

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 :

**Evaluation des impacts des changements climatiques
sur la morphologie du littoral de la wilaya de
Mostaganem**

Présenté par :

Mr. BRAHIMI Aymen

Mr. CHIKHAOUI Nadjib

Setenu le 18/ 11 /2021 devant le jury :

Mme. MAHDID

MAA (ENSSMAL)

Présidente

M. MEZOUAR.K

professeur (ENSSMAL)

Promoteur

M. SALLAYE .M

Ingénieur (CNL)

Co-Promoteur

M. DAHMANI. A

MAA (ENSSMAL)

Examineur

Mr. OTMANI.H

MAB (ENSSMAL)

Examineur

2020/2021

Remerciements :

Au terme de ce travail nous remercions **Allah** le tout puissant pour nous avoir donné la santé, la force, la volonté et le courage pour réaliser ce mémoire de fin d'études.

Nous sommes heureux de pouvoir exprimer notre gratitude à toute personne qui a été utile et qui a contribué à la réalisation de ce travail.

Nous remercions notre **Seigneur** de nous avoir donné la connaissance, le courage et la force de surmonter nos cinq années d'études et terminer ce travail.

Rappelez-vous tout le travail acharné que nous avons fourni, ce n'est pas toujours facile, mais même dans les moments les plus difficiles, nous pouvons toujours trouver le bon chemin et les bonnes personnes pour nous guider.

Notre remerciement s'adresse à tous les membres du jury, pour nous avoir honorés et acceptés de juger ce travail.

Nos plus vifs remerciements s'adressent à :

Monsieur **MEZOUAR. K**, professeur (ENSSMAL) pour nous avoir aidé à travailler grâce à sa confiance, sa disponibilité, ses encouragements et ses précieux conseils.

Nous remercions Monsieur **SALLAYE. M** car il n'a ménagé aucun effort pour que nous soyons dans le meilleur environnement d'apprentissage. Nous avons beaucoup appris de lui, Il Nous a laissé impressionner par son analyse et son esprit compréhensif, Merci de nous guider Vers l'essentiel.

Nous remercions Madame **MAHDID** d'avoir accepté la présidence du jury, nous le remercions aussi pour avoir partagé avec nous des conseils de valeur ainsi que pour ses efforts de former des ingénieurs de qualité.

Nous remercions aussi les professeurs d'Enssmal pour leurs qualités et leurs encouragements continus très utile pour le moral et leurs conseils et orientations dans l'ensemble de notre formation.

Nous sommes honorés par la présence du membre du jury, Monsieur **OTMANI.H.**

Nous n'oublierons jamais ça méthode de simplifier et délivrer les informations, ainsi les précieux conseils qu'elle nous a donnés en tant qu'enseignante soucieuse de notre réussite.

Nous sommes très heureux d'inclure Monsieur **DAHMANI.A** en tant que membre du jury. Nous le remercions sincèrement pour son aide morale et scientifique, son affection, et sa générosité d'enseignant. Nous le remercions d'avoir accepté de revoyez ce travail.

NADJIB ET AYMEN

Dédicace :

J'éprouve l'immense plaisir de dédier ce modeste mémoire :

À ma fierté ; mes parents ; Aucun dédicace, aucun mot ne pourrait exprimer votre juste valeur, la gratitude et l'amour que je vous porte. Que dieu Vous procure une bonne santé et une longue vie

À mes chers frères (Walid et Alaeddine) Je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

À tous mes professeurs. Leur générosité et leur soutien m'oblige de leurs témoigner mon profond respect et ma loyale considération.

À tous mes amis pour leurs appuis, leurs encouragements permanents, et leur soutien moral, Merci d'être toujours là pour moi.

Nadjib

Dédicace :

Je dédier ce modeste travail à ma Chère Mère et mon noble père dont le mérite, les sacrifices et les qualités humaines m'ont permis de vivre ce jour. Qu'Allah Vous accorde une bonne santé et une longue vie de joie et de bonheur.

À mon frère Fayçal qui a été mon soutien moral, un frère et un ami en même temps.

À toute ma famille et mes proches, ainsi que mes professeurs, mes amis et les gens qui ont été à mes côtés tout ce temps.

Amen

Table des matières :

Remerciements :	II
Dédicace :	IV
Table des matières :	VII
Liste des figures :	X
Liste des tableaux :	XIII
Liste des acronymes et abréviations :	1
Introduction Générale	1
Chapitre I: Généralité.....	4
1.Le system littoral.....	5
1.1. La morphodynamique côtière.....	5
1.2. Hydrodynamique littorale	6
1.2.1 La houle :	7
1.2.2 Les courants	8
1.2.3 Les Marées	8
1.3. Profil général d'une côte sableuse.....	8
1.4. Transport sédimentaire.....	9
2.L'influence des activités anthropiques sur le littoral :	10
2.1. L'érosion du Littoral :	10
2.2. Le recul du trait de côte :	11
3.Submersion marine	11
4.Changement climatique	11
4.1. Évolution du niveau moyen des mers du globe depuis 1993	12
Chapitre II : Etat de connaissance du littoral de la wilaya de Mostaganem	13
1. Situation géographique	14
2.Le cadre géologique et sédimentologie.....	14
2.1. Géologie régionale	15
3.Cadre géomorphologique.....	16
3.1. Les vallées	16
3.2. Le plateau de Mostaganem.....	16

3.3. Les Monts de Dahra	17
4.Cadre hydrographique.....	17
5.Cadre climatologique	19
5.1. Température	19
5.2. Précipitations.....	20
5.3. L'indice d'Emberger	21
6.Le vent	22
6.1. Les roses des vents	24
7.Conditions hydro-sédimentaires	26
7.1. La houle.....	26
7.3. Marée.....	29
8.Facteurs anthropiques	30
8.1. La construction des barrages	30
8.2. L'extraction abusive du sable.....	30
8.3. Aménagement portuaire et maritime.....	31
8.4. L'urbanisation désordonnée près de la cote :	32
8.5. Le tourisme sur le littoral	32
9.Conclusion	33
Chapitre III : Modélisation de la dynamique côtière du littoral de Mostaganem	34
1.Introduction.....	35
2.Etude bathymétrique	35
2.1. Description du modèle de simulation MIKE 21.....	35
2.2. Modèle numérique spectral Waves (MIKE 21-SW).....	36
2.3. Modèle numérique hydrodynamique (MIK 21-HD).....	36
2.4. Modèle numérique de transport de sable (MIKE 21-ST).....	37
2.5. Modèle FM MIKE21/3 Couplé.....	38
3.La démarche adoptee	38
3.1. Les données de la bathymetries.....	39
3.2. Des données relatives aux conditions météorologiques.....	39
3.3. Création 2D Bathymétries sous le maillage	39

4. Etude bathymétrique	42
4.1. Simulation de la propagation de la houle par le module SW	43
5. Présentation et interprétation des résultats de module SW	43
6. Simulation des champs de courants générés par la houle et les vents par le module HD	48
6.1. Calibration du module hydrodynamique HD	48
6.2. Présentation et interprétation des résultats de module HD	48
7. Modélisation du transport sédimentaire sous l'effet de houle et de courant.....	53
7.1. Présentation et interprétation des résultats de ST.....	53
8. Conclusion :	58
Chapitre V : Evolution spatio-temporelle du trait de côte de la wilaya de Mostaganem	59
1. Introduction.....	60
2. Méthodologie	60
3. Les logiciels utilisés pour étudier l'évolution du littoral	61
3.1 Google Earth Pro	62
3.2 Aperçu général sur le logiciel ArcGIS Desktop10.4.....	62
▪ ArcCatalog :	62
3.3 Aperçu de l'extension DSAS (Digital Shoreline Analysis System)	62
4. Les méthodes statistiques de calcul de la mobilité du trait de côte sous l'extension DSAS	63
4.1 La méthode des points extrêmes (End Point Rate - EPR).....	63
4.2 La méthode de la régression linéaire (Linear Regression - LRR).....	63
4.3 La méthode de la Mouvement de rivage net (Net Shoreline Movement NSM)	64
5. Interprétation des résultats	64
5.1 La cinématique du trait de côte	64
6. Analyse du bilan sédimentaire	72
7. Conclusion	72
Chapitre V : Submersion marine.....	74
1. Introduction.....	75
1.1 La submersion marine	75

1.2	Les phénomènes physiques responsables des submersions marines d'origine météorologique	76
1.2.1	La surcotes marines.....	76
1.2.2	La surcote atmosphérique	76
1.2.3	La surcote associée à la houle (setup).....	77
1.2.4	La surcote totale.....	77
1.3	Niveau marin maximal statique.....	77
2.	Méthodologie	78
2.1	Scénarios de niveaux d'eau extrêmes.....	79
2.1.1	Hauteur significative au large	79
2.2	Etude des houles extrêmes au large.....	79
2.3	Les houles extrêmes à la cote	83
3.	Variation du niveau de la mer en fonction de la pression atmosphérique (effet barométrique inverse).....	86
4.	Les terres à risque d'inondation.....	86
5.	Résultats et discussion	88
5.1	Les scenarios des niveaux extrêmes.....	89
5.1.1	Submersion à 3 m.....	89
5.1.2	Submersion à 5 m.....	89
6.	Perte des terres due à la submersion marine	91
7.	Conclusion	92
	Conclusion générale.....	94
	Référence bibliographique	97
	Annex	101
	Résumé :.....	102

Liste des figures :

Figure I-1 : Schématisation d'un système morpho-dynamique (Stépanian,2002)	06
Figure I-2 : (Schéma de la zone littorale et des échelles de temps impliquées dans sa dynamique (Dehouck 2006)	07
Figure I-3 : Profil schématique d'une côte sableuse et terminologie anglo-saxonne équivalente (Shepard (1973) In Faye (2010))	09
Figure I-4 : Les types de transport sédimentaire (Degoutte, R. 2004)	10
Figure I-5 : Processus physiques en action lors d'une tempête : agitation et surélévation du plan d'eau (BRGM).....	11
Figure I-6 : Évolution du niveau moyen des mers du globe depuis 1993.....	12
Figure II-1 : Carte de situation géographique de la willaya de MOSTAGANEM.....	14
Figure II-2 : Carte géologique de plateau de Mostaganem, modifiée à partir de la carte de C.G.G ,1959)	15
Figure II-3 : Position des différentes unités géologique des Maghrébides (Domzig et al.2006)..	16
Figure II-4 : Carte des réseaux hydrographiques de la willaya de Mostaganem.....	18
Figure II-5 : Histogramme des températures (max, min et moyenne) mensuelles https://sites.uea.ac.uk/cru/ 1901 - 2019.....	20
Figure II-6 : Histogramme des précipitations mensuelles de Climate research unit time series https://sites.uea.ac.uk/cru/ entre 1901 et 2019.....	21
Figure II-7 : Le diagramme Ombro-thermique.....	22
Figure II-8 : Roses des vents au large de la cote de Mostaganem.....	25
Figure II-9 : Histogramme des fréquences d'apparition des houles annuelle et saisonnière	27
Figure II-10 : Les roses de houles au large de la cote de Mostaganem.....	28
<i>Figure II-11</i> : Carte d'évolution régionale des risque pour la méditerranée basée sur la méthode CRI-Med. (Source : Satta et al.2016)	29
Figure II-12 : Carrière Sidi Lakhedar	30

Figure II-13 : Image satellitaire du port de pêche de la salamandre et le grand port de Mostaganem	31
Figure II-14 : L'urbanisation du littoral de la willaya de Mostaganem.....	32
Figure II-15 : La plage de Sidi Mejdoub Mostaganem.....	33
Figure III_1 : Approche méthodologique adoptée pour la modélisation intégrée du transport sédimentaire non cohésif. Source :(https://www.researchgate.net/figure/Approche-methodologique-de-modelisation-integree-du-transport-de-sediments-non-cohesifs_fig3_348588065)	38
Figure III-2 : Maillage du domaine de travail de la zone d'étude.....	40
Figure III-3 : Emprise du model.....	41
Figure III-4 : Carte bathymétrique de la zone d'étude de Mostaganem	42
Figure III-5 : Le champ de vague de direction Nord (MWD = 360°N).....	45
Figure III-6 : Le champ de vague de direction Nord-ouest (MWD =315°N).....	47
Figure III-7 : Le champ de vague de direction ouest (MWD=270°N).....	50
Figure III-8 : Le champ du courant engendré par les houles de direction Nord.....	51
Figure III-9 : Le champ du courant engendré par les houles de direction Nord-ouest.....	52
Figure III-10 : Le champ du courant engendré par les houles de direction Ouest.....	55
Figure III-11 : Le transport sédimentaire engendré par les houles de direction Nord.....	57
Figure III-12 : Le transport sédimentaire engendré par les houles de direction Nord-ouest.....	58
Figure III-13 : Le transport sédimentaire engendré par les houles de direction Ouest.....	59
Figure IV-01 : Étapes de la méthodologie de suivi du trait de côte. (Méthodologie - GéoLittoral, 2018; Modifiée par BRAHIMI, 2021)	61
Figure IV-02 : La barre d'outils de l'extension DSAS	63
Figure IV-03 : Le bilan sédimentaire de la côte de Mostaganem	71
Figure V-1 : Typologie des submersions marines (franchissement, débordement, rupture d'ouvrage).(BRGM and Cachan, 2012).....	75

Figure V-2 : Processus physiques en action lors d'une tempête : agitation et surélévation du plan d'eau. (S. Charrier, P. Pouzet, M. Maanan, 2019)	76
Figure V-3 Synthèse de la méthodologie adoptée pour la cartographie de l'aléa de submersion marine.....	77
Figure V-4 : Histogramme de la distribution fréquentielle des classes des hauteurs significatives par direction.....	78
Figure V-5 : Corrélation entre Hs et la fréquence d'apparition des houles de direction N au large de la côte de Mostaganem.....	80
Figure V-6 : Corrélation entre Hs et la fréquence d'apparition des houles de direction NW au large de la cote de Mostaganem.....	81
Figure V-7 : Corrélation entre Hs et la fréquence d'apparition des houles de direction W au large de la cote de Mostaganem.....	81
Figure V-8 : Corrélation entre Hs et la fréquence d'apparition des houles de direction E au large de la cote de Mostaganem.....	82
Figure V-9 : Corrélation entre Hs et la fréquence d'apparition des houles de direction NE au large de la cote de Mostaganem	82
Figure V-10 : Carte de la simulation de la houle de 100ans de direction NW.....	84
Figure V-11 : Carte de la simulation de la houle de 2ans de direction NW.....	85
Figure V-12 : Le modèle numérique du terrain (MNT) de la zone d'étude de Mostaganem.....	87
Figure V-13 : Carte d'occupation du sol de la zone d'étude de Mostaganem	88
Figure V-14 : les carte de submersion marine	90
Figure V-15 : Superficies des terres inondées par les différents niveaux d'élévation.....	91

Liste des tableaux :

Tableau II-1 : Les grands Oueds qui irriguent notre zone d'étude et leurs caractéristiques.....	18
Tableau II-2 : Distribution des températures moyennes mensuelles (https://sites.uea.ac.uk/cru/) pour la période entre 1901-2019	19
Tableau II-3 : La distribution des moyennes mensuelles des précipitations au niveau de Climate research unit time series (https://sites.uea.ac.uk/cru/) (1901-2019).....	21
Tableau II-4 : L'indice pluviométrique de l'Emberger	22
Tableau II-5 : Distribution des fréquences d'apparition annuelle et saisonnière du vent par direction entre 1992 à 2020, (www.waveclimate.com)	23
Tableau II-6 : La distribution fréquentielle de Hs selon le traitement des données «Infoplaza Marine Weather» de 1992 à 2020.....	26
Tableau III-1 : Hauteur des houles annuelles retenues par secteur de provenance au large.....	43
Tableau IV-01 : Evolution du trait de côte de Mostaganem entre 2001 et 2011.....	66
Tableau IV-02 : Evolution du trait de côte de Mostaganem entre 2011 et 2021.....	68
Tableau IV-03 : Evolution du trait de côte de Mostaganem entre 2001 et 2021.....	70
Tableau V-1 : Résultats des hauteurs significatives associées aux périodes de retour (m).....	80
Tableau V-2 : Les résultats de simulation des houles extrêmes au large	83
Tableau V-3 : Niveaux d'inondations extrêmes.....	89
Tableau V-4 : Résultats des terres à risque d'inondations.	92

Liste des acronymes et abréviations :

WGS	World Geodesic System
UTM	Universal Transverse Mercator
EPR	End Point Rate
LRR	Linear Regression Rate
NSM	Net Shoreline Movement
DSAS	Digital Shoreline Analyses System
ZC	Zone Côtière
DD	Développement Durable
GIEC	Group Intergouvernemental d'Evaluation du Climat
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Changes
SW	Spectral Wave
HD	Hydro-Dynamique
ST	Sediment Transport
GIZC	Gestion Intégrée des Zones Côtières
CVI	Costal Vulnerability Index
SIG	System d'Information Géographique
CNL	Commissariat Nationale du Littoral

Introduction Générale

Le littoral est une bande à l'intérieur de laquelle les contacts terre-mer se déplacent. Les caractéristiques physiques de cet espace géographique changent sous l'influence combinée des eaux marines (niveau de la mer, houle, marées et courants), du climat global et des évolutions naturelles (structure géologique) et anthropiques. Cette réalité est complexe à appréhender. Seule une approche systémique permet d'aborder la dynamique de ce milieu, le rôle des interactions et l'organisation de l'espace. Comprendre le littoral, c'est donc comprendre à la fois ses caractéristiques morphologiques (relations entre formes et processus) et les facteurs qui entraînent les processus d'érosion dans l'espace et dans le temps. En effet, les rythmes d'évolution de cet espace doivent être abordés selon trois échelles de temps : la dynamique ordinaire, les phénomènes épisodiques et les variations climatiques. (**Aïna Collin, 2009**).

Les changements climatiques en cours risquent d'augmenter l'intensité et la fréquence de l'érosion et de la submersion côtières. Ceux-ci pourraient ainsi entraîner des événements extrêmes (tempêtes violentes, pluies diluviennes, ondes de tempête, etc.), une élévation du niveau de la mer ainsi qu'une diminution de la période d'englacement et du couvert de glace, un élément essentiel pour la protection du littoral contre les vagues en période hivernale. (**GIEC, 2013**).

De nombreuses interrogations se posent alors quant au fait que plusieurs changements résultants soient perceptibles aux échelles continentales et régionales et qui concerne différents aspects comme les modifications dans le fonctionnement des écosystèmes, le changement des précipitations et des régimes hydriques, les périodes d'extrêmes climatiques plus longues, le décalage des saisons, la montée du niveau des océans, la désertification et les vagues de chaleur (**IPCC, 2007**).

Le bassin méditerranéen, dont l'Algérie fait partie, du fait de sa situation géographique qui le place entre les régions arides (le Sahara entre autres) et humides (le nord de l'Europe), n'a pas échappé de ces changements (**Folland, C. K., et al. 2001, Lionello, 2006**). Cette position le rend particulièrement vulnérable aux changements climatiques (**Mariotti, 2015**).

Dans plusieurs études, le réchauffement de la région Ouest de la Méditerranée a été principalement enregistré en deux phases : à partir du milieu des années 1920 à 1950 et depuis le milieu des années 1970 (**Brunet et al, 2001 ; Galan et al, 2001 ; Xoplaki et al, 2003, Brunet, 2007**).

A travers ce modeste travail on va adresser un bilan général détaillé sur l'évolution du trait de côte du littoral de Mostaganem vis-à-vis aux changements climatiques ainsi aux activités anthropiques et aussi comment peut-on s'adapter à une hausse de niveau marin.

Pour cela ce mémoire s'organise en cinq principaux chapitres :

Dans le **Chapitre I** on a parlé sur le terme du système littoral, ces composantes, sa dynamique et les facteurs qui entraînent les processus d'érosion de la cote (aléas naturelles et

Introduction Générale

actions anthropiques) et les conséquences de ces risques et actions sur la morphologie du littoral.

Le **Chapitre II** est réservé à la présentation de la zone d'étude et ces différentes caractéristiques géologiques, géomorphologiques, climatologiques, hydrologiques et océanographiques.

Chapitre III est consacré à l'étude des processus hydro-sédimentaire à l'aide du logiciel MIKE 21.

Une partie de ce chapitre traite la réfraction de la houle propagée du large vers la cote avec le model SW, une partie qui traite la simulation des champs de courants générés par la houle et les vents à l'aide du model HD, et une autre partie est consacré à la simulation du transport sédimentaire sous l'effet de houle et de courants au moyen du model ST.

Chapitre IV est consacré à l'étude spatio-temporel de l'évolution du trait de côte par l'utilisation de l'extension DSAS 3.4 de logiciels Arc GIS 10.4 afin de voir le phénomène de l'érosion et son influence sur la frange littorale de notre zone d'étude.

Chapitre V se focalise sur une étude du phénomène de la submersion marine en utilisant le logiciel ArcGIS 10.4 qui permettra de créer des cartes d'aléa pour des élévations des niveau marines différentes.

Enfin, une **Conclusion** qui synthèse les différents chapitres.

Chapitre I: Généralité

1. Le system littoral

Le domaine littoral est un système complexe où divers phénomènes d'échelles spatio-temporelles bien distinctes interagissent. Pour exemples de ces phénomènes, du plus large au plus local, le littoral est directement soumis aux forces de marée, au vent, aux apports continentaux, aux mouvements induits par les vagues (à la fois ondes longues et ondes courtes) ou encore à la turbulence de l'écoulement. D'un point de vue temporel, les échelles varient de quelques secondes des centaines d'années, allant de la mise en mouvement du grain de sable à l'évolution globale des plages et du trait de côte. De part ce nombre considérable de phénomènes et de leurs interactions, la dynamique d'un tel environnement est très complexe.

En effet, la simple mise en mouvement de quelques particules peut conduire à la formation de fines structures morphologiques telles que les rides sableuses. De telles structures modifient la rugosité du fond et donc le frottement entre les phases liquide et sableuse. Ces évolutions sont à l'origine de la formation de nouvelles structures et un cycle évolutif peut ainsi être amorcé. L'environnement littoral est le résultat de la rétroaction perpétuelle existant entre ces divers phénomènes (N.BRUNEAU, 2009).

1.1. La morphodynamique côtière

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

L'évolution morphologique des côtes résulte de l'interaction de processus graduels et continus tels que les courants marins, l'action des vagues, les apports sédimentaires et les variations du niveau marin (Figure I-1).

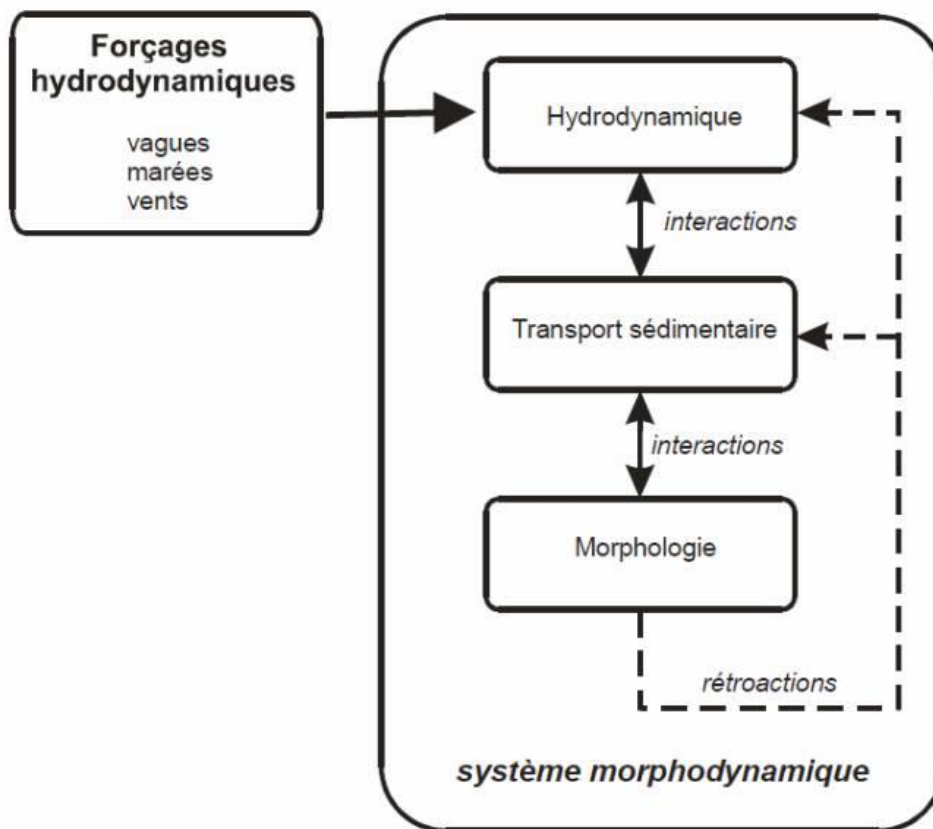


Figure I-1 – Schématisation d'un système morphodynamique (Stépanian.A (2002)).

1.2. Hydrodynamique littorale

La zone littorale est une zone complexe où se produisent de nombreuses interactions entre les agents dynamiques responsables des circulations hydrodynamiques. (Stépanian.A, 2002).

La houle et les courants marins induisent des échanges sédimentaires entre le large et la côte qui affectent significativement les profils de plage et la mobilité du trait de côte. Ce thème est d'actualité, en particulier dans un contexte de changement climatique avec des risques accrus d'érosion du littoral. (Marin François, 2016).

La (Figure I-2) présente une vision schématique de la nature et de la répartition des divers processus hydrodynamiques dans la zone côtière.

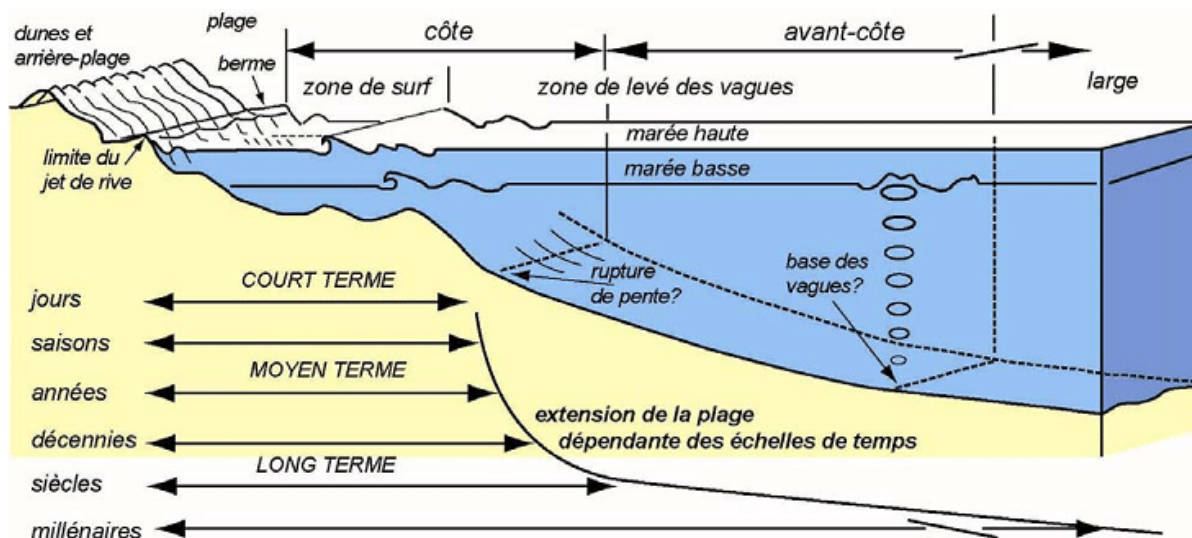


Figure I-2 : Schéma de la zone littorale et des échelles de temps impliquées dans sa dynamique (Modifié par : Dehouck 2006)

1.2.1 La houle :

La houle est produite par un mouvement orbital des molécules liquides, décrivant toutes un cercle d'un mouvement uniforme autour d'un centre fixe. Toutes les molécules, dont les centres d'oscillation sont sur une même verticale, occupent simultanément les mêmes positions angulaires sur leurs orbites. (Villen, 1974).

Les différentes phases d'évolution des vagues permettent de distinguer trois zones du littoral, qui forment autant de sous-systèmes (Nadia Senechal, 2003) définis par l'approche océanographique (ou hydrodynamique). Du large vers la côte, on trouve :

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

1.2.2 Les courants

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

➤ Les courants généraux

Le courant atlantique (pénétration des eaux par le détroit de Gibraltar) longe d'Ouest en Est les côtes d'Afrique du Nord, sa vitesse est de l'ordre de 3 à 4 km/h. Ce courant s'étale sur plusieurs milles nautiques. Encore très sensible au large de l'Algérois (vitesse = 0,7 nœud), son action va en diminuant vers l'Est du bassin occidental de la Méditerranée (LEM, 2009).

1.2.3 Les Marées

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

Dans les côtes algériennes, l'amplitude de la marée n'est pas importante, le marnage est de l'ordre de 70 à 1 m en pleine lune. (AMAROUCHE, 2015).

1.3. Profil général d'une côte sableuse

Par définition une plage correspond au domaine intertidal, c'est-à-dire au domaine de balancement des marées. Cependant pour comprendre la dynamique des zones littorales que sont les plages et plus particulièrement les plages sableuses, il est nécessaire de considérer les transferts sédimentaires entre la plage et la zone subtidale (cross-shore) ainsi que le long de la côte. Le littoral et les plages sont des systèmes qui évoluent à différentes échelles de temps et d'espace en fonction des agents de forçage comme la houle, les marées et les courants associés. (Klervi Hamon, 2014).

Dans le détail, on distingue (Figure I-3), vers l'amont, l'arrière-plage (Backshore) 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 foreshore) soumise à l'action des vagues pendant les conditions non-tempêtuelles. Subdivisée en trois parties :

- **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** (nearshore) constamment immergée et accidentée de barres et de rides, qui sont parallèles et parfois obliques au trait de côte et se forment quand la pente est douce et les sédiments abondants, et de sillons pré-littoraux.

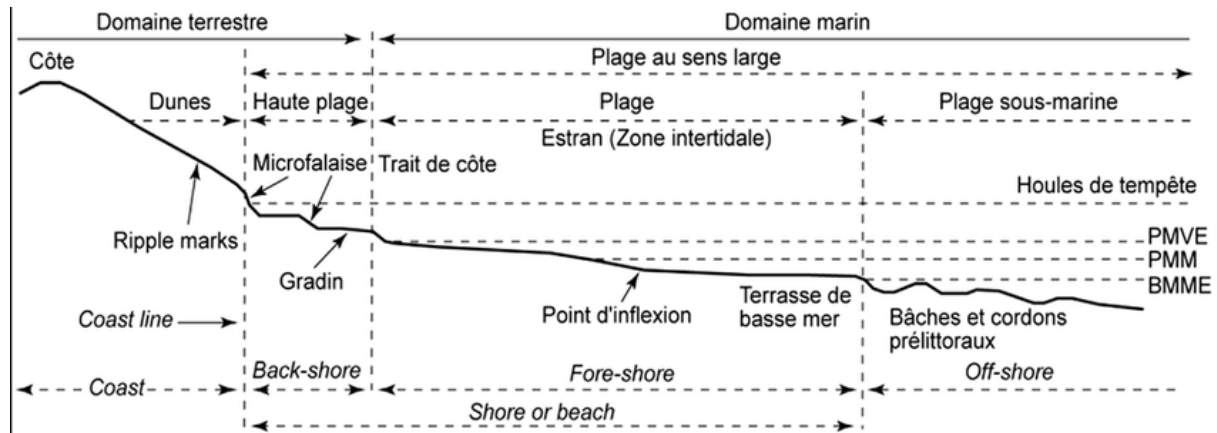


Figure I - 3 : Profil schématique d'une côte sableuse et terminologie anglo-saxonne équivalente (Shepard (1973) In Faye (2011)).

1.4. Transport sédimentaire

Le transport sédimentaire se rencontre très souvent dans la nature : généralement il est soit éolien, soit aquatique. Les particules transportées peuvent avoir des tailles très différentes : les argiles et les limons ont une dimension caractéristique de l'ordre du micron, la taille typique des sables varie entre la centaine de microns et le millimètre, les graviers sont millimétriques et les galets centimétriques. (M. GUILLAUME QUIBEUF, 2019).

Généralement, le transport sédimentaire est séparé en 3 catégories (Figure I-4) (Nans Bujan, 2009) :

Transport par charriage : Transport sur une tranche d'eau étroite (de l'épaisseur de quelques diamètres de grains sédimentaires) sur le fond ou le mouvement est d'abord provoqué par les collisions entre grains plutôt que par la turbulence du fluide. Les grains peuvent glisser ou rouler (traction) dans la tranche ou être soulevés sur de faibles distances (saltation).

Transport par suspension : Les grains sont maintenus en suspension dans la colonne d'eau sous l'effet des vitesses verticales turbulentes dans le fluide.

Transport par saltation : Les grains sont déplacés au sein d'une couche limite lorsque les courants sont intenses et les sédiments grossiers

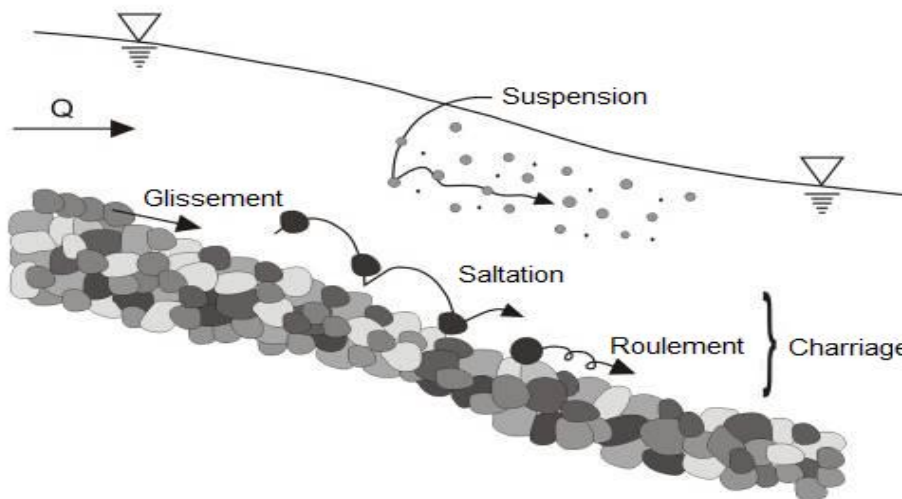


Figure I-4 : Les types de transport sédimentaire (Degoutte, R. 2004)

2. L'influence des activités anthropiques sur le littoral :

Plus récemment, le trait de côte a connu une modification rapide, très fortement marquée par des facteurs d'origine anthropique, au premier rang desquels, le processus de littoralisation (glissement des populations et des activités vers les littoraux) a joué un grand rôle. Au cours des dernières décennies, avec l'augmentation et la mondialisation des échanges, la densité des populations humaines n'a cessé de s'accroître sur le littoral. (Jonathan Daeden, 2015).

Après que la pêche ait énormément périclitée, le tourisme est devenu la première activité économique du littoral. Néanmoins, les zones littorales sont aussi devenues l'objet permanent de multiples convoitises qui sont à la mesure des enjeux économiques qu'elles représentent : industries portuaires, aquaculture, extraction de matériaux.

De ce point de vue, 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.

2.1. L'érosion du Littoral :

L'érosion du littoral est un phénomène naturel ou anthropique qui se produit en de nombreux endroits du monde.

Le déferlement des vagues lors des tempêtes côtières est une cause importante d'érosion sur le littoral. Ces tempêtes accélèrent l'érosion des terrains en front de mer ainsi que celle des formes littorales comme les plages, les terrasses de plage, les cordons dunaires et les flèches littorales. (MSP, 2017).

2.2. Le recul du trait de côte :

Le trait de côte est naturellement instable. L'effondrement des falaises, l'envasement des baies, le remaniement des plages de sable et des dunes, sont des manifestations naturelles des impacts croisés de la marée, de la houle, des courants marins et parfois des fleuves en crue. Les actions humaines contrarient souvent cet équilibre instable : grands travaux portuaires, ouvrages de protection contre la mer, édification des barrages, urbanisation en front de mer avec ses remblais, ses digues, ses ports.

3. Submersion marine

La submersion marine est une inondation temporaire de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques et marégraphiques sévères. Les submersions 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. (ORRM, 2017). Les processus physiques mis en jeu lors des phénomènes de tempêtes sont liés principalement à l'action de la pression atmosphérique et du vent sur le plan d'eau (Figure I-5).

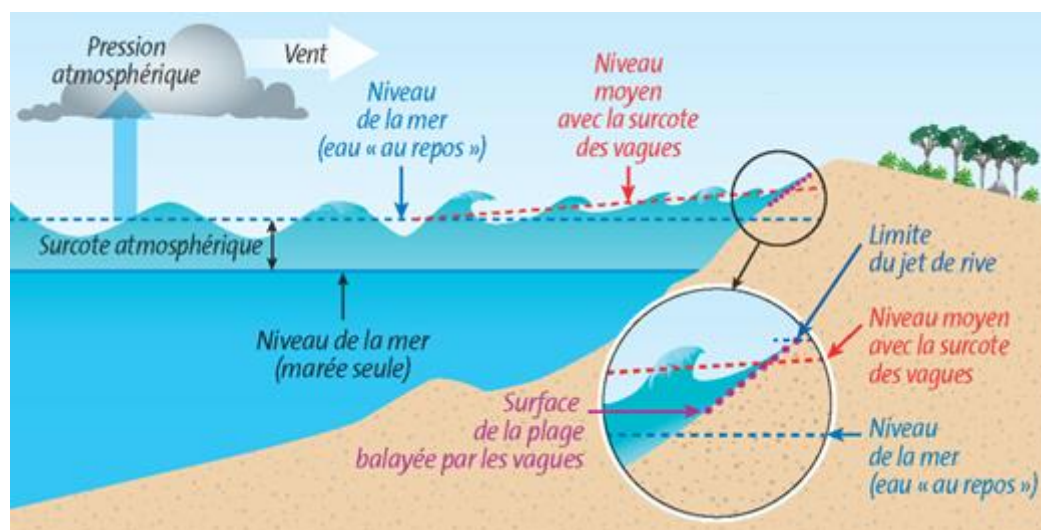


Figure I-5 : Processus physiques en action lors d'une tempête : agitation et surélévation du plan d'eau (BRGM,2017).

4. Changement climatique

Désigne l'ensemble des variations des caractéristiques climatiques en un endroit donné, au cours du temps : réchauffement ou refroidissement. Certaines formes de pollution de l'air, résultant d'activités humaines, menacent de modifier sensiblement le climat, dans le sens d'un réchauffement global.

Ce phénomène peut entraîner des dommages importants : élévation du niveau des mers, accentuation des événements climatiques extrêmes (sécheresses, inondations, cyclones, ...), déstabilisation des forêts, menaces sur les ressources d'eau douce, difficultés agricoles,

désertification, réduction de la biodiversité, extension des maladies tropicales, etc. (GIEC,2019).

Le changement climatique est variable selon les régions. Par exemple, les zones polaires se réchauffent deux fois plus rapidement que le reste du monde. En continuant sur la trajectoire actuelle de réchauffement climatique, la banquise arctique pourrait disparaître totalement d'ici quelques dizaines d'années. (GIEC,2021).

Sous l'effet de la fonte des glaces et du réchauffement climatique, le GIEC prévoit une hausse du niveau moyen de la mer et des océans de 82 cm d'ici 2100 si l'on ne réduit pas nos émissions de gaz à effet de serre.

4.1. Évolution du niveau moyen des mers du globe depuis 1993

Le niveau moyen de la mer s'est élevé de $1,7 \pm 0,3$ mm/an sur la période 1901-2010 (Figure I-6). Le taux d'élévation du niveau marin s'est accéléré durant les dernières décennies pour atteindre $3,3 \pm 0,4$ mm/an sur la période 1993-2019 (mesures satellitaires). Environ 30 % de l'élévation du niveau des mers (Bruno Villalba,2010) est due à la dilatation causée par l'augmentation de la température de l'eau.

Cette montée des eaux aurait un fort impact sur les zones côtières dans le monde. Le rapport complet (GIEC,2019) des experts énonce les conséquences du réchauffement climatique sur les océans et la cryosphère et ses impacts sur les sociétés humaines et les écosystèmes.

L'océan est un puits de carbone, c'est-à-dire qu'il absorbe le dioxyde de carbone (CO₂) de l'atmosphère et le stocke. Or l'accumulation de CO₂ dans l'océan modifie sa composition et provoque une acidification ce qui menace directement ses capacités d'absorption. (GIEC,2019)

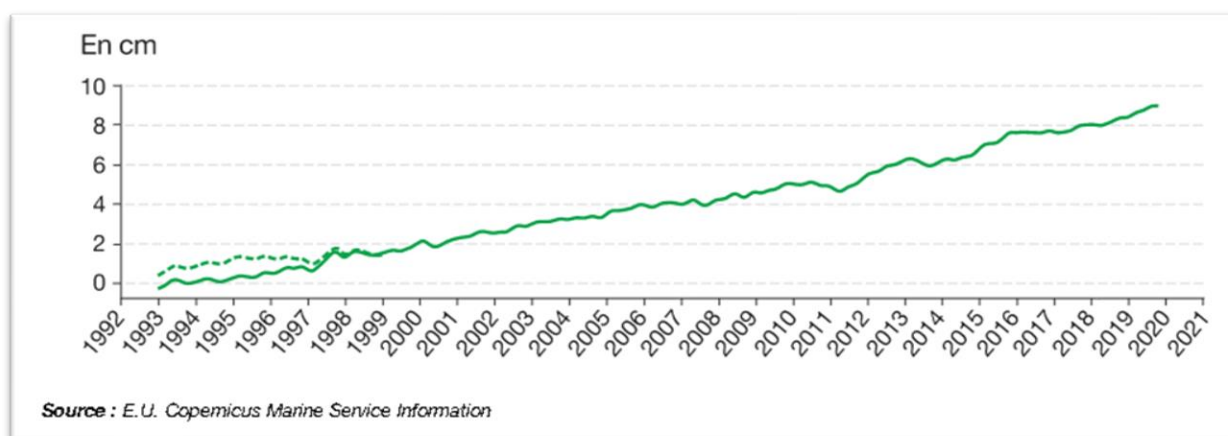


Figure I-6 : Évolution du niveau moyen des mers du globe depuis 1990

**Chapitre II : Etat de
connaissance du littoral
de la wilaya de
Mostaganem**

1. Situation géographique

Mostaganem est une ville côtière située au Nord-Ouest du Littoral Algérien avec une façade maritime de l'ordre de 124km. Elle est localisée à 360 km à l'Ouest d'Alger et à 80 km à l'Est d'Oran, entre les coordonnées géographiques (0°8' Ouest 36°29' Nord) et (0°46' Est 35°37' Nord) (Figure II-1), Elle est limitée :

- A l'Est par la Wilaya de Chleff.
- Au Sud par les Wilaya de Mascara et Relizane.
- A l'Ouest par les Wilaya d'Oran.
- Au Nord par la Mer Méditerranée.

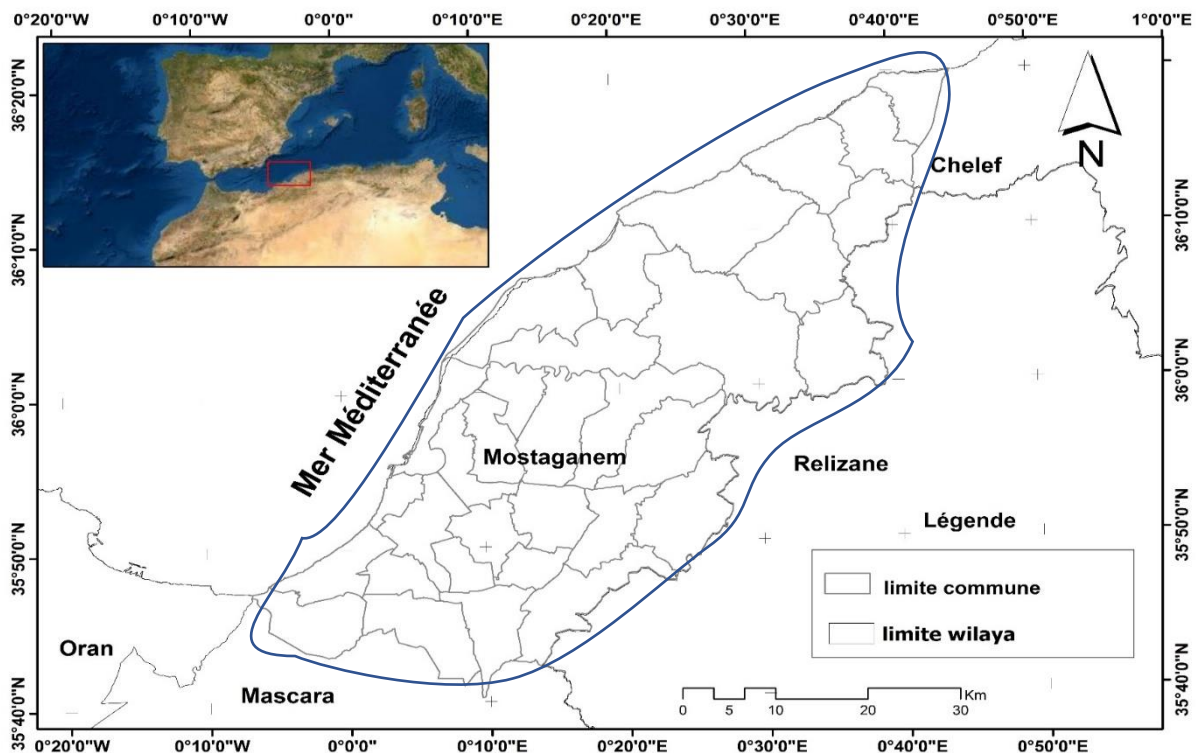


Figure II-1 : Carte de situation géographique de la wilaya de MOSTAGANEM.

2. Le cadre géologique et sédimentologie

Mostaganem est une portion particulièrement instable du bassin miocène Nord-Tellien. Des mouvements d'affaissement et de subsidence ont affecté les plaines de l'Hābra et de la Mina jusque durant le Quaternaire (Figure 2), tandis que la bordure sud se relevait vigoureusement et que les portions Ouest et Nord-est restaient relativement stables. Au Nord-Ouest les monts d'Arzew constituent un môle en surrection ; à ces phénomènes tectoniques de bascule se superposent des plissements SW-NE qui donnent leurs directions aux principaux traits du relief. (Jean BOULAIN, 1958).

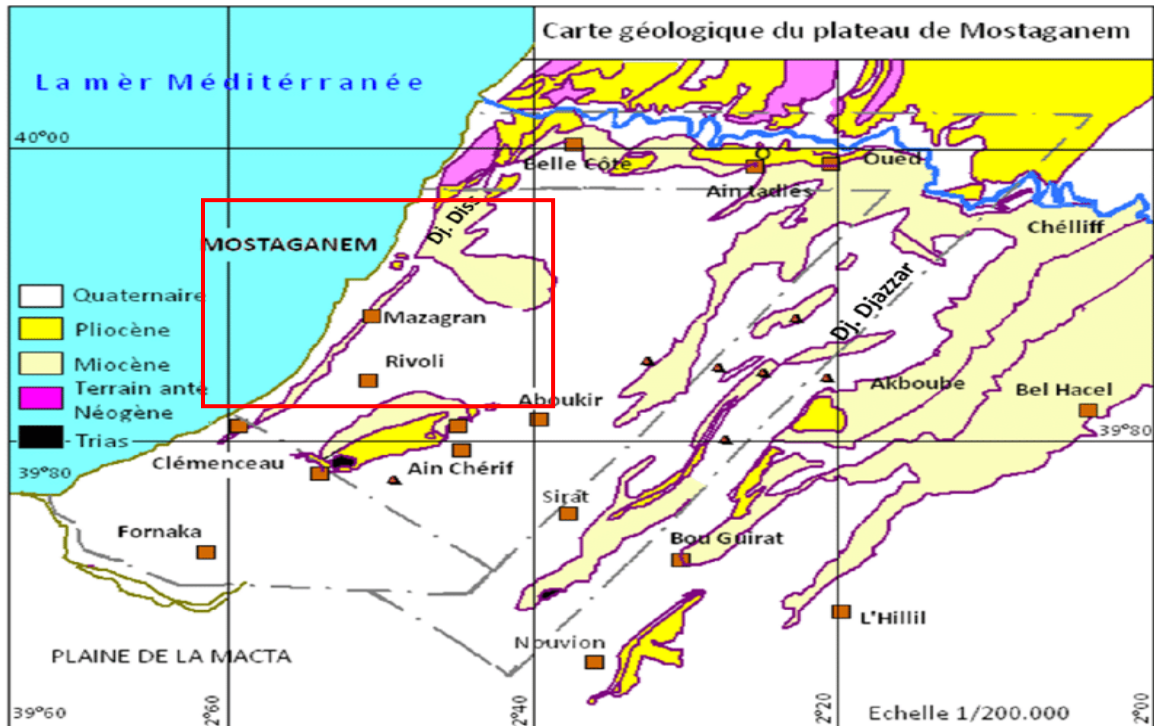


Figure II-2 : Carte géologique de plateau de Mostaganem, modifiée à partir de la carte de C.G.G (1959).

2.1. Géologie régionale

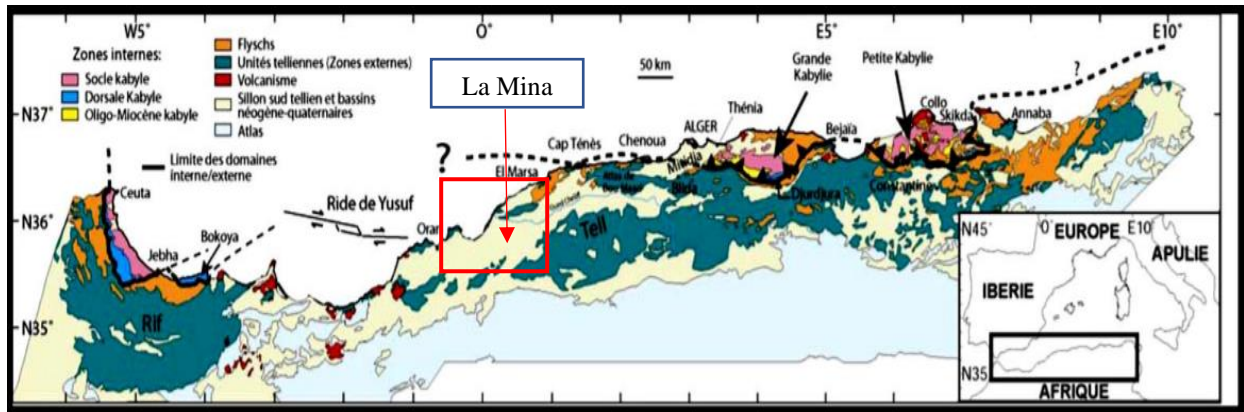
Le plateau de Mostaganem est bien individualisé sur le plan géographique. Il s'étend sur 750 km², son altitude moyenne est de 200 m environ et les points les plus bas dans la Mecta sont au même niveau de la mer. Il constitue un vaste plan incliné comportant une série d'ondulations orientées sud-ouest / nord-est et en grande partie calquées sur les plis qui déforment le substratum mio-pliocène. L'histoire géologique révèle une activité tectonique très intense au cours du Néogène et du Quaternaire, dont résultent les grands traits de la morpho-structure actuelle. Le plateau est constitué de 3 types de formations intéressantes. **(Durand-Delga, 2011).**

Du point de vue structural, il est formé d'une suite d'anticlinaux et de synclinaux parallèles à la côte, orientés selon une direction principale sud-ouest / nord-est. Ces derniers sont constitués par des formations mio-plio-quaternaires marneuses, gréseuses et argileuses. La structure la plus favorable à la constitution des réserves en eau correspond aux synclinaux. Par contre, les collines ou bien certains djebels sont des anticlinaux qui favorisent l'alimentation en eau des synclinaux. Il renferme un niveau réservoir important.

Ce réservoir donne naissance à la plus grande nappe du plateau de Mostaganem. La ressource en eau de cette nappe a pour origine les précipitations, lesquelles dépendent des conditions climatiques de la région.

3. Cadre géomorphologique

La géomorphologie de la wilaya de Mostaganem apparaît sous une morphologie plate, formée par un relief calme ; elle appartient à la chaîne des Maghrébides (Figure II-3).



La Wilaya de Mostaganem est divisée en quatre unités :

- ✓ Les vallées basses de l'ouest appartenant à la plaine d'El Habra, la vallée de l'est.
- ✓ Le plateau de Mostaganem.
- ✓ Les monts de Dahra.

3.1. Les vallées

Les vallées basses de l'ouest se situent à l'ouest du plateau de Mostaganem, appartenant au domaine de la plaine d'El Habra sur environ 100m d'altitude. La vallée de l'est se situe au nord de la région des monts de Dahra, complètement dénudée et fortement ouverte sur la mer, sous une altitude moins de 200m. (Dahra, Encyclopédie berbère,1991).

3.2. Le plateau de Mostaganem

S'étendant sur une superficie de 750Km² et englobant 13 communes, La morphologie du plateau se divise en deux secteurs :

- Une frange littorale : représentée par une côte ardue très élevée sur 242m d'altitude, qui apparaît sous la forme d'un arc formé par des structures ondulatoires, résultant de l'action des vents dominants, formant ainsi des dunes littorales.
- Le plateau proprement dit : Il est formé par des dunes continentales, et nous distinguons ainsi une partie plus basse et peu accidentée marquée par de faibles sinuosités, séparées par des vallées en forme de rochet, qui s'étale jusqu'à la dépression de la Macta.

3.3. Les Monts de Dahra

Les monts de Dahra font partie de la chaîne tellienne (altitude maximale 1000 m), sa partie moyenne qui commence de la rive droite du Cheliff jusqu'au confluent de la Mina, occupe une grande portion du territoire de Mostaganem, englobant les communes déjà citées, caractérisée par une topographie accidentée sur 700m d'altitude fortement confrontée à l'érosion hydrique accentuée par l'absence du couvert végétal.

Ce large plateau ondulé, remarquable par sa nudité, s'étale au sud pour former le plateau de Mostaganem, et au nord celui d'Ouillis près d'Achâacha. (**Dahra, Encyclopédie berbère, 1991**)

4. Cadre hydrographique

Le réseau hydrographique, qui a une double fonction : Assuré le transit des précipitations qui tombent en tout point du bassin versant vers les talwegs et les rivières ; produire et assurer le transit des particules de matière (solutés, sédiments) des continents vers les océans.

L'ensemble du bassin versant participe à ces deux fonctions et alimente, en tout ou partie, les écoulements du drain principal et de ses affluents, ce qui se traduit, en aval du bassin versant, par l'individualisation d'un émissaire unique, au niveau d'un exutoire ou d'une embouchure.

La production et le transit des matériaux (solides ou dissous) s'effectuent sur les pentes et dans les talwegs à l'aide et par l'intermédiaire de l'eau, sous l'influence des forces gravitaires.

Pour cela nous nous sommes intéressés particulièrement aux apports des grands Oueds qui irriguent notre zone d'étude, dont les caractéristiques sont rapportées dans le Tableau II-1 et Figure II-4.

Tableau II-1 : Les grands Oueds qui irriguent notre zone d'étude et leurs caractéristiques. (Léon l'Africain,1898)

Nom de l'Oued	Description
Oued de Chlef	La rivière de Chlef est la plus longue en Algérie avec 700 kilomètres de long. Elle monte dans l'Atlas saharien près de la ville d'Aflou, coule à travers le Tell Atlas et se jette dans la mer Méditerranée au nord de la ville de Mostaganem.
Oued de Kramis	Achaacha se situe sur le Dahra occidental avec Mostaganem à l'ouest et Ténès à l'est se trouvant à peu près à égale distance, 75 à 80 kilomètres. L'oued Kramis, la rivière la plus importante, accueille un barrage. Les autres rivières présentes sur le territoire de la commune sont l'oued Bezougert et l'oued Roumane.
Oued La Macta	La Macta est un oued côtier d'Algérie (Ouest de Mostaganem, Est d'Arzew), situé au Nord-Ouest du pays, il est formé par la réunion de deux cours d'eau : le Sig et Habra.

D'après le tableau 1, la zone d'étude présente deux oueds considérés comme importants (Oued Chelef et Kramis) suite à leurs grands débits charriés vers la mer ouverte ce qui assure une alimentation des plages à proximité.

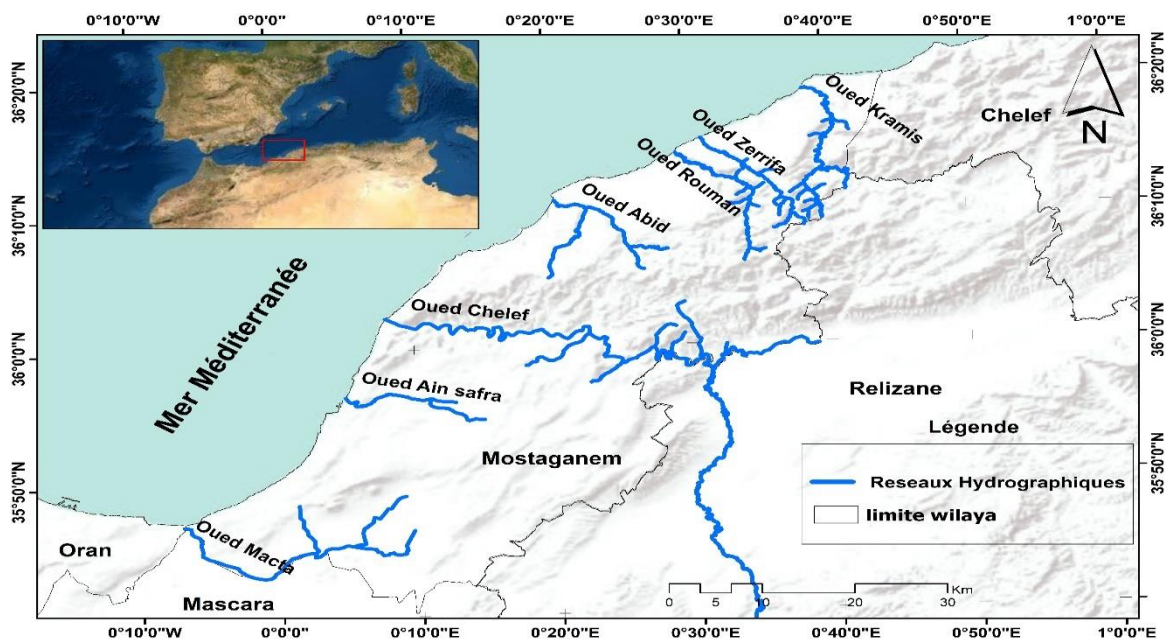


Figure II-4 : Carte des réseaux hydrographiques de la wilaya de Mostaganem. (ANRH,2021)

5. Cadre climatologique

Le climat de l'Algérie est de type méditerranéen caractérisé par deux saisons bien distinctes, celle des pluies et celle de la sécheresse. L'influence du nord - ouest apporte des courants froids et humides, et celle du sud est beaucoup plus liée à des courants chauds et secs.

La région de Mostaganem se caractérise par un climat semi-aride à hiver tempéré avec une pluviométrie qui varie entre 350mm et 400mm, les deux éléments principaux du climat (précipitations et températures) conditionnent tous les rythmes d'irrégularités.

5.1. Température

L'étude de la variation des températures est basée sur le traitement des résultats d'analyse des températures mensuelles calculées à partir des enregistrements effectués régulièrement par Climate research unit time series disponible sur internet <https://sites.uea.ac.uk/cru/> couvrant une période de plus d'un siècle allant de Janvier 1901 à Décembre 2019 les résultats portés sur le tableau II-2 et figure II-5 montrent deux périodes distinctes :

- Une période hivernale relativement froide qui s'étale sur une période de 6 mois allant de mois de Novembre au mois d'avril avec un minimum moyen de 7,9 C° est enregistré au mois de Janvier.
- Une période estivale relativement chaude qui s'étale sur une période de 6 mois. Notant que des moyennes de température qui peuvent atteindre 28,8 C° sont enregistrées au mois de Aout.

Tableau II-2 : Distribution des températures moyennes mensuelles <https://sites.uea.ac.uk/cru/> pour la période entre 1901-2019.

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
Moyens mensuels(C°)												
Max	14,5	16,2	16,9	18,5	21,6	26	28,5	28,8	26,5	22,5	17,4	14,6
Moyens mensuels(C°)												
Min	7,9	8,9	10,6	13,9	16,4	20,3	21,8	23,5	21,2	16,5	12,6	8,9
Moyennes mensuelles(C°)	10,4	10,9	13,1	14,8	16,7	21,9	25,1	26,3	22,3	18,3	14,7	11,8

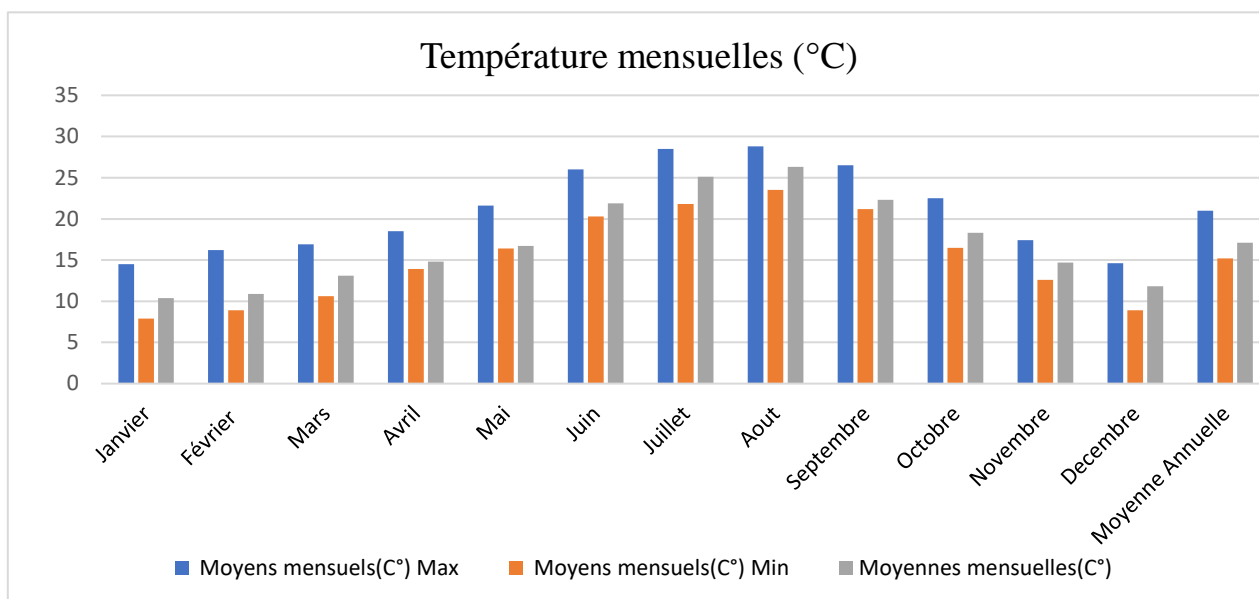


Figure II-5 : Histogramme des températures (max, min et moyenne) mensuelles
<https://sites.uea.ac.uk/cru/> 1901 – 2019

5.2. Précipitations

Les traitements statistiques des données acquises de Climate research unit time series <https://sites.uea.ac.uk/cru/> .

Le tableau 3 couvrant une période allant de 1901 à 2019 nous a permis de tracer l'histogramme des moyennes mensuelles des précipitations dans notre zone d'étude (Figure), ces traitements montrent que la région se caractérise par deux périodes distinctes :

- Période hivernale relativement pluvieuse dont les pluies se concentrent entre le mois d'octobre et le mois d'Mai, elle atteint son maximum en mois de Novembre avec 75mm.
- Période estivale sèche s'étale du mois de juin jusqu'au Septembre avec son minimum enregistré au mois de Juillet avec 1mm.

Tableau II-3 : La distribution des moyennes mensuelles des précipitations au niveau de Climate research unit time series <https://sites.uea.ac.uk/cru/> (1901-2019).

Les mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	Year
Moyenne mensuelle (mm)	53	35	33	26	28	5	1	3	13	34	75	65	381

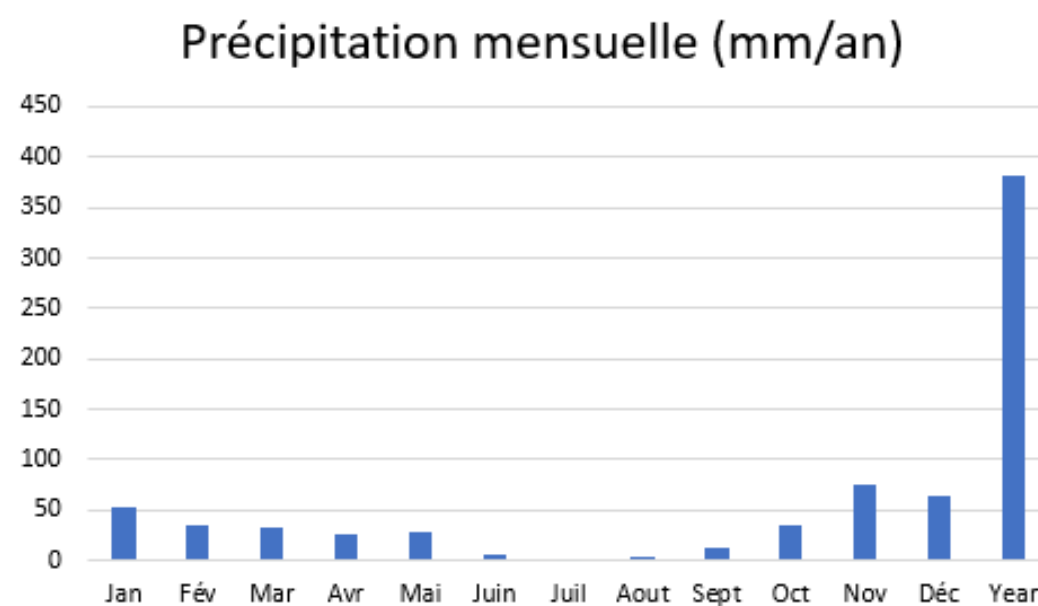


Figure II-6 : Histogramme des précipitations mensuelles de Climate research unit time séries <https://sites.uea.ac.uk/cru/> entre 1901 et 2019.

5.3. L'indice d'Emberger

L'indice climatique d'Emberger, développé par le botaniste Louis Emberger en 1930, puis modifié en 1955 pour définir les cinq différents types de climats méditerranéens, depuis le plus aride, jusqu'à celui de haute montagne, Stewart l'a simplifié en 1969.

Il est défini par la formule suivante (Modifiée par Stewart) :

$$Q = \frac{2000P}{M^2 - m^2} \dots \dots \dots (II-1)$$

- Q : quotient pluviométrique modifié d'Emberger
- M : moyenne des maxima (températures maximales journalières) du mois le plus chaud, en C°

- m : moyenne des minima (températures minimales journalières) du mois le plus froid, en C°
 P : pluviométrie annuel, en millimètres

Les résultats de l'indice pluviométrique sont présentés dans le tableau 4 et la figure II.7.

Tableau II-4 : L'indice pluviométrique de l'Emberger :

Zone d'étude	P (mm)	M(C°)	m(C°)	Q	Etage climatique
Mostaganem	30,9	28,8	7,9	80.5	L'étage semi-aride supérieur à hiver chaud

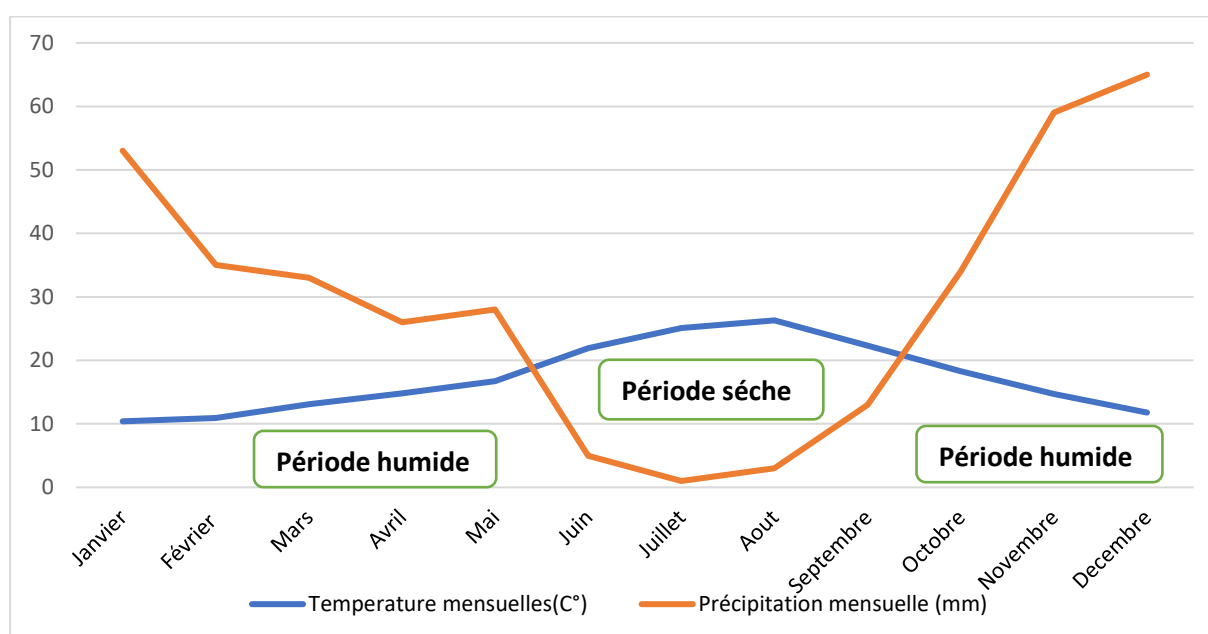


Figure II-7 : Le diagramme Ombro-thermique.

L'analyse du diagramme permet de visualiser une période pluvieuse humide qui est de 7 mois, elle s'étale de fin Septembre à la fin de Mai et une période sèche qui caractérise les mois les plus secs (Juin, Juillet, Aout et Septembre).

6. Le vent

Les mouvements de l'air et de l'eau provoquent l'érosion et la sédimentation le long du littoral. L'action du vent sur la surface de l'eau génère les vagues ; sur la plage il déplace les particules pour les déposer ailleurs.

Il peut aussi mobiliser des quantités considérables du sable des plages et édifier les dunes qui caractérisent certaines côtes.

Dans ce présent travail on a utilisé la base des données de « Infoplaza Marine Weather » disponible sur internet www.waveclimate.com , couvrant une période de 28 ans allant de 1992 jusqu'à 2020.

Les données sont présentées dans le tableau II-5 et la figure II-8.

Tableau II-5 : Distribution des fréquences d'apparition annuelle et saisonnière du vent par direction entre 1992 à 2020, (**Infoplaza Marine Weather**)

Direction	Annuelle	Hiver	Eté	Automne	Printemps
NNE	19,87%	11,81%	24,82%	25,94%	18,92%
W	9,77%	12,05%	8,45%	9,75%	9,61%
N	12,53%	7,52%	17,53%	10,84%	10,91%
WSW	21,38%	33,29%	12,61%	18,69%	22,56%
WNW	6,42%	6,12%	6,87%	6,25%	6,27%
NNW	6,44%	6,23%	7,49%	6,16%	5,57%
NW	5,54%	5,56%	5,89%	5,21%	5,44%
NE	18,05%	17,42%	16,34%	17,16%	20,72%

L'analyse statique de ces données de vent montre que les directions les plus dominantes sont :

- Période printanier et automnale : Une prédominance des vents de secteur compris entre Nord-Nord-Est et Nord-Est avec des fréquences d'apparition respectives de 18.92% et 20,72%. Les vents de cette direction ont des vitesses supérieures à 17 m/s.
- Période hivernale : les vents qui proviennent de secteur Ouest-Sud-Ouest possèdent une grande fréquence qui est de 33.29% avec une vitesse comprise entre 17 et 19 m/s. Les autres directions sont moins fréquentes avec des fréquences relativement faibles.
- Période estivale : les vents les plus dominants sont ceux des deux directions Nord et surtout la direction Nord-Nord-Est avec des fréquences d'apparition respectives de 17.53% et 24.82%. Les directions du vent Nord-Ouest et Ouest existent mais avec une prédominance moins remarquable.
- Fréquence annuelle : nous constatons que les directions de vent les plus dominantes sur notre site d'étude proviennent du Nord, Nord-Est, Nord-Nord-Est et Ouest-Sud-Ouest

avec des fréquences d'apparition respectivement estimées par 12,53% ,18.05%, 19,87% et 21,38%.

6.1. Les roses des vents

.

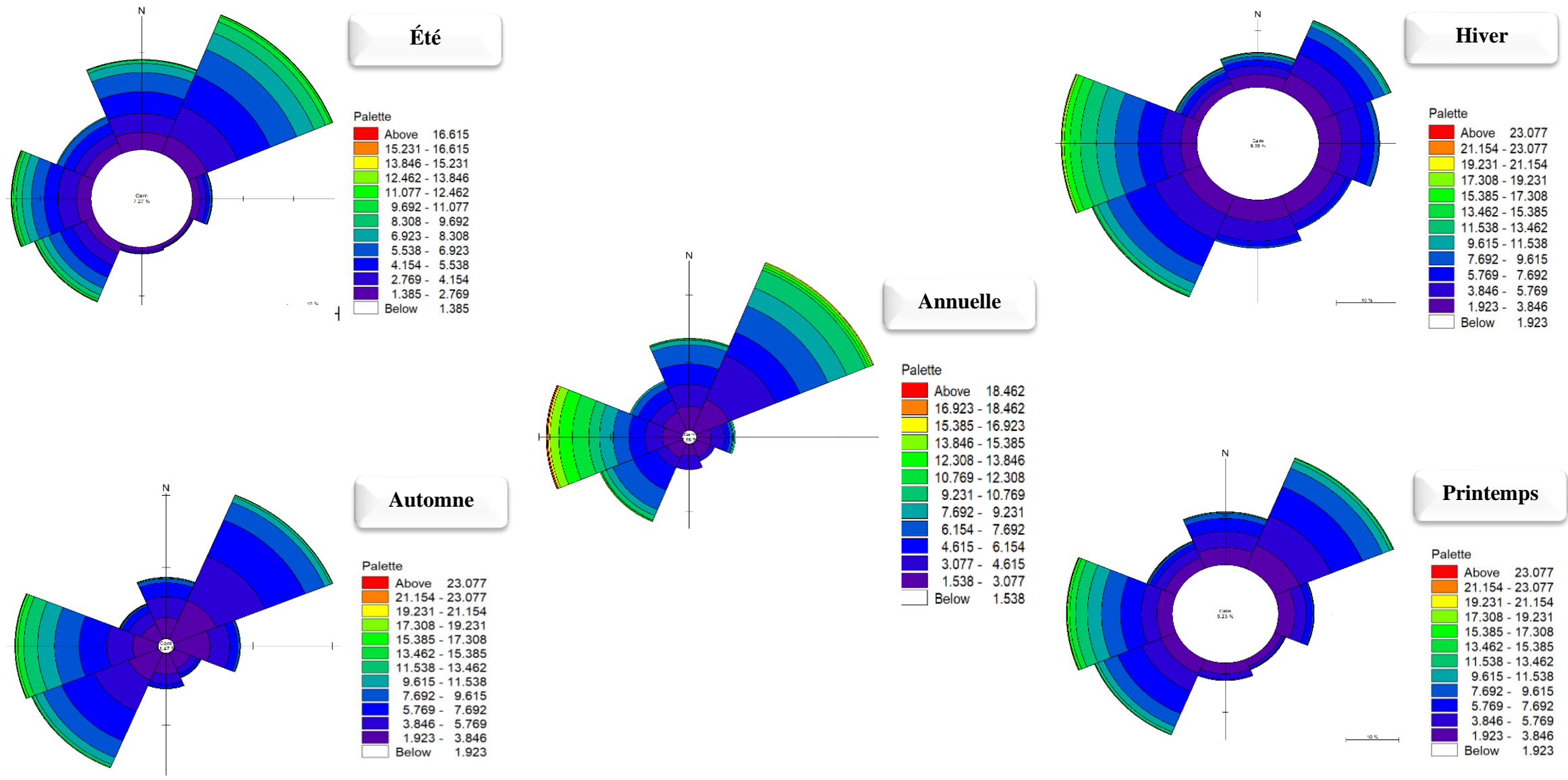


Figure II-8 : Roses des vents au large de la cote de Mostaganem,2020.

7. Conditions hydro-sédimentaires

7.1. La houle

Les données utilisées sont extraites à partir de la base des données météorologiques «Infoplaza Marine Weather» disponible sur Internet www.waveclimate.com, couvrant une période de 28 ans allant du 1992 à 2020.

L'analyse statistique des directions de houles au large nous a permis de tracer les roses annuelles et trimestrielles des houles ainsi que déduire la fréquence d'apparition des houles au large (Figure II.9) et (tableau II.6).

Tableau II-6 : La distribution fréquentielle de Hs selon le traitement des données «Infoplaza Marine Weather» de 1992 à 2020.

Mois/Direction	Annuel	Hiver	Eté	Automne	Printemps
NNE	41,74%	30,97%	52,78%	41,34%	41,17%
W	25,98%	23,70%	22,15%	25,21%	29,79%
N	10,78%	11,32%	10,98%	11,43%	9,42%
WSW	9,18%	16,96%	2,20%	9,63%	8,48%
WNW	4,46%	5,16%	3,43%	4,87%	4,43%
NNW	3,15%	4,57%	2,44%	2,88%	2,80%
NW	2,56%	3,37%	1,94%	2,53%	2,46%
NE	2,13%	3,94%	1,14%	2,12%	1,44%

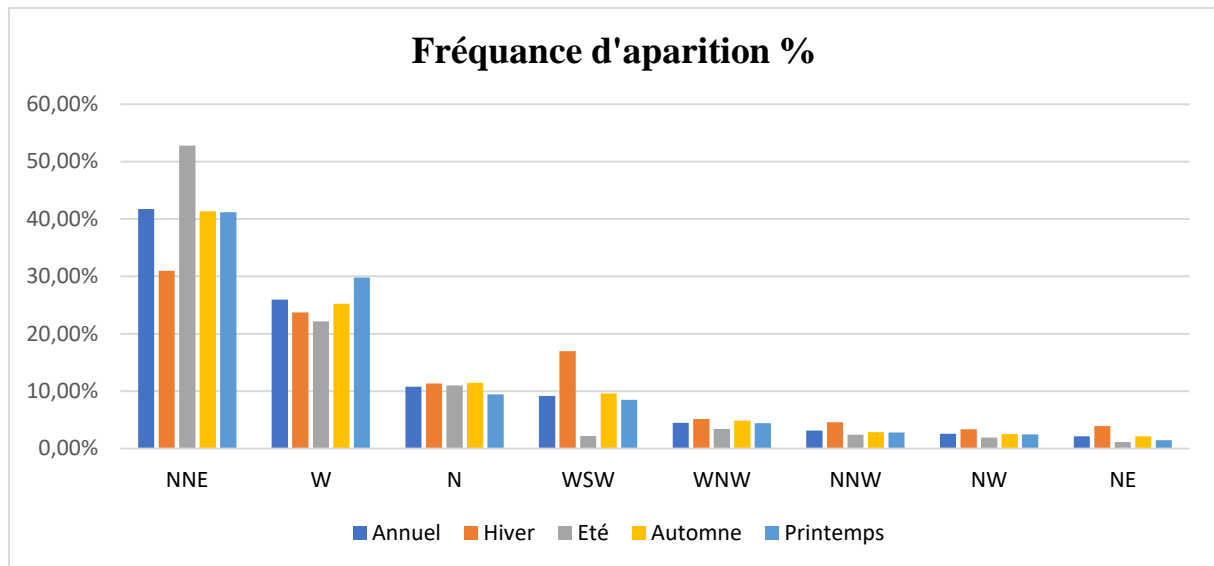


Figure II-9 : Histogramme des fréquences d'apparition des houles annuelle et saisonnière.

Au large des côtes de la zone d'étude, la rose annuelle des houles (Figure II-10) montre que les agitations qui touchent le site proviennent principalement des secteurs Ouest et Nord-Nord-Est avec des fréquences d'apparition respectives 25,98% et 41,74%.

Par ailleurs, l'interprétation des roses trimestrielles fait ressortir les constatations suivantes : Les houles les plus dominantes sont issues des secteurs :

- Nord-Nord-Est avec 41,74% de fréquence annuelle qui domine principalement en été (52,78%) avec une hauteur significative ne s'exécède pas 3m.
- Ouest avec 25,98% de fréquence annuelle qui domine en Printemps (29,79%), en Automne (25,21%) et aussi en Hiver (25,56%) avec une hauteur significative oscille entre 3 et 5m pour les trois trimestres.

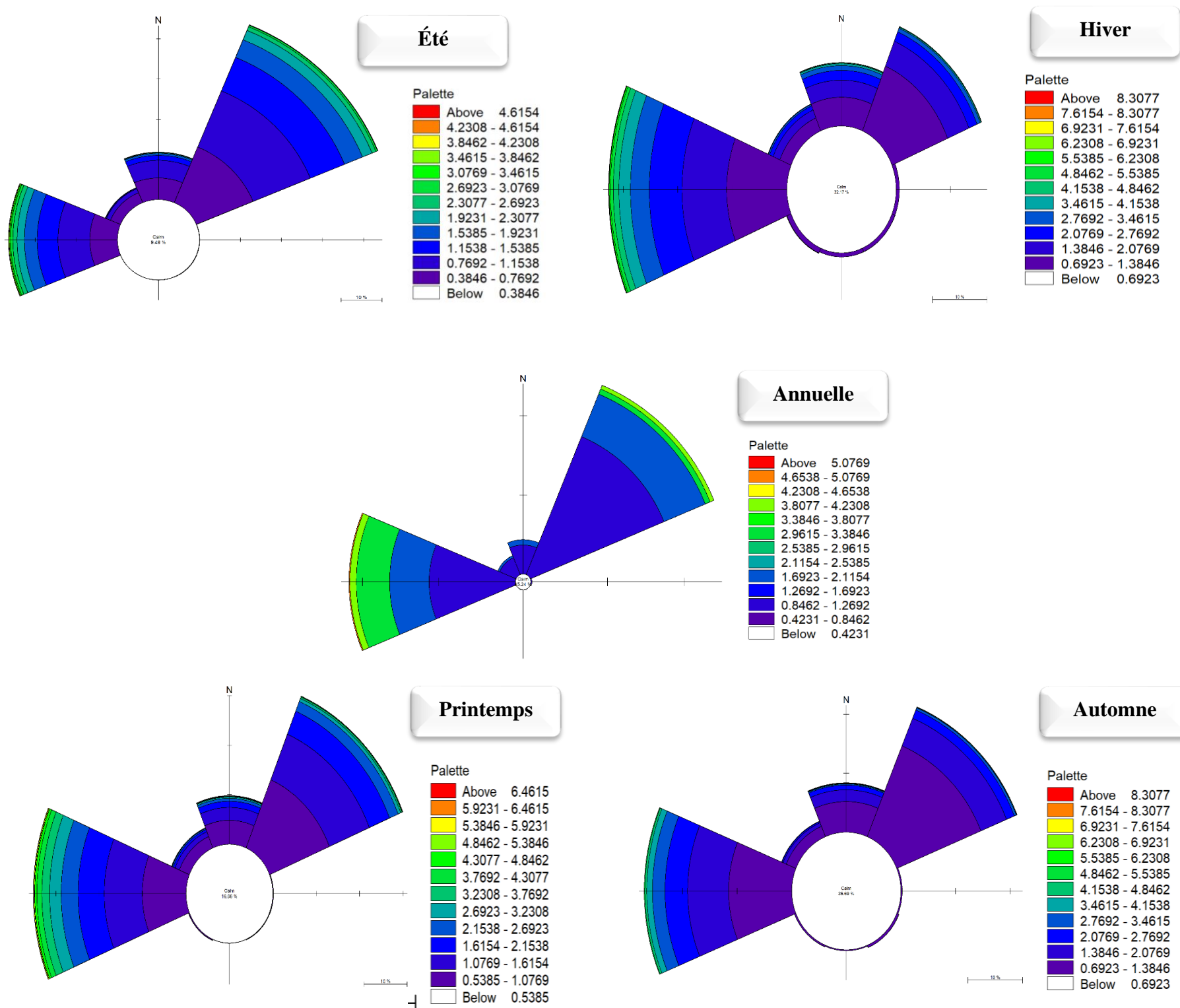


Figure II-10 : Les roses de houles au large de la cote de Mostaganem,2020.

7.3. Marée

La marée désigne le processus de variation périodique du niveau de la mer, elle est due à l'attraction lunaire, et dans une moindre mesure à l'attraction du Soleil qui module son amplitude selon la phase de la Lune et différentes périodes astronomiques. Des courants par endroit très violents sont associés aux marées dans les zones côtières. Les courants de marée jouent par ailleurs un rôle global sur le climat en contribuant au mélange vertical de l'océan, qui refroidit la surface par le contact avec l'eau profonde. (SOMMERIA, 2016)

Dans les côtes algériennes et d'une façon générale, l'amplitude de la marée n'est pas importante, le marnage est de l'ordre de 80 cm à 1m en pleine lune. (Amarouche, 2015).

Le niveau marin

Selon Le 5ème rapport du GIEC (AR5, 2014), la Méditerranée est une des régions les plus vulnérables au changement climatique, une hausse des températures de 2 à 3°C est à prévoir en région méditerranéenne à l'horizon 2050, et de 3 à 5°C à l'horizon 2100.

L'augmentation du niveau de la mer Méditerranée monte à un rythme accéléré de 2,6 à 2,9 mm par an, ce qui implique une augmentation de 0,43 m à 2,5 m d'ici 2100.

Cette élévation du niveau de la mer due au réchauffement climatique va accentuer l'érosion côtière, les submersions et tempêtes et s'annonce catastrophique pour un certain nombre de populations côtières (Figure II.11).

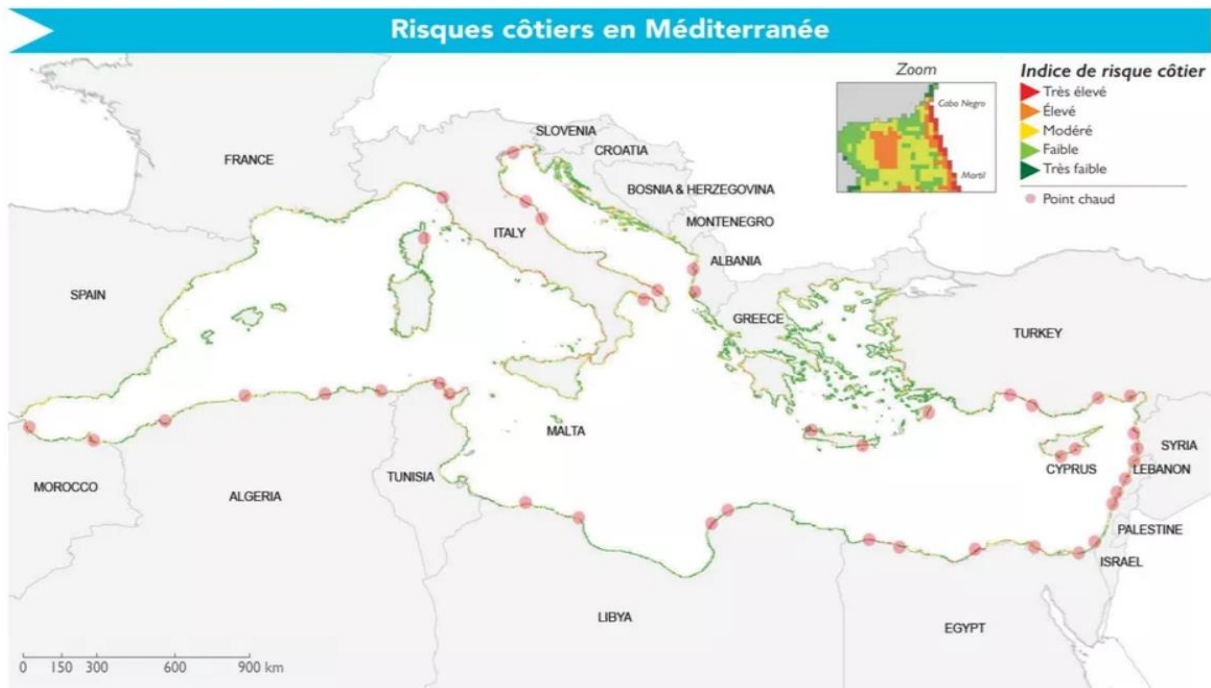


Figure II-11 : Carte d'évolution régionale des risques pour la méditerranée basée sur la méthode CRI-Med. (Source: Satta et al.2016).

8. Facteurs anthropiques

Les activités humaines influencent l'évolution du littoral et peuvent provoquer l'apparition ou l'aggravation de phénomènes d'érosion, notamment si l'Homme prélève des sédiments sur ce littoral. On considère que la pénurie sédimentaire, d'origine naturelle ou non est le principal facteur de l'érosion des plages. De fait, l'homme a souvent intervenu consciemment ou inconsciemment sur cette ressource, soit en prélevant des sédiments (sables, galets), soit en contrariant leur déplacement naturel le long de la côte.

Parmi ces actions, on peut citer :

8.1. La construction des barrages

Les barrages sont régulièrement évoqués dans l'actualité pour leurs impacts sur la biodiversité, à juste titre, mais leur impact sur la dynamique sédimentaire, notamment leur rôle de "pièges à sédiments", est moins souvent relevé. La construction des barrages a considérablement modifié la quantité et la qualité des sédiments libérés en aval des barrages jusqu'à la mer. ; on conçoit donc que l'ensemble de ces obstacles prive l'aval de nombreuses particules de sédiments qui s'accumulent au niveau des barrages.(**Gil Mahe, Programmes SICMED,2011**).

8.2. L'extraction abusive du sable

Le pillage de sable continue sur les plages du Dahra « Est » de Mostaganem et principalement à Sidi Lakhedar (Figure II-12) et Hadjadj. Les pillards agissent au vu et au su de tout le monde sans que personne ne bouge le petit doigt. Bien que l'activité soit strictement interdite, elle n'a jamais connu de répit.



Figure II-12 : Carrière Sidi Lakhedar.

L'extraction du sable marin au large des côtes met particulièrement en péril la faune et flore océanique. Ce qui provoque des trous importants dans les fonds océaniques, entraînant par la suite des glissements de sable. Ce phénomène n'est pas spécifique à une seule région car dans le monde, entre 75% et 90% des plages reculent. **(Environnement : La surexploitation du sable mène à une catastrophe écologique, 2013)**

8.3. Aménagement portuaire et maritime

L'implantation d'un port sur le littoral a comme conséquence immédiate et irréversible la destruction de la faune et de la flore dans la zone des travaux.

La création d'un port nécessite souvent le creusement de bassins et le rejet en mer de matériaux. Ces rejets ont des conséquences sur l'écosystème côtier enfouissement d'organismes benthiques, augmentation de la turbidité et donc diminution de la production primaire, colmatage des branchies.

Les structures portuaires agissent comme une barrière côtière. La dérive côtière des sédiments menace de perturber les matériaux et de modifier le développement du littoral.

Un port de pêche et de plaisance a été réalisé à Salamandre, en 2012. Cette infrastructure permettra aussi de désengorger le port commercial de la ville.

Le Port de Mostaganem ouvert en 1904 est l'un des ports les plus importants d'Algérie et du Maghreb, car il relie de nombreuses lignes et est considéré comme un point de connexion entre l'est et l'ouest.



Figure II-13 : Image satellitaire du port de pêche de la salamandre et le grand port de Mostaganem.

8.4. L'urbanisation désordonnée près de la cote :

L'urbanisation du littoral donne naissance à des rapports conflictuels entre différents usagers. Les tensions ont pour objet l'appropriation du foncier littoral et suscitent l'adoption, à l'échelle de l'individu ou du groupe. (Tarik and Bouziane, 2010)

La construction a proximité du rivage (Figure II-14) accélère le recul du rivage qui conduisant a une surexploitation des réserves côtières, ce qui peut également réduire le couvert végétal et causé la dégradation des dunes de sable, surpopulation de la zone, les rejets liquide en mer provenant des usines cause un déséquilibre de l'écosystème côtier.

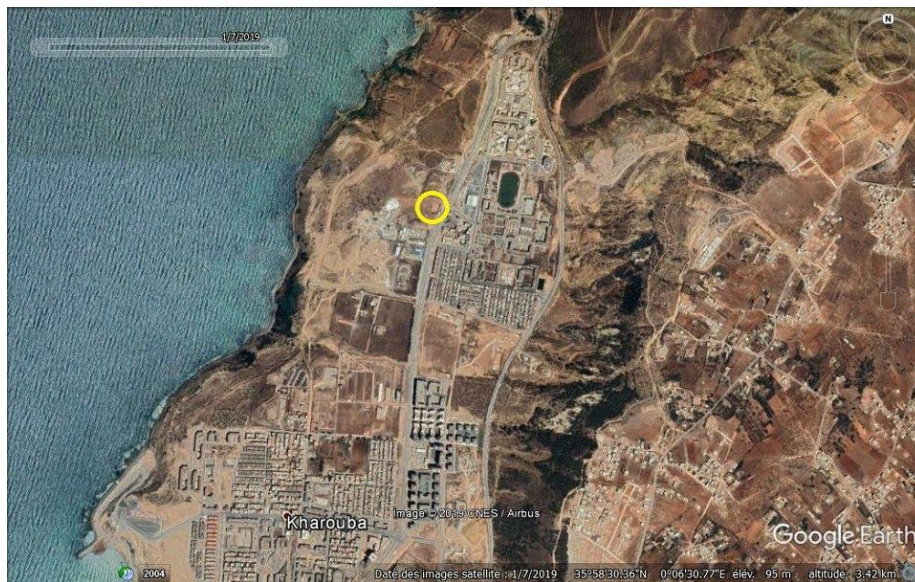


Figure II-14 : L'urbanisation du littoral de la wilaya de Mostaganem.

8.5. Le tourisme sur le littoral

Le tourisme sur le littoral nuit fortement à la préservation des espaces naturels (plage, océan...). En effet, avec de nombreux visiteurs chaque année, certains en oublie leurs bonnes habitudes et laisse leurs déchets dans la nature. Chaque année, 8 millions de tonnes de déchets plastiques sont rejetés dans l'océan.

Le nombre d'estivants qui ont visité les plages de la wilaya de Mostaganem, fort de ses 124 kilomètres de côtes, durant le mois d'août 2020 (15 jours) a atteint 3 millions, en majorité à "Sidi Mansour" et "El Mectaa" (1 million d'estivants), à "Sablettes" et "Ouréah" (500.000) et à la plage de "Bahara" (400.000), a-t-on indiqué. (Nassima Dib, 2020).

En saison estivale, les plages de Mostaganem à cause du piétinement et du carrossage subissent une perturbation de la végétation près de la cote, et il affect ainsi le cordon dunaire (Figure II-15).



Figure II-15 : La plage de Sidi Mejdoub Mostaganem.

9. Conclusion

Notre zone d'étude est délimitée par Kef Lasfar à l'Est et par Ras Sidi Mansour à l'Ouest. Elle s'étend sur environ 85 km de longueur d'où la majorité de leur partie se représente par des plages sableuses qui se caractérise par la présence des dunes au niveau de Stidia, Bahara, El Mectaa et Sidi Mansour. La zone est alimentée par plusieurs Oueds le plus important est Oued Chelef. Tandis que les falaises ne représentent que 4% de son linéaire côtier. Elle est caractérisée par un faciès sédimentaire qui est essentiellement constitué par des terrains sédimentaire (conglomérat, marne et argile) qui date de Moi-Plio-Quaternaire

Du point de vue climatique, la zone possède un climat semi-aride à hiver chaud avec une pluviométrie moyenne de 355mm entre 1901 et 2019.

Elle est soumise à des vents annuels provenant généralement proviennent du Nord, Nord-Est, Nord-Nord-Est et Ouest-Sud-Ouest avec des fréquences d'apparition respectivement estimées par 12,53% ,18.05%, 19,87% et 21,38%.

Elle est soumise à des houles de secteur Nord-Nord-Est et Ouest.

La dégradation des plages de la zone d'étude est due non seulement par les agents hydrodynamiques mais aussi accélérée par des facteurs anthropiques le long de notre zone d'étude.

Chapitre III : Modélisation de la dynamique côtière du littoral de Mostaganem

1. Introduction

Ce chapitre est porté sur l'étude hydrodynamique et hydro sédimentaire littorale, on a besoin de ressortir des paramètres telles quelles : les changements et les modifications survenus à la houle lors de sa propagation du large vers la cote, courants générés par la houle et le transport sédimentaire.

L'objectif principal de ce chapitre est de faire une modélisation numérique des vagues du large vers la côte et les courants subissant de nombreuses transformations dès leur interaction avec le fond. Pour les résultats des simulations numériques en utilisant le DHI Mike 21.

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

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

2. Etude bathymétrique

2.1. Description du modèle de simulation MIKE 21

MIKE 21 est une suite logicielle professionnelle de la modélisation numérique 2D des écoulements à surface libre, développée par DHI Water & Environnement. Il permet la simulation de l'hydraulique et des phénomènes associés dans les rivières, les lacs, les baies, les zones côtières et les océans. (DHI, 2014).

La modélisation de la dynamique sédimentaire en milieu côtier, doit tenir compte des courants induits par la marée et les houles. Il s'ensuit que l'approche modélisatrice doit faire appel à un système de modélisation intégré comprenant 3 modèles numériques : un modèle hydrodynamique, un modèle de houle et un modèle de transport sédimentaire de particules non-cohésifs, sous l'effet de l'action combinée des vagues et des courants. Dans ce contexte, le module MIKE21, comprend les calculs suivants (DHI, 2014).

- MIKE 21-SW (Spectral Waves Flexible Mesh).
- MIKE 21-HD (Hydrodynamic model).
- MIKE 21-ST (Non-Cohesive sediment transport).

2.2. Modèle numérique spectral Waves (MIKE 21-SW)

Modèle spectral de vague de 3ème génération simule : la croissance des vagues en présence du vent, l'interaction vague-vague non-linéaire, la dissipation par le déferlement et par la friction sur le fond, la réfraction par les changements de profondeur et l'interaction vague-courant. Les calculs du modèle MIKE21-SW utilisent une grille à maillage flexible. Le modèle équivalent sur maillage en différence finie est le modèle MIKE21-NSW. (DHI, 2014).

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

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

$$\partial N / \partial t + \nabla \cdot (\vec{v}N) = S / \sigma \dots\dots\dots (III -1)$$

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

$$(cx, cy) = dx^{\vec{}} / dt = c^{\vec{}}g + U^{\vec{}} \dots\dots\dots (III -2)$$

$$c\sigma = d\sigma / dt = \partial\sigma / \partial d [\partial d / \partial t + U^{\vec{}} \cdot \nabla x^{\vec{}} d] - cgk^{\vec{}} \cdot \partial U^{\vec{}} / \partial s \dots\dots\dots (III -3)$$

$$c\theta = d\theta / dt = - 1 / k [\sigma / \partial \cdot \partial d / \partial m + k^{\vec{}} \cdot \partial U^{\vec{}} / \partial m] \dots\dots\dots (III -4)$$

Ici, S est la coordonnée de l'espace dans la direction de l'onde θ , et m est une coordonnée perpendiculaire à S . ∇_x est l'opérateur différentiel bidimensionnel dans l'espace x, y . (DHI, 2014)

2.3. Modèle numérique hydrodynamique (MIK 21-HD)

Traite le frottement sur le fond, l'effet des événements météorologiques (vents et pression atmosphérique), et la force de Coriolis, etc.... Il nous permet de simuler les courants côtiers dû à l'action de la houle dans la zone de déferlement. Il fournit aussi les conditions hydrodynamiques aux autres modules de ce système tel que le module MIKE 21-ST. (DHI, 2014).

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

$$\partial\zeta / \partial t + \partial p / \partial x + \partial q / \partial y = \partial d / \partial t \dots\dots (III -5)$$

$$\partial p / \partial t + \partial / \partial x (\zeta^2 / h) + \partial / \partial y (pq / h) + gh * \partial\zeta / \partial x + gp\sqrt{p^2+q^2} / C^2.h^2 - 1 / \rho w [\partial / \partial x (h\tau_{xx}) + \partial / \partial y (h\tau_{xy})] - \Omega q - fVVx + h / \rho w * \partial / \partial x (p\alpha) = 0 \dots\dots\dots (III -6)$$

$$\partial q / \partial t + \partial / \partial y (\zeta^2 / h) + \partial / \partial x (pq / h) + gh * \partial\zeta / \partial y + gp\sqrt{p^2+q^2} / C^2.h^2 - 1 \rho w [\partial / \partial y (h\tau_{yy}) + \partial / \partial x (h\tau_{xy})] + \Omega p - fVVy + h / \rho w * \partial / \partial y (p\alpha) = 0 \dots\dots\dots (III -7)$$

Les symboles suivants sont utilisés dans ces équations (DHI, 2014):

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

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

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

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

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

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

(V) : Facteur de frottement de vent.

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

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

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

ρ : Masse volumique de l'eau (kg/m^3).

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yx}$: Composantes de l'effort de cisaillement effectif.

2.4. Modèle numérique de transport de sable (MIKE 21-ST)

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. Ce modèle n'utilise que le modèle STPQ3D en cas de houle et des courants combinés. Les transports de sables sont déterminés par l'interpolation dans les tableaux de transport. (DHI, 2014).

Ces tableaux doivent être générés au préalable par « MIKE 21 Toolbox » avec le choix de « Génération of Q3D Sédiment Tables ». Ils doivent intégrer une condition quelconque de bathymétrie, courant, houle, ou sédiment prédit par le module intégré. (DHI, 2014) On est amené à résoudre cette équation de transport-diffusion pour calculer la concentration des sédiments transportés.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \text{div}((\vec{U} + \vec{W}_s)C) = \text{div}(\gamma t * \vec{\nabla} C) \dots \dots \dots (III -8)$$

Avec : \vec{U} : Étant le champ de vitesse 3D ;

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

γ : le coefficient de diffusivité turbulente des sédiments. (DHI, 2014)

La variation correspondante de la hauteur de la houle (Par rapport à la hauteur de la houle au large, H_s), due à la redistribution de l'énergie le long des crêtes, est habituellement exprimée par le coefficient de réfraction K_r . (Benoît et al, 2009).

Le coefficient de réfraction correspondant, K_r est donc calculé comme suit (Benoît et al, 2009) :

$$K_r = H_s \text{ locale} / H_s \text{ au large} \dots\dots\dots (III -9)$$

2.5. Modèle FM MIKE21/3 Couplé

Le modèle FM MIKE21/3 Couplé comprend différents modules, nous pouvons sélectionner pour être inclus dans la simulation : hydrodynamique, transport du sable, spectre de vague, etc. ... Le modèle comprend également un couplage dynamique entre le module de transport du sable et le module hydrodynamique et le module spectral de vague (DHI, 2014h). Le pas de temps global discret est utilisé pour déterminer la fréquence de sortie qui peut être obtenue à partir des différents modules et synchroniser le couplage entre les différents modules. Le pas de temps local pour le module d'onde spectrale (SW) et le module de transport de sable (ST) peut être défini comme un multiple du pas de temps global et d'un facteur de pas de temps. (DHI, 2014).

3. La démarche adoptée

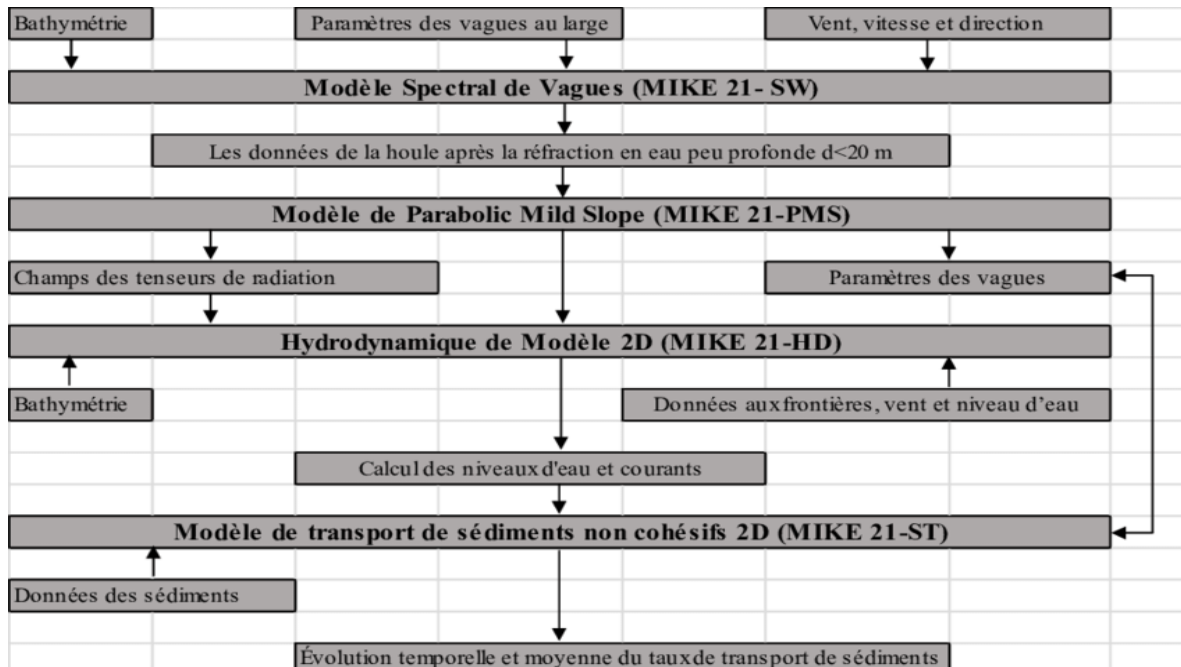


Figure III-1 : Approche méthodologique adoptée pour la modélisation intégrée du transport sédimentaire non cohésif. Source :(https://www.researchgate.net/figure/Approche-methodologique-de-modelisation-integree-du-transport-de-sediments-non-cohesifs_fig3_348588065).

3.1. Les données de la bathymétries

Cette étude a été réalisée suivant ces étapes :

- La digitalisation de la bathymétrie à l'aide de la carte de Navionics <https://www.navionics.com/fra/> selon la zone d'étude qui on a obtenu par faire des captures d'écran sur le site web de navionics après on a traité avec le logiciel de cartographie Arc Gis 10.4 sous le system de projection WGS1984 complexe UTM zone 30N.
- On obtient le résultat de cette opération sous forme tableau fichier Excel qui contient des coordonnées longitude, latitude, profondeur de la bathymétrie digitaliser.
- La digitalisation de trait cote à l'aide de la carte géoréférencée que nous avons obtenue par le Logiciel google Earth pro.
- Ensuite nous avons obtenus un tableau de coordonnées X, Y et Profondeur et nous avons convertis ce tableau en fichier de format .xyz .
- Avec le logiciel Mike 21 on a lancé une interpolation de ces données pour obtenir des informations sur chaque nœud de la MESH générée.
- Nous utilisons ces résultats et avec le Mike 21 pour créer des cartes bathymétriques en 2D et pour faire les 3 simulations SW, HD, ST.

3.2. Des données relatives aux conditions météorologiques

Les données de la houle au large qui ont été utilisées, sont des données du site (www.waveclimate.com). Les données (Hs – Tp – Directions) sont enregistrées chaque trois heures dont les directions de houle dominantes étaient de secteur Nord, West et Nord-Ouest à des hauteurs significatives dominantes oscillant entre 2.5 et 3.25m.

3.3. Création 2D Bathymétries sous le maillage

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

On importe le fichier xyz qui contient les données du trait de côte et un autre qui contient les données de la bathymétrie. Pour faciliter le processus d'élaboration manuelle des données et leur présentation, des cartes graphiques des images de fond peuvent être importées et superposées aux données bathymétriques (DHI, 2014).

La carte bathymétrique a été réalisée par interpolation à l'aide de l'outil « Interpolate » de l'extension Mesh sous Mike 21 par « Natural Neighbour ».

Les étapes fondamentales de la création du maillage :

- Création d'un espace de travail ou il faut spécifier le système de projection.
- Importation des données XYZ du Trait de côte ainsi que la bathymétrie.
- Définir le domaine de travail par la spécification des limites (frontières) par des arcs qui entourent la zone d'études.
- Génération du maillage (Mesh) (Figure III-2).
- Lissage du maillage (Smoothing Mesh).
- Configuration de l'interpolation.
- Lancement de l'interpolation. (Figure III-3).
- Exportation du maillage.

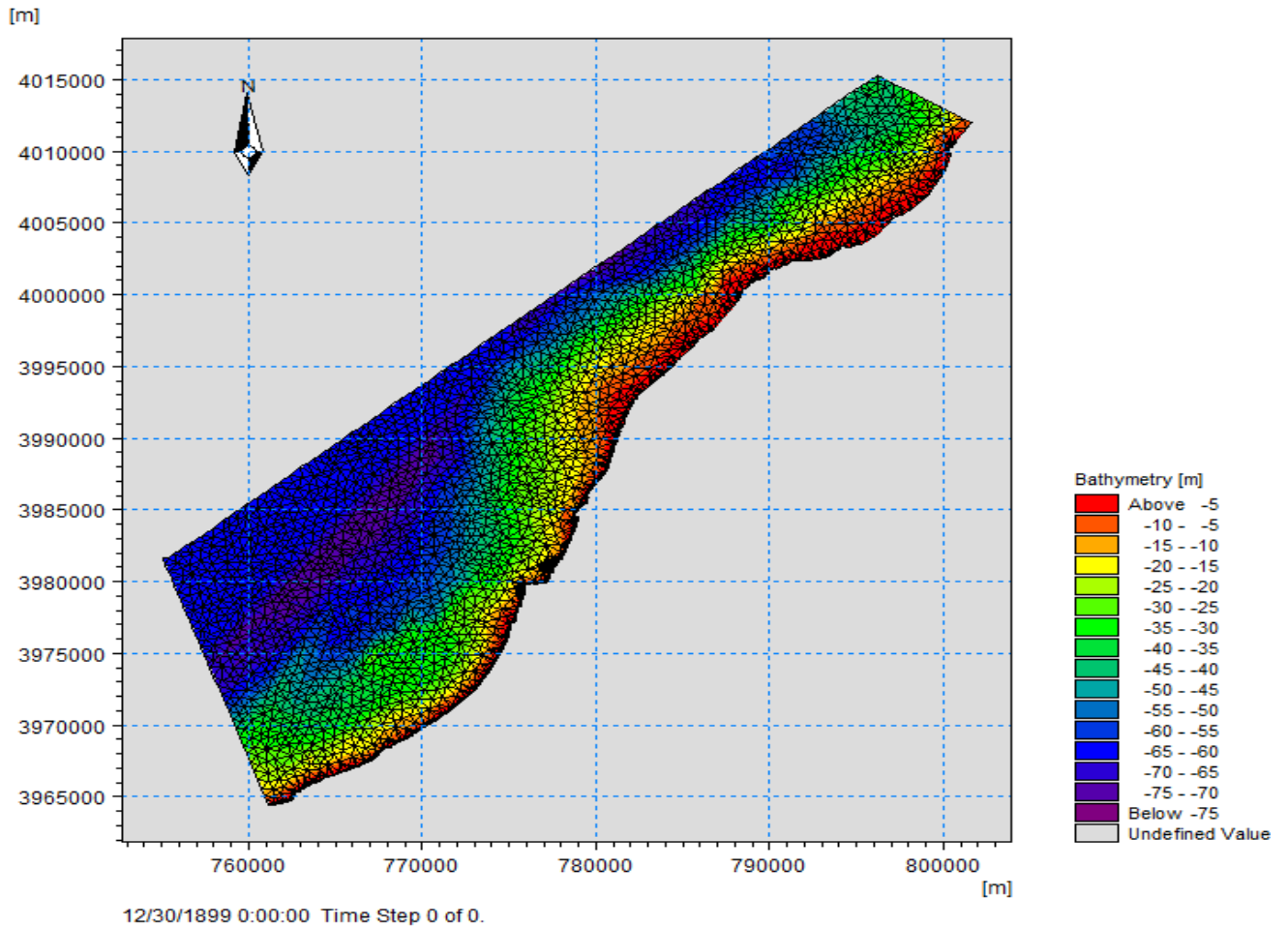


Figure III-2 : Maillage du domaine de travail de la zone d'étude.

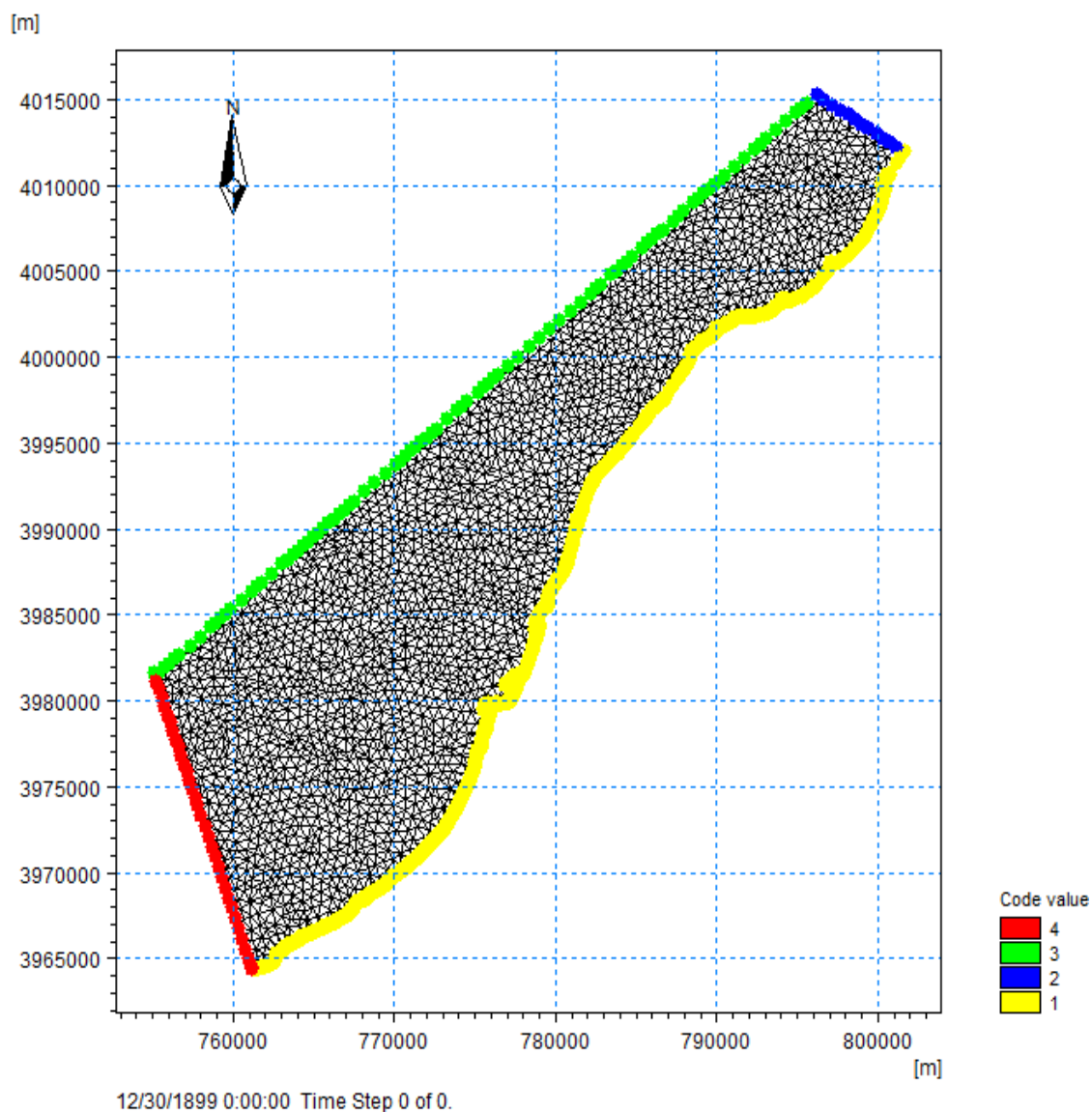


Figure III-3 : Emprise du model

4. Etude bathymétrique

D'après la Carte bathymétrique de la zone d'étude de Mostaganem (Figure III-4). On peut distinguer deux zones morphologiques bien différentes sont mises en évidence :

Zone au large : au-delà de la profondeur de 10m : on remarque que le fond marin est caractérisé par des isobathes régulières parallèle à la cote avec des même distances presque et assez serrés jusqu'à l'isobathe 10m, ce qui renseigne également sur la pente des fonds qui a tendance à s'adoucir (pente douce).

Zone à la cote : Entre 0 et environ -10m de profondeur : caractériser par des isobathes irrégulières rectilignes par rapport au trait de côte où il y a une variation de la morphologie sous-marine avec les isobathes sont très serré ce qui définit un profil à pente abrupte.

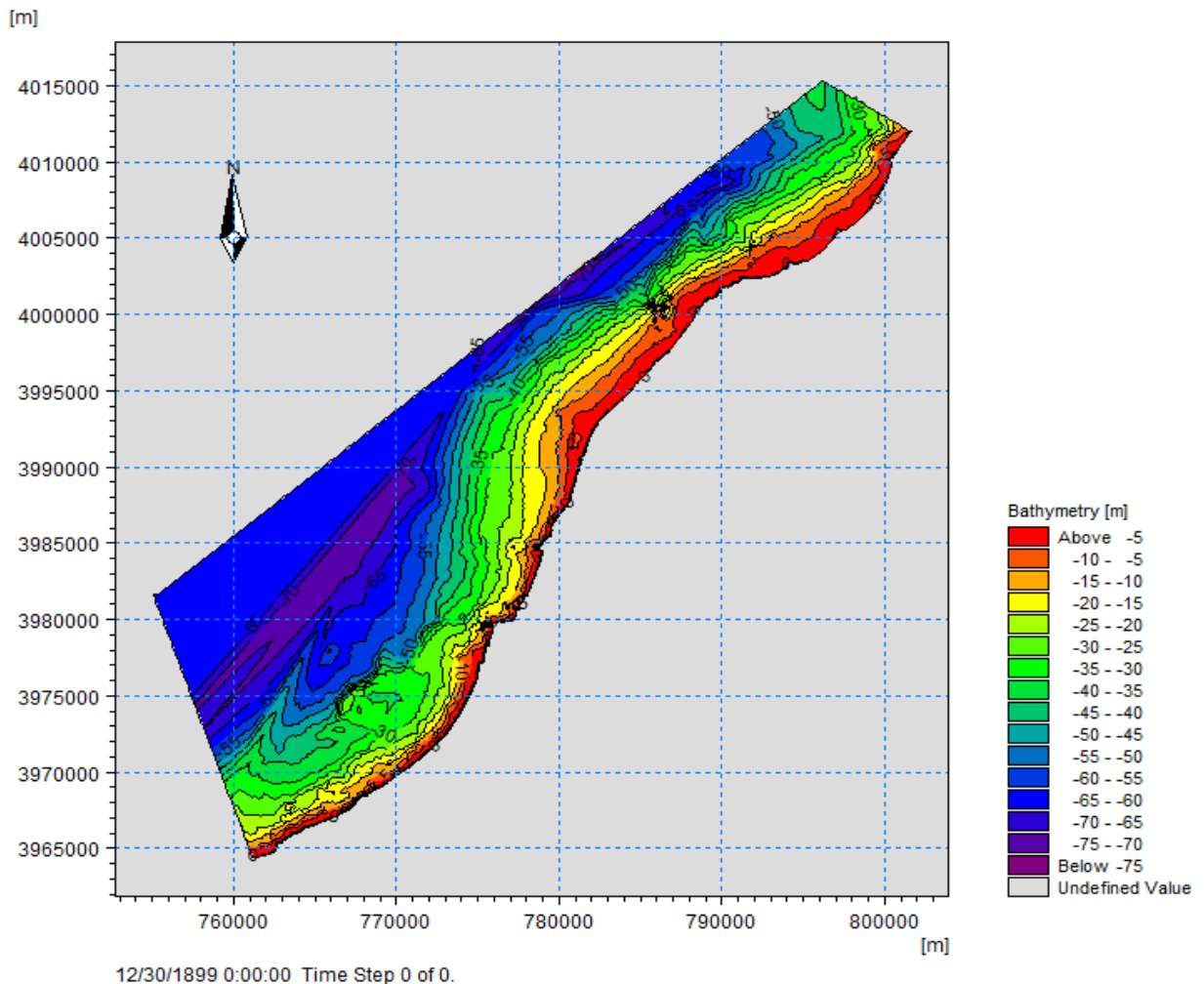


Figure III-4 : Carte bathymétrique de la zone d'étude de Mostaganem

4.1. Simulation de la propagation de la houle par le module SW

C'est un modèle basé sur :

La conservation de la densité de l'action d'onde qui permet de simuler la propagation des états de mer (mers de vent et houles océaniques) dans les domaines offshore et côtier. Le module SW simule la génération de la houle par action du vent, la dissipation de la houle par moutonnement et déferlement bathymétrique ainsi que la dissipation de la houle par frottement sur le fond, la réfraction et la levée de la houle (« Shoaling ») phénomènes tous deux liés aux variations de bathymétrie, les interactions entre la houle et les courants et les effets de variation de la hauteur du plan d'eau et la gestion des zones découvrantes.

Les données d'entrées et calibration du model SW :

Pour utiliser le modèle de MIKE 21 Spectral Waves FM on choisit des différentes données sont nécessaires pour cette étude de bathymétrie :

- une valeur constante de coefficient de déferlement $\gamma = 0.8$.
- Le frottement au fond « bottom friction » est configuré à l'aide du modèle de
- Nikuradse (kn est prise constant et égale à 0.04 m).
- Les directions N315°, N270° et N360°.
- La Hauteur significative $H_s=5.16m$, 4.72m et 5.44m (Tableau III-1).

Tableau III-1 : Hauteur des houles annuelles retenues par secteur de provenance au large.

	Directions de la houle au large		
	N270°	N360°	N315°
Amplitude (m)	4.72	5.44	5.16
Période (s)	8	8.1	8.25

5. Présentation et interprétation des résultats de module SW

La figure III-5 illustre la propagation de la houle provenant du secteur Nord (360°), caractériser par des houles qui apparait surtout dans les tempêtes hivernales. Ce qui engendre des courants de retour dans le sens opposé. Par contre au niveau des ouvrages, les plans de vague

provenant de ce secteur sont peu réfractés et qui abordent la côte. D'après la figure nous remarquons que les houles qui arrivent des directions N360° avec une hauteur significative (H_s0) au large de l'ordre de 5.44m, ont des Hauteurs (H_s) à la côte de valeurs de 0.4 à 1.2 m. Lorsque les houles commencent à ressentir l'effet du fond, la hauteur diminue considérablement avec des coefficients de réfraction (H_s/H_s0) relativement faible entre 0.07 et 0.22 le long de la zone d'étude, et cela signifie que la houle ne perd qu'une partie de son énergie lors de son évolution vers la côte. A l'exception de la zone de Cap IVI (côte rocheuse) et sur le port de Mostaganem et salamandre l'énergie forte, les hauteurs de la houle atteignent les 2.4m cela est dû généralement aux diffractions de la houle sur les jetées du port et les hauteurs atteignent les 1.2m au niveau de Kaf el Asfer.

La figure III_6 illustre la propagation de la houle provenant du secteur Nord-Ouest (315°), Au large, les houles de ce secteur ne subissent aucune modification ($H_s=5.16m$), mais au fur et à mesure lorsqu'elles se rapprochent du rivage, sa hauteur diminue (H_s varie entre 0.4m à 1.6m) avec la diminution de profondeur avec des coefficients de réfraction faibles comprises entre 0.07 et 0.31 ce qui signifie que cette houle ne perd que très peu de son énergie, par un pivotement des orthogonale légère à l'approche du rivage.

La figure III_7 représente la propagation de la houle du secteur Ouest (270°). Les houles de directions ouest sont les plus fréquentes, les orthogonales sont peu réfractées. Au large, ces houles ne subissent aucune modification, elles gardent son énergie initiale ($H_s=4.72m$) en arrivant à la côte les hauteurs significatives H_s les houles peuvent atteindre entre 0.4 et 1.2 avec des coefficients (H_s/H_s0) entre 0.08m et 0.25m donc ces houles engendrant des courants littoraux et entrainer l'érosion côtière. Au niveau de zones abritées par Cap IVI et le port de Mostaganem et salamandre, la hauteur significative enregistrée est de 0.8m et au niveau de Kaf El Asfer la hauteur de la houle est de 1.2m.

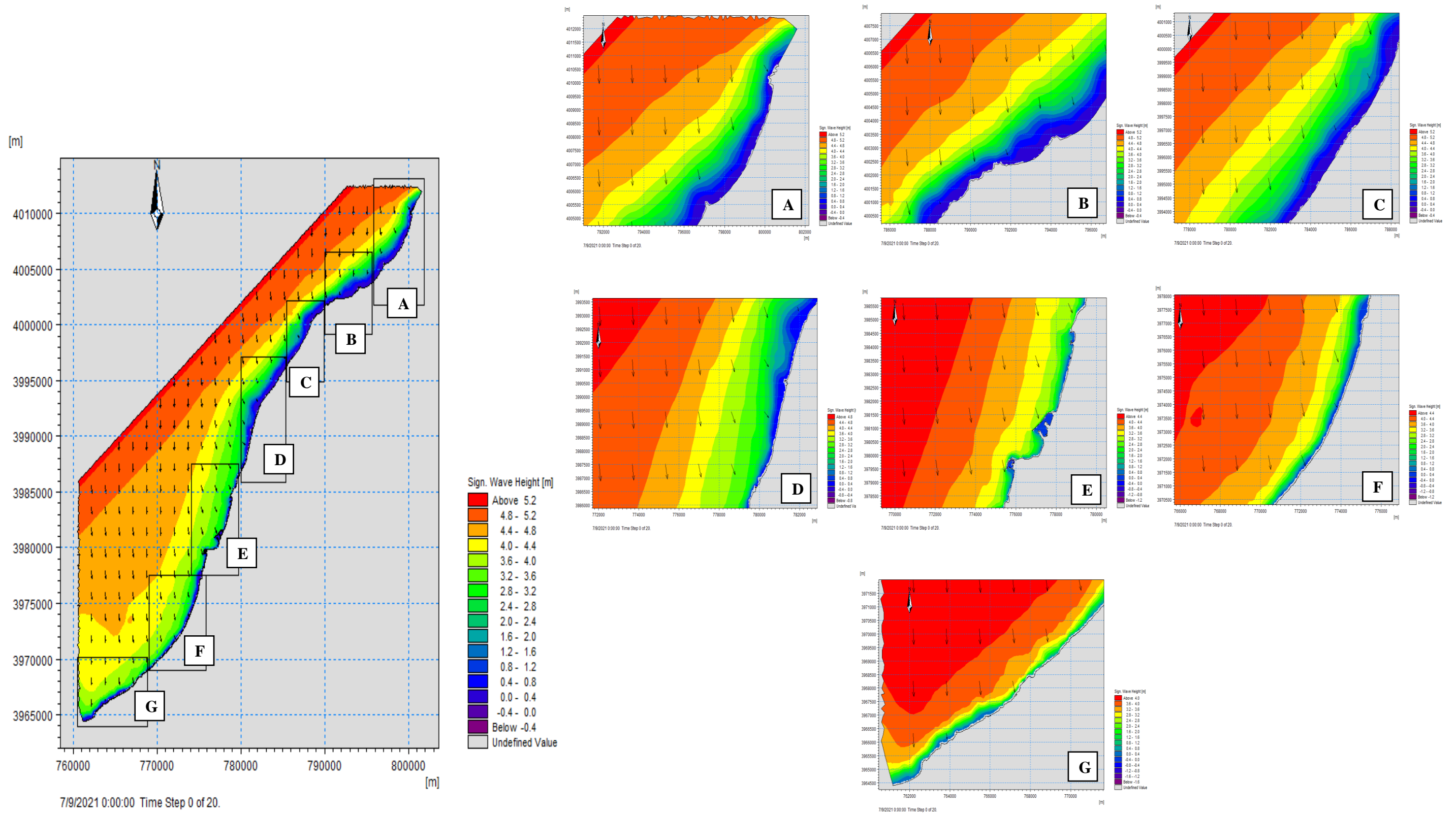


Figure III-5 : Le champ de vague de direction Nord (MWD = 360°N)

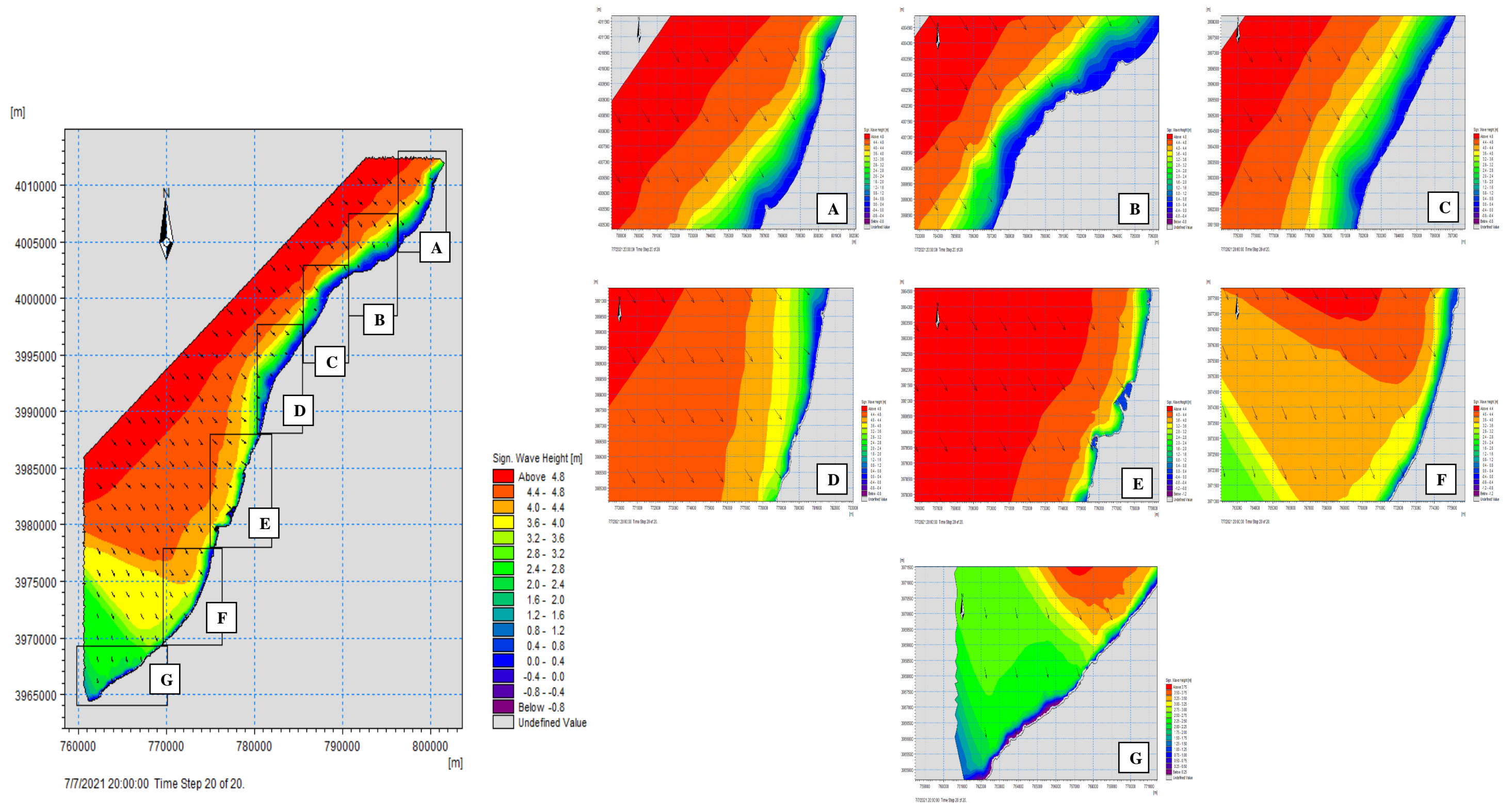


Figure III-6 : Le champ de vague de direction Nord-Ouest (MWD=315°N)

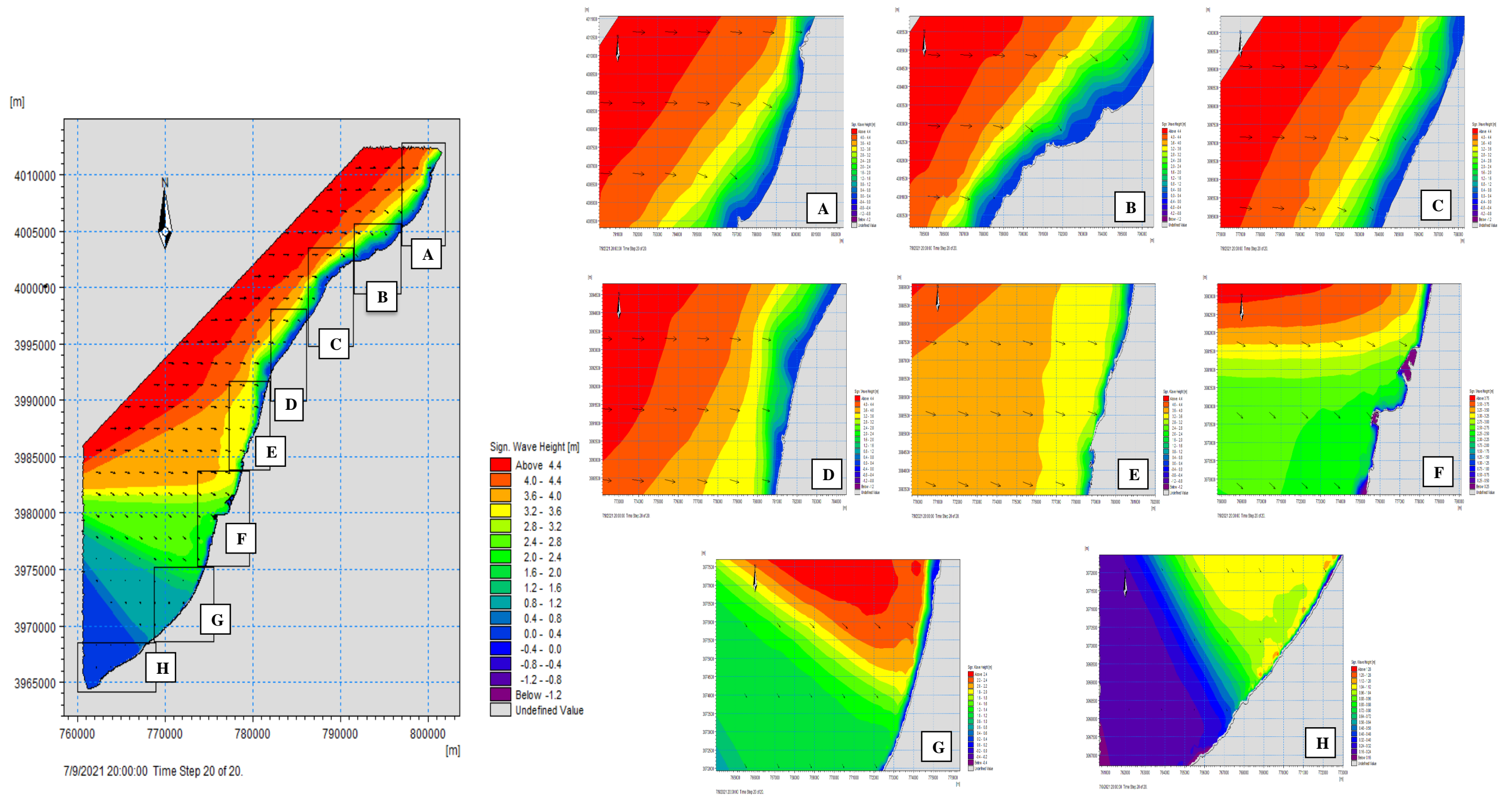


Figure III-7 : le champ de vague de direction Ouest (MWD=270°N)

6. Simulation des champs de courants générés par la houle et les vents par le module HD

Le modèle numérique a été réalisé à l'aide du module Mike 21 HD (Hydrodynamique).

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

6.1. Calibration du module hydrodynamique HD

Le module HD sert à modéliser les champs des courants générés par les houles approchant de rivage. Lors de la calibration du modèle hydrodynamique, on doit tenir en compte de deux facteurs importants : la viscosité et la rugosité du fond (nombre de Manning), la constante de **Smagorinsky** varie de 0,24 à 0,9 (DHI, 2014). Le nombre de Manning est de 24 à 35 ($m^{1/3}/seconde$). Ces dernières ont été déterminées par défaut : 0.28 et 32 respectivement.

6.2. Présentation et interprétation des résultats de module HD

D'après la figure III-8, les houles de secteur Nord ($360^{\circ}N$) engendrent un champ des courants parallèles au trait de côte, qui montrent des activités hydrodynamiques dans presque toute la zone.

On remarque que le champ du courant se propage non seulement d'Est en Ouest suivant une direction parallèle au trait de côte avec des vitesses varient majoritairement entre 0.2 m/s à 1.5 m/s. Mais aussi d'Ouest vers l'Est avec des vitesses moyennes de l'ordre de 0.6 m/s, ce courant est produit principalement par le phénomène de réfraction de la houle. Cependant à l'Est du port I, on remarque des champs de courants plus important qui dépasse la vitesse de 1.1m/s orienté vers la direction Ouest, c'est l'origine des accumulations de quantités importantes du sable au niveau de la jetée principale et favorise l'ensablement du port avec des vagues venant de l'autre côté. La tendance érosive est accentuée par des courants de retours globalement au niveau de « Mostaganem et Salamandre » leurs vitesses oscillent entre 0.5 m/s et 0.75 m/s

D'après la figure III-9, les houles issues du secteur Nord-Ouest donnent naissance près de la côte à un courant de dérive dirigé vers l'Est. Au large, ce courant prend une direction nettement opposée mais avec des vitesses nettement faibles ne dépassent pas 0.5m /s dans la partie Est. Dans la partie Ouest, au niveau de la plage de Stidia, on observe des champs de courant importants avec des vitesses qui dépassent 1m/s. Ce courant joue un rôle important dans la redistribution des sédiments accumulés au voisinage du port pour alimenter la partie érodée.

La figure III-10 montre la variation des courants et leur direction qui sont générés par une houle du Ouest 270° . On constate que ces courants sont orientés d'Est en Ouest suivant une direction parallèle au trait de côte avec des vitesses varient entre 0.08m/s et 0.9m/s le long de la cote à l'exception de la zone de Cap IVI qui enregistre des vitesses importantes de l'ordre

Modélisation de la dynamique côtière du Littoral de Mostaganem

de 1.2 m/s, ces fortes vitesses sont dû essentiellement au transport sédimentaire vers l'Ouest en favorisant l'érosion des cotes sableuses exposées à ses courants. Ces vitesses diminuent en allant vers l'Ouest à cause de l'existence des obstacles par exemples les ouvrages des protections comme port de Mostaganem et port salamandre et épi en T (les vitesses entre 0.15m/s et 0.30m/s).

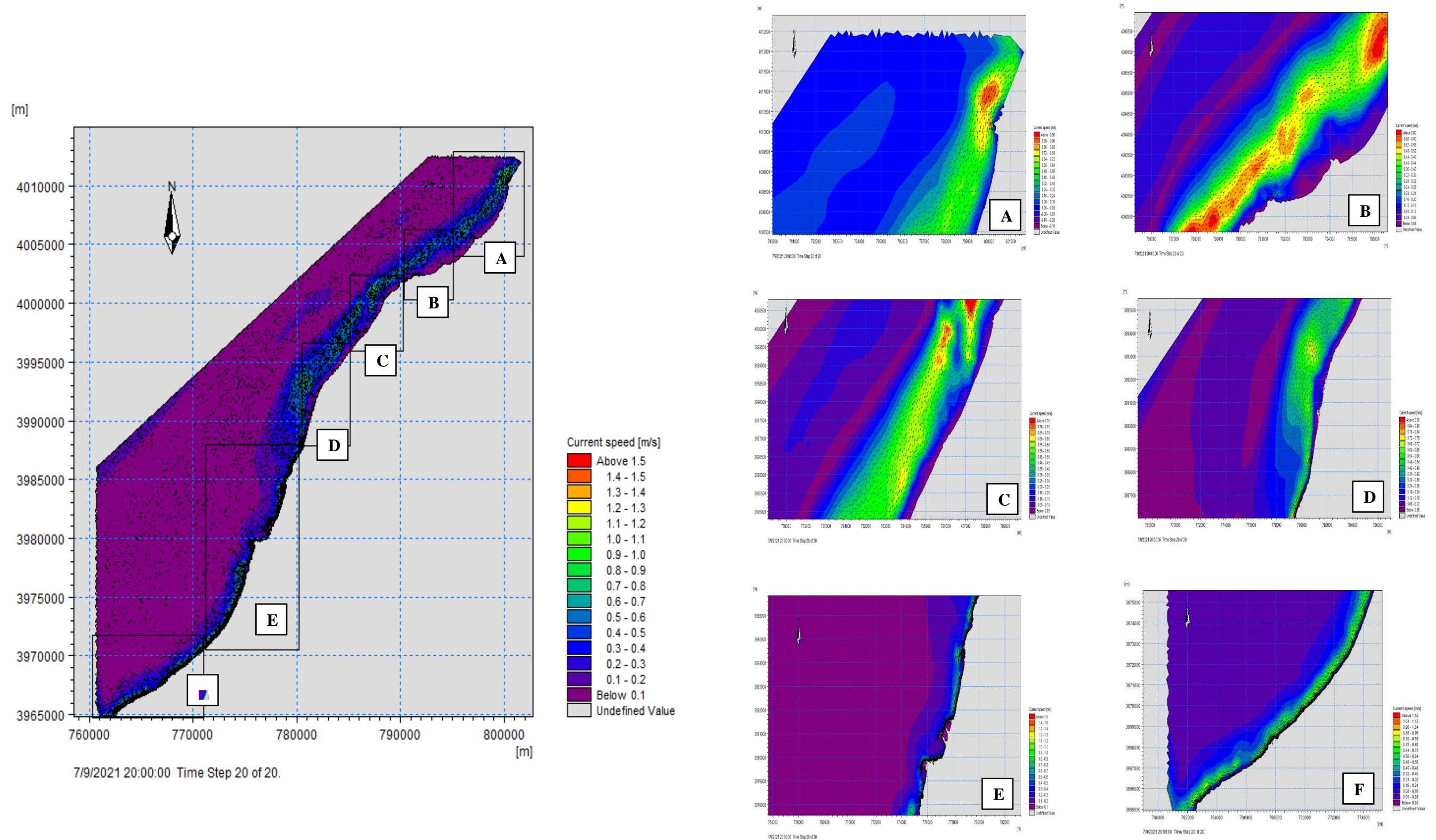


Figure III-8 : Le champ du courant engendré par les houles de direction Nord

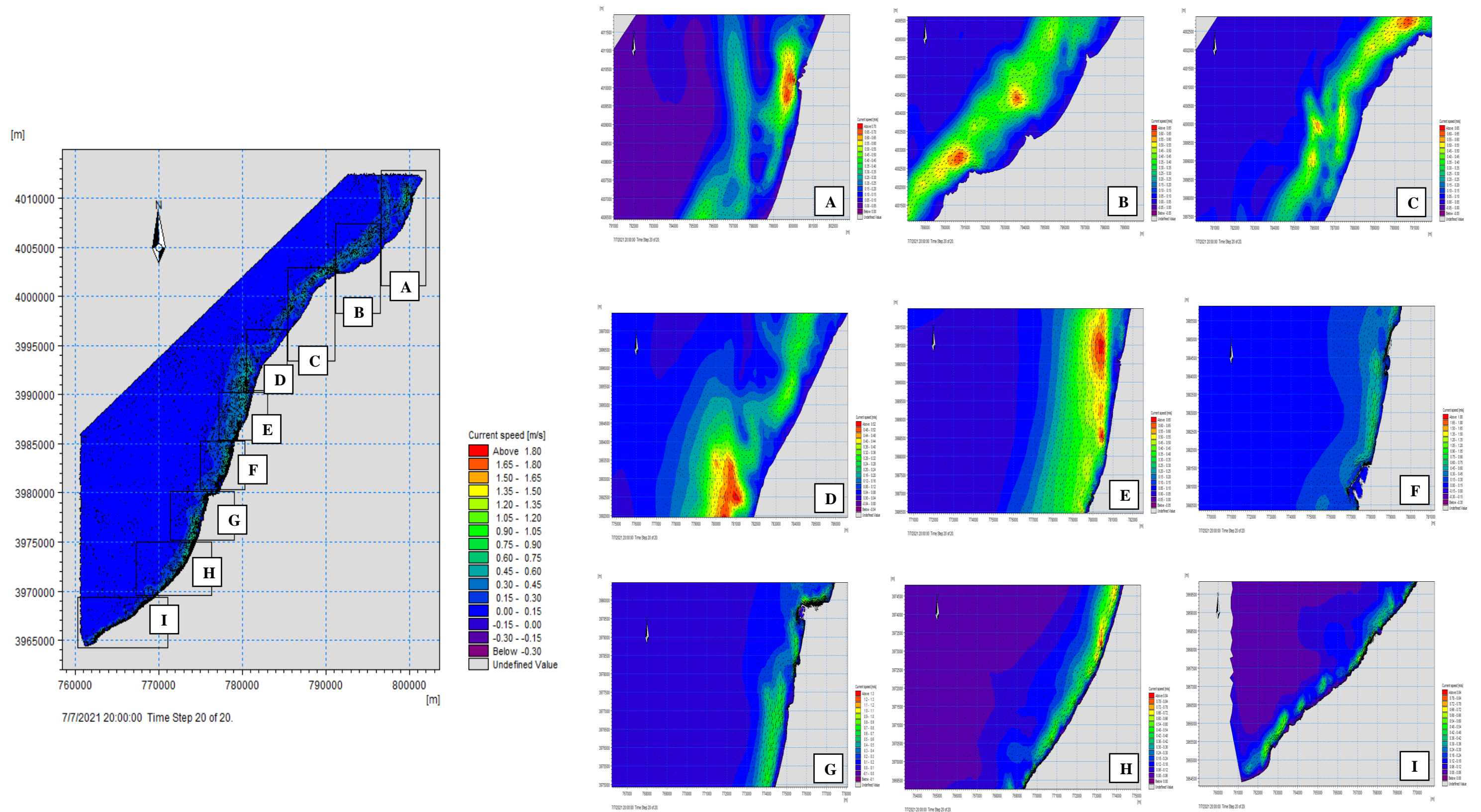


Figure III-9 : Le champ du courant engendré par les houles de direction Nord-Ouest

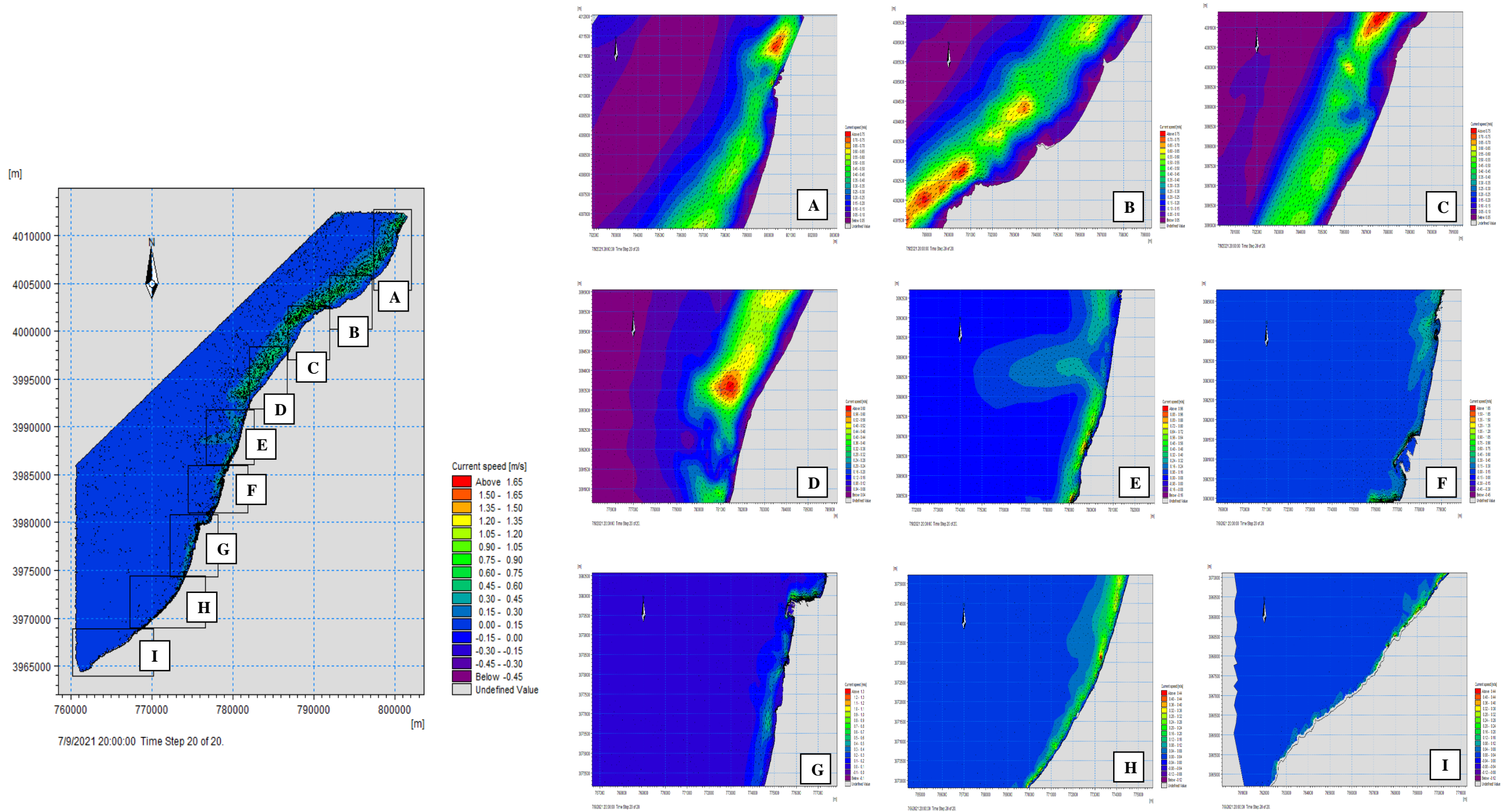


Figure III-10 : Le champ du courant engendré par les houles de direction Ouest

7. Modélisation du transport sédimentaire sous l'effet de houle et de courant

Sous l'action combinée des courants et des vagues, le module Mike 21 ST calcule les taux de transport de sédiments non cohésifs. Les courants qui transportent les sédiments sont causés par les vents, les vagues ou une combinaison des deux. L'effet des vagues déferlantes et non déferlantes est inclus dans le calcul des taux de transport. Les taux de transport de sédiments sont calculés à partir de données bathymétriques, des profondeurs instantanées de l'eau, les tailles sédiments et les variations spatio-temporelles des courants et des vagues dans la région étudiée. (Koutitonsky V, 2005).

7.1. Présentation et interprétation des résultats de ST

De façon générale dans la zone d'étude de Mostaganem (figures- III-11 -12-13), les houles prévenant de secteur Ouest, engendrent une dérive littorale s'orientent de l'Ouest vers l'Est, les houles de secteur Nord-Ouest engendrent une dérive se dirige d'Ouest vers l'Est, néanmoins les houles de secteur Nord engendrent un transport sédimentaire qui converge vers les deux directions selon la morphologie de la zone au voisinage de la côte.

La Figure III-11 - représente le transport sédimentaire induit par la houle du secteur Nord 360° et d'une période de $T=8s$. D'après la carte, Les flux sédimentaire sont d'ordre de $0.00018 \text{ m}^3 /s/ \text{ m}$ à $0.000084 \text{ m}^3 /s/ \text{ m}$.

On observe un taux de transport sédimentaire très fort vers le large au niveau du cap IVI de l'ordre $2\,649,02 \text{ m}^3 /an/ \text{ m}$, un taux moyen de l'ordre $1\,324,51 \text{ m}^3 /an/ \text{ m}$ vers le large, ainsi qu'un taux moins important au niveau de la plage Est de l'ordre $756,86 \text{ m}^3 /an/ \text{ m}$ vers le large et un taux de $946,04 \text{ m}^3 /an/ \text{ m}$ au niveau de Oued de Chlef.

La Figure III-12- représente le transport sédimentaire induit par la houle du secteur Nord -ouest 315° et d'une période de $T=8s$. D'après la carte, Les flux sédimentaire sont d'ordre de $0.000008 \text{ m}^3 /s/ \text{ m}$ à $0.000096 \text{ m}^3 /s/ \text{ m}$.

On observe un taux de transport sédimentaire très fort vers le large au niveau du cap IVI de l'ordre $3\,027,46 \text{ m}^3 /an/ \text{ m}$, un taux moyen de l'ordre $1\,513,73 \text{ m}^3 /an/ \text{ m}$ vers le large, ainsi qu'un taux moins important au niveau de la plage Est de l'ordre $756,86 \text{ m}^3 /an/ \text{ m}$ vers le large.

La quantité et la direction du flux sédimentaire sont proportionnelles avec la vitesse et la direction des courants, c'est pour ça on a enregistré un transport de sédiment très important de la cote vers le large au niveau du cap IVI due essentiellement aux courants de dérive et un transport faible de la plage ouest vers le large lié possiblement à la nappe de retrait.

La pente peut contrôler le transport sédimentaire, dans un fond avec une pente forte le transport sédimentaire est plus fort que celui dans un fond avec une pente douce, c'est pour ça on enregistra au niveau du cap IVI un transport sédimentaire plus important que celui au niveau de la plage Ouest pour une même vitesse du courant.

La Figure III-13 - représente le transport sédimentaire induit par la houle du secteur -ouest 270° et d'une période de $T=8s$. D'après la carte, Les flux sédimentaire sont d'ordre de $0.000005 \text{ m}^3 /s/ \text{ m}$ à $0.00007\text{m}^3 /s/ \text{ m}$.

On observe un taux de transport sédimentaire très fort du cap IVI vers le large d'environ $2049.84 \text{ m}^3 /\text{an}/ \text{ m}$. et un taux moyen de l'ordre $1\ 103,76 \text{ m}^3/\text{an}/ \text{ m}$ de la plage -Est. La quantité et la direction du flux sédimentaire sont proportionnelles avec la vitesse et la direction des courants, dans ce cas, on a enregistré des flux de transport sédimentaire très importants vers la cote et des flux moyens de la cote vers le large due essentiellement aux courants de dérive et de retour.

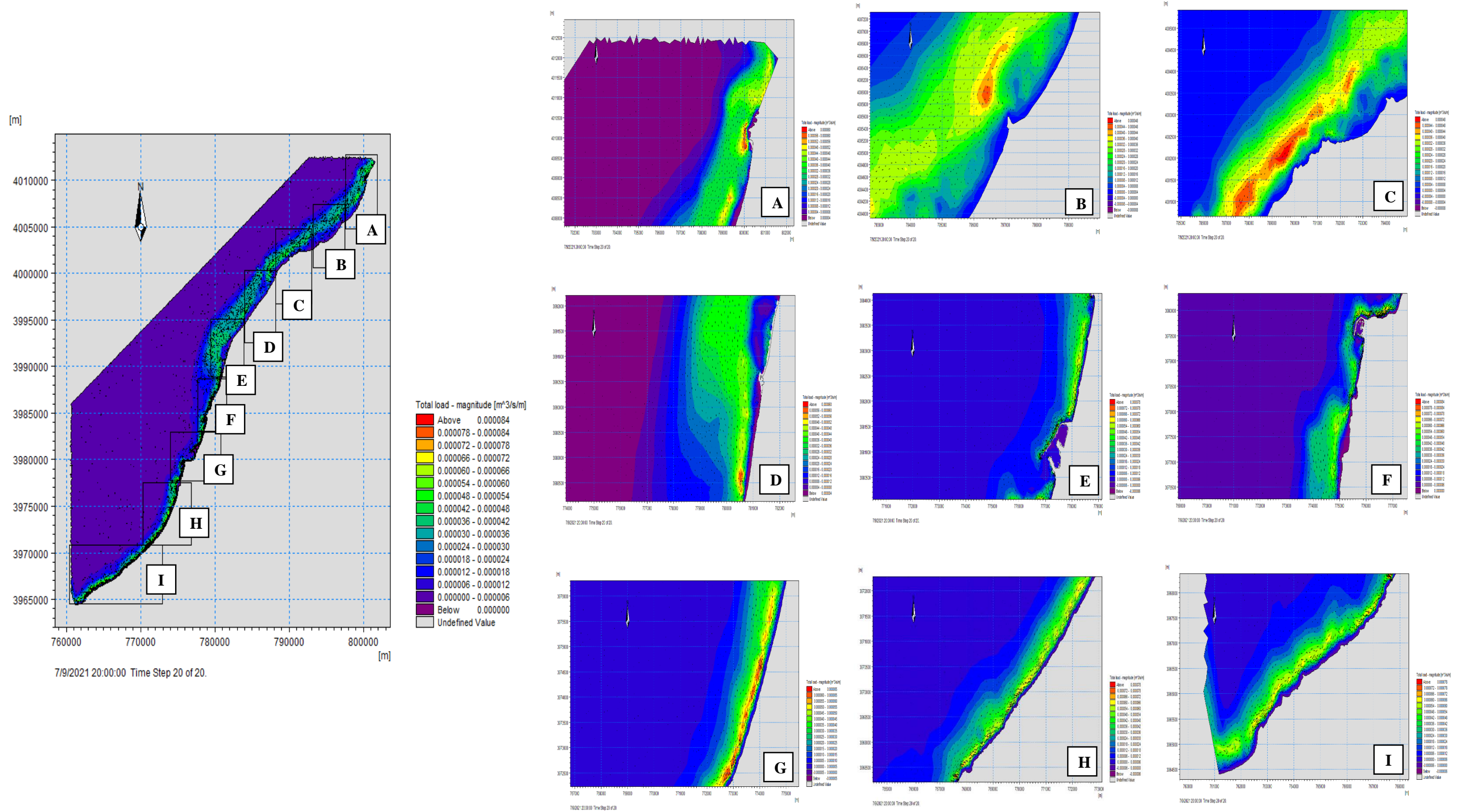


Figure III-11 : Le transport sédimentaire engendré par les houles de direction Nord

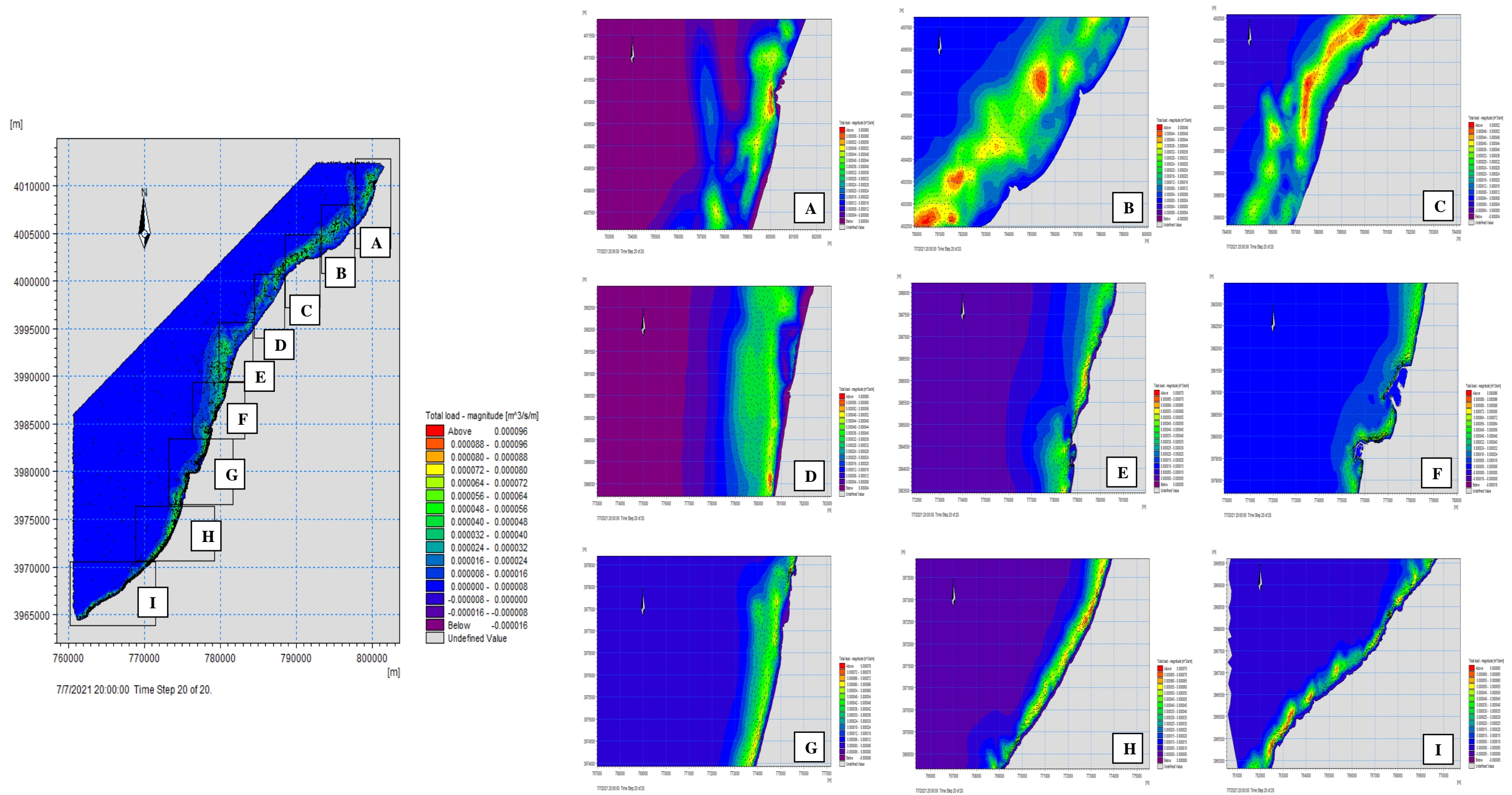


Figure III-12 : Le transport sédimentaire engendré par les houles de direction Nord-Ouest

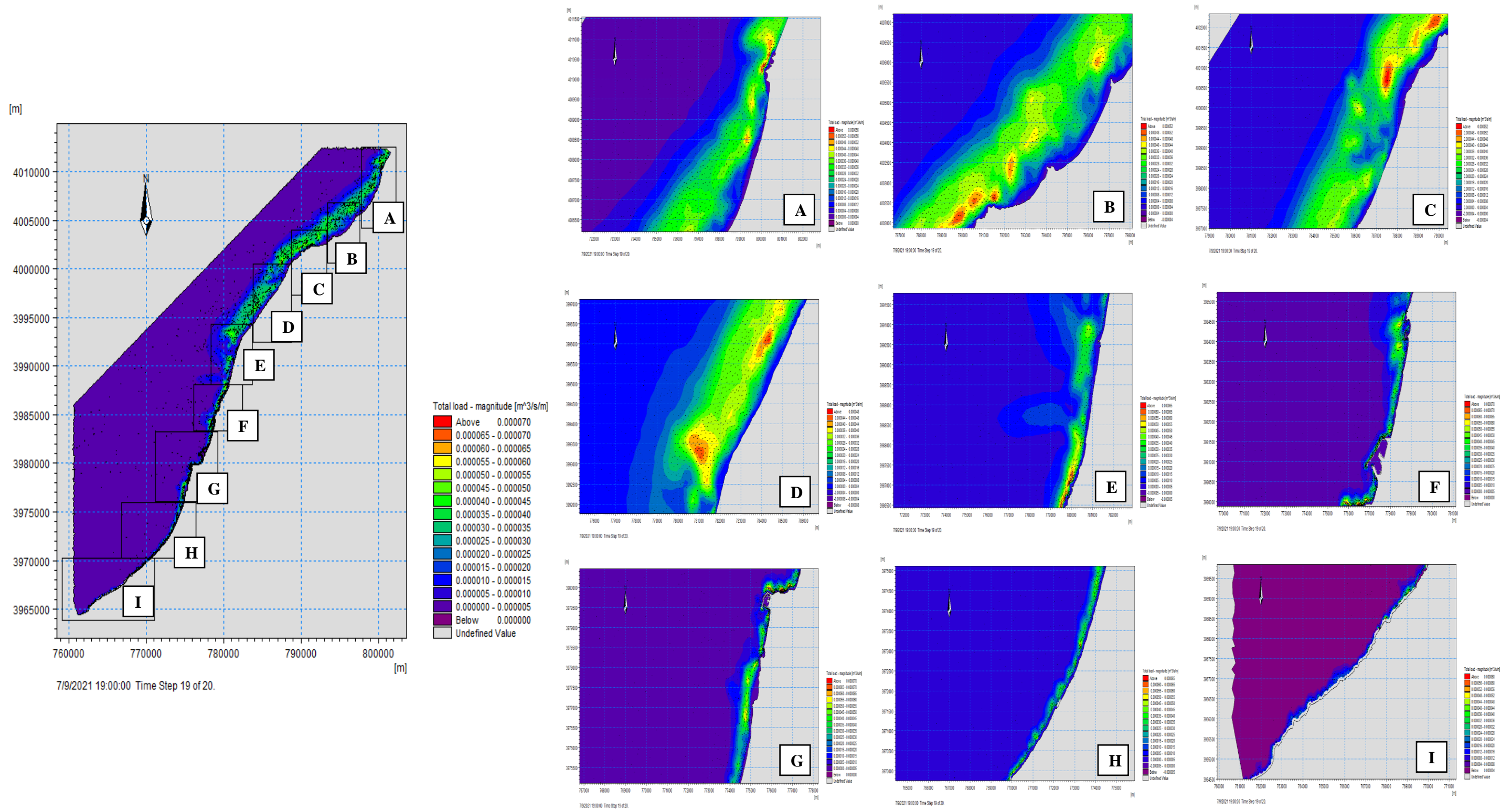


Figure III-13 : Le transport sédimentaire engendré par les houles de direction Ouest

8. Conclusion :

Le modèle numérique Mike 21 nous a permis de calculer et de modéliser les phénomènes hydrodynamiques et hydro sédimentaire.

D'après les résultats de simulation nous avons pu analyser le comportement de ces phénomènes sur la côte et sa propagation avec tous les processus de transformation qui surviennent lors de cette dernière cette analyse :

- Les houles les plus énergétiques sont celles de secteur Nord-Ouest (315°).
- Les courants engendrés par les houles les plus énergétiques de secteur Nord-Ouest (315°) sont des courants de dérive littoral qui conduisent à un transit sédimentaire vers l'Est, mais concernant la partie (les ouvrages des protections port de Mostaganem et port de Salamandre et épi en T) le transport se dirige vers le large, ce qui signifie que notre zone subit une érosion.

Le vent est la force motrice des houles et les différents courants générés avec leurs vitesses et directions contrôlent le flux du transport sédimentaire (quantité et direction).

- Les courants de dérive littorale et de retour sont les responsables du transport des grandes quantités de sédiment.
- La nature, la forme des sédiments et la pente jouent un rôle efficace sur le transport hydro sédimentaire.

**Chapitre V : Evolution
spatio-temporelle du trait
de côte de la wilaya de
Mostaganem**

1. Introduction

L'érosion du trait de côte est un phénomène naturel ou anthropique, qui affecte de nombreuses façades maritimes pouvant avoir des effets positifs sur les milieux et les écosystèmes, mais également des effets négatifs présentant ainsi un risque pour les populations.

Pour comprendre la dynamique globale du site, Il est nécessaire d'étudier l'évolution du trait de côte à diverses échelles. Les études de l'évolution côtière examinent et explorent les raisons pour lesquelles la position et la nature du trait de côte se modifient d'un moment à l'autre. En général, il a été constaté que de nombreux littoraux mondiaux sont sous la menace de l'érosion. (**Williams. S, 1990**)

L'objectif principal de ce chapitre tourne autour de la théorie de l'agglomération et du dépôt côtier, ainsi que sur le développement et l'analyse de l'évolution du littoral.

Il est résumé en 2 points essentiels qui sont :

- Un suivi spatio-temporel de l'évolution du trait de côte de la Wilaya de Mostaganem selon la méthode d'analyse diachronique entre 2001 et 2021.
- Calcul du bilan surfacique de la zone d'étude et voir le rythme d'évolution (érosion ou d'accrétion).

2. Méthodologie

Dans le cadre de cette étude, des images satellitaires des années allant de 2001 à 2021 ont été utilisées, leur traitement est fait à l'aide de logiciel de cartographie Arc Gis 10.4 sous le système de projection WGS84 UTM zone30N.

En premier lieu nous avons fait des captures de Google Earth Pro avec un zoom de 475 m et enregistré ces captures avec la résolution maximale. Après, on a géoréférencé les images satellitaires pour créer les 3 cartes de notre zone d'étude. Puis on a digitalisé les trois traits de côte de notre zone d'étude de 2001, 2011 et 2021. Ensuite, nous avons fait la génération du Shoreline composite, Baseline et des transects. Enfin, on a lancé les calculs des paramètres statistiques des vitesses d'érosion (EPR), des taux d'évolution (LRR) et aussi les distances entre la ligne de rivage la plus ancienne (2001) et la plus récente (2021) (NSM) à partir des traits de côtes par l'outil DSAS.

Voici les étapes du déroulement de notre travail (Figure IV.1) :

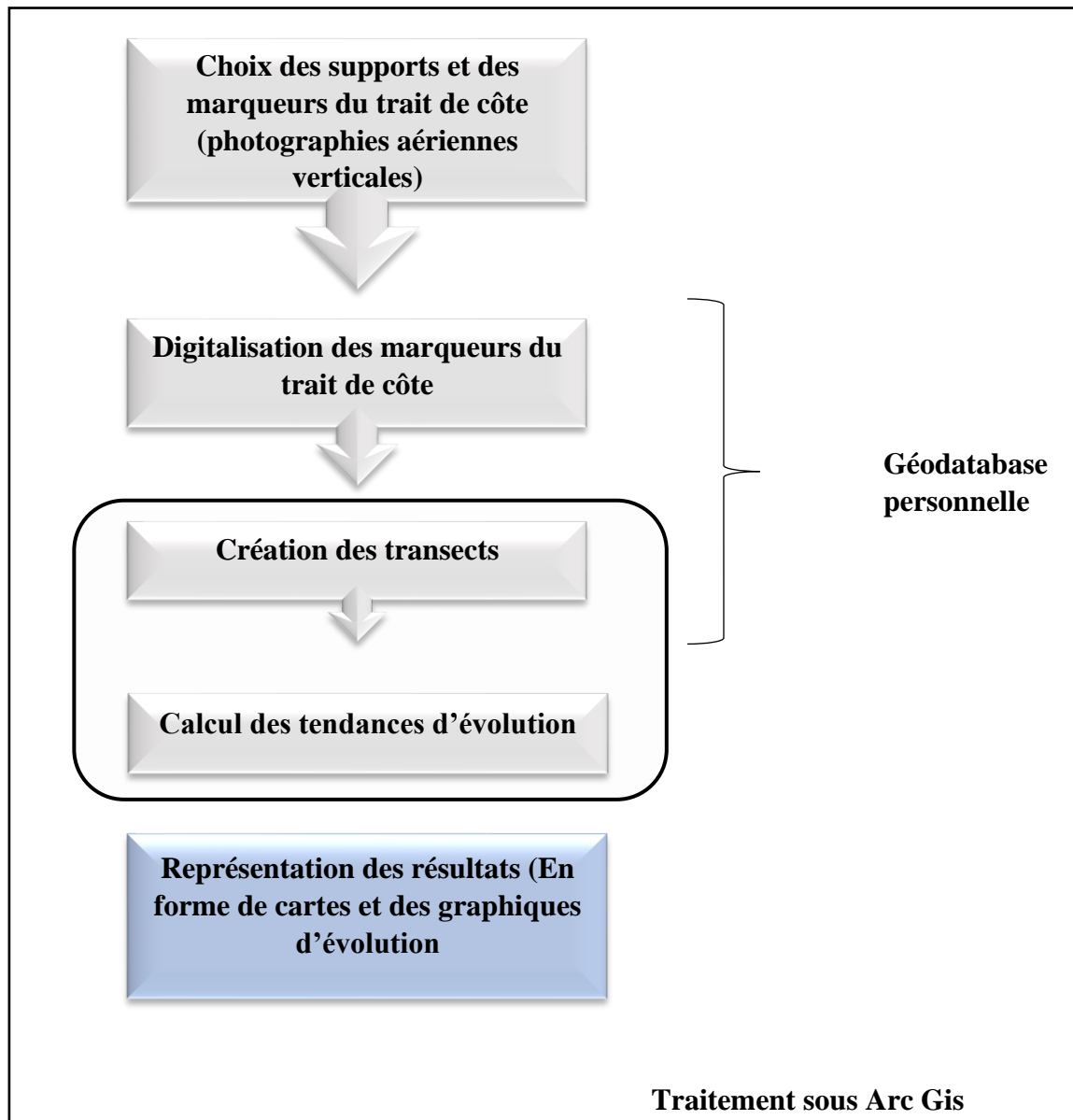


Figure IV-01 : Étapes de la méthodologie de suivi du trait de côte. (Méthodologie - GéoLittoral, 2018; Modifiée par BRAHIMI, 2021)

3. Les logiciels utilisés pour étudier l'évolution du littoral

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé Google Earth Pro pour créer trois cartes avec trois dates différentes et aussi le logiciel « Arc GIS » pour la digitalisation des traits de côte combiné à l'extension « DSAS » (Digital shore line analyses system) pour le calcul de leur évolution afin d'appréhender les phénomènes (l'érosion et l'accumulation) et leur influence sur le littoral de notre zone d'étude.

3.1 Google Earth Pro

Google Earth Pro est un logiciel qui permet de voyager dans le monde via un globe virtuel et d'afficher des images satellites, des plans, des reliefs et des bâtiments 3D. C'est un logiciel qui contient des images de grande résolution de l'ordre de 3m à 5m (SPOT, QUICKBIRD, IKONOS,...). Ces images sont issues d'entreprises de commercialisation d'images et sont archivées sur le serveur de Google Earth Pro qui est accessible par connexion à l'internet. Elles sont mises à jour au fur et à mesure. (Ahfir et Meziane, 2016)

3.2 Aperçu général sur le logiciel ArcGIS Desktop10.4

ArcGIS est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques. En tant que principale plateforme de développement et d'utilisation des systèmes d'informations géographiques (SIG) au monde, ArcGIS est utilisé par des personnes du monde entier pour mettre les connaissances géographiques au service du gouvernement, des entreprises, de la science, de l'éducation et des médias. ArcGIS permet la publication des informations géographiques afin qu'elles puissent être accessibles et utilisables par quiconque. Le système est disponible partout au moyen de navigateurs Web, d'appareils mobiles tels que des smartphones et d'ordinateurs de bureau.(ArcGIS Resource Center,2018)

Le logiciel Arc GIS comprend trois applications principales : ArcCatalog, ArcMap, et ArcToolbox.

- **ArcCatalog** : Est un explorateur de données tabulaires et cartographiques offrant des outils de gestion et d'organisation analogues à ceux offerts par les systèmes d'exploitation comme WINDOWS ou DOS (copier, renommer, effacer, créer des icônes, etc.). Il permet aussi de visualiser les données tabulaires et des couches géographiques ainsi que leur exploration.
- **ArcMap** : Est l'application fondamentale du logiciel Arc GIS. Elle contient une boîte à outils, organisés sous forme de modules indépendants (extensions), permettant de gérer, manipuler, analyser et éditer les différentes couches d'informations de la base de données.
- **ArcToolbox** : Est une boîte à outils permettant d'effectuer des conversions et de transferts de format et aussi de projection (Teffahi, N., 2018).

3.3 Aperçu de l'extension DSAS (Digital Shoreline Analysis System)

DSAS (Digital Shore line Analysis System) est un plugin développé par l'USGS (United States Geological Survey) disponible gratuitement qui fonctionne au sein du logiciel de Système d'information géographique Arc GIS d'ESRI (Environmental Systems Research Institute). Il calcule les statistiques de taux de changement pour une série chronologique de données vectorielles de trait de côte (Figure IV.2). Cet outil a été utilisé dans différentes études de mesure et suivi de la dynamique du trait de côte à travers le monde. (Thieler et Danforth. 1994).



Figure IV.02 : La barre d'outils de l'extension DSAS

Barre d'outils de DSAS :

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

4. Les méthodes statistiques de calcul de la mobilité du trait de côte sous l'extension DSAS

Après avoir préparé les traits de cote sous format vecteur au sein d'une géo-data base personnelle dans ArcCatalog et la création d'une ligne de base "Baseline" on vas créer des transects qui viendront couper les différents traits de cotes par l'utilisation de l'extension DSAS afin de calculer certaine statistique qui vont donner un aperçu approfondi sur l'érosion ou l'accumulation présente dans notre zone d'étude.

4.1 La méthode des points extrêmes (End Point Rate - EPR)

La méthode des points extrêmes n'utilise que deux positions connues de la ligne de référence (la position la plus ancienne et la plus récente).

C'est le rapport de la distance entre le trait de côte le plus ancien et le plus récent sur le temps (nombre d'années) écoulé entre les deux dates.

4.2 La méthode de la régression linéaire (Linear Regression - LRR)

D'après FENSTER et al. (1993), La régression linéaire est la méthode la plus robuste pour estimer les tendances historiques de l'évolution du trait de côte et c'est la méthode qui traduit également le taux d'évolution annuelle de la ligne de référence le long de chaque transect, est intéressant si l'on analyse la cinématique littorale pour plus de deux dates, car la méthode de calcul tient compte de la tendance évolutive du trait de côte sur toute la période considérée.

4.3 La méthode de la Mouvement de rivage net (Net Shoreline Movement NSM)

Le mouvement du littoral net indique une distance et non un taux. Le NSM est associé aux dates de seulement de deux rivages. Elle indique la distance entre les traits de côte les plus anciens et les plus récents pour chaque transect.

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).

Pour cette étude on a utilisé un espacement de 20 m entre les transects de 500 m de longueur pour obtenir transects le long de la cote de Mostaganem (environ 85 km de linéaire côtier).

5. Interprétation des résultats

L'analyse des données a permis de définir la cinématique du trait de côte de l'ensemble de la grande Baie avec une marge d'erreur estimée par +/- 4 m liée principalement à la résolution des images satellitaires utilisé dans ce traitement et aussi le traitement lui-même.

5.1 La cinématique du trait de côte

Pour bien comprendre la dynamique de ces différents rivages selon l'échelle spatio-temporelle, on a projeté les résultats statistiques des indicateurs EPR, NSM et LPR, afin d'élaborer des cartes d'évolution représentatives de cette tendance selon les périodes suivantes :

➤ Evolution du rivage entre 2001 et 2011

Au cours de cette période, le trait de côte affiche une Progression de la ligne de rivage par accumulation des sédiments dans la majorité de la zone d'étude entre Ras Sidi Mansour et Kef El Asfer avec une vitesse d'accumulation moyenne de l'ordre de 1,64 m/an (Forte accrétion) (Tableau IV-01).

La zone de Anse des pirates qui se trouve après l'ouvrage de protection (épée en T) et le rivage du secteur des deux port de Mostaganem entre les transect (673 à 715) ainsi que les transect entre (781 à 842) marque une accumulation avec des taux d'EPR qui varient respectivement entre 3,15 m/an et 3,65 m/an ; et entre 3,8 m/an et 9,79 m/an soit des distances entre 31,45 m et 36,47 m ; et 38,02 m et 97,88m avec un maximum d'accrétion enregistré au niveau du transect 717 de l'ordre de 17,50 m/an. Cette accumulation et peut être expliqué par les ouvrages de protection qui renverser les tendances régionales à l'érosion.

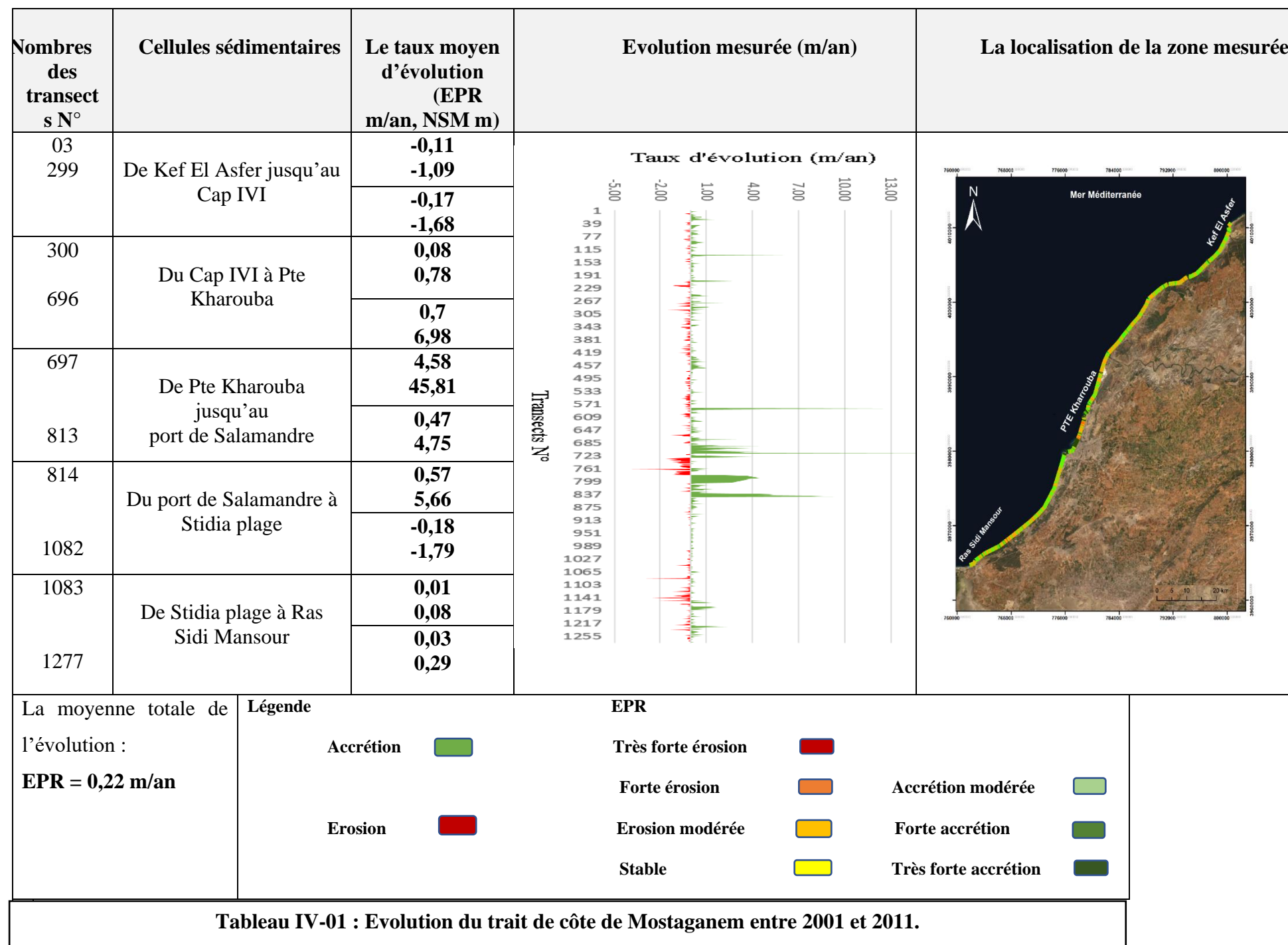
Cependant la région après le port du Salamandre et avant l'ouvrage de protection (épée en T) (du transect 730 à 780) On enregistre un recul du trait de côte (Érosion modérée) avec des taux d'EPR respectivement -0.19 m/an et -0,50 m/an soit des distances de -1,86 m et -5,05 m et une moyenne de l'ordre de -6.37 m/an. Cette érosion et peut être expliqué par l'élévation du niveau de la mer, les tempêtes, ainsi que les courants, les houles et les vents.

Evolution spatio-temporelle du trait de côte de la wilaya de Mostaganem

Les plages sableuses qui se trouve dans le rivage du secteur PTE Kharrouba entre les transects (470 à 581) marque une stabilité du trait de côte avec des valeurs d'EPR oscillent respectivement entre 0,06 m/an et -0,01 m/an soit des distances 0,58 m et 0,56 m.

Le rivage situé après Stidia plage entre les transects (898 et 1043) et aussi relativement stable avec des valeurs d'EPR oscillent respectivement entre -0,02 m/an et 0,01 m/an soit des distances 0,58 m et 0,56 m.

Cette stabilité du trait de côte est peut-être expliquée par les transects qui présentent une forte disparité spatiale avec une succession de zones en érosion et en accumulation qui fait que, sur l'ensemble de cette zone, l'évolution est faible voire nulle.



➤ Evolution du rivage entre 2011 et 2021

Durant cette période notre zone d'étude a subi une érosion plus ou moins importante surtout à l'est de son rivage avec une vitesse de recul moyenne de -0.49 m/an (Tableau IV-02).

Le secteur Est entre Kef El Asfer et Kef El Eurcher (transect 17 à 424) marque une forte érosion avec un taux d'EPR respectivement varie entre $-1,12$ m/an et $-1,05$ m/an soit des distances entre $-11,17$ m et -10.47 m. Cependant une région de la plage qui se trouve près de Kef El Asfer (transects 46 à 58) enregistre une très forte avancée du trait de côte de l'ordre de plus de $19,25$ m avec un maximum au niveau du transect 58. Cette avancée est expliquée par la présence des rochers qui se trouve dans Kef El Asfer près de cette plage ce qui favorisent l'accumulation dans la plage.

Le reste de notre zone d'étude (transect 425 à 1265) est marqué par une phase relativement stable toute au long de la cote avec un taux d'EPR qui varie entre $-0,02$ m/an soit une distance de $-0,18$ m et $0,03$ m/an soit une distance de $0,26$ m. Cette stabilité du trait de côte est peut-être expliquée par les transects qui présentent une forte disparité spatiale avec une succession de zones en érosion et en accumulation qui fait que, sur l'ensemble de cette zone, l'évolution est faible voire nulle.

Dans la zone de PTE Kharouba, après l'ouvrage de protection (transect 588 à 681) et marqué par une phase d'accrétion et une autre d'érosion. Une accrétion (transect 588 à 631) avec un taux d'EPR qui varie entre $2,75$ m/an soit une distance de $27,54$ m et $0,58$ m/an soit une distance de $5,77$ m. Une d'érosion (transect 633 à 681) avec un taux d'EPR qui varie entre $-0,41$ m/an soit une distance de $-4,05$ m et $-1,07$ m/an soit une distance de $-10,71$

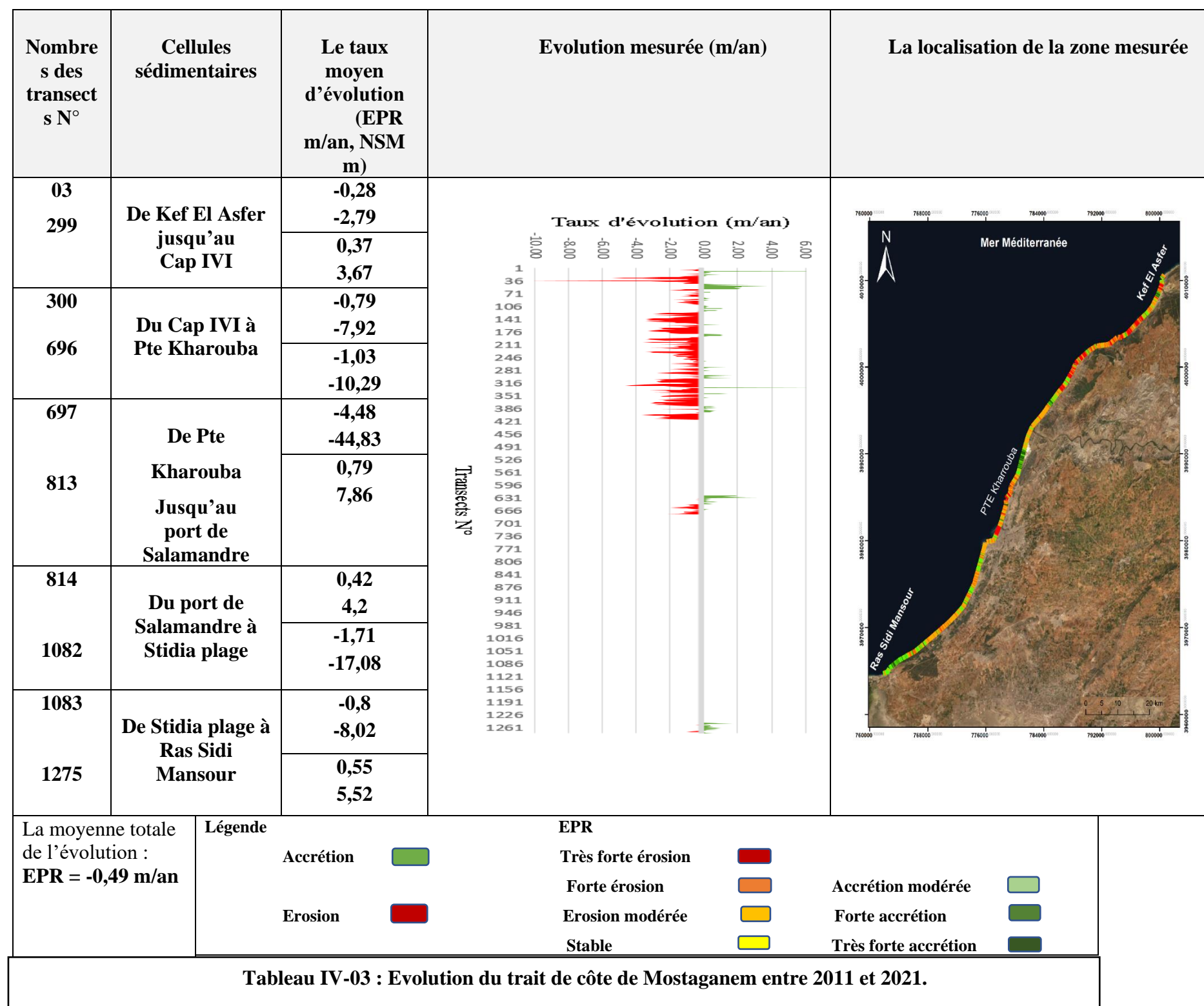


Tableau IV-03 : Evolution du trait de côte de Mostaganem entre 2011 et 2021.

➤ Evolution de la ligne de rivage de notre zone d'étude entre 2001 et 2021

Les changements de la ligne de rivage de notre zone d'étude (Ras Sidi Mansour – Kef El Asfer) sur une période mi séculaire (2001-2021) sont étudiés à partir des résultats des deux paramètres : Net Shoreline mouvement (NSM) et End point rate (EPR), ces résultats montrent une position du rivage qui varie entre phase de recul et d'autre d'avancé selon les secteurs.

Les secteurs stables sont observés majoritairement au niveau des falaises rocheuses (Falaise du Cap IVI, falaise de Kharouba et falaise de Stidia) (Tableau IV-03). Le recul durant cette période est enregistré dans la partie Est dans la plage de la Baie Teddert qui se trouve avant Kef l'Asfer avec un taux d'érosion moyen de -0,49 m/an soit une distance de -9,98 m au niveau des transect (de 59 à 179). Dans la partie Est du rivage entre Kef Bouguetar jusqu'au Cap IVI, le recul du rivage a atteint une moyenne de -0,61 m/an soit une distance moyenne de -12,29 m. Le recul le plus marqué dans cette période est enregistrer aux niveaux du transect 868 dans le rivage près du port de la Salamandre avec un taux d'érosion de -5,49 m/an avec une distance de -109,7 m.

L'avancée la plus marquée du rivage est observée sur la partie des deux ports de Mostaganem notamment la plage de Matarba et au niveau de la zone protégé par l'ouvrage de protection (épée en T) et dans la zone de Stidia plage, le taux d'accrétion maximum atteint 8,84 m/an dans le transect 722 qui se situe dans l'ouvrage de protection (épée en T).

La tendance générale de l'ensemble du littoral de la baie, révèle que durant les 20 ans (2001 à 2021), 66,72% du rivage a connu une érosion soit 56,70 km de linière côtier, 32,34% du rivage a connu une accrétion équivalente à une distance 27,48 km. Les secteurs stables représentent 0,94% soit une distance de 0,8 km de linéaire côtier.

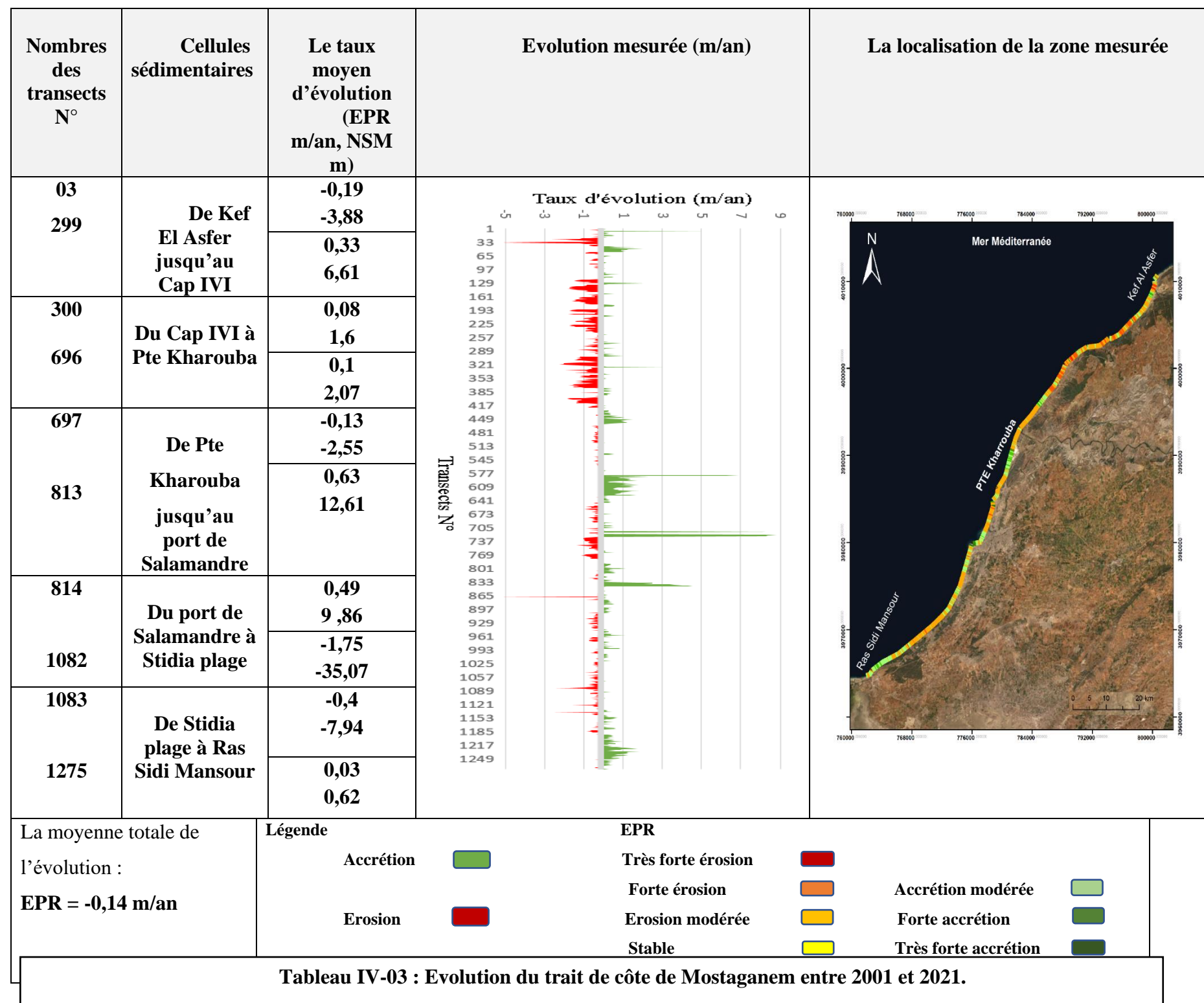


Tableau IV-03 : Evolution du trait de côte de Mostaganem entre 2001 et 2021.

6. Analyse du bilan sédimentaire

Le changement du rivage durant les 20 ans a permis d'estimer les pertes et les gains de sédiments exprimés en unité de surface tout au long de la zone d'étude à partir de la digitalisation des traits de cote.

Les résultats montrent une variabilité spatio-temporelle le long du littoral de la cote de Mostaganem. Les surfaces des plages perdues dominent celles gagnées par accrétion, et le budget sédimentaire global sur les 20 ans est négative (Figure IV.3).

Le bilan total de l'érosion est -47,0303 ha, tandis que le bilan total de l'accumulation est 23,8422 ha (Figure IV.3).

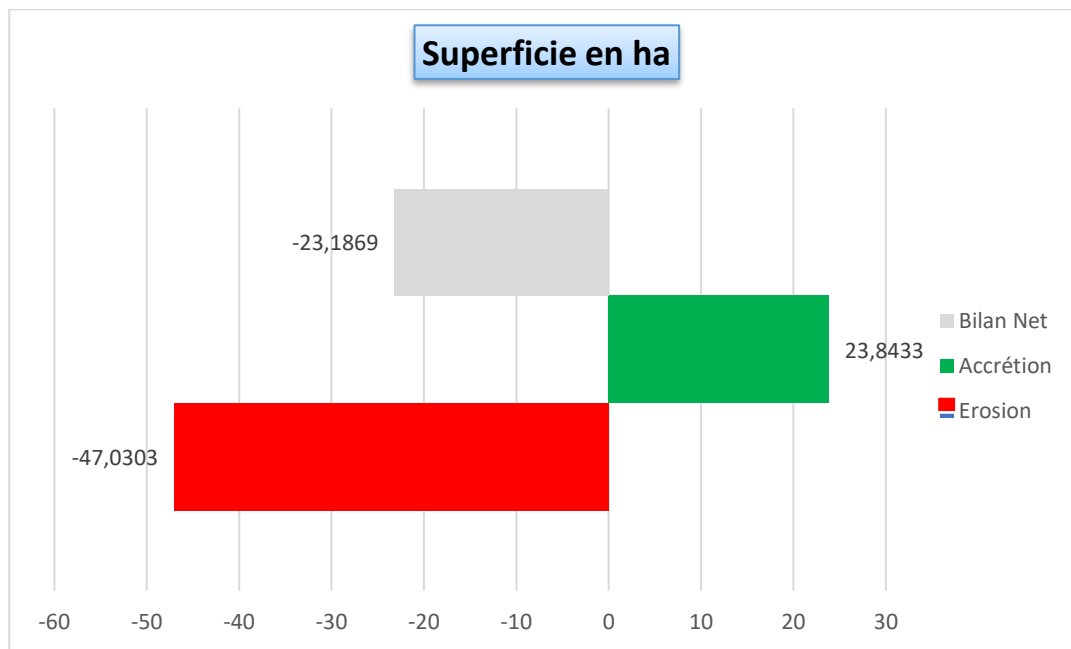


Figure IV-3 : Le bilan sédimentaire de la cote de Mostaganem.

7. Conclusion

L'analyse chronologique des traits de côte dans la wilaya de Mostaganem allant de 2001 à 2021 a permis de déterminer les tendances et changement évolutives du trait de côte qui a connu une érosion plus importante que l'accumulation.

Le littoral de cette zone est en état d'érosion durant cette période de 20 ans, la perte est estimée à -47,0303 ha qui est un volume très important et un pourcentage de 66,35 % de la totalité de la surface d'évolution.

Ce recul de trait de côte est intense dans la partie du rivage entre Kef Bouguetar jusqu'au pré du cap IVI ainsi que dans la partie Est le long de la plage sableuse qui se trouve avant Kef l Asfer, l'accumulation et présente dans les deux ports ainsi que dans la zone où se trouve l'ouvrage de protection (épée en T).

Evolution spatio-temporelle du trait de côte de la wilaya de Mostaganem

Ces modification du trait de côte sont des conséquences au causes naturelles comme la forme et nature du substrat, l'hydrodynamisme et il y a aussi l'activité anthropique comme l'urbanisation, la construction des ouvrages de protection.

Chapitre V : Submersion marine

1. Introduction

La submersion marine est une inondation temporaire de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques et marégraphiques sévères (**Meedat, 1997**).

Les submersions marines représentent un risque majeur, susceptible d'augmenter (**Nicholls et Cazenave, 2010**) en fonction de l'élévation attendue du niveau de la mer (**GIEC, 2014**), de l'évolution démographique en zones littorales et de la concentration des enjeux dans ces mêmes zones (**Meur-Ferec et al. 2008**).

1.1 La submersion marine

« Le phénomène de submersion marine se définit par une inondation temporaire des terres par la mer dans des conditions météorologiques et marégraphiques intenses » (**Nicholls et Cazenave, 2010**). Ce phénomène est lié à une élévation temporaire du niveau de la mer qui peut avoir une origine géologique ou météorologique. Dans le premier cas, l'élévation est générée par un tsunami ayant pour origine un tremblement de terre sous-marin, une éruption volcanique ou un glissement de terrain. Dans le second cas, elle est la conséquence d'une surcote liée au passage d'un cyclone tropical ou à une tempête dans les latitudes moyennes. Dans ce travail de thèse, nous nous intéressons aux submersions marines générées par des facteurs météorologiques.

Les submersions 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 (Figure V-1) (**BRGM,2012**).

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 ;
- ✓ Franchissements exceptionnels de ces ouvrages par des « paquets de mer ».

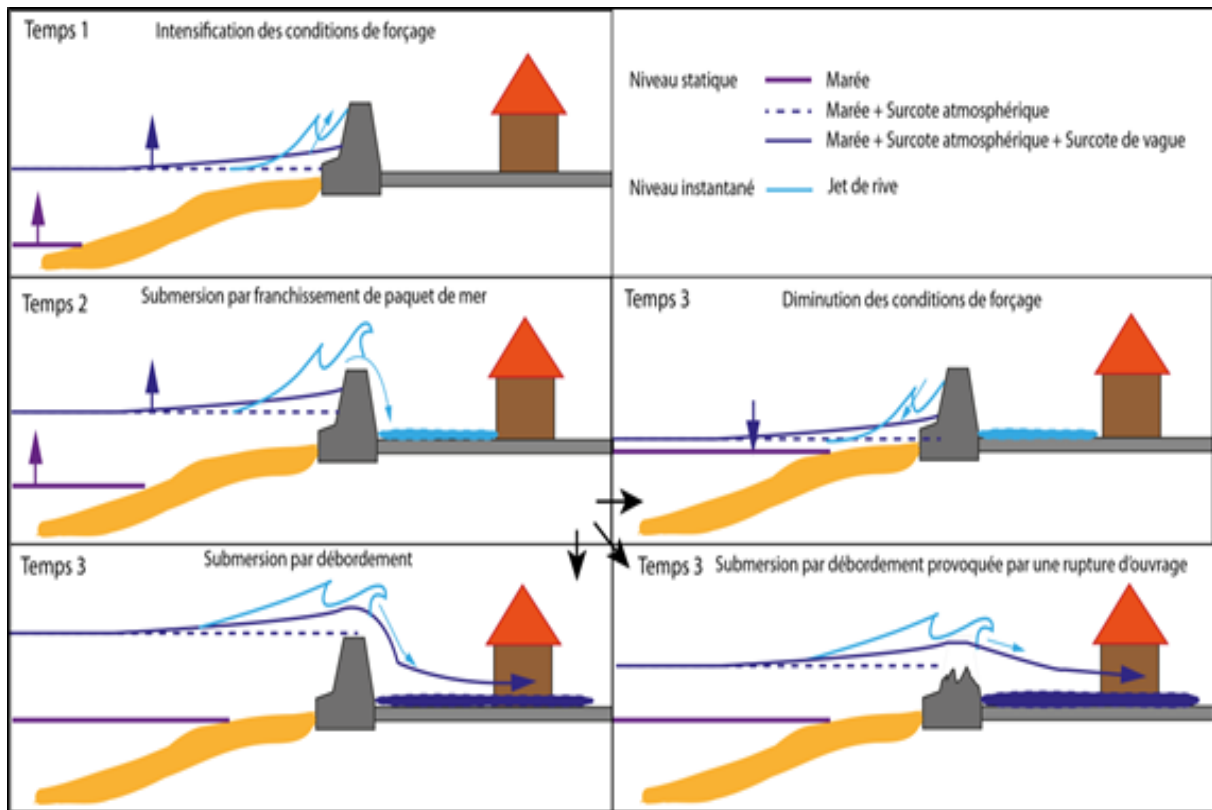


Figure V-1 : Typologie des submersions marines (franchissement, débordement, rupture d'ouvrage). (BRGM and Cachan, 2012).

1.2 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.

1.2.1 La surcotes marines

Correspondent à une surélévation momentanée du plan d'eau par rapport au niveau moyen. Elles ont lieu lors des tempêtes ou des cyclones sous l'action du vent, de la pression atmosphérique et de la houle. (BRGM, 2012).

1.2.2 La surcote atmosphérique

Une élévation supplémentaire du niveau de la mer par rapport à son niveau prévu en raison de la diminution de la pression atmosphérique. Généralement, ce phénomène est combiné à plusieurs autres paramètres dont les conséquences à la côte sont redoutables (houle, vagues et submersions).

En premier lieux la surcote atmosphérique entraine une surélévation du niveau du plan d'eau par la chute de la pression atmosphérique, une diminution de 1h Pa équivaut à une élévation de 1cm du plan d'eau (phénomène de baromètre inverse), ensuite le vent exerce une contrainte à la surface de l'eau en générant une modification du niveau du plan d'eau statique.

1.2.3 La surcote associée à la houle (setup)

L'interaction entre la période de la marée, les vents qui poussent sur la surface de la mer, la pression plus basse, la configuration du fond marin, les effets d'entonnoir des côtes, etc. agissent en synergie. Ils provoquent alors une surélévation du niveau marin sur le trait de côte (**R. Bouligand et M. Tabeaud, 2000**).

À l'approche de la cote, les vagues déferlent elles transfèrent leur énergie sur la colonne d'eau provoquant une élévation moyenne du niveau d'eau (setup). , ce niveau pouvant dans certains cas atteindre plus d'un mètre.

1.2.4 La surcote totale

En pleine mer, les courants de surface ne provoquent pas de surcotes car ils peuvent s'écouler librement à toute profondeur. De même, près des côtes bordées par des eaux profondes, car le surplus d'eau peut être évacué en profondeur par un « contre-courant ». Par contre, les eaux accumulées par les vents contre un littoral bordé d'eaux peu profondes génèrent des surcotes importantes. Donc la surcote totale est fortement dépendante de la bathymétrie du domaine considéré ainsi que la morphologie du fond marin ainsi que la morphologie du littoral elle-même (**Stéphane Buchou, 2019**).

1.3 Niveau marin maximal statique

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 (Figure V-2).

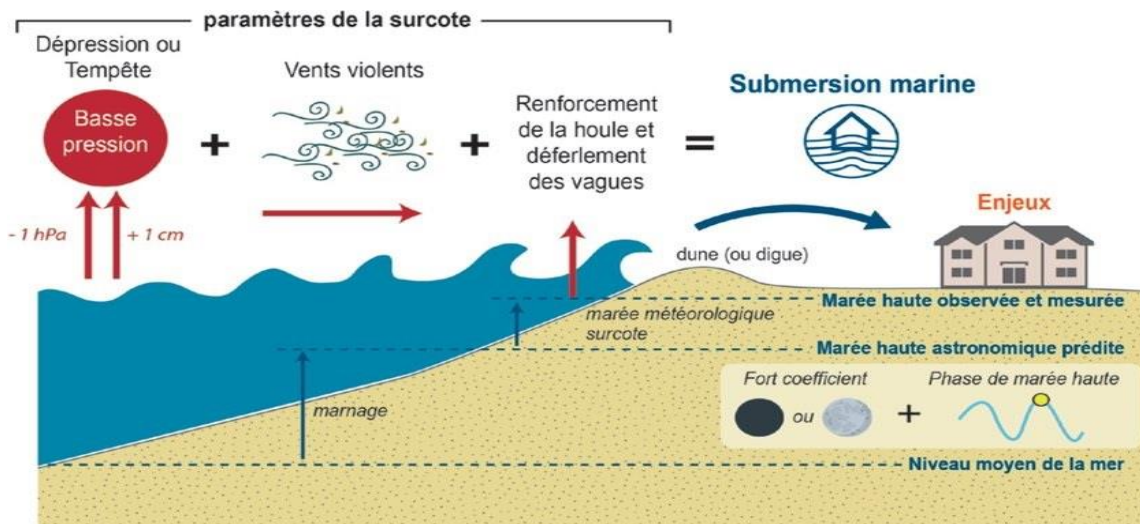


Figure V-2 : Processus physiques en action lors d'une tempête : agitation et surélévation du plan d'eau. (**S. Charrier, P. Pouzet, M. Maanan, 2019**).

2. Méthodologie

Cette étude a pour but de caractériser et cartographier les terres à risque de submersion dans la côte de la zone d'étude, elle est basée sur des scénarios d'élévation du niveau de la mer, modélisée par l'utilisation du logiciel de cartographie « ArcGIS 10.4 » (Figure V-3). La méthode retenue pour l'estimation de l'aléa submersion est celle utilisée par plusieurs auteurs (**Fletcher et al, 1995 ; Benavente et al, 2006 ; Suanez et al, 2007 ; Kumar et al, 2008**).

Cette méthode est basée sur :

- Détermination des niveaux d'inondation extrêmes prenant en compte le « Wave setup Wind set-up et l'élévation du niveau de la mer due à la baisse de la pression atmosphérique ».
- Croisement des niveaux extrêmes avec la topographie de la zone.
- Ensuite, ce niveau d'eau d'inondation est superposé à un modèle numérique de terrain (MNT), dont la plus petite maille est de 10 m de côté et une résolution altimétrique de 5 m, de la zone d'étude en vue de cartographier la zone submersible.

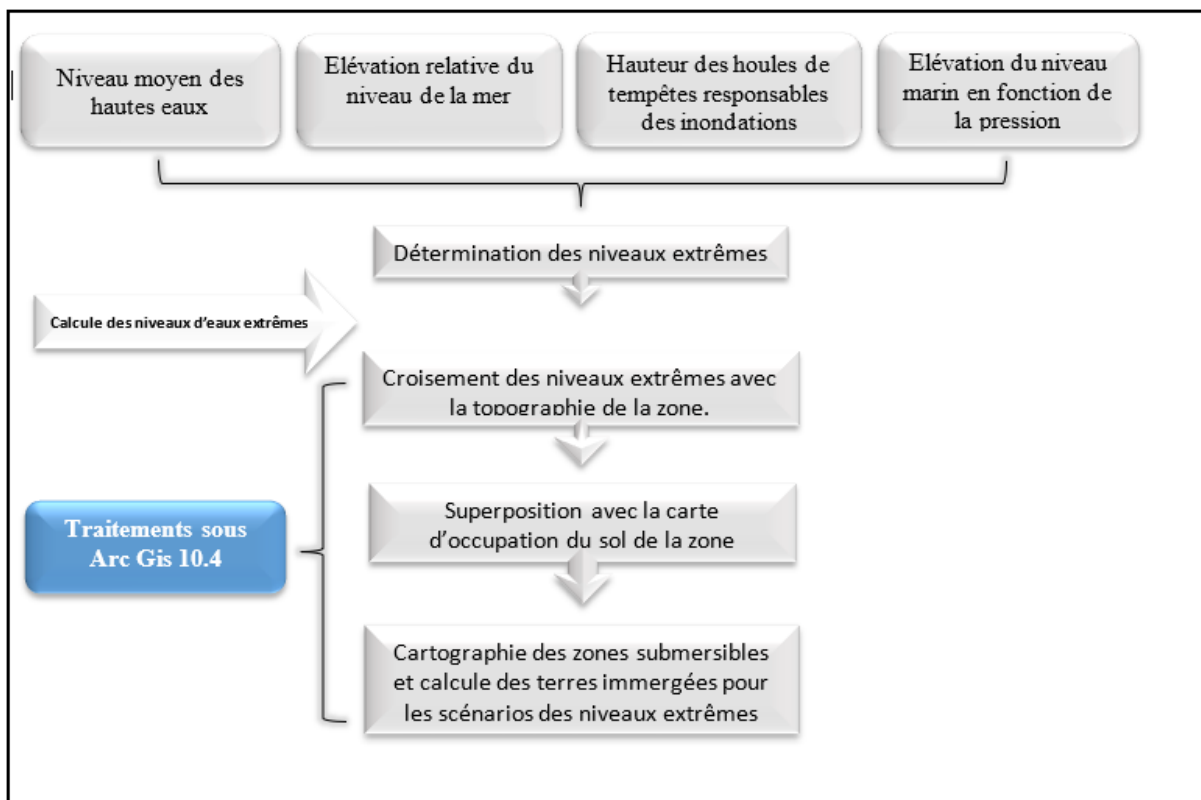


Figure V-3 : Synthèse de la méthodologie adoptée pour la cartographie de l'aléa de submersion marine.

2.1 Scénarios de niveaux d'eau extrêmes

La méthode utilisée pour estimer le niveau d'inondation (D_{ft}) est basée sur l'équation de (HOOZMANS et al., 1993) :

$$D_{ft} = MHW + S_t + W_f + P_f \dots\dots\dots(V-1)$$

Où :

MHW : Niveau moyen des hautes eaux

S_t : Elévation relative du niveau de la mer ;

W_f : Hauteur des houles de tempêtes responsables des inondations ;

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

2.1.1 Hauteur significative au large

Les données utilisées pour cette étude est celle extraites du site web des observations météorologique « <https://waveclimate.com> » couvrant une période de 28 ans allant de 1992 à 2020.

Le traitement des données des houles au large de la zone d'étude nous a permis de faire une classification des fréquences d'apparition annuelles des classes des hauteurs significative par direction afin d'identifier la direction et l'amplitude des houles responsables des inondations côtières.

2.2 Etude des 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).

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 :

$$P = \frac{24}{365 \cdot 24 \cdot R} = \frac{1}{365 \cdot R} \dots\dots\dots(V-2)$$

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 :

$$P = \frac{24}{3 \cdot 365 \cdot 24 \cdot R} = \frac{1}{3 \cdot 365 \cdot R}$$

Submersion Marine

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 :

$$H = B - A \log P \dots\dots\dots (V-3)$$

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.

D'après le tableau ci-dessous (Tableau V-1), les fortes agitations marines proviennent des secteurs N, NW et W avec des amplitudes qui oscillent entre 5.16 m et 9.19 m pour les houles biennale et centennale respectivement.

Les houles les plus faibles proviennent d'Est avec une amplitude minimale biennale de 2.16 m.

Tableau V-1 : Résultats des hauteurs significatives associées aux périodes de retour (m).

La période de retour (an)	N	NE	NW	E	W
Houle annuelle (1 an)	5.44	3.35	5.16	1.99	4.72
Houle biennale (2 ans)	6.00	3.68	5.68	2.16	5.16
Houle Quinquennale (5 ans)	6.75	4.11	6.37	2.39	5.75
Houle Décennale (10 ans)	7.31	4.44	6.90	2.57	6.20
Houle Vingtennale (20 ans)	7.88	4.77	7.42	2.74	6.65
Houle Cinquantennale (50 ans)	8.62	5.20	8.12	2.97	7.24
Houle Centennale (100 ans)	9.19	5.53	8.64	3.14	7.69

La corrélation est une mesure statistique qui exprime la notion de liaison linéaire entre deux variables (Figure V-5 à V-9) (ce qui veut dire qu'elles évoluent ensemble à une vitesse constante).

Submersion Marine

C'est un outil courant permettant de décrire des relations simples sans s'occuper de la cause et de l'effet. (Pierre Mercklé,2010).

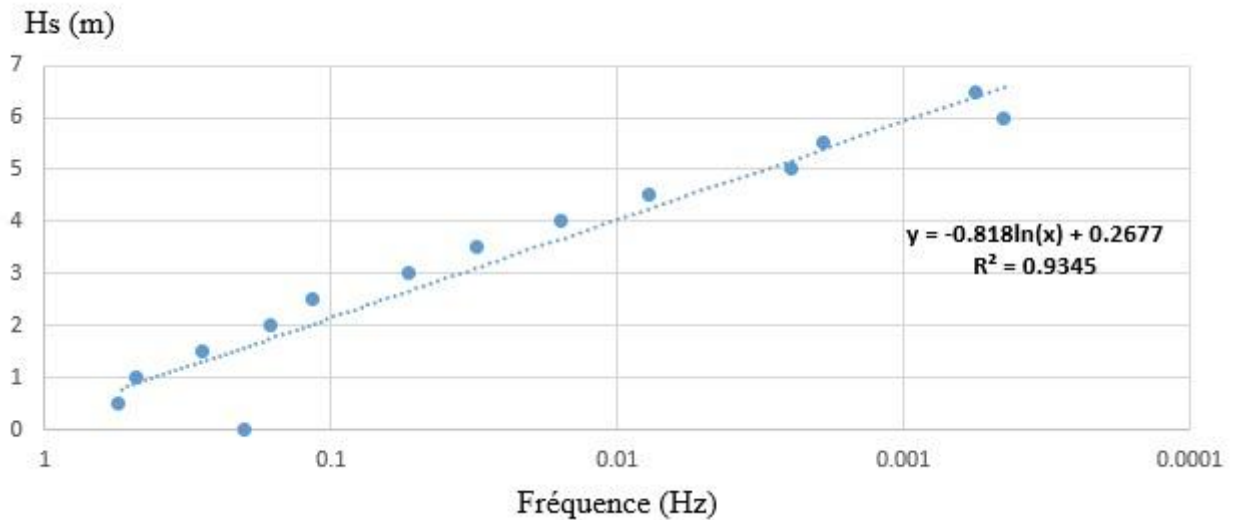


Figure V-5 : Corrélation entre H_s et la fréquence d'apparition des houles de direction N au large de la cote de Mostaganem.

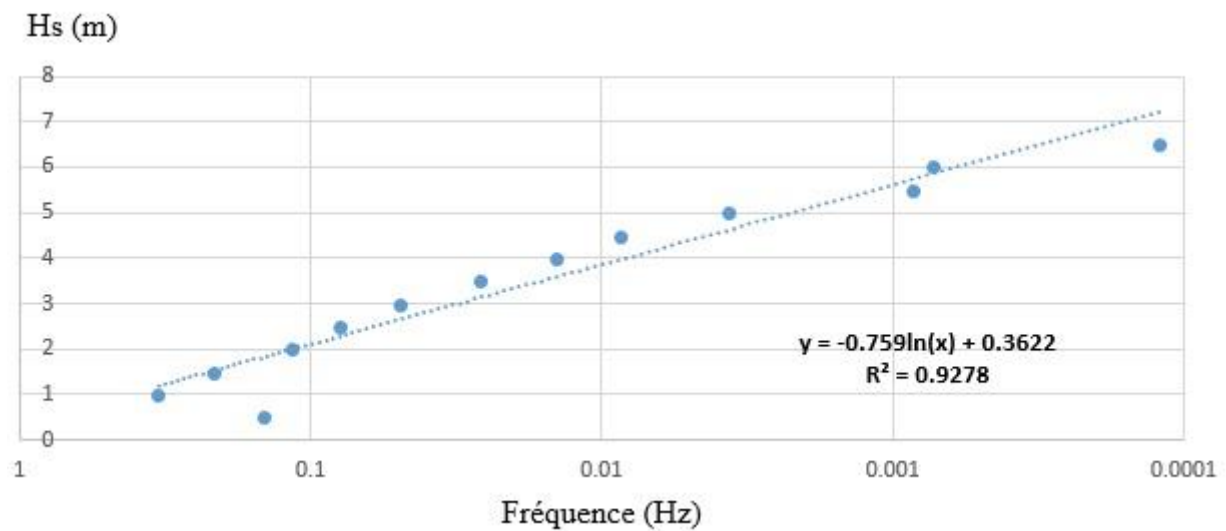


Figure V-6 : Corrélation entre H_s et la fréquence d'apparition des houles de direction NW au large de la cote de Mostaganem.

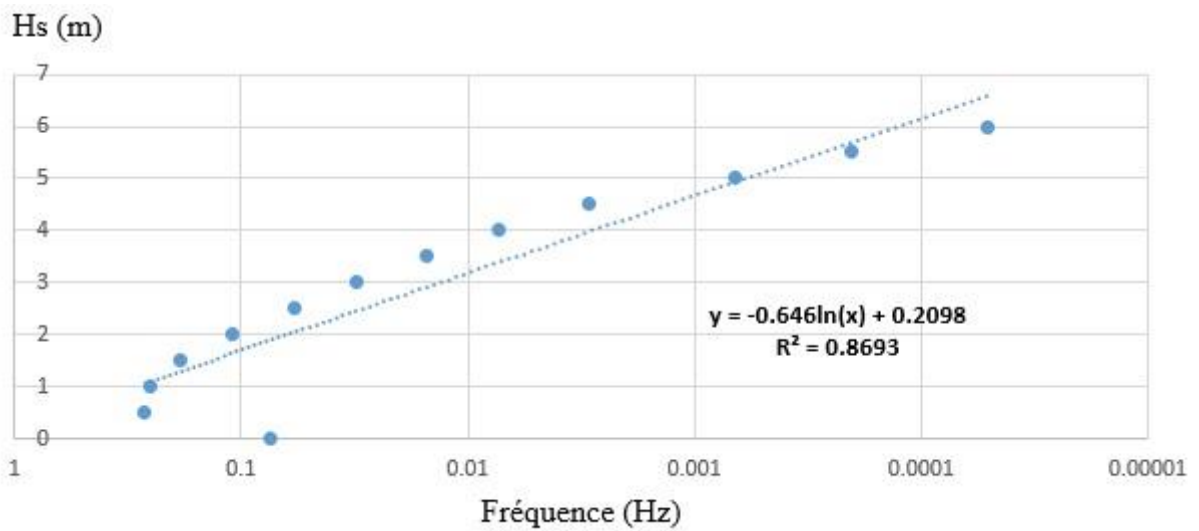


Figure V-7 : Corrélation entre Hs et la fréquence d'apparition des houles de direction W au large de la cote de Mostaganem.

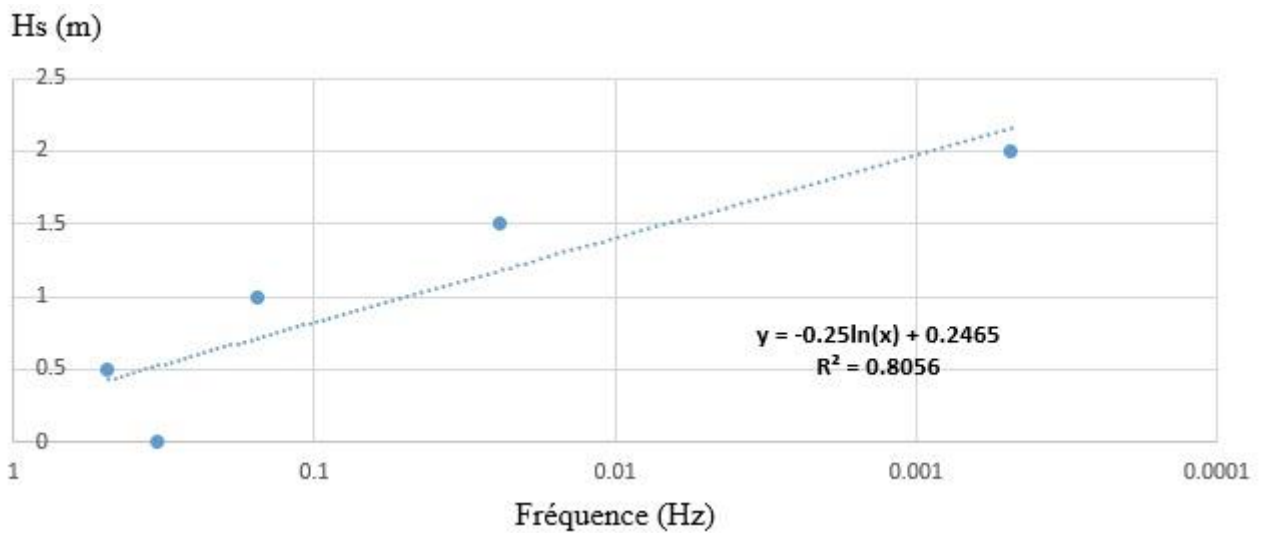


Figure V-8 : Corrélation entre Hs et la fréquence d'apparition des houles de direction E au large de la cote de Mostaganem.

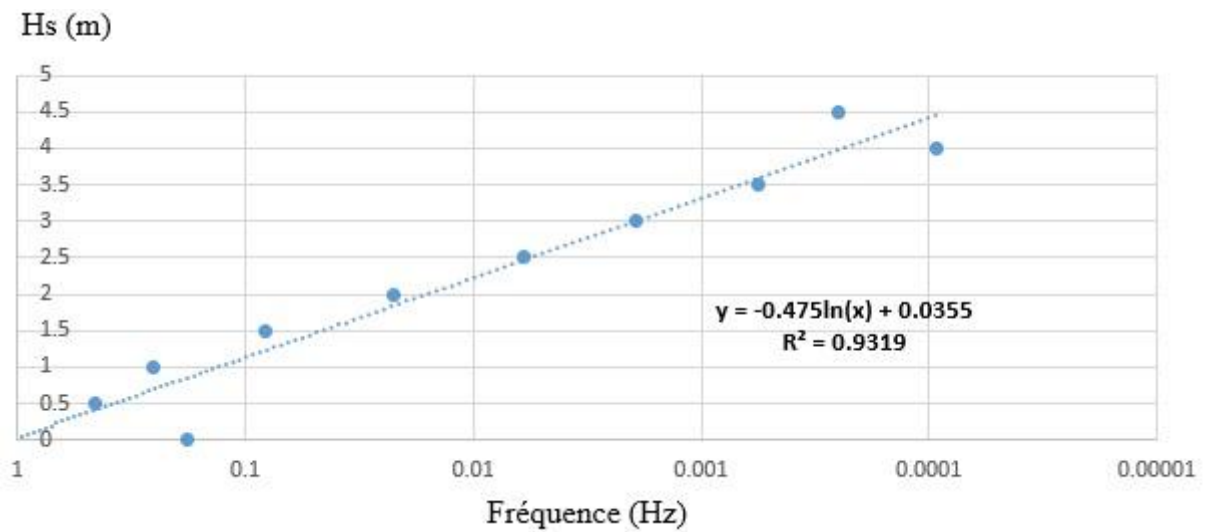


Figure V-9 : Corrélation entre Hs et la fréquence d'apparition des houles de direction NE au large de la cote de Mostaganem.

2.3 Les houles extrêmes à la cote

D'après les résultats de l'étude des houles extrêmes au large, Les résultats de simulation de ces houles sont présentés dans le tableau suivant (Tableau V-2) :

Direction	Nord Ouest
Period de retour (R)	
2 Ans (niveau d'inondation minimal)	1.9m
100 Ans (niveau d'inondation maximal)	3.9m

Tableau V-2 : Les résultats de simulation des houles extrêmes au large.

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 NW comme étant les plus défavorables pour le site d'étude.

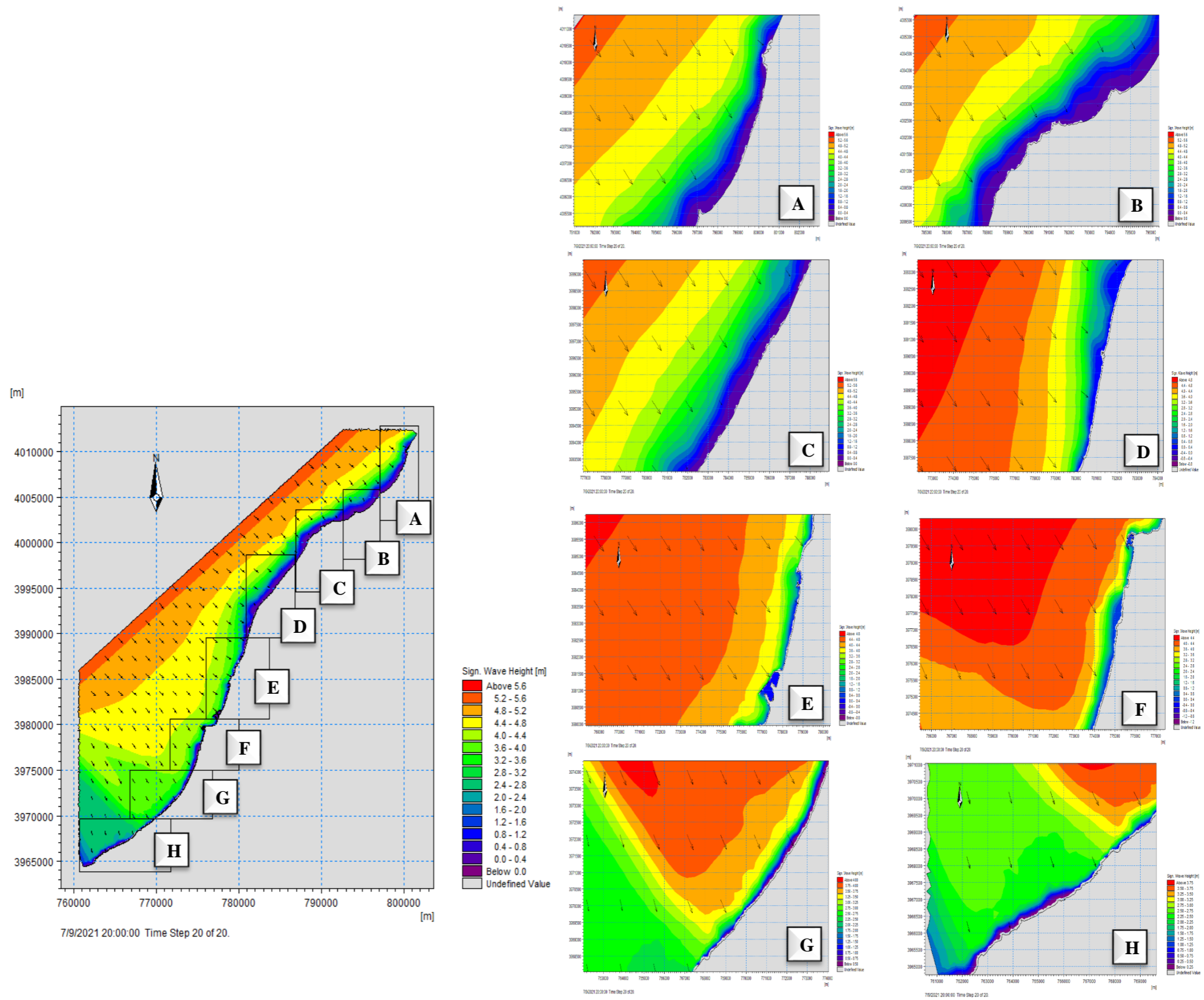


Figure V-11 : Carte de la simulation de la houle de 2ans de direction NW.

3. Variation du niveau de la mer en fonction de la pression atmosphérique (effet barométrique inverse)

Les submersions marines sont le plus souvent associées à des conditions météorologiques locales de tempête et aux phénomènes bien connus de surcote résultant du cumul de l'effet barométrique inverse et des vents d'afflux. Le déferlement des vagues joue également un rôle prépondérant dans la surélévation totale. Il provoque des variations du niveau d'eau de deux types : une surélévation statique du niveau moyen (surcote de vague) et des variations instantanées provoquées par le jet de rive. Ces deux phénomènes sont responsables dans certains cas de plus de 2/3 de la surélévation totale. **(GIEC,2001).**

La variation du niveau de la mer liée à la pression atmosphérique peut être approchée à partir de la formule qui suit :

$$Z = 0.01 (1013 - p) \dots \dots \dots (V-4)$$

Où :

p : est la pression atmosphérique en hectopascal,

1013 hPa : étant la pression correspondant au niveau de repos de la mer.

Cette formule montre qu'une baisse de pression d'un hectopascal fait monter le niveau marin d'environ un centimètre. En Algérie, les pressions oscillent entre 950hPa et 1050hPa, faisant varier le niveau de la mer entre -0.37m et 0.63m.

4. Les terres à risque d'inondation

Le développement de la structure urbaine dans la zone côtière se caractérise par une occupation verticale prioritaire. Ce genre d'anarchie et d'occupation intensive rendra l'environnement très vulnérable aux catastrophes météorologiques, et la faible topographie de la région accélérera ces catastrophes. Afin d'estimer la superficie terrestre qui sera inondée par une élévation extrême du niveau de la mer, les cotes de ces niveaux ont été comparées avec le modèle numérique de terrain (MNT) **(SAS Planet)** (Figure V-12. De plus, afin d'identifier les facteurs de risques des unités de

Submersion Marine

construction dans la zone d'étude, ces mêmes niveaux de crue ont été superposés sur la carte d'occupation du sol (FigureV-13).

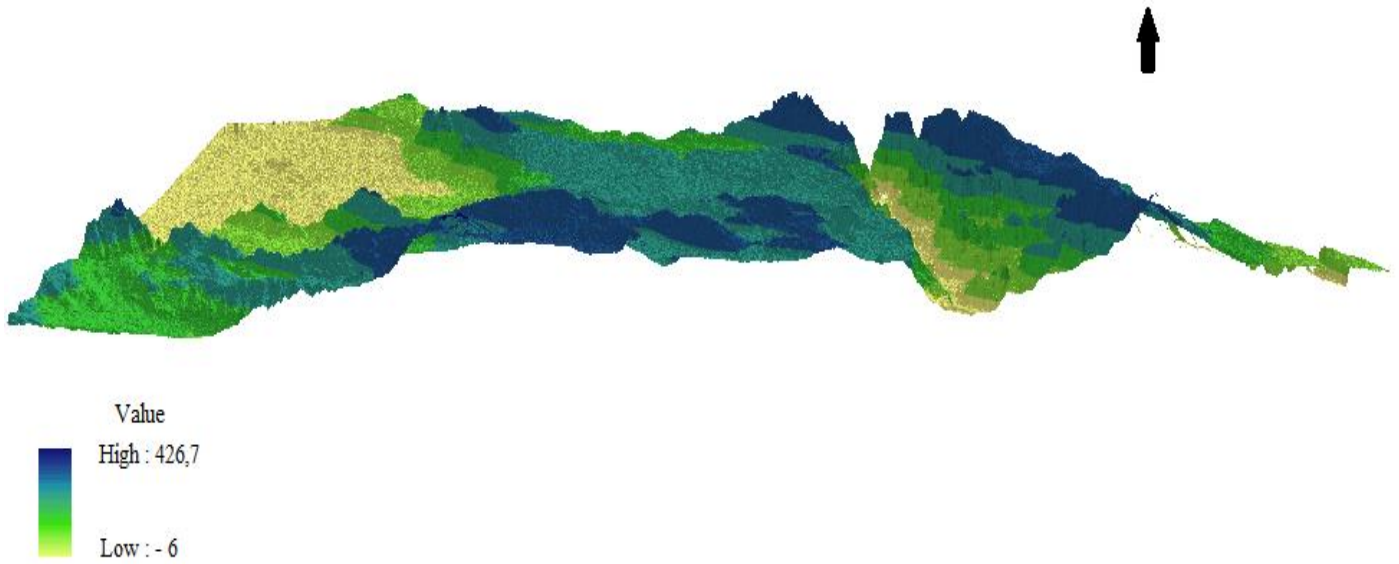


Figure V-12 : Le modèle numérique du terrain (MNT) de la zone d'étude de Mostaganem.

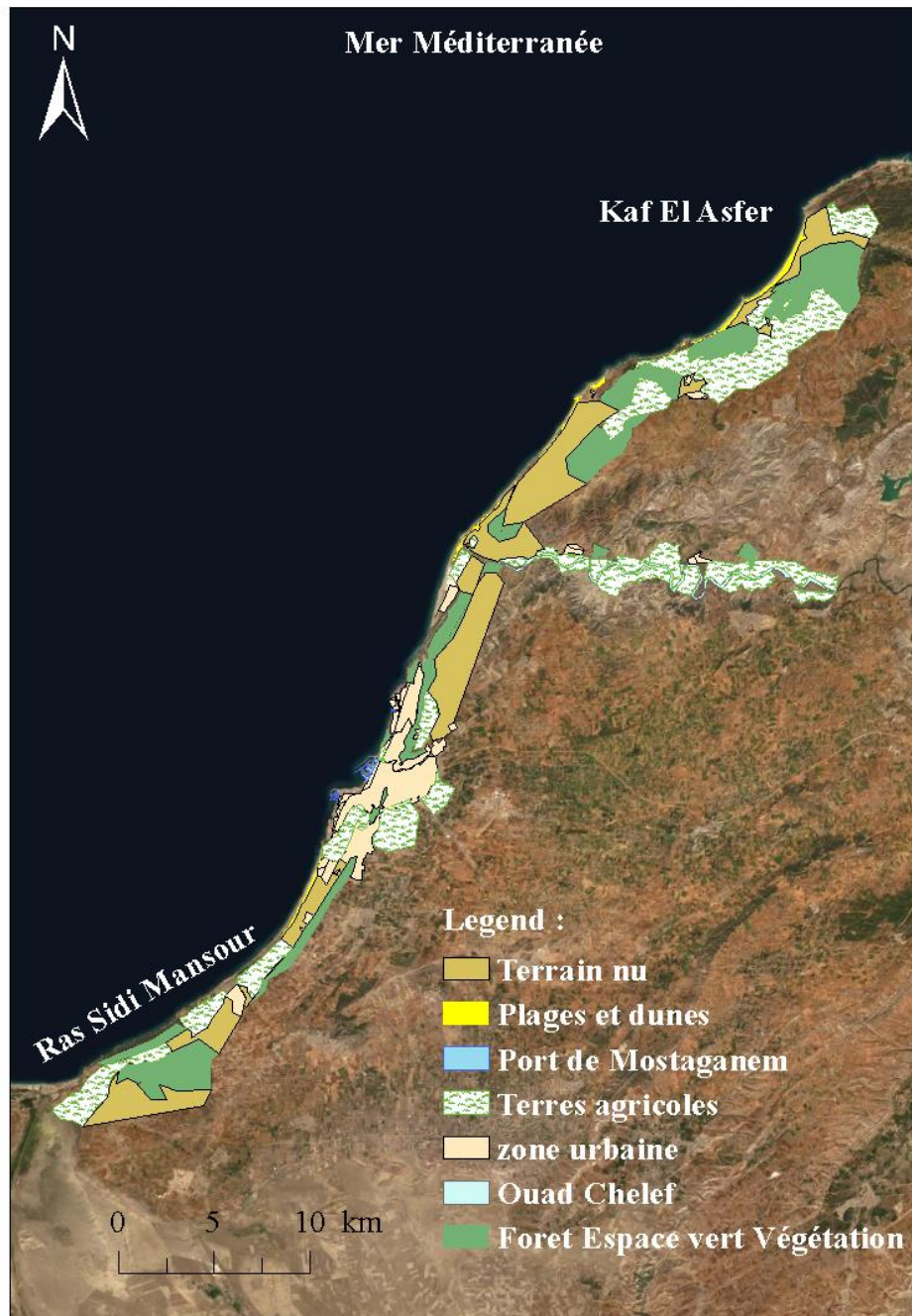


Figure V-13 : Carte d'occupation du sol de la zone d'étude de Mostaganem.

5. Résultats et discussion

Les cartes de submersion sont obtenues après la modélisation de ce phénomène sous ArcGIS 10.4 pour plusieurs scénarios de l'élévation de niveau marin à savoir 3m et 5m.

5.1 Les scenarios des niveaux extrêmes

Sur le logiciel Arc Gis, le niveau d'inondation est superposé à un modèle numérique de terrain (MNT) de résolution 30 m pour établir des cartes pour l'aléa de submersion marine à des différents niveaux extrêmes d'inondation. En dernier et après qu'on termine cette superposition pour les 2 scénarios et les projeter sur les images ortho rectifiées de notre zone d'étude (Tableau V-2), on peut commencer la rédaction des cartes de submersion.

Tableau V-3 : Niveaux d'inondations extrêmes

période de retour (R)	MHW	St	Wf	Pf	Dft
100 ans	34 cm	2.5 mm	3.9 m	0.63 m	4,87 m
2 ans	34 cm	2.5 mm	1.9m	0.63 m	2.87 m

5.1.1 Submersion à 3 m

Pour le cas d'une élévation de 3m de niveau marin (Figure V-14), On constate que l'eau de mer pénètre vers l'arrière-pays par des distances très loin de la côte d'environ de 700 m avec une surface immergée qui s'étale jusqu'à 2812.65 Hectare, pays touchant : les plages, les infrastructures portuaires et touristiques. Ainsi que les réseaux hydrographiques notamment que la partie Est (au niveau d'Oued Chlef) est la plus affectée.

5.1.2 Submersion à 5 m

La figure (V-14) montre un cas extrême de la submersion marine dans notre zone d'étude. Les zones de la côte touchant par ce niveau sont essentiellement les terres agricoles, les plages, les dunes et les zones urbanisées, ainsi que les réseaux hydrographiques seront affectés par ce niveau d'inondation, notamment, oued chlef la partie la plus affectée pour ce niveau de submersion avec une superficie des terres immergées est d'environ 3766.82 h.

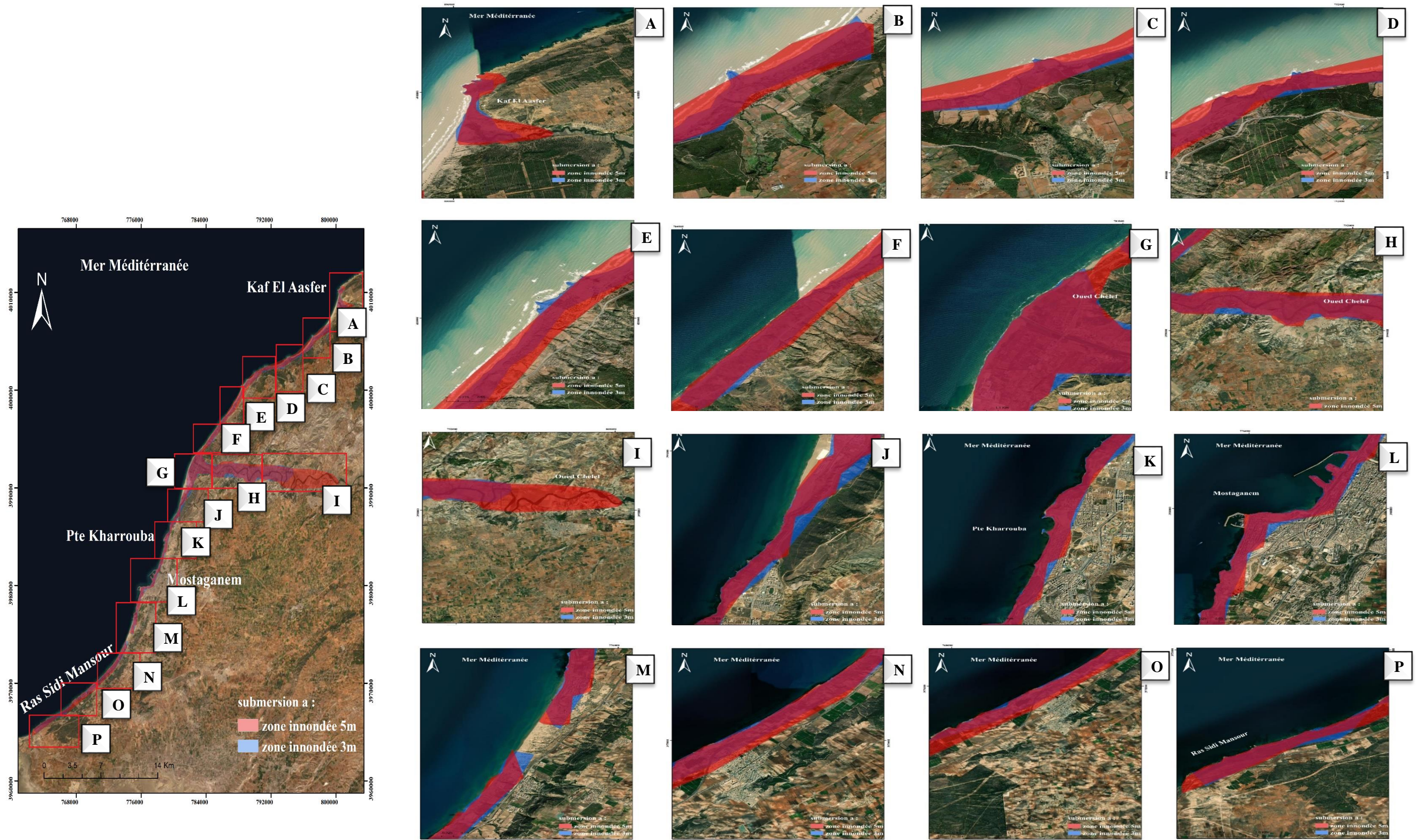


Figure V-14 : les carte de submersion marine.

6. Perte des terres due à la submersion marine

L'application des niveaux de submersion sur la carte d'occupation du sol de la Willaya de Mostaganem met en évidence une étendue importante des zones inondables.

Les principaux résultats de la perte de terres due à l'inondation marine sont consignés dans le tableau V-3 et présentés dans la figure V-15. Les inondations potentielles les plus importantes toucheraient les terres basses de la côte de la willaya de Mostaganem spécialement dans la zone d'Oued Chlef où les systèmes naturels de défense contre la mer, cordons dunaires, ont été détruits.

Les terres agricoles sont fortement touchées par les intrusions des eaux marines à différents niveaux d'élévation telle que 39.20 % à 45.60 % de ses surfaces sont perdus. Cependant 9.77% à 7.91 % des plages de la zone sont perdues à ces niveaux d'élévations.

L'envahissement des eaux marines à différentes directions en arrière-pays peut atteindre une dizaine de kilomètres en menaçant les habitats, les établissements, les équipements culturels et de loisirs, les hébergements touristiques, etc.

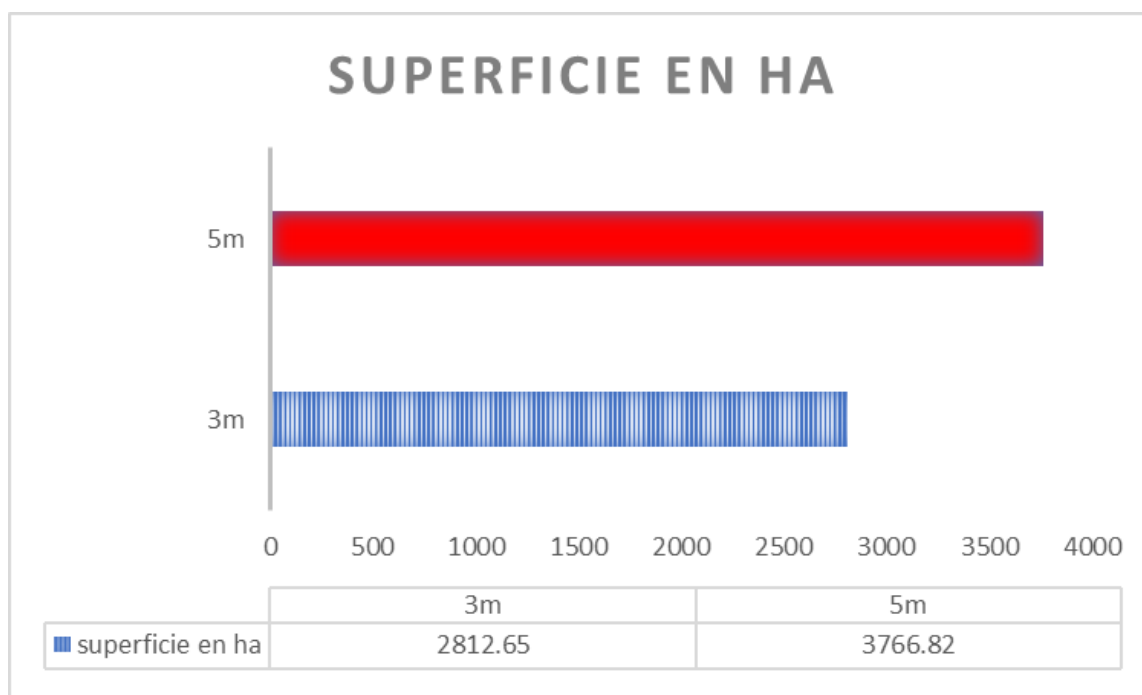


Figure V-15 : Superficies des terres inondées par les différents niveaux d'élévation.

Tableau V-4 : Résultats des terres à risque d'inondations.

Type d'occupation du sol	Niveau d'inondation 3 m (R = 2 ans)		Niveau d'inondation 5 m (R = 100 ans)	
	Superficie (ha)	Superficie (%)	Superficie (ha)	Superficie (%)
Zones urbanisées	326,54	11,61	336,59	8,94
Ports et ouvrages de protection	29,87	1,06	34,93	0,93
Plages et dunes	274,85	9,77	297,89	7,91
Forêts, espace vert et végétation	283,18	10,07	304,1	8,08
Terres agricoles	1102,65	39,20	1718,67	45,60
Oued Chlef	185,84	6,60	312,5	8,29
Terrain nu	609,72	21,68	762,15	20,25
Total	2812,65	100	3766,82	100

7. Conclusion

Les résultats de notre étude de la modélisation de submersion marine et des pertes des terres ont permis de définir les risques de ce phénomène :

- Le recul mécanique du trait de côte par la remontée du niveau des eaux pourra entraîner l'attaque d'aménagements.
- Si la ligne de rivage est fragile, les dommages seront importants sur les équipements, aménagements urbains existants.
- La cartographie des zones inondables révèle que **2812.65ha** de sa superficie présenteraient un risque de submersion avec un niveau d'inondation 3 m.

Submersion Marine

- Pour un niveau submersion 5 m. La côte Est a été la plus vulnérables aux inondations, en raison de la faible topographie avec une superficie des terres immergées est d'environ **3766.82** ha.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre étude s'intitule « Évaluation des impacts des changements climatique sur la morphologie du littoral de Mostaganem », ce mémoire va se concentrer sur l'étude de la région, cela en utilisant un ensemble d'outils et de technique afin d'arriver à un diagnostic en bonne et due forme de l'état de la cote de Mostaganem.

Tout d'abord, on a entamé le mémoire avec le chapitre généralité qui englobe un ensemble d'information, parmi ces informations on peut citer, le littoral et son approche systémique, les processus hydro sédimentaire ou on parle de l'hydrodynamique (vague, houle...etc.), le transport sédimentaire (modes de transport) et les différents facteurs influençant le transport sédimentaire, la morphologie des plages et des barres sableuses et enfin un petit aperçu sur l'érosion côtière et ces origines que ce soit naturelle ou anthropique.

Par la suite, on s'est intéressé à la zone d'étude de Mostaganem ou on a essayé de la présenter sous ces différentes formes autrement dit les différentes caractéristiques de la zone que ce soit des caractéristiques géologiques et géomorphologiques, caractéristiques climatologiques, hydrologiques, océanographiques.

La méthodologie mise en avant dans ce travail a réussi à valoriser les apports de la modélisation numérique par l'utilisation du modèle numérique Mike 21 et d'un SIG. On a utilisé le modèle numérique Mike 21, afin de cartographier les fonds marins et d'étudier la propagation de la houle de nos zones d'études. La première partie nous a permis une bonne reconnaissance de la morphologie sous-marine. La deuxième partie nous a également permis d'exploiter les caractéristiques de la houle au large, avec estimation de la direction et de la hauteur de la houle significative à la côte.

L'étude bathymétrique indique la présence que le fond marin est caractérisé par des isobathes régulières parallèle a la cote avec pente douce et des isobathes irrégulières avec pente abrupte. La modélisation de la réfraction de la houle dans notre zone d'étude pour 03 directions (une direction approximativement perpendiculaire à la côte (360° N), une direction de houle (270° N), une direction de (315° N)). La modélisation des champs de courants générés par la houle nous a renseignés sur la distribution des courants sur notre zone d'étude ainsi que leurs intensités et leurs vitesses. La modélisation du transport sédimentaire nous a permis d'identifier les zones d'accumulation des sédiments et les zones d'érosion. Cette étude montre que :

Les résultats selon SW : les houles qui arrivent des directions N360 avec une hauteur significative (H_s0) au large de l'ordre de 5.44m. la direction N315° Au large, les houles de ce secteur ne subissent aucune modification ($H_s=5.16$ m), mais au fur et à mesure lorsqu'elles se rapprochent du rivage, sa hauteur diminue (H_s varie entre 0.4m à 1.6m). La direction ouest (270°) ces houles ne subissent aucune modification, elles gardent son énergie initiale ($H_s=4.72$ m).

Selon HD : le secteur Nord (360° N) On remarque que le champ du courant se propage non seulement d'Est en Ouest suivant une direction parallèle au trait de côte avec des vitesses varient majoritairement entre 0.2 m/s à 1.5 m/s. le secteur Ouest 270° On constate que ces courants sont orientés d'Est en Ouest suivant une direction parallèle au trait de côte avec des vitesses varient entre 0.08m/s et 0.9m/s le long de la cote à l'exception de la zone de Cap IVI qui enregistre des vitesses importantes de l'ordre de 1.2 m/s. le Nord-Ouest le courant prend une direction nettement opposée mais avec des vitesses nettement faibles ne dépassent pas 0.5m /s dans la partie Est.

Selon ST : secteur -ouest 270° On observe un taux de transport sédimentaire très fort du cap IVI vers le large d'environ 2049.84 m³ /s/ m. et un taux moyen de l'ordre et 1 103,76 m³/an/ m de la plage. Secteur Nord -ouest 315° On observe un taux de transport sédimentaire très fort vers le large

Conclusion Générale

au niveau du cap IVI de l'ordre 3 027,46 m³ /an/ m, un taux moyen de l'ordre 1 513,73 m³ /an/ m vers le large. Secteur Nord 360° un taux de transport sédimentaire très fort vers le large au niveau du cap IVI de l'ordre 2 649,02 m³ /an/ m, un taux moyen de l'ordre 1 324, 51 m³ /an/ m vers le large.

Ensuite on a la partie qui met en évidence une étude de la cinématique du trait de côte à une échelle pluriannuelle (de 2001 à 2021), par l'utilisation de l'outil DSAS, qui repose sur une analyse des tendances d'évolution surfacique du littoral dans son état naturel et le suivi de sa transformation à partir de calculs statistiques notamment le (NSM, l'EPR), qui s'est conclu avec les résultats suivants :

- Une érosion soit 56,70 km de linière côtier.
- Une accrétion équivalente à une distance 27,48 km.
- Une distance de 0,8 km de linéaire côtier.

Une autre partie est consacré pour les simulations des phénomènes de submersions marines, où on a travaillé sur une proposition des scénarios d'élévation de niveau marin par (3m, 5m), les superficies susceptibles d'être potentiellement inondées par ces scénarios sont d'environ 6042.18 ha à un niveau d'inondation maximal de 5 m, 4328.72 ha à un niveau d'inondation minimal de 3m. Les résultats de cette étude montrent que cette proposition est une contrainte qui doit être forcément intégrée à la conception des aménagements côtiers, compte tenu la vulnérabilité des zones basses, des franges littorales et des plages.

Ce travail réalisé dans le cadre du projet de fin d'études, a permis de créer une base de données récente qui pourra servir pour une étude future de la zone ou même pour les projets de fin d'études qui traitent le même sujet.

Référence bibliographique

- Aïna Collin, (2009).** À l'interface entre terre et mer : la gestion du trait de côte. France : Versailles cedex. P.06
- Ahfir., Meziane, (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. Gestion et protection du littoral .Alger :ENSSMAL. P.76
- 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. P.111
- ArcGIS Resource Center, (2018).** What is ArcGIS Enterprise ? [En ligne]. [Consulter le 13/07/2021]. Disponible sur le web : <https://resources.arcgis.com/en/communities/mapping/home/>
- Aurélie Dehouck, (2006).** Morphodynamique des plages sableuses de la mer d'Iroise (Finistère). Université de Bretagne occidentale. France : Brest. P.05
- Benoît et al, (2009).** [Modélisation de la dynamique non-linéaire des états de mer océaniques](#) Paris : (ENPC). P.27
- BRGM, (2012).** Bureau de recherches géologiques et minières. Rapport d'activité 2012 du BRGM. [En ligne]. [Consulter le 03/08/2021]. Disponible sur le web : <https://www.brgm.fr/fr/actualite/rapport-annuel/rapport-activite-2012-brgm>
- BRGM, LMT, Mss-Mat Cachan. (2012).** Dynamiques concept. CSTB, Une approche mécanique d'évaluation de la vulnérabilité sismique des maçonneries. Document non publié. Paris : EVSIM.
- Brunet et al, 2001.** Temporal and spatial temperature variability and change over Spain during 1850–2005. USA, P.23
- Bruno Villalba, (2010).** Commissariat général au développement durable, 2010, L'environnement en France. Paris : Service de l'observation et des statistiques, Ministère de l'écologie de l'énergie du développement durable et de la mer, P.140.
- BUJAN-NANS. (2009).** Application d'un modèle de circulation quasi-tridimensionnel littoral à la dynamique des plages du Languedoc-Roussillon. Thèse de doctorat. Physique de l'environnement. France : Université de Montpellier II. 250 p.
- CASTELLE, (2004).** Modelling of a rip current induced by waves over a ridge and runnel system on the Aquitanian Coast. Rapport d'activité. Document non publié. Comptes Rendus Geoscience.
- CIRIA, CUR. CETMEF. (2009).** Guide Enrochement. L'utilisation des enrochements pour les ouvrages hydrauliques. France : Version française du Rock Manual. CETMEF, Compiègne. P.89
- COWELL, PETER J., BRUNO G. THOM. (1994).** Morphodynamics of coastal evolution [en ligne] Consulter le [09/07/2021]. Disponible sur le web : <http://services.cambridge.org/us/academic/subjects/earth-and-environmental-s>

Référence Bibliographique

Dahra, (1991). Encyclopédie berbère. Paris. Édisud. P.132

DEGOUTTE G., (2004). Cours d'hydraulique, dynamique et morphologie fluviale. Paris :AgroParisTech. P.53

DHI (2014). MIKE 21 Spectral Wave Module. Scientific Documentation [En ligne]. [Consulter le 14/06/2020]. Disponible sur le Web : DHI (2014). MIKE 21/3 Couple Model FM. Disponible sur le web : www.mediafire.com/view/rr6pv2o6bf6k87u/M21SW_Scientific_Doc.pdf

DHI (2014). MIKE ZERO: Creating 2D Bathymetries. Bathymetry Editor & MeshGenerator. Scientific Documentation [En ligne]. [Consulter le 14/06/2020]. Disponible sur le web : www.mediafire.com/view/rr6pv2o6bf6k87u/M21SW_Scientific_Doc.pdf.

DHI (2014). MIKE 21/3 Couple Model FM. [En ligne]. [Consulter le 14/06/2020]. Disponible sur le web : www.mediafire.com/view/rr6pv2o6bf6k87u/M21SW_Scientific_Doc.pdf

Domzig et al. (2006). Déformation active et récente, et structuration tectono-sédimentaire de la marge sous-marine algérienne. Brest. P.85

DURAND-DELGA, M. (1980). Le cadre structural de la Méditerranée occidentale. Géologie des chaînes alpines issues de la Tethys, ed. Paris : BRGM, P.P 67.85

Faye, I., Giraudet, E., Gourmetant, F. et Henaff, A., (2011). Cartographie normalisée de l'évolution du trait de côte, mappe monde, laboratoire Géome, Royaume-Uni : institut européen de la mer, université de Bretagne occidentale, p12.

Fletcher et al, (1995). Coastal flooding hazard mapping and PPR flood prone zones: food for thought from the analysis of the commune of Guissény. France: Finistère.P.41

Folland, C. K., et al. (2001), Lionello, (2006). Developments in Earth and Environmental Sciences, The Mediterranean climate: An overview of the main characteristics and issues Volume., N°4., P.P.230-247

GIEC, Bilan. (2001). Des changements climatiques : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Rapport d'activité. Document non publié. Suisse : GIEC.

GIEC, (2013). Résumé à l'intention des décideurs. Rapport d'activité. Document non publié Genève, Suisse : GIEC

GIEC, (2019). Rapport spécial du GIEC 2019 : l'océan et la cryosphère. Rapport d'activité. Document non publié. Genève, Suisse : GIEC

Gil Mahe, (2011). Hydrologie des grands fleuves africains : états des ressources hydriques et sédimentaires par rapport au changement climatique et aux effets des aménagements. France : Programmes SICMED. P.109

HOOZMANS, 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, France : Deltares (WL). P.59

Référence Bibliographique

IPCC, (2007). Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport d'activité. Document non publié. Genève, Suisse : IPCC. P.06

Jean BOULAIN, (1958). La depression latérale dans les sols où : De l'horizontalisme au verticalisme : Essai sur la loxostasie. Paris : Cedex 05. P.63

Jonathan Daeden, (2015). Analyse des pressions anthropiques sur l'environnement littoral européen et français. France : La Rochelle. P.17

Klervi Hamon, (2014). Étude de la morphodynamique et du profil d'équilibre d'une plage de poche macrotidale. France: EDP Sciences & Science Press. P.07

Komen, et al, (1996). Dynamics and Modelling of Ocean Waves. Royaume-Uni: Cambridge University Press. P.13

Koutitonsky V, (2005). Étude d'impact sur l'environnement du projet de reconstruction du pont et de la route 199 dans les municipalités du Havre-aux-Maisons, aux Îles-de-la-Madeleine. Modélisation numérique intégrée des courants, des vagues et du transport de sédiments à l'entrée de la lagune du Havre-aux-Maisons. Canada : UQAR-ISMER. P.59

LARRAS, Jean. (1979). Physique de la houle et des lames. Paris : Eyrolles, P. 282

LEM, (2009). Expertise pour l'étude de protection de rivage du site est de la baie d'Alger. Rapport d'activité. Document non publié. Alger : Laboratoire des études maritimes.

Léon l'Africain, (1898). Description de l'Afrique : tierce partie du monde. Paris : Gallica. P.133

Marin François, (2016). Hydrodynamique marine : la houle les fonds marins et le littoral cours logiciels et exercices corrigés. Paris : EDP Sciences. P.38

Meedat, (1997). Le phénomène de la submersion marine. Paris, France : DDTM de charente maritime. P.02

Méthodologie - Géo Littoral, (2018). Étapes de la méthodologie de suivi du trait de côte. [En ligne].[Consulter le 23/05/2021].Disponible sur le web : <http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/methodologie-r475.html>

Meur-Ferec et al. (2008). Coastal Risks in France: An Integrated Method for Evaluating Vulnerability. Journal of Coastal Research (2008). P.P.178.189.

M. GUILLAUME QUIBEUF, (2019). Etude expérimentale du transport sédimentaire hors équilibre. Rapport d'activité. Document non publier Toulouse, France : Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse. P.55

Nicholls et Cazenave, (2010). Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. [En ligne].[Consulter le 17/09/2021]. Disponible sur le web : <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1185782> .

Patrick Geistdoerfer, (2002). La mer et les océans. France : Vigot-Maloine. P.45

Référence Bibliographique

R. Bouligand et M. Tabeaud, (2000). Les surcotes à Brest depuis un siècle : analyse des paramètres météorologiques influents à l'échelle locale. France : Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne. P.33

S. Charrier, P. Pouzet, M. Maanan, (2019). La tempête de 1940 détectée dans les sédiments des Traicts du Croisic. France : Les Cahiers Nantais, IGARUN. P.P.3-14

SENECHAL, Nadia. (2003). Etude de la propagation des vagues au-dessus d'une bathymétrie complexe en zone de surf. France : Université de Bordeaux. P.29

Stépanian.A (2002). Evolution morphodynamique d'une plage macrotidale à barres : Omaha beach (Normandie). France : Université de Caen. P.22

Stéphane Buchou, (2019). Rapport "Quel littoral pour demain ? Vers un nouvel aménagement des territoires côtiers adapté au changement climatique". Rapport d'activité. Document non publié. France.

SOMMERIA, (2016). La Physique et la Terre ». France : Belin et CNRS-éditions, 2000. P.229

Tarik and Bouziane, (2010). Coastal Urbanization in Algeria, Processes and Environment Impacts: The Case of the Bay Aïn El Turck. Memoire d'ingénieur. Algeria: ENSSMAL. P.53

Teffahi, N., (2018). Cours de cartographie 4eme année, ENSSMAL.

Thieler, E., Miller, R.T., (2005). User guide and tutorial for the digital shoreline analysis system (DSAS) version 3.2 extension for ArcView. [En ligne]. [Consulté le 03/07/2021]. Disponible sur le web : <http://woodshole.er.gov/project-pages/dsas/>.

Annex

Cellules sédimentaires	De Kef El Asfer jusqu'au Cap IVI	Du CAP IVI jusqu'a Pte Kharouba	De Pte Kharouba jusqu'au Port de Salamandre	Du Port de Salamandre a Stidia plage	De Stidia plage à Ras Sidi Mansour
Nombre de transects N°	296	396	116	268	192
Longueur (km)	19.73	26.4	7.73	17.86	12.8
Taux moyen du changement du trait de cote					
EPR (m/an)	-1.06	-0.35	-0.11	0.14	1.33
LRR (m/an)	-1.03	-0.35	-0.12	0.2	0.83
NSM (m)	-21.2	-6.94	-2.28	2.8	26.2
Taux min et max du changement du trait de cote					
EPR (m/an)	-5.49	-0.77	-0.56	-0.05	0.4
	-0.56	-0.05	-0.17	0.4	8.84
LRR (m/an)	-3	-5	-2.3	-1.7	-2.48
	1.6	5.06	3.2	1.6	1.69
NSM (m)	-109.7	-3.32	-11.17	-0.96	8.06
	-11.12	-0.96	-3.39	8.05	176.8
Nombre et pourcentage % des transects en érosion et en accrétion(EPR)					
Erosion	230 transects	276 transects	74 transects	176 transects	94 transects
	18.05%	21.66%	5.8%	13.81%	7.37%
Accrétion	67 transects	121 transects	43 transects	93 transects	100 transects
	5.25%	9.5%	3.37%	7.3%	7.84%

Résumé :

Partant du postulat que le changement climatique et l'élévation consécutive du niveau de la mer Méditerranée sont maintenant les phénomènes les plus inquiétants pour la communauté scientifique, de cet effet plusieurs études ont tenté de contribuer aux efforts menés pour l'évaluation de la vulnérabilité et de l'adaptation des zones côtières algériennes face à ces changements.

Allant de 2001 jusqu'à 2021, le littoral de la Willaya de Mostaganem a connu une forte dégradation dont 66,72% de ces plages sont perdues par érosion avec un taux de recul moyen de l'ordre de -0.49 m/an, cela est expliqué par la conjugaison des facteurs naturels (climat des houles) et/ou anthropiques (développement de tourisme balnéaire, industrie, extension du tissu urbain...).

2812,65 ha de la superficie totale présente un risque de submersion avec un niveau d'inondation minimum (3 m); et 3766,82 ha pour un niveau de submersion maximum (5 m).

Mots clés : Changement climatique, élévation du niveau de la mer, vulnérabilité, adaptation, Mostaganem, submersion.

Summary:

Starting from the postulate that climate change and the consequent Mediterranean Sea level rise are now the most worrying phenomena for the scientific community, several studies have therefore attempted to contribute to the efforts made for the assessment of vulnerability and the adaptation of Algerian coastal areas to these changes.

From 2001 to 2021, the coast of Mostaganem experienced a strong degradation of which 66.72% of these beaches are lost by erosion with an average rate of -0.49 m / year, this is to explain by the combination of natural (swell climate) and / or anthropogenic factors (development of seaside tourism, industry, extension of the urban fabric, etc.).

2812.65 ha of the total area presents a risk of submersion with a minimum flood level (3 m); and 3766.82 ha for a maximum submersion level (5 m).

Keywords: Climate change, sea level rise, vulnerability, adaptation, Mostaganem, submersion.

ملخص

انطلاقاً من الافتراض بأن تغير المناخ وما يترتب عليه من ارتفاع في مستوى البحر الأبيض المتوسط هما الآن أكثر الظواهر إثارة للقلق بالنسبة للمجتمع العلمي، لذلك حاولت العديد من الدراسات المساهمة في الجهود المبذولة لتقييم الضعف وتكيف المناطق الساحلية الجزائرية مع هذه التغيرات.

من عام 2001 إلى عام 2021، شهد ساحل ولاية مستغانم تدهوراً قوياً تم فقدان 66.72% من هذه الشواطئ بسبب التعرية بمتوسط معدل تراجع قدره -0.49 م / سنة، وهذا للتوضيح من خلال الجمع بين العوامل الطبيعية (المناخ المنتفخ) و / أو العوامل البشرية (تطوير السياحة الساحلية، والصناعة، وتوسيع النسيج الحضري، وما إلى ذلك).

2812.65 هكتار من المساحة الإجمالية تمثل خطر الغمر مع مستوى أدنى للفيضان (3 م)؛ و 3766.82 هكتار لأقصى مستوى غمر (5 م).

الكلمات المفتاحية: تغير المناخ، ارتفاع مستوى سطح البحر، الضعف، التكيف، مستغانم، الغمر.