

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

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



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme
d'Ingénieur en Sciences de la Mer

Option : AMENAGEMENT DU LITTORAL

Thème :

Contribution à la connaissance de la morphologie et de la dynamique
sédimentaire du littoral centre de l'Algérie (cas d'étude : Boumerdès,
Sidi Fredj et Hamdania)

Présenté par :

- Azzi Mohamed Imad Eddine
- Boukert Hachemi

Soutenu le 15/07/2017 devant le jury composé de :

| | | | |
|--------------------|-----------------------|---------|-----------|
| Mr BOUAICHA F. | Maître de conférences | ENSSMAL | Président |
| Mr MEZOUAR K. | Maître de conférences | ENSSMAL | Promoteur |
| Mr OTMANI H. | Maître- Assistante | ENSSMAL | Examineur |
| Mr GUERFI M. | Professeur | ENSSMAL | Examineur |
| Mme SALEM CHRIF Y. | Doctorante | ENSSMAL | Invitée |

Année universitaire : 2016-2017

REMERCIEMENT

Nous tenons tout d'abord à remercier grandement dieu tout puissant de nous avoir donné la santé, la patience et la volonté, pour réaliser ce modeste travail.

Nous tenons tout particulièrement à remercier Mr **Mezouar**, qui nous a encadré, soutenu, encouragé, et avec qui nous avons établi une relation de confiance.

Nous remercions, Maître Assistant A (ENSSMAL), qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence de ce jury.

Nos plus vifs remerciements à :

Mr, GUERFI, S Professeur (USTHB), on le remercie d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Mr OTMANI. H Maître Assistant A (ENSSMAL), on le remercie d'avoir accepté examiner notre travail.

Nous remercions aussi toutes les personnes qui ont contribué et participé de pré ou de loin à nos recherches et à l'élaboration de ce modeste mémoire.

Dédicace :

À mes chers parents

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.

Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

À mes chers frères (Hakim, Farouk et Chakib)

Je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

À mes amis

Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

Imad

À mes chers parents, pour leurs amours, leurs tendresses et leurs prières tout au long de mes études,

À toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

À tous mes amis pour leurs appuis, leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

Merci d'être toujours là pour moi.

Hachemi

LISTE DES FIGURES :

| | |
|---|-----------|
| Figure 1.1 : Représentation schématique de l'approche morphodynamique incluant les facteurs environnementaux et leur influence sur le système côtier. Les flèches indiquent le rapport entre les différents compartiments sans tenir compte de l'aspect temporel (COWELL&THOM, 1994) | 6 |
| Figure 1.2 : Composants d'un système morphodynamique côtier. (STEPANIAN, 2002)..... | 6 |
| Figure 1.3 : Répartition spatio-temporelle des facteurs climatiques, hydrodynamiques, Sédimentologique et anthropiques impliqués dans la morphodynamique des littoraux (d'après Fenster et al. 1993)..... | 8 |
| Figure 1.4 : Zonation du domaine côtier d'après Short (1999) et Wright et al. (1982), modifié..... | 10 |
| Figure 1.5 : Grandeurs caractéristiques des houles (Grasso, 2009)..... | 11 |
| Figure 1.6 : Modifications subies par les vagues à l'approche de la cote (d'après MICHAUD, 2011)..... | 12 |
| Figure 1.7 : Classification des différents types de transport en fonction de la taille des sédiments (D'après VAN RIJN, 1993B). | 15 |
| Figure 2.1 : Situation géographique du littoral centre de l'Algérie (ArcGis, Azzi et Boukert, 2017)..... | 18 |
| Figure 2.2 : Situation géographique de la plage Boumerdès(ArcGis, Azzi et Boukert, 2017)..... | 19 |
| Figure 2.3 :Situation géographique de la plage Est de Sidi Fredj (ArcGis, Azzi et Boukert, 2017)..... | 20 |
| Figure 2.4 : Situation géographique de la plage Hamdania(ArcGis, Azzi et Boukert, 2017)..... | 21 |
| Figure 2.5 : Carte géologique de la région de Boumerdès (Ficheur. E, 1985)..... | 22 |
| Figure 2.6 : Carte géologique régionale de la zone algéroise (INCT, 2016).)..... | 22 |
| Figure 2.7 : Esquisse morphologique du secteur Alger-Ténès (BOUTIBA, 2004).)..... | 24 |
| Figure 2.8 : Le réseau hydrographique régional dans la baie de Zemmouri (ANRH, 2014).)..... ;..... | 25 |
| Figure 2.9 : réseau hydrographique de la baie d'EL Djamila (Benallaoua, 2013).)..... ;..... | 28 |
| Figure 2.10 : Le réseau hydrographique local dans la plage de Hamdania(ArcGis, Azzi et Boukert, 2017). | 29 |
| Figure 2.11 :La rose des vents maximums, station de Dar El Beida (DHI Mike 21- Azzi et Boukert, 2017)... | 30 |
| Figure 2.12 :Spectre de vents maximums (direction et vitesse)..... | 31 |
| Figure 2.13 :La rose des vents moyens, station de Dar El Beida (DHI Mike 21- Azzi. Boukert, 2017)..... | 31 |
| Figure 2.14 :Spectre des vents moyens (direction et vitesse) | 32 |
| Figure 2.15 : La rose des houles, SSMO (DHI Mike 21- Azzi et Boukert, 2017)..... | 33 |
| Figure 3.1 : Evolution du trait de côte de la plage de Boumerdès selon différentes périodes entre 2008 et 2016..... | 38 |
| Figure 3.2 : Evolution de la ligne de côte de la plage de Boumerdès entre 2008 et 2016 et position des transects..... | 39 |
| Figure3.3 : Illustration du Mouvement net des rivages (NSM) de la plage de Boumerdès entre 2008 et 2016.. | 40 |

| | |
|---|-----------|
| Figure 3.4 : Représentation de la direction de l'évolution du trait de côte de la plage de Boumerdès entre 2008 et 2016..... | 41 |
| Figure 3.5 : représentation du rythme d'évolution du trait de côte de la plage de Boumerdès entre 2008 et 2016..... | 41 |
| Figure 3.6 : Vitesse d'évolution du trait de côte au niveau de la plage de Boumerdès entre 2008 et 2016..... | 43 |
| Figure 3.7 : Représentation de LRR selon chaque transect dans la plage de Boumerdès entre 2008 et 2016.... | 43 |
| Figure 3.8 : représentation graphique du taux de la régression linéaire avec son équation de certains transects de la plage de Boumerdès entre 2008, 2009, 2012, 2015 et 2016..... | 45 |
| Figure 3.9 : Analyse du taux d'évolution en surface entre 2008 et 2016..... | 46 |
| Figure 3.10 : Bilan sédimentaire de la plage de Boumerdès entre 2008 et 2016..... | 46 |
| Figure 3.11 : Evolution du trait de côte de la plage Est de Sidi Fredj selon différentes périodes entre 2002 et 2017..... | 47 |
| Figure 3.12 : Evolution de la ligne de côte de la plage Est de Sidi Fredj entre 2002 et 2017 et position des transects..... | 48 |
| Figure 3.13 : Illustration du Mouvement net des rivages (NSM) de la plage de Sidi Fredj entre 2002 et 2017... | 49 |
| Figure 3.14 : Représentation de la direction de l'évolution du trait de côte de la plage Est de Sidi Fredj entre 2002 et 2017..... | 50 |
| Figure 3.15 : représentation du rythme d'évolution du trait de côte de la plage de Boumerdès entre 2008 et 2016..... | 51 |
| Figure 3.16 : Evolution du trait de côte au niveau de la plage Est de Sidi Fredj entre 2002 et 2017..... | 51 |
| Figure 3.17 : représentation de LRR selon chaque transect dans la plage Est de Sidi Fredj entre 2002 et 2017. | 52 |
| Figure 3.18 : représentation graphique du taux de la régression linéaire avec son équation de certains transects de la plage Est de Sidi Fredj entre 2002 et 2017..... | 54 |
| Figure 3.19 : analyse du taux d'évolution en surface entre 2002 et 2017..... | 55 |
| Figure 3.20 : Bilan sédimentaire de la plage Est de Sidi Fredj entre 2002 et 2017..... | 55 |
| Figure 3.21 : Evolution du trait de côte de la plage de Hamdania selon différentes périodes entre 2009 et 2016..... | 56 |
| Figure 3.22 : Evolution de la ligne de côte de la plage de Hamdania entre 2009 et 2016 et position des transects..... | 57 |
| Figure 3.23 : Illustration du Mouvement net des rivages (NSM) de la plage de Hamdania entre 2009 et 2016. | 58 |
| Figure 3.24 : Représentation de la direction de l'évolution du trait de côte de la plage de Hamdania entre 2009 et 2016..... | 58 |
| Figure 3.25 : Illustration du rythme d'évolution du trait de côte de la plage de Hamdania entre 2009 et 2016.... | 51 |
| Figure 3.26 : Evolution du trait de côte au niveau de la plage de Hamdania entre 2009 et 2016..... | 60 |
| Figure 3.27 : Représentation de LRR selon chaque transect dans la plage de Hamdania entre 2009 et 2016... | 61 |

| | |
|--|-----------|
| Figure3.28 : représentation graphique du taux de la régression linéaire avec son équation de certains transects de la plage de Hamdania entre 2009, 2012, 2013 et 2016..... | 62 |
| Figure 3.29 : analyse de taux d'évolution en surface entre 2009 et 2016..... | 63 |
| Figure3.30 : bilan sédimentaire de la plage de Hamdania entre 2009 et 2016..... | 63 |
| Figure 4.1 : L'interface de Mike Zero..... | 67 |
| Figure 4.2 : l'approche méthodologique adoptée pour de la modélisation intégrée du transport de sédiments non cohésifs (Azzi, Boukert 2017)..... | 68 |
| Figure 4.3 : Carte bathymétrique de la zone de Boumerdès (2009), (DHI-Mike 21, Azzi, Boukert, 2017)..... | 73 |
| figure 4.4 : Carte bathymétrique de la zone de Sidi Fredj (2017) (DHI-Mike 21, Azzi, Boukert, 2017)..... | 73 |
| Figure 4.5 : Carte bathymétrique de la zone de Hamdania (2015), (DHI-Mike 21, Azzi, Boukert, 2017)..... | 74 |
| Figure 4.6 : Les étapes de définition de maillage (1)..... | 76 |
| Figure 4.7 : les étapes de définition de maillage (2)..... | 77 |
| Figure 4.8 : Le maillage de la zone de Boumerdès(DHI-Mike 21, Azzi, Boukert, 2017)..... | 78 |
| Figure 4.9 : le maillage de la zone de Sidi Fredj(DHI-Mike 21, Azzi, Boukert, 2017)..... | 79 |
| Figure 4.10 : le maillage de la zone de Hamdania, (DHI-Mike 21, Azzi, Boukert, 2017)..... | 80 |
| Figure4.11 : Interface du modèle couplé MIKE 21/3 FM..... | 81 |
| Figure 4.12 : Rose des houles WaveWatch III (DHI-Mike 21, AZZI, BOUKERT, 2017)..... | 83 |
| Figure 4.13 : Champs des houles dans la zone de Boumerdès (H = 5.11m ; Tp = 10.46s ; Dir= 22.5°N)..... | 83 |
| Figure4.14 : Champ des houles dans la zone de Boumerdès (H= 3.31m ; Tp = 9.11s ; Dir = 270°N)..... | 84 |
| Figure4.15 : Champ des houles dans la zone de Boumerdès (H= 3.25m ; Tp = 8.85s ; Dir = 45°N)..... | 84 |
| Figure 4.16 : Champs des houles dans la zone de Sidi Fredj (H = 5.11m ; Tp = 10.46s ; Dir= 22.5°N)..... | 86 |
| Figure 4.17 : champ des houles dans la zone de Sidi Fredj (H= 3.31m ; Tp = 9.11s ; Dir = 270°N)..... | 86 |
| Figure 4.18 : champ des houles dans la zone de Sidi Fredj (H= 3.25m ; Tp = 8.85s ; Dir = 45°N)..... | 87 |
| Figure 4.19 : Champs des houles dans la zone de Hamdania (H = 5.11m ; Tp = 10.46s ; Dir= 22.5°N)..... | 88 |
| Figure 4.20 : Champ des houles dans la zone de Hamdania (H= 3.31m ; Tp = 9.11s ; Dir = 270°N)..... | 89 |
| Figure4.21 : champ des houles dans la zone de Hamdania (H= 3.25m ; Tp = 8.85s ; Dir = 45°N)..... | 89 |
| Figure 4.22 : Grille de données (vent, direction et intensité)..... | 92 |
| Figure 4.23 : Spectre des vents (DHI-Mike 21, Azzi Imad, BoukertHachemi, 2017)..... | 92 |
| Figure 4.24 : Rose des vents de la station du port d'Alger (DHI-Mike 21, AZZI, BOUKERT, 2017)..... | 93 |
| Figure 4.25 : Champs des courants dans la zone de Boumerdès (Direction des houles= 45°)..... | 94 |
| Figure4.26 : Champs des courants dans la zone de Sidi Fredj (Direction des houles= 45°)..... | 95 |

| | |
|---|------------|
| Figure 4.27 : Champs des courants dans la zone de Hamdania (Direction des houles= 45°)..... | 96 |
| Figure 4.28 : Etapes de simulation par le module HD dans la zone de Hamdania (Step 1 of 100)..... | 97 |
| Figure 4.29 : Etapes de simulation par le modèle HD dans la zone de Hamdania (step 5 of 100)..... | 98 |
| Figure 4.30 : Etapes de la simulation par le modèle HD dans la zone de Hamdania (step 15 of 100)..... | 99 |
| Figure 4.31 : Message d’erreur de Mike 21..... | 100 |
| Figure 5.1 : Positionnement des points de prélèvement dans la partie aérienne dans la plage de Sidi Fredj. | 102 |
| Figure 5.2 : Positionnement des points de prélèvement dans la partie aérienne dans la plage de Hamdania. | 103 |
| Figure 5.3 : Positionnement des points de prélèvement dans la partie sous-marine de Sidi Fredj..... | 104 |
| Figure 5.4 : Positionnement des points de prélèvement dans la partie sous-marine de la plage de Hamdania. | 104 |
| Figure 5.5 : Carte de la répartition des pélites dans la partie aérienne de la plage Est de Sidi Fredj..... | 109 |
| Figure 5.6 : Carte de la répartition des pélites dans la partie aérienne de la plage Hamdania..... | 110 |
| Figure 5.7 : Carte de la répartition des pélites dans la partie sous-marine de la plage Est de Sidi Fredj..... | 111 |
| Figure 5.8 : Carte de la répartition des pélites dans la partie sous-marine de la plage Hamdania..... | 112 |
| Figure 5.9 : Carte de la répartition de la médiane (D50) dans la partie aérienne de la plage Est de Sidi Fredj...113 | |
| Figure 5.10 : Carte de la répartition de la médiane (D50) dans la partie aérienne de la plage Hamdania..... | 114 |
| Figure 5.11 : Carte de la répartition de la médiane (D50) dans la partie sous-marine de la plage Est de Sidi Fredj..... | 115 |
| Figure 5.12 : Carte de la répartition de la médiane (D50) dans la partie sous-marine de la plage Hamdania.... | 116 |
| Figure 5.13 : Modélisation du transport sédimentaire dans la zone de Boumerdès (DHI Mike 21- Azzi et Boukert, 2017)..... | 118 |
| Figure 5.14 : Modélisation du transport sédimentaire dans la zone de Sidi Fredj (DHI Mike 21- Azzi et Boukert, 2017)..... | 119 |
| Figure 5.15 : Modélisation du transport sédimentaire dans la zone de Hamdania (DHI Mike 21- Azzi et Boukert, 2017)..... | 120 |
| Figure 5.16 : Modélisation du transport sédimentaire dans la zone Ouest de la plage Hamdania (DHI Mike 21- Azzi et Boukert, 2017)..... | 120 |

Liste des acronymes

- A.F.N.O.R** : Association Française **de** Normalisation
- A.N.R.H** : Agence Nationale des **R**essources **H**ydriques
- C.F.L** : condition de **C**ourant, **F**riedrichs et **L**ewy, connue aussi sous le nom de nombre de Courant
- D.H.I** : Institut **H**ydraulique **D**anois
- D.S.A.S**: Digital Shoreline Analysis System
- E.N.S.S.M.A.L** : Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la **M**er et de l'**A**ménagement du **L**ittoral
- E.P.R**: End Point Rate
- E.S.R.I**: Environmental Systems **R**esearch Institute
- F.M** : Flexible Mesh
- G.P.S**: Global Positioning System
- HD**: Hydrodynamique
- Hs**: Hauteur significative.
- I.N.C.T**: Institut National de Cartographie et de **T**éledétection
- Kr**: Coefficient de **r**éfraction
- L.E.M** : Laboratoire des **É**tudes **M**aritimes
- N** : Nord
- N.S.M**: Net Shoreline Movement
- NE** : Nord Est
- NNE** : Nord-Nord-Est
- NW**: Nord-Ouest
- O.N.M** : Office National de **M**étéorologie
- S.H.F.N** : Service **H**ydrographique des **F**orces **N**avales
- S.H.O.M** : Service **H**ydrographique et **O**céanographique de la **M**arine.
- S.I.G** : Système d'**I**nformation **G**éographique.
- S.S.M.O**: Summary of **S**ynoptic **M**eteorological **O**bservation
- ST**: Transport Sedimentary
- SW** : Spectral **W**ave
- W.G.S**: World **G**eoïde **S**ystem
- X.Y.Z** : Extension d'un fichier au format XYZ

| | |
|----------------------------|------|
| Remerciement | i |
| Dédicaces..... | ii |
| Liste des figures..... | iii |
| Liste des tableaux..... | vii |
| Liste des acronymes | viii |
| Sommaire | ix |
| Introduction générale..... | 2 |

CHAPITRE I

Généralités

| | |
|--|----|
| 1. Morphodynamique côtière | 5 |
| a. principes et concepts | 5 |
| b. Evolution morphodynamique | 7 |
| c. Relations spatio-temporelles en morphodynamique côtière | 7 |
| 2. Morphologies littorales | 8 |
| 3. Processus hydrodynamiques | 10 |
| a. La houle | 10 |
| b. Le courant | 12 |
| c. Le vent | 12 |
| d. La marée | 13 |
| 4. Phénomène de l'érosion du littoral | 13 |
| 5. Le Transport sédimentaire en zone littorale | 14 |
| a. Les processus de mise en mouvement des particules | 15 |
| b. Dérive littorale des sédiments | 15 |
| c. Transport transversal des sédiments | 16 |

CHAPITRE II

Présentation de la zone d'étude

| | |
|---|----|
| 1. Cadre géographique..... | 18 |
| a- Boumerdès..... | 18 |
| b- Sidi Fredj | 19 |
| c- Hamdania..... | 20 |
| 2. Cadre géologique et géomorphologique | 21 |
| a- Boumerdès | 21 |
| b- Sidi Fredj | 23 |

| | |
|-------------------------------|----|
| c- Hamdania | 24 |
| 3. Cadre hydrologique..... | 26 |
| a- Boumerdès | 26 |
| b- Sidi Fredj | 27 |
| c- Hamdania | 28 |
| 4. Cadre climatologique | 29 |
| 5. Cadre hydrodynamique | 32 |
| A. La houle | 32 |
| B. Les courants | 33 |
| C. La marée | 33 |

CHAPITRE III

Evolution du trait de cote

| | |
|--|----|
| 1. Les variations de la ligne de côte | 36 |
| 2. Les logiciels utilisés | 36 |
| 3. Les statistiques calculées par le DSAS | 37 |
| a. Le taux des points extrêmes (EPR) | 37 |
| b. Mouvement net des rivages (NSM) | 37 |
| c. Le Linear Regression Rate-of-change (LRR) | 37 |
| 4. Résultats | 48 |
| A. Boumerdès | 48 |
| a. Mouvement net des rivages (NSM) | 40 |
| b. Le taux de point final (EPR) | 42 |
| c. Le Linear Regression Rate-of-change (LRR) | 43 |
| d. Analyse du bilan sédimentaire | 45 |
| B. Sidi Fredj | 47 |
| a. Mouvement net des rivages (NSM) | 49 |
| b. Le taux de point final (EPR) | 50 |
| c. Le Linear Regression Rate-of-change (LRR) | 52 |
| d. Analyse du bilan sédimentaire | 54 |
| C. Hamdania | 56 |
| a. Mouvement net des rivages (NSM) | 57 |
| b. Le taux de point final (EPR) | 59 |
| c. Le Linear Regression Rate-of-change (LRR) | 61 |

| | |
|--|----|
| d. Analyse du bilan sédimentaire | 63 |
|--|----|

CHAPITRE IV

Modélisation hydrodynamique

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 66 |
| a. Mike 21 HD | 68 |
| b. Mike 21 SW | 69 |
| c. Mike 21 ST | 70 |
| 2. Approche méthodologique | 72 |
| a. Création 2D Bathymétries sous le maillage | 72 |
| a.1. Boumerdès | 73 |
| a.2. Sidi Fredj | 73 |
| a.3. Hamdania | 74 |
| b. Configuration des maillages | 78 |
| b.1. Boumerdès | 78 |
| b.2. Sidi Fredj | 79 |
| b.3. Hamdania | 79 |
| 3. Configuration du modèle DHI-MIKE FM | 81 |
| 4. Module SW | 82 |
| a. Conditions du niveau marin | 82 |
| b. Les conditions de courant | 82 |
| c. Rupture des vagues | 82 |
| d. Conditions initiales des limites | 82 |
| 5. Résultats | 83 |
| a. Boumerdès | 83 |
| b. Sidi Fredj | 86 |
| c. Hamdania | 88 |
| 6. Module HD | 91 |
| a. Frottement sur les fonds | 91 |
| b. Viscosité turbulente | 91 |
| c. Force de Coriolis | 91 |
| d. Force des Vents | 91 |
| e. les radiations des champs de houle | 93 |

| | | |
|----|-------------------------------|----|
| | f. Conditions initiales | 93 |
| 7. | Résultats | 94 |
| | a. Boumerdès | 94 |
| | b. Sidi Fredj | 95 |
| | c. Hamdania | 96 |

CHAPITRE V

Etude granulo-sédimentaire

| | | |
|----|---|-----|
| 1. | Prélèvement et échantillonnage | 102 |
| | a. Prélèvement dans la partie aérienne | 102 |
| | b. Prélèvement dans la partie sous-marine | 103 |
| 2. | Analyse au laboratoire | 105 |
| | a. Méthode d'analyse | 106 |
| | b. Classes de taille | 106 |
| 3. | Paramètres granulométriques..... | 107 |
| | a. Les paramètres de position | 107 |
| | b. Les indices granulométriques | 107 |
| 4. | Les résultats | 108 |
| | A. Analyse de la fraction fine | 108 |
| | B. Analyse de la fraction grossière | 113 |
| 5. | Modélisation du transport sédimentaire | 117 |
| | a. Boumerdès | 118 |
| | b. Sidi Fredj | 119 |
| | c. Hamdania | 120 |
| | Conclusion | 123 |
| | Bibliographie | 125 |
| | Annexes..... | 130 |

Introduction générale

Autrefois considérée comme l'objet d'investigations purement scientifiques, la dynamique du littoral et en particulier l'érosion côtière est devenue un enjeu sociétal.

Aujourd'hui, le littoral n'est pas seulement le point de contact entre les trois compartiments terrestres que sont l'hydrosphère, la lithosphère et l'atmosphère, c'est aussi l'entité géographique qui possède le poids économique et démographique le plus important.

BIRD (1985) a montré que 70 % des rivages dans le monde sont soumis à l'érosion. Plus récemment, BEER (1997) soulignait aussi que l'évolution des littoraux sableux est dominée généralement par une tendance régressive. Les études menées ces dernières années dans les différentes régions du monde montrent que la régression des côtes sableuses est un phénomène planétaire.

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 le 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.

L'évaluation des variations spatio-temporelles de la position du trait de côte à l'échelle régionale et locale pose de nombreuses questions d'ordre méthodologique relatives au choix de l'indicateur à utiliser, à la façon de l'extraire et de mesurer sa mobilité à différentes échelles et à partir de données hétérogènes.

Est-ce que le littoral centre algérien subit les processus dynamiques de la même manière sur l'ensemble de ses unités? Et quels sont les facteurs qui créent ces unités morphologiques ?

De manière à traiter ces questions, ce mémoire s'organise en cinq principaux chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la synthèse des connaissances nécessaires pour traiter ce sujet. Il dresse un état de l'art concernant les concepts et les outils théoriques qui permettent de comprendre et d'expliquer le système côtier sableux, la morphodynamique côtière, l'hydrodynamisme et le transport sédimentaire.

Le deuxième chapitre est réservé à la présentation des zones choisies pour la réalisation de ce mémoire. Chaque zone d'étude sera ensuite replacé dans son contexte géographique, géologique, géomorphologique, hydrologique, climatologique et enfin hydrodynamique.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de l'évolution du trait de côte, il nous a fallu, après avoir collecté toutes les études et mesures disponibles, sélectionner un outil numérique existant et reconnu par la collectivité scientifique comme étant performant.

Le quatrième chapitre consiste à la modélisation hydrodynamique, la simulation du mouvement et des comportements des houles et des courants. La présentation de la méthodologie suivie, des calculs effectués et l'interprétation des résultats obtenus.

Le cinquième chapitre présente la zone choisie comme cas d'étude pour l'analyse granulométrique. Il décrit l'approche méthodologique employée pour l'expérimentation in situ ainsi que les diverses techniques de traitement et d'analyse des données. Le transport sédimentaire associé aux changements morphologiques des plages est analysé en fonction de plusieurs paramètres caractéristiques des processus hydro-sédimentaires mis en jeu. L'analyse se base principalement sur l'effet de l'interaction des non-linéarités des vagues et des courants sur la direction du transport sédimentaire.

1. Morphodynamique côtière

a. principes et concepts

Le domaine littoral est un système complexe où divers phénomènes d'échelles spatio-temporelles bien distincts interagissent. Les échelles de temps varient de quelques secondes à des centaines d'années, allant de la mise en mouvement du grain de sable à l'évolution globale des plages et du trait de côte. De part ce nombre considérable de phénomènes et de leurs interactions, la dynamique d'un tel environnement est très complexe. (**BRUNEAU, 2009**).

La morphodynamique côtière est l'ajustement mutuel de la topographie et des processus dynamiques, impliquant un transport sédimentaire et des phénomènes de rétroactions (**WRIGHT et THOM, 1977**).

On peut donc considérer le concept de la morphodynamique côtière comme étant un système complexe qui comprend des sous-systèmes interdépendants. La complexité de ces objets sont dues à :

- Tout d'abord, les systèmes sont composés d'une grande variété d'éléments possédant leurs caractéristiques propres.
- Ces éléments sont organisés en niveaux hiérarchiques et peuvent être emboîtés.
- Les interactions entre les éléments sont de nature très variées.
- Ces interactions sont généralement non-linéaires car elles ne peuvent pas être expliquées par une simple relation de proportionnalité (**MEZOUAR, 2009**).

Wright & Thom (1977) sont les premiers à avoir utilisé une approche morphodynamique du système côtier en identifiant l'avant et l'après modification, ainsi que les processus qui en sont responsables, tout en considérant une rétroaction possible entre les différentes composantes. Le milieu côtier est contrôlé par trois facteurs environnementaux :

- 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.

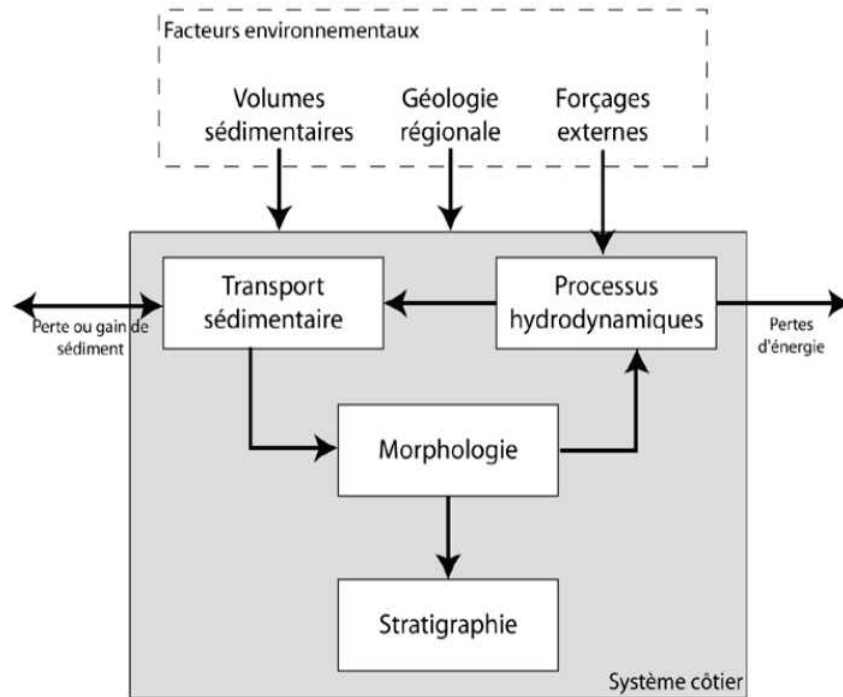


Figure 1.1 : Représentation schématique de l'approche morphodynamique incluant les facteurs environnementaux et leur influence sur le système côtier. Les flèches indiquent le rapport entre les différents compartiments sans tenir compte de l'aspect temporel (COWELL & THOM, 1994).

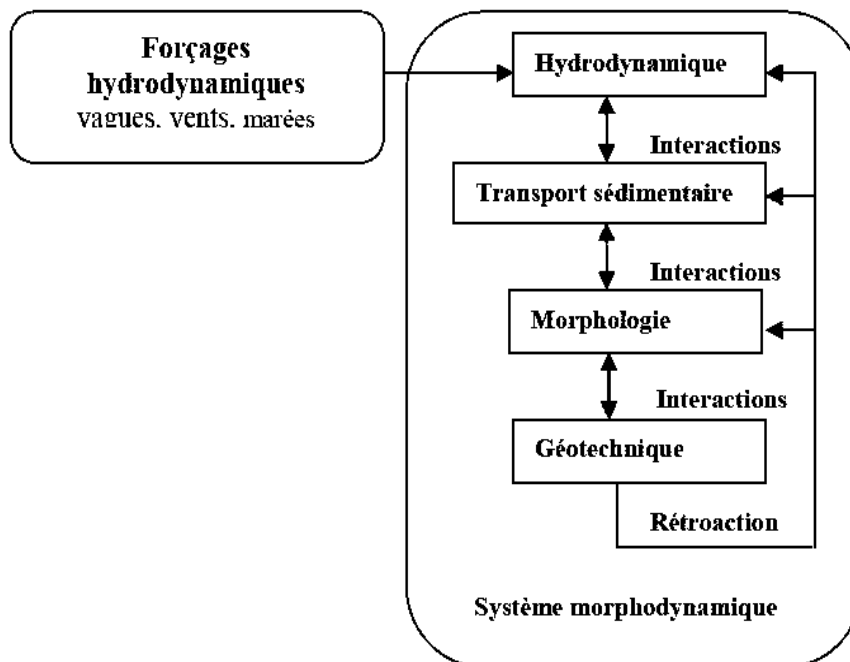


Figure 1.2 : Composants d'un système morphodynamique côtier (STEPANIAN, 2002).

b. Evolution morphodynamique

L'étude de l'évolution morphodynamique des littoraux consiste à relier les forçages hydrodynamiques, les processus de transport sédimentaire et le développement morphologique à toutes les échelles de temps (STEPANIAN, 2002).

Une modification des forçages génère une modification de la dynamique des fluides, du transport sédimentaire et l'interaction de ces processus avec la morphologie initiale est à l'origine de la construction d'une nouvelle morphologie. Des phénomènes de rétroactions sur la dynamique des fluides et le transport sédimentaire peuvent être soit positifs (autocontrôle, *self organization*), ou négatifs (autorégulation, *self regulation*) (COWELL & THOM, 1994).

L'évolution morphodynamique d'un système côtier est classiquement décrite comme une évolution markovienne¹, définie comme une succession d'états morphologiques (WRIGHT & THOM, 1977). Ce concept est la base théorique du développement des modèles d'évolution des plages (SONU, 1973 ; Short, 1979 ; Wright & Short, 1984, 1985 ; Horikawa, 1988 ; Short & Aagaard, 1993). Dans ces modèles supportés par un paramétrage hydrodynamique, le système morphodynamique subit des variations graduelles et réversibles entre deux états extrêmes. Les états intermédiaires dépendant de l'état précédent, l'évolution morphodynamique d'un système doit donc être étudiée en prenant en compte l'état morphologique initial, la réponse à une variation des forçages étant non linéaire en fonction de celui-ci.

c. Relations spatio-temporelles en morphodynamique côtière :

En fonction de l'échelle de temps à laquelle il est étudié, le comportement d'un système morphodynamique côtier (plage, embouchure, dune, estuaire) peut être très variable. A chaque échelle de temps est associée une représentativité spatiale se référant à l'amplitude volumique des changements morphologiques mis en jeu. L'examen des relations spatio-temporelles qui conditionnent le devenir d'un système côtier constitue une mesure de la stabilité du système aux variations de forçages (Kroon, 1994). Dans le cas d'un système côtier, De Vriend (1991) suppose l'existence d'une relation linéaire entre l'amplitude des évolutions spatiales subies par le système et l'échelle temporelle de ces évolutions. Il découle de cette relation primaire une hiérarchisation spatio-temporelle des processus dynamiques qui contrôlent l'évolution de la zone côtière.

¹ Evolution graduelle par états successifs interdépendants. Markov : Mathématicien russe (1856-1922)

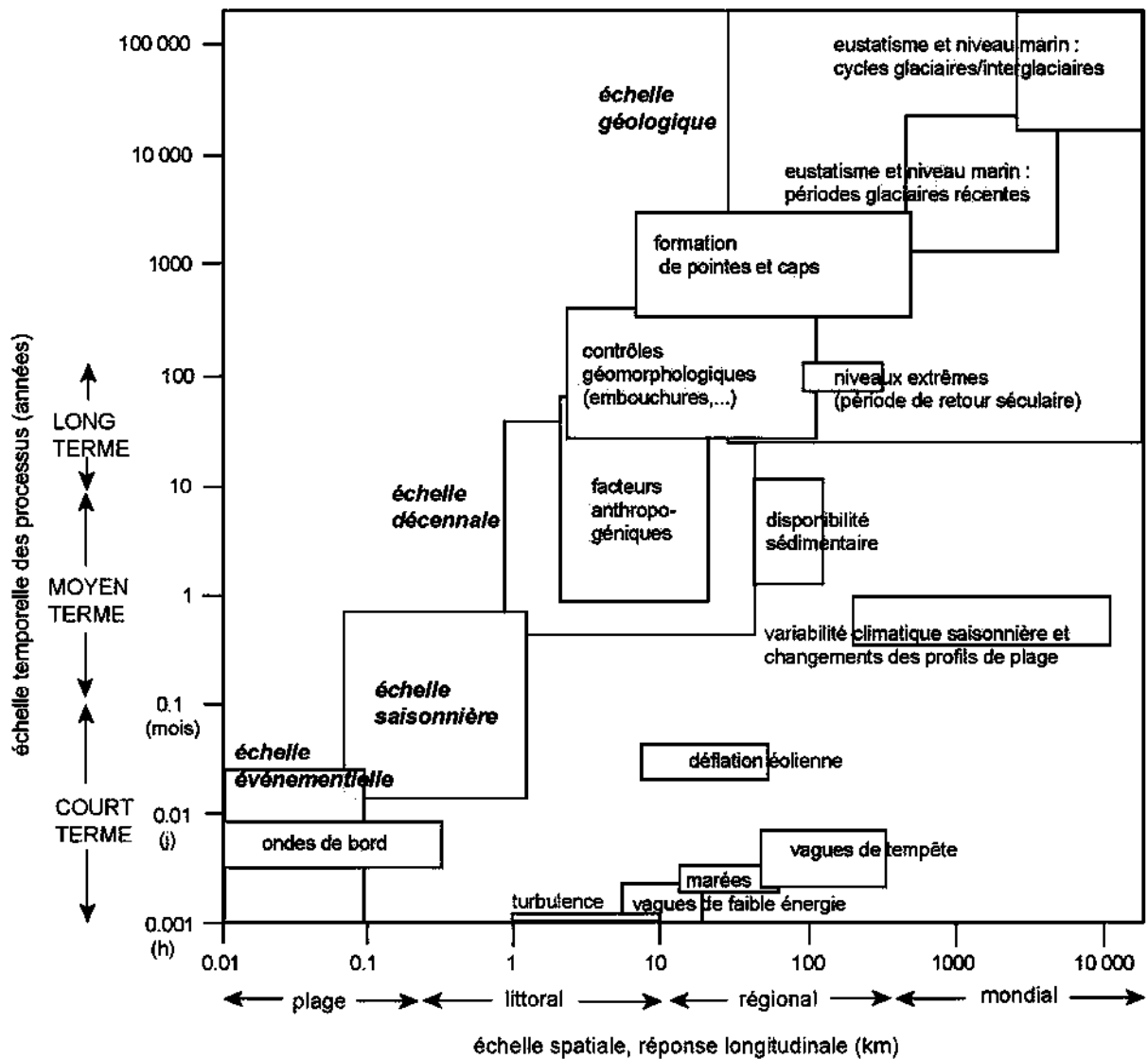


Figure 1.3 : Répartition spatio-temporelle des facteurs climatiques, hydrodynamiques, Sédimentologique et anthropiques impliqués dans la morphodynamique des littoraux (Fenster et al. 1993).

2. Morphologies littorales

Le littoral est un espace particulier, à l'interface de la lithosphère, de l'atmosphère et de l'hydrosphère. Par conséquent, on trouve trois influences :

- **Continental :** la structure géologique du secteur considéré, qui détermine le type et la résistance des roches offertes aux facteurs d'érosion.
- **Marine :** les conséquences des variations du niveau de la mer ou encore des processus induits par les facteurs hydrodynamiques.

- **Atmosphérique** : au travers de l'action de tous les agents subaériens qui contribuent à la mobilité des sédiments du littoral (**PASKOFF., CLUS-AUBY, 2007**).

La configuration des plages dépend de la géométrie du littoral, de la nature et du volume des sédiments disponibles, du régime d'agitation lui-même dépendant du climat et du marnage. En fonction des limites d'action des vagues et de la marée, la zone littorale peut être subdivisée en (**Figure 1.4**) :

- la plage sous-marine inférieure (*lowershoreface*), qui s'étend de la limite d'action des vagues sur le fond à la profondeur de fermeture. La limite hydrodynamique externe de la plage sous-marine inférieure peut être définie par la profondeur à laquelle la houle commence à être influencée par le fond.
- la plage sous-marine supérieure (*uppershoreface*), qui s'étend de la profondeur de fermeture à celle des plus basses mers. La profondeur de fermeture correspond à la limite au-delà de laquelle on ne détecte plus de changement dans le profil sur un an (**Hallermeier, 1981**).
- le domaine intertidal, communément appelé estran, est situé dans la zone de battement de la marée. Cette zone est très dynamique en raison du balayage de l'estran par la marée, et sa largeur est fonction de marnage et de la pente de la plage. Dans les environnements macro tidaux, le domaine intertidal est séparé en trois compartiments définis par les niveaux marégraphiques (**Wright et al. 1982**) :
 - La basse plage, située entre le niveau moyen des basses mers de vive-eau (BMVE) (BMME) et le niveau moyen des basses mers de morte-eau (BMME).
 - La moyenne plage, située entre le niveau moyen des basses mers de morte-eau (BMME) et le niveau moyen des pleines mers de morte-eau (PMME).
 - La haute plage, située entre le niveau moyen des pleines mers de morte-eau (PMME) et le niveau moyen des pleines mers de vive-eau (PMVE).
- Le domaine supra tidal, qui s'étend de la laisse des plus hautes mers à l'arrière de la dune.

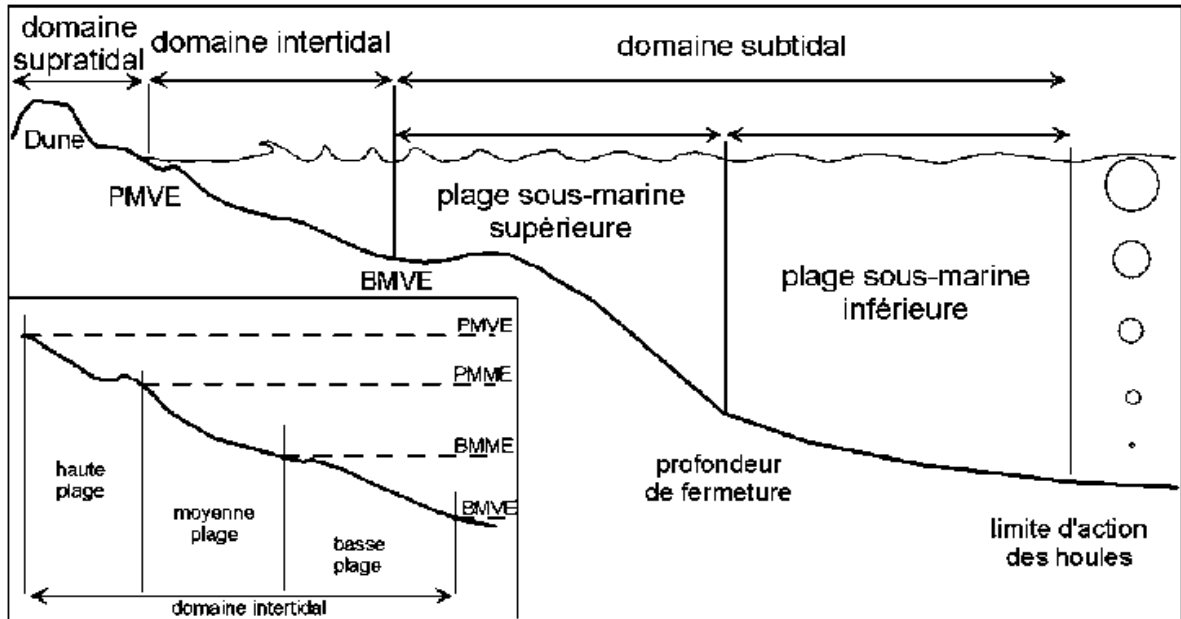


Figure 1.4 : Zonation du domaine côtier (Short (1999) et Wright et al. (1982)).

3. Processus hydrodynamiques

Le littoral évolue à travers les déplacements des sédiments qui le composent. La houle, le vent et les courants sont capables de transporter le sédiment présent sur une plage, ce sont les forçages de l'évolution du littoral.

a. La houle

La houle constitue l'agent primordial de la dynamique des plages (PASKOFF., CLUS-AUBY, 2007).

La houle est issue de l'action du vent sur la surface de l'eau. Formée au large, elle se propage à travers plusieurs domaines. Tout d'abord en domaine profond où l'action du fond n'a aucun effet sur leur propagation qui est alors définie comme dispersif. A l'approche de la côte, la houle va peu à peu se modifier en raison des contraintes de frottement au niveau du fond (AHFIR., MEZIANE, 2016).

Les houles sont caractérisées par :

- leur période, c'est-à-dire le temps (T) qui s'écoule entre le passage en un point donné de deux crêtes successives. Elle est généralement inférieure à 30 secondes pour les grands océans. En Méditerranée, cette valeur est souvent inférieure à 10 secondes,
- leur hauteur (H) qui désigne la distance verticale entre un creux et une crête. Elle peut également être désignée par les termes amplitude ou creux,

- leur longueur d'onde (λ) qui correspond à la distance entre deux crêtes successives. (L'EID Méditerranée., SMNLR, 2005).

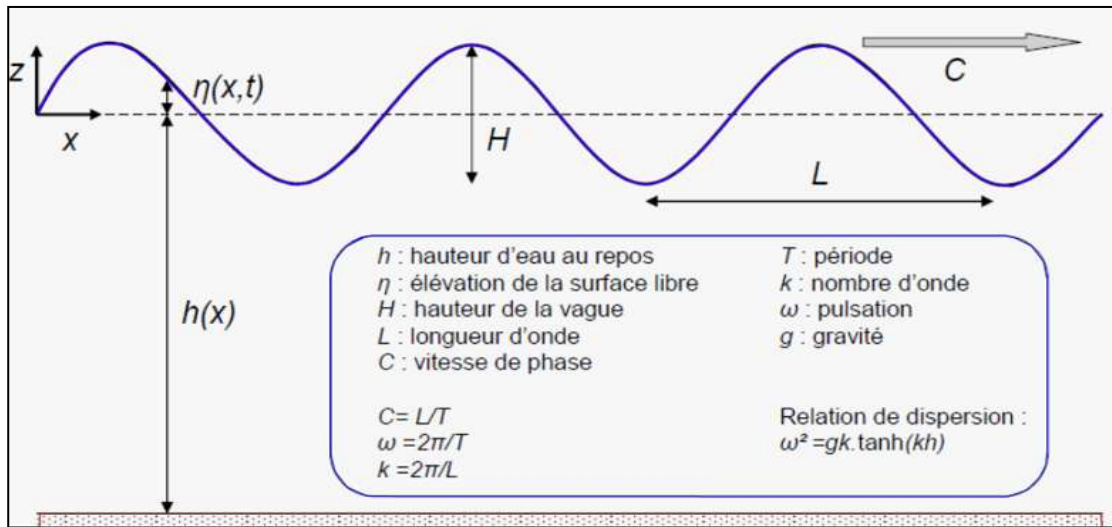


Figure 1.5 : Grandeurs caractéristiques des houles (Grasso, 2009).

Transformations de la houle

A l'approche de la côte, la houle va subir différentes transformations, suivant la bathymétrie des secteurs qu'elle traverse, et les obstacles qu'elle rencontre :

- La réfraction : le frottement de la houle sur le fond entraîne une diminution de la vitesse et une modification de la direction de propagation et, de ce fait, la réduction de l'énergie transportée.
- La diffraction : c'est le phénomène par lequel une onde, en rencontrant un obstacle, génère à l'aval de celui-ci une onde circulaire de même période mais d'énergie décroissante.
- La réflexion : quand la houle rencontre un obstacle, elle est réfléchi dans une direction qui fait avec la perpendiculaire à l'obstacle un angle égal à l'angle d'incidence. La superposition des ondes incidentes et réfléchi peut créer des oscillations bien plus grandes que celles de la houle incidente seule.
- Le déferlement : la houle se brise en arrivant à de faibles profondeurs, puis déferle jusqu'au rivage. Le déferlement a une action très importante sur la morphologie du rivage et mobilise d'importants volumes de matériaux. C'est en partie à lui que l'on doit la formation des systèmes fosse-barre. (L'EID Méditerranée., SMNLR, 2005).

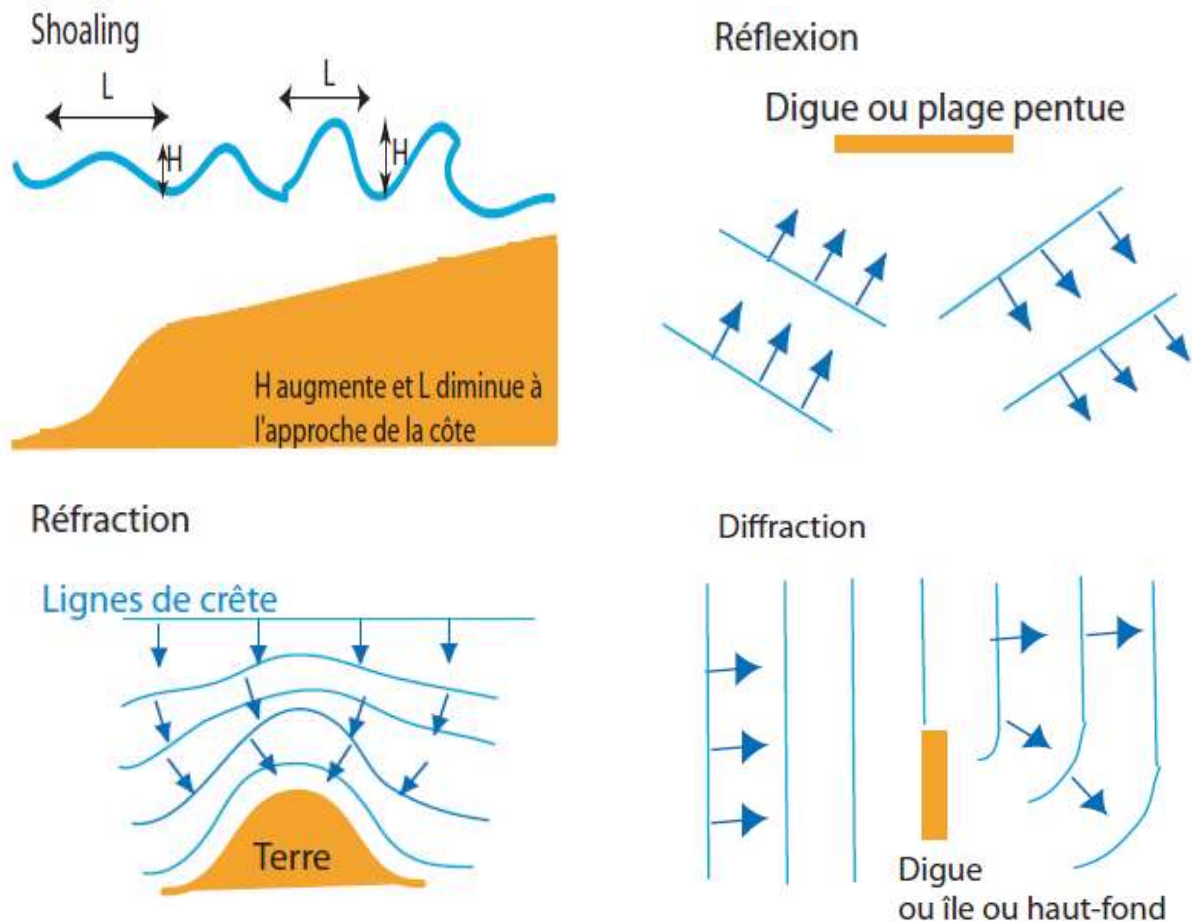


Figure 1.6 : Modifications subies par les vagues à l'approche de la côte (MICHAUD, 2011).

Il est important de noter qu'en dehors de la zone de déferlement, au large des brisants, la houle ne déplace pas les masses d'eau. Elle ne transporte donc pas les sédiments. Mais, du fait de son oscillation, elle les décolle du fond et les rend susceptibles d'être transportés par les courants. (L'EID Méditerranée., SMNLR, 2005).

b. Le courant

Le courant marin, par définition, est une masse d'eau qui se déplace sur de très longues distances, à la surface ou en profondeur des mers et des océans. Dans son déplacement le courant est susceptible de transporter des sédiments et de modeler le paysage littoral (Senechal, 2003).

c. Le vent

Les côtes sont toujours plus ventées que leur arrière-pays immédiat parce que les vents qui les abordent n'ont pas été freinés par des obstacles topographiques pendant leur course. En raison de leur fréquence et leur vitesse, ils jouent un rôle dans l'évolution des plages par

leur participation à l'hydrodynamisme littoral. Les vents sont à l'origine, lorsqu'ils sont très forts, de courants de fond. Perpendiculaires au rivage, ils accentuent la cambrure des vagues, d'où un pouvoir accru de mise en mouvement des sédiments de l'avant-plage au moment du déferlement. Parallèles au rivage, ils sont capables, suivant leur direction, d'accélérer ou de ralentir la dérive littorale. **(PASKOFF., CLUS-AUBY, 2007).**

Le vent a une action primordiale dans la dynamique sédimentaire : d'une part, il est responsable de la génération de la houle, d'autre part, il joue un rôle important en agissant directement sur les sédiments de la plage émergée. **(L'EID Méditerranée., SMNLR, 2005).**

d. La marée

La marée est un mouvement oscillatoire périodique du niveau de la mer que l'on observe avec plus ou moins d'intensité sur toutes les mers du globe. C'est la réponse de l'océan aux variations périodiques des forces d'attraction exercées par la lune et le soleil. **(GISTDOERFER, 2002).**

Les oscillations du niveau des mers et des océans qu'entraîne la marée s'accompagne de mouvements horizontaux de masses d'eau appelés courants de marée. Les courants induits par la marée sont fondamentaux. L'originalité de ces courants qui affectent l'ensemble de la masse d'eau (avec malgré tout une lente décroissance des vitesses vers le fond) réside, d'une part, dans leur puissance **(AHFIR., MEZIANE, 2016).**

4. Phénomène de l'érosion du littoral

Les plages, qui sont par définition des formes d'accumulation peuvent paradoxalement connaître des phénomènes d'érosion d'une ampleur telle que, parfois, c'est leur survie même qui est en jeu. Il est toutefois capital de comprendre que le recul de la côte ne conduit pas nécessairement à la dispersion des plages. Si aucun obstacle, naturel ou artificiel, ne vient entraver le déplacement du rivage, la plage change simplement de position dans l'espace sans que son existence soit menacée **(PASKOFF., CLUS-AUBY, 2007).**

Le déplacement de la ligne de rivage est le résultat de l'action d'un ensemble de facteurs, L'équilibre entre les processus eustatiques et isostatiques entraîne des variations du niveau marin relatif (NMR) qui sont à l'origine de transgressions et de régressions, lesquelles ont une influence primordiale sur la géomorphologie et l'évolution des littoraux **(PASKOFF, 1994).** Une hausse accélérée du NMR, associée à la hausse du niveau global des océans observée depuis un siècle peut donc entraîner une submersion des terres, une accélération de l'érosion côtière et une modification de la dynamique sédimentaire dans la zone côtière **(Environnement Canada, 1999 ; IPCC, 2001; PNUE, 2002).**

Les plages s'érodent quand elles perdent plus de sédiment qu'elles n'en reçoivent. Au fur et à mesure que le volume de sable et gravier diminue, la plage s'abaisse et se rétrécit. Quand les plages sont adossées à des dunes, c'est le bourrelet dunaire qui est entaillé, prenant

l'aspect d'une falaise, les bermes ou toutes autres formes d'accumulation ayant disparu sur le haut de plage (**PASKOFF., CLUS-AUBY, 2007**).

D'autres conditions géologiques, comme les propriétés géotechniques des sédiments et la lithostratigraphie (**SHAW et al, 1998b; Wilcock et al. , 1998**), l'équilibre entre l'apport en sédiments et l'espace d'accommodation créé (**Catuneanu, 2002 ; Miall ,1997**) de même que la physiographie et la pente générale de la côte (**Bruun, 1962; Posamentier et Allen, 1993**) peuvent grandement influencer les processus et l'intensité de l'érosion côtière ainsi que le recul de la ligne de rivage.

L'augmentation de l'intensité et de la fréquence des tempêtes constitue également un facteur d'érosion et de risque de submersion des côtes (**Forbes et al.2004 ; Hill et al.2004 ; Morton et Sallenger, 2003 ;Paskoff, 2001**). Les épisodes de précipitations intenses ainsi que l'instabilité des talus côtiers sont des facteurs déterminants du risque de mouvements de masse dans la zone côtière (**Duchesne et al.2003 ; Allard, 1984**). De plus, la réduction de l'extension et de la durée du couvert de glace de mer causée par le réchauffement climatique fait augmenter le fetch des eaux libres et contribue à intensifier l'énergie des vagues pour l'érosion des côtes

Cependant, ces formes d'érosion peuvent n'être que temporaires et trop d'interventions inutiles, voire néfastes à la survie des plages, ont été entreprises sur la base d'un diagnostic insuffisant. Ce sont donc les observations répétées sur une longue période et les mesures comparatives rigoureuses de la position du trait de côte et des profils de plages qui permettent de poser réellement un diagnostic d'érosion. (**PASKOFF., CLUS-AUBY, 2007**). Les causes principales de l'érosion des plages doit être recherchée dans l'inversion de la tendance évolutive qui leur avait permis de se former. La pénurie sédimentaire qui caractérise l'époque actuelle a en effet succédé à une période où les apports de matériaux étaient très abondants.

5. Le Transport sédimentaire en zone littorale

La plupart des sédiments sont transportés en suspension, le reste est transporté près du fond en saltation. 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 d'une partie côtière. Elle se produit dans une zone étroite de la côte. 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 vont être transportés du large vers la côte et sous celui de la houle réfléchie, les vont être déplacés dans la direction opposée (**THAN, 2015**).

a. Les processus de mise en mouvement des particules

En fonction de l'origine du sédiment, le transport total dans une tranche d'eau est défini par une fraction fine qui est transporté en suspension, une fraction sableuse ou supérieure qui est transportée soit au niveau du fond soit en suspension. Le transport total correspond alors à l'ensemble de ces processus (**Figure 1.7**).

Le transport sédimentaire est initié lorsque les contraintes de cisaillement ou les vitesses du courant dépassent le seuil de mise en mouvement des particules. Ce seuil est étroitement lié à la taille du grain, la nature du sédiment et la densité du fluide dans lequel il est transporté (**HULJSTRÖM, 1935; SHIELDS, 1936**). Quelle que soit la taille des particules, le transport sédimentaire est contrôlé par la gravité et par les forces liées au fluide environnant. Il est alors divisé en trois modes de transport : le transport de fond (bedload) où le sédiment roule ou est tracté sur le substrat, la saltation caractérise les grains qui effectuent des ressauts au-dessus du fond et la suspension définit le transport dans la colonne d'eau (**VAN RIJN, 1993B**).

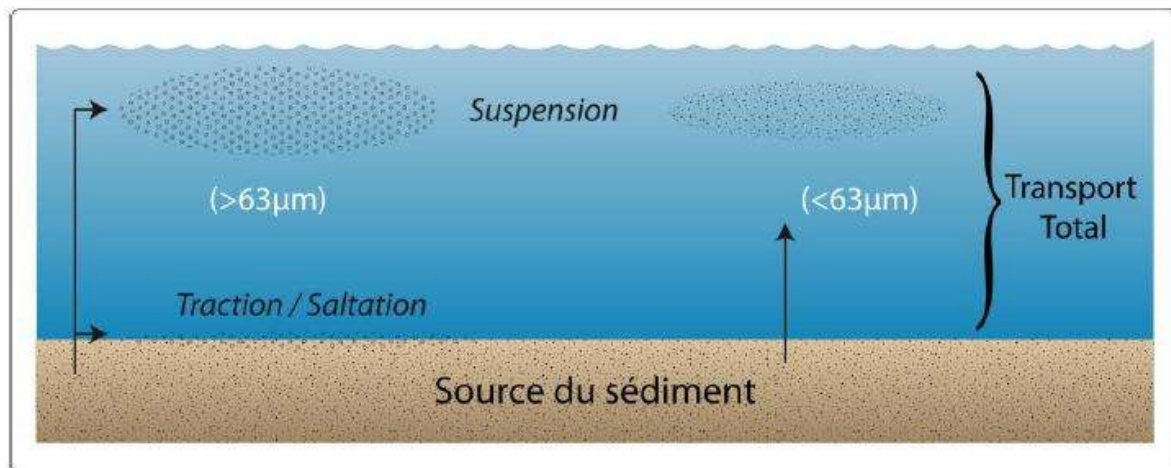


Figure 1.7 : Classification des différents types de transport en fonction de la taille des sédiments (**VAN RIJN, 1993B**).

Le transport en suspension est possible lorsque la vitesse d'initiation du mouvement est dépassée et surtout quand les forces verticales dirigées vers la surface engendrées 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.

b. Dérive littorale des sédiments

Si la direction des houles incidentes n'est pas perpendiculaire à la côte, une forte composante parallèle à la côte est générée, conduisant aux courants de dérive littorale. Les sédiments transportés par ces courants constituent la dérive littorale des sédiments. Elle est le résultat direct des propriétés des sédiments et le courant de dérive généré par l'incidence de la

houle oblique. Les houles associées aux courants côtiers sont les facteurs générateurs du transport côtier du sable.

La dérive littorale des sédiments peut se voir très clairement lorsque la ligne de transport sédimentaire naturel est entravée par des constructions côtières telles que les barrages et les digues. Ces sédiments sont bloqués et ne peuvent se déplacer parallèlement à la côte. En conséquence, les phénomènes d'accrétion et d'érosion surviennent en amont et en aval de la construction, respectivement. Ce transit est souvent estimé par la quantité de sédiments déposés en amont de la digue, ou le barrage au large ou bien la masse accrétée dans l'estuaire et l'entrée du port, ou bien le taux d'érosion du trait de côte dans le secteur d'étude. Cette estimation indirecte consiste à plus ou moins décrire l'état du transit des sédiments, mais avec une précision relative.

c. Transport transversal des sédiments

L'étude du transport transversal des sédiments laisse encore de nombreuses questions non élucidées. Ce point a motivé de nombreux chercheurs dans le domaine de l'ingénierie côtière, à la fois expérimentale et théorique. En principe, il n'est pas possible d'effectuer une description détaillée de la dérive littorale des sédiments sans le modèle du transport transversal des sédiments et de l'évolution du profil. Le modèle du transport sédimentaire dans le profil de plage calculera les changements du volume de transport parallèlement au profil de la plage.

Le transport transversal des sédiments est principalement déterminé par le régime des vagues (**Silva et al. 2002**). Ses mécanismes sont liés aux conditions internes et externes à la zone de déferlement. Son intensité à l'intérieur de cette zone est beaucoup plus grande que celle à l'extérieur de cette zone. Les phénomènes d'accrétion et d'érosion le long d'un profil de plage dépendent particulièrement du gradient et du sens du transport sédimentaire en chaque point du profil (**Silva et al. 2002**).

1. Cadre géographique

Notre cas d'étude est le littoral centre de l'Algérie ; il s'étend de Dellys (wilaya de Boumerdès) jusqu'à Ténès (wilaya de Chlef).

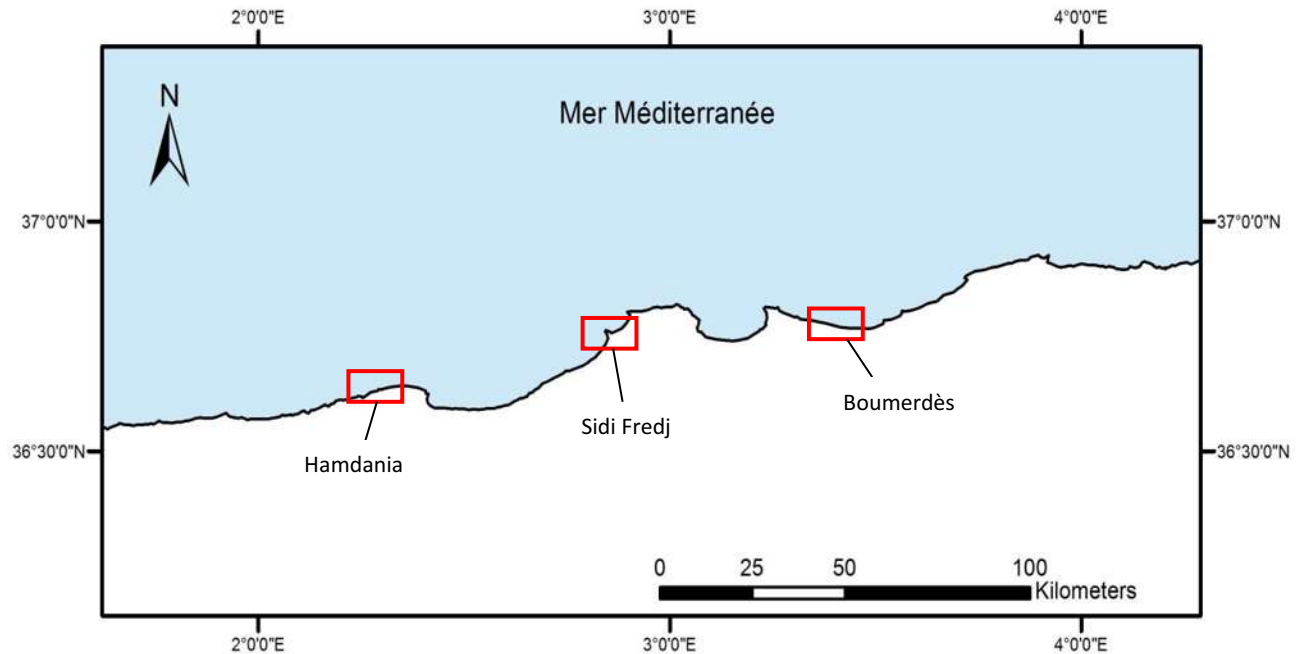


Figure 2.1 : Situation géographique du littoral centre de l'Algérie (ArcGis, Azzi et Boukert, 2017).

Pour faire notre étude, on a divisé le littoral centre en trois parties : partie Est du littoral centre (plage de Boumerdès), partie centre du littoral centre (plage Est de Sidi Fredj) et la partie Ouest du littoral centre (plage Hamdania).

a- Boumerdès

Notre première zone d'étude se situe dans la wilaya de Boumerdès qui représente la zone Est du littoral centre de l'Algérie. Située dans la baie de Zemmouri à environ 50 km de l'Est d'Alger ; la plage de Boumerdès est une bande littorale d'une longueur d'environ 1200 m. Elle est délimitée par Oued Corso à l'Ouest, le Rocher noir à l'Est, le plateau de Boumerdès et la ville au Sud et la mer Méditerranée au Nord.

Les coordonnées de la plage de Boumerdès sont:

- Latitude Nord 36°46'0'' à 36°46'07''
- Longitude Est 3°27'46'' à 3°28'37''

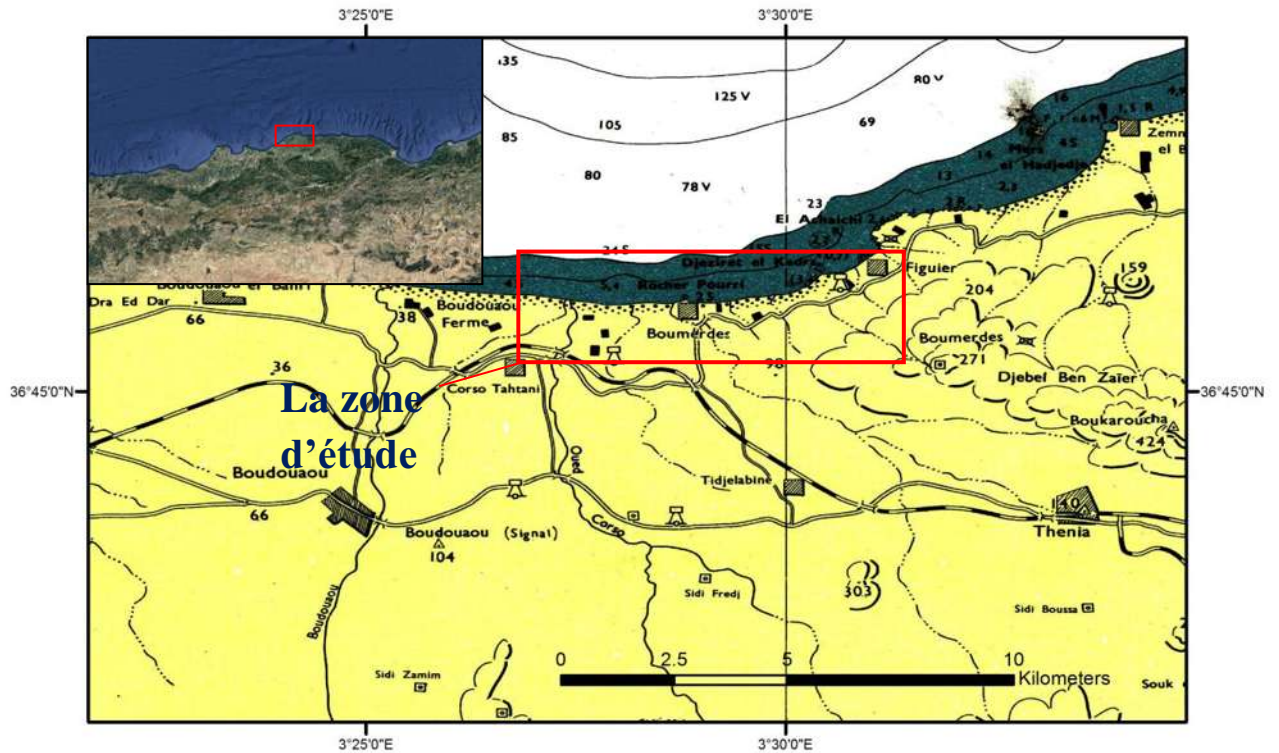


Figure 2.2 : Situation géographique de la plage Boumerdès (ArcGis, Azzi et Boukert, 2017).

b- Sidi Fredj

Notre seconde zone d'étude se situe dans la wilaya d'Alger qui représente la zone centre du littoral centre de l'Algérie. Située à l'Ouest de la baie d'El Djamilia à environ 25Km d'Alger ; la plage Est de Sidi Fredj est une bande littorale d'une longueur d'environ 450 m. Elle est délimité parle massif d'Alger à l'Est, à l'Ouest par la baie de Bouismail, le Sahel et la plaine de la Mitidja au Sud et la mer Méditerranée au Nord.

Les coordonnées de la plage Est de Sidi Fredj sont:

- Latitude Nord $36^{\circ}45'34''$ à $36^{\circ}45'46''$
- Longitude Est $2^{\circ}50'49''$ à $2^{\circ}51'2''$

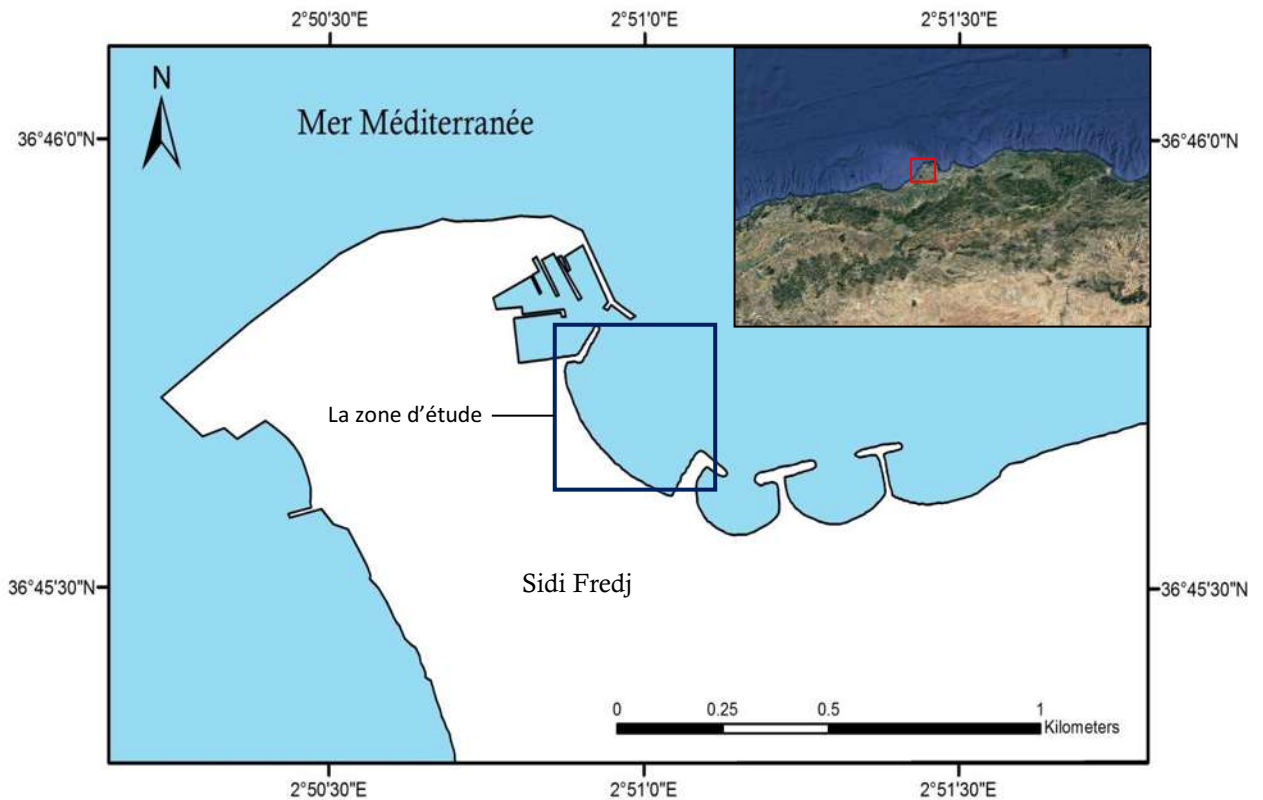


Figure 2.3 : Situation géographique de la plage Est de Sidi Fredj (ArcGis, Azzi et Boukert, 2017).

c- Hamdania

Notre troisième zone d'étude se situe dans la wilaya de Tipasa qui représente la zone Ouest du littoral centre de l'Algérie. Située à l'Ouest du massif de Chenoua à environ 90 Km d'Alger ; la plage de Hamdania est une bande littorale d'une longueur d'environ 2000 m et de 35 m de large en moyenne. Elle est délimitée par les trois îlots à l'Est, oued El Bellah à l'Ouest, le massif de Chenoua au Sud et la mer Méditerranée au Nord.

Les coordonnées de la plage Hamdania sont:

- Latitude Nord 36°37'3'' à 36°37'37''
- Longitude Est 2°14'44'' à 2°15'42''

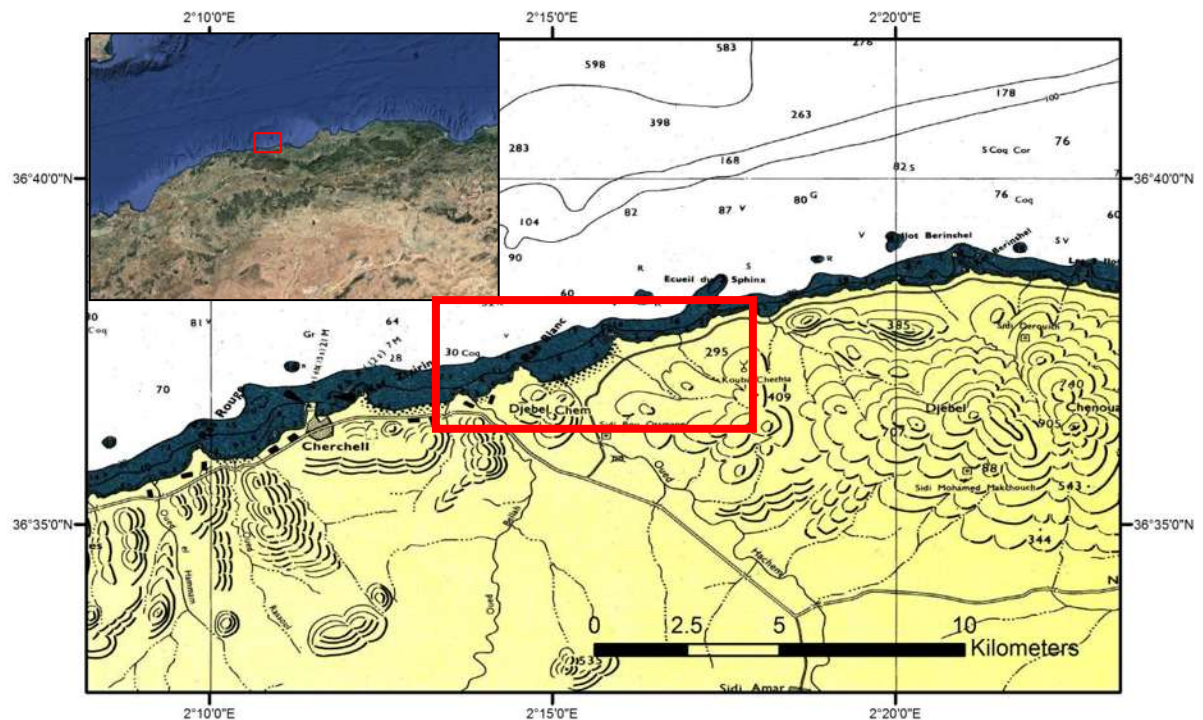


Figure 2.4 : Situation géographique de la plage Hamdania (ArcGis, Azzi et Boukert, 2017).

2. Cadre géologique et géomorphologique

a- Boumerdès

La figure 2.5 les observations sur le terrain et les synthèses de diverses études géologiques permettent de nous renseigner sur la géologie de la région de Boumerdès, on a pu décrire les formations suivantes

- **Les roches sédimentaires** : La zone de Boumerdès est constituée dans sa majeure partie de sable rouge du Pliocène supérieur, sauf le long des oueds où on peut observer de la marne bleue sahélienne et des dépôts récents d'alluvions. Cette zone est un dépôt

b- Sidi Fredj

Le littoral de la baie d'El Djamila est caractérisé par une importante accumulation sableuse. De nombreux bands rocheux affleurent au niveau de l'estran et se poursuivent sous l'eau (**Boutiba, 1996**).

Le substratum métamorphique de la presqu'île de Sidi Fredj est constitué de granites et de gneiss largement fissurés et diaclases.

Le promontoire rocheux est constitué de quatre types gneiss oeillet identifiés par l'étude pétrographique :

- Type 1 : « vieux gneiss » caractérisé par la foliation et linéation bien marquées de teintes grises assez claires.
- Type 2 : gneiss oeillet massif peu orienté de teinte claire.
- Type 3 : gneiss oeillet à grains fins bien lités de teinte claire, riche en quartz.
- Type 4 : gneiss oeillet avec un aspect de granite orienté avec une foliation moulante de phénocristaux.

La position de Sidi Fredj dans l'édifice structural reste difficile à préciser vu l'isolement de la formation gneissique de Sidi Fredj des autres unités techniques du massif d'Alger (**Bellahsene et Messaoudi, 2005**).

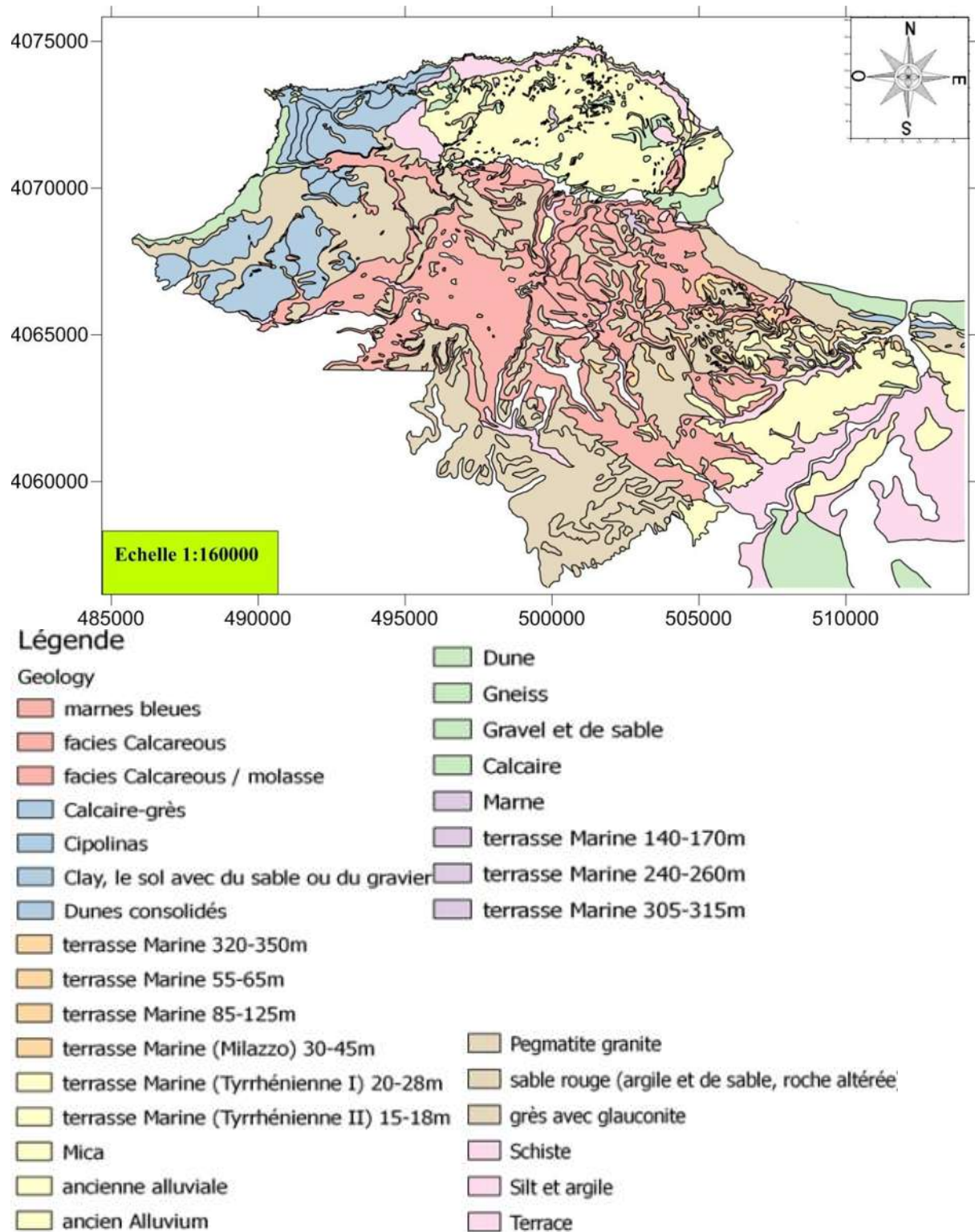


Figure 2.6: Carte géologique régionale de la zone de Sidi Fredj

c- Hamdania

L'essentiel du linéaire côtier du littoral ouest est formé par les terrasses du Pléistocène et du Pliocène ancien (Nègre, 1964) constituées de grès plus ou moins durs renfermant des *Hélix* et des débris marins (Khelifi, 2008).

L'étude tectonique et orographique de la région algéroise a relevé que la zone littorale a été découpée, pendant le secondaire, en différents compartiments (Glageaudet *al.*, 1952) :

- une chaîne calcaire (Chenoua).
- une nappe de flysh entre Ténès et Cherchell.
- une série marno- argileuse au niveau du sahel, entre Chenoua et Zéralda.
- une série néritique sur le littoral à l'ouest d'Alger.

Du mont Chenoua à Cherchell se disséminent des falaises et zones rocheuses ainsi que des grèves et des plages à sédiments fournis par l'érosion des roches schisteuses du Dévonien. Dans le Chenoua, seuls les schistes épi-métamorphiques affleurent et correspondent à du Paléozoïque. Oued Mousselmoun (Ouest de Cherchell) termine cette succession de falaises (BOUTIBA, 2004)

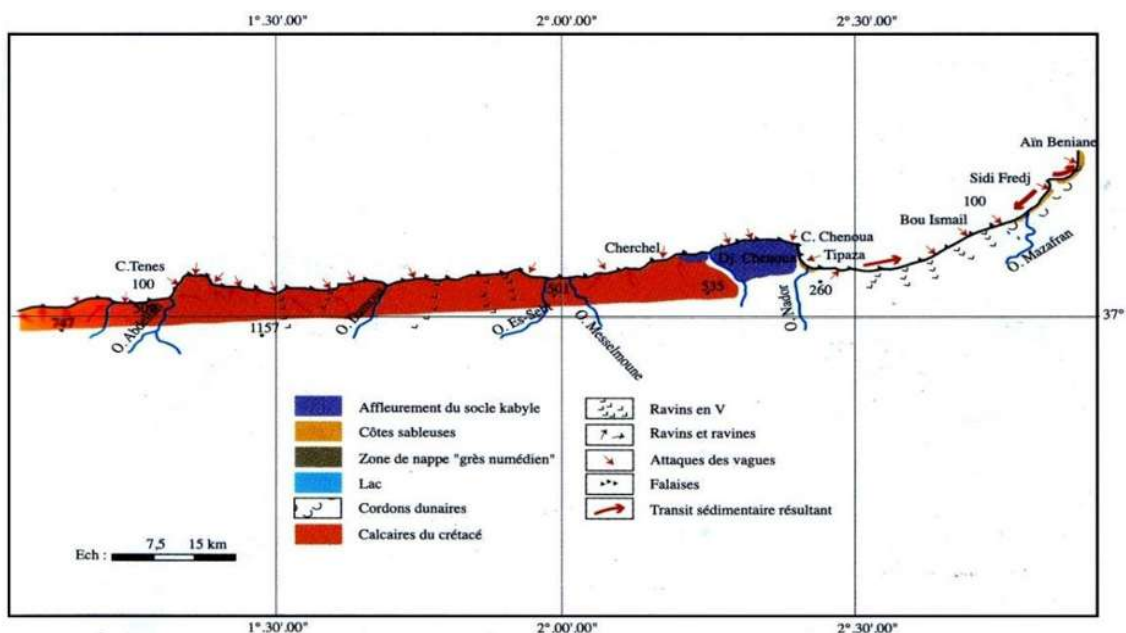


Figure 2.7 : Esquisse morphologique du secteur Alger-Ténès (BOUTIBA, 2004).

3. Cadre hydrologique

a- Boumerdès

La wilaya de Boumerdès est l'une des régions les plus arrosées au niveau national puisqu'elle reçoit annuellement un volume pluviométrique compris entre 500 mm et 1300mm/an. (ANRH. 2014)

Les eaux souterraines de cette zone sont constituées par des nappes profondes et superficielles dont le volume est d'environ 93hm³(LEM.2014).En plus, les eaux superficielles constituent une ressource non négligeable.

Plusieurs oueds font partie de la région de Boumerdès et qui débouchent tous dans la baie de Zemmouri : Oued Isser, Oued Safsaf, Oued Boumerdès, Oued Tatareg, Oued Corso, Oued Boudouaou, Oued Réghaia (Figure 2.8).

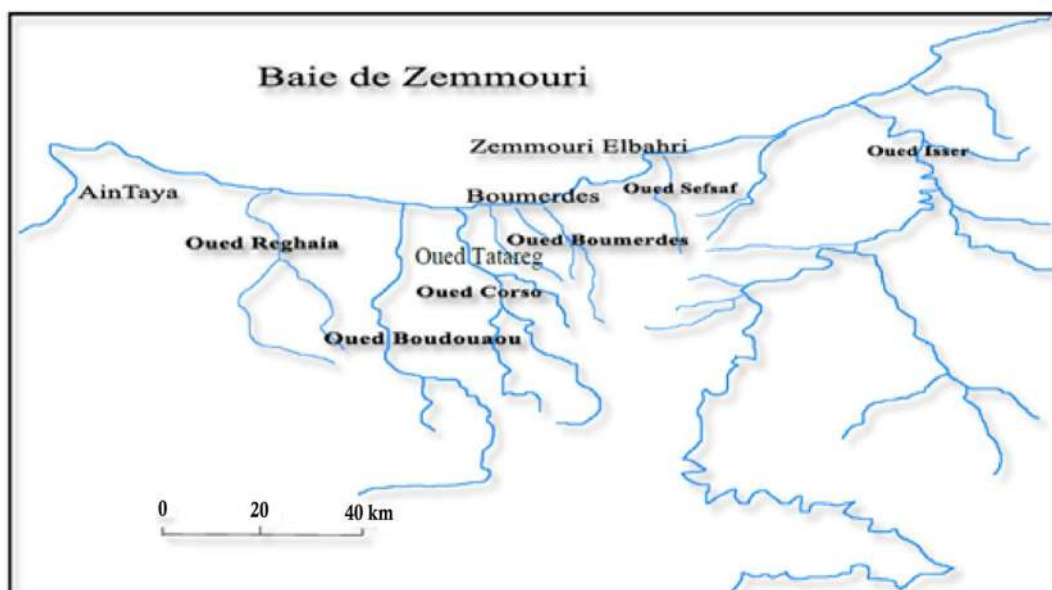


Figure 2.8: Le réseau hydrographique régional dans la baie de Zemmouri (ANRH, 2014).

Tableau 2.1: Estimation des transports solides (ANRH, 2004).

| Les oueds | Taux d'abrasion moyen (m ³ /km ²) | Volume du transport solide (Mm ³ /an) |
|----------------|--|--|
| Oued Réghaia | 210 | 0.02 |
| Oued Boudouaou | 138 | 0.21 |
| Oued Corso | 115 | 0.11 |
| Oued Boumerdès | 55 | 0.02 |
| Oued Isser | 120 | 4.96 |

b- Sidi Fredj

La baie d'El Djamila est alimentée par l'oued Beni Messous, l'oued Beni Messous prend sources du massif de Bouzaréah et a un impact plus important sur la zone, il regroupe l'oued Defla et l'oued Bainem.

L'oued de Beni-Messous est situé entre El-Djamila et Club des Pins à 18 Km à l'ouest d'Alger. Son débit est estimé à 7.7 millions m³/an (0.245 m³/s) (Benzohra, 1993).

Tableau 2.2: Caractéristiques du bassin versant de l'oued Beni Messous (Dheewa, 2011).

| Surface bassin versant (km ²) | longueur (km) | pente (%) | altitude | | perméabilité | | |
|---|---------------|-----------|----------|-----|----------------------------|------------------------------|---------------------------|
| | | | min | max | perméable | semi-perméable | imperméable |
| 33 | 11.5 | 3 | 0 | 360 | 7 km ² 21.2% | 11 km ² 33.3 % | 15 km ² 45% |

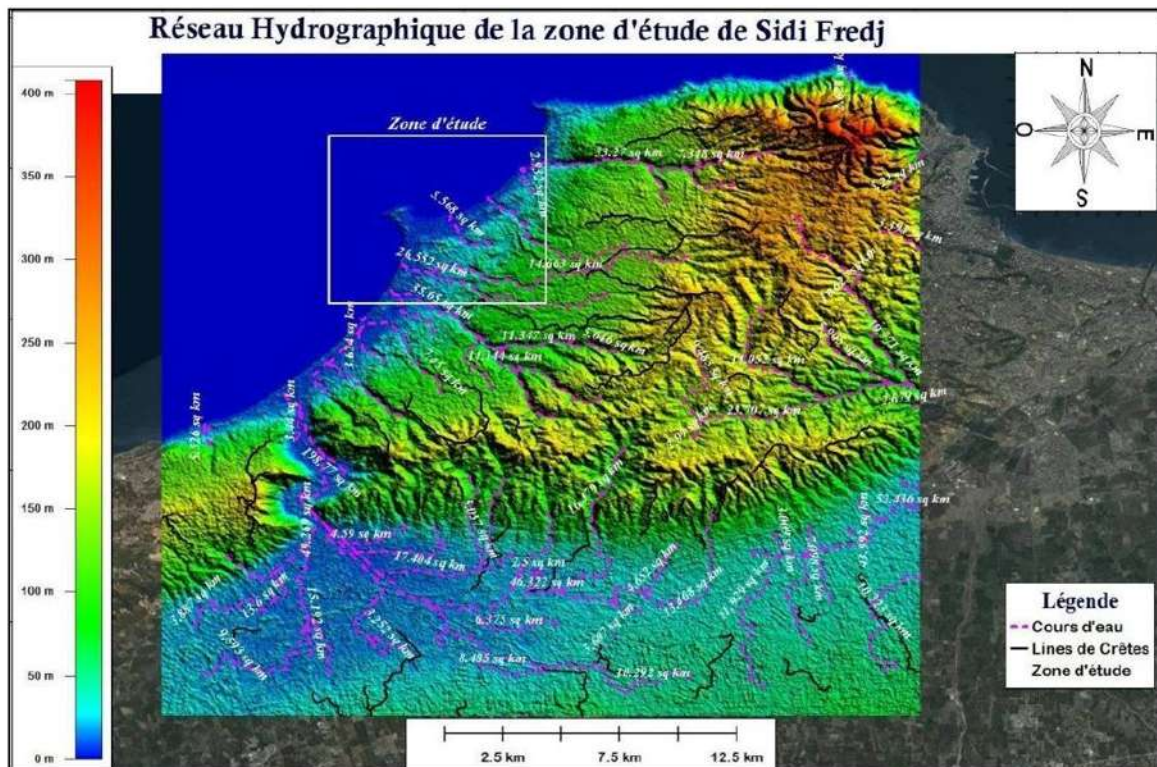


Figure 2.9: le MNT du réseau hydrographique de la baie d'EL Djamila (Benallaoua, 2013).

c- Hamdania

La zone côtière de la wilaya de Tipasa s'étend de l'embouchure de l'oued Mazafran à l'est jusqu'à l'oued Damous à l'Ouest (PDAU Tipasa, 2006).

On distingue deux principaux bassins hydrographiques de part et d'autre du Mont Chenoua, l'un côtier, drainant les eaux du versant nord directement vers la mer, l'autre fluvial, alimentant les oueds Hachem et Nador. Le bassin côtier s'étend sur environ 4.800 ha et se compose d'une série de sous-bassins dont les plus importants sont le sous-bassin de l'oued Medjoua (1.842 ha), l'oued Hachem (2.400 ha), l'autre à l'oued Nador (900 ha).

La wilaya de Tipaza dispose d'un réseau hydraulique important. Nous distinguons d'Est en Ouest :

- Oued Mazafran ;
- Oued El Hachem ;
- OuedDjer ;
- OuedDamous.

En plus d'une multitude de petits affluents permanents ou temporaires tel : Oued Merzoug, Oued Bourgal, Oued Guesrayane, Oued Seris, Oued Hadjjid etc.

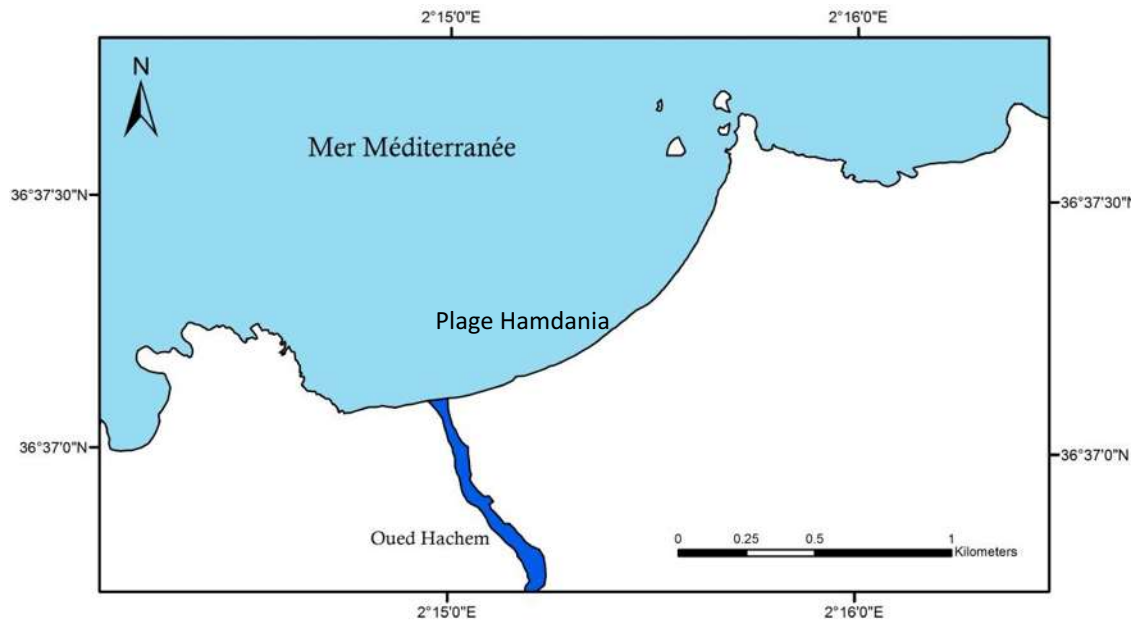


Figure 2.10: Le réseau hydrographique local dans la plage de Hamdania (ArcGis, Azzi et Boukert, 2017).

4. Cadre climatologique

La détermination du caractère de climat est très importante pour mieux apprécier les régimes hydrodynamiques qui régulent et transforment les fonds marins et la zone côtière de notre zone d'étude. Dans notre étude, nous intéressons aux régimes des vents.

- **Le vent**

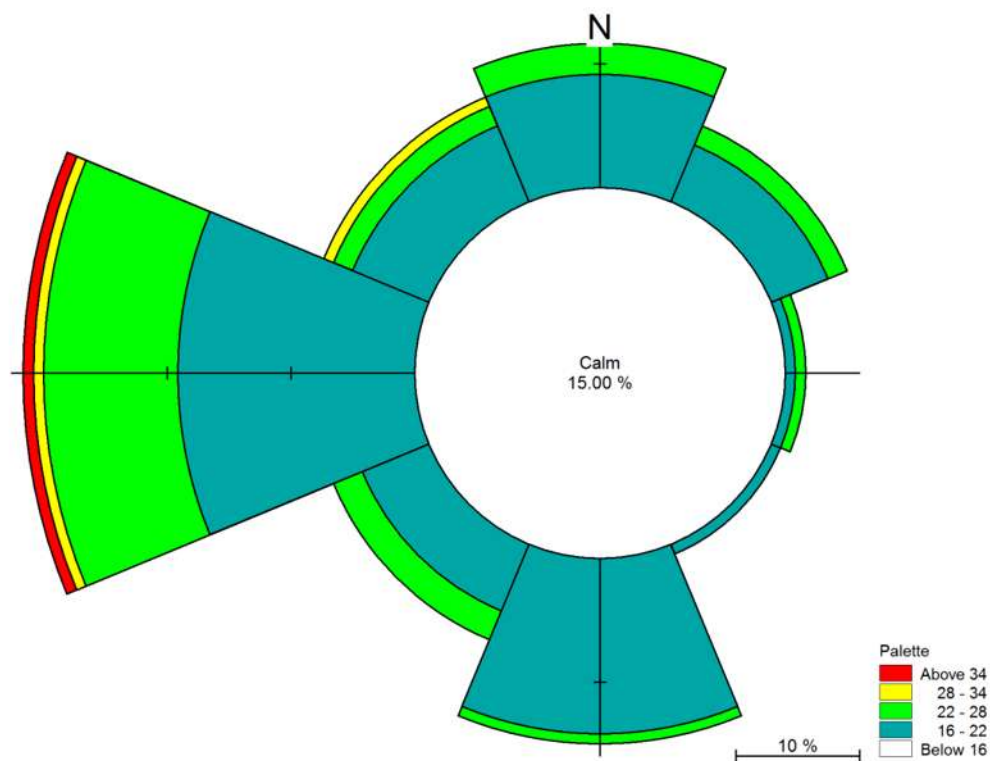
C'est le générateur principal de vagues et de courants superficiels agissant sur les transferts sédimentaires de façon directe sur la partie aérienne et par différents agents hydrodynamiques sur la partie immergée (Otmami, 2014).

Acquisition des données :

L'acquisition des données s'est faite au niveau de plusieurs sources ; afin de choisir la période la plus longue, qui soit dépourvue le plus possibles de données manquantes pour toutes les stations du centre algérien, le choix s'est porté sur la station de Dar El Beida.

Les données sont collectées, nous nous les sommes procurées sous forme de fichiers EXCEL (période : 1995–2004) de l'office national de météorologie (ONM) une période de 10 ans ; la principal raison qui régit le choix de cette période est :

Période en commun d'enregistrement des données climatiques entre les stations de la région d'étude, comportant le moins de données manquantes possibles ; vue les discontinuités d'enregistrements que connaissent les stations météorologiques de nos régions d'étude, l'arrêt d'une ou de plusieurs stations varie d'une ou plusieurs années tel que la station de Khemissti.



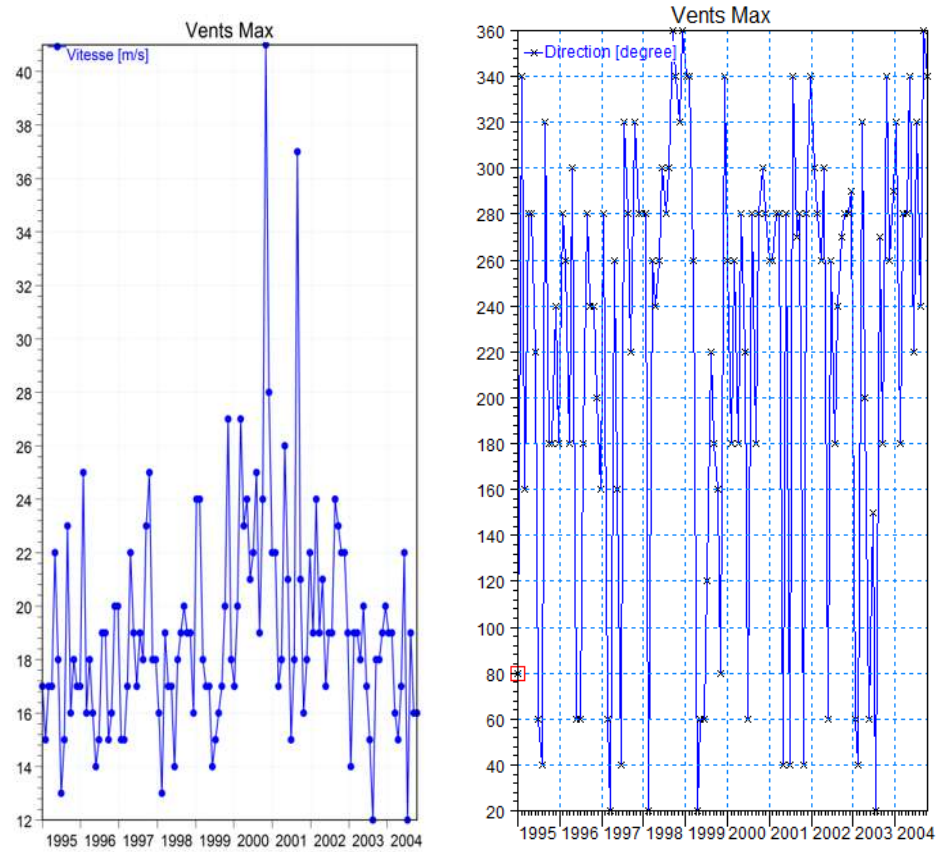


Figure 2.12 : Spectre de vents maximums (direction et vitesse)

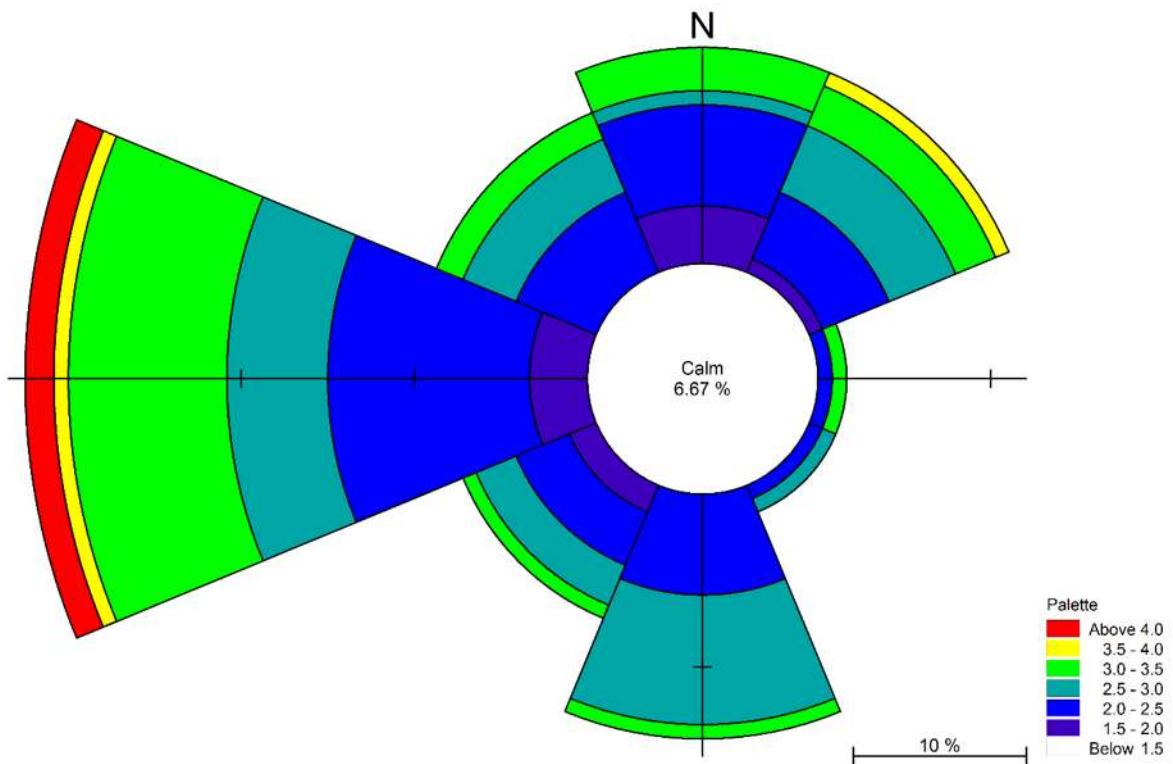


Figure 2.13 : La rose des vents moyens, station de Dar El Beida (DHI Mike 21- Azzi. Boukert, 2017)

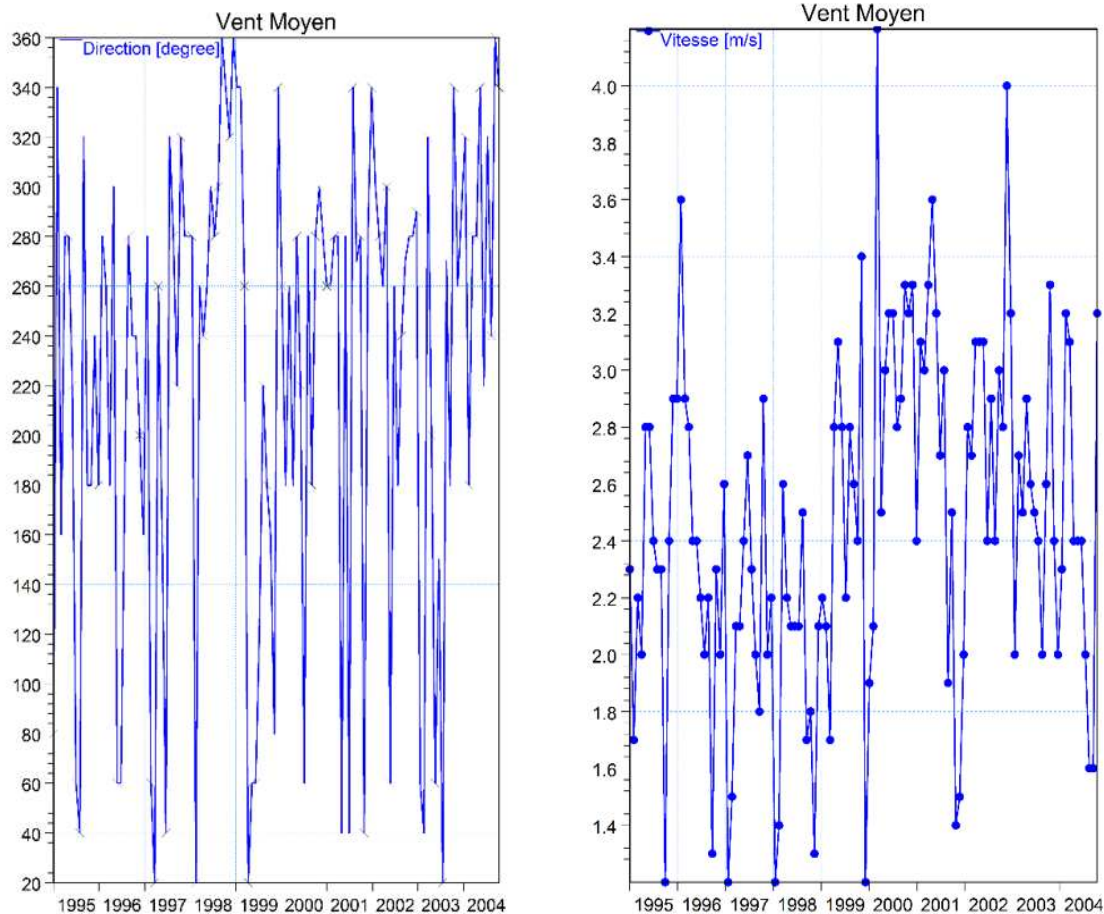


Figure 2.14 : Spectre des vents moyens (direction et vitesse)

5. Cadre hydrodynamique

Le régime sédimentologique, qui concerne tant l'évolution du littoral et des fonds marins (avancée ou recul du rivage, érosion ou sédimentation des fonds.), que les mouvements des sédiments, peut être défini comme étant la résultante des actions des divers facteurs hydrodynamiques (houles, courants, vents) sur les matériaux (meubles ou consolidés) de la côte et des fonds. (Mezouar, 2009).

A. La houle

La connaissance des caractéristiques de la houle au large : direction, amplitude, période, énergie... permettent de (Mezouar, 2009):

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

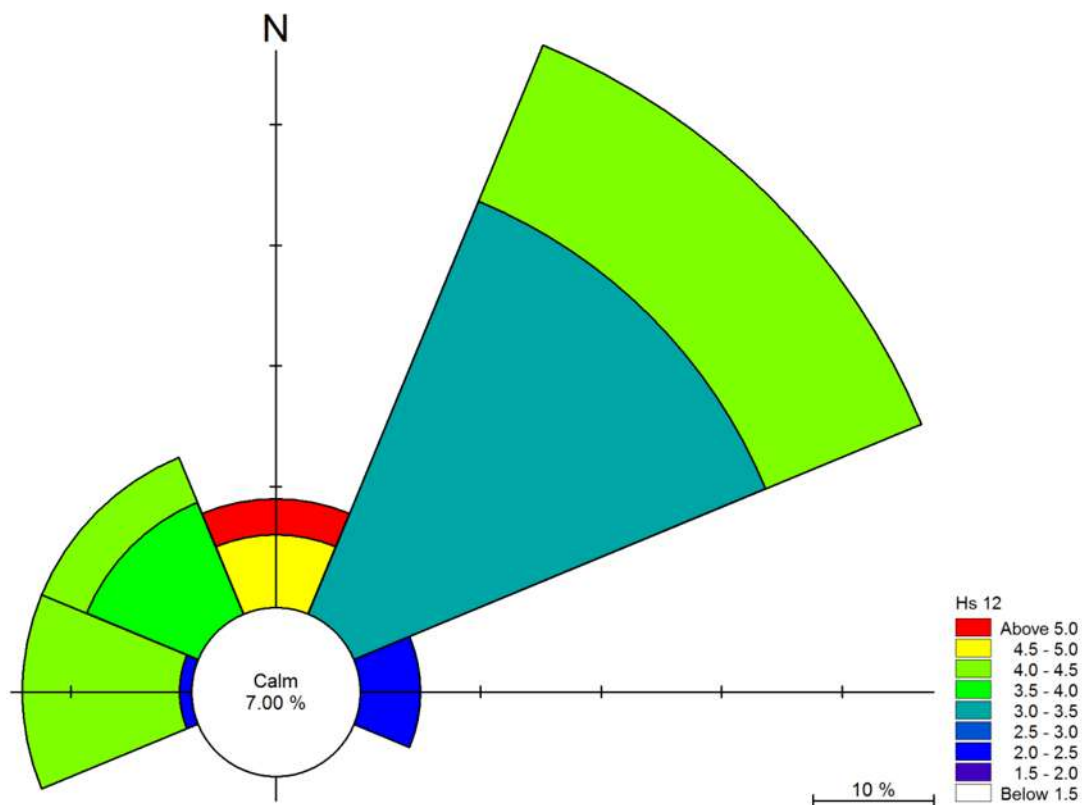


Figure 2.15 : La rose des houles, SSMO (DHI Mike 21- Azzi et Boukert, 2017)

B. Les courants

- **Le courant Algérien :**

C'est un courant général (qui domine au large de la région d'étude), d'origine atlantique, il se déplace d'Ouest en Est le long des côtes algériennes sous l'effet de la force de Coriolis. Ce courant général entre 1° et 2° Est devient instable pour former des tourbillons anticycloniques accompagnés de phénomènes d'upwelling (La remontée d'eau) (Milot et al, 1990).

C. La marée

La marée est un mouvement oscillatoire périodique du niveau de la mer que l'on observe avec plus ou moins d'intensité sur toutes les mers du globe. C'est la réponse de l'océan aux

variations périodiques des forces d'attraction exercées par la lune et le soleil. **(GISTDOERFER, 2002).**

Bien que la marée soit faible sur la côte Algérienne, elle dépasse rarement les 35cm avec des périodes d'environ 12h à 24h, et que notre littoral soit de type micro tidal, il est recommandé de prendre en considération ce marnage surtout que notre zone d'étude (Club des Pins) est caractérisée par une pente douce, ce qui conduit à une amplification des phénomènes d'inondation **(KHALDI, 2015).**

1. Les variations de la ligne de côte

Les études de l'évolution côtière examinent et explorent les raisons pour lesquelles la position et la nature du trait de côte se modifient d'un moment à l'autre. En général, il a été constaté que de nombreux littoraux mondiaux sont sous la menace de l'érosion (WILLIAMS et al., 1990).

2. Les logiciels utilisés

Pour étudier l'évolution du trait de côte on doit faire appel à plusieurs logiciels :

- **logiciel ArcGis 10.2 :**

ArcGis est l'un des logiciels SIG les plus utilisés. Ce logiciel offre de nombreuses potentialités pour la manipulation, la gestion, l'analyse et l'édition des données spatiales. Différentes couches d'informations spatiales peuvent être manipulées offrant la possibilité d'analyser une ou plusieurs couches sous le contrôle des autres. Le seul lien entre ces différentes couches est le lien spatial, c'est-à-dire, l'appartenance au même espace géographique et ayant le même système de coordonnées (Asbai, 2013).

- **Google Earth Pro :**

Google Earth Pro est un logiciel qui permet de voyager dans le monde via un globe virtuel et d'afficher des images satellites, des plans, des reliefs et des bâtiments 3D. C'est un logiciel qui contient des images de grande résolution de l'ordre de 30m à 60cm (SPOT, QUICKBIRD, IKONOS,...). Ces images sont issues d'entreprises de commercialisation d'images et sont archivées sur le serveur de Google Earth Pro qui est accessible par connexion à l'internet. Elles sont mises à jour au fur et à mesure.

- **Aperçu de l'extension DSAS :**

Le système d'analyse Shoreline Digital (DSAS) est une application logicielle disponible gratuitement qui travaille dans le (ESRI) Système d'information géographique (ArcGIS). DSAS calcule les statistiques de taux de changement pour une série chronologique des données vectorielles du littoral. (Himmelstoss et al, 2016).

Barre d'outils de DSAS :

- Définir / Modifier les paramètres : spécifiés les noms de fichiers pour les entrées de référence et de rivage et d'autres paramètres, tels que l'espacement des profils.
- transects Cast : génère une nouvelle (ou écrase un existant) classe d'entités des profils en fonction des paramètres par défaut spécifiés par l'utilisateur.
- Le menu déroulant : répertorie tous les fichiers de transect reconnus ajoutés au projet ArcMap actif.
- Calculer les statistiques : lance une boîte de dialogue peuplée avec une liste sélectionnable des statistiques de changement de taux à calculer.
- Clip transects à SCE : lance une boîte de dialogue offrant aux utilisateurs la possibilité de générer une copie du fichier de profils spécifié qui est accroché à l'enveloppe de changement de rivage (SCE) ou la distance maximale entre tous les rivages.
- Lancer la fonction d'aide DSAS.
- A propos de DSAS : fournit des informations sur le logiciel, y compris le numéro de version (USGS, 2016).

3. Les statistiques calculées par le DSAS

a. Mouvement net des rivages (NSM)

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

b. Le taux des points extrêmes (EPR)

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

c. Le Linear Regression Rate-of-change (LRR):

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

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

4. Résultats

L'évaluation des variations spatio-temporelles de la position des traits de côte a été étudiée sur les trois zones d'étude (Boumerdès, Sidi Fredj et Hamdania).

Voici l'étude de l'évolution du trait de côte pour chaque zone :

A. Boumerdès

Dans cette première zone, la digitalisation des traits de côté a été faite sur cinq images satellitaires de la plage de Boumerdès de dates différentes : 2008, 2009, 2012, 2015 et 2016.



Figure 3.1: Evolution du trait de côte de la plage de Boumerdès selon différentes périodes entre 2008et 2016.

- **Génération de transects**

La génération des transects perpendiculaires par rapport à la ligne de base de chaque zone a été réalisée à l'aide de l'extension Digital Shoreline Analysis System (DSAS) sur ArcGis. Ce qui nécessite une longueur des transects et le pas de mesure pour chaque zone d'étude.

L'analyse de l'évolution du trait de côte de cette zone d'étude a été faite sur 87 transects d'une longueur des transects de 210 m et d'un pas de mesure de 15 m (**figure 3.2**).

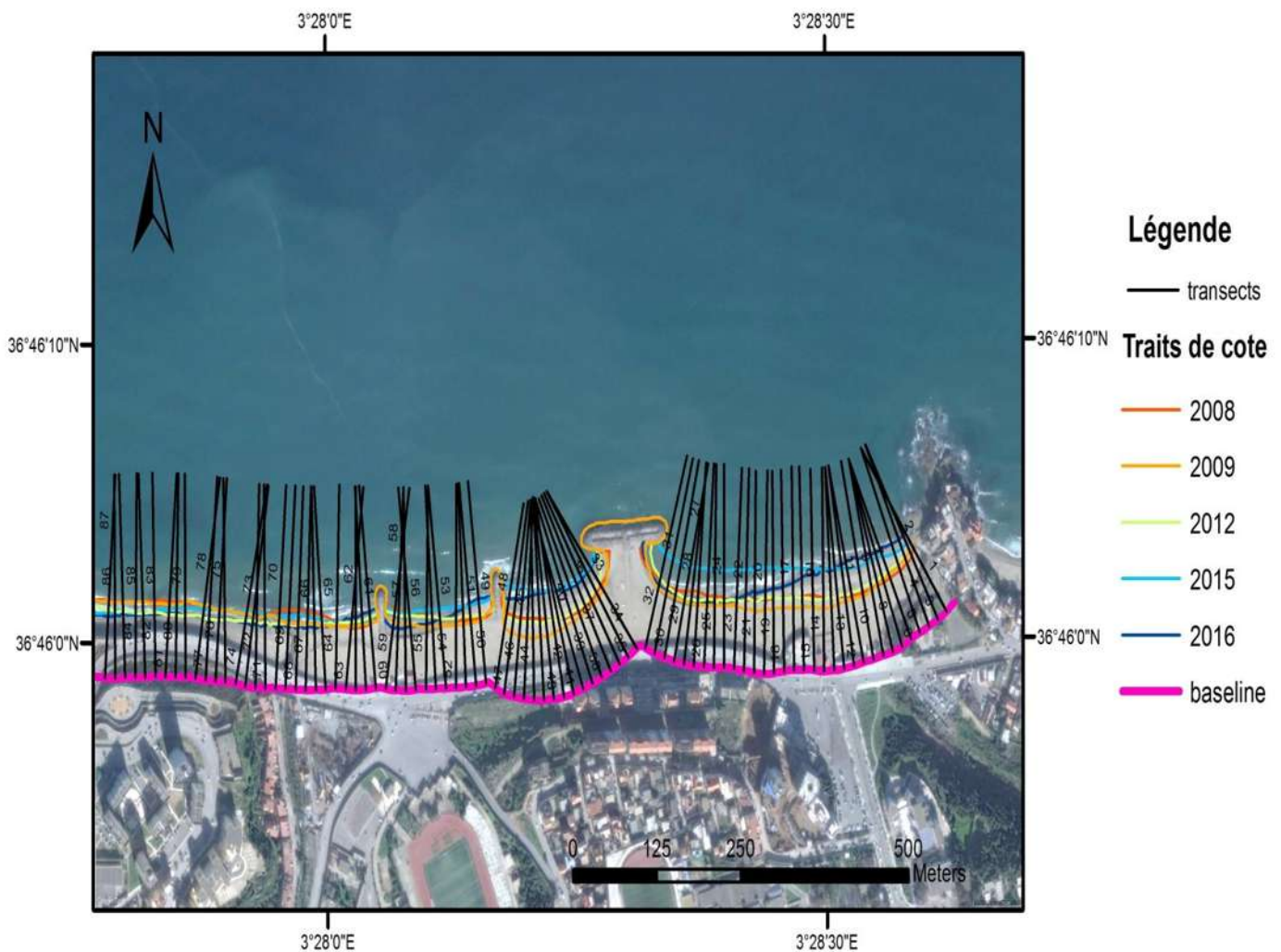


Figure 3.2 : Evolution de la ligne de côte de la plage de Boumerdès entre 2008 et 2016 et position des transects.

- **Les calculs statistiques**

a. Mouvement net des rivages (NSM)

Pour bien comprendre la dynamique de ces différents traits de côté selon l'échelle spatio-temporelle, on a projeté les données statistiques du mouvement net des rivages (NSM) calculées par l'extension DSAS pour élaborer une cartereprésentative de la zone d'étude de Boumerdès :

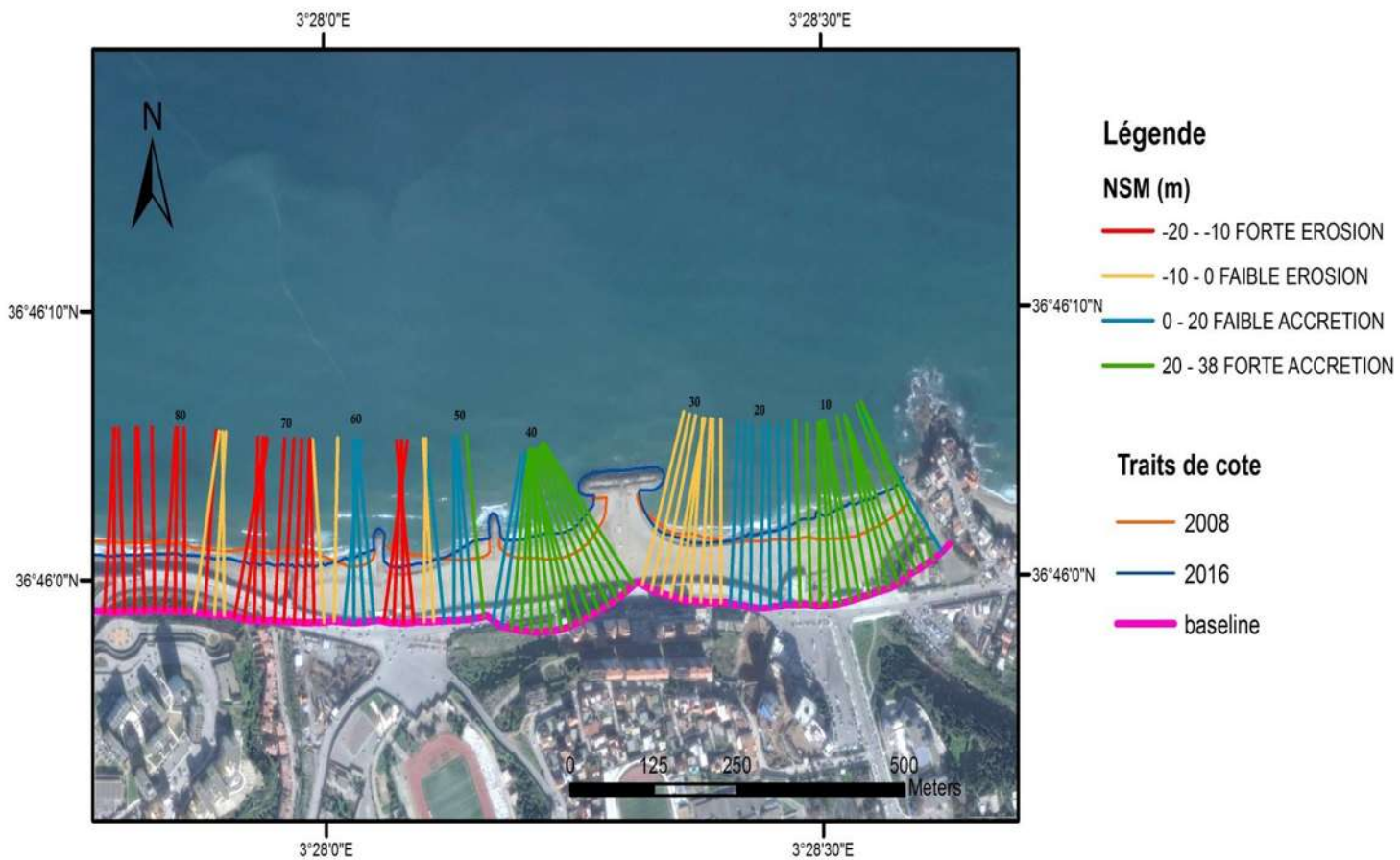


Figure3.3: Illustration du Mouvement net des rivages (NSM) de la plage de Boumerdès entre 2008 et 2016.

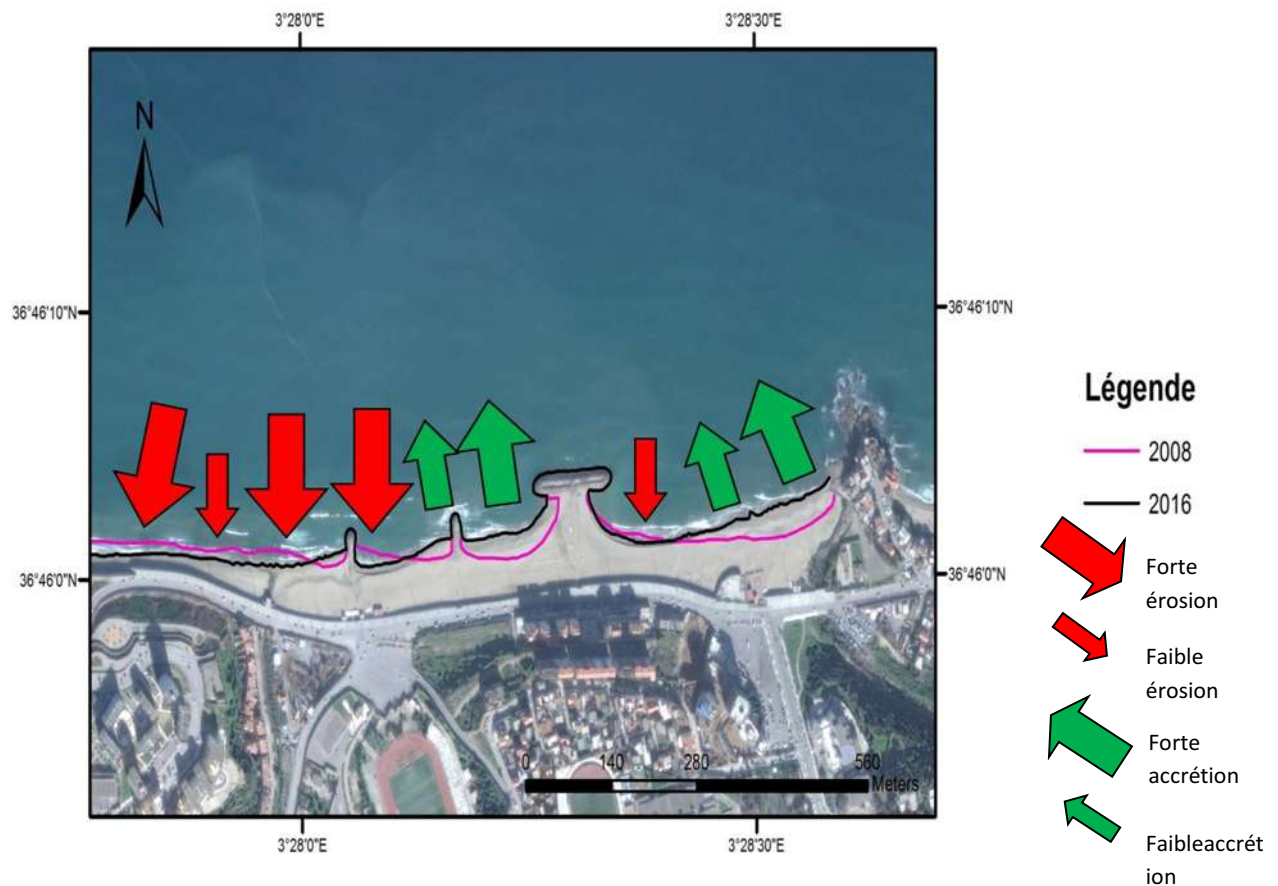


Figure 3.4: Représentation de la direction de l'évolution du trait de côte de la plage de Boumerdès entre 2008 et 2016

Commentaire :

La figure 3.3 nous renseigne sur les distances de déplacement du trait de côté sur chaque transect entre 2008 et 2016 dans la plage de Boumerdès, puisque le NSM ne prend en considération que les traits de côté le plus récent et le plus anciens.

La couleur verte des transects indique une accrétion de 20 à 38 m, le bleu pour l'accumulation de 0 à 20 m entre 2002 et 2017. Alors que les couleurs de transects qui indiquent la régression sont le jaune et le rouge. Cette érosion peut atteindre les 20 m entre ces dernières 15 années.

L'accrétion dans la plage de Boumerdès ne figure que dans sa partie Est et centrale, cette avancée du trait de côté peut atteindre parfois les 38 m. Par contre le recul couvre toute la partie Ouest de la plage avec des distances de 0 à 20 m.

La figure 3.4 indique les différentes directions de déplacement des traits de côté de la plage de Boumerdès entre 2008 et 2016, on voit que le côté Ouest de la plage est en régression et le côté Est et centre est en engraissement important.

b. Le taux de point final (EPR):

Pour bien comprendre l'évolution de ces différents traits de côté selon l'échelle spatiotemporelle, on a projeté le support statistique du taux des points finaux (End Point Rate), pour élaborer une carte représentative de cette zone d'étude (**Figure 3.13**).

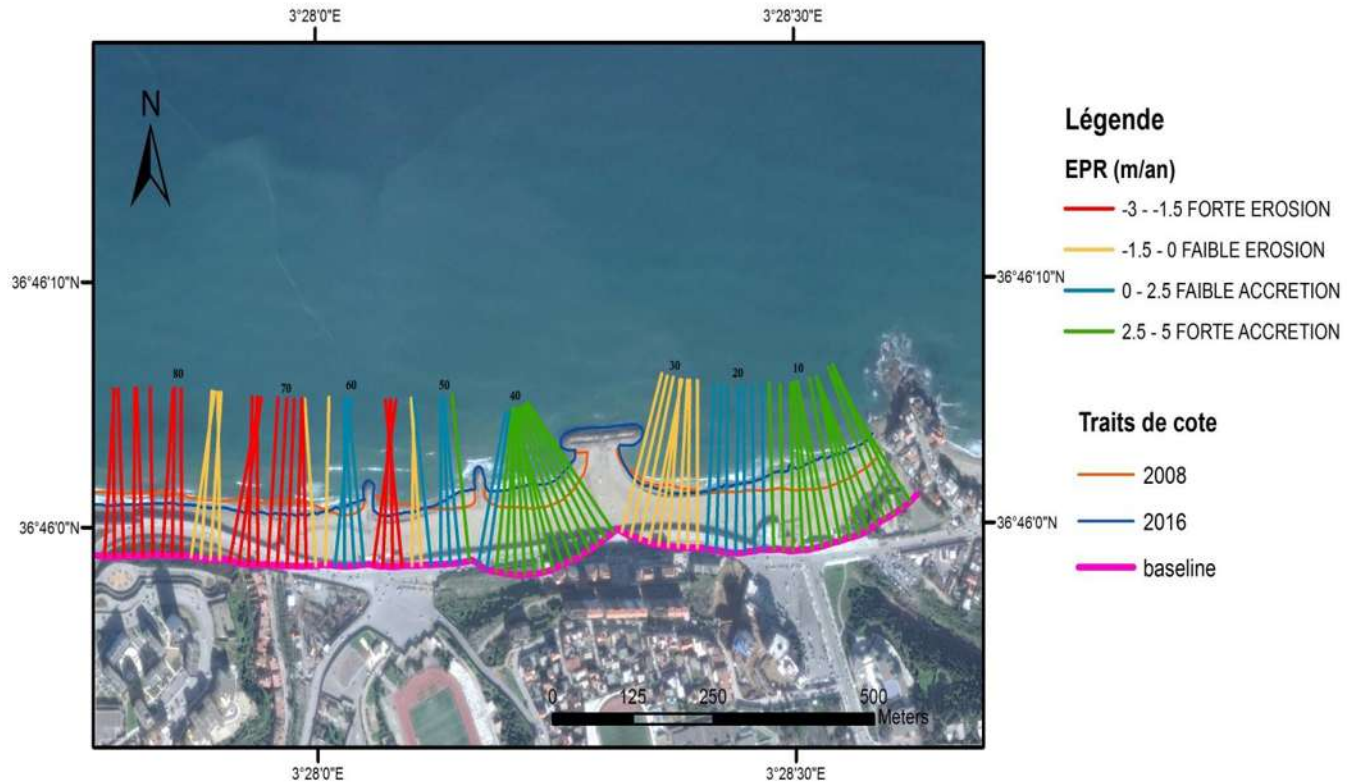


Figure 3.5: représentation du rythme d'évolution du trait de côte de la plage de Boumerdès entre 2008 et 2016.

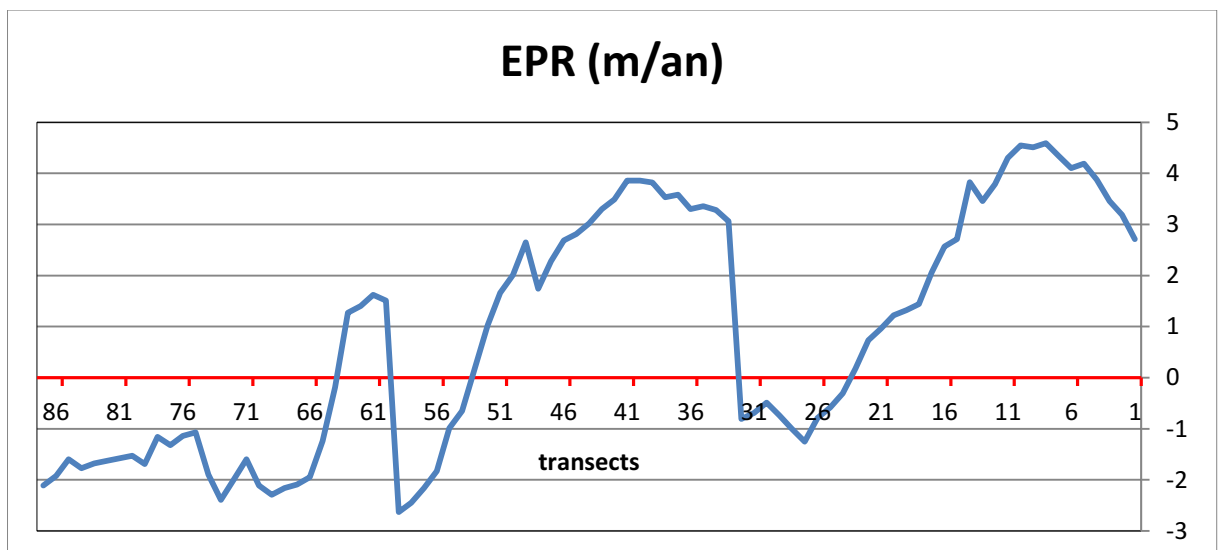


Figure 3.6 : Vitesse d'évolution du trait de côte au niveau de la plage de Boumerdès entre 2008 et 2016.

Commentaire :

Selon la figure 3.5 on constate que cette plage de Boumerdès au cours de ces 8 dernières années, son trait de côte entre 2008 et 2016 a subi beaucoup de changement. On voit qu'il y a une forte accumulation dans la partie Est de la plage de Boumerdès et entre l'épi en forme de T et l'épi central. Cette accumulation de sable a un taux qui peut dépasser les 3 m/an est illustrée par les couleurs des transects en vert et en bleu dans la figure 3.5. Le gain de sédiments dans la plage de Boumerdès est entre les transects 1 à 23 et entre 32 à 52 (**Figure 3.6**).

L'érosion se trouve dans la partie Ouest de la plage de Boumerdès et en aval des épis, elle est indiquée par les couleurs de transects en rouge et en jaune, cette perte dont la vitesse dépasse parfois les 2m/an est entre les transects 53 et 60 et aussi les transects 64 et 84 (**Figure 3.6**).

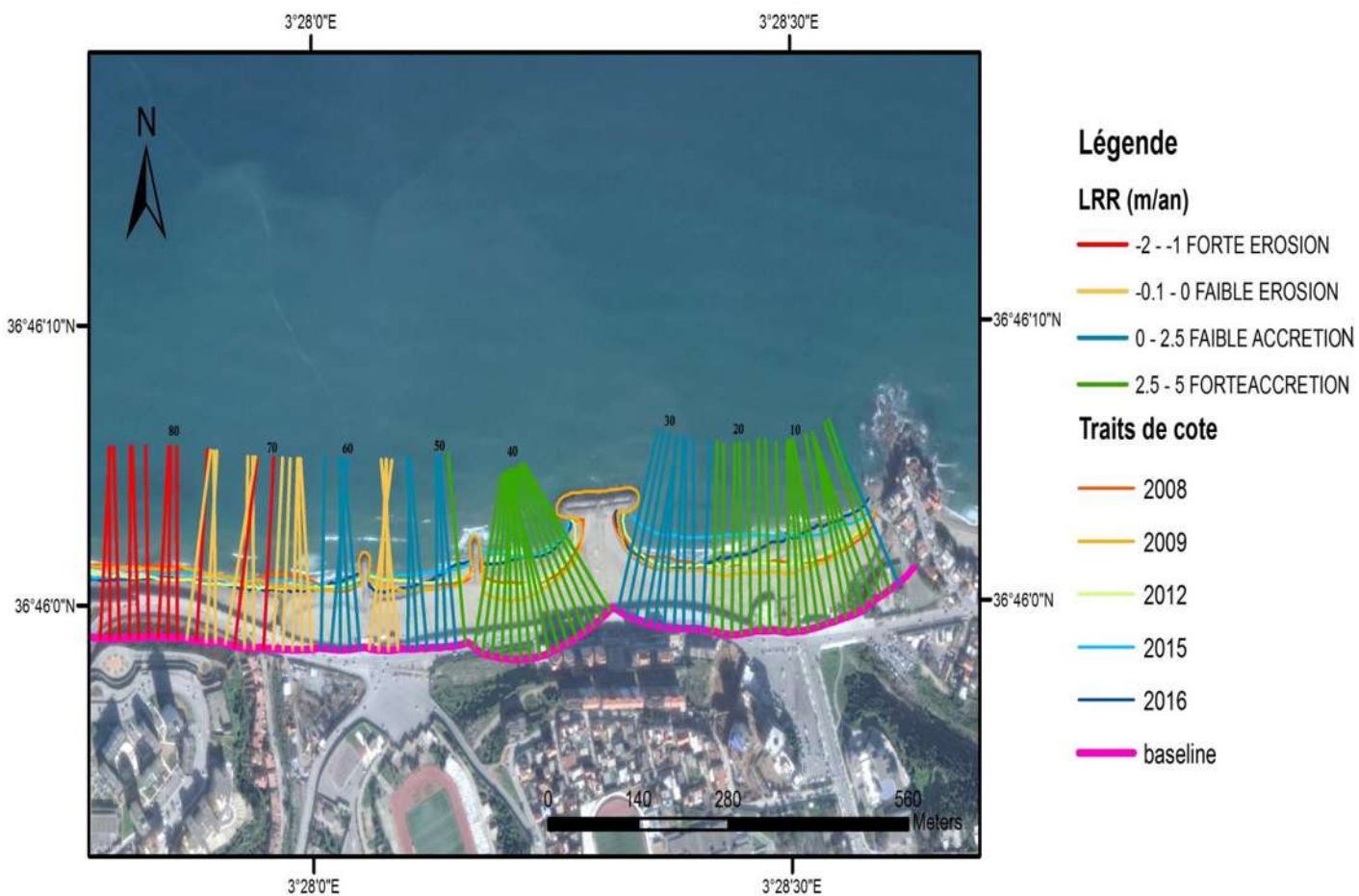
c. Le Linear Regression Rate-of-change (LRR)

Figure 3.7: Représentation de LRR selon chaque transect dans la plage de Boumerdès entre 2008 et 2016.

Commentaire :

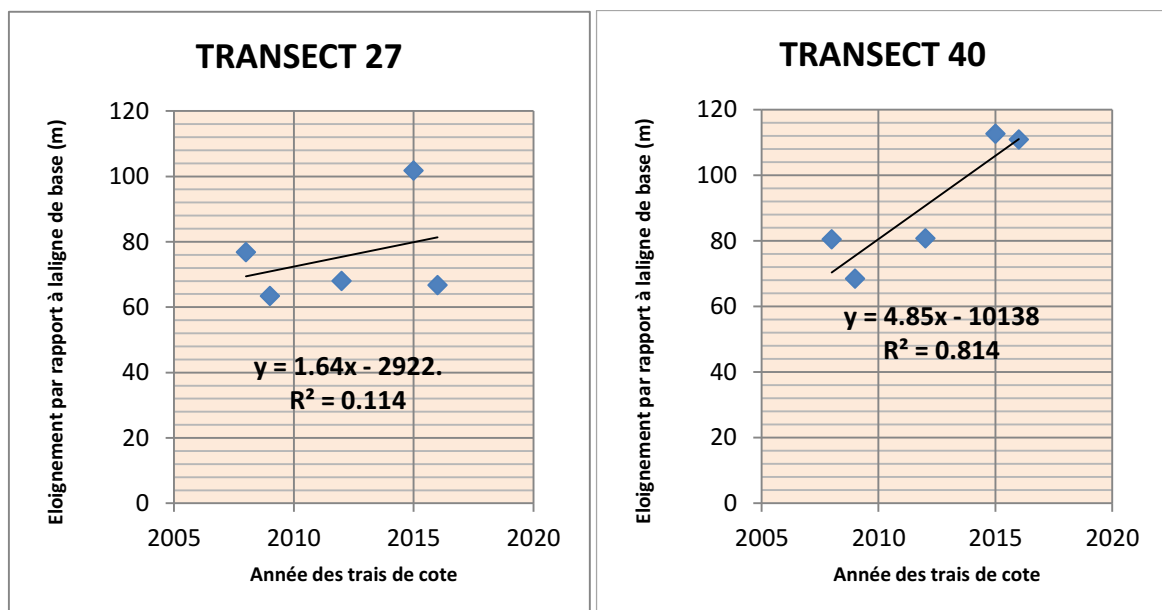
L'objectif du taux de la régression linéaire (LRR) c'est qu'il prend en considération tous les traits de côté de différentes années.

D'après la figure 3.7 de la représentation du taux de la régression linéaire dans la plage de Boumerdès entre les années 2008, 2009, 2012, 2015 et 2016, on constate que le trait de côté a subit beaucoup de changement. On voit que dans la partie Est de la plage (entre le rocher noir et l'épi en forme de T) et la partie centrale de la plage (entre l'épi en forme de T et l'épi central) qui ont des transects colorés en bleu et en vert ; ces deux parties de la plage ont une grande tendance d'engraissement avec une vitesse qui dépasse parfois 4 m/an, cela est due en grande partie au blocage du transit sédimentaire par les épis.

Par contre la partie Ouest de la plage de Boumerdès a connu une tendance régressive entre l'année 2008 et 2016, les transects colorés en rouge et en jaune représentent cette érosion qui a une vitesse d'environ 1 à 2 m/an entre les années 2008, 2009, 2012, 2015 et 2016. Et cela pourrait être dû à l'action frontale de la houle dans cette zone du littoral centre.

On peut dire que l'évolution du trait de côté de la plage de Boumerdès tend en général vers une situation positive (engraissement), alors il y aura toujours un gain de sédiment dans les années prochaines si les conditions climatiques et physiques restent les mêmes.

Voici quelques graphes (**Figure 3.8**) qui représentent des exemples du taux de la régression linéaire de quelque transects de la zone de Boumerdès. Ces graphes confirment la figure de la représentation du taux de la régression linéaire (LRR) selon chaque transect dans la plage de Boumerdès entre 2008 et 2016 car la pente de la courbe de tendance est égale à la valeur de LRR.



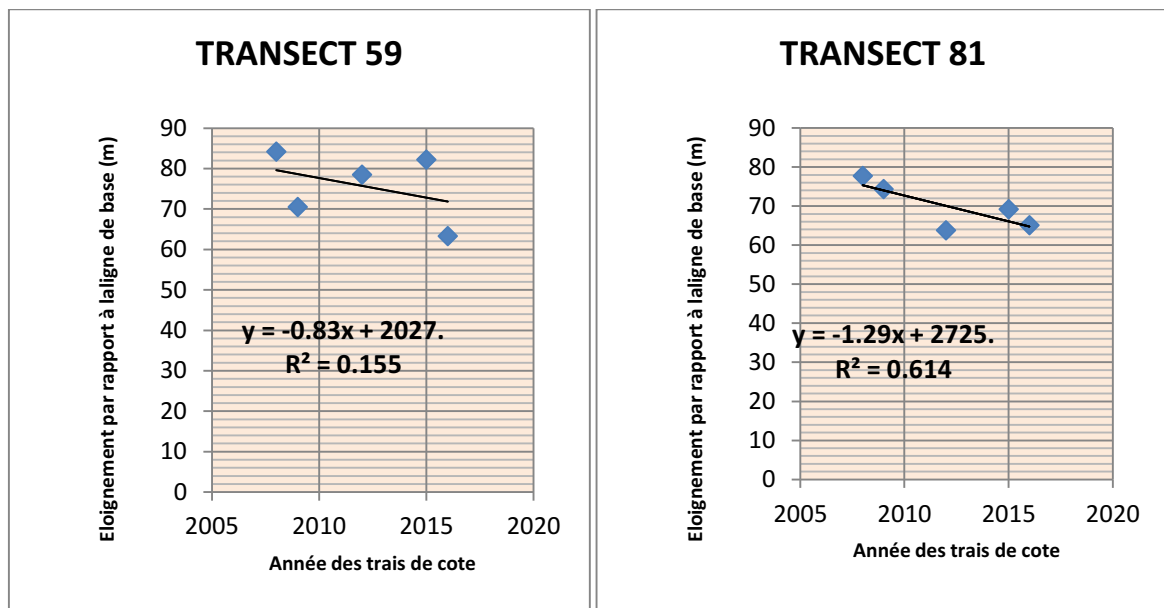


Figure 3.8: représentation graphique du taux de la régression linéaire avec son équation de certains transects de la plage de Boumerdès entre 2008, 2009, 2012, 2015 et 2016.

d. Analyse du bilan sédimentaire

La cartographie de l'évolution surfacique des plages de cette zone d'étude a permis de calculer les surfaces d'érosion et d'accrétion pour faire des histogrammes des bilans sédimentaire.

L'analyse du bilan sédimentaire nous permet de quantifier les surfaces gagnées et les surfaces perdues et cela entre deux périodes 2008 et 2016.

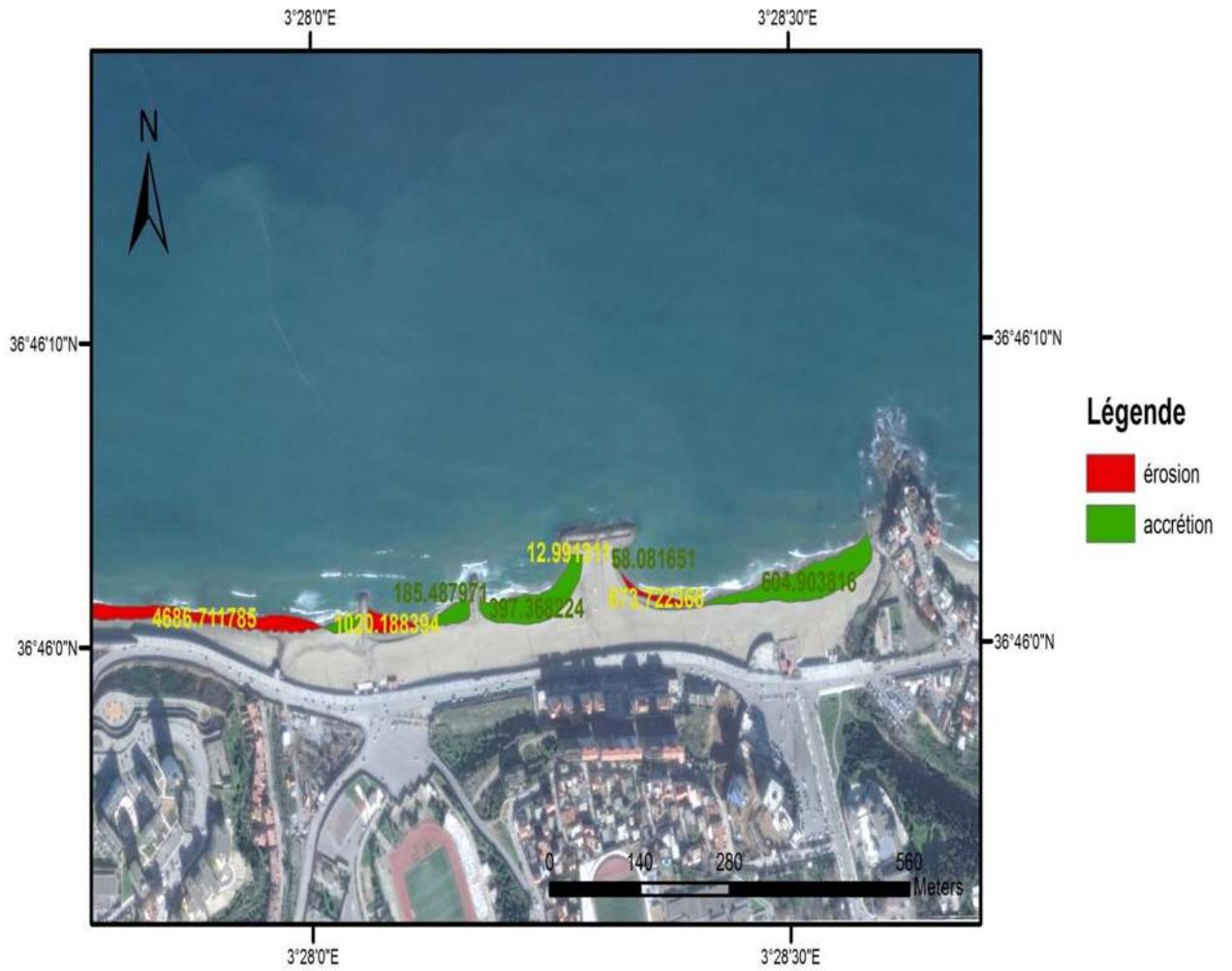


Figure 3.9: Analyse du taux d'évolution en surface entre 2008 et 2016.

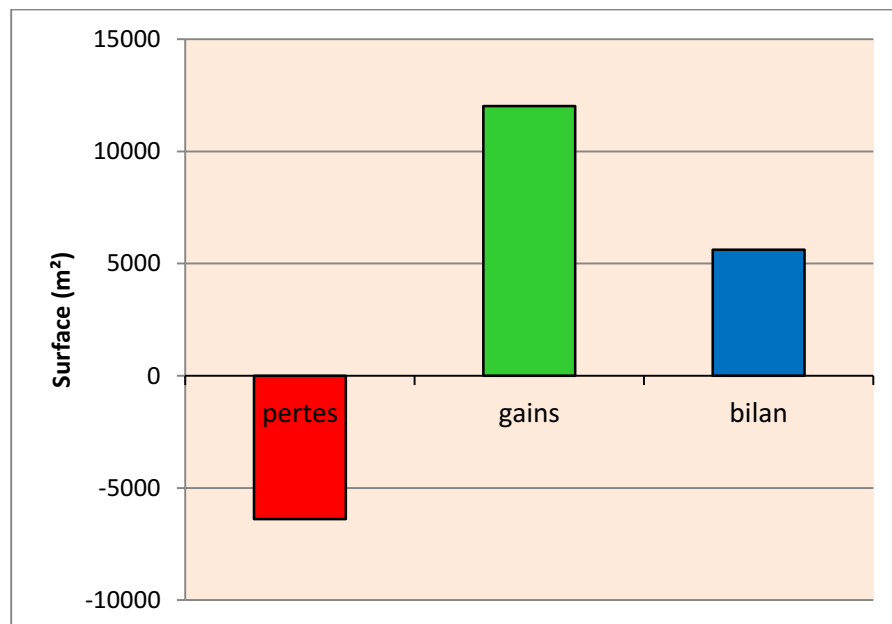


Figure 3.10: Bilan sédimentaire de la plage de Boumerdès entre 2008 et 2016.

Commentaire :

D'après la figure 3.9 et la figure 3.10, on voit qu'il y a une accumulation qui atteint une surface d'environ 12010 m², et cette accumulation se trouve beaucoup plus dans la partie Est de la plage de Boumerdès et entre l'épi en forme de T et l'épi adjacent (centrale). Par contre les surfaces perdues ne dépassent pas les 6400 m², et on les trouve dans la partie Ouest de la plage de Boumerdès et en aval des épis. Et selon la forme des accumulations et des pertes on peut dire que le transport sédimentaire se déplace d'Ouest en Est.

Le bilan sédimentaire de la plage de Boumerdès entre 2008 et 2016 nous renseigne sur l'état de la zone d'étude, ce bilan est positif d'une surface d'environ 5616 m².

B. Sidi Fredj

Pour cette deuxième zone, la digitalisation des traits de côté a été faite sur huit images satellitaires de la plage Est de Sidi Fredj de dates différentes entre 2002 et 2017 (**Figure 3.11**).

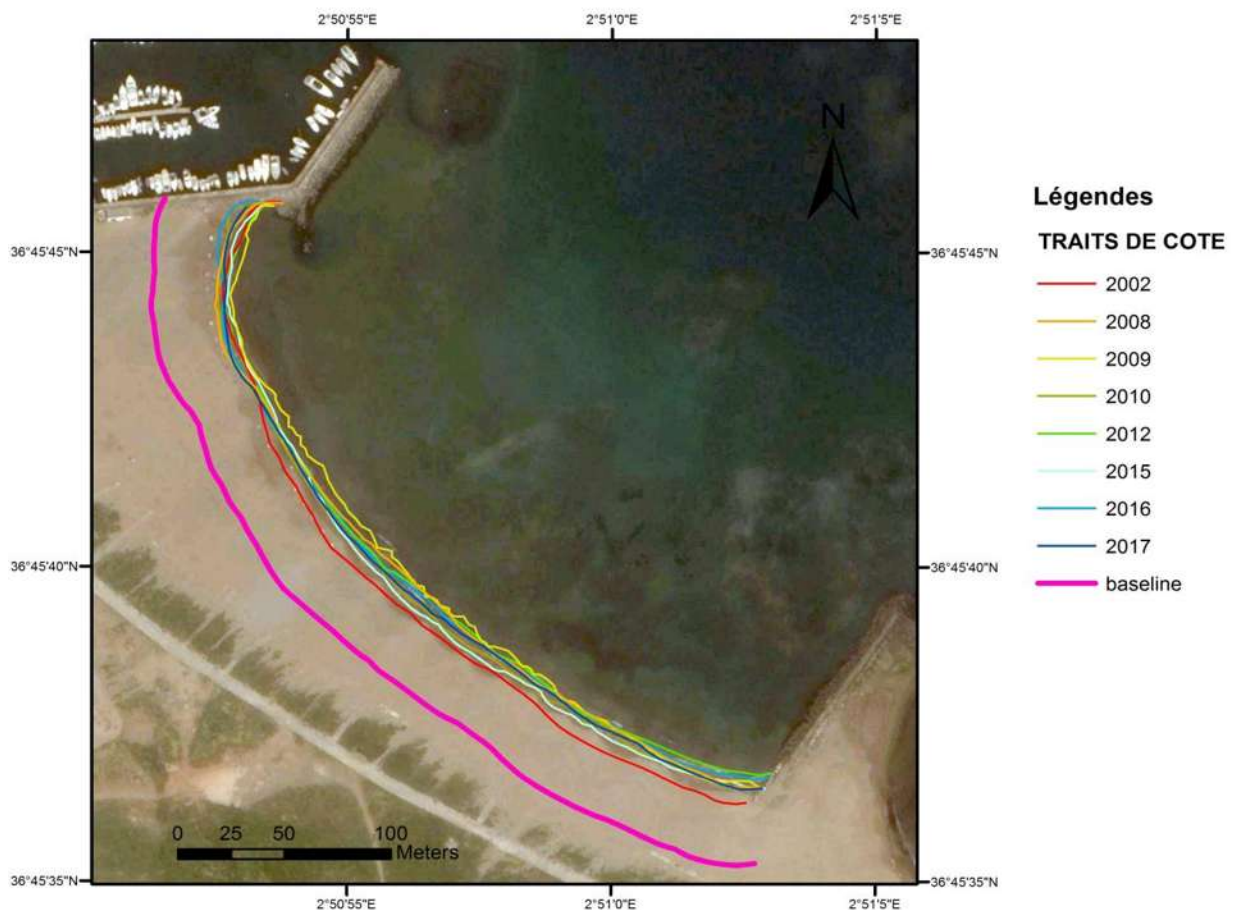


Figure 3.11: Evolution du trait de côte de la plage Est de Sidi Fredj selon différentes périodes entre 2002 et 2017.

• Génération de transects

L'analyse de l'évaluation des variations spatio-temporelles entre 2002 et 2017 de la position du trait de côte de la plage Est de Sidi Fredj a été faite sur 48 transects d'une longueur des transects de 150 m et d'un pas de mesure de 10 m (**figure 3.12**).

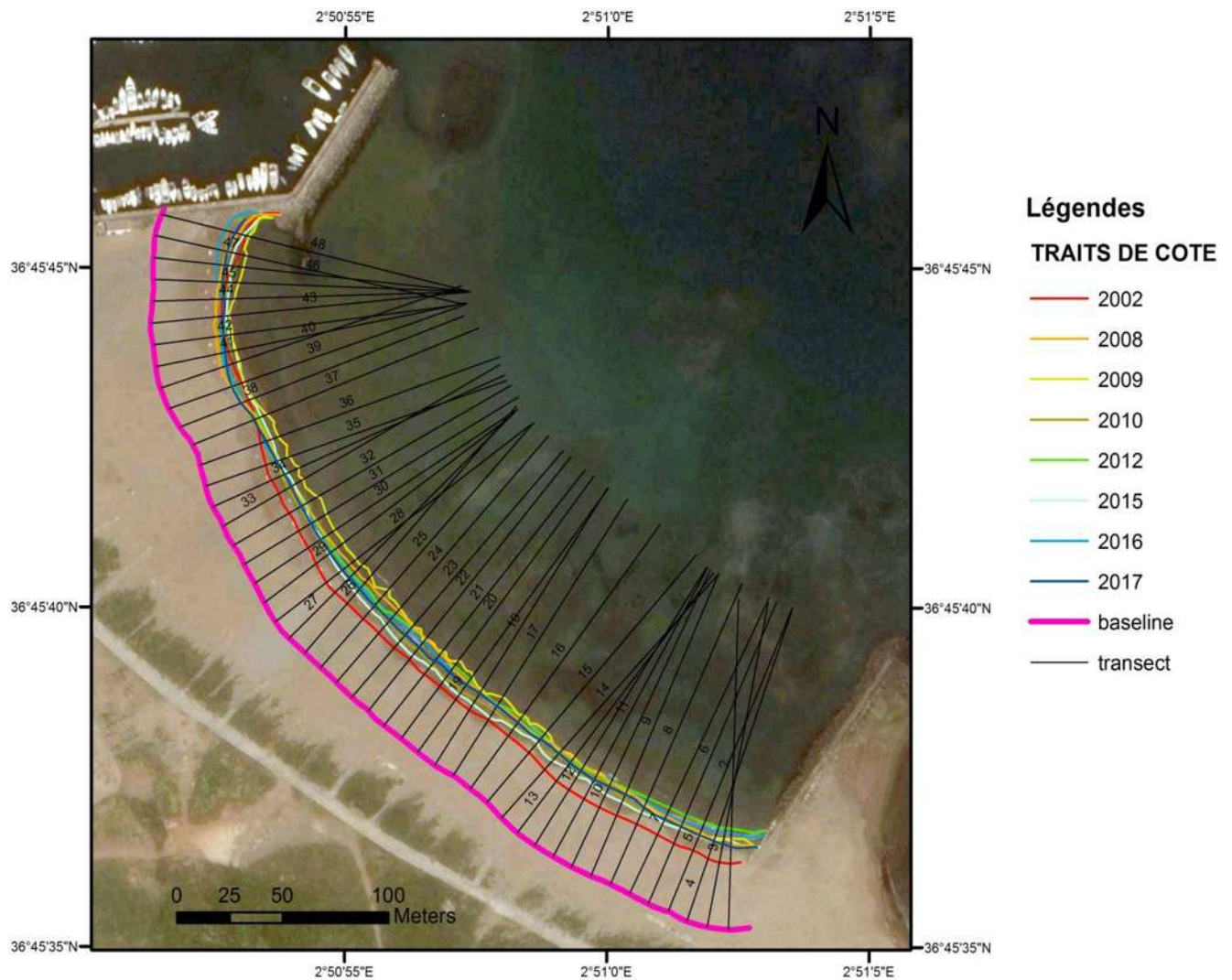


Figure 3.12: Evolution de la ligne de côte de la plage Est de Sidi Fredj entre 2002 et 2017 et position des transects.

- Les calculs statistiques

a. Mouvement net des rivages (NSM)

Pour bien comprendre la dynamique de ces différents traits de côté selon l'échelle spatio-temporelle, on a projeté les données statistiques du mouvement net des rivages (NSM) calculées par l'extension DSAS pour élaborer une cartereprésentative de la plage Est de Sidi Fredj.

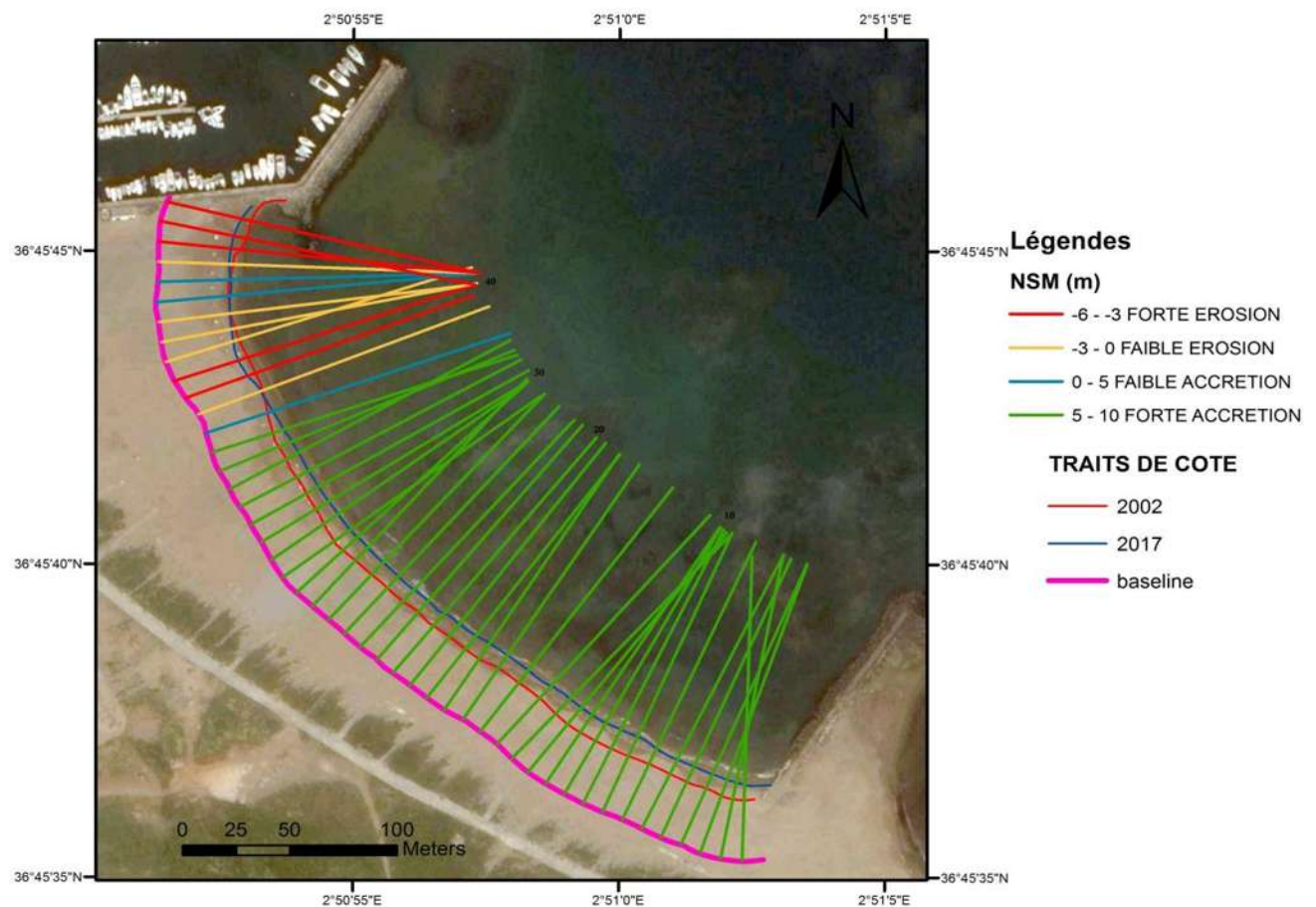


Figure 3.13: Illustration du Mouvement net des rivages (NSM) de la plage de Sidi Fredj entre 2002 et 2017.

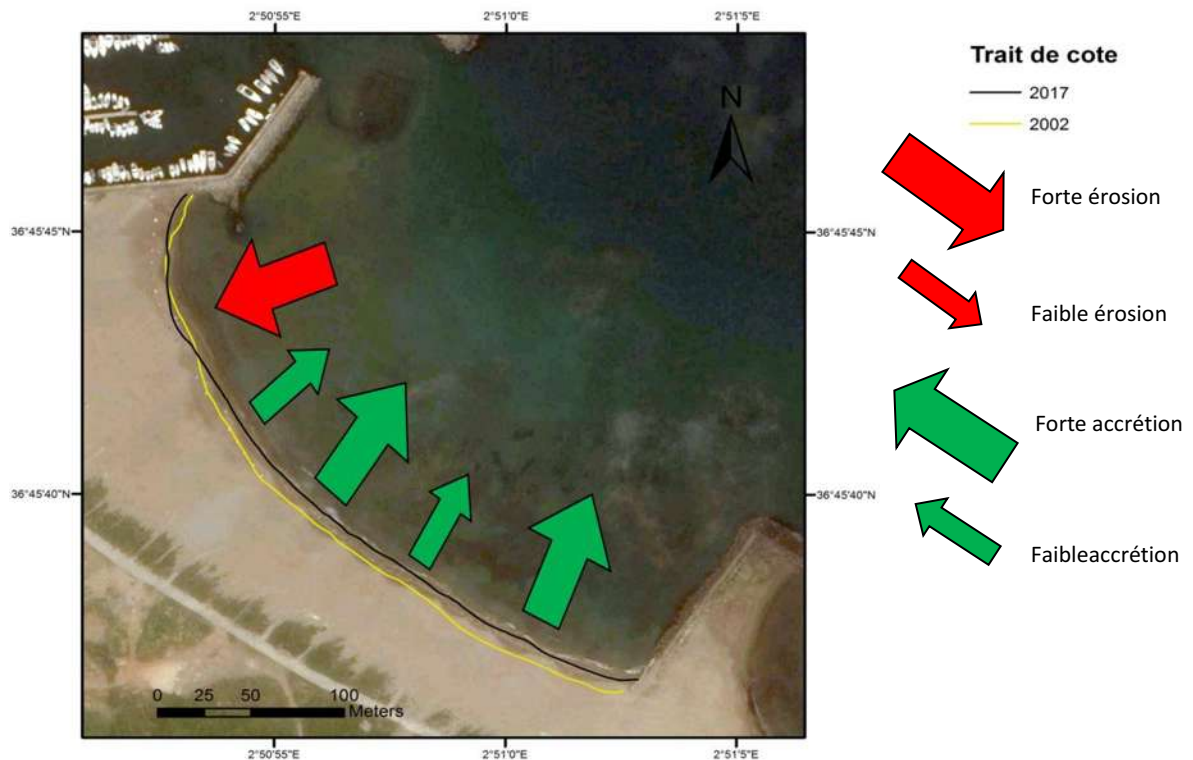


Figure 3.14: Représentation de la direction de l'évolution du trait de côte de la plage Est de Sidi Fredj entre 2002 et 2017

Commentaire :

La figure 3.13 nous renseigne sur les distances de déplacement du trait de côté sur chaque transect entre 2002 et 2017 dans la plage Est de Sidi Fredj.

La couleur verte des transects indique une forte accrétion de 5 à 10 m, le bleu pour le faible engraissement de 0 à 5 m entre 2002 et 2017. Par contre les couleurs de transects qui indiquent la régression sont le jaune et le rouge des grandeurs respectueusement d'environ 0 à 3 m et de 3 à 6 m pour les fortes érosions.

On voit qu'en partie Sud-est il y a un engraissement avec des distances qui peuvent atteindre 10 m. On voit aussi une perte de sédiment dans la partie nord-ouest illustrée en rouge dans la figure 3.13 qui est de grandeur de 6 m en 15 ans.

La figure 3.14 indique les différentes directions de déplacement des traits de côté de la plage de Sidi Fredj entre 2002 et 2017, on voit que la majeure partie de la plage est en engraissement sauf la partie Nord-ouest où il existe un recul important.

b. Le taux de point final (EPR):

Pour bien comprendre l'évolution de ces différents traits de côté selon l'échelle spatiotemporelle, on a projeté le support statistique du taux de point final (End Point Rate), pour élaborer une cartereprésentative (**Figure 3.15**):

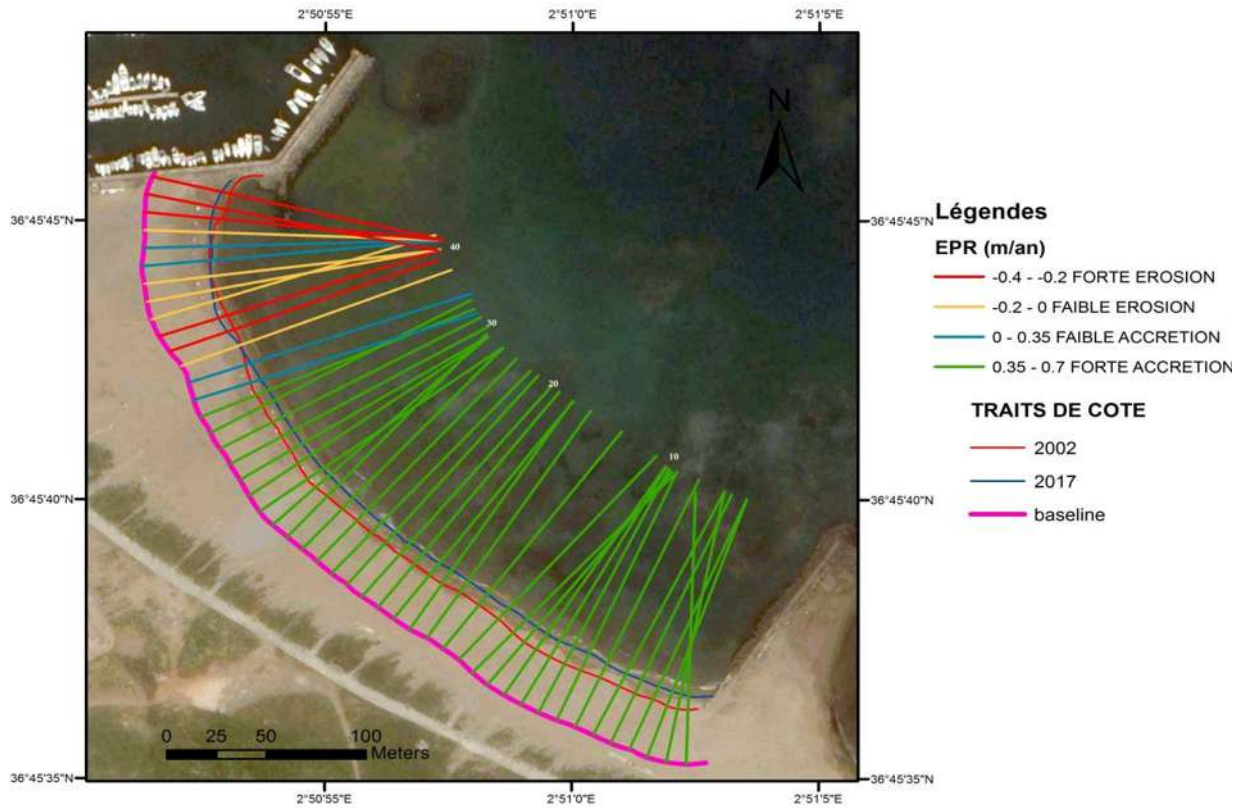


Figure 3.15: représentation du rythme d'évolution du trait de côte de la plage de Boumerdès entre 2008 et 2016.

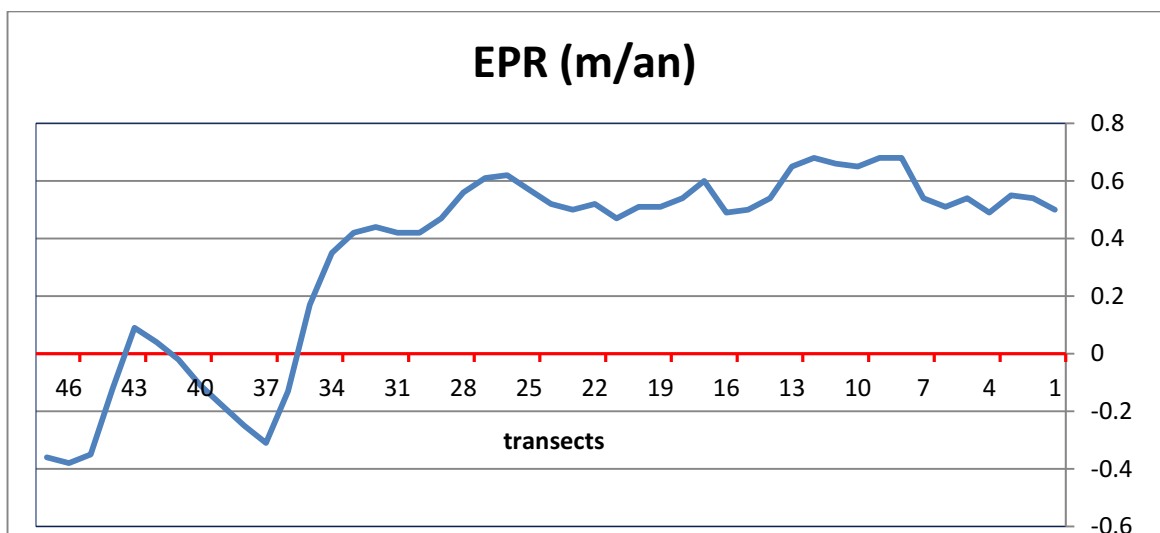


Figure 3.16: Evolution du trait de côte au niveau de la plage Est de Sidi Fredj entre 2002 et 2017.

Commentaire :

D'après la figure 3.15 qui peut nous renseigner sur les variations qu'a subit cette plage de Sidi Fredj au cours de ces 15 dernières années, le trait de côte entre 2002 et 2017 a subit beaucoup de changement.

L'évolution de la ligne de rivage s'est caractérisée par un engraissement quasi-général sur toute la plage avec une vitesse d'avancée qui peut dépasser 0.6 m/an pendant ces 15 dernières années (**Figure 3.16**), sauf dans la partie Nord-ouest de la plage on voit un petit recul du trait de côté d'environ 0.3 m/an.

La couleur verte dans la figure 3.15 indique la présence d'un taux d'accrétion très important d'une grandeur de 0.35 à 0.7 m/an cela est due en partie au blocage du transit sédimentaire par l'épi en forme de L.

La couleur rouge dans la figure 3.15 représente un taux d'érosion très important qui peut atteindre une vitesse de recule de 0.2 à 0.38 m/an cela pourrait être due à l'action frontale de la houle sur la plage Est de Sidi Fredj.

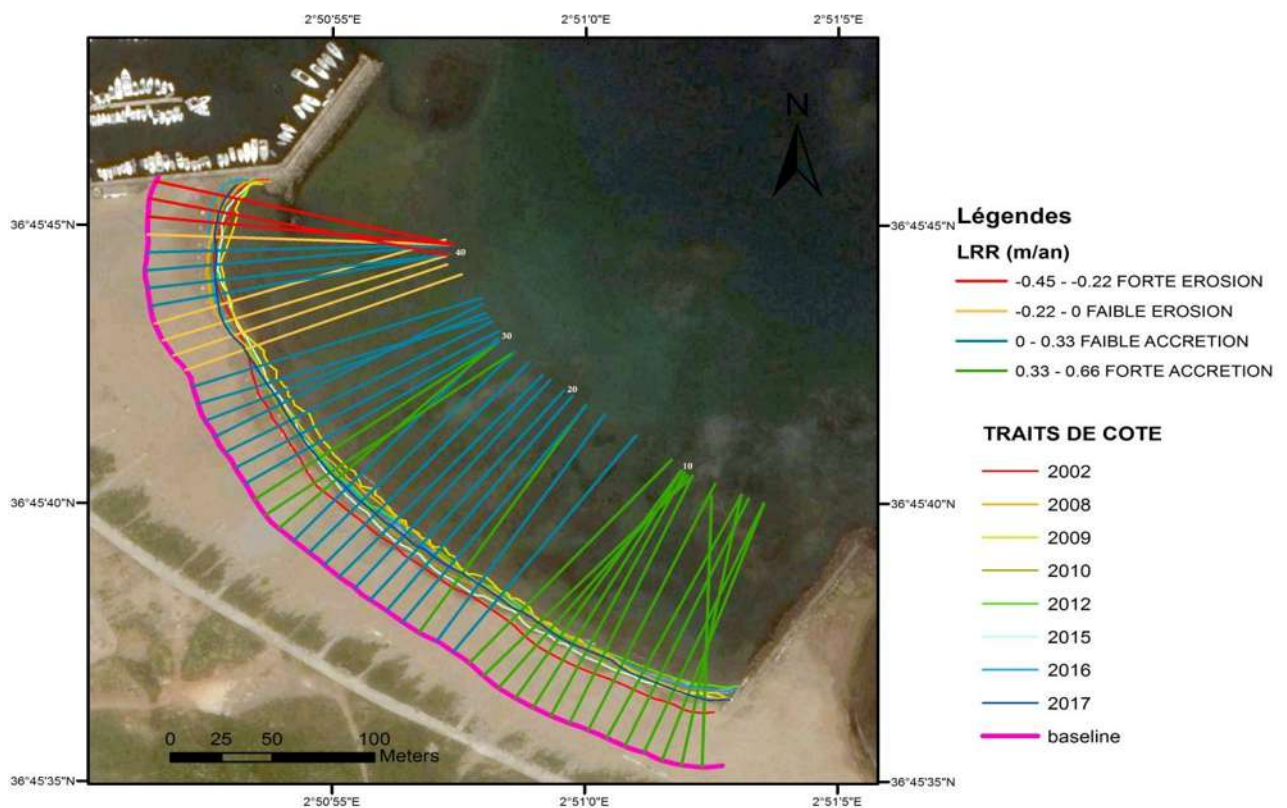
c. Le Linear Regression Rate-of-change (LRR)

Figure 3.17: représentation de LRR selon chaque transect dans la plage Est de Sidi Fredj entre 2002 et 2017.

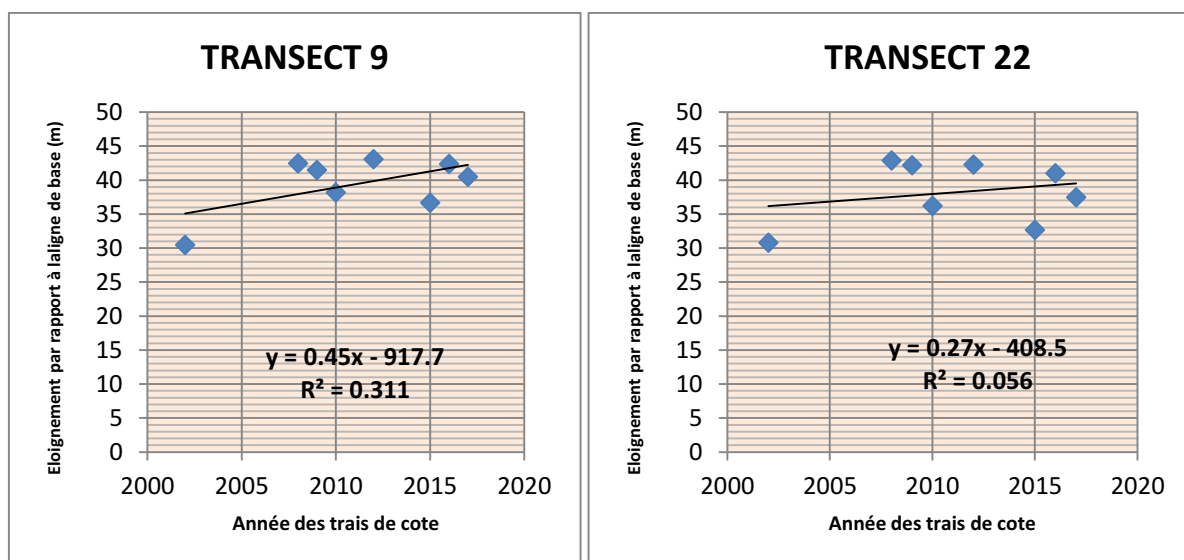
Commentaire :

D'après la figure 3.17 de la représentation du taux de la régression linéaire dans la plage Est de Sidi Fredj entre les années 2002, 2008, 2009, 2010, 2012, 2015, 2016 et 2017, on constate que le trait de côté a subi beaucoup de changement. On voit que dans la partie Sud-est et la partie centrale de la plage qui ont de transects colorés en bleu et en vert ; ces deux parties de la plage ont une grande tendance d'engraissement avec une vitesse qui est d'environ 0,6 m/an, cela est due en grande partie au blocage du transit sédimentaire par l'épi en forme de L.

Par contre la partie Nord-Ouest de la plage Est de Sidi Fredj a une tendance d'érosion entre les années 2002 et 2017, les transects colorés en rouge et en jaune représentent cette régression qui a une vitesse d'environ 0,1 à 0,4 m/an entre les années 2002, 2008, 2009, 2010, 2012, 2015, 2016 et 2017.

On peut dire que l'évolution du trait de côté de la plage Est de Sidi Fredj tend dans la majeure partie vers une situation d'engraissement, alors il y aura toujours un gain de sédiment dans les années prochaines si les conditions climatiques et physiques restent les mêmes.

Voici quelques graphes (**Figure 3.18**) de l'éloignement des traits de côté par rapport à la ligne de base en fonction de leurs années. Ces graphes représentent des exemples du taux de la régression linéaire de quelque transects de la zone de Sidi Fredj. Ils confirment la figure 3.17 de la représentation du taux de la régression linéaire (LRR) selon le transect dans la plage Est de Sidi Fredj entre 2002 et 2017 puisque la pente de la courbe de tendance est égale à la valeur de LRR.



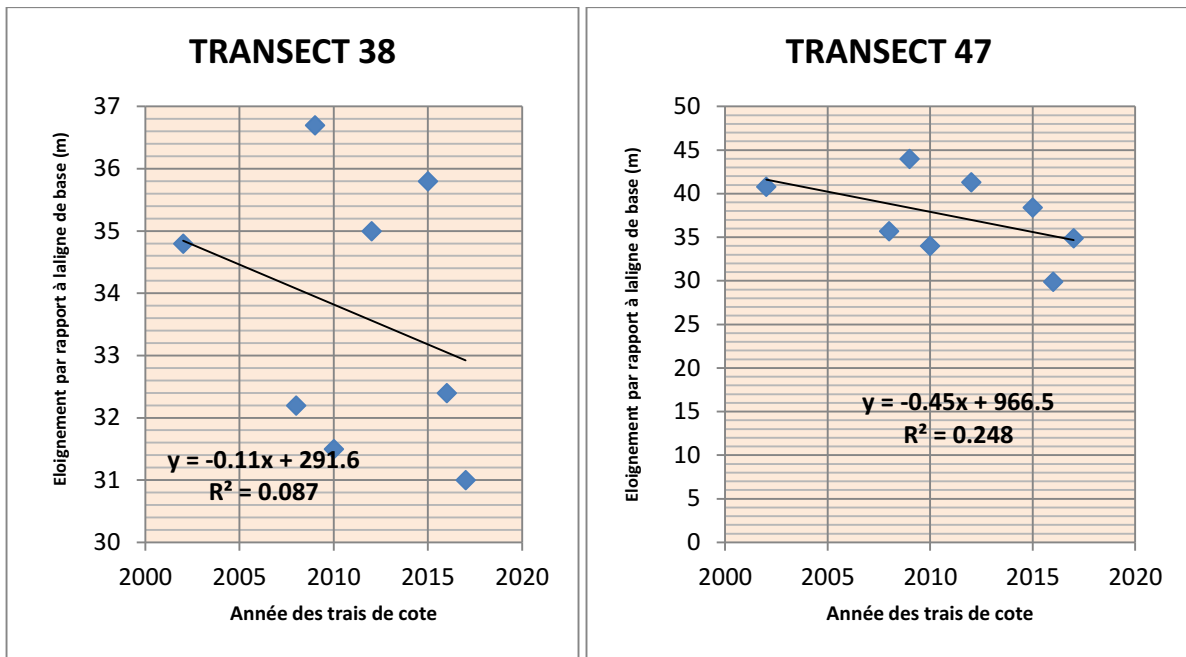


Figure 3.18: représentation graphique du taux de la régression linéaire avec son équation de certains transects de la plage Est de Sidi Fredj entre 2002et 2017.

d. Analyse du bilan sédimentaire

La cartographie de l'évolution surfacique de la plage Est de Sidi Fredj nous a permis de calculer les surfaces d'érosion et d'accrétion pour faire des histogrammes des bilans sédimentaire.

L'analyse du bilan sédimentaire nous permet de quantifier les surfaces gagnées et lessurfaces perdues de la plage Est de Sidi Fredj et cela entre deux périodes 2002 et 2017 (**Figure 3.19**).



Figure3.19: analyse du taux d'évolution en surface entre 2002 et 2017.

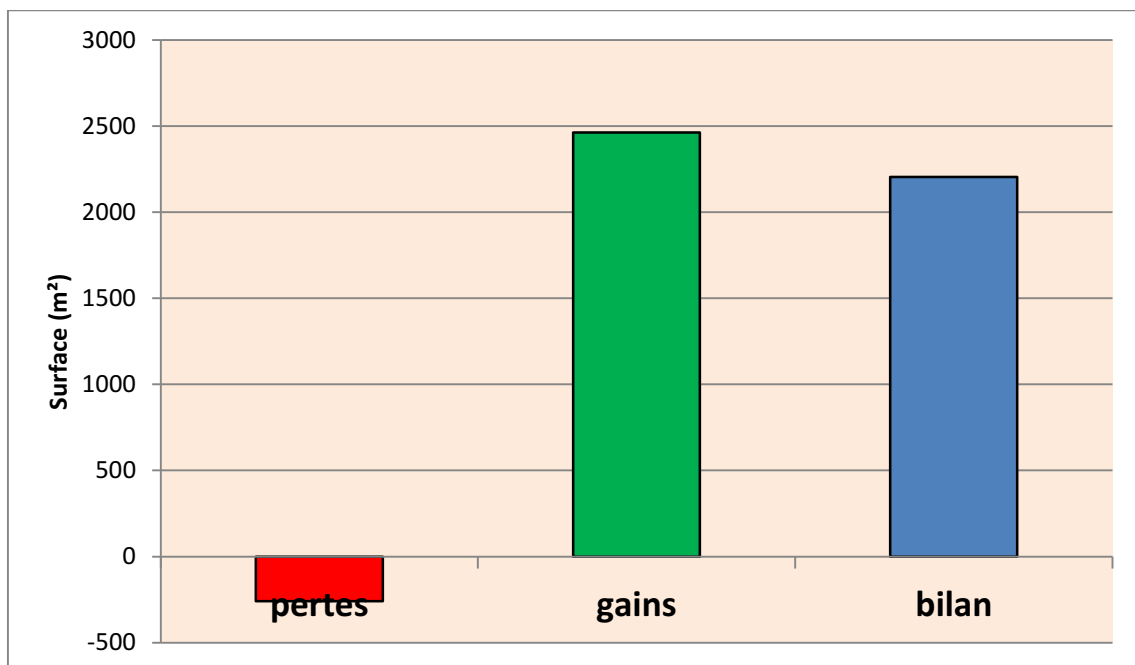


Figure3.20: Bilan sédimentaire de la plage Est de Sidi Fredj entre 2002 et 2017.

Commentaire :

Selon la figure 3.19 et la figure 3.20, on remarque une grande accumulation qui peut atteindre une surface de 2463 m², et cette accumulation se trouve dans la majeure partie de la plage Est de Sidi Fredj. La surface perdue ne dépasse pas les 260 m², et on trouve cette perte dans la partie Nord-Ouest de la plage.

Le bilan sédimentaire de la plage Est de Sidi Fredj entre 2002 et 2017 nous renseigne sur l'état de la zone d'étude, ce bilan est positif d'une surface d'environ 2204 m² (**Figure 3.20**).

C. Hamdania

Dans cette troisième zone, la digitalisation des traits de côte a été faite sur quatre images satellitaires de la plage de Hamdania de dates différentes entre 2009 et 2016 (**Figure 3.21**).

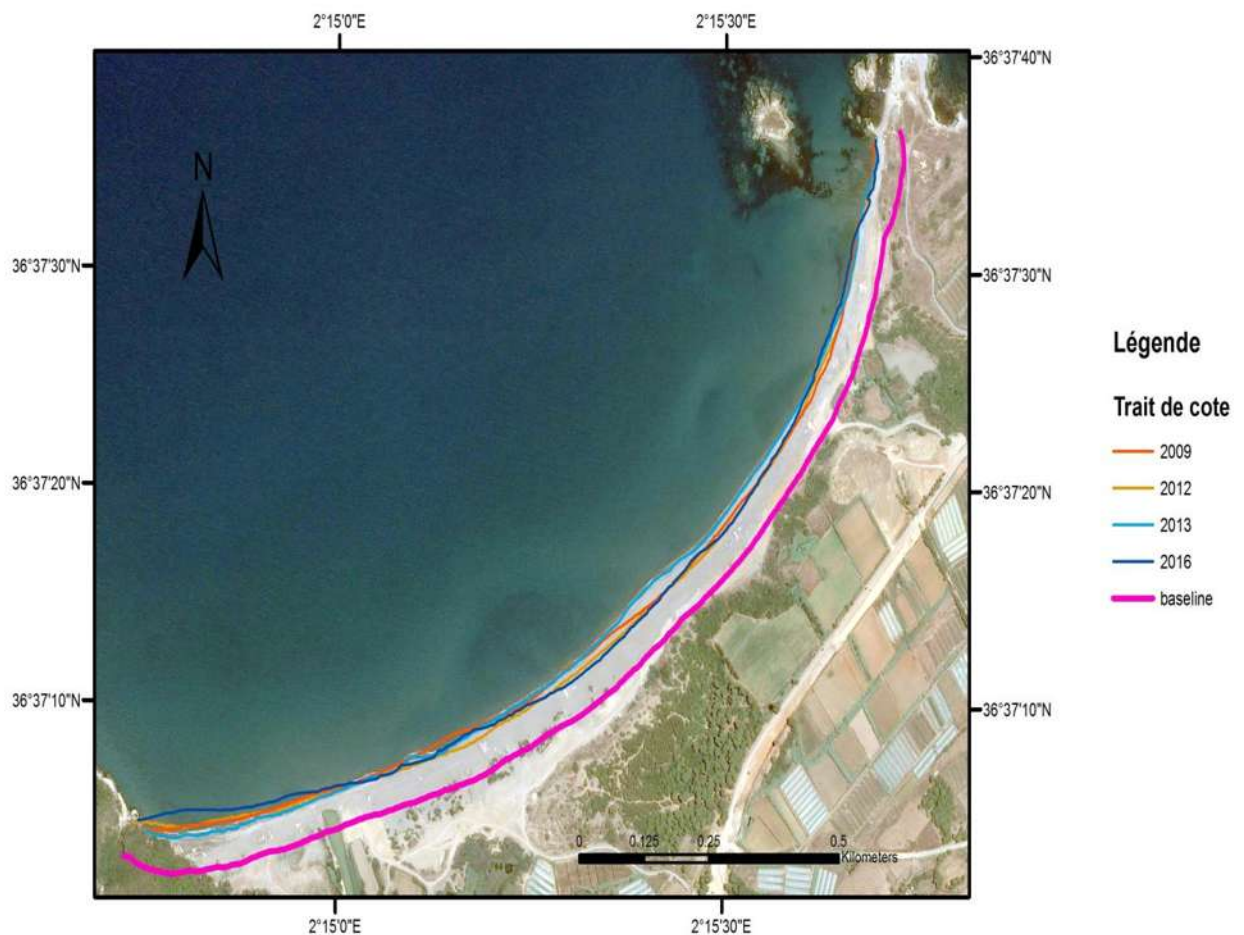


Figure 3.21: Evolution du trait de côte de la plage de Hamdania selon différentes périodes entre 2009 et 2016.

- **Génération de transects**

L'analyse de l'évaluation des variations spatio-temporelles entre 2009 et 2016 de la position du trait de côte de la plage Hamdania a été faite sur 64 transects d'une longueur des transects de 150 m et d'un pas de mesure de 30 m (**Figure 3.22**).

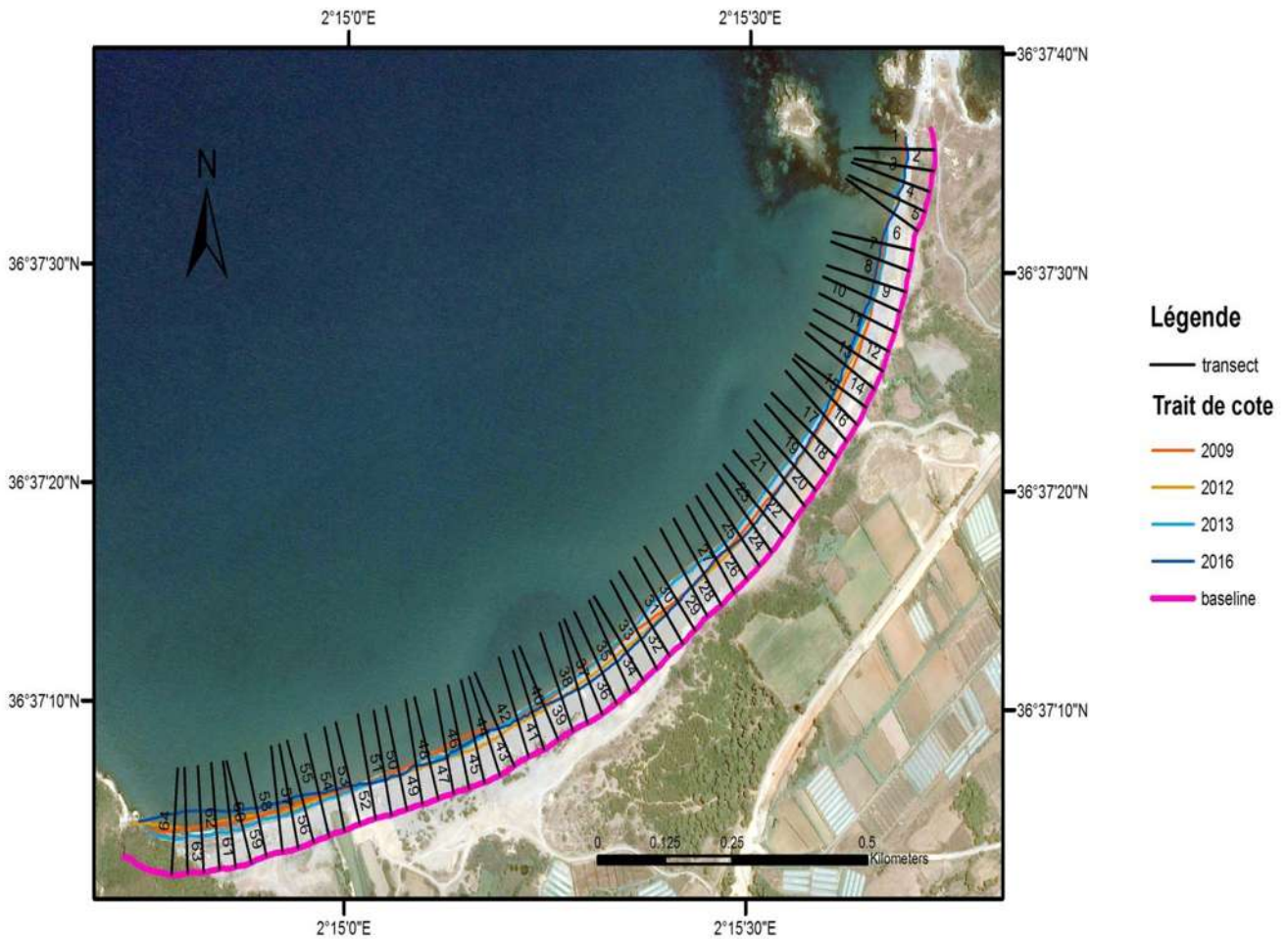


Figure 3.22: Evolution de la ligne de côte de la plage de Hamdania entre 2009 et 2016 et position des transects.

- **Les calculs statistiques**

- a. Mouvement net des rivages (NSM)

Pour bien comprendre la dynamique de ces différents traits de côté selon l'échelle spatio-temporelle, on a projeté les données statistiques du mouvement net des rivages (NSM) calculées par l'extension DSAS pour élaborer une cartereprésentative de la plage Hamdania.

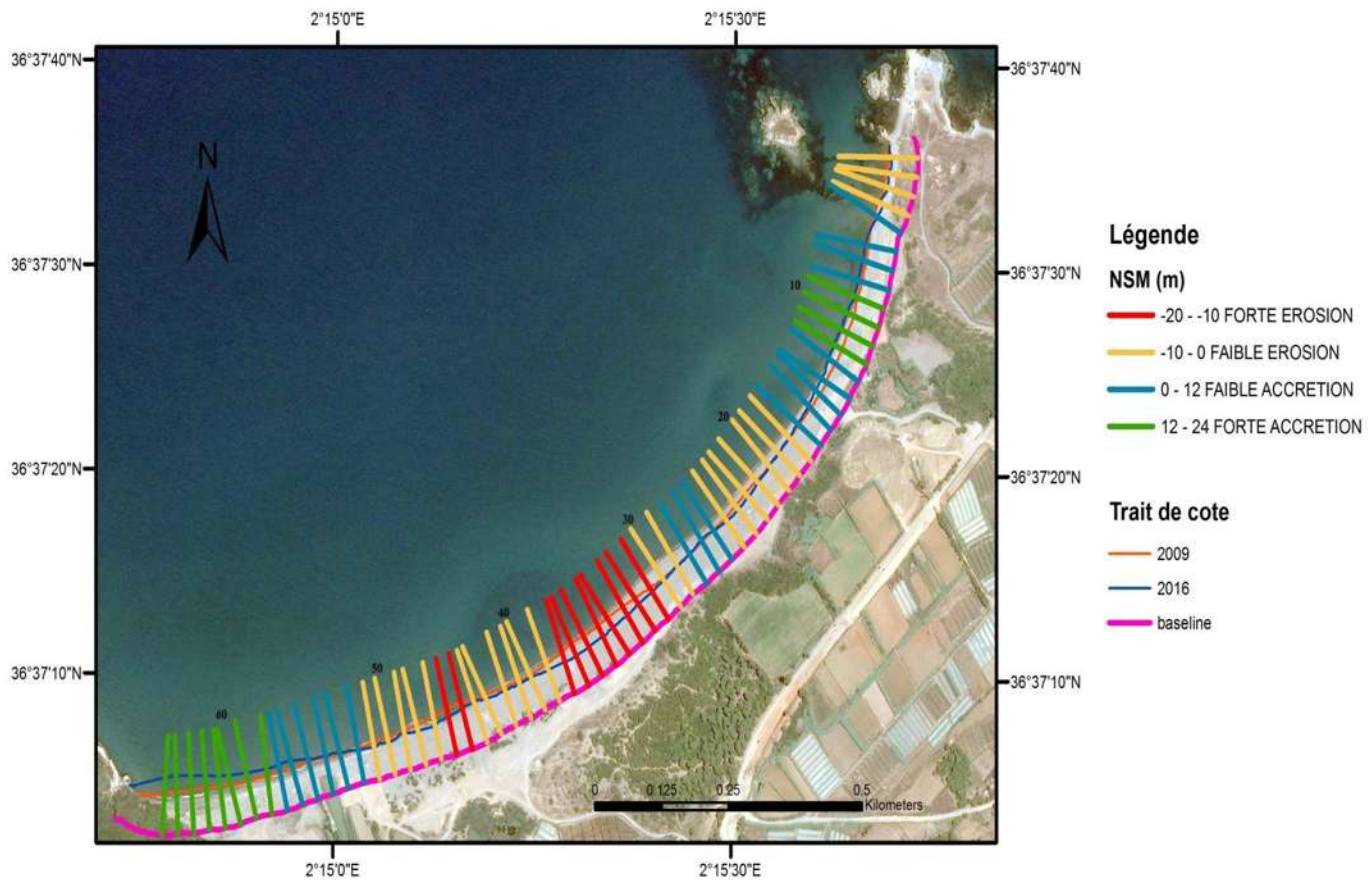


Figure 3.23: Illustration du Mouvement net des rivages (NSM)de la plage de Hamdania entre 2009 et 2016.

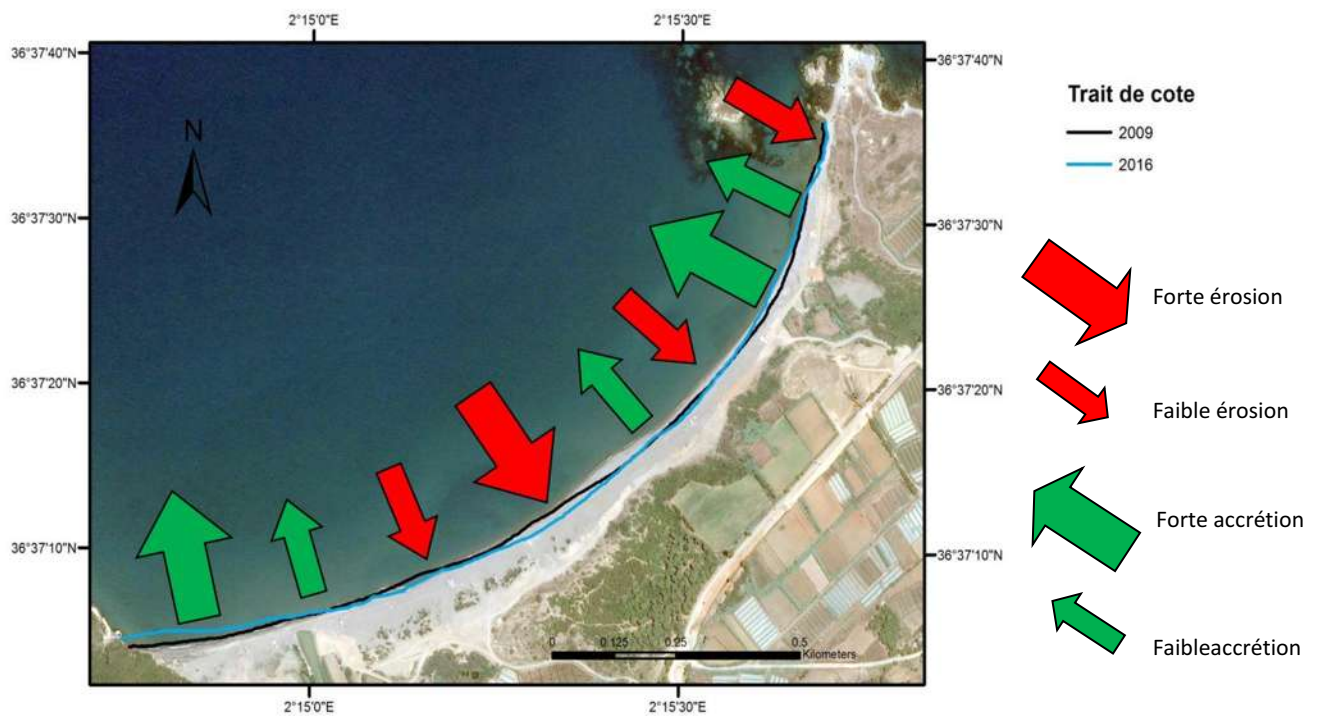


Figure3.24:Représentationde la direction de l'évolutiondu trait de côte de la plage de Hamdania entre 2009 et 2016.

Commentaire :

La figure 3.23 représente les distances de déplacement du trait de côte entre 2009 et 2016 dans la plage de Hamdania. On remarque qu'une accumulation s'est produite dans la partie sud-ouest et la partie Nord-est durant ces 7 dernières années avec des distances de déplacement qui dépassent les 20 m, cet engraissement est représenté par des flèches vertes sur la figure des directions de l'évolution du trait de côte de la plage de Hamdania. On remarque aussi une forte érosion dans la partie centrale de la plage de Hamdania dont les distances de recule sont de grandeur de 12 à 24 m entre l'année 2009 et 2016, cette perte est représentée par de flèches rouges (Figure 3.24).

b. Le taux de point final (EPR):

Pour bien comprendre l'évolution de ces différents traits de côte selon l'échelle spatiotemporelle, on a projeté le support statistique du taux de point final (End Point Rate), pour élaborer une carte représentative (Figure 3.25):

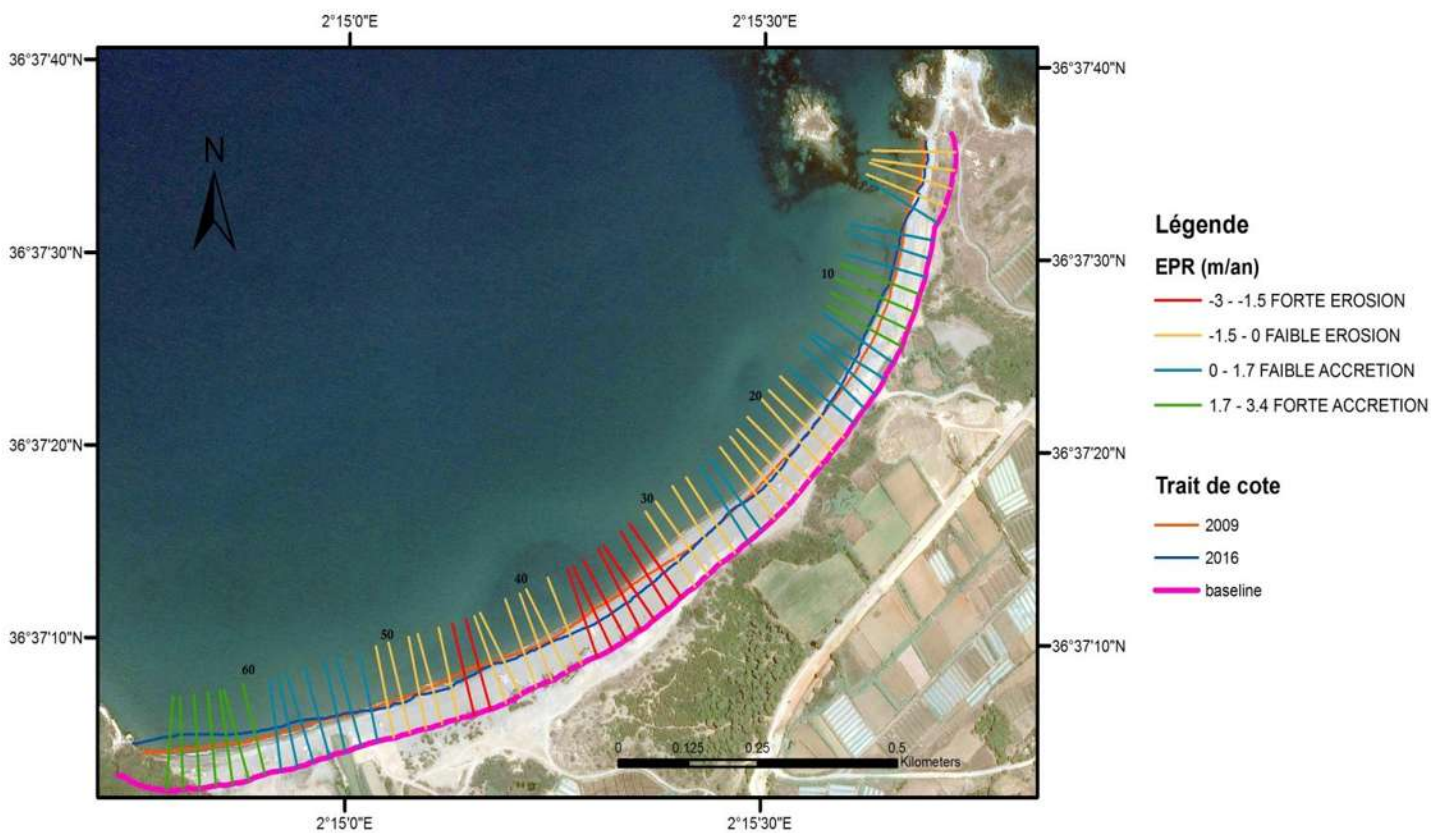


Figure 3.25: Illustration du rythme d'évolution du trait de côte de la plage de Hamdania entre 2009 et 2016.

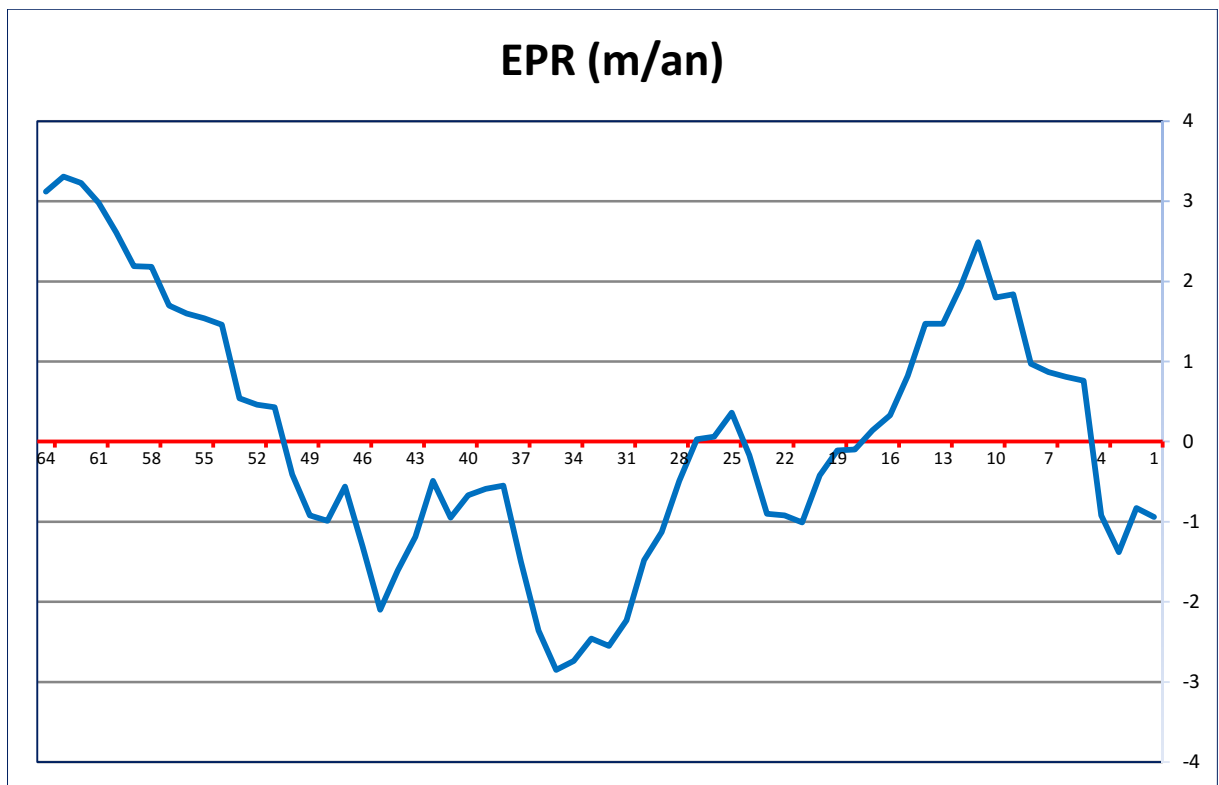


Figure 3.26: Evolution du trait de côte au niveau de la plage de Hamdania entre 2009 et 2016.

Commentaire :

Selon la figure 3.25 on constate que cette plage de Hamdania au cours de ces 7 dernières années, son trait de côte entre 2009 et 2016 a subi beaucoup de changement.

On remarque d'abord qu'on a assisté à une érosion significative dans la partie centrale de la plage. La couleur rouge des transects dans la figure 3.25 illustre cette perte, en cette partie le taux net moyen de ce recul est d'une grandeur de 1.5 à 3 m/an cela pourrait être due aux fortes actions d'hydrodynamisme qui existe dans cette plage.

L'évolution de la ligne de rivage s'est caractérisée aussi par une accumulation de sable sur la partie Sud-ouest de la plage avec une vitesse d'avancée qui peut dépasser 2 m/an pendant ces 7 dernières années (**Figure 3.26**), et cela est dû aux apports terrigènes qui arrivent par l'embouchure d'oued Hachem qui se diversifie dans cette partie de la plage.

c. Le Linear Regression Rate-of-change (LRR):

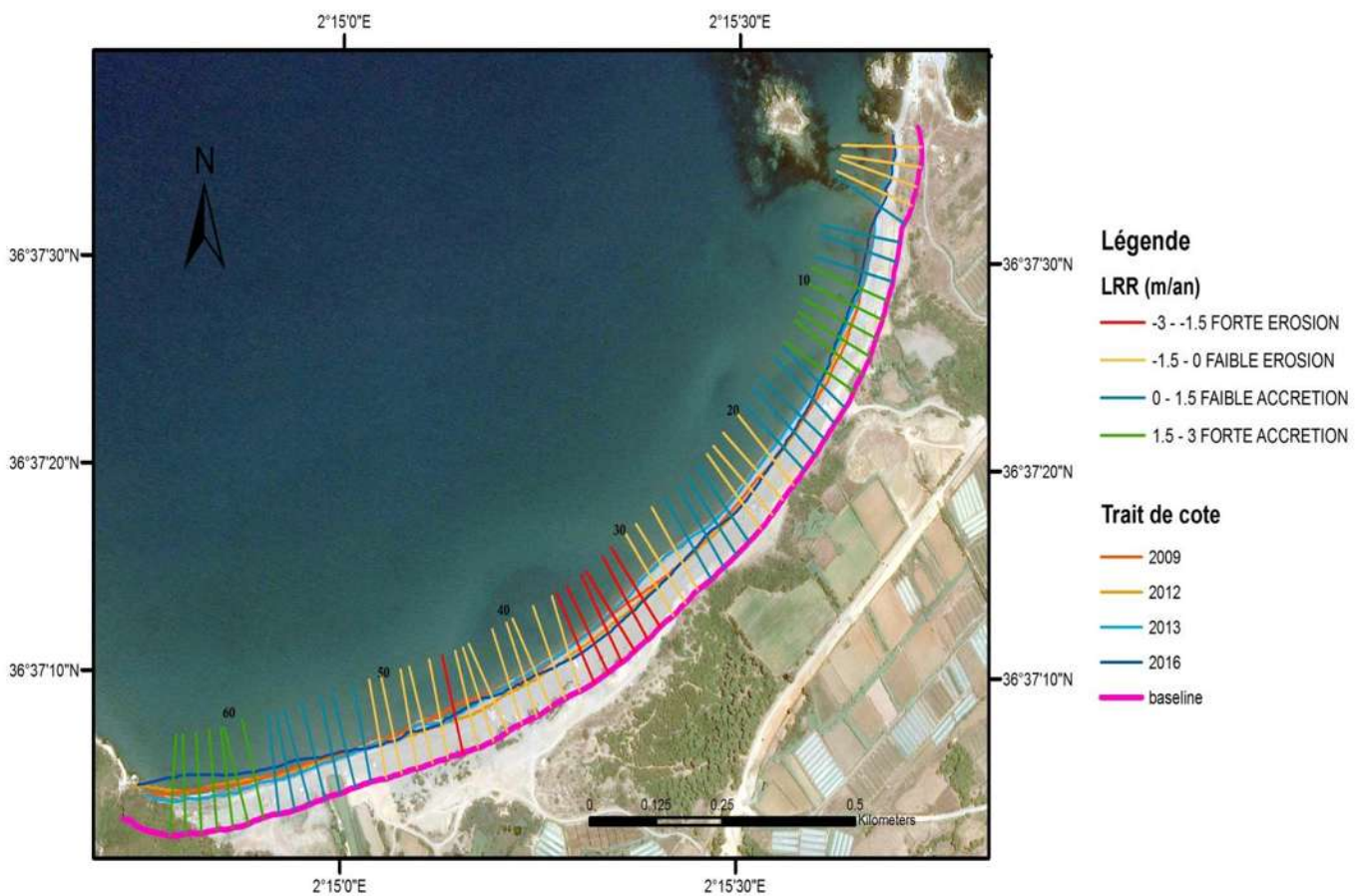


Figure 3.27: Représentation de LRR selon chaque transect dans la plage de Hamdania entre 2009 et 2016.

Commentaire :

D'après la Figure 3.27 de la représentation du taux de la régression linéaire dans la plage de Hamdania entre les années 2009, 2012, 2013 et 2016, on remarque que le trait de côté a subi beaucoup de changement. On voit que la plage a une tendance d'engraissement dans la partie Sud-ouest où se trouve l'embouchure de l'oued Hachem, cette partie de la plage qui a des transects colorés en bleu et en vert, tend vers une accretion d'une vitesse qui dépasse parfois 1,8 m/an, cela est due en grande partie aux apports des sédiments qui viennent par l'oued Hachem.

On voit aussi une tendance régressive entre les années 2009 et 2016 dans la partie centrale de la plage de Hamdania, les transects colorés en rouge et en jaune représentent cette érosion qui a une vitesse d'environ 1.5 à 3 m/an entre les années 2009, 2012, 2013 et 2016. Et cela pourrait être dû à l'action frontale de la houle dans cette zone du littoral centre.

Voici quelques graphes (**Figure3.28**) de l'éloignement des traits de côté par rapport à la ligne de base en fonction de leurs années. Ces graphes représentent des exemples du taux de la régression linéaire de quelque transects de la zone de Sidi Fredj. Ces graphes confirment la figure de la représentation du taux de la régression linéaire (LRR) selon chaque transect dans la plage Hamdania entre 2009 et 2016 puisque la pente de la courbe de tendance est égale à la valeur de LRR.

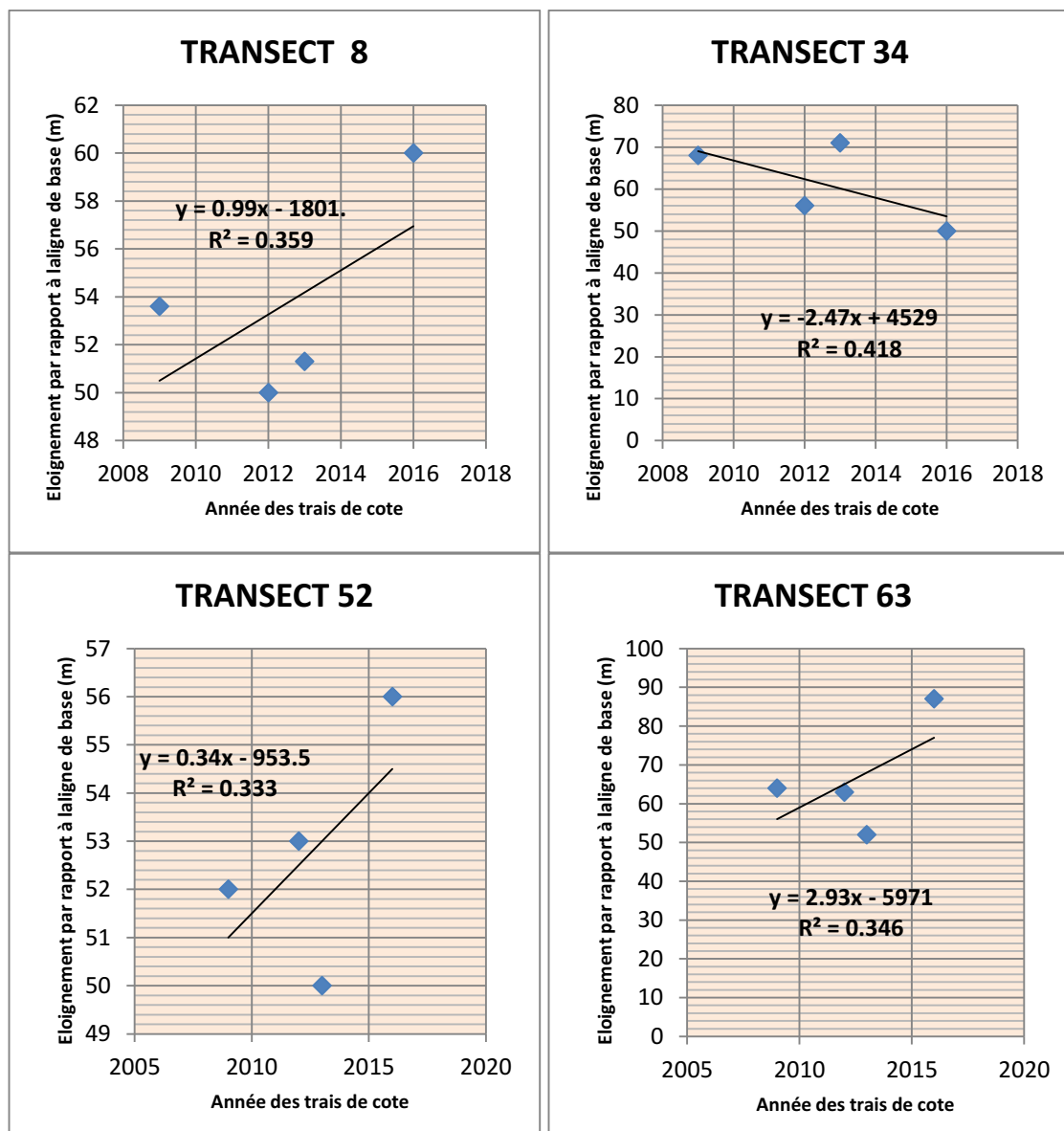


Figure3.28: représentation graphique du taux de la régression linéaire avec son équation de certains transects de la plage de Hamdania entre 2009, 2012, 2013 et 2016.

d. Analyse du bilan sédimentaire

La cartographie de l'évolution surfacique de la plage de cette zone d'étude a permis de calculer les surfaces d'érosion et d'accrétion pour faire des histogrammes des bilans sédimentaire.

L'analyse du bilan sédimentaire nous permet de quantifier les surfaces gagnées et les surfaces perdues et cela entre deux périodes 2009 et 2016 (**Figure 3.29**).

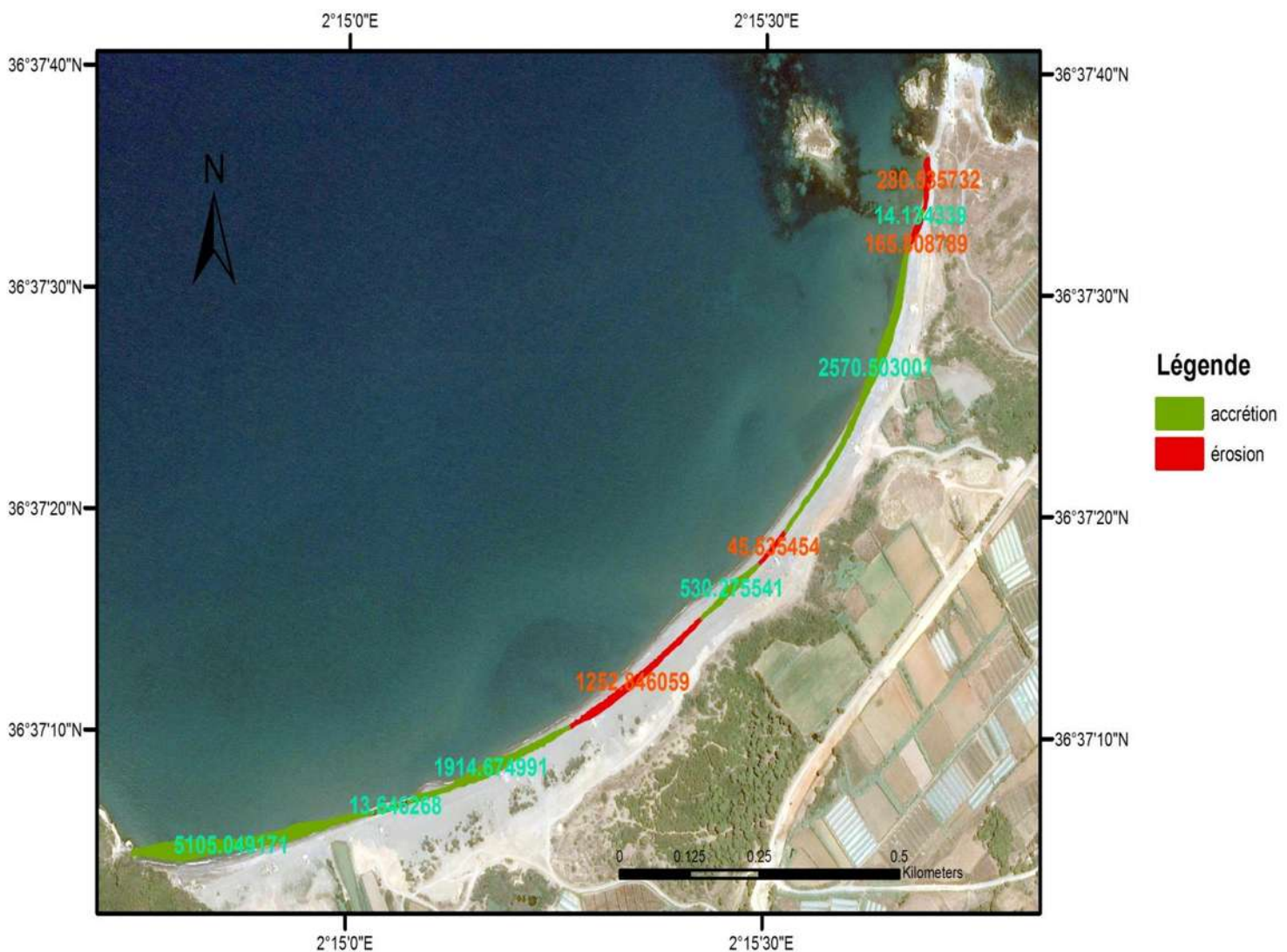


Figure 3.29: analyse de taux d'évolution en surface entre 2009 et 2016.

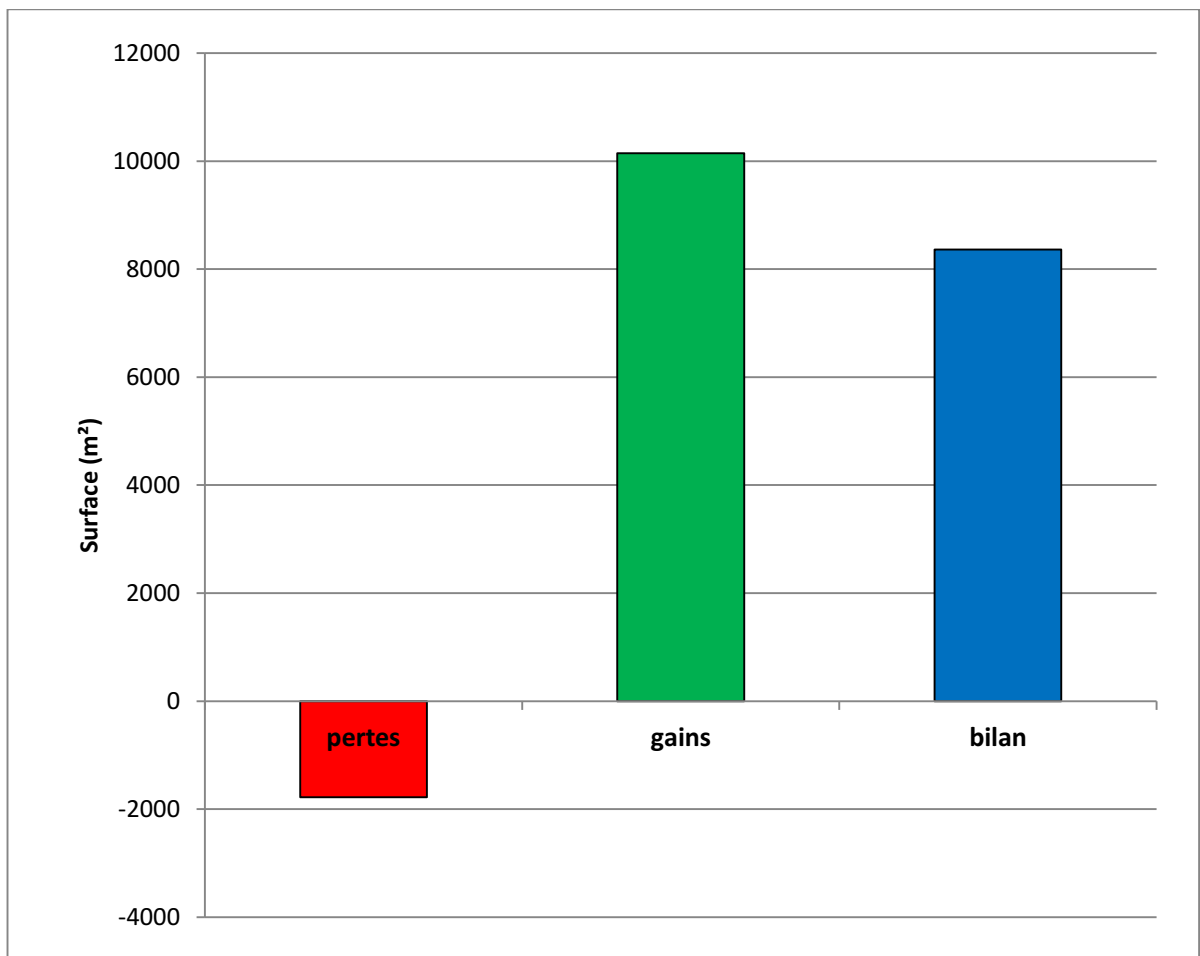


Figure3.30: bilan sédimentaire de la plage de Hamdania entre 2009 et 2016.

Commentaire :

A partir de la figure 3.29 et la figure 3.30, on remarque une grande accumulation qui atteint une surface d'environ 10148 m², et cette accumulation se trouve dans la majeure partie de la plage de Hamdania et surtout dans le côté Sud-ouest, là où se trouve l'embouchure de l'oued Hachem. La surface perdue ne dépasse pas les 1782 m², et on trouve cette perte dans la partie centrale et le Nord-est de la plage.

Le bilan sédimentaire de la plage de Hamdania entre 2009 et 2016 nous renseigne sur l'état de la zone d'étude, ce bilan est positif d'une surface d'environ 8365 m² (**Figure3.30**).

1. Introduction

L'étude des conditions hydrodynamiques sur le littoral a toujours été un élément fondamental dans la compréhension des différents phénomènes côtiers. Depuis quelques années, les chercheurs se contentent de la description mathématique du mouvement. Aujourd'hui, avec l'évolution de la technologie et l'avancement des recherches il est possible d'approcher numériquement la solution des équations mathématiques et donc de simuler les mouvements et comportements des vagues et houles qui demandent beaucoup de calculs.

L'objectif principal de cette partie est de faire une modélisation numérique des vagues du large vers la côte et les courants. Subissant de nombreuses transformations dès leur interaction avec le fond, et influence le paramètre du transport sédimentaire ce qui nous aidera à mieux cerner notre étude.

- **Modélisation numérique**

La représentation du phénomène hydraulique réel nécessite des moyens matériels et immatériels qui peuvent être très onéreux. Dès qu'on cherche à comprendre et prévoir, même de manière qualitative, le comportement d'un système, on essaiera de s'appuyer sur la traduction de la complexité des phénomènes sous forme d'un ensemble d'équations mathématique décrivant les processus physiques qui seront par la suite implémenter dans un système afin d'être traité et avoir le résultat souhaité : On parle de la « Modélisation numérique ».

- **Mike Zero**

MIKE Zéro est le nom commun des implémentations Windows de DHI intégrant l'interface utilisateur graphique pour la mise en place des simulations, la pré-analyse et le post-traitement, la présentation et la visualisation dans un environnement de projet orientée (DHI, 2007).

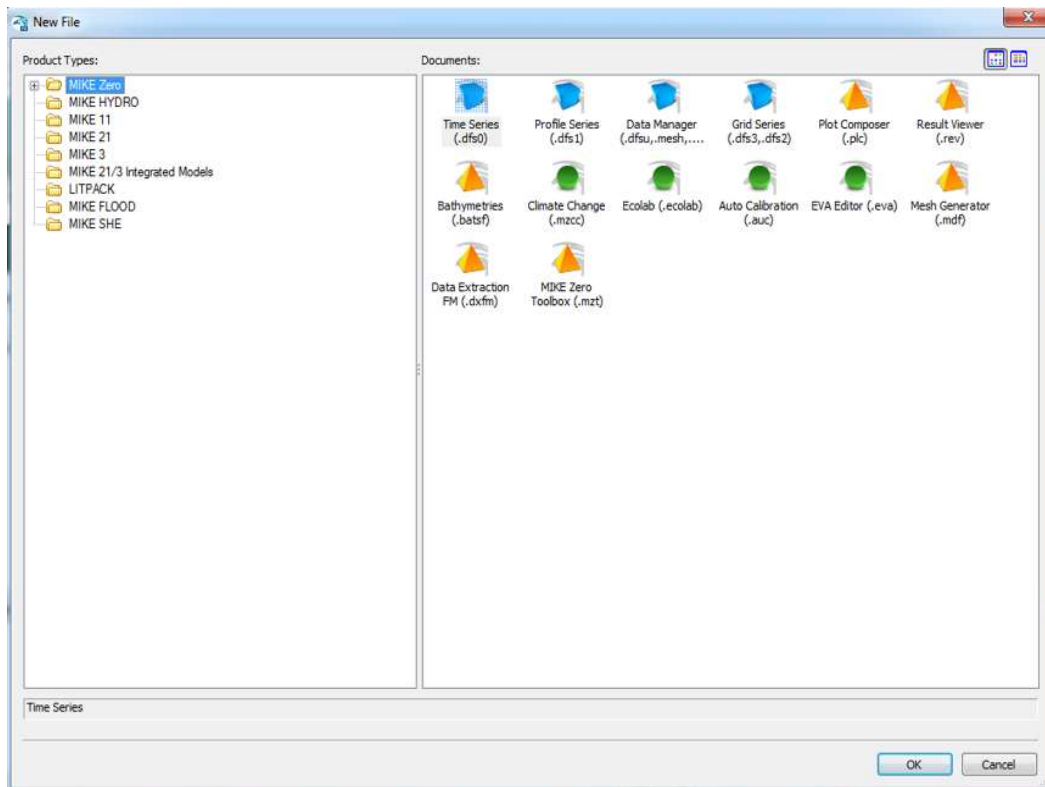


Figure 4.1 : L'interface de Mike Zéro.

- **Modélisation numérique des vagues**

Une modélisation précise des vagues et courant de surface se doit de traiter, de façon la plus fidèle possible, d'une part les effets non linéaire (dus aux interactions vague-vague et vague-fond et vague-courant) et d'autre part les effets dispersifs (**Chabot .S.2011**), tout en prenant en compte le caractère irrégulier et multidirectionnel de l'état de mer, mais aussi les variations bathymétrique.

La prise en compte correcte de toutes ces caractéristiques reste un défi largement ouvert, même si de nombreux modèles mathématiques et méthodes de simulation numérique ont été proposés depuis plusieurs décennies afin de traiter tout ou une partie de ces aspects (**Janssen P., 1995**).

- Modéliser les transformations de la houle du large jusqu'à la côte.
- Obtention des données sur le climat de la houle au large de la côte qui seront utiliser par la suite avec les mesures de la houle autant que source indépendante afin d'obtenir des informations sur le climat à court terme de la houle au large. A partir de ces données, une analyse de la houle extrême peut être réalisée, si la durée des simulations des états de la mer dont on dispose est suffisante.
- Modéliser les courants de surface (Long-shore, cross-shore ...) qui vont nous emmener à mieux comprendre et trouver de meilleures explications aux transports sédimentaires et la dérive littorale existante dans nos zones d'études.

Dans cette partie il faut distinguer deux principaux types de modèle de houle :

- **Le modèle de houle à phase moyenne** : c'est un modèle spectral de la houle, où son hypothèse est basé sur l'échelle de longueur de variation des propriétés de la houle est assez grande par rapport à la longueur d'onde, et les processus physique dominants sont liées au vent .Les processus à petite échelle, comme la diffraction ou la réflexion ne sont pas pris en considération. Pour ce faire, nous pouvons utiliser des modèles de troisièmes génération, comme WAM(**Groupe Wamdi,1988**) , SWAN (**Booji et al,1999**) , Wavewatch III (**Tolman , 1991**) , ces modèles fournissent un spectre directionnel complet de la houle ainsi que les paramètres synthétisés comme la hauteur significative de la houle H_s , et d'autres paramètres (**Benoit et al ,2009**)
- **Le modèle de houle avec résolution de phases** : il résout classiquement l'ensemble des équations de conservation de masse et d'inertie par discrétisation de 10à50 points par longueur d'onde et par période de la houle .Ce modèle sert à déterminer l'évolution de chaque vague individuelle d'un train de vague , les processus de la diffraction et réflexion sont bien traités , en plus de la réfraction , du frottement de fond et le déferlement induit par la profondeur (**Banner,2006**).

- **Description des modèles numériques**

a. **Mike 21 HD**

Le modèle hydrodynamique MIKE21 HD résolve les équations bidimensionnelles classiques de Saint-Venant par la méthode en volume fini sur une grille à maillage flexible et par la méthode des différences finies sur une grille à maillage rectangulaire. Il traite le frottement sur le fond, l'effet des événements météorologiques, vent et pression atmosphérique), la force de Coriolis, etc. ... il nous permet de simuler les courants côtiers dus à l'action de la houle dans la zone de déferlement. (**Wikhydro, 2014**).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} & \longrightarrow \text{Equation de Continuité de mouvement Horizontale.} \\ & = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_{lx}}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_a S \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} \longrightarrow \text{Equation de Continuité de la profondeur.}$$

$$\begin{aligned}
&= f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_w}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) \\
&+ \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_z S
\end{aligned} \tag{3}$$

Où :

t : le temps.

x, y et **z** : les coordonnées cartésiennes.

η : la hauteur de la surface.

d : la hauteur d'eau.

h : la profondeur totale de l'eau, $h = \eta + d$.

u, v et **w** : les composantes de la vitesse dans les directions x, y et z.

f : le paramètre de Coriolis, $f = 2\Omega \sin\phi$.

Ω : la vitesse angulaire de révolution.

φ : la latitude géographique.

g : l'accélération gravitationnelle.

ρ_w : la densité de l'eau.

s_{yx}, s_{xy}, s_{yy}, s_{xx} : des composantes du rayonnement tenseur.

vt : le turbulent vertical (ou Eddy) viscosité.

p_a : la pression atmosphérique.

ρ₀ : la densité de référence de l'eau.

S : l'amplitude de la décharge causée par des sources ponctuelles.

u_s, v_s : la vitesse par laquelle l'eau est déchargée dans l'eau ambiante.

A : la viscosité turbulente horizontale.

τ_{sx}, τ_{sy} et **τ_{bx}, τ_{by}** : composantes x et y du vent de surface et des contraintes de fond.

b. Mike 21 SW

Le module d'analyse spectrale de la houle est l'un des outils de modélisation numérique pour l'étude de modèle spectral vent-vague. Le modèle est basé sur une grille à maillage flexible (DHI, 2014k) et est particulièrement applicable pour l'analyse des vagues simultanées à la fois à l'échelle régionale et locale. Le maillage flexible permet une résolution spatiale grossière pour la zone au large et une haute résolution en eau peu profonde et sur le littoral. Le modèle SW simule la croissance des vagues par l'action du vent, l'interaction non-linéaire vague-vague, la dissipation due au 'white-capping', la dissipation due au frottement de fond, la dissipation due au déferlement de la vague, la réfraction de la houle par les changements de profondeur, l'interaction vague-courant et l'effet de profondeur d'eau variant dans le temps (ROCHE, 2011 ; DHI, 2014k ; Wikhydro, 2014).

Il nous faut choisir des formulations pouvant être utilisées dans un modèle spectral de vague (Damlamian et Kruger, 2013).

Formulation spectrale : Le module d'analyse spectrale de la houle (SW) est approprié à la fois au large et près des côtes pour la modélisation des vagues car il comprend deux formulations différentes :

Formulation directionnelle découplée paramétrique (formulation paramétrique à découplage directionnel), adaptée la modélisation de la houle à la côte (DHI, 2014f). Elle a des incertitudes pour la modélisation de la transformation des vagues à une échelle assez large (Damlamian et Kruger, 2013).

Cette formulation est basée sur le paramétrage de l'équation de conservation de l'action des vagues. Le paramétrage est réalisé par l'introduction du moment du zéro et du premier ordre du spectre d'action de vague en tant que variables dépendantes. (DHI, 2014f)

Formulation entièrement spectrale, la plus adapté à la modélisation des vagues spectrales au large. Le spectre fréquence-directionnel de l'action des vagues est la variable dépendante. (DHI, 2014f)

Elle permet de modéliser de manière plus efficace la croissance, la décroissance et la transformation des vagues en présence du vent (Damlamian et Kruger, 2013).

Dans nos travaux, la formulation entièrement spectrale a été utilisée, elle requière des temps de calcul nettement plus réduits (Damlamian et Kruger, 2013). La deuxième formulation a été utilisée pour obtenir le spectre fréquence-directionnel de l'action des vagues pendant une courte période.

Formulation temporelle : MIKE21 SW utilise deux formulations temporelles quasi stationnaire et instationnaire. La formulation quasi stationnaire nécessite en général des temps de calcul moins importants. Elle s'adapte aux forçages qui évoluent lentement dans le temps et dans l'espace (Damlamian et Kruger, 2013). Nous utilisons la formulation quasi stationnaire dans nos calculs.

Pour des informations plus détaillées sur ces formulations, nous renvoyons au manuel d'utilisation du logiciel MIKE21 (DHI, 2014f).

Le module permet d'utiliser des données de vagues au large préétablies, qui doivent alors être connues grâce à des mesures ou autres données externes, ou de générer des vagues par le vent. La deuxième approche a été utilisée pour la présente étude.

c. Mike 21 ST

La modélisation du transport sédimentaire associé aux courants et aux vagues est effectuée à l'aide du module ST (Sand Transport) de MIKE 21. En fonction de l'ensemble des forçages hydrodynamiques (courant de marée, agitation due aux vagues et courants littoraux), ce module permet le calcul du transport des sables et de l'évolution morphologique des plages.

Le module MIKE 21 ST repose sur le modèle sédimentaire Q3D développé par DHI Water & Environment pour simuler la dynamique sédimentaire littorale sous l'influence combinée des vagues et des courants. Le modèle Q3D calcule le transport sédimentaire et l'hydrodynamique en deux dimensions, en utilisant toutefois une approche quasi 3D permettant de prendre en compte l'évolution dans le temps et sur la verticale du cisaillement, de la turbulence, des vitesses des courants et des concentrations de sédiments. L'évolution temporelle de la couche limite sous l'effet combiné des vagues et du courant est résolue selon la méthode d'intégration de la quantité de mouvement développé par Fredsoe (THAN, 2015).

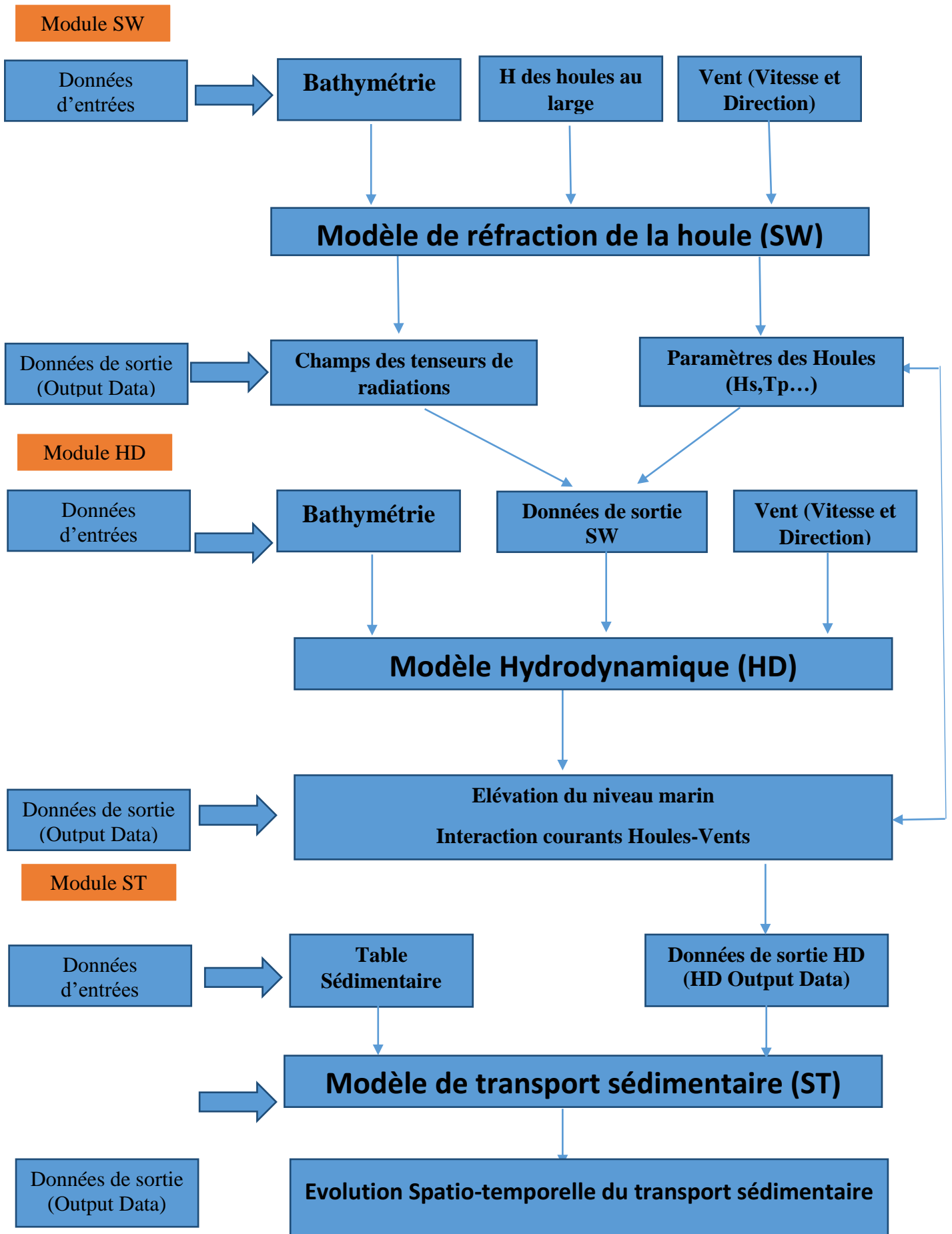


Figure 4.2 : l'approche méthodologique adoptée pour de la modélisation intégrée du transport de sédiments non cohésifs (Azzi, Boukert 2017).

2. Approche méthodologique

- **Principe de simulation du MIKE21-DHI**

Le modèle numérique utilisé dans le cadre de cette étude est le **MIKE21-DHI** de l'institut hydraulique Danois qui est un puissant système de modélisation numérique des phénomènes physiques (Houle, Courant et Transport sédimentaire), il permet de faire des simulations à grande échelle et d'augmenter la résolution des mailles de calculs à certains endroits du domaine simulé à l'aide de grilles imbriquées. MIKE a été construit à partir de savoir-faire de spécialistes reconnus, il a été considéré comme le plus fiable (**Kerssens et al. 2012**).

a. Création 2D Bathymétries sous le maillage

- **L'étude bathymétrique**

L'étude bathymétrique est une étude primordiale dans notre domaine afin de reconnaître et interpréter la morphologie sous-marine, pour cela nous avons procédé à une analyse bathymétrique selon deux méthodes pour essayer d'obtenir un résultat fiable et précis

Les développements technologiques récents, notamment en imagerie, conduisent à l'acquisition de données localisées par divers organismes. Un nombre croissant de données de référence est disponible, permettant la mise en œuvre d'applications de recherche utilisant les potentialités d'analyse et de représentation des SIG (ex : Global mapper). Pour les petits fonds marins côtiers, les Modèles Numériques de Profondeur (MNP) ou bien les modèles numériques de terrain sont particulièrement appréciés des scientifiques, notamment pour leur aptitude à permettre le calcul des surfaces ou des volumes, à fournir divers indices, tels que l'inclinaison et l'orientation des pentes, ainsi que pour les possibilités de visualisation des structures en trois dimensions (**Laassilia, 2013**).

Afin de suivre l'évolution morpho sédimentaire du littoral centre de l'Algérie, on a eu recours à l'introduction des bathymétries des trois zones d'étude.

a.1 Boumerdès :

La bathymétrie de la zone de Boumerdès a été fournie par le LEM (laboratoire des études maritimes) qui date de 2009.

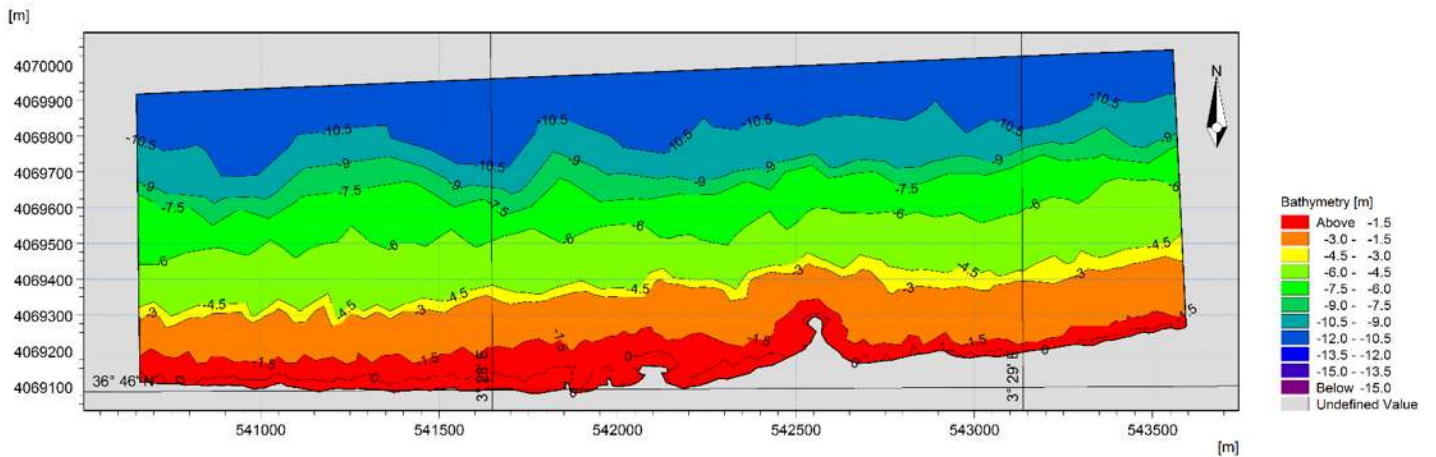


Figure 4.3: Carte bathymétrique de la zone de Boumerdès (2009), (DHI-Mike 21, Azzi, Boukert, 2017).

a.2 Sidi Fredj

La bathymétrie de Sidi Fredj a été réalisée suite à une sortie terrain effectuée en 2017 par l'embarcation de l'ENSSMAL (Baba Arroudj).

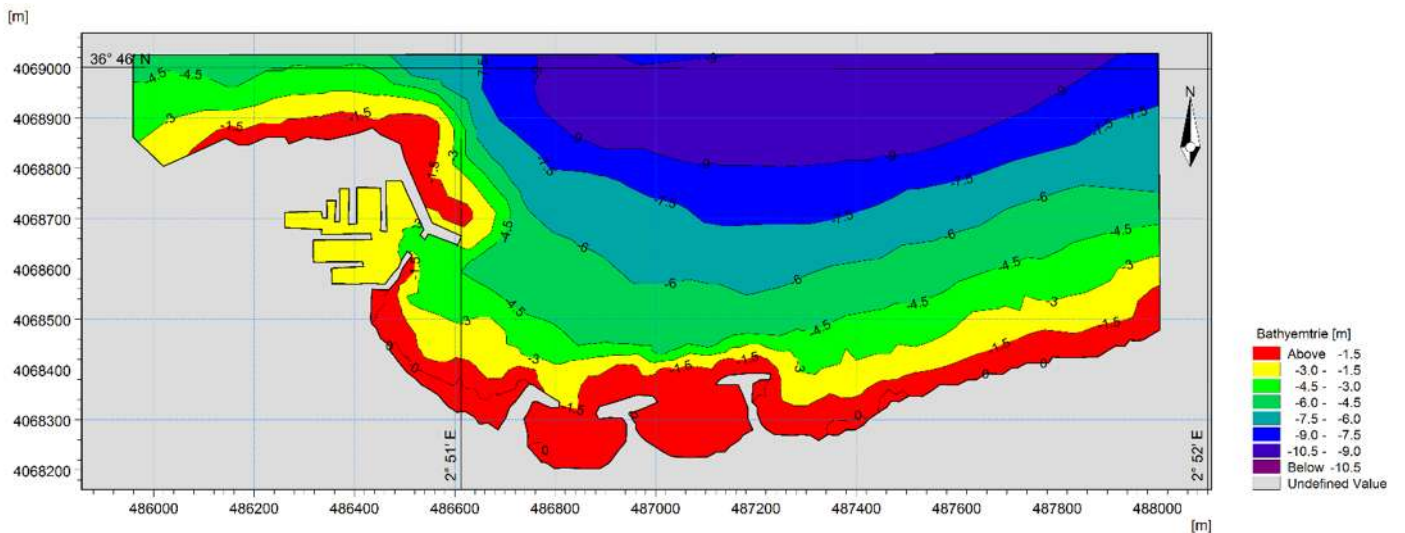


Figure 4.4: Carte bathymétrique de la zone de Sidi Fredj (2017) (DHI-Mike 21, Azzi, Boukert, 2017).

a.3 Hammdania :

La bathymétrie a été réalisée par IHCANTABRIA (l'institut de l'environnement hydraulique de l'université de Cantabria) (Espagne) en 2015.

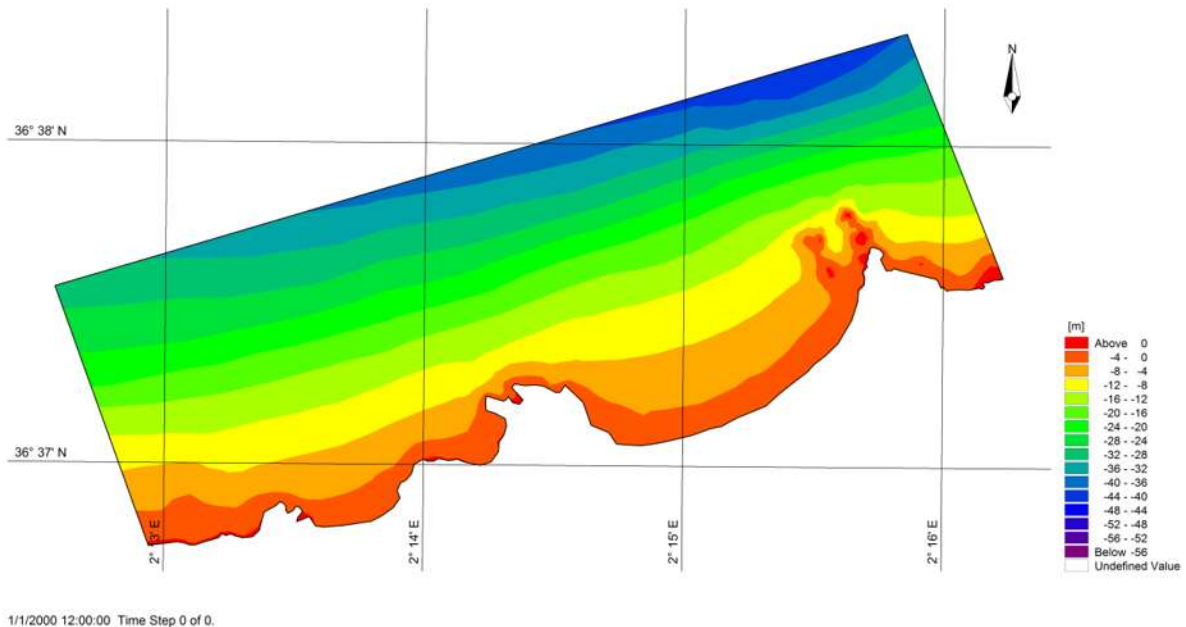


Figure 4.5 : Carte bathymétrique de la zone de Hammdania (2015), (DHI-Mike 21, Azzi, Boukert, 2017).

Le module MeshGenerator nous offre un environnement pour la création, l'édition et la présentation de bathymétries numériques 2D détaillées. MeshGenerator génère un format souple de maillage (*.MESH) (DHI, 2014j).

Le programme nous fournit les utilitaires pour importer des données du trait de côte, notamment les bathymétries. Pour faciliter le processus d'élaboration manuelle des données et leur présentation, des cartes graphiques des images de fond peuvent être importées et superposées aux données bathymétriques (DHI, 2014j).

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

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

Cette étape est fondamentale dans cette modélisation numérique, elle sert à définir la grille dans laquelle toutes nos simulations seront établies.

La composante « maillage flexible » procure un degré de flexibilité optimal pour décrire les caractéristiques bathymétriques, l'écoulement ambiant et les conditions de houle. On a en effet recours à des maillages non structurés tenant compte des limites et de la profondeur.

Comme nos zones d'études, lorsque le domaine étudié est vaste, il faut veiller à choisir la solution la mieux adaptée, de manière à trouver le bon compromis entre résolution/précision du modèle et temps de calcul raisonnables.

- **Les étapes fondamentales de la création du maillage**

Il faut noter que tous les maillages de nos zones d'étude ont été faits grâce à l'outil 'MeshGenerator', ci-dessous les étapes suivies pour définir un maillage (**Figures 4.3 et 4.4**) :

- Création d'un espace de travail ou il faut spécifier le système de projection.
- Importation des données XYZ du Trait de côte ainsi que la bathymétrie.
- Définir le domaine de travail par la spécification des limites (frontières) par des arcs qui entourent la zone d'études.
- Génération du maillage (Mesh).
- Lissage du maillage (SmoothingMesh).
- Configuration de l'interpolation.
- Lancement de l'interpolation.
- Exportation du maillage.

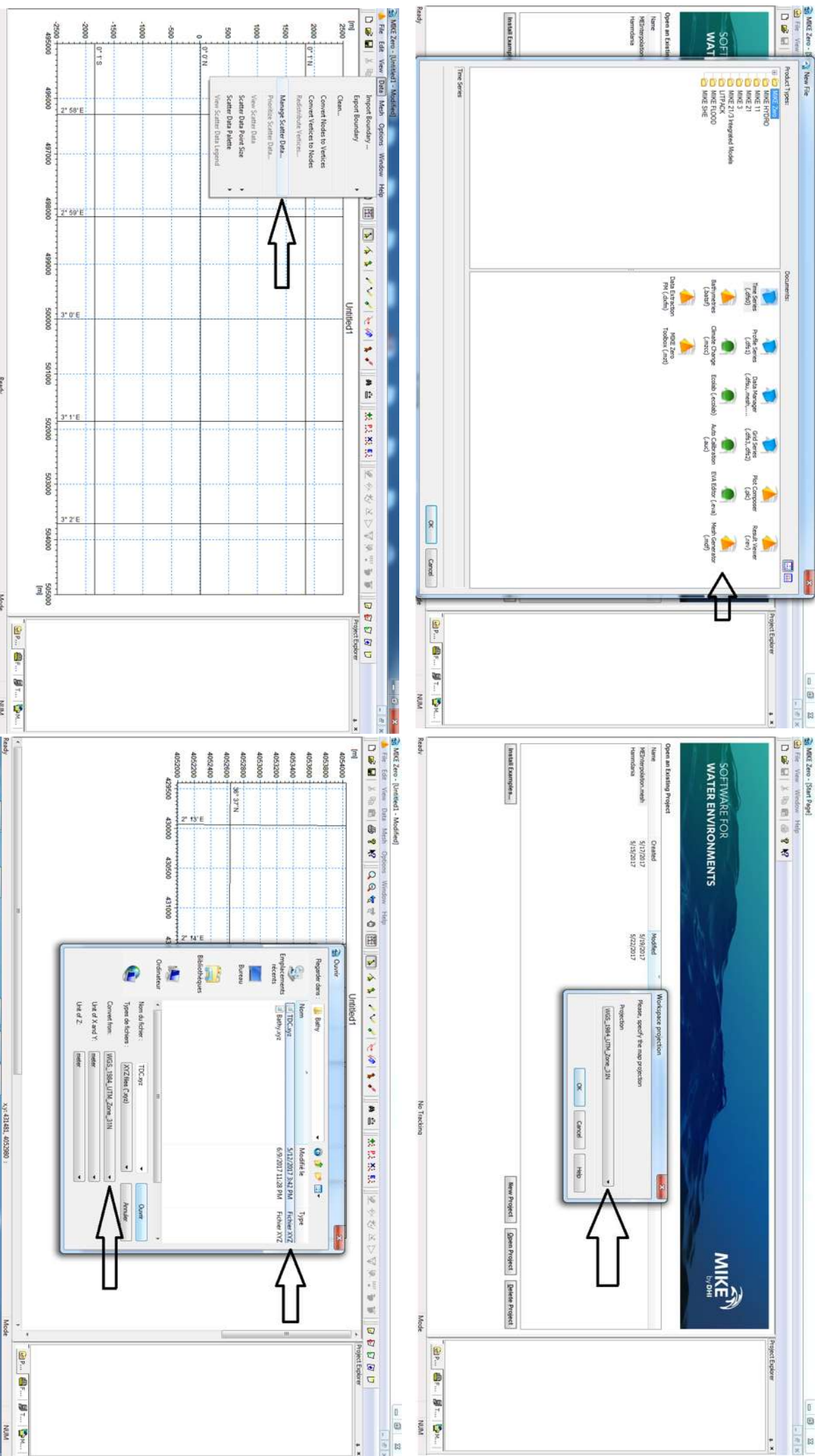


Figure 4.6 : Les étapes de définition de maillage (1).

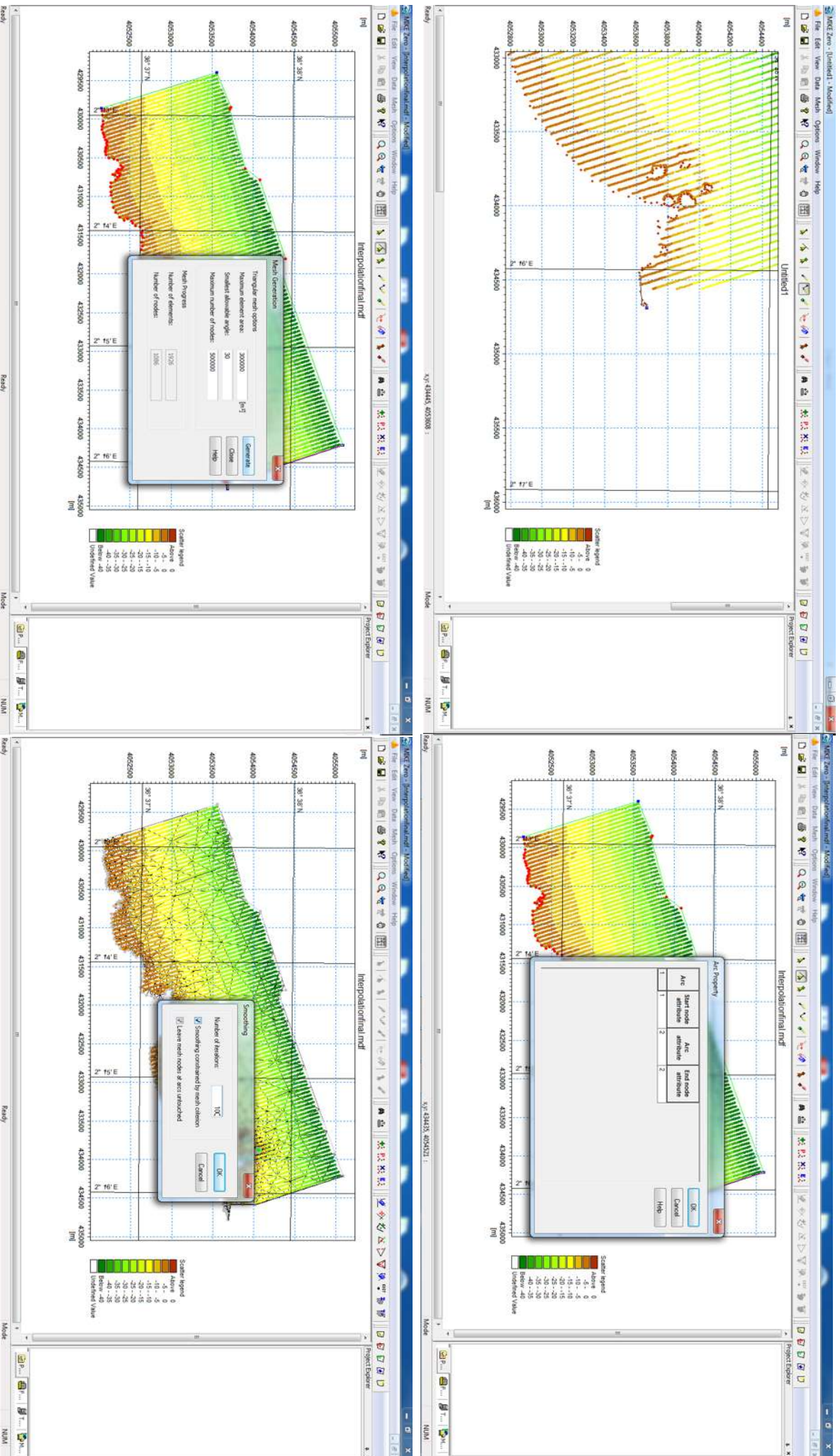


Figure 4.7 : les étapes de définition de maillage (2).

b. Configuration des maillages

Le modèle local des zones d'étude intègre l'utilisation du maillage triangulaire uniquement. La configuration du maillage a été faite en fonction de la spécificité de chaque zone (la bathymétrie, la nature du trait de côte, si il y'a des ilots ou non, l'existence d'un port ou ouvrage de protection dans la zone ou...).

Les traits de côte des trois zones d'études sont intégrés avec un Code 1 (**figure 4.3**) qui est un code spécifique pour la partie Terre. Le code 2 est attribué à la limite est, code 3 pour la limite Nord et code 4 pour la limite ouest.

b.1. Boumerdès

Pour la zone de Boumerdès on a 2358 mailles et 1303 nœuds avec un linéaire de 6 km allant de l'extrême Est du Rocher Noir jusqu'à l'extrême Ouest de la Plage Boumerdès. La surface du maillage est d'environ 4 km².

La taille du maillage dans la zone de Boumerdès varie de 180 mètres au large à 5 mètres dans la côte.

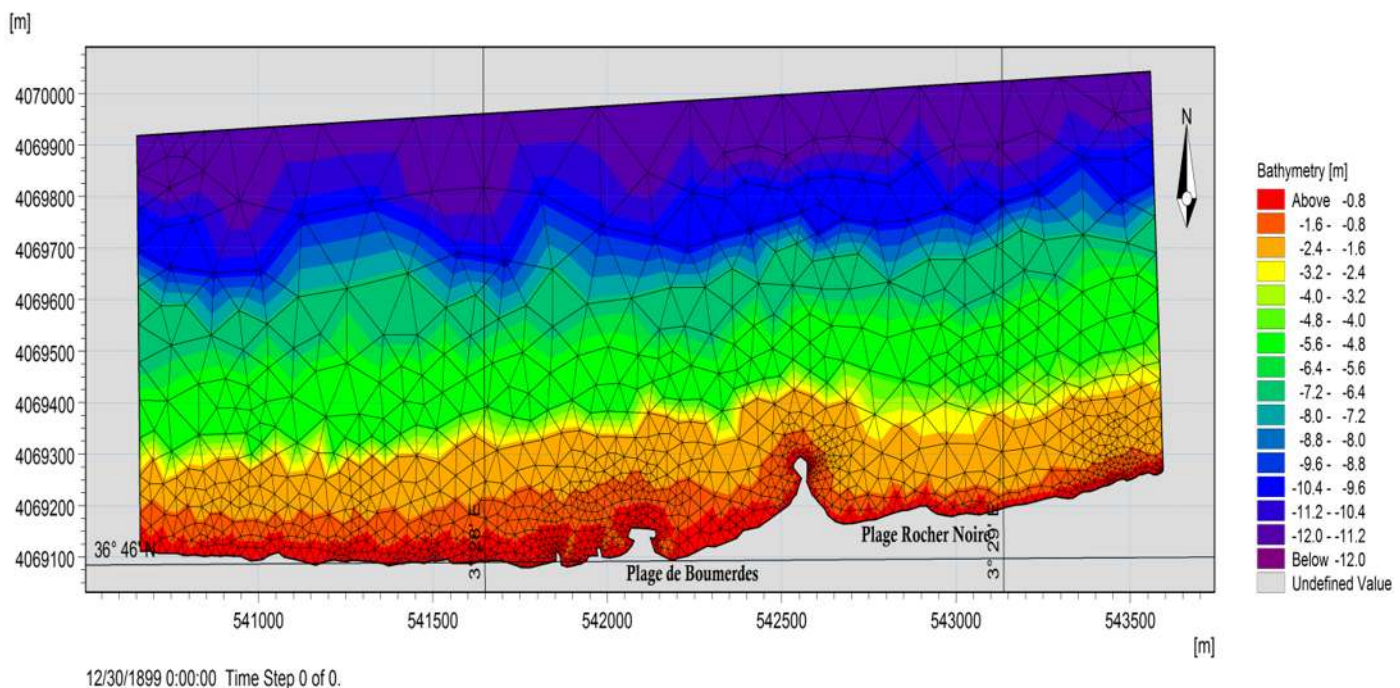


Figure 4.8: Le maillage de la zone de Boumerdès (DHI-Mike 21, Azzi, Boukert, 2017).

b.2. Sidi Fredj

Pour la zone de Sidi Fredj on a 1812 mailles et 1061 nœuds avec un linéaire de 2 km, allant de l'extrême est de la plage Moretti jusqu'à l'extrême ouest du port de Sidi Fredj. La surface du maillage est d'environ 1.3 km².

La taille du maillage varie de 110 mètres au large à 5 mètres à la côte

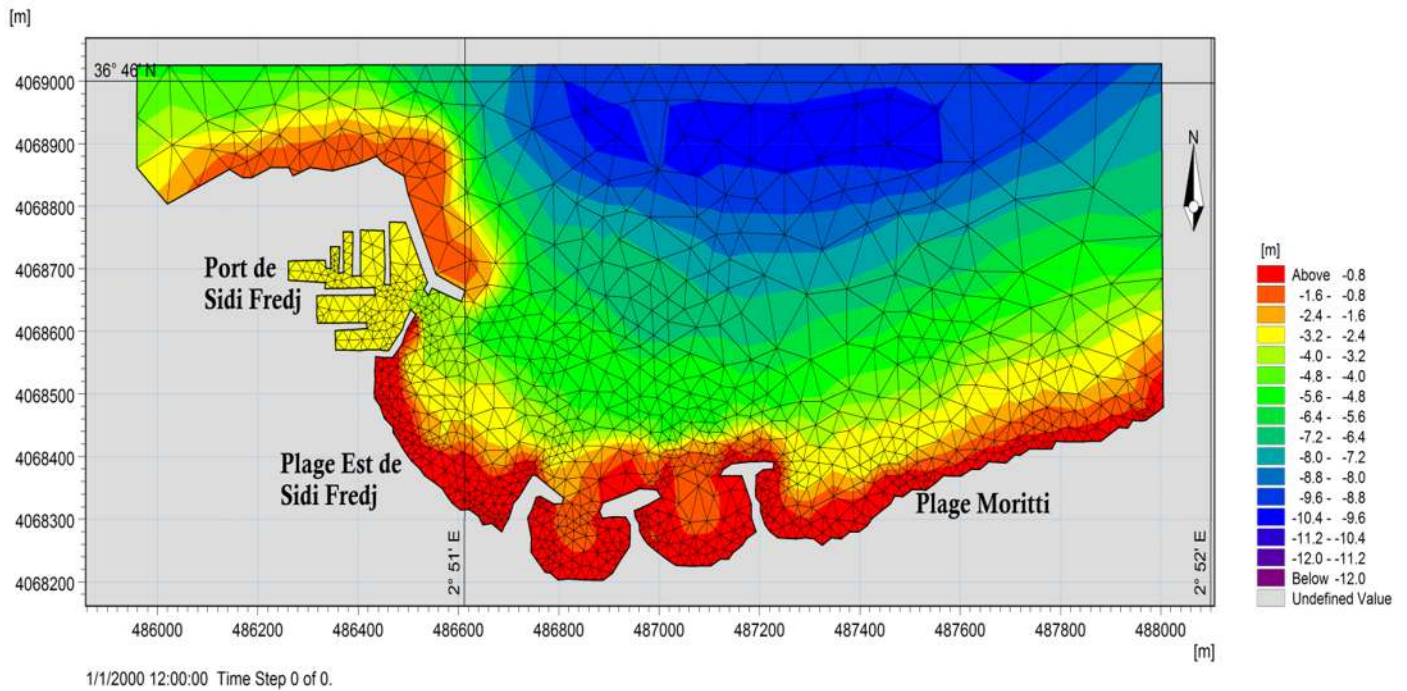


Figure 4.9 : le maillage de la zone de Sidi Fredj (DHI-Mike 21, Azzi, Boukert, 2017).

b.3. Hamdania

Pour la zone Hamdania On a 6475 Elément de maille et 3522 Nœuds, avec environs 7 km de linéaire allant de l'extrême Est de la plage Hamdania jusqu'à l'extrême Ouest de la plage Oued Balah, la surface du maillage est d'environ 11 km².

La taille du maillage pour cette zone varie de 350 mètres au large à 5 mètres dans la côte.

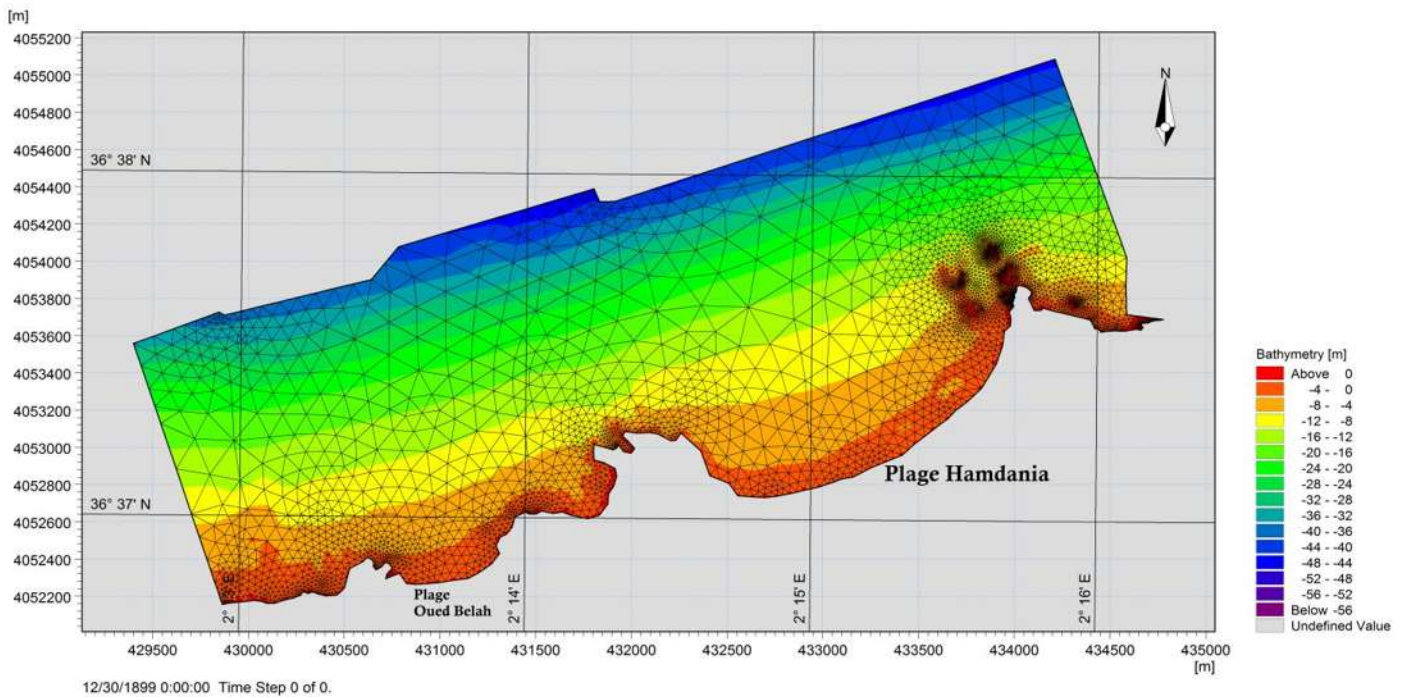


Figure 4.10 : le maillage de la zone de Hamdania, (DHI-Mike 21, Azzi, Boukert, 2017).

- **Mike 21 :**

Dans le cadre de ce travail, l'approche retenue consiste a priori en la modélisation couplée MIKE21 pour les raisons principales suivantes :

Le logiciel MIKE comprend certains modules spécialisés pour calculer le champ descourants, des vagues, du transport des sédiments, ...etc. pour les zones côtières. Enparticulier, le modèle intégré MIKE21/3 Modèle FM couplé avec le module MIKE21ST intègre des modèles professionnels pour étudier les questions liées au transport du sable et au dépôt – érosion (Deigaard, R., Fredsoe, J. et Connie Hedegaard, IB (1986)).

Le modèle couplé MIKE21/3 FM est un nouveau produit (développé en2004-2009) et le logiciel spécialisé plus avancé MIKE21 comprend de nombreux modules intégrés pour l'utilisation dans quatre grands domaines : l'hydraulique dela rivière et de la mer ; les vagues ; les processus d'accrétion, d'érosion ; et l'environnement hydraulique. Il s'agit d'un modèle d'hydraulique numérique par éléments finis intégrés pour simuler le processus hydraulique intégré ainsi quedans des eaux peu profondes, couplant vagues, courants et transport de matériel (ycompris le transport de la boue, le transport du sable, la transmission). Nousutilisons trois modules : l'hydrodynamique (HD), le transport de sédiments (ST) etle spectre de la houle (SW).(DHI-2014f).

Dans la dernière version de MIKE 21, qui a été utilisée pour la présente étude, la modélisation de l'ensemble des processus peut être effectuée en mode couplé, permettant une mise à jour de l'ensemble des variables (courants, vagues, transports des sédiments et morphologie) à chaque pas de temps du calcul.

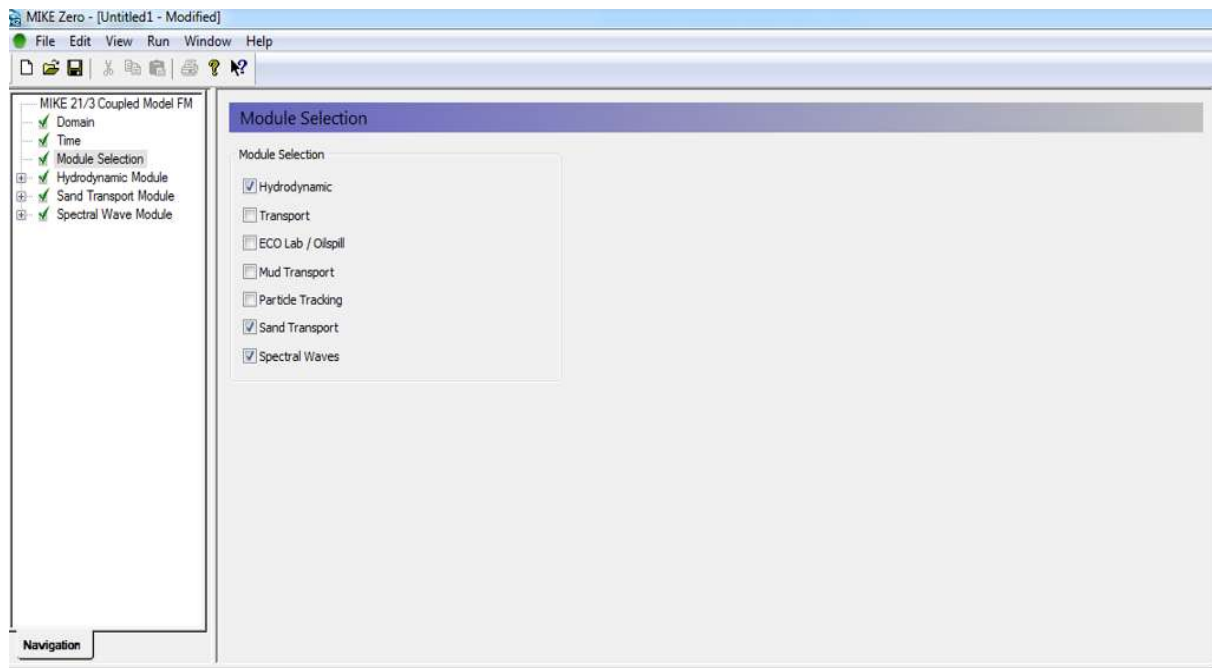


Figure 4.11: Interface du modèle couplé MIKE 21/3 FM.

3. Configuration du modèle DHI-MIKE FM

Il s'agit des conditions aux limites établies par l'opérateur avant le lancement de la simulation.

- **Conditions aux limites**

Les conditions aux limites d'un modèle représentent les paramètres qui sont imposés par l'utilisateur aux diverses frontières de la zone modélisée. Un choix judicieux de ces conditions est essentiel pour obtenir un modèle donnant des résultats représentatifs de la réalité (Lasalle, 2016).

- **Paramètres de calcul**

Les paramètres de calcul et la configuration des modèles (voir section 3.5) sont imposés sur toutes les simulations des trois zones d'études.

Ces configurations sont faites en fonction des méthodologies proposés par le manuel d'utilisation de DHI-Mike 21 ainsi que les différentes publications scientifiques (Lasalle NHC, THAN, Sanchez...) ainsi que la spécificité de nos zones d'études (mer ouverte, bathymétrie croissante, pas d'obstacle au large...).

4. Module SW

a. Conditions du niveau marin

Les conditions du niveau marin varient en fonction du temps de simulation et selon la bathymétrie de la zone d'étude, la grille des données du niveau marin est calculée par le module HD.

b. Les conditions de courant

Les vecteurs de vitesse et de direction des courants sont calculés grâce au module HD.

c. Rupture des vagues

La rupture des vagues est calculée par le changement de la profondeur avec une valeur constante $\gamma = 0.8$ et $\alpha = 1$.

d. Conditions initiales des limites

Les conditions initiales imposées dans le module SW dans les limites des zones d'études sont les paramètres de la houle, dans ce travail on a pris trois paramètres (Hauteur significative, période de la houle, et direction) comme suite :

Hs = 5.11m, Tp = 10.46s; Dir = 22.5°N (1)

Hs = 3.25m; Tp = 8.85s; Dir = 45°N (2)

Hs = 3.31m; Tp = 9.11s; Dir = 270°N (3)

Pour ce travail on a pris les plus grandes houles enregistrées au large, les statistiques ont montrées que :

La moyenne des plus grandes houles enregistrées en douze (12) ans avec une hauteur de 5.11 m de direction Nord Nord-est (1) et sa représente 4.07 % des houles.

La moyenne des houles les plus fréquentes enregistrées avec une hauteur de 3.25 m de direction Nord est (2) et qui représente 36.40 % des houles.

La moyenne des deuxièmes plus fréquentes houles enregistrées et qui représente une hauteur de 3.31 m et de direction Ouest (3) et qui représente 17.38 % des houles.

On souligne que ces données sont récentes et qui sont obtenues par la base de données Global OceanWaves (GOW) validé par des données satellitaires et des bouées de houles.

Ces données proviennent d'une série d'enregistrement toutes les heures de 1979 jusqu'à 2014 et traités par le module WaveWatch III. (IH Cantabria, 2015).

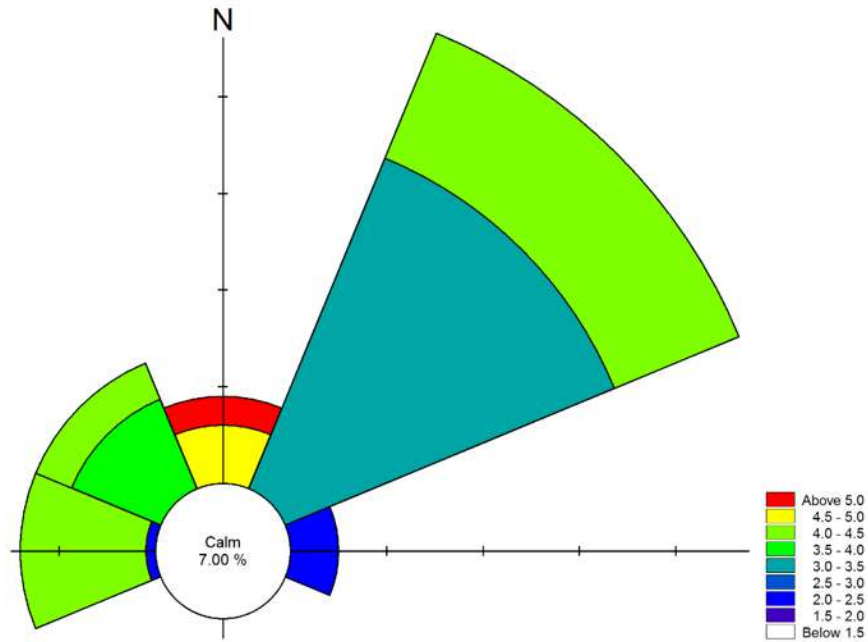


Figure 4.12: Rose des houles WaveWatch III (DHI-Mike 21, AZZI, BOUKERT, 2017)

5. Résultats

a. Boumerdès

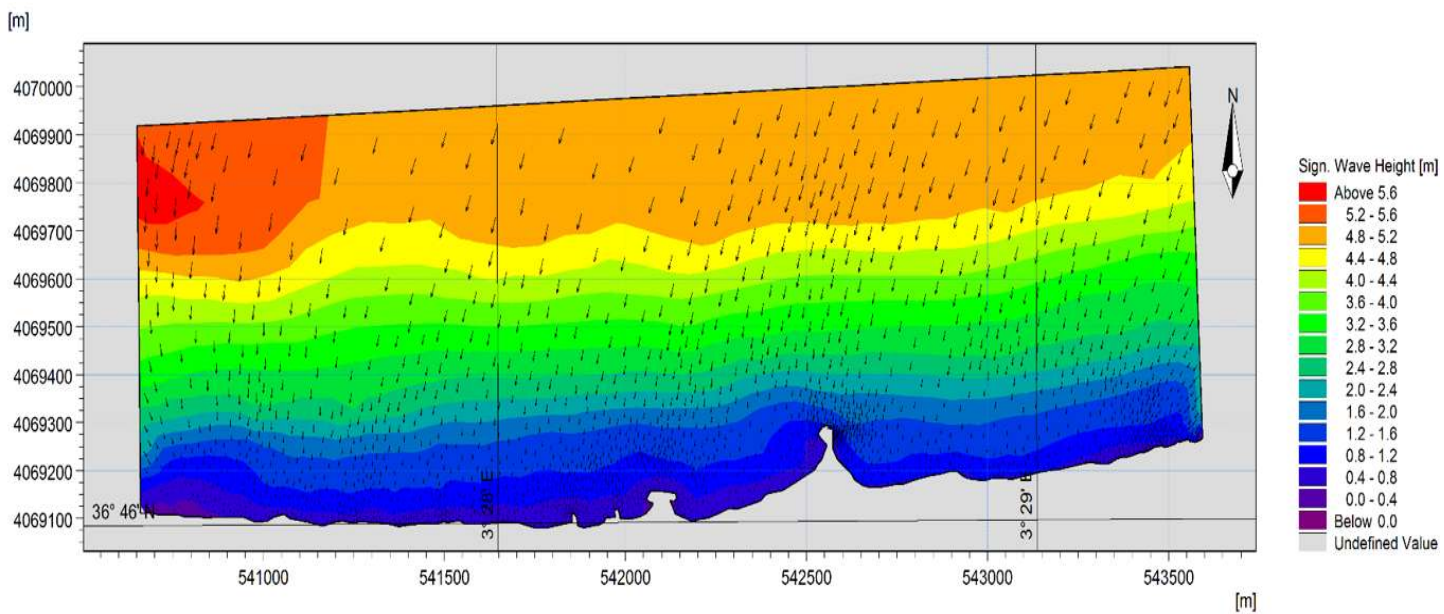


Figure 4.13 : Champs des houles dans la zone de Boumerdès ($H = 5.1\text{ m}$; $T_p = 10.46\text{ s}$; $\text{Dir} = 22.5^\circ\text{N}$)

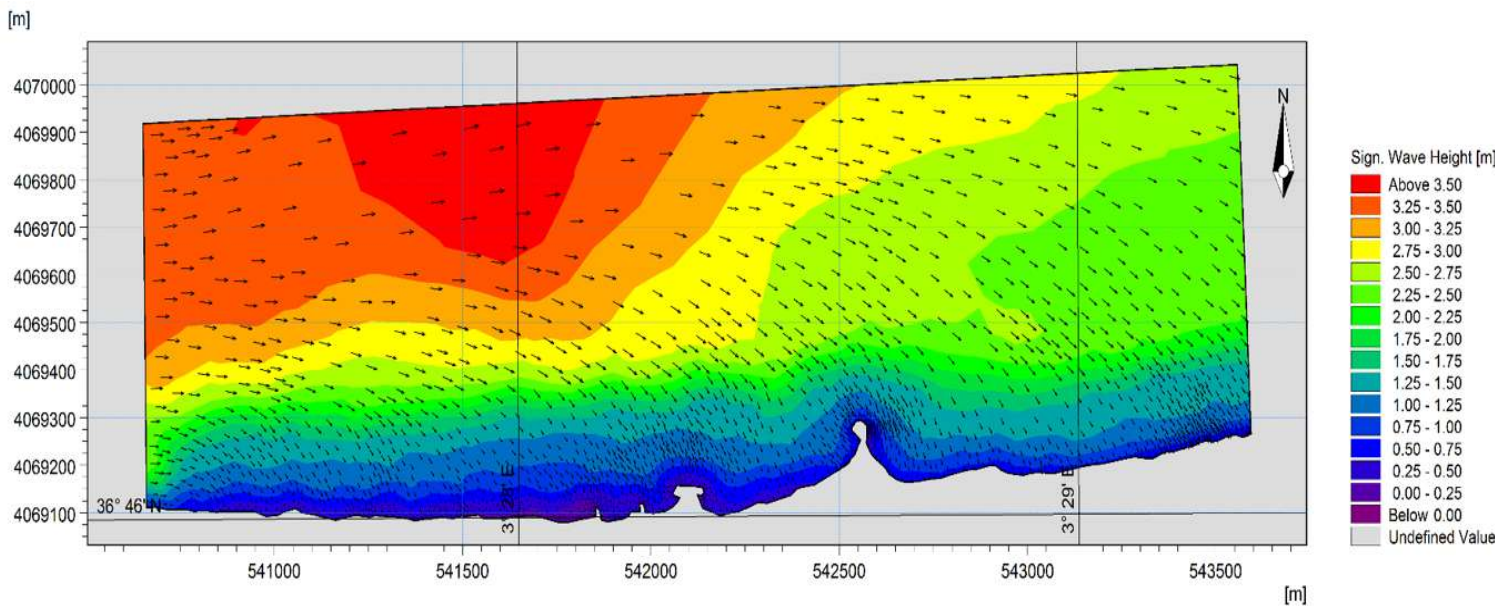


Figure4.14: Champs des houles dans la zone de Boumerdès ($H= 3.31\text{m}$; $T_p = 9.11\text{s}$; $\text{Dir} = 270^\circ\text{N}$)

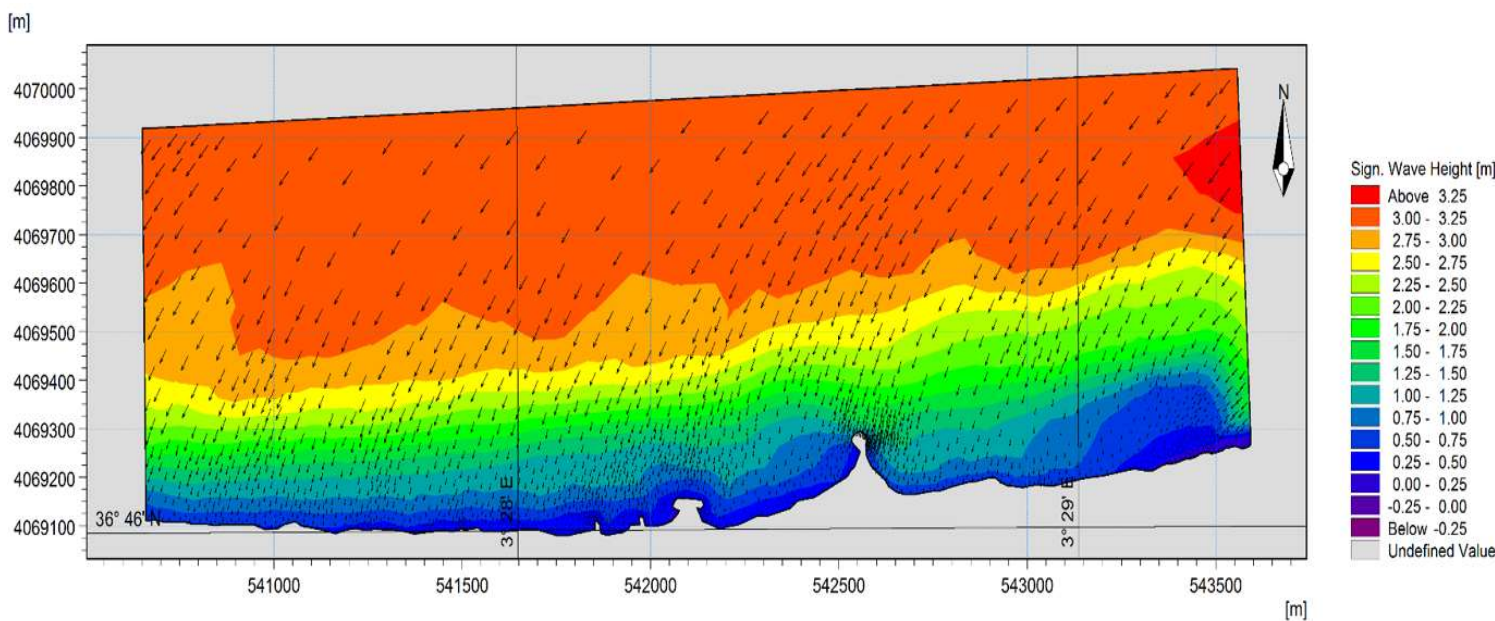


Figure4.15 : Champs des houles dans la zone de Boumerdès ($H= 3.25\text{m}$; $T_p = 8.85\text{s}$; $\text{Dir} = 45^\circ\text{N}$)

Commentaire :

La figure 4.10 représente la simulation numérique de la réfraction de la houle pour la direction 22.5° N (Nord, Nord-est) avec une hauteur de 5.11m au large et une seule période $T_p = 10.46$ s.

Le champ des houles dévie graduellement jusqu'à la côte ; les houles abordent la côte d'une manière frontale, au fur et à mesure que la profondeur diminue, la hauteur de la houle diminue considérablement.

A la profondeur de -12 m, on observe que la hauteur de la houle est comprise entre 4.8 à 5.2, marquant qu'il y a aucun pivotement des orthogonales. Dès que ce champ de houle approche de la côte on remarque une diminution des hauteurs qui atteignent les 0.8 m dans la partie est du rocher noir, cela signifie que la houle perd la majorité de son énergie lors de son évolution vers la côte et les 0.4 m dans sa partie ouest et celle des ouvrages de protection existants qui signifie que les obstacles jouent un rôle considérable pour la dissipation de l'énergie.

La figure 4.11 représente la simulation numérique de la réfraction de la houle pour la direction 270° N (Ouest) avec une hauteur de 3.31m au large et une seule période $T_p = 9.11$ s.

Les résultats obtenus par la simulation montrent que la hauteur significative de la houle diminue de 0.31 à partir de -10m de profondeur avec une légère modification de direction. Quand le fond atteint les -8 m de profondeur on remarque que la hauteur de la houle atteint les 2.75 m avec une déviation importante des orthogonales de la houle. A l'approche de la côte la houle perd la majorité de sa hauteur jusqu'à atteindre les 0.25m aux pieds du rivage. Cela signifie que le coefficient de la réfraction de la houle est important.

Ce changement des caractéristiques de la houle (hauteur et direction) est peut être due à l'effet de la configuration de la bathymétrie qui fait que le coefficient de la réfraction soit important pour cette direction (Ouest) et en résultat les orthogonales de la houle change de direction.

La figure 4.12 représente la simulation numérique de la réfraction de la houle pour la direction 45° N (Est) avec une hauteur de 3.25 m au large et une seule période $T_p = 8.85$ s.

La simulation hydrodynamique de la houle montre qu'au niveau de l'isobathe -8 m la houle commence à perdre sa hauteur jusqu'à atteindre les 0.25 m à -1 m de profondeur avec un léger changement de direction qui pourrait être due aux resserrements des isobathes, ce qui nous laisse savoir que la houle perd la globalité de son énergie lors de sa propagation du large vers la côte ; le changement de la profondeur est la principale cause de cette dissipation d'énergie.

b. Sidi Fredj

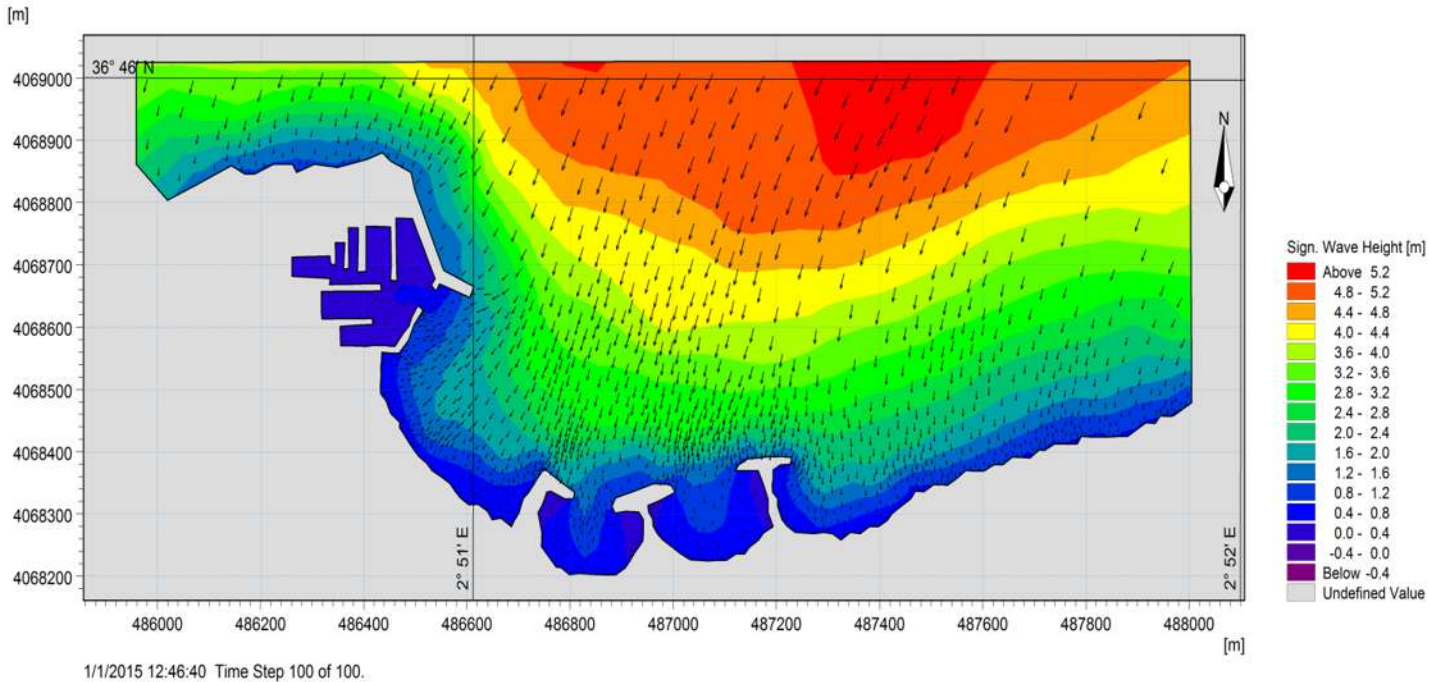


Figure 4.16 : Champs des houles dans la zone de Sidi Fredj ($H = 5.11\text{m}$; $T_p = 10.46\text{s}$; $\text{Dir} = 22.5^\circ\text{N}$)

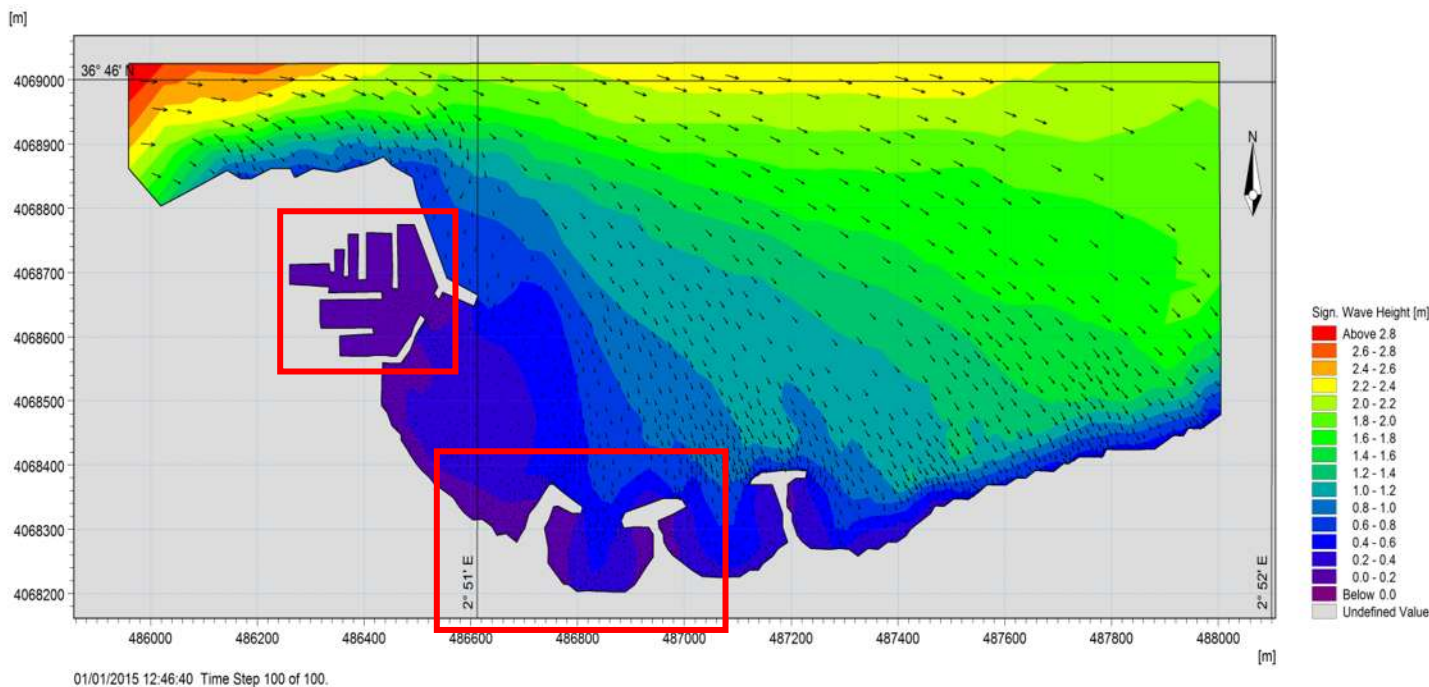


Figure4.17 : Champs des houles dans la zone de Sidi Fredj ($H = 3.31\text{m}$; $T_p = 9.11\text{s}$; $\text{Dir} = 270^\circ\text{N}$)

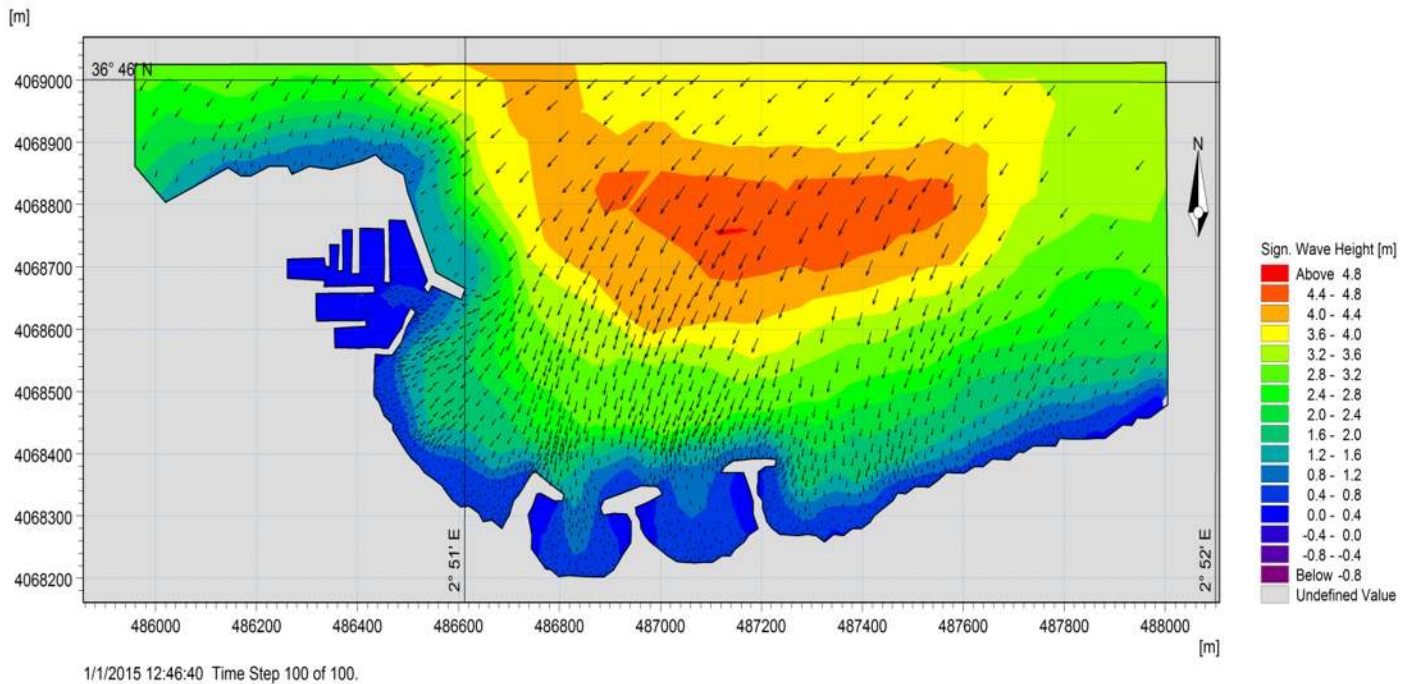


Figure 4.18 : Champs des houles dans la zone de Sidi Fredj ($H= 3.25\text{m}$; $T_p = 8.85\text{s}$; $\text{Dir} = 45^\circ\text{N}$)

Commentaire :

La figure 4.13 représente la simulation numérique de la réfraction de la houle pour la direction 22.5°N (Nord- Nord-est) avec une hauteur de 5.11 m au large dont la période est de 10.46s .

A partir de la figure on remarque que les houles commencent à perdre leurs énergies progressivement à partir de l'isobathe $- 10\text{ m}$ ou la hauteur de houle est de l'ordre de 4.8 m dans la partie Nord-est de la zone d'étude. En revanche dans la partie Nord-ouest la hauteur est de l'ordre de 3.2 m , elle diminue à fur et à mesure jusqu'à atteindre son minimum qui est de l'ordre de 0.4 m à l'approche du rivage, ce qui nous laisse penser que pour cette direction de houle la configuration de la bathymétrie est la principale cause de la dissipation de l'énergie de la houle.

On remarque aussi que pour cette direction (22.5°N) de houle, la zone de Sidi Fredj est exposée directement aux houles de façon perpendiculaire.

La figure 4.14 représente la simulation numérique de la réfraction de la houle pour la direction 270°N (Ouest) avec une hauteur de 3.31 m au large et une seule période $T_p= 9.11\text{s}$.

La simulation montre qu'à l'isobathe $- 12\text{ m}$, la hauteur de houle est de l'ordre de 2.10 avec un léger pivotement des orthogonales qui est estimé à 20°N .

On observe que du fait du fond la houle commence à perdre ses caractéristiques jusqu'à atteindre son minimum qui est de l'ordre de 0.30 m de hauteur prêt de la côte. La cause principale de cette réfraction est la nature du fond.

On remarque aussi qu'à proximité des ouvrages de protection et la jeté principal du port (couleur sur la figure en rouge) qui n'y a presque pas de houle cela est causé peut être par ces ouvrages qui dispersent l'énergie de la houle et abrite la zone a proximité pour cette direction de houle.

La figure 4.15 représente la simulation numérique de la réfraction de la houle pour la direction 45° N (Est) avec une hauteur de 3.25 m au large et une seule période $T_p = 8.85s$.

Le résultat de la simulation numérique montre que le champ de houle se propage de la direction Nord est avec une hauteur maximale de 3.25 m en diminuant progressivement du fait du fond jusqu'à atteindre son minimum qui est de l'ordre de 0.25 m au pied de la côte.

c. Hamdania

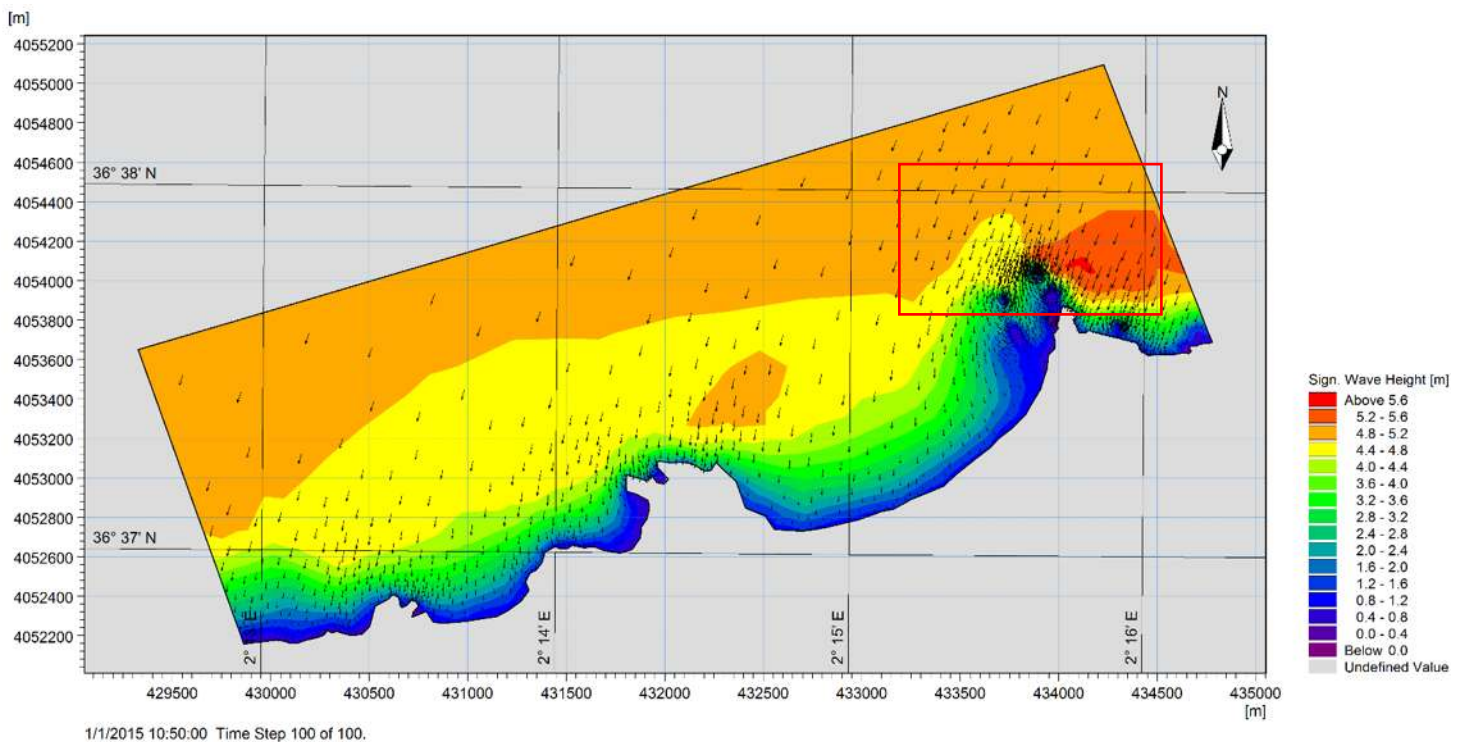


Figure 4.19: Champs des houles dans la zone de Hamdania ($H = 5.11m$; $T_p = 10.46s$; $Dir = 22.5^\circ N$)

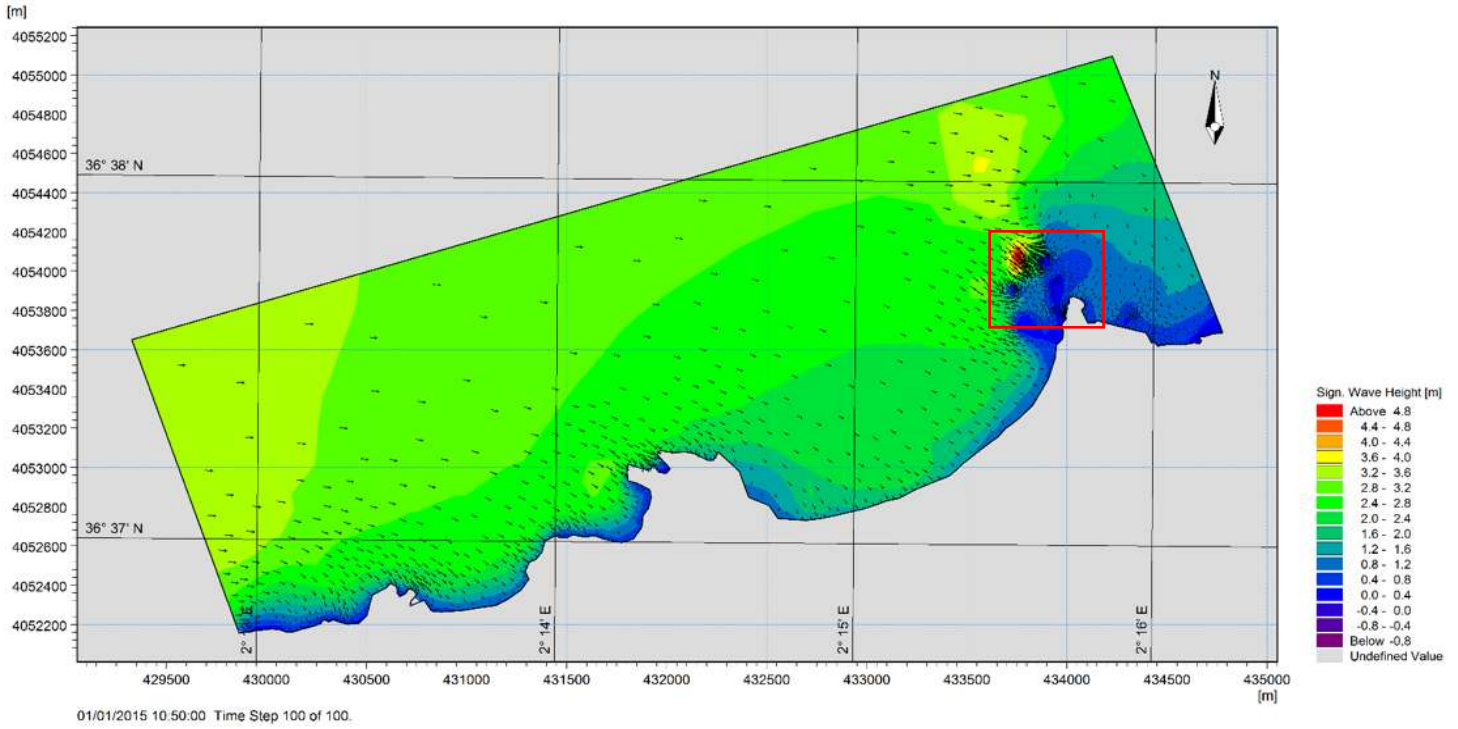


Figure 4.20 : Champs des houles dans la zone de Hamdania ($H= 3.31\text{m}$; $T_p = 9.11\text{s}$; $\text{Dir} = 270^\circ\text{N}$)

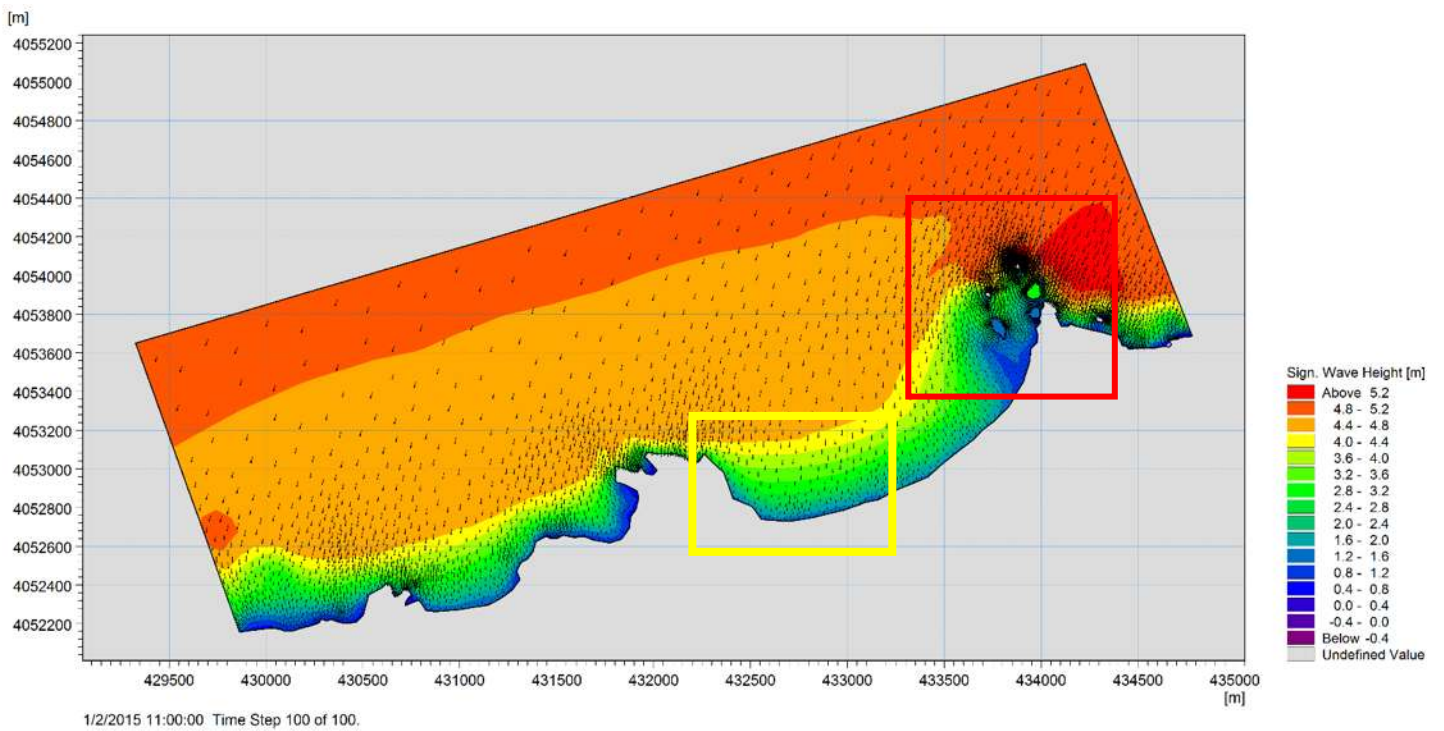


Figure 4.21 : Champs des houles dans la zone de Hamdania ($H= 3.25\text{m}$; $T_p = 8.85\text{s}$; $\text{Dir} = 45^\circ\text{N}$)

Commentaire :

La figure 4.16 représente la simulation numérique de la réfraction de la houle pour la direction 22.5° N (Nord- Nord-est) avec une hauteur de 5.11 m au large et une seule période = 10.46s.

La simulation montre que la propagation de la houle est de secteur Nord-est (NE) avec une hauteur maximale entre 4.8 et 5.2m et diminue progressivement jusqu'à atteindre la côte avec une hauteur de 0.4m sans changement significatif de direction.

La simulation fait une exception au niveau de la partie est de la zone (cadre en rouge). En effet une condensation d'énergie dans cette partie, qui est due à la présence des îles ainsi on remarque qu'il y'a une dispersion frontale de l'énergie de la houle avec un changement de direction.

La figure 4.17 représente la simulation numérique de la réfraction de la houle pour la direction 270° N (Ouest) avec une hauteur de 3.31 m au large et une seule période $T_p = 9.11$ s.

Ce champ de houles ne subit pas de modification significative de direction, mais au fur et à mesure que la profondeur diminue, la hauteur de la houle diminue considérablement.

On remarque dans la partie Est qu'en raison de la présence des îles houle (voir cadre rouge) il y'a eu un changement brusque dans les paramètres de la houle qui s'est traduit par l'augmentation de la hauteur.

Une autre remarque qu'au milieu de notre zone d'étude au niveau de la côte (voir cadre jaune), il y a un fort hydrodynamisme qui est peut être due à la configuration du trait de côte qui est perpendiculaire à la direction de la houle incidente. En effet dans cette zone, il y a des sédiments grossiers ce qui confirme notre simulation (voir section : granulométrie).

La figure 4.18 représente la simulation numérique de la réfraction de la houle pour la direction 45° N (est) avec une hauteur de 3.25 m au large et une seule période $T_p = 8.85$ s.

La simulation hydrodynamique de la houle montre qu'au niveau de l'isobathe -40 m avec une hauteur de houle de l'ordre de 5.2m ce qui est supérieure à la valeur de la houle au large ou au conditions limites des données de large introduite (input data), ceci est peut être due au vent qui est de la même direction que la houle et qui s'est interagié avec et a changé la configuration de la houle par l'augmentation sa hauteur et de par sa direction.

On remarque dans la partie Est qui en raison de la présence des îles (voir cadre rouge) il y a eu un changement brusque dans les paramètres de la houle qui s'est traduit par l'augmentation de la hauteur.

6. Module HD

Pour le module DHI-Mike 21 HD les configurations sont comme suites :

a. Frottement sur les fonds

Toutes les simulations hydrodynamiques ont été réalisées avec un coefficient de Manning de $n = 0,03$, constant dans l'ensemble du secteur modélisé.

b. Viscosité turbulente

Les flux de quantité de mouvement dus à la turbulence, à l'intégration verticale des équations de base (modèle bidimensionnel) et aux fluctuations se produisant à des échelles inférieures aux cellules de maillage, ceux-ci sont pris en compte dans MIKE 21 par un paramètre de viscosité turbulente. En pratique, la variation de ce paramètre induit notamment dans les écoulements une plus ou moins grande tendance à former des zones de décollement et des courants de retour. Sur la base des résultats obtenus dans des études similaires, la formulation de Smagorinsky, avec une constante de 0,28, a été utilisée.

c. Force de Coriolis

La Force de Coriolis a été pris en compte avec un type de variation selon le domaine. Le calcul de la force de Coriolis est programmé automatiquement selon l'algorithme de DHI-Mike 21.

d. Force des Vents

Les forces des vents sont introduites par une grille de donnée qui varie dans le temps et dans le domaine, les données utilisées sont celle de 2015 de la station météorologique du port d'Alger (**OtmaniHousseyn**). Les données sont enregistrées quatre fois par jours pendant une année.

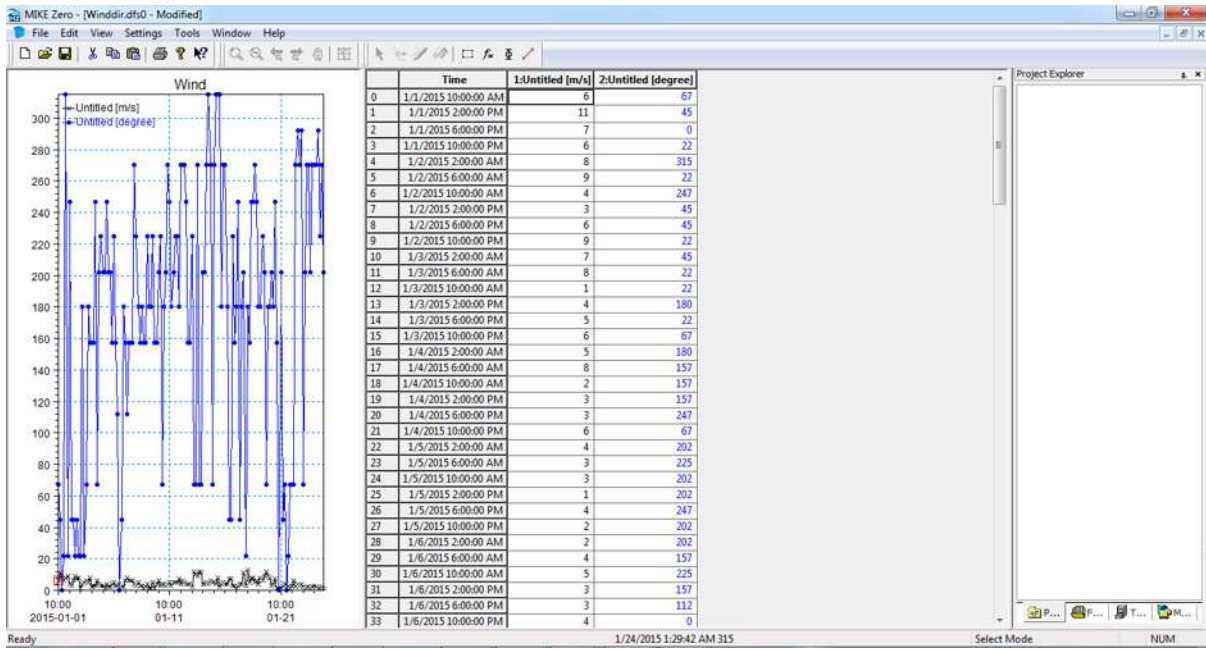


Figure 4.22: Grille de données (vent, direction et intensité).

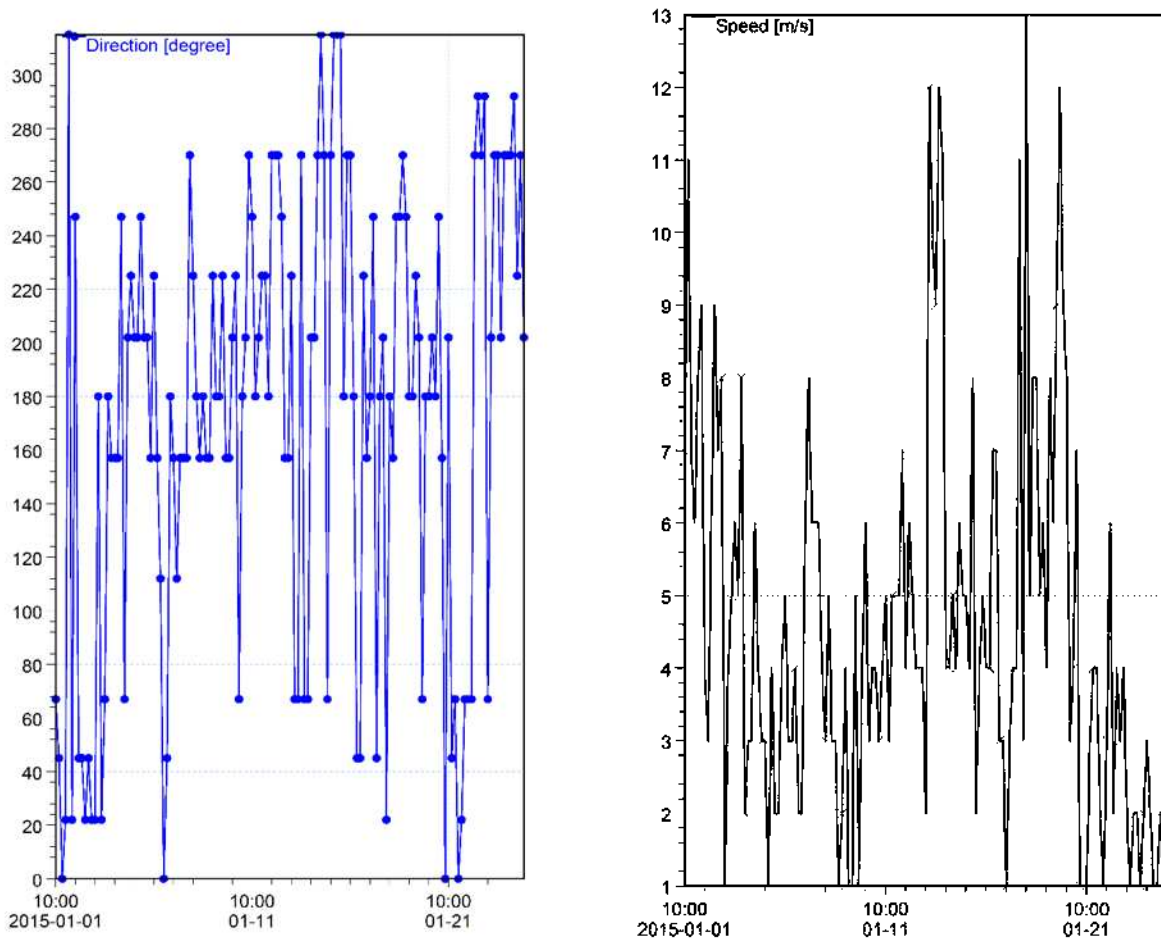


Figure 4.23 : Spectre des vents (DHI-Mike 21, Azzi Imad, BoukertHachemi, 2017).

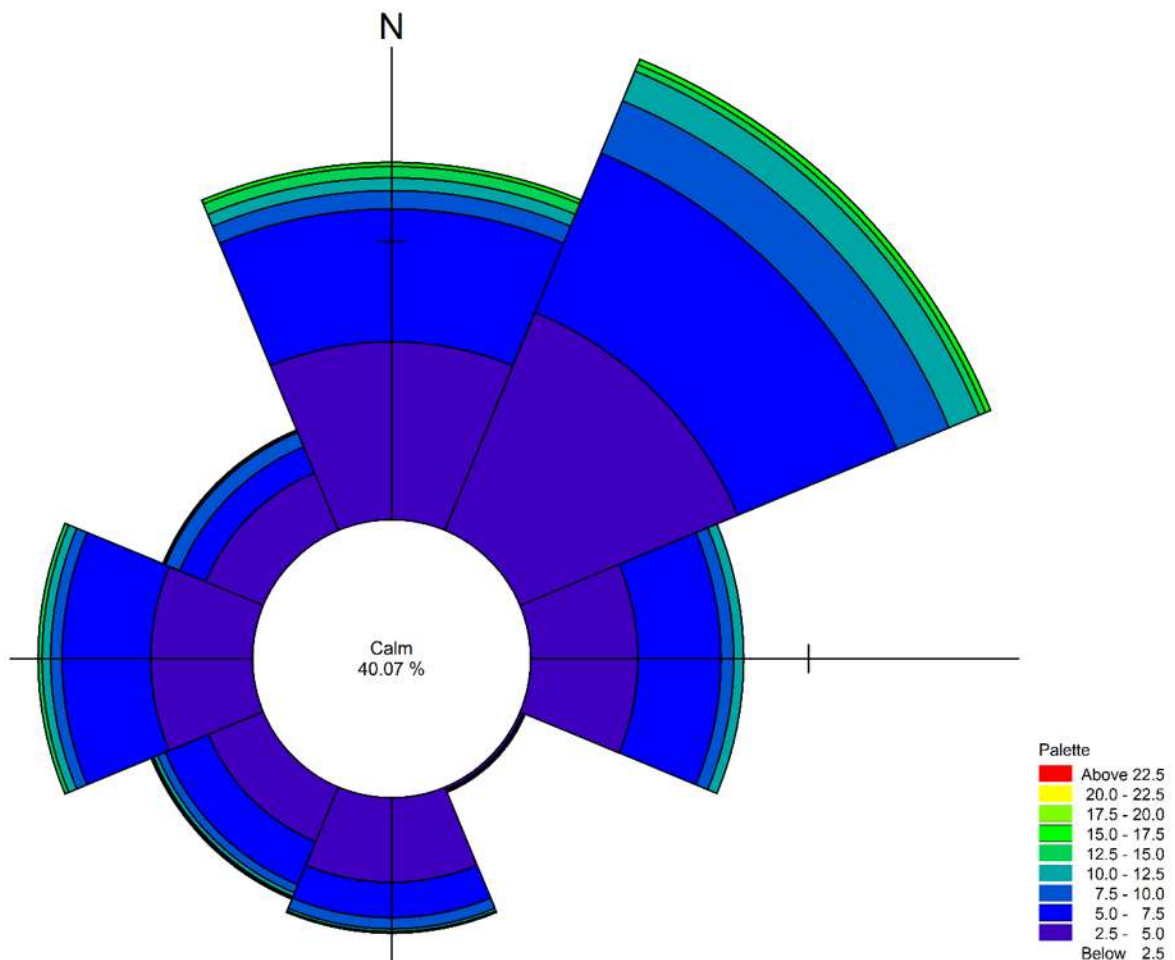


Figure 4.24 : Rose des vents de la station du port d'Alger (DHI-Mike 21, AZZI, BOUKERT, 2017).

e. les radiations des champs de houle

Les radiations des champs de houle sont obtenues grâce à la formulation spectrale du module Mike 21 SW (voir section 3.5.2).

f. Conditions initiales

Les conditions initiales sont les niveaux d'eau utilisés comme conditions aux limites, des informations de niveaux d'eau sur les points aux limites nord, est et ouest sont nécessaires, de ce fait la valeur du niveau d'eau utilisé est de $e=0.34$ m (SHFN, 2012).

7. Résultats

a. Boumerdès

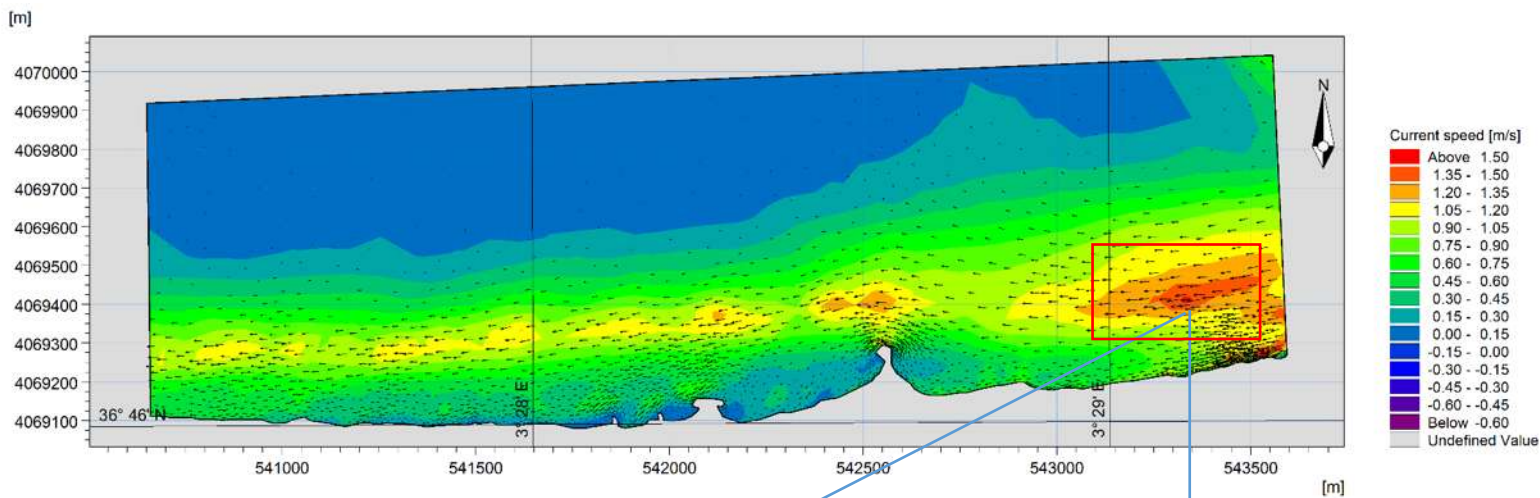


Figure 4.25 : Champs des courants dans la zone de Boumerdès (Direction des houles = 45°).

| Element | Sign. Wave Height [m] | x [m] | y [m] |
|---------|-----------------------|---------------|----------------|
| 155 | 2.97556 | 541242.688188 | 4069360.998148 |
| 156 | 2.08711 | 541278.861581 | 4069294.185767 |
| 157 | 1.84897 | 541314.123416 | 4069274.710628 |
| 158 | 1.36933 | 541333.962935 | 4069233.047507 |
| 159 | 3.21323 | 542164.299871 | 4069191.558875 |
| 160 | 2.91912 | 541274.722730 | 4069342.472479 |
| 161 | 2.19489 | 541302.088129 | 4069295.065628 |
| 162 | 1.82757 | 541337.711285 | 4069274.240308 |
| 163 | 1.44519 | 541348.191307 | 4069251.727632 |
| 164 | 1.31534 | 541384.050460 | 4069221.925425 |

| Element | Current speed [m/s] | x [m] | y [m] |
|---------|---------------------|---------------|----------------|
| 158 | 0.853691 | 541333.992935 | 4069233.047507 |
| 159 | 1.0387 | 542164.299871 | 4069191.558875 |
| 160 | 0.800439 | 541274.722730 | 4069342.472479 |
| 161 | 1.20843 | 541302.088129 | 4069295.065628 |
| 162 | 1.29672 | 541337.711285 | 4069274.240308 |
| 163 | 0.942311 | 541348.191307 | 4069251.727632 |
| 164 | 0.896702 | 541384.050460 | 4069221.925425 |
| 165 | 0.923211 | 542000.657823 | 4069460.192734 |
| 166 | 1.06456 | 542128.895636 | 4069648.359183 |
| 167 | 1.03388 | 542078.021567 | 4069769.991587 |

Commentaire :

D'après cette figure (4.22), on observe que les champs des courants formés par la houle de secteur est (45°N) dans la région de Boumerdès montrent des activités hydrodynamiques dans presque toute la zone.

On remarque que le courant se propage d'est en ouest suivant une direction parallèle au trait de côte avec une vitesse majoritaire qui varie entre 0.60 m/s à 1.05 m/s, ce courant est produit principalement par le phénomène de réfraction de la houle.

On remarque aussi qu'il y'a des augmentations de vitesse dans quelques segment qui est de l'ordre de 1.05 m/s à 1.50 m/s, après une vérification des données de sortie (Output data) on a trouvé que dans l'élément de Maille (159) et les éléments avoisinantes de la zone concerné dans le module SW, il y'a une augmentation de la hauteur de la houle. Ce changement est peut être due au phénomène de récolement (Interaction houle – houle, houle –

vent, houle –courant) ainsi que l'influence de la morphologie du fond. Seule une simulation approfondie en un point avec des données de sortie et des spectres de variations de houles, courants, vents, et élévation du niveau de la mer peut confirmer l'hypothèse.

A l'ouest du Rocher noir et des ouvrages de protection, les champs de courant face à ces obstacles se propagent dans des directions différentes ainsi leurs vitesses diminuent.

b. SidiFredj

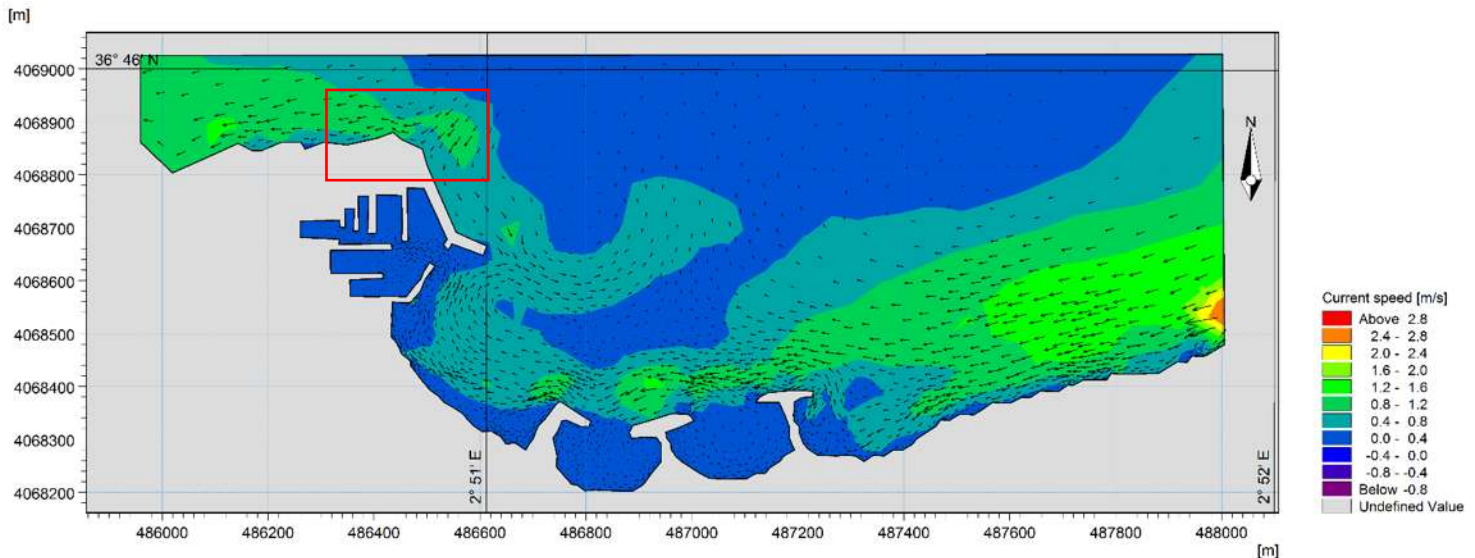


Figure 4.26 : Champs des courants dans la zone de Sidi Fredj (Direction des houles = 45°).

Commentaire :

La figure 4.23 représente les champs de courant dans la zone de Sidi Fredj générés par des houles de secteur est.

On remarque au niveau de la plage de Moretti des vitesses allant de 1.6 m/s à 2 m/s qui est due à la forte présence des houles suivant la direction Est – Ouest.

Suite à la présence des ouvrages de protection la vitesse du courant diminue à un intervalle de 0.8 m/s à 1.2 m/s et on remarque un changement de direction du fait de la dissipation d'énergie.

Des vitesses de courant réduites et de changement de direction sont aussi enregistrées au niveau de la passe d'entrée du port et c'est grâce à la jetée principale et le courant du sens opposé (voir cadre rouge) que ces directions ont réfracté. On peut dire que le port est abrité.

c. Hamdania

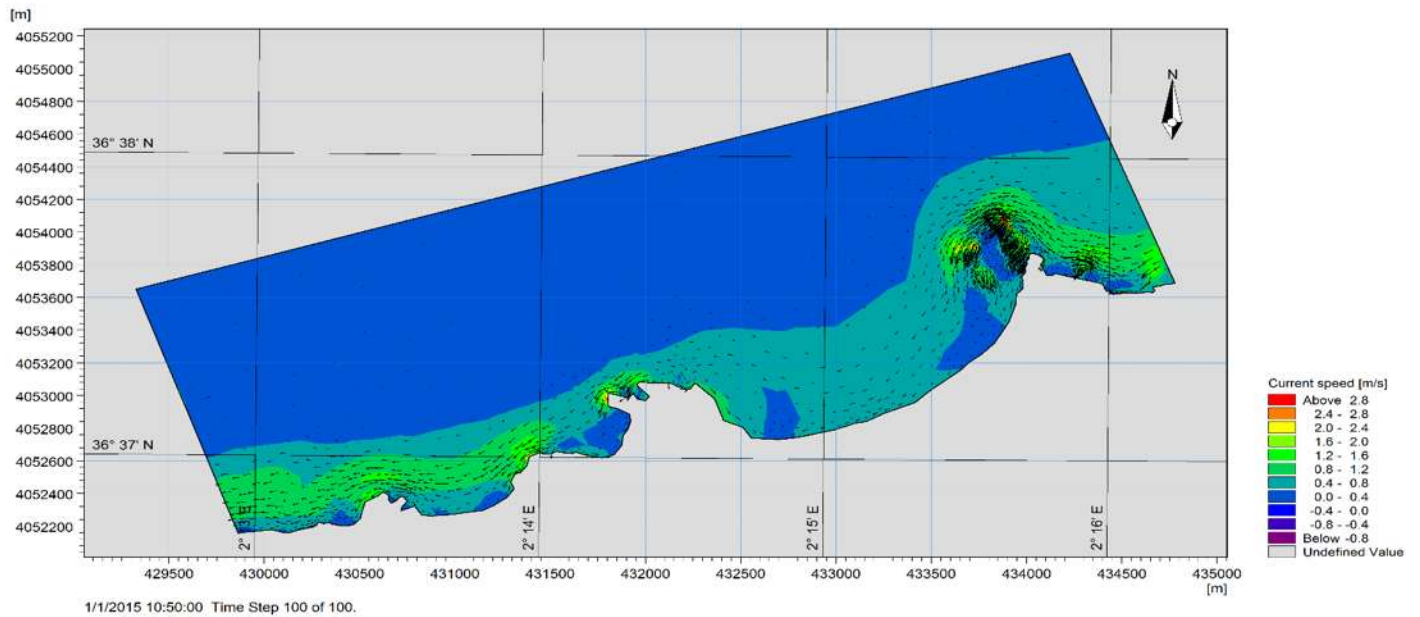


Figure 4.27 : Champs des courants dans la zone de Hamdania (Direction des houles = 45°).

La figure 4.24 représente les champs de courant dans la zone de Hamdania générés par des houles de secteur Est.

La simulation montre qu'au niveau est de la zone il y'a une très forte concentration de courants avec une vitesse de 1.6 m/s à 2 m/s avec des déviations de directions. Cette concentration est due à la présence d'îles dans cette région. En effet le fluide rencontre un obstacle et on a une dissipation et une diminution d'énergie.

Au niveau de la plage de Hamdania on a des vitesses de courant qui varie entre 0.4 m/s et 0.8 m/s suivant la répartition du trait de côte.

Au niveau ouest de la plage de Hamdania on remarque qu'il y'a des courants qui s'affrontent (voir carré rouge). Ceci est dû à la présence d'une falaise et il y'a eu une dissipation d'énergie du fait de la réfraction de la houle. Cette remarque coïncide avec le terrain (la présence de sédiment de grand diamètre, de type galet) et coïncide aussi avec l'évolution du trait de côte (voir chapitre).

Au niveau ouest de la zone le courant se rétablit à une vitesse supérieure, cela est peut être due aux situations des vagues / vents (Force frictionnelle) qui se sont montrées appropriées.

Les Pas de la Simulation par DHI-Mike 21 HD :

On a choisi la zone de Hamdania pour monter les pas (time step) importants de la simulation effectuée par le module HD ainsi comprendre comment la simulation fonctionne et comprendre comment on a eu les résultats des champs de courant.

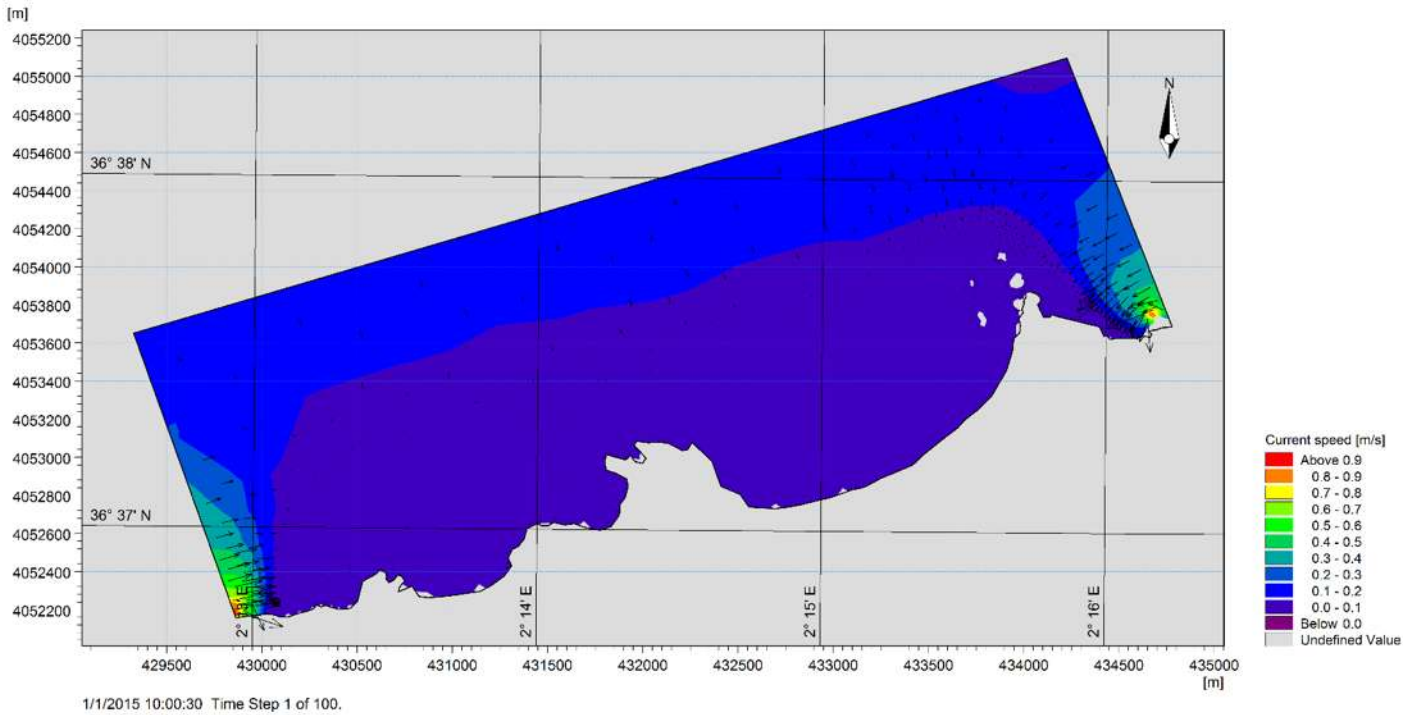


Figure 4.28 : Etapes de simulation par le module HD dans la zone de Hamdania (Step 1 of 100)

On remarque par la figure 4.25 qu'il y'a des vecteurs de vitesses qui arrivent par toutes les directions (longitudinaux et transversales), c'est des radiations (radiation stresses) due aux énergies des vagues (données générées par le module SW).

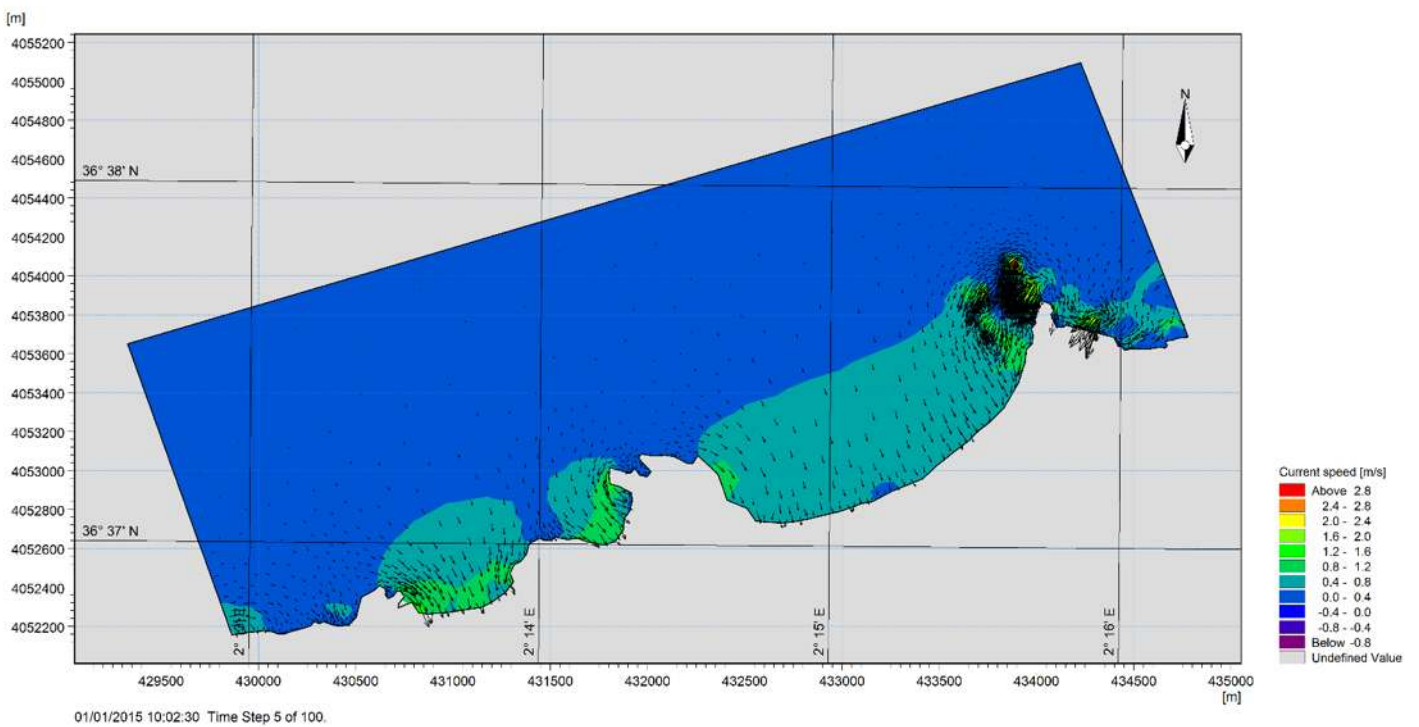


Figure 4.29 : Etapes de simulation par le modèle HD dans la zone de Hamdania(step 5 of 100)

Pour cette figure on observe que les radiations des houles sont perpendiculaires à la ligne du rivage, il y a un transport de masse et d'énergie, on parle du courant le long de la cote.

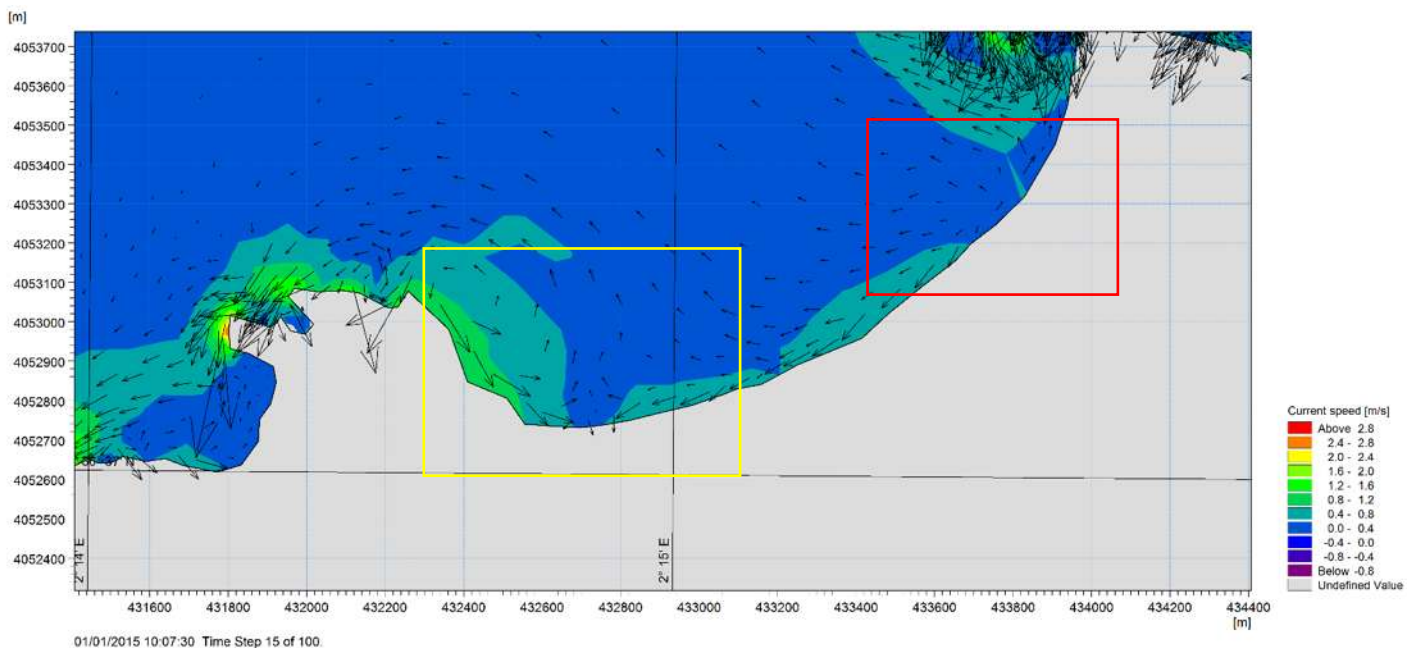


Figure 4.30 : Etapes de la simulation par le modèle HD dans la zone de Hamdania(step 15 of 100)

Pour cette figure au pas 15/100, on remarque que le courant prend des directions différentes, en effet il y a eu une formation d'un gradient de pression, cette différence de pression exige à son tour la rétablissements des conditions d'équilibre soit par :

- Formation de courants de vecteurs opposés. (voir cadre rouge)
- courants qui s'affrontent (face à face) et là on parle du contre-courant (ripcurrent). (voir cadre jaune).

DHI-Mike 21 dans son algorithme prend en considération toutes les variantes introduites (bathymétries, houles, vitesse du vent, élévation du niveau marin...) il est très difficile de représenter toutes les étapes et encore plus difficile de représenter tous les pas du temps.

Quelques Remarques :

1/ Quelques valeurs dans la palette paraient négatives, il s'agit en vérité de la projection d'une vitesse sur un axe et ce n'est pas la vitesse elle-même qui est négatives.

2/ Pour la zone de Hamdania, durant la simulation des courants par DHI-Mike 21 FM on a eu à faire face à un problème de contrainte de stabilité, le message d'erreur était "CLF condition a été violée", cette contrainte est due à la présence d'îles dans la zone qui sont à proximité du trait de côte (voir région est), au final on a eu un maillage très serré. Le temps de calcul et le temps de passage d'une maille à une autre était trop rapide pour un processeur d'un ordinateur standard.

Par proposition de Mr Anders Nottrott qui est un doctorant en ingénierie mécanique et environnementale de l'université de California, on a eu recours à la réduction du temps de pas (Time Step) et la réduction du nombre de maillage pour que la vitesse maximale (CFL condition) soit inférieure à 1.

```
warning: CFL condition violated in HD calculation
time : 0
element number : 3048
CFL number : 1.762906
x-coordinate (center) : 433955.566
y-coordinate (center) : 4054075.03
still water depth : 12.56564
length : 12.595859
```

Figure 4.31 : Message d'erreur de Mike 21

```
'  
> The maximum value of the CFL number is set by the Courant-Friedrichs-Lewy  
> condition (see WRF Description, Section 3.3 Stability Constraints). It is a  
> necessary condition for the convergence of the finite difference  
> integration schemes.  
>  
> Generally  $CFL = u_i * dt / dx_i$ , where  $u_i$  is the maximum velocity in the  $i$ th  
> direction,  $dt$  is the timestep and  $dx_i$  is the grid spacing in the  $i$ th  
> direction. For a simple 1D advection equation with an explicit solver the  
> requirement is  $CFL < 1$  everywhere in the domain. The limiting value is  
> different for other equations and higher order finite difference schemes.  
>  
> If you get an error message saying that the CFL was violated you should  
> consider the solution associated with that simulation to be spurious. To  
> resolve this problem you can either reduce  $dt$  (which increases the  
> computation time) or you can increase  $dx$  (which reduces resolution) and  
> rerun the simulation. Keep in mind that  $u_i$  is the maximum velocity in the  
>  $i$ th direction so a large velocity event at even one grid point can cause  
> you simulation to "blow up" in just a couple of time steps. Thus it is  
> important to consider the CFL in three dimensions and then allow some small  
> factor of safety in the design of  $dt$  or  $dx$ .  
>  
> Regards,  
>  
> Anders  
>  
>  
> --  
> Anders Nottrott  
> *PhD Student, Mechanical and Environmental Engineering*  
> University of California, San Diego  
> Department of Mechanical and Aerospace Engineering
```

Figure 4.32 : Réponse pour une solution d'un message d'erreur

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.

1. PRELEVEMENT ET ECHANTILLONNAGE

a. Prélèvement dans la partie aérienne

A l'aide d'un GPS (GARMIN 72H) et d'une benne (VAN VEEN) l'étude granulométrique a été effectuée des échantillons de sédiments superficiels prélevés sur la plage aérienne. Les échantillons ont été ensuite mis dans des sacs en plastique et étiquetés.

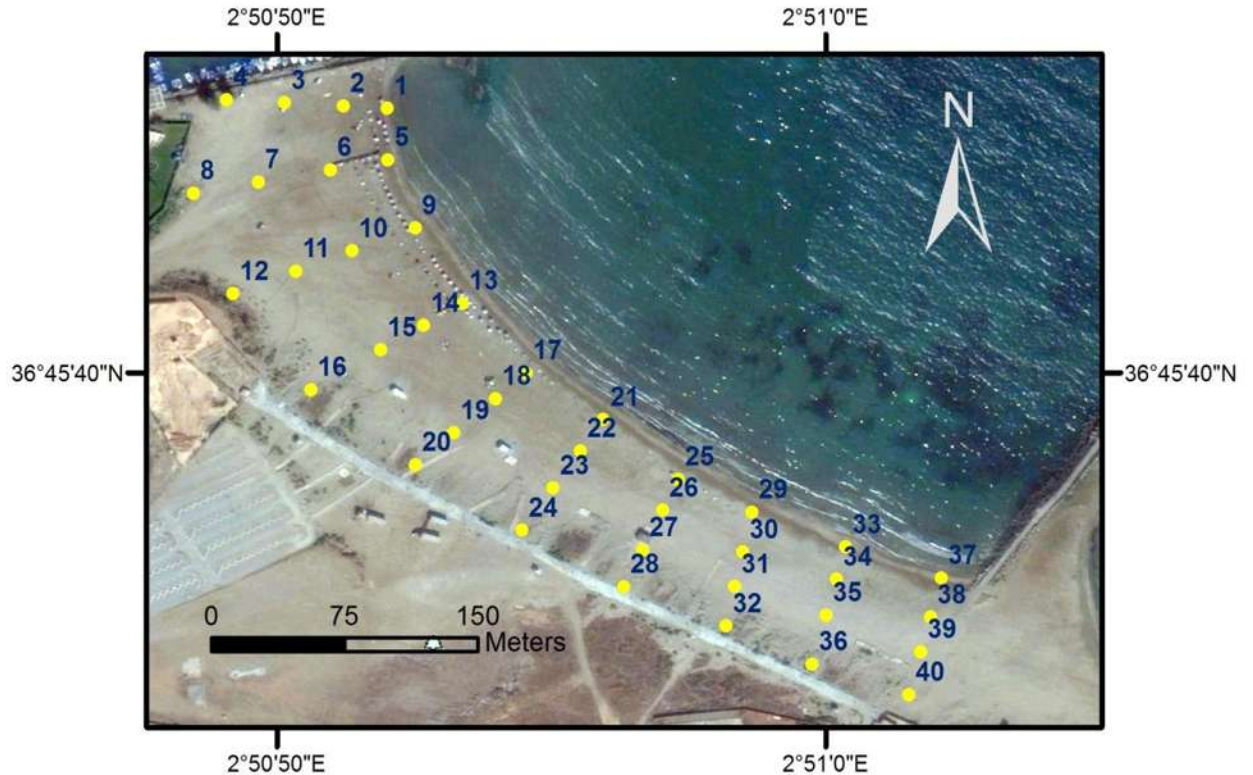


Figure 5.1: Positionnement des points de prélèvement dans la partie aérienne dans la plage de Sidi Fredj.

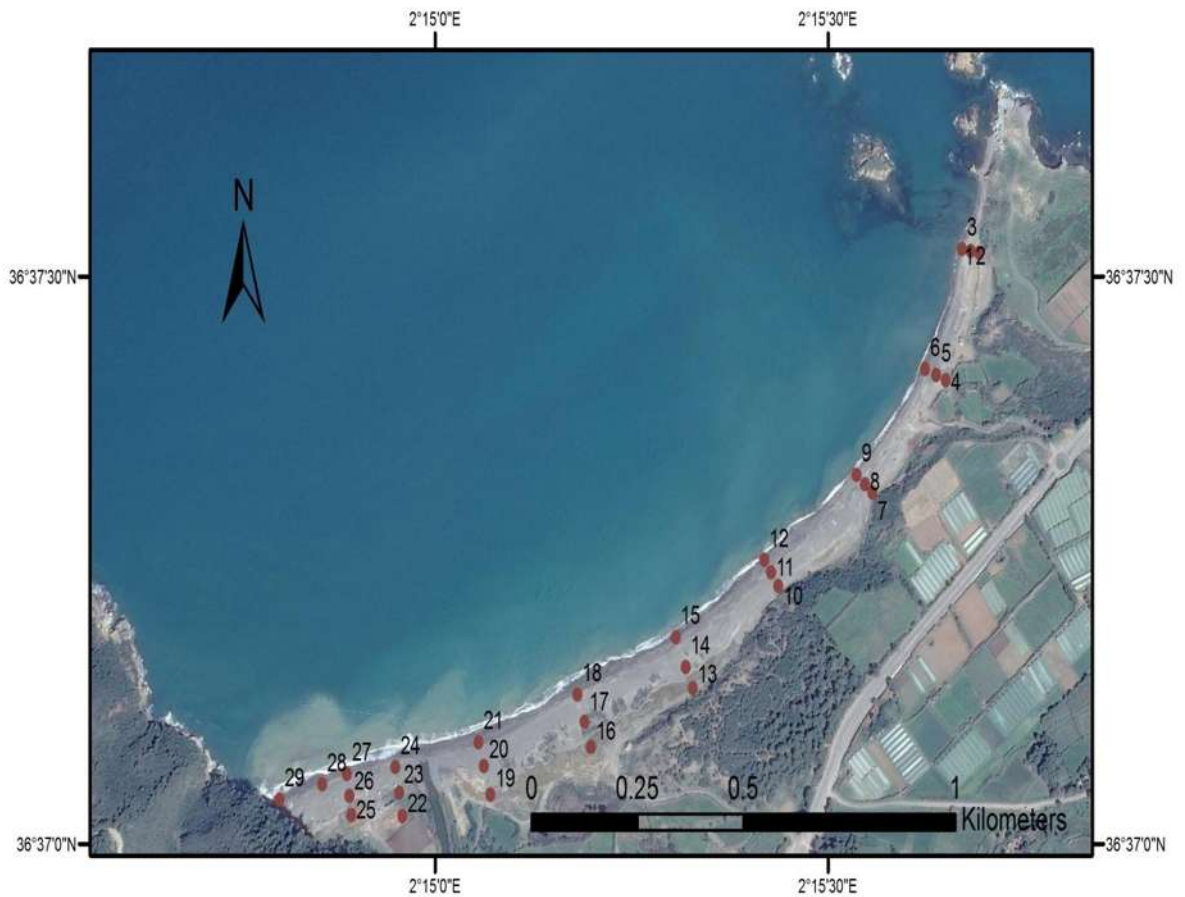


Figure 5.2 : Positionnement des points de prélèvement dans la partie aérienne dans la plage de Hamdania.

b. Prélèvement dans la partie sous-marine

A l'aide d'un GPS (GARMIN 72H) et d'une benne preneuse de type « Van-Veen » attachée à un câble et envoyée sur le fond en mer à partir d'une embarcation, l'étude sédimentologique a été effectuée sur plusieurs échantillons de sédiments superficiels (**Figure 2.3**). Une fois remontée, les échantillons ont été récupérés et mis dans des sacs en plastique et étiquetés.

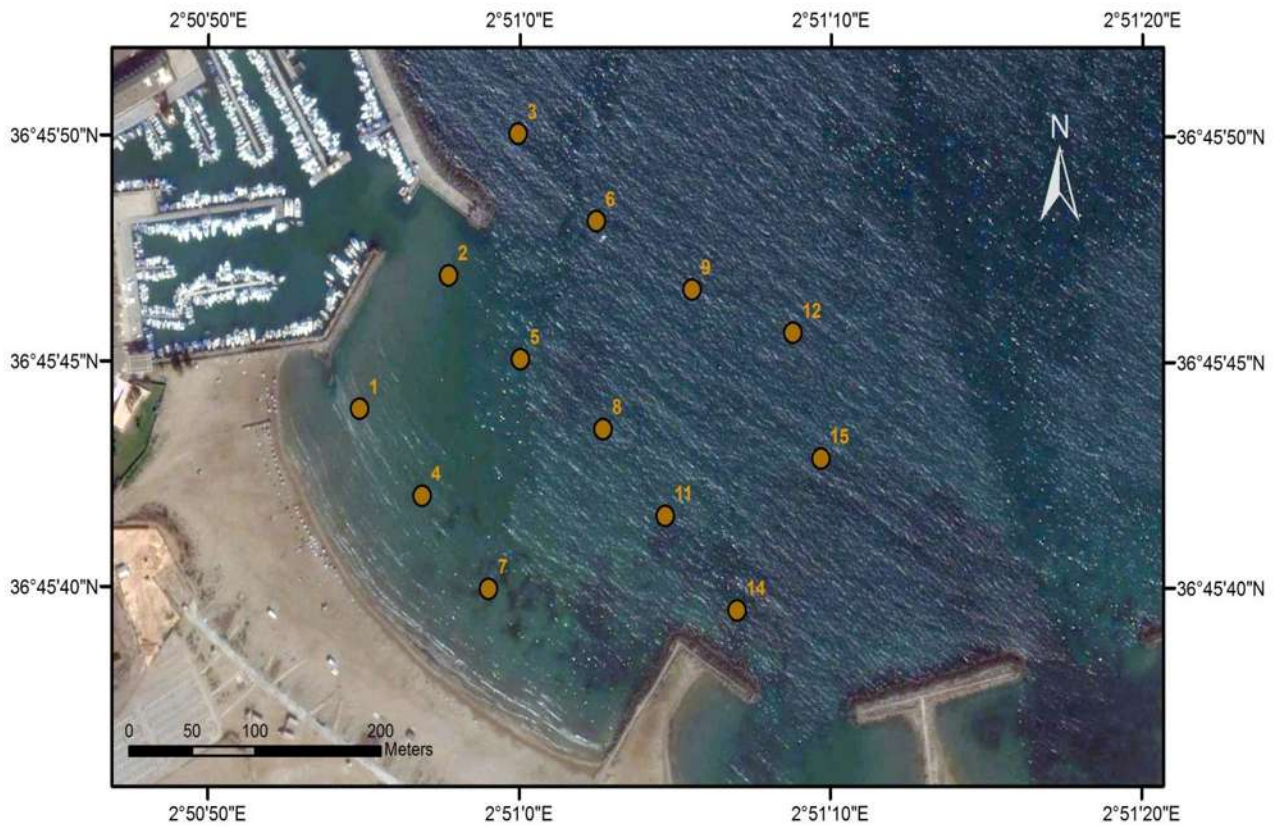


Figure5.3 : Positionnement des points de prélèvement dans la partie sous-marine de Sidi Fredj.

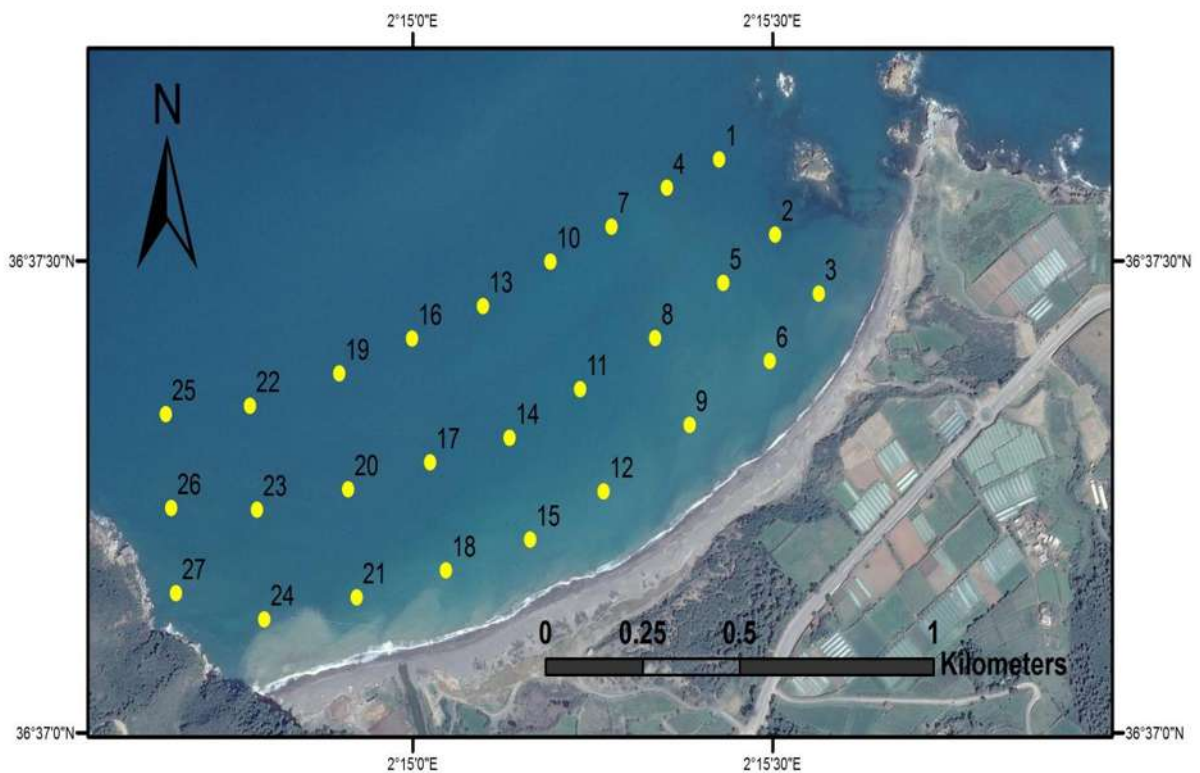


Figure5.4 : Positionnement des points de prélèvement dans la partie sous-marine de la plage de Hamdania.

2. Analyse au laboratoire

L'analyse granulométrique consiste à évaluer le pourcentage de la masse totale qui correspond à chaque dimension selon la méthode classique (**Riviere. A ,1977**).

La granulométrie consiste aussi en l'analyse de la distribution statistique des classes de tailles d'une collection de grains (**Ehrhold, 1994**).

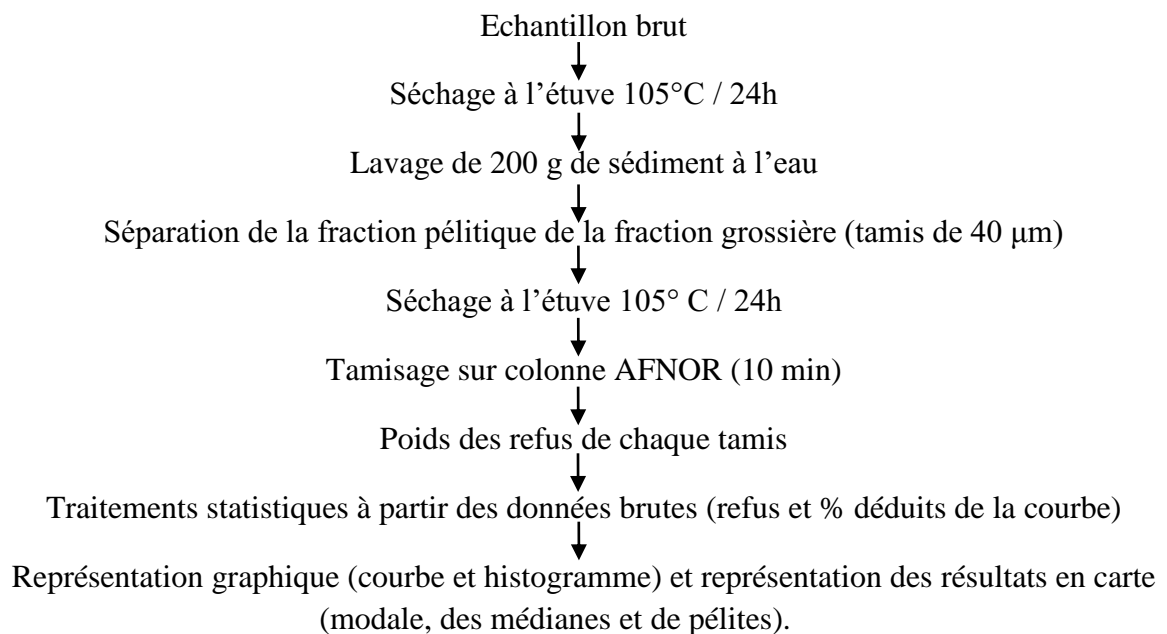
Le tamisage consiste à mesurer le poids de sédiment retenu par les toiles de mailles de tamis calibrés. Chaque tamis est superposé par taille de maille décroissante selon une progression mathématique. Le poids de sédiment retenu (refus de tamis) peut alors être connu. On utilise une tamiseuse qui va faire vibrer l'ensemble de la colonne pendant un temps précis. Il est possible de réaliser cette opération à sec lorsque les grains sont relativement grossiers (à partir des silts) (**Ehrhold, 1994**).

Chaque échantillon est mis dans le fond d'une boîte de pétri, et placé dans une étuve à 105°C pendant 24h. Une fois séchés, les échantillons sont passés sous un courant d'eau dans un tamis de 50µm de diamètre afin de soustraire les fractions fines. Les échantillons sont remis à l'étuve pendant 24h à 105°C. Une quantité de 200g de sédiment pour chaque station est tamisée par une tamiseuse de type AFNOR dont le diamètre des mailles en microns des tamis est dans l'ordre décroissant : 4000-3150-2500-2000-1600-1250-1000-800-630-500-400-315-250-200-160-125-100-80-63-50-40. (**Otmani, 2014**).

Les pourcentages des refus cumulés, ou ceux des tamisages cumulés, sont représentés sous la forme d'une courbe granulométrie en portant les ouvertures des tamis en abscisse, sur une échelle logarithmique, et les pourcentages en ordonnée, sur une échelle arithmétique. La courbe est tracée de manière continue et ne peut pas passer rigoureusement par tous les points. (**AHFIR., MEZIANE, 2016**).

Le matériel utilisé lors de l'analyse au laboratoire est : une étuve, une série de tamis, une tamiseuse et une balance de précision.

a. Méthode d'analyse



b. Classes de taille

Tableau 5.1: Définitions granulométriques pour les graviers, galets et blocs (Ehrhold, 1994).

| Classe | Taille (mm) |
|-----------------------|-------------|
| Sable très fin | 0.063_0.125 |
| Sable fin | 0.125_0.25 |
| Sable moyen | 0.25_0.5 |
| Sable grossier | 0.5_1 |
| Sable très grossier | 1_2 |
| Gravier très fin | 2_4 |
| Gravier fin | 4_8 |
| Gravier moyen | 8_16 |
| Gravier grossier | 16_32 |
| Gravier très grossier | 32_64 |
| Petit galet | 64_90 |
| Galet moyen | 90_128 |
| Gros galet | 128_180 |
| Très gros galet | 180_256 |
| Petit bloc | 256_512 |
| Bloc moyen | 512_1024 |
| Gros bloc | 1024_2048 |
| Très gros bloc | 2048_4096 |
| Méga bloc | >4096 |

3. Paramètres granulométriques

a. Les paramètres de position

Les paramètres de position sont extraits à partir des courbes de fréquence cumulative (en ordonnée échelle arithmétique : Le pourcentage des tamis cumulés, en abscisse échelle logarithmique : les diamètres des tamis), permettent de calculer les différents indices. (Otmani, 2014).

- Les quartiles
 - Q25 : diamètre du grain à l'ordonnée 25%, c'est le premier quartile.
 - Q50 (D50) : diamètre du grain à l'ordonnée 50%, c'est la médiane.
 - Q75 : 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.

- Le mode granulométrique

Le mode granulométrique (M_o) correspond à la dimension la plus significative de la distribution granulométrique, c'est-à-dire la dimension la plus représentative des grains d'un sédiment (Sourdat, 2000).

b. Les indices granulométriques

- **Indice central**

C'est de positionner globalement l'échantillon sur l'échelle des dimensions des sédiments. Il traduit la puissance moyenne des paléo écoulements (LOSSON et CORBONNOIS, 2006).

- Folk et Ward : $M_z = (\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84})/3$

Tableau 5.2 : Les valeurs adoptées de M_z

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

• Les indices de dispersion ou de classement

Ils donnent une idée sur l'étalement de la courbe au tour de son grain moyen, et nous renseignent sur le degré de classement du sédiment. (TRASK, 1932)

- Le sorting de Trask : $S_o = (Q_{75}/Q_{25})^{1/2}$
- Folk et Ward : $S_i = [(\Phi_{84}-\Phi_{16})/4] + [(\Phi_{95}-\Phi_5)/6,6]$

Tableau 5.3 : Les valeurs adoptées de S_o pour le classement.

| Les Valeurs de S_o | Le classement |
|----------------------|--------------------|
| $S_o < 1$ | Très bien classé |
| $1 < S_o < 2.5$ | Bien classé |
| $2.5 < S_o < 3$ | Normalement classé |
| $3 < S_o < 4$ | Mal classé |

• Les coefficients d'asymétrie

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. Il est défini par la relation suivante :

- Skewness de Trask : $Sk_i = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)}$

Tableau 5.4 : Les valeurs adoptées de SK pour l'asymétrie.

| Limite de SK | L'asymétrie |
|--------------|---------------------------------------|
| $SK < 1$ | Classement maximum vers les fines |
| $SK = 1$ | La symétrie est parfaite |
| $SK > 1$ | Classement maximum vers les grossiers |

4. Les résultats

a. Analyse de la fraction fine

Les pourcentages en fraction fine ($< 40 \mu\text{m}$) des échantillons des stations de prélèvement nous ont permis de réaliser des cartes de la répartition de pélites.

- L'échantillonnage au niveau des unités émergées

1- Sidi Fredj

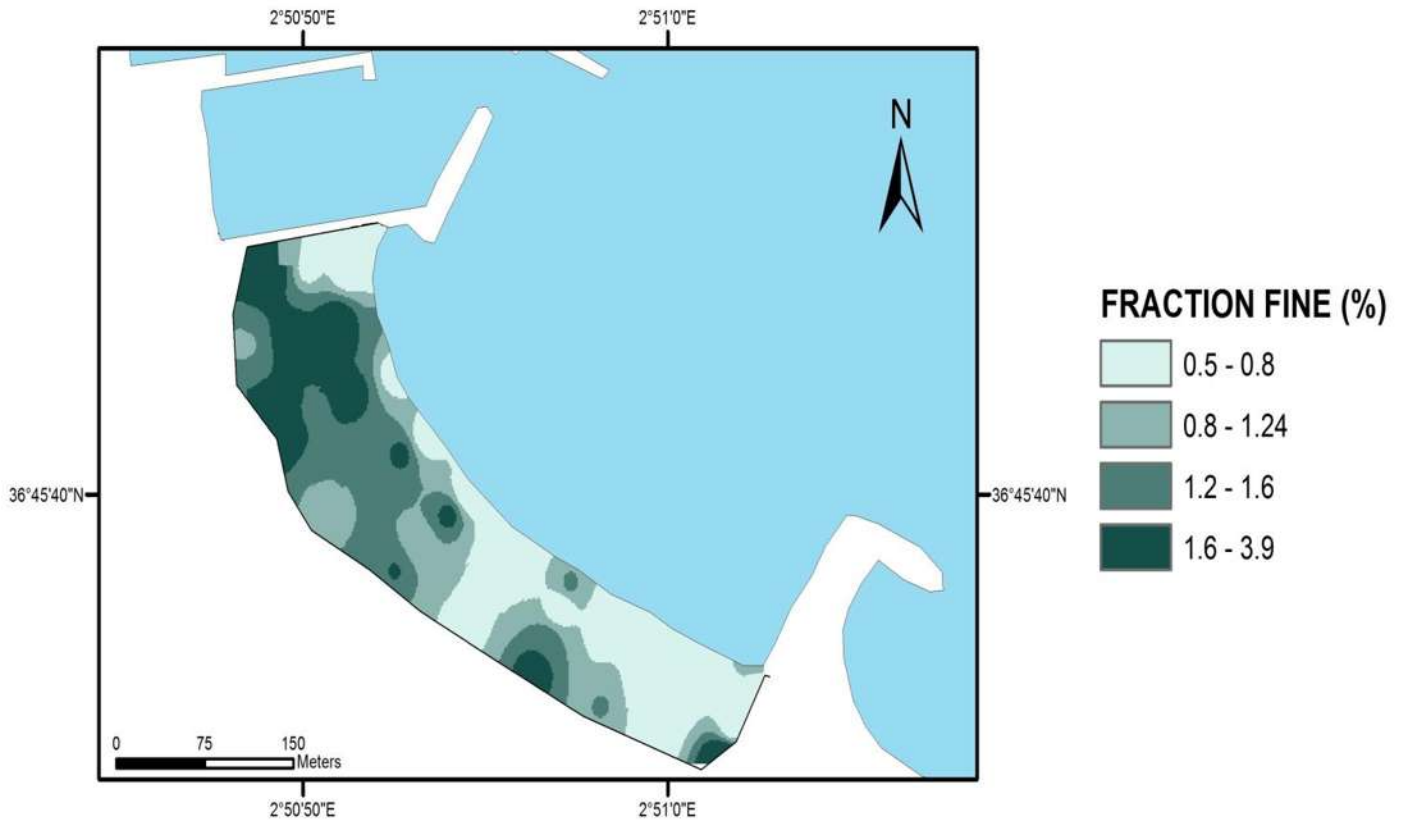


Figure5.5 : Carte de la répartition des pélites dans la partie aérienne de la plage Est de Sidi Fredj.

Commentaire :

La carte de répartition des pélites dans la partie aérienne de la plage Est de Sidi Fredj (**Figure5.5**), montre une répartition spatiale des grains d'un taux faible allant de 0.05% qui augmente d'un degré faible dont l'optimum ne dépasse pas les 3.9% au niveau de la partie supra littoral , tout en avançant vers la ligne de rivage, cette répartition peut être provoquée par une force éolienne qui présente un impact remarquable sur le littoral.

2- Hamdania

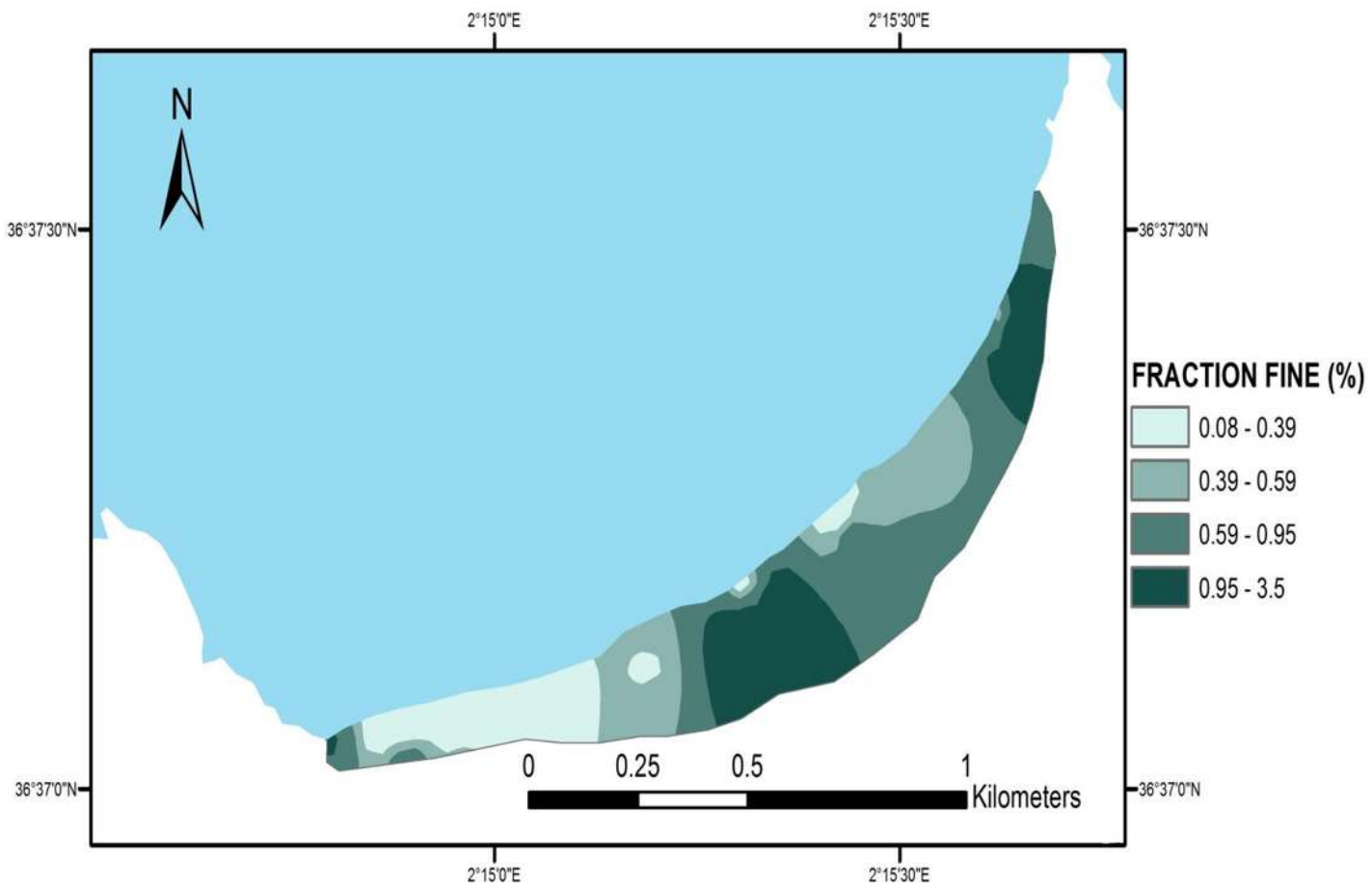


Figure 5.6 : Carte de la répartition des pélites dans la partie aérienne de la plage Hamdania.

Commentaire :

Les résultats obtenus dans la carte de répartition des pélites dans la plage Hamdania (**Figure 5.6**) montre que la teneur en fraction fine varie d'un taux de 0.08% jusqu'à 3.5%, dont les taux les plus élevés sont au niveau de la partie centrale de la plage cela est dû à la présence d'un cordon dunaire observé lors des prélèvements sur terrain, outre, concernant la partie sud-ouest on remarque l'augmentation du taux qui est causé par les apports du Oued qui se trouve dans cette zone.

- **L'échantillonnage au niveau des unités immergées**

1- Sidi Fredj

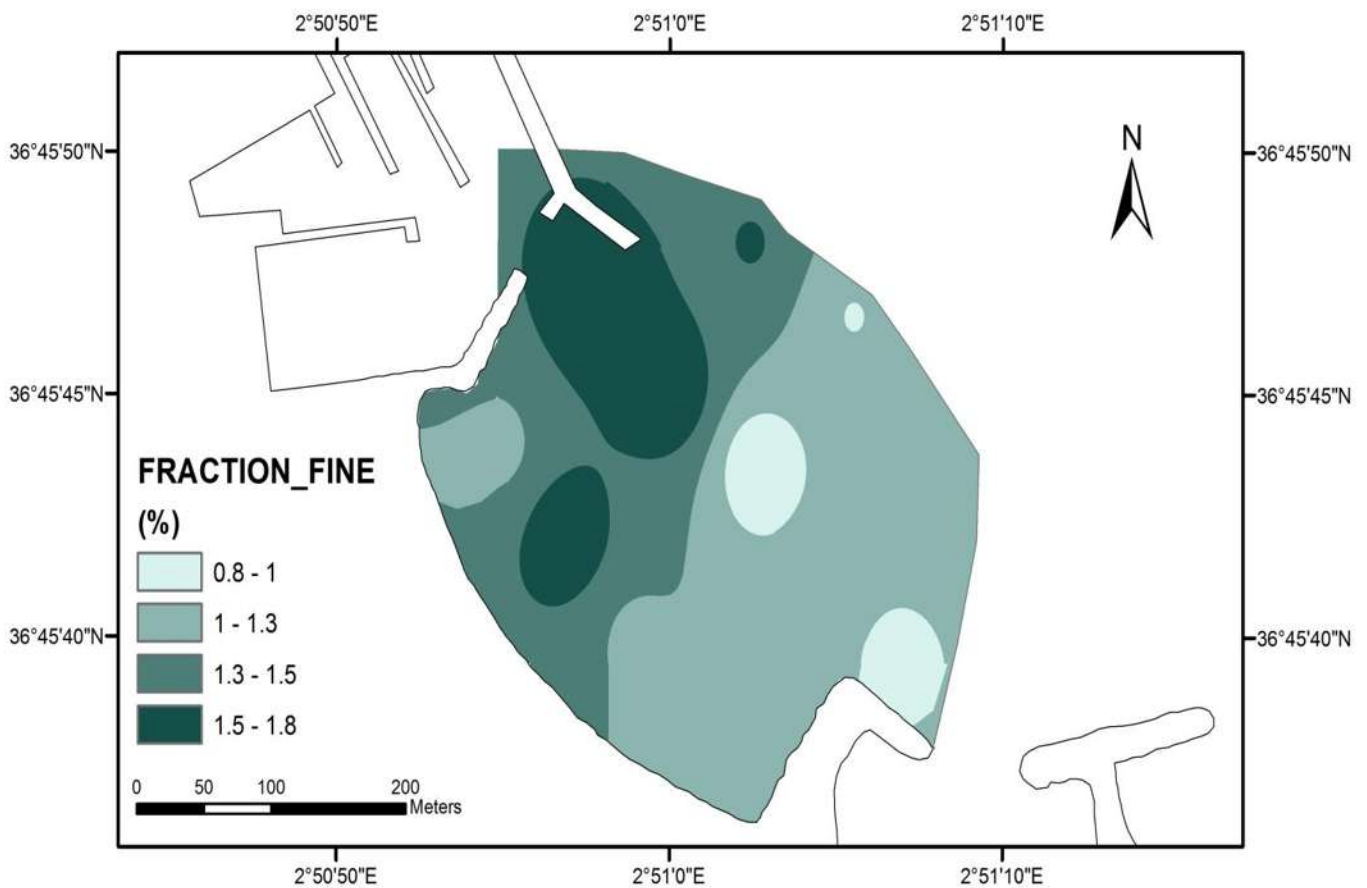


Figure5.7 : Carte de la répartition des pélites dans la partie sous-marine de la plage Est de Sidi Fredj.

Commentaire :

Selon une observation sur la carte (**Figure5.7**), on observe une répartition globale au niveau de la partie sous-marine, avec des teneurs faibles qui sont comprises entre 0.8% et 1.8%, mais on remarque que les plus grandes teneurs se retrouvent dans la partie nord-ouest de notre zone d'étude qui est probablement dû à la présence du port plus exactement du côté de la passe d'entrée du port, par contre les plus faibles teneurs sont enregistrées sur les petits fonds avec un taux qui varie entre 0.8 et 1.3%.

2- Hamdania

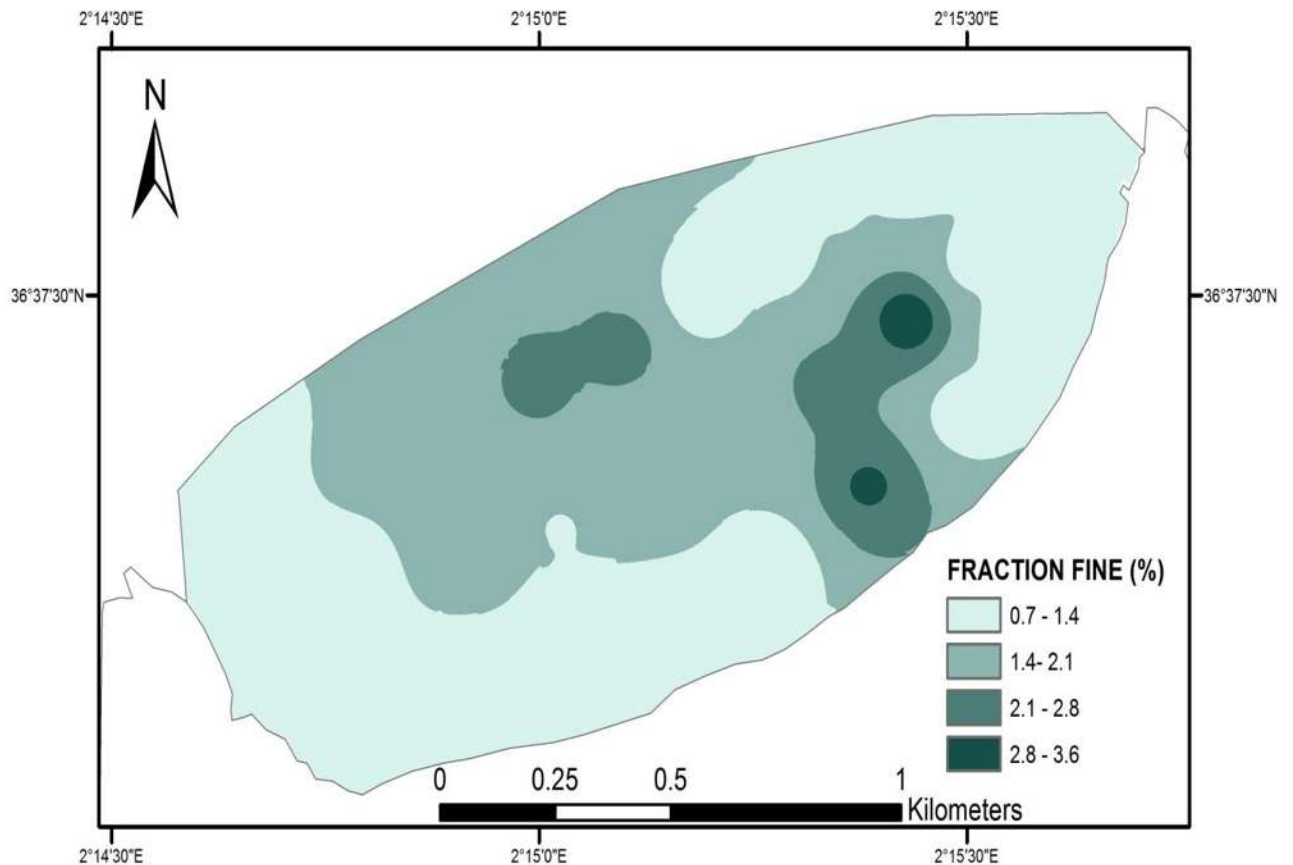


Figure5.8 : Carte de la répartition des pélites dans la partie sous-marine de la plage Hamdania.

Commentaire :

D'après la carte ci-dessus (**Figure5.8**), on remarque une répartition des pélites très peu abondantes avec des taux faibles sur la majorité de notre zone dont les pourcentages varient entre 0.7 et 2.1%, tandis que sur la partie Est près du rivage on observe un stock considérable avec une teneur qui est entre 2.1 et 3.6% qui peut être dû par l'action de la houle brisée qui provoque la décantation de cette fraction fine.

b. Analyse de la fraction grossière

- **L'échantillonnage au niveau des unités émergées**

1- Sidi Fredj

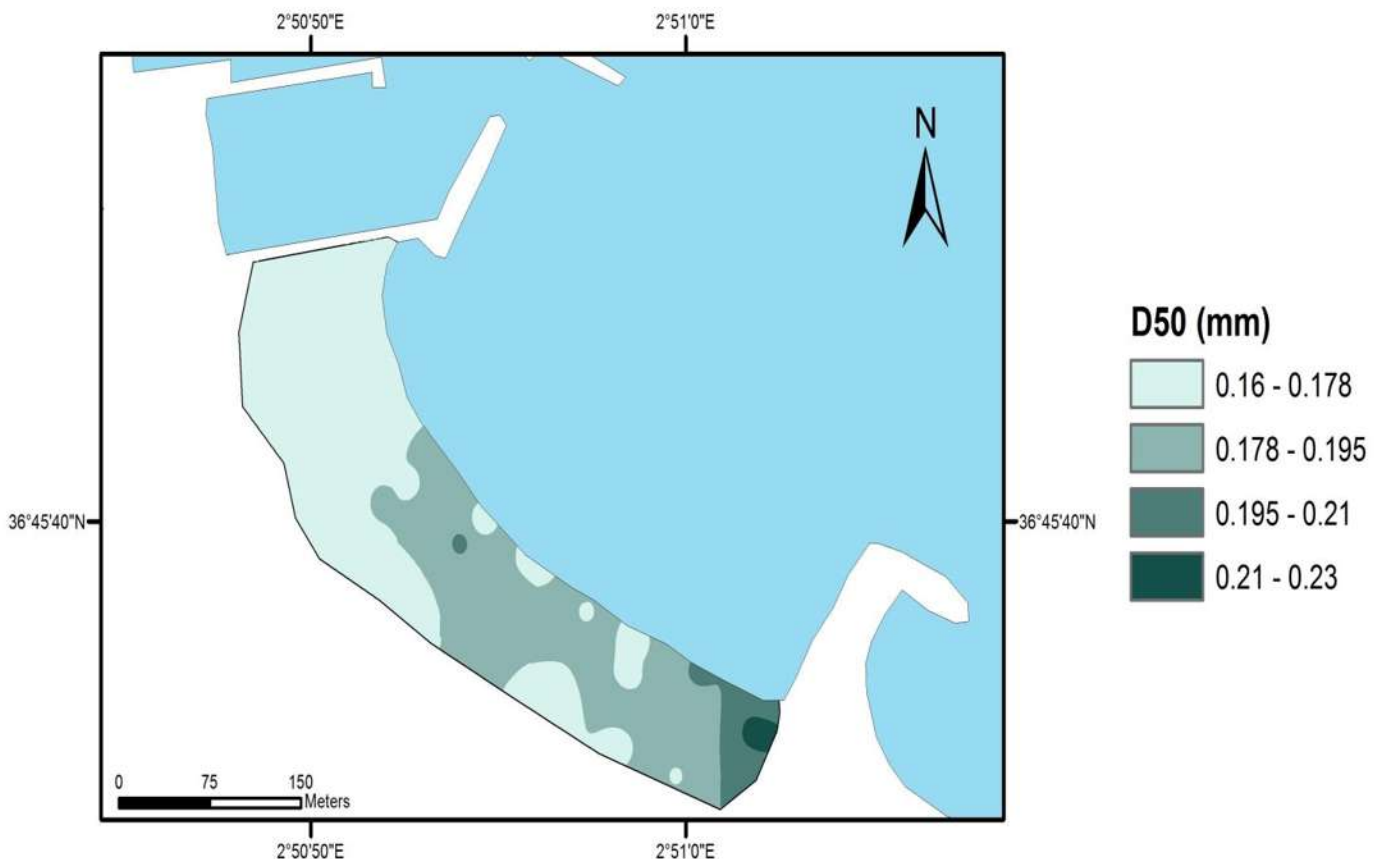


Figure 5.9: Carte de la répartition de la médiane (D50) dans la partie aérienne de la plage Est de Sidi Fredj.

Commentaire :

Selon la Carte de la répartition de la médiane dans la partie aérienne de la plage Est de Sidi Fredj (**Figure 5.9**) on peut dire que les diamètres des médianes se répartissent d'une façon croissante en allant du nord-ouest vers le sud-est avec des diamètres de 0.16 jusqu'à 0.23mm, la partie Est les plus grands diamètres à cause des forces hydrodynamiques existant dans cette zone.

2- Hamdania

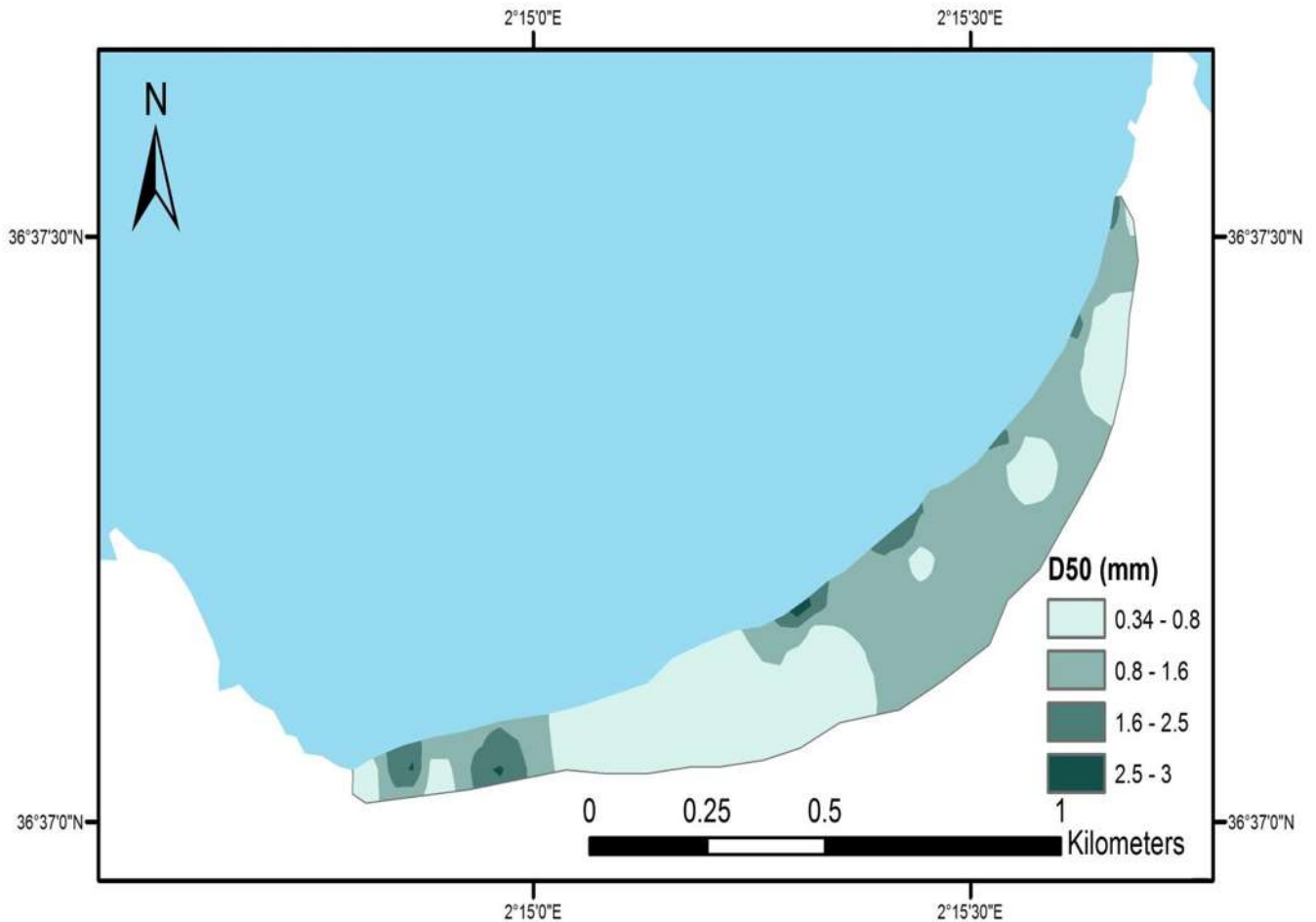


Figure 5.10 : Carte de la répartition de la médiane (D50) dans la partie aérienne de la plage Hamdania.

Commentaire :

Selon cette carte (**Figure 5.10**) on remarque que les diamètres sont réparties d'une façon croissante en couvrant toute la plage, tout en allant de l'Ouest vers l'Est avec des diamètres de 0.34 jusqu'à 3 mm, mais le diamètre qui domine est compris entre 0.34 et 1.6 mm, cette répartition est provoquée probablement par le jet du rive, puis transporté par le vent dans de différentes directions.

- **L'échantillonnage au niveau des unités immergées**

1- Sidi Fredj

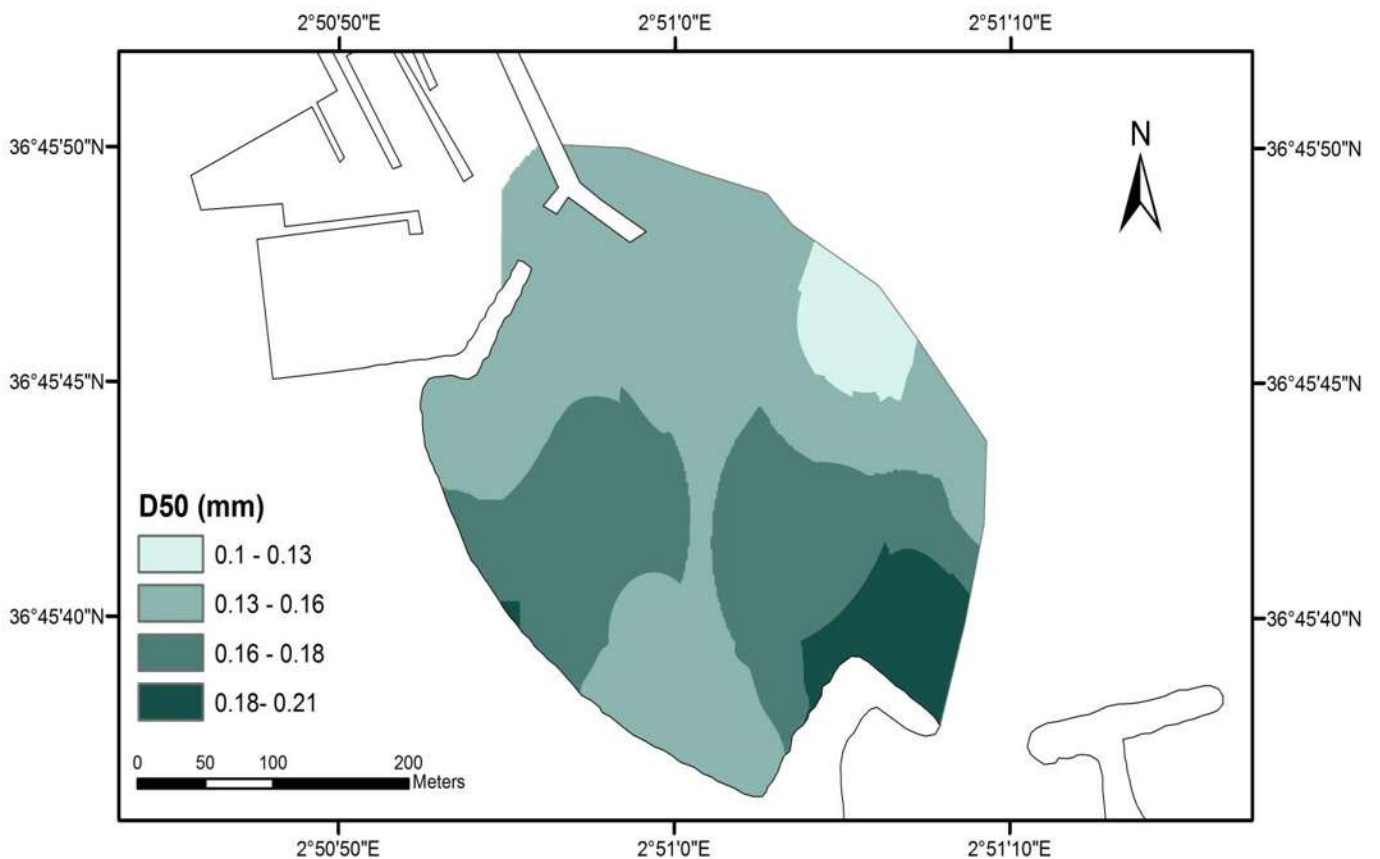


Figure 5.11: Carte de la répartition de la médiane (D50) dans la partie sous-marine de la plage Est de Sidi Fredj.

Commentaire :

La Carte de la répartition de la médiane dans la partie sous-marine de la plage Est de Sidi Fredj (**Figure 5.11**) nous a permis de définir la dynamique sédimentaire, on voit que dans la partie central du petit fond de la plage Est de Sidi Fredj la médiane a des grands diamètres et ça c'est dû à l'action frontale des houles, il y a aussi la partie de l'épi en L dont la fraction grossière a les plus grands diamètres, dû à l'engraissement dans cette partie causé par cet épi qui fait obstacle à ces sédiments. Par contre on voit sur les grands fonds une prédominance des petits diamètres en raison d'un faible hydrodynamisme.

2- Hamdania

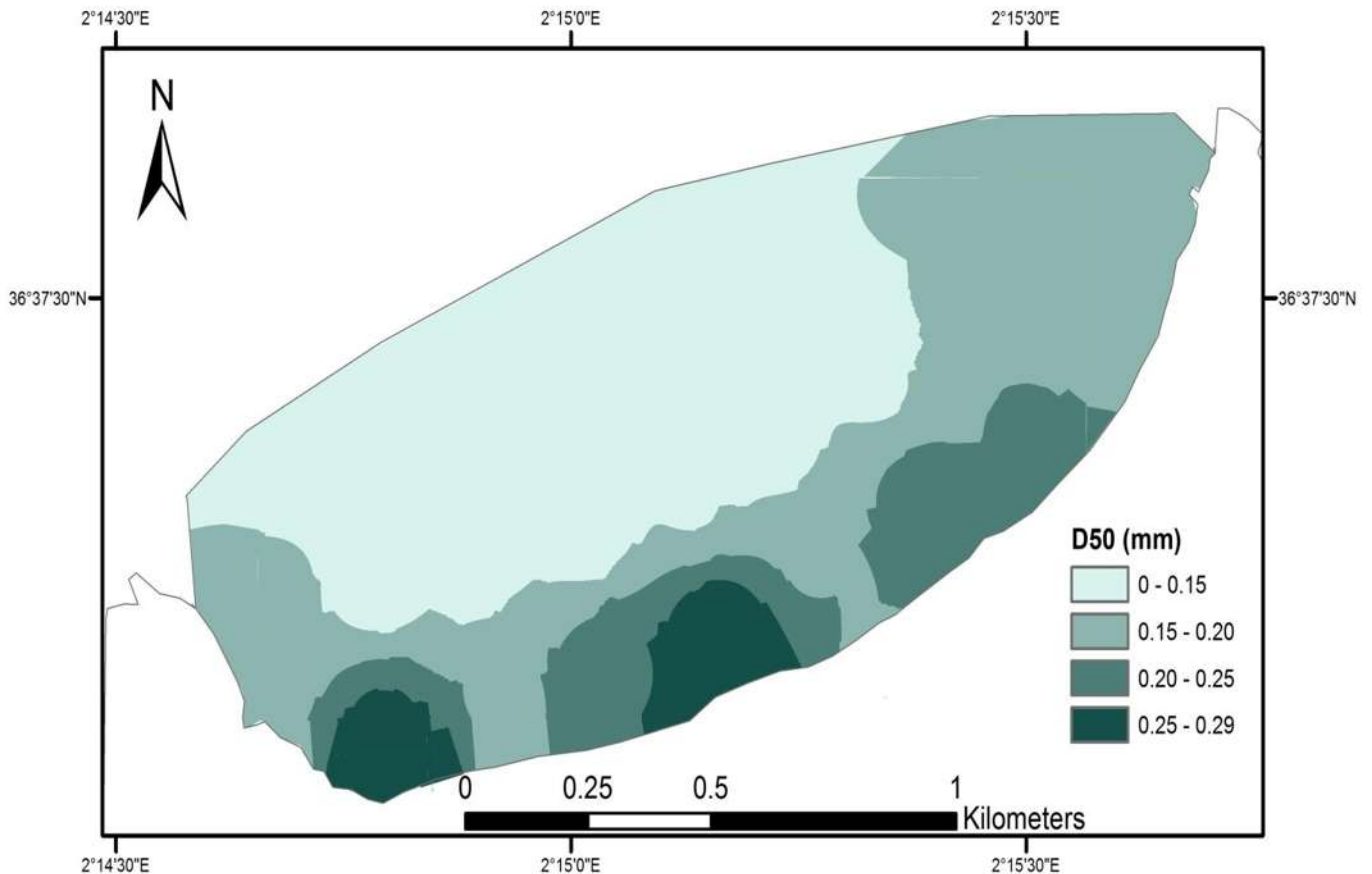


Figure 5.12: Carte de la répartition de la médiane (D50) dans la partie sous-marine de la plage Hamdania.

Commentaire :

La carte représentée (**Figure 5.12**) nous permet d'obtenir le résultat de la répartition de la médiane dans la partie sous-marine de la plage Hamdania, là où il nous apparaît que les diamètres sont d'un ordre décroissant en allant de la ligne du rivage vers le large, en allant d'un diamètre de 0.15mm jusqu'à un maximum de 0.29 mm, dont la fraction grossière avec les plus grand diamètres se retrouvent au niveau des petits fonds, dû à l'action de la houle qui provoque le transport de ces grains et l'Oued Hachem qui participe à son tour dans le transport de ces fractions, par contre sur les grands fonds on remarque une prédominance des petits diamètres en raison d'un faible hydrodynamisme.

5. Modélisation du transport sédimentaire

Pour les trois zones d'étude, la modélisation du transport sédimentaire a été faite en utilisant le module MIKE 21/3 Coupled Model FM, C'est un couplage entre les trois modèles : le modèle hydrodynamique MIKE21-HD, le modèle de réfraction de vague MIKE21-SW et le modèle du transport de sable MIKE21-ST.

Deux méthodes de simulation dans MIKE Bijker et STP utilisent l'équation du transport des sédiments qui est calculée comme suit (DHI, 2014c) :

$$q_{tb} = q_b + q_s$$

Ou :

q_{tb} : le transport total des sédiments.

q_b : le transport par charriage.

q_s : le transport par suspension.

Voici les résultats obtenus pour chaque zone :

a. Boumerdès

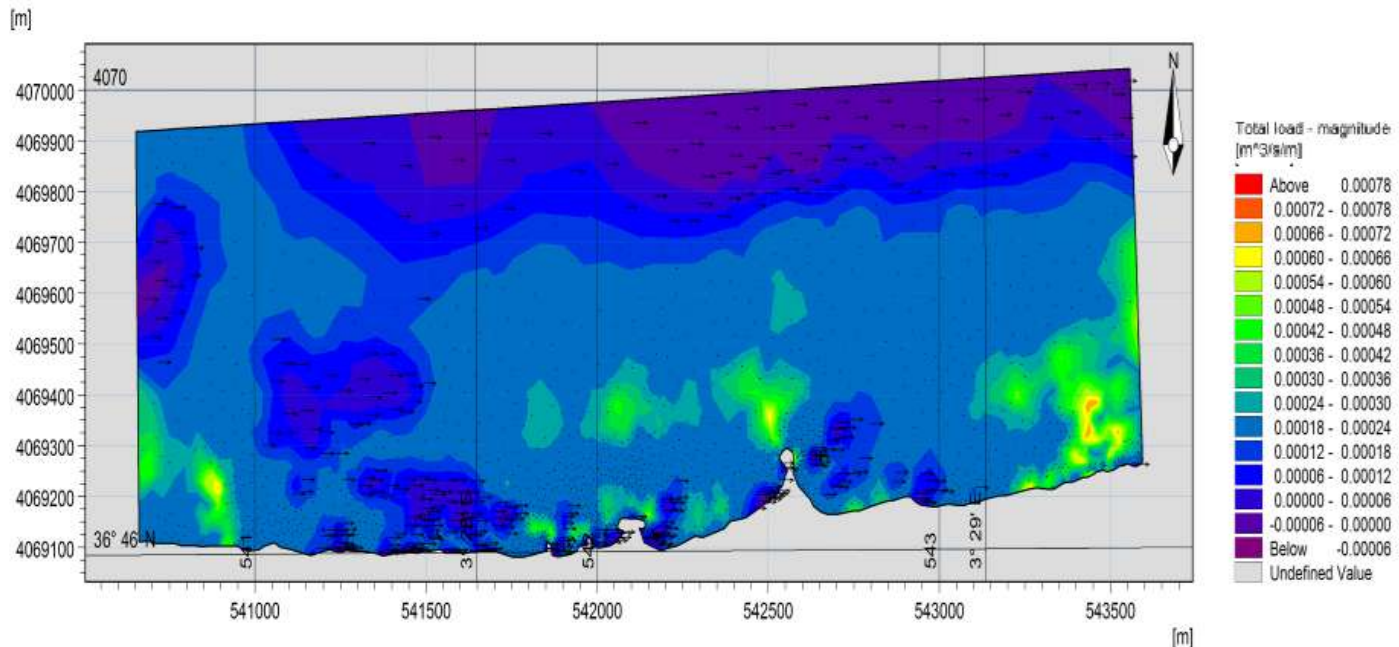


Figure 5.13 : Modélisation du transport sédimentaire dans la zone de Boumerdès (DHI Mike 21- Azzi et Boukert, 2017).

Commentaire :

La carte de la modélisation du transport sédimentaire dans la zone de Boumerdès (**Figure 5.13**) nous renseigne sur la direction du transport sédimentaire, et cette direction est de l'Ouest vers l'Est dans la majeure partie de la zone de Boumerdès, ce qui explique l'accumulation de sable produite en amont de l'épi en T et l'érosion en son aval.

Les forces hydrodynamiques qui existent dans ce site façonnent la plage en engendrant la formation d'une dérive littorale dans la direction Ouest vers l'Est.

Le débit dans les petit fonds de la plage de Boumerdès est de grandeur de 0.0003 à 0.00006 m³/s/m.

b. Sidi Fredj

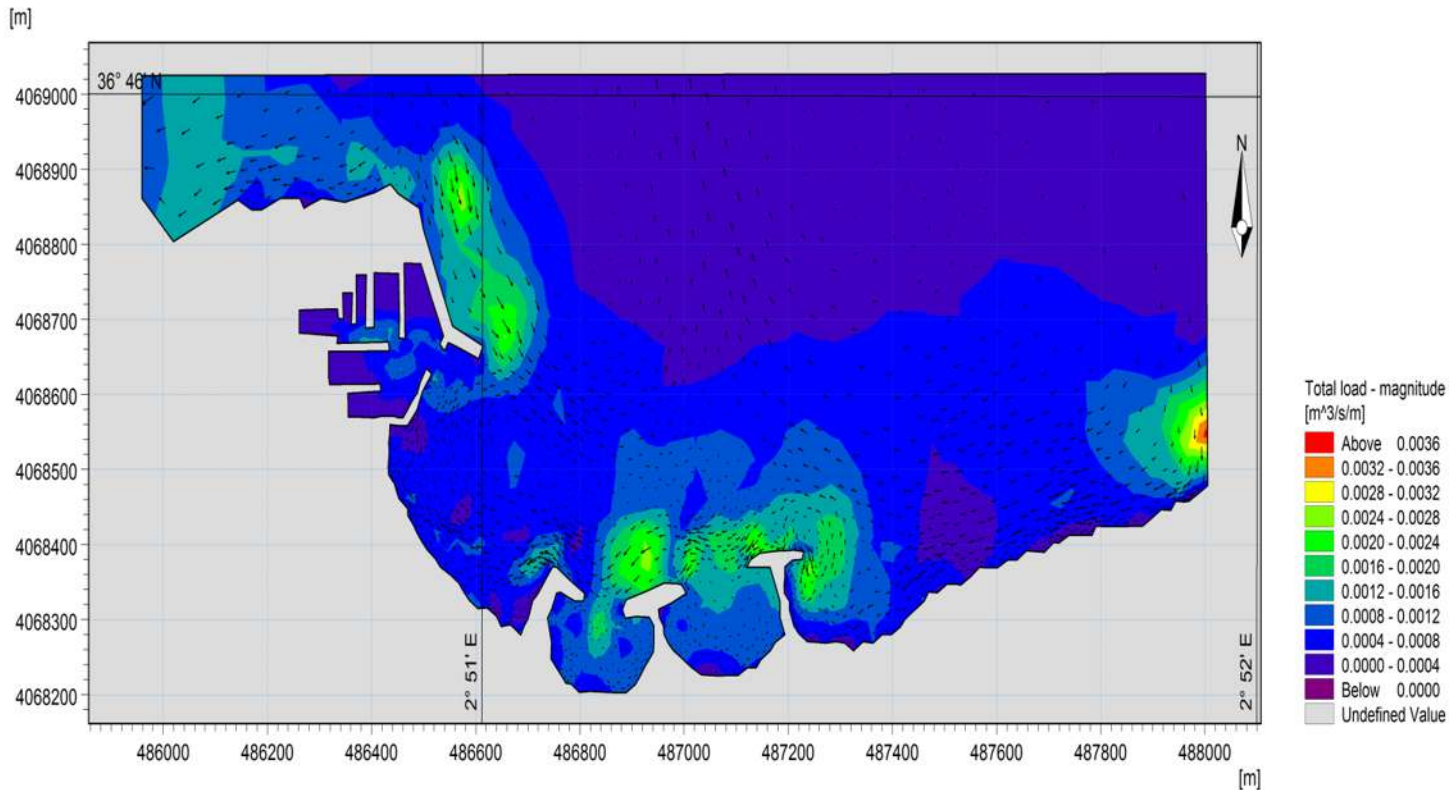


Figure 5.14 : Modélisation du transport sédimentaire dans la zone de Sidi Fredj (DHI Mike 21- Azzi et Boukert, 2017).

Commentaire :

La carte de la modélisation du transport sédimentaire dans la zone de Sidi Fredj (Figure 5.14) illustre le mouvement des sédiments dans cette zone.

On voit que le transport sédimentaire suit la direction des courants représentées dans le chapitre précédent, il y a un fort débit de transport en parallèle à la jetée principale qui dépasse parfois les $0.002 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. On a aussi un transport sédimentaire important dans la partie des trois épis vers la plage Est de Sidi Fredj ce qui explique l'accrétion produite dans la majeure partie de la plage.

On voit aussi que le débit du transport sédimentaire diminue vers le large puisque la profondeur augmente et les courants n'ont pas un impact sur le sédiment de ces profondeurs.

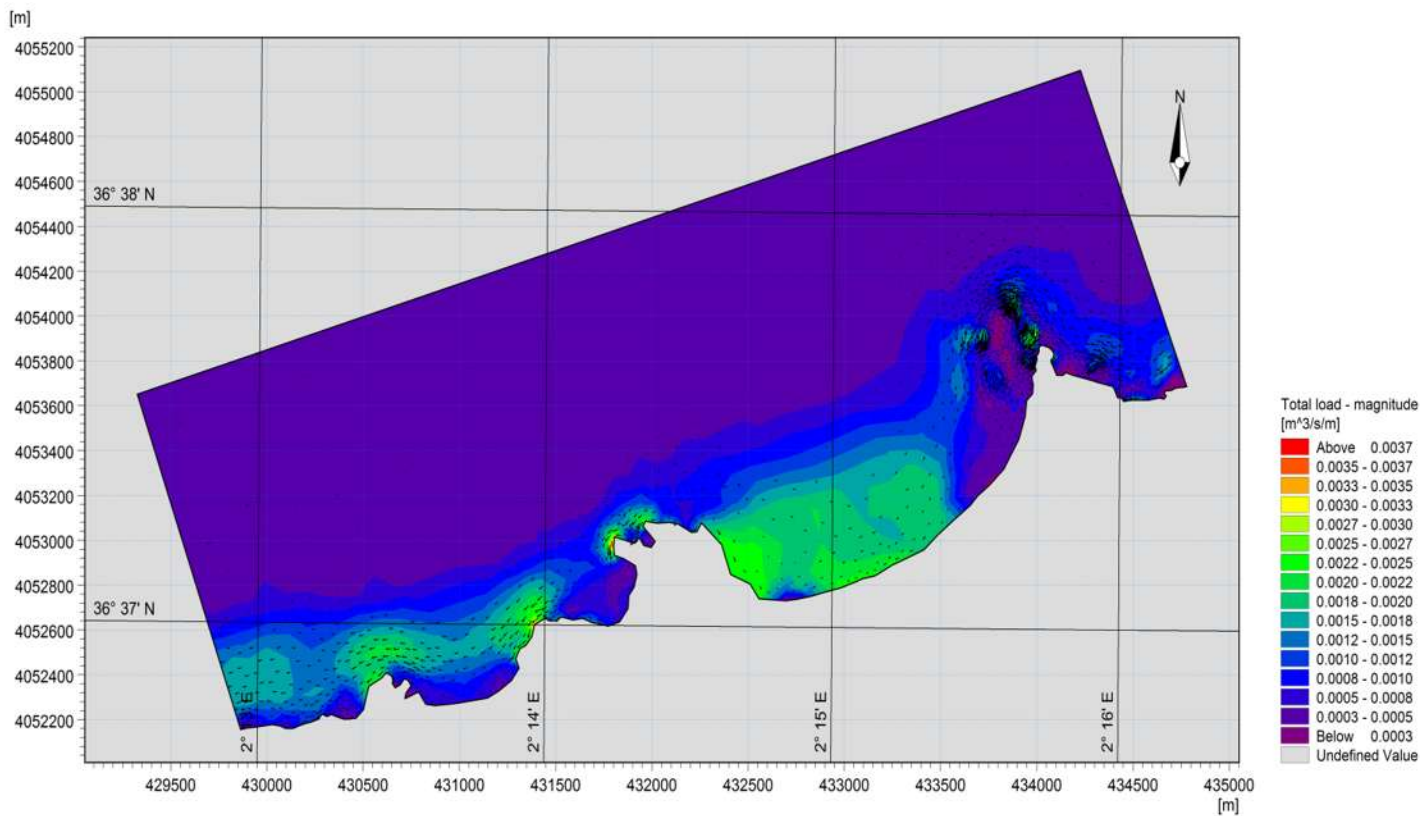
c. Hamdania

Figure 5.15 : Modélisation du transport sédimentaire dans la zone de Hamdania (DHI Mike 21- Azzi et Boukert, 2017).

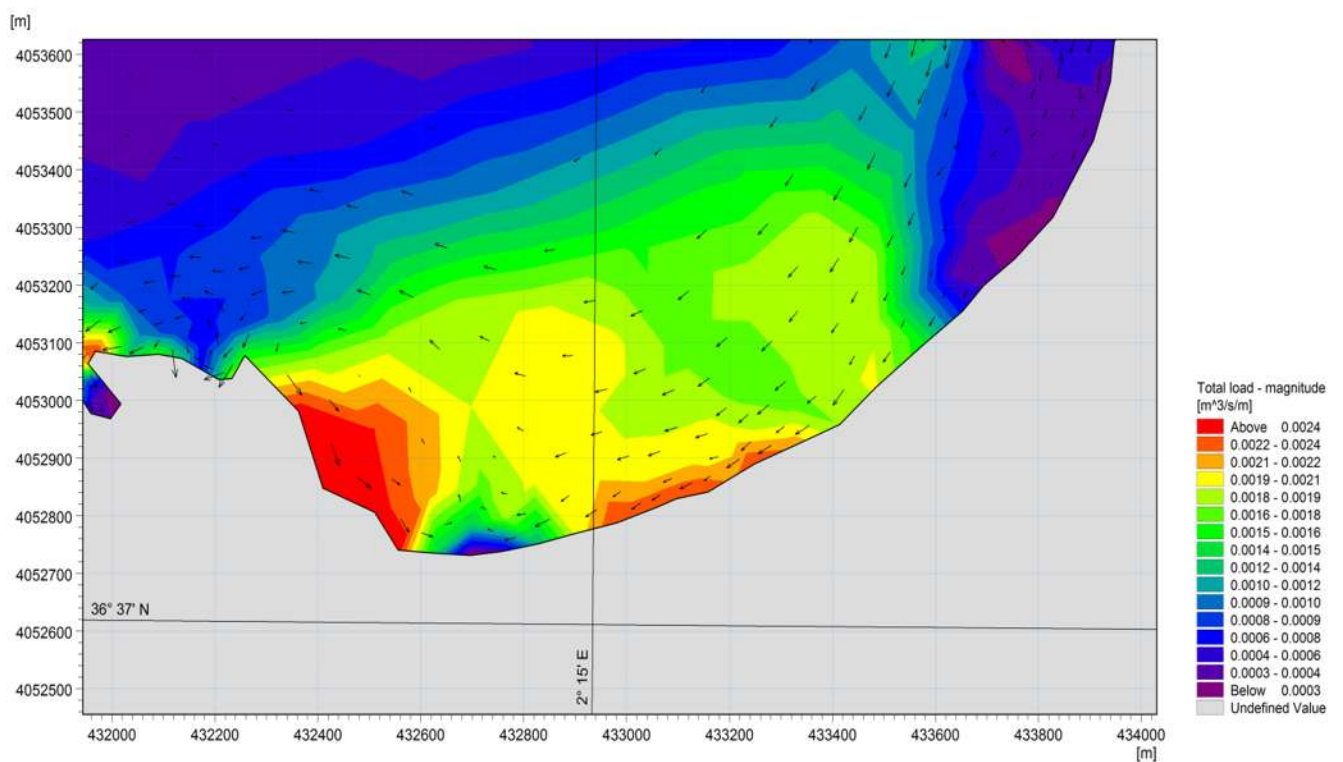


Figure 5.16: Modélisation du transport sédimentaire dans la zone Ouest de la plage Hamdania (DHI Mike 21- Azzi et Boukert, 2017).

Commentaire :

La carte de la modélisation du transport sédimentaire dans la zone de Hamdania (**Figure 5.15**) indique la direction du transport sédimentaire, et cette direction est de l'Est vers l'Ouest dans la majeure partie de cette zone.

On voit que le transport sédimentaire suit la direction des courants représentées dans le chapitre précédent et confirme les résultats de l'évolution du trait de côte dans le chapitre 3.

Dans la partie Ouest de la plage de Hamdania (**Figure 5.15**) on voit que le débit du transport est très élevé, il peut atteindre $0.0024\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ voire plus et ça est dû aux apports terrigènes transportés par les courants de dérive illustrés dans le chapitre 5.

Par contre dans la partie Est, on a un faible transport sédimentaire qui est due aux faibles courants dont la vitesse est diminuée par les îles et l'herbier à posidonie qui existe dans cette zone.

Conclusion

La détermination de l'évolution de la morphologie côtière est un problème très difficile et complexe, en particulier pour la présence de plusieurs facteurs hydrodynamique, climatologiques et les variations de fond.

Notre travail utilise des méthodes de recherche modernes pour analyser les diverses données et pour objectif de comprendre le fonctionnement littoral et les interactions entre ses facteurs.

Les outils des systèmes d'information géographique utilisé, nous ont servi pour la création des bases de données, faire des études statistiques, et ressortir avec des résultats sur l'évolution du trait de côte à court terme

L'application du logiciel DHI-Mike 21 pour évaluer l'impact de ces facteurs, Les résultats de nos calculs ont donné une image complète d'évolution du littoral en concordance avec les observations réalisées sur le terrain, Ils ont montré que la houle joue un rôle primordial dans la dynamique littorale. Il est aussi important de prendre en compte dans les modèles l'impact fort des paramètres du fond tels que sédiment, la nature du fond et les autres facteurs tels que le courant, le surcote, le vent...

Les données dont nous disposions ont démontré que le modèle développé avec MIKE21 donnait des résultats satisfaisants de ce point de vue et donc pouvait servir de base au test de solutions par la voie numérique. L'intégration d'un certain nombre de modules donne en effet des résultats raisonnables, compatibles avec le phénomène réel et les mesures réelles. Ainsi, nous pouvons utiliser le modèle pour calculer l'évolution du littoral, l'avenir et prévoir l'impact des solutions de protection sur l'évolution du littoral. Il devient ainsi plus simple d'envisager différents scénarios d'intervention.

Les résultats de ce mémoire s'arrêtent juste au niveau de la recherche, de l'analyse de l'évolution du littoral et de l'impact sur le littoral, mais nous n'avons pas prié en considération le rôle d'autres facteurs tel que la posidonie, le franchissement sur les ouvrages de protection, l'impact socio-économique.

La solution d'ingénierie qui serait retenue devrait intégrer des analyses plus fines pour le modèle avant de l'appliquer pour tenter de stabiliser le littoral, les enjeux étant importants

- ADJAL, M. (2014).** *Modélisation physique de la dynamique hydro-sédimentaire de la plage Ouest de BOUMERDES.* Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Algérie : ENSSMAL, 76 p.
- AHFIR, Y. et MEZIANE, I. (2016).** *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.* Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Algérie : ENSSMAL, 165 p.
- BEER, T. (1997).** *Environmental oceanography.* London: CRC press, 367 p.
- BIRD, E.C.F. (1985).** *Coastal changes, a global review.* London: Wiley. Chichester, 1985, 219 p.
- BONNEFOY, F. (2005).** *Modélisation expérimentale et numérique des états de mer complexes.* Thèse de doctorat. Dynamique des fluides et des transferts. France : Université de Nantes, 278 p.
- BOUKHENNAF, A. et HALAILI, Y. (2010).** *Apport de la télédétection pour la détermination de la bathymétrie du port et la plage de sidi Fredj.* Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Algérie : ENSSMAL, 89 p.
- BOUNAB, B. et CHAMBI, M. (2016).** *Processus morpho-sédimentaire et évolution multi-échelle de la plage Front de mer de la ville de Boumerdès.* Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Algérie : ENSSMAL, 114 p.
- BRIERE, C. (2003).** *Etude de l'hydrodynamique d'une zone côtière anthropisée : l'embouchure de l'Adour et les plages adjacentes d'Anglet.* Thèse de doctorat. Génie Civil, Hydraulique maritime et Transport sédimentaire. France : l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, pp. 180-192.
- BRUNEAU, N. (2009).** *Modélisation morphodynamique des plages sableuses.* Thèse de doctorat. Physique de l'environnement. France: Université de Bordeaux I, pp. 5-9.
- BUJAN, N. (2009).** *Application d'un modèle de circulation quasi-tridimensionnel littoral à la dynamique des plages du Languedoc-Roussillon.* Thèse de doctorat. Sciences de la Terre et de l'Univers. France : université Montpellier II, 250 p.
- Canadian Contribution to the Oceans and Seas Dialogue.** Monographie no. 7, *Septième séance de la Commission des Nations Unies sur le développement durable (CDD), New York, 20 p.*
- CIEUTAT, J-M. (2003).** *Modélisation physiquement réaliste de session de simulation d'entraînement maritime.* Thèse de doctorat. Informatique. France: L'Université de Bordeaux I, 136 p.

- COWELL, P-J et THOM, B-G. (1994).** Morphodynamics of coastal evolution. *In: R.G.W Carter & Woodroffe, C.D. Coastal Evolution: Late Quaternary shoreline morphodynamic. Cambridge: University Press, pp. 33-86.*
- DE VRIEND, H.J. (1991).** Large-scale coastal evolution concept. New York: ASCE, *Proceedings of the 22th Coastal Engineering Conference, pp. 1962-1974.*
- DEGRYSE-KULKARNI, C. (2003).** Morphodynamique de la zone de swash. *Science de la terre et de l'univers. France : université de Caen, 183 p.*
- DEHOUC, A. (2006).** *Morphodynamique des plages sableuses de la mer d'Iroise Finistère.* Thèse de doctorat. Géologie marine. France : Université de Bretagne occidentale, pp 5-9 .
- DESMAZES, F. (2005).** *Caractérisation des barres sableuses d'une plage de la côte Aquitaine : exemple de la plage du truc vert.* Thèse de doctorat. Géologie marine. France : Université de Bordeaux1, pp 12-15.
- DHI (2014) f. MIKE 21 Spectral Wave Module Scientific Documentation. Denmark: Hørsholm, 385 p.**
- DHI (2014) j. MIKE ZERO: Creating 2D Bathymetries. Bathymetry Editor & Mesh Generator. Denmark: Hørsholm, 114 p.**
- EID et SMNLR. (2005).** Guide technique n°9. Connaissance et gestion de l'érosion du littoral. *Secrétariat technique du SDAGE Bassin Rhône-Méditerranée-Corse (RMC). Mars (2005), 54 p.*
- Environnement Canada. (1999).** *Canada's Oceans : Experience and Practice, 3p.*
- Fenster et al. (1993).** A new method for predicting shoreline positions from historical data. *Journal of Coastal Research, Vol. 9, pp. 147-171.*
- FERRER, P. (2010).** *Morphodynamique à multi-échelles du trait de côte prisme sableux du golfe du Lion depuis le dernier optimum climatique.* Thèse de doctorat. Océanologie-Géologie. France : L'Université de Perpignan Via Domitia, 255 p.
- GRASSO, F. (2009).** *Modélisation physique de la dynamique hydro-sédimentaire des plages.* Thèse de doctorat. Océans, Atmosphère, Hydrologie. France: l'Université JOSEPHFOURIER- Grenoble1, 253 p.
- HAMMOUD, N. (2014).** Analyse statistique de l'évolution morphodynamique des plages plage de BOUMERDES Ouest. *Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Algérie : ENSSMAL, 83 p.*
- HÉQUETTE, A. (2001).** *Courants et transports sédimentaires dans la zone littorale : le rôle des courants orbitaux et de downwelling / Currents and sediment transport in the coastal zone: the role of orbital and downwelling currents. Géomorphologie : relief, processus, environnement, vol.7, n° 4, pp 5-7.*

- KAMALINEZHAD, M. (2004).** Plage en équilibre morphologique et hydrodynamique associée. Thèse de doctorat. Océan, atmosphère, hydrologie. France : Institut National Polytechnique de Grenoble, 181 p.
- KHALDI, N. (2015).** *Modélisation de l'hydrodynamique sédimentaire soumise à l'action de la houle et des courants, application à la cote de sidi Fredj.* Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Algérie : ENSSMAL, pp. 145-169.
- Khan, M.S. (2002).** *Scaling Relations from Scale Model Experiments on Equilibrium Accretionary Beach Profiles.* Thèse de doctorat. USA : Drexel University, 176 p.
- KROON, A. (1994).** *Sediment transport and morphodynamics of the beach and nearshore zone, near Egmond, The Netherlands.* Thèse de Doctorat, Netherlands : Université d'Utrecht, 275 p.
- LE, M-H. (2008).** *Caractérisation physique et mécanique des sols marins d'offshore profond.* Thèse de doctorat. Géotechnique. France : Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 252 p.
- LOMBARD, A. (2005).** Les variations actuelles du niveau de la mer : *Observations et causes.* Thèse de doctorat. *Océanographie Spatiale.* France : l'université de Toulouse III, 156 p.
- MARC, V. (2008) :** *Modélisation numérique des conditions hydro sédimentologique,* thèse de doctorat. France : Université claudes bernard - Lyon 1, 269 p.
- MEEDDM, A (2010).** La Gestion du Trait de Côte. *France : Quae pp. 180.*
- MESSAOUD KHELIFI, A. (2014).** *Etude de protection de la plage est de BOUMERDES.* Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Algérie : ENSSMAL, 50 p.
- MESSAOUDI, S. (2002).** *Evolution du trait de côte dans la plage Est Sidi Fredj.* Mémoire de DEUA. Aménagement du littoral. Algérie : ISMAL, 31 p.
- MEZOUAR, K. (2009).** *Etude comparative entre les méthodes de protection des deux littoraux algérien et roumain.* Thèse de doctorat. Géotechnique et fondation. Roumanie : Université Technique de Construction de Bucarest, 404 p.
- MORELLATO, D. (2008).** Dynamique des plages sableuses soumises à l'action des vagues, de la marée et des rechargements artificiels. *Thèse de doctorat. Océanographie Physique.* France : l'Université de Brest, 280 p.
- NADIA, S. (2003).** Etude de la propagation des vagues au-dessus d'une bathymétrie complexe en zone de surf. *Thèse de doctorat. Océanographie, Paléo-océanographie.* France : l'Université Bordeaux I, pp. 90-106.
- NADIR, M. (2016).** *Modélisation numérique de la morphodynamique d'une cote sableuse soumise à l'effet des vagues et des houles cas : Plage Est de sidi Fredj.* Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Algérie : ENSSMAL, 140 p.

OULD ELMOUSTAPHA, A. (2000). *Influence d'un ouvrage portuaire sur l'équilibre d'un littoral soumis à un fort transit sédimentaire.* Thèse de doctorat. Terre solide et enveloppes superficielle. France : université de Caen, 163 p.

PARENTHÖEN, M. (2004). *Animation Phénoménologique de la Mer.* Thèse de doctorat. Informatique. France : L'université de Bretagne Occidentale, 266 p.

Paskoff, R., Clus-Auby, C.(2007) . L'érosion des plages : les causes, les remèdes. Paris : Armand. 187 p.

PASKOFF, R. et CLUS-AUBY, C. (2007). L'érosion des plages les causes, les remèdes. 3^{éd.} Paris : Armand. 244 p.

PASKOFF, R. (1998). Les littoraux : impact des aménagements sur leur évolution. 3^{éd.} Paris ; Armand Colin, 264 p.

Paskoff, R. (1994). Les littoraux. Impact des aménagements sur leur évolution. Paris: Masson, 2^{éd.} 256 p.

PAU, M. (2008). Modelling the dynamics of waves and currents, as well as the generation of sand bars in the nearshore zone. *Mémoire Master. Meteorologie, Oceanographie Physique et Climat. Pays Bas : université d'Utrecht, 126 p.*

RIHOUEY, D. (2004). Analyse statistique de l'évolution morphodynamique des plages sableuses : application aux sites d'étude du programme national d'environnement côtier et aux plages d'Anglet. *Thèse de doctorat. Génie civil-dynamique littorale et sédimentaire. France : l'université de Pau et des pays de l'Adour. pp. 90-106.*

ROUSSEAUX, G. (2003). Etude de l'instabilité d'une interface fluide-granulaire : Application à la morphodynamique des rides de plage. *Physique des Liquides. France : l'Université Paris 6. 219 p.*

Shaw, J. et Taylor, R.B. et al. (1998a). Sensitivity of the coasts of Canada to sea-level rise. *Rapport no. 0-660-17569-X, Geological Survey of Canada, Ottawa, 79 p.*

STEPANIAN, A. (2002). *Evolution morphodynamique d'une plage macrotidale à barres: Omaha Beach Normandie.* Thèse de doctorat. Science de la terre et de l'univers. France: Université de Caen / Basse Normandie, 217 p.

THAN V. (2015). *Modélisation d'érosion côtière : application à la partie ouest du tombolo de Giens.* France : thèse de doctorat. L'université de Marseille France. 427 p.

WRIGHT, L.D. et SHORT, A.D. (1982). Morphodynamics of surf zones and beaches: *asynthesis. Canada: Marine Geology. Vol. 12, n. 56, pp. 93-118.*

Méthodologie d'utilisation de l'extension DSAS

Enregistrement des images

Dans notre cas le traitement numérique de l'évolution du trait de côte a été abordé engéoréférençant un ensemble d'images satellitaires extraites à partir de Google Earth Pro.

D'abord, sur Google Earth Pro on doit fixer des points dans nos zones d'étude pour définir leurs localisations afin de les utilisées sur ArcGis 10.2 pour faire le géoréférencement (**figure1**). Ensuite on enregistre l'image et après on change la date sur l'historique pour enregistrer des images plus anciennes de dates différentes. Toutes les images doivent avoir la même altitude pour chaque zone, elles sont enregistrées sous format JPEG (leurs noms sont leurs dates dans l'historique). On met toutes les images enregistrée dans le même dossier.

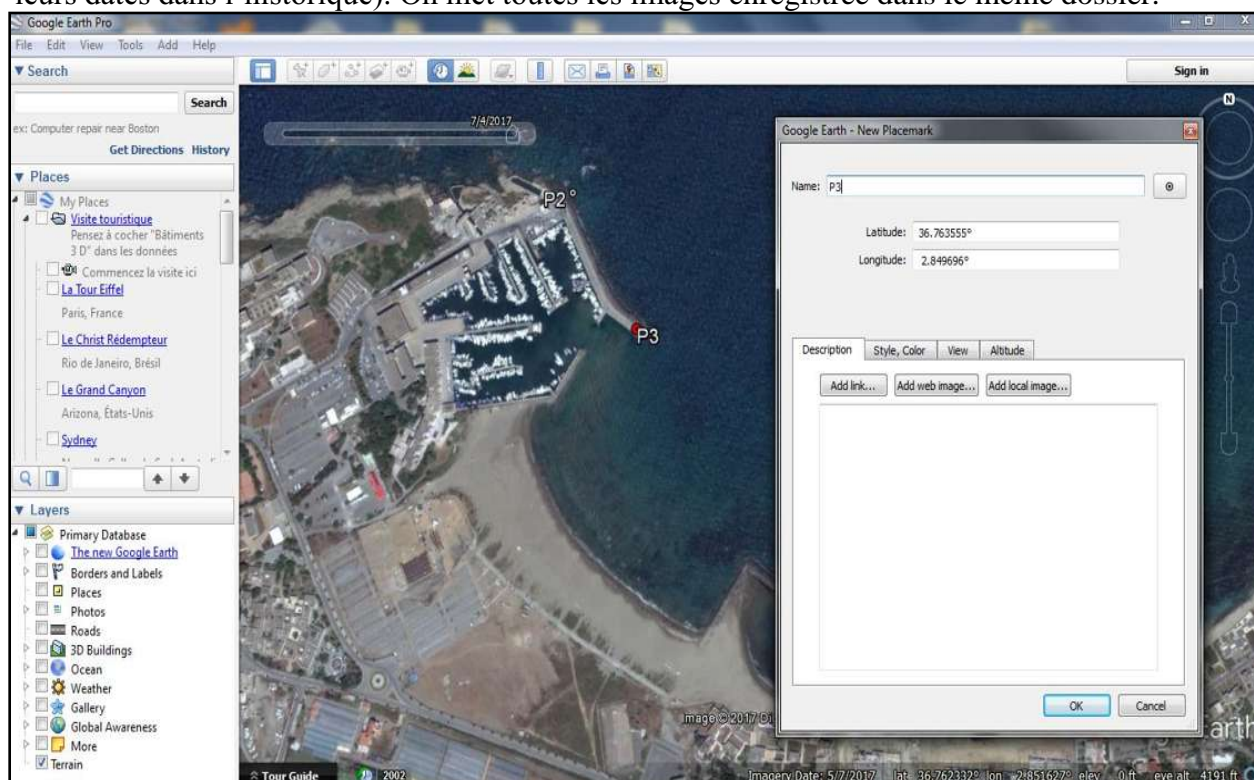


Figure 1 : Fixation des points sur Google Earth Pro.

Ensuite, on ouvre ArcGis, on fait connecter le dossier qui contient les images, et on introduit ces images

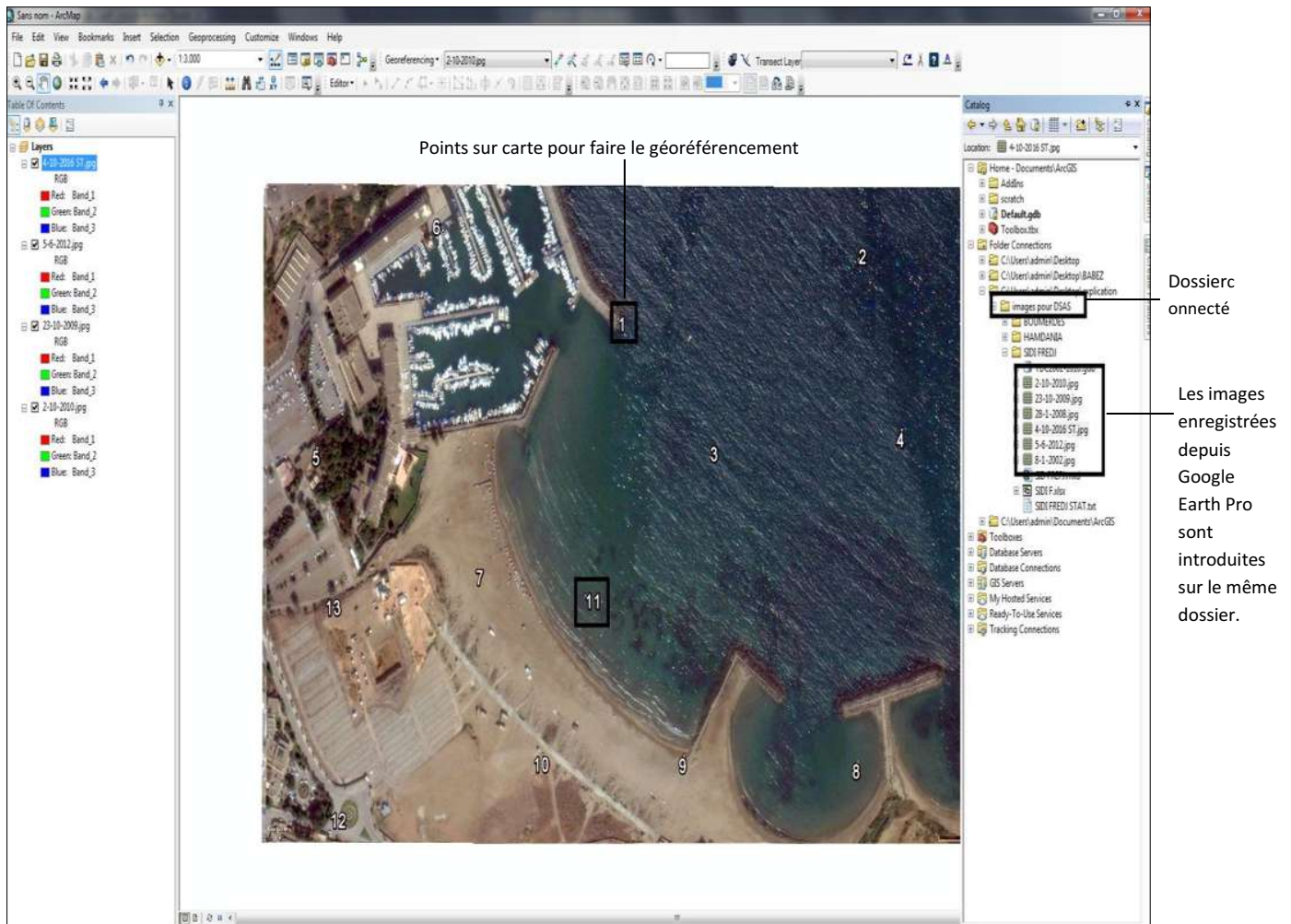


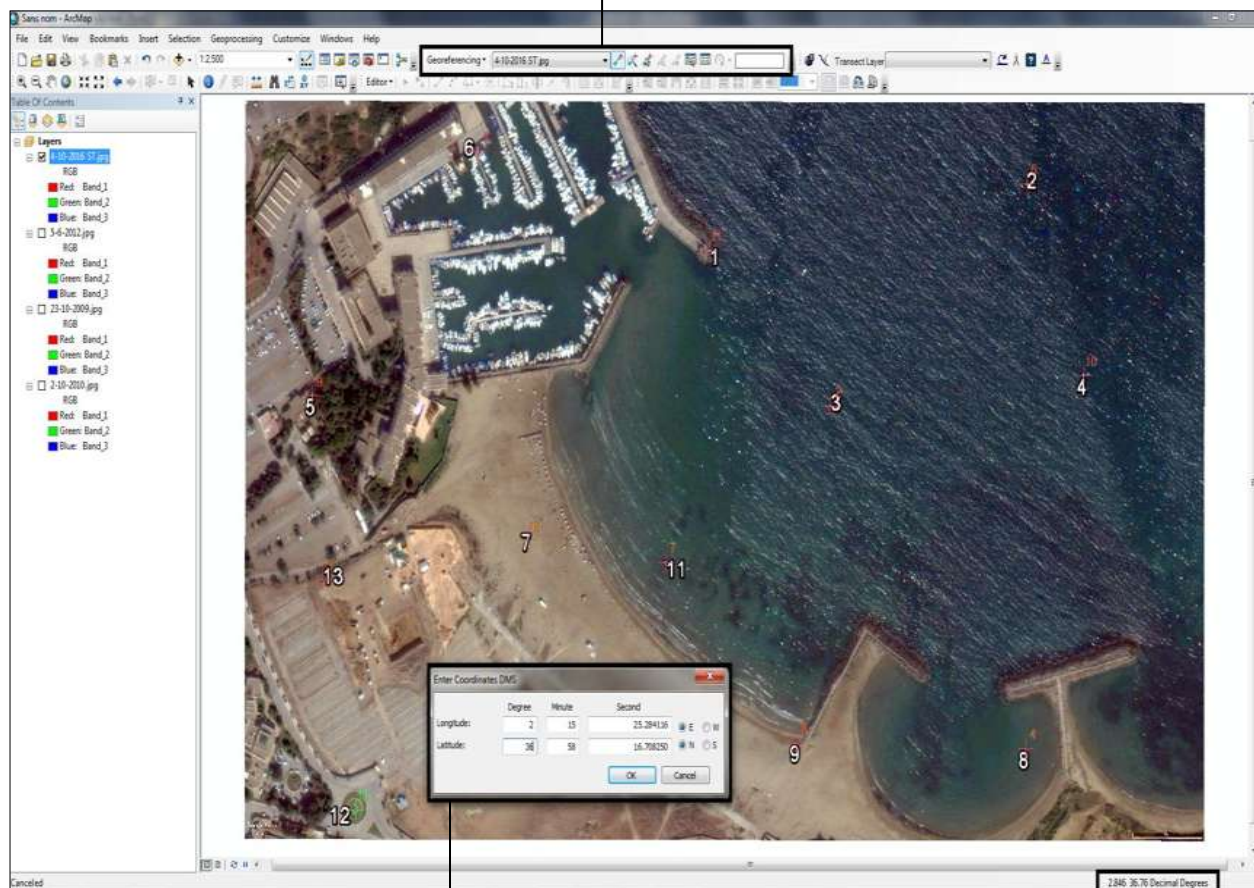
Figure 2: introduction des images enregistrée à l'aide de GoogleEarth Pro sur ArcGis.

Le géoréférencement

Après, on choisi le système des coordonnées géographiques sur *data frame properties*. Dans nos trois cas on a choisi le même système de coordonnées géographiques : WGS_1984.

L'étape qui suit c'est le géoréférencement, on introduit la longitude et la latitude de chaque point qu'on a choisit sur GoogleEarth Pro de chaque image. Quand on fini le géoréférencement on clique sur Update Georeferencing qui se trouve sur la barre d'outils du géoréférencement.

La barre d'outils du Géoréférencement



Introduction de la longitude et la latitude de
chaque point choisi sur Google Earth Pro.

La carte est géoréférencée

Figure 3: le géoréférencement des images sur ArcGis.

La digitalisation des traits de cote

Pour faire la digitalisation des différents traits de cote il faut d'abord créer une nouvelle base de données sur ArcGis pour mettre tous les traits de cote créés de forme ligne (le nom des traits de cote est la date de l'image dont la digitalisation est faite).

Ensuite, les traits de cote sont digitalisés manuellement pour chaque année et pour chaque zone d'étude.

Ces images satellitaires collectées nous ont permis de faire la digitalisation des traits de côte multi-dates (historique) pour entreprendre une analyse de la cinématique des littoraux sableux des trois zones d'étude.

La barre d'outils de la digitalisation

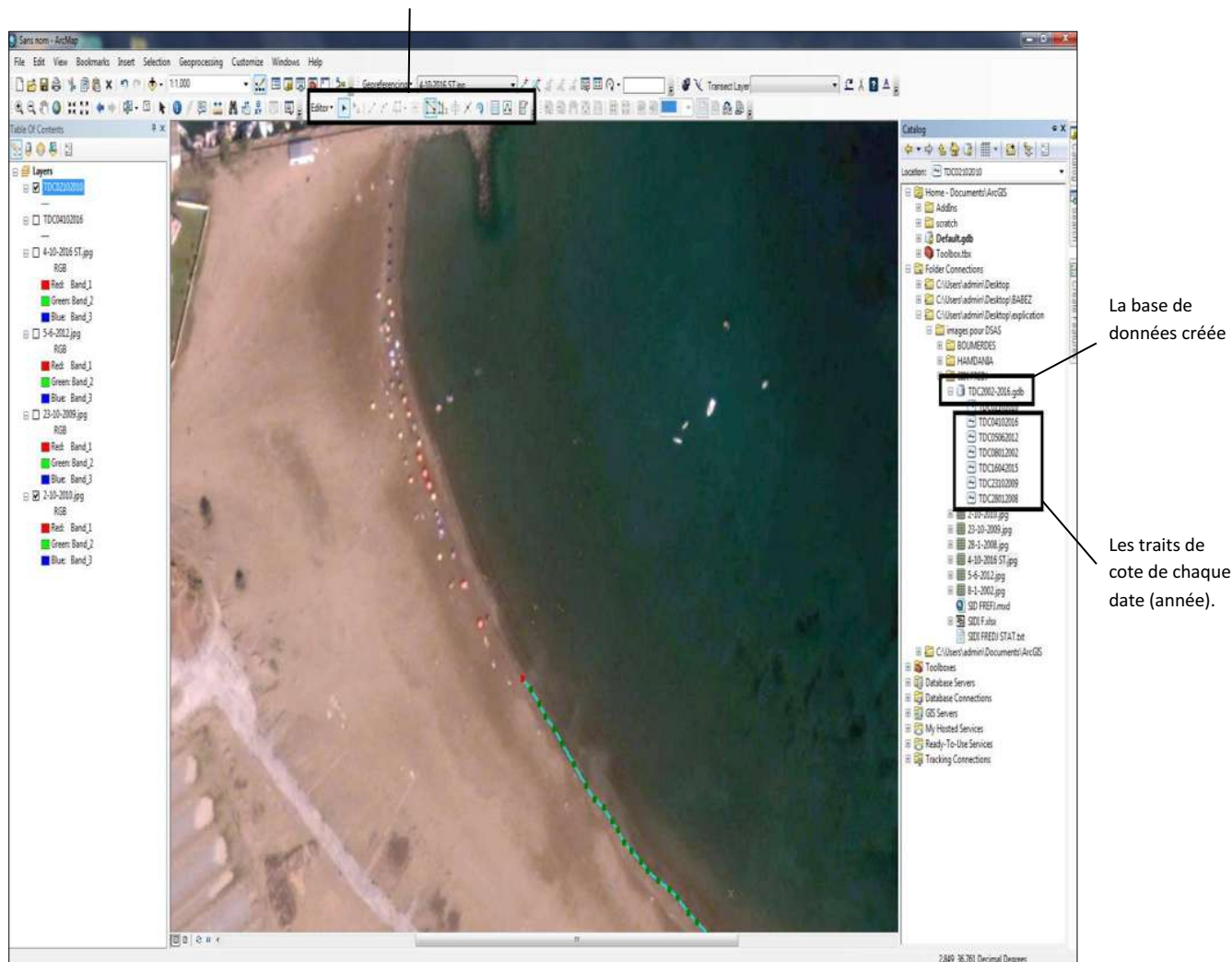


Figure 4 : Digitalisation des traits de cote sur ArcGis

Création d'une ligne de base

L'étude de l'évolution du trait de cote à besoin aussi d'une ligne de base qui doit être en parallèle par rapport au différents traits de cote digitalisés précédemment.

Dans notre cas, on a utilisé l'option *Buffer* sur ArcGis pour faire la digitalisation de la ligne de base. Cette ligne de base doit être créée sur les images satellitaires pour faciliter la génération des transects (Figure 5).

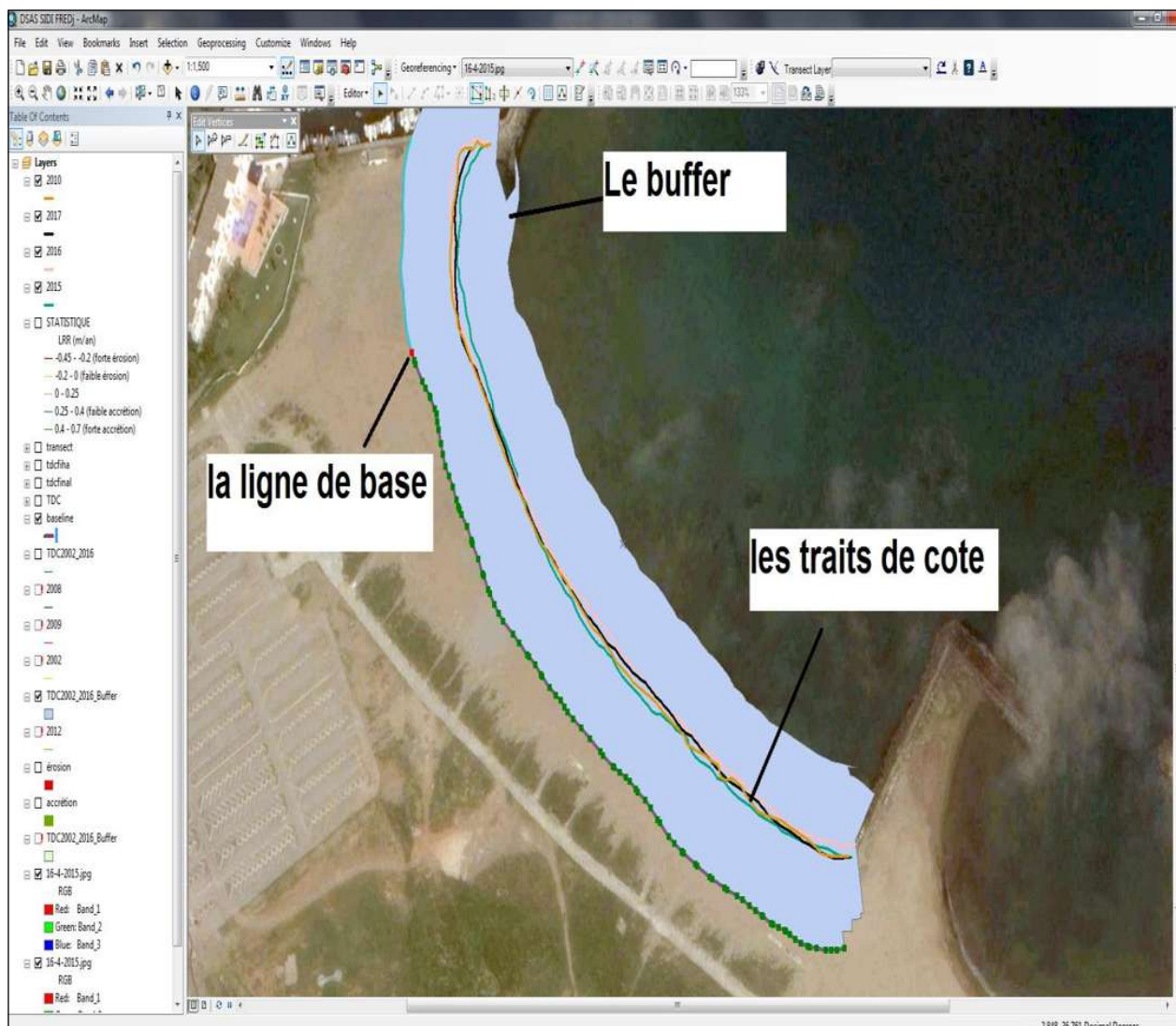


Figure 5:Digitalisation de la ligne de base sur ArcGis.

Génération de transects

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

Dans cette étape l'extension Digital ShorelineAnalysis System (DSAS) a besoin d'une ligne de base et des traits de cotes pour générer des transects, ces transect seront en perpendiculaires à la ligne de base, on doit définir leur longueur et leur espacement (on a donné pour chaque zone longueur et espacement des transects) (**Figure 6**).

La barre d'outils du DSAS

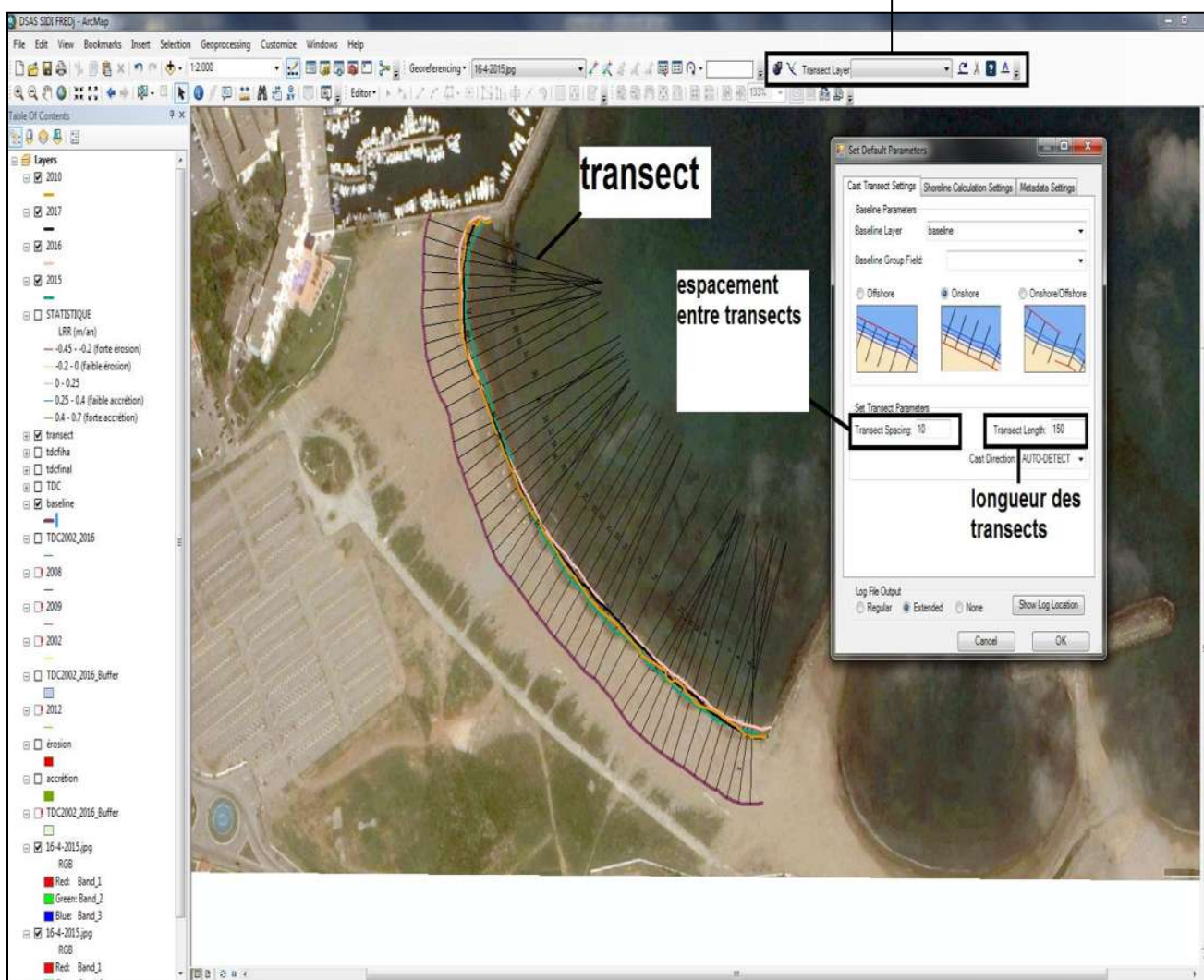


Figure 6: Génération des transects sur ArcGis.

Calculs statistiques sur DSAS

Après la génération de transects vient l'étape des calculs statistiques, cette option se trouve sur la barre d'outils du DSAS. DSAS génère automatiquement mesure les écarts entre les traits de côte et calcule les taux moyens de déplacement le long de chaque transect. Cette analyse automatique de tous ces transects permet de définir des secteurs d'évolution.

On calcule les trois indicateurs qui sont : Le Net Shoreline Movement (NSM), L'End Point Rate (EPR) et Le Linear Regression Rate-of-change (LRR) (**Figure 7**).

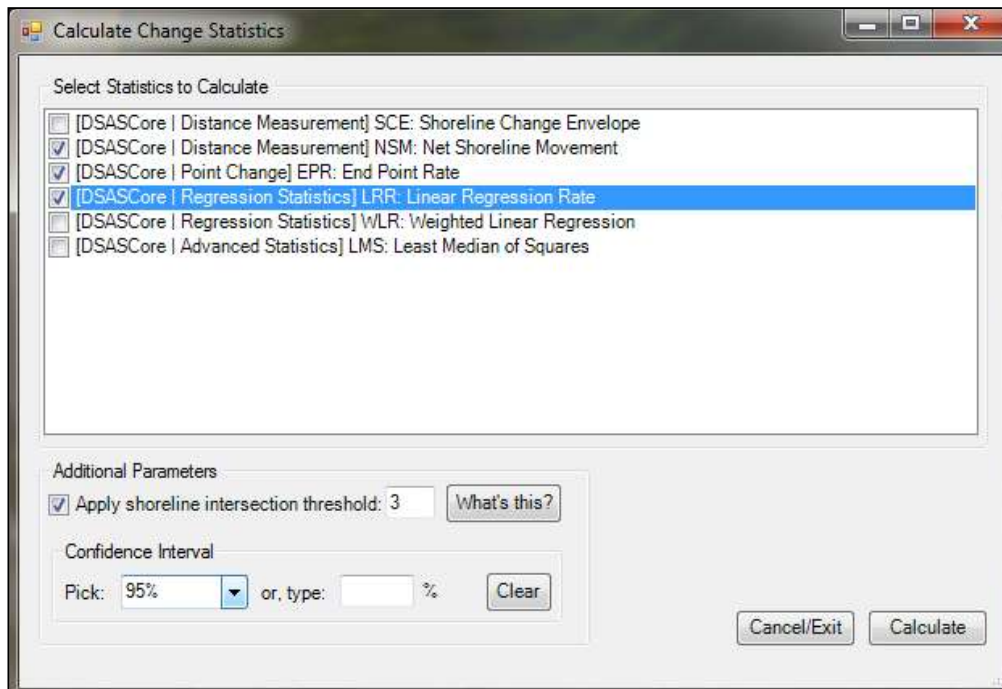


Figure 7: Génération des calculs statistiques par le DSAS

| | | | | | | | | | | | | | | EPR | NSM | | LRR | | | | | | |
|-----|-----------|----------|------------|-------|------------|---------------------|---------|-----------|------------|-----------|------------|---------|------------|------------|------------|-----|-------|------|-------|-------|------|------|-------|
| FID | Shape* | OBJECTID | BaselinelD | Group | TransOrder | ProcTime | Autogen | StartX | StartY | EndX | EndY | Azimuth | SHAPE_Leng | OBJECTID_1 | TransectID | TCD | EPR | EPI | NSM | LRR | LR2 | LSE | LC95 |
| 0 | Polyligne | 2 | 1 | 0 | 2 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486669.24 | 4067945.41 | 486673.94 | 4068095.33 | 1.8 | 150.000002 | 2 | 2 | 10 | 0.5 | 0.45 | 7.74 | 0.82 | 0.44 | 3.85 | 0.697 |
| 1 | Polyligne | 3 | 1 | 0 | 3 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486659.3 | 4067946.48 | 486668.02 | 4068093.71 | 11.04 | 150 | 3 | 3 | 20 | 0.54 | 0.45 | 8.26 | 0.66 | 0.5 | 3.69 | 0.687 |
| 2 | Polyligne | 4 | 1 | 0 | 4 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486649.69 | 4067949.18 | 486699.46 | 4068090.67 | 19.39 | 150.000003 | 4 | 4 | 30 | 0.55 | 0.45 | 8.43 | 0.63 | 0.51 | 3.38 | 0.612 |
| 3 | Polyligne | 5 | 1 | 0 | 5 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486640.77 | 4067953.61 | 486699.62 | 4068091.58 | 23.1 | 150 | 5 | 5 | 40 | 0.49 | 0.45 | 7.59 | 0.51 | 0.41 | 3.34 | 0.605 |
| 4 | Polyligne | 6 | 1 | 0 | 6 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486631.39 | 4067957.03 | 486692.21 | 4068094.15 | 23.92 | 150.000002 | 6 | 6 | 50 | 0.54 | 0.45 | 8.28 | 0.49 | 0.39 | 3.36 | 0.608 |
| 5 | Polyligne | 7 | 1 | 0 | 7 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486622.45 | 4067961.52 | 486698.67 | 4068096.11 | 26.19 | 150.000001 | 7 | 7 | 60 | 0.51 | 0.45 | 7.77 | 0.44 | 0.33 | 3.46 | 0.626 |
| 6 | Polyligne | 8 | 1 | 0 | 8 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486613.5 | 4067965.96 | 486675.73 | 4068102.44 | 24.51 | 149.999999 | 8 | 8 | 70 | 0.54 | 0.45 | 8.35 | 0.45 | 0.33 | 3.55 | 0.643 |
| 7 | Polyligne | 9 | 1 | 0 | 9 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486604.24 | 4067969.74 | 486684.75 | 4068106.99 | 23.79 | 150.000002 | 9 | 9 | 80 | 0.68 | 0.45 | 10.47 | 0.51 | 0.35 | 3.79 | 0.687 |
| 8 | Polyligne | 10 | 1 | 0 | 10 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486595.13 | 4067973.85 | 486680.71 | 4068108.76 | 25.92 | 150.000002 | 10 | 10 | 90 | 0.68 | 0.45 | 10.49 | 0.51 | 0.32 | 4.08 | 0.738 |
| 9 | Polyligne | 11 | 1 | 0 | 11 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486586.29 | 4067978.54 | 486659.31 | 4068109.56 | 29.13 | 150 | 11 | 11 | 100 | 0.65 | 0.45 | 10.04 | 0.49 | 0.3 | 4.15 | 0.751 |
| 10 | Polyligne | 12 | 1 | 0 | 12 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486577.7 | 4067983.65 | 486658.99 | 4068109.71 | 32.82 | 150.000001 | 12 | 12 | 110 | 0.66 | 0.45 | 10.1 | 0.49 | 0.32 | 3.92 | 0.71 |
| 11 | Polyligne | 13 | 1 | 0 | 13 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486569.47 | 4067989.31 | 486662.19 | 4068107.22 | 38.18 | 149.999999 | 13 | 13 | 120 | 0.68 | 0.45 | 10.46 | 0.5 | 0.34 | 3.88 | 0.703 |
| 12 | Polyligne | 14 | 1 | 0 | 14 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486562.04 | 4067995.99 | 486663.94 | 4068106.07 | 42.79 | 149.999998 | 14 | 14 | 130 | 0.65 | 0.45 | 9.92 | 0.42 | 0.29 | 3.69 | 0.668 |
| 13 | Polyligne | 15 | 1 | 0 | 15 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486555.07 | 4068003.16 | 486654.33 | 4068115.63 | 41.43 | 150 | 15 | 15 | 140 | 0.54 | 0.45 | 8.27 | 0.4 | 0.27 | 3.61 | 0.655 |
| 14 | Polyligne | 16 | 1 | 0 | 16 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486547.14 | 4068009.24 | 486637.04 | 4068129.31 | 36.82 | 149.999999 | 16 | 16 | 150 | 0.5 | 0.45 | 7.85 | 0.33 | 0.2 | 3.67 | 0.664 |
| 15 | Polyligne | 17 | 1 | 0 | 17 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486539.18 | 4068015.27 | 486621.47 | 4068140.68 | 33.27 | 149.999998 | 17 | 17 | 160 | 0.49 | 0.45 | 7.57 | 0.25 | 0.1 | 4.13 | 0.749 |
| 16 | Polyligne | 18 | 1 | 0 | 18 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486530.4 | 4068020.02 | 486612.07 | 4068145.03 | 32.99 | 150 | 18 | 18 | 170 | 0.6 | 0.45 | 9.23 | 0.36 | 0.21 | 3.81 | 0.69 |
| 17 | Polyligne | 19 | 1 | 0 | 19 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486522.28 | 4068025.85 | 486612.37 | 4068145.79 | 36.91 | 149.999999 | 19 | 19 | 180 | 0.54 | 0.45 | 8.24 | 0.31 | 0.12 | 4.61 | 0.835 |
| 18 | Polyligne | 20 | 1 | 0 | 20 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486514.49 | 4068032.12 | 486605.67 | 4068151.23 | 37.44 | 150.000003 | 20 | 20 | 190 | 0.51 | 0.45 | 7.79 | 0.28 | 0.09 | 4.87 | 0.881 |
| 19 | Polyligne | 21 | 1 | 0 | 21 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486506.4 | 4068037.99 | 486601.48 | 4068154 | 39.44 | 150.000002 | 21 | 21 | 200 | 0.51 | 0.45 | 7.87 | 0.3 | 0.11 | 4.84 | 0.877 |
| 20 | Polyligne | 22 | 1 | 0 | 22 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486499.02 | 4068044.7 | 486594.92 | 4068160.04 | 39.74 | 149.999999 | 22 | 22 | 210 | 0.47 | 0.45 | 7.21 | 0.27 | 0.09 | 4.83 | 0.875 |
| 21 | Polyligne | 23 | 1 | 0 | 23 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486491.16 | 4068050.81 | 486591.11 | 4068162.86 | 41.79 | 150.000001 | 23 | 23 | 220 | 0.52 | 0.45 | 7.92 | 0.28 | 0.08 | 5.17 | 0.936 |
| 22 | Polyligne | 24 | 1 | 0 | 24 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486483.89 | 4068057.68 | 486584.1 | 4068169.29 | 41.92 | 150.000001 | 24 | 24 | 230 | 0.5 | 0.45 | 7.69 | 0.24 | 0.07 | 5.06 | 0.916 |
| 23 | Polyligne | 25 | 1 | 0 | 25 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486476.39 | 4068064.28 | 486577.14 | 4068175.4 | 42.2 | 149.999997 | 25 | 25 | 240 | 0.52 | 0.45 | 8.02 | 0.23 | 0.05 | 5.47 | 0.99 |
| 24 | Polyligne | 26 | 1 | 0 | 26 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486469 | 4068071.01 | 486569.95 | 4068182.36 | 41.78 | 149.999998 | 26 | 26 | 250 | 0.57 | 0.45 | 8.81 | 0.28 | 0.08 | 5.22 | 0.944 |
| 25 | Polyligne | 27 | 1 | 0 | 27 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486461.46 | 4068077.58 | 486569.63 | 4068181.5 | 46.15 | 149.999999 | 27 | 27 | 260 | 0.62 | 0.45 | 9.53 | 0.37 | 0.13 | 5.17 | 0.937 |
| 26 | Polyligne | 28 | 1 | 0 | 28 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486454.97 | 4068085.14 | 486575.5 | 4068174.42 | 53.47 | 150.000001 | 28 | 28 | 270 | 0.61 | 0.45 | 9.34 | 0.39 | 0.15 | 5.08 | 0.92 |
| 27 | Polyligne | 29 | 1 | 0 | 29 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486448.81 | 4068093.7 | 486579.77 | 4068168.61 | 60.04 | 143.593209 | 29 | 29 | 280 | 0.56 | 0.45 | 8.63 | 0.36 | 0.15 | 4.78 | 0.866 |
| 28 | Polyligne | 30 | 1 | 0 | 30 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486442.22 | 4068102.58 | 486577.14 | 4068173.99 | 61.57 | 147.325412 | 30 | 30 | 290 | 0.47 | 0.45 | 7.29 | 0.32 | 0.14 | 4.32 | 0.781 |
| 29 | Polyligne | 31 | 1 | 0 | 31 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486440.25 | 4068111.26 | 486569.69 | 4068187.06 | 59.64 | 150 | 31 | 31 | 300 | 0.42 | 0.45 | 6.51 | 0.26 | 0.1 | 4.21 | 0.763 |
| 30 | Polyligne | 32 | 1 | 0 | 32 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486435.11 | 4068119.8 | 486566.39 | 4068192.36 | 61.07 | 150 | 32 | 32 | 310 | 0.42 | 0.45 | 6.47 | 0.29 | 0.12 | 4.38 | 0.793 |
| 31 | Polyligne | 33 | 1 | 0 | 33 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486430.34 | 4068126.55 | 486561.22 | 4068201.83 | 60.76 | 150.000001 | 33 | 33 | 320 | 0.44 | 0.45 | 6.73 | 0.33 | 0.22 | 3.46 | 0.627 |
| 32 | Polyligne | 34 | 1 | 0 | 34 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486425.56 | 4068137.31 | 486563.21 | 4068196.91 | 66.59 | 150.000002 | 34 | 34 | 330 | 0.42 | 0.45 | 6.52 | 0.33 | 0.19 | 3.7 | 0.669 |
| 33 | Polyligne | 35 | 1 | 0 | 35 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486422.06 | 4068146.63 | 486564.2 | 4068194.56 | 71.37 | 150.000001 | 35 | 35 | 340 | 0.35 | 0.45 | 5.39 | 0.24 | 0.15 | 3.18 | 0.575 |
| 34 | Polyligne | 36 | 1 | 0 | 36 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486419.38 | 4068156.26 | 486561.12 | 4068205.34 | 70.9 | 150 | 36 | 36 | 350 | 0.17 | 0.45 | 2.65 | 0.1 | 0.03 | 2.94 | 0.533 |
| 35 | Polyligne | 37 | 1 | 0 | 37 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486415.84 | 4068165.47 | 486548.36 | 4068235.73 | 62.07 | 145.464803 | 37 | 37 | 360 | -0.13 | 0.45 | -1.93 | -0.07 | 0.03 | 2.18 | 0.395 |
| 36 | Polyligne | 38 | 1 | 0 | 38 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486409.87 | 4068173.43 | 486535.55 | 4068255.32 | 56.91 | 143.403386 | 38 | 38 | 370 | -0.31 | 0.45 | -4.73 | -0.11 | 0.04 | 2.81 | 0.508 |
| 37 | Polyligne | 39 | 1 | 0 | 39 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486404.6 | 4068181.93 | 486537.79 | 4068250.92 | 62.62 | 147.993386 | 39 | 39 | 380 | -0.25 | 0.45 | -3.9 | -0.07 | 0.01 | 3.37 | 0.61 |
| 38 | Polyligne | 40 | 1 | 0 | 40 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486400.64 | 4068191.1 | 486543.24 | 4068237.62 | 71.93 | 150.000001 | 40 | 40 | 390 | -0.18 | 0.45 | -2.83 | -0.04 | 0 | 3.55 | 0.642 |
| 39 | Polyligne | 41 | 1 | 0 | 41 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486398.53 | 4068200.94 | 486545.69 | 4068229.92 | 78.82 | 150.000001 | 41 | 41 | 400 | -0.11 | 0.45 | -1.68 | 0.01 | 0 | 3.49 | 0.632 |
| 40 | Polyligne | 42 | 1 | 0 | 42 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486397.28 | 4068210.76 | 486546.37 | 4068227.3 | 83.67 | 143.25982 | 42 | 42 | 410 | -0.02 | 0.45 | -0.38 | 0.05 | 0.01 | 2.66 | 0.482 |
| 41 | Polyligne | 43 | 1 | 0 | 43 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486395.96 | 4068220.63 | 486545.94 | 4068223.26 | 88.99 | 151.846173 | 43 | 43 | 420 | 0.04 | 0.45 | 0.59 | 0.1 | 0.05 | 2.48 | 0.448 |
| 42 | Polyligne | 44 | 1 | 0 | 44 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486396.87 | 4068230.57 | 486546.71 | 4068223.64 | 92.65 | 150.324309 | 44 | 44 | 430 | 0.09 | 0.45 | 1.32 | 0.11 | 0.06 | 2.48 | 0.449 |
| 43 | Polyligne | 45 | 1 | 0 | 45 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486397.24 | 4068240.51 | 486547.13 | 4068234.93 | 92.13 | 150.000001 | 45 | 45 | 440 | -0.12 | 0.45 | -1.84 | -0.12 | 0.03 | 3.62 | 0.655 |
| 44 | Polyligne | 46 | 1 | 0 | 46 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486397.36 | 4068250.5 | 486547.18 | 4068243.13 | 92.82 | 150.537355 | 46 | 46 | 450 | -0.35 | 0.45 | -5.31 | -0.38 | 0.21 | 4.13 | 0.749 |
| 45 | Polyligne | 47 | 1 | 0 | 47 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486398.15 | 4068260.45 | 486544.85 | 4068229.16 | 102.04 | 149.999998 | 47 | 47 | 460 | -0.38 | 0.45 | -5.87 | -0.45 | 0.25 | 4.23 | 0.766 |
| 46 | Polyligne | 48 | 1 | 0 | 48 | 2017/06/03 04:56:49 | 1 | 486401.28 | 4068269.91 | 486544.07 | 4068223.97 | 107.83 | 149.992144 | 48 | 48 | 470 | -0.36 | 0.45 | -5.47 | -0.37 | 0.18 | 4.34 | 0.785 |

Tableau 1: La table des attributées issue lors du calcul statistique par le DSAS.

