

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

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



Mémoire de Fin d'Études

En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'état en Sciences de la Mer

Option : Gestion et Protection du Littoral

Thème :

**Evolution spatio-temporelle du littoral de la baie d'El Djamila,
prévision des risques et adaptation.**

Présenté par :

- **Mohammed Wassila**

Soutenu le 18/ 07/2023 devant le jury :

M^{me} ABDEDAIM H.

Présidente (MCB)

ENSSMAL

M^{me} FEZAA N.

Promoteur (Professeure)

ENSSMAL

Mr MEZOUAR K.

Co-promoteur (Professeur)

ENSSMAL

Mr DAHMANI A.E.A.

Examineur (MCB)

ENSSMAL

Année universitaire : 2022-2023

Remerciement

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

*Je remercie particulièrement ma promotrice **Mme. FEZAA Nacima**, pour m'avoir guidé pendant la période de la réalisation de ce travail.*

*Mes vifs remerciements vont aussi à mon Co-promoteur Monsieur **M. MEZOUAR Khoudir** pour sa patience, sa très grande disponibilité, son soutien constant et ses encouragements le long de ce mémoire.*

*J'adresse également mes chaleureux remerciements aux membres de jury, **M^{me} ABDEDAIM H.** pour avoir accepté de présider les membres du jury et **M. DAHMANI A.** pour avoir accepté d'examiner ce modeste travail.*

Je voulais remercier également :

Tous mes enseignants qui m'ont transmis leur savoir durant mon cursus universitaire au sein de l'ENSSMAL et au personnel de la bibliothèque et l'administration de L'ENSSMAL.

Enfin je profite de ces lignes pour témoigner toute ma gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail de fin d'étude.

Dédicace

Je dédie ce travail

*A mes très chers **Parents**, source de vie, d'amour et d'affection qui m'ont soutenu et encouragé durant ces années d'études.*

Qu'ils trouvent le témoignage de ma profonde reconnaissance.

*A ma grande sœur **Lila** et mes frères **Mohammed et Anes** à l'étranger qui nous ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche malgré de loin.*

*A toute ma **Famille**, source d'espoir et de motivation.*

*A tous mes **amis (e)** de proche ou de loin, pour leur soutien inestimable.*

A vous cher lecteur

Table des matières

Remerciement	
Dédicace.....	
Table des matières.....	
Listes des figures	
Introduction générale.....	P1
Chapitre I : Généralités	P4
1. Le système littoral.....	P4
1.1 La morpho dynamique côtière.....	P4
1.2 Relation spatio-temporelles en morpho-dynamique côtière	P5
1.3 Profil général d'une côte sableuse	P6
2. Processus hydrodynamiques	P7
a. Les vagues	P7
b. La houle	P8
2. b.1 Grandeurs physiques et caractéristiques de la houle	P9
2. b.2 Mécanismes générateurs de la houle	P10
2. b.3 Mécanismes modificateurs de la houle	P10
3. La dynamique sédimentaire	P12
3.1 L'érosion côtière	P13
3.2 Transports sédimentaire.....	P13
3.3 Approche de la dynamique sédimentaire par la granulométrie.....	P13
4. Emprise humaine et modification du trait de côte.....	P13
5. Changement climatique	P13
6. Les variations du niveau de la mer	P14
7. Risque	P14
8. Adaptation.....	P15
Chapitre II : Zone d'étude	
1. Situation géographique	P16
2. Cadre géologique.....	P16
3. Topographie marine	P17
4. La géomorphologie	P18
5. La sédimentologie	P18
6. Dynamique sédimentaire.....	P19
7. Données océanographiques	P20
7.1. Les houles	P20
7.2. Les courants.....	P23
8. Données climatiques et météorologiques	P23
8.1. Les vents.....	P23
8.2. Température.....	P25

8.3. Pluviométrie.....	P25
Chapitre III : Modélisation hydrodynamique	
Introduction	P27
1. Présentation des logiciels utilisés pour la bathymétrie	P27
2. Les modules du Mike21.....	P28
2.1 Le module hydrodynamique : Mike21 HD (Hydro-Dynamics).....	P28
2.2 Le module de vague spectrale : Mike SW (<i>Spectral Wave</i>).....	P28
2.3 Le module de transport des sédiments : Mike 21 ST (<i>Sand Transport</i>)	P29
3. Les principales applications des modèles MIKE21/3.....	P30
4. La méthodologie	P31
4.1 Etude bathymétrique.....	P31
4.2 Création de la bathymétrie 2D sous le maillage.....	P32
4.3 Interprétation des résultats.....	P32
5. Résultats.....	P33
a. Module SW.....	P33
b. Module HD.....	P38
c. Module ST.....	P43
Conclusion	P49
Chapitre VI : Evolution spatio temporelle du trait de côte.....	
Introduction	P51
1. La méthodologie.....	P51
2. Les logiciels utilisés	P52
3. Les résultats	P54
a) Mouvement net des rivages (NSM).....	P57
b) Le taux de point final (EPR)	P59
c) Le Linear Regression Rate change (LRR)	P62
d) Analyse du bilan sédimentaire	P63
Conclusion	P63
Chapitre V: Submersion marine	
1- Introduction.....	P64
2- La submersion marine.....	P64
3- Rappels théoriques sur les phénomènes physiques responsables des submersions marines d'origine météorologique.....	P65
4- Méthodologie.....	P65
4.1.1. Variation du niveau de la mer en fonction de la pression atmosphérique.....	P66
4.1.2. Hauteur significative au large.....	P67
5- Les zones à risque d'inondation	P67
6- Interprétation des résultats.....	P68
Conclusion	P68
Chapitre VI : Prévision des risques et adaptation	

Introduction	P70
1. Risques littoraux	P70
1.1 Le risque d'érosion	P70
1.2 Le risque de submersion marine.....	P71
1.3 Risques et changement climatique.....	P71
2. Adaptation	P71
2.1 L'adaptation aux changements climatiques.....	P72
2.2 Types de stratégie d'adaptation	P72
a. Le retrait.....	P72
b. L'accommodation.....	P72
c. La protection.....	P73
Conclusion générale.....	P77
Bibliographie.....	P79
Annexes	P85
Résumé.....	

Liste des figures

Figure 01: Composants d'un système morfo dynamique côtier (Hzami, 2015)	P4
Figure 02: Relations patio- temporelle des systèmes morphodynamiques côtiers. Synthèse proposée par (Dubarbier, 2014).....	P6
Figure 03: Profil général d'une côte sableuse (Faye, 2010).....	P7
Figure 04: Représentation des paramètres caractéristiques des vagues.....	P8
Figure 05: Types d'ondes de surface, montrant la relation entre les fréquences, la cause de leur génération et la quantité d'énergie de chaque type (Denamiel, 2006).....	P9
Figure 06: Représentation des grandeurs caractéristiques des vagues (Grasso, 2009 in Nadir, 2016)	P10
Figure 07: Schématisation du courant de retour : A/vue de profil sur une plage de pente homogène B/ vue plan.	P12
Figure 08: Impacts potentiels des changements climatiques sur la zone côtière (Mclaughlin et al. 2001, Modifiée)	P14
Figure 09: Définition de risque (Samuels, 2005).	P15
Figure 10: Situation géographique de la baie d'El Djamilia.....	P16
Figure 11: La géologie de la baie d'El Djamilia.....	P17
Figure 12: Topographie de la baie d'El Djamilia	P18
Figure 13: Transit sédimentaire dans la région d'El Djamilia (Rabehi et Rahal, 2011).....	P19
Figure 14: Répartition sédimentologique de la baie d'El Djamilia (Campagne 2006).....	P20
Figure 15: Roses mensuelles des houles au large d'El-Djamila.....	P21
Figure 16: Roses saisonnières et totale des houles au large d'El-Djamila.....	P22
Figure 17: Rose des vents au large de la cote de la Baie d'El-Djamila.....	P24
Figure 18 : Schéma récapitulatif de l'approche méthodologique de la modélisation par les codes MIKE-21.	P30
Figure 19: Carte bathymétrique de la zone de la baie d'El Djamilia (les plages Sidi Fredj)..	P31
Figure 20: Bathymétrie et l'élément Mesh de la zone d'étude de la baie d'El-Djamila (plages Sidi Fredj).....	P32
Figure 21: Champs des houles dans la baie d'El Djamilia (H=5.11 ; Tp=10.46s ; Dir=22.5°)	P34
Figure 22: Champs des houles dans la baie d'El Djamilia (plages de Sidi Fredj) ; (H=5.11 ; Tp=10.46s ; Dir=22.5°).....	P35
Figure 23: Champs des houles dans la baie d'El Djamilia (H=3.25m ; Tp=8.85s ; Dir=45°N).....	P35

Figure 24: Champs des houles dans la baie d'El Djamila (plages de Sidi Fredj) ; (H=3.25m ; Tp=8.85s ; Dir=45°N).....	P36
Figure 25 : Champs des houles dans la baie d'El Djamila (H=3.31m ; Tp=9.11s ; Dir=270°N).....	P36
Figure 26: Champs des houles dans la baie d'El Djamila (plages de Sidi Fredj) ; (H=3.31m ; Tp=9.11s ; Dir=270°N).....	P37
Figure 27: Champs des courants dans la baie d'El Djamila générés par les Houles du secteur NNE (H=5.11m ; Tp=10.46s ; Dir=22.5).....	P38
Figure 28: Champs des courants dans la baie d'El Djamila (plages de Sidi Fredj) ; générés par les Houles du secteur NNE (H=5.11m ; Tp=10.46s ; Dir=22.5).....	P38
Figure 29: Champs des courants dans la baie d'El Djamila (H=3.25m ; Tp=8.85s ; Dir=45).....	P38
Figure 30: Champs des courants dans la baie d'El Djamila ; (plages de Sidi Fredj) (H=3.25m ; Tp=8.85s ; Dir=45).....	P39
Figure 31: Champs des courants dans la baie d'El Djamila (H=3.31m ; Tp=9.11s ; Dir=270°N).....	P40
Figure 32 : Champs des courants dans la baie d'El Djamila ;(plges de Sidi Fredj) (H=3.31m ; Tp=9.11s ; Dir=270°N).....	P41
Figure 33: Champ de transport sédimentaire au voisinage du la baie d'El Djamila générés par les Houles du secteur 45N dans la baie d'El Djamila (H=3.25m ; Tp=8.85s ; Dir=45°N).....	P41
Figure 34: Champ de transport générés par les Houles du secteur 45N dans la baie d'El Djamila (plages de Sidi Fredj) ; (H=3.25m ; Tp=8.85s ; Dir=45°N).....	P42
Figure 35: Champ de transport sédimentaire au voisinage du la baie d'El Djamila générés par les Houles du secteur 45N dans la baie d'El Djamila (H=3.31m ; Tp=9.11s ; Dir=270) ...	P42
Figure 36: Champ de transport sédimentaire générés par les Houles du secteur 45N dans la baie d'El Djamila ; (plages de Sidi Fredj) (H=3.31m ; Tp=9.11s ; Dir=270°N).....	P43
Figure 37: Champ de transport sédimentaire générés par les Houles du secteur 22.5N dans la baie d'El Djamila (H=5.11m ; Tp=10.46s ; Dir=22.5°N).....	P43
Figure 38: Champ de transport sédimentaire générés par les Houles du secteur 22.5N dans la baie d'El Djamila (plages de Sidi Fredj) (H=5.11m ; Tp=10.46s ; Dir=22.5°N).....	P48
Figure 39: Transects générés par DSAS (USGS, 2018).....	P49
Figure 40: Evolution du trait côte de la baie d'El Djamila selon différentes périodes entre 2007 et 2022	P54
Figure 41: Evolution du trait côte des plages de Sidi Fredj selon différentes périodes entre 2007 et 2022.....	P50
Figure 42: Evolution du trait de côte de la d'El Djamila entre 2007 et 2022.....	P51

Figure 43: Evolution du trait de côte des plages de Sidi Fredj entre 2007 et 2022.....	P51
Figure 44: Illustration du mouvement net des rivages (NSM) de la baie d'El Djamila entre 2007 et 2022.....	P52
Figure 45: Illustration du mouvement net des rivages (NSM) entre 2007 et 2022.....	P52
Figure 46: Représentation du rythme d'évolution du trait de côte de la baie d'El Djamila entre 2007 et 2022	P54
Figure 47: Représentation du rythme d'évolution du trait de côte des plages de Sidi Fredj entre 2007 et 2022.....	P54
Figure 48: Diagramme d'EPR en fonction des transects montrant l'évolution du trait de côte la baie d'El Djamila (cas des plages de Sidi Fredj) entre 2007 et 2022.....	P55
Figure 49: Représentation de LRR selon chaque transect de la baie d'El Djamila entre 2007 et 2022.....	P56
Figure 50: Représentation de LRR selon chaque transect des plages de Sidi Fredj entre 2007 et 2022.....	P56
Figure 51: Analyse du taux d'évolution en surface entre 2007 et 2022 (cas de la partie NW des plages de Sidi Fredj).....	P57
Figure 52: Typologie des submersions marines (franchissement, débordement, rupture d'ouvrage). (BRGM et Cachan, 2012).....	P61
Figure 53: Schéma montrant les principaux processus hydrodynamiques pour le calcul des niveaux d'eau extrêmes à la côte.....	P62
Figure 54: Le plan de vague de la direction N associé à la période de retour 1 an.....	P64
Figure 55: Le plan de vague de la direction N associé à la période de retour 20ans	P64
Figure 56: Le plan de vague de la direction N associé à la période de retour 50ans	P65
Figure 57: Le modèle numérique du terrain (MNT) en 2D de la baie d'El Djamila	P67
Figure 58: Le modèle numérique du terrain (MNT) en 3D de la baie d'El Djamila	P67
Figure 59: Carte de l'aléa submersion sur la Baie d'El Djamila en cas d'élévation de niveau de la mer	P68
Figure 60: Carte de l'aléa submersion de 2 m sur la Baie d'El Djamila.....	P69
Figure 61: Carte de l'aléa submersion de 3m sur la Baie d'El Djamila.....	P70
Figure 62: Carte de l'aléa submersion de 4m sur la Baie d'El Djamila.....	P71
Figure 63: Schéma qui représente les risques d'érosion.....	P73
Figure 64: Schéma qui représente les risques de submersion.....	P74

Introduction

Introduction générale

L'espace littoral, situé à l'interface terre-mer est un environnement côtier dynamique qui se matérialise par une bande plus ou moins large. La dynamique spatio-temporelle résulte de plusieurs interactions entre la mer, l'atmosphère, la terre et la population. Les littoraux sont donc des environnements complexes sièges de multiples paramètres d'évolution morphodynamique (Cowell et Thom, 1994).

Le concept de l'évolution spatio-temporelle du littoral est défini comme l'ajustement mutuel de l'hydrodynamique, la topographie et le transport sédimentaire. L'accélération de l'élévation du niveau de la mer et la modification des processus physiques des environnements côtiers (augmentation des températures de surface, perturbation de la circulation océanique, élévation du taux de salinité, etc...), liés au changement climatique actuel, sont les facteurs responsables de la dégradation des milieux côtiers (Church et White, 2006 ; Doney et al., 2009 ; Mori et al., 2010).

Les tempêtes constituent avec l'élévation du niveau de la mer, le principal risque de submersion et d'érosion des littoraux, elles sont considérées comme une contrainte majeure à l'urbanisation croissante des zones côtières (Brunel, 2010). Ces événements, de forte intensité jouent un rôle important dans l'évolution des plages (Nicholls et Hoozemans, 1996 ; Hzami, 2021).

Pour comprendre les phénomènes naturels mis en cause dans la mobilité du trait de côte, on ne peut pas se contenter de suivre simplement ses déplacements au cours du temps. Le littoral étant un système ouvert, il convient d'appréhender son évolution à travers l'analyse de son bilan sédimentaire au sein de chaque cellule hydro sédimentaire en passant par l'analyse des champs des houles et des courants engendrés.

La prévision des risques associés à l'évolution des littoraux est essentielle pour la planification et la prise de décision éclairée. Pour se faire, des modélisations numériques et des outils de traitement d'images sont utilisés pour évaluer les tendances passées, simuler les scénarios futurs et prévoir les impacts potentiels sur les zones côtières. Les données sur le niveau de la mer, l'érosion côtière, la dynamique des vagues et d'autres paramètres sont optimisées et analysées afin de mieux comprendre les processus en jeu.

La baie d'El Djamila, objet de notre étude est considérée comme l'un des points littoraux les plus convoités lors de la période estival car elle recueille un bon nombre d'infrastructures touristiques et hôtelières, elle connaît également une expansion importante de la zone urbaine. Des travaux antérieurs ont montré que la zone d'étude a subi dans le passé des problèmes d'érosion et de submersion marine sur plusieurs décennies.

Les principaux objectifs de ce travail est de mettre en évidence la tendance passée jusqu'à l'actuel de l'évolution hydrosédimentaire de la baie d'El Djamila ainsi que de prévoir les risques d'érosion et de submersions marines dans le futur et l'adaptation à ces risques.

Pour atteindre ces objectifs, ce mémoire s'organise en six principaux chapitres :

Le chapitre I : est une synthèse des connaissances nécessaires pour traiter ce sujet, il introduit des notions générales pour l'étude hydrodynamique et sédimentaire.

Le chapitre II : est consacré à la présentation de notre zone d'étude. Il a pour but de présenter ses différentes caractéristiques ; géomorphologiques, géologiques, sédimentologiques, climatiques, hydrographiques et hydrodynamiques.

Le chapitre III : dans lequel sont présentées les modélisations hydrosédimentaires issues de l'application du modèle « Mike » pour réaliser des simulations de propagation des vagues et des courants ainsi que de transport des sédiments sur la portion du littoral étudiée dans ce

travail. Ceci afin de donner quelques éléments de réponse à la problématique posée qui est la détermination de l'état de vulnérabilité de la zone d'étude.

Le chapitre IV : est consacré à l'étude d'évolution spatio-temporelle du trait de côte, entre 2007 et 2022. Ceci dans le but de comprendre les processus géologiques, océanographiques et météorologiques qui influencent l'évolution de la baie au fil du temps.

Le chapitre V : est consacré à la cartographie de l'aléa de la submersion marine, basée sur des scénarios d'élévation du niveau de la mer, modélisée par l'utilisation du logiciel de cartographie ArcGIS 10.8.

Le chapitre VI : concerne la prévision des risques et l'adaptation dans le littoral de la zone d'étude.

Chapitre I :

Généralités

1. Le système littoral

La côte est le lieu de rencontre entre le continent, l'océan et l'atmosphère. Ces trois environnements, contrôlés par de multiples processus physiques, interagissent au niveau du littoral (Carter, 1998 ; Boak et Turner, 2005). Les processus évoluent à différentes échelles spatio-temporelles jusqu'aux étroites interactions qui existent entre le fluide et le sédiment (Van Rijn, 1986). Les littoraux sableux sont des systèmes dynamiques qui peuvent être «stables», ils peuvent subir une érosion, ou bien avoir tendance à s'engraisser selon les forçages naturels et anthropiques (Paskoff, 1998 ; Paskoff, 2005 ; Paskoff et Clus-Auby, 2007) auxquels ils sont soumis.

Dans ces environnements, la tendance érosive naturelle est accélérée par des actions anthropiques qui ont introduit un déséquilibre dans les processus côtiers en limitant le volume de sable nécessaire au maintien des plages et à la stabilité du trait de côte (Paskoff, 1998).

1.1 La morpho dynamique côtière

Un système morpho dynamique est constitué d'un objet géomorphologique qui réagit aux variations d'une composante dynamique par un ajustement morphologique. Cette réponse est une tentative de mise à l'équilibre de la morphologie par rapport aux nouvelles conditions de forçages. Dans le cas des systèmes littoraux, la topographie des fonds côtiers est en constant ajustement avec la dynamique du milieu fluide. Cet ajustement morphologique est le résultat d'un gradient de transport sédimentaire. (Fig. 1)

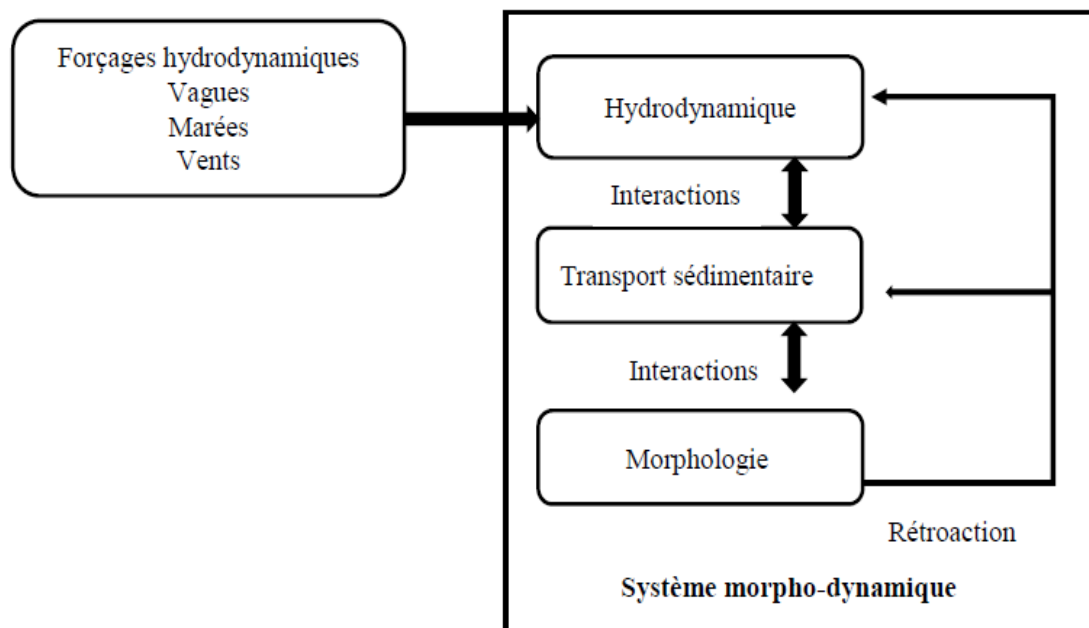


Figure 1 : Composants d'un système morpho dynamique côtier (Cowell et Thom, 1994, Modifiée).

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 qui est à l'origine de la construction d'une nouvelle morphologie. Des phénomènes de rétroactions sur la dynamique des fluides et le transport peuvent être soit positifs ou négatifs (Cowell et Thom, 1994). Un processus d'autocontrôle renforce la tendance d'évolution du système en

augmentant le déséquilibre. Alors qu'un processus d'autorégulation inverse la tendance et amène le système vers l'équilibre.

1.2 Relation spatio-temporelles en morpho-dynamique côtière

La diversité des systèmes côtiers dans le monde est liée à l'influence exercée par ces factures :

- Géographie et topographie
- Climat,
- Courants océaniques,
- Niveaux de salinité,
- Activités humaines. etc.....

Un système côtier est défini par sa morphologie (présence ou non de barres sédimentaires, de lagunes ...) qui exerce une influence sur les agents hydrodynamiques responsables du transport sédimentaire, notamment la houle, par l'intermédiaire des multiples transformations qu'elles subissent sur l'avant côte. Cette influence se manifeste en particulier par des pertes d'énergie à l'approche de la côte (Arduin et al. in Ahfir et Meziane, 2016).

Le transport sédimentaire qu'induisent les facteurs hydrodynamiques est donc, par essence, profondément différencié selon les zones de l'avant-côte considérées, créant des secteurs en accrétion ou en érosion et contribuant ainsi au modelage d'une nouvelle morphologie. Cette boucle est rétroactive et se reproduit dans le temps à différentes échelles.

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

Il découle de cette relation une hiérarchisation spatio-temporelle (Kroon, 1994) des processus dynamiques qui contrôlent l'évolution de la zone côtière.

Selon la nomenclature de De Vriend (in Bouzeroura et Houa, 2018), les échelles suivantes peuvent être distinguées:

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

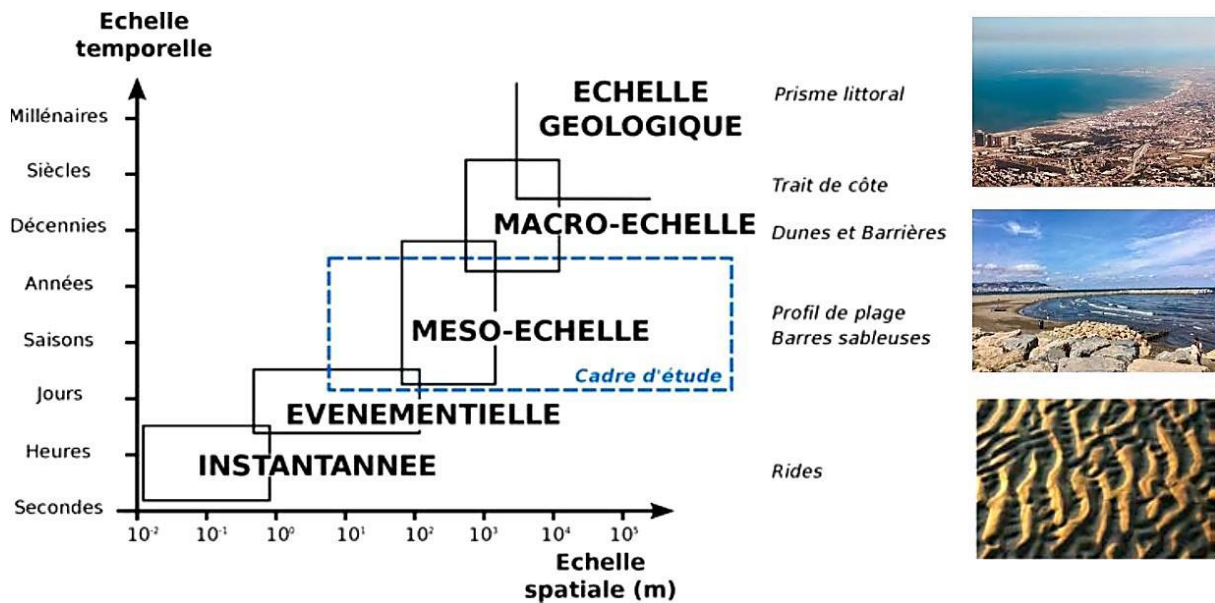


Figure 02 : Relation entre les différentes échelles spatio-temporelles et les principales morphologies littorales (Dubarbier, 2014).

1.3 Profil général d'une côte sableuse

Les plages sont des accumulations littorales de sédiments meubles, qui vont des sables fins (de 0.063 à 0.2 mm) aux blocs (supérieurs à 20 cm), susceptibles d'être mobilisés par le passage régulier des eaux marines ; on parle de grève lorsqu'elles sont constituées de galets.

Les matériaux des plages proviennent des sédiments continentaux apportés par les fleuves, ils sont remaniés par l'action des houles et des dérives littorales qui peuvent les transporter vers le large. Ainsi, il se forme une plage dès lors que le volume de sédiments disponibles est supérieur au volume transporté. Les plages ont un profil transversal en pente douce, à allure faiblement concave. Leur pente varie en fonction du calibre des sédiments qui les constituent et des caractéristiques des vagues qui y déferlent. Le profil est abrupt quand les sédiments sont grossiers (Faye, 2010 in Nadir, 2016).

Dans le détail, on distingue, vers l'amont, l'arrière-plage (Back-shore) partie de la plage qui est sujette à l'action des vagues uniquement durant les tempêtes. En absence de tempête le sable peut être remobilisé par les facteurs éoliens.

Vers la mer, la plage subaérienne (l'estran, espace intertidale ou fore-shore) soumise à l'action des vagues pendant les conditions non-tempétuelles est subdivisée en trois parties (Fig. 3) :

- Haut de plage : sous forme de bourrelets, qui sont dus à l'accumulation des matériaux par les mers les plus hautes ;
- Moyenne plage : marquée par une ligne de réflexion à partir de laquelle la pente diminue brusquement.
- Bas de plage : submergé à chaque marée. Sa partie avale montre parfois une alternance de bancs surbaissés et de gouttières ou bâches.
- Et enfin, l'avant-plage (near-shore) constamment immergée, elle est accidentée de barres et de rides, qui sont parallèles et parfois obliques au trait de côte. Ces dernières

se forment quand la pente est douce et les sédiments abondants. Des sillons pré-littoraux se retrouvent également dans cette partie avant plage.

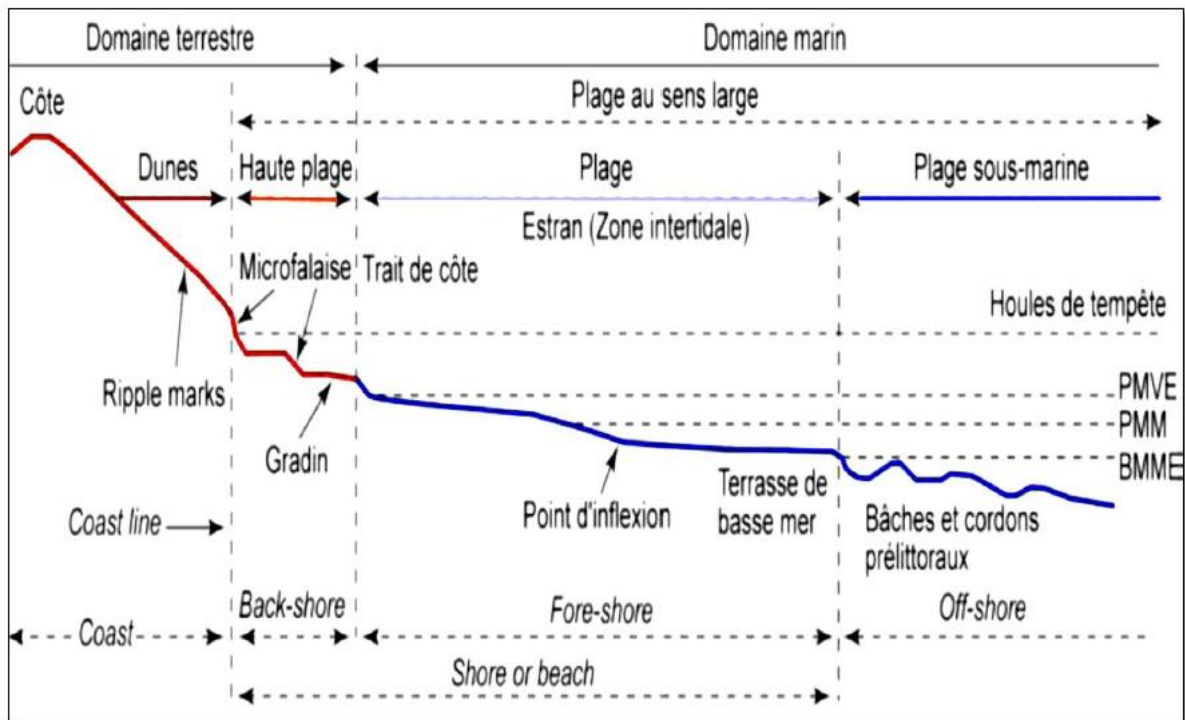


Figure 03 : Profil général d'une côte sableuse (Faye, 2010).

2. Processus hydrodynamiques

L'activité hydrodynamique marine est un phénomène très complexe qui nécessite la connaissance de plusieurs paramètres physiques (Remmache ; Bachri et Houma, 2020).

a. Les vagues

Les vagues sont des ondes de gravité qui se propagent généralement au niveau de la surface de la terre, la figure 04 permet de représenter les différents paramètres d'une vague. Les principaux paramètres des vagues sont :

- La hauteur H
- La période T
- La longueur d'onde λ
- Nombre d'onde K

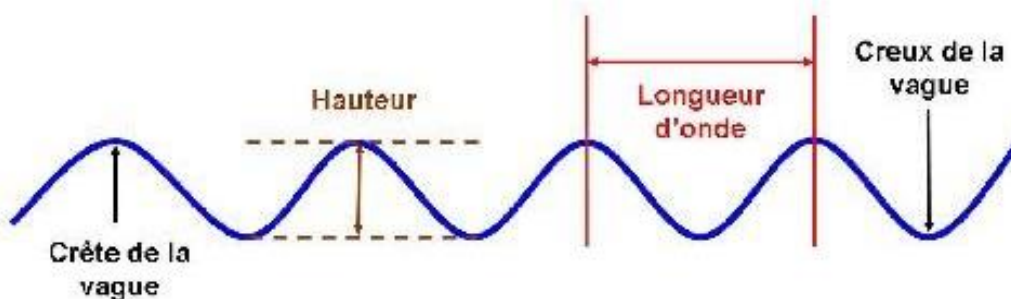


Figure 04 : Représentation des paramètres caractéristiques des vagues.

b. La houle

La houle définie par (Guicher, 1979) comme un système de vagues plus ou moins réguliers, dans lequel la hauteur est relativement faible par rapport à la longueur d'onde et qui se propage dans la mer hors de la présence du vent qui en a été la cause initiale (in Bouzeroua et Houa, 2018).

Connaitre et prévoir les caractéristiques des vagues lors de leur propagation vers la côte est un besoin important pour les activités marines, en particulier la protection côtière, afin de dimensionner un ouvrage tel qu'une digue. Différentes théories de houle ont été établies grâce à des fonctions mathématiques pour expliquer et calculer les houles régulières. Il est important de préciser que la surface de la mer est beaucoup plus complexe et aléatoire du fait de son caractère non linéaire. Cependant, différents modèles mathématiques de la houle ont été établis dès le XIX siècle par Airy (1845) et Miche (1944) (in Safari et Imam, 2006).

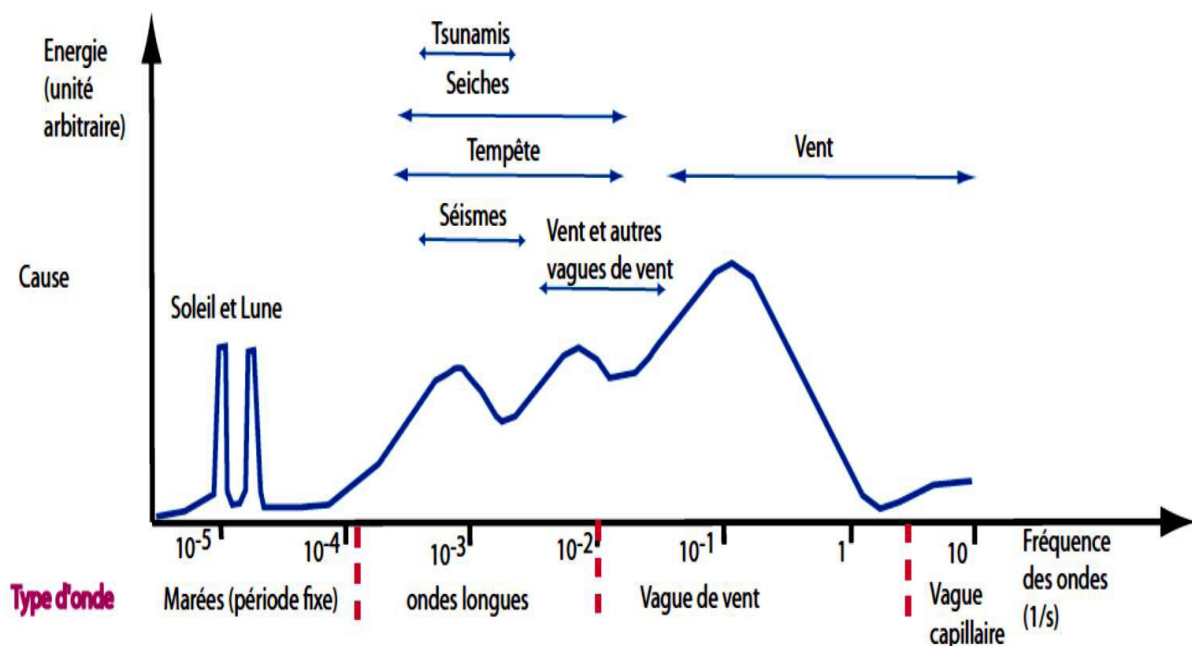


Figure 05 : Types d'ondes de surface, montrant la relation entre les fréquences, la cause de leur génération et la quantité d'énergie de chaque type (Denamiel, 2006).

2.b.1 Grandeurs physiques et caractéristiques de la houle

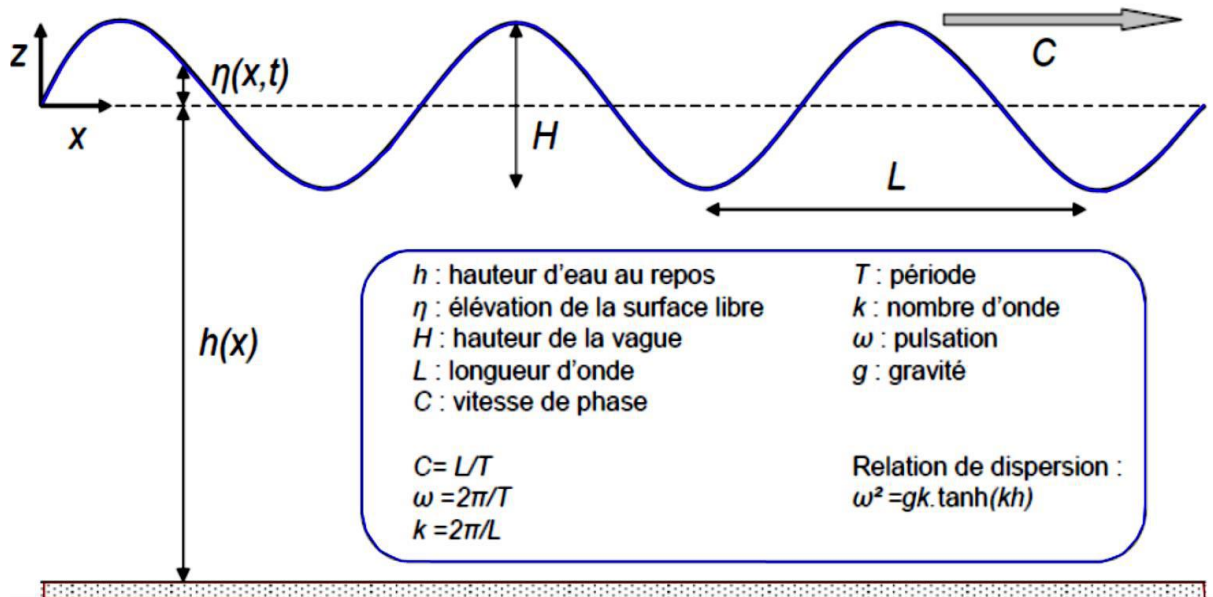


Figure 06 : Représentation des grandeurs caractéristiques des vagues (Grasso, 2009 in Nadir, 2016).

2. .b.2 Mécanismes générateurs de la houle

• Le vent

Le processus selon lequel les vagues sont créées par le vent est le suivant :

- ✓ Il faut un minimum de vent (environ 1 m/s) pour qu'un champ de vagues apparaisse ;
- ✓ De petites vagues se forment alors, au fur et à mesure que le vent s'intensifie ; ce sont des ondes de haute fréquence, avec une courte longueur d'onde et une faible amplitude;
- ✓ Après un temps suffisant, le spectre des vagues est pleinement développé et ne varie plus beaucoup. Sa fréquence dominante est celle du vent et il faut attendre d'autant plus longtemps pour atteindre cet état quasi-stationnaire que le vent est plus fort.

Les vagues grandissent selon le fetch, la vitesse et la durée du vent. Elles continuent de grandir tant que sa célérité d'onde ne dépasse pas celle du vent. Dans le cas contraire, elle déferle au large en « mouton » (Wright et al, 1999).

2 . b.3 Mécanismes modificateurs de la houle

• Les courants

Parmi leurs effets, les courants ont la capacité de réfracter les vagues. Ainsi, les variations de courant modifient la vitesse de phase des vagues et induisent une réfraction. La direction de propagation est alors modifiée et n'est plus perpendiculaire aux crêtes mais s'oriente parallèlement au courant. La forme des vagues est aussi modifiée. Les courants peuvent aussi bloquer les vagues lorsque leur direction de propagation est opposée à la direction des courants, et quand l'intensité du courant est supérieure à leur vitesse de groupe. Les vagues sont alors stoppées (Nadir, 2016).

• Frottement sur le fond

L'effet de la friction au fond est plus complexe car elle dépend de la nature du fond, généralement variable et dont la topographie à l'échelle de quelques mètres est façonnée par l'action des vagues. Le frottement au fond affecte les vagues seulement lorsqu'elles sont en eau suffisamment peu profonde (dès que la vitesse n'est pas nulle au fond). Cela implique que le frottement agit de façon préférentielle sur les basses fréquences du spectre d'énergie (Briere, 2005).

c. La marée

La marée est connue de façon assez précise déjà depuis longtemps et les théories élaborées pour analyser ce phénomène ont permis d'établir des annuaires donnant, avec une approximation souvent suffisante, les prévisions de son amplitude pour chaque jour en de nombreux points du globe (Jacques Viguier, 2011).

Dans les côtes algériennes, l'amplitude de la marée n'est pas importante, le marnage est de l'ordre de 20 à 30 cm en pleine lune et de 5 à 15 cm en nouvelle (Amarouche, 2015).

d. Les courants

Les courants sont des déplacements des masses d'eau, caractérisés par une vitesse, une direction et un débit précis.

Les courants généraux sont formés (**Chapon, 1984**) :

- Par des forces extérieures au milieu marin (vents) ;
- Par des forces intérieures du milieu marin (différence de salinité ou de température à l'intérieur de la mer).

Les courants sont responsables de la dynamique des sédiments et contrôlent les processus d'érosion, de transport et de sédimentation.

2 .d.1 Types des courants

• Courant de dérive littorale

Lorsque la houle arrive à la côte avec une certaine obliquité elle donne naissance à un courant parallèle au rivage, le plus souvent désigné sous le nom de dérive littorale, situé entre les lignes de déferlement et le trait de côte. Ce courant joue un rôle très important dans l'évolution des rivages, en particulier quand il s'agit de plages.

La vitesse de la dérive littorale n'est pas facile à calculer. Il existe cependant des formules qui permettent de faire des estimations comme celle de Cartier (2011).

• Courant de retour

L'apport d'eau à la cote, du au déferlement qui transforme les vagues d'oscillation en vagues de translation, doit logiquement être compensé par un retour d'eau vers le large, produisant un courant qui se manifeste près du fond dans l'espace infralittoral et auquel on donne parfois le nom de récurrent ou encore courant d'arrachement. Il est perpendiculaire à la cote lorsqu'il naît de la rencontre de deux dérives littorales de sens opposé. Mais ils sont le plus souvent obliques (Senechal, 2003).

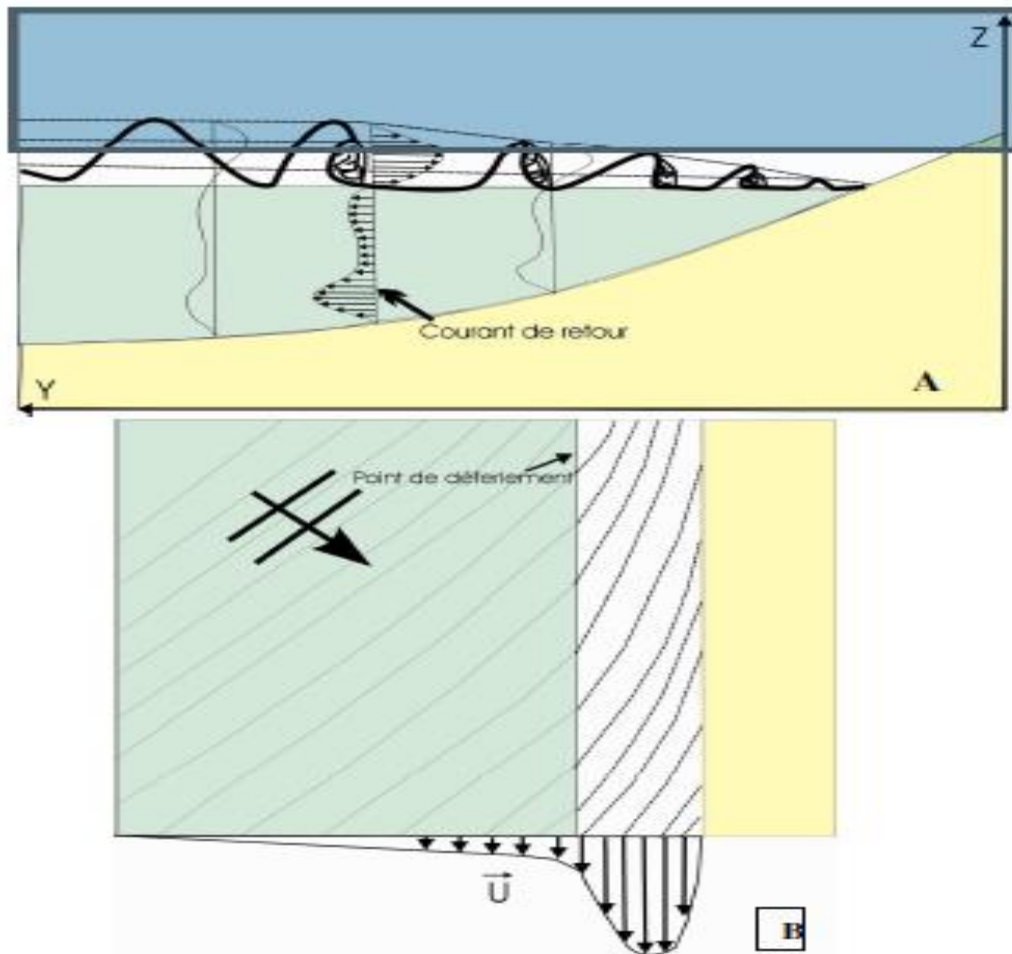


Figure 07: Schématisation du courant de retour : A/vue de profil sur une plage de pente homogène B/ vue plan (Amrouni, 2008).

3 La dynamique sédimentaire

La dynamique sédimentaire du système littoral est soumise aux actions conjuguées marines et terrestres. Le bilan sédimentaire est la résultante des apports et des exports des flux sédimentaires de la côte. La compréhension des facteurs qui contrôlent la dynamique sédimentaire est indispensable pour une meilleure connaissance de l'évolution du système littoral. Plusieurs agents contribuent à l'équilibre de la côte dont (Béji, 2020) :

3 .1 L'érosion côtière

L'érosion littorale provoque un recul du trait de côte sous l'action des vagues qui viennent déferler sur la côte. Cette action est variable en fonction de :

- La nature géologique du site, géomorphologie (plage, falaise...) et la présence d'ouvrage de protection,
- La fréquence des houles à fort potentiel énergétique
- L'orientation des houles dominantes à la côte qui agit sur la mise en place d'un courant de dérive littorale.

De manière générale, l'érosion marine est plus importante en période hivernale avec des forts coups de vent et tempêtes provoquant un déferlement plus important des vagues sur le littoral.

3. 2 Transport sédimentaire

De nombreux processus contrôlent le transport sédimentaire. Parmi ces processus on peut citer l'intensité et la structure des courants dans la colonne d'eau. Les variations des vitesses couvrent une gamme d'échelle temporelle très large en zone côtière. Ainsi, les sédiments vont être transportés au gré du mouvement orbital des vagues, des courants moyens (courant de retour sagittal ou de dérive), ou encore des ondes longues. A cela s'ajoute la turbulence induite par le déferlement qui peut favoriser la remise en suspension des sédiments.

3. 3 Approche de la dynamique sédimentaire par la granulométrie

L'analyse granulométrique nous permet de connaître la constitution fréquentielle des différentes fractions qui composent le stock sédimentaire d'une part et de définir les paramètres de la dynamique (mouvement) des sédiments (zone d'accumulation, zone d'érosion, sens du transit sédimentaire).

4 Emprise humaine et modification du trait de côte

Le littoral est depuis toujours le lieu privilégié d'installation de ports, de villes et d'activités industrielles et économique. Ces pressions humaines causent de profondes perturbations du rivage et des écosystèmes littoraux. Ces perturbations agissent conjointement et placent les plages dans une situation précaire. A titre d'exemple, on peut citer :

- **La littoralisation de la bande côtière** qui accélère le phénomène de l'érosion côtière tout en augmentant le déficit sédimentaire.
- **La construction des barrages en amont des Oueds** qui réduit considérablement les quantités de sédiments charriés.
- **La dégradation du couvert végétale** qui favorise le départ des sédiments des dunes vers l'arrière-pays par des agents aériens tel que le vent.
- **La fréquentation humaine** qui impacte les cordons dunaires. Elle détruit la végétation ou empêche son développement et expose le sable à l'action du vent. De même l'extraction des matériaux modifie les échanges sédimentaires.

5 Changement climatique

Les changements climatiques actuels accompagnés de l'élévation du niveau des mers accéléré constituent un véritable risque menaçant les zones côtières. Leurs impacts vont aggraver les tempêtes de mer ainsi que les risques d'inondations et de submersions des côtes basses. Le changement climatique pourrait non seulement augmenter les événements extrêmes les plus menaçants (par exemple, par l'augmentation fréquence des tempêtes), mais aussi aggraver les effets physiques à long terme, tels que la hausse du niveau moyen de l'eau, l'érosion des côtes, le déficit de sédiments, eau salée dans les nappes côtières et la perte des zones humides côtières (Bijlsma et al. 1992) (in Mansoum et Benali, 2016).

Compte tenu de ces risques existants et les risques croissants dans les zones côtières, il ya un grand besoin de gagner autant de perspicacité que possible dans la nature exacte et l'ampleur des augmentations possibles du risque lié à l'élévation du niveau de la mer et les tendances

futures du climat sur les milieux géophysiques, ainsi que les menaces qui pèsent sur la société humaine.

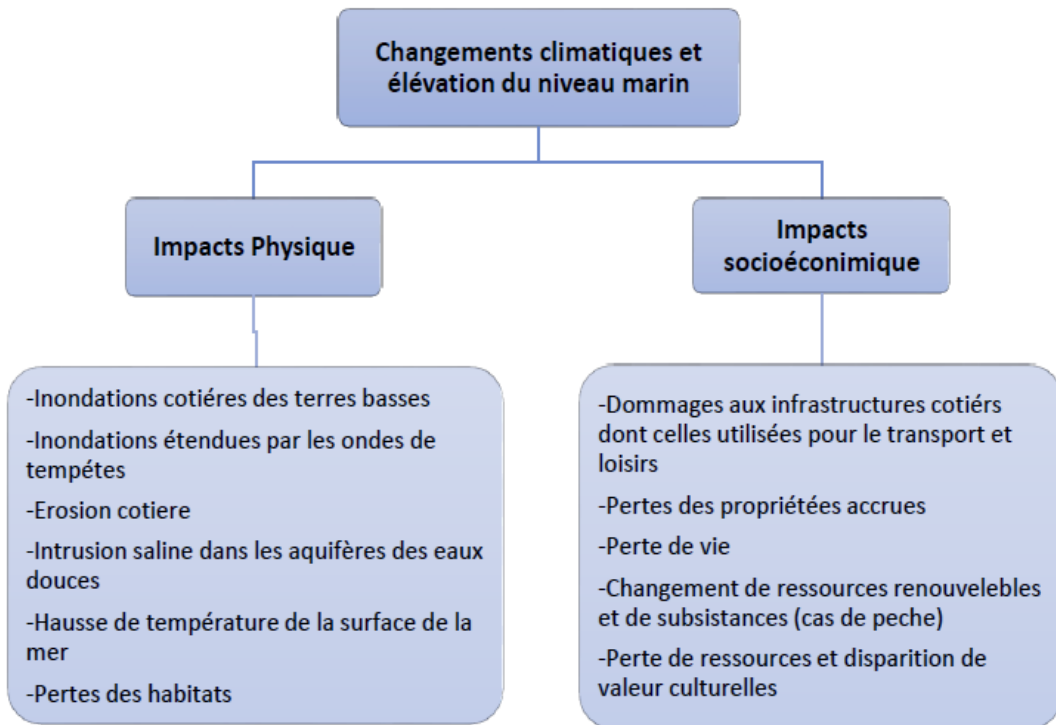


Figure 08 : Impacts potentiels des changements climatiques sur la zone côtière (McLaughlin et al. 2001, Modifiée).

6 Les variations du niveau de la mer

Il est admis que ni le niveau du sol, ni celui de la mer ne sont permanents. Il existe des mouvements verticaux de l'écorce terrestre, associés aux variations des glaciations et à d'autres processus tectoniques. Cependant, les changements actuels du niveau moyen de la mer sont liés essentiellement à ceux du volume d'eau dans les océans et aux variations des courants océaniques.

Les études modernes relatives au niveau de la mer ont des implications sur les problèmes des transports maritimes, de l'érosion côtière et sur les projets d'ouvrage et de défense contre les inondations (Mansoum ; Benali, 2016).

7 Risque

Le risque est un dommage résultant d'une exposition à un danger (Izambart, 2011). Lorsqu'il se matérialise on parle alors d'accident, si l'ampleur des dommages causés dépasse un certain seuil de tolérance, il s'agit alors d'une catastrophe (Roche, 2009)



Figure 09: Définition du risque.

8 Adaptation

En général, l'adaptation fait référence à la capacité d'un organisme, d'un système ou d'une entité à s'ajuster, à réagir ou à se modifier pour faire face à des changements ou à des conditions nouvelles. Cela implique de prendre des mesures appropriées pour faire face aux défis, aux pressions ou aux perturbations de l'environnement afin de maintenir le fonctionnement et la viabilité.

Dans le domaine du littoral, l'adaptation se réfère à la capacité des écosystèmes côtiers, des communautés humaines et des infrastructures à s'ajuster et à répondre aux changements physiques, environnementaux et socio-économiques qui se produisent le long des zones côtières. Les systèmes côtiers sont soumis à des pressions croissantes, telles que l'élévation du niveau de la mer, l'érosion côtière, les tempêtes plus répandues et intenses, la perte d'habitats et les impacts du changement climatique.

L'adaptation dans le domaine du littoral vise à trouver un équilibre entre la protection des écosystèmes côtiers, la préservation des services éco systémiques qu'ils fournissent, la sauvegarde des moyens de subsistance des populations locales et la réduction des risques associés aux événements extrêmes et aux changements environnementaux. L'objectif ultime est de favoriser la durabilité et la résilience des systèmes côtiers dans un contexte de changement continu.

Chapitre II: zone d'étude

Ce chapitre porte sur le contexte général de notre zone d'étude, la baie d'El Djamila. Il a pour objectifs ; en premier lieu d'aborder la situation géographique de la baie d'El Djamila, ensuite de présenter ses différentes caractéristiques : géomorphologiques, géologiques, sédimentologiques, climatiques, hydrographiques et hydrodynamiques.

1. Situation géographique

La baie d'El Djamila se situe à une trentaine de kilomètres à l'ouest d'Alger, elle représente le quart oriental de la baie de Bou Ismail. C'est une baie relativement fermée, limitée à l'ouest par la presqu'île de Sidi Fredj et à l'est par Ras Acrata (Figure 11). Son rivage est orienté SO– NE et ses coordonnées géographiques sont :

$E2^{\circ}50'54.744''$ et $N36^{\circ}45'43.092''$ (port de Sidi Fredj),

$E2^{\circ}53'42.792''$ et $N36^{\circ}48'5.796''$ (Ras Acrata).



Figure 10: Situation géographique de la baie d'El Djamila.

2. Cadre géologique

Le domaine terrestre de notre zone d'étude est formé de terrains sédimentaires du Quaternaire et du Néogène qui constituent le sahel d'Alger. Les massifs de bordures, Ras Acrata et Sidi Fredj sont formés de terrains métamorphiques plus anciens (Fig. 12).

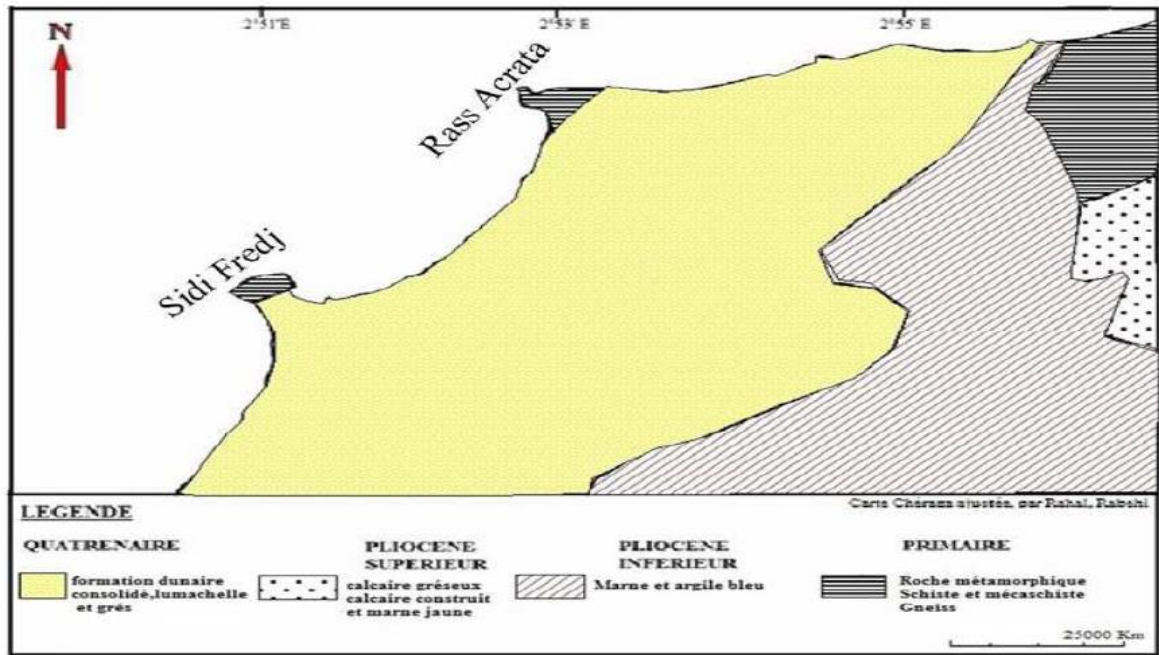


Figure11 : La géologie de la baie d'El Djamilia. (in Rabehi et Rahal, 2011).

3. Topographie marine

La baie d'El Djamilia se caractérise par une topographie sous marine à une pente douce régulière d'ouest en est, avec un fond de nature sableuse. La topographie est généralement uniforme, mais on distingue la présence de deux fosses dans la partie Est de la baie entre les profondeurs 15 à 19m et 18 à 22m (Anayat, 2010). Cependant, aux niveaux des zones rocheuses, les pentes sont abruptes.

La présence des petits hauts fonds reflète l'existence des dunes hydrauliques entre 14 et 15 m de profondeur (Anayat, 2010).

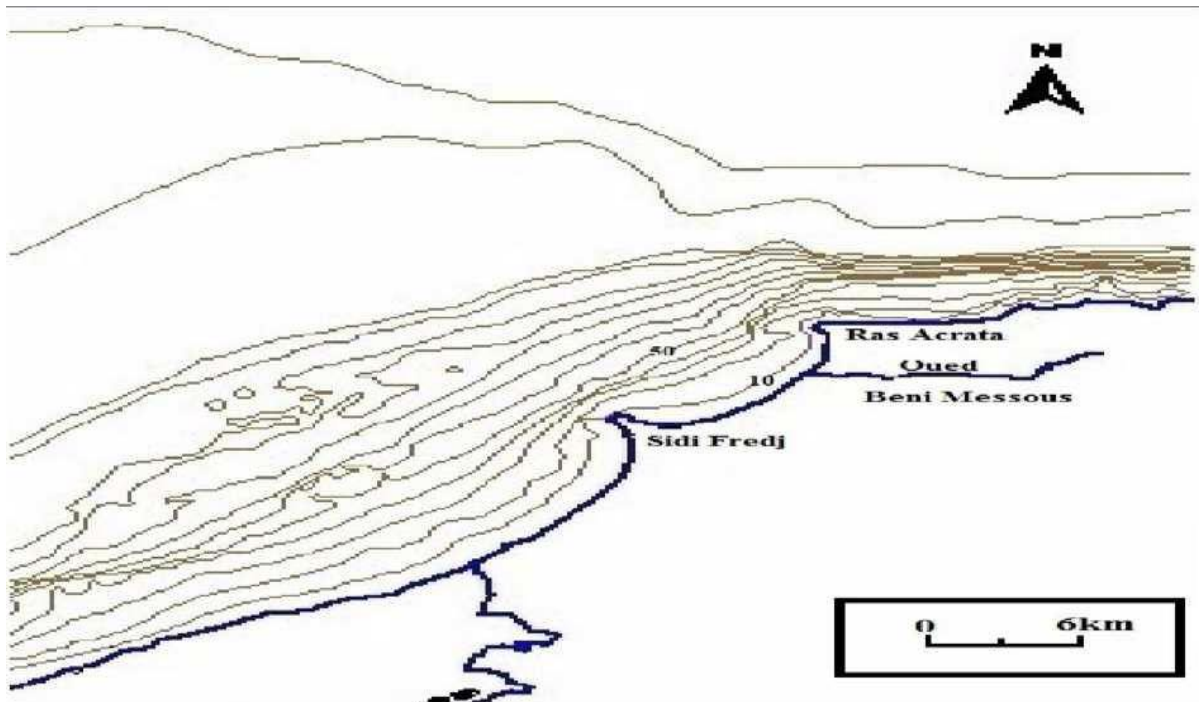


Figure12: Topographie de la baie d'El Djamilia (Leclaire 1972).

4. La géomorphologie

La baie d'El Djamilia est caractérisée par des dunes actuelles, des alluvions récentes des sables argileux et des graviers actuels qui bordent toutes la côte (Ayme, 1960).

A l'arrière, de dunes fossiles (consolidées), des dépôts lacustres, des travertins et des dunes lapidifiées caractérisent le Pleistocene.

Le platier rocheux qui borde la baie d'El Djamilia réapparaît vers l'est après le franchissement de l'Oued Béni Messous et se relie au cap de Rass Acrata (Rabehi et Rahal, 2011). En effet, les deux massifs rocheux qui bordent la baie d'El Djamilia sont de nature gneissique.

5. La sédimentologie

On se référant à l'étude sédimentologique effectuée par le LEM en 1995, la dynamique sédimentaire dans la région d'El Djamilia (Fig. 14) est animée essentiellement par :

- La dérive littorale due aux houles de l'Ouest.
- Le courant de retour provoqué par les houles Ouest-Nord-Ouest d'incidence frontale.
- Les houles Ouest-Nord-Ouest qui engendrent un courant de retour. Les houles vont reprendre les sédiments déposés latéralement et les déposer vers le large.
- Les houles de direction Ouest-Nord-Ouest sont les houles qui ont le plus d'impact sur le site.
- La dérive littorale due aux houles de l'ouest transporte les sédiments vers l'est.

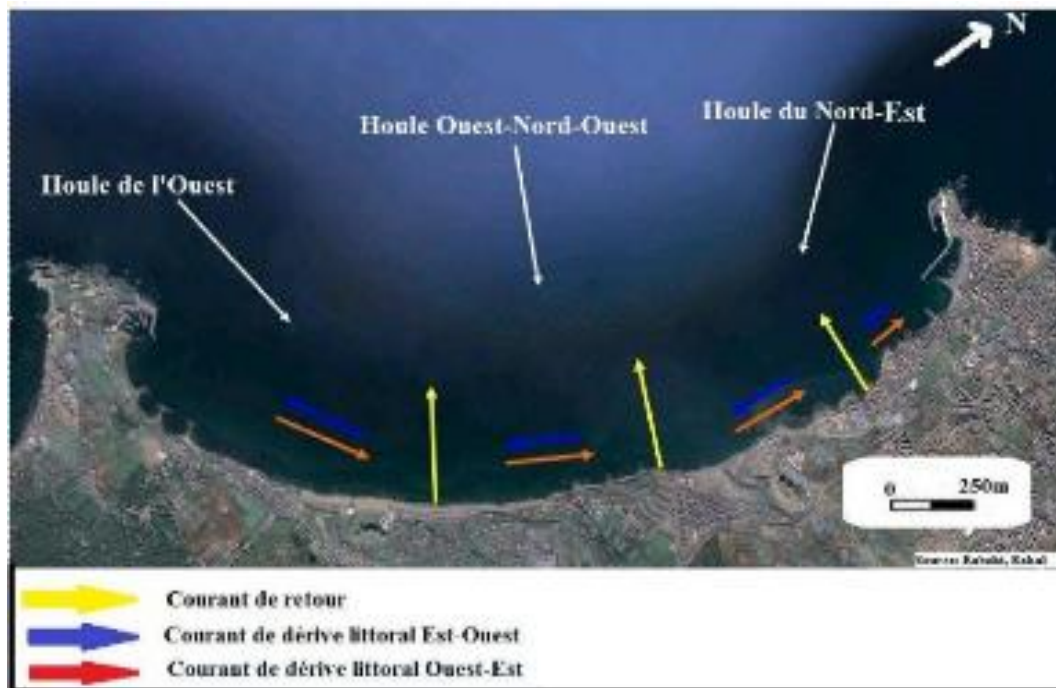


Figure 13: Transit sédimentaire dans la région d'El Djamila. (Rabehi et Rahal, 2011).

6. Dynamique sédimentaire

La dynamique sédimentaire est la résultante d'actions hydrodynamiques (ou fluides) et solides, réagissant l'un sur l'autre (Broman et al. 1988). Son équilibre est très sensible à tout changement pouvant entraver son processus. On note la dominance du sable grossier surtout au voisinage du port d'El Djamila, ces sédiments sont bien classés (AlSid ChiKh et al. 2009).

Au niveau de la côte à l'est du port d'El Djamila, le dynamisme est important, provoqué par l'intensité des houles de l'Ouest, Nord-Ouest et Ouest-Nord-Ouest.

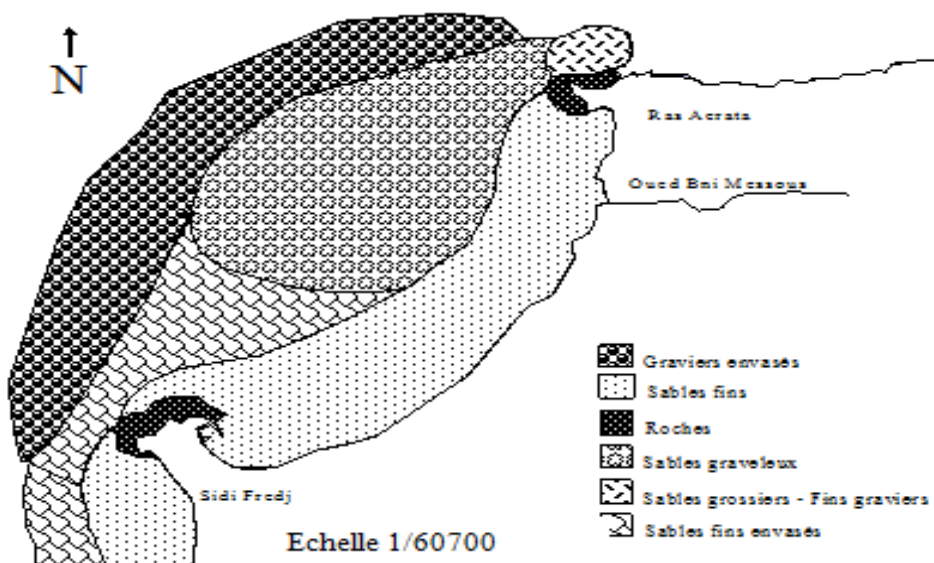


Figure 14: Répartition sédimentologique de la baie d'El Djamila (Campagne 2006 ; in Rabehi et Rahal, 2011).

7. Données océanographiques

La zone côtière est soumise à des forçages répétitifs par des agents hydrodynamiques (la houle, le courant, la marée et le vent). Ces agents jouent un rôle très important dans la dynamique sédimentaire du littoral, construction, destruction des littoraux (reculé ou avancé).

7.1. Les houles

C'est un paramètre hydrodynamique qui dépend directement des vents et joue un rôle important dans la zone de déferlement (Belaidi et Hamdous, 2016).

En hiver les houles les plus importantes et les fréquences observées viennent de l'ouest avec les plus grandes amplitudes entre 2 et 2.5m, elles représentent 10% à 30% des houles. Les houles maximales peuvent atteindre les 4 à 6 mètres. Deux autres directions de provenance de houles dominantes s'ajoutent à la direction ouest principale en hiver; ce sont les houles de NE et de NNE.

En été, les directions des houles les plus dominantes sont originaires du secteur ENE et NE avec une fréquence moins importante et des amplitudes généralement plus faibles, de 0.5 à 1m, elles représentent 10% à 20%.

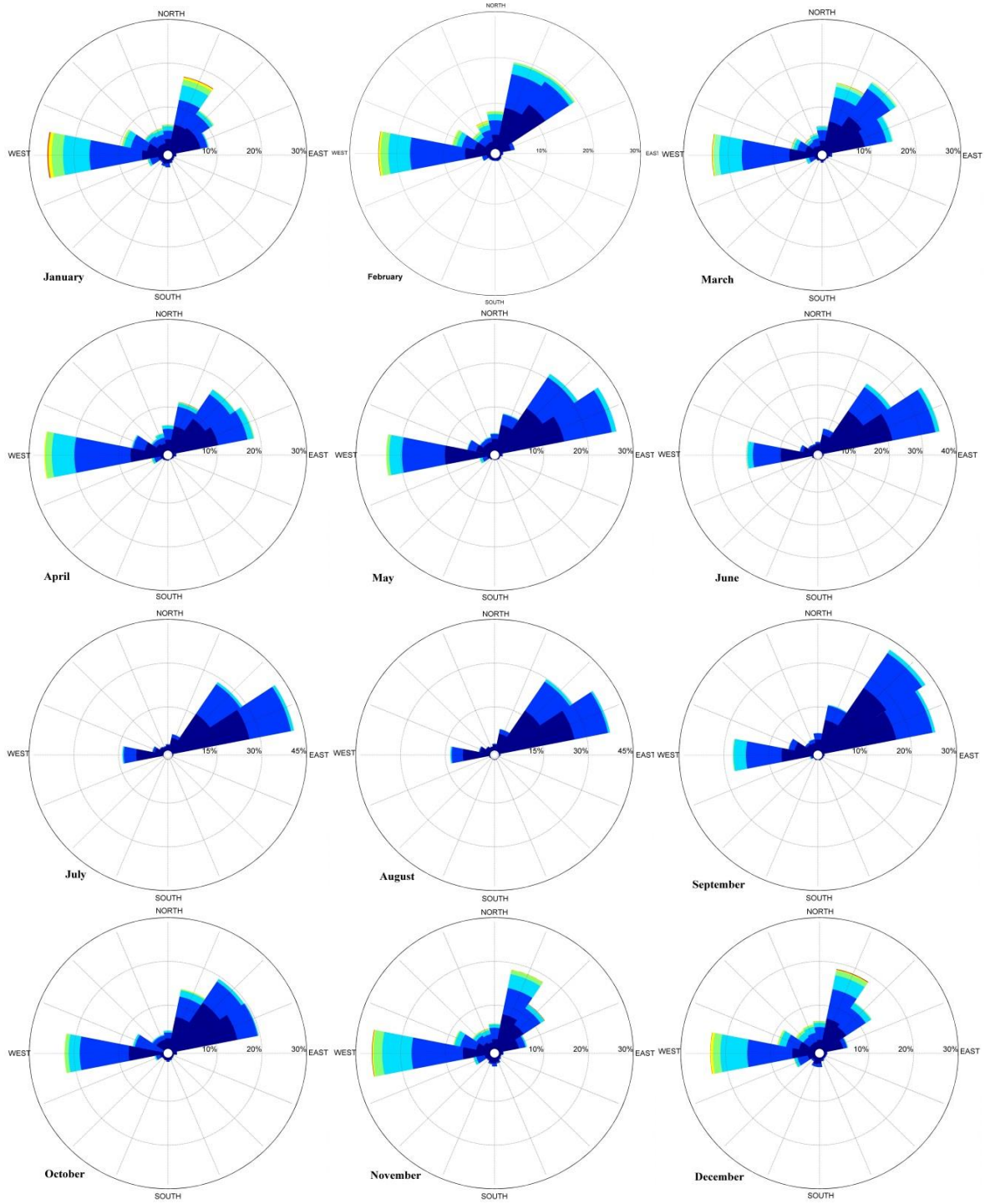


Figure 15: Roses mensuelles des houles au large d'El-Djamila entre 1972 à 2021.

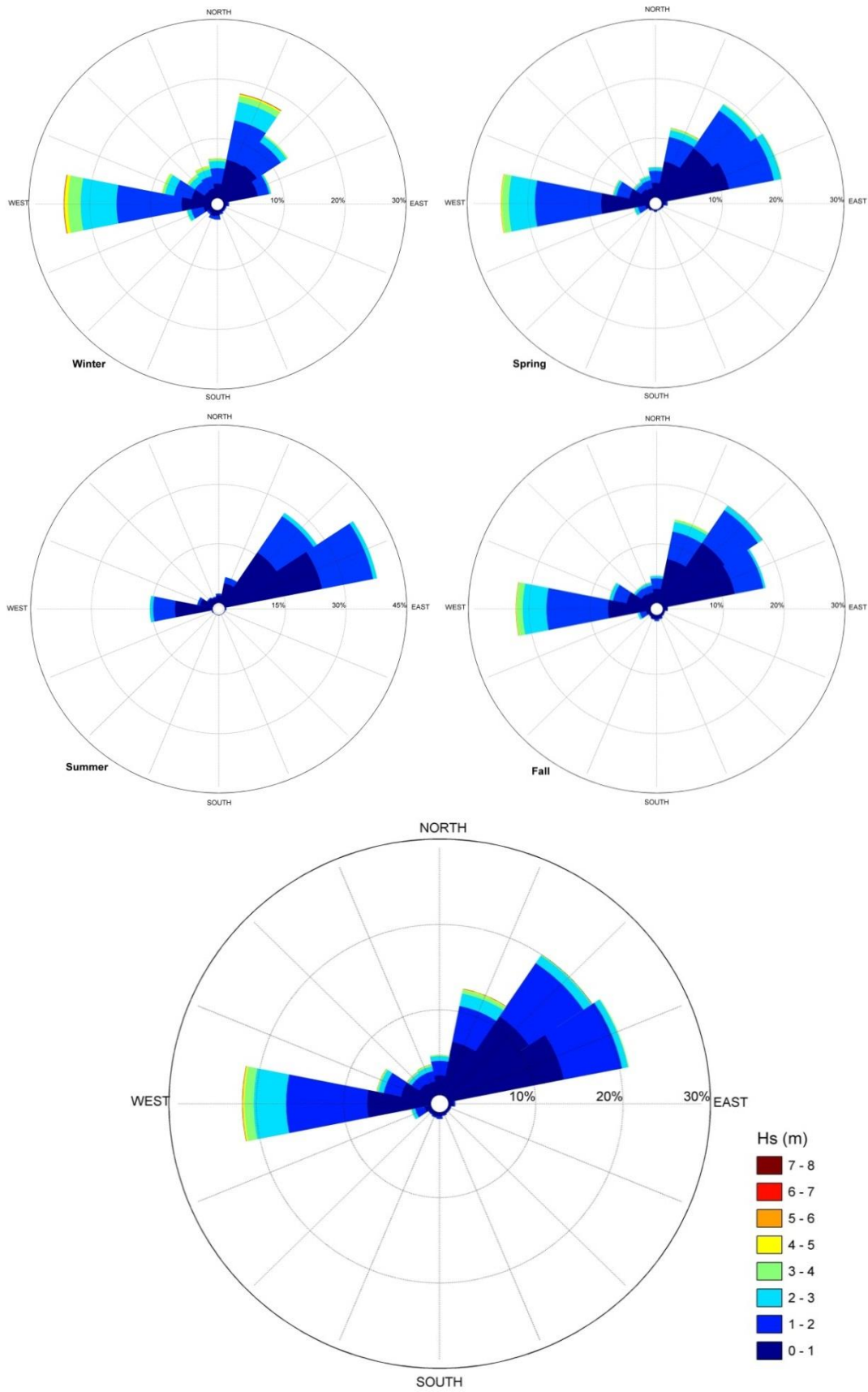


Figure 16: Roses saisonnières et totale des houles au large d'El-Djamila entre 1972 à 2021.

7.2. Les courants

Le long des côtes algériennes, les courants sont relativement faibles et ne constituent pas un facteur déterminant pour le fonctionnement des ouvrages littoraux (Oukazi, 1993).

Les informations compilées au cours des observations enregistrées au large par l'institut météorologique Royal Néerlandais indique que les courants ont une vitesse inférieure à 0.5 nœud pendant environ 75% et à un nœud pour 80% du temps (Benrahmoun et Berakane, 2015).

8. Données climatiques et météorologiques

La détermination des caractéristiques du climat est très importante pour mieux contraindre les régimes hydrodynamiques qui contrôlent les fonds marins et la côte de notre zone d'étude. Les données météorologiques et climatiques sont d'un intérêt certain pour la compréhension des mouvements de la mer, notamment des houles. Ces dernières dépendent exclusivement des vents, car ils sont générateurs des vagues et des courants superficiels. Le climat du Nord algérien est méditerranéen subhumide, caractérisé par des hivers humides et froids, et des étés chauds et secs. La période allant de l'automne au printemps est pluvieuse, les vents humides en provenance de la mer sont à l'origine des pluies. L'Algérie a connu un changement climatique, perceptible par la variation de la température et de la pluviométrie lors des 30 dernières années, qui s'inscrit dans le phénomène du réchauffement climatique globale que connaît la Terre.

a. Les vents

Le vent est le mouvement de l'air à grande échelle dans l'atmosphère terrestre. Il est causé par des différences de pression atmosphérique et des variations de température à travers la surface de la Terre. Lorsque la pression atmosphérique est plus élevée à un endroit par rapport à un autre, l'air se déplace des zones de haute pression vers les zones de basse pression pour équilibrer ces différences.

Ils sont le générateur des houles et de certain courant de surface, leur impact évolue proportionnellement avec leurs vitesses, ils jouent ainsi un rôle important dans l'évolution de la géomorphologie des côtes.

Les données des roses des vents ont permis de déterminer la fréquence d'apparition du vent par direction et par classe de vitesse à deux échelles ; annuelle et saisonnières et de tracer les roses annuelle et saisonnières des vents. (Fig. 17).

Dans la baie d'El Djamila, la répartition des vents est parfaitement liée au régime annuel des houles. Les données SSMO (Summary of Synoptic Meteorological Observation) au large d'Alger confirment l'existence de deux périodes distinctes des vents dans cette zone (in Bellahsene et Messaoudi, 2005).

La période hivernal est marqué par des vents dominants de direction générale ouest (OSO et O) et qui ont une fréquence de 60 à 88%. Les vents dominants ont une vitesse d'environ 21 à 24 m/s. Cependant, en été avec des vents dominants de direction générale est (principalement ENE mais aussi NE et E). Ceux du secteur Nord ont des fréquences de 45 à 75%. Les vents dominants ont une vitesse d'environ (12 à 15 m/s).

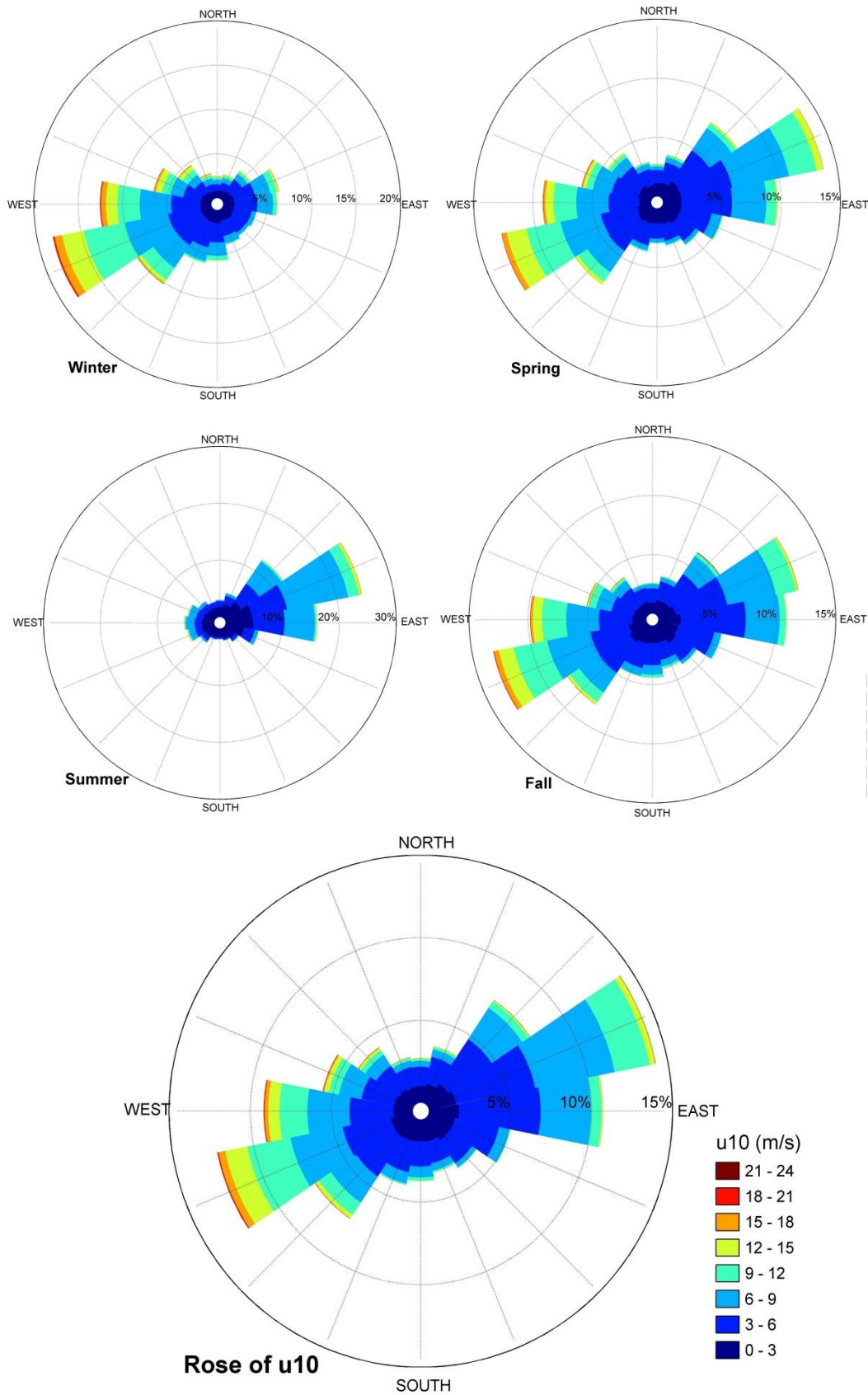


Figure17: Rose des vents au large de la cote de la Baie d'El-Djamila entre 1972 à 2021.

8.2. Température

La température moyenne la plus basse est celle du mois de janvier. Elle est égale à 11,89°C pour la période de 10 ans de 2000 jusqu'à 2010, alors que août est le mois le plus chaud avec une valeur environ de 29,14°C. Le mois de janvier est le plus froid avec une moyenne des minima de 5,3°C (Benrahmoun et Berakane, 2015).

8.3. Pluviométrie

En période hivernale la pluviométrie est relativement importante de (Benrahmoun et Berakane, 2015). De décembre à mai, se situant entre 15 et 108 mm.

En période estivale la pluviométrie est réduite, de juin à septembre avec une quantité variant entre 4 à 25 mm (ONM, in Haoua et Laloui, 2006).

**Chapitre III :
Modélisation
hydrodynamique**

Introduction

Le transport de sédiments non cohésifs dépend des mouvements d'eau générés soit par les courants, soit par les vitesses orbitales liées à la houle, soit le plus souvent par une combinaison de ces deux phénomènes. Afin de comprendre le fonctionnement hydro sédimentaire de la côte de Sidi Fredj, une modélisation bidimensionnelle de la propagation de la houle et de la courantologie est mise en œuvre.

Les estimations du transport sédimentaire doivent reposer sur des études analytiques de l'évolution du trait de côte prenant en compte le régime des houles et des courants dans le secteur d'étude à long terme. Une carte bathymétrique du secteur étudié est également indispensable, elle constitue une donnée de base pour cette étude hydro sédimentaire (Benallou, 2020).

L'objectif principal de ce chapitre est de reconstituer le climat hydro-sédimentaire qui domine la zone d'étude dans une échelle de temps précise, en appliquant un modèle numérique, afin de donner quelques éléments de réponse à la problématique posée qui est la détermination de l'état de vulnérabilité de la zone d'étude. Cette partie du travail s'articule en trois étapes complémentaires qui sont:

- En premier lieu récolter des données nécessaires pour la simulation, en plus d'une étude bathymétrique, qui est une étape basique pour parvenir à une modélisation hydro- sédimentaire ;
- En deuxième lieu déterminé des modules intégrés dans un système de modélisation, dans notre cas les trois modules du modèle Mike21 (SW, HD et ST), ont été appliqués, en fonction de nos besoins dans l'objectif d'avoir un aperçu hydro-sédimentaire de la zone.
- En dernier lieu une présentation et interprétation des résultats issus des différentes simulations sous le Mike21.

1. Présentation des logiciels utilisés pour la bathymétrie

Mike Zéro

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).

Mike 21

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 (DHI 2014).

MIKE 21 est un produit modulaire, il comprend des moteurs de simulation destinés à un très large éventail d'applications. Celles-ci incluent la modélisation des flux de marée, des ondes

de tempête, de l'advection-dispersion, des déversements d'hydrocarbures, de la qualité de l'eau, du transport de boue, du transport de sable, des perturbations portuaires et de la propagation des vagues (DHI 2014).

Outre les outils de simulation, MIKE 21 comprend des outils de productivité pour préparer la saisie et l'interprétation ainsi que la présentation des résultats (DHI, 2014).

2. Les modules du Mike21

Dans le cadre de ce travail, trois modules ont été utilisés :

- Mike 21 HD (Hydro-Dynamic);
- Mike 21 SW (Spectral Wave);
- Mike 21 ST (Sand Transport).

2.1 Le module hydrodynamique : Mike21 HD (*Hydro-Dynamics*)

La modélisation des courants induits par la marée et les vagues (courants littoraux) repose sur le module FM (Flexible Mesh) de MIKE 21.

Ce module utilise un maillage flexible aux volumes finis qui permet d'augmenter la résolution de la bathymétrie dans les zones d'intérêt. Celles-ci sont modélisées à l'aide d'un maillage relativement fin tandis que les champs éloignés sont modélisés avec un maillage plus grossier, permettant ainsi d'optimiser les temps de calculs.

Dans le cas présent, d'après les niveaux de marée imposés aux limites de la zone modélisée, le module fournit les valeurs de niveaux et de vitesses d'écoulement intégrées sur la verticale en chacun des points de maillage de la bathymétrie. Le module intègre également les contraintes de radiation dues aux vagues (calculées à l'aide du module SW - voir section suivante), qui permettent de superposer les courants littoraux aux courants de marée (DHI, 2014).

2.2 Le module de vague spectrale : Mike SW (*Spectral Wave*)

La transformation des vagues du large à l'approche du littoral sous l'effet de la réfraction et du déferlement est simulée à l'aide du module SW (Spectral Waves) de MIKE 21.

Le module SW intègre les développements les plus récents pour la simulation de la génération et de la transformation des vagues en eaux profondes et côtières. Les simulations permettent de reproduire les phénomènes de réfraction, de dissipation par déferlement et/ou frottement sur le fond, de génération des vagues par le vent, d'interaction non linéaire entre les vagues et d'interaction vagues courants. 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 (DHI 2014).

2.3 Le module de transport des sédiments : Mike 21 ST (*Sand Transport*)

Le modèle *Mike 21 ST* est un modèle numérique qui calcule les taux de transport de sédiments non cohésifs (Sable) sur le fond et en suspension sous l'action combinée des courants et des vagues. Il combine donc le modèle hydrodynamique MIKE HD et le modèle de vague MIKE21-SW (DHI 2014).

Il offre deux formulations pour le calcul du transport sédimentaire : la formulation de Bijker (courants seuls) et la formulation SPT du DHI (courants et vagues).

Les taux de transport sont calculés (au choix) selon (I) une approche de plan bidimensionnel horizontal (2DH) dans lequel les taux sont calculés dans la direction du courant moyen, avec une composante transversale résultante de la pente du fond, ou (II) par la description quasi tridimensionnelle (Q3D) de l'hydrodynamique et du transport de sédiments qui résout.

Transport dans ses directions perpendiculaires et parallèles au courant, et au rivage, celles du déferlement des vagues.

Cette modélisation peut être appliquée à tous les endroits où les courants et les vagues déplacent le sable.

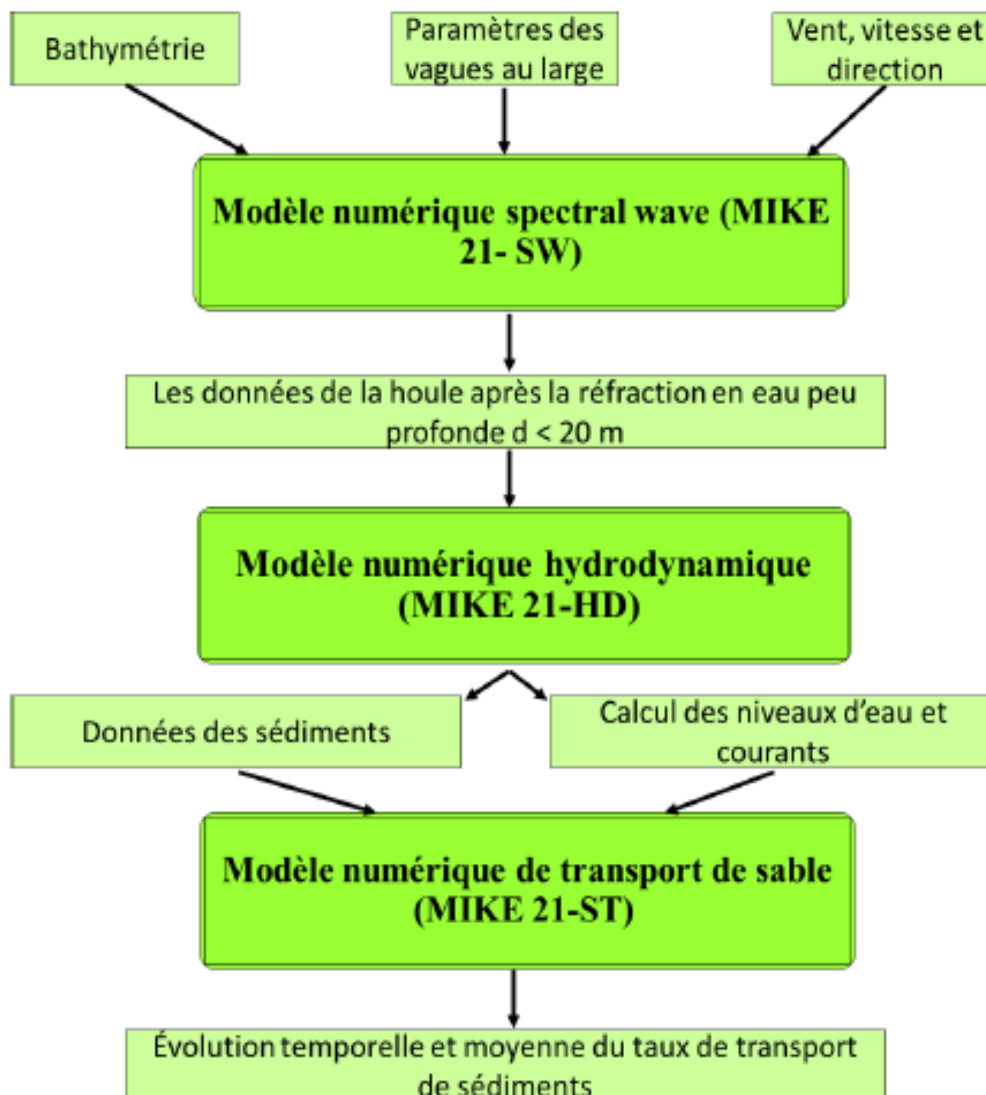


Figure 18: Schéma récapitulatif de l'approche méthodologique de la modélisation par les codes MIKE-21.

3. Les principales applications des modèles MIKE21/3

Les principales applications des modèles MIKE21/3 sont :

- Études et prévisions des courants et des marées.
- Études limnologiques dans les lacs.

- Conception et analyses des structures côtières et offshore.
- Aménagement et optimisation des ports et marinas en présence de vagues, courants à l'entrée et ensablement.
- Eaux de refroidissement, désaliénation et analyse de recirculation.
- Optimisation d'un diffuseur sous-marin d'eaux usées.
- Étude d'impact environnemental d'infrastructures marines.
- Modélisation écologique et choix de site de mariculture.
- Inondation des terres côtières et prévision des ondes de tempêtes.

4. La méthodologie

4.1 Etude bathymétrique

Les données bathymétriques sont cruciales pour étudier les processus hydro-sédimentaires. À titre d'exemples, les variations bathymétriques en zone littorale contrôlent les processus de levé et de déferlement bathymétrique des vagues (Castelle et al, 2016 in Pezerat, 2022).

La bathymétrie utilisée dans le cadre de ce travail est la combinaison de données de trois sources (Données du terrain, NAVIONICS et GEBCO). La bathymétrie de la baie a été obtenue par la digitalisation de la carte publiée par NAVIONICS SonarChart™, édition 2021 à l'échelle de 1/250000 avec une résolution qui varie entre 100 et 0,5m du large vers la côte.

Cette étude permet de créer une carte bathymétrique de la baie qui montre les contours sous-marins, les variations de profondeur et d'autres caractéristiques topographiques importantes.

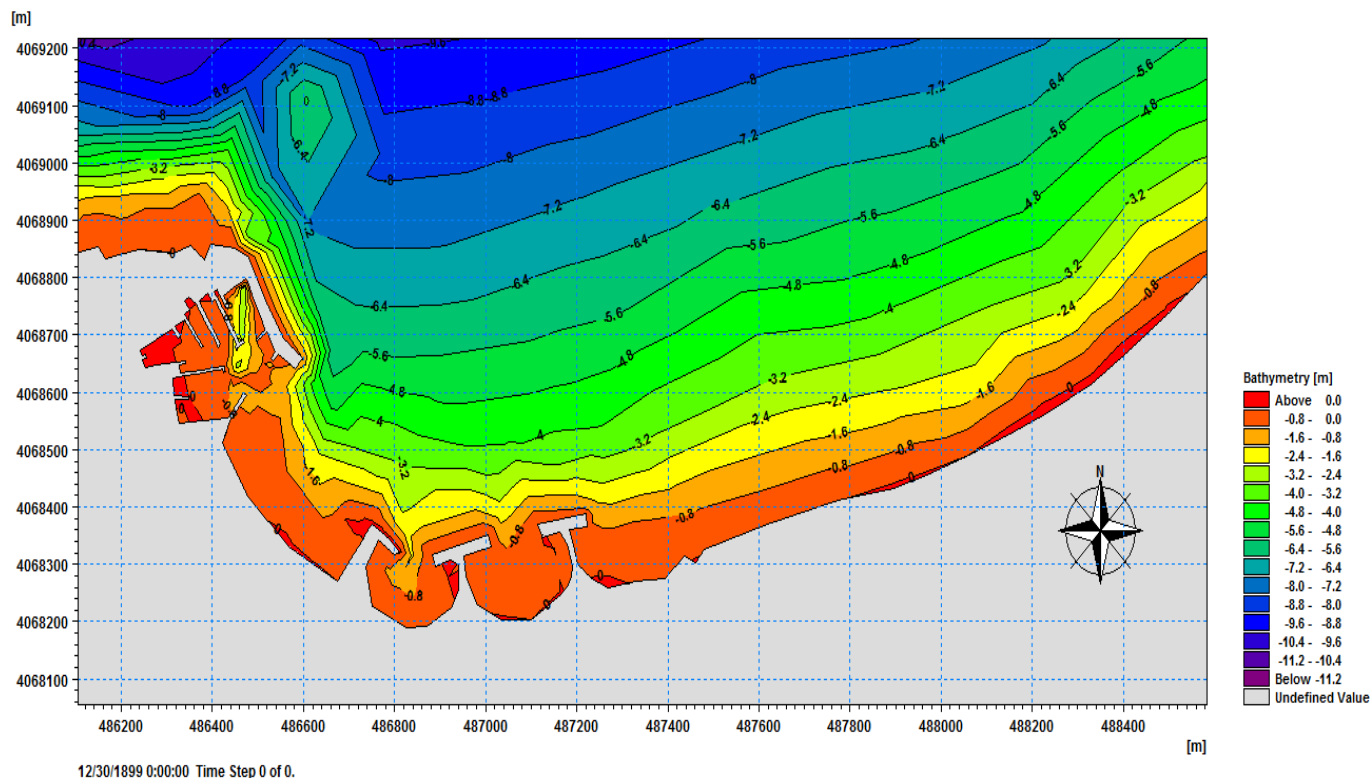


Figure 19: Carte bathymétrique de la zone de la baie d'El Djamilia (les plages Sidi Fredj).

4.2 Création de la bathymétrie 2D sous le maillage

La plateforme Mike Zéro nous offre la possibilité d'importation et visualisation des données bathymétriques sous un maillage souple bien déterminé (Mesh) à l'aide du module « MeshGenerator » qui à son tour offre un environnement pour la création, l'édition et la présentation de la bathymétrie numériques 2D détaillées sous le système de projection WGS84 UTM Zone31N.

Cette plateforme nous facilite le processus d'élaboration manuelle des données et leur présentation, des cartes graphiques ainsi que des images satellitaires peuvent être importées et superposées aux données bathymétriques pour une meilleure présentation à condition qu'elles soient géo référencées à l'aide de l'extension « Image Rectifier ». Plusieurs méthodes ont été destinées pour l'interpolation des valeurs de la bathymétrie (Krigging, Natural Neighbourhood...etc.).

Dès que la bathymétrie est prête, on peut utiliser les utilitaires d'exportation de données bathymétriques de sortie sous différents formats.

Le maillage est composé d'éléments triangulaires dont la taille a été ajustée suivant les évolutions bathymétriques et la précision souhaité.

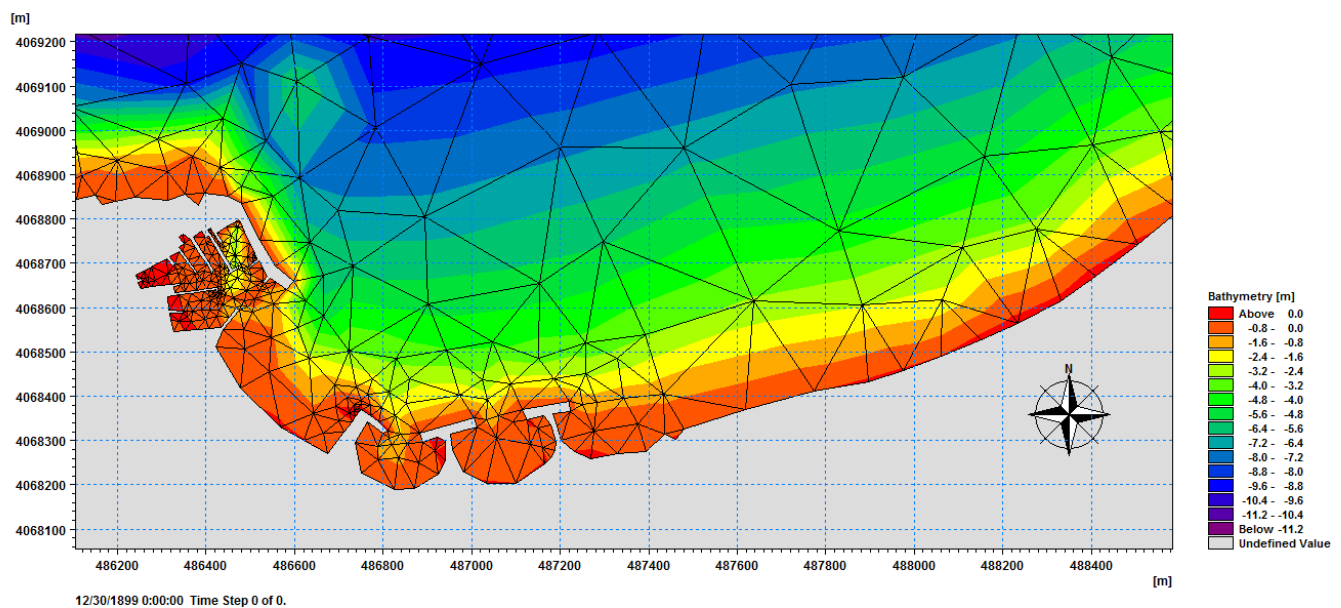


Figure 20: Bathymétrie et l'élément Mesh de la zone d'étude de la baie d'El-Djamila (plages Sidi Fredj).

4.3 Interprétation des résultats

• Etude bathymétrique

D'après l'analyse de carte bathymétrique (fig.19), on constate que les isobathes du centre de la baie sont pratiquement parallèles à la côte, avec une faible pente entre Ras Acrata (à l'Est) et Sidi Fredj (à l'Ouest). Un resserrement des isobathes qui se traduit par une pente moins douce qu'au centre de la baie, ceci étant normal vu que les deux zones sont rocheuses et accidentées. Plus à l'ouest (Moretti) entre les isobathes 5m et 15m, on a une large zone régulière à pente très douce.

5. Résultats

a) Module SW

• Conditions limites initiales

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

$$H_s = 5.11\text{m}, T_p = 10.46\text{s}, \text{Dir} = 22.5^\circ\text{N} \dots\dots\dots (1)$$

$$H_s = 3.25\text{m}, T_p = 8.85\text{s}, \text{Dir} = 45^\circ\text{N} \dots\dots\dots (2)$$

$$H_s = 3.31\text{m}, T_p = 9.11\text{s}, \text{Dir} = 270^\circ\text{N} \dots\dots\dots (3)$$

En effet, pour les houles enregistrées au large considérées dans ce travail, les statistiques ont montré que :

Les figures ci-après (Figure 21 à 26) montrent les champs de houles induits par les vagues calculées au moyen du modèle numérique MIKE21-SW pour les trois directions de houles sélectionnées.

La figure 21 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 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 - 10m ou la hauteur de houle est de l'ordre de 4.8m dans la partie Nord-est de la zone d'étude. En revanche dans la partie Sud-ouest la hauteur est de l'ordre de 3.2m, elle diminue à fur et a mesuré jusqu'à atteindre son minimum qui est de l'ordre de 0.4m 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.

Les houles de direction 45°N (figure 23) sont très fréquentes, elles apparaissent surtout lors des tempêtes printanière, elles arrivent avec une obliquité de 20 à 40° par rapport au rivage, en engendrant des courants de dérive parallèles à la côte et des courants de retours dans le sens opposé. Les cartes montrent que les orthogonales sont peu réfractées. Au large, les houles de direction Nord–Est ne subissent aucune modification et gardent leurs caractéristiques initiales (H_s de 3.25m et $T_p=8.85\text{s}$.), mais au fur et à mesure, qu'elles propagent vers la cote et l'effet de fond commence à être ressenti, la hauteur de la houle diminue en se rapprochant de la cote pour atteindre des valeurs inférieures varient en fonction de la morphologie des fonds. La houle arrive à la cote avec des hauteurs comprises entre 0.25m et 1.75m, ce qui rend la côte très vulnérable.

La figure 25 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 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

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.

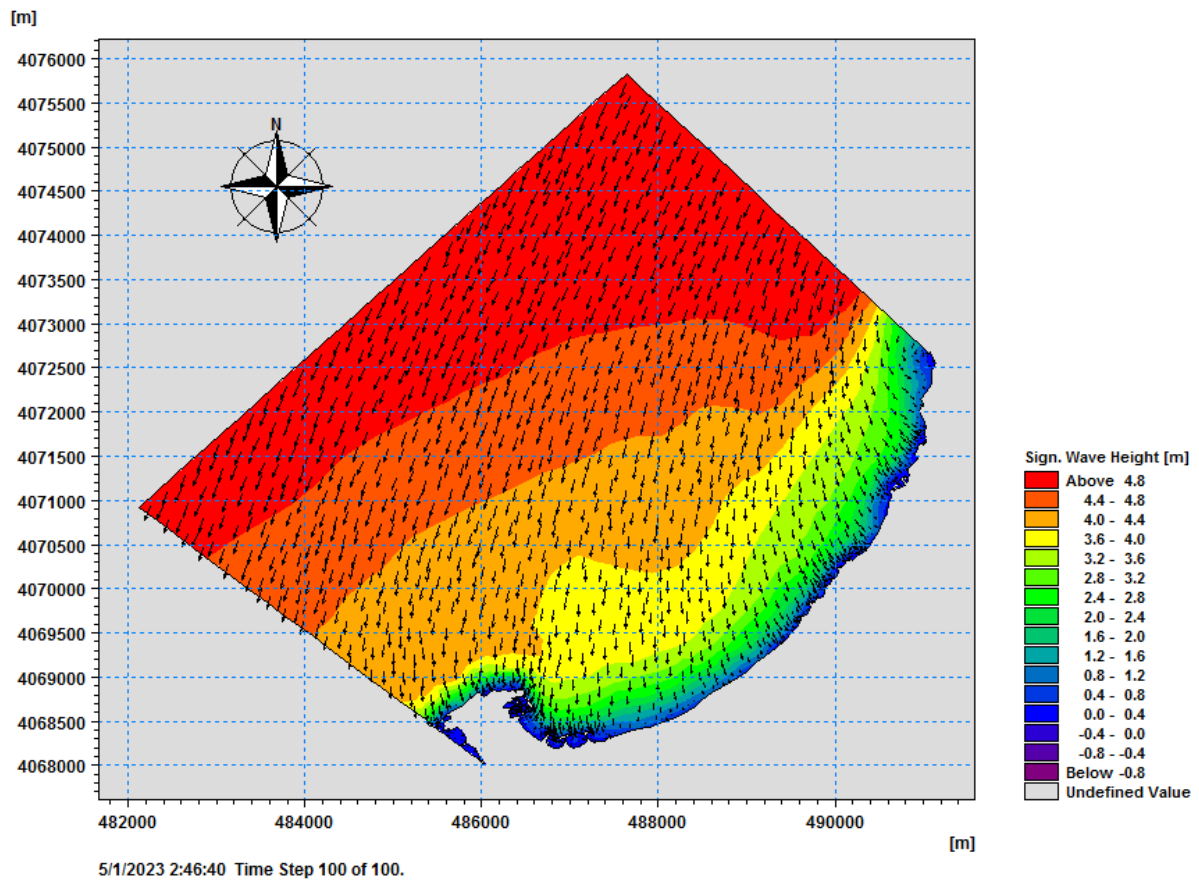


Figure 21: Champs des houles dans la baie d’El Djamila ($H=5.11$; $Tp=10.46s$; $Dir=22.5^\circ$).

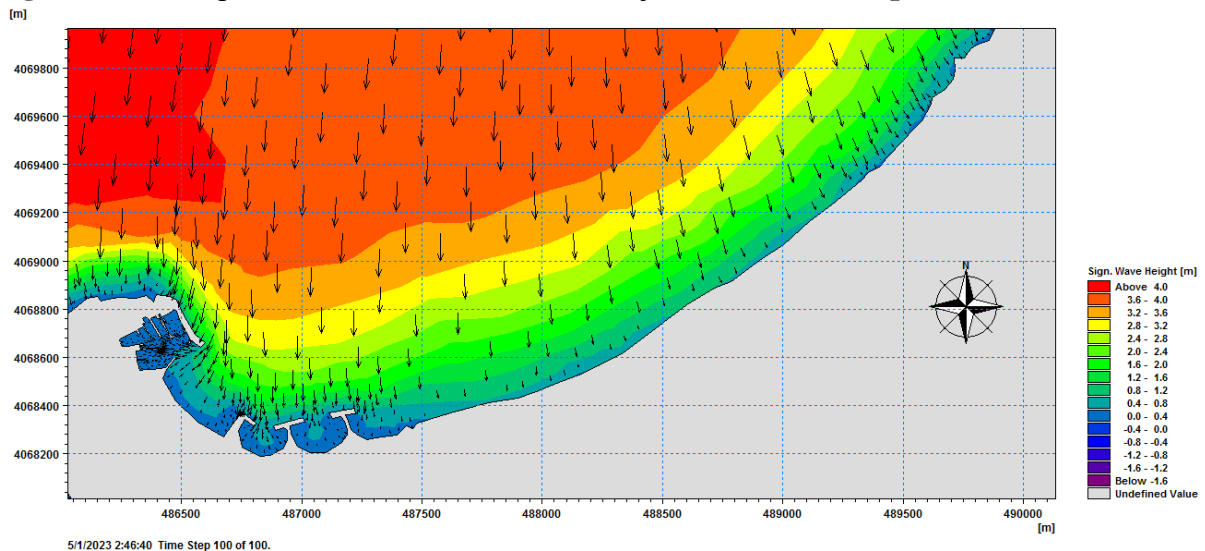


Figure 22: Champs des houles dans la baie d’El Djamila (plages de Sidi Fredj) ; ($H=5.11$; $Tp=10.46s$; $Dir=22.5^\circ$).

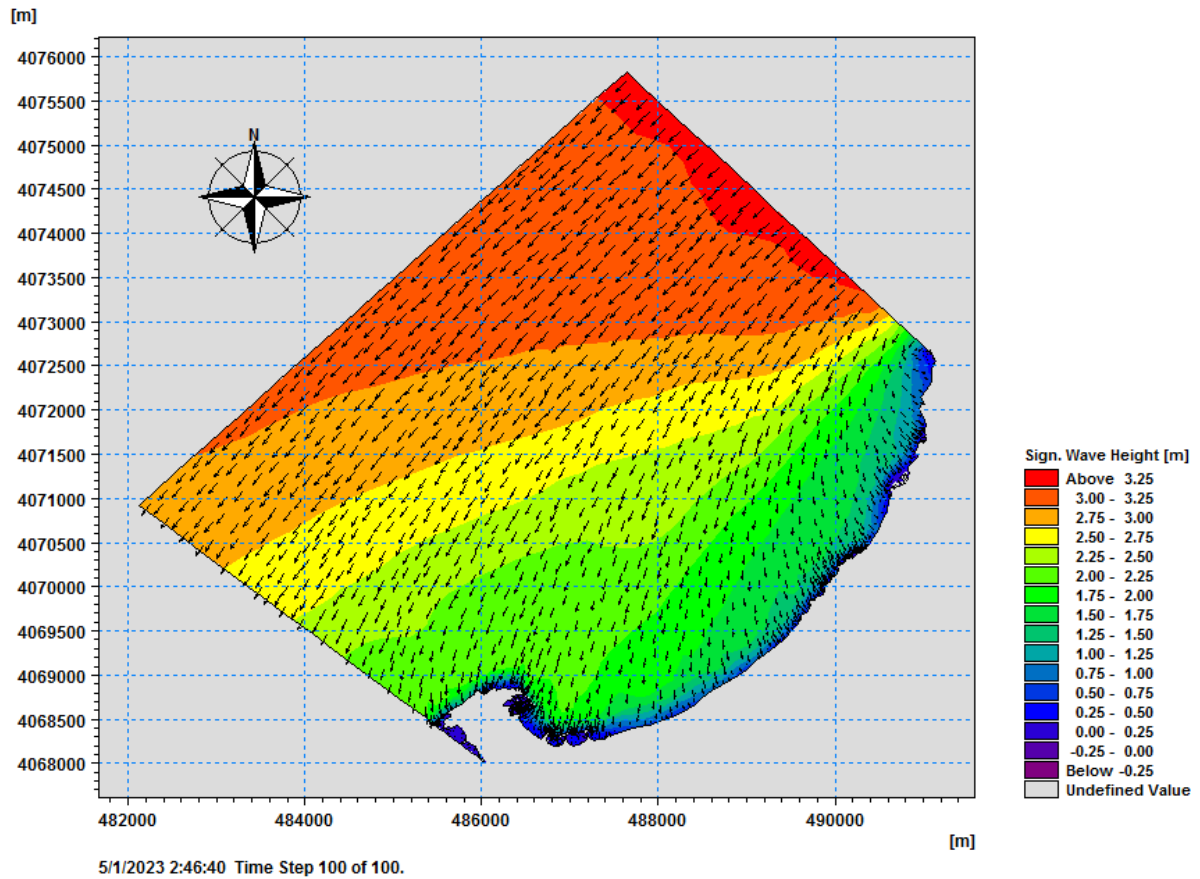


Figure 23: Champs des houles dans la baie d’El Djamilia ($H=3.25m$; $T_p=8.85s$; $Dir=45^\circ N$).

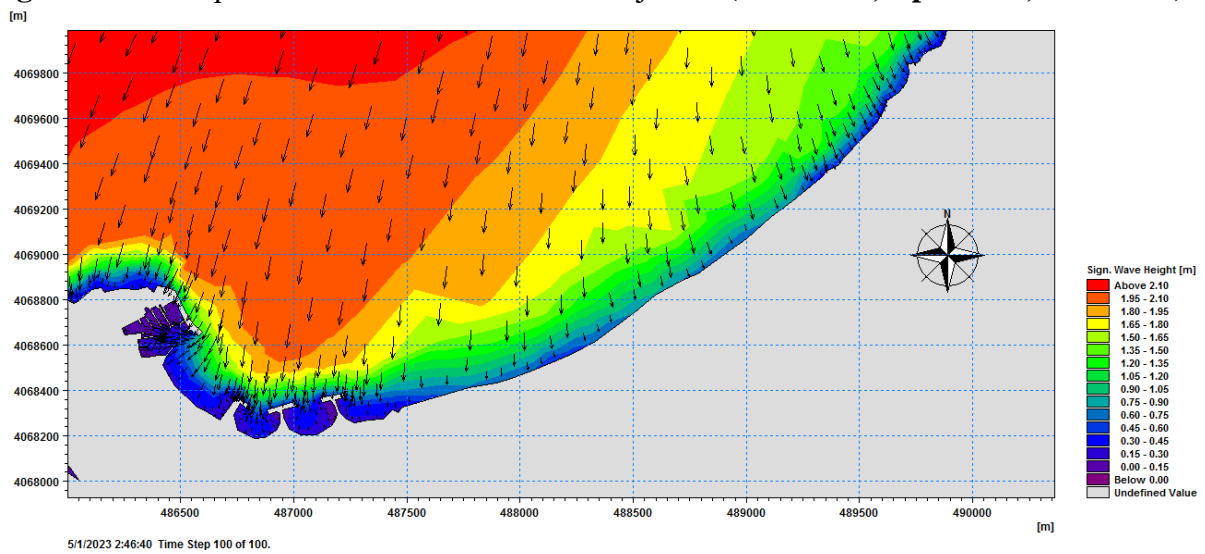


Figure 24: Champs des houles dans la baie d’El Djamilia (plages de Sidi Fredj) ; ($H=3.25m$; $T_p=8.85s$; $Dir=45^\circ N$).

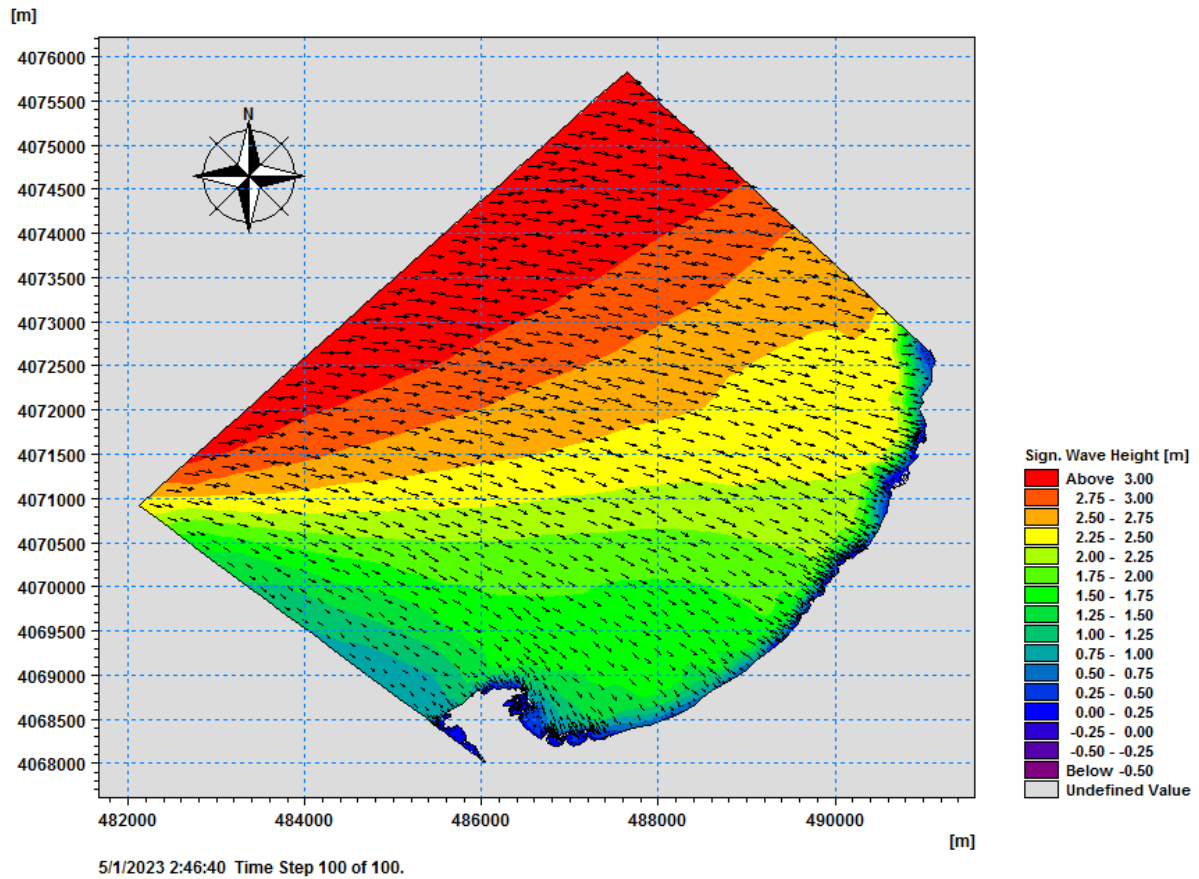


Figure 25: Champs des houles dans la baie d’El Djamil ($H=3.31m$; $Tp=9.11s$; $Dir=270^{\circ}N$).

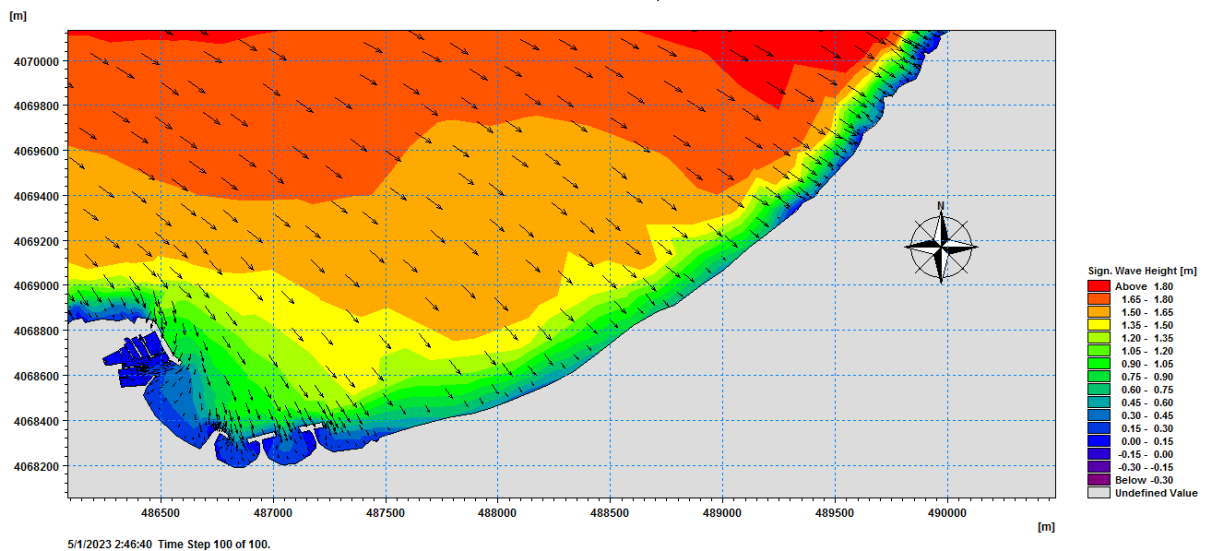


Figure 26: Champs des houles dans la baie d’El Djamil (plages de Sidi Fredj) ; ($H=3.31m$; $Tp=9.11s$; $Dir=270^{\circ}N$).

b) Module HD

Les figures ci-après (Figure 27 à 32) montrent les champs de courants induits par les vagues calculées au moyen du modèle numérique MIKE21-HD pour les trois directions de houles sélectionnées.

Les figures 27 et 28 représentent les champs des courants de la zone de Sidi Fredj par des houles de secteur NNE (22.5° N).

Au niveau des plages de Sidi Fredj des vitesses des courants de direction Est Ouest allant de 0.1m/s à 0.9m/s (Fig. 27). Suite à la présence des ouvrages de protection la vitesse du courant diminue avec des valeurs variant entre 0.4 m/s à 0.6 m/s, ce changement de direction du à la dissipation de l'énergie des vagues.

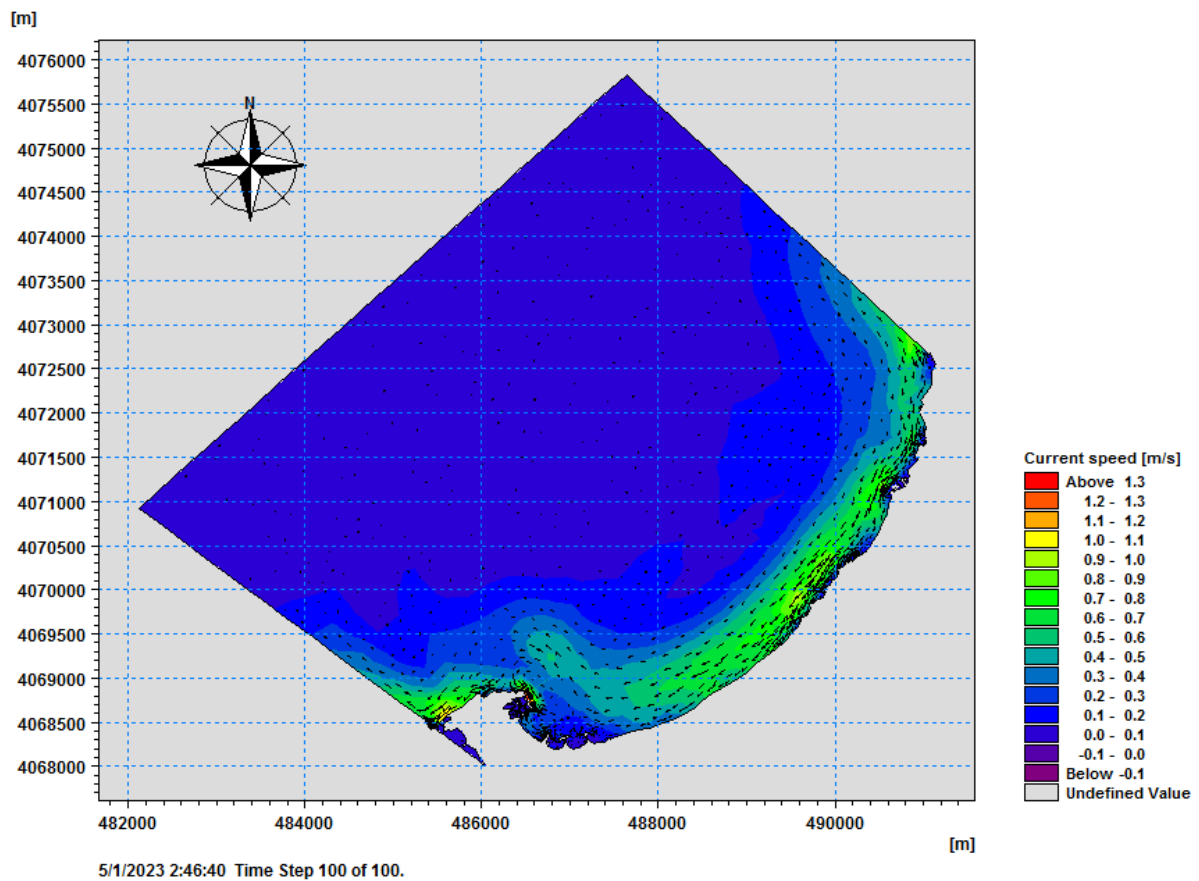


Figure 27: Champs des courants dans la baie d'El Djamila générés par les Houles du secteur NNE ($H=5.11\text{m}$; $T_p=10.46\text{s}$; $Dir=22.5$).

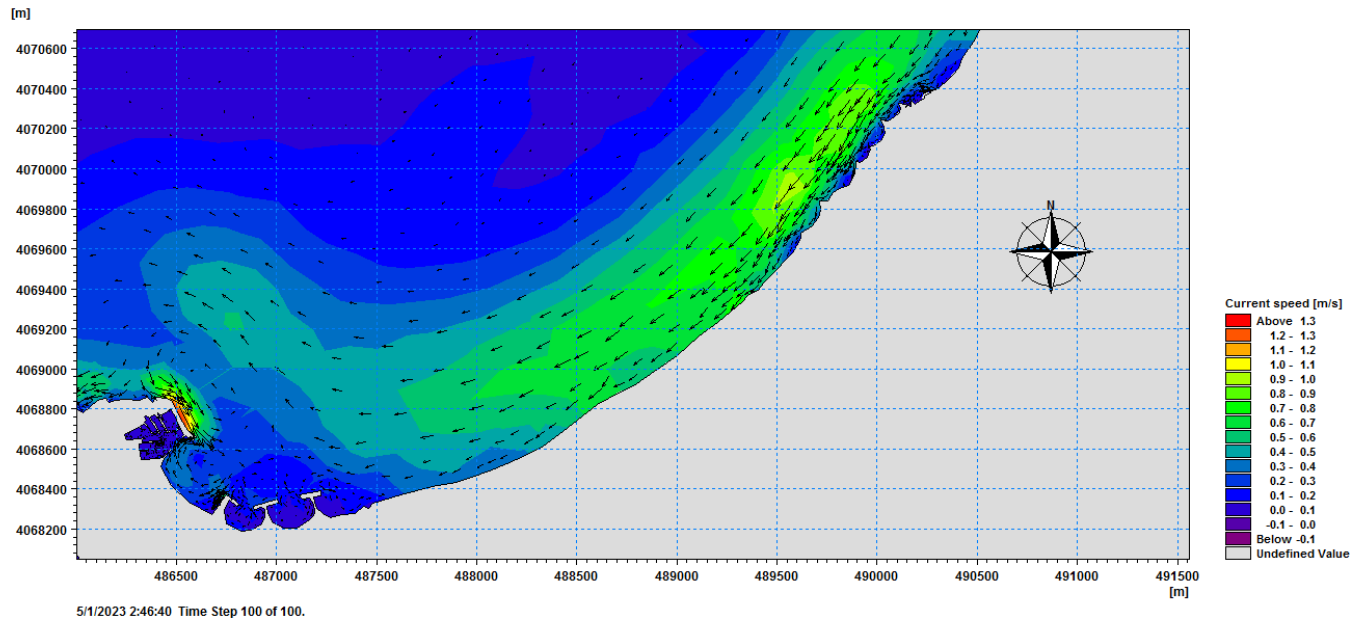


Figure 28: Champs des courants dans la baie d’El Djamila (plages de Sidi Fredj) générés par les Houles du secteur NNE ($H=5.11m$; $T_p=10.46s$; $Dir=22.5$).

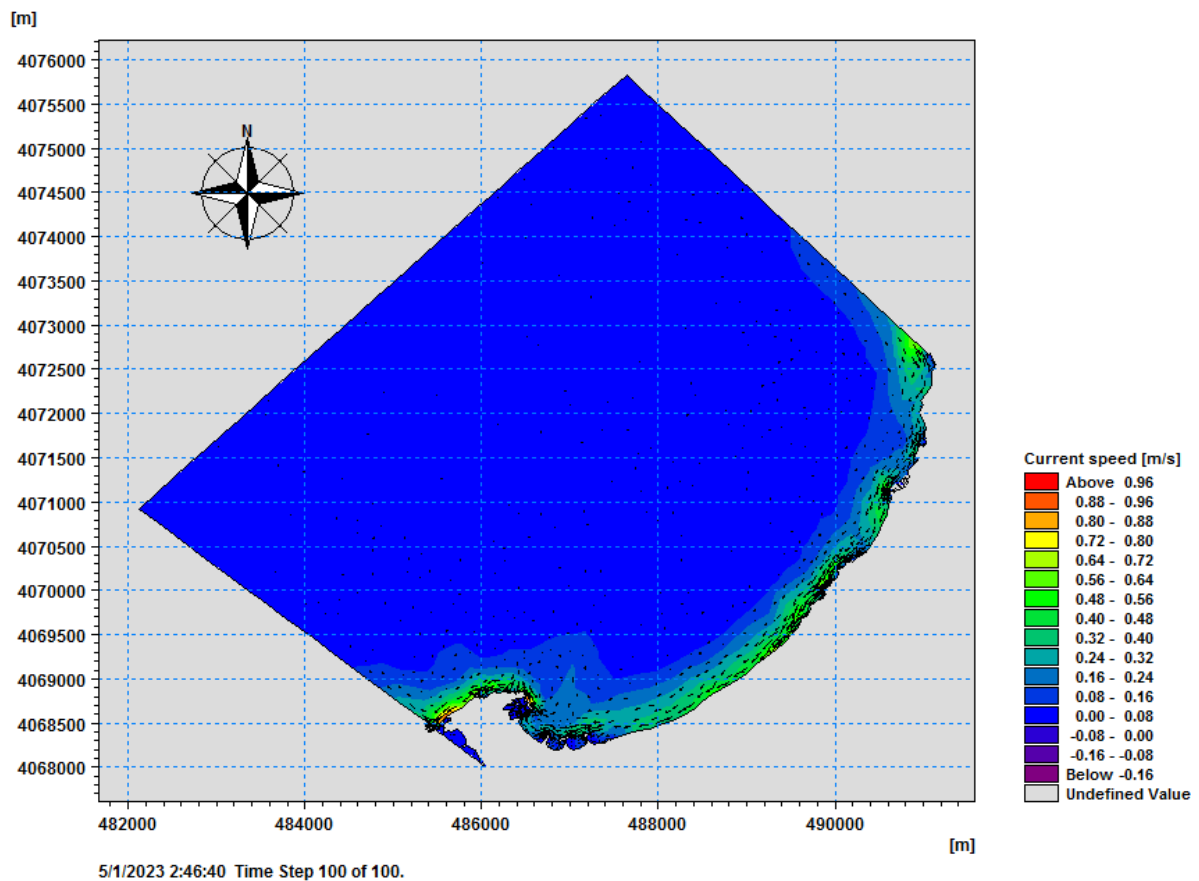


Figure 29: Champs des courants dans la baie d’El Djamila ($H=3.25m$; $T_p=8.85s$; $Dir=45$).

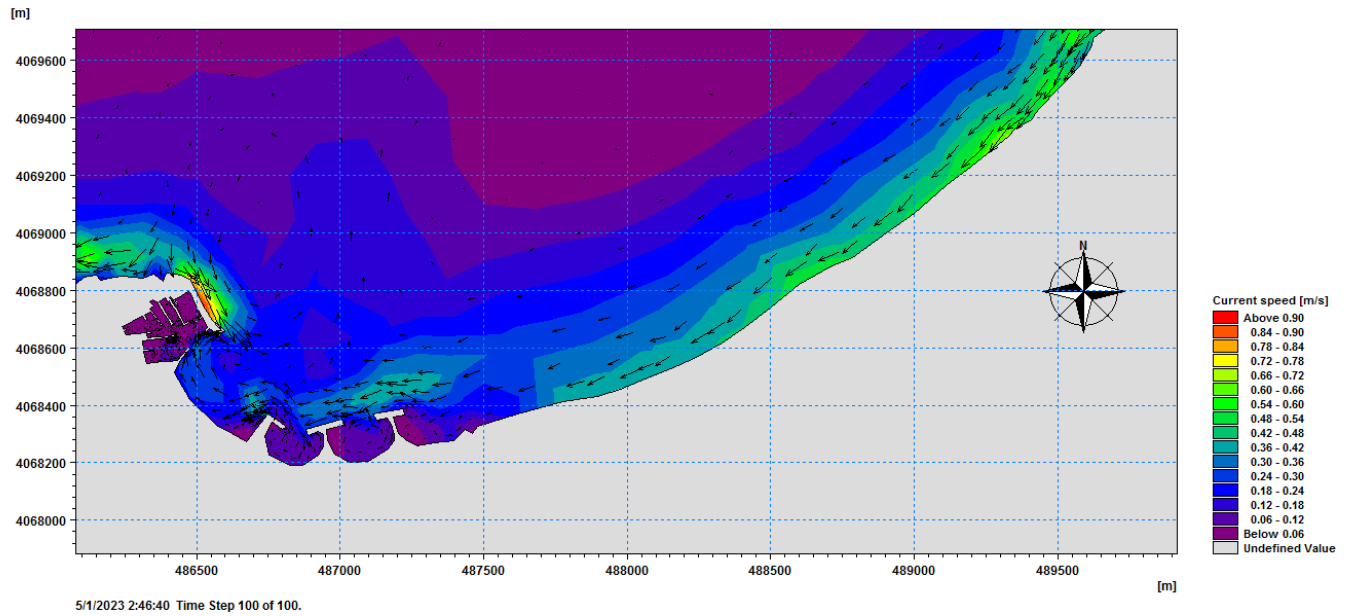


Figure 30: Champs des courants dans la baie d’El Djamilia (plages de Sidi Fredj) ;
 (H=3.25m ; Tp=8.85s ; Dir=45).

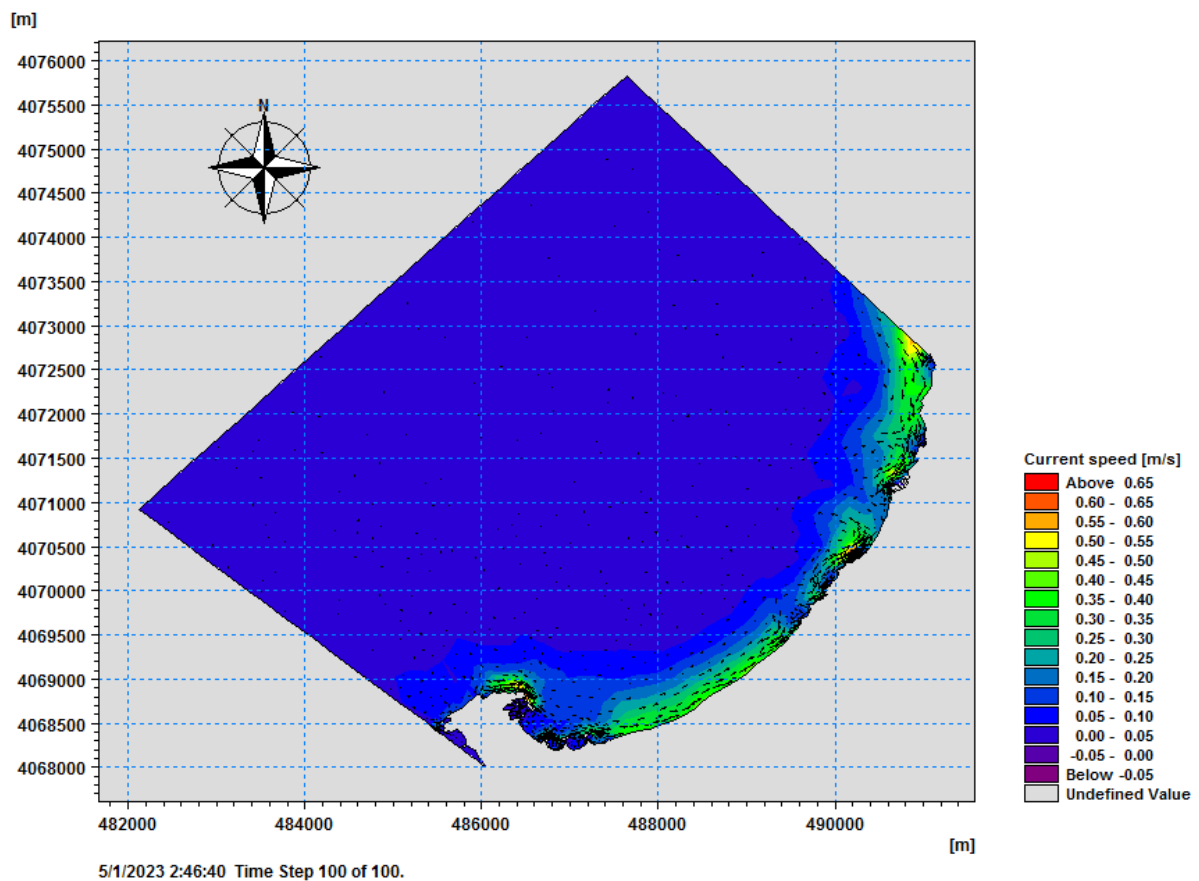


Figure 31: Champs des courants dans la baie d’El Djamilia (H=3.31m ;
 Tp=9.11s ; Dir=270°N).

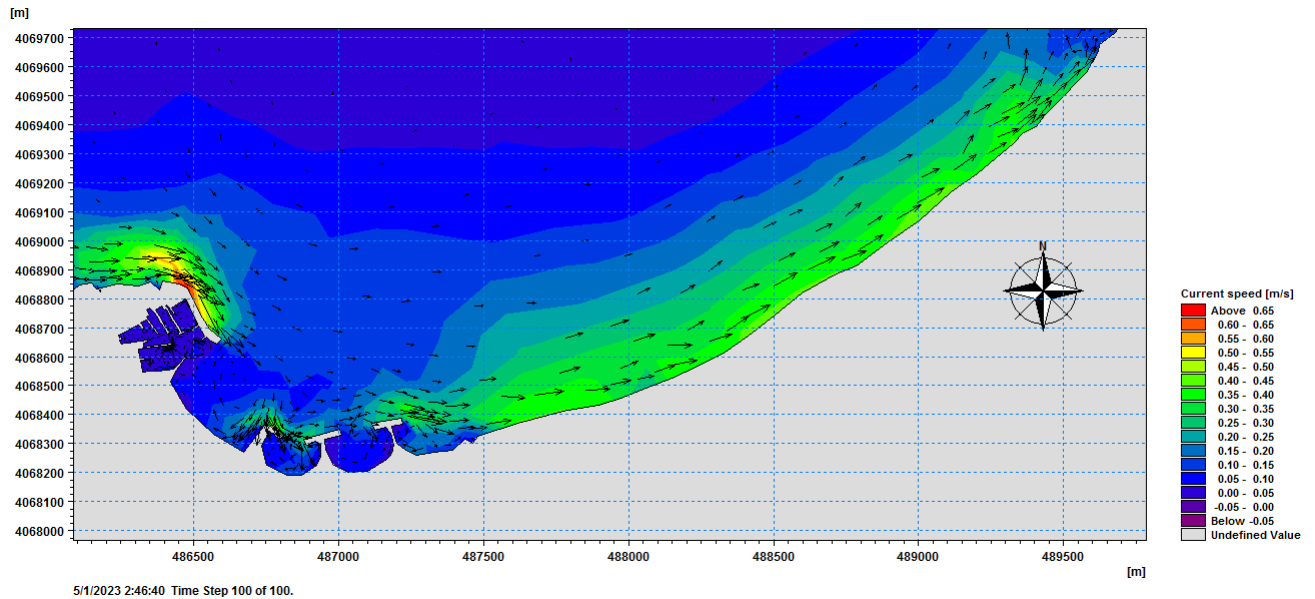


Figure 32: Champs des courants dans la baie d'El Djamilia (plages de Sidi Fredj) ;
($H=3.31\text{m}$; $T_p=9.11\text{s}$; $\text{Dir}=270^\circ\text{N}$).

c) Module ST

Pour comprendre les phénomènes naturels mis en cause dans la mobilité du trait de côte, on ne peut pas se contenter de suivre simplement ses déplacements au cours du temps. Les figures ci-après (Figure 33 à 38) montrent la dynamique sédimentaire induite par les vagues et les courants calculées au moyen du modèle numérique MIKE21-ST pour les trois directions de houles sélectionnées.

D'après ces résultats, représentés sur les figures ci-dessous, il ressort que :

Les houles en provenance du secteur Nord-Est engendrent une dérive littorale parallèle à la côte et orientée vers l'Ouest, ces courants de dérive transportent le sable vers l'Ouest sur la plage Ouest avec un débit $2235 \text{ m}^3/\text{an} / \text{m}$ pour la houle Nord Est.

Au niveau de la zone de Sidi Fredj pour les houles en provenance du secteur Ouest, le résultat des cartes obtenues (figure 37 et 38) montre qu'un transport longitudinal vers l'Est dans la zone de Moretti avec un débit de $2488 \text{ m}^3/\text{an} / \text{m}$, ce qui provoque l'érosion de cette partie. On constate qu'il y a une tendance de perte de sédiments vers le large engendré par des courants de retours avec un taux de $2240 \text{ m}^3/\text{an} / \text{m}$.

Les houles provenant des directions Est-Nord-Est (Figure 33 et 34) atteignent le site de façon plus ou moins frontale, engendrant la formation d'une dérive littorale dans la direction Est – Ouest, qui assure la dissémination des sédiments dans le même sens, engendrant l'ensablement du port. Cela pourrait être expliqué par la configuration géographique de la côte ainsi que la présence du port, qui protège notre zone d'étude des houles du secteur Nord - Ouest qui sont significatives en fréquence et en amplitude.

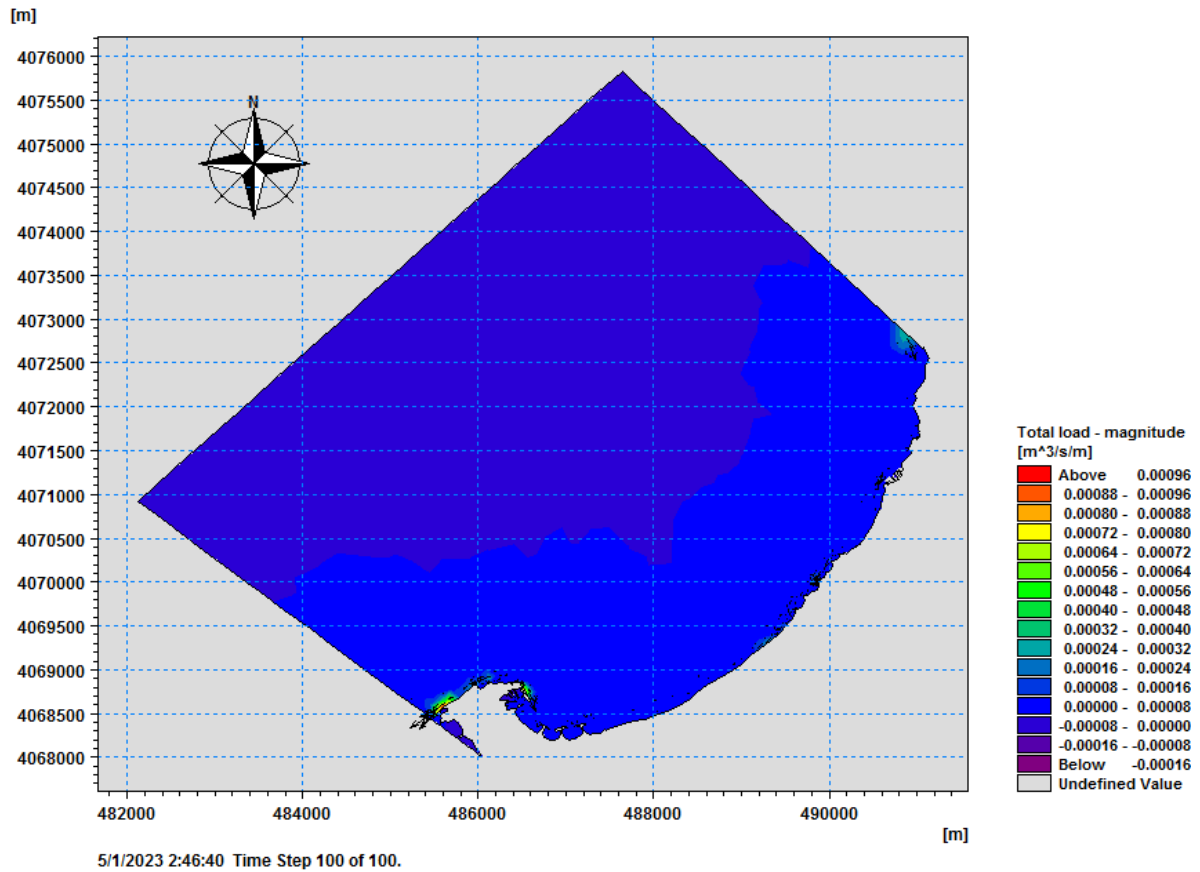


Figure 33: Champ de transport sédimentaire au voisinage de la baie d'El Djamilia générés par les Houles du secteur 45N dans la baie d'El Djamilia ($H=3.25m$; $Tp=8.85s$; $Dir=45^\circ N$).

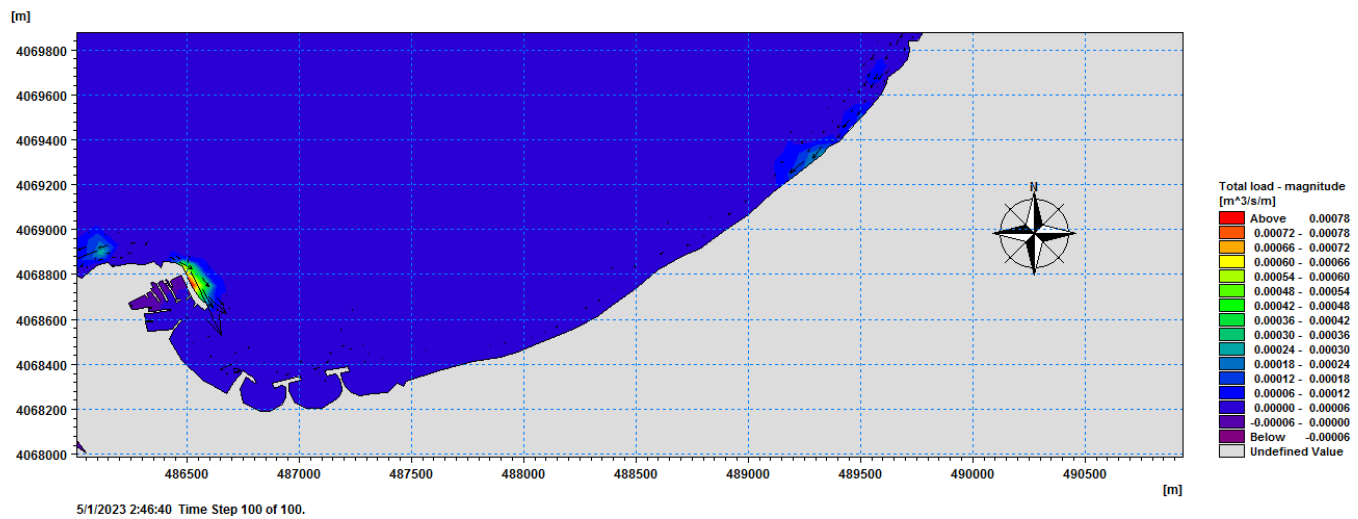


Figure 34: Champ de transport générés par les Houles du secteur 45N dans la baie d'El Djamilia (plages de Sidi Fredj) ; ($H=3.25m$; $Tp=8.85s$; $Dir=45^\circ N$).

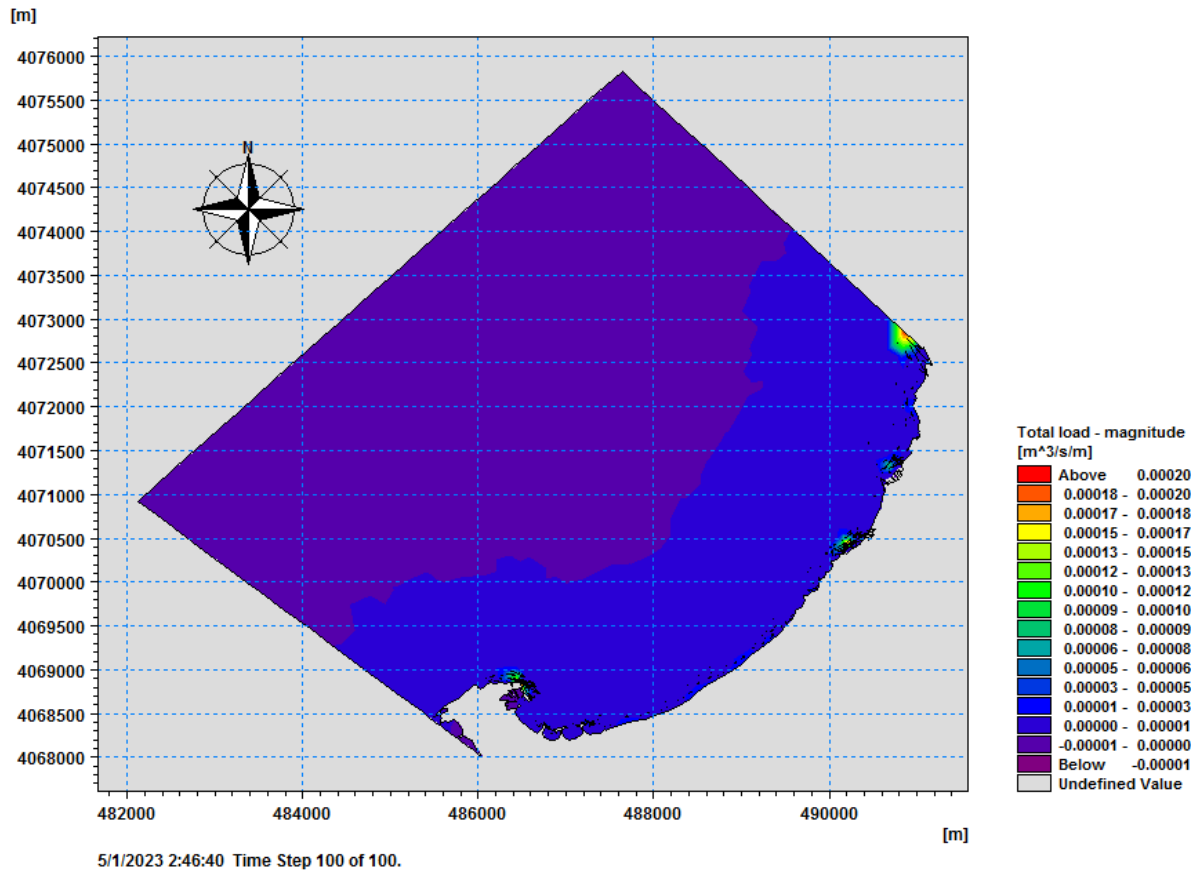


Figure 35: Champ de transport sédimentaire au voisinage de la baie d'El Djamila générés par les Houles du secteur 45N dans la baie d'El Djamilia ($H=3.31m$; $Tp=9.11s$; $Dir=270^\circ N$).

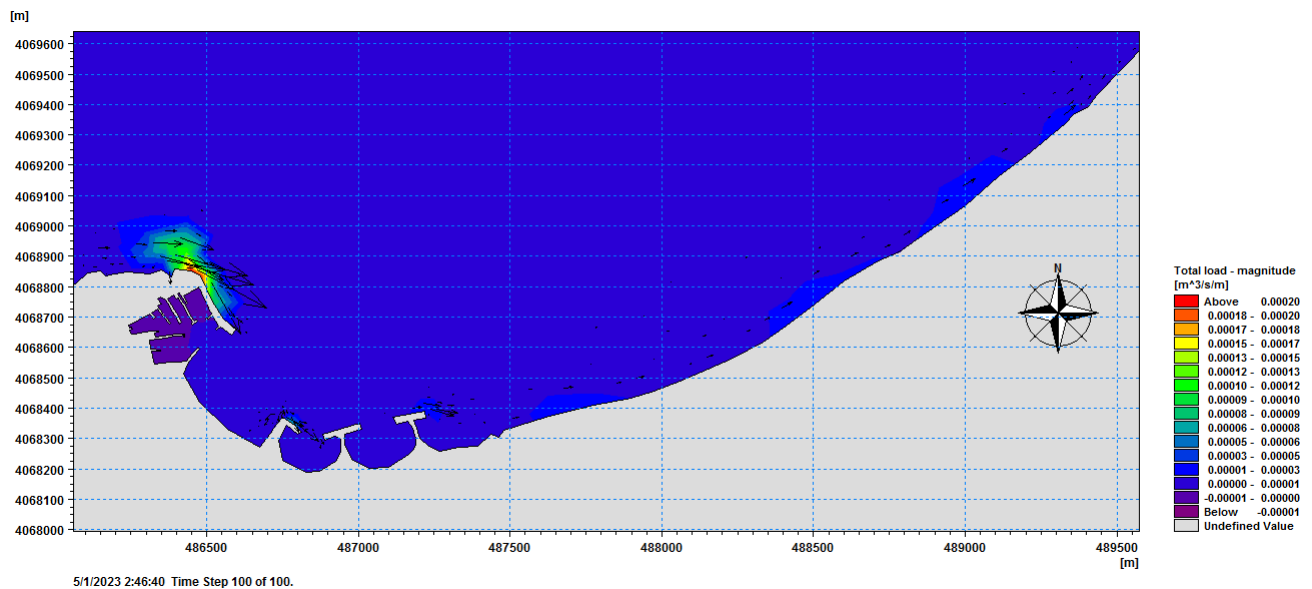


Figure 36: Champ de transport sédimentaire générés par les Houles du secteur 45N dans la baie d'El Djamilia ;(plages de Sidi Fredj) ($H=3.31m$; $Tp=9.11s$; $Dir=270^\circ N$).

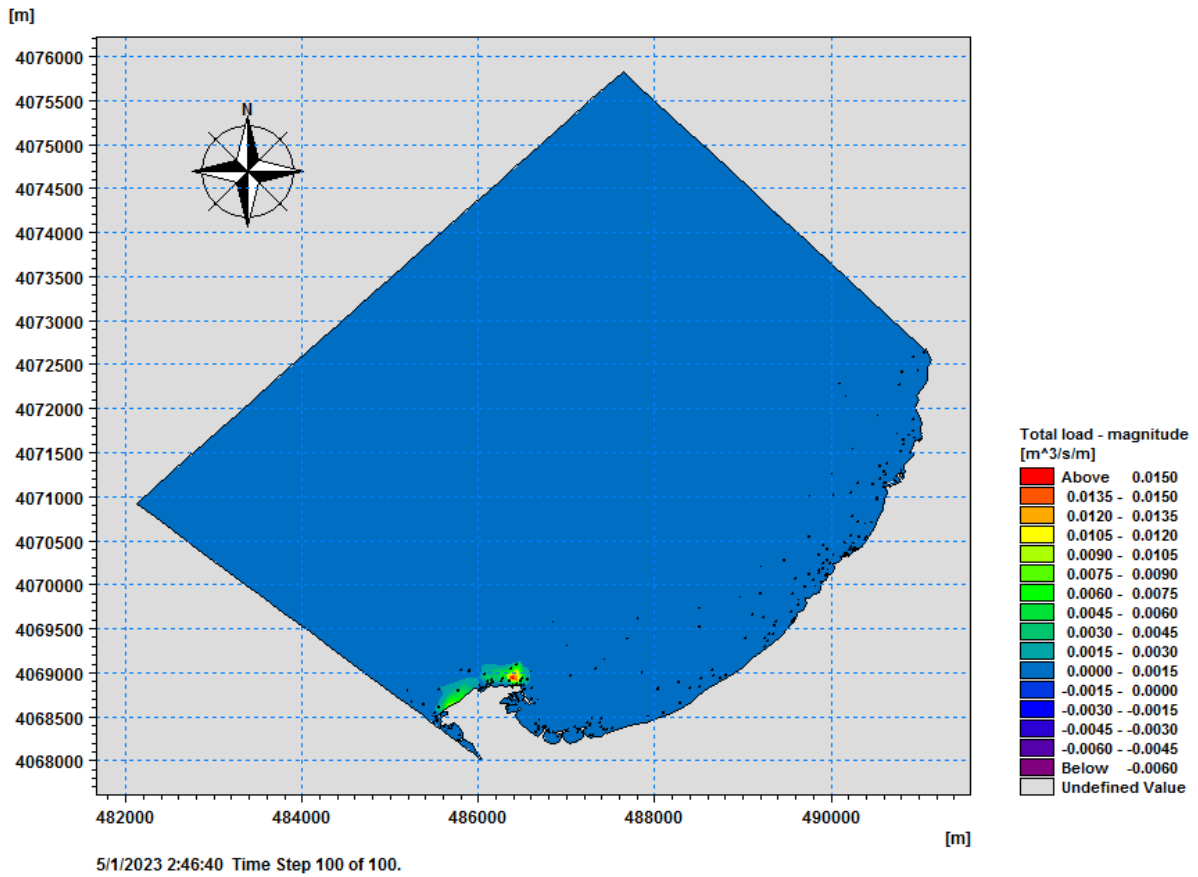


Figure 37: Champ de transport sédimentaire générés par les Houles du secteur 22.5N dans la baie d’El Djamil (H=5.11m ;Tp=10.46s ; Dir=22.5°N).

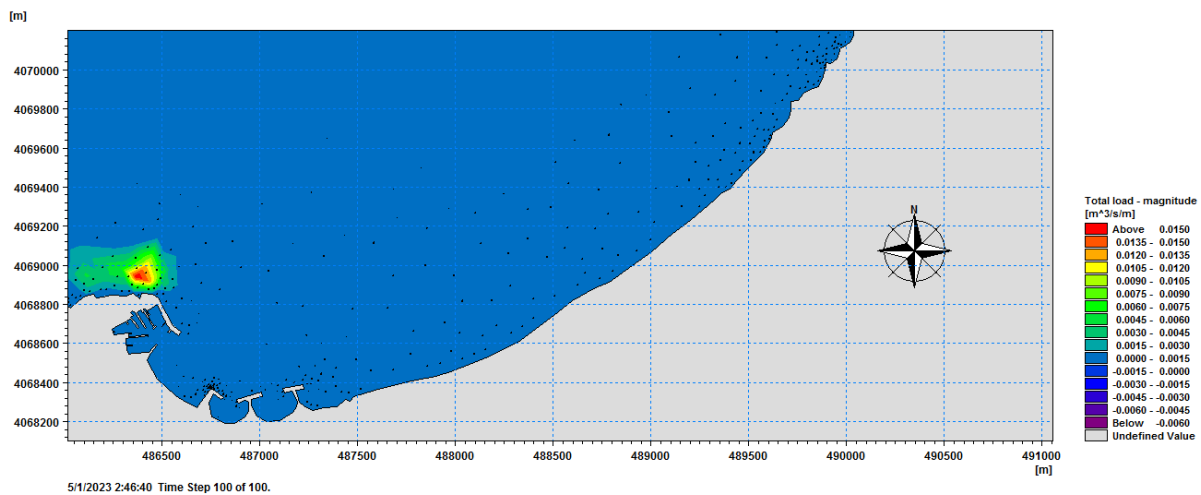


Figure 38: Champ de transport sédimentaire générés par les Houles du secteur 22.5N dans la baie d’El Djamil (plages de Sidi Fredj) ; (H=5.11m ; Tp=10.46s ; Dir=22.5°N).

Conclusion

La modélisation hydrodynamique de la baie d’El Djamil est une approche puissante et précise pour comprendre le comportement des courants, des marées et des vagues dans cette région spécifique. Elle permet de simuler et de prédire les conditions hydrodynamiques à différentes échelles de temps et d’espace, ce qui est essentiel pour la gestion et la planification des

activités côtières. Elle peut être utilisée pour évaluer les risques d'érosion côtière, les impacts des marées sur les infrastructures côtières et la dispersion des polluants.

**Chapitre IV:
Evolution spatio-
temporelle du trait
de côte**

Introduction

Au cours des dernières années, le débat sur les changements climatiques, leurs causes et leurs effets a gagné en intensité (Christy, 2001 ; Nature, 2002 ; Matthews, 2003). Il est nourri notamment par le fait que certaines des conséquences attendues, à l'exemple de l'élévation du niveau de la mer, pourraient être pesantes et déterminantes pour les zones côtières, très peuplées, et leurs gestion futur (Granja et Carvalho 2000 ; Vilibic et al. 2000 ; Jenen et al. 2001 ; Ravis et al. 2002 ; in Djouder et Boutiba, 2017). En effet, l'élévation du niveau de la mer tient une place toute particulière dans le second volet du 6^e rapport d'évaluation du GIEC publié en février 2022. Contrairement à d'autres variables climatiques, telles que les températures et les précipitations, le niveau de la mer continuera à s'élever bien après la stabilisation des températures globales, puisque les glaciers de montagne et les calottes de glace en Antarctique et au Groenland mettront des siècles à s'ajuster aux nouvelles températures.

Cependant, les variations de la position du trait de côte dépend de plusieurs facteurs, notamment des variation du niveau de la mer mais aussi de d'autres facteurs naturels tels que le vent, la houle, les courants et apport de sédiments ainsi que de facteurs anthropiques liés aux activités humaines tels que les développements urbains, construction des ouvrages de protection, pollutions, ...

Ces différents facteurs engendrent soit de l'accrétion ou de l'érosion des côtes et donc la variation de la position du trait de côte.

L'étude de l'évolution spatio-temporelle de la ligne de côte est donc essentielle pour comprendre les processus géomorphologiques qui agissent sur les zones côtières et pour évaluer l'impact des activités humaines sur ces écosystèmes fragiles. Les changements de la ligne de côte peuvent avoir des conséquences importantes sur l'environnement, l'économie locale, le tourisme et la sécurité des populations.

Un suivi spatio-temporel de l'évolution du trait de côte de la grande baie d'El Djamila selon la méthode d'analyse diachronique entre 2007 et 2022 a été effectué dans le cadre de ce travail.

4. La méthodologie

Dans le cadre de cette étude, des images satellitaires des années allant de 2007 à 2022 ont été utilisées, leurs traitement est fait à l'aide de logiciel de cartographie Arc Gis 10.8 sous le système de projection WGS84 UTM zone 31N.

Ce travail s'est déroulé suivant ces étapes :

- Géoréférencement des images satellitaires.
- Digitalisation des traits de côte de la baie d'El Djamila pour les années 2007 ; 2012 ; 2017 et 2022 avec Google Earth pro.
- Génération de la ligne de référence de base et les transects.
- Génération de la table attributaire avec les différents paramètres (NSM ; EPR ; ERR) calculées par le module DSAS.
- Présentation des résultats sous formes de graphes et de cartes.

5. Les logiciels utilisés

Pour étudier l'évolution spatio-temporelle de trait de côte, on doit faire appel à plusieurs logiciels.

- **Google Earth pro**

Google Earth pro est un logiciel qui permet de visualiser 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 60m (**SPOT, QUICKBIRD, IKONOS,**).

Ces images sont issues de l'entreprises de commercialisations d'images et sont archivées sur le serveur de Google Earth Pro qui est accessible par connexion à l'internet. Elles sont mises à jours au fur et mesure.

- **Logiciel Arc Gis 10 .8**

Arc Gis est l'un des logiciel SIG les plus utilisés dans le domaine de la cartographie et de la télédétection. Ce logiciel offre de nombreuses potentialités pour la manipulation, la gestion, l'analyse et l'édition des données spatiales.

Différentes couches d'information spatiales peuvent être manipulées offrant la possibilité d'analyser une ou plusieurs couche 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 in Larbi, 2017). Le logiciel Arc Gis 10.8 comprend trois applications principales : Arc Catalog, ArcMap et ArcToolbox. Le logiciel Arc GIS 10.4 comprend trois applications principales : ArcCatalog, ArcMap et ArcToolbox.

Arc Catalog

ArcCatalog est une application logicielle faisant partie du système ArcGIS développée par Esri. Il s'agit d'un outil de gestion de données géographiques permettant d'organiser, de rechercher, de pré visualisé et de gérer des fichiers de données spatiales. ArcCatalog est conçu pour faciliter l'exploration et la gestion des données géographiques, qu'elles soient disponibles localement sur un ordinateur ou sur des serveurs distants.

ArcMap

ArcMap est une application logicielle de bureau développée par Esri, faisant partie du système ArcGIS. Il s'agit d'un puissant outil de cartographie et d'analyse géo spatiale utilisé par les professionnels de la géographique pour créer, visualiser, interroger, analyser et partager des données géographiques.

ArcMap permet aux utilisateurs de travailler avec différentes sources de données géographiques, notamment des fichiers Shapefile, des géodatabases, des fichiers raster, des tables attributaires, des services web géographiques, etc...

- ✓ **ArcToolbox**

ArcToolbox est une composante essentielle du système ArcGIS développé par Esri. Il s'agit d'une boîte à outils logiciels qui regroupe un ensemble d'outils géo spatiaux permettant

d'effectuer diverses tâches de traitement, d'analyse et de gestion des données géographiques.

ArcToolbox offre une collection d'outils conviviaux et puissants qui peuvent être utilisés dans ArcMap, ArcCatalog et d'autres applications ArcGIS. Ces outils sont conçus pour automatiser des tâches complexes, effectuer des analyses avancées et manipuler les données géographiques de différentes manières.

- **Le DSAS (Digital Shoreline Analysis System)**

C'est une extension complémentaire au bureau Esri ArcGIS (10.7) qui permet de calculer des statistiques de taux de changement à travers plusieurs positions historiques du littoral : vitesses d'érosion et accrétion (EPR), des taux d'évolution (LRR) et les distances (NSM) à la base des traits de côtes digitalisés à partir des images satellitaires au cours de plusieurs années.

- NSM indique la distance entre les traits de côte, les plus anciens et les plus récents pour chaque transect.
- EPR, un taux calculé en divisant la distance du changement de trait de côte par le temps s'écoulant entre le trait de côte le plus ancien et le plus récent.
- LRR est la pente de la ligne de régression positionnée dans le nuage de points formé par les mesures de distances entre tous les points d'intersection de chaque transect et des traits de côte comparés.

En sortie, l'extension DSAS fournit 2 fichiers l'un contient les caractéristiques des points d'intersection «Transects intersect» et l'autre contient les statistiques d'évolution «Transects rate» (EPR, NSM et LRR).

DSAS génère des transects (Fig. 40) qui sont projetés perpendiculairement à la ligne de base de référence pour croiser les rivages à un espacement spécifié par l'utilisateur le long du rivage. DSAS v5 prend en charge une ligne de base située n'importe où : au large, à terre, au milieu des données du littoral (midshore) ou une combinaison d'emplacements de ligne de base (USGS, 2022).

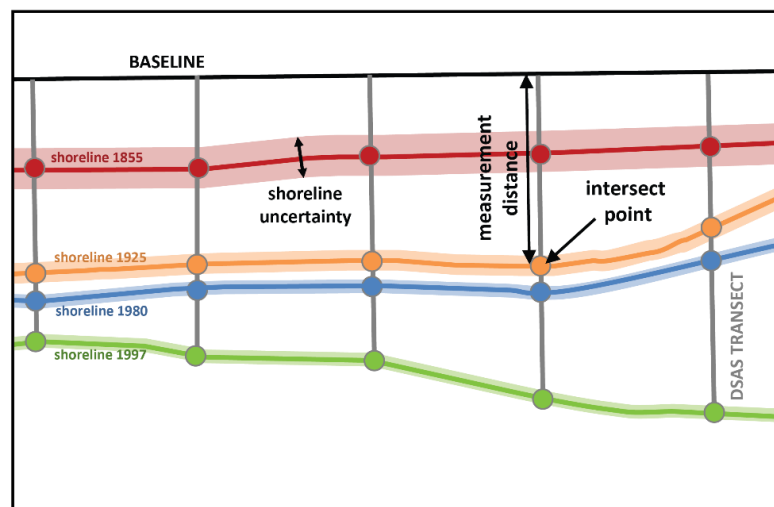


Figure 39: Transects générés par DSAS (USGS, 2018).

Les résultats

La cinématique du trait de côte : pour bien comprendre la dynamique de ces différents rivages selon l'échelle spatiotemporelle les résultats statistiques des indicateurs EPR, NSM et LPR ont été projetés afin d'élaborer des cartes d'évolution représentatives de cette tendance selon les périodes suivantes 2007 ; 2012 ; 2017 et 2022. L'étude de l'évolution des variations spatio-temporelle de la position des traits de côte a été focalisée sur la zone de Sidi Fredj.

La digitalisation des traits de côte a été faite sur la base de quatre images satellitaires de la plage de Sidi Fredj de dates différentes : 2007, 2012, 2017 et 2022 (Fig. 40).

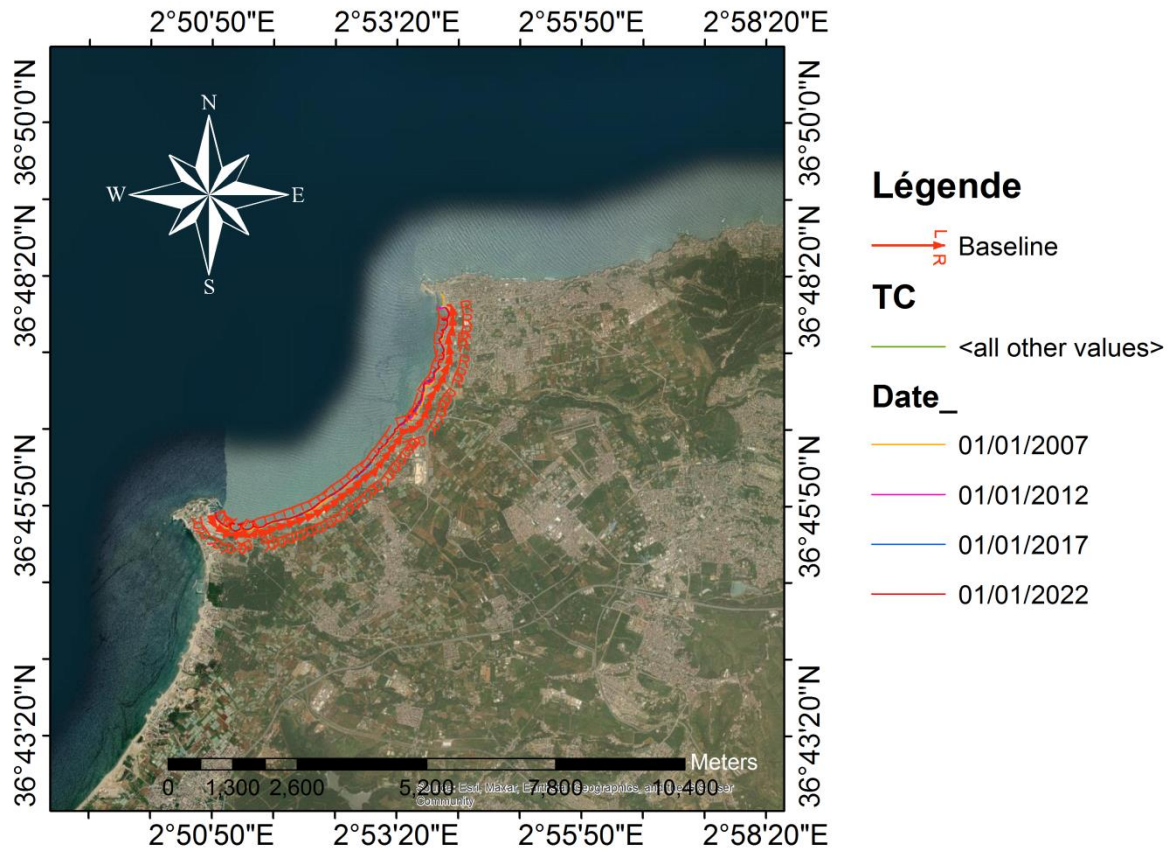


Figure 40: Evolution du trait de côte de la baie d'El Djamila selon différentes périodes entre 2007 et 2022.

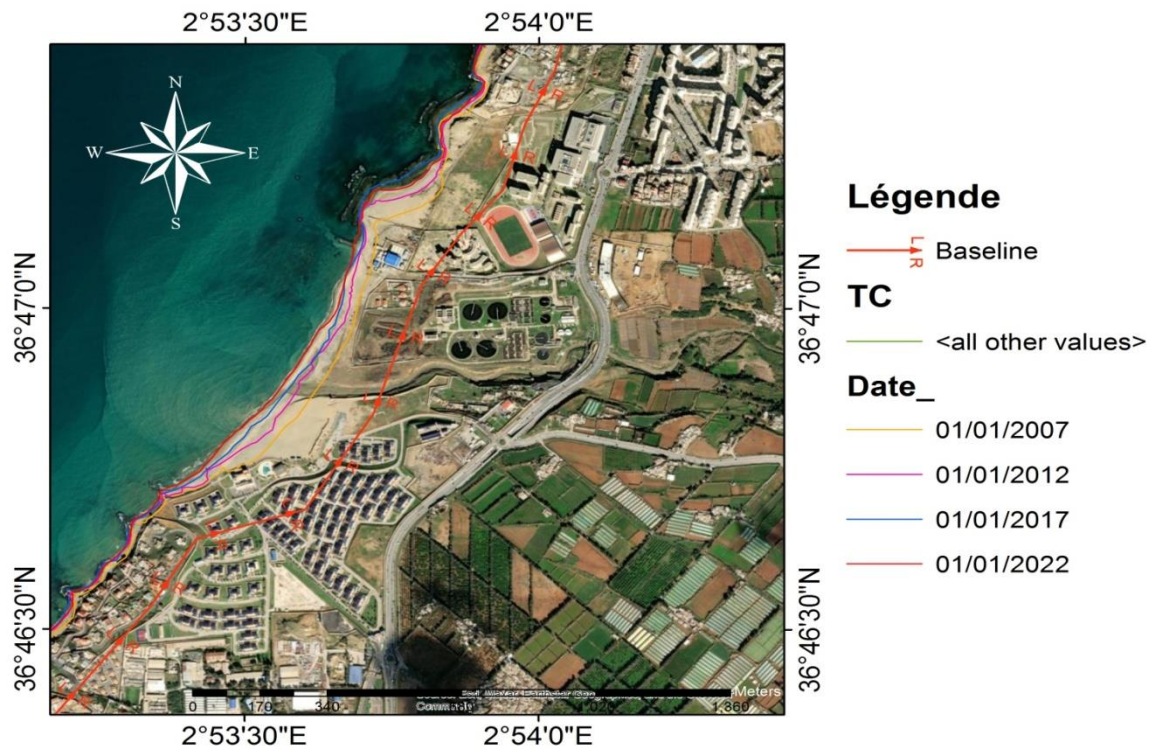


Figure 41: Evolution du trait côte des plages de Sidi Fredj selon différentes périodes entre 2007 et 2022.

- **Génération de transects**

La variation spatio-temporelle de la ligne de rivage a été calculée par des intervalles de transects de 200m de longueur espacés avec une distance de 50 m le long de la côte. 400 transects ont été générés par DSAS et qui sont orientés perpendiculairement à la ligne de base. Trois techniques ont été utilisées :

- EPR, LRR et NSM pour analyser le taux de changement du rivage entre 2007 et 2021 le long de la côte d'El Djamila (Fig. 42).

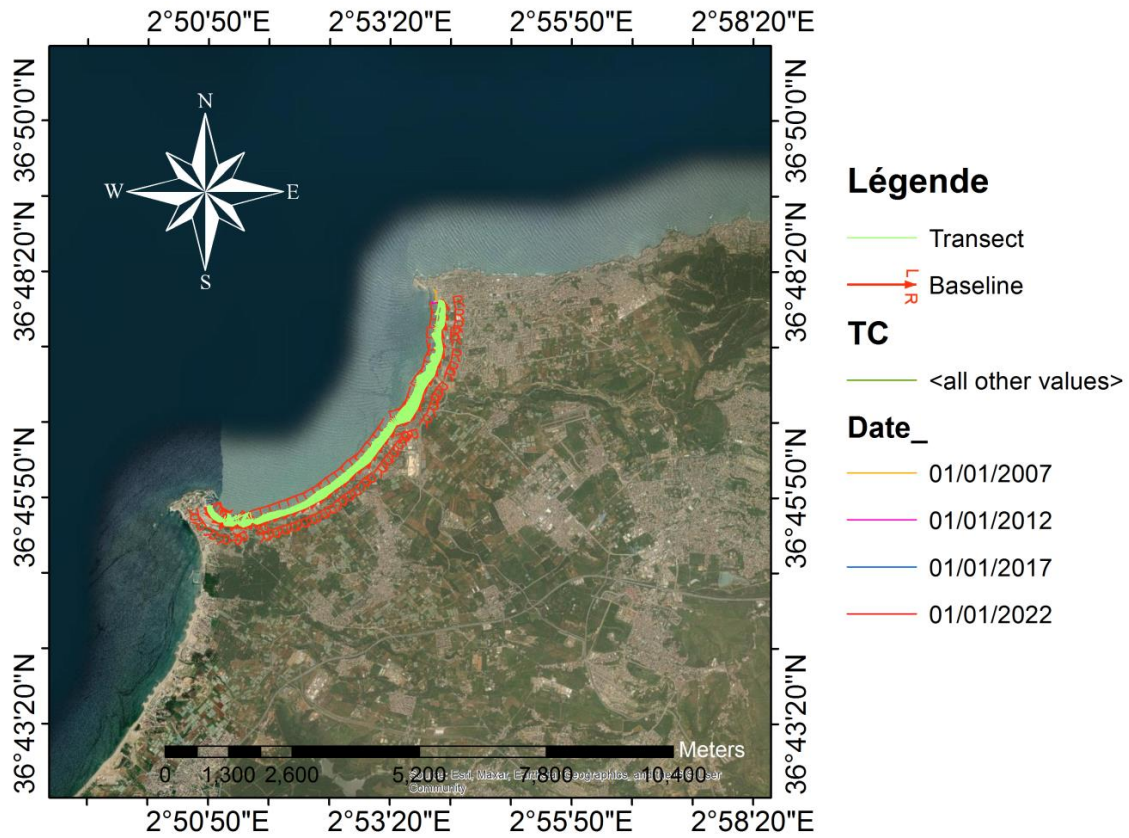


Figure 42: Evolution du trait de côte de la baie d’El Djamila entre 2007 et 2022.

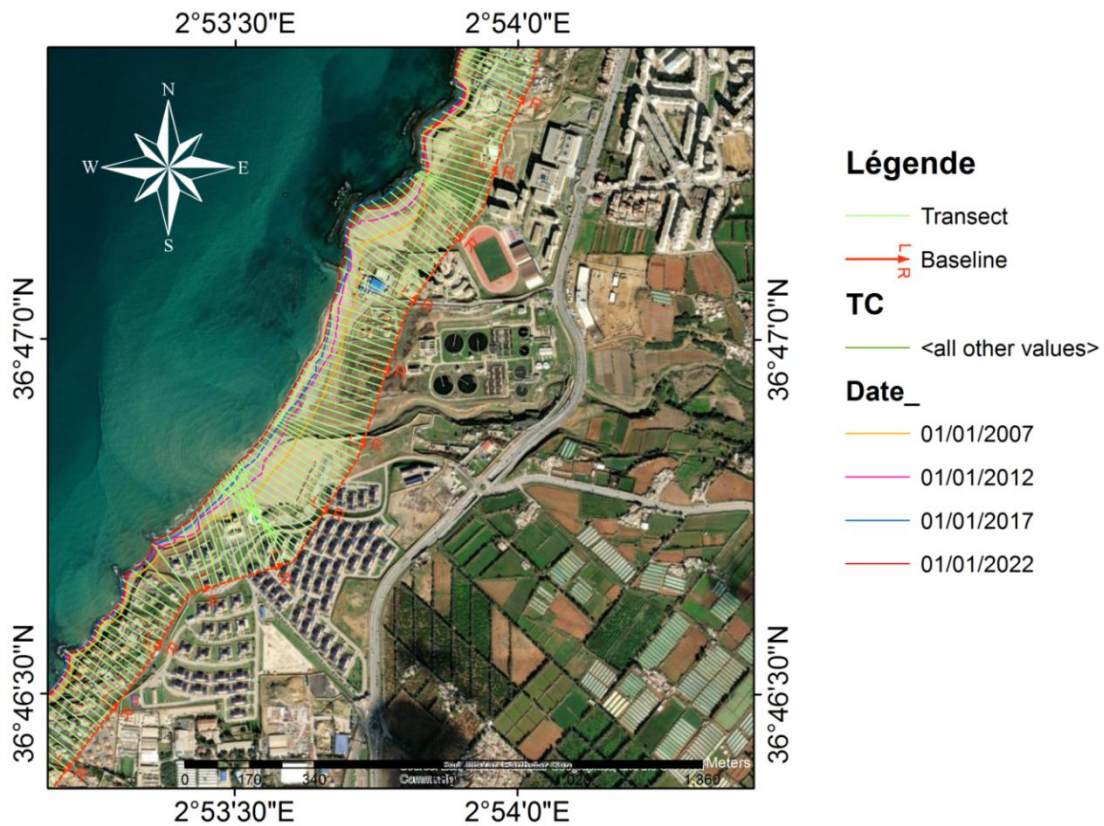


Figure 43: Transects générés de l’évolution du trait de côte des plages de Sidi Fredj entre 2007 et 2022.

a) Mouvement net des rivages (NSM)

Pour bien comprendre la dynamique de ces différents traits de côte 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 carte représentative de la plage de Sidi Fredj (Fig. 45).

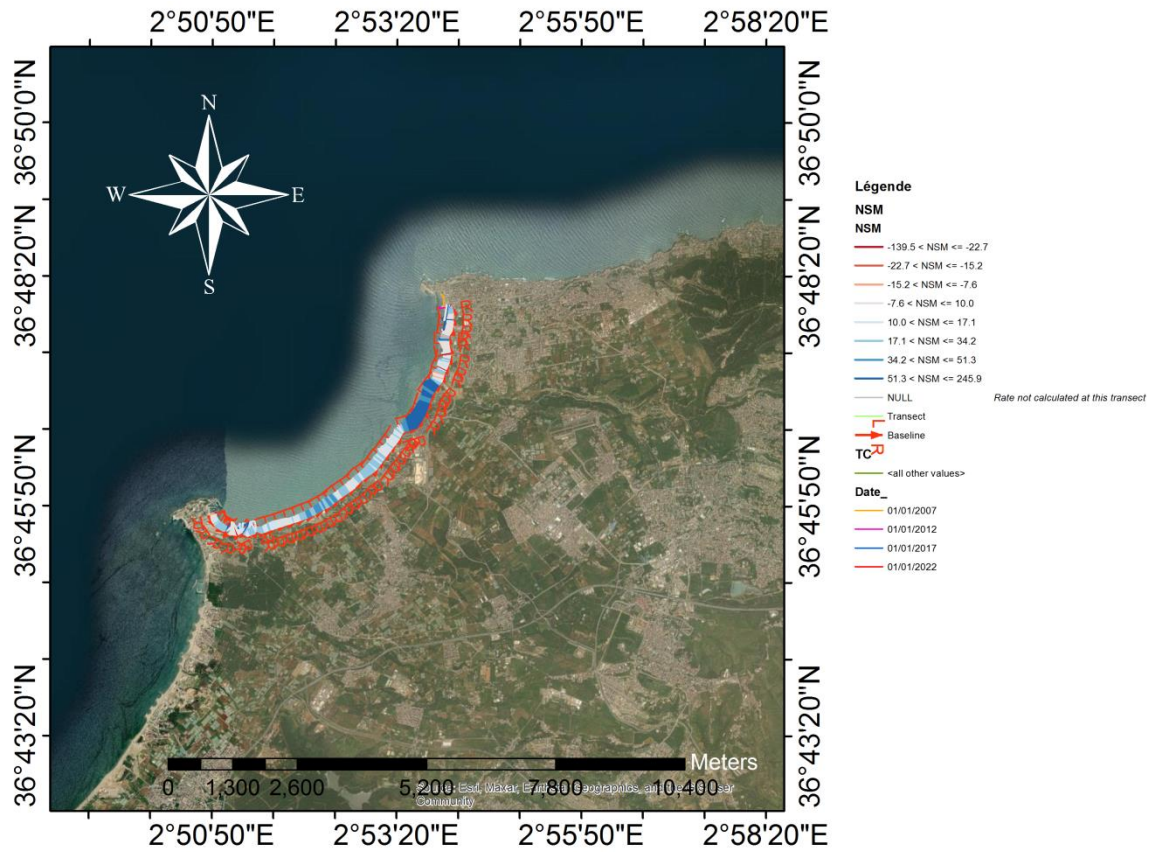


Figure 44: Illustration du mouvement net des rivages (NSM) de la baie d'El Djamila entre 2007 et 2022.

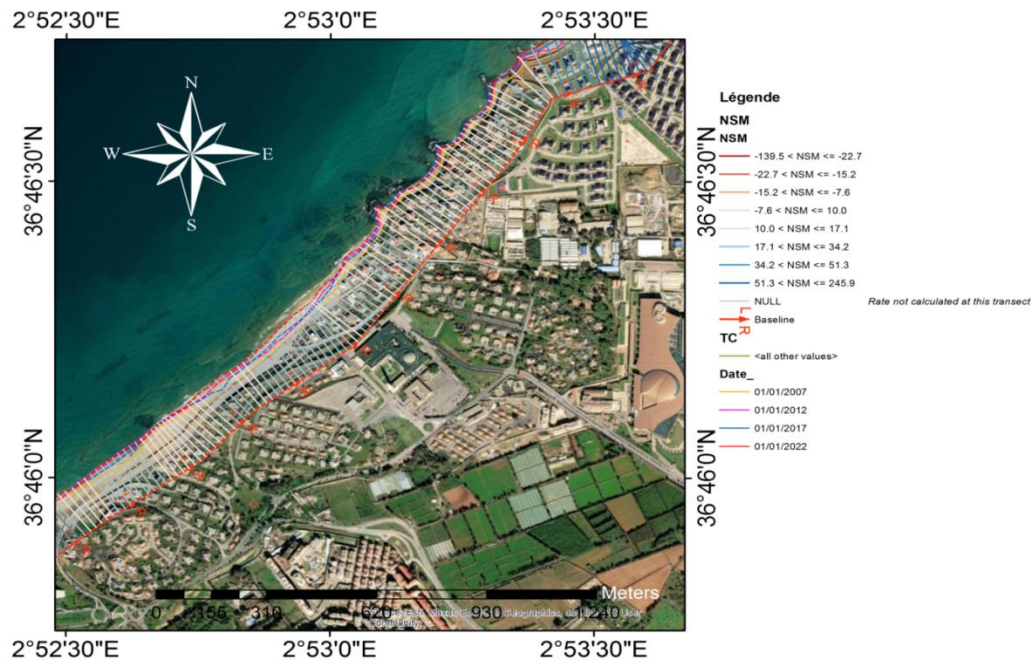


Figure 45: Illustration du mouvement net des rivages (NSM) entre 2007 et 2022.

• **Commentaire**

La figure 45 nous renseigne sur la distance de déplacement du trait de côte sur chaque transect entre 2007 et 2022 dans la plage de Sidi Fredj.

La couleur bleu des transects indique une accrétion de 17,1 m à 245,9 m, par contre les couleurs gris et rouge des transects indiquent une érosion, de grandeurs respectueusement de -7.6m à -10m et de -139.5m à -7.6m pour les fortes érosions.

On remarque que dans la partie NE du littoral de Sidi Fredj, il y a un engraissement (recul de la mer) avec distances qui peuvent atteindre 245,9 m (transects bleus). Et dans la partie O de Sidi Fredj il ya accrétion modérée.

Les déplacements des traits de côte de la plage de Sidi Fredj entre 2007 et 2022 observés sur la figure 40, indiquent que la majeure partie de la plage est relativement en engraissement.

b) Le taux de point final (EPR)

Pour bien comprendre l'évolution de ces différents traits de côte selon une échelle spatio-temporelle, le support statistique du taux de point final (End Point Rate) a été projeté, pour élaborer une carte représentative (Fig. 46).

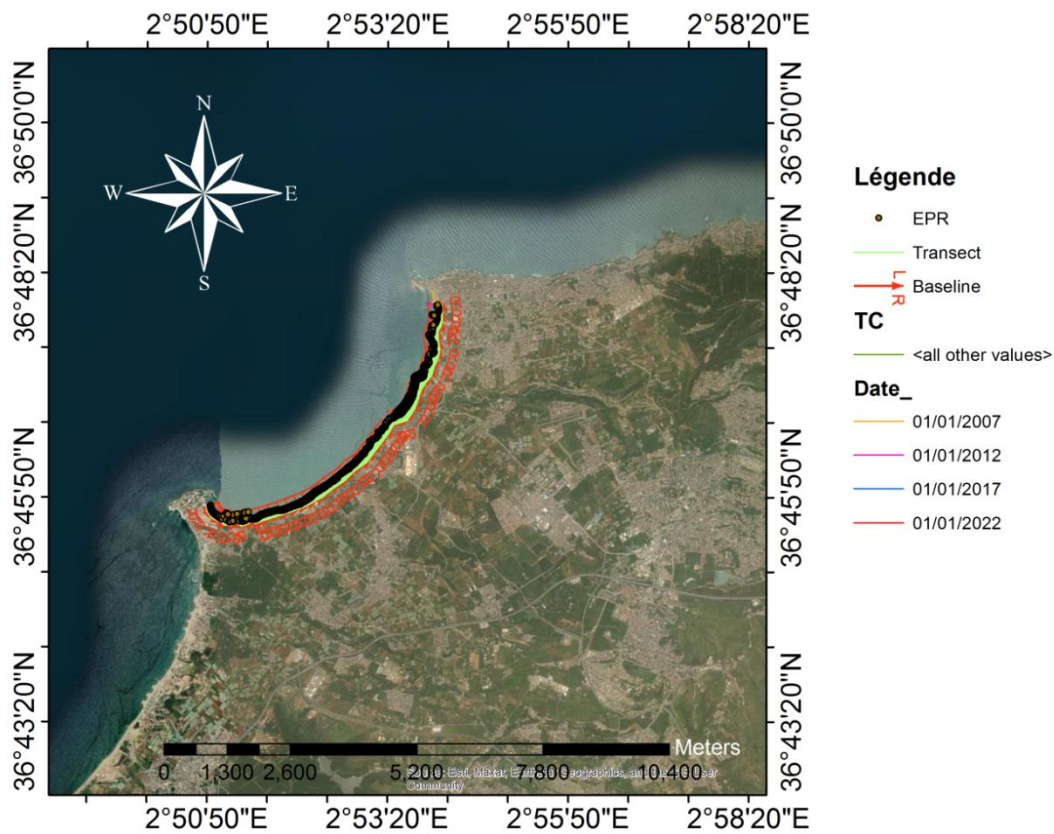


Figure 46: Représentation du rythme d'évolution du trait de côte de la baie d'El Djamila entre 2007 et 2022.

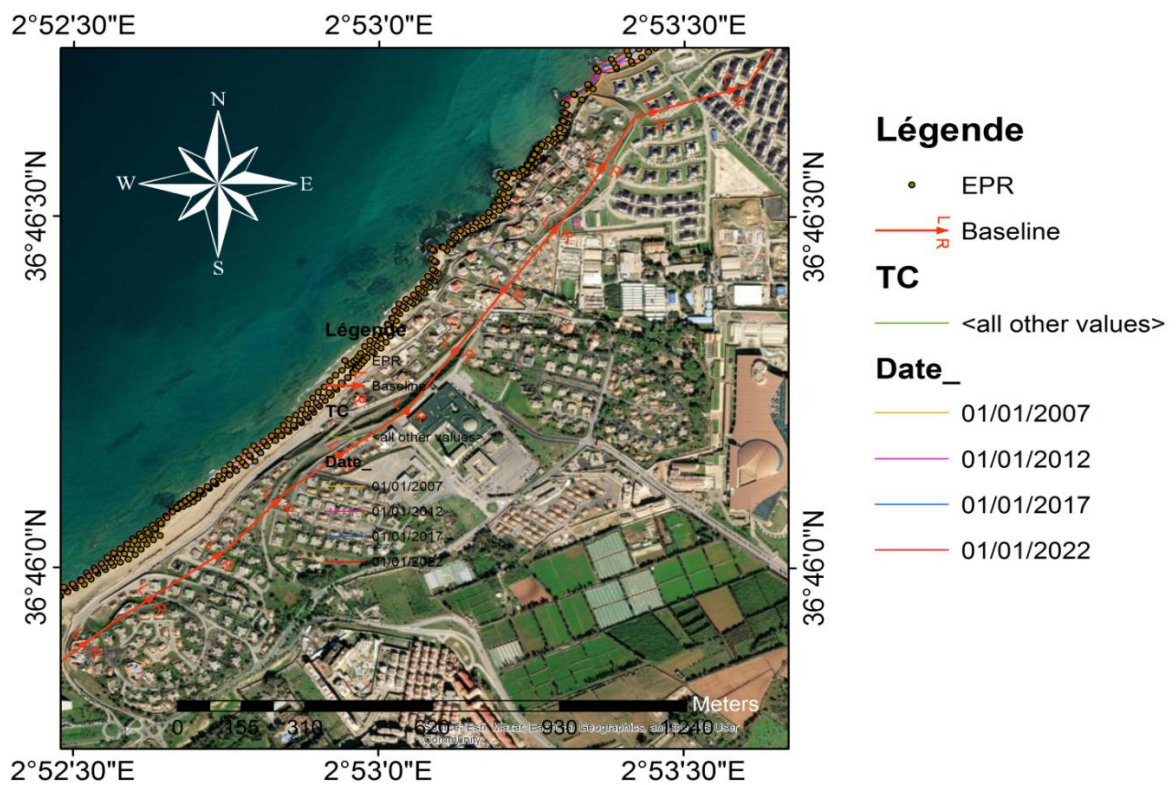


Figure 47: Représentation du rythme d'évolution du trait de côte des plages de Sidi Fredj entre 2007 et 2022.

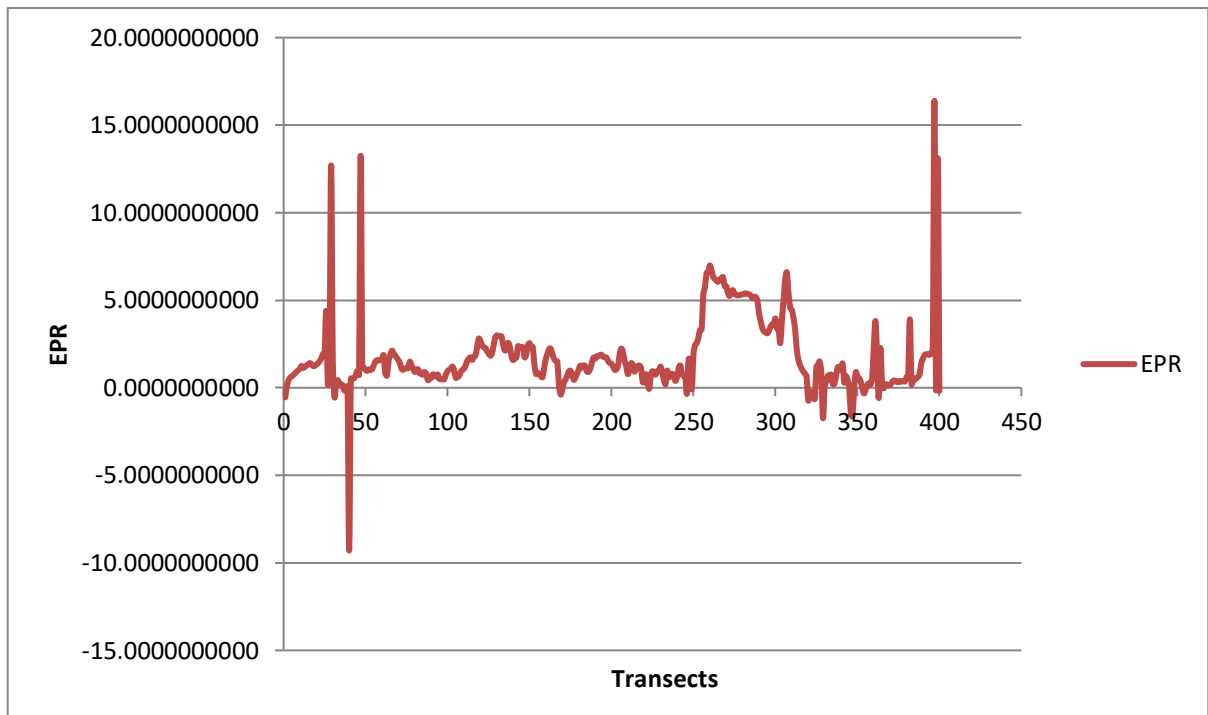


Figure 48: Diagramme d'EPR en fonction des transects montrant l'évolution du trait de côte la baie d'El Djamila (cas des plages de Sidi Fredj) entre 2007 et 2022.

- **Commentaire**

La figure 48, nous renseigne sur les variations qui ont affectées les plages de Sidi Fredj au cours de ces 15 dernières années, en effet, le trait de côte entre 2007 et 2022 a subi beaucoup de changements.

Selon le diagramme d'EPR, on observe qu'il y a une érosion moyenne dans la partie centrale des plages de Sidi Fredj, la figure 47 illustre cette érosion. En cette partie le taux net moyen du recul est d'une grandeur de 1 à 15 m/an. Cela pourrait être dû aux fortes actions de -1 à -10 m d'hydrodynamique qui existent dans ces plages, en effet, elle est exposée à toutes les directions principales des houles.

c) Le Linear Regression Rate change (LRR)

- **Commentaire**

La figure 49, représente le taux de la régression linéaire dans la baie d'El Djamila (cas des plages de Sidi Fredj), entre les années 2007, 2012, 2017 et 2022. On constate que le trait de côte a subi des changements remarquables.

Au niveau de la plage (Fig. 50), la tendance d'engraissement est relativement stable entre -11,4 et 14,8 m/an, cela dû en grande partie au blocage du transit sédimentaire par un épi au niveau du port de Sidi Fredj dans la partie Ouest, ce qui fait que la tendance d'érosion est plus grande dans cette zone.

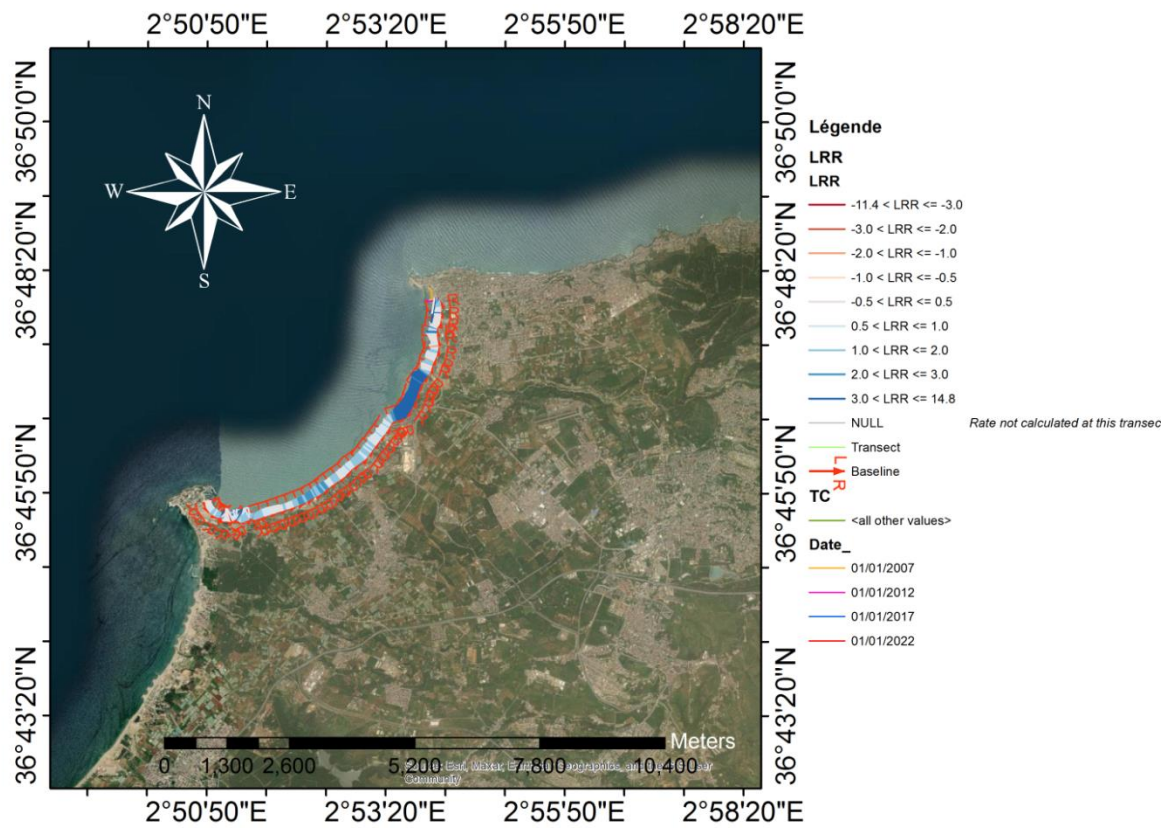


Figure 49: Représentation de LRR selon chaque transect de la baie d'El Djamilia entre 2007 et 2022 .

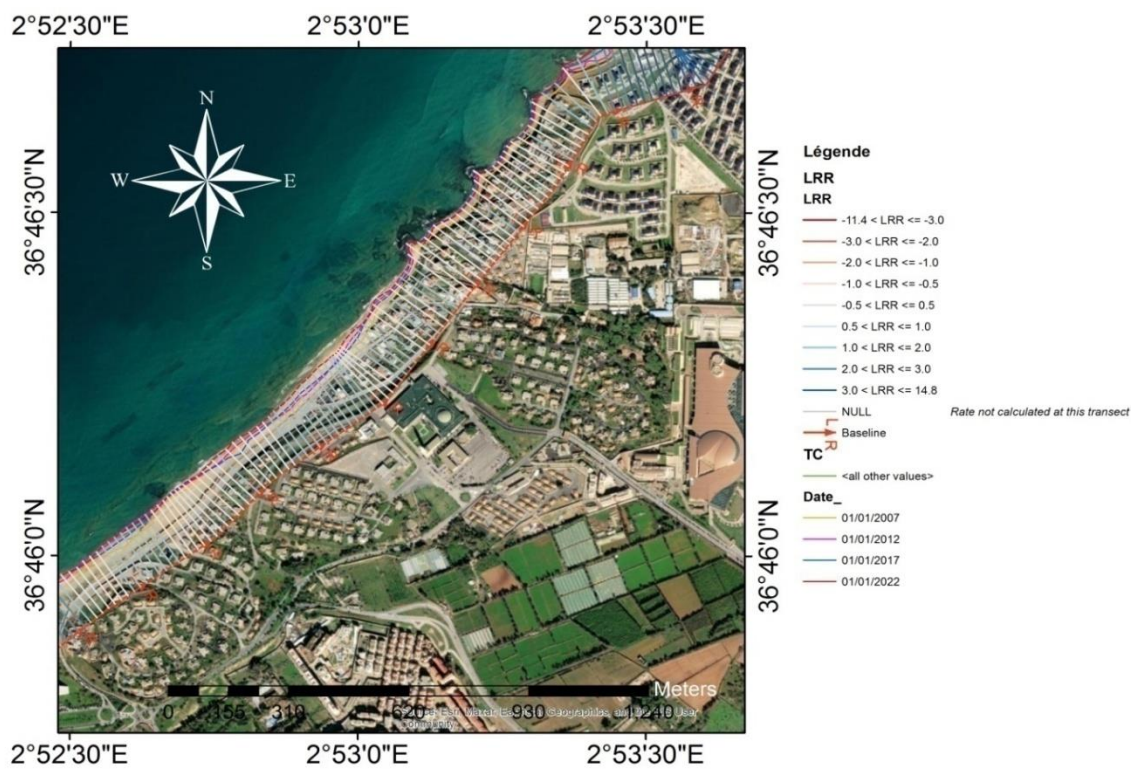


Figure 50: Représentation de LRR selon chaque transect des plages de Sidi Fredj entre 2007 et 2022 .

d) Analyse du bilan sédimentaire

La cartographie de l'évolution surfacique des plages de Sidi Fredj, nous a permis de calculer les surfaces d'érosion et d'accrétion pour effectuer des histogrammes des bilans sédimentaires. L'analyse du bilan sédimentaire nous permet de quantifier les surfaces gagnées et les surfaces perdues des plages de Sidi Fredj traits de côtes 2007 et 2022.

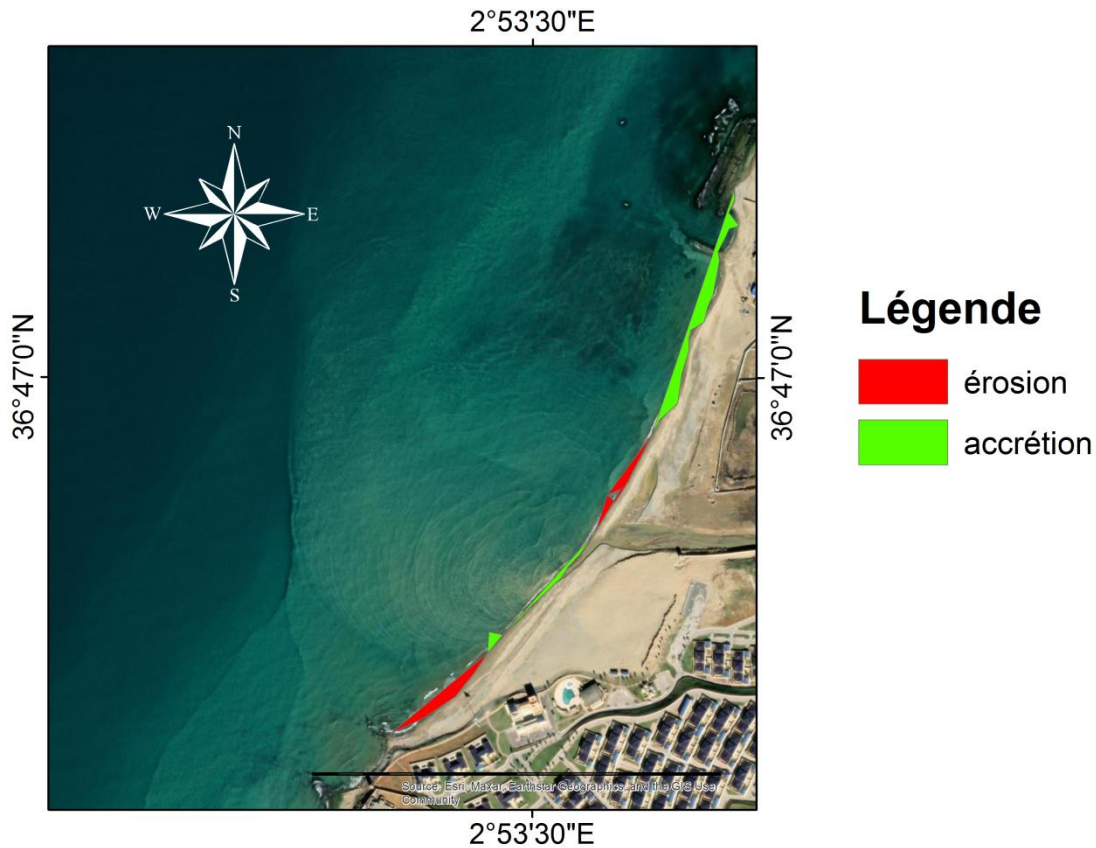


Figure 51: Analyse du taux d'évolution en surface entre 2007 et 2022 (cas de la partie NE des plages de Sidi Fredj).

- **Commentaire**

La baie d'El Djamila (cas des plages de Sidi Fredj). Cette figure montre une grande accumulation dans la majeure partie de la zone représentée (NE) de Sidi Fredj, la couleur rouge indique qu'il y a une forte érosion au niveau de certaines zones, par contre la couleur vert indique il y a accrétion dans d'autres zones de la partie considérée des plages de Sidi Fredj, notamment au NE sur la figure.

Conclusion

Les traits de la côte de la baie d'El Djamila sont un élément essentiel de l'étude de la géomorphologie et de la dynamique côtière de la région étudiée. L'étude des traits de côte permet de comprendre les processus géologiques, océanographiques et météorologiques qui influencent l'évolution de la baie au fil du temps.

Selon les résultats obtenus on conclut :

Il ya un fort engraissement de littorale qui peut atteindre 245,9 m. Cela pourrait être du aux fortes actions d'hydrodynamique qui existent dans ces plages, en effet, elle est exposée à toutes les directions principales des houles.

Un recul moyen de littoral de la baie d'El Djamila de 1 à 15 m/an à l'échelle de la baie.

Une érosion moyenne dans la partie centrale des plages de Sidi Fredj qui peut aller de -1 à -10 m/an.

**Chapitre V:
Submersion marine**

1. Introduction

La côte de la zone d'étude constitue un atout indéniable pour le développement économique et social, en particulier le développement du tourisme. Cette côte présente également certains risques pour son exploitation et son développement, y compris les problèmes liés à l'érosion et les inondations côtières. La faible topographie de la zone d'étude accentuée par une occupation humaine excessive et parfois anarchique l'ont rendu vulnérable face à ce nouvel épisode de hausse du niveau moyen de la mer Méditerranée et l'amplification de phénomènes de submersions marines et donc l'érosion de cette frange côtière.

2. La submersion marine

La submersion marine est un phénomène naturel qui se produit lorsque les zones côtières sont envahies par les eaux de la mer. Cela peut se produire en raison de différentes causes, telles que les marées hautes, les tempêtes ou les tsunamis. Lorsque la submersion marine se produit, des étendues de terres généralement sèches et habitables sont submergées par l'eau de mer, ce qui peut causer des dommages aux infrastructures importantes, à l'environnement et aux populations locales.

La submersion marine est un problème croissant dans de nombreuses régions du monde, en raison du changement climatique et de l'élévation du niveau de la mer. Les scientifiques mentionnent que ces phénomènes vont s'intensifier à l'avenir, ce qui souligne l'importance de prendre des mesures pour atténuer les effets de la submersion marine, tels que la construction de digues, la mise en place de systèmes d'alerte l'adoption précoce et précoce des politiques de gestion des zones côtières.

Les submersion envahissent généralement les terrains situés en dessous du niveau des plus hautes mers mais atteignent aussi parfois des altitudes supérieures si des projections d'eaux marines franchissent des ouvrages de protection et/ou la crête des cordons littoraux.

Elles peuvent se produire lorsqu'il y a :

- Rupture d'un cordon sédimentaire (plage, dunes, cordon de galets) suite à une forte érosion ;
- Débordement ou rupture de digues et d'ouvrages de protection ;
- Franchissement exceptionnels de ces ouvrages par des « paquets de mer ».

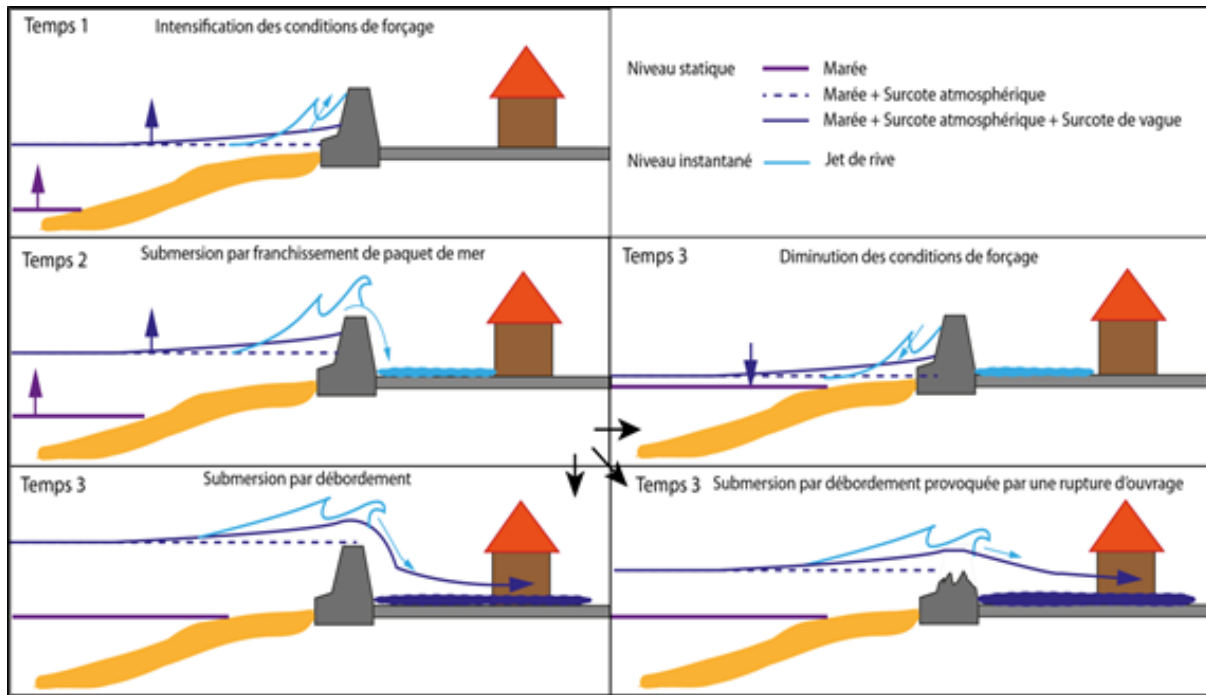


Figure 52: Typologie des submersions marines (franchissement, débordement, rupture d’ouvrage) (BRGM et Cachan, 2012).

3. Rappels théoriques sur les phénomènes physiques responsables des submersions marines d’origine météorologique

Les processus physiques responsables de la submersion marine sont liés principalement à l’action de la pression atmosphérique et du vent sur le plan d’eau :

- La surcote atmosphérique : le passage d’un important système dépressionnaire est caractérisé par des variations du niveau marin selon deux mécanismes :
 - La chute de la pression atmosphérique entraîne une surélévation du niveau du plan d’eau. C’est le phénomène de baromètre inverse. Une diminution de 1hPa équivaut à une élévation de 1cm du plan d’eau.
 - Le vent exerce une contrainte à la surface de l’eau en générant une modification du niveau du plan d’eau statique (surcote ou décote) et des courants.
- La surcote associée à la houle (setup) : à l’approche de la côte, les vagues déferlent elles transfèrent leur énergie sur la colonne d’eau provoquant une élévation moyenne du niveau d’eau (setup).
- La surcote totale : la part relative de la surcote atmosphérique et de la surcote associée à la houle dans la surcote totale est fortement dépendante de la bathymétrie du domaine considéré.

Niveau marin maximal statique et instantané : Le niveau maximal atteint par la mer est défini en tenant compte du « jet-de-rive » (swash). On appelle run-up, l’altitude maximale atteint par le jet-de-rive sur la côte.

4. Méthodologie

Dans le cadre de cette étude prospective, la caractérisation et la cartographie des terres qui sont à risque de submersion dans la cote de la zone d'étude sont basées sur des scénarios d'élévation du niveau de la mer, modélisée par l'utilisation du logiciel de cartographie ArcGIS 10.8.

La méthode retenue pour l'estimation de l'aléa submersion est celle utilisée par plusieurs auteurs (Flecher et al. 1995 ; Bellomo et al. 1999 ; Benavente et al. 2006 ; Suanez et al. 2007 ; Kumar et al. 2008).

Cette méthode est basée sur :

- Le calcul des niveaux d'eaux extrêmes à la côte d'occurrence annuelle, biennale, vingtennale et centennale, et en tenant compte du waveset-up, windset-up et l'élévation du niveau de la mer due à la baisse de la pression atmosphérique.
- En deuxième lieu, ce niveau d'eau d'inondation est superposé à un modèle numérique de terrain (MNT).

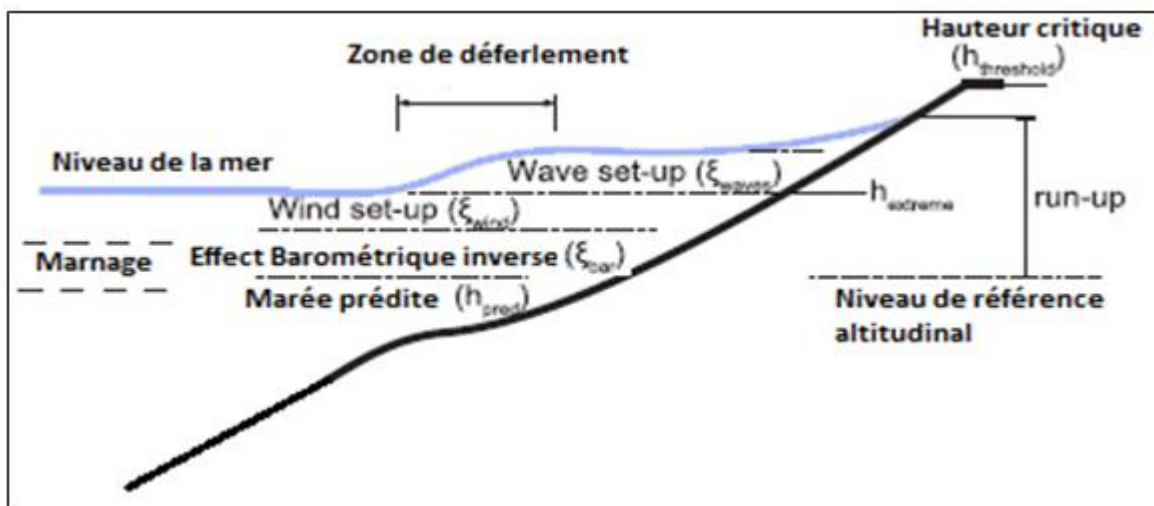


Figure 53: Schéma montrant les principaux processus hydrodynamiques pour le calcul des niveaux d'eau extrêmes à la côte.

4.1- Scénarios de niveaux d'eau extrêmes

En l'absence des données concernant les surcotes et décotes, enregistrements marégraphiques et de tempêtes au large de la côte de la zone d'étude, les niveaux d'inondation ont été calculés à partir l'équation de Hoozemans et al. 1993:

$$Dft = MHW + St + Wf + Pf \quad \text{Equation}$$

Où:

MHW: Niveau moyen des hautes eaux ;

St: Elévation relative du niveau de la mer ;

Wf: Hauteur des houles de tempêtes responsables des inondations ;

Pf: Elévation du niveau marin en fonction de la pression atmosphérique.

○ **Niveau d'inondation minimum**

Déterminé à partir des valeurs de niveau moyen des hautes eaux, les amplitudes moyennes de la houle, et la plus basse estimation de l'élévation du niveau de la mer.

○ **Niveau d'inondation maximum**

Calculé à partir des valeurs de niveau maximum des hautes eaux, des amplitudes des houles de tempêtes, et de la plus forte estimation de l'élévation du niveau de la mer.

4.1.1. Variation du niveau de la mer en fonction de la pression atmosphérique

Le réglage barométrique : le niveau de la mer peut varier en fonction des changements de la pression atmosphérique ; ainsi les basses pressions créent une surcote alors que les hautes pressions engendrent une décote. Cette relation peut être approchée à partir de la formule qui suit (Ménard et al. 2003) :

$$Z = 0.01 (1013 - p)$$

p : est la pression atmosphérique en hectopascal.

L'élévation du niveau d'eau est considérée comme étant d'environ 0,10 m pour chaque chute de 10hPa sous la pression barométrique normale (1013hPa). En Algérie, les pressions oscillent entre 952hPa et 1050hPa, faisant varier le niveau de la mer entre -0.37m et 0.63m.

4.1.2. Hauteur significative au large

Les données des houles et des vents sont des mesures altimétriques sur une période de 30 ans (1992-2022). Elles ont été obtenues à partir de la base de données «Infoplaza Marin Weather (2022)» disponible sur le site web www.waveclimate. Le traitement statistique de ces données a permis de définir la hauteur de vague centennale associée à la hauteur des houles provoquant les inondations côtières, et a permis aussi de faire une classification des fréquences d'apparition annuelle des classes des hauteurs significatives des houles au large en fonction de la direction.

✓ Houles extrêmes au large

La définition de la distribution de probabilité d'événements de grande ampleur et extrêmes est utile dans le calcul des niveaux d'inondation. La détermination du climat d'agitation à long terme a pour but d'associer une hauteur de la houle à une période de retour donnée (habituellement 30 à 100 ans) (Ciria et al. 2009).

Par définition, la houle de période de retour **R** est la houle dont l'amplitude **H(R)** est atteinte et dépassée en moyenne pendant une durée cumulée de 24 h au cours d'une durée totale égale à **R** années. Sa probabilité d'occurrence s'exprime par :

$$P=24365*24*R=1365*R$$

R : Nombre d'année (**R** = 1 : Houle annale, **R** = 2 : Houle biennale, **R** = 5 : houle quinquennale, **R** = 10 : Houle décennale, **R** = 20 : Houle vingtennale, **R** = 50 : Houle cinquantennale, **R** = 100 : Houle centennale, ...).

Si on considère que l'état de la mer change 3 fois par 24 heures l'équation de la probabilité d'occurrence devient : $P=243*365*24*R=13*365*R$

Une fois la période de retour fixée, la hauteur correspondante peut être déterminée par extrapolation de la courbe hauteur-probabilité dont on suppose qu'elle évolue selon la loi de LARRAS qui suppose que les valeurs des creux extrêmes peuvent être approchées par l'équation :

$$H=B-A\log P$$

Où

A : Pente

B : Intersection de la droite de régression avec l'axe y.

H : Hauteur de la houle R-annale (m).

P : Probabilité d'occurrence de la houle R-annuelle.

La démarche adoptée consiste à déterminer la pente A et l'intersection B à partir de la droite de régression tracée en fonction des Hauteurs significatives (Hs) de l'enregistrement disponible et des fréquences cumulées correspondantes (-log(F)).

Ces deux valeurs (A et B) seront appliquées dans la loi de LARRAS pour déterminer les H extrêmes (R-annuelles) en fonction des probabilités d'occurrence (R-annuelles) correspondante.

Tableau 01 : Résultats des hauteurs significatives associées aux périodes de retour (m).

Période de retour (R)	N	NNW	NW
Houle annuelle (1 an)	4.25	4.44	4.09
Houle Décennale (10 ans)	6.25	5.42	5.54
Houle veingtenale (20 ans)	6.87	5.61	5.87
Houle Cinquantennale (50 ans)	7.68	5.81	6.24
Houle Centennale (100 ans)	8.28	5.93	6.47

Remarque : D'après le tableau 01, les fortes agitations marines proviennent des secteurs N, cette direction est considérée comme une direction pénalisante avec une altitude maximale Hs = 8.28 m pour la direction nord.

✓ Les houles extrêmes à la côte

En principe, la hauteur et la période des houles extrêmes doivent être déterminées au point de déferlement. Les paramètres de houles extrêmes à la côte sont déterminés avec un modèle 2D (Mike 21), ce qui permet de représenter la formation de la houle et son évolution à grande échelle spatiale. Les valeurs utilisées comme données d'entrée pour la modélisation des houles extrêmes à la côte sont celles des secteurs dominants(N).

D'après les résultats de l'étude des houles extrêmes au large, on a pris la moyenne des amplitudes des houles provenant de la direction N comme étant les plus défavorables pour le site d'étude. Les résultats de simulation de ces houles sont présentés dans les figures suivantes:

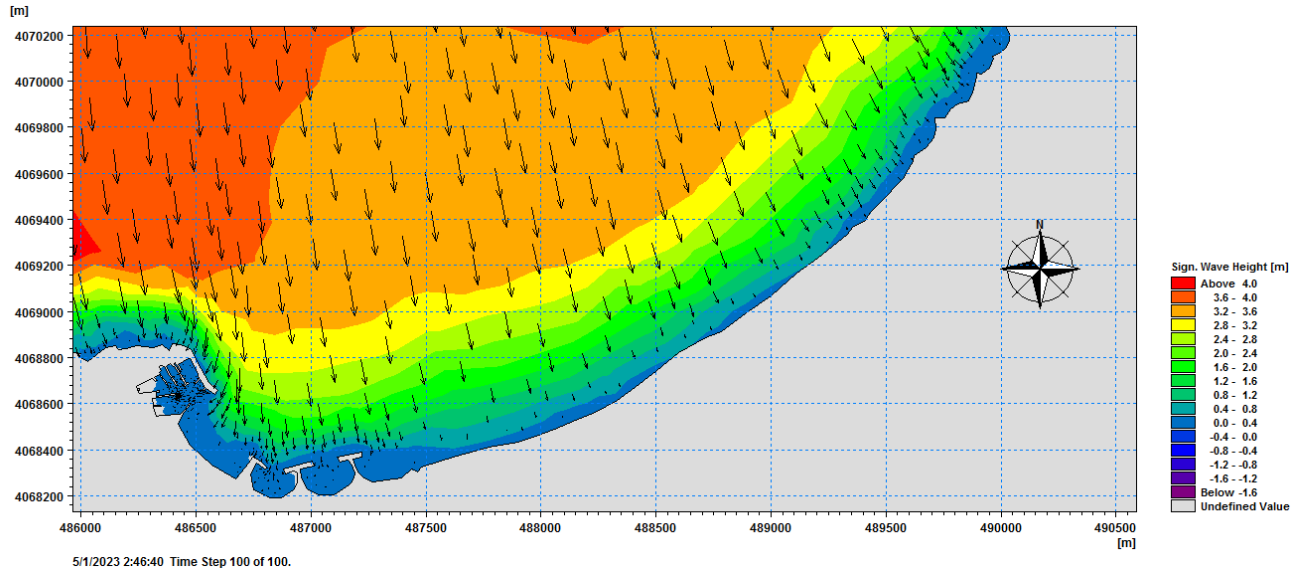


Figure 54: Le plan de vague de la direction N associé à la période de retour 1an.

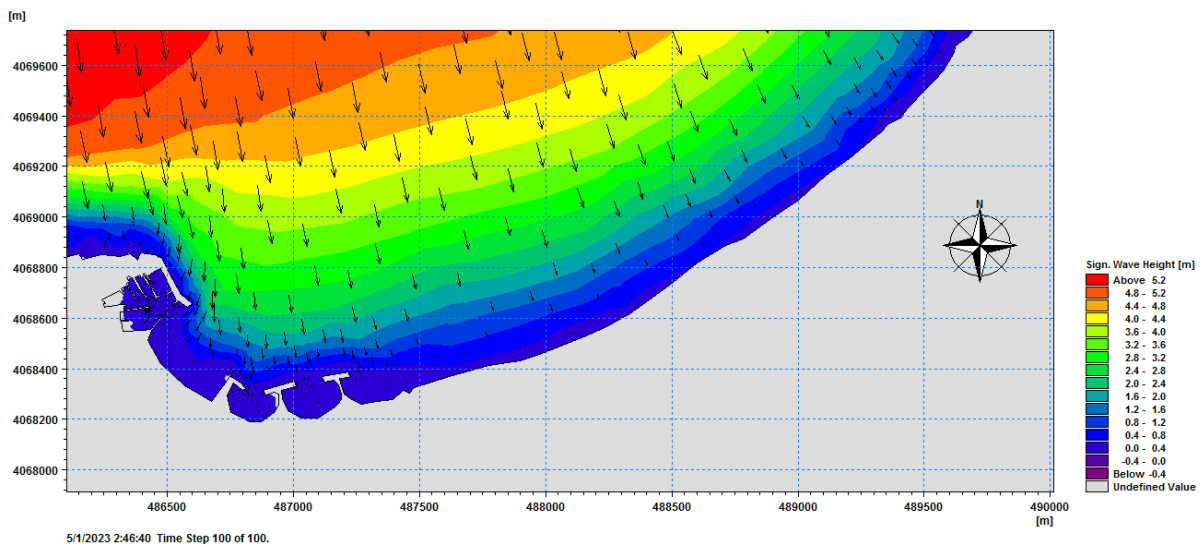


Figure 55 : Le plan de vague de la direction N associé à la période de retour 20ans.

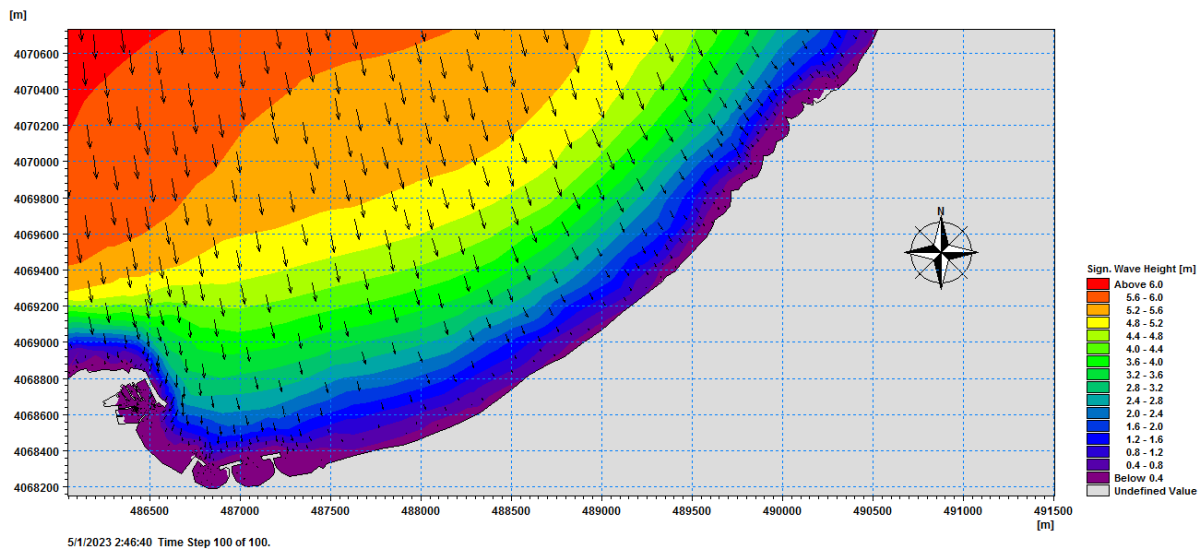


Figure 56: Le plan de vague de la direction N associé à la période de retour 50ans.

5. Les zones à risque d'inondation

Quel que soit son taux, l'élévation du niveau de la mer ferait monter le niveau d'attaque des vagues, car un niveau marin plus haut fournirait une plus haute base pour les mouvements puissants des tempêtes (WASA Group, 1998 in Niazi, 2007). Ceci se traduirait par l'inondation des terres basses et des changements dans la morphologie côtière. Les répercussions potentielles d'un tel phénomène dépendent non seulement du taux de cette hausse, de la fréquence et de l'intensité des houles de tempêtes, mais aussi de la sensibilité de la côte à la submersion, qui à son tour dépend de la morphologie et de la topographie de la zone côtière.

Il est important de noter que les zones à risque d'inondation peuvent varier en fonction de nombreux facteurs, tels que le climat, le relief, les précipitations, le drainage du sol et l'aménagement du territoire. Les autorités locales, les organismes de gestion des catastrophes et les services météorologiques effectuent généralement des évaluations pour déterminer les zones à risque d'inondation.

Ces évaluations peuvent aboutir à la création de cartes des zones inondables, qui indiquent les zones à risque élevé, modéré ou faible. Les autorités utilisent ces cartes pour la planification urbaine, la gestion des urgences et pour informer les résidents et les propriétaires fonciers des risques associés aux inondations.

Les côtes de ces niveaux ont été confrontées au model numérique du terrain (MNT).

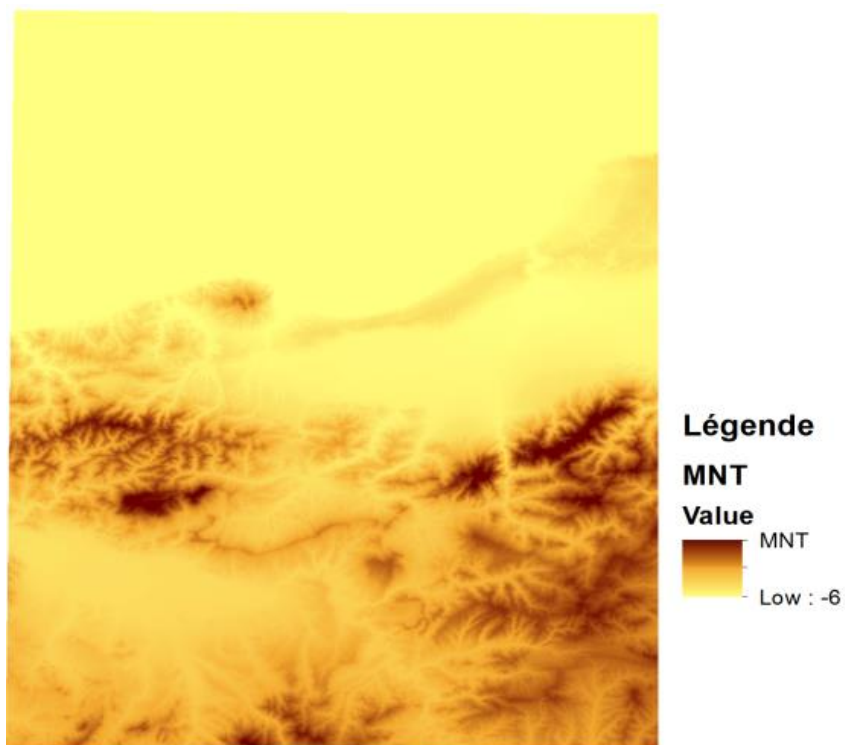


Figure 57: Le modèle numérique du terrain (MNT) en 2D de la baie d'El Djamilia.

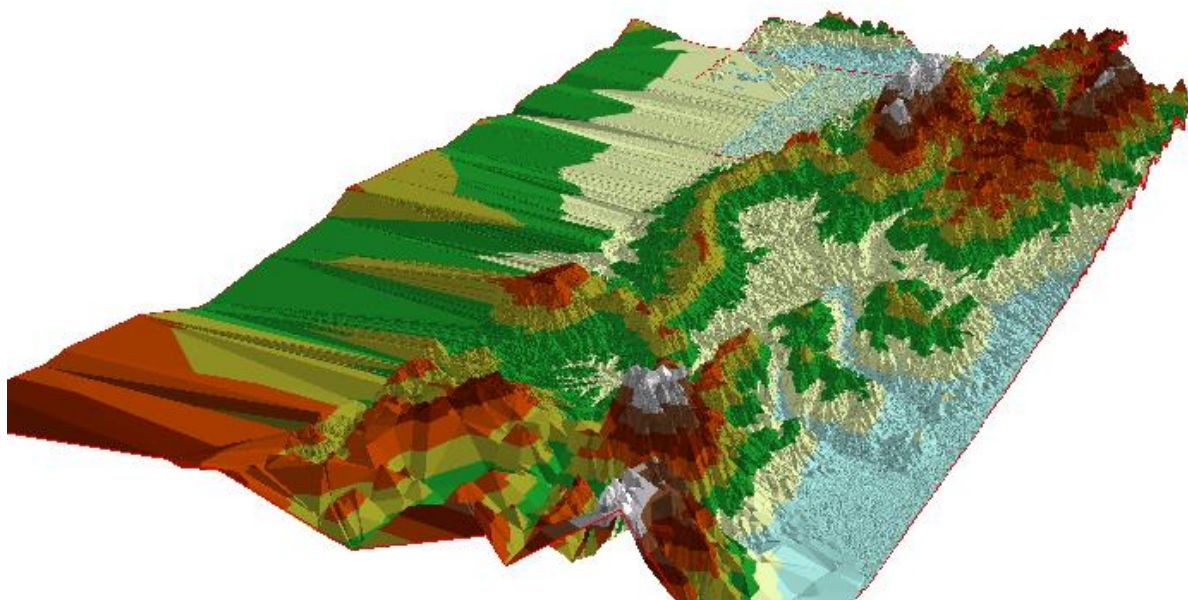


Figure 58: Le modèle numérique du terrain (MNT) en 3D de la baie d'El Djamilia.

6. Interprétation des résultats

La submersion marine est un grand risque sur la côte d'El Djamila. Les tempêtes qui touchent périodiquement ce littoral peuvent provoquer de fortes houles et des surcotes marégraphiques. Des simulations d'inondation ont été effectuées pour laquelle un MNT construit à partir d'un levé topographique détaillé de l'avant-plage, de la côte basse et du cordon dunaire.

Les cartes de submersion montrent qu'une large partie de la zone urbanisée située en arrière des dunes se trouvait sous cette côte d'inondation, soulignant ainsi le risque non négligeable de submersion en cas de disparition même partielle du cordon dunaire.

Un modèle numérique du terrain est une représentation mathématique en trois dimensions du relief de la surface terrestre. Il est généralement créé à l'aide de données topographiques fournies par des méthodes telles que la télédétection par satellite, le lidar (Light Detection and Ranging) ou la photogrammétrie.

Pour cette portion côtière, où la majorité des plages connaissent depuis 49 ans allant de 1972 à 2021 une importante érosion, les facteurs des risques d'inondation (une topographie basse, un climat de vagues de forte énergie, une hausse des niveaux moyens de la mer et une augmentation de la fréquence de tempêtes violentes) favoriseraient l'extension des zones submergées.

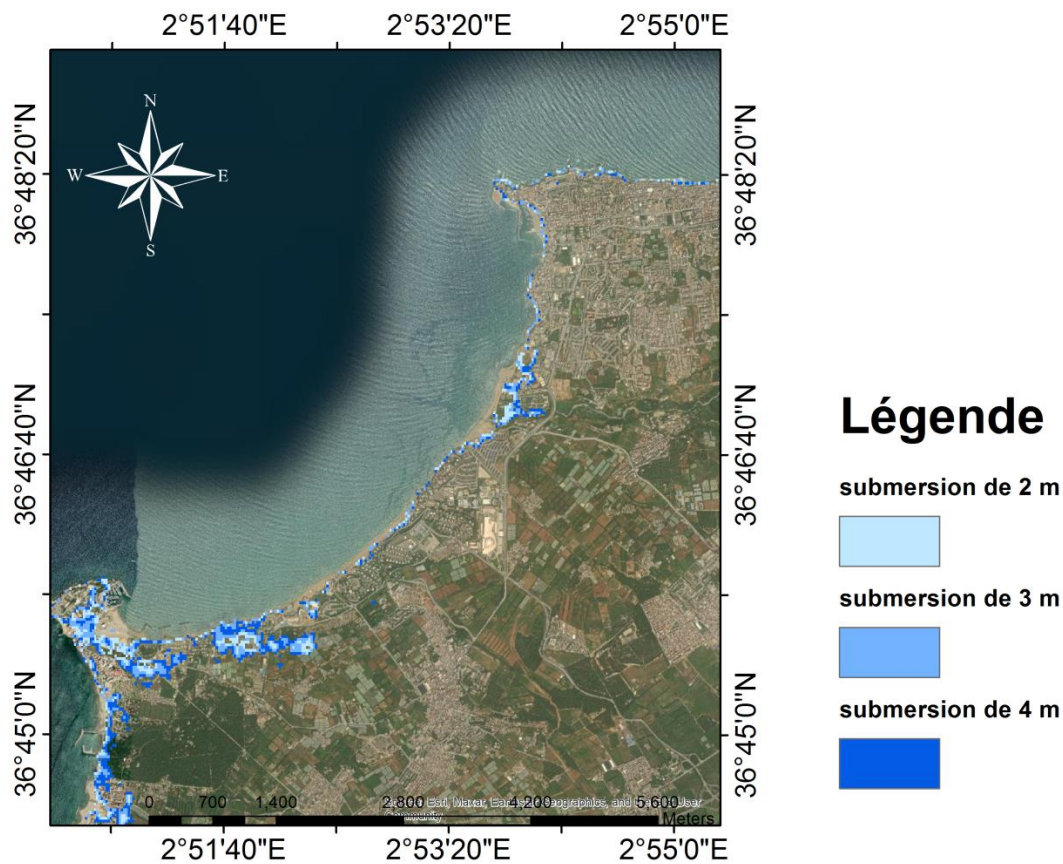


Figure 59: Carte de l'aléa submersion sur la Baie d'El Djamila en cas d'élévation de niveau de la mer.

- **Scénarios d'inondations**

À la base d'un modèle numérique du terrain MNT plusieurs traitements ont été faites, ce qui nous a permis d'établir des cartes pour l'aléa de submersion marine à des différents niveaux extrêmes d'inondation et dans ce là permet d'avoir :

Les cartes de submersion qui sont obtenues après la modélisation de ce phénomène sous ArcGIS 10.8 pour plusieurs scénarios de l'élévation de niveau marin à savoir **2m, 3m et 4m**

- **Scénario d'une élévation de 2m**

D'après les cartes on remarque non seulement que la partie Ouest de la baie (au niveau d'Oued Béni Masseuse) est la plus affectée par le niveau d'inondation de 2 m.

Dans le côté est de la baie on remarque que les surfaces occupées par les eaux marines pénètrent vers l'arrière-pays avec des distances plus ou moins importantes par rapport à la ligne du côté cela du aux ouvrages et au port.

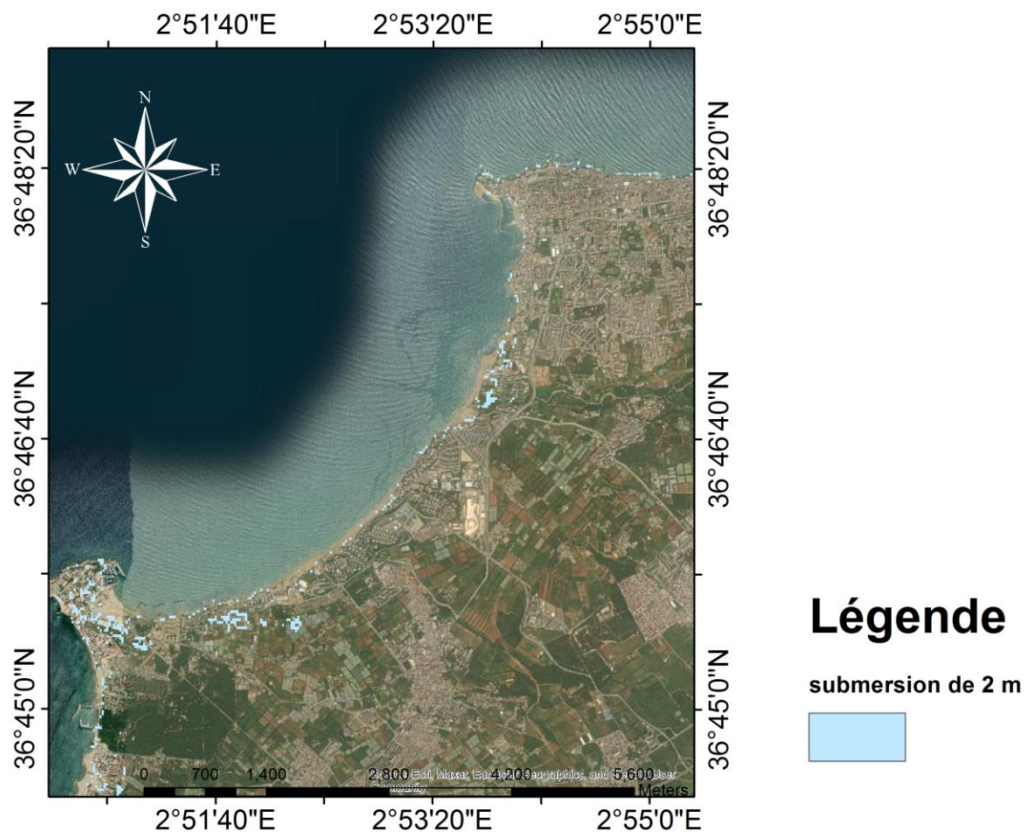


Figure 60: Carte de l'aléa submersion de 2 m sur la Baie d'El Djamilia.

- **Scénario d'une élévation de 3m**

D'après la carte de submersion de 3 mètres du niveau normal dans la baie d'El Djamilia serait considérée comme une situation très critique et dangereuse. Une telle submersion représenterait un risque majeur pour les zones côtières et les régions basses environnantes.

La surface occupée par les eaux de la mer est moins importante, par rapport au niveau marin de 3m.

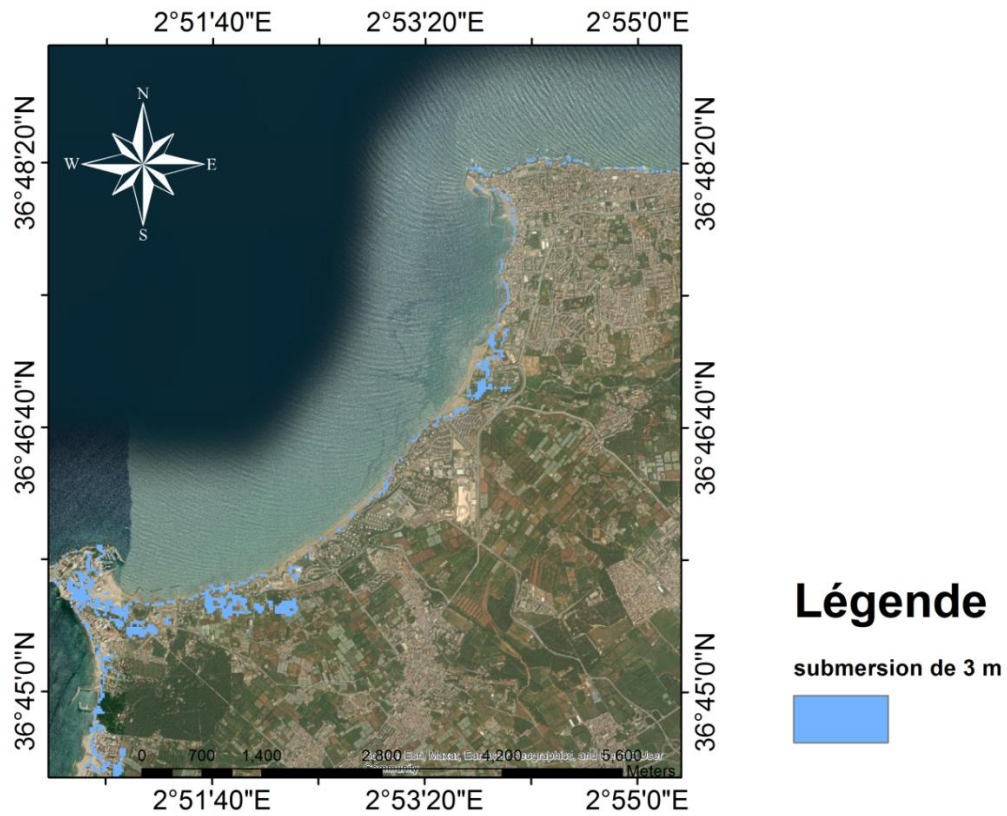


Figure 61: Carte de l'aléa submersion de 3m sur la Baie d'El Djamilia.

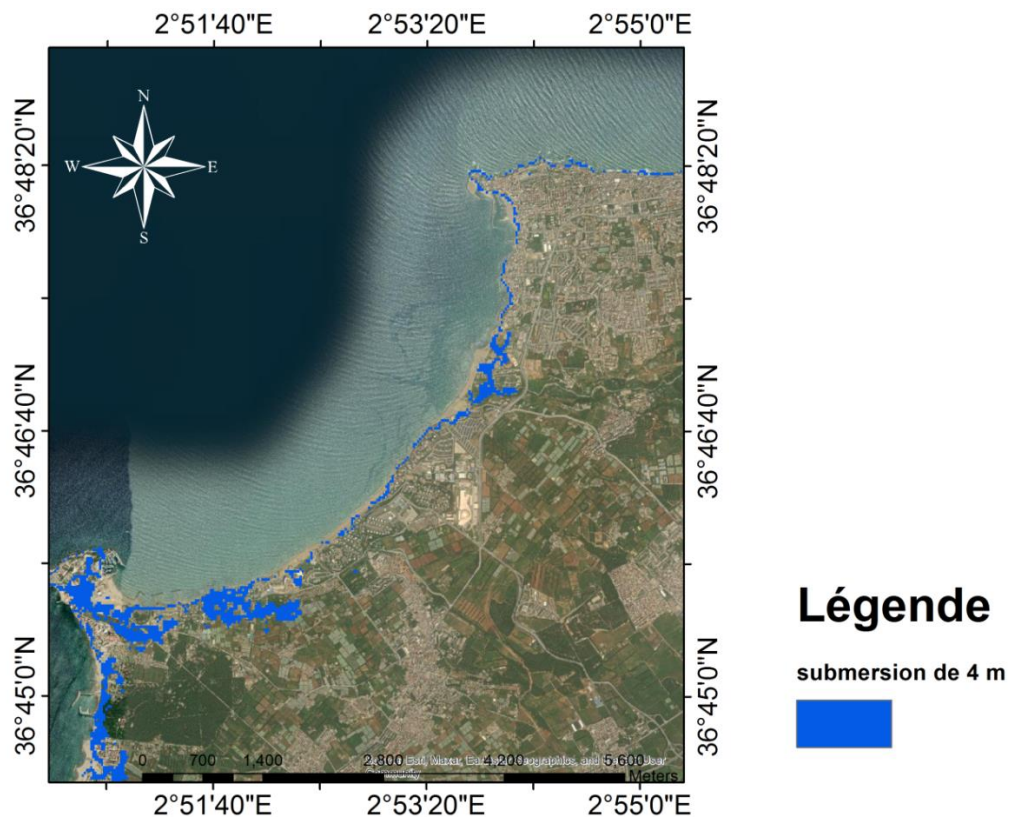


Figure 62: Carte de l'aléa submersion de 4m sur la Baie d'El Djamilia.

➤ Scénario d'une élévation de 4m

Pour un cas extrême d'une élévation de 4m de niveau marin, on remarque que la surface occupée par les eaux de la mer est plus importante en termes de superficie et de distance par rapport au trait de côte, on la comparant avec la submersion de 2 m.

Conclusion

Les résultats obtenus soulignent que l'élévation du niveau marin conjuguée à une fréquence accrue des houles de tempêtes provoquerait des inondations considérables. La cartographie des zones inondables révèle que 567.8 ha de sa superficie présenteraient un risque de submersion avec un niveau d'inondation 2 m, de 610.1 ha pour un niveau de submersion 3 m et de 958.7 ha pour le niveau de submersion 4 m.

La côte Est et Ouest sont les plus vulnérables aux inondations, en raison de la faible topographie. Quel que soit le niveau d'inondation, les conséquences seraient lourdes pour les aménagements et les infrastructures en front de mer.

Chapitre VI : Prévision des risques et adaptation

Introduction

Les risques littoraux – ici l'érosion côtière et la submersion marine - menacent un nombre croissant de territoires, d'habitants et d'activités.

1. Risques littoraux

Les risques littoraux font référence à la probabilité d'occurrence d'événements ou de phénomènes pouvant causer des dommages ou des perturbations sur les zones côtières. Ils englobent les menaces naturelles.

Le risque littoral est déterminé par une combinaison de facteurs, tels que l'intensité et la fréquence des événements météorologiques extrêmes, les caractéristiques géographiques et géologiques des côtes, l'ampleur des activités humaines, ainsi que la vulnérabilité des communautés et des écosystèmes côtiers.

Les environnements littoraux sont soumis à deux grands types de risques naturels qui doivent être pris en compte dans la gestion des aménagements.

- ✓ Le risque de submersion marine,
- ✓ Le risque d'érosion marine.

1.1 Le risque d'érosion

L'érosion du littoral se traduit par le recul du trait de côte, soit, un déplacement vers l'intérieur des terres de la limite entre le domaine maritime et continental suite à la perte de matériaux (sables, roches, sédiments) (GIEC novembre, 2020).

Ce phénomène de recul s'accélère en raison notamment de l'élévation progressive du niveau des océans, de l'effet des aménagements anthropiques, de l'accroissement des fréquences et intensités des événements météorologiques extrêmes. Même si l'observation de l'érosion se déroule sur un temps long, il s'agit d'un phénomène inéluctable (recul, accrétion) qui peut connaître des épisodes brutaux selon les endroits (GIEC novembre, 2020).

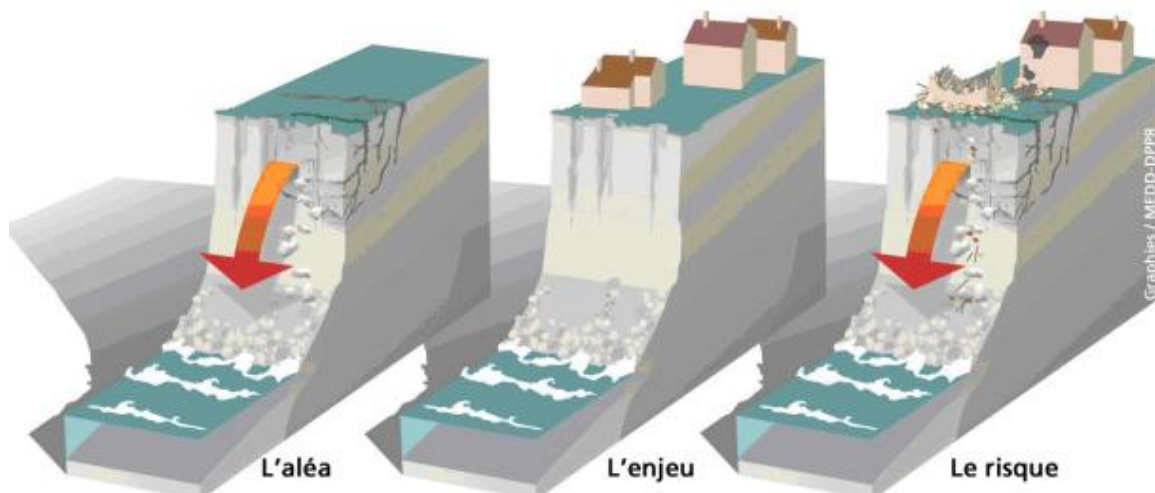


Figure 63: Schéma qui représente les risques d'érosion.

1.2 Le risque de submersion marine

Le risque est une notion qui comprend plusieurs composantes : les aléas, enjeux et les vulnérabilités (Dauphiné et Provitolo, 2013). Léone, Meschinet De Richmond et Vinet (2010) définissent le risque naturel comme le croisement entre la probabilité qu'un phénomène naturel potentiellement destructeur (l'aléa) se réalise et les dommages possibles que ce phénomène pourrait entraîner sur des biens ou des personnes (les enjeux) dans une zone donnée. Ces enjeux peuvent être caractérisés par leur vulnérabilité (Anne-Peggy Hellequin et Patrick Pigeon, 2019).

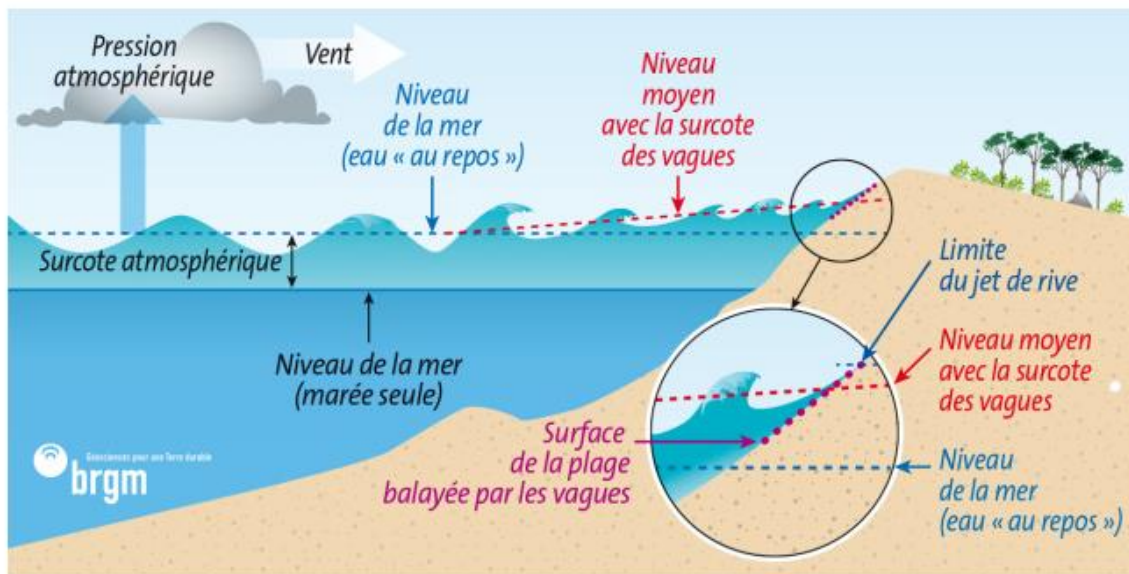


Figure 64: Schéma qui représente les risques de submersion marine

1.3 Risques et changement climatique

A l'échelle des temps géologiques, le climat de la planète n'est pas stable mais variable avec des alternances de périodes froides (périodes glaciaires) et de périodes chaudes (périodes interglaciaires). Cette variabilité climatique naturelle s'explique par les changements lents de l'orbite de la Terre dus aux interactions avec les autres planètes du système solaire (théorie de Milankovitch). Ces variations climatiques se traduisent par des variations de températures spectaculaires. Celles-ci entraînent à leur tour une variation du volume des glaces polaires et donc une variation du niveau de la mer. Par exemple, depuis la fin de la dernière période glaciaire il y a environ 18.000 ans, le niveau de la mer est remonté de 120 m. Depuis 1850 (début de l'ère industrielle) les modifications naturelles s'accroissent du fait des activités humaines. Malgré des incertitudes sur son ampleur et sa vitesse, la poursuite de l'élévation du niveau de la mer est inéluctable même si les émissions des gaz à effet de serre (GES) cessaient aujourd'hui (phénomène d'inertie du système climatique). Elle est aujourd'hui d'environ 4mm/an et pour un réchauffement au-delà de 2 °C, la vitesse de l'élévation du niveau de la mer pourrait atteindre 1cm/an en moyenne globale après 2050 d'après les scénarios des experts (Rapport GIEC, 2022).

En l'absence de mesures d'adaptation, cette élévation entraînera inévitablement des submersions marines plus fréquentes et plus intenses lors des tempêtes au cours des

prochaines décennies. Le recul du trait de côte, notamment des plages sableuses, sera également favorisé.

2. Adaptation

L'adaptation du littoral fait référence aux mesures et aux stratégies mises en place pour réduire la vulnérabilité des zones côtières aux risques et aux impacts liés aux changements climatiques et à l'évolution de l'environnement côtier. Elle vise à favoriser la résilience des communautés, des écosystèmes et des infrastructures face aux défis actuels et futurs du littoral.

L'adaptation du littoral comprend un large éventail d'actions et d'approches, qui peuvent varier en fonction des caractéristiques spécifiques de chaque région côtière.

- La construction de défenses côtières,
- La gestion durable des zones côtières,
- La restauration des écosystèmes côtiers,
- L'adaptation des infrastructures,
- La sensibilisation et l'éducation,
- Planification de l'utilisation des terres,
- Protection et gestion des plages,
- sensibilisation des communautés locales aux risques de submersion marine.

2.1 L'adaptation aux changements climatiques

L'adaptation aux changements climatiques est un processus par lequel les communautés et les écosystèmes s'ajustent aux changements et effets associés, afin de limiter les conséquences négatives et de profiter des bénéfiques potentiels. Pour les milieux humains, l'adaptation permet de se préparer aux nouvelles conditions climatiques. Dans les milieux naturels, les populations végétales et animales s'adapteront également, mais de façon réactive, et subiront davantage d'impacts négatifs à court terme des changements climatiques. L'adaptation concerne tous les niveaux décisionnels (individuel, local, régional, national, international) et exige une approche globale et très intégrée car les enjeux touchent plusieurs secteurs et vont souvent au-delà des limites administratives (Benallou, 2020).

2.2 Types de stratégie d'adaptation

L'adaptation est définie comme un ensemble d'activités visant à «réduire la vulnérabilité des systèmes naturels et humains aux impacts du changement climatique et aux risques liés au climat, en maintenant ou en accroissant la capacité d'adaptation et la résilience» (OCDE, CAD, 2011).

Trois catégories classiquement (Retrait, Accommodation et Protection) envisagées dans la plupart des études de vulnérabilité (GIEC, 1990).

Les trois (3) types des stratégies d'adaptation

- a. **Le retrait:** représente une forme d'adaptation proactive d'élimination d'impacts directs. Au lieu de tenter de protéger les terres contre l'empiètement de la mer, la stratégie consiste à abandonner les terres menacées lorsque les conditions deviennent intolérables, à déplacer et reloger les populations

- b. **L'accommodation** : consiste à poursuivre l'occupation des terres côtières tout en apportant des réajustements aux activités humaines et aux infrastructures afin d'atténuer les impacts de l'élévation du niveau de la mer. Elle représente une action intermédiaire entre la protection et le retrait.
- c. **La protection**: c'est tenter de prévenir les effets de la mer sur la terre en utilisant des structures de défense appropriées (douces et/ou en dur). C'est une réponse à l'érosion qui menace des propriétés ou des infrastructures côtières.

- **Les risques littoraux de la baie d'El Djamila et adaptation:**

D'après les résultats de ce travail, le littoral de la baie d'El Djamila a connu un fort recul de son rivage et il a subi des intrusions marines spectaculaires à des niveaux d'inondation maximal suite à une élévation du niveau marin. Des stratégies d'adaptation et de protection sont présentées, tout en proposant des mesures d'accompagnement.

L'un des principaux risques auxquels la baie d'El Djamila est confrontée est l'érosion côtière.

En raison de l'élévation du niveau de la mer et des conditions météorologiques extrêmes, les plages et les dunes de la baie peuvent subir une érosion importante, entraînant la perte de terres et la dégradation des habitats côtiers. Cette érosion expose également les infrastructures côtières, telles que les hôtels, les résidences et les installations touristiques, à des risques accrus.

L'élévation du niveau de la mer et les tempêtes peuvent provoquer des inondations dans les zones basses de la baie.

Pour faire face à ces risques, une adaptation du littoral dans la baie d'El Djamila est essentielle. Plusieurs mesures peuvent être prises pour réduire la vulnérabilité de la région.

La baie d'El Djamila fait donc face à des risques importants liés aux forçages hydrodynamiques, ultimement causés par les changements climatiques, et à l'activité humaine. Cependant, en mettant en place des mesures d'adaptation appropriées ces risques peuvent être atténués.

Il est important de noter que les solutions pour éviter les risques de littoral dans la baie d'El Djamila doivent être adaptées aux caractéristiques spécifiques de la région et être basées sur une évaluation approfondie des risques, des contraintes environnementales et des besoins locaux. L'implication et la coordination entre les autorités locales, les experts en environnement et les parties prenantes sont essentielles pour développer et mettre en œuvre des solutions efficaces.

Il faut investir dans la construction de digues et de brise-lames qui peut servir de barrières physiques pour protéger les zones sensibles des effets de la submersion marine. Ces structures sont conçues pour résister aux forces des vagues et réduire l'impact des tempêtes sur les terres intérieures.

L'implication des résidents et des parties prenantes est essentielle pour la mise en œuvre efficace de ces solutions et pour assurer la résilience à long terme du littoral face aux risques.

Conclusion Général

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était d'évaluer l'évolution spatio-temporelle du littoral de la baie d'El Djamila dans le but de la prévision des risques auxquels s'expose cette partie du littoral et de l'adaptation.

La modélisation hydrodynamique basée sur l'utilisation du logiciel de Mike 21 a permis de simuler les différents phénomènes réels tels que l'action de la houle, les courants et le transport sédimentaire. Les résultats obtenus paraissent réalistes, ils montrent clairement une forte action des houles et des vagues au niveau de la zone des Sidi Fredj. La modélisation de la dynamique sédimentaire montre que le transport sédimentaire annuel est dirigé vers l'ouest avec un maximum d'accumulation situé dans la partie ouest au voisinage du port de Sidi Fredj à cause des ouvrages de protection.

Etude de l'évolution du traits de côte par l'utilisation du logiciel ArcGIS (outil de DSAS), pour l'évaluation de la cinématique du trait de côte a permis ; de créer des bases de données, de faire des comparaisons statistiques, de ressortir avec des résultats concernant l'évolution géomorphologique de la zone d'étude entre 2007 et 2022 dans le temps et dans l'espace ainsi que de mettre en évidence et quantifier les processus géologiques à l'origine de ces modifications géomorphologiques, tels que l'érosion et l'accrétion. En effet, les résultats obtenus nous informent que pour la période considérée la tendance générale observée à l'échelle de la baie est qu'elle subit une accrétion, il ya un fort engraissement de son littorale qui peut atteindre 245,9 m. La baie d'El Djamila a enregistré un recul de son littoral de 1 à 15 m/an à échelle de la baie. Cela pourrait être du aux fortes actions d'hydrodynamique qui existent dans ces plages, en effet, elle est exposée à toutes les directions principales des houles et au blocage du transit sédimentaire par un épi au niveau du port de Sidi Fredj. Néanmoins, la partie centrale des plages de Sidi Fredj semble plus vulnérable, elle subit une érosion qui peut atteindre -7.6m/a. En effet, les houles en provenance du secteur Ouest, génèrent un transport longitudinal vers l'Est dans la zone de Moretti avec un débit de 2488 m³/an /m, ce qui provoque l'érosion de cette partie. Une tendance de perte de sédiments vers le large engendré par des courants de retours avec un taux de 2240 m³/an /m est constatée.

L'étude de la submersion marine dans la baie d'El Djamila est une composante essentielle de la gestion des risques côtiers et de la protection de l'environnement. Les résultats obtenus de la simulation de différents scénarios de submersion marine révèlent que l'élévation du niveau marin conjuguée à une fréquence accrue des houles de tempêtes provoquerait des inondations considérables. La cartographie des zones inondables révèle que 567.8 ha de sa superficie présenteraient un risque de submersion avec un niveau d'inondation 2 m ; de 610.1 ha pour un niveau de submersion 3 m et de 958.7 ha pour le niveau de submersion 4 m.

En ce qui concerne les prévisions des risques, il est important de noter que le changement climatique, qui a comme conséquence la montée du niveau de la mer et une amplification de la fréquence des tempêtes, augmente la vulnérabilité du littoral de la baie d'El Djamila aux risques côtiers. Pour faire face à ces défis, des mesures d'adaptation sont nécessaires. Cela peut inclure la construction de structures de protection côtière telles que des brise-lames, des digues ou des épis, qui peuvent atténuer l'impact des vagues et réduire l'érosion. Une stratégie de retrait qui consiste à abandonner les terres menacées lorsque les conditions deviennent intolérables, à déplacer et reloger les populations des zones les plus vulnérables.

Bibliographie

- Ahfir, Y, Meziane. I (2016).** Modélisation numérique de la cinématique du trait de côte et la dynamique sédimentaire des plages sableuses (Oran, Bou-Ismaïl, Alger, Bejaïa et Skikda) Cas d'étude : Sidi Fredj). Mémoire d'ingénieur. Aménagement du Littoral: Dely Brahim. ENSSMAL, p.p 19.
- Airy, G.B (1845).** Tides and waves. Extracted from the Encyclopaedia Metropolitana, Tom. V. p.p 241-396. URL <http://books.google.co.uk/books?id=41dSAAAacAAJ>.
- Al Sid Chik .S, Lainser.K (2007).** Baie de Bou Ismaïl et Baie d'El Djamilia: Paramètres océanographiques, gestion littorale et imagerie bathymétrique. Mémoire d'ingénieur, ENSSMAL, p.p 8-13.
- Amrouni (2008).** Morphodynamique d'une plage sableuse microtidale barres : côte nord de Mahdia (Tunisie orientale).
- Amarouche. K (2015).** Contribution à la recherche des zones à fort potentiel d'énergie houlomotrice à base d'un modèle hydrodynamique. Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL, 111 p.
- Anayat .M, Moudache.A (2010).** Pollution tellurique dans les eaux et sédiments superficiels de la baie de Bou-Ismaïl. Mémoire d'ingénieur . ISMAL, 23 p.
- Anfuso, J. Á. Martínez-del-Pozo, Rangel-Buitrago (2013).** Morphological cells in the Ragusa littoral (Sicily, Italy).
- Assogb(2018).** Travail de fin d'études: "Etude de la dynamique du trait de côte et des stratégies de gestion du risque d'érosion côtière : cas de Cotonou au Bénin de 1955 à 2018".
- Azzi. M, Boukert. H (2017).** 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). Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Dely Brahim : ENSSMAL, p49.
- Bachari. H (2009).** Modélisation et cartographie de la pollution marine et de la bathymétrie à partir de l'imagerie satellitaire.
- Benallou. I (2020).** Evaluation des impacts des changements climatiques et des activités anthropiques sur le littoral de la baie de Zemmouri : Vulnérabilité et adaptation. Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Dely Brahim : ENSSMAL.
- Belaidi. S, Hamadous. Y (2016).** (PDF) Etude hydro sédimentaire du rivage de khemisti : Application de la modélisation numérique en domaine bidimensionnel par un progiciel de calcul MIKE 21.
- Béji .Y (2020) (PDF) .**Dynamique sédimentaire du littoral de Ghar El Melah : Evolution naturelle et impacts anthropiques.
- Benrahmoun. M, Berkane. N (2015).** Evaluation de la vulnérabilité des cotes du littoral centre (Cas : la baie d'EL Djamilia). Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral . Dely Brahim: ENSSMAL.
- Belabadi. K, Ounnas. A (2011).** Étude des courants côtiers observés sur les petits fonds de la plage de Sidi Fredj: application pour la protection de la plage de Sidi Fredj. Mémoire D'ingénieur. Aménagement du littoral. Dely Brahim: ENSSMAL, p.p 14.
- Bird E.C.F. (1985).** Coastline changes. A global review. John Wiley & Sons, Chichester,

New York, Brisbane, Toronto, Singapore, p.p 219 .

Bouzeroua. A, Houa. B (2018). Impacts des forçages météorologiques et anthropiques sur la dynamique morpho-sédimentaire du littoral Ouest algérois. Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Dely Brahim : ENSSMAL.

Brgm. Lmt, Mss-Mat Cachan. (2012). Dynamiques concept. CSTB, Une approche mécanique d'évaluation de la vulnérabilité sismique des maçonneries EVSIM, Rapport final.

Briere .C (2005). Etude de l'hydrodynamique d'une zone côtière anthropisée : l'embouchure de l'Adour et les plages adjacentes d'Anglet [en ligne]. Pau, 2005. [Consulté le 11/9/2020]. Disponible sur le Web" <http://www.theses.fr/2005PAUU3007>".

Carter, R.W.G (1998). Coastal Environments. An Introduction to the physical, Ecological and cultural systems of coastlines. Harcourt Brace Jovanovich, Publisher, p.p 381.

Castelle. B (2004). Modélisation de l'hydrodynamique sédimentaire au-dessus des barres sableuses soumises à l'action de la houle : application à la côte aquitaine. Thèse de doctorant.

Chapon . J(1984). Travaux maritimes, Tome 1, Ingénieur Général des Ponts et Chaussées. Edition Eyrolles p.p 216-217-218.

Ciraia, CUR. CETMEF. (2009). Guide Enrochement. L'utilisation des enrochements pour les ouvrages hydrauliques. Version française du Rock Manual. CETMEF, Compiègne. doctorat, Université Bordeaux 1, p.p 295 .

Cowell, Peter.J, Bruno.G, Thom (1994). Morphodynamics of coastal evolution [en ligne]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Disponible sur le web : " <http://services.cambridge.org/us/academic/subjects/earth-and-environmental-s> ".

De Vriend, H.J (1991). Large-scale coastal evolution concept. New York, ASCE, Proceedings of the 22th Coastal Engineering Conference, p.p 1962-1974.

Denamiel. C (2006). Modélisation hydrodynamique 3D en zone pré-littorale : Caractérisation des effets des houles de tempête sur la circulation océanique [en ligne]. Thèse. Montpellier 2. Disponible sur le web : " http://www.gm.univ-montp2.fr/IMG/pdf/DEA_denamiel.pdf ".

Dhi (2014). Mike 21/3 Coupled Model FM. [En ligne]. [Consulté le 13.03.2017]. Disponible sur le web <www.mediafire.com/view/4extjtmhec4v69v/MIKE_213_Coupled_Model_FM.pdf>

Faye, Ibrahima. (2010). Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest) : Approches régionale et locale par photo-interprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes [en ligne]. Disponible sur le web : " <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00472200/PDF/DYNAMIQUE-DU-TRAIT-DE-CO> ".

Fletcher, C. H, et al (1995). Marine flooding on the coast of Kaua'i during Hurricane Iniki: hindcasting inundation components and delineating washover [en ligne]. Journal of Coastal Research, JSTOR, 188–204 p. [Consulté le 4/9/2020]. Disponible sur <<https://www.jstor.org/stable/4298321>>".

Giec, (1990). Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change: the IPCC scientific assessment. Document non-publié. Mass, Cambridge: GIEC.

Guilchier. A(1979). Précis d'hydrologie marine et continentale, Paris 2èd édition. Masson, p 344.

- Grasso, Florent. (2009).** Modélisation physique de la dynamique hydro-sédimentaire des plages [en ligne]. [Consulté le 21/5/2020]. Disponible sur le web " <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00432041/document>.
- Hoozemans, F. M. J et al (1993).** Sea level rise: A global vulnerability assessment vulnerability assessments for population, coastal wetlands and rice production on a global scale. H1588, Deltares (WL).
- Izambart. G (2011).** L'apport de la pratique de retour d'expérience pour comprendre la vulnérabilité face aux inondations. Mémoire master 1, Université de Toulouse II, France.
- Jacques(2011).** Modèles en hydraulique maritime. In : Département Ports et Côtes de SOGREAH Ingénierie : Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdit 1.
- Kroon .A (1994).** Sediment transport and morphodynamics of the beach and nearshore zone, near Egmond, The Netherlands. Thèse de Doctorat. Netherlands : Université d'Utrecht, p 275.
- Larbi. N (2017).** Etude de protection et d'aménagement de la zone de Verte Rive-Bordj EL Kiffan, Recours à la modélisation physique et numérique (MIKE21, LITPACK). Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral Dely Brahim. : ENSSMAL, p.p 26.
- Mclaughlin, Suzanne, [et al.] (2001).** Socio-economic data in coastal vulnerability indices: constraints and opportunities [en ligne]. Journal of Coastal Research, no 36, Coastal Education and Research Foundation, p.p 487–497 p. Disponible sur : " <https://meridian.allenpress.com/jcr/article/doi/10.2112/1551-5036-36.sp1.48> ".
- Nadir .M (2016).** Modélisation numérique de la morpho dynamique d'une côte sableuse soumise à l'effet des vagues et des houles cas : Plage Est de SIDI Fredj. Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL. p.p 149 .
- Niazi, Saida (2007).** Evaluation des impacts des changements climatiques et de l'élévation du niveau de la mer sur le littoral de Tétouan (Méditerranée occidentale du Maroc) : Vulnérabilité et Adaptation. Thèse doctorat. Rabat: Université Mohammed V-Agdal, Faculté des Sciences, p.p 66.
- Oukazi. H(1993).** Le port de plaisance de Sidi Fredj: approche critique à travers son fonctionnement et l'impact sur l'environnement immédiat. Mémoire d'ingénieur Aménagement du littoral Dely Brahim. : ENSSMAL, p .p 43-50.
- Paskoff, Roland et Christine Clus-Auby (2007).** L'érosion des plages : les causes, les remèdes. Paris : Institut océanographique. p.p 184.
- Paskoff, Roland (1998).** Conséquences possibles sur les milieux littoraux de l'élévation du niveau de la mer prévue pour les prochaines décennies. Annales de Géographie, JSTOR, p.p 233–248.
- Rabehi. W, Rahal .F (2011).** Aménagement du port d'El Djamila avantages et inconvénients et comportements des structures. Mémoire D'ingénieur.. Aménagement du littoral : Dely Brahim . ENSSMAL.
- Remmache .K, Bachar, N E I (2020).** Apport de la télédétection très haute résolution pour l'étude diachronique des plages de la region centre Algérienne.
- Roche.L (2009).** La perception du risque d'inondation par les habitants des zones inondables. Projet de fin d'études, Ecole polytechnique de l'université de Tours, France.
- Samuels. P (2005).** Language of risk - project definitions. Report : T32-04-01 goce-ct-2004-505420.

- Safari .M, Imam (2006).** Analyse de la performance... [Consulté le 21 octobre 2020]. Disponible sur "Google Scholar. <https://scholar.google.fr/scholar?hl=fr&as>".
- Senechal, Nadia (2003).** Etude de la propagation des vagues au-dessus d'une bathymétrie complexe en zone de surf. Bordeaux 1.
- Suanez, Serge, et al (2007).** Méthode d'évaluation du risque de submersion des côtes basses appliquée à la plage du Vougot, Guissény (Bretagne). Géomorphologie : relief, processus, environnement, vol. 13, no 4, Groupe français de géomorphologie, p.p 319–334.

Annexes

1/Méthodologie de l'utilisation de l'extension DSAS

a. La digitalisation des traits de côte

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.

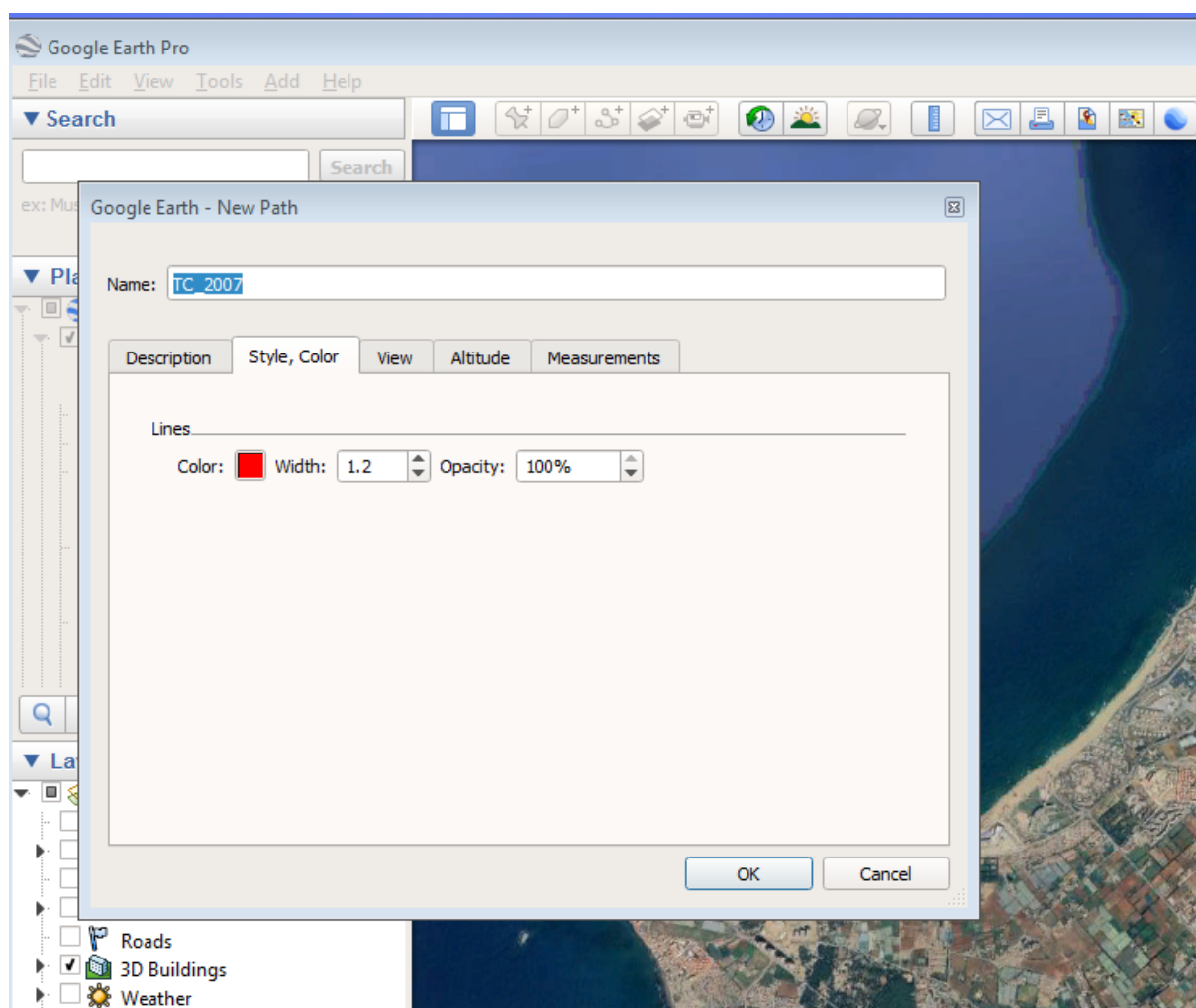


Figure 1: L'outil de digitalisation des traits de côte sur Google Earth.

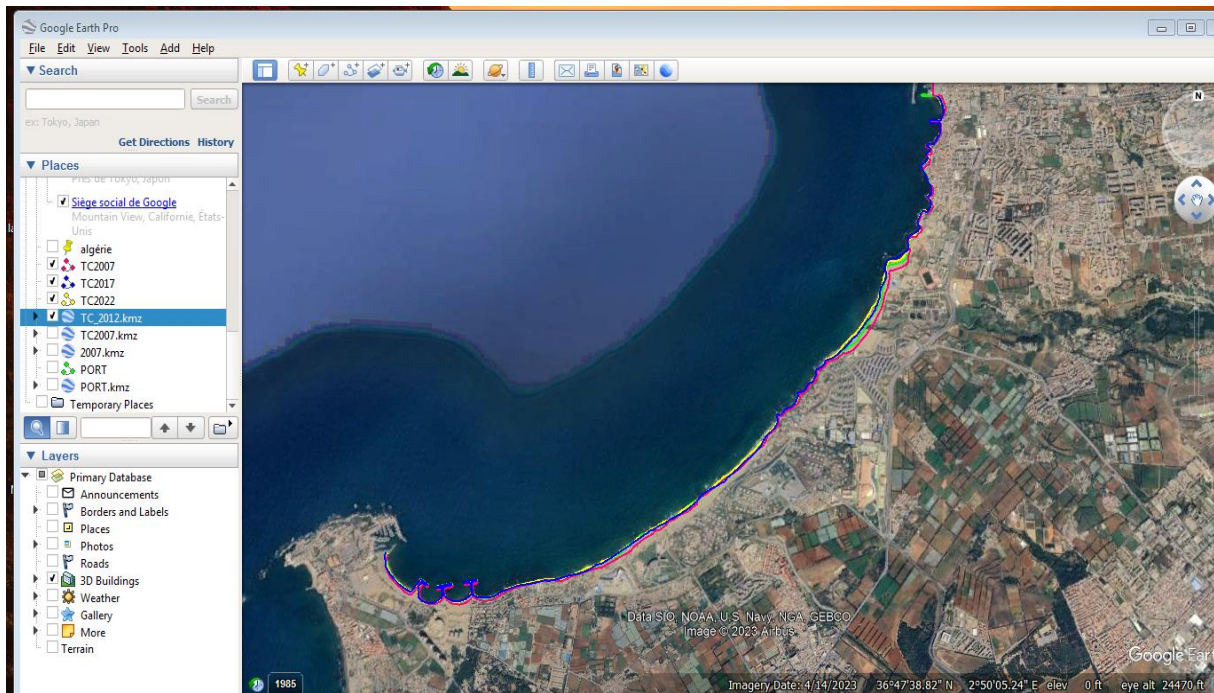


Figure 2: La digitalisation des traits de côte (Google Earth).

b. 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 parallèles 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. (Fig.2)

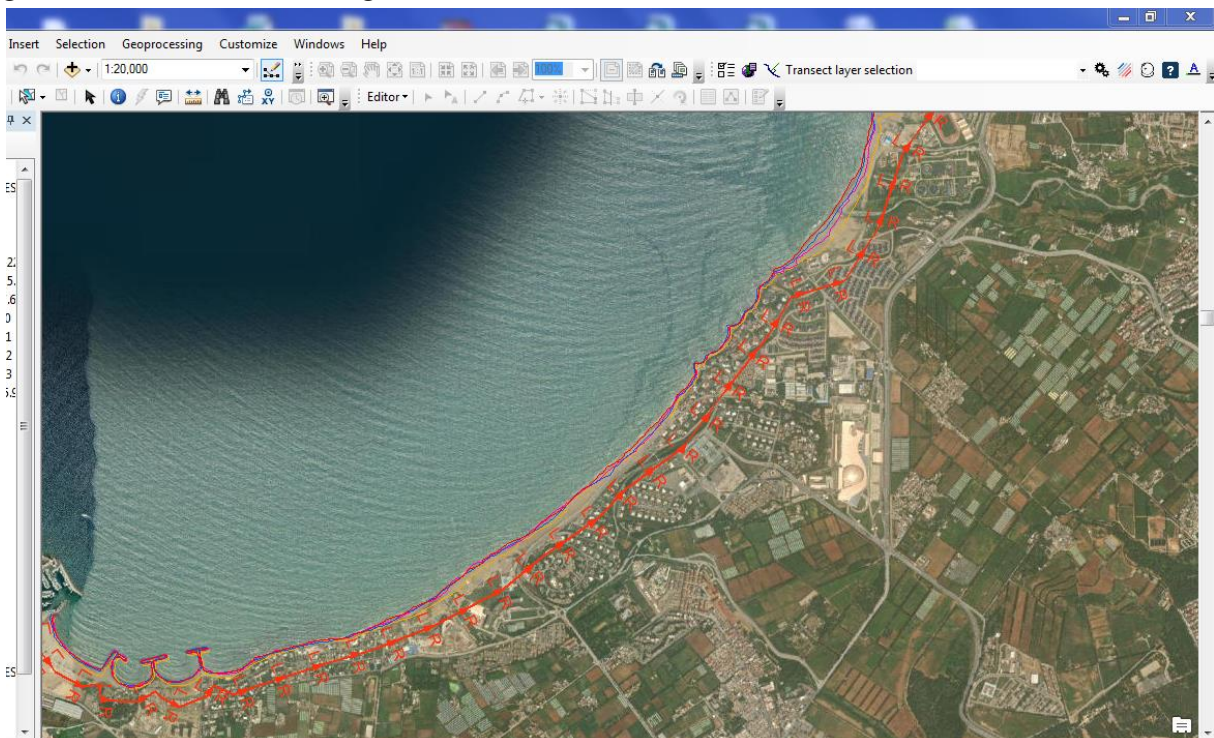


Figure 3: La digitalisation de la ligne de base sur ArcGIS.

c. 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) .(Fig4)

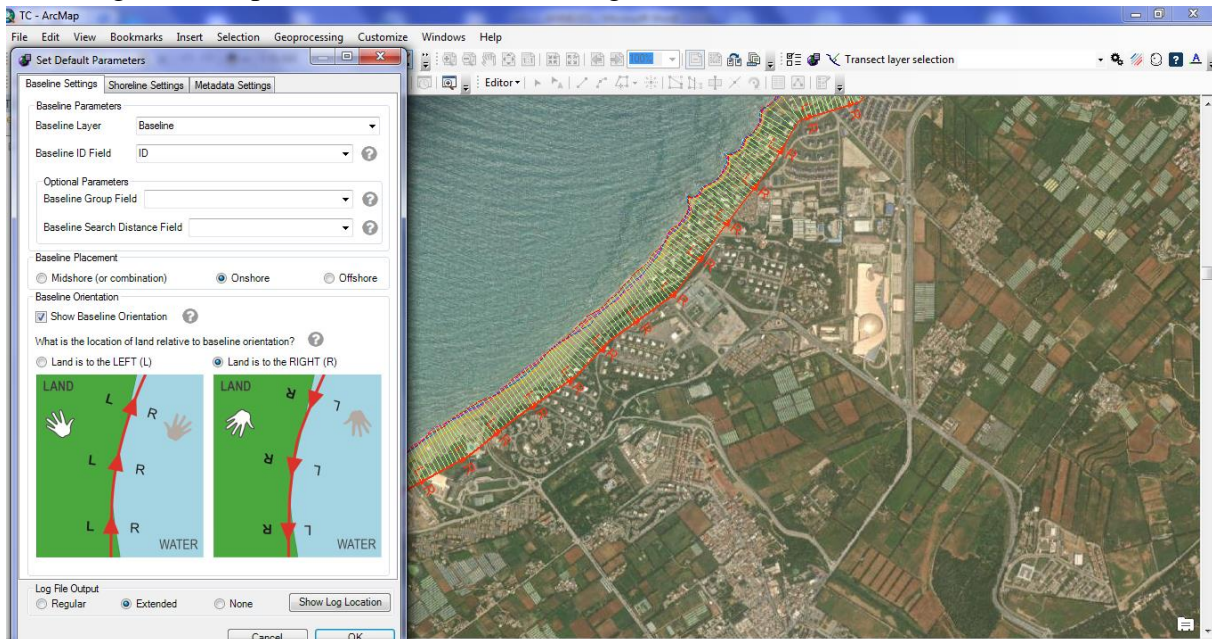


Figure 4 : Génération des transects sur ArcGIS.

d. Calculs statistiques de 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 mesuré 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 Mouvement (NSM), L'End Point Rate (EPR) et Le LinearRegression Rate-of-change (LRR) (Fig5).

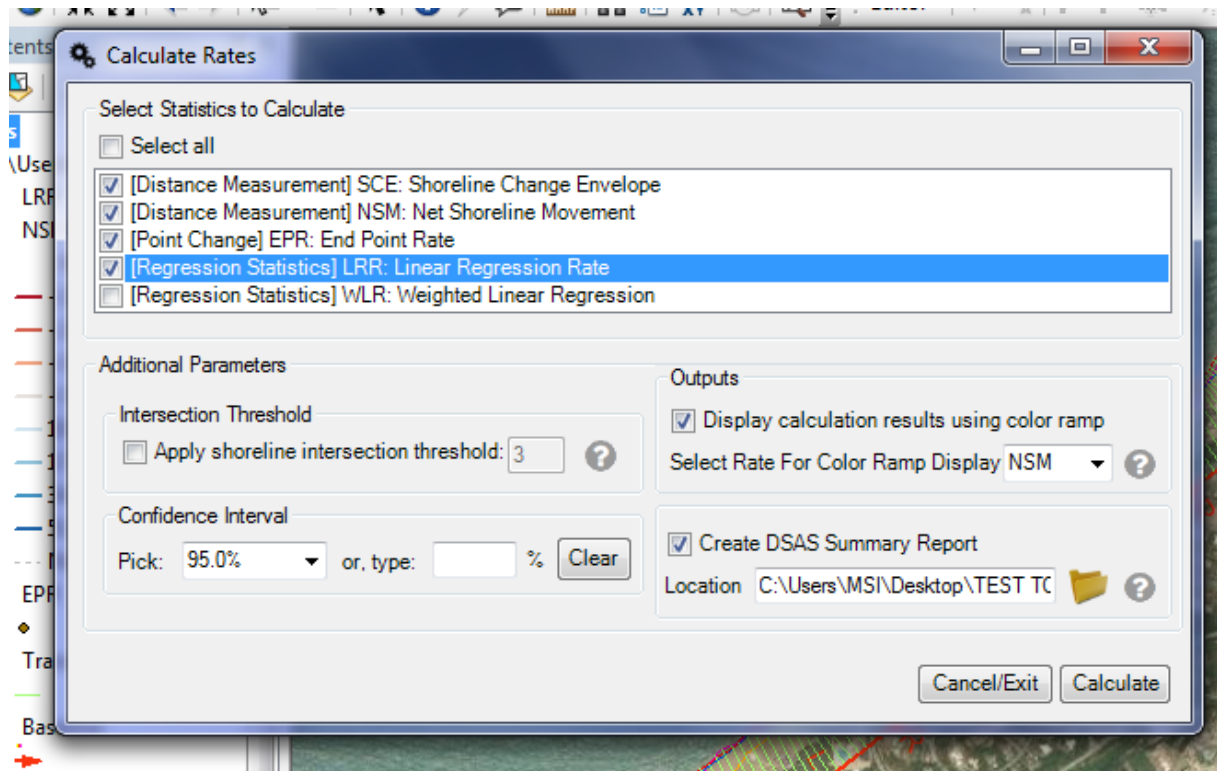


Figure 5: Génération des calculs statistiques par le DSAS.

OID	OBJECTID	TransectID	BaselineID	GroupID	TransOrder	Azimuth	ShrCount	TCD	SHAPE_Leng	NSM	EPR	EPRunc	LRR	LR2	LSE	LCI95
0	1	1	1	0	1	259.51	4	0	103.989913	-8.29	-0.55	0.47	-0.75	0.45	6.57	2.53
1	2	2	1	0	2	259.51	4	20	97.890963	1.1	0.07	0.47	-0.12	0.04	4.83	1.86
2	3	3	1	0	3	259.51	4	40	100.016198	6.12	0.41	0.47	0.16	0.05	5.84	2.25
3	4	4	1	0	4	259.51	4	60	104.681808	8.75	0.58	0.47	0.24	0.05	8.18	3.15
4	5	5	1	0	5	255.24	4	80	108.165967	9.77	0.65	0.47	0.25	0.04	9.7	3.73
5	6	6	1	0	6	250.23	4	100	112.129835	11.04	0.74	0.47	0.35	0.08	9.31	3.58
6	7	7	1	0	7	245.18	4	120	113.647089	12.47	0.83	0.47	0.49	0.17	8.52	3.28
7	8	8	1	0	8	240.16	4	140	111.089193	14.01	0.93	0.47	0.62	0.27	8.14	3.13
8	9	9	1	0	9	235.25	4	160	110.732233	15.22	1.01	0.47	0.7	0.3	8.56	3.29
9	10	10	1	0	10	234.64	4	180	111.336681	16.5	1.1	0.47	0.79	0.34	8.75	3.37
10	11	11	1	0	11	234.64	4	200	113.712328	18.71	1.25	0.47	0.97	0.39	9.48	3.65
11	12	12	1	0	12	234.23	4	220	116.242369	16.91	1.13	0.47	0.89	0.38	9	3.46
12	13	13	1	0	13	229.35	4	240	118.115227	17.98	1.2	0.47	0.97	0.47	8.22	3.16
13	14	14	1	0	14	224.36	4	260	120.83873	19.04	1.27	0.47	1.05	0.55	7.57	2.91
14	15	15	1	0	15	219.35	4	280	121.012274	20.15	1.34	0.47	1.1	0.55	7.92	3.05
15	16	16	1	0	16	214.38	4	300	119.427021	21.17	1.41	0.47	1.14	0.52	8.7	3.35
16	17	17	1	0	17	209.93	4	320	118.64938	20.14	1.34	0.47	1.05	0.45	9.17	3.53
17	18	18	1	0	18	209.93	4	340	117.710776	18.63	1.24	0.47	0.92	0.35	9.84	3.79
18	19	19	1	0	19	209.93	4	360	116.121694	18.78	1.25	0.47	0.94	0.37	9.71	3.74
19	20	20	1	0	20	207.91	4	380	114.667285	19.91	1.33	0.47	1.03	0.42	9.52	3.66
20	21	21	1	0	21	200.43	4	400	116.078229	20.96	1.4	0.47	1.09	0.43	9.92	3.82
21	22	22	1	0	22	192.61	4	420	120.173138	22.77	1.52	0.47	1.19	0.44	10.66	4.1
22	23	23	1	0	23	184.73	4	440	116.344151	25.18	1.68	0.47	1.32	0.45	11.67	4.49
23	24	24	1	0	24	177.08	4	460	111.060613	28.98	1.93	0.47	1.53	0.46	13.22	5.09
24	25	25	1	0	25	184.64	4	480	89.625778	29.59	1.97	0.47	1.66	0.57	11.43	4.4
25	26	26	1	0	26	203.08	4	500	125.466574	65.5	4.37	0.47	4.17	0.62	25.75	9.91
26	27	27	1	0	27	224.29	4	520	200.720319	2.35	0.16	0.47	0.01	0	5.59	2.15
27	28	28	1	0	28	243.28	4	540	382.400772	30.55	2.04	0.47	1.75	0.57	12.1	4.66
28	29	29	1	0	29	245.27	4	560	498.018929	190.54	12.7	0.47	11.51	0.63	70.47	27.12
29	30	30	1	0	30	231.02	4	580	317.404383	22.99	1.53	0.47	1.2	0.36	12.66	4.87
30	31	31	1	0	31	214.45	4	600	124.056396	-7.96	-0.53	0.47	-0.47	0.61	2.97	1.14
31	32	32	1	0	32	199.01	4	620	238.501088	2.84	0.19	0.47	0.12	0.08	3.18	1.22
32	33	33	1	0	33	185.68	4	640	251.542065	6.62	0.44	0.47	0.33	0.2	5.19	2
33	34	34	1	0	34	184.49	4	660	243.104762	3.72	0.25	0.47	0.16	0.11	3.51	1.35
34	35	35	1	0	35	183.74	4	680	233.244696	3.07	0.2	0.47	0.13	0.08	3.41	1.31
35	36	36	1	0	36	183	4	700	225.648204	2.27	0.15	0.47	0	0	6.36	2.45
36	37	37	1	0	37	182.29	4	720	83.357005	-2.21	-0.15	0.47	-0.03	0	4.54	1.75
37	38	38	1	0	38	176.62	4	740	82.82323	-0.76	-0.05	0.47	0.04	0	5.31	2.04
38	39	39	1	0	39	170.2	4	760	84.81353	1.2	0.08	0.47	0.16	0.05	5.56	2.14

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

Résumé

L'évolution spatio-temporelle du littoral fait référence aux changements qui se produisent naturellement sur les côtes au fil du temps en raison de processus géologiques, océaniques et météorologiques. La prévision des risques côtiers implique l'utilisation de modèles et de données pour évaluer les menaces potentielles auxquelles les zones côtières sont exposées. L'évolution spatio-temporelle du littoral de la baie d'El Djamila n'échappe pas aux risques littoraux tels que l'érosion et les inondations. La partie centrale de la baie est la plus vulnérable au problème d'érosion qui pourrait être du aux fortes actions d'hydrodynamiques sur ses plages. Les côtes Est et Ouest sont par contre les plus vulnérables aux inondations, en raison de la faible topographie de ces zones. Quel que soit le niveau d'inondation, les conséquences seraient lourdes pour les aménagements et les infrastructures en front de mer.

Les risques côtiers, tels que l'érosion et les inondations, sont accentués par les changements climatiques et la montée du niveau de la mer. Par conséquent, des mesures d'adaptation s'imposent dès à présent. En effet, une planification côtière intégrée et des mesures d'adaptation appropriées peuvent contribuer à atténuer ces risques et à assurer la durabilité de la baie d'El Djamila.

Abstract

The spatio-temporal evolution of the coastline refers to the changes that occur naturally on the coasts over time due to geological, oceanic and meteorological processes. Coastal risk prediction involves the use of models and data to assess the potential threats to which coastal areas are exposed. The spatio-temporal evolution of the coastline of the bay of El Djamila is not immune to coastal risks such as erosion and flooding. The central part of the bay is the most vulnerable to the problem of erosion which could be due to the strong hydrodynamic actions on its beaches. The east and west coasts, on the other hand, are the most vulnerable to flooding, due to the low topography of these areas. Whatever the level of flooding, the consequences would be serious for the facilities and infrastructure on the seafront.

Coastal risks, such as erosion and flooding, are accentuated by climate change and rising sea levels. Therefore, adaptation measures are needed now. Indeed, integrated coastal planning and appropriate adaptation measures can help mitigate these risks and ensure the sustainability of El Djamila Bay.

المخلص

يشير التطور المكاني والزمني للخط الساحلي إلى التغيرات التي تحدث بشكل طبيعي على السواحل بمرور الوقت بسبب العمليات الجيولوجية والمحيطية والأرصاد الجوية. يتضمن التنبؤ بالمخاطر الساحلية استخدام النماذج والبيانات لتقييم التهديدات المحتملة التي تتعرض لها المناطق الساحلية. إن التطور المكاني والزمني للخط الساحلي لخليج الجميلة ليس بمنأى عن المخاطر الساحلية مثل التعرية والفيضانات. الجزء المركزي من الخليج هو الأكثر عرضة لمشكلة التعرية التي يمكن أن تكون بسبب الإجراءات الهيدروديناميكية القوية على شواطئها. من ناحية أخرى، فإن السواحل الشرقية والغربية هي الأكثر عرضة للفيضانات، بسبب انخفاض تضاريس هذه المناطق. مهما كان مستوى الفيضانات، ستكون العواقب وخيمة على المرافق والبنية التحتية على الواجهة البحرية. إن المخاطر الساحلية، مثل التعرية والفيضانات، تتفاقم بفعل تغير المناخ وارتفاع منسوب مياه البحر، ولذلك، هناك حاجة إلى تدابير التكيف الآن. في الواقع، يمكن للتخطيط الساحلي المتكامل وتدابير التكيف المناسبة أن تساعد في التخفيف من هذه المخاطر وضمان استدامة خليج الجميلة.