

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل
Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



**Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme
D'Ingénieur d'Etat en Sciences de la Mer
Option : Gestion et Protection du Littoral**

Thème :

**COMPORTEMENT DES FORMATIONS
GÉOLOGIQUES DE LA ZONE COTIERE D'EL
MARSA (ALGER) VIS-À-VIS L'ÉROSION MARINE**

Présenté par

BENABID MAHDI

AHMED GAID AHLEM

Soutenu le 02/07/2024, devant le jury composé de :

M. OTMANI. H.	Maitre de conférences A ENSSMAL	Président
Mme. MEHDID S.	Maitre Assistante A ENSSMAL	Examinatrice
Mme. FEZAA N.	Professeur ENSSMAL	Promotrice
M. SEFFARI A.	Maitre de Recherche B CRAAG	Co-Promoteur

Année universitaire : 2023/2024

Remerciements

- ✚ Au terme de ce travail, nous remercions **Dieu le Tout-Puissant** pour nous avoir donné la santé, le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail
- ✚ On remercie **nos parents** pour leur soutien tout au long de notre parcours qui n'a pas été un long fleuve tranquille. Sans leur soutien indéfectible, le parcours parcouru, qui se termine par le présent mémoire, n'aurait jamais pu voir le jour.
- ✚ Nous remercions particulièrement notre promotrice **Mme. FEZZA N** Professeur à l'ENSSMAL. Qui nous a encadrés pendant la période de la réalisation de ce travail. Pour sa disponibilité, malgré ses responsabilités administratives, pour ses orientations, son soutien qui nous a permis de mener à bien ce travail et surtout pour sa soif de progrès et de science dans le but de nous simplifier les choses qui nous ont bloqué à certain moment critiques de ce mémoire.
- ✚ Nous remercions énormément notre Co-promoteur **M. SEFFARI A.** Maître de recherche B au C.R.A.A.G Qui a bien voulu nous prendre sous son aile dans la partie Géomorphologie. Pour ce travail riche d'intérêt, pour nous avoir guidés à chaque étape de sa réalisation et qui nous a toujours réservé le meilleur accueil, malgré ses obligations professionnelles et la distance.
- ✚ Nous tenons à remercier **M. OTMANI** Professeur à l'ENSSMAL d'avoir accepté de présider le jury de cette soutenance.
- ✚ Nous adressons nos remerciements les plus vifs à **Mme. MEHDID S.** Maître de conférences A à l'ENSSMAL pour avoir accepté d'examiner notre travail et de nous faire part de ces retours.
- ✚ On exprime nos remerciements à l'ensemble de **la famille ENSSMAL** (l'ensemble de nos profs, amis et collègues depuis le début de l'aventure ENSSMAL en 2019 et envers l'ensemble de **nos enseignants** qui nous ont formés bien avant) qui nous ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de notre démarche commencer il y a 18 ans.
- ✚ Nous adressons nos remerciements à **toutes les personnes** qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce présent mémoire.
- ✚ Au final, je remercie **mon binôme** pour sa confiance, son soutien inestimable et surtout pour les agréables moments passés ensemble.

Dédicace

À mes Chers parents

Qui m'ont toujours poussé vers le chemin du savoir, pour leurs sacrifices, leur soutien inconditionnel moral et matériel et pour faire de moi l'homme que je suis que Dieu le Tout Puissant garde ma mère en bonne santé et fasse mon père un part de sa miséricorde.

À mes chers frère et sœur

Qui m'ont soutenu et aidé moralement et matériellement au long de mes études.

À tous mes amis

Tous qu'ils ont contribués à ce travail de loin et de près. Surtout mon binôme Ahmedgaid Ahlem.

Benabid Mahdi

À mes Chers parents

Votre amour et votre soutien indéfectible ont été le fondement de ma réussite. Ce projet de fin d'études est le fruit de vos sacrifices et de vos encouragements constants. Je vous le dédie avec toute ma gratitude, en espérant vous rendre fiers.

À ma sœur, mes frères et toute ma famille

Qui m'ont soutenu et aidé moralement et matériellement au long de mes études.

À mes fidèles

Compagnons de route dans cette aventure académique, Vos rires, votre soutien et votre amitié sincère ont rendu ce parcours mémorable. Merci d'avoir été là dans les moments de doute comme de victoire

À mon binôme

Merci pour votre contribution inestimable à la réussite de ce projet.

Ahmedgaid Ahlem

Table des matières

Remerciement

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des acronymes

Résumé

Introduction générale: _____ 16

Chapitre I Généralités _____ 17

I.1. Définition du littoral: _____ 19

I.2. Système morphodynamique : _____ 20

I.3. Evolution spatio-temporelle des composantes du système littoral : _____ 21

I.4. Les facteurs de l'évolution des littoraux : _____ 22

I.4.1. L'action du vent : _____ 22

I.4.2. L'action des vagues : _____ 23

I.4.3. Les courants : _____ 24

I.4.4. Les eaux découlement et d'infiltration : _____ 25

I.4.5. L'action du gel et du dégel d'eau infiltrée : _____ 26

I.4.6. Les actions chimiques de l'eau de mer et de l'eau d'infiltration: _____ 27

I.4.7. Les actions biologiques : _____ 28

I.5. Morphodynamique des côtes : _____ 28

I.5.1. Les plages : _____ 28

I.5.2. Les falaises : _____ 29

I.5.2.1. Processus de formation des falaises : _____ 30

I.5.2.2. L'influence subaérienne et marine : _____ 30

I.6. Notion de trait de côte : _____ 32

I.7. Impact du changement climatique sur les littoraux : _____ 32

Chapitre II Caractéristiques géomorphologiques, climatiques et hydrodynamiques de la zone d'étude	33
II.1. Situation géographique :	34
II.2. Cadre géomorphologique :	35
II.2.1. Typologie de la côte :	35
II.2.2. Le réseau hydrographique :	35
II.3. Les données climatiques :	36
II.3.1. Les températures:	37
II.3.2. Les précipitations :	38
II.3.4. Le vent :	39
II.4. Les données hydrodynamiques :	41
II.4.1. La houle :	41
II.4.2. Les courants de dérive littoral :	43
Chapitre III Contexte géologique	43
III.1. Introduction:	45
III.2. Les différents faciès lithologiques de la côte d'El Marsa :	46
III.2.1. Le socle :	46
III.2.2. Les formations sédimentaires néogènes :	46
III.2.2.1. L'Oligo Miocène kabyle (OMK) :	46
III.2.2.2. Le Miocène:	47
III.2.3. Le Pliocène :	47
III.2.3. Le Plaisancien :	47
III.2.3.2. L'Astien :	48
III.2.4. Quaternaire :	48
III.3. Les formations magmatiques :	48
III.3.1. Le plutonisme :	48
III.3.2. Le volcanisme :	49
III.4. Aperçu tectonique :	49

III.5. Conclusion :	53
Chapitre IV Analyse des événements extrêmes	53
IV.1. Introduction :	55
V.2. Analyse des événements extrêmes :	55
IV.2.1 Théorie des valeurs extrêmes :	55
IV.2.2 Hauteur significative :	56
IV.2.3 Période de pic :	57
IV.3 Méthode Peaks Over Threshold (POT):	59
IV.4 Conclusion :	67
Chapitre V Modélisation hydrodynamique	67
V.1. Introduction :	69
V.2. Présentation du modèle :	69
V.2.1. Mesh Generator :	70
V.2.2. Le module de vague spectrale : Mike 21 SW (Spectral Wave):	70
V.2.3. Le module hydrodynamique HD :	71
V.3. Construction du modèle numérique et présentation des résultats	71
V.3.1. Génération de la Mesh :	71
V.3.1.1. Données bathymétriques pour la génération de la Mesh :	71
V.3.2. Mesh et Bathymétrie résultante :	72
V.4 Scénarios de simulation :	76
V.5. Résultats des simulations :	79
V.5.1. Résultats pour l'est baie d'Alger :	79
V.5.1.1. Période de retour de 10 ans :	79
V.5.2.2. Période de retour de 30 ans :	80
V.5.1.3. Période de retour de 100 ans	81
V.5 .1.4. Interprétation des Résultats :	82
V.5.2. Résultats pour l'ouest de la baie de Zemmouri:	83
V.5.2.1. Période de retour de 10 ans	83

V.5.2.2. Période de retour de 30 ans	84
V.5.2.3. Période de retour de 100 ans :	85
V.5.2.4. Interprétation des Résultats :	86
V.6 Conclusion :	87
Chapitre VI Evolution du trait de côte	87
VI.1. Introduction :	89
VI.2. Définition du trait de côte :	89
VI.3. Matériels et méthodes :	89
VI.3.1. Collecte et traitement des données :	89
VI.3.2. Outils de traitement :	90
VI.3.2.1. Google EarthPro :	90
VI.3.2.2. Arc Gis 10.4 :	91
VI.3.2.3. Extension DSAS :	91
VI.3.3. Extraction du trait de côte:	92
VI.3.4. Les méthodes statistiques de calcul de la mobilité du trait de côte sous l'extension DSAS :	98
VI.3.4.1 La méthodes des points extrêmes (End Point Rate) EPR :	98
VI.3.4.2. La méthode de la régression linéaire LRR :	98
VI. 3.4.3. La méthode du Mouvement de rivage net (Net Shoreline Movement NSM)	99
VI.4. Résultats et discussions:	99
VI.4.1. Evolution du littoral à long terme :	100
VI.4.2. Evolution du littoral à court terme :	102
VI.4.3. Evolution du littoral dans la zone rocheuse El Marsa :	106
Chapitre VII discussion des résultats	115
VII.1. Introduction :	117
VII.2. L'influence de l'hydrodynamique sur la dynamique d'érosion :	117
VII.3. Influence de la topographie, du réseau hydrographique et la bathymétrie sur la dynamique d'érosion:	120
VII.4. Influence de la déformation tectonique (failles) sur la dynamique d'érosion :	123

VII.5. Influence de la nature des faciès sur la dynamique d'érosion _____	123
VII.6. Influence du changement climatique sur les taux d'érosion : _____	125
Conclusion générale : _____	128
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES _____	130

Figures des annexes

Annexe A _____	137
Annexe B _____	154

Liste des figures

Figure 1 : Les éléments d'une zone littorale (Bousquet, 1990). -----	20
Figure 2 : Composants d'un système morphodynamique côtier (Stépanian, 2002).-----	21
Figure 3 : Relation spatio-temporelles des systèmes morphodynamique littoraux -----	22
Figure 4:Processus hydrodynamiques induits par les vagues incidentes sur un profil de plage microtidal(Davidson-Arnott et al., 2019).-----	24
Figure 5:Les différents courants générés par les vagues auprès de la côte(Short, 1999). -----	25
Figure 6 :Schéma simplifié des eaux d'infiltration (Giret, 2023).-----	26
Figure 7 :Principales unités morphologiques d'une plage et ses agents dynamiques-----	29
Figure 8 : Schéma de la formation des falaises.(Cour géomorphologie littoral. Mme Fezaa)-	30
Figure 9:L'influence des facteurs subaériens sur les falaises -----	31
Figure 10 :Carte de la situation géographique de la zone d'étude(ArcGIS Online).-----	34
Figure 11 : Typologie de la côte de la zone d'étude. (ArcGIS Online)-----	35
Figure 12:Réseau hydrographique de la zone d'étude.-----	36
Figure 13:Diagramme de température de station Dar El Baida durant l'année 2023. -----	37
Figure 14:Diagramme des précipitations mensuelles en mm de Dar El Beida durant l'année 2023. -----	39
Figure 15:Roses trimestrielles et annuelle du vent au large de la zone d'étude entre 1992 et 2020 -----	40
Figure 16:Roses trimestrielles et annuelles des houles au large de la zone d'étude entre 1992 et 2020-----	42
Figure 17: Carte géologique de la zone d'étude modifiée en se basant sur la carte géologique détaillée Alger, 1963, 1/50000) -----	50
Figure 18: Photos des différents types de roches qui affleurent sur la portion de la côte étudiée. -----	51
Figure 19: Photo montrant le plan de la faille séparant la granodiorite du conglomérat et la zone de brèche tectonique. -----	52
Figure 20: Cartographie des affleurements des différents faciès lithologiques sur la côte d'El Marsa. -----	53
Figure 21:Schéma représentatif des méthodes blocks maxima et POT. -----	56
Figure 22:Représentation du spectre des hauteurs de houle enregistrées (Alger). -----	57
Figure 23: Représentation du spectre des hauteurs de houle enregistrées (Zemmouri).-----	57
Figure 24:Représentation du spectre des périodes de houle enregistrées (Alger). -----	58
Figure 25:Représentation du spectre des périodes de houle enregistrées (Zemmouri). -----	58
Figure 26:Moyenne des excès de la série des hauteurs Omnidirectionnelle de l'enregistrement (Zemmouri). -----	60
Figure 27:Moyenne des excès de la série des hauteurs Omnidirectionnelle de l'enregistrement (Alger). -----	60
Figure 28:Représentation des événements extrêmes sur les hauteurs de houle de 1992 – 2019(Alger). -----	61
Figure 29:Représentation des événements extrêmes sur les hauteurs de houle de 1992 – 2020 (Zemmouri). -----	61
Figure 30: Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour omnidirectionnel (Zemmouri). -----	62

Figure 31: Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour omnidirectionnel (Alger). -----	62
Figure 32: Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour chaque direction (Alger). -----	63
Figure 33: Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour chaque direction (Zemmouri). -----	64
Figure 34: Maillage de la Mesh à l'échelle de l'Est baie d'Alger et de la zone rocheuse d'El Marsa. -----	73
Figure 35: Maillage de la Mesh à l'échelle de l'Ouest baie de Zemmouri et la zone rocheuse J d'El Marsa (ex Jean Bart). -----	73
Figure 36: Carte bathymétrique de la zone est baie d'Alger. -----	74
Figure 37: Carte bathymétrique de la zone ouest baie Zemmouri. -----	75
Figure 38: Point d'extraction des séries temporelle dans la baie d'Alger. -----	77
Figure 39: Point d'extraction des séries temporelle dans la baie de Zemmouri. -----	77
Figure 40: Champs des houles dans l'est de la baie d'Alger pour la direction Nord (10ans). -	79
Figure 41: Champs des courants dans l'est de la baie d'Alger pour la direction Nord (10ans).	79
Figure 42: Champs des houles dans l'ouest de la baie Zemmouri pour la direction Nord (30 ans). -----	80
Figure 43: Champs des courants dans l'est de la baie d'Alger pour la direction Nord (30ans).	80
Figure 44: Champs des houles dans l'est de la baie d'Alger pour la direction Nord (100 ans).	81
Figure 45: Champs des courants dans l'est de la baie d'Alger pour la direction Nord (100ans).	81
Figure 46: Champs des houles dans l'ouest de la baie Zemmouri pour la direction Nord (10 ans) -----	83
Figure 47: Champs des courants dans l'ouest de la baie Zemmouri pour la direction Nord (10ans). -----	83
Figure 48: Champs des houles dans l'ouest de la baie Zemmouri pour la direction Nord (30 ans). -----	84
Figure 49: Champs des courants dans l'ouest de la baie Zemmouri pour la direction Nord (30ans). -----	84
Figure 50: Champs des courants dans l'ouest de la baie Zemmouri pour la direction Nord (100ans). -----	85
Figure 51: Champs des houles dans l'ouest de la baie Zemmouri pour la direction Nord (100 ans). -----	85
Figure 52: Étapes de la méthodologie de suivi du trait de côte. -----	92
Figure 53: Géoréférencement de la carte géologique. -----	93
Figure 54: Digitalisation du trait de côte de la zone d'étude (Google Earth). -----	93
Figure 55: Digitalisation du trait de côte de la zone d'étude (carte géologique). -----	94
Figure 56: Création de la ligne de base. -----	94
Figure 57: Génération des transects. -----	95
Figure 58: Les étapes d'extraction du trait de côte 2023. -----	97
Figure 59: Evolution du trait de côte entre 1962 et 2024. -----	101
Figure 60: Evolution du trait de côte entre 1962 et 2007. -----	103
Figure 61: Evolution du trait de côte entre 2007 et 2024. -----	105
Figure 62: Evolution du trait de côte de la zone rocheuse El Marsa entre 1962 et 2024. ----	107
Figure 63: Evolution du trait de côte de la zone rocheuse El Marsa entre 1962 et 2007 ----	109
Figure 64 : Evolution du trait de côte de la zone rocheuse El Marsa entre 2007 et 2013. ---	111
Figure 65: Evolution du trait de côte de la zone rocheuse El Marsa entre 2013 et 2018. ----	113

Figure 66: Portion de la zone rocheuse côtière d'El Marsa étudiée montrant une alternance d'affleurement des faciès de pignatites et de schistes.-----	117
Figure 67: Brise lame naturel. -----	118
Figure 68: Résultat de la pression mécanique sur les estrans rocheux. -----	118
Figure 69: Erosion préférentielle des formations rocheuses par les processus hydrodynamiques (vagues et courant).-----	119
Figure 70: Effondrement des falaises sous l'action des vagues.-----	120
Figure 71: Représentation 3D de la bathymétrie de la zone d'étude.-----	121
Figure 72: Evolution du trait de côte entre 1962 et 2024 montrant des taux d'érosion différents pour la formation des marnes. Les marnes altérées situées à l'est de la zone enregistrent une érosion plus élevée.-----	121
Figure 73: Effondrement des falaises de conglomérat escarpées au niveau d'une faille. ---	123
Figure 74 Photo montrant une érosion marine active au niveau des rhyolites. Présence d'encoche et de cavités formées par l'action des vagues.-----	124
Figure 75: Le taux d'érosion entre 1962 et 2024 -----	125
Figure 77:Préparation de la série du tems des houles pour une année 2019. Erreur ! Signet non défini.	
Figure 76Création de la série du tems des houles pour une année 2019.-----	154
Figure 78: Choisir l'outil Plot Composer (.plc) pour dessiner la rose des houles. -----	155
Figure 79: Création de la rose des houles. -----	155

Liste des tableaux

Tableau 1: Les précipitations mensuelles en mm de Dar El Beida durant l'année 2023 -----	38
Tableau 2: Tableau récapitulatif de l'ensemble l'ensemble des résultats obtenu par la méthode POT(Alger). -----	65
Tableau3:Tableaurécapitulatif de l'ensemble des résultats obtenu par la méthode POT(Zemmouri). -----	66
Tableau 4 :Les inpts des simulations pour l'ensemble des périodes de retour (10, 30 et 100 ans) pour l'est baie d'Alger. -----	78
Tableau 5: Les inpts des simulations pour l'ensemble des périodes de retour (10,30 et 100ans) pour l'ouest de la baie de Zemmouri. -----	78
Tableau 6: L'ensemble des images utilisées. -----	90
Tableau 7Classification des valeurs de changement du trait de côte à partir des paramètres EPR/LRR/NSM. -----	99

Liste des acronymes

3D : trois dimensions.

DSAS: Digital Shoreline Analysis System.

E: Est.

EPR: End Point Rate.

Esri: Environmental System Research Institute.

IGN : Institut Géographique National.

Km : kilomètres.

LRR: Linear Regression Rate-of-change.

Max : Maximum.

MEDDTL : Ministère de l'Ecologie du Développement Durable des Transports et du Logement.

m : mètre.

Min : Minimum.

m/an : mètre par an.

mm : millimètre

Moy: Moyenne.

N: Nord.

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index.

NSM : Net Shore Movement.

°C : degré Celsius.

PH : potentiel hydrogène.

SIG: Système Information Géographique.

SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.

USGS : United States Geological Survey, Institut d'études géologiques des États-Unis.

UTM: Urchin Tracking Module.

WGS 84: World Geodesic System.

Résumé:

Cette étude sur l'érosion marine de la zone côtière d'El Marsa révèle la complexité des processus érosifs, influencés par la nature des formations géologiques. Les conditions hydrodynamiques extrêmes exercent une forte pression, surtout lors d'événements rares. Les formations granitiques sont plus résistantes, tandis que les schistes et marnes sont plus vulnérables. Les discontinuités structurales, comme les failles, accélèrent l'érosion. Les zones les plus vulnérables se situent à l'est et à l'ouest du cap d'El Marsa. Le changement climatique pourrait intensifier ces processus. Des stratégies de gestion intégrée sont nécessaires, incluant des méthodes "dures" et "douces" pour protéger durablement le littoral.

This study on marine erosion in the coastal area of El Marsa reveals the complexity of erosive processes influenced by the nature of geological formations. Extreme hydrodynamic conditions exert significant pressure, especially during rare events. Granitic formations are more resistant, while schists and marls are more vulnerable. Structural discontinuities, such as faults, accelerate erosion. The most vulnerable areas are located east and west of Cape El Marsa. Climate change could intensify these processes. Integrated management strategies are necessary, including "hard" and "soft" methods to sustainably protect the coastline.

هذه الدراسة حول التآكل البحري في المنطقة الساحلية لمنطقة المرسى تكشف عن تعقيد العمليات التآكلية المتأثرة بطبيعة التكوينات الجيولوجية. تمارس الظروف الهيدروديناميكية القاسية ضغطاً كبيراً، خاصة خلال الأحداث النادرة. التكوينات الجرانيتية أكثر مقاومة، في حين أن الشست والمرل أكثر عرضة للتآكل. تُسرّع الفواصل الهيكلية، مثل الصدوع، من عملية التآكل. تقع المناطق الأكثر عرضة للخطر في شرق وغرب رأس المرسى. قد يؤدي تغير المناخ إلى تفاقم هذه العمليات. هناك حاجة إلى استراتيجيات إدارة متكاملة، بما في ذلك الأساليب "الصعبة" و"الناعمة" لحماية الساحل بشكل مستدام.

Introduction générale

Introduction générale:

Le littoral est un des systèmes physiques les plus dynamiques. Il est défini comme étant l'interface entre la terre, la mer et l'atmosphère. De ce fait, il est soumis aux différents processus physiques qui animent ces trois milieux.

L'accélération de l'élévation du niveau de la mer et la modification des processus physiques des environnements côtiers liés au changement climatique actuel, sont des facteurs naturels responsables de la dégradation des milieux côtiers. En effet, les tempêtes constituent avec l'élévation du niveau de la mer, le principal risque de submersion et d'érosion des littoraux. Elles sont considérées comme des contraintes majeures à l'urbanisation croissante des zones côtières.

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

L'évolution du trait de côte engendré par la combinaison d'un certain nombre de processus dynamiques, qui peuvent être marins et/ou continentaux, dépend des caractéristiques géomorphologiques des systèmes côtiers où la vitesse de recul par l'érosion marine dépend de la nature du substrat littoral.

La côte algéroise a un héritage géologique et géomorphologique, très varié, façonné par l'orogénèse alpine et les variations du niveau marin. Elle est formée d'un socle métamorphique constitué de gneiss, micaschistes et schistes ; de terrains magmatiques plutoniques et volcaniques ainsi que par des formations sédimentaires d'âge Mio-Plio-Quaternaire.

La zone littorale rocheuse d'El Marsa, qui fait l'objet de ce travail, comprend le cap d'El Marsa ainsi que son prolongement à est par la zone ouest de la baie de Zemmouri et à ouest par la zone est de la baie d'Alger. Cette zone côtière, correspondant à une petite portion du littoral algérois, offre à l'affleurement une grande variété de faciès lithologiques qui forment des falaises rocheuses.

L'objectif principal de ce travail est de mettre en évidence l'érosion préférentielle des différents faciès lithologiques qui affleurent dans la zone d'étude et de quantifier le taux de recul du trait

de côte par l'érosion marine pour les différentes natures de roches formant le substrat rocheux. L'étude a été faite à long et à court terme afin d'estimer l'accélération de l'érosion côtière liée au changement climatique.

Les travaux effectués dans le cadre de ce mémoire pour atteindre ces objectifs sont présentés dans les chapitres suivants :

Le chapitre I : est une synthèse des connaissances nécessaires pour traiter ce sujet.

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

Le chapitre III : dans lequel seront présentées les différents faciès lithologiques qui affleurent dans la région étudiée, leur cartographie ainsi que leurs caractéristiques pétrographiques et la déformation qui les affecte.

Le chapitre IV : dans lequel est présentée une analyse, pour une meilleure compréhension, des conditions environnementales extrêmes susceptibles de s'exercer sur les faciès géologiques qui affleurent dans la région d'El Marsa.

Le chapitre V : dans lequel sont présentées les modélisations hydrodynamiques issues de l'application du modèle « Mike 21 » pour réaliser des simulations de propagation des vagues et des courants dans ce travail. Ceci afin de donner quelques éléments de réponse à la problématique posée et de déterminer l'état de vulnérabilité de la zone d'étude.

Le chapitre VI : est consacrée à l'étude de l'évolution spatio-temporelle du trait de côte entre 1962 et 2024, à long et à court terme, en relation avec la nature géologique des terrains.

Le chapitre VII : dans lequel est présentée une discussion générale de l'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de cette étude.

Le chapitre VIII : dans lequel sera présentée une conclusion générale.

CHAPITRE I

Généralités

I.1. Définition du littoral:

Le littoral représente une zone charnière, un espace de rencontre et de transition entre les milieux terrestre et marin. C'est une frange aux multiples facettes, modelée par les interactions complexes des forces naturelles océaniques et continentales. Cette région côtière revêt une importance cruciale d'un point de vue écologique, économique et social, concentrant une grande partie des activités humaines.

La notion du littoral fait l'objet d'une grande variété d'approches selon les disciplines scientifiques. Le géographe Roland Paskoff, dans son ouvrage de référence "Les Littoraux" (**Paskoff, 2010**), définit le littoral comme suite: *"Le littoral est la frange à l'interface terre-mer; subissant à la fois l'influence marine et celle, plus ou moins forte, du milieu continental. C'est une bande côtière complexe, au contour instable, résultant de l'action combinée des agents marins et subaériens."*

D'un point de vue géomorphologique, le littoral est étudié comme une zone côtière façonnée par des phénomènes tels que l'érosion, le déplacement et l'accumulation de matériaux provoqués par les vagues, les courants et les marées. Selon Eric Bird géomorphologue et professeur émérite à l'Université de Melbourne, dans son livre "Coastal Geomorphology: An Introduction" (**Bird, 2008**)

"Le littoral est la zone de la surface terrestre qui est directement affectée par l'action des vagues marines et par les processus d'érosion, de transport et de sédimentation qui en découlent. C'est l'interface dynamique entre les environnements terrestres et marins, soumise à des forces antagonistes constantes qui modèlent un paysage côtier en perpétuelle évolution."

D'un point de vue politique et juridique en Algérie, le littoral est défini par l'article 7 de la loi du 5 février 2002. Selon cette loi, le littoral est délimité par la ligne des plus hautes eaux marines et s'étend sur une largeur de 800 mètres à partir de la côte, incluant la totalité de la largeur des massifs forestiers des plaines côtières, entre autres.

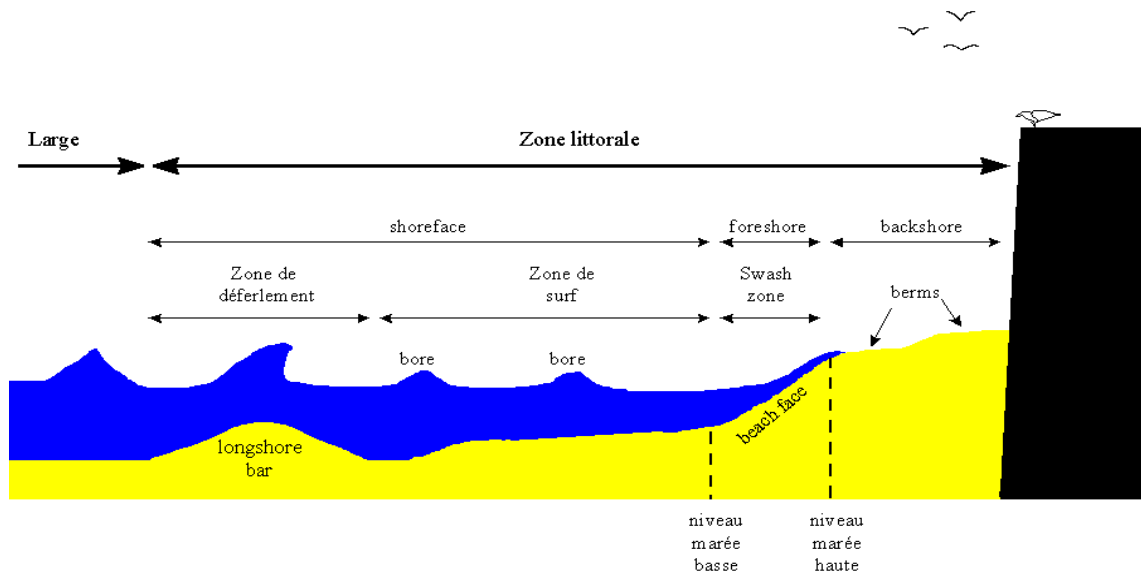


Figure 1 : Les éléments d'une zone littorale (Bousquet, 1990).

I.2. Système morphodynamique :

Un système morphodynamique se compose d'une formation géomorphologique qui répond aux changements d'un processus dynamique en ajustant sa morphologie. Cette adaptation vise à rétablir un équilibre morphologique face aux nouvelles conditions imposées. Dans le contexte des systèmes côtiers, la topographie des fonds marins subit constamment des ajustements en réponse à la dynamique de l'environnement fluide. Ces modifications morphologiques résultent d'un gradient de transport sédimentaire, lorsqu'il y a un changement dans les forçages environnementaux, cela entraîne une modification de la dynamique des fluides et du transport sédimentaire. L'interaction de ces processus avec la morphologie existante conduit à la formation d'une nouvelle morphologie. Des phénomènes de rétroaction sur la dynamique des fluides et le transport sédimentaire peuvent être positifs (autocontrôle, auto-organisation) ou négatifs (autorégulation) (Cowell and Thom, 1994). Un processus d'autocontrôle renforce la tendance à l'évolution du système en augmentant le déséquilibre, tandis qu'un processus d'autorégulation inverse cette tendance et ramène le système vers un équilibre (Stépanian, 2002).

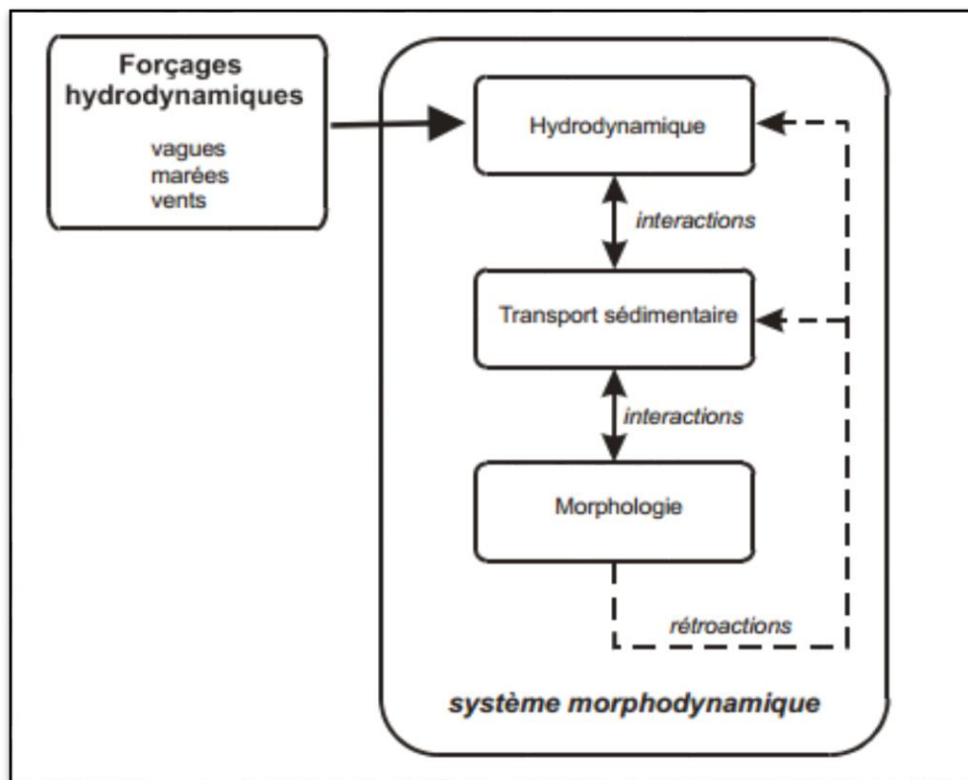


Figure 2 : Composants d'un système morphodynamique côtier (Stépanian, 2002).

I.3. Evolution spatio-temporelle des composantes du système littoral :

Le découpage spatio-temporel de l'évolution des composantes du système littoral implique une analyse fine des dynamiques spatiales et temporelles. Les entités littorales présentent des dynamiques distinctes à différentes échelles de temps et d'espaces, allant de micro-échelles à macro-échelles

Les différentes échelles qui caractérisent le système littoral (Fenster et al., 1993):

- Long terme échelle (géologique) qui s'étend du siècle au millénaire, sur des zones côtières pouvant aller du kilomètre à plusieurs dizaines de kilomètres (Deltas).
- Méso-échelle (pluriannuelle) est caractérisée par un pas de temps compris entre la dizaine de mois et quelques d'années (Flèche sableuse). Elle permet d'étudier les entités côtières de 1 à 10 Km.
- Micro-échelle (journalière à interannuelle) consiste à étudier les formes sédimentaires de petite taille (inférieurs à 0.1 Km) (Ligne de côte, dunes, barres, etc.)

La figure 3 montre le modèle de découpage proposé par (Dubarbier, 2014).

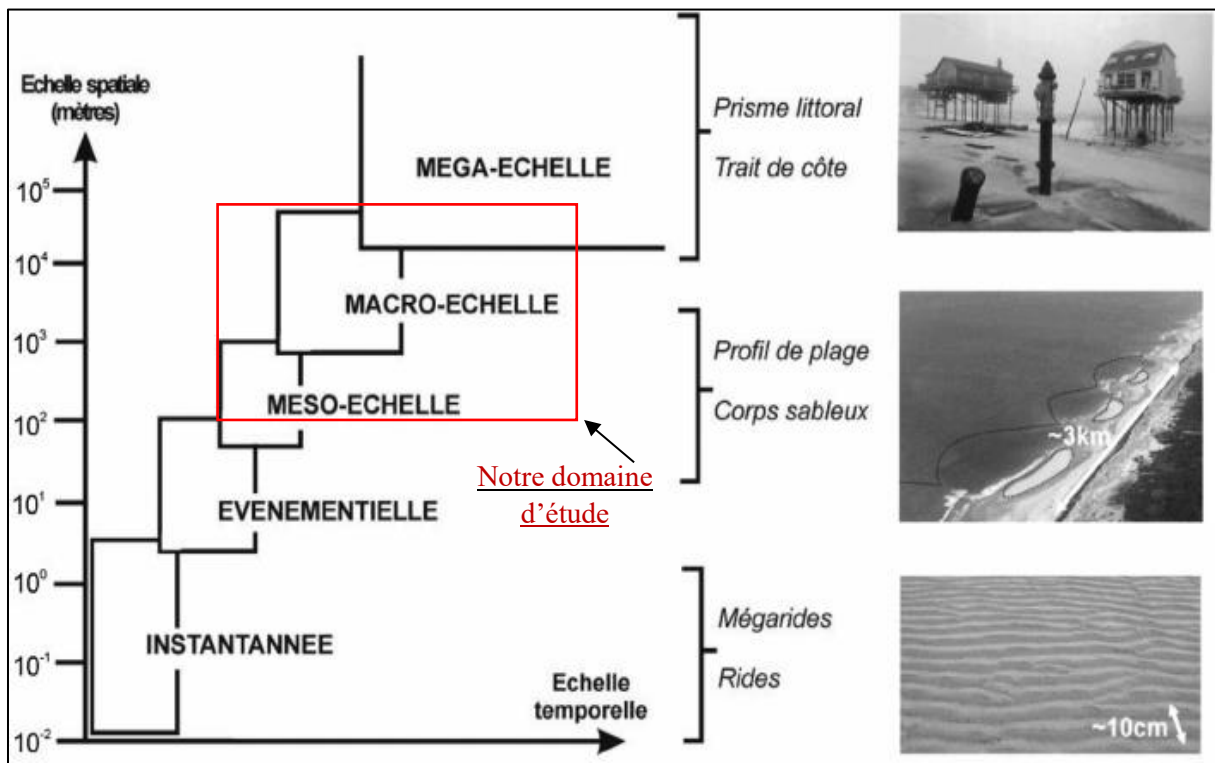


Figure 3 : Relation spatio-temporelle des systèmes morphodynamiques littoraux (Dubarbier, 2014).

I.4. Les facteurs de l'évolution des littoraux :

I.4.1. L'action du vent :

Le vent joue un rôle essentiel dans le déplacement des masses de sable, influant directement sur le mouvement éolien à la surface terrestre, et de manière indirecte en générant les courants et les vagues (Allouhi et al., 2017).

Ce déplacement des masses d'air peut avoir un impact significatif sur les côtes rocheuses par différents processus :

- Érosion éolienne (déflation) : Le vent transporte des particules de sable et de poussière qui, en s'abattant sur les roches, les usent progressivement par abrasion. Ce phénomène est particulièrement marqué sur les falaises et les promontoires rocheux exposés aux vents dominants (Pye and Tsoar, 2008).
- Corrasion éolienne : Les particules transportées par le vent agissent comme des agents abrasifs, érodant les surfaces rocheuses par impact et frottement, ce processus contribue à la formation de formes caractéristiques telles que les taffonis (cavités) et les alvéoles (Mustoe, 1982).

- Formation de dunes et de cordons littoraux : Le vent transporte et dépose le sable, créant des dunes et des cordons littoraux qui peuvent protéger ou éroder les falaises rocheuses en modifiant les conditions d'érosion (**Pye and Tsoar, 2008**).
- Altération par le sel : Les embruns marins transportés par le vent déposent du sel sur les roches côtières, favorisant leur altération chimique et physique

I.4.2. L'action des vagues :

Les vagues sont des ondulations de la surface de l'eau générées par le vent soufflant sur une étendue d'eau relativement restreinte (**Komar, 1977**). Au-delà de cette zone de formation l'onde sortie devient la houle. Les houles sont caractérisées par leur hauteur, leur longueur d'onde, leur période et leur célérité. En se déplaçant vers la côte elles arrivent à une zone de transformation par l'effet du fond. La houle déferle sur la zone proche de la côte, dès que la profondeur est inférieure à 2 fois la hauteur des vagues.

L'action des vagues sur le littoral est un processus crucial qui façonne les côtes en érodant, transportant et déposant les sédiments (**Hughes and Masselink, 2003**). Lorsque les vagues atteignent la zone de déferlement, une partie de leur énergie est dissipée, entraînant un transport sédimentaire cross-shore (perpendiculaire à la côte) et long shore (parallèle à la côte) (**Davidson-Arnott et al., 2019**), ce phénomène dynamique est responsable de l'érosion des plages, de la formation de barres sableuses sous-marines et de la migration des embouchures de cours d'eau (**Komar, 1977**).

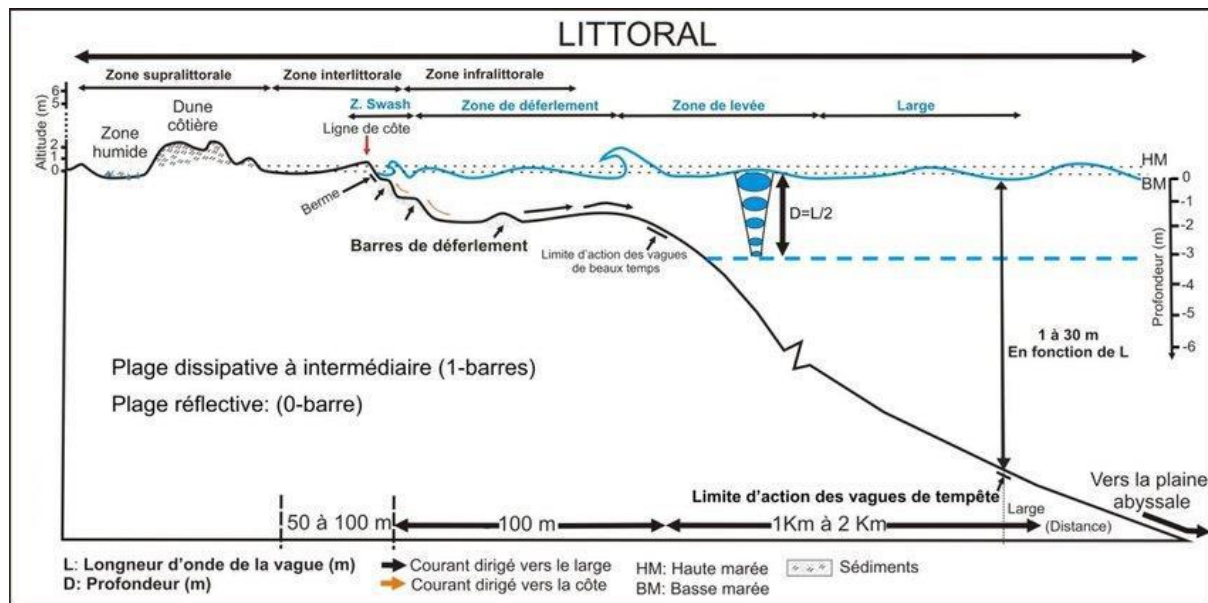


Figure 4: Processus hydrodynamiques induits par les vagues incidentes sur un profil de plage microtidal (Davidson-Arnott et al., 2019).

I.4.3. Les courants :

Les courants marins se réfèrent aux flux d'eau de mer à grande échelle, se déplaçant à la fois horizontalement et verticalement. Ils résultent de diverses forces telles que les vents, les marées, les disparités de densité (liées à la température et à la salinité) et l'effet de Coriolis (Tomczak and Godfrey, 2003).

Selon (Castelle et al., 2006), on distingue quatre types de courants côtiers principaux :

Les courants de dérive littorale : Ils sont parallèles à la côte et résultent de l'angle d'incidence oblique des vagues par rapport au rivage. Ils transportent les sédiments le long du littoral, provoquant de l'érosion ou de l'accrétion des plages.

Les courants de retour : Perpendiculaires à la côte, ils se forment lorsque les vagues déferlent et transportent l'eau vers le large, créant des courants de retour qui peuvent être dangereux pour les baigneurs.

Les courants de marée : Générés par la force des marées, ils peuvent être alternatifs (flux et reflux) ou résiduels (courant net résultant). Ils influencent le transport des sédiments et des polluants.

Les courants d'upwelling et de downwelling : Ils sont perpendiculaires à la côte et provoqués par les vents parallèles ou obliques au rivage. L'upwelling amène les eaux froides et riches en nutriments vers la surface, tandis que le downwelling entraîne les eaux de surface vers le fond.

(Castelle et al., 2006) soulignent que ces courants interagissent de manière complexe, créant des circulations tridimensionnelles qui modèlent la morphologie côtière et influencent les processus biogéochimiques.

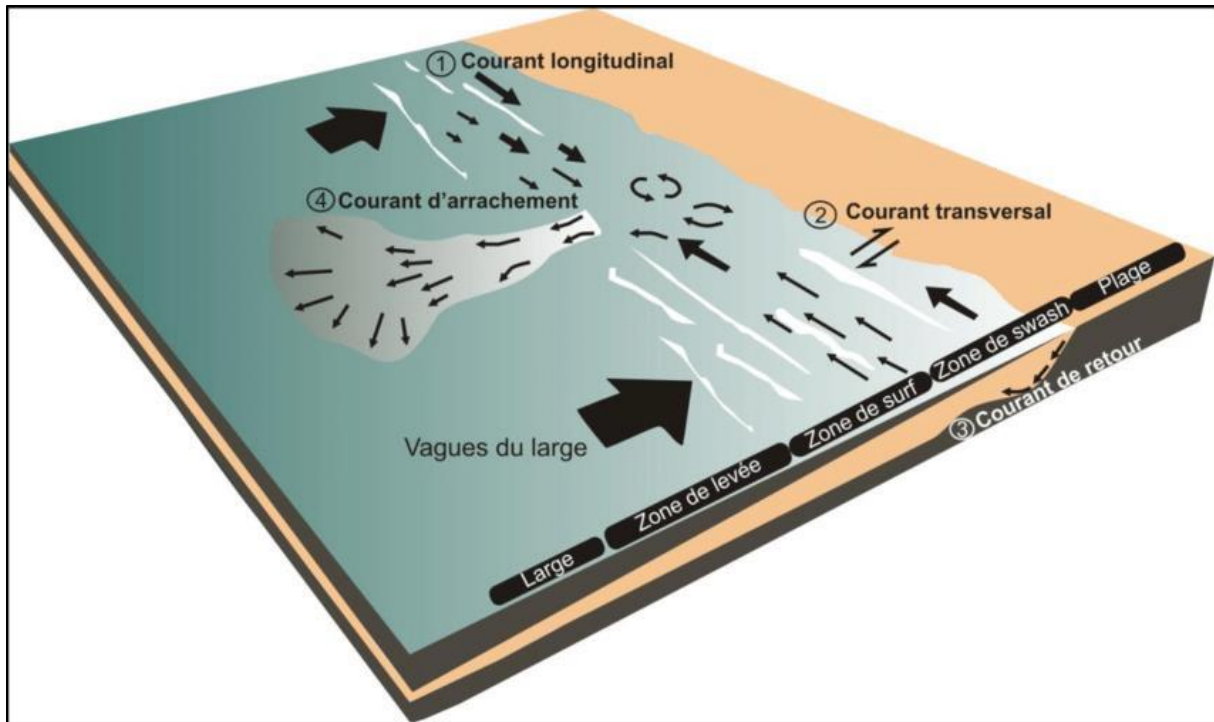


Figure 5: Les différents courants générés par les vagues auprès de la côte (Short, 1999).

I.4.4. Les eaux découlement et d'infiltration :

Les eaux d'écoulement sont les eaux qui s'écoulent à la surface du sol après les précipitations (pluie, fonte des neiges/glaces). On distingue plusieurs types d'eaux d'écoulement :

Le ruissellement superficiel : Il se produit lorsque le taux de précipitation dépasse le taux d'infiltration du sol. L'eau s'écoule alors directement à la surface en suivant la pente du terrain (Ward and Trimble, 2004).

L'écoulement hypodermique (ou sub-surfacique) : Il s'agit de l'écoulement latéral de l'eau dans les couches superficielles du sol, au-dessus d'une couche moins perméable ou d'un substrat rocheux (Dunne and Leopold, 1978).

L'écoulement concentré : Lorsque le ruissellement se concentre dans les dépressions du terrain, il forme des rigoles, des ravines et des cours d'eau temporaires (Selby, 1993).

Les eaux d'écoulement jouent un rôle essentiel dans le cycle hydrologique en alimentant les cours d'eau, les lacs et les océans. Cependant, un ruissellement excessif peut également causer des inondations, de l'érosion des sols et du transport de sédiments ainsi que de polluants.

Les eaux d'infiltration sont les eaux qui pénètrent dans le sol à partir de la surface. Ce processus est essentiel pour la recharge des nappes phréatiques, le maintien des écosystèmes humides et la régulation du cycle hydrologique. On distingue trois processus principaux des eaux d'infiltration :

- **L'infiltration** : C'est le processus par lequel l'eau pénètre dans le sol à travers les pores et les fissures présents à la surface. Le taux d'infiltration dépend de facteurs tels que la texture et la structure du sol, la teneur en eau initiale, la couverture végétale et l'intensité des précipitations (Hillel, 1998).
- **La percolation** : Une fois infiltrée, l'eau se déplace verticalement à travers les couches de sol et de roche perméables sous l'effet de la gravité. Ce processus, appelé percolation, alimente les nappes phréatiques et les aquifères souterrains (Freeze and Cherry, 1979).
- **L'écoulement souterrain** : L'eau souterraine peut également se déplacer latéralement, créant un écoulement souterrain qui contribue à l'alimentation des sources, des cours d'eau et des zones humides (Ward and Trimble, 2004).

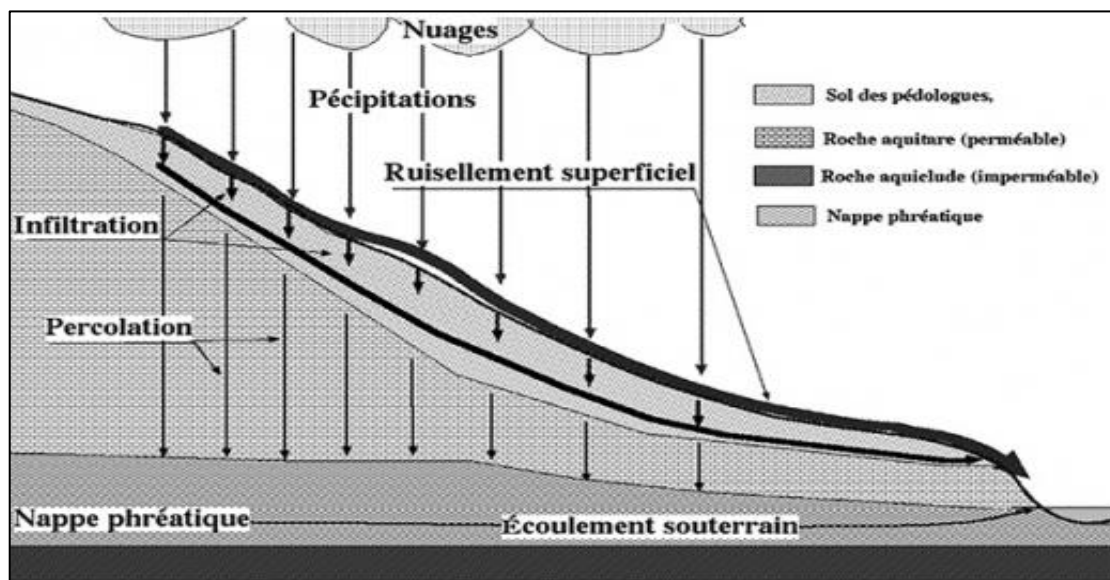


Figure 6 :Schéma simplifié des eaux d'infiltration (Giret, 2023).

I.4.5. L'action du gel et du dégel d'eau infiltrée :

La gélification de l'eau interstitielle (infiltrée) conduit à la fragmentation des roches cohérentes. En effet, l'augmentation du volume de l'eau lorsqu'elle passe de l'état liquide à l'état solide est

responsable de phénomènes de fragmentation (calcaires compacts et granites) et de pulvérisation (craie) des roches : c'est la cryoclastie. L'eau qui s'infiltré dans le substrat, qui se dilate en gelant, participe donc à l'érosion du substrat.

I.4.6. Les actions chimiques de l'eau de mer et de l'eau d'infiltration:

L'eau de mer exerce diverses actions chimiques sur les formations rocheuses côtières en raison de sa composition riche en sels dissous. Ces actions chimiques contribuent à l'érosion et à l'altération des roches, en parallèle des processus mécaniques liés aux vagues et aux courants.

La dissolution est un processus clé par lequel les ions hydrogène (H^+) de l'eau de mer attaquent les minéraux comme le calcaire, entraînant leur dissolution progressive (**Trenhaile, 2011**). L'hydrolyse des minéraux silicatés par les ions H^+ conduit également à la décomposition chimique des roches.

Les roches magmatiques volcaniques qui se mettent en place dans l'eau de mer subissent de l'hydrothermalisme qui correspond à un phénomène d'altération chimique liée à une réaction entre le magma encore chaud avec les ions de l'eau de mer.

De plus, l'oxydation des minéraux, notamment ceux contenant du fer, est facilitée par l'oxygène dissous dans l'eau de mer).

Lorsque l'eau de mer s'infiltré dans les fissures et les pores des roches, l'évaporation peut provoquer la cristallisation des sels dissous, exerçant une pression de cristallisation qui fragmente la roche.

De même, l'eau d'infiltration peut également fragiliser les roches par l'altération chimique de leurs minéraux. Les conséquences du phénomène dépendent de la nature du substrat. Par exemple :

Les calcaires subissent la dissolution, élargissant les fractures et les cavités, qui facilite le travail d'érosion par les vagues.

Les falaises d'argiles peuvent se gorger d'eau, et être plus propice à des éboulements, dû à l'infiltration. En effet, la structure des argiles en feuillets, leur permet de capter l'eau sous forme d'ion OH^- dans leurs espaces interfoliées.

Pour des roches magmatiques, formées presque entièrement de minéraux silicatés comme le granite, les conséquences sont beaucoup plus faibles car les processus d'hydrolyse sont plus longs à se mettre en œuvre.

I.4.7. Les actions biologiques :

Enfin, les organismes marins comme les algues, les bactéries et les mollusques peuvent contribuer à l'altération biochimique des roches en sécrétant des substances acides ou en perforant la roche (**Goudie and Viles, 2016**). L'efficacité de ces processus chimiques dépend de facteurs tels que la composition minéralogique de la roche, la température, le pH et la salinité de l'eau de mer.

I.5. Morphodynamique des côtes :**I.5.1. Les plages :**

Les plages se transforment constamment sous l'influence des vagues, des courants, des marées et des vents, résultant d'une interaction complexe entre les processus marins, terrestres et atmosphériques. Composées de sédiments comme le sable, les graviers ou les galets, elles représentent des environnements côtiers dynamiques et temporaires (**Masselink and Gehrels, 2014**).

La morphologie des plages est définie par leurs limites horizontales, qui s'étendent de la position des basses mers de vive eau jusqu'aux hautes mers de vive eau. Cette étendue est principalement influencée par l'amplitude des marées. Cependant, d'autres facteurs clés déterminent les caractéristiques morphologiques spécifiques d'une plage.

La hauteur des vagues, qu'elles soient de beau temps ou de tempête, ainsi que la fréquence des tempêtes, jouent un rôle majeur dans le façonnement de la pente et du profil de la plage.

Les conditions de forte houle tendent à éroder et aplatir le haut de la plage, tandis que les périodes de faible énergie des vagues favorisent l'accumulation de sédiments et la formation de bermes et de crêtes.

La granulométrie des sédiments, c'est-à-dire la taille des particules de sable ou de galets, affecte également la morphologie de la plage. Les plages composées de sédiments plus grossiers ont généralement une pente plus abrupte, tandis que celles constituées de sables fins présentent souvent un profil plus doux et étendu.

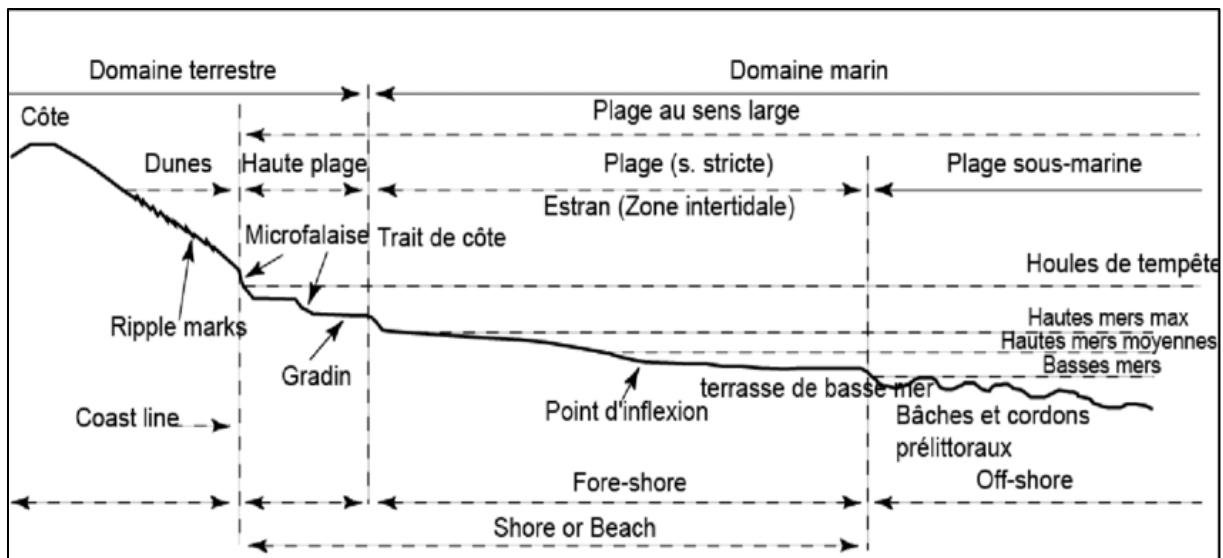


Figure 7 : Principales unités morphologiques d'une plage et ses agents dynamiques (Sagne et al., 2019).

I.5.2. Les falaises :

Les falaises sont des formations géologiques côtières caractérisées par une paroi rocheuse abrupte et escarpée faisant face à la mer. Elles représentent l'interface entre le domaine continental et le domaine marin, soumise à l'érosion par les agents atmosphériques et marins.

On distingue différents types de falaises côtières en fonction de leur activité érosive et de leur relation avec le niveau marin :

Les falaises vives appelées aussi falaises à érosion active, sont directement attaquées par les vagues à leur base. Elles subissent une érosion intense par les processus mécaniques et chimiques, entraînant leur recul progressif (Emery and Kuhn, 1982).

Les falaises mortes ou falaises fossiles ne sont plus en contact avec la mer en raison d'un recul du trait de côte ou d'un abaissement du niveau marin relatif. Bien que stabilisées, elles gardent la morphologie typique des falaises mais leur évolution est essentiellement due aux processus subaériens (Trenhaile, 2011).

Les falaises plongeantes correspondent à des falaises immergées dont la base se prolonge sous le niveau des eaux. Elles restent soumises aux forces hydrodynamiques marines et peuvent être active ou fossile (Sunamura et al., 2014).

I.5.2.1. Processus de formation des falaises :

La formation d'une falaise résulte de l'action érosive de la mer sur un versant continental. Ce processus commence par l'entaille de la côte par les vagues et les courants marins, qui progressivement enlèvent des morceaux de matériaux rocheux du flanc de la côte. Ces matériaux rocheux peuvent être constitués de diverses formations géologiques, comme des couches de calcaire, de grès ou de schiste. Au fil du temps, cette érosion continue creuse progressivement le versant continental, créant une paroi rocheuse abrupte qui est caractéristique d'une falaise. Cette formation peut être attribuée à plusieurs causes :

- L'érosion subaérienne (A) : l'usure d'un substrat rocheux ou meuble.
- Des produits d'éruptions volcaniques (B) :
- Des mouvements tectoniques : la création de failles qui affectent la structure des falaises (C)

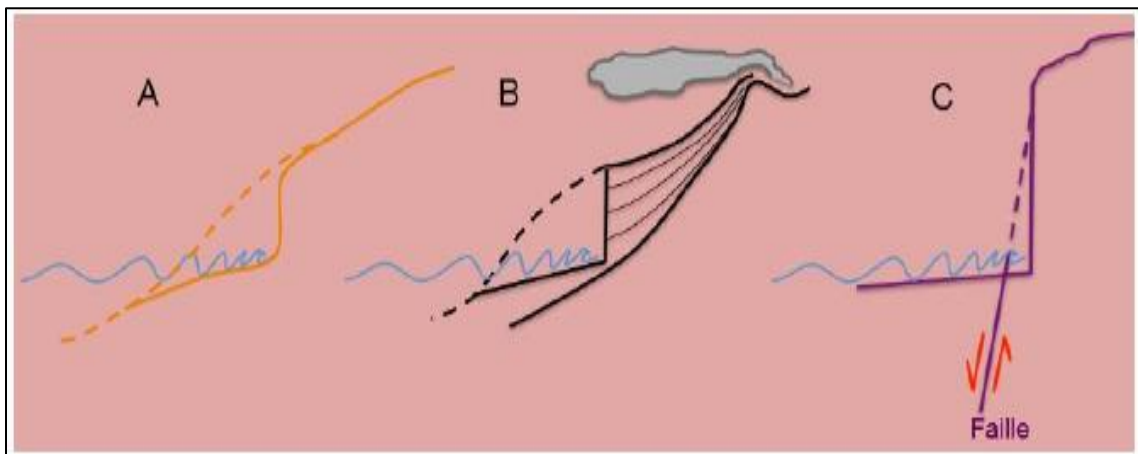


Figure 8 :Schéma de la formation des falaises.(Cour géomorphologie littoral. Mme Fezaa)

I.5.2.2. L'influence subaérienne et marine :

Les processus subaériens et marins sont des éléments cruciaux dans l'érosion et la transformation morphologique des falaises.

Les falaises sont soumises à divers processus d'érosion d'origine subaérienne (actions sommitales), les variations de température jouent un rôle clé, notamment par le phénomène de gélivation (gélifraction/cryoclastie) où les cycles de gel-dégel de l'eau présente dans les fissures des roches provoquent une fragmentation progressive. Les vents participent également à la dégradation des falaises avec leurs effets érosifs sur les parois fragiles. Les précipitations influencent l'érosion de plusieurs manières : les infiltrations d'eau dans les formations argileuses

et marneuses induisent des phénomènes de plastification, tandis que la rétention interne d'eau et d'air dans les diaclases accélère l'altération chimique et physique des roches. Le ruissellement crée diverses entailles allongées à la base des falaises, formant des cônes de déjection constitués par l'accumulation de débris arrachés en amont. Cette combinaison de processus subaériens liés aux températures, aux vents, aux précipitations et au ruissellement façonne continuellement la morphologie des falaises côtières.

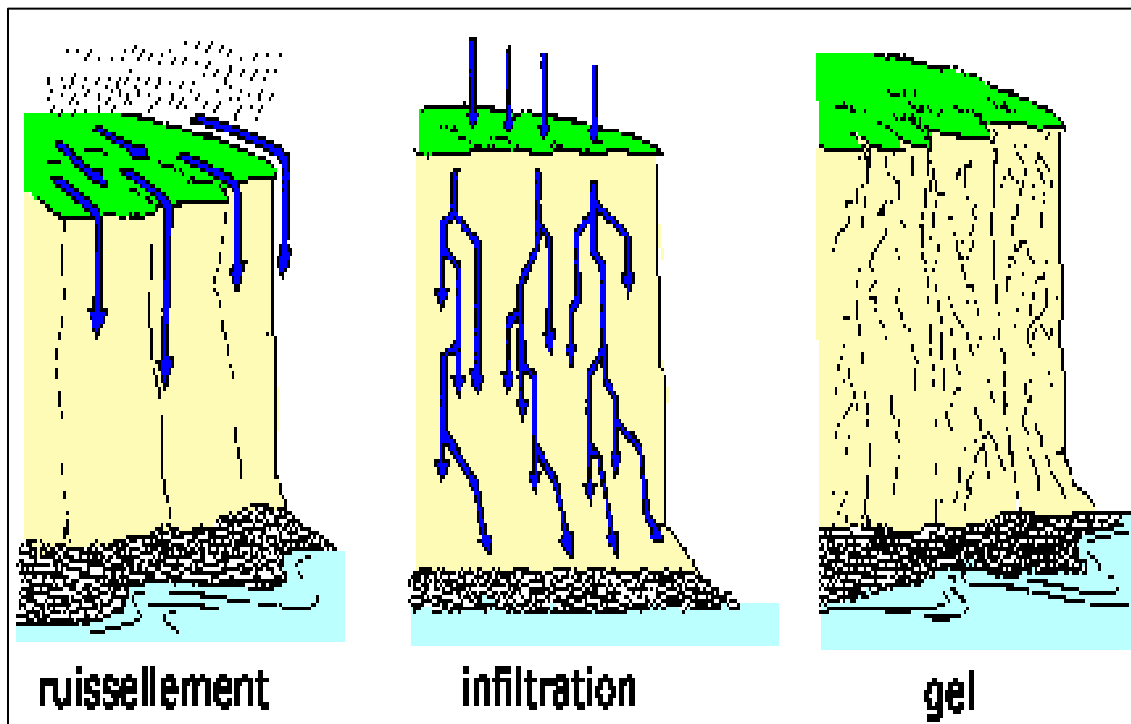


Figure 9: L'influence des facteurs subaériens sur les falaises

<https://www.u-picardie.fr/beauchamp/littoral/GRENOBLE-3.html>

Les falaises côtières sont soumises à l'action érosive constante des forces marines, en particulier la houle et les embruns. La houle, qui représente les vagues océaniques de grande amplitude, exerce une pression mécanique considérable sur la base des falaises lors de son déferlement. Cette action répétée finit par fragiliser et déstabiliser les roches, provoquant leur effritement et l'arrachement de blocs entiers. De plus, les embruns, ces fines gouttelettes d'eau de mer projetées par le vent et les vagues, transportent des sels marins qui pénètrent dans les fissures et les pores des roches. Lorsque ces sels cristallisent, ils exercent une pression de désagrégation qui contribue à l'altération chimique et à la fragmentation des falaises. L'action combinée de la houle et des embruns accélère ainsi le processus d'érosion des falaises, façonnant progressivement leur morphologie et entraînant un recul progressif du trait de côte.

I.6. Notion de trait de côte :

Le trait de côte représente la ligne de démarcation entre la terre et la mer. Pour les côtes de type falaise, le trait de côte est défini comme le pied de la falaise, c'est-à-dire l'endroit où la base rocheuse abrupte rencontre la plage ou l'estran. Cette limite peut être facilement identifiable lorsque la falaise est constituée de roches résistantes et présente une pente raide. Cependant, dans certains cas, la transition peut être plus progressive, avec la présence de talus ou d'éboulis rocheux, rendant la délimitation du trait de côte plus complexe (**Sunamura et al., 2014**).

Pour les côtes de type plage, le trait de côte correspond généralement à la limite supérieure du rivage atteinte par les plus hautes marées ou par les vagues de tempête. Cette limite peut être matérialisée par une berme, une microfalaise d'érosion, une ligne de débris ou de végétation. Cependant, la position précise du trait de côte sur les plages peut varier considérablement en fonction des conditions météorologiques, des cycles de marée et des processus d'érosion ou d'accumulation sédimentaire (**Boak and Turner, 2005**).

I.7. Impact du changement climatique sur les littoraux :

Le changement climatique a un impact significatif sur les littoraux à travers le monde. L'élévation du niveau de la mer, résultant de la dilatation thermique des océans et de la fonte des calottes glaciaires, est l'un des principaux facteurs affectant les zones côtières. Selon le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2021), le niveau moyen des océans pourrait s'élever de 0,61 à 1,10 mètre d'ici à 2100 dans un scénario d'émissions élevées.

Cette élévation du niveau marin entraîne une érosion accrue des plages et des falaises, une augmentation de la fréquence et de l'intensité des submersions côtières, ainsi qu'une intrusion d'eau salée dans les aquifères côtiers. De plus, les événements météorologiques extrêmes, tels que les tempêtes et les cyclones, dont la fréquence et l'intensité sont exacerbées par le changement climatique, amplifient les processus d'érosion et de submersion des littoraux (**Nicholls and Cazenave, 2010**).

Les écosystèmes côtiers, comme les mangroves, les marais salants et les récifs coralliens, subissent également des pressions accumulées en raison de l'élévation des températures, de l'acidification des océans et des changements dans les régimes hydrologiques, menaçant leur capacité de protection naturelle contre l'érosion côtière (**Alongi, 2008**).

CHAPITRE 2 :

Caractéristiques géomorphologiques, climatiques et hydrodynamiques de la zone d'étude

II.1. Situation géographique :

Le littoral algérois s'étend sur de nombreux kilomètres le long de la mer Méditerranée, avec trois baies principales qui se distinguent de l'ouest vers l'est :

la baie de Bousmail, la baie d'Alger, la baie de Zemmouri.

Notre secteur d'étude correspond à la zone rocheuse d'El Marsa qui se situe essentiellement à l'extrémité ouest de la baie de Zemmouri et chevauchant l'extrémité ouest de la baie d'Alger, à environ 25 km à l'est du centre-ville d'Alger. Elle est bordée par la mer Méditerranée au nord et à l'ouest, par la commune de Ain taya à l'est, et par bordj el kiffan et bordj el bahri au sud.

Les coordonnées géographiques de la zone d'étude sont les suivantes:

Latitude entre 36°43'08"N et 36°54'20"N

Longitude entre 3°12'45"E et 3°24'45"E

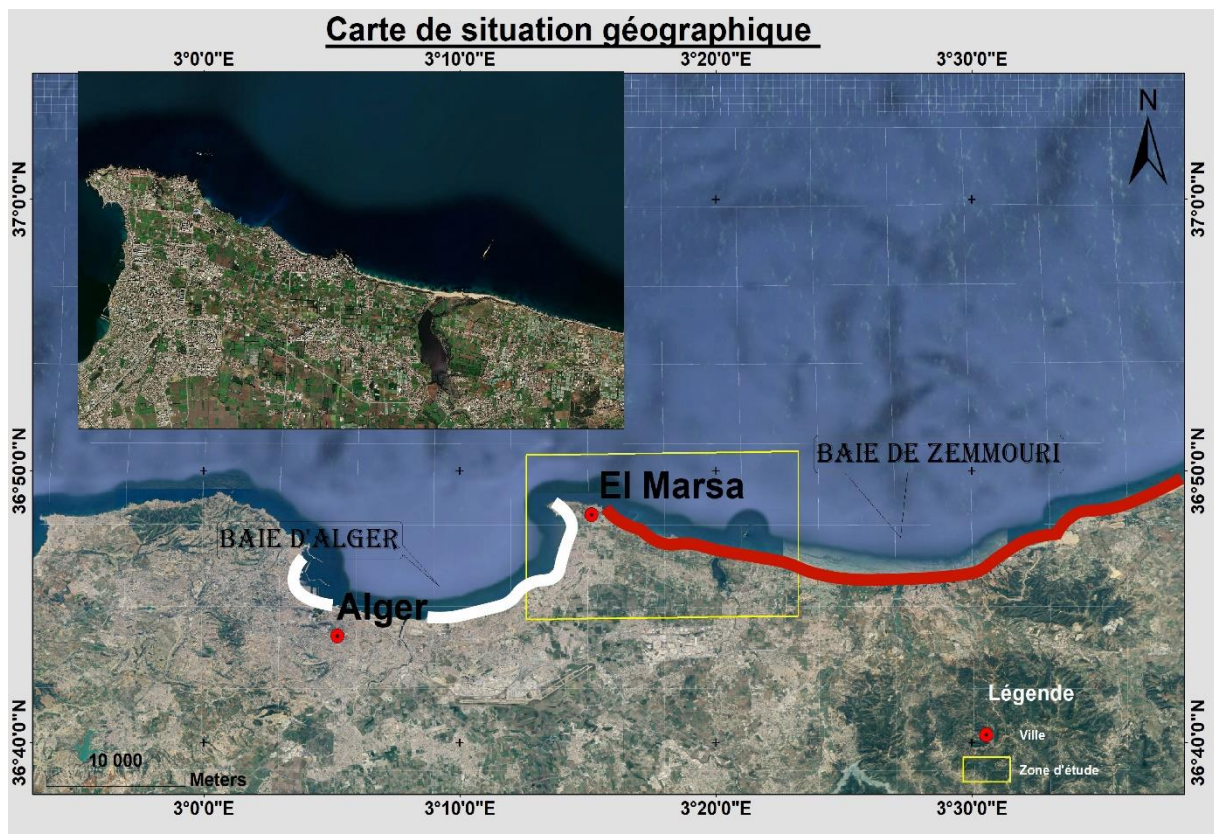


Figure 10 :Carte de la situation géographique de la zone d'étude.(ArcGIS Online)

II.2. Cadre géomorphologique :

Notre zone d'étude présente une gamme diversifiée de formes littorales, comprenant des falaises, des plages sableuses et des dunes, ces caractéristiques sont le résultat de l'interaction entre les processus morpho-dynamiques et la géologie du site.

La diversité morphologique de cette zone est influencée et façonnée par les processus hydrodynamiques tels que les vagues, les houles et les courants, ainsi que par les processus climatiques tels que les précipitations et les variations de température.

II.2.1. Typologie de la côte :

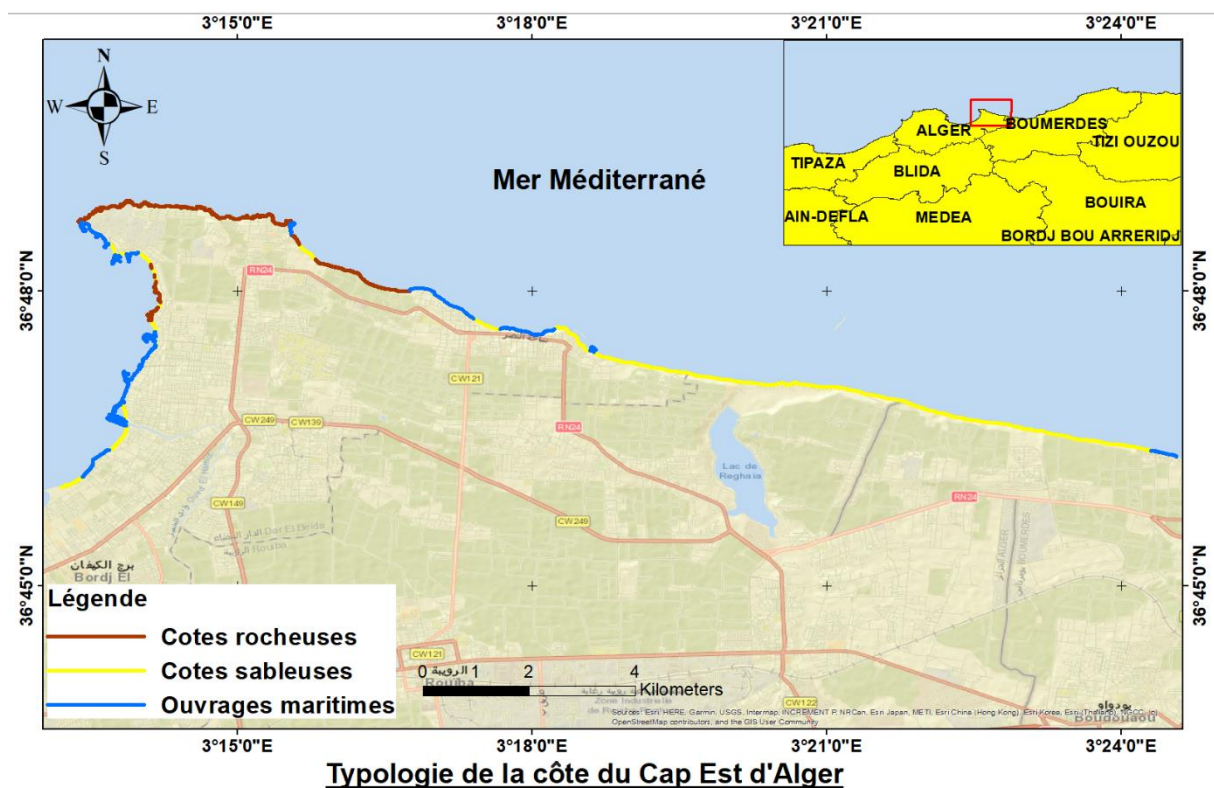


Figure 11 : Typologie de la côte de la zone d'étude.(ArcGIS Online)

II.2.2. Le réseau hydrographique :

Oued El Hamiz : La superficie du bassin versant est de 160 km², son embouchure se situe près du cap Matifou. Il débouche à l'est de la baie d'Alger près du cap Matifou. La présence du barrage El Hamiz en amont réduit considérablement les apports solides venant en mer (Houma, 2009).

Oued Reghaia : son bassin versant couvre une superficie d'environ 110 km², délimité par les massifs de Bouzaréah au nord et du Sahel au sud, prenant sa source dans les hauteurs de l'Atlas Blidéen, l'oued s'écoule sur une longueur d'approximativement 25 km avant de se jeter dans la Méditerranée au niveau de la plage de Reghaia, son embouchure se trouve à proximité immédiate de l'aéroport international Houari Boumediene. Caractérisé par un régime hydrologique typique des oueds algérois, avec des crues violentes en période hivernale, l'oued Reghaia a été fréquemment sujet à des inondations causant d'importants dégâts matériels et humains dans les zones urbanisées traversées (HABI, 2011).



Figure 12: Réseau hydrographique de la zone d'étude.

II.3. Les données climatiques :

Le climat de notre zone d'étude est typiquement méditerranéen, caractérisé par la présence simultanée de deux saisons distinctes : une saison chaude et sèche et une saison relativement froide et pluvieuse.

II.3.1. Les températures:

En règle générale, les températures dans les régions côtières tendent à se modérer en raison de leur proximité avec la mer.

Dans le cas de notre zone d'étude et selon les données climatiques fournies par la station de Dar El Baida à 25 m d'altitude, les températures estivales sont relativement élevées avec 38,3 C° en août, 35,8 C° en juillet et 30,7 C° en septembre. Par contre la température moyenne en janvier est de 6,2 C°

-Une période relativement froide allant de novembre à mars avec un minimum enregistré en mois de février de 0,7 C°

-Une période chaude couvre les autres mois avec une température maximale enregistrée en juillet à 4

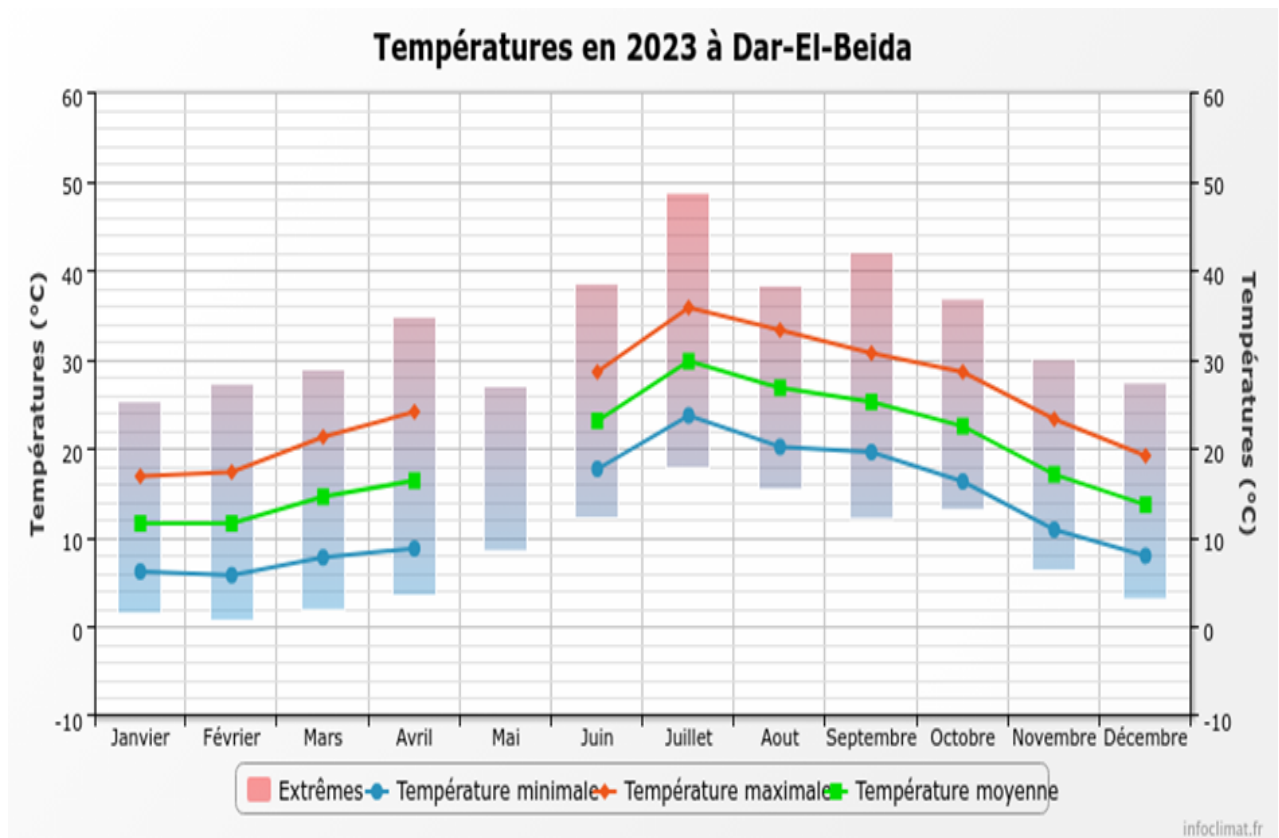


Figure 13: Diagramme de température de station Dar El Baida durant l'année 2023.
(Office Nationale Météorologique)

II.3.2. Les précipitations :

Dans l'ensemble, les précipitations sont importantes en automne, elles sont particulièrement intenses en hiver et s'accompagnent souvent d'orages. A l'inverse, elles sont peu abondantes en été et connaissent des fluctuations diverses au printemps.

La valeur annuelle de la précipitation donnée par la station de Dar El Beida couvrant l'année 2023 est de l'ordre de 386,7 mm

Les précipitations se concentrent du mois de novembre jusqu'en mars, avec un maximum hivernal de l'ordre 122,9 mm en Janvier ; celles-ci diminuent progressivement du mois de d'avril jusqu'en Août.

Tableau 1:: Les précipitations mensuelles en mm de Dar El Beida durant l'année 2023

mois	précipitation en mm
janvier	122.9
février	51.7
Mars	25.9
Avril	1.0
Mai	00
Juin	26.7
juillet	0.4
Aout	00
septembre	14.9
octobre	4.0
novembre	62.1
décembre	74.1
annuelle	386.7

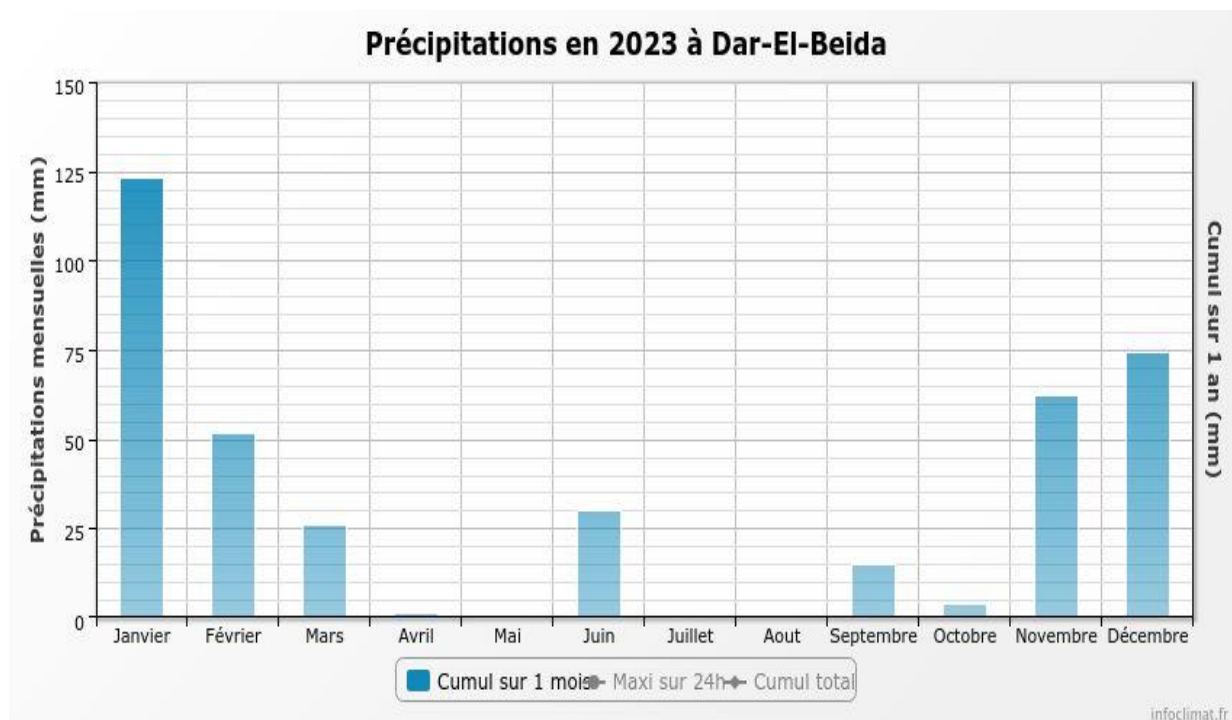


Figure 14: Diagramme des précipitations mensuelles en mm de Dar El Beida durant l'année 2023. (Office Nationale Météorologique)

II.3.4. Le vent :

Pour une zone côtière, la connaissance du régime général des vents au large est d'une extrême importance dans le mouvement superficiel des eaux marines. En effet, ils sont des générateurs des houles au large et des courants superficiels, leur impact croît avec leur vitesse (**Dordor et al., 1980**).

Les données du vent (direction et vitesse) ont été extraites du site (**www.climatewave.com**) pour une période de 28 ans, de 1992 à 2020. Ces dernières ont permis de réaliser les roses des vents à l'aide du logiciel Mike21.

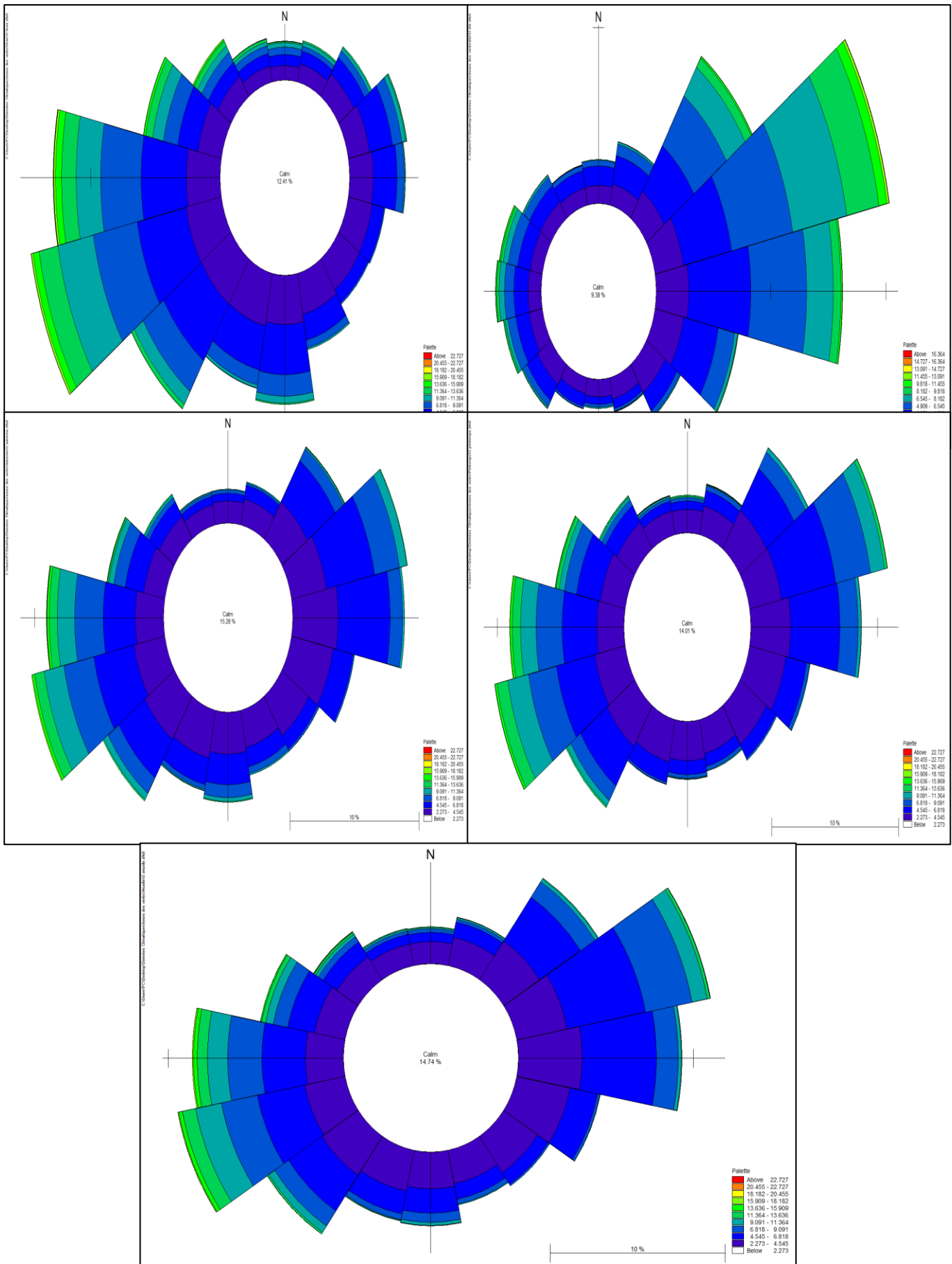


Figure 15: Roses trimestrielles et annuelle du vent au large de la zone d'étude entre 1992 et 2020

II.4. Les données hydrodynamiques :

II.4.1. La houle :

La houle est une onde qui se propage à la surface de la mer. Étant le facteur le plus important dans la dynamique sédimentaire des petits fonds, sa direction de propagation est liée à celle du vent et la profondeur (**Leclaire, 1972**).

Les données de la houle sont obtenues à partir du site (**www.climatewave.com**) où elles sont archivées sous forme de fichiers numériques. Ces fichiers comprennent les fréquences annuelles et saisonnières d'apparition de la houle au large, couvrant une période de 28 ans, de 1992 à 2020.

Les données utilisées proviennent des mesures effectuées en mer, spécifiquement au large de la baie de Zemmouri, aux coordonnées géographiques précises de 37° N et 3° 31' E.

L'analyse des données sur les houles au large des côtes algériennes révèle que la baie de Zemmouri est exposée à l'agitation des vagues provenant principalement de quatre directions : l'ouest, le nord, le nord-est et le nord-nord-est. Toutefois, les vagues les plus fréquentes pendant la période hivernale proviennent des secteurs nord-est et ouest.

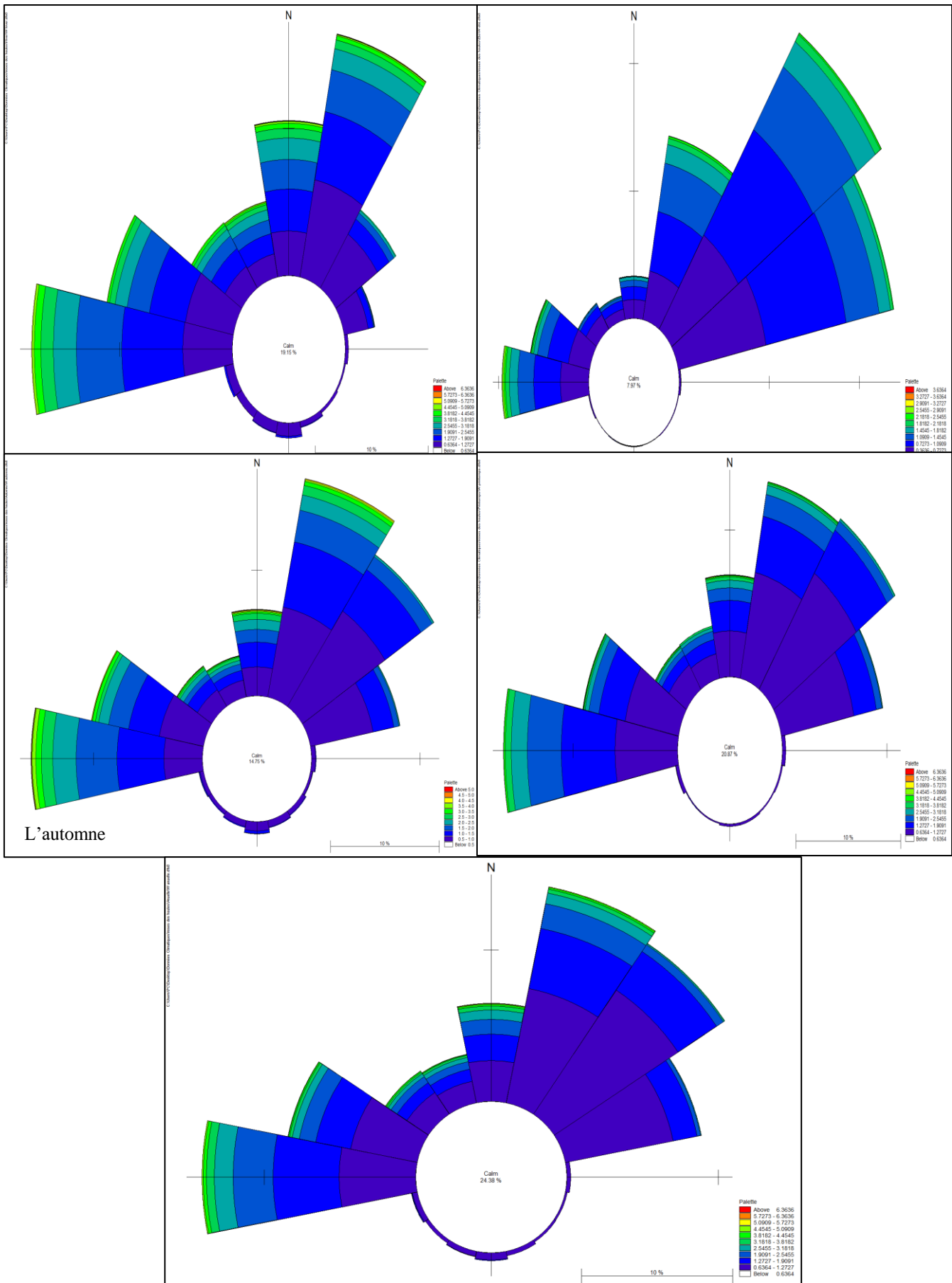


Figure 16: Roses trimestrielles et annuelles des houles au large de la zone d'étude entre 1992 et 2020

II.4.2. Les courants de dérive littoral :

Le courant de dérive littorale est un mouvement parallèle au rivage de masse d'eau sous l'impact des vagues, qui arrive à la côte avec un angle d'incidence entre 45 et 50%.

Dans notre zone d'étude, les vents et les houles de direction Nord-Est provoquent une dérive littorale de l'Est vers l'Ouest alors que les houles et les vents de direction ouest et nord-ouest provoquent une dérive littorale de l'Ouest vers l'Est (SALLAYE, 2021).

CHAPITRE III:
CONTEXTE GEOLOGIQUE

III.1. Introduction:

La chaîne alpine d'Afrique du Nord ou chaîne des Maghrébides fait partie de l'orogène alpin périméditerranéen (Durand-Delga, 1969) d'âge Tertiaire qui s'étend de l'Ouest à l'Est sur 2000 km depuis l'Espagne du Sud à l'arc calabro-sicilien.

Dans ce domaine en forme d'anneau très aplati, on distingue classiquement les zones internes, situées à l'intérieur de l'anneau et représentées aujourd'hui par différents massifs, dispersés le long de la côte méditerranéenne et les zones externes situées à sa périphérie.

Le nord de l'Algérie est constitué de différentes unités géologiques et structurales qui font partie de la chaîne des Maghrébides. La côte algéroise fait partie des zones internes. Elle est composée essentiellement par d'un socle métamorphique, de terrains magmatiques et de formations sédimentaires.

Le socle métamorphique est formé de gneiss, micaschistes, schistes. Il affleure dans les massifs de Chenoua et d'Alger, à Sidi Fredj ainsi qu'à Cap Matifou. Les terrains magmatiques sont de nature plutonique ou volcanique. Les faciès plutoniques correspondent essentiellement à des granites. Cependant, les roches volcaniques sont de composition variable correspondant à des basaltes, andésites et rhyolites. Les terrains sédimentaires sont de différentes natures et d'âge Mio-Plio-Quaternaire.

La zone littorale rocheuse d'El Marsa, située à l'est, en continuité, de la baie d'Alger a un riche patrimoine géologique et géomorphologique façonné par une longue histoire marquée par l'orogénèse alpine et les variations du niveau marin.

Le but de ce chapitre est de cartographier et de présenter les différents faciès lithologiques qui affleurent dans la zone d'étude et de noter la déformation qui les affecte. Ce qui est présenté dans ce chapitre est essentiellement basé sur les observations de terrain faites lors d'une sortie effectuée dans le cadre de ce travail et sur l'étude des cartes géologiques dressées par l'Institut Géographique National, qui couvrent la région étudiée dans ce travail. Les documents utilisés et qui ont été d'un grand support à notre étude sont les suivants :

- 1) La feuille d'Alger, 1963, 1/50000, Institut Géographique Nationale
- 2) Modèle Numérique de terrain, 2014, résolution 30 m, issue de l'USGS

III.2. Les différents faciès lithologiques de la côte d'El Marsa :

Depuis Cap El Marsa jusqu'à El Karma (Boumerdes) , la région est très intéressante de point de vue pétrographique de faite que l'affleurement offre tous les types de roches (sédimentaires, métamorphique, plutonique et volcanique) sur une falaise côtière verticale haute d'environ 10 m.

III.2.1. Le socle :

De nature métamorphique, le socle affleure à Cap Matifou sous forme d'un petit chaînon de 2 Km de longueur, orienté Nord-Ouest-Sud Est, il se prolonge jusqu'à l'Est au littoral entre Boumerdés, ou il forme les pointements du rocher noir et d'El Karma.

De point de vue lithologique, le socle dans ces secteurs, il est représenté par des gneiss ocellés, des marbres, des paragneiss mais surtout des schistes à schistosité parfois plissée et montrant des lentilles de quartz d'exsudation (Figure 18-A). Ces schistes sont traversés par divers endroits par des pegmatites et des granites de type granodiorite dans la zone d'étude.

III.2.2. Les formations sédimentaires néogènes :

Elles sont caractérisées par deux principales formations:

- Un Oligo miocène kabyle correspondant à une couverture molassique discordante sur le socle.
- Un miocène " post-nappe " formé essentiellement par des calcaires gréseux et des marnes.

III.2.2.1. L'Oligo Miocène kabyle (OMK) :

Il regroupe les formations Oligocène Burdigalien inférieur ; discordant et transgressif sur le socle. D'une manière générale, cette formation se résume comme suit:

A la base un conglomérat grossier marquant la première étape de la transgression, suivi ensuite par des grès micacés. Cette série, stratigraphiquement liée au socle puisqu'elle représente sa couverture, A cap Matifou, l'OMK se représente comme un petit affleurement d'ordre métrique en contact tectonique par faille avec le socle, par contre la coupe la plus complète s'observe sur le littoral aux environ de Boumerdès ou il se repose sur le socle par l'intermédiaire d'une discordance de ravinement. A El Marsa l'OMK a pu être observé en discordance sur les schistes qui représentent la partie sommitale du socle.

L'OMK dans ces secteurs, débutent par des conglomérats polygéniques et hétérogènes renferment des éléments remaniés d'origine diverse proviennent essentiellement de socle ancien (schistes, micaschistes, quartz, phyllades).

Ces éléments sont de taille centimétrique et décimétriques dépassant parfois le mètre, emballés sous formes de brèches non jointifs témoins de la proximité de la zone nourricière dans une matrice argilo gréseuse de teinte rouge. (Figure 18-B)

L'évolution vers le sommet est marquée par une alternance de bancs décimétriques de conglomérats avec des niveaux gréseux grossiers ocres.

Ces conglomérats sont constituées d'éléments plus ou moins arrondis, jointifs de taille centimétriques à décimétrique, des schistes, de gneiss et de quartz prédominant.

Ces éléments sont emballées dans une matrice argilo gréseuse ocre, présentant un granoclassement positif. Cette alternance présente des stratifications obliques.

III.2.2.2. Le Miocène:

Depuis El Marsa jusqu'à Ain Taya plage, le Miocène occupe de large surface d'affleurement tout le long de la cote.

Il débute par quelques mètres de marnes grises à miches calcaire qui évolue vers l'est par une alternance avec des bancs décimétriques à métriques de calcaires gréseux grisâtre (Figure 18-C et D).

Ces couches sont de direction de N050 et d'inclinaison 40° vers le SE. Elles sont recoupées par de nombreuses fentes de tensions de plusieurs directions (N20, N025, N030, N110, N115, N120, N185, N330) à différentes échelles avec souvent un remplissage de calcite blanchâtres.

Au fur à mesure que l'on se dirige vers l'E les marnes miocènes deviennent moins compétentes.

III.2.3. Le Pliocène :

III.2.3. Le Plaisancien :

Le Plaisancien est composé pour l'essentiel de marnes argileuses de couleur bleu transgressif et discordant sur le Miocène sous-jacent. Il affleure à partir de Surcouf jusqu'à l'oued Reghaia.

III.2.3.2. L'Astien :

Dans ces secteurs, les affleurements de l'Astien sont très réduits, il affleure à l'extrémité de l'Oued Reghaia. C'est une formation marno-sableuse très riche en lamellibranche (Ostera, Venus, Cardium).

III.2.4. Quaternaire :

Les dépôts quaternaires sont discordants sur les formations les plus anciennes. On distingue les formations calabriennes et villafranchiennes, elles sont constituées essentiellement par un matériel dunaire (sable beige).

Les formations tyrrhéniennes qui sont réparties en terrasses marines, elles sont formées par des microconglomérats à quartz emballés dans une matrice sableuse.

Elles affleurent entre Bordj EL Bahri et Boumerdès, le long des falaises côtières. Elles sont presque à l'horizontale.

L'épaisseur de ces terrasses est variable, elle peut atteindre 10 m et plus en certains endroits (Ain Taya). Le tout est surmonté par les sols rouges littoraux.

III.3. Les formations magmatiques :

Les manifestations magmatiques de la région s'expriment par des intrusions magmatiques de plutonique qui correspondent à des granodiorites et des pegmatites intrusives dans les schistes, ainsi que par des épanchements volcaniques correspondant essentiellement à des rhyolites qui recourent la série miocène.

III.3.1. Le plutonisme :

Il s'agit d'une granodiorite sous forme d'un massif qui s'étend sur une distance avoisinant les 2Km suivant une direction NW-SE, dont la limite SE est coïncide avec une faille de direction N110 qui le sépare des formations sédimentaires (OMK).

C'est une roche à texture grenue, très claire (leucocrate), composée de cristaux de feldspath, de plagioclase, de micas et de quartz visibles à l'œil nu (Figure 18-E).

Les pegmatites affleurent sous forme de lentilles en intrusion dans le socle métamorphique. Il s'agit de roches blanchâtres à texture grenue à gros grains, formées de quartz, feldspaths, micas blancs et de tourmalines (Figure 18-F).

III.3.2. Le volcanisme :

Il est représenté sous forme d'un dôme au sud-est de la **rhyolite**, mise en place dans les formations marneuses miocènes, occupant une position intermédiaire entre ces dernières, de couleur grise claire d'âge Miocène moyen à supérieur. Ces roches volcaniques sont très altérées et montrent une patine verdâtre témoignant de l'altération de leurs minéraux ferromagnésiens probablement par métasomatisme (Figure 18-G).

III.4. Aperçu tectonique :

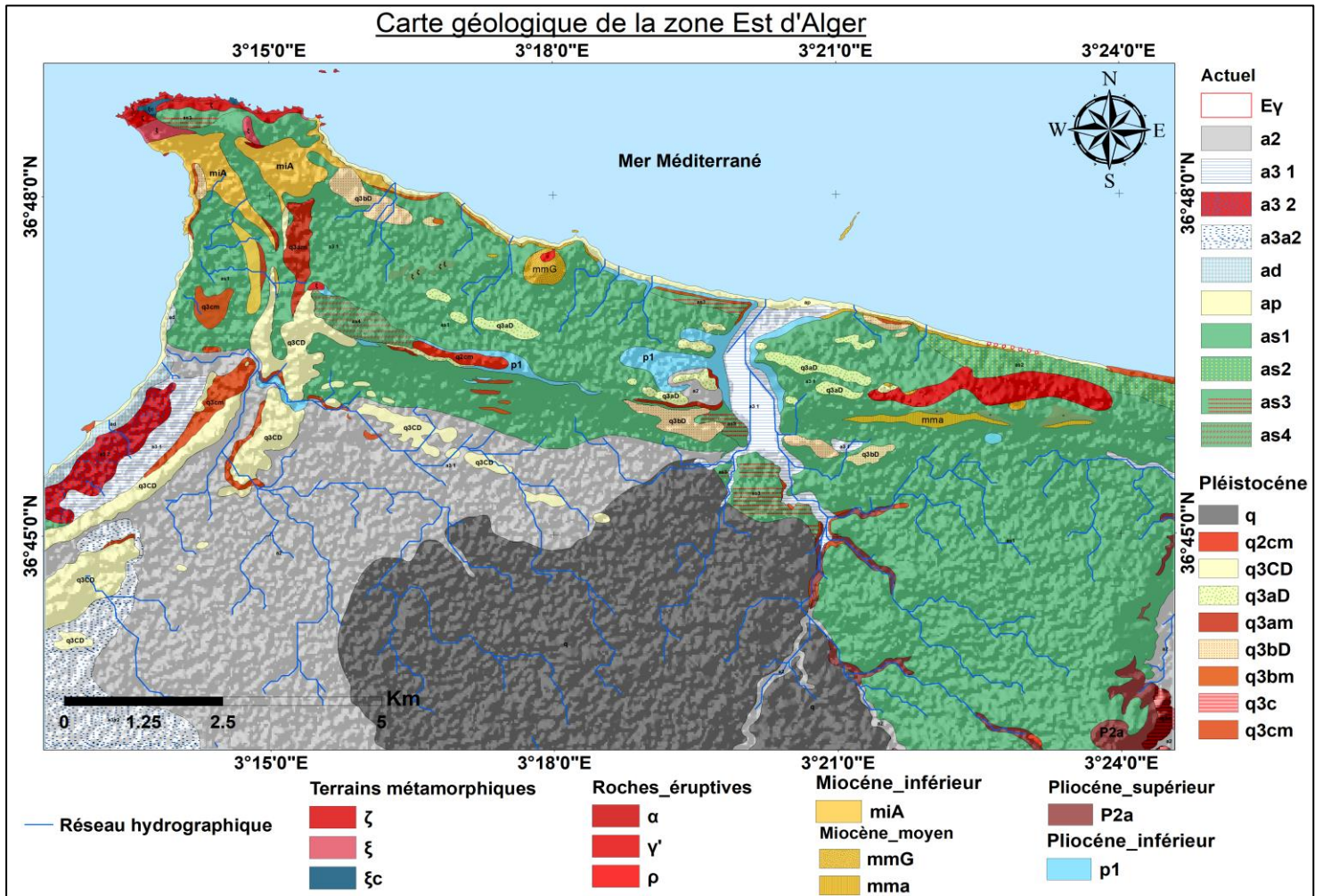
Les pendages pris au niveau des formations sédimentaires miocènes à El Marsa montre l'allure d'une structure monoclinale, car le pendage plonge toujours dans la même direction vers le NE, il varie entre N050 à N070 et il se redresse presque à la verticale.

En plus de cette tectonique souple, on note la présence d'une déformation cassante qui se traduit par des failles et des décrochements affectant les contacts ou les formations de la même unité.

Une faille d'échelle décimétrique a été observée sur le terrain. Cette dernière met en contact L'OMK discordant sur le socle d'un côté et le faciès plutonique granodioritique de l'autre côté. Il s'agit d'une faille de direction N110 à subverticale qui plonge de 85° vers le NW.

La zone de contact correspond un brèche tectonique où les roches ont été broyées par le mouvement de la faille.

Carte géologique de la zone Est d'Alger



<u>Actuel:</u>	<u>Pléistocène :</u>	<u>Miocène:</u>
<p><u>Pléistocène :</u></p> <p>a^D: plages</p> <p>Ey : boules de granodiorite sur la plage ouest de l'Alma marine.</p> <p>a² : alluvions récentes.</p> <p>a^{3a2} : partie du marais et dépôts de la rassaula encore inondable ou q^{3cm} tantôt affleure, tantôt se trouve à moins d'un mètre.</p> <p>a^{3.1} : dépôts de marais et dépôts lacustres derrière les dunes.</p> <p>a^{3.2} : partie de la Mitidja anciennement marécageuse et souvent inondée.</p> <p>a^{s1} : sables plus ou moins argileux et plus ou moins rubéfiés.</p> <p>a^D : dunes actuels.</p> <p>a^{s2} : sables roses et graviers siliceux dépôts de ruissellement au N et au S du sahel oriental postérieurs à q^{3cm}.</p> <p>a^{s3} : graviers provenant de la décalcification des poudingues marins.</p> <p>a^{s4} : complexe rougeâtre schisto-quartzeux résultant probablement de la décalcification de q^{2cm}.</p>	<p>q : alluvions anciennes (comblant de la Mitidja) sicilien.</p> <p>q^{2cm} : sables et petites galets de quartz, calcaire jaune plus au mois argileux (comprise entre 50 et 65 m).</p> <p>q^{3CD} : dunes consolidées de la phase de régression postérieure à q^{3cm}.</p> <p>q^{3aD} : dunes consolidées postérieures à q^{3am}.</p> <p>q^{3am} : mêmes faciès que q^{3bm}(compris entre 35 et 45 m).</p> <p>q^{3bD} : dunes consolidées postérieures à q^{3hm}.</p> <p>q^{3bm} : lumachelle a pectioncles poudingues et grès marins.</p> <p>q^{3c} : alluvions anciennes tyrrhénien II.</p> <p>q^{3cm} : lumachelle a pectioncles pudiques et grès marins, grain de quartz pilulaires plus ou moins cimentés.</p>	<p><u>Miocène inférieur:</u></p> <p>mi^A : faciès argileux</p> <p>mi^G : faciès gréseux</p> <p><u>Miocène Moyen :</u></p> <p>mma^A : marneux ou argileux.</p> <p>mm^G : marno-calcaire et gréseux</p> <p><u>Pliocène:</u></p> <p><u>Pliocène inférieur :</u></p> <p>P^{2A} : faciès argileux ou argileux sableux</p> <p><u>Pliocène supérieur :</u></p> <p>P¹ : plaisancien marneux ou argileux.</p>
	<p><u>Terrains métamorphiques</u></p> <p>ζ: micaschistes a biotite fréquemment injectes de pegmatite.</p> <p>ξ: schiste à sericite</p> <p>ξc :calcaire (lenticulaires dans les schistes)</p>	<p><u>Roches éruptives</u></p> <p>A: Andésite quartique ou Burdigalien.</p> <p>Υ: Pegmatite dans les micaschistes.</p> <p>P: Rhyolite du vindobonien.</p>

Figure 17: Carte géologique de la zone d'étude modifiée en se basant sur la carte géologique détaillée Alger, 1963, 1/50000) .



- A) Les schistes du socle.
- B) les conglomérat de base discordant sur les schiste.
- C) Les marnes du Miocène.
- D) Alternance des marnes du Miocène avec les niveaux de calcaires.
- E) Aspect de la granodiorite.
- F) Aspect des pegmatites recoupant les schistes du socle.
- G) Aspect des roches volcaniques rhyolitiques.

Figure 18: Photos des différents types de roches qui affleurent sur la portion de la côte étudiée.

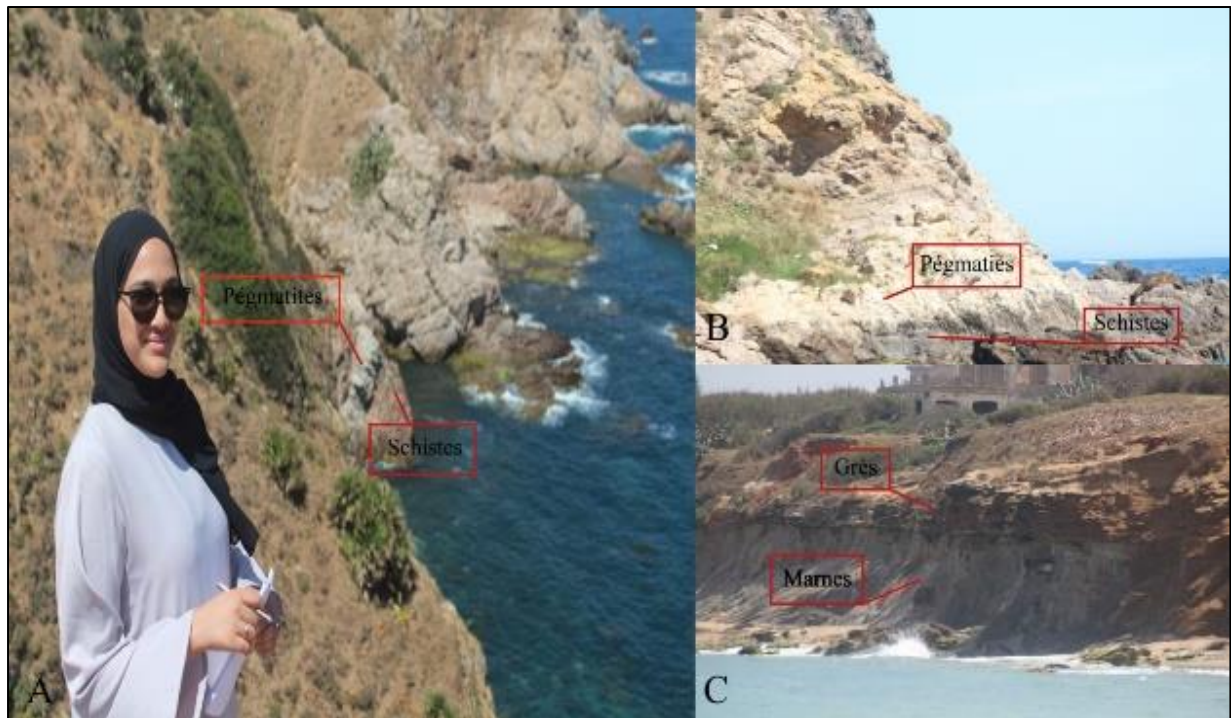


Figure 19: A) Affleurement des pegmatites en alternance avec les schistes sur la côte. B) Intrusion de pegmatite dans les schistes. C) Erosion des marnes altérées, affleurant à l'est d'El Marsa, surmontées de couches horizontales de grès en discordance.

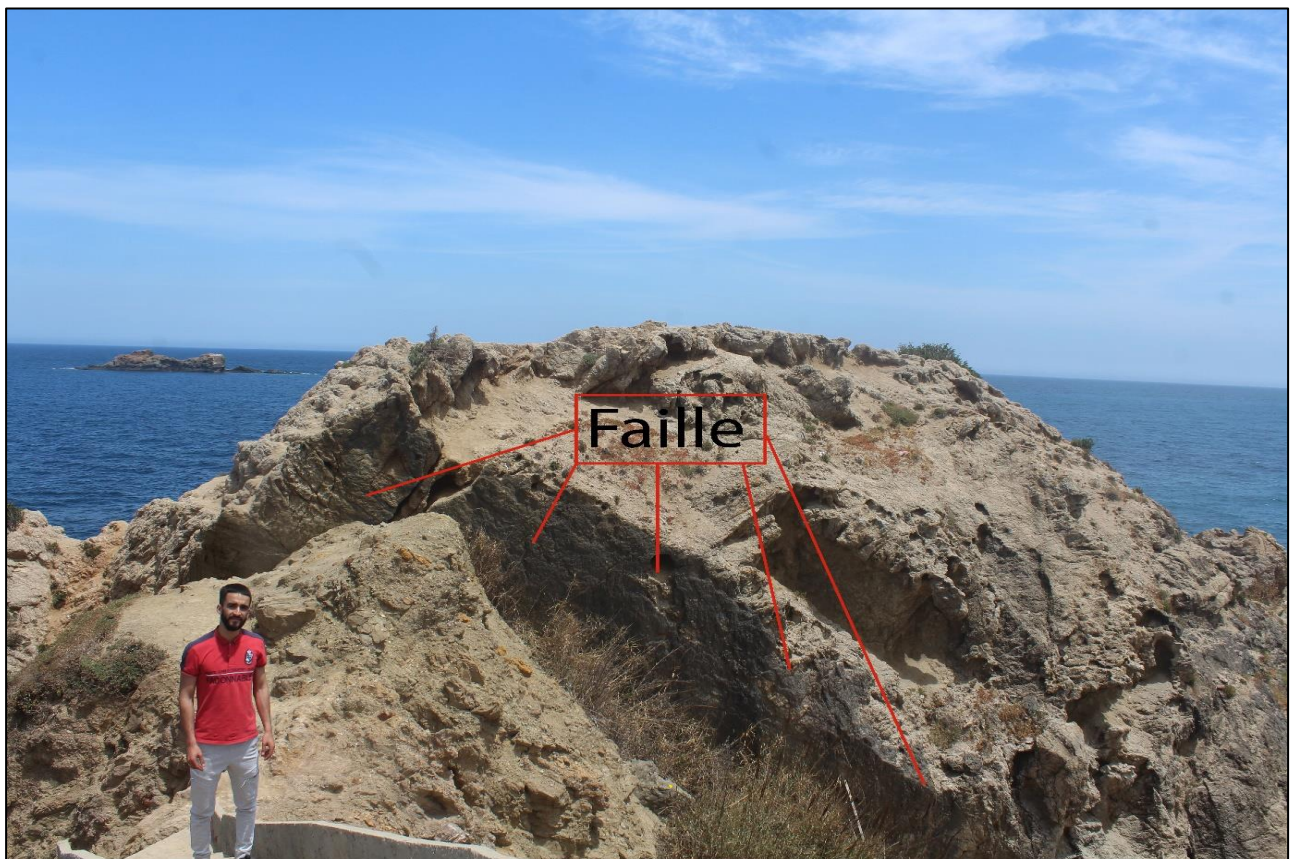


Figure 19: Photo montrant le plan de la faille séparant la granodiorite du conglomérat et la zone de brèche tectonique.

III.5. Conclusion :

La cartographie et l'étude des différentes lithologies, qui affleurent dans la zone côtière étudiée dans ce travail, sur le terrain ont permis de mettre en évidence la présence de six faciès géologiques distincts à caractères rhyologiques très différents. Ces six faciès, qui sont exposés à l'érosion marine, sont :

- Un faciès de schistes foliés et déformé.
- Un faciès plutonique correspondant à un massif de granodiorite très compétente.
- Un faciès de pegmatite compétente qui est intrusive dans les schistes et affleure en alternance avec ces derniers sur la côte d'El Marsa.
- Un faciès de roches volcaniques correspondant à des rhyolites relativement altérées.
- Un faciès de conglomérat affleurant en discordance sur les schistes et à coté de la granodiorite par contact anormal correspondant à une faille. Ces roches ont été bréchifiées par le mouvement de la faille.
- Un faciès de marnes compétentes à l'Ouest et altérées au niveau des passages des oueds notamment à l'est de la zone d'étude.

La répartition de ces faciès sur la portion de la côte étudiée est résumée sur la figure 21.

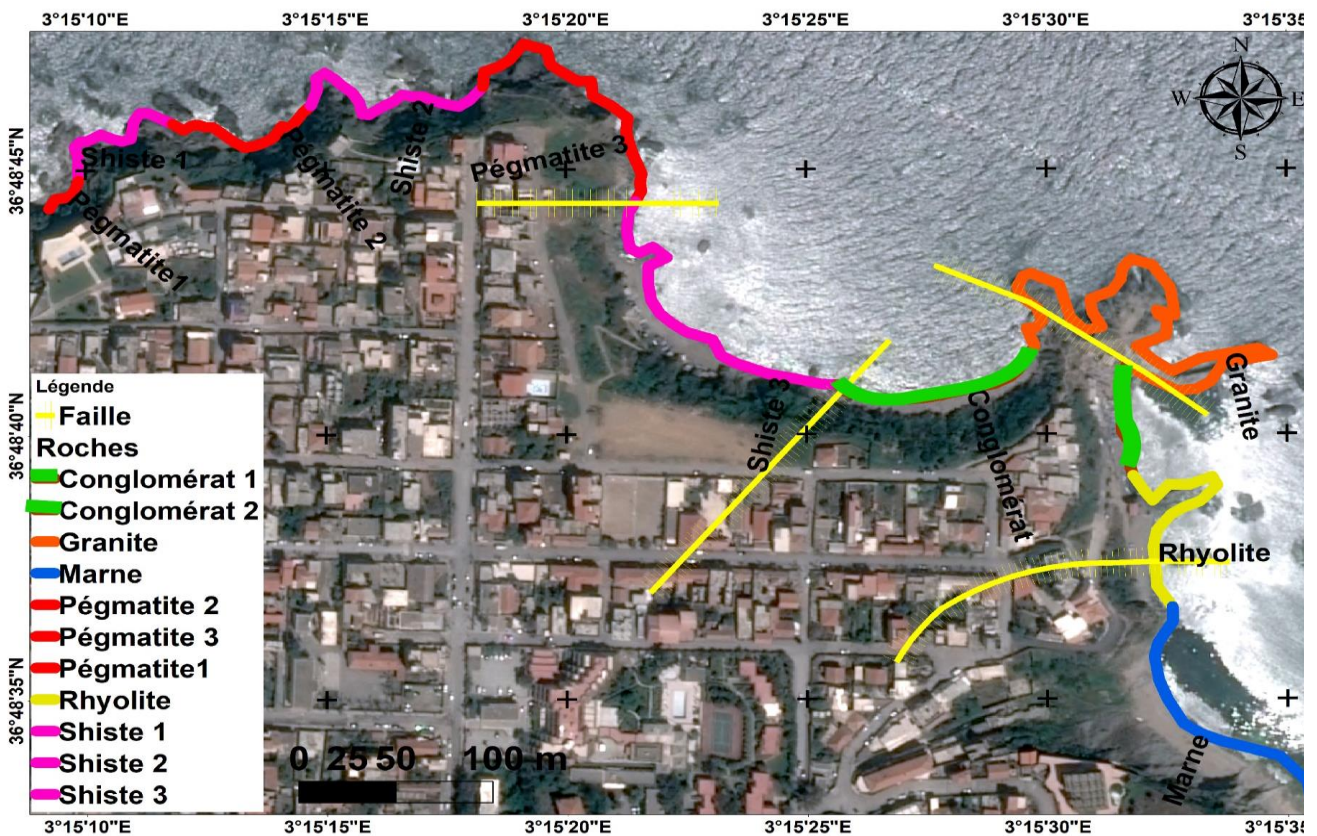


Figure 20: Cartographie des affleurements des différents faciès lithologiques sur la côte d'El Marsa. (ArcGIS Online)

CHAPITRE IV

Analyse des événements extrêmes

IV.1. Introduction :

La modélisation fiable de l'érosion des formations rocheuses littorales nécessite une compréhension approfondie des conditions environnementales extrêmes susceptibles de s'exercer sur ces faciès géologiques. En effet, les simulations d'érosion côtière visent généralement à prévoir les impacts sur des horizons temporels de grande ampleur, comme une période de retour centennale. L'évaluation rigoureuse des niveaux extrêmes d'agents érosifs tels que les vagues de tempête et des incertitudes associées revêt donc une importance capitale d'un point de vue technique. Une approche statistique basée sur la théorie des valeurs extrêmes permet de modéliser ces événements rares mais particulièrement énergétiques qui façonnent et dégradent les faciès rocheux côtiers. L'application judicieuse de ces méthodes probabilistes contribue à une meilleure appréhension des risques d'érosion à long terme pour ces formations géologiques littorales vulnérables.

V.2. Analyse des événements extrêmes :

Pour arriver à des résultats concluants on a fait le choix de travailler avec la théorie des valeurs extrêmes.

IV.2.1 Théorie des valeurs extrêmes :

La théorie des valeurs extrêmes constitue un outil statistique puissant pour caractériser les événements rares et intenses qui dépassent un certain seuil critique. Son application permet de modéliser la distribution limite des valeurs maximales, en ajustant des lois de probabilité spécifiques aux observations extrêmes d'un échantillon de données. Cette approche méthodologique vise à estimer de manière fiable la probabilité d'occurrence et l'amplitude des phénomènes exceptionnels, en extrapolant au-delà de la période d'observation.

En statistique, il y a deux principales façons d'identifier les valeurs extrêmes dans un ensemble de données. La première consiste à diviser la période couverte en blocs (par exemple par jour ou par mois), et à ne considérer que la valeur maximale dans chaque bloc pour les analyses suivantes. On l'appelle l'approche des maximas par blocs.

La deuxième méthode se concentre plutôt sur les valeurs qui dépassent un certain seuil fixé au préalable. Toutes les observations au-delà de ce seuil sont considérées comme des valeurs extrêmes. Cette technique est appelée la méthode des dépassements de seuil ou méthode POT (Peaks Over Threshold) (Cornel Stander, 2015)

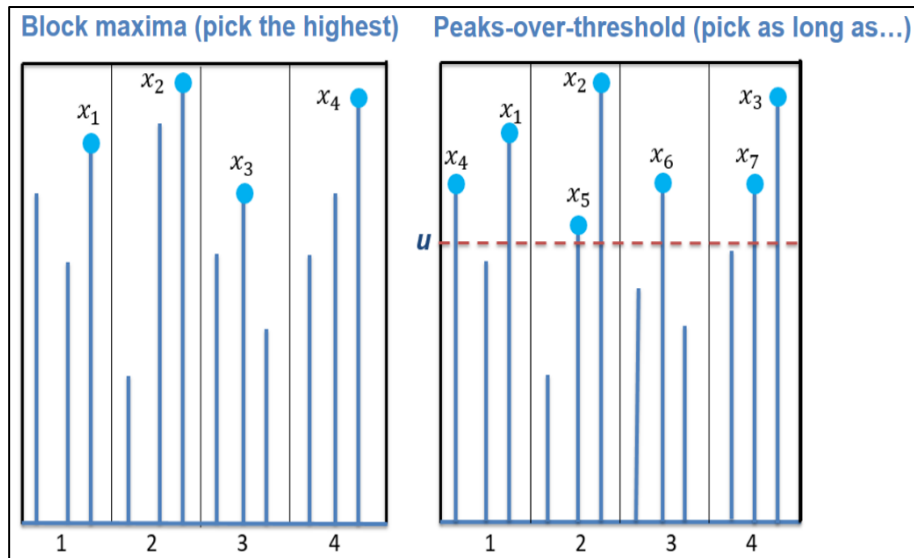


Figure 21: Schéma représentatif des méthodes blocks maxima et POT.

L'approche des Blocs Maximas a un défaut. Elle ne considère que la valeur la plus haute dans chaque bloc de temps. Donc si deux valeurs très élevées arrivent dans le même bloc, seulement la plus haute des deux est prise en compte. Les autres grandes valeurs du bloc sont ignorées. Cela fait qu'on risque de rater des données importantes.

Au contraire, la méthode POT (Peaks Over Threshold) n'a pas ce problème. Elle prend en compte toutes les valeurs au-dessus du seuil choisi. Donc aucune donnée significative n'est perdue avec cette approche (Cornel Stander, 2015).

IV.2.2 Hauteur significative :

D'après l'analyse des données des figures 2, 3 et 4 présentant les données d'enregistrement de la hauteur significative des vagues (H_s) sur une période s'étalant de 1992 à 2020, plusieurs observations importantes peuvent être soulignées.

Tout d'abord, l'amplitude des valeurs de H_s fluctue considérablement, oscillant entre une valeur minimale de 0,03 mètre et une valeur maximale de 6,56 mètres. Cette vaste plage de variation témoigne de la nature dynamique et variable des conditions de l'état de la mer dans la zone étudiée.

Ensuite, la valeur moyenne de H_s sur l'ensemble de la période est de 0,92 mètre, bien que cette moyenne semble modérée, elle masque en réalité des épisodes ponctuels de conditions de mer agitées, comme en attestent les valeurs maximales enregistrées.

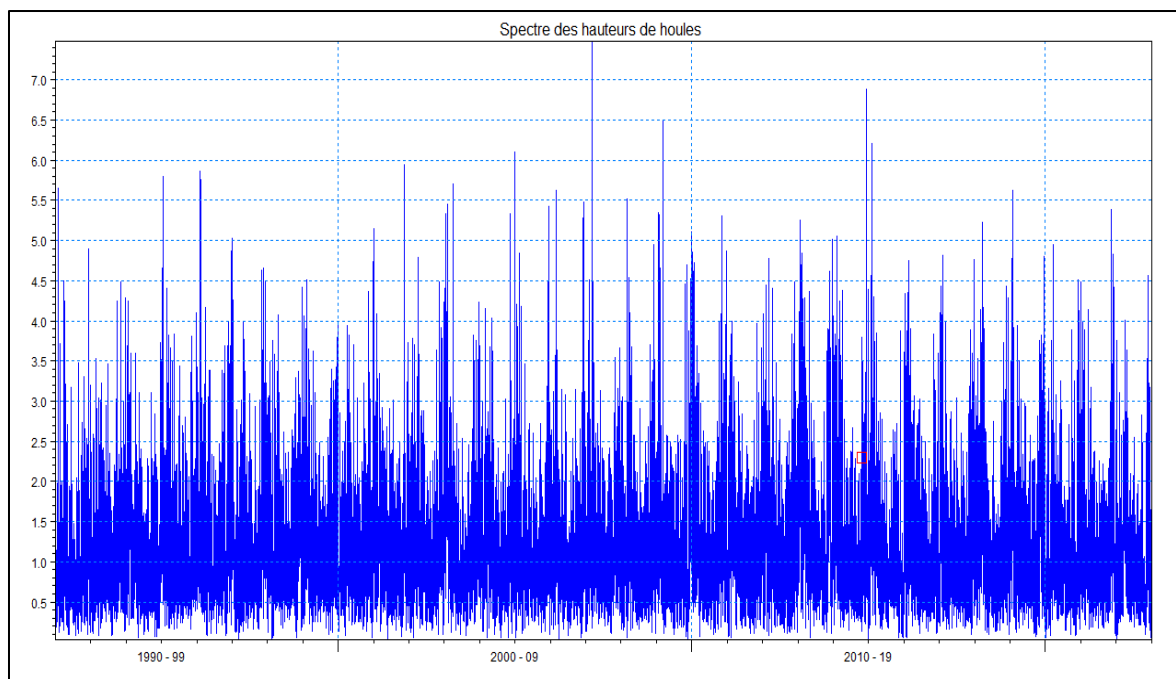


Figure 22: Représentation du spectre des hauteurs de houle enregistrées (Alger).

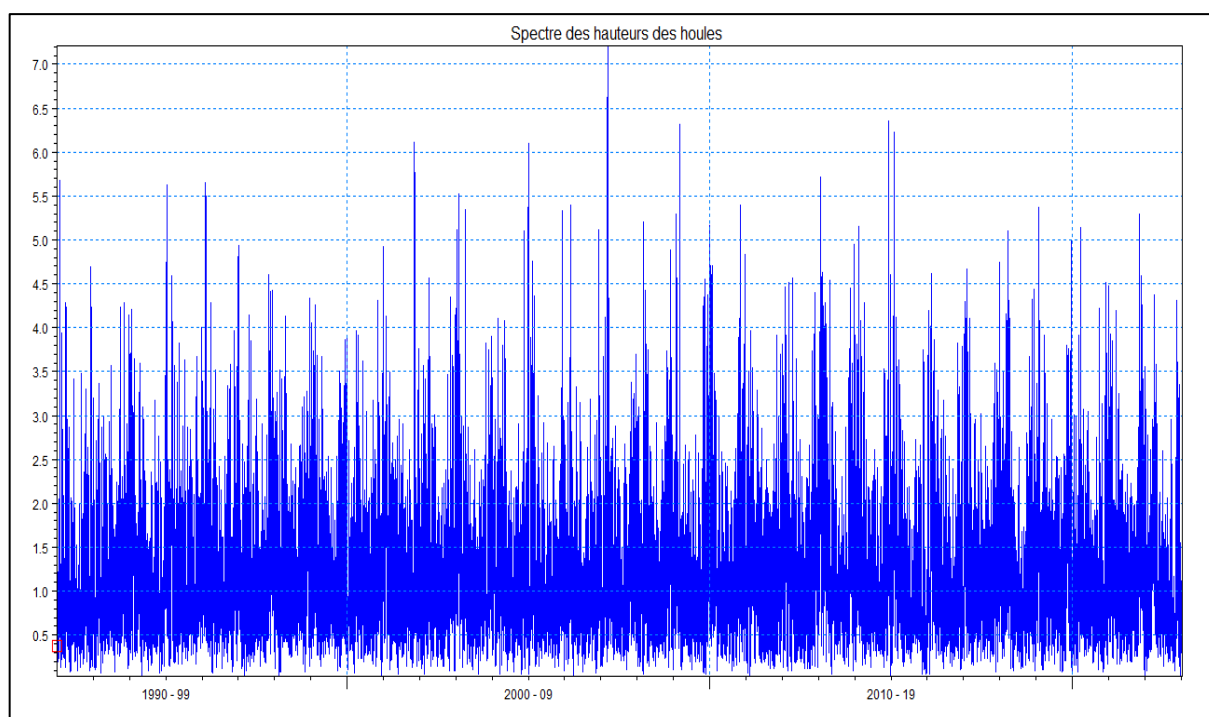


Figure 23: Représentation du spectre des hauteurs de houle enregistrées (Zemmouri).

IV.2.3 Période de pic :

Les périodes enregistrées sont dans une gamme assez large allant de 1,5s à 18,5s, les périodes sont globalement entre 3s et 9s.

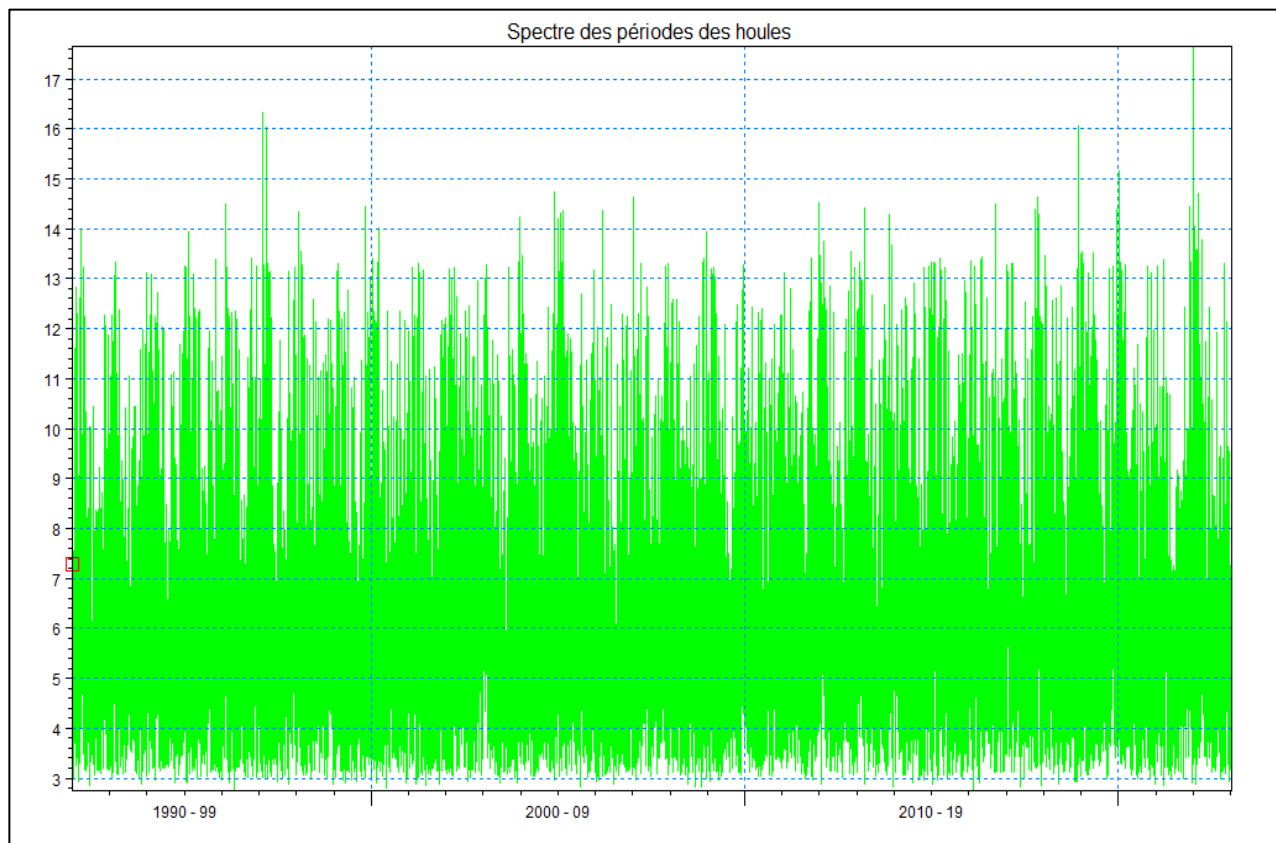


Figure 24: Représentation du spectre des périodes de houle enregistrées (Alger).

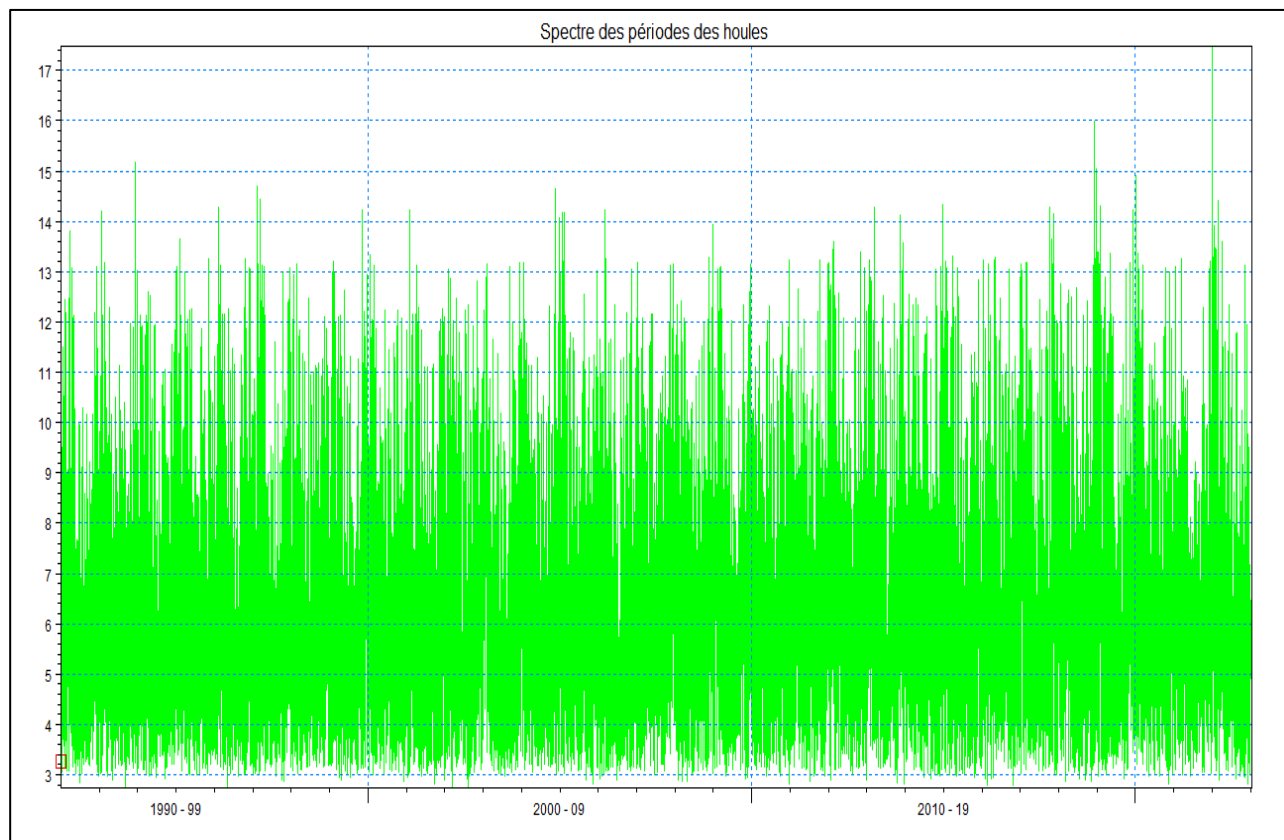


Figure 25: Représentation du spectre des périodes de houle enregistrées (Zemmouri).

IV.3 Méthode Peaks Over Threshold (POT):

Selon **Tilbi. K. et al. (2018)**, cette méthode POT (Peaks Over Threshold) est basée sur l'étude de la distribution statistique des valeurs dépassant un certain seuil, en utilisant une loi appelée "loi de Pareto généralisée". Un avantage de cette approche par rapport à la méthode des blocs maximaux, c'est qu'il est plus facile d'obtenir un échantillon de dépassements de seuil que seulement les valeurs maximales.

Dans la pratique, on fixe un seuil u et on regarde la $(n-k+1)$ -ème plus grande valeur observée, notée $X_{(nk+1,n)}$, qui représente ce seuil. Voici les étapes à suivre :

- On commence avec un échantillon de données X_1, \dots, X_n . Au-dessus du seuil u choisi, on compte le nombre d'observations N_u qui dépassent ce seuil.
- On constitue alors un nouvel échantillon Y_1, \dots, Y_{N_u} qui contient uniquement les valeurs excédant le seuil u .

Équation 1 :

$$F_u(x) = \Pr(X - u \leq x | X > u) = \frac{F(x + u) - F(u)}{1 - F(u)}$$

Préalablement à la détermination du seuil, une analyse de la moyenne résiduelle a été menée afin d'optimiser son choix. Cette étape a été réalisée en **langage Python** en utilisant la bibliothèque **pyextreme** dédiée aux méthodes de la théorie des valeurs extrêmes. L'objectif était d'examiner le comportement de la moyenne résiduelle en fonction des valeurs seuils potentielles, et ainsi identifier le seuil optimal correspondant à la zone de stabilité de cette statistique, c'est-à-dire situé avant les oscillations prononcées de la moyenne résiduelle.

Dans cette étude, le seuil a été fixé à 3,2 m pour la baie d'Alger (figure26), et 3,7 m pour la baie de Zemmouri (figure 27).

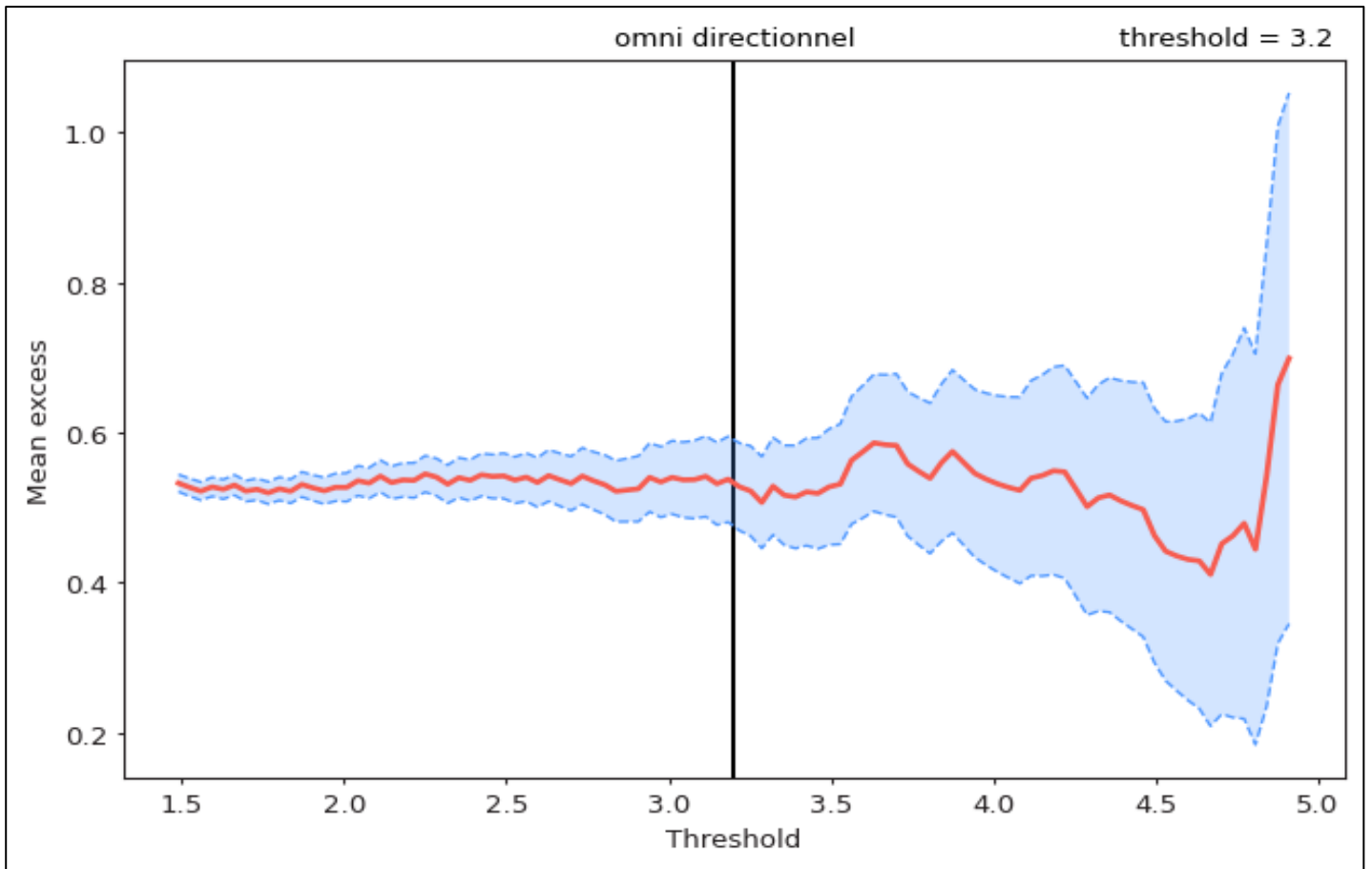


Figure 27: Moyenne des excès de la série des hauteurs Omnidirectionnelle de l'enregistrement (Alger).

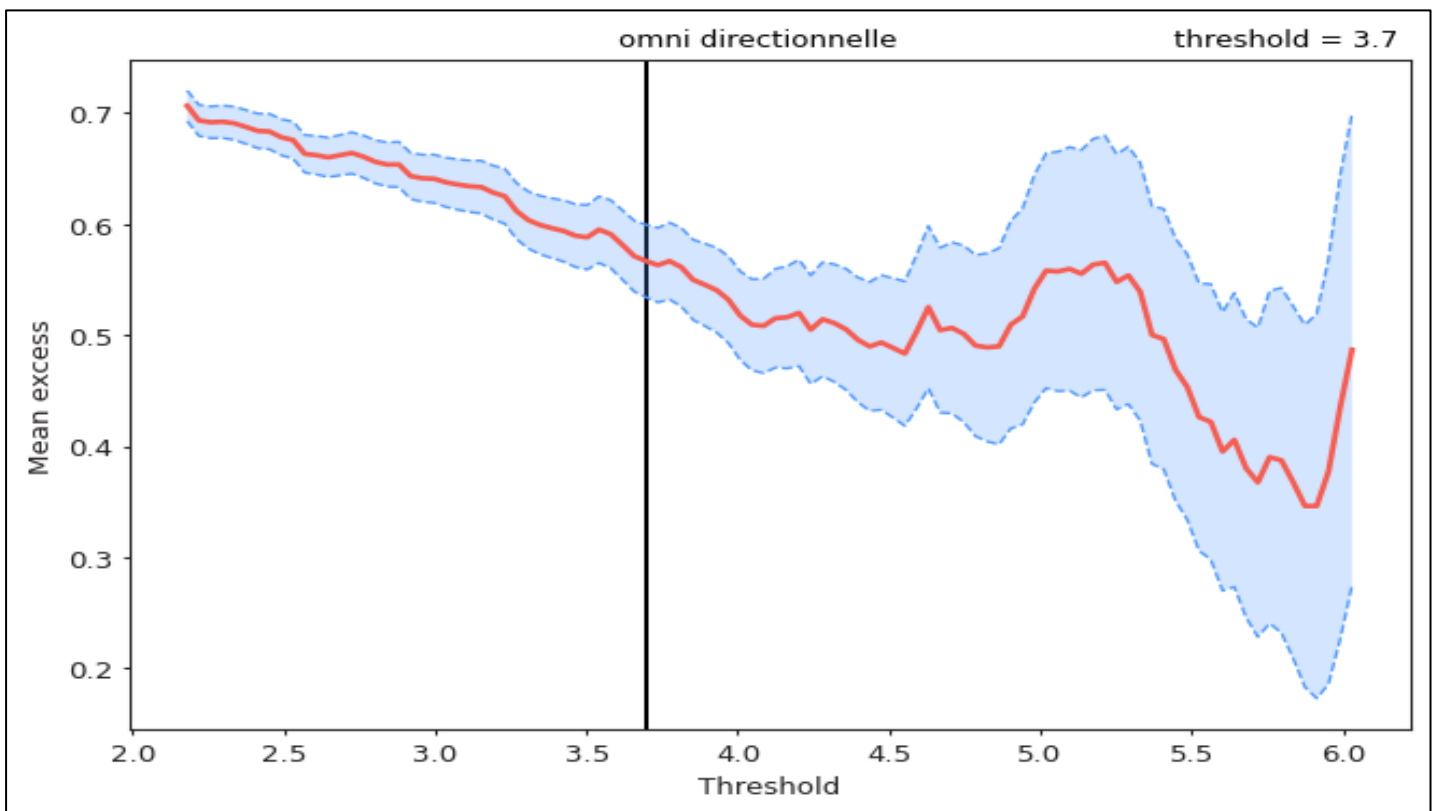


Figure 26: Moyenne des excès de la série des hauteurs Omnidirectionnelle de l'enregistrement (Zemmouri).

La sélection des points inclus dans les calculs est représentée graphiquement dans les figures ci-dessous :

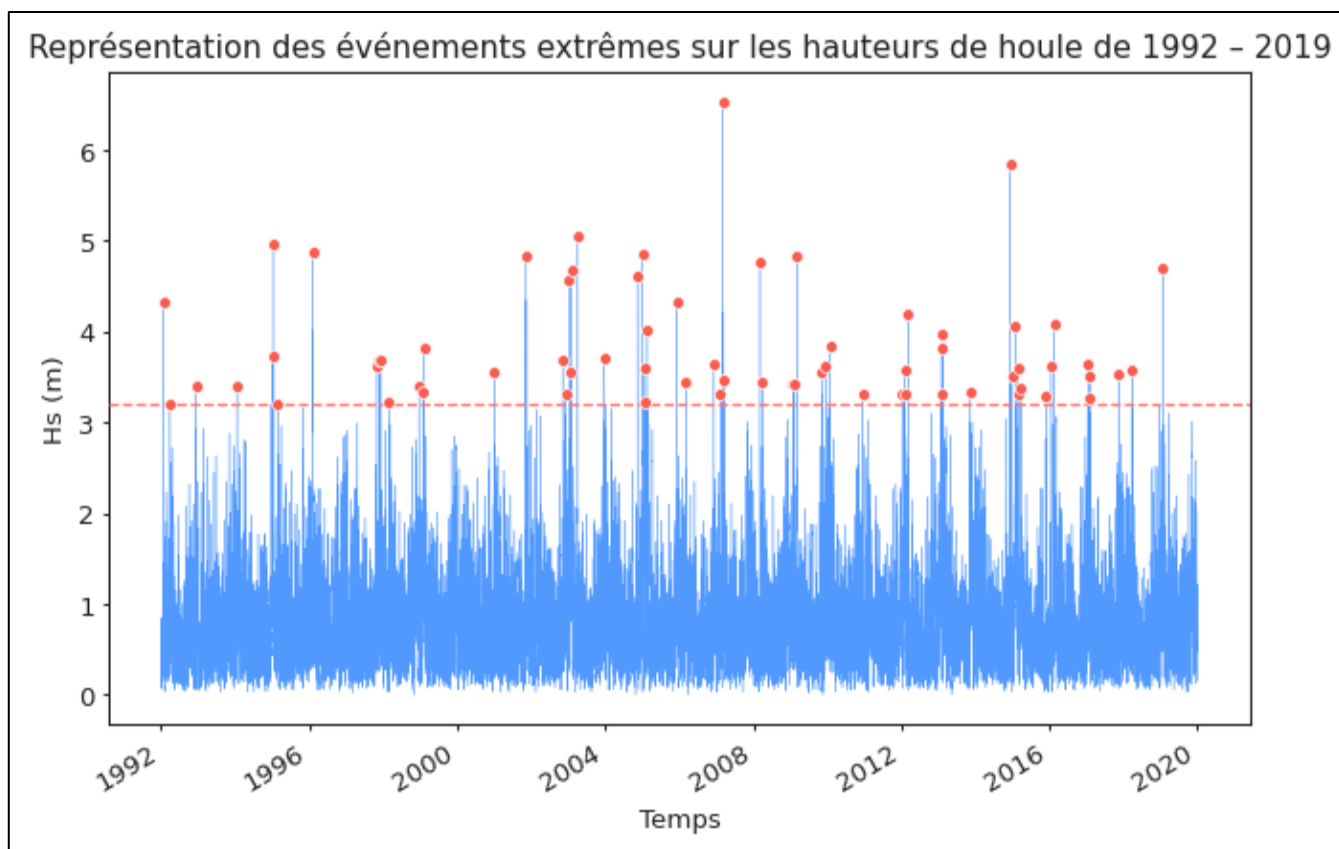


Figure 28: Représentation des événements extrêmes sur les hauteurs de houle de 1992 - 2019 (Alger).

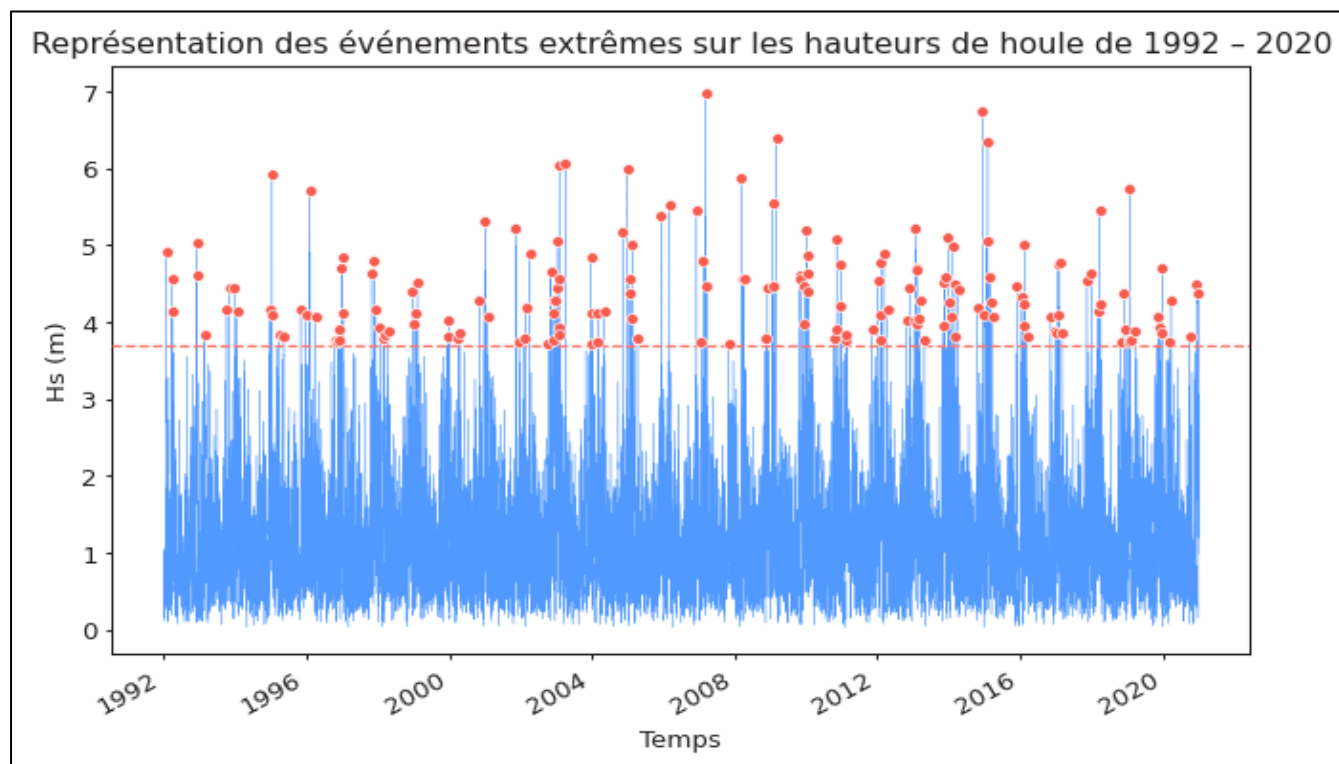


Figure 29: Représentation des événements extrêmes sur les hauteurs de houle de 1992 - 2020 (Zemmouri).

Une fois l'étape de sélection des valeurs extrêmes réalisée, l'estimation des hauteurs de houle associées à différentes périodes de retour a été effectuée à l'aide de la bibliothèque pyextreme en langage Python dédiée aux méthodes de la théorie des valeurs extrêmes. Les résultats obtenus sont les suivants :

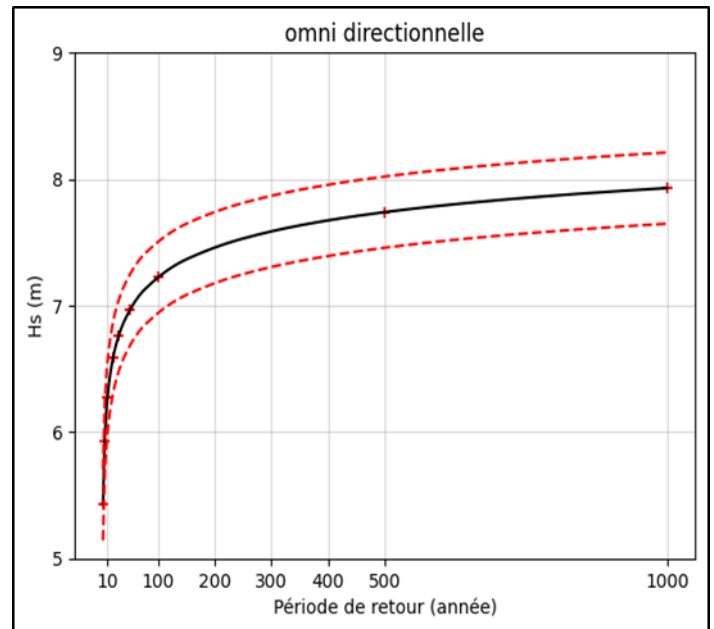
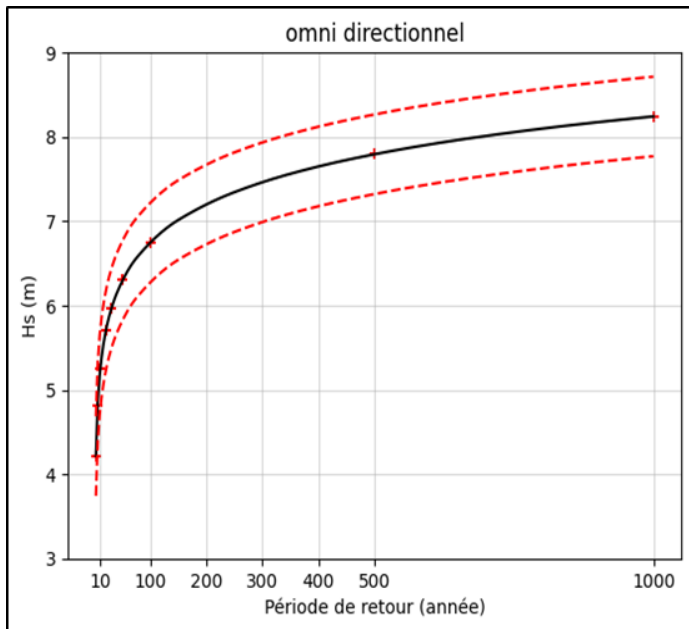


Figure 31: Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour omnidirectionnel (Alger).

Figure 30: Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour omnidirectionnelle (Zemmouri).

Les résultats présentés dans les graphiques (Figures 26 et 27) sont accompagnés de traits rouges délimitant les intervalles de confiance à 95%, soit les marges d'erreur acceptables à 5% près. Les hauteurs de houle estimées pour les périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100 et 1000 ans sont représentées par des croix rouges.

Cette même méthodologie d'estimation par la théorie des valeurs extrêmes sera appliquée pour les autres directions. Les résultats obtenus pour chaque direction seront présentés ultérieurement.

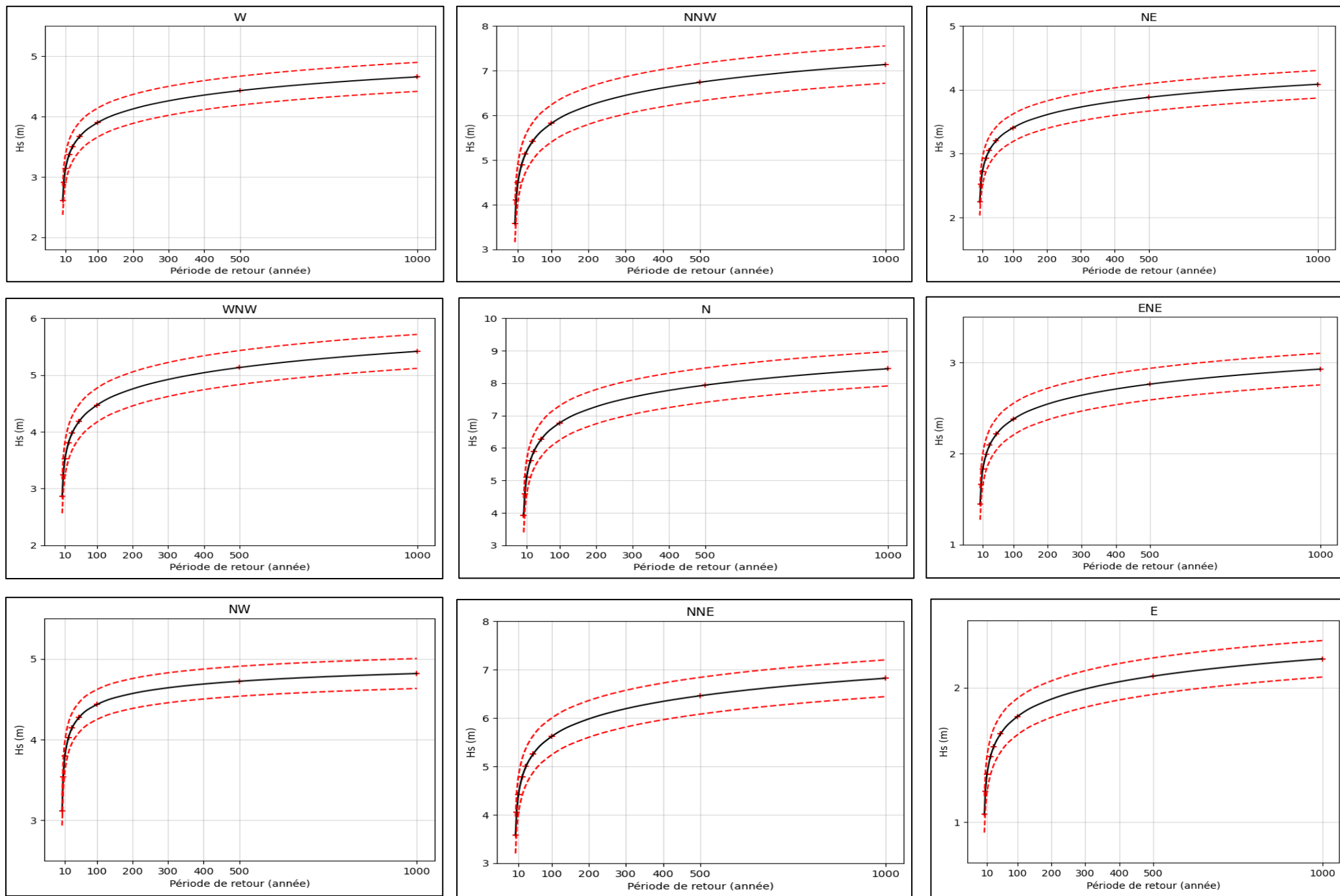


Figure 32:: Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour chaque direction (Alger).

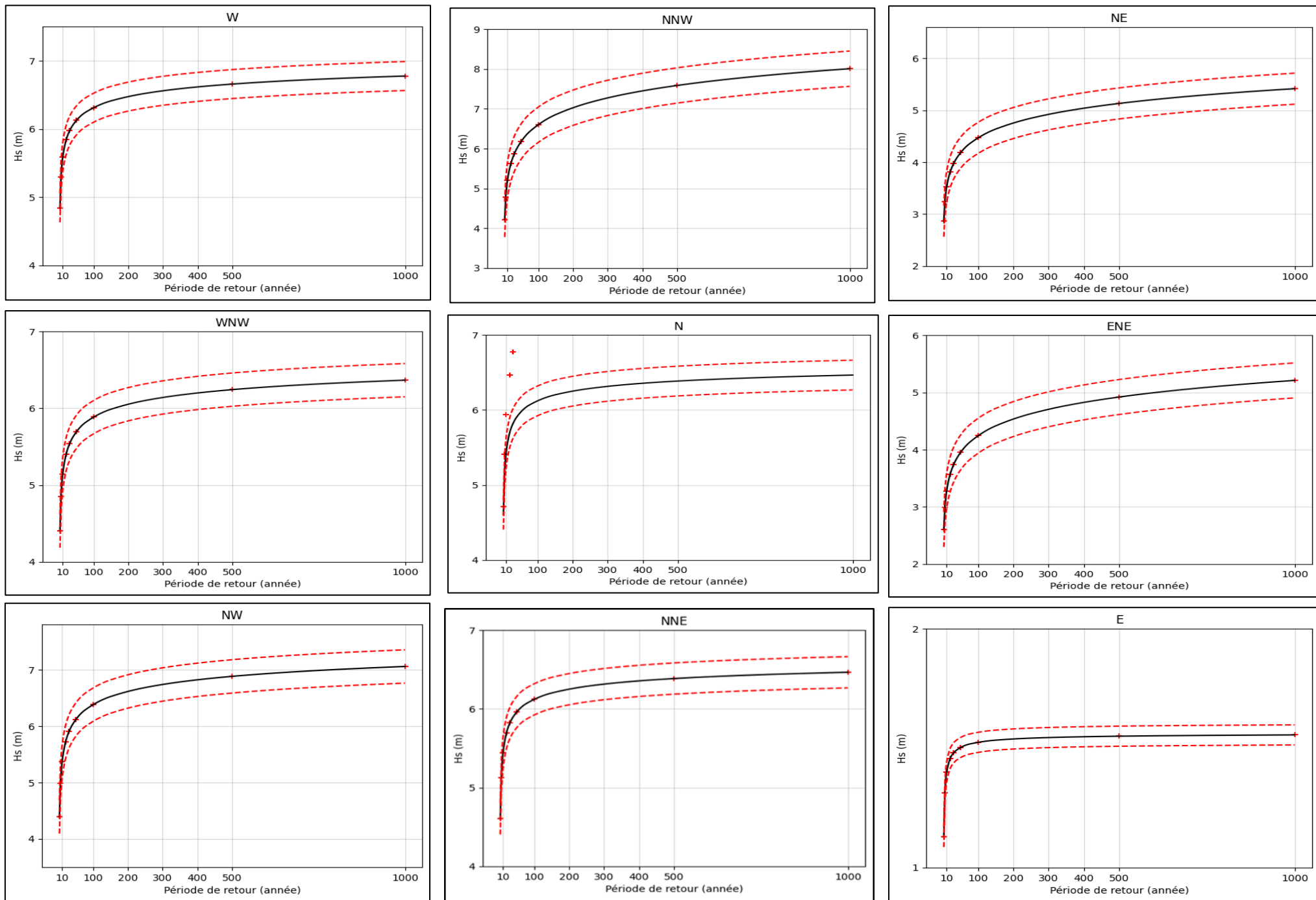


Figure 33: Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour chaque direction (Zemmouri).

Dans le but de faciliter l'interprétation des résultats issus de l'application de la méthode des Pics au-dessus d'un Seuil (POT), un tableau récapitulatif est présenté ci-après. Celui-ci synthétise les différentes hauteurs de houle extrêmes estimées, en les associant aux périodes de retour correspondantes qui reflètent la probabilité d'occurrence future de tels événements extrêmes.

Tableau 2: Tableau récapitulatif de l'ensemble des résultats obtenu par la méthode POT(Alger)

POT										
Période de retour (année)	Hauteur de vague par direction (mètre)									
	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	Toutes les directions
2	2.6	2.9	3.11	3.58	3.93	3.58	2.24	1.44	1.05	4.21
5	2.91	3.19	3.53	4.10	4.59	4.06	2.51	1.66	1.22	4.81
10	3.13	3.39	3.79	4.50	5.10	4.42	2.72	1.82	1.35	5.26
20	3.36	3.56	4.02	4.90	5.60	4.78	2.92	1.99	1.48	5.71
30	3.5	3.65	4.14	5.13	5.89	4.99	3.04	2.09	1.56	5.97
50	3.67	3.76	4.27	5.42	6.26	5.26	3.19	2.21	1.65	6.30
100	3.9	3.89	4.43	5.82	6.77	5.62	3.4	2.37	1.78	6.75
500	4.36	4.02	4.61	6.74	7.94	6.46	3.89	2.69	2.12	7.79
1000	4.65	4.23	4.81	7.14	8.44	6.82	4.08	2.92	2.21	8.24

Tableau3 :Tableau récapitulatif de l'ensemble des résultats obtenu par la méthode POT(Zemmouri).

POT										
Période de retour (année)	Hauteur de vague par direction (mètre)									
	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	Toutes les directions
2	4.84	4.4	4.39	4.22	4.71	4.60	2.88	2.6	1.13	5.42
5	5.29	4.85	4.98	4.78	5.41	5.13	3.24	2.99	1.31	5.93
10	5.59	5.15	5.37	5.20	5.94	5.44	3.52	3.28	1.40	6.28
20	5.84	5.4	5.72	5.62	6.46	5.70	3.81	3.57	1.46	6.59
30	5.97	5.54	5.9	5.87	6.77	5.82	3.98	3.74	1.48	6.76
50	6.13	5.7	6.12	6.18	7.16	5.96	4.19	3.95	1.50	6.97
100	6.31	5.89	6.38	6.60	7.69	6.12	4.47	4.24	1.52	7.22
500	6.43	6.09	6.88	7.59	8.91	6.39	5.14	4.92	1.55	7.74
1000	6.78	6.37	7.06	8.01	9.44	6.47	5.42	5.21	1.56	7.93

L'examen approfondi des tableaux 3 et 4, présentant les hauteurs de houle extrêmes prédites par l'application de la méthode des Pics au-dessus d'un Seuil (POT), apporte un éclairage intéressant sur la distribution directionnelle de ces événements maritimes extrêmes. Tout d'abord, il ressort que le secteur Est apparue comme étant le moins susceptible de générer des vagues de forte intensité. A l'inverse, les directions Nord, Nord-Nord-Ouest et le Nord-Ouest se distinguent comme étant les plus à risque en termes de formation de houles extrêmes de grande amplitude.

Par ailleurs, il convient de souligner que l'analyse omnidirectionnelle, qui considère l'ensemble des données sans distinction de direction, conduit logiquement aux estimations de hauteurs de houle les plus élevées.

Ceci s'explique par le fait que le modèle se base alors sur les valeurs de hauteur maximales présentes dans les séries temporelles, quelle que soit leur provenance directionnelle.

IV.4 Conclusion :

En définitive, cette étude des événements extrêmes maritimes a permis de caractériser les probabilités d'occurrence des phénomènes hydrodynamiques exceptionnels et de modéliser leurs distributions statistiques.

Il ressort de cette étude que les directions de houle Nord, Nord-Nord-Ouest et le Nord-Ouest se distinguent comme étant les plus à risque, dans l'ordre respectif, en termes de formation de houles extrêmes de grande amplitude.

Néanmoins, des efforts soutenus doivent être poursuivis afin d'affiner davantage les méthodes d'estimation et de modélisation des événements extrêmes, garantissant ainsi une appréhension toujours plus fiable des risques associés pour les environnements géologiques vulnérables.

Chapitre V :
Modélisation
hydrodynamique

V.1. Introduction :

La modélisation numérique des environnements marins s'avère indispensable pour simuler et prévoir avec précision l'évolution complexe des phénomènes maritimes. De nombreux logiciels spécialisés ont été développés à cet effet, tant par la communauté scientifique (**Ahn et al., 2019**) que par des acteurs industriels du secteur privé (**Symonds et al., 2016**).

Ces modèles numériques de haute performance permettent en effet de reproduire fidèlement les variations des niveaux d'eau liées aux marées, les régimes de courants océaniques et côtiers, ainsi que l'ensemble des processus hydrodynamiques en milieux littoraux. Par ailleurs, ces simulations numériques offrent l'opportunité d'évaluer rigoureusement l'impact des phénomènes hydrodynamiques marins sur les aménagements anthropiques sur le littoral et d'anticiper les conséquences des perturbations environnementales sur les zones côtières. Ainsi, ces outils de modélisation marine constituent un instrument d'aide à la décision stratégique incontournable pour assurer une gestion durable et éclairée des espaces maritimes, orienter la planification des infrastructures côtières et garantir la préservation pérenne des écosystèmes littoraux face aux pressions naturelles et anthropiques.

V.2. Présentation du modèle :

La suite logicielle MIKE 21, développée par l'institut danois de renom DHI Water & Environment, constitue un outil numérique de modélisation hydrodynamique 2D performant et polyvalent, elle permet de simuler avec une grande précision l'hydraulique et les processus associés dans divers environnements aquatiques complexes, qu'il s'agisse de systèmes fluviaux, lacustres, de baies, de zones côtières ou encore d'étendues océaniques.

MIKE 21 repose sur une architecture modulaire intégrant différents moteurs de calcul hautement spécialisés, conçus pour répondre à un large éventail de problématiques appliquées. Ces modules offrent en effet la capacité de modéliser une grande variété de phénomènes hydrodynamiques, tels que les régimes de marées, la propagation des vagues de tempête, le transport sédimentaire, la dynamique hydro-sédimentaire des zones portuaires ainsi que les conditions maritimes dans les environnements offshore et nearshore (DHI, 2014). Toutefois, la mise en œuvre de ces simulations numériques nécessite au préalable la génération d'un maillage adapté du domaine d'étude. À cette fin, l'interface de maillage (Mesh Generator) de la plateforme logicielle Mike-Zero a été employée.

V.2.1. Mesh Generator :

Cet outil logiciel propose un environnement de travail dédié à la génération de maillages numériques destinés aux modèles MIKE Zero à maillage flexible (FM) et fixe. Cette fonctionnalité permet l'intégration de multiples maillages sur une même grille de calcul. Il est primordial de doter ces modèles numériques de nouvelle génération d'un maillage approprié afin d'obtenir des résultats précis lors des simulations réalisées avec MIKE.

Les méthodes d'interpolation employées sont valides indépendamment du type de maillage utilisé. Le générateur de maillage offre deux possibilités d'interpolation pour les éléments triangulaires, à savoir l'interpolation par voisin naturel et l'interpolation linéaire (DHI, 2014).

La création du maillage nécessite de suivre les étapes suivantes :

- Définir un système de coordonnées géographiques adapté à la zone d'étude. Dans le cadre de cette étude, le système de coordonnées WGS 84 UTM Zone 31 a été retenu.
- Fournir le trait de côte et la bathymétrie de la zone d'étude sous forme d'un fichier XYZ.
- Générer un maillage constitué de différentes tailles de mailles afin d'obtenir des résultats précis tout en réduisant les temps de calcul du logiciel.

V.2.2. Le module de vague spectrale : Mike 21 SW (Spectral Wave):

MIKE21-SW est un modèle numérique d'état de mer spectral de troisième génération. Il simule la génération des vagues par le vent, les interactions non linéaires entre les composantes spectrales, la dissipation par déferlement bathymétrique et par frottement au fond, les effets de réfraction induits par les variations bathymétriques, ainsi que les interactions entre les vagues et les courants hydrodynamiques. Les calculs effectués par ce modèle reposent sur une grille de discrétisation spatiale non structurée à maillage flexible (DHI, 2014).

En d'autres termes, MIKE21-SW permet de modéliser de manière réaliste la propagation, la déformation et la dissipation du champ de vagues en résolvant l'équation de conservation de la densité d'action d'onde sans approximation parabolique ni hypothèse de faible cambrure. Les processus physiques pris en compte dans les équations du modèle assurent un calcul robuste des états de mer en milieu côtier ou hauturier, y compris en présence d'importantes circulations hydrodynamiques.

V.2.3. Le module hydrodynamique HD :

Le module hydrodynamique (HD) résout les équations bidimensionnelles intégrées sur la verticale de Saint-Venant, qui décrivent la propagation des ondes longues en eaux peu profondes. Ces équations aux dérivées partielles sont discrétisées par une méthode volumes finis sur un maillage non structuré, offrant une grande flexibilité pour représenter fidèlement la géométrie du domaine d'étude. Parmi les processus physiques pris en compte, on peut citer les effets du frottement au fond, du vent et de la pression atmosphérique, de la force de Coriolis, ainsi que différents modèles de fermeture turbulente.

Le module gère également l'évolution temporelle de la bathymétrie induite par la marée en activant ou désactivant les mailles terrestres selon leur état d'immersion. Une formulation spécifique permet de considérer les contraintes de radiation exercées par la houle dans la zone de déferlement.

V.3. Construction du modèle numérique et présentation des résultats**V.3.1. Génération de la Mesh :**

Afin d'effectuer une analyse approfondie et réduire les erreurs susceptibles d'affecter les résultats des simulations, nous avons divisé notre zone d'étude en deux parties ; Est baie d'Alger, Ouest baie Zemmouri) et on a inclus les Oueds (El Hamiz et Reghaia) dans notre zone d'étude.

La zone Est baie d'Alger s'étend sur 19307 m, allant du plage bateau casse à l'ouest, en passant par oued EL HAMIZ, jusqu'à la détente de Jean Bart à l'est.

La zone Ouest baie Zemmouri s'étend sur 11544 m, allant de la détente de Jean Bart à l'ouest, en passant par oued Reghaia, jusqu'à la plage Mamarine à l'est.

V.3.1.1. Données bathymétriques pour la génération de la Mesh :

La bathymétrie du modèle numérique a été construite par fusion de données issues de trois sources distinctes (Modèle Numérique de Terrain, cartes marines NAVIONICS et grille bathymétrique GEBCO). Pour les oueds étudiés, les informations bathymétriques ont été extraites par numérisation d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). La bathymétrie de la baie d'Alger provient de la numérisation de la carte marine NAVIONICS SonarChart™, édition 2021 à l'échelle 1/250000 avec une résolution variant de 100 m au large à 0,5 m près des côtes (Alem et Saf, 2021).

Pour les zones au-delà de -200 m de profondeur, la bathymétrie a été complétée par les données GEBCO intégrées dans MIKE21, ainsi que par la numérisation de cartes bathymétriques de la région centrale algérienne.

Le prétraitement des données bathymétriques a été réalisé à l'aide du logiciel ArcGIS 10.4.1, suite logicielle d'information géographique (SIG) développée par Esri (Environmental Systems Research Institute) comprenant divers modules interconnectés (ArcMap, ArcScene, ArcCatalogue...).

Les fichiers bathymétriques au format shapefile issus d'ArcMap ont été convertis en fichiers XYZ exploitables par MIKE21 grâce à l'utilitaire de conversion d'ArcToolbox, ont été convertis en fichiers XYZ exploitables par MIKE21 grâce à l'utilitaire de conversion d'ArcToolbox.

V.3.2. Mesh et Bathymétrie résultante :

Est baie d'Alger :

Le maillage numérique est composé de 8497 nœuds et 7065 éléments triangulaires. Un raffinement du maillage est appliqué à proximité de la zone rocheuse étudié, avec un espacement de 3000 m. Une transition progressive de la résolution spatiale est mise en œuvre dans la zone rocheuse EL Marsa afin d'assurer un compromis optimal entre précision des résultats et coût de calcul (figure 34).

Cette technique de dégradation progressive du maillage, également appelée lissage de maillage, permet d'augmenter la taille des mailles dans les régions où les gradients bathymétriques et les variations de l'écoulement sont plus faibles, réduisant ainsi les besoins en ressources informatiques sans compromettre la qualité de la modélisation dans les zones d'intérêt prioritaire.

Ouest baie de Zemmouri :

Le maillage numérique est composé de 4394 nœuds et 6779 éléments triangulaires. Un raffinement du maillage est appliqué à proximité de la zone rocheuse étudié, avec un espacement de 1000 m. Une transition progressive de la résolution spatiale est mise en œuvre

dans la zone rocheuse Jean Bart afin d'assurer un compromis optimal entre précision des résultats et coût de calcul (figure 35).

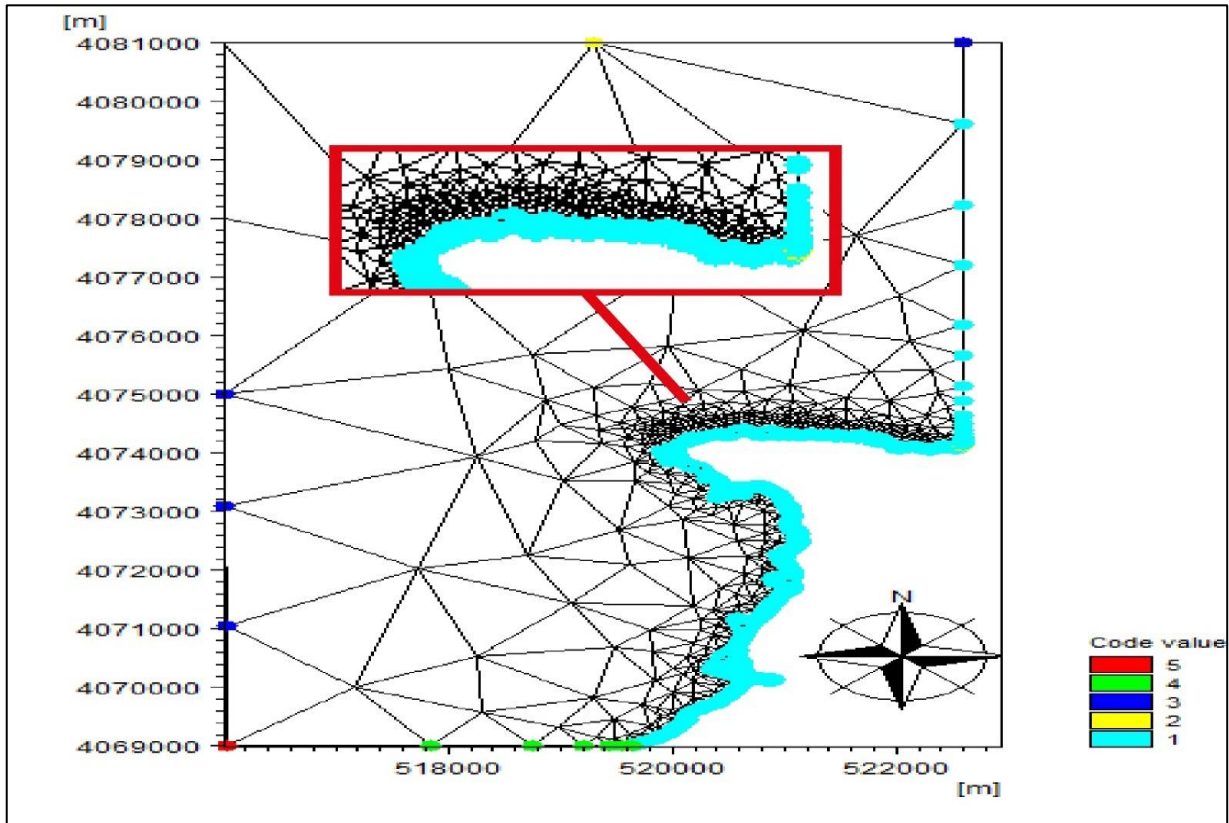


Figure 34: Maillage de la Mesh à l'échelle de l'Est baie d'Alger et de la zone rocheuse d'El Marsa.

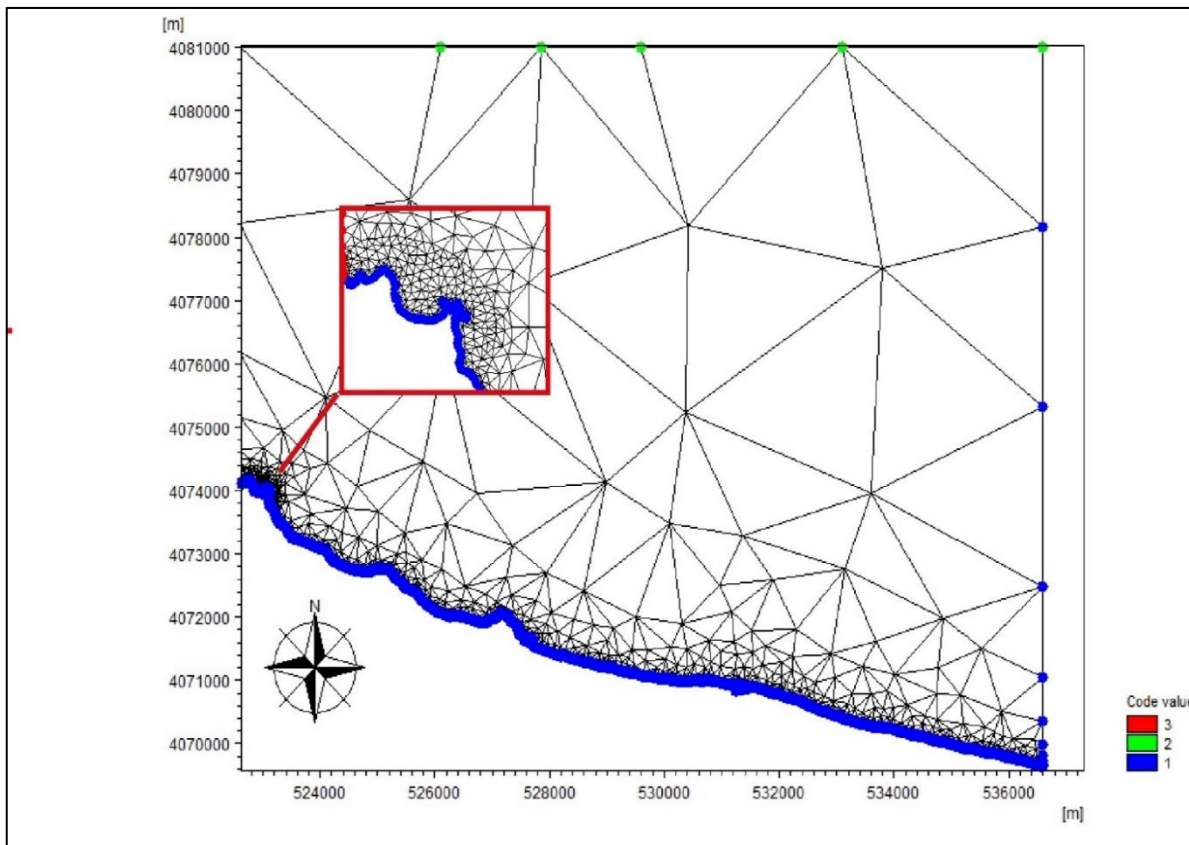


Figure 35: Maillage de la Mesh à l'échelle de l'Ouest baie de Zemmouri et la zone rocheuse Jean Bart.

Après l'interpolation de la Mesh, on obtient une bathymétrie des deux zones, allant jusqu'à la pleine abyssale de la méditerranée :

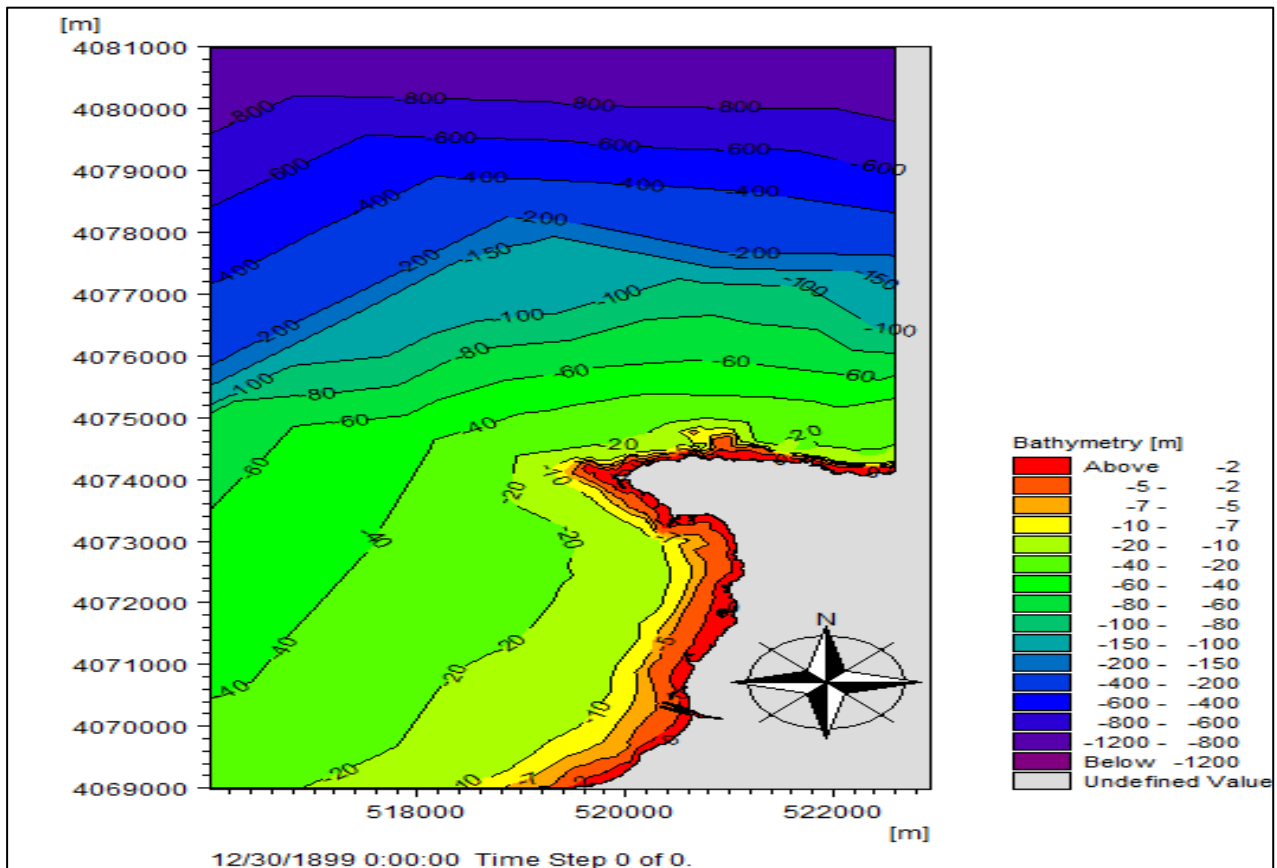


Figure 36: Carte bathymétrique de la zone est baie d'Alger.

Cette représentation bathymétrique met en évidence les caractéristiques morphologiques remarquables des fonds marins dans la portion orientale du golfe d'Alger. On peut diviser la bathymétrie de cette zone en trois domaines principaux :

Le plateau continental near shore :

Cette zone peu profonde proche du trait de côte est représentée par les teintes vert pâle à jaune, avec des profondeurs inférieures à 50 mètres. Elle correspond au plateau continental étroit bordant la côte algéroise. Cependant, il est important de noter que dans cette portion du littoral au niveau de la baie, à El Marsa, ce plateau est nettement plus large et les profondeurs changent lentement en allant vers le large comparé à sa largeur plus réduite au nord-est (figure36).

Le rebord du plateau et la pente continentale supérieure :

Représentés par les couleurs jaune-orange à rouge, ces zones marquent une nette rupture de pente passant de 50 à 100 mètres de profondeur sur une distance réduite. Cela définit le rebord du plateau et le début de la pente continentale supérieure à fort pendage.

Le glacis au pied de la pente :

Au nord-est, une zone plus lisse de couleur bleue à verte correspond à un glacis sous-marin avec des profondeurs variant de 100 à 200 mètres environ. Ainsi, cette carte met en évidence la forte accidentée des fonds marins dans ce secteur

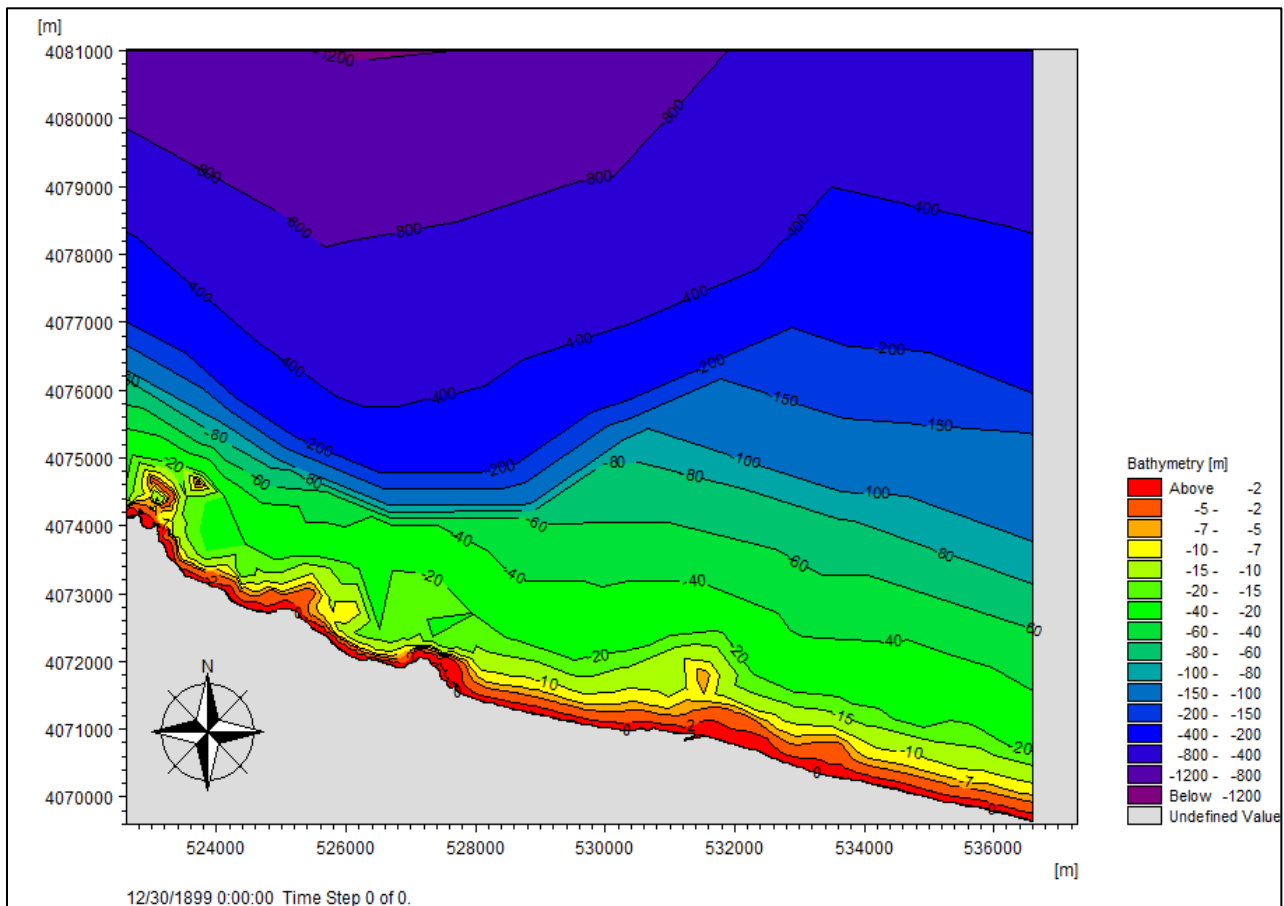


Figure 37: Carte bathymétrique de la zone ouest baie Zemouri.

D’après la carte bathymétrique de la zone ouest baie de Zemouri des zones morphologiques bien distinctes sont mises en évidence :

La frange littorale :

Proche des côtes, on observe une bande étroite de faibles profondeurs inférieures à 20 mètres (teintes jaune-vert), correspondant à la frange littorale peu profonde. Cette frange montre un relief irrégulier et accidenté.

Le rebord de plateau :

Marqué par les couleurs orange vif, cette zone marque une rupture de pente abrupte entre 20 et 100 mètres de profondeur, délimitant le rebord du plateau continental.

Les bassins et dépressions :

Des zones dépressionnaires plus profondes (violet foncé dépassant 400m), formant de petits bassins confinés.

Ainsi, le paysage sous-marin est fortement disséqué

V.4 Scénarios de simulation :

Après avoir identifié les directions de houle pénalisantes et déterminé les hauteurs de vagues extrêmes associées à différentes périodes de retour dans l'étude précédente (chapitre IV), on a choisi de simuler la direction la plus pénalisante (Nord). La méthode adoptée consiste à associer la hauteur significative de houle maximale correspondant aux périodes de retour d'événement retenues (10 ans, 30 ans et 100 ans).

En complément, l'élévation future du niveau marin projetée par le rapport du GIEC en 2019 a été prise en considération. Les résultats obtenus, combinant les hauteurs de houle extrêmes par période de retour, ainsi que l'élévation du niveau de la mer.

Note :

Pour l'ensemble des simulations numériques, un vent constant a été attribué à toutes les modélisations.

Les vitesses et directions moyennes de ce vent forcing, présentées dans le Tableau VI-4, ont été déterminées à partir de l'analyse statistique d'une longue série temporelle de données de vent et de vagues, issues de la base Infoplaza, couvrant la période 1992-2022 dans les baies d'Alger et Zemmouri (figure 38,39).

Afin d'éviter une surestimation des conditions extrêmes résultant du couplage direct d'un vent et d'une houle de même période de retour rare, la méthode des probabilités conjointes vent-

vagues a été privilégiée, comme recommandé par Abid et al. (2020). Cette approche permet d'associer de manière réaliste les conditions de vent et de vagues en tenant compte de leur probabilité d'occurrence concomitante.

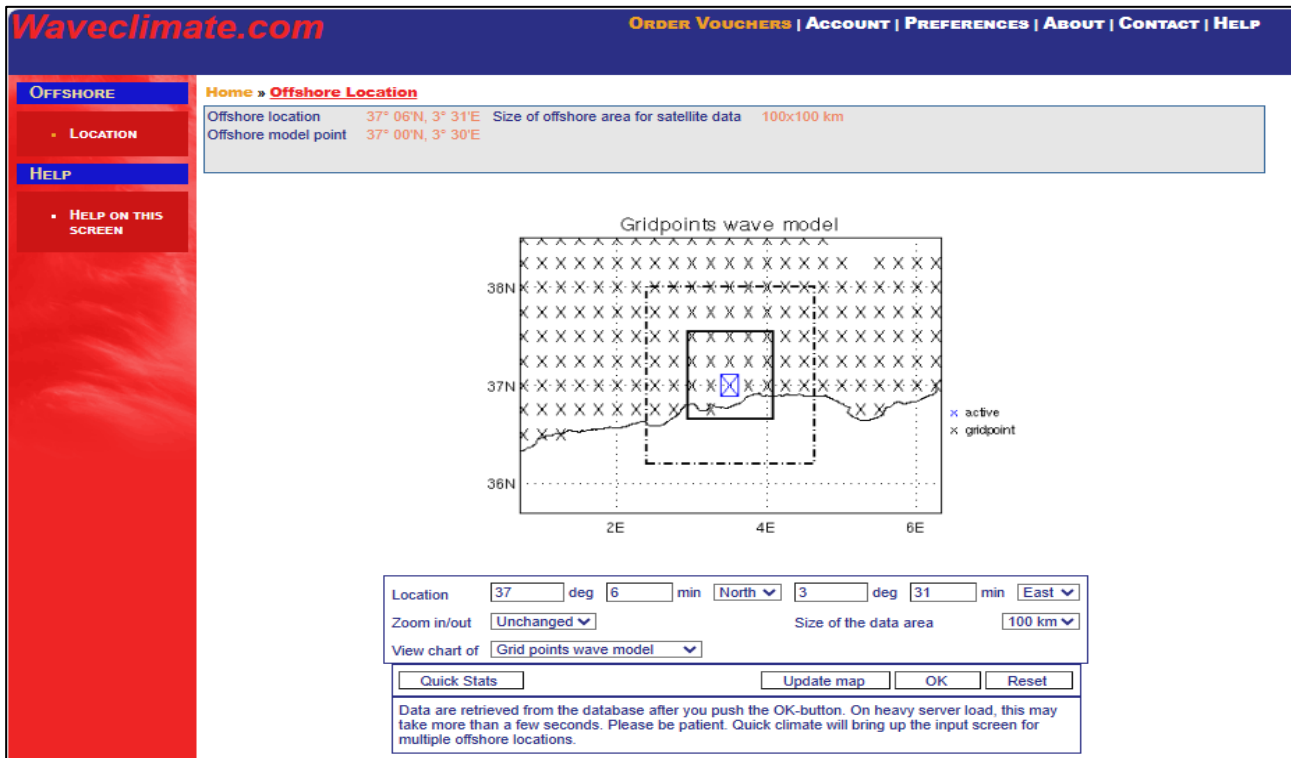


Figure 39: Point d'extraction des séries temporelle dans la baie de Zemmouri.

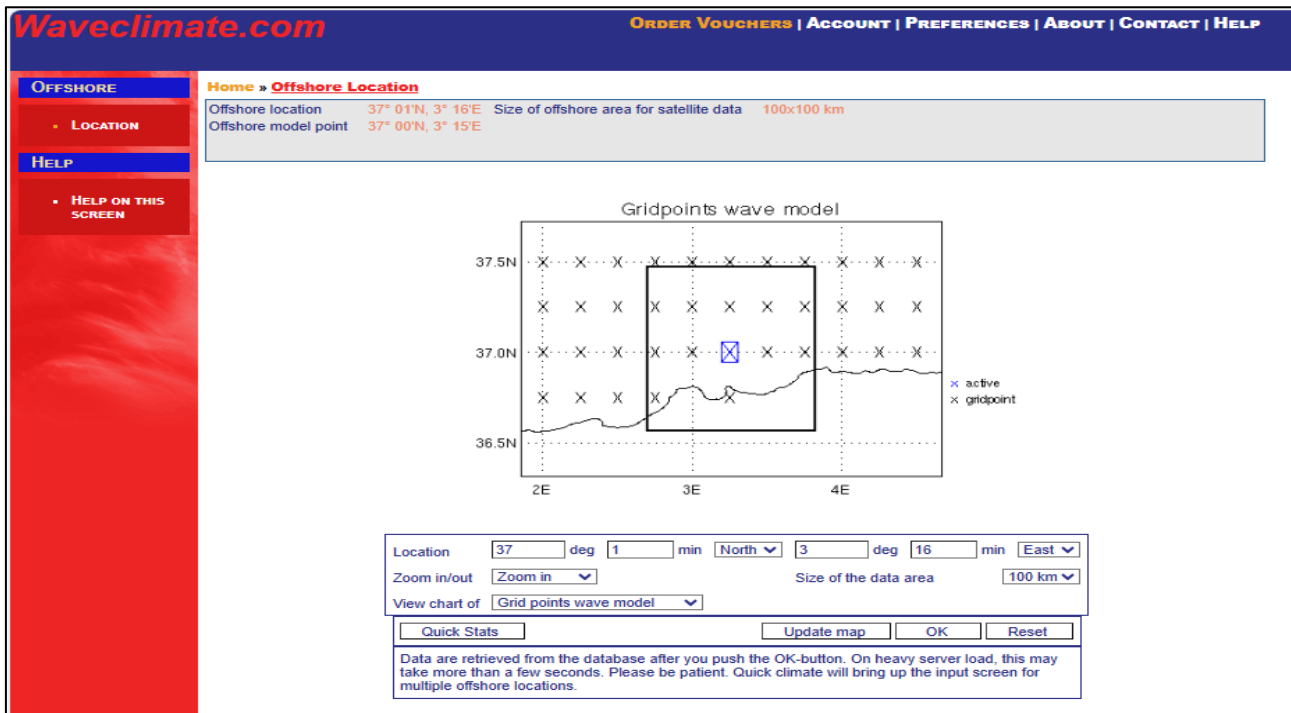


Figure 38: Point d'extraction des séries temporelle dans la baie d'Alger.

Tableau 4 : Les inpts des simulations pour l'ensemble des périodes de retour (10, 30 et 100 ans) pour l'est baie d'Alger.

	Période de retour 10				Niveau de la mer
Paramètre de houle	Hs	Tp	U10	U10 direction (°)	NGA = +0.34m Elévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
Direction Nord	5.10	10.22	12	359.8	
	Période de retour 30				Niveau de la mer
Paramètre de houle	Hs	Tp	U10	U10 direction (°)	NGA = +0.34m Elévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
Direction Nord	5.89	11.13	12	359.8	
	Période de retour 100				Niveau de la mer
Paramètre de houle	Hs	Tp	U10	U10 direction (°)	NGA = +0.34m Elévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
Direction Nord	6.77	12.09	12	359.8	

Tableau 5: Les inpts des simulations pour l'ensemble des périodes de retour (10,30 et 100ans) pour l'ouest de la baie de Zemmouri.

	Période de retour 10				Niveau de la mer
Paramètre de houle	Hs	Tp	U10	U10 direction (°)	NGA = +0.34m Elévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
Direction Nord	5.94	9.16	12	359.8	
	Période de retour 30				Niveau de la mer
Paramètre de houle	Hs	Tp	U10	U10 direction (°)	NGA = +0.34m Elévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
Direction Nord	6.77	10.02	12	359.8	
	Période de retour 100				Niveau de la mer
Paramètre de houle	Hs	Tp	U10	U10 direction (°)	NGA = +0.34m Elévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
Direction Nord	7.69	10.93	12	359.8	

V.5. Résultats des simulations :

V.5.1. Résultats pour l'est baie d'Alger :

V.5.1.1. Période de retour de 10 ans :

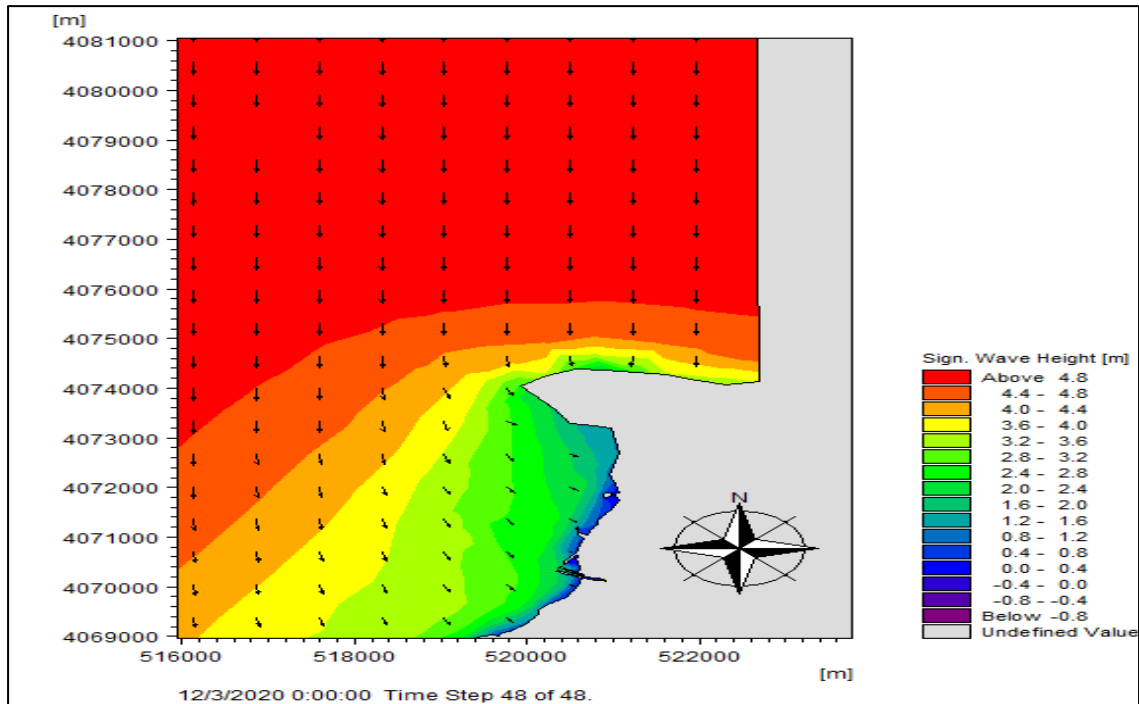


Figure 40:Champs des houles dans l'est de la baie d'Alger pour la direction .Nord (10ans).

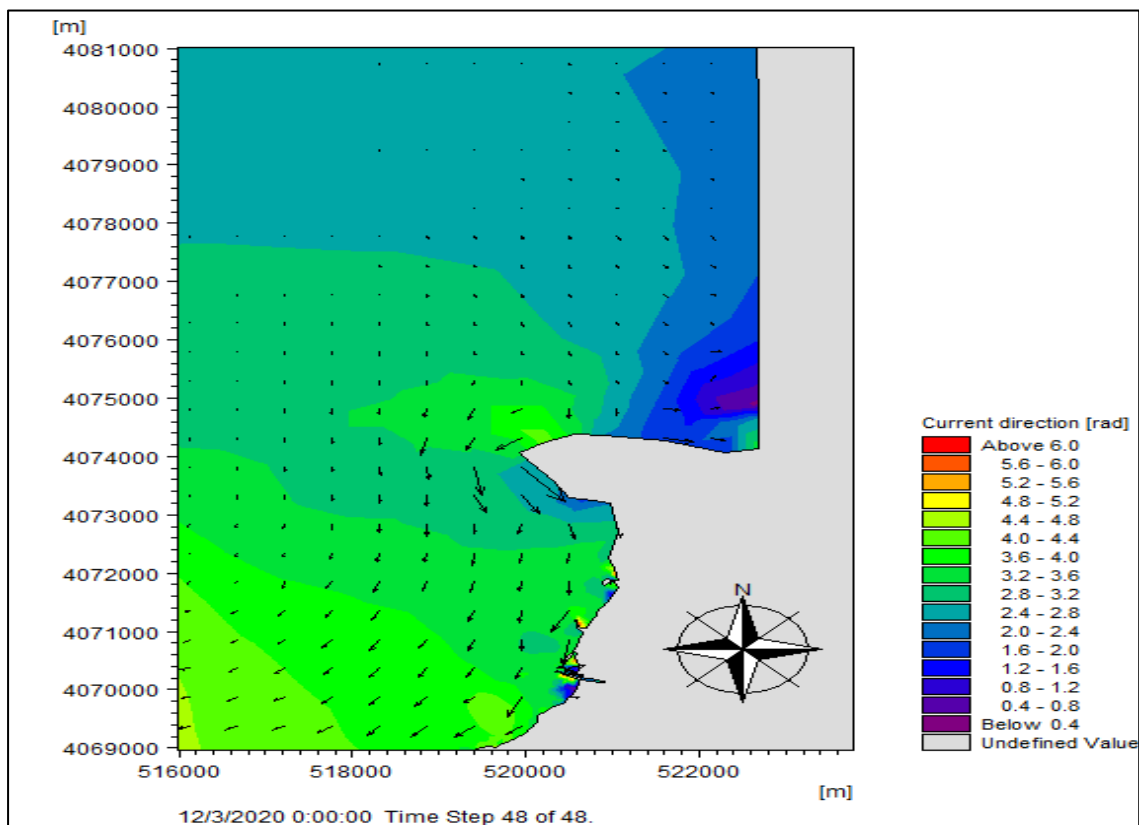


Figure 41: Champs des courants dans l'est de la baie d'Alger pour la direction Nord(10ans).

V.5.2.2. Période de retour de 30 ans :

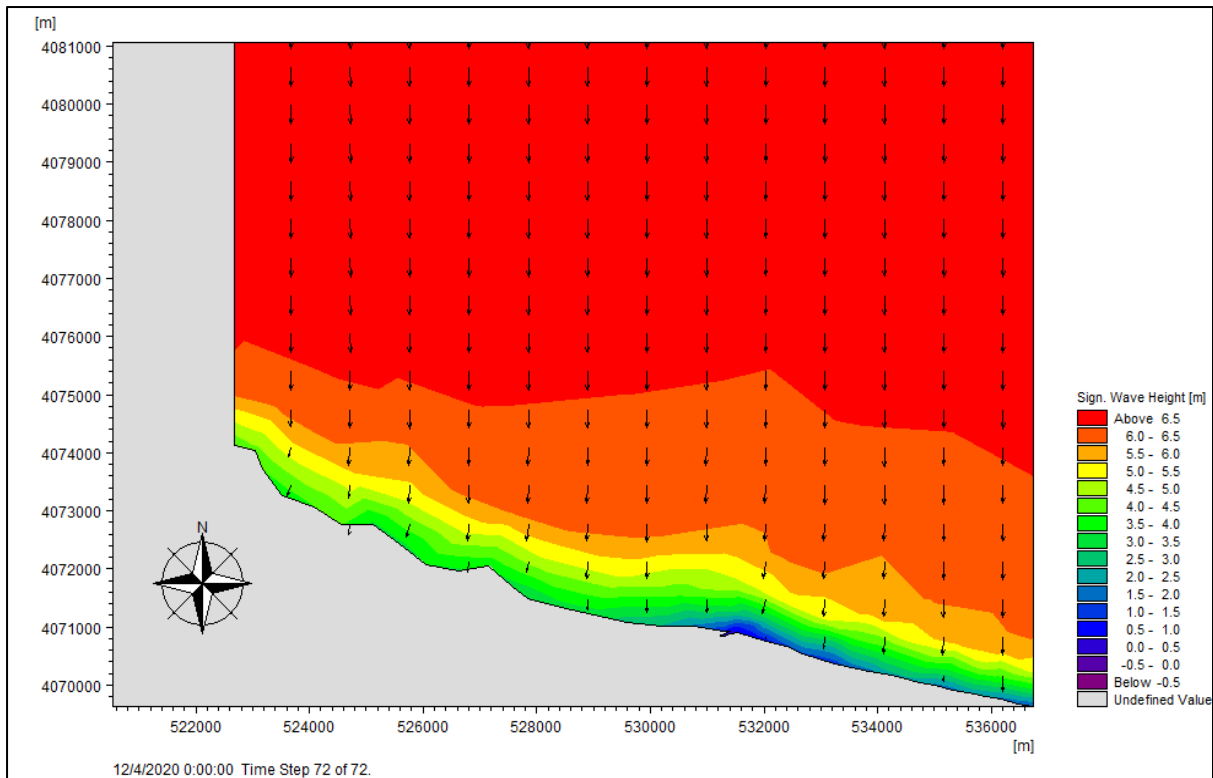


Figure 42:Champs des houles dans l'ouest de la baie Zemmouri pour la direction Nord (30 ans).

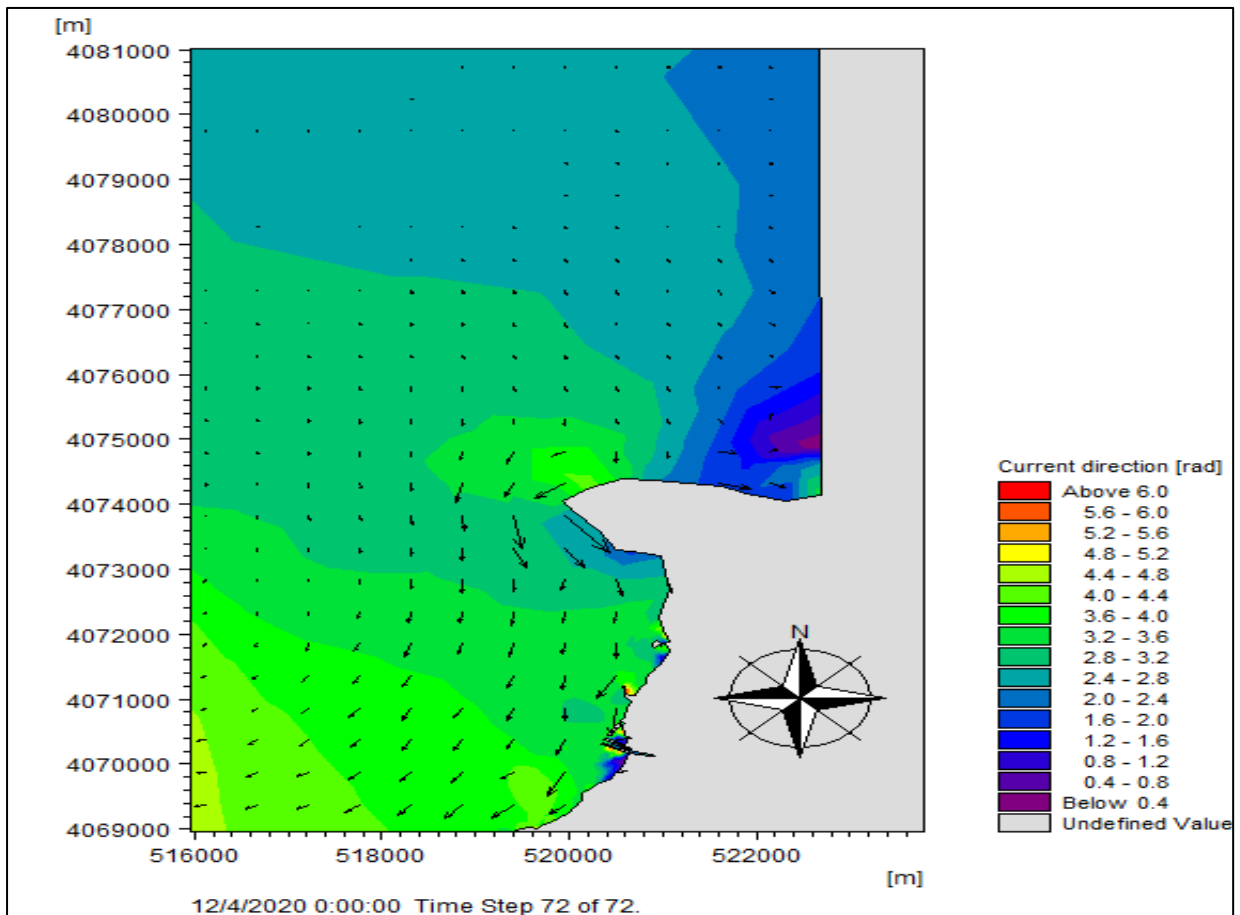


Figure 43:Champs des courants dans l'est de la baie d'Alger pour la direction Nord (30ans).

V.5.1.3. Période de retour de 100 ans :

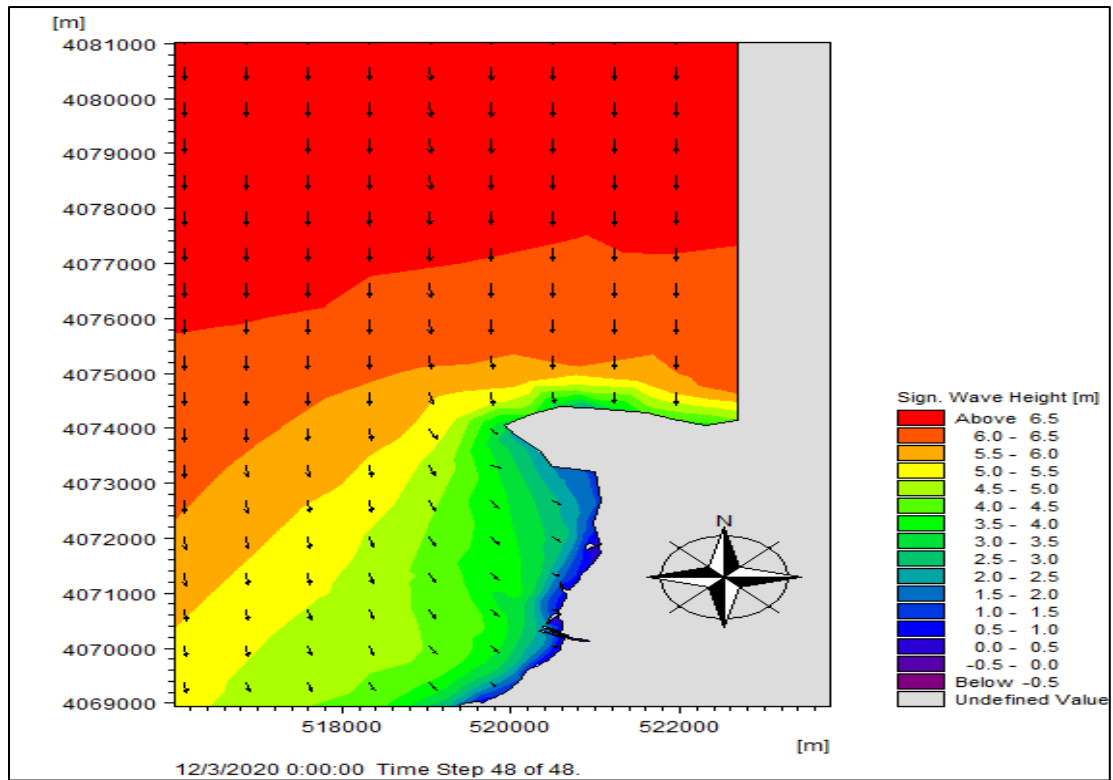


Figure 44:Champs des houles dans l'est de la baie d'Alger pour la direction Nord (100 ans).

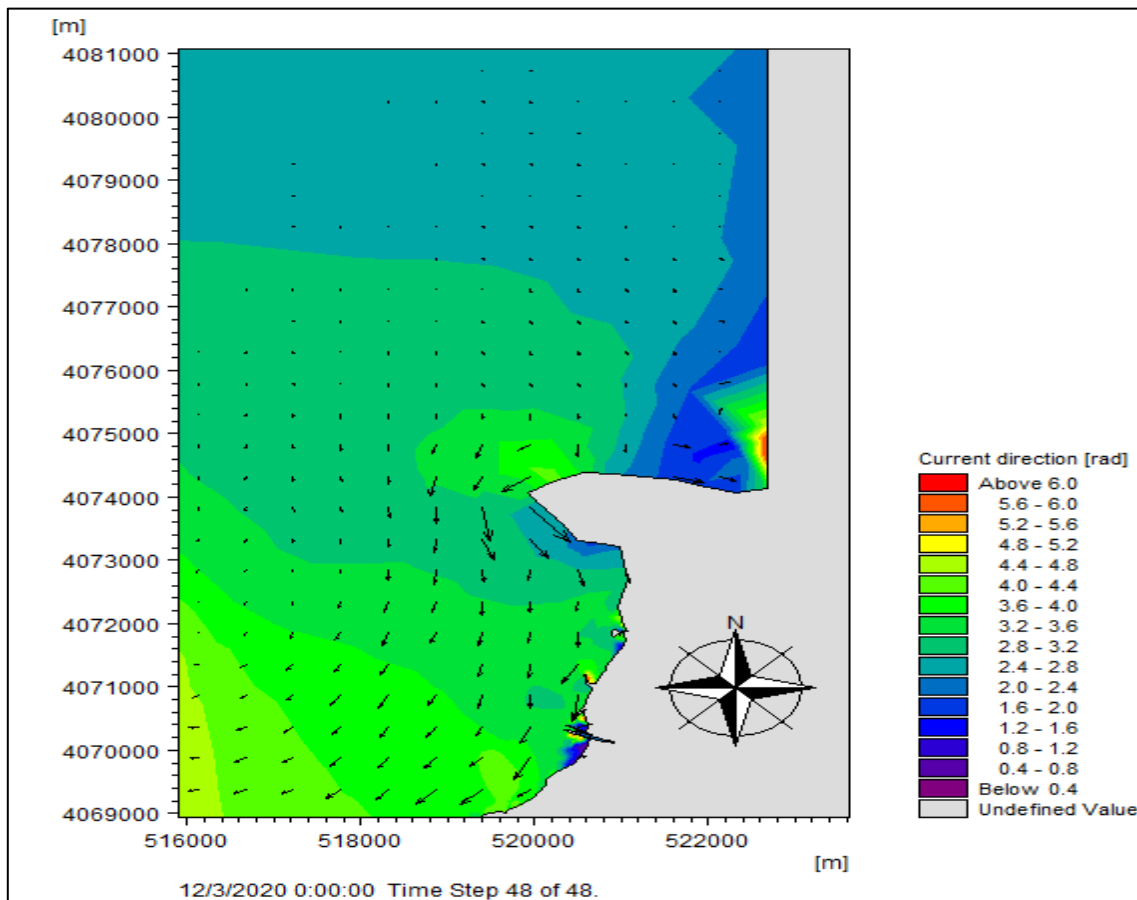


Figure 45:Champs des courants dans l'est de la baie d'Alger pour la direction Nord (100ans).

V.5 .1.4. Interprétation des Résultats :

Les simulations illustrent le comportement des vagues et des courants induits pour différentes périodes de retour dans la partie est de la baie d'Alger.

Pour une période de retour de 10 ans, on observe des hauteurs significatives de vagues atteignant un maximum d'environ 2,2 mètres près des côtes. Ces conditions génèrent des courants côtiers avec des vitesses maximales d'environ 0,5 m/s dans cette zone.

Lorsque l'on considère une période de retour de 30 ans, les hauteurs de vagues augmentent, avec des valeurs maximales autour de 3 mètres le long de la côte est. En conséquence, les vitesses des courants côtiers s'intensifient également, atteignant jusqu'à 0,8 m/s au plus fort.

Pour un événement extrême de période de retour centennale (100 ans), les simulations indiquent des hauteurs significatives de vagues maximales de l'ordre de 4 mètres près du rivage est. Ces vagues intenses induisent des courants côtiers très rapides, avec des vitesses maximales pouvant atteindre 1,1 m/s dans les zones les plus exposées à l'est de la baie.

On remarque ainsi une augmentation substantielle de l'intensité des phénomènes avec la période de retour considérée. Entre les scénarios de 10 ans et 100 ans, les hauteurs de vagues maximales près des côtes passent d'environ 2,2 mètres à 4 mètres, tandis que les vitesses maximales des courants côtiers plus que doublent, passant de 0,5 m/s à 1,1 m/s dans la partie est de la baie.

Cette concentration des plus fortes houles et des courants côtiers les plus intenses dans la partie est probablement liée à l'orientation de la propagation des vagues incidentes dans ce secteur de la baie d'Alger.

Ces chiffres soulignent l'importance de considérer les conditions extrêmes de vagues et de courants, en particulier pour la période de retour centennale, dans la gestion des risques côtiers et l'aménagement du littoral dans la partie est de la baie d'Alger.

V.5.2. Résultats pour l'ouest de la baie de Zemmouri:

V.5.2.1. Période de retour de 10 ans :

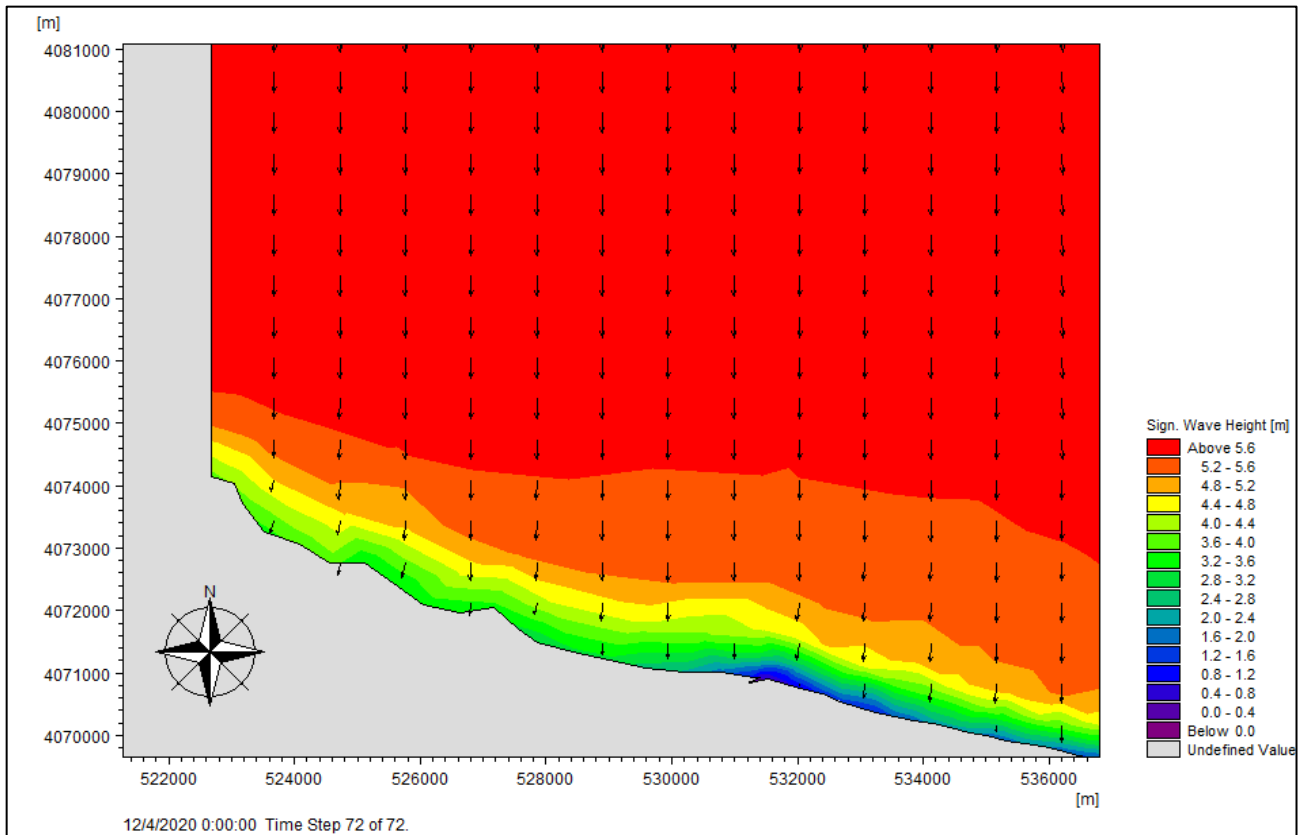


Figure 46: Champs des houles dans l'ouest de la baie Zemmouri pour la direction Nord (10 ans)

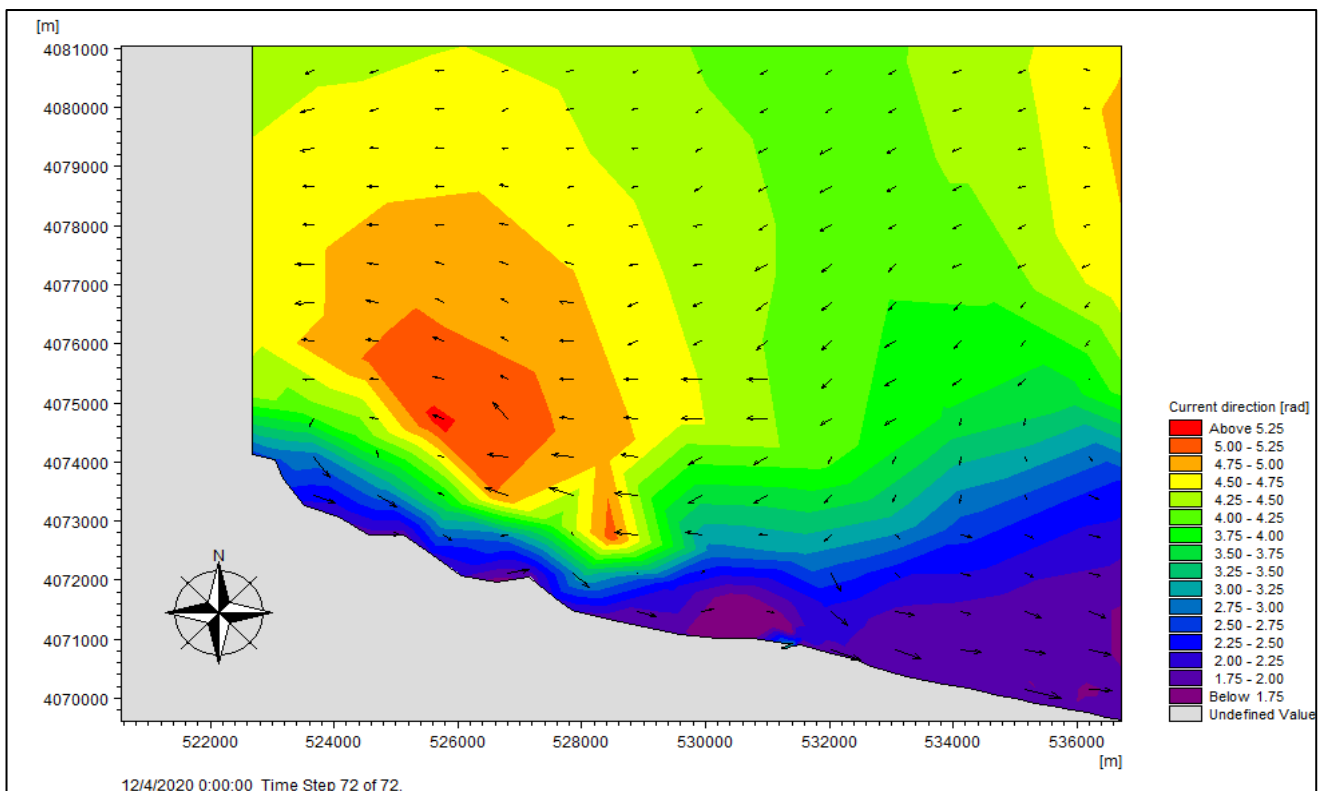


Figure 47: Champs des courants dans l'ouest de la baie Zemmouri pour la direction Nord (10ans).

V.5.2.2. Période de retour de 30 ans :

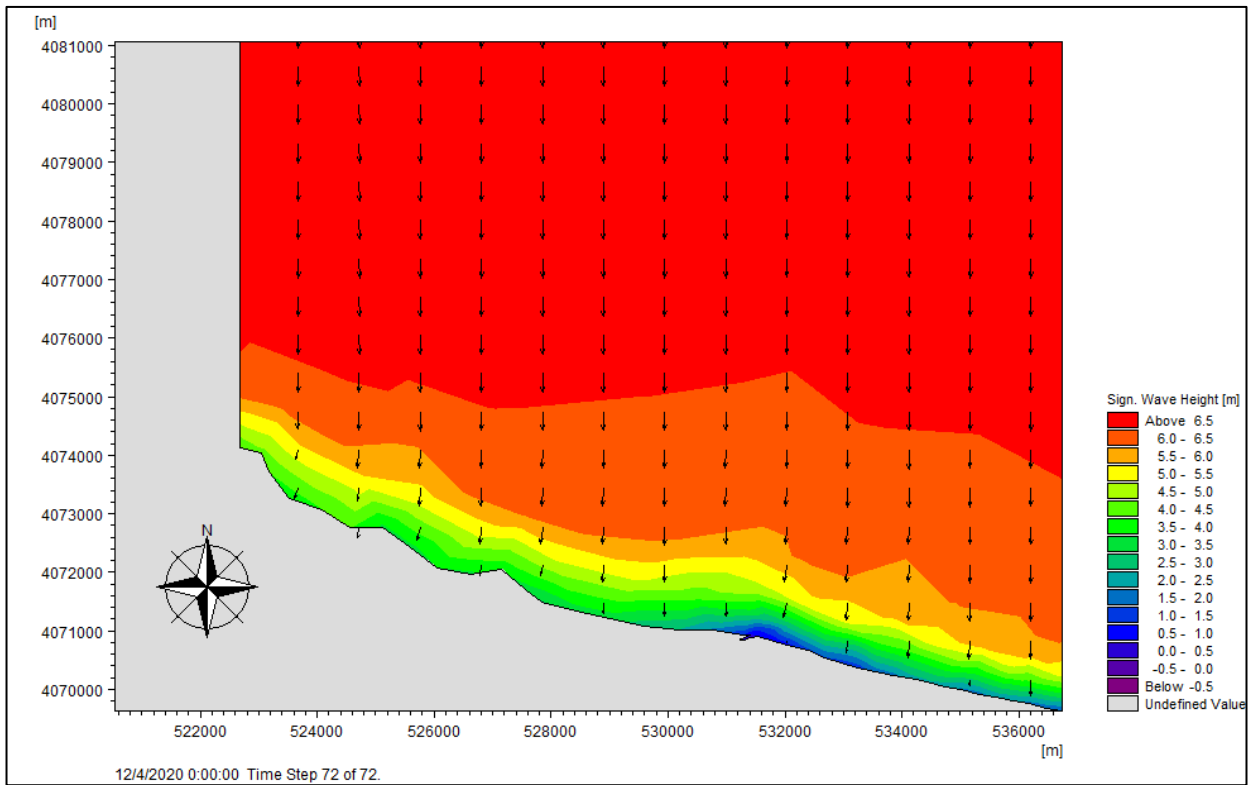


Figure 48: Champs des houles dans l'ouest de la baie Zemouri pour la direction Nord (30 ans).

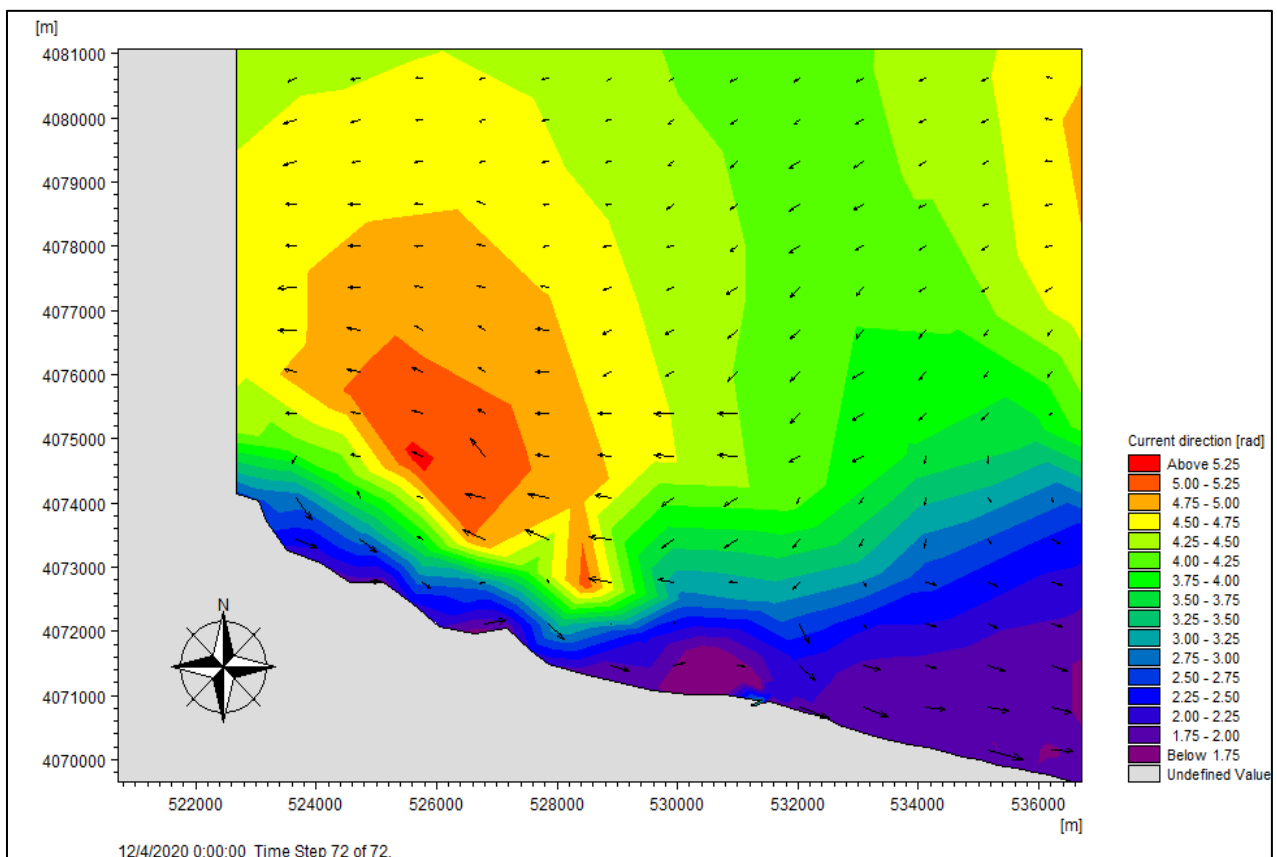


Figure 49: Champs des courants dans l'ouest de la baie Zemouri pour la direction Nord (30ans).

V.5.2.3. Période de retour de 100 ans :

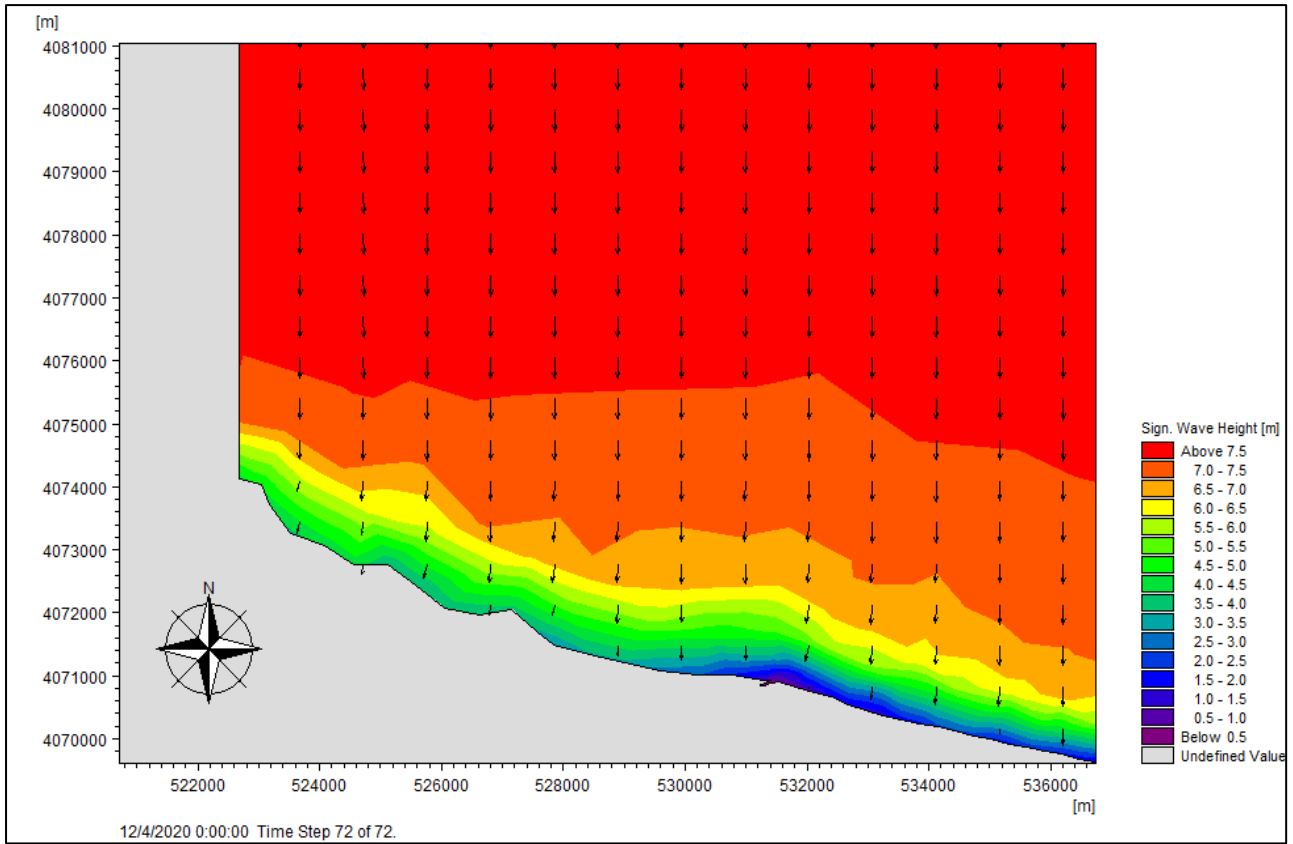


Figure 51: Champs des houles dans l'ouest de la baie Zemouri pour la direction Nord (100 ans).

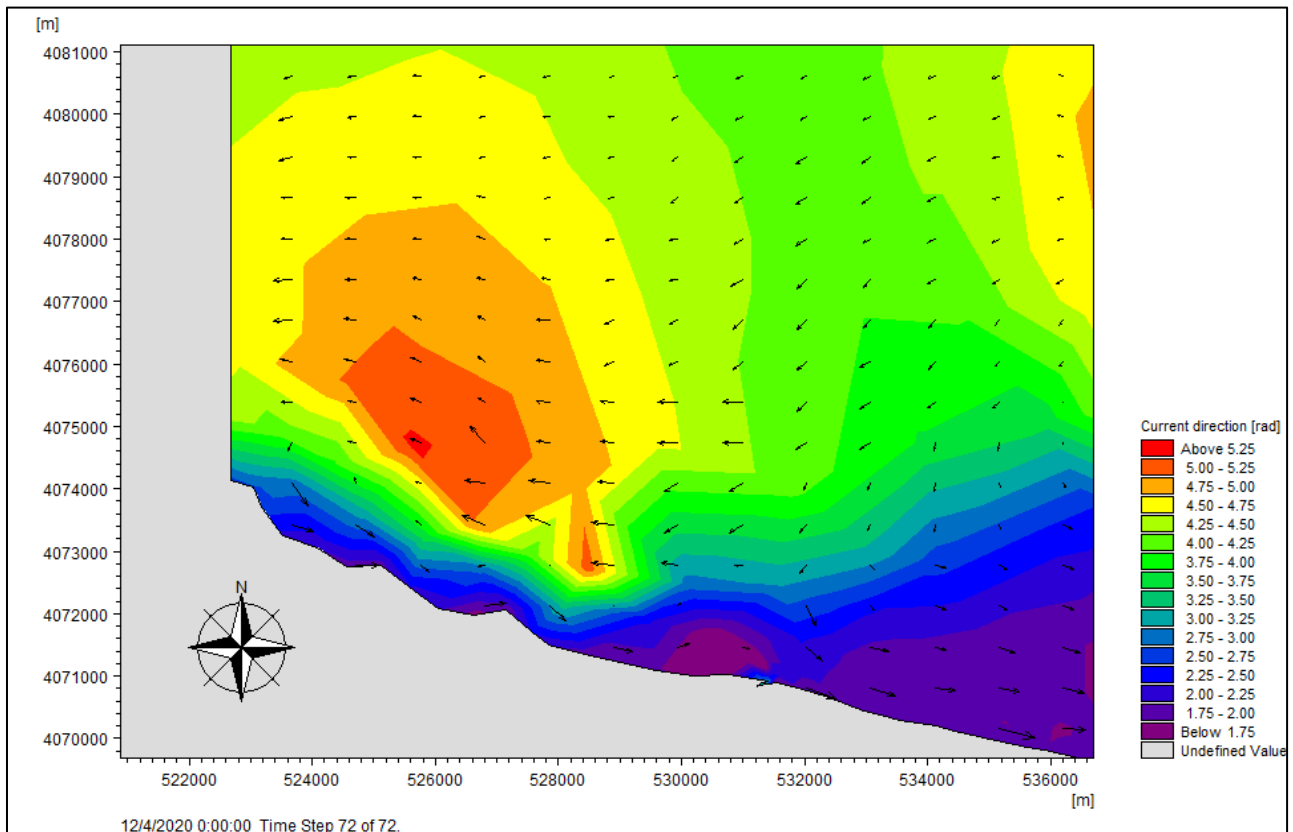


Figure 50: Champs des courants dans l'ouest de la baie Zemouri pour la direction Nord (100ans).

V.5.2.4. Interprétation des Résultats :

Les simulations illustrent la propagation des houles et la circulation des courants côtiers induits pour différentes périodes de retour dans l'ouest de la baie de Zemmouri et l'est de la baie d'Alger.

A l'ouest de la baie de zemmouri, pour une période de retour de 10 ans, les hauteurs significatives des vagues atteignent un maximum de 2,5 mètres près de la côte ouest. Ces houles génèrent des courants côtiers avec des vitesses maximales d'environ 0,6 m/s dans cette même zone.

Lorsque l'on considère une période de retour de 30 ans, les conditions de vagues deviennent plus sévères, avec des hauteurs significatives maximales de 3,5 mètres le long de la côte ouest. En conséquence, les vitesses des courants côtiers augmentent également, atteignant jusqu'à 0,9 m/s au plus fort.

Pour un événement extrême avec une période de retour de 100 ans, les simulations montrent des hauteurs significatives de vagues maximales dépassant les 4,5 mètres à certains endroits près du rivage ouest. Ces conditions intenses induisent des courants côtiers très rapides, avec des vitesses maximales pouvant atteindre 1,2 m/s dans les zones les plus exposées à l'ouest de la baie.

On observe ainsi une augmentation significative de l'intensité des phénomènes avec la période de retour considérée. Entre les scénarios de 10 ans et 100 ans, les hauteurs de vagues maximales près des côtes passent de 2,5 mètres à 4,5 mètres, tandis que les vitesses maximales des courants côtiers doublent, passant de 0,6 m/s à 1,2 m/s dans la partie ouest de la baie.

Cette concentration des plus fortes houles et des courants côtiers les plus rapides dans la partie ouest est liée à l'orientation ouest de la propagation des vagues incidentes dans cette zone.

Ces chiffres mettent en évidence l'importance de prendre en compte les conditions extrêmes de vagues et de courants côtiers, en particulier pour la période de retour centennale, dans la gestion et l'aménagement de cette zone littorale sensible.

Au niveau de la zone Est baie d'Alger

Les résultats permettent de constater que cette zone, oins exposée au forçage hydrodynamique. La hauteur des vagues atteint au maximum..... au niveau de la côte. En effet, le relief marin joue un rôle important en minimisant l'impact des vagues sur la côte. En effet, les pointements de reliefs hauts au large jouent, par endroit sur la portion de de la côte étudiée, le rôle de brises lames naturels.

V.6 Conclusion :

En conclusion, les simulations numériques réalisées ont mis en évidence des conditions hydrodynamiques très intenses, avec de fortes houles et des courants côtiers rapides, en particulier lors d'événements extrêmes de période de retour centennale. Ces conditions extrêmes, concentrées dans l'ouest de la baie de Zemmouri et l'est de la baie d'Alger, exercent des forçages importants sur le littoral, favorisant l'érosion des faciès géologiques côtiers. Les faciès meubles ou peu consolidés sont particulièrement vulnérables face à l'action combinée des vagues énergétiques et des courants vigoureux. Il est donc essentiel de considérer ces conditions hydrodynamiques extrêmes, spécifiquement pour la période de retour de 100 ans, dans l'analyse des risques d'érosion côtière affectant les formations géologiques littorales de ces deux baies.

Néanmoins, l'impact des forçages hydrodynamiques sur la zone côtière reste hétérogène et largement conditionné par le relief sous-marin.

Chapitre VI :

Évolution du trait de côte

VI.1. Introduction :

Le trait de côte est un élément essentiel de la géomorphologie littorale, influencé par les processus d'érosion et d'accumulation des faciès géologiques. L'objectif principal de ce chapitre vise à explorer la théorie de l'érosion des faciès géologiques et de l'accumulation dans le contexte du développement et de la poursuite de l'analyse de l'évolution du trait de côte.

VI.2. Définition du trait de côte :

Le trait de côte n'a pas une définition unique car il s'agit d'une zone mouvante et changeante, dont la délimitation varie selon les spécificités morphologiques et dynamiques du littoral. Par exemple, pour l'IGN il correspond aux "laisses de pleine mer", tandis que pour le SHOM, il désigne la limite supérieure atteinte par la mer lors des plus grandes marées. Cette dernière définition est également retenue dans le guide de gestion du trait de côte du MEDDTL.

Le trait de côte peut ainsi être caractérisé par la corniche d'une falaise rocheuse ou dunaire en cas d'érosion des dunes, ou matérialisé par la limite de végétation pour les dunes en accrétion. Cette variabilité de définition provient de la diversité des façades maritimes en termes de types de côtes (rocheuses, meubles, artificialisées) qui induisent des spécificités morpho dynamiques différentes. Le trait de côte étant une zone en perpétuel mouvement, il n'admet donc pas de limite fixe et immuable (**GHEZALI, 2016**).

VI.3. Matériels et méthodes :**VI.3.1. Collecte et traitement des données :**

Des images satellitaires multi dates (1985-2023) de Landsat5-TM, Landsat8-OLI ont été utilisées pour extraire les lignes de rivage dans la zone d'étude (Tableau IV.1).

Onze images satellitaires Landsat ont été téléchargées à partir du site Web de l'USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) pour couvrir l'ensemble de la zone d'étude.

Les images téléchargées ont été corrigées géométriquement et ortho rectifiées en utilisant une correction de terrain standard (niveau L1T).

Les images téléchargées étaient dans le système de projection UTM zone 31N et le datum WGS84. Elles ont été traitées et il a été vérifié que les images téléchargées sont exemptes de nuages dans la zone d'étude. Les images ont été utilisées à une seule période de l'année (la

saison de l'été) en raison de l'absence des nuages et la similitude des phénomènes hydrodynamiques.

Tableau 6: L'ensemble des images utilisées.

Date	Satellite	Sensor-ID	Résolution spatial(m)	Nombre d'image
15/6/1985	Landsat-5	TM	30	1
26/6/1989	Landsat-5	TM	30	1
23/07/1993	Landsat-5	TM	30	1
03/08/1997	Landsat-5	TM	30	1
26/5/2001	Landsat-5	TM	30	1
22/06/2005	Landsat-5	TM	30	1
19/07/2009	Landsat-5	TM	30	1
15/08/2013	Landsat-8	OLI_TIRS	30	1
09/7/2017	Landsat-8	OLI_TIRS	30	1
20/07/2021	Landsat-8	OLI_TIRS	30	1
18/07/2023	Landsat-8	OLI_TIRS	30	1

VI.3.2. Outils de traitement :**VI.3.2.1. Google EarthPro :**

Google Earth Pro est un outil de système d'information géographique (SIG) qui offre des fonctionnalités supplémentaires par rapport à la version gratuite de Google Earth. Il permet

d'importer et d'afficher des données spatiales sélectivement et raster provenant de diverses sources, ainsi que de créer des analyses spatiales et des mesures avancées.

Google Earth Pro est la version professionnelle du logiciel de visualisation terrestre de Google, offrant des fonctionnalités avancées telles que l'importation de fichiers SIG (KML, KMZ, shapefiles, geodatabases), des outils d'analyse spatiale pour mesurer des distances, des surfaces, créer des tampons et des profils d'élévation, l'impression de cartes haute résolution, la création de films animés à partir de données spatiales, ainsi qu'un support technique prioritaire dédié aux utilisateurs professionnels.

VI.3.2.2. Arc Gis 10.4 :

ArcGIS, le système d'information géographique (SIG) conçu par Esri (Environmental System Research Institute), joue un rôle crucial dans la gestion et l'analyse du littoral. Ses fonctionnalités avancées d'acquisition, de stockage, de manipulation et de représentation des données spatiales permettent une cartographie précise du littoral et un suivi temporel de son évolution. En utilisant les outils d'analyse spatiale intégrés, tels que les superpositions, les calculs de surface et de distance, ainsi que la modélisation 3D, ArcGIS offre la possibilité d'explorer les changements morphologiques des zones côtières. De plus, il permet d'évaluer les risques associés à l'érosion et à la submersion, et de concevoir des stratégies d'adaptation appropriées.

VI.3.2.3. Extension DSAS :

DSAS (Digital Shore line Analysis System) est un progiciel développé par l'USGS (United States Geological Survey) disponible gratuitement qui fonctionne au sein du logiciel de Système d'information géographique Arc GIS. Il calcule les statistiques de taux de changement pour une série chronologique de données vectorielles de trait de côte. 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 al., 2005**).

L'utilisateur peut également spécifier l'espacement des lignes de transect le long du rivage. Le déplacement du trait de côte vers l'intérieur des terres ou vers la mer, par rapport à la ligne de base, est décrit comme une accumulation ou une érosion à chaque transect, respectivement. Les valeurs statistiques sont considérées comme positives pour l'accumulation et négatives pour l'érosion (**Boukhennaf, 2023**).

Le logiciel calcule diverses valeurs statistiques afin de mesurer le changement de position du rivage (Anfuso et al., 2016), les principales mesures comprennent le taux de point final (EPR), qui évalue la variation du trait de côte entre deux rivages successifs. Le taux de régression linéaire (LRR) englobe toutes les lignes de rivage et peut être calculé en ajustant une ligne de régression des moindres carrés à tous les points de rivage d'un transect. Le mouvement net de rivage (NSM) quantifie la distance totale entre les rivages successifs. Cette méthode spécifique de détection des changements côtiers a été précédemment appliquée avec diverses données de télédétection (BOUKHENNAF, 2023).

VI.3.3. Extraction du trait de côte:

Le processus de sélection de la méthode d'extraction du trait de côte revêt une grande importance car elle influe considérablement sur l'incertitude associée au trait de côte obtenu. Les techniques d'extraction du trait de côte à partir d'images de télédétection peuvent être classées en deux grandes catégories : la méthode manuelle et la méthode automatique.

Méthode manuel :

La méthode manuelle d'extraction du trait de côte reste l'une des techniques les plus fiables et utilisées, elle permet d'obtenir un trait de côte très précis en détectant finement les irrégularités du littoral(Faye,IBN, 2010).La figure résume les étapes de la méthodologie de suivi du trait de côte suivis dans notre étude.

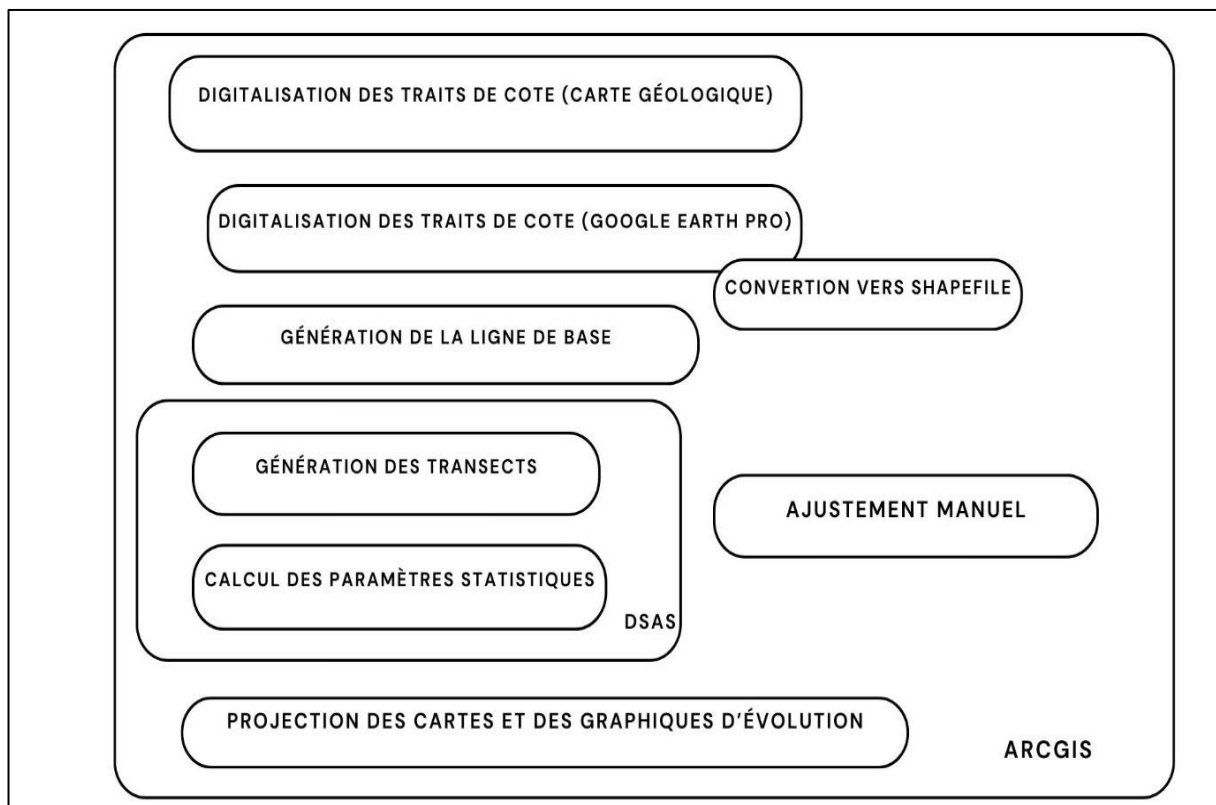


Figure 52: Étapes de la méthodologie de suivi du trait de côte.

1. Le géoréférencement:

Le géoréférencement consiste à attribuer à une image des coordonnées géographiques permettant de la superposer avec précision sur une carte ou une autre image (rectifiée ou non) de la même zone géographique.

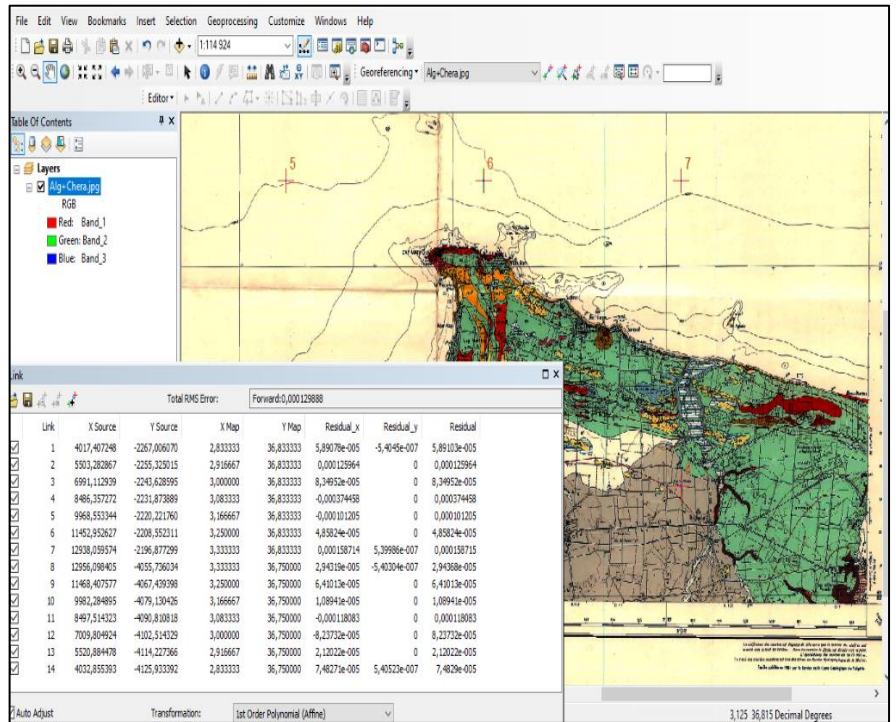


Figure 53: géoréférencement de la carte géologique.

2. Digitalisations des traits de cote (carte géologique et Google Earth pro) :

La digitalisation consiste à tracer manuellement une ligne virtuelle qui délimite l'interface entre la mer et la terre, définissant ainsi le trait de côte. Cette opération est réalisée à l'aide de l'outil "Éditeur" du logiciel "ArcGIS", permettant d'extraire les différents traits de côte correspondant à chaque date analysée.

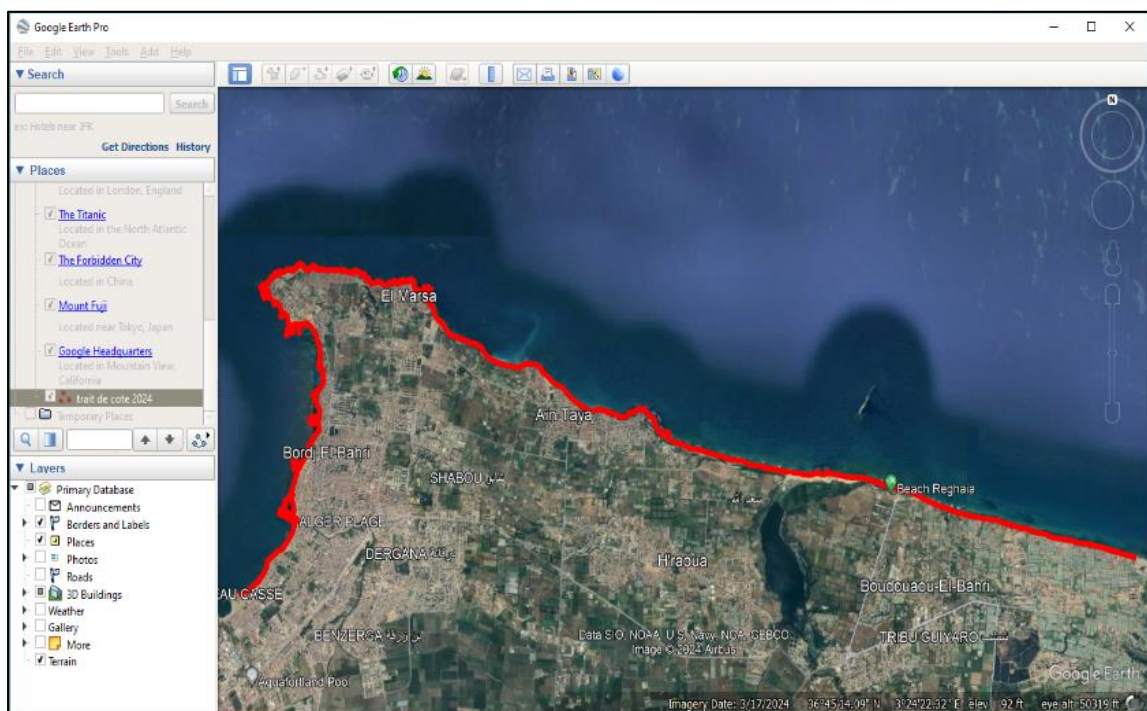


Figure 54: Digitalisation du trait de côte de la zone d'étude (Google Earth).

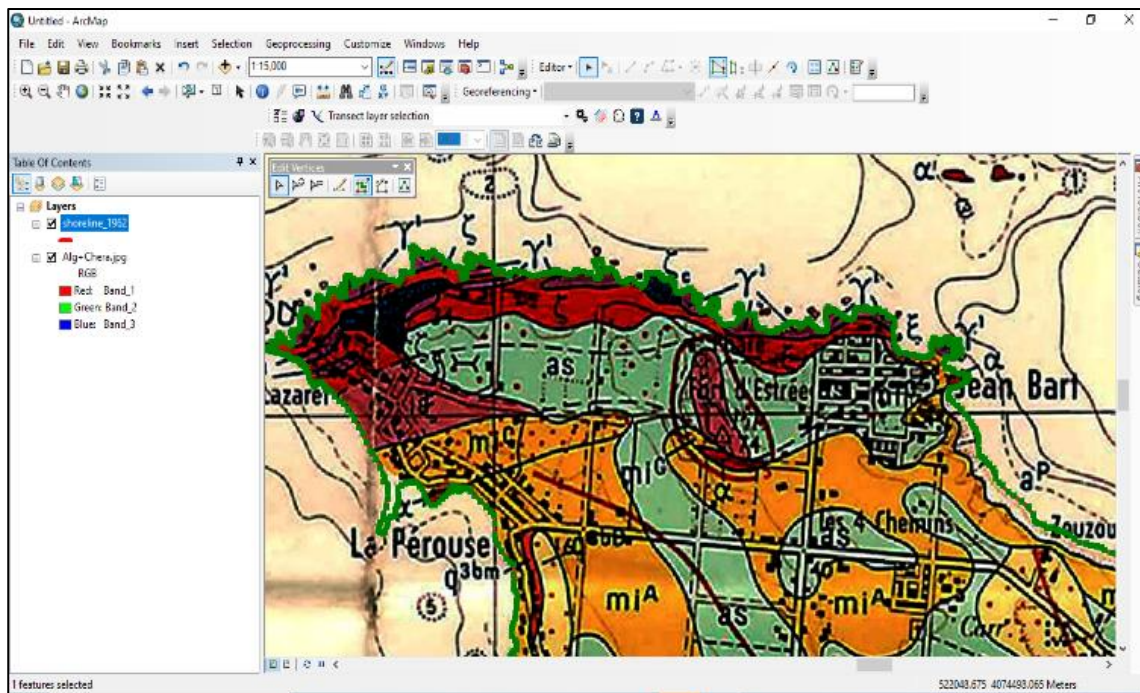


Figure 55: Digitalisation du trait de côte de la zone d'étude (carte géologique).

3. Génération de la ligne de base :

La ligne de base est considérée comme une ligne de référence pour le logiciel DSAS (Digital Shoreline Analysis System). Elle est indispensable pour générer les transects, qui sont des lignes perpendiculaires au trait de côte permettant d'analyser les variations dans le temps.

La ligne de base sert également au calcul statistique de l'évolution du trait de côte, dans ArcGIS, elle est représentée par une classe d'entité géométrique de type ligne, utilisant le système de coordonnées projetées WGS84_UTM.

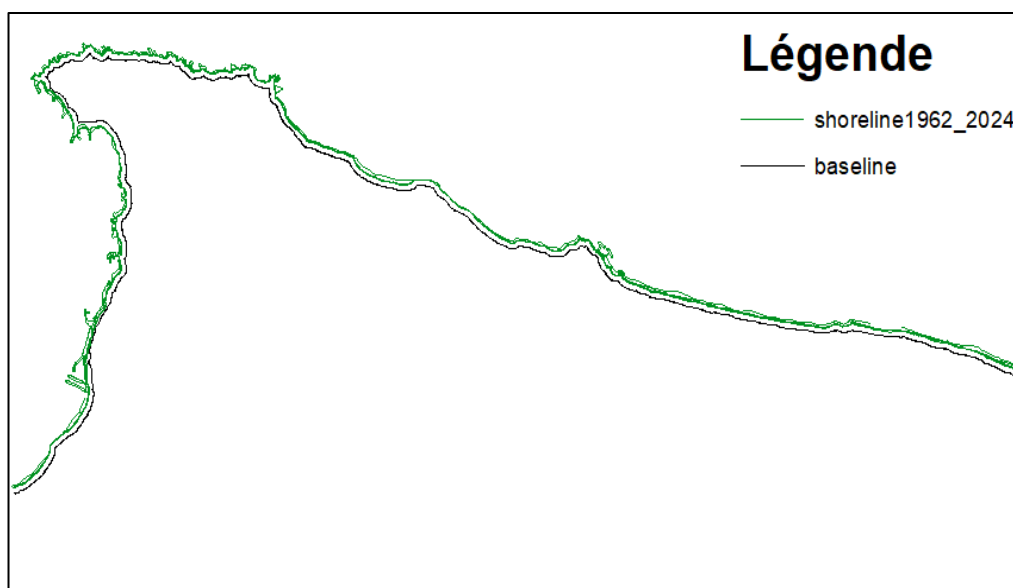


Figure 56: Création de la ligne de base.

4. Génération des transects :

Les transects ont été réalisés grâce à la fenêtre de dialogue du DSAS, les traits de côte et la ligne de base, ils sont caractérisés par un nombre 2493 transects et par une distance de lissage de 50 m et une distance 10 m qui sépare 2 transect successifs.

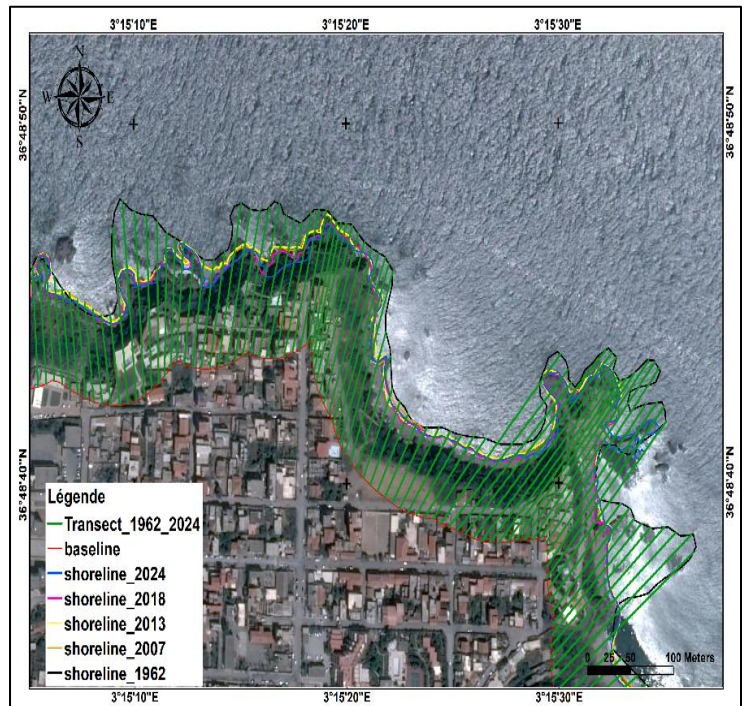


Figure 57: Génération des transects.

5. Calcul des paramètres statistiques :

Les taux de changements de rivages sont calculés en utilisant des méthodes NSM, EPR et LRR.

Méthode automatique :

Les méthodes automatiques impliquent l'utilisation d'algorithmes mathématiques et d'indices à partir d'images satellites pour distinguer les zones terrestres des zones aquatiques. Ces algorithmes et indices sont appliqués à l'aide de logiciels spécialisés tels que QGIS, ArcGIS, ENVI, ERDAS Imagine, etc.

Dans notre étude, nous avons utilisé la méthode combinant l'Indice de Végétation Différencié Normalisé (NDVI) et la Transformation Tasseled Cap (TCT). Cette méthode se décompose en plusieurs étapes :

1. Délimitation de la zone d'intérêt en recadrant les images Landsat8.
2. Calcul de l'Indice de Végétation Différencié Normalisé (NDVI) à partir d'une image composite des bandes rouge et proche infrarouge, afin d'évaluer le niveau de verdure et de classer les zones de végétation. (figure 58.a)

3. Utilisation de la Transformation Tasseled Cap pour convertir les canaux de bande en un nouvel ensemble de bandes facilement interprétables, comprenant la luminosité (figure 58.b), la verdure (figure 58.c) et l'humidité (figure 58.d).
4. Utilisation de la méthode Iso Cluster (une méthode de classification non supervisée) pour regrouper les valeurs de NDVI, de luminosité, de verdure et d'humidité en un ensemble de données comprenant 10 classes (figure IV.58.e).
5. Recalcul des 10 classes en deux classes distinctes : la classe terre avec la valeur 0 et la classe mer avec la valeur 10(figure IV 58.f) (**Boukhennaf, 2023**) .

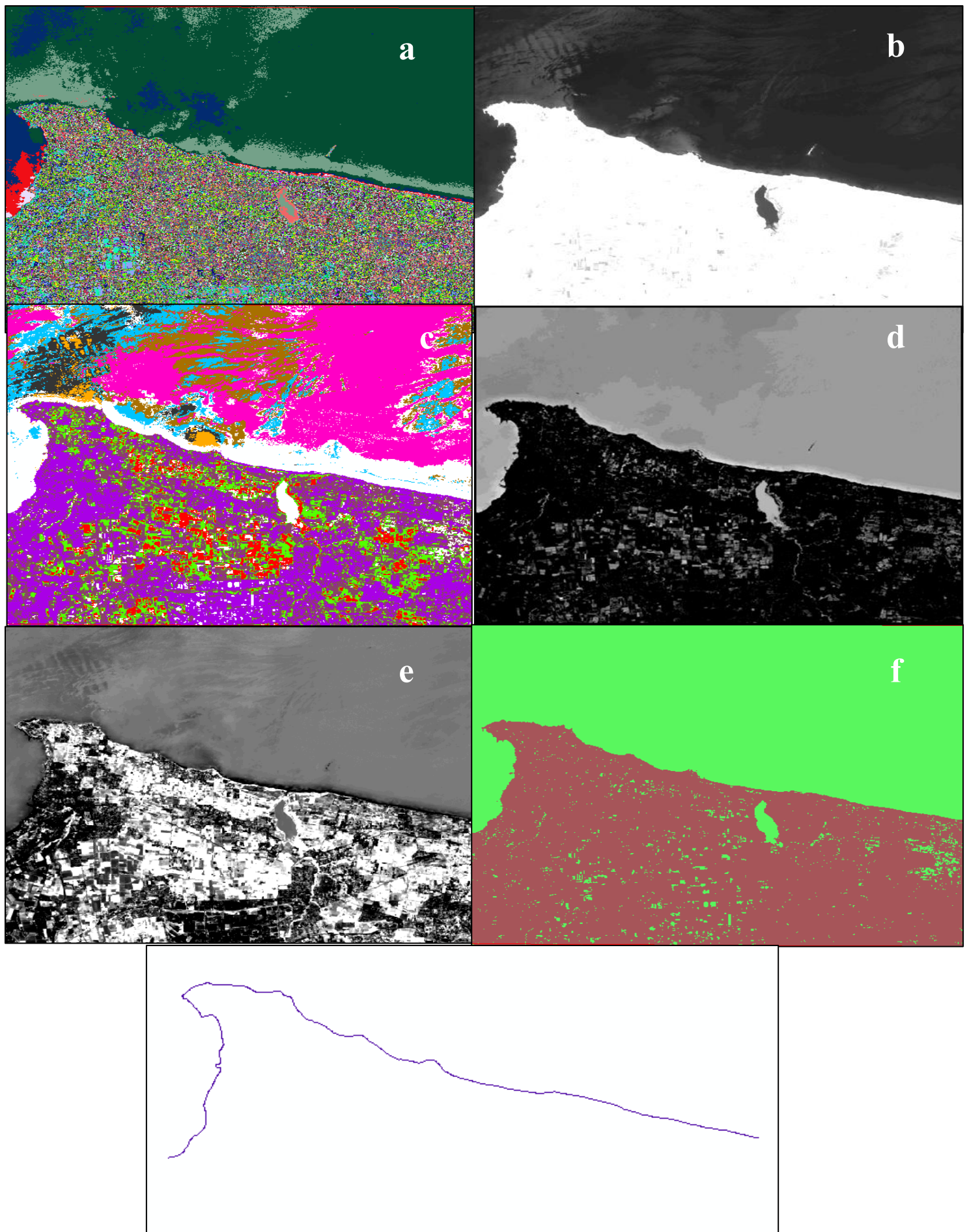


Figure 58: Les étapes d'extraction du trait de côte 2023.

VI.3.4. Les méthodes statistiques de calcul de la mobilité du trait de côte sous l'extension DSAS :

L'extension DSAS pour ArcGIS offre plusieurs méthodes statistiques pour quantifier la mobilité du trait de côte le long des transects préalablement définis.

VI.3.4.1 La méthode des points extrêmes (End Point Rate) EPR :

La méthode des points extrêmes repose sur l'utilisation de seulement deux positions connues de la ligne de référence, à savoir la position la plus ancienne et la plus récente. La distance entre ces deux emplacements extrêmes du trait de côte pendant la période d'étude est divisée par le nombre d'années écoulées pour obtenir la vitesse d'évolution annuelle du littoral. Cette approche présente l'avantage de sa simplicité. Cependant, lorsqu'il existe des positions intermédiaires entre les deux dates extrêmes de la période d'étude, les taux estimés par cette méthode ne tiendront pas compte des éventuelles variations temporelles dans l'évolution du littoral, telles que l'accélération, le ralentissement ou même l'inversion de tendance. Par conséquent, ces taux peuvent être moins significatifs que ceux obtenus par des méthodes régressives qui utilisent toutes les positions disponibles et nécessitent donc plusieurs traits de côte.

VI.3.4.2. La méthode de la régression linéaire LRR :

La méthode LRR (Linear Regression Rate) est une technique de régression linéaire permettant de calculer le taux d'évolution statistique du trait de côte à partir d'une série de positions datées le long d'un transect donné. Le processus de calcul consiste à réaliser, pour chaque transect, une régression linéaire par la méthode des moindres carrés entre les positions du trait de côte (en mètres) et les dates correspondantes (**Thieler et al., 2009**). Le coefficient directeur de la droite de régression correspond alors au taux d'évolution du trait de côte (en m/an) le long de ce transect. Les coefficients de la droite sont calculés en minimisant la somme des carrés des distances verticales résiduelles entre chaque point de mesure et la droite de régression. Cette méthode prend donc en compte toutes les positions intermédiaires du trait de côte, contrairement à la méthode EPR basée uniquement sur les positions extrêmes. Cependant, la LRR reste sensible aux valeurs aberrantes (**Himmelstoss, 2009**).

VI. 3.4.3. La méthode du Mouvement de rivage net (Net Shoreline Movement NSM) :

Elle indique la distance entre les traits de cote les plus anciens et les plus récents pour chaque transect.

VI.4. Résultats et discussions:

Afin de mieux cerner la dynamique du trait de côte sur une période de 62 ans, des cartes d’aléa à l’érosion ont été réalisées sur cinq périodes : de 1962 à 2007, de 2007 à 2013, de 2013 à 2018, de 2018 à 2024 et de 1962 à 2024.

Neufs (9) classes représentant le degré de progression ou de dégradation de la zone étudiée (Tableau 7) ont été calculée et cartographiées.

Tableau 7 Classification des valeurs de changement du trait de côte à partir des paramètres EPR/LRR/NSM.

Classe	Taux de changement de trait de cote		Classification du trait de cote
	EPR \LRR(m/an)	NSM(m)	
1	[> -3]	[> -186]	Erosion très élevée
2	[-3 / -2]	[-124 / -186]	Erosion élevée
3	[-2 / -1]	[-62/ -124]	Erosion modérée
4	[-1 / -0.5]	[-31/-62]	Erosion faible
5	[-0.5 / +0.5]	[-31 / +31]	Stable
6	[+0.5 / +1]	[+31 / +62]	Accrétion faible
7	[+1 / +2]	[+62/ +124]	Accrétion modérée
8	[+2 / +3]	[+124 / +186]	Accrétion élevée
9	[> +3]	[> +186]	Accrétion très élevée

VI.4.1. Evolution du littoral à long terme :

L'étude diachronique réalisée sur le littoral étudié entre 1962 et 2024 met en évidence des dynamiques côtières contrastées. À l'échelle régionale, les indicateurs de mobilité du trait de côte témoignent d'une prévalence des processus érosifs sur la majorité des cellules côtières analysées.

En effet, les valeurs moyennes du LRR sont représentatives du taux d'évolution pluri-décennal, sont déficitaires pour 5 communes sur 7, oscillant entre -0,87 m/an à Boudouaou El Bahri et -0,27 m/an à El Marsa. Seule Bordj El Bahri dénote une tendance positive avec un LRR moyen de +0,16 m/an, synonyme d'une progradation du trait de côte sur cette portion du littoral. La commune de Bordj El Kiffan, malgré un LRR moyen négatif (-0,46 m/an) présente quant à elle une forte hétérogénéité avec des dynamiques d'érosion et d'accrétion marquées localement (figure 59).

Ensuite, cette pression érosive générale est à relier avec les évolutions du niveau de la mer (NSM) enregistrées sur la période d'étude. Si la moyenne régionale exhibe une remontée de +0,22 m, cette tendance recouvre en réalité de fortes disparités spatiales, comprises entre -111,46 m à El Marsa et +258,65 m à Bordj El Bahri. Ces écarts très importants illustrent l'influence de facteurs locaux (géologie, bathymétrie, ouvrages côtiers, etc.) sur la réponse du niveau marin à l'échelle de chaque cellule littorale (figure 59).

Enfin, il convient donc d'analyser ces deux indicateurs de façon couplée pour appréhender finement les dynamiques côtières à l'œuvre. Ainsi, malgré une légère tendance à l'accrétion sur le long terme à Bordj El Bahri, la forte remontée du niveau marin locale (+31,57 m) pourrait à terme inverser cette tendance et favoriser un recul du trait de côte par accélération des processus érosifs.

À l'inverse, sur les communes d'Ain Taya et Haraoua, une érosion côtière chronique est observée (LRR moyens de -0,34 et -0,48 m/an) alors même que le signal du NSM est négatif (-20,45 et -28,31 m), ce qui suggère un contrôle majeur des forçages hydrodynamiques locaux (vagues, courants) sur la mobilité de ces cellules côtières très réactives.

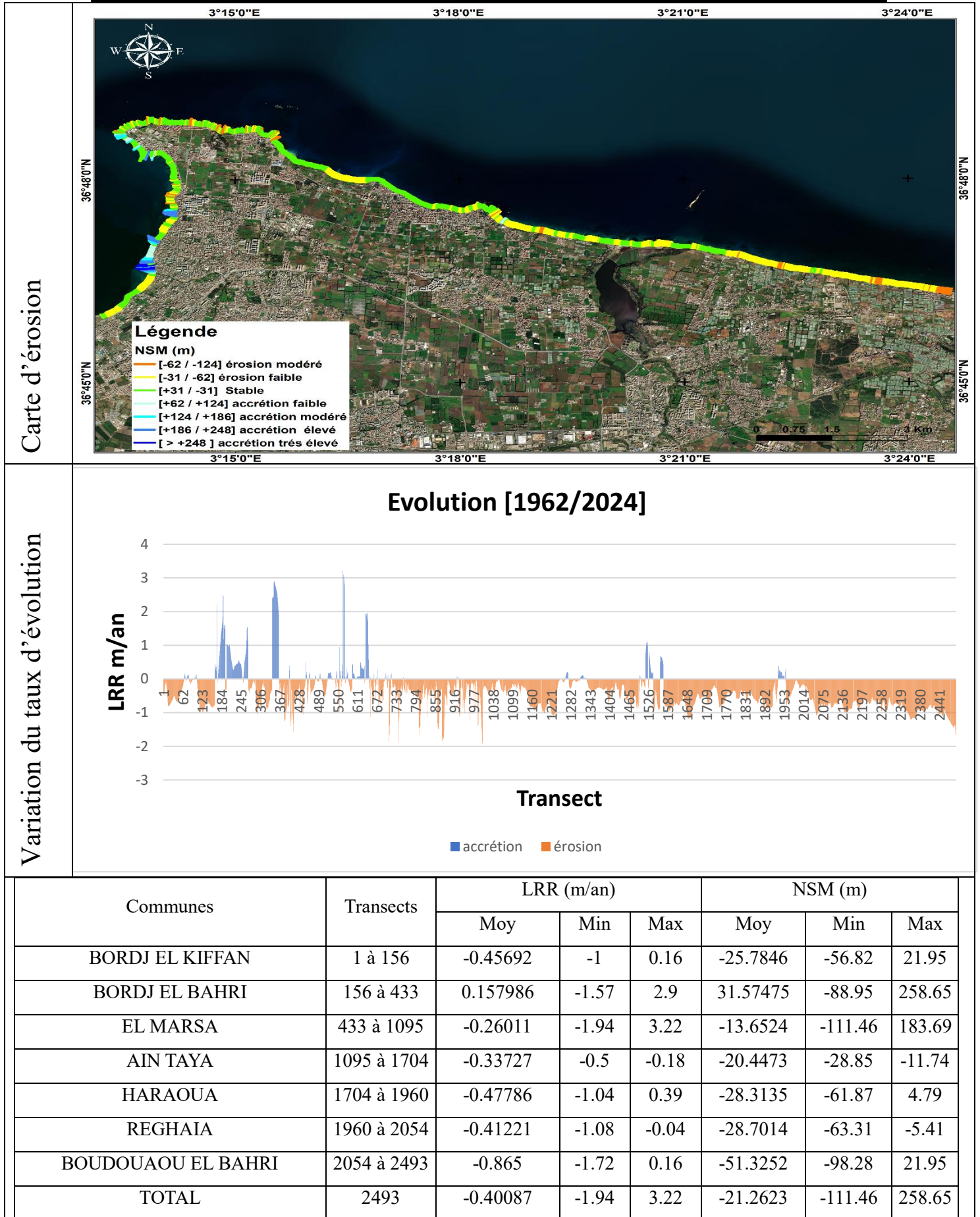


Figure 59: Evolution du trait de côte entre 1962 et 2024.

VI.4.2. Evolution du littoral à court terme :**Période allant de 1962 à 2007:**

L'analyse diachronique du trait de côte réalisée à l'échelle régionale entre 1962 et 2007 fait ressortir des dynamiques littorales contrastées. Les indicateurs cinématiques étudiés, l'érosion Potentiel Rate (EPR) et les variations du niveau moyen de la mer (NSM), mettent en évidence une forte hétérogénéité spatiale des processus d'érosion et d'accrétion côtières.

Concernant l'EPR, indicateur intégré du potentiel érosif naturel des cellules littorales, les résultats révèlent une prédominance des secteurs à fort aléa érosion à l'échelle régionale avec une valeur moyenne de -0,54 m/an. Cette tendance se confirme localement sur la majorité des communes étudiées, les valeurs moyennes s'échelonnant de -0,95 m/an à Boudouaou El Bahri à -0,30 m/an à Bordj El Bahri, synonymes d'une forte prédisposition naturelle à l'érosion côtière sur ces linéaires.

Seule la commune d'El Marsa dénote un EPR moyen plus faible de -0,34 m/an, témoignant d'un potentiel érosif naturel moindre. Au-delà de ces tendances centrales par commune, une hétérogénéité locale marquée ressort, avec des valeurs extrêmes minimales de -2,47 m/an et maximales de +4,09 m/an mesurées ponctuellement.

L'analyse des variations du NSM met également en lumière une forte disparité spatiale des tendances. Si la moyenne régionale de -24,27 m reflète une baisse généralisée du niveau marin, des signaux opposés d'élévation et de baisse sont enregistrés localement, comme l'illustrent les moyennes respectives de +183,69 m à El Marsa et de -42,29 m à Boudouaou El Bahri.

Cette hétérogénéité se confirme à plus fine échelle avec des valeurs extrêmes oscillant entre -110,83 m et +183,69 m, soulignant l'importance des effets de site dans la réponse du niveau marin.

Ce jeu de données multi-scalaire et multiparamétrique met ainsi en évidence la complexité de la dynamique hydro-sédimentaire côtière en termes d'érosion, d'accrétion et de variations des niveaux marins sur la zone d'étude entre 1962 et 2007.

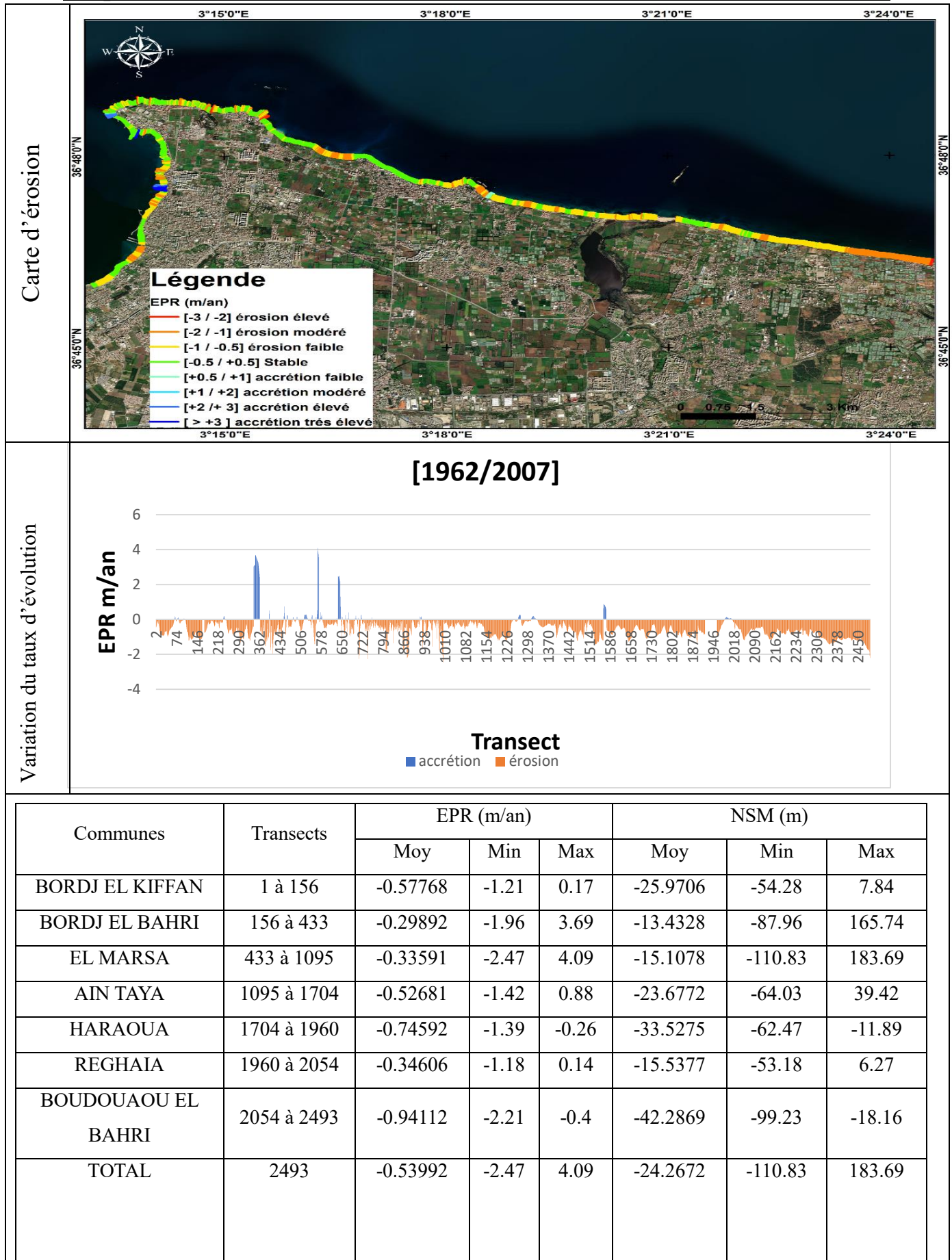


Figure 60: Evolution du trait de côte entre 1962 et 2007.

Période allant de 2007 à 2024 :

Sur l'ensemble de la zone côtière étudiée, on observe un taux d'érosion moyen de -0,54 m/an entre 2007 et 2024 (EPR moyen de -0,53992 m/an). Cependant, ce chiffre masque de fortes disparités locales.

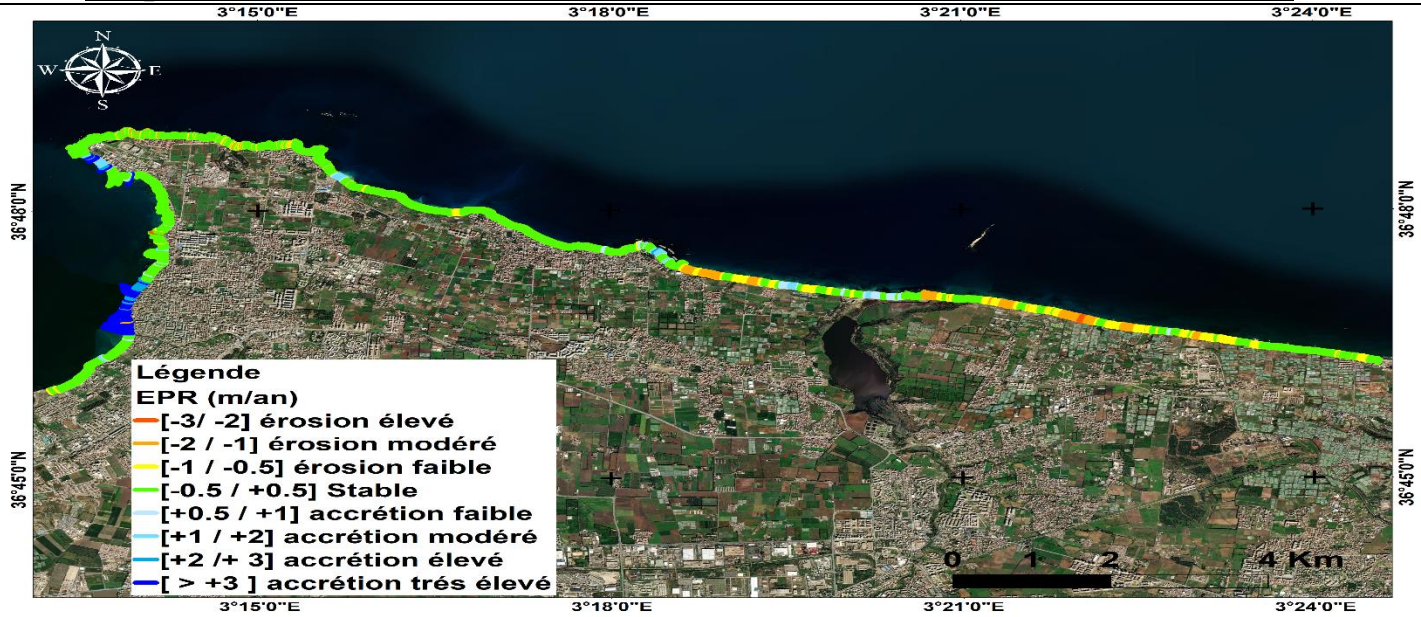
La commune la plus touchée par l'érosion côtière est Boudouaou El Bahri, avec un recul moyen du trait de côte de -0,94 m/an, atteignant par endroits jusqu'à -2,21 m/an. À l'inverse, El Marsa présente les taux d'accrétion les plus élevés, avec un EPR maximum de +4,09 m/an sur certains transect (figure 61).

De manière générale, les communes de Haraoua (-0,75 m/an), Bordj El Kiffan (-0,58 m/an) et Ain Taya (-0,53 m/an) affichent des tendances érosives marquées tandis que Bordj El Bahri (-0,30 m/an) et Reghaia (-0,35 m/an) sont moins impactées.

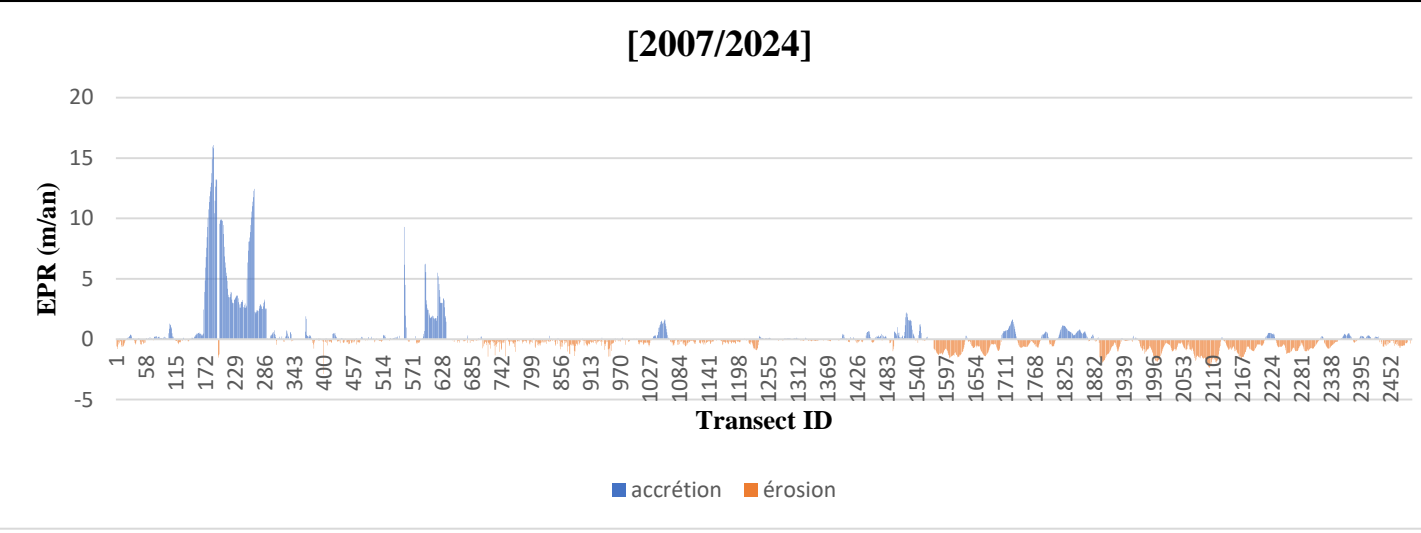
Parallèlement, les variations du niveau de la mer sont également très contrastées spatialement, oscillant entre -110,83 m à El Marsa et +183,69 m à El Marsa également. La forte hausse de +165,74 m enregistrée localement à Bordj El Bahri pourrait accentuer la pression érosive sur cette portion du littoral à moyen terme.

Cette analyse souligne l'hétérogénéité des dynamiques côtières à l'échelle locale, résultant de l'influence combinée de multiples facteurs tels que la géologie, la bathymétrie ou la présence d'ouvrages de protection côtière. Une approche spatialisée reste indispensable pour appréhender finement ces enjeux cruciaux de gestion du trait de côte.

Carte d'érosion



Variation du taux d'évolution



Communes	Transects	EPR (m/an)			NSM (m)		
		Moy	Min	Max	Moy	Min	Max
BORDJ EL KIFFAN	1 à 156	0.011806	-0.8	1.28	0.198903	-13.4	21.45
BORDJ EL BAHRI	156 à 433	2.683333	-2.88	16.07	45.10833	-48.48	270.15
EL MARSA	433 à 1095	9.3	-1.45	9.3	156.37	-24.45	156.37
AIN TAYA	1095 à 1704	-0.18374	-1.58	2.22	-3.0899	-26.59	37.26
HARAOUA	1704 à 1960	-0.01177	-1.93	1.63	-0.19846	-32.39	27.47
REGHAIA	1960 à 2054	-0.77298	-1.86	0.15	-13.0023	-31.24	2.58
BOUDOUAOU EL BAHRI	2054 à 2493	-0.53943	-2.34	0.52	-9.06948	-39.39	8.75
TOTAL	1 à 2493	0.151085	-2.88	16.07	2.539128	-48.48	270.15

Figure 61: Evolution du trait de côte entre 2007et 2024.

VI.4.3. Evolution du littoral dans la zone rocheuse El Marsa :

On a adopté a travailler su cette bande littoral car elle constitue un environnement idéal pour examiner le comportement des différentes formations rocheuses face à l'érosion marine. Cette région offre une diversité remarquable de lithologies, avec une représentation de la plupart des grands groupes de roches : magmatiques, métamorphiques et sédimentaires. Cette variété lithologique est bien exposée et affleure dans une même orientation structurale générale.

Période allant de 1962 à 2024 :

L'analyse diachronique réalisée sur les différentes formations géologiques du secteur d'étude entre 1962 et 2024 met en évidence des dynamiques côtières contrastées. À l'échelle régionale, les indicateurs de mobilité du trait de côte témoignent d'une nette prévalence des processus érosifs sur la majorité des formations analysées.

En effet, les valeurs moyennes du taux de recul linéaire (LRR) sont déficitaires pour 9 formations sur 11, oscillant entre -1,13 m/an pour les rhyolites et -0,16 m/an pour les schistes 3. Seules les formations de conglomérat 2 dénotent une tendance positive avec un LRR moyen de +0,87 m/an, synonyme d'une progradation du trait de côte.

Cette pression érosive générale est à relier avec les évolutions du niveau de la mer (NSM) enregistrées sur la période d'étude. Si la moyenne régionale exhibe une remontée de +49,61 m, cette tendance recouvre en réalité de fortes disparités spatiales, comprises entre -102,93 m pour les rhyolites et +0,87 m pour les conglomérats 2. Ces écarts illustrent l'hétérogénéité de la réponse du niveau marin à l'échelle des différentes cellules côtières.

Il convient donc d'analyser ces deux indicateurs de façon couplée pour appréhender finement les dynamiques à l'œuvre. Ainsi, malgré une accrétion sur le long terme pour les conglomérats 2, la forte remontée du NSM locale (+0,87 m) pourrait à terme inverser cette tendance. À l'inverse, sur les schistes 1, une érosion chronique est observée (LRR -0,98 m/an) alors même que le signal du NSM est négatif (-57,32 m), suggérant un contrôle majeur d'autres forçages.

Cette analyse souligne donc l'hétérogénéité des réponses du trait de côte selon la formation géologique, impliquant des stratégies de gestion spatialisées à l'échelle de chaque cellule littorale.

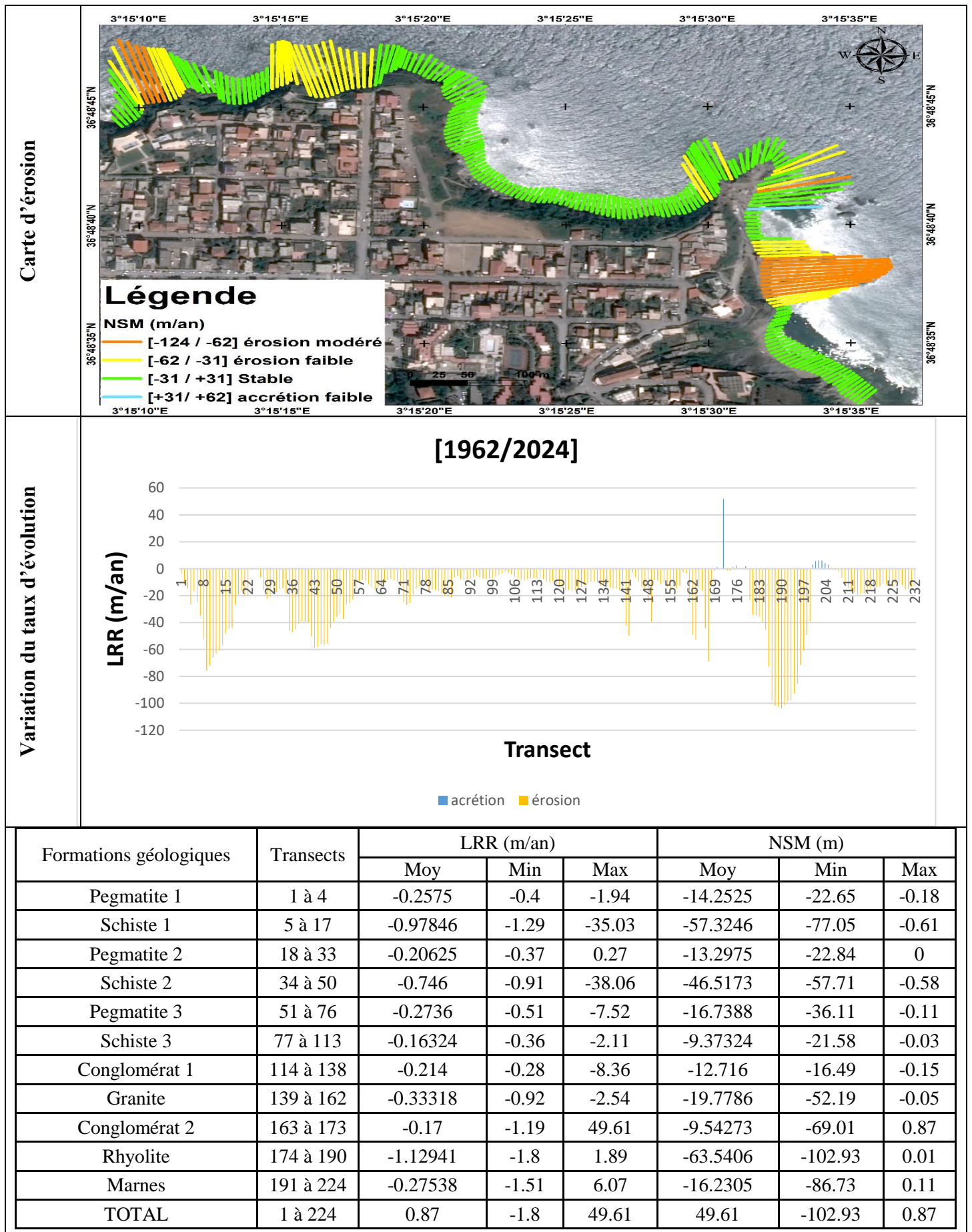


Figure 62: Evolution du trait de côte de la zone rocheuse El Marsa entre 1962 et 2024.

Période allant de 1962 à 2007 :

L'étude diachronique réalisée sur les différentes formations géologiques de la zone entre 1962 et 2007 met en exergue une prédominance marquée des processus érosifs côtiers à l'échelle régionale.

En effet, les indicateurs de mobilité du trait de côte, à travers les taux d'érosion moyens (EPR), sont déficitaires pour 10 formations sur les 11 analysées. Ces EPR moyens oscillent entre -1,76 m/an pour les rhyolites, qui constituent la formation la plus vulnérable, et -0,14 m/an pour les marnes. La seule exception est la formation de conglomérat 2 qui présente un EPR moyen positif de +0,06 m/an, synonyme d'une progradation locale du rivage.

Parallèlement, les variations du niveau marin relatif (NSM) sur cette période affichent une hausse moyenne de +19,89 m, mais recouvrent en réalité de fortes disparités spatiales allant de -102,47 m pour les rhyolites à +49,56 m pour les conglomérats 2.

L'analyse conjointe de ces deux indicateurs permet de mettre en lumière certaines dynamiques notables. Ainsi, malgré l'accrétion observée sur les conglomérats 2, la forte remontée locale du NSM (+49,56 m) pourrait rapidement s'avérer un facteur défavorable inversant cette tendance positive. À l'inverse, sur les schistes 1 une érosion côtière très soutenue (-1,20 m/an) se produit alors que le signal du NSM est négatif (-53,78 m), laissant présager un contrôle prédominant d'autres forçages hydrodynamiques locaux.

Cette période 1962-2007 confirme donc la forte hétérogénéité spatiale des dynamiques côtières en fonction du substrat géologique.

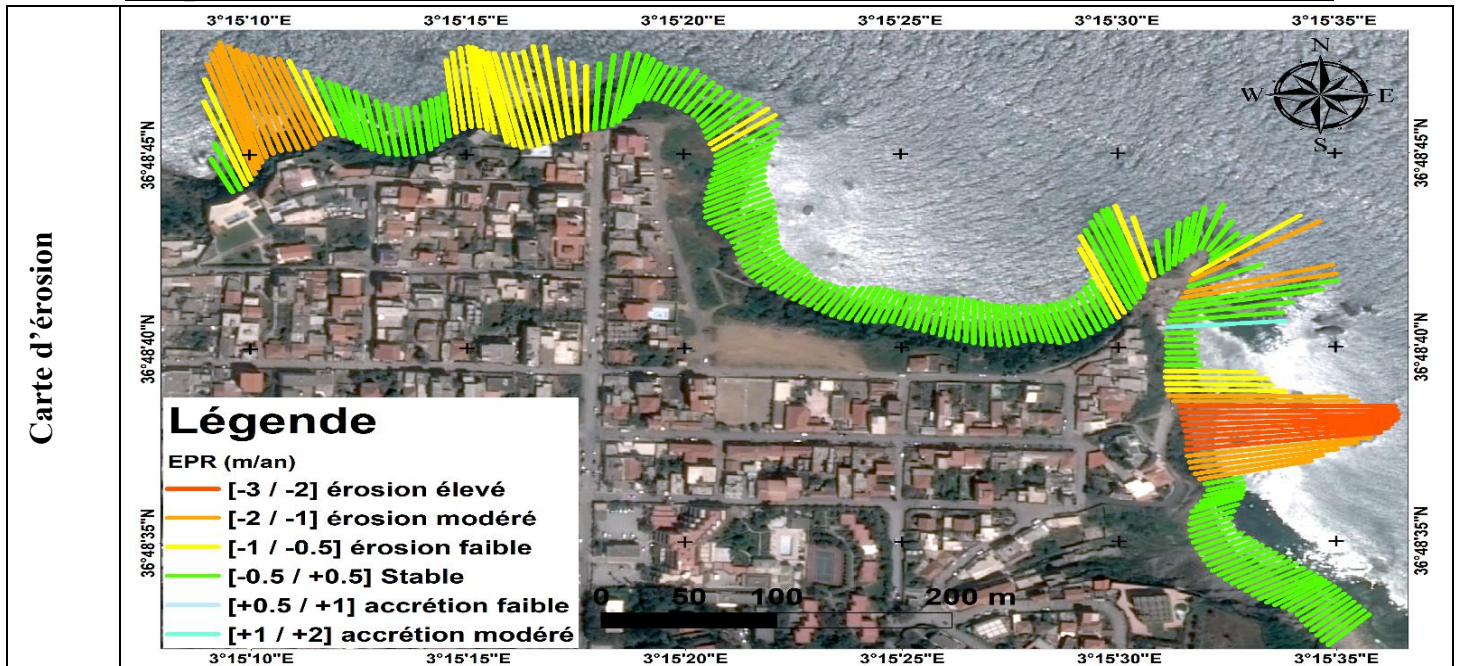
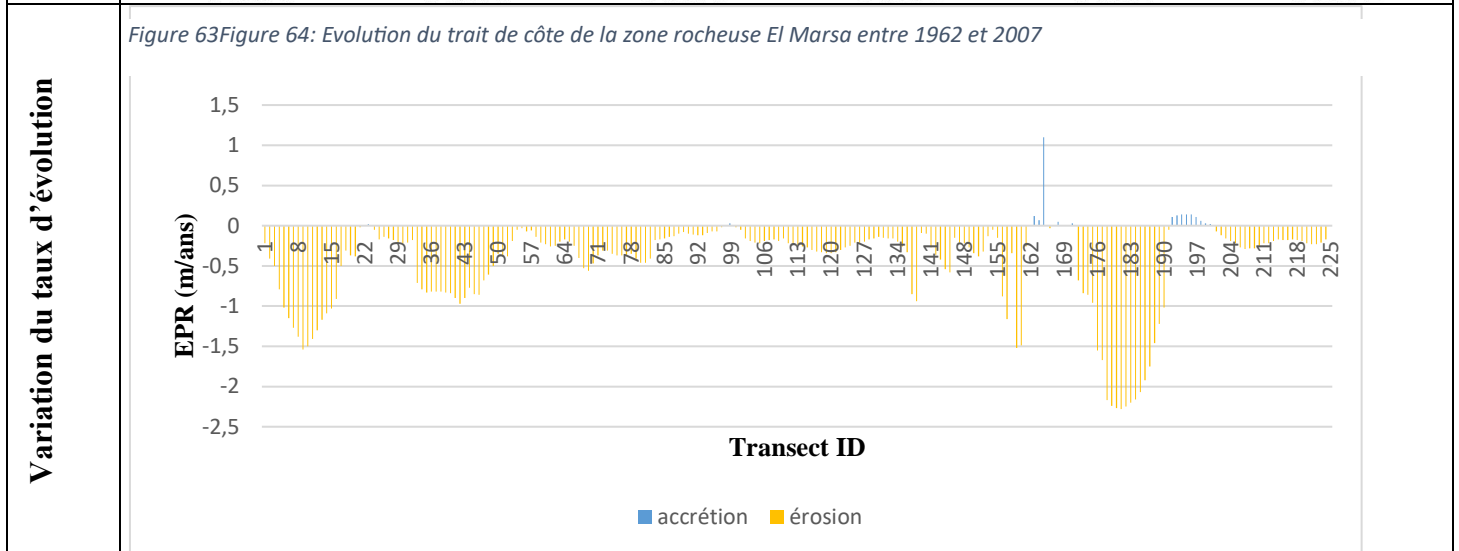


Figure 63 Figure 64: Evolution du trait de côte de la zone rocheuse El Marsa entre 1962 et 2007



Formations géologiques	Transects	EPR (m/an)			NSM (m)		
		Moy	Min	Max	Moy	Min	Max
Pegmatite 1	1 à 4	-0.48	-0.79	-0.22	-21.5825	-35.45	-10.02
Schiste 1	5 à 17	-1.19692	-1.54	-0.79	-53.7823	-69.37	-35.45
Pegmatite 2	18 à 33	-0.19188	-0.5	0.02	-8.63125	-22.38	0.85
Schiste 2	34 à 50	-0.79412	-0.97	-0.5	-35.6559	-43.64	-22.53
Pegmatite 3	51 à 76	-0.27269	-0.56	-0.03	-12.2985	-25.36	-1.4
Schiste 3	77 à 113	-0.17892	-0.46	0.03	-8.01811	-20.59	1.41
Conglomérat 1	114 à 138	-0.27	-0.85	-0.14	-12.122	-38.32	-6.3
Granite	139 à 162	-0.46542	-1.52	-0.05	-20.9654	-68.34	-2.37
Conglomérat 2	163 à 173	0.062727	-0.68	1.1	2.896364	-30.35	49.56
Rhyolite	174 à 190	-1.75706	-2.28	-0.84	-78.9718	-102.47	-37.81
Marnes	191 à 224	-0.14514	-1.02	0.14	-6.49314	-45.82	6.39
TOTAL	1 à 224	-0.44263	-2.28	1.1	-19.8878	-102.47	49.56

Figure 63: Evolution du trait de côte de la zone rocheuse El Marsa entre 1962 et 2007.

Période allant de 2007 à 2013 :

Sur la période 2007-2013, les dynamiques côtières analysées à travers les taux d'érosion (EPR) et les variations du niveau marin relatif (NSM) affichent des tendances contrastées selon les formations géologiques.

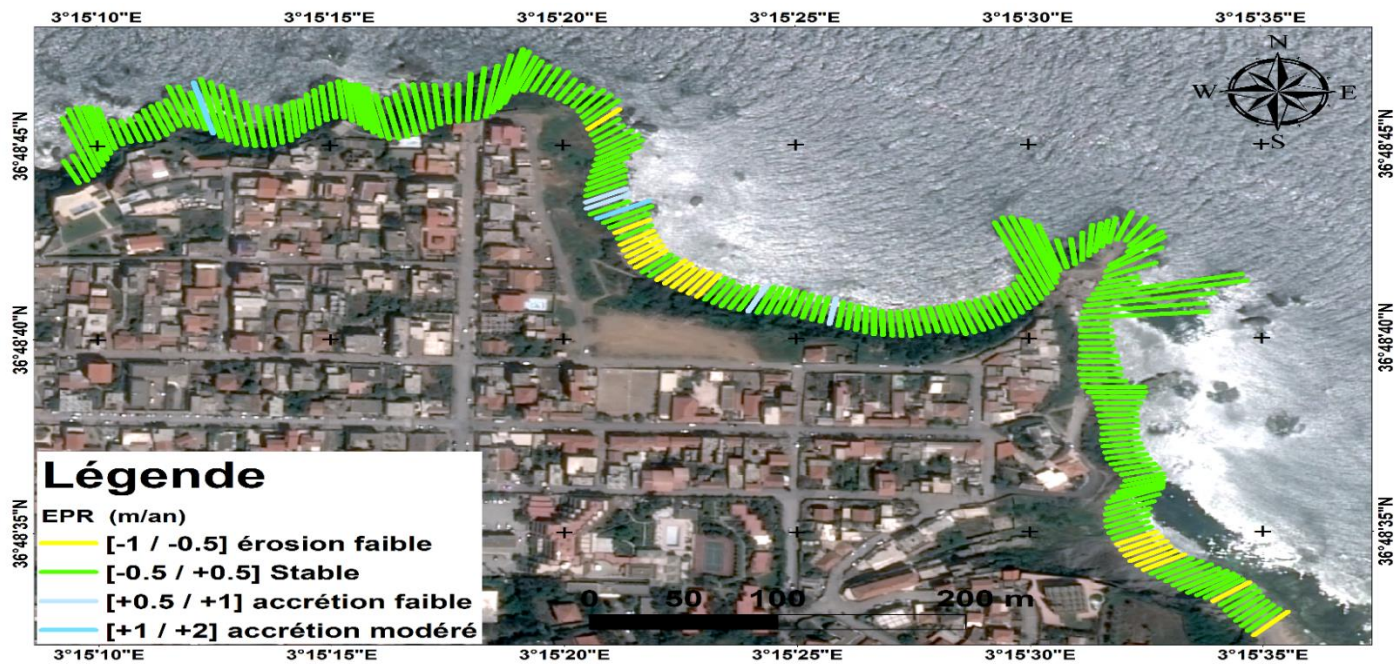
À l'échelle régionale, l'EPR moyen ressort légèrement positif à +0,006 m/an, témoignant d'une très faible accrétion moyenne du trait de côte. Cependant, cette valeur masque d'importantes disparités locales.

En effet, 6 formations sur 11 présentent des EPR moyens négatifs, synonymes d'érosion côtière, avec des valeurs comprises entre -0,07 m/an pour les schistes 3 et -0,27 m/an pour les marnes. Cette hétérogénéité se retrouve également dans le signal du niveau marin. Si la tendance régionale est quasi stable avec +0,04 m en moyenne, les évolutions locales par formation varient de -5,95 m pour les schistes 3 à +12,43 m pour cette même formation sur le promontoire est.

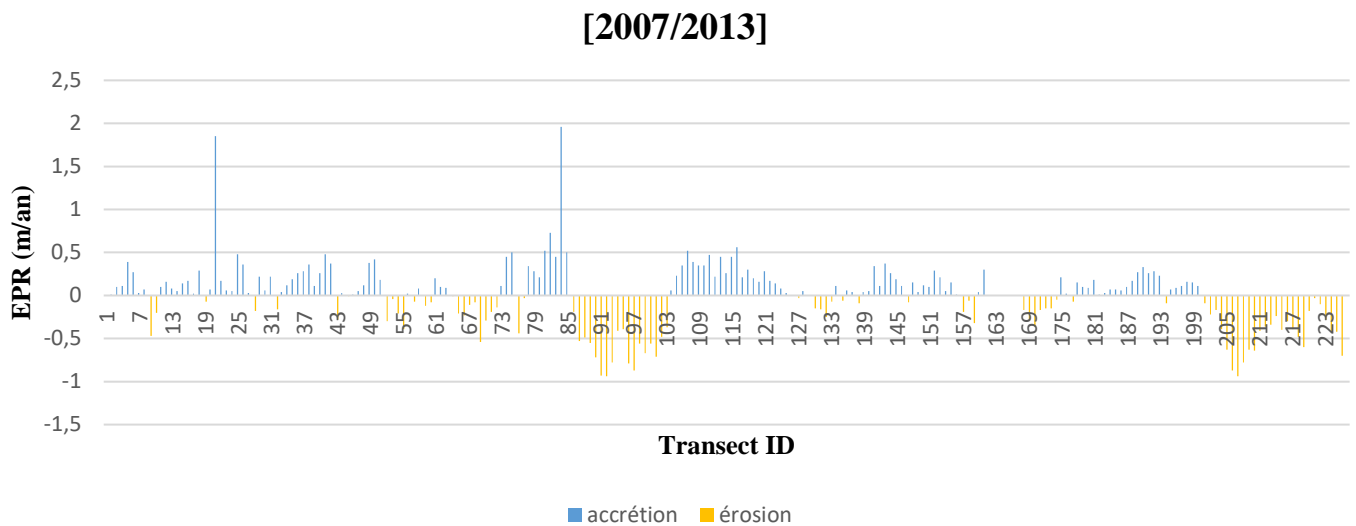
L'analyse croisée des deux indicateurs fait ressortir quelques dynamiques intéressantes. Sur les marnes, une érosion marquée (-0,27 m/an) se poursuit alors même que le signal du NSM est quasi nul (-1,70 m), soulignant le rôle prépondérant d'autres facteurs forçant hydrodynamiques.

Cette période 2007-2013 confirme donc la forte variabilité spatio-temporelle des dynamiques côtières à l'échelle des différentes formations géologiques.

Carte d'érosion



Variation du taux d'évolution



Formation géologiques	Transects	EPR (m/an)			NSM (m)		
		Moy	Min	Max	Moy	Min	Max
Pegmatite 1	1 à 4	0.073333	0.01	0.11	0.453333	0.06	0.69
Schiste 1	5 à 17	0.065714	-0.47	0.39	0.418571	-2.99	2.46
Pegmatite 2	18 à 33	0.206471	-0.18	1.85	1.308824	-1.11	11.72
Schiste 2	34 à 50	0.185294	-0.28	0.48	1.172941	-1.79	3.05
Pegmatite 3	51 à 76	-0.06615	-0.54	0.5	-0.42538	-3.44	3.15
Schiste 3	77 à 113	-0.07	-0.94	1.96	-0.43973	-5.95	12.43
Conglomérat 1	114 à 138	0.0916	-0.25	0.56	0.5756	-1.58	3.54
Granite	139 à 162	0.095	-0.32	0.37	0.60125	-2	2.32
Conglomérat 2	163 à 173	-0.11727	-0.36	0	-0.73818	-2.29	0
Rhyolite	174 à 190	0.088333	-0.15	0.33	0.561111	-0.94	2.1
Marnes	191 à 224	-0.26806	-0.94	0.28	-1.70111	-5.93	1.79
TOTAL	1 à 224	-0.00564	-0.94	1.96	-0.03649	-5.95	12.43

Figure 64 : Evolution du trait de côte de la zone rocheuse El Marsa entre 2007 et 2013.

Période allant de 2013 à 2018 :

Sur la période 2013-2018, les dynamiques côtières enregistrées le long du littoral étudié sont marquées par une prédominance généralisée des processus érosifs à l'échelle régionale.

Cette période est marquée par trois événements de tempête ont été marqués dans cette période (**Amarouche et al., 2020**). La première tempête a été classée comme catastrophique en 2015 provenant de WNW qui a persisté pendant 8 jours du 29/01/2015 au 05/02/2015 et la deuxième tempête en 2016 (14/02/2016) a été classée comme tempête extrême (classe IV) provenant de la direction Ouest. Alors que, la troisième tempête a été annoncée le 20 mars 2018 de classe IV et venant d'une direction Nord-Ouest.

En effet, les valeurs moyennes du taux d'érosion (EPR) sont négatives pour 10 formations géologiques sur les 11 analysées, reflétant un recul du trait de côte. Ces EPR de qui peuvent atteindre -1,45 m/an pour les schistes 2 indiquent que ces roches affichent l'érosion la plus marquée et constituent avec les rhyolites les faciès les plus vulnérables. Cependant, ce même faciès (Schiste 3) est relativement stable au niveau central du golf d'El Marsa.

Seule la formation des pegmatites 1 dénote une tendance relativement stable.

Parallèlement, l'indicateur d'évolution du niveau marin relatif (NSM) exhibe globalement une remontée moyenne de +2,57 m. Mais cette tendance régionale dissimule là encore d'importantes variations spatiales allant de -16,34 m pour les pegmatites 2 à +16,31 m pour les pegmatites 1.

L'analyse couplée des deux indicateurs EPR et NSM permet de mettre en évidence certaines dynamiques notables. Ainsi, malgré l'engraissement observé localement sur les pegmatites 1, la forte remontée du niveau marin (+2,24 m) pourrait rapidement s'avérer un facteur défavorable inversant ce processus d'accrétion.

À l'inverse, sur les schistes 1, une érosion côtière soutenue (-0,50 m/an) se poursuit alors que le signal du NSM est négatif (-2,41 m), suggérant l'influence prédominante d'autres forçages hydrodynamiques à l'échelle de cette cellule littorale très réactive.

Cette période 2013-2018 confirme donc la persistance de dynamiques côtières très hétérogènes spatialement selon la nature du substrat géologique.

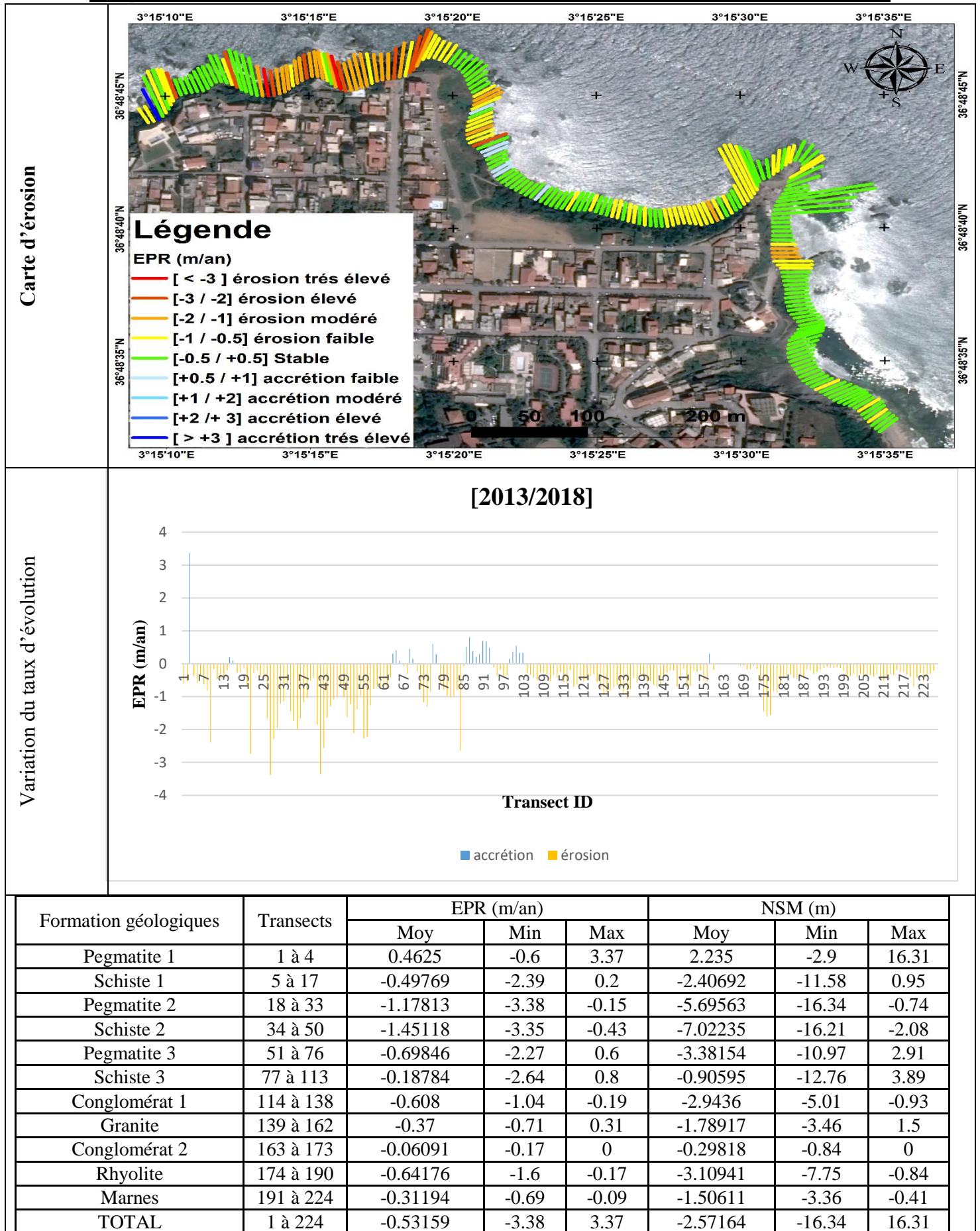


Figure 65: Evolution du trait de côte de la zone rocheuse El Marsa entre 2013 et 2018.

Période allant de 2018 à 2024 :

Sur la période récente 2018-2024, les dynamiques côtières analysées le long du littoral présentent des tendances plus nuancées selon les formations géologiques.

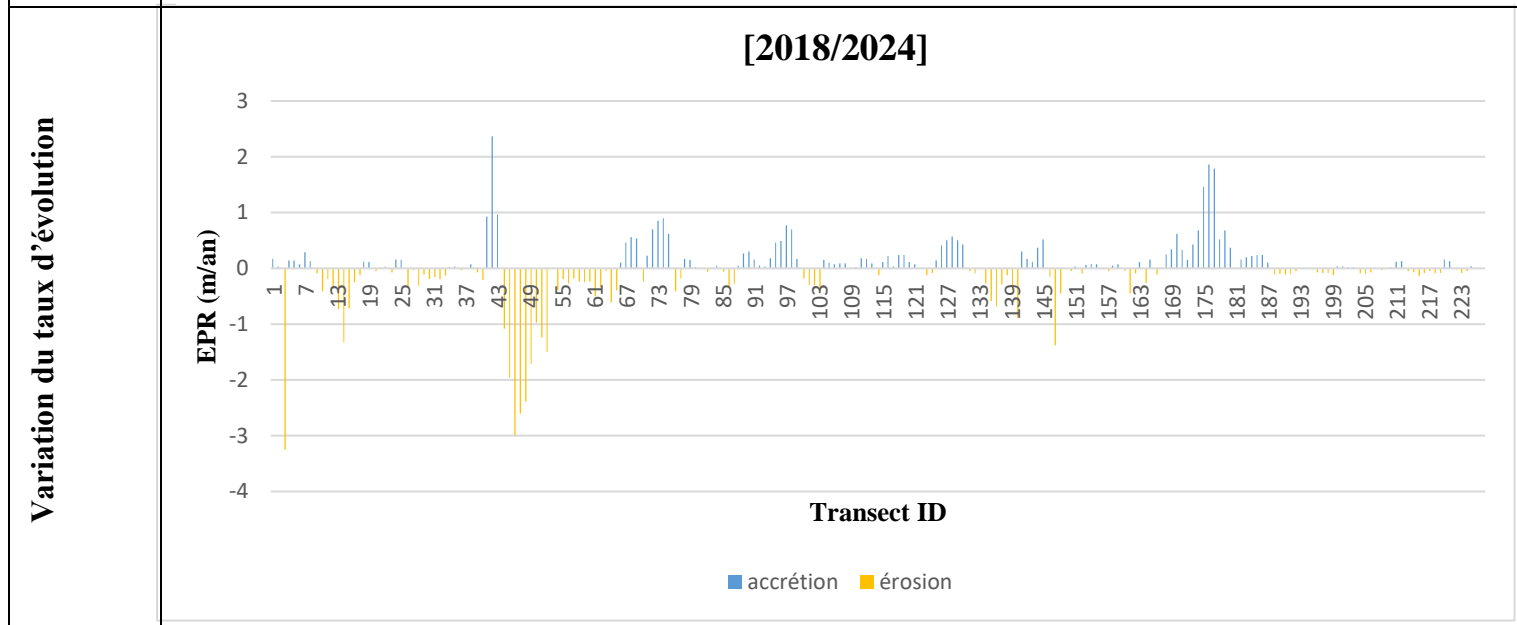
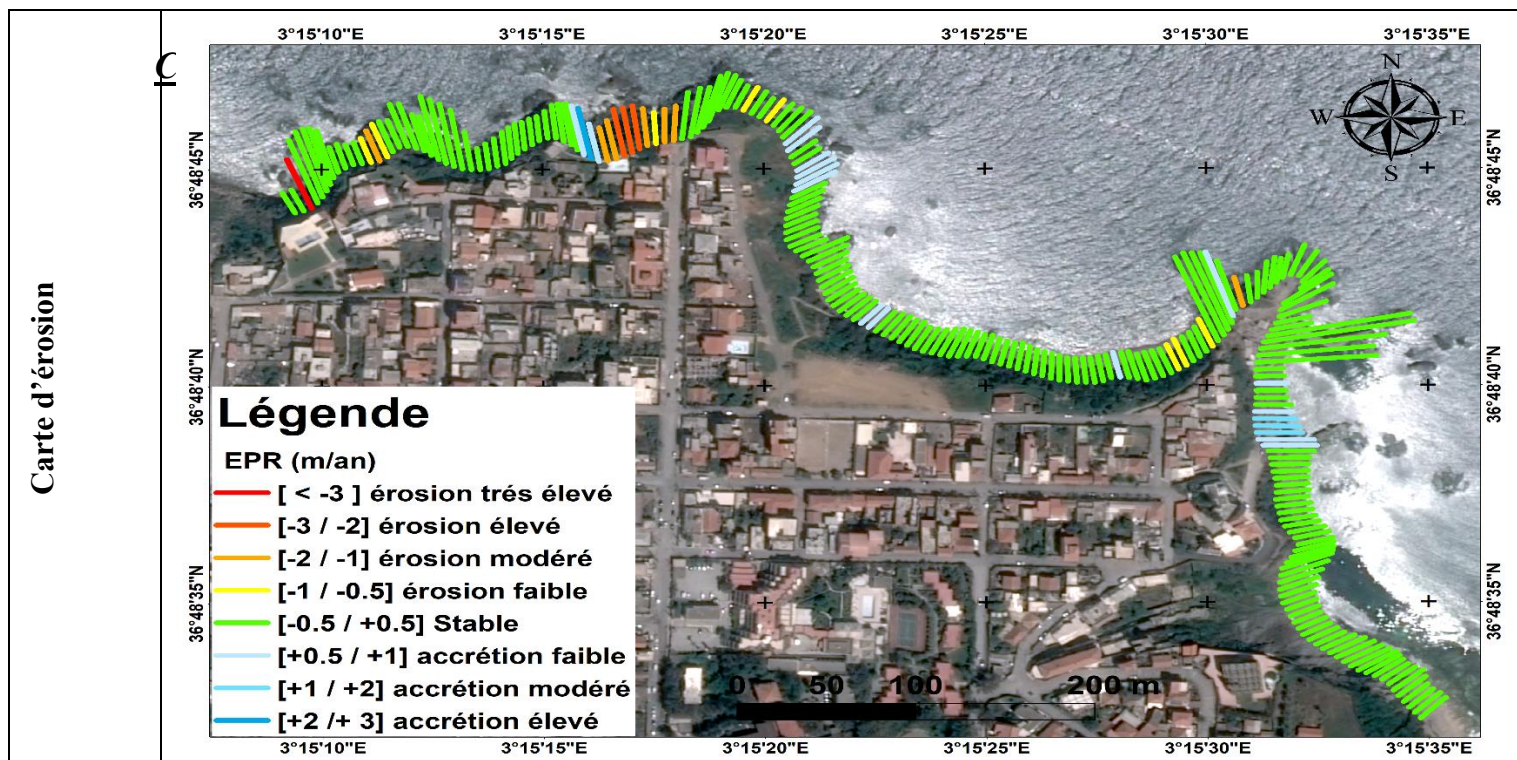
A l'échelle régionale, le taux d'érosion moyen (EPR) ressort très faible à $-0,035$ m/an, masquant cependant d'importantes disparités locales. En effet, si 5 formations sur 11 affichent des EPR moyens positifs synonymes d'accrétion, notamment les rhyolites ($+0,48$ m/an) et les conglomérats 2 ($+0,18$ m/an), les 6 autres dénotent au contraire une érosion du trait de côte.

Les formations les plus vulnérables sur cette période demeurent les pegmatites 1 avec un EPR moyen de $-0,73$ m/an, ainsi que les schistes 2 à $-0,57$ m/an. A l'inverse, les conglomérats 1 ($+0,046$ m/an) et les schistes 3 ($+0,077$ m/an) témoignent d'une certaine résilience côtière.

En termes d'évolution du niveau marin relatif (NSM), si la tendance régionale moyenne est quasi stable à $-0,035$ m, d'importantes fluctuations spatiales sont visibles, de $-18,35$ m pour les pegmatites 1 à $+13,37$ m pour les schistes 2.

L'analyse croisée des EPR et NSM met en lumière certains contrastes intéressants. Ainsi, malgré une érosion chronique sur les pegmatites 1, la légère baisse locale du NSM ($-0,73$ m) pourrait favoriser un ralentissement de cette dynamique régressive. À l'inverse, sur les schistes 2, l'accrétion maximale ($+2,37$ m/an) coïncide avec une très forte remontée du niveau marin ($+13,37$ m), laissant présager des pressions hydro-sédimentaires accrues à moyen terme.

Cette période récente 2018-2024 confirme donc la poursuite de dynamiques côtières très hétérogènes spatialement.



Formation géologiques	Transects	EPR (m/an)			NSM (m)		
		Moy	Min	Max	Moy	Min	Max
Pegmatite 1	1 à 4	-0.7275	-3.25	0.17	-0.7275	-18.35	0.96
Schiste 1	5 à 17	-0.27077	-1.33	0.29	-0.27077	-7.51	1.64
Pegmatite 2	18 à 33	-0.0625	-0.33	0.16	-0.0625	-1.89	0.89
Schiste 2	34 à 50	-0.56588	-2.99	2.37	-0.56588	-16.9	13.37
Pegmatite 3	51 à 76	-0.08038	-1.5	0.9	-0.08038	-8.44	5.06
Schiste 3	77 à 113	0.076757	-0.41	0.77	0.076757	-2.29	4.34
Conglomérat 1	114 à 138	0.0464	-0.68	0.57	0.0464	-3.83	3.22
Granite	139 à 162	-0.09167	-1.38	0.52	-0.09167	-7.78	2.94
Conglomérat 2	163 à 173	0.184545	-0.26	0.62	0.184545	-1.46	3.52
Rhyolite	174 à 190	0.479444	-0.11	1.86	0.479444	-0.64	10.51
Marnes	191 à 224	-0.02459	-0.14	0.16	-0.02459	-0.76	0.9
TOTAL	1 à 224	-0.035	-3.25	2.37	-0.035	-18.35	13.37

Figure 66: Evolution du trait de côte de la zone rocheuse El Marsa entre 2018 et 2024.

Chapitre VII

Discussion des résultats

VII.1. Introduction :

La zone rocheuse d'El Marsa, située à l'est de la baie d'Alger, présente une diversité remarquable de formations géologiques affleurant sur le littoral (figure 67). Cette variété lithologique, allant des roches magmatiques aux roches sédimentaires, offre un cadre d'étude privilégié pour analyser l'influence de la nature des faciès sur les dynamiques d'érosion côtière. L'évolution spatio-temporelle du trait de côte dans ce secteur révèle en effet des réponses morphologiques contrastées selon les caractéristiques intrinsèques des formations rocheuses.



Figure 66: Portion de la zone rocheuse côtière d'El Marsa étudiée montrant une alternance d'affleurement des faciès de pigmatites et de schistes.

VII.2. L'influence de l'hydrodynamique sur la dynamique d'érosion :

L'analyse des simulations numériques (chapitre V) a permis de mettre en évidence l'importance des conditions hydrodynamiques extrêmes, en particulier pour la période de retour centennale, dans les processus d'érosion affectant les formations géologiques littorales.



Figure 67: Brise lame naturelle.



Figure 68: Résultat de la pression mécanique sur les estrans rocheux.

Les résultats montrent que pour une période de retour de 100 ans, les hauteurs significatives de houle peuvent atteindre plus de 4,5 mètres dans certaines zones exposées de la baie de Zemmouri. Ces vagues énergétiques exercent une pression mécanique considérable sur les falaises et les estrans rocheux (figure 69), favorisant leur dégradation progressive par arrachement et abrasion des matériaux.

Les formations géologiques les plus vulnérables, comme les faciès meubles ou peu consolidés (marnes altérée, schistes), subissent une érosion accélérée sous l'effet de ces vagues extrêmes. À l'inverse, les lithologies plus résistantes, telles que granites ou les pegmatites, présentent une meilleure résilience face à ces forçages hydrodynamiques intenses (figure 70).



Figure 69: Erosion préférentielle des formations rocheuses par les processus hydrodynamiques (vagues et courant).

Les simulations ont également mis en évidence des vitesses de courants côtiers pouvant atteindre 1,2 m/s lors d'événements extrêmes de période de retour centennale. Ces courants vigoureux, combinés à l'action érosive des vagues, jouent un rôle majeur dans le sapement et l'effondrement des falaises rocheuses (figure 71).

L'érosion différentielle induite par ces courants intenses favorise la formation de microfalaises, d'encoches et de cavités à la base des escarpements rocheux (figure 70). Ce

processus fragilise progressivement les formations géologiques et accélère leur recul par le biais d'éboulements et d'effondrements (figure 71).



Figure 70: Effondrement des falaises sous l'action des vagues.

VII.3. Influence de la topographie, du réseau hydrographique et la bathymétrie sur la dynamique d'érosion:

La bathymétrie de la zone d'étude joue un rôle essentiel dans la transformation des houles au fur et à mesure de leur propagation vers la côte. Les simulations montrent que les zones les plus exposées, avec des fonds marins plus abrupts, subissent des hauteurs de vagues maximales plus importantes.

Ce phénomène s'observe notamment dans l'ouest de la baie de Zemmouri, où la bathymétrie présente des pentes plus marquées (figure 72). Dans ces secteurs, les vagues déferlent avec une énergie accrue, exerçant des contraintes mécaniques plus fortes sur les formations rocheuses littorales.

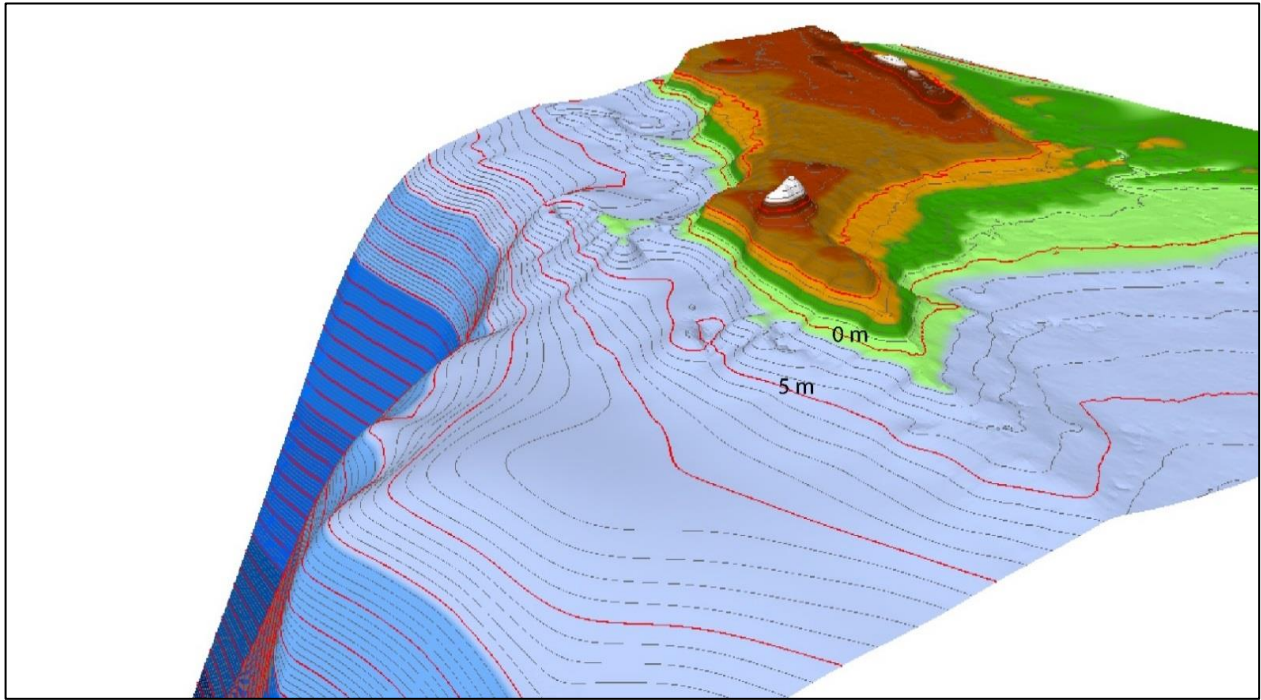


Figure 71: Représentation 3D de la bathymétrie de la zone d'étude.

Cependant, dans les zones où les plate-formes d'abrasion sont très développées comme dans la zone des marnes 1 (figure 20) où le déferlement des vagues se produit loin de la côte (Figure 67) Ces zones sont stables et ne montrent pas d'érosion.

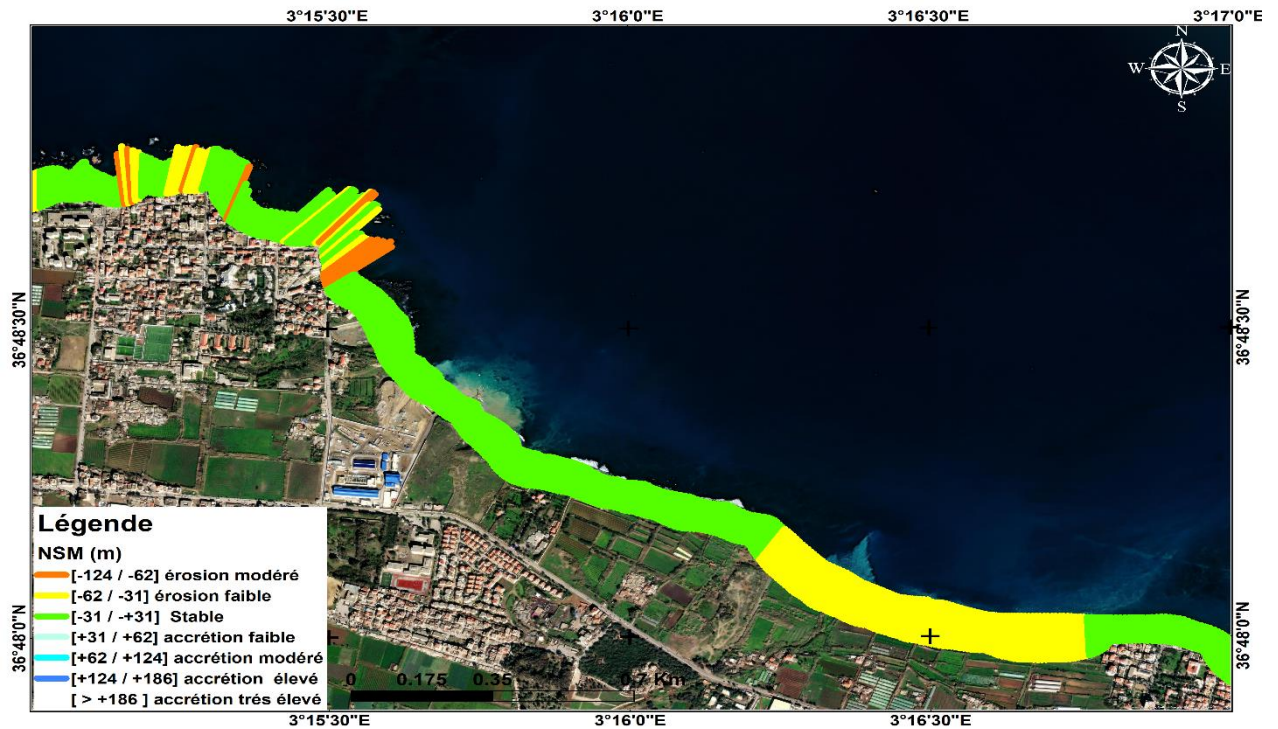


Figure 72 Evolution du trait de côte entre 1962 et 2024 montrant des taux d'érosion différents pour la formation des marnes. Les marnes altérées situées à l'est de la zone enregistrent une érosion plus élevée.

L'altération subaérienne joue également un rôle très important dans l'accentuation de l'érosion marine. En effet, dans les zones d'affleurement des marnes où le réseau hydrographique est plus dense montre des taux d'érosion nettement plus importante (figure 73).

La morphologie des falaises, caractérisée par leur hauteur, leur pente et leur degré de fracturation, influe directement sur leur stabilité face à l'érosion. Les simulations ont mis en évidence que les escarpements les plus abrupts et les plus élevés sont les plus vulnérables aux processus d'érosion.

En effet, les falaises présentant une topographie plus escarpée sont d'avantage soumises aux efforts mécaniques des vagues et des courants. Leur fragilisation progressive par sapement à la base entraîne fréquemment des éboulements et des effondrements (figure 71), accentuant ainsi le recul du trait de côte.

VII.4. Influence de la déformation tectonique (failles) sur la dynamique d'érosion :

Les zones de failles sur les littoraux rocheux sont des zones de grande vulnérabilité. Ces entailles fragilisent le substratum rocheux et favorise la circulation de l'eau. De plus, au niveau des plans de failles les terrains correspondent à des brèches tectoniques ou les roches sont broyées par le mouvement de la faille. Elles deviennent donc facilement mobilisables par les eaux continentales et par les vagues. C'est le cas des conglomérats affleurant dans la région étudiée au niveau de la faille (figure 74).



Figure 73: Effondrement des falaises de conglomérat escarpées au niveau d'une faille.

VII.5. Influence de la nature des faciès sur la dynamique d'érosion :

L'analyse diachronique de l'évolution du trait de côte a permis de mettre en évidence la diversité des réponses des formations géologiques face aux processus d'érosion.

Les résultats montrent que certaines formations, comme les granites et les pegmatites, présentent une meilleure résistance à l'érosion, avec des taux de recul les plus faibles, généralement d'environ -0.25m/an par an. À l'inverse, les faciès plus tendres, tels que les schistes et les marnes, notamment quand elles souffrent déjà d'une altération subaérienne, subissent une érosion plus marquée, avec des taux de recul plus importants (figure 74) qui peuvent atteindre -1.29 m/an par an pour les schistes et -1.51 m/an par an pour les marnes.

Cependant, le faciès qui a enregistré le taux d'érosion le plus élevé est celui des rhyolites, avec des taux de recul d'environ - 1.8 m/an. En effet ce faciès géologique altéré chimiquement est très vulnérable à l'érosion marine (Figure 75).

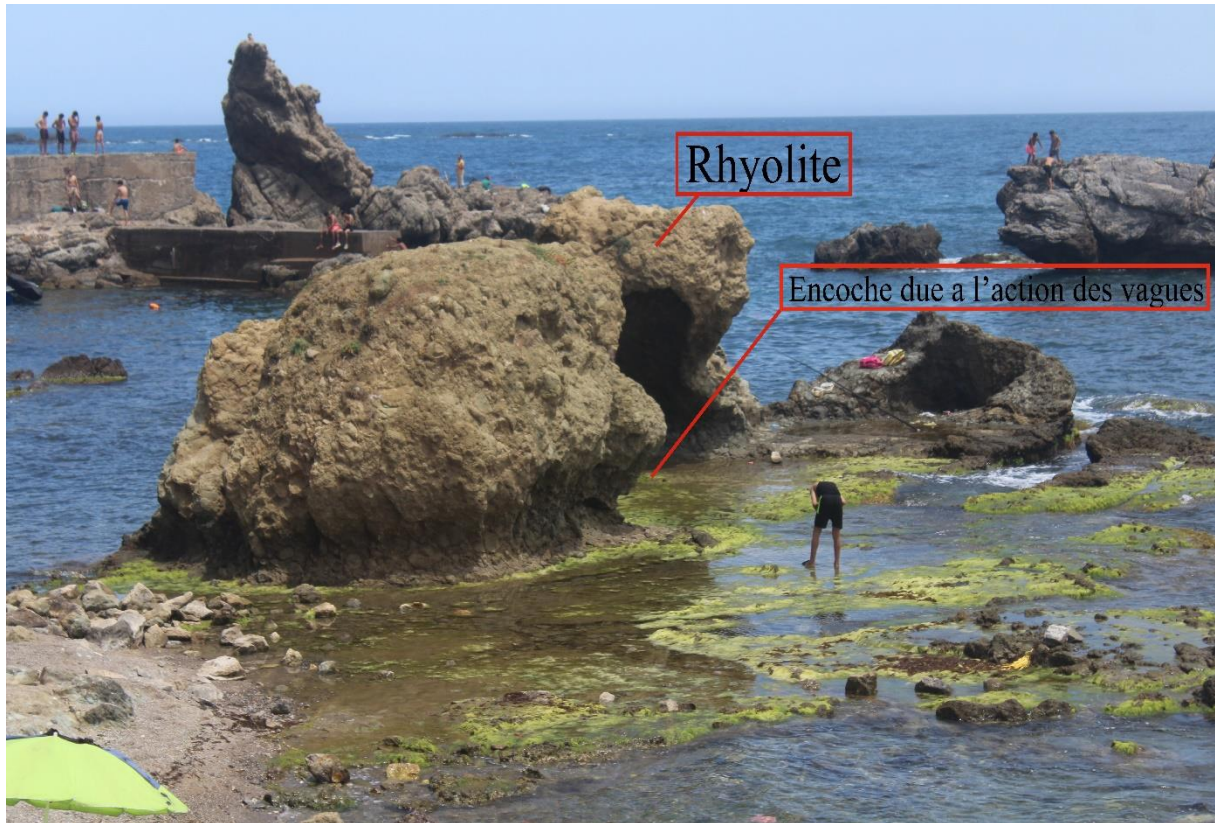


Figure 74 Photo montrant une érosion marine active au niveau des rhyolites. Présence d'encoche et de cavités formées par l'action des vagues.

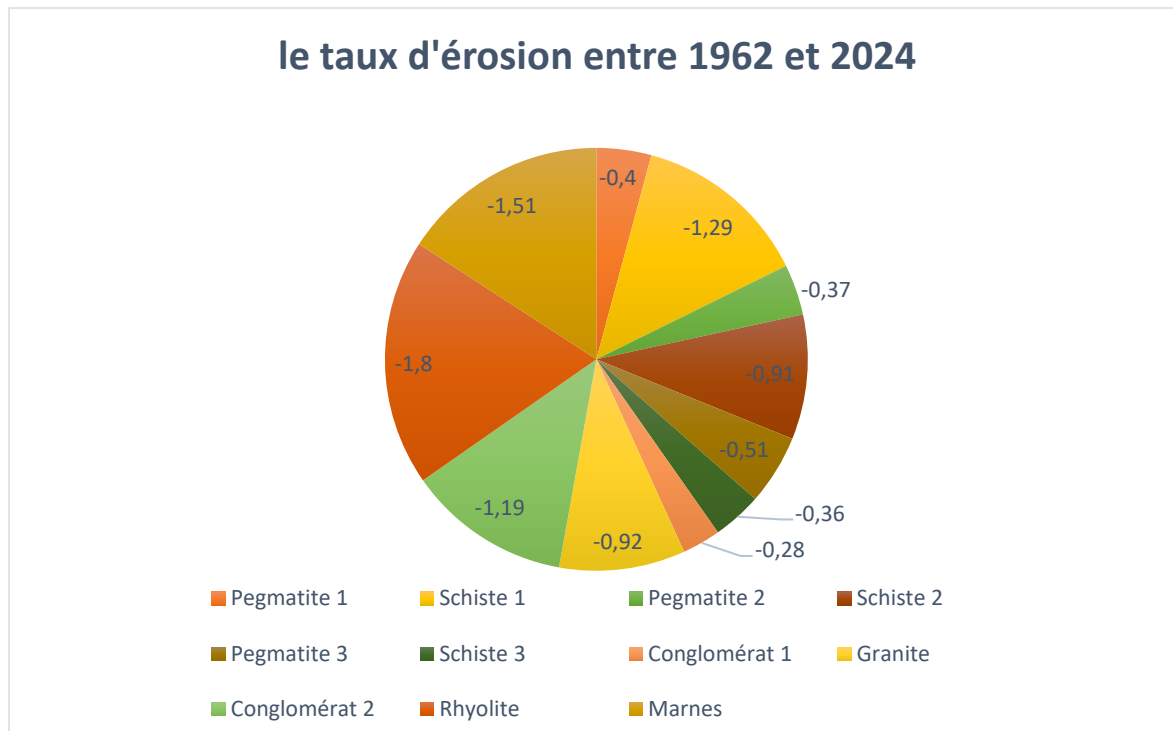


Figure 75: Le taux d'érosion entre 1962 et 2024

VII.6. Influence du changement climatique sur les taux d'érosion :

Les projections du **GIEC** concernant l'élévation future du niveau marin constituent un facteur aggravant pour l'érosion des côtes rocheuses de la zone d'étude.

Élévation du niveau marin et recul du trait de côte selon les scénarios du GIEC, le niveau moyen des mers pourrait s'élever de 0,61 à 1,10 mètres d'ici 2100 dans un contexte d'émissions élevées. Cette remontée du niveau marin aura pour conséquence de soumettre les formations géologiques littorales à une érosion accrue, notamment par le biais du sapement de leur base.

Les simulations ont montré que cette élévation du niveau de la mer, combinée aux conditions hydrodynamiques extrêmes, entraînerait un recul significatif du trait de côte, pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres pour certaines lithologies les plus vulnérables.

Le changement climatique est également susceptible d'amplifier l'occurrence et l'intensité des événements météorologiques extrêmes, tels que les tempêtes. Cette augmentation de la fréquence et de l'énergie des vagues de tempête aura pour effet d'accélérer les processus d'érosion affectant les formations rocheuses côtières.

Les falaises les plus exposées subiront alors une dégradation accélérée, avec un recul plus rapide du trait de côte. Cette dynamique érosive renforcée par le changement climatique représente un enjeu majeur pour la gestion durable des espaces littoraux.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Cette étude portant sur le comportement des formations géologiques de la zone côtière d'El Marsa vis-à-vis de l'érosion marine a permis de mettre en lumière la complexité et la variabilité des processus érosifs affectant ce littoral. L'analyse approfondie des différents faciès géologiques, couplée à une modélisation numérique des conditions hydrodynamiques et à une évaluation diachronique de l'évolution du trait de côte, a révélé des dynamiques d'érosion différentielles fortement influencées par la nature lithologique des formations.

Les résultats démontrent que les conditions hydrodynamiques, particulièrement lors d'événements extrêmes de période de retour centennale, exercent une pression considérable sur les formations littorales. Les simulations ont mis en évidence des hauteurs de houle pouvant dépasser 4,5 mètres et des courants côtiers atteignant 1,2 m/s, engendrant des contraintes mécaniques importantes sur les escarpements rocheux. Cette action érosive est modulée par la bathymétrie, la topographie des falaises et le réseau hydrographique, créant des zones de vulnérabilité accrue là où la bathymétrie est abrupte et où les falaises sont escarpées. L'étude a révélé une hiérarchie claire dans la résistance des différents faciès face à l'érosion marine. Les formations granitiques et pegmatitiques manifestent une résilience supérieure, avec des taux de recul modérés d'environ 0,25 m/an. À l'opposé, les faciès schisteux et marneux, particulièrement lorsqu'ils sont altérés, présentent une vulnérabilité accrue avec des taux d'érosion atteignant respectivement 1,29 m/an et 1,51 m/an. Les rhyolites altérées se distinguent comme les plus sensibles, subissant un recul marqué d'environ 1,8 m/an. Cette érosion différentielle souligne l'importance cruciale des caractéristiques lithologiques dans la détermination de la susceptibilité des côtes à l'érosion marine. Par ailleurs, l'étude a mis en exergue le rôle significatif des discontinuités structurales, notamment des zones de failles, dans l'accélération des processus érosifs. Ces zones de faiblesse, caractérisées par la présence de brèches tectoniques, constituent des points de vulnérabilité accentuée face à l'action des vagues et des courants.

Les travaux réalisés ont permis de mettre en évidence que les zones les plus vulnérables et les plus exposées au forçage des vagues dans la région correspondent aux falaises de schistes à l'est du cap d'El Marsa et les zones de marnes altérées par les eaux d'infiltration à ouest du Cap.

Dans le contexte du changement climatique, les projections d'élévation du niveau marin et l'augmentation potentielle de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques

Conclusion Générale

extrêmes laissent présager une intensification des processus érosifs. Cette perspective souligne l'urgence d'intégrer ces facteurs dans les stratégies de gestion côtière à long terme.

Face à l'érosion marine menaçant les falaises côtières, plusieurs stratégies de gestion sont mises en œuvre pour assurer leur protection durable. Les méthodes de protection "dures" incluent la construction d'ouvrages comme des épis, des brise-lames ou des murs de soutènement, mais ces structures peuvent perturber la dynamique sédimentaire naturelle et nécessitent un entretien coûteux (**Kamphuis, 2020**). En alternative, les techniques "douces" ou d'ingénierie naturelle, telles que le rechargement des plages en sable et la végétalisation des falaises, favorisent la stabilisation par les systèmes racinaires. La gestion des falaises comprend également la régulation de l'accès et des activités humaines, ainsi que le recul stratégique des infrastructures en zones à risque (**Griggs, 2005**). Une planification intégrée prenant en compte les risques, les enjeux socio-économiques et les processus naturels est essentielle pour une gestion durable à long terme.

En fin, cette étude fournit une base scientifique solide pour la compréhension des mécanismes d'érosion affectant la zone côtière d'El Marsa. Elle met en lumière la nécessité d'une approche intégrée, prenant en compte la diversité géologique, les conditions hydrodynamiques et les projections climatiques pour une gestion durable du littoral. Ces résultats constituent un fondement essentiel pour l'élaboration de stratégies d'adaptation et de protection côtière, cruciales face aux défis environnementaux et anthropiques croissants auxquels sont confrontés ces écosystèmes littoraux sensibles. Des recherches supplémentaires, notamment sur la modélisation à long terme de l'évolution du trait de côte et l'évaluation des impacts socio-économiques de l'érosion côtière, permettraient d'affiner davantage les stratégies de gestion et de préservation de ce patrimoine géologique et écologique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ahn, J., Na, Y., Park, S.W., (2019).** Development of Two-Dimensional Inundation Modelling Process using MIKE21 Model. *KSCE J. Civ. Eng.* 23, p.p.3968–3977.
- Allouhi, A., Zamzoum, O., Islam, M.R., Saidur, R., Kousksou, T., Jamil, A., Derouich, A., (2017).** Evaluation of wind energy potential in Morocco's coastal regions. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 72,p.p. 311–324.
- Alongi, D.M., (2008).** Mangrove forests: resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 76,p.p. 1–13.
- Amarouche, K., Akpınar, A., Bachari, N.E.I., Houma, F., (2020).** Wave energy resource assessment along the Algerian coast based on 39-year wave hindcast. *Renew. Energy* 153,p.p. 840–860.
- Anfuso, G., Bowman, D., Danese, C., Pranzini, E., (2016).** Transect based analysis versus area based analysis to quantify shoreline displacement: spatial resolution issues. *Environ. Monit. Assess.*
- Bird, E.C., (2008).** Coastal geomorphology: an introduction. Lieu: John Wiley & Sons.
- Boak, E.H., Turner, I.L., 2005. Shoreline definition and detection: a review. *J. Coast. Res.* 21, p.p.688–703.
- BOUKHENNAF, (2023).** Modélisation de la cinématique du trait de côte, dynamique sédimentaire et évaluation des zones à risque de la côte Algéroise. Thèse doctorat.GPL.Bely brahim: Enssmal
- Castelle, B., Bonneton, P., Senechal, N., Dupuis, H., Butel, R., Michel, D., (2006).** Dynamics of wave-induced currents over an alongshore non-uniform multiple-barred sandy beach on the Aquitanian Coast, France. *Cont. Shelf Res.* 26, p.p.113–131.
- Cornel Stander, (2015).** Analysis of extreme events in the coastal engineering environment [WWW Document]. URL (accessed 5.20.24).
- Cowell, P.J., Thom, B.G., (1994).** Morphodynamics of coastal evolution. *Coast. Evol. Late Quat. Shorel. Morphodynamics*, p.p. 33–86.
- Davidson-Arnott, R., Bauer, B., Houser, C., (2019).** Introduction to coastal processes and geomorphology. Cambridge university press.
- Dordor, P., Marquestaut, E., Villeneuve, G., (1980).** Dispositif de mesures du pouvoir thermoélectrique sur des échantillons très résistants entre 4 et 300 K. *Rev. Phys. Appliquée* 15, p.p.1607–1612.

- Dubarbier, B., (2014).** Modélisation numérique de l'évolution des profils de plages sableuses dominées par l'action de la houle (PhD Thesis). France: Bordeaux.
- Dunne, T., Leopold, L.B., (1978).** Water in environmental planning. Macmillan.
- Emery, K.O., Kuhn, G.G., (1982).** Sea cliffs: their processes, profiles, and classification. Geol. Soc. Am. Bull. 93, p.p.644–654.
- Faye, IBN, (2010).** Faye, IBN, Diop, ES et Cabacting, LD (2010). Etude diachronique de la zone côtière de Rufisque à partir de données de télédétection. Journal de recherche côtière
- Fenster, M.S., Dolan, R., Elder, J.F., (1993).** A new method for predicting shoreline positions from historical data. J. Coast. Res. p.p.147–171.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A., (1979).** Groundwater prentice-hall. Englewood Cliffs NJ 176, p.p.161–177.
- Ghazali, (2016).** Evolution du trait de côte au niveau de la baie de Bouismail : recours à l'image satellite et système d'information géographique.
- Giret, A., (2023).** Chapitre III. Histoire de l'hydrologie, in: Pierre Perrault: Le père de l'Hydrologie, Histoire. Presses universitaires de Rennes, Rennes, p.p. 127–180.
- Goudie, A.S., Viles, H.A., (2016).** Geomorphology in the Anthropocene. Cambridge University Press.
- Habi, M., (2011).** Evaluation du phénomène d'inondation dans la plaine orientale de la Mitidja (oued el Hamiz et oued Reghaia) Alger-Algérie. Évolution 22.
- Hillel, D., (1998).** Environmental soil physics. Academic.
- Himmelstoss, (2009).** Instructions d'installation et guide de l'utilisateur du DSAS 4.0, rapport ouvert de l'USGS.
- Griggs, G.B., (2005).** The impacts of coastal armoring. Shore Beach 73, p.p. 13–22.
- Houma, F.B., (2009).** Modélisation et cartographie de la pollution marine et de la bathymétrie à partir de l'imagerie satellitaire (PhD Thesis). Université Paris-Est.
- Hughes, M.G., Masselink, G., (2003).** An Introduction to Coastal Processes and Geomorphology. Hodder Educ. Lond.
- Kamphuis, J.W.,(2020).**Introduction to coastal engineering and management. World Scientific.
- Komar, P.D., (1977).** Beach processes and sedimentation.
- Leclaire, L., (1972).** La sédimentation holocène sur le versant méridional du bassin Algero-Balfares (précontinent Algérien).

- Masselink, G., Gehrels, R., (2014).** Coastal environments and global change. John Wiley & Sons.
- Mustoe, G.E., (1982).** The origin of honeycomb weathering. *Geol. Soc. Am. Bull.* 93, p.p.108–115.
- Nicholls, R.J., Cazenave, A., (2010).** Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones.
- Paskoff, R., (2010).** Les littoraux: impact des aménagements sur leur évolution. Paris: Armand Colin.
- Pye, K., Tsoar, H., (2008).** Aeolian sand and sand dunes. Springer Science & Business Media.
- Sagne, P., Fall, B., Ba, K., Hadji, E., (2019).** Morphosedimentary evolution of Mamelles and Ouakam beaches (Dakar, Senegal) Evolution morphosédimentaire des plages des Mamelles et de Ouakam (Dakar, Sénégal). *J. Environ. Health Sci. Eng.* 3, p.p.238–252.
- SALLAYE, M., (2021).** Processus mis en jeu dans l'évolution morpho-dynamique de la baie de Zemmouri: modélisation hydro-sédimentaire et cinématique du trait de côte. thèse doctorat: Dely brahim: Enssmal
- Selby, M.J., (1993).** Hillslope Materials. Oxford University Press, 451p.
- Short, A.D., (1999).** Handbook of beach and shoreface morphodynamics. Great Britain: John Wiley; ISBN 0-471-96570-7.
- Stépanian, A., (2002).** Evolution morphodynamique d'une plage macrotidale à barres: Omaha beach (Normandie) (PhD Thesis). France: Université de Caen.
- Sunamura, T., Tsujimoto, H., Aoki, H., (2014).** Chapter 12 .The rock coast of Japan. *Geol. Soc. Lond. Mem.* 40, 203–223. <https://doi.org/10.1144/M40.12>
- Symonds, A.M., Vijverberg, T., Post, S., Van Der Spek, B.-J., Henrotte, J., Sokolewicz, M., (2016).** Comparison between Mike 21 FM, Delft3D and Delft3D FM flow models of western port bay, Australia. *Coast Eng* 2, p.p.1–12.
- Thieler, E.R., Himmelstoss, E., Miller, T., (2005).** User guide & tutorial for the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 3.2. Ext. ArcGIS 9, p.p. 2005–1304.
- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., Ergul, A., (2009).** The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0-an ArcGIS extension for calculating shoreline change. US Geological Survey.
- Tomczak, M., Godfrey, J.S., (2003).** Regional oceanography: an introduction. Daya books.
- Trenhaile, A.S., 2011. Cliffs and rock coasts.
- Ward A.D., Trimble, S.W., (2004).** Environmental Hydrology, CRC Press. Boca Raton FL 475.

Annexes



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل
Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral

Etude technico-économique en vue de l'obtention
du diplôme Start-up

Projet:

Bureau d'études en cartographie littorale 3D

Présenté par :

Ahmedgaid Ahlem

Benabid Mahdi

Soutenue le 03/07/2023, devant le jury composé de :

Année universitaire : 2023/2024

Carte d'information

1. Equipe d'encadrement :

2. Equipe de projet :

Étudiant	Faculté	Spécialité
Ahmedgaid Ahlem	ENSSMAL	Gestion et Protection du Littoral
Benabid Mahdi	ENSSMAL	Gestion et Protection du Littoral

Annexe A

Introduction

Les zones côtières revêtent une importance cruciale pour de nombreux pays maritimes, en raison de leur riche biodiversité, de leurs potentiels économiques et de leur attractivité résidentielle et touristique. Cependant, ces littoraux sont confrontés à des défis environnementaux majeurs liés notamment à l'érosion côtière, à la montée des eaux et aux aléas naturels. Selon les experts, environ 20% des côtes mondiales sont actuellement en érosion, menaçant les écosystèmes naturels et les infrastructures humaines. Face à ces enjeux complexes, une gestion durable et éclairée des littoraux s'impose, soutenue par des outils technologiques de pointe.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre projet entrepreneurial visant à créer un bureau d'études spécialisé dans la cartographie 3D haute résolution des zones côtières. L'idée centrale est de mettre à profit les avancées récentes en matière de lidar aéroporté, de radar et de drones pour modéliser avec une extrême précision la topographie littorale, en intégrant à la fois le trait de côte terrestre et la bathymétrie sous-marine.

La présente étude technico-économique vise à évaluer la faisabilité et la viabilité de mise en œuvre de ce projet innovant. Réalisée conformément aux directives de la l'arrêté n°1275 du Ministère de l'Enseignement Supérieur, et s'appuyant sur les compétences acquises lors de formations dans les domaines de la gestion de projet, du marketing, de la finance et du business model, cette analyse rigoureuse abordera les différents aspects techniques, commerciaux, organisationnels et financiers de la création de ce bureau d'études de pointe en cartographie littorale 3D.

Le premier axe : Présentation du projet

1.L'idée de projet :

L'idée de notre projet est de créer un bureau d'études dans le domaine des services techniques, spécialisé dans la cartographie 3D des zones littorales à l'aide de technologies modernes comme le lidar, le radar et les drones.

Au cours de la réalisation de notre Projet fin d'étude on a germé que la gestion des littoraux nécessite des données cartographiques très précises et régulièrement mises à jour pour suivre l'évolution du trait de côte et anticiper les risques d'érosion et de submersion. Les technologies évoluées comme le lidar aéroporté offrent désormais cette capacité.

Le bureau d'études proposera des prestations de cartographie haute résolution par acquisitions lidar/radar/drones, avec traitement des données et restitutions cartographiques 3D pour ses clients, ces missions seront accomplies par une équipe pluridisciplinaire regroupant des experts en topographie, géomatique, traitement de données géospatiales et génie côtier.

Le siège social sera basé dans une grande ville côtière, idéalement proche d'un pôle universitaire, avec des interventions terrains planifiées le long du littoral de la région et à terme à une échelle nationale.

2.Les valeurs proposées :

On a listé les principales valeurs à mettre en avant auprès des clients, cibles que sont les collectivités, services de l'État et bureaux d'études en environnement/aménagement :

- Maîtrise des technologies de pointe (lidar, radar, drones) pour l'acquisition de données 3D précises.
- Équipes pluridisciplinaires qualifiées (topographes, géomaticiens, analystes)
- Livrables cartographiques 3D très haute résolution et haute précision
- Suivi régulier et comparaisons diachroniques pour analyse de l'évolution du trait de côte
- Produits sur-mesure selon les besoins spécifiques des clients
- Contribution à une meilleure connaissance des dynamiques côtières
- Identification précise des zones à risques d'érosion/submersion
- Aide à la planification des aménagements et ouvrages de protection
- Interlocuteur dédié pour un suivi de projet optimal.

3.Équipe de travail :

Étudiante 01 Ahmedgaid Ahlem

Etudiant 02 Benabid Mahdi

4.Objectifs du projet :

Notre objectif au cours de cinq premières années de devenir un acteur référent à l'échelle nationale dans la cartographie 3D du trait de côte, en visant 20 à 25% de part de marché sur ce créneau.

Sur le long terme (5-10 ans), Nos objectifs sont de conserver un leadership, de diversifier les activités, et d'atteindre 30 à 40% des parts de marché en cartographie littorale dans L'Algérie.

5.Calendrier de réalisation de projet :

Pour mener à bien ce projet, l'objectif final est divisé en six tâches principales : études préalables, acquisition d'équipements, aménagement du siège, installation technique, achat de ressources numériques et réalisation de projets pilotes. Chaque tâche requiert un temps spécifique. Les résultats clés attendus sont respectivement : un plan d'affaires validé, du matériel de pointe livré, des locaux opérationnels, une infrastructure technique fonctionnelle, une suite logicielle complète et des cartographies 3D de démonstration. Ce découpage permet une gestion efficace du projet sur 15 mois, avec des jalons précis pour suivre l'avancement.

		1	2	3	4	5	6	7	8
1	Études préalables		✗	✗					
2	Commande des équipement		✗	✗					
3	Construction d'un siège de production				✗	✗			
4	Installation des équipèrent			✗	✗				
5	Achat de matière première					✗	✗		
6	Réalisation de prototype							✗	

Deuxième axe: Aspects innovants

1.Aspects innovants :

Notre microentreprise se distingue par son approche novatrice. En fusionnant lidar, radar et drones, elle offre une précision inégalée dans la modélisation 3D du trait de côte. Cette technologie détecte les moindres changements, auparavant invisibles. L'entreprise va plus loin avec ses algorithmes d'intelligence artificielle qui prédisent l'érosion future, transformant la gestion côtière d'une posture réactive à proactive. Cette innovation, rare dans ce secteur, positionne cette jeune structure comme un pionnier, prouvant que même une microentreprise peut révolutionner un domaine complexe.

2.Domains d'innovation :

Notre microentreprise en cartographie littorale peut s'inscrire dans plusieurs domaines d'innovation :

- Géo Tech (utilisation de lidar et drones pour une cartographie 3D ultra-précise du littoral).
- IA (algorithmes prédisant l'érosion future à partir des données collectées).
- IoT (drones autonomes surveillant en continu les changements côtiers).
- Green Tech (Outils cartographiques aidant à préserver les écosystèmes dunaires).

Troisième axe : Analyse stratégique du marché

1. Le segment du marché :

Le marché potentiel regroupe tous les acteurs impliqués dans la gestion côtière : les 14 wilayas littorales, le Ministère de l'Environnement, le Commissariat National du Littoral (CNL), les bureaux d'études en environnement, et les entreprises industrielles en zone portuaire.

Notre microentreprise vise quatre acteurs stratégiques du littoral algérien.

- Le Commissariat National du Littoral (CNL) : (architecte de la politique côtière) dispose de budgets conséquents pour la préservation.
- Les wilayas d'Alger et d'Oran : confrontées à une érosion alarmante, cherchent des solutions immédiates pour sauver plages et infrastructures.
- Le Centre National des Techniques de la Construction (CNTC) :(référence en études) influence les décisions nationales.
- Sonatrach :(géant pétrolier) investit massivement pour protéger ses installations côtières vitales.

2. Mesure de l'intensité de concurrence :

Sur le marché algérien de la cartographie littorale, la concurrence reste modérée. Notre principal rival direct est le Centre National des Techniques Spatiales (CNTS) à Arzew, qui utilise l'imagerie satellitaire pour le suivi côtier. Bien qu'influent, le CNTS manque de la précision qu'offrent nos drones et lidars, indirectement deux bureaux d'études généralistes, l'ENHYD et Géo-Ingénierie, proposent parfois des relevés côtiers, mais sans technologie dédiée.

Le CNTS détient environ 60% du marché de l'analyse littorale, l'ENHYD et Géo-Ingénierie se partageant 25%, le reste étant inexploité.

3. La stratégie marketing :

Notre bureau d'études en cartographie littorale 3D mise sur une stratégie marketing adaptée à nos moyens de startup. Face à des concurrents établis, nous équilibrons astucieusement notre mix marketing.

Notre atout majeur est notre produit : une cartographie 3D ultra-précise, enrichie par l'IA qui prédit l'érosion future. Cette innovation rare nous positionne comme pionniers.

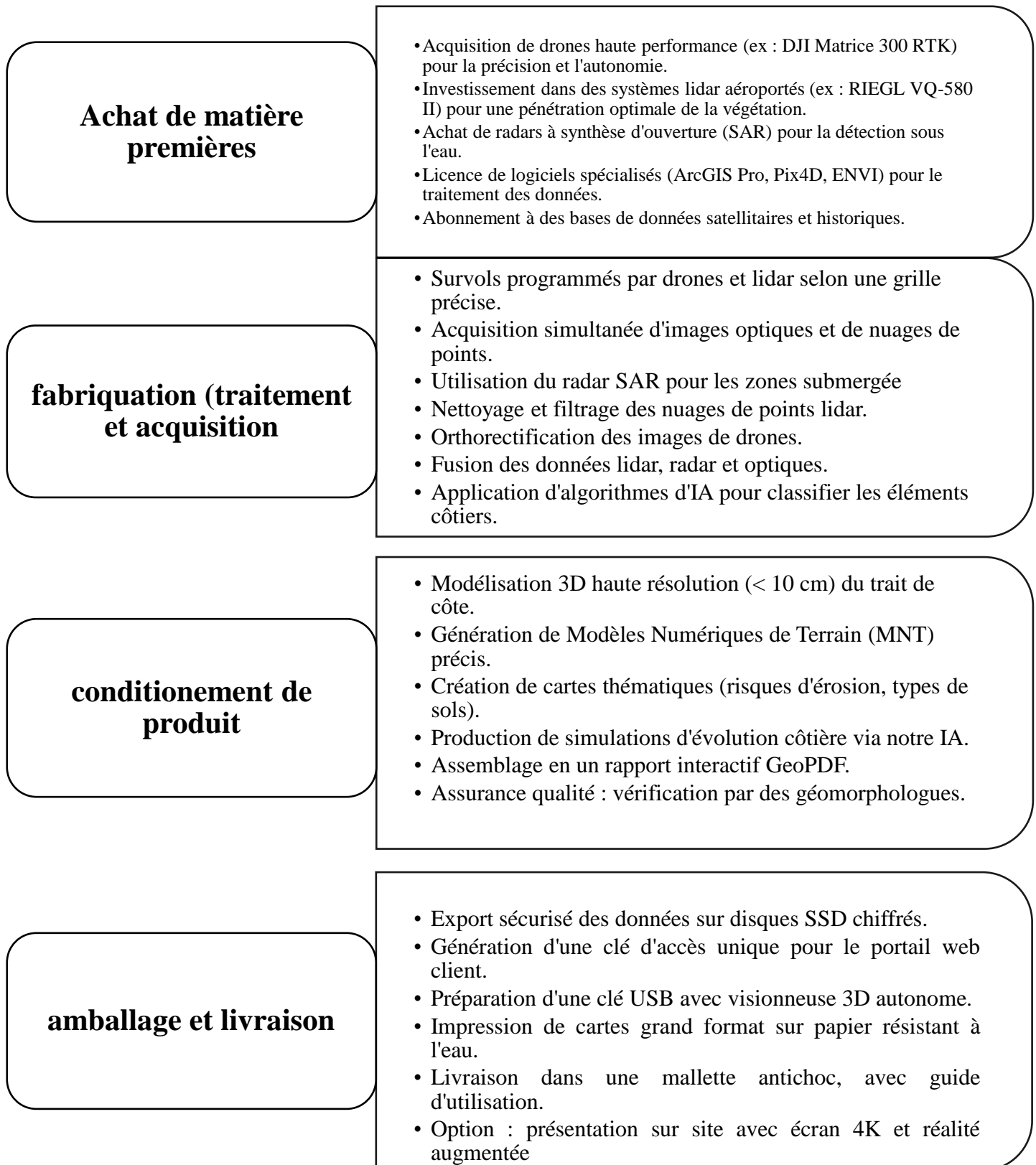
Côté prix, nous restons légèrement sous le marché, avec des abonnements pour des revenus stables. Notre distribution cible directement les décideurs via des événements clés et un site web professionnel.

Pour la promotion, le digital prime : contenu éducatif viral, newsletter ciblée, et sponsoring stratégique d'événements. Des webinaires gratuits et des articles techniques renforcent notre crédibilité sans gros budget. Cette approche équilibrée et ingénieuse nous permet de concurrencer efficacement les grands acteurs, en transformant nos limites financières en opportunités d'innovation.

Quatrième axe : Plan de production et organisation

1. Le processus de production :

Bureau d'études en cartographie 3D littorale suit un processus de production rigoureux, garantissant des livrables de haute qualité. Ce processus se décompose en quatre étapes clés :



2.L’approvisionnement:

Notre bureau d'études en cartographie 3D littorale s'appuie sur une stratégie d'approvisionnement pointue. Nous structurons nos achats pour accéder aux meilleures technologies tout en optimisant nos finances. Pour nos données, nous combinons des abonnements satellitaires de renom et archives LiDAR nationales, assurant un flux constant d'images précises. Des contrats cadres avec des fournisseurs d'élite garantissent nos stocks de matériaux essentiels : SSD, papier spécial, pièces de drones.

Notre équipement est stratégique : drones professionnels, LiDAR compact et stations de travail puissantes, tous choisis pour leur précision. Nos fournisseurs, leaders mondiaux, offrent qualité et support continu. La politique de paiement soutient notre croissance : versements échelonnés et financements à taux zéro pour le gros matériel, achats groupés pour les consommables. Cette approche nous permet d'avoir toujours la technologie de pointe nécessaire à notre innovation, tout en préservant notre trésorerie.

3.La main d’œuvre :

Notre projet, bien que démarrant comme une microentreprise, a un impact significatif et varié sur l'emploi. Nous créons directement cinq postes clés, chacun essentiel à notre mission : un ingénieur en géomatique, un pilote de drone certifié, un data scientist en IA, un géomorphologue côtier et un gestionnaire de projets environnementaux.

Mais notre impact ne s'arrête pas à ces emplois hautement qualifiés. En effet, notre croissance soutient également des emplois essentiels tel que :

Sur le plan technique, un technicien en étalonnage laser, un doctorant en géomorphologie et un expert en IA utilisent nos données pour faire avancer la science.

Sur le terrain, deux plongeurs inspectent les infrastructures sous-marines, et un spécialiste traduit nos rapports en dialectes locaux.

Notre travail inspire même l'entrepreneuriat : un poste dans une startup locale développant des capteurs côtiers sur notre conseil.

Enfin, une femme de ménage et un agent de sécurité pour compléter notre équipe.

En tout, notre bureau génère environ 23 emplois. Cette diversité montre que la gestion du littoral, vue par des ingénieurs comme nous, ne se limite pas à la technologie. Elle englobe recherche, culture locale, chaque poste direct ou indirect, du doctorant au pêcheur devenu médiateur, contribue à une nouvelle économie côtière où technologie et communauté s'unissent pour un littoral algérien résilient.

4. Les principaux partenaires :

Notre microentreprise en cartographie 3D littorale s'appuie sur un réseau stratégique de partenaires :

- Le Centre National des Techniques Spatiales nous ouvre ses archives satellite et guide notre acquisition lidar.
- DJI et Velodyne nous équiperont en drones marins et lidars submersibles, tandis qu'Esri transforme nos données en modèles 3D saisissants.
- Le Commissariat National du Littoral facilite nos interventions.
- Le Centre des Techniques de la Construction valide nos analyses.
- L'École Nationale des Sciences de la Mer et l'Aménagement du littoral affine nos algorithmes.
- Algeria Venture et L'incubateur BlueStart nous incubent.
- La Banque Extérieure d'Algérie finance notre équipement à taux préférentiel.
- La CNED co-investit en R&D.
- Total, exploitant des terminaux côtiers, finance une étude pilote

Cinquième axe : Plan financier

1. Les couts et charges :

Notre microentreprise en cartographie 3D littorale requiert un investissement initial conséquent, reflet de notre engagement d'ingénieurs pour une technologie de pointe. Le budget total s'élève à 15 millions de dinars, décomposé avec précision.

L'équipement technique qui est cœur de notre offre, représente 60% : 5 millions pour un LiDAR Velodyne VQ-580 II, 3 millions pour deux drones DJI Matrice 300 RTK, et 1 million pour une station de travail Dell bi-Xeon.

Le volet logiciel est crucial pour transformer les données en insights, il totalise 2 millions (licences ArcGIS Pro, Pix4D, et notre IA propriétaire).

L'aménagement d'un bureau technique à Alger coûte 2 millions, garantissant un environnement optimal. Le fonds de roulement de 2 millions couvre 6 mois de salaires, loyers et missions terrain.

Notre financement allie vision écologique et pragmatisme d'ingénieur. La Banque Extérieure d'Algérie, séduite par notre impact vert, prête 8 millions à 4% sur 7 ans, avec 6 mois de grâce. Un taux avantageux reflétant la confiance dans notre projet.

La CNED octroie 4 millions, reconnaissant que cartographier le littoral renforce la sécurité nationale. Ce n'est pas un don, mais un investissement stratégique de l'État. Total Algérie complète avec 3 millions contre 10% de parts. Plus qu'un apport, c'est un partenariat : nous sécurisons leurs terminaux, ils valident notre technologie.

Cette structure à trois piliers - banque verte, État stratège, industriel partenaire - optimise notre financement. Elle réduit les risques en diversifiant les sources, tout en validant notre concept sur les plans environnemental, national et commercial.

Notre remboursement, suit un plan structuré et progressif ; Les six premiers mois, critiques pour notre installation, sont sans remboursement. Cette période de grâce nous permet de déployer nos lidars et drones sans pression financière immédiate, assurant une fondation technologique solide.

Ensuite, notre remboursement s'échelonne lentement d'abord, puis à un rythme constant. La première année, seuls les intérêts (320 000 DZD) sont dus, comme une phase d'observation où nous mesurons le terrain. De l'année 2 à 7, nous remboursons une part fixe de capital (1 230 769 DZD) plus les intérêts, la 8ème année, le solde (615 385 DZD) est réglé marquant la fin de notre engagement.

année	Capital restant	intérêts	remboursement	annuité
1	8 000 000	320 000	0	320 000
2	8 000 000	320 000	1 230 769	1 550 769
3	6 769 231	231270	1 230 769	1 501 538
4	5 538 462	221 538	1 230 769	1 452 308
5	4 307 692	172 308	1 230 769	1 403 077
6	3 076 923	123 077	1 230 769	1 353 846
7	1 846 154	73 846	1 230 769	1 304 615
8	615 385	24 615	615 385	640 000

2.Le chiffre d'affaires :

Notre chiffre d'affaires prévisionnel pour la première année d'activité de notre microentreprise spécialisée dans la cartographie littorale 3D par lidar, radar et drones, s'élève à 5 000 000 de dinars algériens selon nos projections initiales. Ce montant, issu d'une étude de marché approfondie, représente un démarrage prometteur pour notre offre innovante à haute valeur ajoutée. Cependant, les aléas commerciaux lors du lancement d'une nouvelle activité peuvent impacter ce chiffre, à la hausse comme à la baisse. C'est pourquoi deux scénarios de prévision ont été élaborés pour les trois premières années d'exploitation :

Prévisions de chiffre d'affaires

Scénario optimiste

Ce scénario repose sur une conquête commerciale particulièrement dynamique dès le lancement et une montée en puissance rapide sur notre marché de niche :

Année1: 6000000 DA Notre offre de cartographie littorale 3D innovante séduit immédiatement. Nous remportons des contrats majeurs auprès du Commissariat National du Littoral ainsi que des wilayas côtières stratégiques comme Alger et Oran, très exigeantes de nos services de pointe.

Année2: 10000000 DA Notre positionnement technologique différenciant continue de convaincre les acteurs clés. Le Centre National des Techniques de la Construction et de l'industriel Sonatrach nous sélectionnent. Nous renouvelons également nos premiers contrats en ajoutant des options de suivi régulier à haute valeur ajoutée.

Année3 : 15000000DA La notoriété grandissante de notre expertise nous ouvre de nouveaux marchés. D'autres wilayas littorales ainsi que des bureaux d'études spécialisées font appel à nos services. Notre offensive commerciale soutenue et l'élargissement continu de notre offre nous permettent d'atteindre ce niveau élevé de chiffre d'affaires.

Scénario pessimiste

Ce scénario, plus prudent, anticipe un rythme de développement commercial plus mesuré face à la nouveauté de notre activité :

Année 1 : 3500000 DA Malgré l'attrait de notre proposition de valeur, notre démarrage s'avère plus lent que prévu. Des délais dans les cycles de prospection et de signature des premiers contrats pénalisent nos résultats sur cette année de lancement.

Année 2: 6000000 DA Nos premières réalisations nous permettent progressivement de convaincre de nouveaux clients. Cependant, la concurrence reste vive sur ce marché émergent, limitant notre progression.

Année3: 9000000 DA Le bouche-à-oreille autour de la qualité de nos livrables cartographiques et notre crédibilité désormais établie nous ouvre de nouvelles opportunités. Notre chiffre d'affaires poursuit sa croissance, mais à un rythme plus modéré que le scénario optimiste.

Ces deux scénarios, optimiste et pessimiste, prévoient une fourchette large de prévision de revenus lors de notre phase de lancement. Ils nous permettent d'anticiper au mieux nos besoins de financement et notre plan de trésorerie, en fonction du rythme effectif de conquête commerciale que nous parviendrons à atteindre.

3. Les comptes de résultats escomptés :

Le compte de résultat prévisionnel constitue une pièce maîtresse pour démontrer la viabilité économique de notre microentreprise. Le tableau ci-après présente nos projections rigoureuses de revenus, charges et résultats nets pour les trois premières années d'exploitation de notre bureau d'étude.

Tableau des comptes de résultats prévisionnels (en milliers de dinars algériens).

	Année 1	Année 2	Année 3
Chiffre d'affaire	5000	8000	12000
Coûts des ventes	2500	4000	5500
Marge brute	2500	4000	6500
Charge opérationnel	1800	2200	2800
EBITDA	700	1800	3700
Dotations aux amortissements	300	400	500
Résultat opérationnel	400	1400	3200
Charges financières	120	110	100
Résultats avant impôts	280	1290	3100
Impôts sur les bénéfices	84	387	930
Résultat net	196	903	2170

Le BFR représente le financement dont notre entreprise a besoin pour faire face au décalage entre le règlement des dépenses d'exploitation et l'encaissement des recettes, il se calcule en prenant en compte :

- Le stock de matières premières/données à financer
- Les créances clients (factures émises non encore payées)
- Moins les dettes fournisseurs (factures à payer)

$$\text{BFR} = \text{Stocks} + \text{Créances clients} - \text{Dettes fournisseurs}$$

Stocks : Notre entreprise doit constituer un stock permanent de données géospatiales (imageries, modèles numériques) et de consommables techniques (stockage, pièces de rechange drones). Le volume de stock est estimé à 500 000 DZD.

Créances clients : Nos clients étant principalement des donneurs d'ordre publics ou parapublics, le délai de règlement moyen est de 90 jours. Sur un chiffre d'affaires annuel prévisionnel de 5 000 000 DZD, l'encours de créances clients serait donc de 1 250 000 DZD.

Dettes fournisseurs : Les délais de paiement négociés avec nos fournisseurs (équipementiers, éditeurs, sous-traitants) sont en moyenne de 60 jours. Pour 2 500 000 DZD de charges d'achat annuelles, le volume de dettes fournisseurs ressort à 416 667 DZD.

Le besoin en fonds de roulement global pour notre entreprise serait donc :

$$\text{BFR} = 500\ 000 + 1\ 250\ 000 - 416\ 667 = 1\ 333\ 333\ \text{DZD}$$

Cette évaluation du BFR à près de 1,4 million de dinars nous permet d'appréhender au mieux les besoins de financement de notre cycle d'activité. Ce montant devra être couvert par une trésorerie disponible suffisante et/ou des lignes de crédits bancaires dédiées. Le suivi régulier et le renouvellement des sources de financement du BFR seront cruciaux pour la pérennité de notre modèle économique de cartographie littorale 3D.

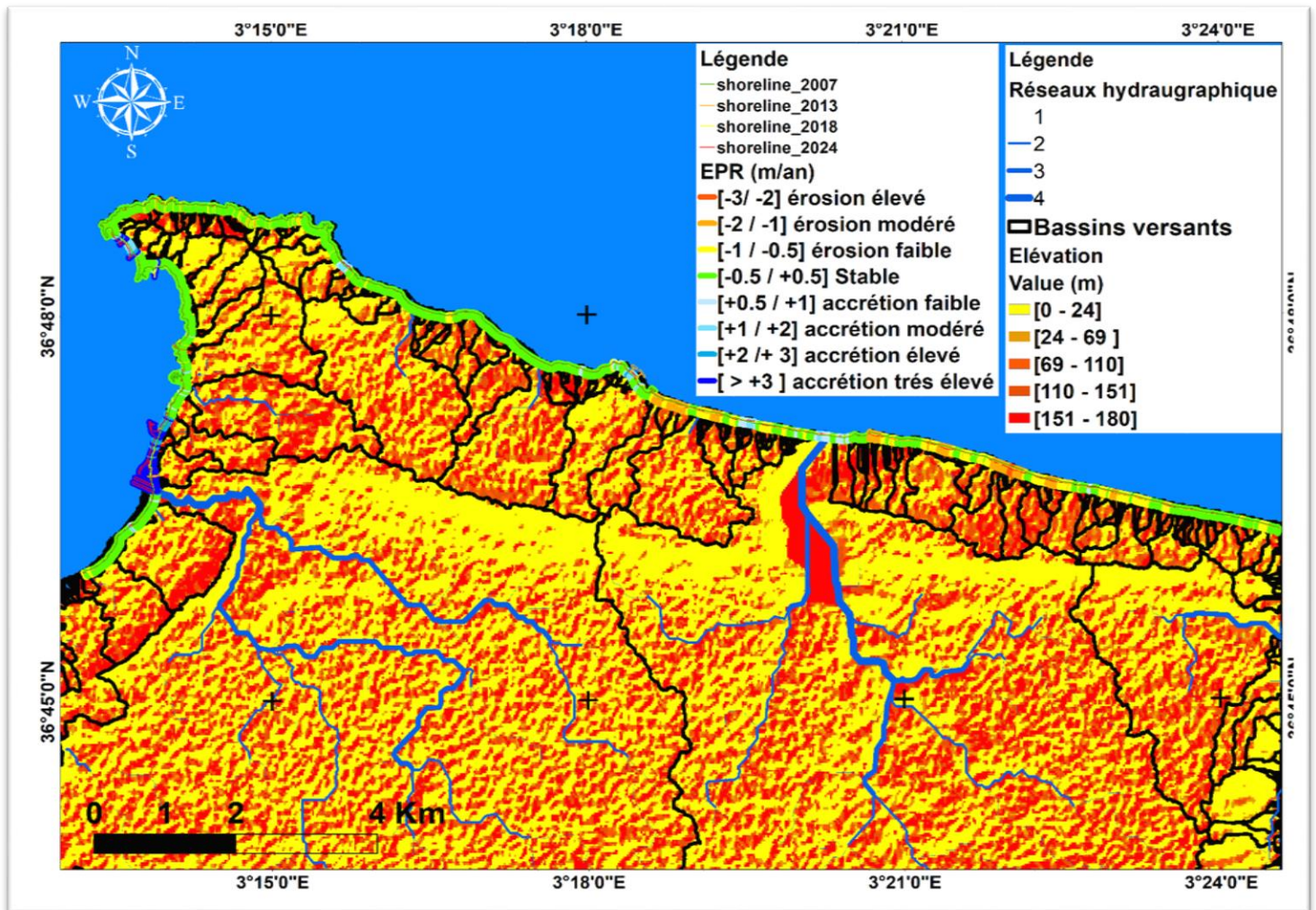
4. Le plan de trésorerie :

Le plan de trésorerie prévisionnel est un outil essentiel pour toute entreprise. Il permet de projeter avec rigueur les flux de trésorerie entrants et sortants sur la première année d'activité. Cette anticipation des mouvements de liquidités est cruciale pour dimensionner correctement les besoins de financement initiaux et s'assurer de disposer de ressources pérennes. Le tableau suivant détaille notre plan de trésorerie prévisionnel mensuel pour la première année d'exploitation de notre microentreprise de cartographie littorale.

(Les chiffres sont en milliers de dinars algériens).

	janv	fév	mars	avril	mai	juin	juill	aout	sept	oct	nov	dec	Total
Ventes			800			1200		1400		1600			5000
Total rentrée			800			1200		1400		1600			5000
Dépenses d'exploitation													
Achat matière/donnée	150	80	100	90	80	120	100	120	110	90	90	90	1220
Salaires	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	5400
Charges locatives	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	600
Autres charges	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	480
Total dépenses	690	620	640	630	620	660	640	660	650	630	630	630	7700
Trésorerie nette d'exploit	-690	-620	160	-630	-620	540	-640	740	-650	970	-630	-630	-2700
Acquisition d'équipement	8000		5000										13000
Développement logiciel	2000												2000
Total investissement	10000		5000										15000
Prêt bancaire	8000												8000
Apports en fond propre	10000												10000
Total financement	18000												18000
Variation de trésorerie	7310	-620	-40840	-630	-620	-540	-640	740	-650	970	-630	-630	300
Trésorerie début période		7310	6690	1850	1220	600	1140	500	1240	590	1560	930	
Trésorerie fin de période	7310	6690	1850	1220	600	1140	500	1240	590	1560	930	300	300

Sixième axe : Prototype expérimental



BUSINESS MODEL CANVAS

Partenaires clés

- CNTS (Centre National Des Techniques Spatiales)
- Esri (Environmental Systems Research Institute)
- CNL (Commissariat National Du Littoral)
- CNTC (Centre National Des Techniques De Construction)
- Enssmal, Bluestart
- Algeria Venture
- Banque Extérieure D'algerie
- Cned (La Caisse Nationale D'equipement Pour Le Développement)
- Total Algerie

Activités clés

- Acquisition de données
- Traitement des données
- Production de livrables cartographique 3d
- Recherche et développement
- Gestion de projet et développement commercial

Ressources clés

- équipements (drones, lidar)
- logiciels spécialisées (ArcGIS, ai propriétaire)
- données (lidar, bases terrain uniques)
- équipe pluridisciplinaire d'experts
- partenariats stratégiques
- propriété intellectuelle

Valeur fournie

- Cartographie 3d haute précision du littoral
- Suivi des évolutions et prédiction par IA
- Expertise sur mesure pour la gestion côtière
- Combinaison unique de technologies de pointe
- Aide à la décision pour les aménagements

Relations clients

- Conseil personnalisé et Suivi Dédié Par Projet.
- Formations et séminaires techniques.
- Démonstrations et preuves de concept (poc).
- Rapports d'étude et supports de communication.
- Newsletter et veille technologique sectorielle

Les canaux

- Événements et salons professionnels ciblés.
- Site web vitrine et réseaux sociaux spécialisés.
- Plaquettes et fiches produits diffusées par e-mailing.
- Articles et publicités.
- Réseau de partenaires.

Segment de clientèle

- Collectivités littorales
- Agences publiques d'aménagement
- Bureaux d'études côtiers)
- Gestionnaires d'infrastructures littorales
- instituts de recherche marine

Structure des coûts

- Coûts fixes :
- Salaires, loyers, licences logicielles annuelles, assurances et frais juridiques, frais de marketing et communication récurrents, eau et électricité, internet
- Coûts variables :
- Achat de données externes, réparation et maintenance location ponctuelle de matériel spécifique, frais de déplacement et d'hébergement pour les missions terrain, frais d'impression et d'expédition des livrables, publicité

Sources de revenue

- Prestations de cartographie 3d sur mesure.
- Études prédictives d'évolution du littoral.
- Abonnements annuels aux services de suivi.
- Vente de données et de modèles 3d.
- Formation et conseil en gestion du littoral.
- Licensing de notre solution logicielle.

Annexe B

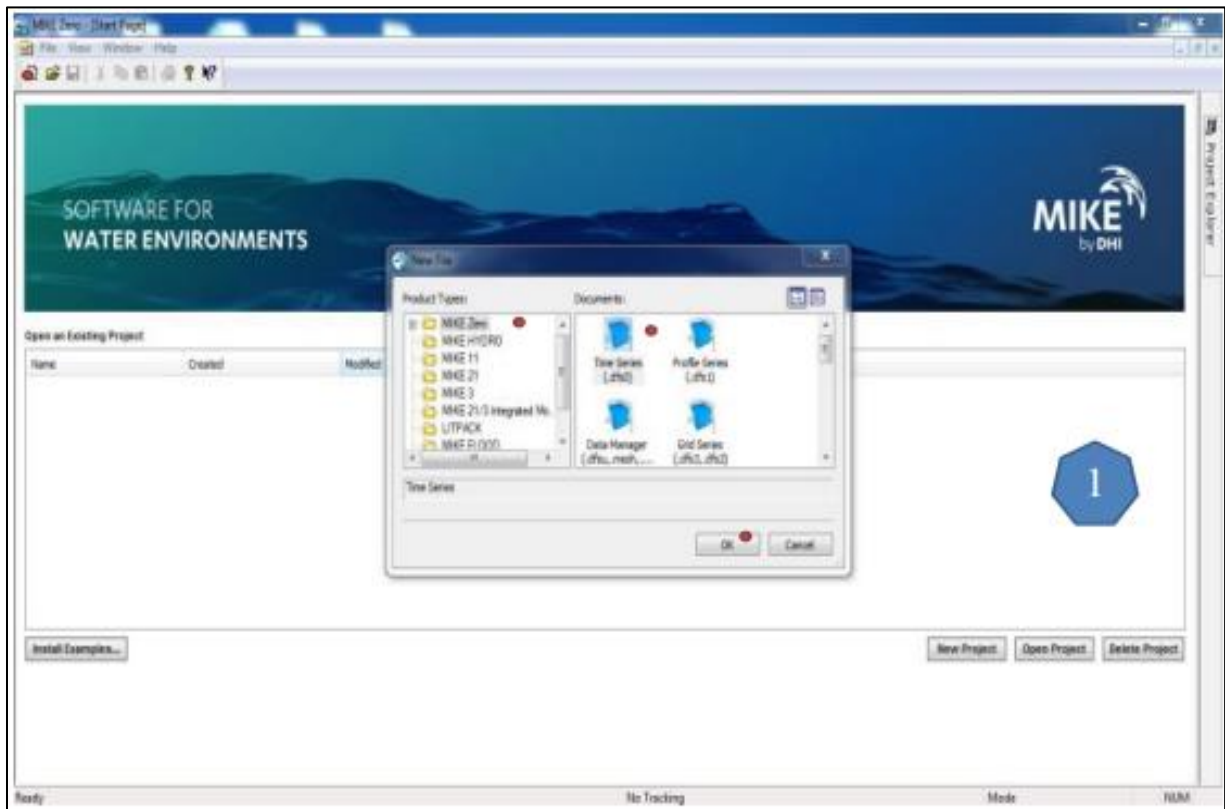


Figure 76 Création de la série du tems des houles pour une année 2019.

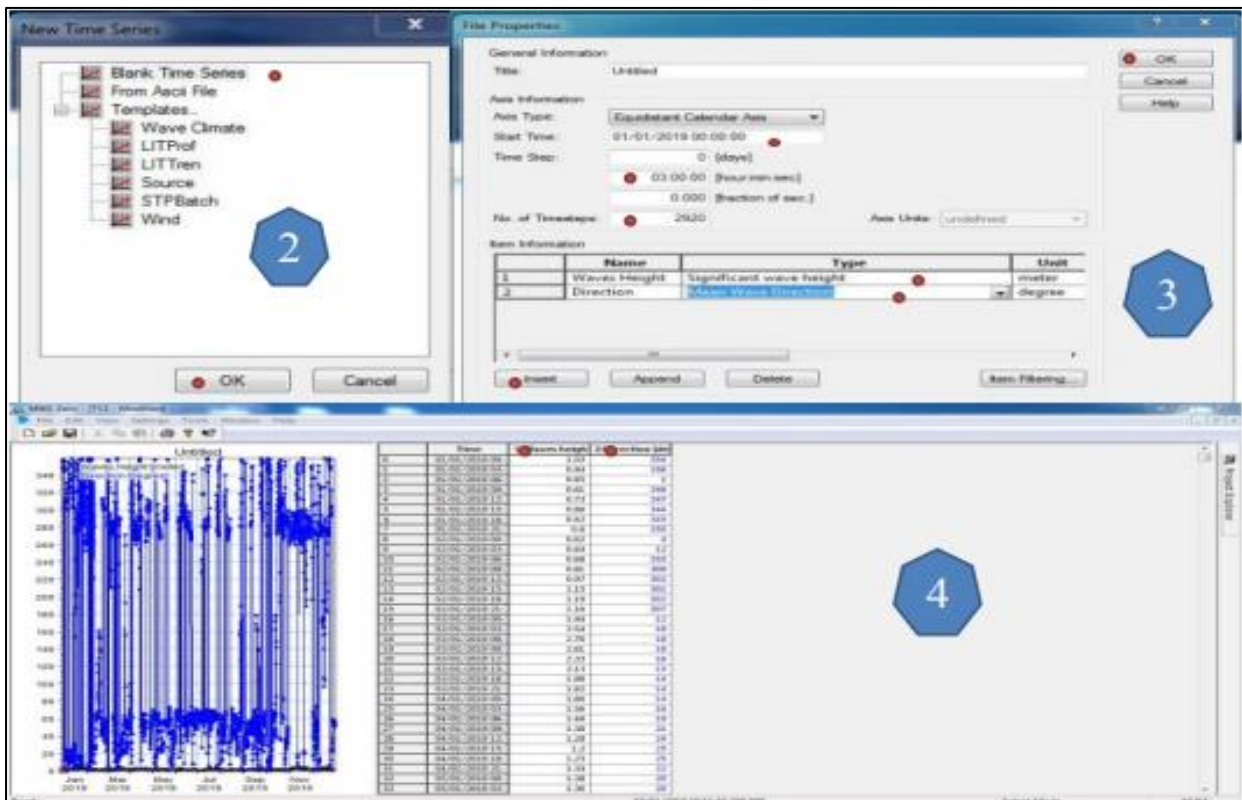


Figure 77: Préparation de la série du tems des houles pour une année 2019

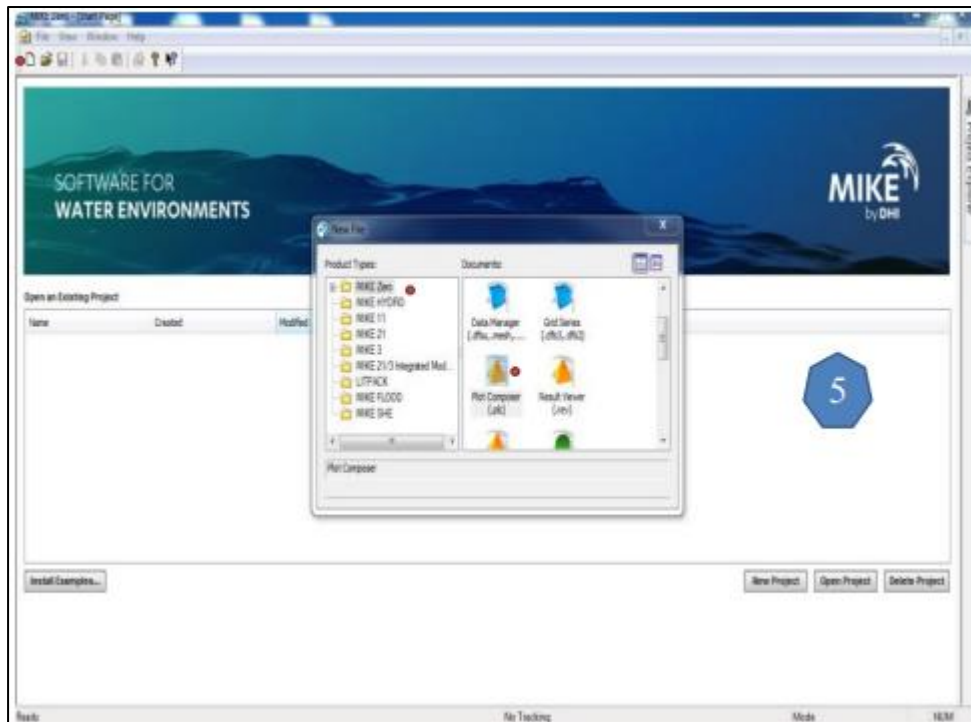


Figure 79: Choisir l'outil Plot Composer (.plc) pour dessiner la rose des houles.

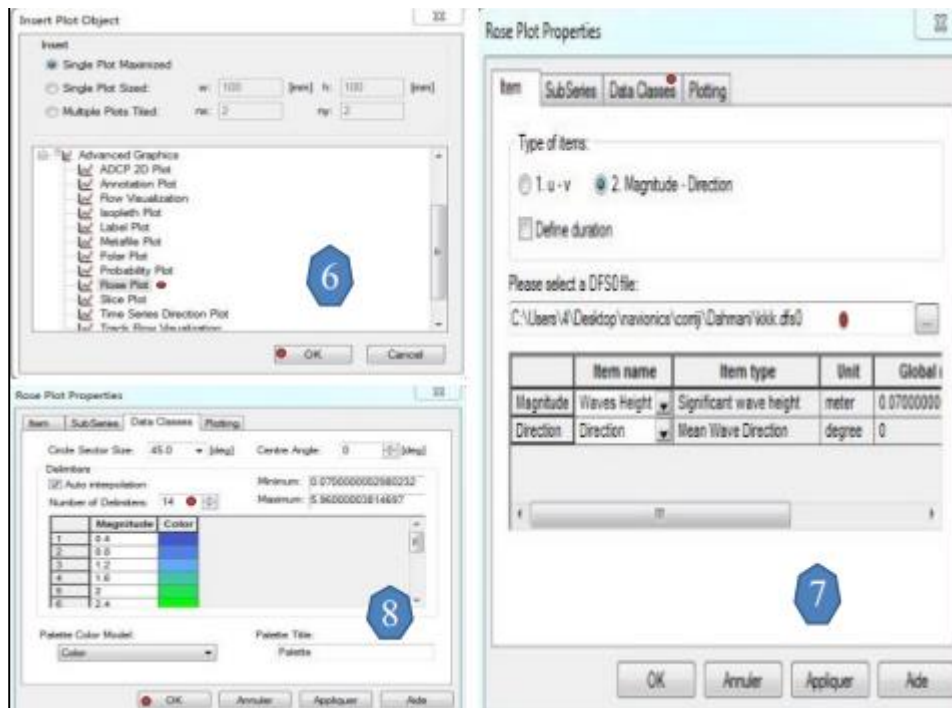


Figure 78: Création de la rose des houles.





