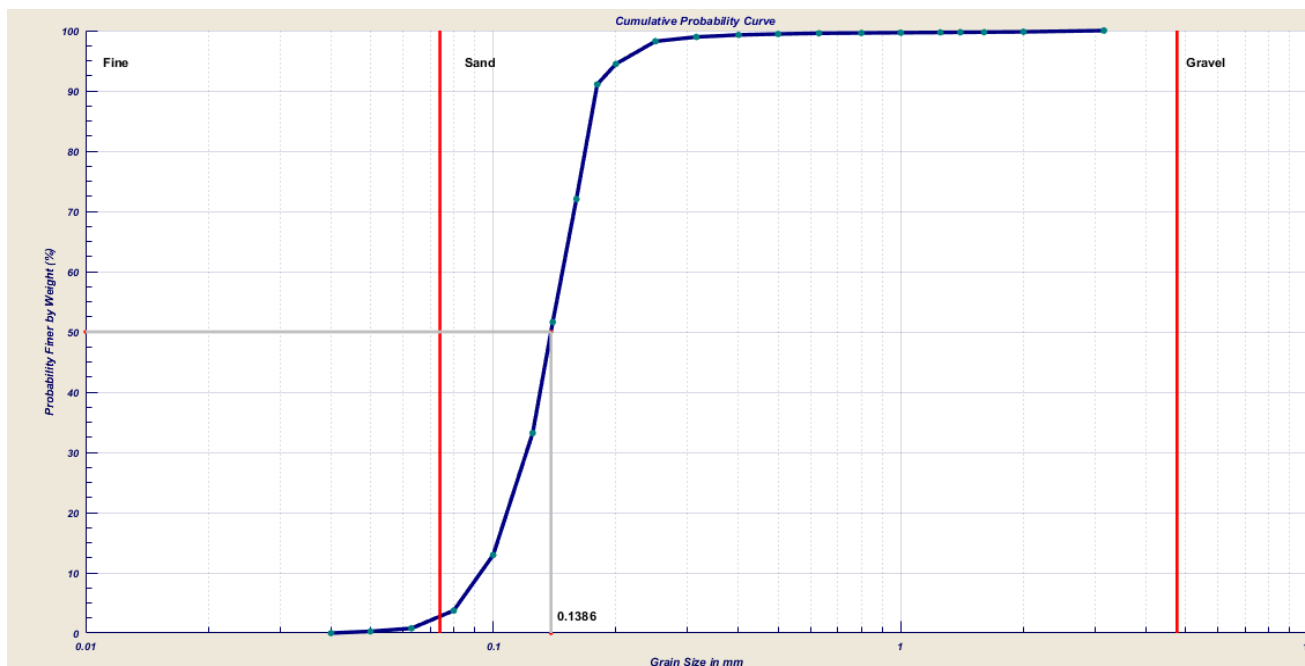


8. Sieve Analysis - Results

The main results of sieve analysis were:

- D 5 (mm) = 0.12698
- D 10 (mm) = 0.13649
- D 16 (mm) = 0.14526
- D 30 (mm) = 0.1614
- D 50 (mm) = 0.17161**
- D 60 (mm) = 0.17757
- D 75 (mm) = 0.19927
- D 84 (mm) = 0.21801
- D 95 (mm) = 0.27695
- Mean Grain Size (mm) = 0.17582**
- Standard Deviation 1.2605
- Skewness = 0.8687
- Kurtosis = 0.39555
- Coefficient of uniformity (Cc) = 1.0749
- Coefficient of curvature (Cu) = 1.301
- Standard Deviation Classification = Very well sorted
- Skewness Classification = Fine skewed
- Kurtosis Classification = Leptokurtic (peaked)
- ASTM Classification = Fine sand**
- % of Gravel = 0
- % of Sand = 99.6772
- % of Fine = 0.3228
- Wentworth classification = Fine sand**
- USCS classification = SP**

Courbe et indices granulométriques de l'échantillon 1 (partie marine)



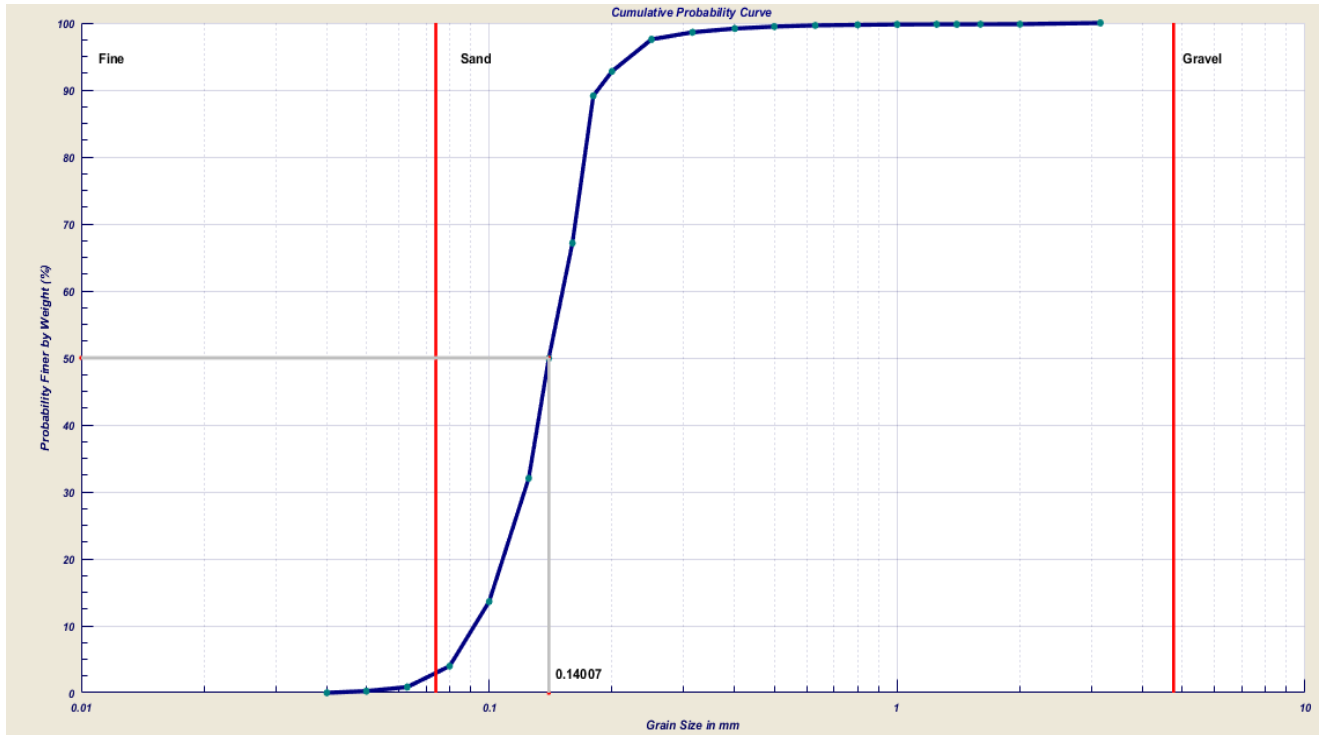
8. Sieve Analysis - Results

File Edit View Insert Tools Desktop Window Help

The main results of sieve analysis were:

- D 5 (mm) = 0.084002
- D 10 (mm) = 0.09512
- D 16 (mm) = 0.10471
- D 30 (mm) = 0.12179
- D 50 (mm) = 0.1386
- D 60 (mm) = 0.14786
- D 75 (mm) = 0.16261
- D 84 (mm) = 0.16949
- D 95 (mm) = 0.20414
- Mean Grain Size (mm) = 0.13499
- Standard Deviation 1.3079
- Skewness = 1.1066
- Kurtosis = 0.47035
- Coefficient of uniformity (Cc) = 1.0546
- Coefficient of curvature (Cu) = 1.5545
- Standard Deviation Classification = Very well sorted
- Skewness Classification = Coarse skewed
- Kurtosis Classification = Mesokurtic
- ASTM Classification = Fine sand
- % of Gravel = 0
- % of Sand = 96.2659
- % of Fine = 3.7341
- Wentworth classification = Fine sand
- USCS classification = SP

Courbe et indices granulométriques de l'échantillon 2 (partie marine)



8. Sieve Analysis - Results

File Edit View Insert Tools Desktop Window Help

The main results of sieve analysis were:

- D 5 (mm) = 0.083107
- D 10 (mm) = 0.094054
- D 16 (mm) = 0.10391
- D 30 (mm) = 0.12284
- D 50 (mm) = 0.14007
- D 60 (mm) = 0.15171
- D 75 (mm) = 0.16577
- D 84 (mm) = 0.17251
- D 95 (mm) = 0.21533
- Mean Grain Size (mm) = 0.13592
- Standard Deviation 1.3303
- Skewness = 1.0999
- Kurtosis = 0.46129
- Coefficient of uniformity (Cc) = 1.0575
- Coefficient of curvature (Cu) = 1.613
- Standard Deviation Classification = Very well sorted
- Skewness Classification = Coarse skewed
- Kurtosis Classification = Leptokurtic (peaked)
- ASTM Classification = Fine sand
- % of Gravel = 0
- % of Sand = 96.0175
- % of Fine = 3.9825
- Wentworth classification = Fine sand
- USCS classification = SP