

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

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

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

Option : Gestion et Protection du Littoral

Thème :

**Impact des événements météo-océaniques
extrêmes sur l'évolution spatiotemporelle des
côtes sableuses de la baie de Bou Ismail**

Présenté par :

EL HOUARI Nour Elhouda

HACHICHI Hadjer

Soutenu le 13 / 07 /2023 devant le jury :

Mme FEZZA N	Présidene	Professeur	ENSSMAL
Mr MEZOUAR K	Promoteur	Professeur	ENSSMAL
SALEM CHERIF Y	Co-promoteur	Maitre-assistante B	ENSSMAL
Mr DAHMANI A	Examineur	Maitre-assistant B	ENSSMAL
Mr OUIZ	Examineur	Directeur	MEDITRAM

Remerciement

HACHICHI Hadjer

Avant de commencer la présentation de ce rapport, je profite de l'occasion pour remercier du fond du cœur toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Mr K. Mezouar professeur encadrant pour son soutien et son aide, qui grâce à lui je suis arrivée à ce résultat.

Mes remerciements vont également à Mme Y. Salem Cherif notre Co-promotrice qui nous a donné de son temps et nous a encouragé.

Je suis également redevable à I. Benallou qui malgré que ce soit qu'une connaissance, était là pour nous et nous a beaucoup aidée.

Sans oublier, un grand merci à mes camarades et amis, H. Lyzidi, N. Saadoun

Un merci spécial va à ma famille pour leur amour inconditionnel et leur soutien indéfectible. Sans leur encouragement constant je n'en serai pas arrivée jusqu'à là.

EL HOUARI NOUR ELHOUDA

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon promoteur Monsieur « **MEZOUAR Khoudir** », Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé, son entière disponibilité, ses critiques constructives et ses conseils et son appui scientifique inestimable. J'adresse mes sincères remerciements vont aussi à ma Co-promoteur Madame « **SALEM CHERIF Yousra** » pour sa patience, son soutien constant et ses encouragements le long de ce mémoire.

J'adresse aussi mes chaleureux remerciements à : A notre collègue **LYZIDI.H SADOUN . N, BENALLOU.I**, pour son aide et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Je remercie mes très chers parents et ma grand-mère, qui ont toujours été là pour moi. Je remercie mes sœurs et mon frère pour leurs encouragements et leur soutien inconditionnel.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction	1
Chapitre I : Généralités	4
I.1 Le système littoral :	5
I.2 Morpho dynamique côtière :	5
I.3 Hydrodynamique littoral :	6
I.4 Les agents de la dynamique côtière :	8
I.4.1 La houle :	8
I.4.2 Le vent :	9
I.4.3 Les courants :	9
I.4.4 La marée :	10
I.5 Changement climatique :	10
Les impacts potentiels du changement climatique sur les aléas côtiers	11
I.6 Les variations de niveau de la mer :	11
I.7 Submersion marine :	12
CHAPITRE II : Etat de connaissance de la zone de Bou Ismail.....	14
II.1 Géomorphologie et sédimentologie.....	15
II.1.1 Les plages :	16
II.1.2 Les dunes :	16
II.2 Etude géologique :	17
II.3 Réseau hydrographique :	18
II.4 Climatologie :	19
II.4.1 Température :	19
II.4.2 Précipitations :	20
II.4.3 L'indice d'Emberger :	21
II.4.4 Les vents :	22
II.4.5 Les houles :	26
II.5 La pression anthropique dans la baie de Bou Ismail :	29

II.6	Infrastructures Portuaires :	29
➤	Port d'El djamila :	29
➤	Port de Sidi fredj :	30
➤	Port de Bouharoun :	30
➤	Port de Khemisti :	30
➤	Port de Tipaza :	30
CHAPITRE III : Analyse des évènements extrêmes.....		31
III.1	Principe de la théorie des extrêmes.....	32
III.1.1	Loi des valeurs extrêmes généralisée (GEV)	32
III.2	Méthodes des valeurs extrêmes	33
III.2.1	Méthode block Maxima	34
III.2.2	La méthode POT	40
III.3	Comparaison entre les méthodes POT et Blocs Maximas (GEV distribution).....	44
III.4	Elévation du niveau de la mer liée au changement climatique :.....	44
Chapitre IV : Modélisation de la dynamique côtière du littoral de la baie de Bou Ismail		46
IV.1	Modélisation numérique :	47
IV.2	Présentation du modèle utilisé :	47
IV.2.1	MIKE 21 SW :.....	47
IV.2.2	MIKE 21 HD :.....	50
IV.2.3	Modèle de transport de sable MIKE21 ST.....	52
IV.3	Création de la bathymétrie sous maillage imbriqué :.....	53
IV.4	Scénarios de simulation :	56
IV.5	Résultats des simulations	58
IV.5.1	Propagation des houles :.....	58
IV.5.2	Champs des courants HD	59
IV.5.3	Transport sédimentaire ST:	59
Chapitre V : Evolution spatio-temporelle du trait de côte de la baie de Bou-Ismaïl		70
V.1	Méthodologie.....	71
V.2	Aperçus général des logiciels utilisés :.....	72
V.2.1	ArcGis :	72
➤	ArcCatalog :	73
➤	ArcMap :	73
➤	ArcToolbox	73
V.2.2	Le DSAS (Digital Shoreline Analysis System) :	73
V.2.3	Google earth pro :.....	74

V.3	Analyse diachronique de la cinématique de la ligne de rivage.....	74
	La cinématique du trait de côte :	74
V.3.1	Evolution du rivage entre 2007 et 2012	75
V.3.2	Evolution du rivage entre 2012 et 2017	78
V.3.3	Evolution du rivage entre 2017 et 2022	80
V.3.4	Evolution du rivage entre 2007 et 2022	81
V.3.5	L'évolution provisionnelle du trait de côte 2022-2044.....	84
Chapitre VI :La Submersion marine		87
VI.1	La submersion marine.....	88
VI.2	Méthodologie de simulation de submersion marine :	90
VI.2.1	2.1. Scénarios de niveaux d'eau extrêmes :	91
	Détermination Hauteur des houles de tempêtes responsables des inondations ;.....	91
VI.2.2	Scénarios d'inondations	92
VI.3	Les zones à risque d'inondation :.....	93
VI.4	Interprétation des résultats	96
➤	Submersion à 2 m.....	96
➤	Submersion à 3 m.....	96
➤	Submersion 4 m.....	96
➤	Submersion à 5 m.....	99
➤	Submersion à 6 m.....	99
Conclusion		100
Bibliographie		103
Annexe		

Liste des figures

<i>Figure 1 :Composition d'un système morpho dynamique côtier (Stépanian, 2002).</i>	6
<i>Figure 2: Processus hydrodynamiques dans la zone côtière (STEPANIAN, 2002).</i>	7
<i>Figure 3 : Schéma général d'une plage sableuse</i>	8
<i>Figure 4 : Types d'ondes de surface, montrant la relation entre les fréquences, la cause de leur génération et la quantité d'énergie de chaque type (DENAMIEL, 2006).</i>	9
<i>Figure 5: Niveau eustatique depuis 1993, données satellite NASA, et tendance linéarisée.</i> 12	
<i>Figure 6: Situation géographique de la zone d'étude (Hachichi H., Elhouari H., 2023).</i> ... 15	
<i>Figure 7:Carte morpho-géologique du bassin de la Mitidja et ses environs (données topographiques SRTM-3 et carte géologique d'Algérie au 1/500'000).</i>	18
<i>Figure 9: Histogramme de température moyenne 2021(waveclimate2021)</i>	20
<i>Figure 10: Histogramme des précipitations mensuelles</i>	21
<i>Figure 11:Le diagramme ombro-thermique(1992-2021).</i>	22
<i>Figure 12:Roses des vents annuelle et saisonnières enregistrées de la période 1992 – 2021</i>	24
<i>Figure 13:Roses des vents mensuels enregistrées de la période 1992 – 2021</i>	25
<i>Figure 14:Roses des houles annuelle et saisonnières enregistrées de la période 1992 – 2021</i>	27
<i>Figure 15:Roses des houles mensuelles enregistrées de la période 1992 – 2021</i>	28
<i>Figure 16: image satellitaires entre 1985 et 2023 (Google Earth Pro)</i>	29
<i>Figure 17: représentation des distributions possible de la méthode GEV (Kh. Tilbi, 2018)</i> 33	
<i>Figure 18:Schéma représentatif des méthodes : blocks maxima(a) et POT(b) (Bhattacharyya, M., Ritolia, G., 2008).</i>	34
<i>Figure 19: détermination de l'échantillon des maxima annuels des hauteurs de houle entre 1992 et 2021.</i>	35
<i>Figure 20: Estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour l'omnidirectionnel.</i>	36
<i>Figure 21: Estimation des événements extrêmes via la distribution de Weibull pour l'omnidirectionnel.</i>	36

<i>Figure 22: Estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour chaque direction.</i>	<i>37</i>
<i>Figure 23: Estimation des événements extrêmes via la distribution de Weibul pour chaque direction</i>	<i>38</i>
<i>Figure 24: Moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelle de l'enregistrement.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 25: Représentation de méthode POT sur les hauteurs de la houle de 1992-2021</i>	<i>41</i>
<i>Figure 26: Estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour l'omnidirectionnel</i>	<i>41</i>
<i>Figure 27: Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour chaque direction.</i>	<i>43</i>
<i>Figure 28: Comparaison des résultats obtenu avec les deux méthode POT et BM.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure 29: présente une évaluation de la fourchette probable des projections concernant RCP 2.6 et RCP 8.5 jusqu'à 2100 (Bamber et al, 2019)</i>	<i>45</i>
<i>Figure 30: Organigramme de l'étude bathymétrique</i>	<i>54</i>
<i>Figure 31: Emprise du maillage</i>	<i>54</i>
<i>Figure 32: Carte bathymétrique de la grande baie de Bou Ismail.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure 33: Le champ de vague de direction Nord Nord-Ouest de la période de 2ans</i>	<i>61</i>
<i>Figure 34: Le champ de courant de direction Nord Nord-Ouest de la période de 2ans</i>	<i>62</i>
<i>Figure 35: Transport sédimentaire engendré par les houles de direction Nord Nord-Ouest de la période de 2ans</i>	<i>63</i>
<i>Figure 36: Le champ de vague de direction Nord Nord-Est de la période de 5ans.....</i>	<i>64</i>
<i>Figure 37: Le champ du courant engendré par les houles de direction Nord Nord-Est de la période de 5ans.</i>	<i>65</i>
<i>Figure 38: Transport sédimentaire engendré par les houles de direction Nord Nord-Est de la période de 5ans.</i>	<i>66</i>
<i>Figure 39: Le champ de vague de direction Ouest de la période de 10ans.....</i>	<i>67</i>
<i>Figure 40: Le champ du courant engendré par les houles de direction Ouest de la période de 10 ans.</i>	<i>68</i>
<i>Figure 41: Transport sédimentaire engendré par les houles de direction Ouest de la période de 10 ans.</i>	<i>69</i>

<i>Figure 42:Étapes de la méthodologie de suivi du trait de côte. (OTMANI et al., 2019, Modifiée par ELHOUARI, HACHICHI, 2023).</i>	72
<i>Figure 43:Transect généré DSAS (USGS,2018).</i>	74
<i>Figure 44:Évolution spatiotemporelle du trait de côte de la baie de Bou Ismail (2017) : carte de répartition spatiale (haut) et histogramme du taux d'évolution par transect (bas)</i>	77
<i>Figure 45:Évolution spatiotemporelle du trait de côte de la baie de Bou Ismail (2012-2017) : carte de répartition spatiale (haut) et histogramme du taux d'évolution par transect (bas)</i>	79
<i>Figure 46:Évolution spatiotemporelle du trait de côte de la baie de Bou Ismail (2017-2022): carte de répartition spatiale (haut) et histogramme du taux d'évolution par transect (bas)</i>	81
<i>Figure 47:Évolution spatiotemporelle du trait de côte de la baie de Bou Ismail (2007-2022) : carte de répartition spatiale (haut) et histogramme du taux d'évolution par transect (bas)</i>	83
<i>Figure 48: Carte d'évolution du trait de côte entre 2022-2044 de toute la baie de Bou Ismail</i>	84
<i>Figure 49:Carte d'évolution du trait de côte entre 2022-2044 des différentes sections de la baie de Bou Is</i>	85
<i>Figure 50:Typologie des submersions marines (franchissement, débordement, rupture d'ouvrage) (d'après OIEau, 2018).</i>	89
<i>Figure 51:Typologie des submersions marines (franchissement, débordement, rupture d'ouvrage) (Haute-Corse, Services Etat, 2022).</i>	89
<i>Figure 52:Processus physiques en action lors d'une tempête : agitation et surélévation du plan d'eau. (BRGM, 2012).</i>	90
<i>Figure 53:La démarche adoptée pour la cartographie des zones à risque de Submersion marin.</i>	91
<i>Figure 54:Le modèle numérique du terrain (MNT) de la grande baie de Bou Ismail.</i>	93
<i>Figure 55:Carte d'occupation du sol de la grande baie de Bou Ismail .</i>	94
<i>Figure 56:Carte d'occupation du sol de la grande baie de Bou Ismail .</i>	95
<i>Figure 57:Le carte de submersion marie</i>	97
<i>Figure 58:Les cartes de submersion marine</i>	98
<i>Figure 59:Superficies des terres inondées par les différents niveaux d'élévation.</i>	99

Liste des tableaux

<i>Tableau 1: Caractéristique des plages de la baie de Bou Ismail (CNL Tipaza ,2022)</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 2: Les réseaux hydrographiques de la baie de Bou Imail.....</i>	<i>19</i>
<i>Tableau 3:Distribution des températures moyennes mensuelles pour la période entre 1992-2021.</i>	<i>20</i>
<i>Tableau 4:La distribution des moyennes mensuelles des précipitations (1992-2021).....</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 5:L'indice pluviométrique de l'Emberger.....</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 6: Tableau résumant des résultats des hauteurs de houles prédites par la distribution de Gumbel pour la méthode des blocks maxima (BM).</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 7:Tableau résumant l'ensemble des résultats obtenu par la méthode des blocks maxima selon la distribution de Weibull.</i>	<i>40</i>
<i>Tableau 8:les résultats obtenu selon la distribution de Gumbel pour la méthode POT.....</i>	<i>42</i>
<i>Tableau 9:des inputs des simulations pour l'ensemble la période de retour 2ans</i>	<i>57</i>
<i>Tableau 10:des inputs des simulations pour l'ensemble la période de retour 5 ans.</i>	<i>57</i>
<i>Tableau 11:des inputs des simulations pour l'ensemble la période de retour 10 ans.</i>	<i>57</i>
<i>Tableau 12:Evolution du trait de côte de la baie de Bou Ismail entre 2007 et 2012.</i>	<i>76</i>
<i>Tableau 13:Evolution du trait de côte de la baie de Bou Ismail entre 2012 et 2017</i>	<i>78</i>
<i>Tableau 14:Evolution du trait de côte de la baie de Bou Ismail entre 2017 et 2022.</i>	<i>80</i>
<i>Tableau 15:Évolution du trait de côte de la baie de Bou Ismail entre 2007 et 2022.</i>	<i>83</i>
<i>Tableau 16:les résultats des houles extrêmes au large.</i>	<i>92</i>
<i>Tableau 17:les résultats des houles extrêmes à la côte.....</i>	<i>92</i>
<i>Tableau 18: Niveaux d'inondations extrêmes.....</i>	<i>92</i>

Liste des acronymes et abréviations

ZC : Zone Côtière

DEM: Digital Elevation Model.

DGPS: Differential Global Positioning Système.

DSAS: Digital Shoreline Analysis System.

DTM: Digital Terrain Model.

NSRDB: National Solar Radiation Database.

POT: Peak-Over-Threshold.

DD : Développement Durable

GIEC : Groupe Intergouvernemental d'Evaluation du Climat

GIZC : Groupe Intergouvernemental Des zones cotières

LRR: Linear Regression Rate

NSM: Net Shoreline Movement SIG

EPR: End point rate

HD: Hydrodynamic

ST: Sediment Transport

SW: Spectral Wave

SIG : System d'Information Géographique

UTM : Universal Transverse Mercator

WGS : World Géodésique System

MNT : Modèles Numériques de Terrain

Introduction générale

La zone littorale est de plus en plus touchée par des phénomènes naturels tel que les érosions, inondations, submersions. Elle est soumise à plusieurs forçages hydrodynamique par les courants, vagues, tempêtes, changements climatiques..., et par les activités anthropiques tel que les aménagements (les stations balnéaires, d'installations touristiques les ouvrages de protection côtier, barrages ...).

Les variations des côtes sont principalement dus à l'érosion et à la sédimentation. Ces phénomènes sont influencés en premier lieu par l'action des vagues, des marées et des courants qu'ils génèrent. De plus, les espaces littoraux subissent des transformations en raison de l'influence d'agents morphogéniques externes tels que le vent, les eaux de ruissellement et d'infiltration, ainsi que le gel. L'efficacité de ces agents peut être renforcée lorsqu'ils interagissent avec la zone de transition entre la terre et la mer. Cette interface est également le théâtre de processus physiques et physicochimiques importants, qui ne doivent pas être négligés, ainsi que d'actions biologiques de destruction et de construction.

En fin, il ne faut pas oublier que l'homme, en s'appuyant sur des moyens techniques de plus en plus performants, est devenu, volontairement mais aussi involontairement, un agent essentiel de l'évolution spatiotemporelle des côtes sableuses de beaucoup de rivages marins. Le littoral Algérien est soumis à un recul important dans environ 50% des côtes dont plus de 75% sont des plages sableuses (**BOUTIBA,2006**). Dans un contexte de changements climatiques, on assiste actuellement à une hausse du niveau marin relatif (**GIEC, 2001**) de 1 à 2 mm/an depuis un siècle (**PIRAZZOLI, 1989, WOODWORTH et al., 1999, MORNER, 2004**) et de 3,1 mm/an depuis la dernière décennie (**GIEC, 2007**) dont les conséquences sont l'accélération de l'érosion des plages et l'augmentation de la fréquence de submersion côtière.

Actuellement, l'érosion côtière est une grave menace pour de nombreux sites côtiers Algériens en particulier le long de littoral de la baie de Bou Ismail, ce dernier constitue, non seulement le siège d'échanges de sédiment qui se produisent latéralement et transversalement sous l'action des houles, courants, vents ..., mais aussi un territoire attractif connu un fort potentiel touristique avec un fort étalement urbain qui sont soulignés la perte de caractéristique naturelle et la mobilité de rivage. A travers ce modeste travail on va dresser un bilan général détaillé sur la vulnérabilité du littoral de le grande baie de Bou Ismail, il vis-à-vis aux changements climatiques ainsi aux activités anthropiques et aussi comment peut-on s'adapter à une hausse de niveau marin. Pour cela on adaptera une démarche simplifiée et concrète. Elle s'articule autour de ces cinq chapitres :

Dans le Chapitre I on a abordé le concept du system littoral, ces composantes et sa dynamique en signalant la fragilité de cette portion côtière face aux aléas naturelles et aux actions anthropiques.

Dans le Chapitre II on a décrit les aspects généraux de notre zone ; la topographie, la géologie, la géomorphologie, l'hydrologie et les conditions naturelles y compris les vents, les courants, et les houles qui conditionnent directement la dynamique sédimentaire tout le long de la côte

Chapitre III est consacré à la présentation des résultats des études bathymétrique et hydrodynamique d'une part, et étude du transport sédimentaire et la modélisation de transit littoral d'une autre part dans une approche de modélisation numérique à l'aide des logiciels Arc Gis et Mike21.

Chapitre IV porte à l'étude des variations historiques de la position de la ligne de rivage, dans le but de parvenir à l'identification et la description des taux nets d'évolution le long de cette côte, en plus l'établissement d'un scénario prévisionnel à l'horizon 2044.

Chapitre VII : destiné à l'étude de la submersion marine et ses impacts sur la zone côtière, en se basant sur des scénarios d'élévation du niveau de la mer, avec une approche pratique, en élaborant des cartes d'aléa pour les différentes périodes de retour suivant différentes directions. Pour arriver par la suite à l'estimation et valorisation des terres perdues

Chapitre I : Généralités

I.1 Le système littoral :

La côte est le lieu de rencontre entre le continent, l'océan et l'atmosphère. Ces trois environnements, contrôlés par de multiples processus physiques, interagissent au niveau du littoral (**CARTER, 1988 ; BOAK et TURNER, 2005**). Les processus évoluent à différentes échelles spatio-temporelles jusqu'aux étroites interactions qui existent entre le fluide et le sédiment (**VAN Rijn, 1986**).

Un système littoral est un ensemble d'éléments en interaction dans le temps et dans l'espace, ce qui rend la tâche de comprendre leur comportement très complexe. Pour décrire ce type de système, il est possible de combiner des approches analytiques classiques avec une modélisation numérique (2D et 3D) (**MEZOUAR et al., 2009**).

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

La zone côtière algérienne est vulnérable suite à des risques naturels tels que les inondations, les séismes, les tsunamis et la sécheresse. Nous avons également deux grands phénomènes qui attaquent de plus en plus le littoral : l'érosion et la submersion marine qui prennent actuellement des proportions très alarmantes et inquiétantes à la fois (**GIEC, 2007**).

Le système côtier algérois subit de nombreuses pressions liées principalement au degré d'anthropisation, l'activité touristique incontrôlée et l'érosion côtière. Elles sont perçues comme des contraintes fortes, induisant d'importants phénomènes de dégradation (**PINOT, 1998**).

I.2 Morpho dynamique côtière :

Un système morpo dynamique est constitué d'un élément morphologique qui réagit en fonction des processus hydrodynamiques. (**HZAMI,2015**). Cette réponse est une tentative de mise à l'équilibre de la morphologie par rapport aux nouvelles conditions de forçages. Dans le cas des systèmes littoraux, la topographie des fonds côtiers est en constant ajustement avec la dynamique du milieu fluide. Cet ajustement morphologique est le résultat d'un gradient de transport sédimentaire (figure 1).

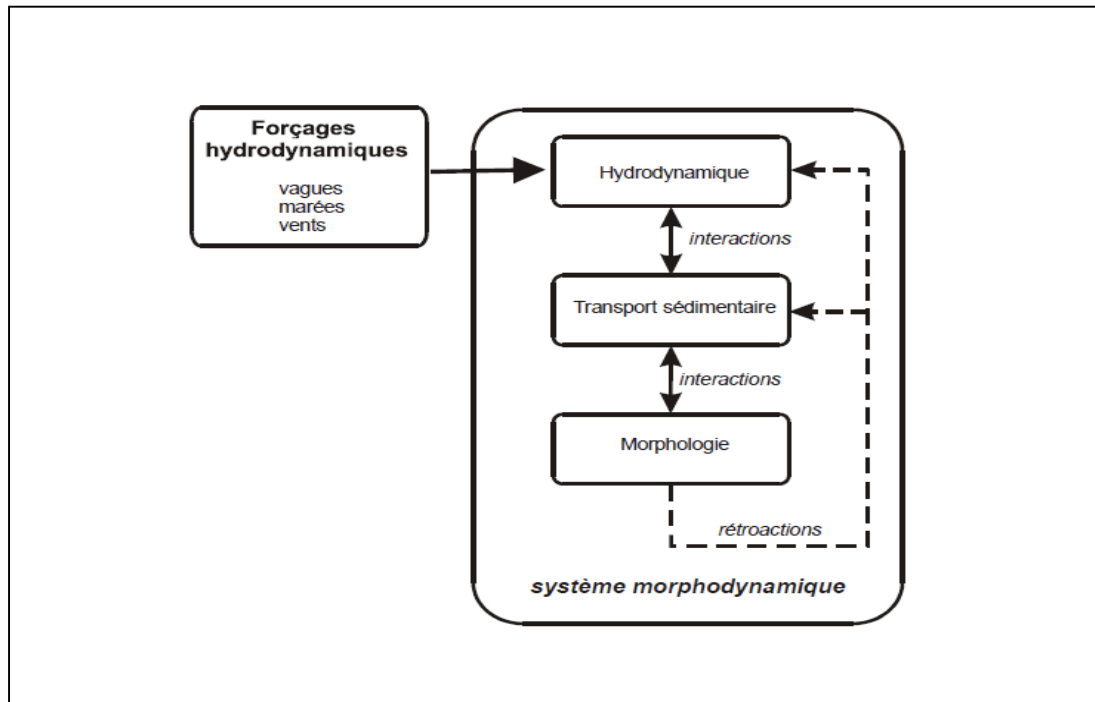


Figure 1 : Composition d'un système morpho dynamique côtier (STEPANIAN, 2002).

En effet, la dynamique sédimentaire en zone littorale est contrôlée par des processus physiques, climatiques et anthropiques intervenant à des échelles temporelles et spatiales diverses.

Une modification des forçages génère une modification de la dynamique des fluides, du transport sédimentaire et l'interaction de ces processus avec la morphologie initiale est à l'origine de la construction d'une nouvelle morphologie. Des phénomènes de rétroactions sur la dynamique des fluides et le transport peuvent être soit positifs ou négatifs (COWELL et THOM, 1994) Un processus d'autocontrôle renforce la tendance d'évolution du système en augmentant le déséquilibre. Alors qu'un processus d'autorégulation inverse la tendance et amène le système vers l'équilibre.

I.3 Hydrodynamique littoral :

Les zones littorales sont des environnements dynamiques où se produisent de nombreuses interactions entre des différents agents de circulations hydrodynamiques. La majorité de ces agents sont des phénomènes oscillatoires qui se manifestent à différentes échelles spatio-temporelles (DIDIER RIHOUEY, 2004). Une zonation du domaine côtier et de la plage s'effectue en fonction des processus hydrodynamique liés aux transformations des vagues lors de leur propagation :

- Zone du large "Offshore zone" désigne la zone qui s'étend du large jusqu'à la zone de rupture où le premier déferlement a lieu.
- Zone de déferlement "Surf zone" désigne la zone des brisants qui s'étend du début de la zone de rupture jusqu'au haut de plage mouillé par la mer.

- Zone de levée "Shoaling zone" désigne la zone de remontée des fonds qui engendre une cambrure de plus en plus forte de la houle, jusqu'à ce qu'il y ait rupture de la vague et déferlement.
- Zone de Swash "Swash zone" désigne la partie de la plage qui est alternativement recouverte par l'air ou par l'eau au rythme des vagues qui viennent la lécher. (DAHMANI,2022)

La zone littorale est une zone complexe où se produisent de nombreuses interactions entre les agents dynamiques responsables des circulations hydrodynamiques. La Figure X présente une vision schématique de la nature et de la répartition des divers processus hydrodynamiques dans la zone côtière (STEPANIAN, 2002).

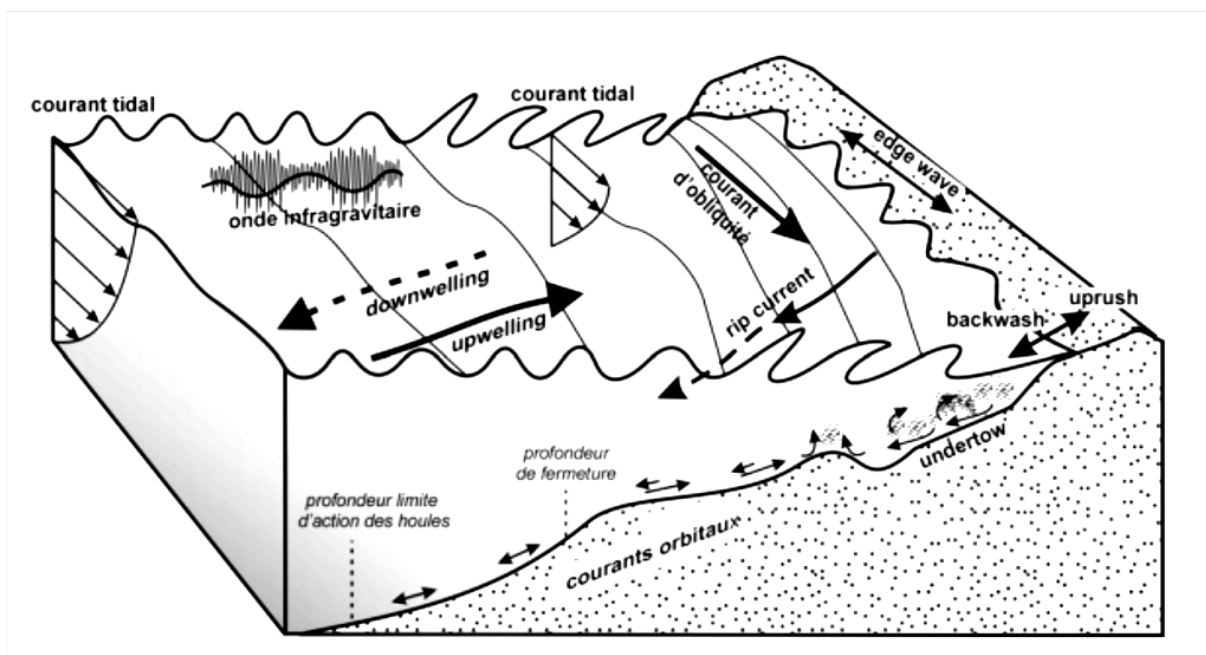


Figure 2: Processus hydrodynamiques dans la zone côtière (STEPANIAN, 2002).

La morpho dynamique de la plage est due aux contraintes appliquées par le fluide sur le sédiment. Ces contraintes qui peuvent être visqueuses ou turbulentes résultent de différents forçages hydrodynamiques tels que la houle, les courants, le niveau d'eau ou encore la marée. Sur les plages, la morpho dynamique est fortement influencée par la dissipation de l'énergie des vagues incidentes dans la zone de déferlement. A ces processus s'ajoute la dynamique sédimentaire complexe liée au niveau d'érodabilité (dépendant du type de sédiment, taille, forme etc.), aux différents modes de transports et aux interactions au sein du sédiment. (KLEVRI, 2014)

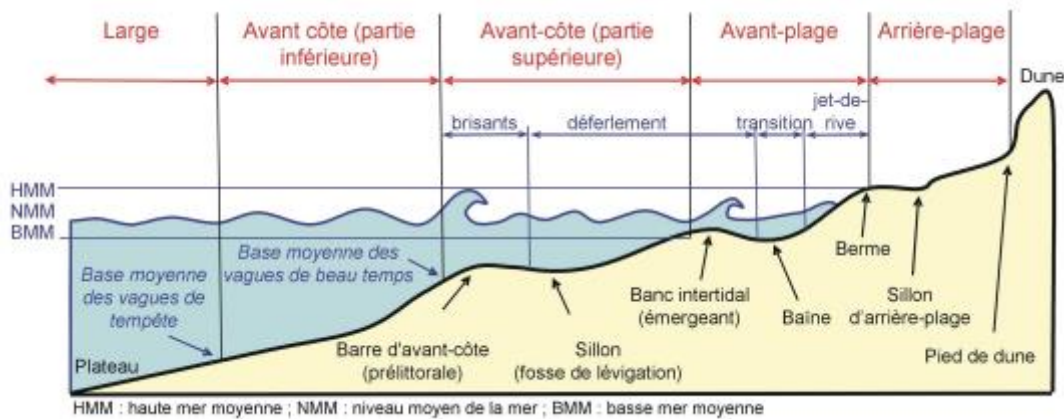


Figure 3 : Schéma général d'une plage sableuse

Vers la mer, la plage subaérienne (l'estran, espace intertidale ou foreshore) soumise à l'action des vagues pendant les conditions non-tempêtuelles. Subdivisée en trois parties :

- Haut de plage : sous forme de bourrelets, qui sont dus à l'accumulation des matériaux par les mers les plus hautes.
- Moyenne plage : marquée par une ligne de réflexion à partir de laquelle la pente diminue brusquement.
- Bas de plage : submergé à chaque marée. Sa partie avale montre parfois une alternance de bancs surbaissés et de gouttières ou bâches.
- l'avant-plage (nearshore) constamment immergée et accidentée de barres et de rides, qui sont parallèles et parfois obliques au trait de côte et se forment quand la pente est douce et les sédiments abondants, et de sillons pré-littoraux. (BENALLOU, 2020)

I.4 Les agents de la dynamique côtière :

Le système littoral est constamment exposé à de nombreux facteurs hydrodynamiques qui modifient son fonctionnement à travers un large spectre de forçage à l'échelle géologique (tectonique et eustatique) et à l'échelle temporaire. Nous citons les forces naturelles les plus influentes ci-dessous :

I.4.1 La houle :

La houle est un mouvement ondulatoire de la surface de la mer qui est formé par un champ de vent éloigné de la zone d'observation nommé zone de Fetch. La surface de la mer présente généralement une suite indéfinie d'ondulations parallèles presque identiques qui se propagent de façon sensiblement uniforme vers le rivage, (BONNEFILLE, 2010).

Les houles sont caractérisées par : leur période T qui s'écoule entre le passage en un point donné de deux crêtes successives (elle est généralement inférieure à 30 secondes pour les grands océans) et leur longueur d'onde (L). La houle commence à ressentir le fond à une profondeur $d = L/2$ (L : la longueur d'onde de la houle). (HZAMI,2015).

Comprendre et prédire les caractéristiques des vagues lors de leur déplacement vers la côte est un besoin important des activités marines, notamment de protection côtière, afin de dimensionner des ouvrages tels que les brise-lames. Différentes théories de l'inflation ont été développées, utilisant des fonctions mathématiques pour expliquer et calculer l'inflation régulière. Il est important de préciser que les surfaces marines sont plus complexes et aléatoires en raison de leurs caractéristiques non linéaires. Cependant, différents modèles mathématiques de la houle ont été établis dès le XIX siècle par **AIRY (1845)**, et **MICHE (1944)** (**SAFARI, M. IMAM. 2006**).

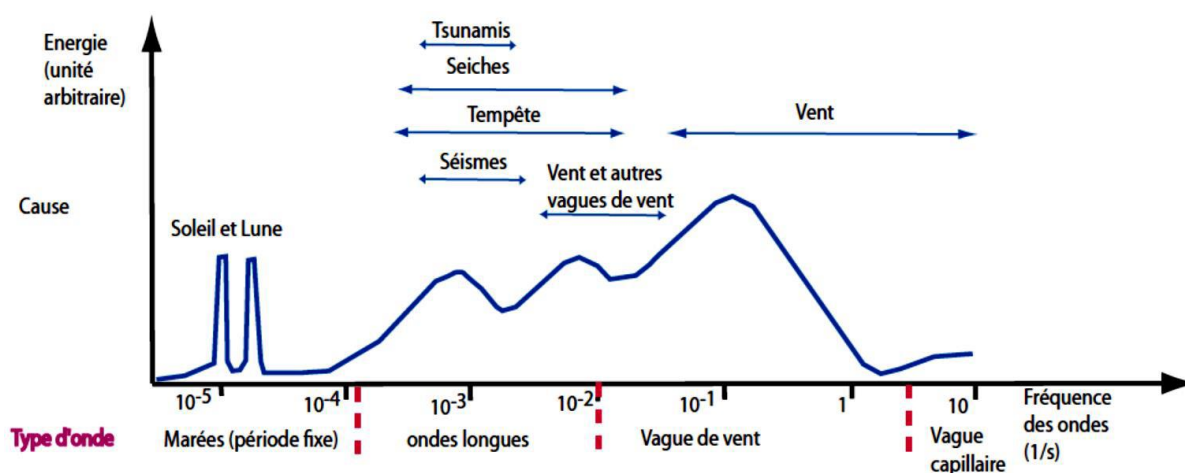


Figure 4 : Types d'ondes de surface, montrant la relation entre les fréquences, la cause de leur génération et la quantité d'énergie de chaque type (DENAMIEL, 2006).

I.4.2 Le vent :

Le vent est un élément important à prendre en considération dans toute étude relative à la zone côtière. En effet, les vents sont générateurs de vagues et de courants superficiels et leurs impacts augmentent avec leurs vitesses. Les vents jouent un rôle important dans l'évolution géomorphologique des milieux littoraux, surtout dans les côtes basses d'accumulation des régions à climat sec, (**BOUTIBA, 1996**). Ce facteur joue un rôle essentiel dans les transferts sédimentaires directement sur la partie aérienne et par les différents agents hydrodynamiques générés par ce dernier sur la partie immergée.

I.4.3 Les courants :

Par définition, le courant marin est un déplacement d'eau de mer causé par le vent, la force de Coriolis et des variations de températures, de densité et de salinité. Ce courant est caractérisé par sa direction, sa vitesse, son débit et sa température.

I.4.3.1 Les courants généraux

Ce sont des courants qui sont créés par le franchissement des eaux atlantiques du détroit de Gibraltar. Dans les côtes algériennes, ces courants progressent vers l'Est à une vitesse de 0.5 m/s à 1 m/s (**LECLAIRE, 1972**). Ils sont affectés par des tourbillons cycloniques et anticycloniques de 50 km à 200 km de diamètre et qui atteignent 500 à 2000 m de profondeur (**MILLOT, 1985 ; MAILLOT, 1987 ; TAUPIER-LETAGE, 1988**).

I.4.3.2 Les courants côtiers

Des courants qui sont actifs près de la côte, engendrés par la marée et les vagues, ces dernières qui abordent la côte avec une certaine obliquité et créent un courant parallèle au rivage qui prend naissance au niveau de la zone de déferlement qui est le facteur moteur dans le phénomène de la dérive littoral.

Les courants de retour

Opèrent en surface et en profondeur, à partir du lieu de déferlement des vagues, leur vitesse dépend de l'énergie de la houle et de la pente de la plage, ils sont responsables la dispersion d'une partie des sédiments côtiers vers le large.

Frottement sur le fond :

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

I.4.4 La marée :

La marée est un mouvement oscillatoire de niveau de la mer engendré par l'attraction de la lune et du soleil sur les particules fluides des océans (**BOUGIS, 2003**). D'une façon générale, la marée a une amplitude faible sur les côtes algériennes (de l'ordre de 20 cm environ) mais présente d'importants écarts suivant l'époque lunaire. En pleine lune, elle peut atteindre 25 à 30 cm en moyenne, et celle de la nouvelle lune varie de 5 à 15 cm. (**HATTABI et KADDOUR, 2018**). Le rythme fondamental est imposé par la marée astronomique de faible amplitude comme celle existant sur toute la côte Algérienne. Aussi, le niveau d'eau peut changer en fonction d'autres phénomènes tels que la pression atmosphérique, les seiches et le vent, mais le niveau ne dépasse pas 50 cm, (**Le Hir P. et al, 2001**), avec des périodes qui varient généralement entre 12h et 14h, (**BELAIDI et HAMDOUS, 2016**).

I.5 Changement climatique :

Le changement climatique correspond à une modification durable du climat au niveau planétaire due à une augmentation des concentrations de gaz à effet de serre (CO₂ mais aussi méthane par exemple) dans l'atmosphère. Le terme de changement climatique, tel qu'utilisé par le GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Evaluation du climat), désigne tout changement du climat dans le temps, qu'il soit dû à la variabilité naturelle ou provoqué par les activités humaines. (**BENALLOU, 2020**)

De nombreuses études (**FOLLAND et al., 1990**) démontrent que le climat mondial s'est réchauffé au cours des 150 dernières années. La hausse de température n'a pas été constante ; des cycles de réchauffement et de refroidissement se sont succédé à des intervalles de plusieurs

décennies. Néanmoins, la tendance à long terme est au réchauffement planétaire (**GIEC, 2001, 2007**).

- **La fonte des glaces** : la hausse des températures entraîne la fonte des glaces terrestres (calottes polaires et glaciers). Cela constitue un apport d'eau supplémentaire pour l'océan, ce qui fait augmenter son volume et par conséquent son niveau.
- **La dilatation thermique** : plus l'eau est chaude, plus elle occupe un volume important à quantité égale, car les molécules soumises à la chaleur ont tendance à s'agiter et à s'éloigner les unes des autres.

Le changement climatique - par l'augmentation du niveau de la mer et des tempêtes plus fréquentes et plus sévères - **accélère deux phénomènes naturels** :

- **L'érosion marine** : les mouvements de la mer érodent les rivages. Plus l'océan gagne du terrain sur la terre, plus il a de chance d'emporter avec lui du sable (littoral sableux) ou de fragiliser les roches, augmentant le risque d'éboulement (littoral rocheux). Ce phénomène d'érosion entraîne le recul du trait de côte dans de nombreuses régions du monde.
- **La submersion marine** : une inondation temporaire du littoral. Avec l'augmentation du niveau de l'océan, les espaces côtiers risquent d'être inondés plus fréquemment.

Les impacts potentiels du changement climatique sur les aléas côtiers

Au cours du XXI^e siècle, une augmentation des aléas côtiers est prévue en Languedoc-Roussillon :

- L'érosion et le recul du trait de côte devraient s'aggraver à l'avenir à cause du changement climatique. Les principaux facteurs contribuant à cette évolution sont :
 - L'élévation du niveau de la mer ;
 - Les modifications possibles des paramètres des tempêtes ;
 - La diminution des précipitations entraînant une diminution des apports sédimentaires.
- L'impact de l'érosion sera toutefois hétérogène le long du littoral régional. Ceci est dû à la complexité et la multiplicité des facteurs qui interagissent pour contrôler l'évolution de la zone côtière.
- Les aléas de submersion dépendent des variations du niveau de la mer, de la marée et des surcotes. Le climat des vagues et le régime des surcotes restant inchangés, la principale cause d'un changement de cet aléa est associée à l'élévation du niveau moyen des mers.

I.6 Les variations de niveau de la mer :

Le niveau de la mer est la position moyenne de la surface de la mer, constituant un niveau de référence considéré comme stable. D'une façon très simplifiée, c'est la ligne médiane entre une marée basse moyenne et une marée haute moyenne à un endroit côtier particulier, hors influence des vagues. La moyenne s'établit sur une échelle de temps au moins annuelle.

Les variations absolues du niveau marin correspondent à la variation de la distance entre la surface de la mer et une référence fixe : en pratique, l'ellipsoïde de référence déterminé par la géodésie est la plus utilisée. Les variations absolues du NM correspondent à des variations spatiales et temporelles du NM par rapport à cet ellipsoïde. L'eustatisme désigne les changements globaux du niveau absolu de la mer.

Lorsque nous parlons de niveau marin relatif, il s'agit du NM mesuré à partir d'un point de référence dans le soubassement. Il ne tient pas compte de l'épaisseur de sédiment mais comprend la subsidence ajoutée au niveau eustatique. L'accommodation désigne l'espace total disponible pour déposer du sédiment ; la notion d'espace disponible désigne la fraction de cet espace n'ayant pas encore été comblée par du sédiment.

Selon la synthèse des connaissances scientifiques publiée en 2021 par le **GIEC**, le niveau de la mer a augmenté de 0,20 m (intervalle de confiance très probable : 0,15 à 0,25 m) entre 1901 et 2018. Le rythme de hausse de niveau de la mer s'accélère. Selon la synthèse de 2021 du GIEC, la vitesse d'augmentation du niveau de la mer était de 1,3 mm/an (intervalle de confiance très probable : 0,6 à 2,1 mm/an) entre 1901 et 1971, elle a augmenté à 1,9 mm/an (intervalle de confiance très probable : 0,8 à 2,9 mm/an) entre 1971 et 2006, puis à 3,7 mm/an (intervalle de confiance très probable : 3,2 à 4,2 mm/an) entre 2006 et 2018. Fin 2022, un rapport de l'Organisation météorologique mondiale indique que le niveau eustatique a monté d'un centimètre en moins de trois ans, le rythme annuel ayant doublé depuis 1993.

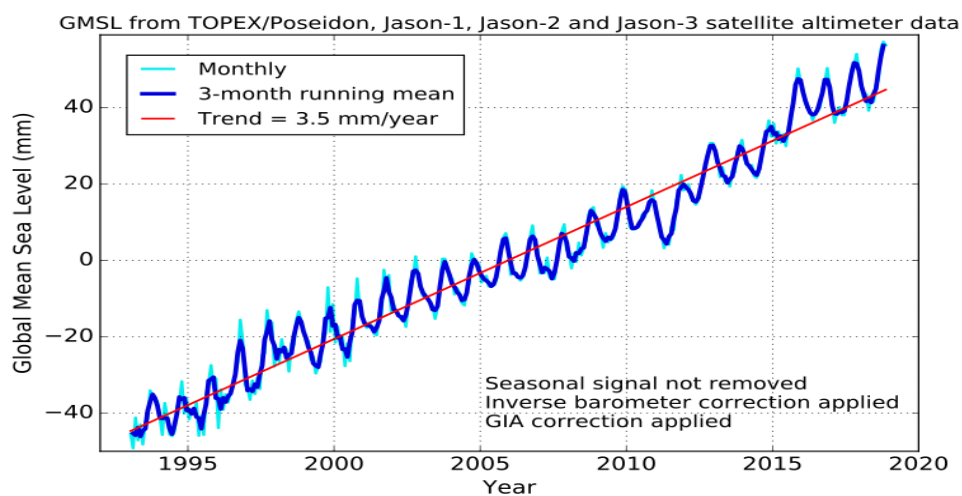


Figure 5: Niveau eustatique depuis 1993, données satellite NASA, et tendance linéarisée.

I.7 Submersion marine :

Les submersions marines sont des inondations temporaires par la mer de la zone côtière lors de conditions météorologiques et océaniques défavorables. Ces phénomènes étant généralement dus à des surélévations du niveau marin, les zones de topographie basses sont par définition les plus sensibles (lagunes, marais, estuaires ...).

Types de submersion :

Lors des tempêtes et en fonction de l'exposition de la côte (caractéristiques géomorphologiques), on peut ainsi observer différents types de submersion provoquée par :

- des franchissements par paquets de mer, correspondant au passage des vagues par-dessus les défenses côtières (naturelles ou artificielles), l'accumulation d'eau résultante peut s'avérer importante selon l'ampleur des franchissements, leur durée et le linéaire concerné ; le franchissement est conditionné par la position du plan d'eau (niveau statique) par rapport à la côte maximale du terrain naturel ou des ouvrages de protection, et par les caractéristiques locales des vagues (hauteurs et périodes) ;
- des débordements, correspondant à une élévation du niveau d'eau statique (ou niveau moyen avec la surcote des vagues) au-dessus de la côte maximale du terrain naturel ou des ouvrages de protection ; il entraîne un déversement direct d'importantes quantités d'eau à terre ; les volumes d'eau mis en jeu (et donc les conséquences du phénomène) dépendent de l'écart entre le niveau d'eau et celui de la côte maximale du terrain naturel ou des ouvrages de protection, de la durée du débordement et de la vitesse de l'écoulement ;

La rupture de structures de protection (ouvrages ou cordons dunaires) est causée par l'action répétée des vagues et/ou la surverse. Les structures de protection peuvent être alors endommagées progressivement ou brutalement, et des brèches ou une défaillance généralisée peuvent se produire, provoquant le passage à un régime particulier .

**Chapitre II : Etat de
connaissance de la zone de
Bou Ismail**

La baie de Bou Ismail est située au Arctique cœur de l'Algérie enveloppant deux Wilayas, Alger (coté est) et Tipaza (côté Ouest), ces deux wilayas sont séparées par l'oued Mazafran. Elle s'étend du Cap Mont Chenoua côté Ouest (wilaya de Tipaza) jusqu'au Ras Acrata coté est (wilaya d'Alger). La crique est orientée Nord Est Sud-Ouest sur une distinction de familier de 50 km entres les coordonnées 2°20'E et 2°55'E.

La partie orientale de la baie de Bou Ismail est caractérisée par la présence d'une autre baie appelé la baie d'El Djamila, cette baie se trouve à environ 20 kilomètres à l'ouest d'Alger, elle se situe entre 2° 50' 30" et 2° 54' 00' Est de Greenwich et entre 36° 45' et 36° 48' Nord de l'équateur. La baie de Bou Ismail est caractérisée par un potentiel agricole et touristique notamment dans sa partie ouest (Tipaza), le tourisme est aussi présent dans la partie Est de la baie avec la présence du complexe touristique de Sidi Fredj et du centre thalassothérapeute, et non loin de ce centre on aperçoit la station océanographique de Sidi Fredj) et au centre de la baie et plus précisément dans la commune de Bou Ismail se trouve le Centre National de la Recherche en Développement de la Pêche et de l'Aquaculture. (HACHICHI H., ELHOUARI H., 2023).

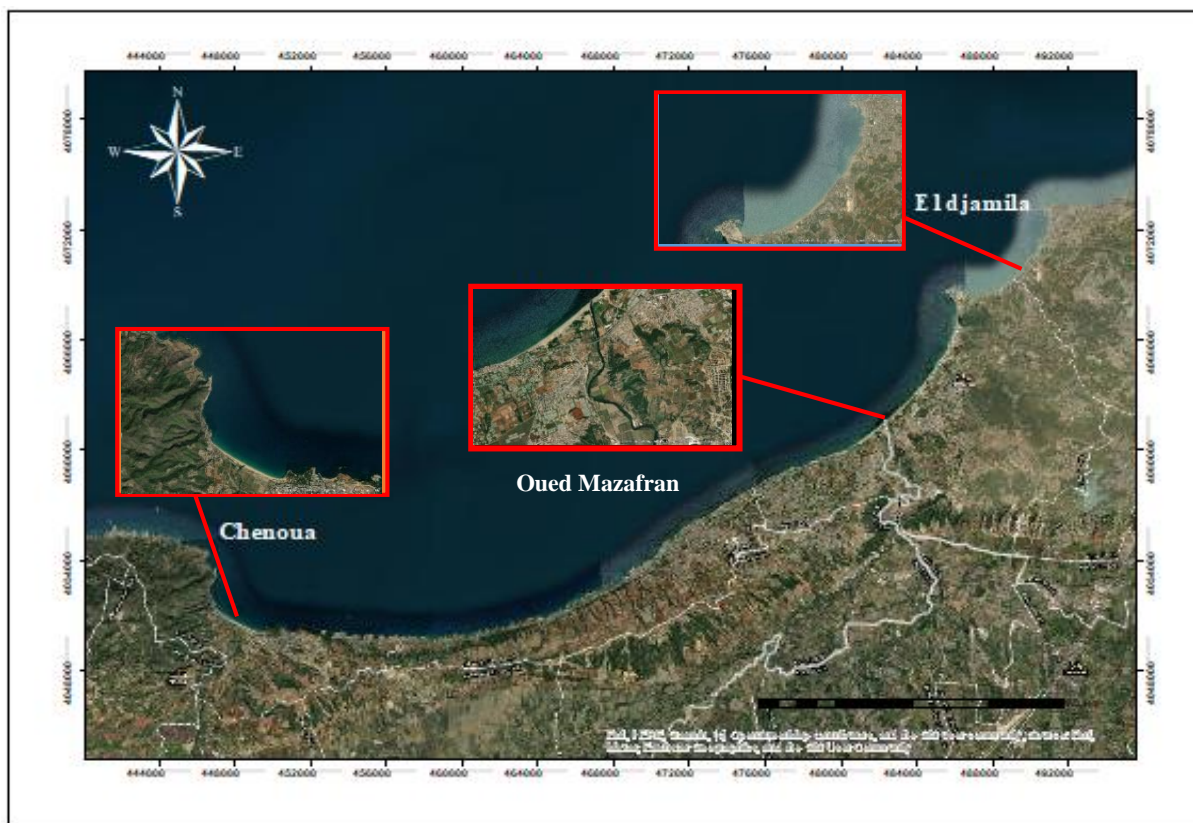


Figure 6: Situation géographique de la zone d'étude (HACHICHI H., ELHOUARI H., 2023).

II.1 Géomorphologie et sédimentologie

La baie de Bou Ismail connaît une diversité géomorphologique. Elle contient des côtes rocheuses comme l'Anse de Kouali située dans la commune d'Ain Tagourait, des falaises au

niveau du Mont Chenoua sise dans la commune de Tipaza et une variété de plages allant de sable fins aux galets. On cite sans être exhaustif la plage colonel Abbas dans la commune de Douaouda et la plage Kheloufi dans la commune de Zeralda. (**GRIMES., 2010**)

Le plateau continental entre Tipaza et Bouharoun est peu différencié, il se prolonge insensiblement vers les fonds de 1000 mètres après une légère rupture de pente vers 120 mètres, en arrivant vers l'embouchure du Mazafran on remarque un plateau continental d'une extension de 11 km, par ailleurs on remarque un glacis qui se développe dans le Nord Est du massif Chenoua (**LECLAIRE., 1972**).

La baie de Bou Ismail est caractérisée par une grande diversité sédimentaire, 9 faciès sont identifiés (gravier, vase, roche etc.), la distribution de ce faciès n'est pas identique on marque une différence entre la partie Est plutôt sableuse par rapport à la partie Ouest plutôt rocheuse (**MOULFI et al, 2012**). Deux types de sédiments arénitiques dans la baie de Bou ismail ont été observés, il s'agit du sable et des graviers côtiers, au large les sable sont plus ou moins argileux et sont très peu différents des vases calcaires qui les entourent (**LECLAIRE., 1972**). Au niveau de la baie de Bou Ismail, les sables et sablons siliceux forment une succession de belles plages à partir de Douaouda jusqu'à l'extrémité est de la baie, il existe aussi des sablons plus mince de Douaouda jusqu'à Tipaza, et des boues argilo-siliceuse vers le large (**LECLAIRE., 1972**).

La baie de Bou Ismail est bordée par deux caps, le Cap Arcata à l'est et le Mont Chenoua à l'Ouest, elle est caractérisée par la présence d'une grande étendue de côte sableuses à l'est à la périphérie d'Oued Mazafran (Communes de Zeralda et Douaouda) ainsi qu'une étendue moins importante l'Ouest (commune de Tipaza). Les côtes rocheuses sont plus présentes dans la commune de Ain Tagourait avec la présence d'anses, où on y trouve, entre autres, ce type de morphologie côtière.

II.1.1 Les plages :

La majorité des plages de la zone sont sableuses, qui ne diffèrent que dans la forme : plages rectilignes, de poche ou de pied de falaise. Ce secteur est caractérisé par l'abondance des plages sableuses ouvertes le long de la baie d'El Djamila jusqu'à Oued Mazafran (Tableau 1), et la présence des plages de poche et de pied de falaise au niveau du linéaire rocheux à l'est. Le Tableau représente un récapitulatif d'une prospection terrain ainsi qu'un traitement basique sous ArcGis de la zone d'étude.

De nombreux platiers rocheux affleurent au niveau de l'estran et se poursuivent sous l'eau jusqu'à des profondeurs de 4 à 5 m sur la plage de Moretti et de Club des Pins. Actuellement, certains affleurements sont recouverts par l'ensablement de la zone adjacente à la jetée Sud du port (**BOUGHERARA, H., 2011**).

Les dunes :

Les dunes littorales de la baie d'El Djamila constituent le prolongement oriental d'un cordon dunaire prenant naissance à l'embouchure de l'Oued Mazafran et qui continue jusqu'à l'Est de l'Oued Béni Messous. Le cordon atteint une largeur maximale sur les plages de Staoueli et Club des Pins. Ces dunes ont une extension et une morphologie très variable en fonction de la direction des vents dominants. En effet, il existe deux bandes littorales parallèles à la côte. L'une borde la haute plage, c'est la zone des dunes mobiles, l'autre se situe vers l'intérieure des

terres, et est caractérisée par une couverture végétale dense ; c'est la zone des dunes fixes. Les systèmes dunaires de la côte Ouest d'Alger sont en voie de dégradation à cause de l'extension excessive du tissu urbain, des constructions incontrôlées, des structures de plage et l'extraction de sable à des fins de construction (AMIS, 2004).

Tableau 1: Caractéristique des plages de la baie de Bou Ismail (CNL Tipaza ,2022)

Nom de plage	Type de plage	Superficie (hectare)	Longueur (m)	Largeur (m)	Granulométrie
Colonel abbés	Intermédiaire	12.46	2245.32	80	Sableuse (sable fin a grossier)
Plage Khaloufi	Intermédiaire	2.46	800.64	40	Sableuse (sable fin a grossier)
Colonel Houes	Réflexive	2.75	930.22	30	Sableuse (sable fin a grossier)
Front de mer bouismaïl	Dissipative	0.29	295.27	15	Sable moyen
Plage sidi boumaaza	Intermédiaire	1.76	662.20	30	Sableuse(sable moyen)
Plage Maheidine	Dissipative	0.29	295.27	15	Sableuse (sable moyen)
Plage centre	Réflexive	0.56	476.86	12	Sableuse (sable fin)
Plage kouali	Dissipative	0.59	442.45	13	Sableuse (sable moyen)
Complexe CET Tipaza	Dissipative	0.20	142.15	15	Sableuse (sable fin)
Corne d'or Est	Dissipative	0.32	186.31	30	Sableuse (sable fin)
Corne d'or Ouest	Dissipative	0.15	93.95	17	Sableuse (sable fin)
Matares	Dissipative	2.33	486.03	50	Sableuse (sable fin)
Centre de repos familia (CRF)	Dissipative	5.58	812.59	80	Sableuse (sable fin)
Plage tourinfchenoua	Dissipative	3.19	599.70	50	Sableuse (sable fin)
Chenoua	Dissipative	2.50	735.28	45	Sableuse (sable fin)
Plage des galets	Réflexive	2.70	1088.73	10	Galets

II.2 Etude géologique :

L'analyse de la géologie et la sédimentologie locale permet, d'une part, de définir les sources ultimes et proximales de sédiments des différents segments du cordon dunaire et des plages de la côte étudiée et, d'autre part, de connaître les processus de leurs mises en place (KERMANI, 2016). La zone d'étude occupe la partie occidentale de la plaine de la Mitidja, principale plaine côtière de l'Algérois. Elle est délimitée par deux entités géomorphologiques : l'Atlas Blidéen

vers le Sud et le Sahel algérois vers le Nord (Figure 8).

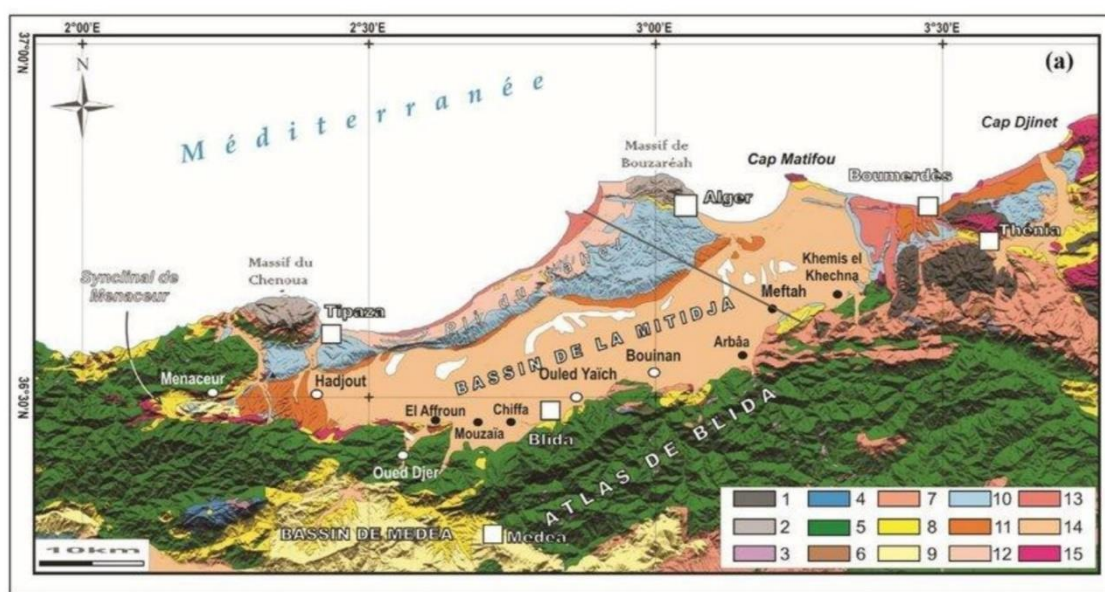
Géologie régionale

La géologie de la région algéroise connue sous le nom de massif d'Alger (**SEKKAL, 1986**), ce relief est constitué d'un socle métamorphique primaire au niveau de cap Matifou et au mont Bouzareah, bordé de part et d'autre de dépôts sédimentaires du Sahel et de la Mitidja. (**MESSAOUD, 1987**).

Massif d'Alger (Massif de Bouzareah) : Il est essentiellement composé de terrains métamorphiques correspondant à une série gneissique à micas, du marbre (cipolin), des schistes, des micaschistes et des pegmatites. Ces terrains composent les différentes unités tectoniques reconnues dans le massif d'Alger.

El Sahel : Les séries affleurant dans le sahel sont rapportées à du Miocène, du Pliocène, du Villafranchien et du Quaternaire.

Le bassin de la Mitidja : La plaine de la Mitidja est située à l'Ouest d'Alger, et se présente comme une vaste dépression recouverte par des dépôts alluvionnaires d'âge Quaternaire



II.3 Réseau hydrographique :

La baie de Bou Ismail est caractérisée par la présence des réseaux hydrographiques qui alimentent les plages en sédiments, c'est un réservoir de trois rivières (Mazafran, Nador et Beni Messous) à régime hydrologique irrégulier, mais avec un débit important.

Tableau 2: Les réseaux hydrographiques de la baie de Bou Ismail

Oueds	Description
Oued Nador	L'oued Nador se trouve dans la partie Ouest de la baie de Bou Ismail, au pied du mont Chenoua au nord de la wilaya de Tipaza. Son chef-lieu est situé à environ 5 Km au sud-ouest de Tipaza et a environ 20 km au sud-est de Cherchell, avec un débit égal à 36.3 Hm ³ /an.
Oued Mazafran	L'oued représente la limite séparant la wilaya d'Alger et la wilaya de Tipaza, il est formé par des ramifications des Oueds DjerChaffa et Bou-roumi. Ces apports varient tout au long de l'année avec une période moyenne de 2850 Hm ³ /an et se caractérisent par des crues soudaines en hiver et au printemps, possédant un bassin versant de 1850 m ² .
Oued Béni Messous	Elle est située à 18 km dans la partie orientale de la baie (ouest d'Alger). Il prend sa source dans le massif de Bouzareah et son embouchure se trouve à environ 2km à l'ouest du port d'El Djamilia. La superficie de son bassin versant d'environ 33 km ² avec un débit faible considéré à 77000 Hm ³ /an.

II.4 Climatologie :

La baie de Bou Ismail, située au nord de l'Algérie, bénéficie d'un climat méditerranéen caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers doux avec des précipitations.

II.4.1 Température :

L'étude de la variation des températures est basée sur le traitement des résultats d'analyse des températures mensuelles calculées à partir des enregistrements effectués régulièrement au niveau de la zone de Bou Ismail couvrant une période de 29 ans allant 01/1992 à 01/2021 les résultats portés sur les deux tableaux et les figures montrent deux périodes distinctes :

- Une période hivernale relativement froide qui s'étale sur une période de 6 mois allant de mois de Novembre au mois d'avril avec un minimum moyen de 7.6 C° est enregistré au mois de Janvier (figure 8)
- Une période estivale relativement chaude qui s'étale sur une période de 6 mois. Notant que des pics de température qui peuvent atteindre 31.7 C° sont enregistrées au mois d'Aout. (figure 8).

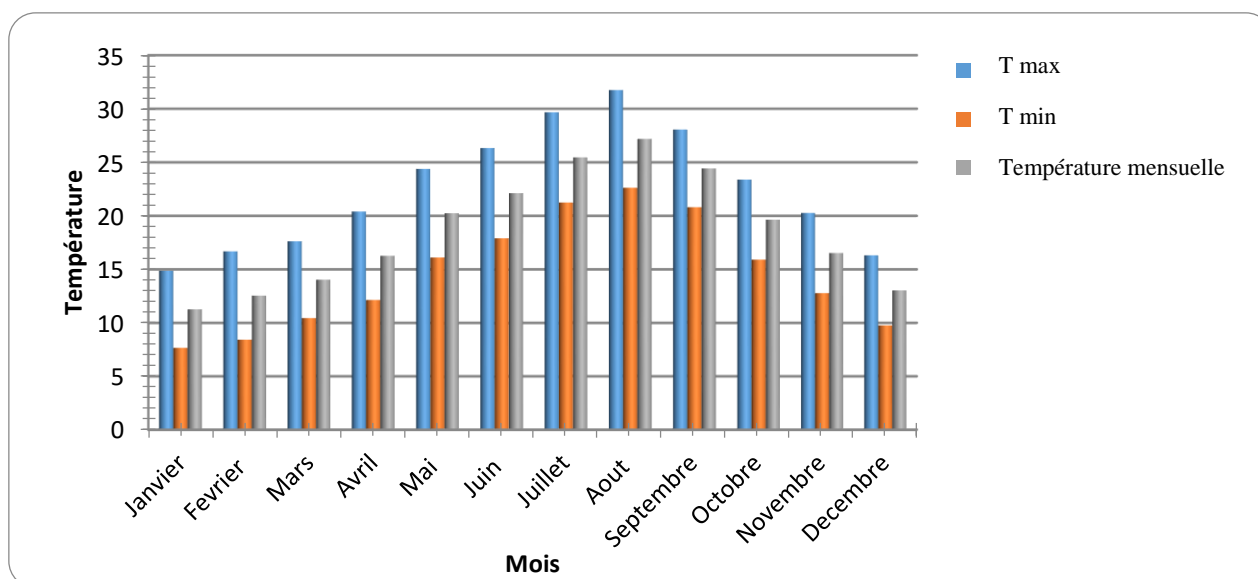


Figure 8: Histogramme de température moyenne 2021(waveclimate2021)

Tableau 3: Distribution des températures moyennes mensuelles pour la période entre 1992-2021.

mois	T max	T min	Moyenne mensuelle
Janvier	14,9	7,6	11,3
Février	16,7	8,4	12,5
Mars	17,6	10,4	14
Avril	20,4	12,1	16,3
Mai	24,4	16,1	20,2
Juin	26,3	17,9	22,1
Juillet	29,7	21,2	25,4
Aout	31,7	22,6	27,2
Septembre	28	20,8	24,4
Octobre	23,4	15,9	19,6
Novembre	20,3	12,8	16,5
Décembre	16,3	9,7	13

II.4.2 Précipitations :

Les traitements statistiques des données acquises au niveau de la baie de Bou Ismail (tableau 4) couvrant une période de 29 ans allant de 1992 à 2021 nous a permis de tracer l'histogramme des moyennes mensuelles des précipitations dans notre zone d'étude (Figure 9), ces traitements montrent que la région se caractérise par deux périodes distinctes :

- Période hivernale pluvieux dont les pluies se concentrent entre le mois d'Septembre et le mois d'Mai, elle atteint son maximum en mois de Décembre avec 123,68 mm.
- Période estivale sèche s'étale du mois Juin jusqu'au Aout avec son minimum enregistré au mois d'Aout avec 1.21 mm.

Tableau 4:La distribution des moyennes mensuelles des précipitations (1992-2021).

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
PPT	118,99	17,547	66,73	65,48	40,6	23,8	1,80	1,21	16,62	50,41	90,86	123,68

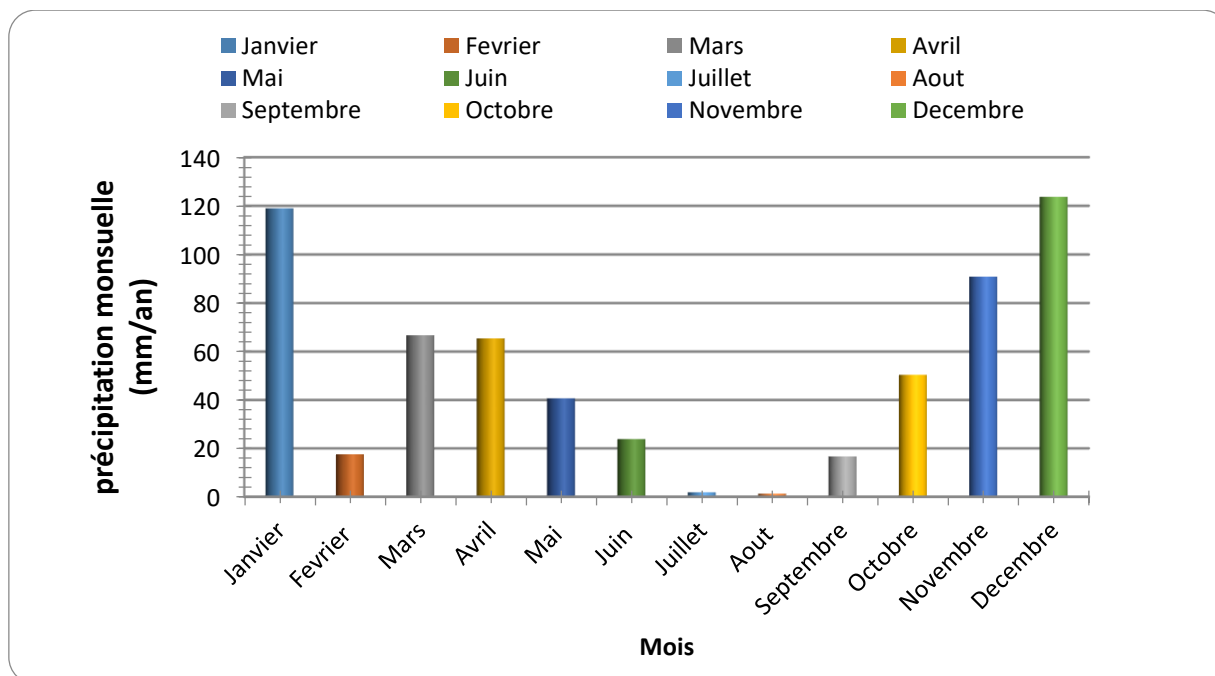


Figure 9: Histogramme des précipitations mensuelles

II.4.3 L'indice d'Emberger :

Il est particulièrement adapté aux régions méditerranéennes dans lesquelles il permet de distinguer différents étages climatiques. Il est défini par la formule suivante (**Modifiée par Stewart, 1969**) :

$$Q = 2000P / M^2 - m^2$$

Avec :

Q : quotient pluviométrique modifié d'Emberger

M : moyenne des maxima (températures maximales journalières) du mois le plus chaud, en C°

m : moyenne des minima (températures minimales journalières) du mois le plus froid, en C°

P : pluviométrie annuel, en millimètres

Tableau 5:L'indice pluviométrique de l'Emberger.

PPT (mm)	Tmax (C °)	Tmin (C°)	Q	Etage climatique
123.68	31,7	7,6	260.6	Subhumide à hiver froid

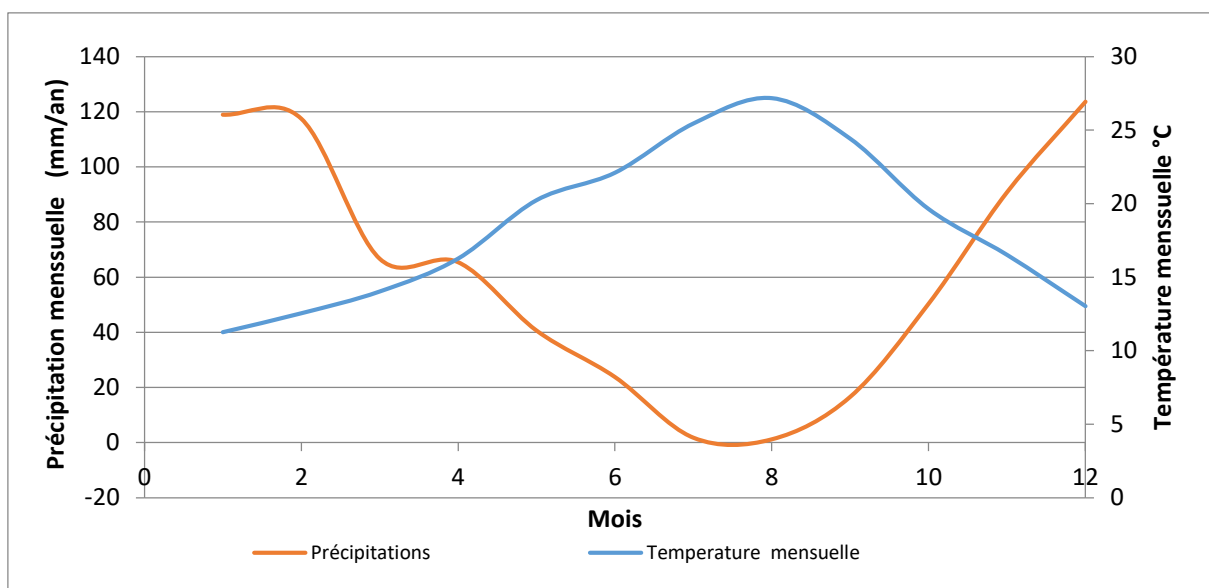


Figure 10: Le diagramme ombro-thermique (1992-2021).

L'analyse du diagramme permet de visualiser une période pluvieuse humide qui est de 6 mois, elle s'étale de Novembre à la fin d'Avril et une période sèche qui caractérise les mois les plus secs (Mai, Juin, Juillet, Août et Septembre).

II.4.4 Les vents :

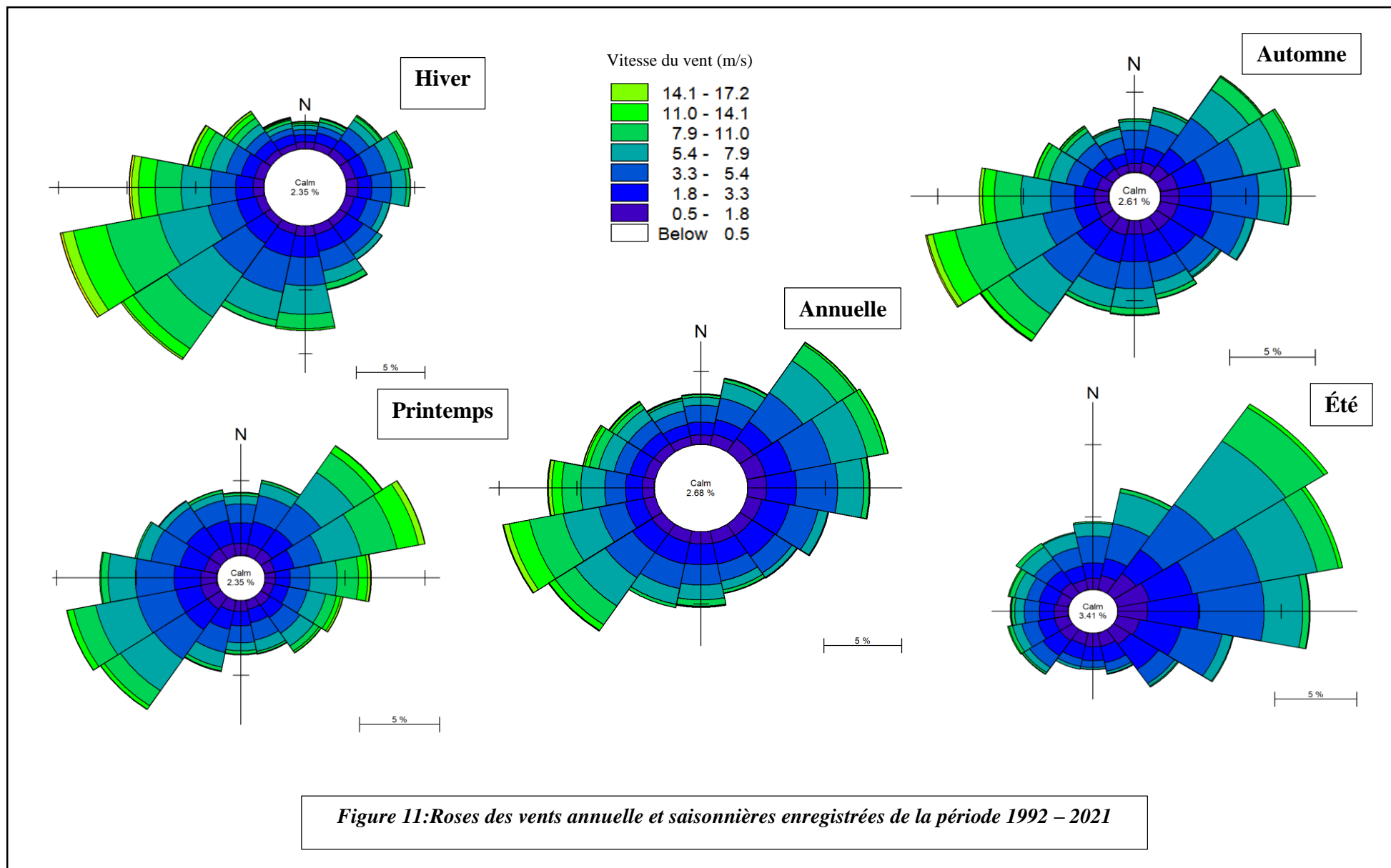
Le vent local a une grande influence sur la houle. Une étude sur le climat du vent a été effectuée sur la période 1992 – 2021 sur notre base de données « Infoplaza » issue de « Wave Climate ».

Le vent au niveau de la baie de Bou Ismail est en moyenne de 4,5 à 5 m/s, les vents les plus violents se produisent durant les mois de Janvier, Février, Mars, Novembre et Décembre, les vents les plus violents recensés dépassent les 21 m/s durant la période entre 1992 et 2021. (*infoplaza., 2022 ,<http://www.waveclimate.com/>*).

L'analyse statique des roses de vent montre que : (figures 11 et 12)

- Période automnale : les vents qui dominent sont de deux secteurs sud-Ouest qui est dans la région de direction 202.5° et 247.5° avec une vitesse environ 5.4 et 7.9 m/s et de direction nord-est qui de temps dans les régions de direction 22.5° et 67.5° avec une vitesse maximale de 3.3 et 5.4 m/s, et un pourcentage de calme 2.61.
- Période estivale : les vents les plus dominants sont les directions Nord-Est qui est dans la région de direction 22.5° et 67.5° ils possèdent une fréquence de 15%, avec une vitesse maximale comprise entre 5.4 et 7.9 m/s, et un taux de calme 3.41 %.
- Période printanière : les vents les plus dominants sont les directions nord-est qui dans la région de direction 22.5° et 67.5° possèdent une fréquence de 12% avec une vitesse maximale entre 11 et 14.1 m/s, et un taux de calme 2.35%.

- Période hivernale : les vents les plus dominants est de directions sud-ouest et avec dans la région de direction 202.5° et 247.5° qui possèdent une fréquence de 15° avec une vitesse maximale entre 5.4 et 7.9 m/s, et taux de calme 2.35 % .
- Fréquence annuelle : nous constatons que les directions de vent les plus dominantes sur notre site d'étude proviennent du sud-Ouest et de Nord-Est avec des fréquences d'apparition respectivement estimées par 10% avec un taux de calme est enregistré 2.68 %.



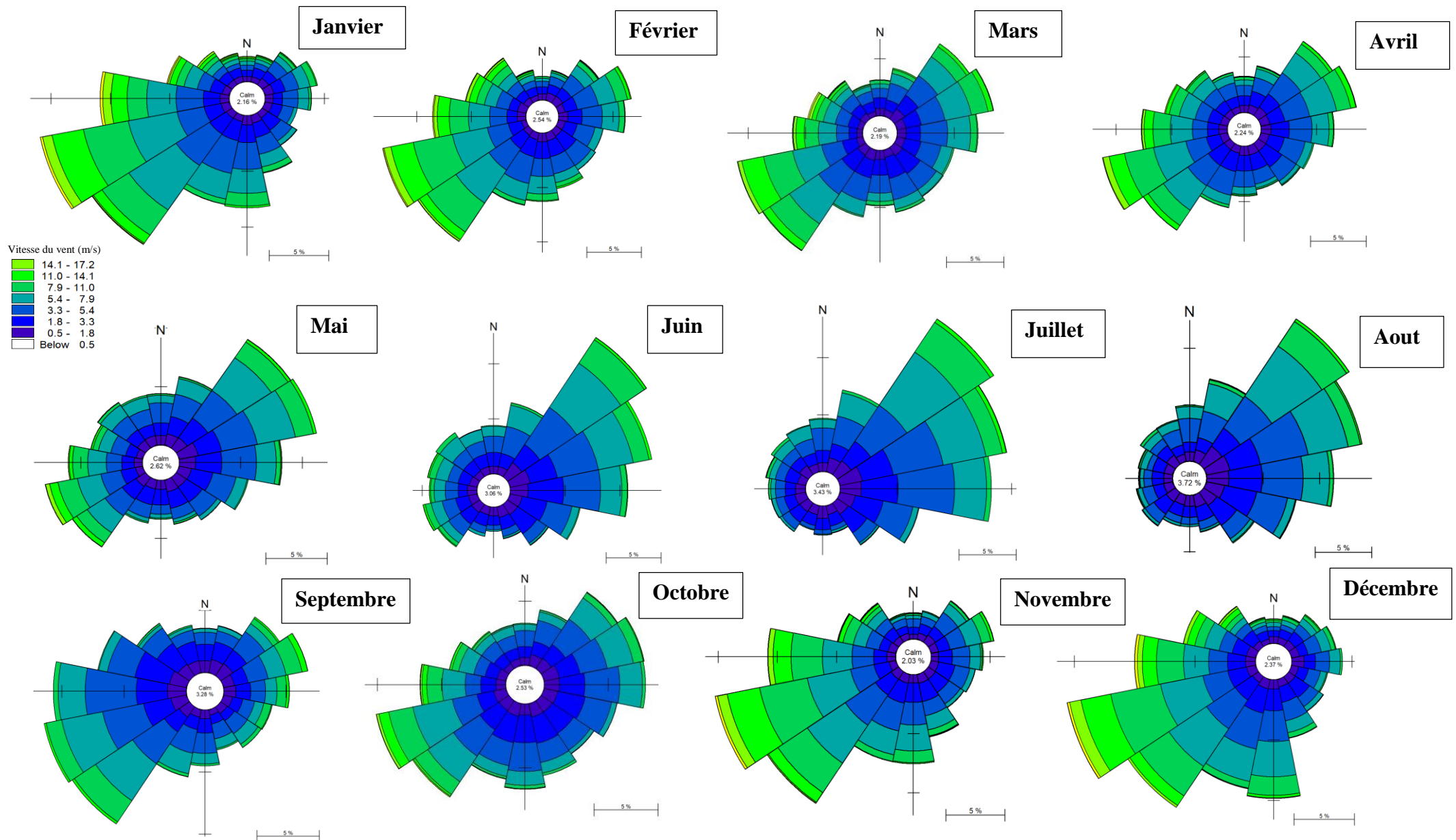


Figure 12: Roses des vents mensuelles enregistrées de la période 1992 – 2021

II.4.5 Les houles :

La Baie de Bou Ismail peut être subdivisée en deux zones Est et Ouest pour en appréhender l'étude de la houle,

La zone Est concerne les données des houles calculées au niveau du point de coordonnées géographiques 37°N de latitude et 3°E de longitude. Elles sont majoritairement de hauteur entre 0,5 et 1 mètre (ARGOSS.,2022, <http://www.waveclimate.com/>) en période estivale houles sont de faible hauteur . Par contre, les houles de hauteur plus importante peuvent se produire en saison hivernale. Les hauteurs les plus importantes ont été recensées durant les mois de Février, Mars et Novembre pour la période entre 1992 et 2021, ces houles atteignent des hauteurs de 5,5 mètres. (ARGOSS., 2022, <http://www.waveclimate.com/>).

Les données de houles calculées au niveau du point géographique dans la zone ouest dont les coordonnées géographiques sont, en latitude 37°N et en longitude 2°30'E.

Comme c'est le cas pour le coté Est de la Baie, la plupart des houles sont de hauteur entre 0,5 et 1 mètre (la plupart en saison estivale) avec des pics de hauteur durant les mois de Janvier et Novembre, les houles atteignent exceptionnellement des hauteurs entre 5 et 6 mètres (ARGOSS., 2022, <http://www.waveclimate.com/>).

L'analyse statique des roses de houle montre que :

- Période automnale : la hauteur significative qui domine est répartie dans le secteur nord est avec une direction de 225 et 67.5 une fréquence de 15% et amplitude maximale de 0.5 à 1.25m, ainsi qu'un taux de calme de 0.51%
- Période printanier : les houles dominantes sont de direction nord est entre 22.5 et 67.5, une fréquence d'environ 18% et une amplitude atteignant 0.5 à 1.25m, avec un taux de calme de 0.48 %
- Période estivale les houles les plus dominantes sont de secteur nord est avec une fréquence d'apparition de 30% et une amplitude maximale de 0.5 à 1.25m, avec un taux de calme qui atteignant 0.26 %.
- Période hivernale : les houles les plus élevées apparaissent pendant cette saison suite aux fortes pressions, elles sont réparties sur deux zones, secteur ouest avec une fréquence de 10% et une amplitude dominante de 1.25 à 2.5m et le secteur Nord Est qui à une fréquence de 10% et une amplitude de 1.25 à 2.5m, et une zone calme de 1.02%.
- Période annuelle : l'intensité des houles les plus dominantes provient du Nord Est, avec une fréquence de 23% et une amplitude maximale de 0.5 à 1.25m et un pourcentage de calme atteignant 0.57%.

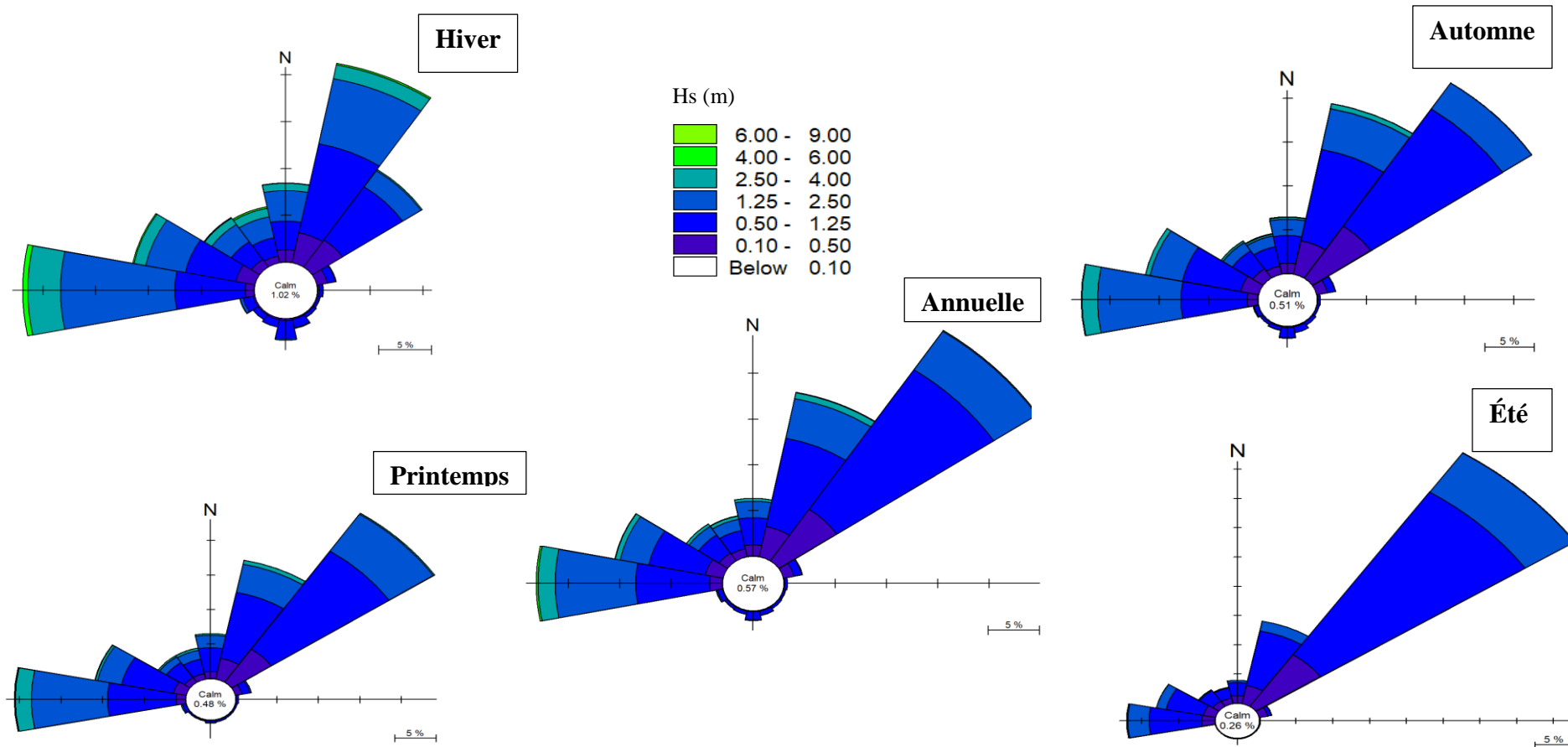


Figure 13: Roses des houles annuelle et saisonnières enregistrées de la période 1992 – 2021

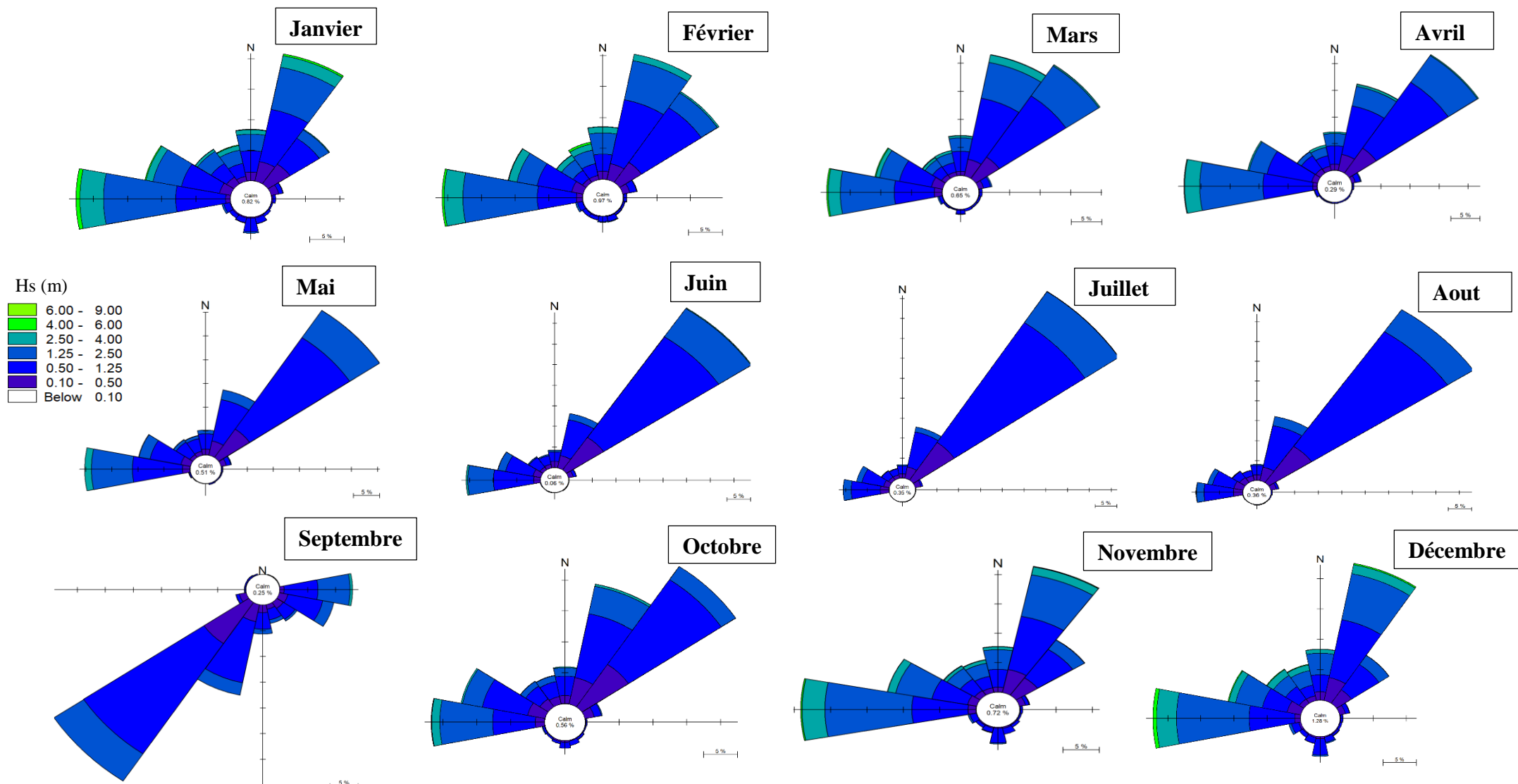


Figure 14: Roses des houles mensuelles enregistrées de la période 1992 – 2021

II.5 La pression anthropique dans la baie de Bou Ismail :

La Baie de Bous Ismail est soumise à des pressions anthropiques non seulement par la croissance démographique , mais aussi par l’artificialisation du littoral dans le début remonte en 1985. Il s’agit de la concentration des ports et des ouvrages de protection du littoral mais qui interviennent d’une manière négative et indirecte sur la dynamique sédimentaire que ce soit pour le transport sédimentaire transversal ou longitudinal selon le type d’ouvrage , les phénomènes d’accrétion et d’érosion sont donc inévitable.(**BENZERFA ,BORKACHE ,2022**)

La dominance de plages au niveau de la baie de Bou Ismail et son intérêt touristique ont fait que des ouvrages de protection ont été implantés dans cette zone dans le but de préserver son patrimoine sédimentaire et protéger les plages face à l’érosion. En effet, des épis en forme de T ont été réalisés jouant aussi bien le rôle d’épis (arrêt du transport sédimentaire horizontal) que de brise lames (arrêt du transport sédimentaire vertical induit par la houle).

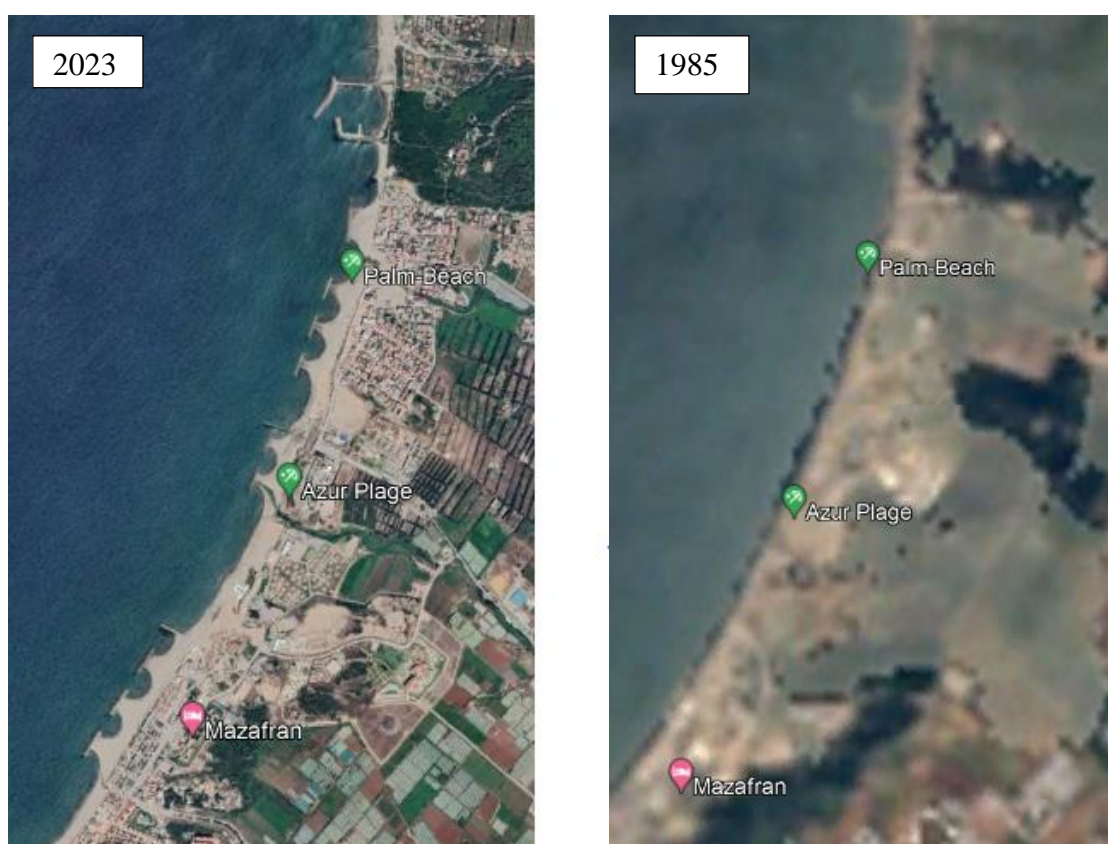


Figure 15: image satellitaires entre 1985 et 2023 (Google Earth Pro)

II.6 Infrastructures Portuaires :

La baie de Bou Ismail contient cinq infrastructures portuaires à différents usages (Pêche, loisirs. etc.).

➤ Port d'El djamila :

Le port d’El Djamilia est situé à l’extrémité est de la baie de Bou Ismail et fait face à la presqu’île de Sidi-Ferruch dont il est séparé par une plage de sable d’une longueur d’environ 7 km le long de laquelle se trouvent les complexes touristiques de « Club des Pins » et de « Moretti ». La zone du port est constituée de :

- Un ensemble d'habitations individuelles
- Un ensemble d'équipements touristiques et de détente
- Une plage de sable
- Un port de pêche et de plaisance.
- Une plage artificielle en gravier

➤ **Port de Sidi fredj :**

Le port de plaisance est situé dans une presque-île dans la commune de Staoueli à 24 km à l'ouest d'Alger, il fut bâti en 1969 dans le cap Sidi Fredj.

➤ **Port de Bouharoun :**

Le port de Bouharoun est un port de pêche situé dans la commune de Bouharoun à 45 km à l'ouest d'Alger

➤ **Port de Khemisti :**

Un petit port de pêche situé dans la commune de Khemisti dans le nord-est de la wilaya.

➤ **Port de Tipaza :**

Le port de Tipaza est situé à l'Est du mont de Chenoua dans la commune de Tipaza, il est entre l'oued Nador et l'oued Mazafran.

Chapitre III : Analyse des évènements extrêmes

L'étude approfondie sur l'évolution des traits de côte, mettant en évidence les processus et les facteurs clés qui influencent ces changements, fournit une base solide pour les schémas généraux d'évolution des traits de côte et pour évaluer les risques potentiels associés à ces changements face aux différents facteurs qui interviennent sur le système côtier.

Les facteurs naturels, tels que les changements du niveau de la mer, les courants et les vagues, jouent un rôle majeur dans la dynamique des côtes. Les interactions complexes entre ces facteurs naturels et les activités humaines, telles que l'urbanisation côtière, la construction de digues et l'extraction de sable, peuvent accélérer ou perturber les processus naturels d'évolution. En comprenant mieux les mécanismes et les facteurs qui influencent ces processus, nous sommes mieux préparés à prendre des décisions éclairées en matière de gestion côtière et de planification des zones côtières.

Dans ce chapitre nous nous intéressons donc aux facteurs naturels, paramètres de houle (vague) et niveau de la mer, qui peuvent impacter l'évolution de la ligne de côte ; en désignant les évènements extrêmes dont l'impact pourrait être irréversible.

III.1 Principe de la théorie des extrêmes

Il s'agit dans l'étude des valeurs extrêmes d'analyser l'épaisseur des queues de distributions, ou encore d'étudier les plus grandes observations d'un échantillon pour caractériser sa loi initiale. Ainsi, la théorie des extrêmes vient en complément de la théorie statistique classique où il est plus commun d'étudier le comportement d'une distribution autour de sa moyenne plutôt que dans le domaine des observations extrêmes souvent appelées événements rares. La théorie des extrêmes est fondée sur un équivalent au théorème central limite ; mais pour les queues de distribution on s'intéresse au comportement du maximum d'un échantillon (X_1, \dots, X_n) , variable aléatoire définie par :

$$m_i = \max(x_{(i-1)l+1}, \dots, x_{il}) \quad \text{pour } i \in 1, \dots, k$$

Équation 1

III.1.1 Loi des valeurs extrêmes généralisée (GEV)

La forme de la distribution des valeurs extrêmes est donnée pour tout $x \in \mathbb{R}$ par

$$H_\gamma(x) = \begin{cases} \exp\{-(1 + \gamma x)^{\frac{1}{\gamma}}\} \{1 + \gamma x > 0\} & \text{Si } \gamma \neq 0, \\ \exp(-e^{-x}) & \text{sinon} \end{cases}$$

Équation 2

La fonction densité correspondante h_γ est donnée pour tout $x \in \mathbb{R}$ par

$$h_\gamma(x) = \begin{cases} H_\gamma(x)(1 + \gamma)^{\frac{1}{\gamma}-1} \{1 + \gamma \tilde{\Omega} > 0\} & \text{Si } \gamma \neq 0, \\ \exp(-x - e^{-x}) & \text{sinon} \end{cases}$$

Équation 3

III.1.1.1 Les lois limites possibles :

Le comportement de la queue de distribution d'une suite de variables aléatoires sera complètement caractérisé par le paramètre d'échelle (dispersion) γ . Une partie sera consacrée aux

méthodes d'estimation de ce paramètre. Le signe de γ a une forte influence sur les distributions des extrêmes, et on distingue deux cas.

- **Domaine d'attraction de Gumbel :**

Lorsque $\gamma = 0$, la distribution H_0 est appelée distribution de Gumbel. Le support de cette loi est \mathbb{R} et dans ce cas les queues de distribution sont légères et décroissent de manière exponentielle. H_0 sera parfois notée Λ .

- **Domaine d'attraction de Weibull :**

Lorsque $\gamma < 0$, on pose $\alpha = -1/\gamma > 0$ et on note $\psi_\alpha(x) = \exp[-(-x)^\alpha]$ si x est négatif 1 sinon. Toutes les lois de ce domaine d'attraction ont un point extrême fini et la queue de distribution sera très mince.

Le principe de base de la théorie des valeurs extrêmes est basé sur la loi de Fisher-Tippett-Gnedenko, qui décrit la distribution des valeurs extrêmes. Cette loi montre que, sous certaines hypothèses, la distribution des valeurs extrêmes suit l'une des trois lois : la loi de Gumbel, la loi de Fréchet ou la loi de Weibull. Ces lois permettent de modéliser la probabilité des valeurs extrêmes et d'estimer les paramètres des distributions des valeurs extrêmes.

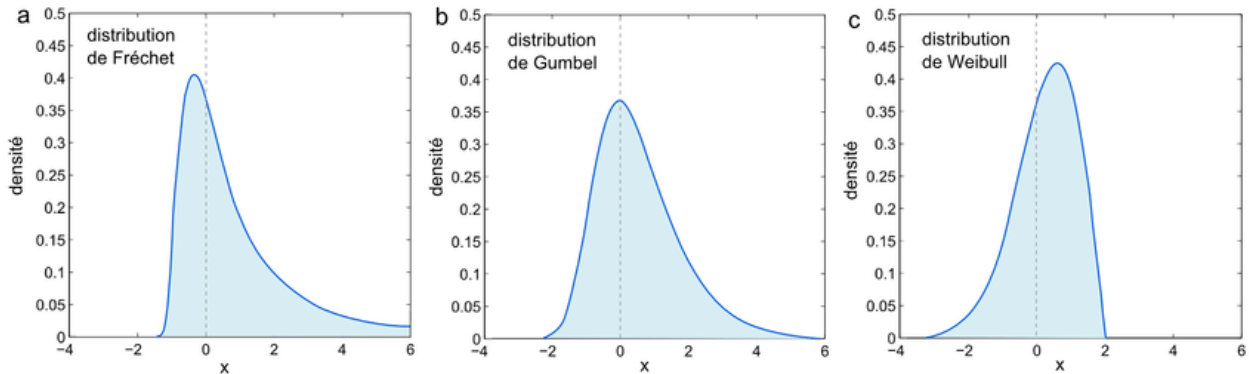


Figure 16: représentation des distributions possible de la méthode GEV (Kh. Tilbi, 2018)

Deux distributions de GEV (Gumbel et Weibull) seront utilisées pour l'estimation des périodes de retour dans le domaine du génie côtier.

L'analyse des données a été effectuée sur le langage Python sur l'interface Google colab via la bibliothèque extrême, les résultats obtenus sont présentés sous forme de graphes et de tableaux.

III.2 Méthodes des valeurs extrêmes

En statistique, Il existe deux méthodes courantes pour définir les valeurs extrêmes :

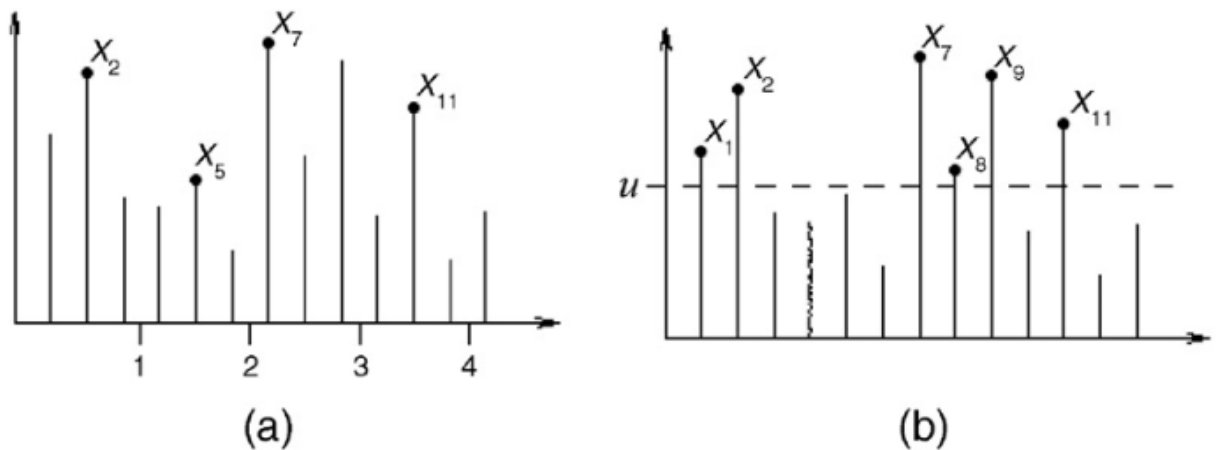
- **La méthode des seuils (Peak-Over-Threshold) :**

Cette méthode consiste à fixer un seuil au-delà duquel une observation est considérée comme une valeur extrême. Les observations qui dépassent ce seuil sont ensuite utilisées pour estimer les

paramètres de la distribution des valeurs extrêmes. Cette méthode est souvent utilisée pour modéliser les événements extrêmes dans tels que la climatologie et la gestion des risques.

- **La méthode des blocs maximas :**

Cette méthode consiste à diviser une série chronologique de données en blocs de taille fixe et à identifier la valeur maximale dans chaque bloc ; ensuite, les valeurs extrêmes. Cette méthode est particulièrement utile pour modélise les événements extrêmes qui se produisent sur une période donnée (par exemple, les maxima quotidiens ou mensuels), tels que les inondations, les tempêtes, etc.



(a) Block Maxima method, (b) Peak-Over-Threshold Method.

Figure 17:Schéma représentatif des méthodes : blocks maxima(a) et POT(b) (BHATTACHARYYA, M., RITOLIA, G., 2008)

III.2.1 Méthode block Maxima

La série temporelle a été divisée en bloc de données dont l'étendue est d'une durée d'une année (représenté avec les lignes en bleu) pour permettre de prendre le maximum de chaque année séparément comme le montre la Figure 18 par les points rouges

Une fois les maximums sélectionnés pour chaque année on passe directement au calcul des hauteurs de houles correspondant à chaque période de retour. Une fois les maximums sélectionnés pour chaque année on passe directement au calcul des hauteurs de houles correspondant à chaque période de retour avec le langage python sur l'interface Google Colab via la bibliothèque Pyextrêmes

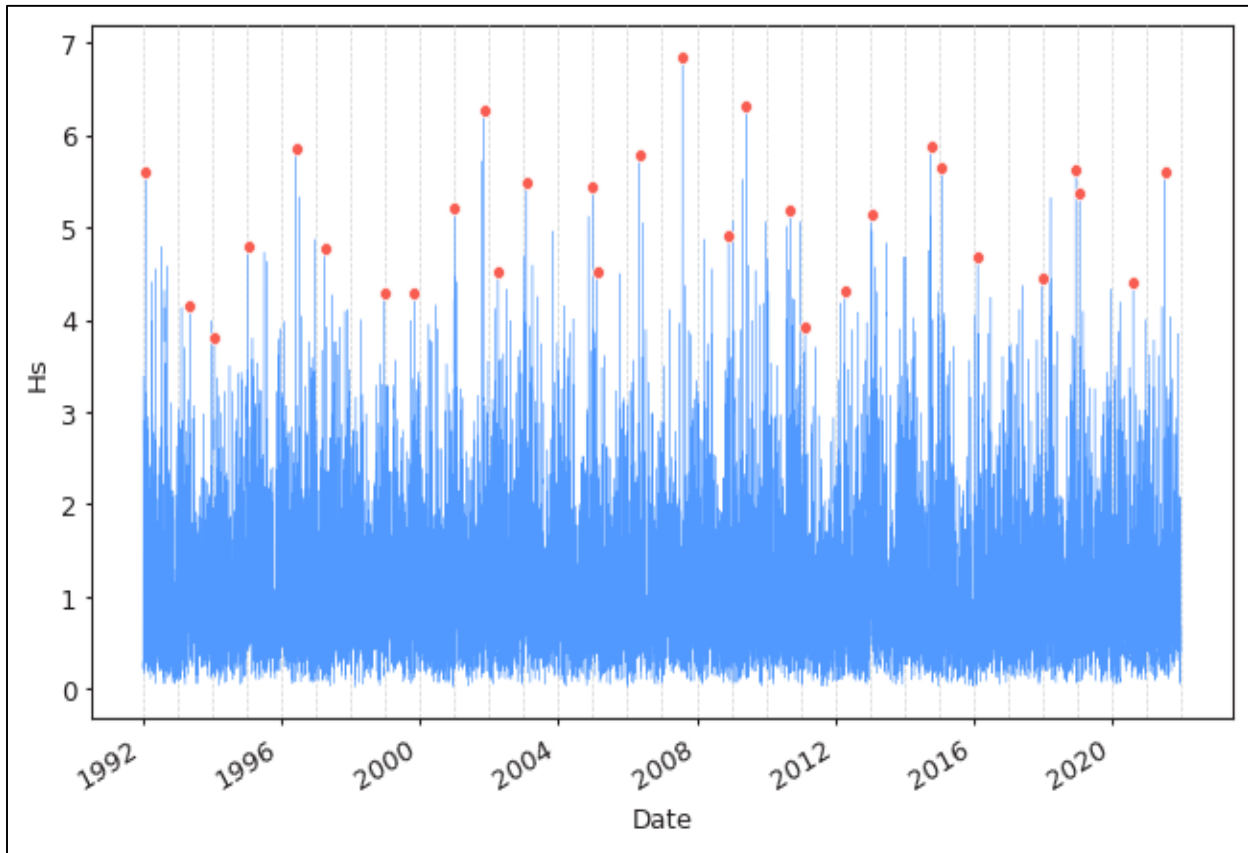


Figure 18: détermination de l'échantillon des maxima annuels des hauteurs de houle entre 1992 et 2021.

III.2.1.1 Résultats des distributions Gumbel et Weibull pour la méthode des bolck maxima

Les résultats figurants dans le graphe (Figure 19 et 20) expliqués par des traits verts qui désignent les limites de l'erreur acceptée pour les résultats de 15% près. Les croix rouges indiquent les valeurs de hauteurs de houles pour les périodes de retour 2, 5, 10, 25, 30, 50, 100 et 1000 ans.

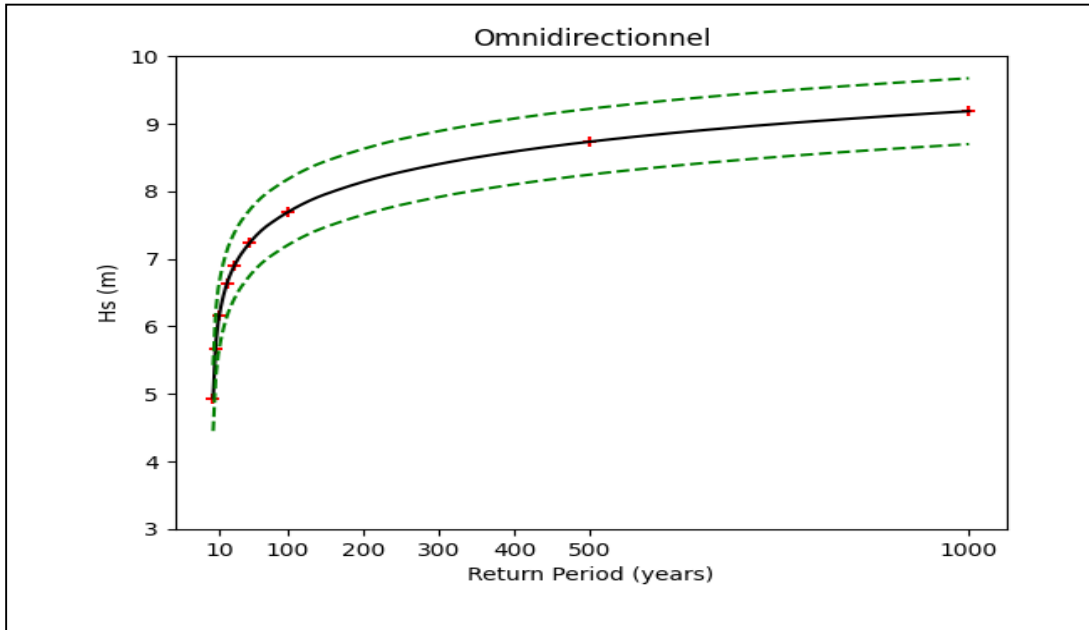


Figure 19: Estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour l'omnidirectionnel.

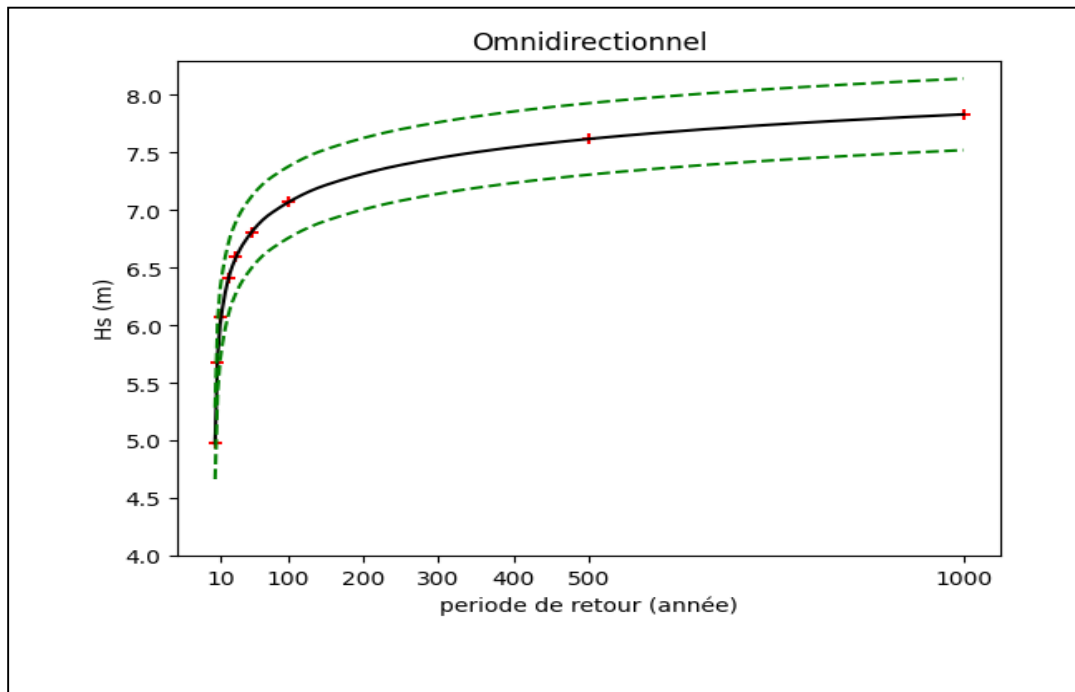


Figure 20: Estimation des événements extrêmes via la distribution de Weibull pour l'omnidirectionnel.

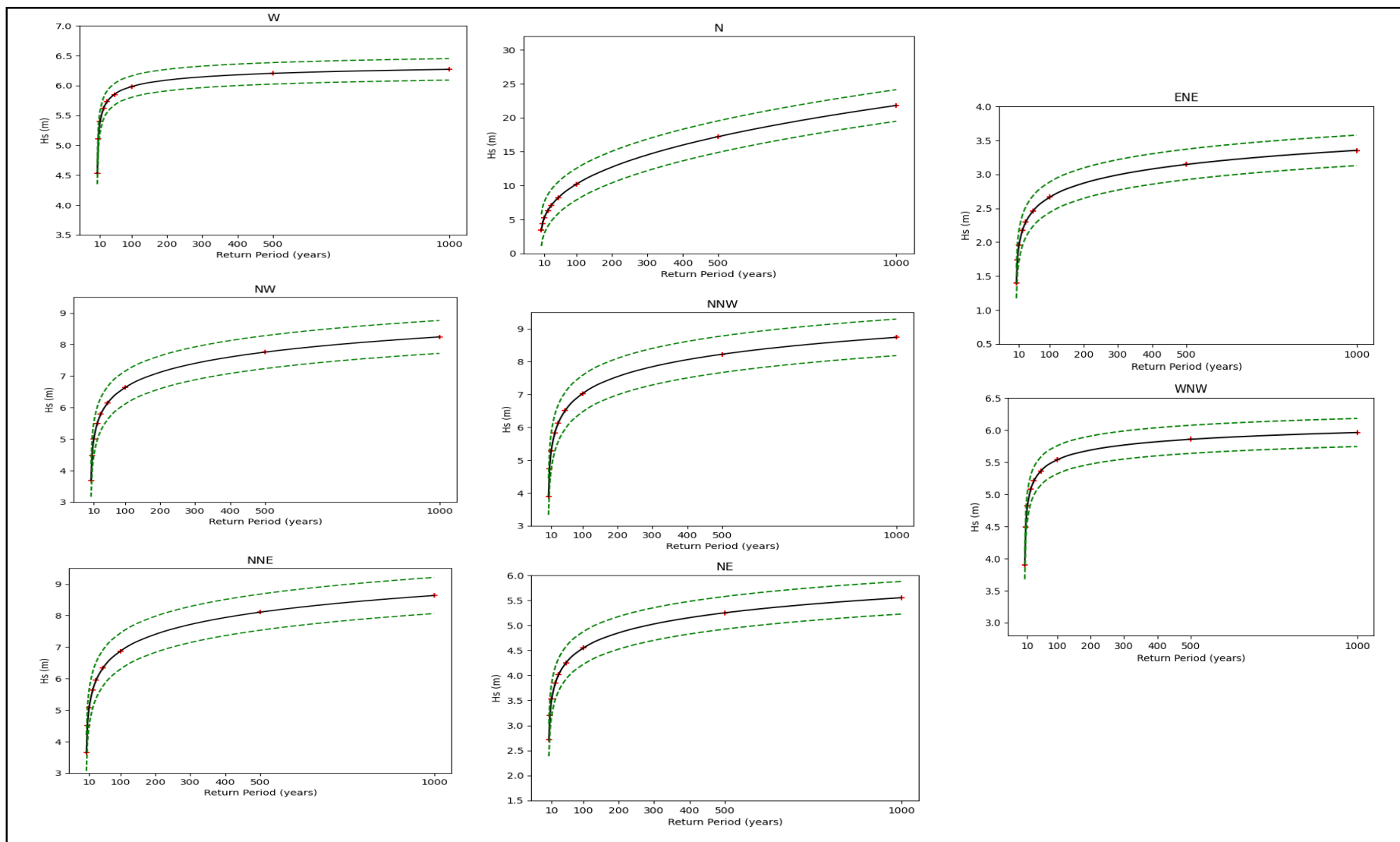


Figure 21: Estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour chaque direction.

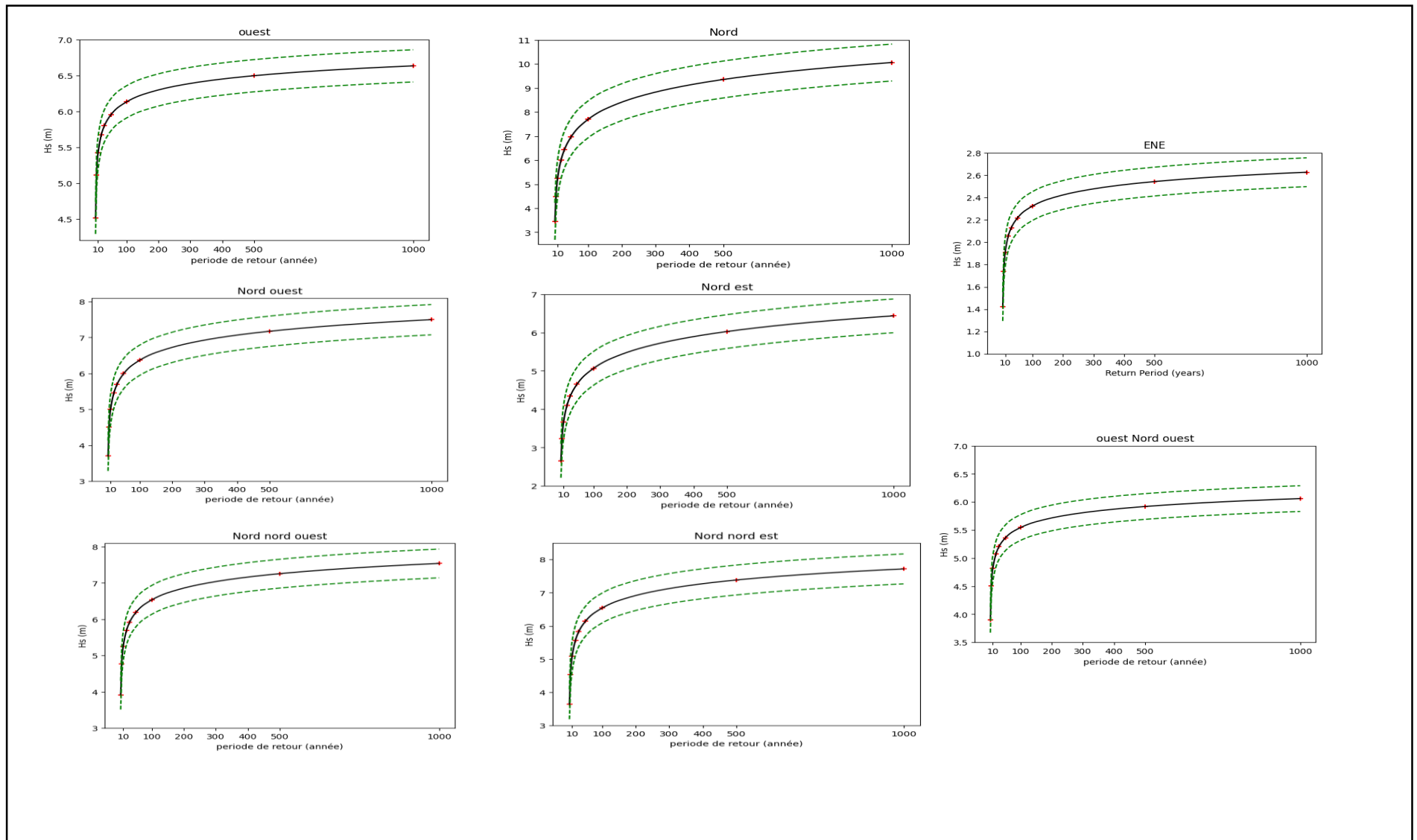


Figure 22: Estimation des événements extrêmes via la distribution de Weibull pour chaque direction

Afin de mieux lire les résultats obtenus par la distribution de Gumbel et puis Weibull, les tableaux 6 et 7 suivants résument l'ensemble de hauteurs de houle extrêmes obtenues selon les périodes de retour choisis.

Tableau 6: Tableau résumant des résultats des hauteurs de houles prédites par la distribution de Gumbel pour la méthode des blocks maxima (BM).

BM Distribution de Gumbel									
Hauteur des vagues en mètre									
Période De retour	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	Omni
2	4.57	3.93	3.72	3.93	3.45	3.81	2.69	1.44	5.10
5	5.15	4.54	4.51	4.77	4.39	4.72	3.22	1.77	5.94
10	5.44	4.86	5.03	5.33	5.30	5.13	3.64	1.99	6.28
25	5.72	5.20	5.69	6.03	6.94	5.49	4.25	2.26	6.55
50	5.88	5.41	6.17	6.56	8.64	5.68	4.79	2.47	6.68
100	6.01	5.58	6.66	7.08	10.89	5.83	5.39	2.68	6.77
500	6.22	5.90	7.78	8.28	19.04	6.03	7.12	3.15	6.01
1000	6.28	6.01	8.26	8.79	25.19	6.09	8.04	3.35	6.91

A partir du Tableau 6 et 7 qui représentent les résultats des hauteurs de houles prédites on remarque que la direction Est Nord Est est la moins susceptible d'engendrer une houle extrême, d'autre part, les directions les plus susceptibles d'engendrer des hauteurs de houle plus élevées le Nord Nord-Ouest et le Nord-Ouest et le Nord Est, le Nord présente des hauteurs plus importantes que les autres directions pour des périodes de retour supérieur à 10 ans.

Par contre l'analyse des hauteurs omnidirectionnelles donne les résultats les plus grands car le modèle repose sur l'échantillonnage des hauteurs maximales qui puissent exister dans la série de données de toutes directions confondues.

Tableau 7: Tableau résumant l'ensemble des résultats obtenu par la méthode des blocks maxima selon la distribution de Weibull.

BM distribution de Weibul									
Hauteur des vagues par direction en mètre									
Période de retour	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	Omni
2	4.51	3.90	3.70	3.91	3.45	3.64	2.65	1.42	4.97
5	5.10	4.50	4.50	4.76	4.49	4.54	3.23	1.73	5.67
10	5.41	4.81	5.00	5.25	5.25	5.08	3.66	1.91	6.07
25	5.67	5.07	5.45	5.68	5.99	5.56	4.22	2.05	6.41
50	5.94	5.35	5.99	6.19	6.96	6.14	4.64	2.21	6.80
100	6.13	5.54	6.36	6.53	7.79	6.53	5.06	2.32	7.07
500	6.49	5.91	7.17	7.25	9.35	7.38	6.02	2.54	7.61
1000	6.63	6.05	7.49	7.53	10.05	7.71	6.43	2.62	7.83

III.2.2 La méthode POT

Afin de choisir le seuil optimal, nous avons procédé au calcul de la moyenne résiduelle avec le langage python sur l'interface Google Colab via la bibliothèque Pyextrêmes, le seuil se définit comme la limite de la partie droite avant les variations de la moyenne résiduelle.

Le choix du seuil, s'est porté sur la valeur 3.35 m (Figure 9)

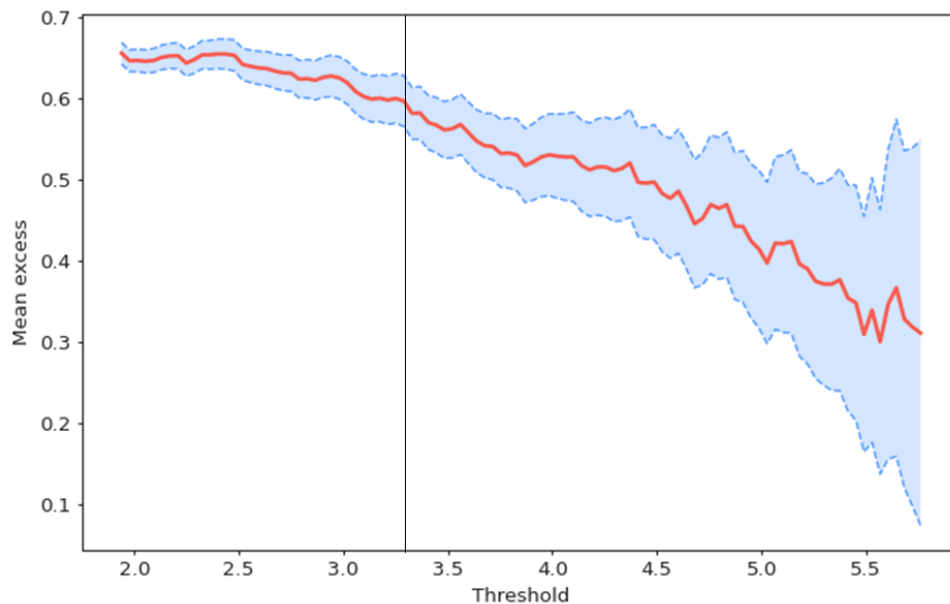


Figure 23: Moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelle de l'enregistrement

L'Ensemble des points retenus pour le calcul sont représentés dans la figure ci-dessous.

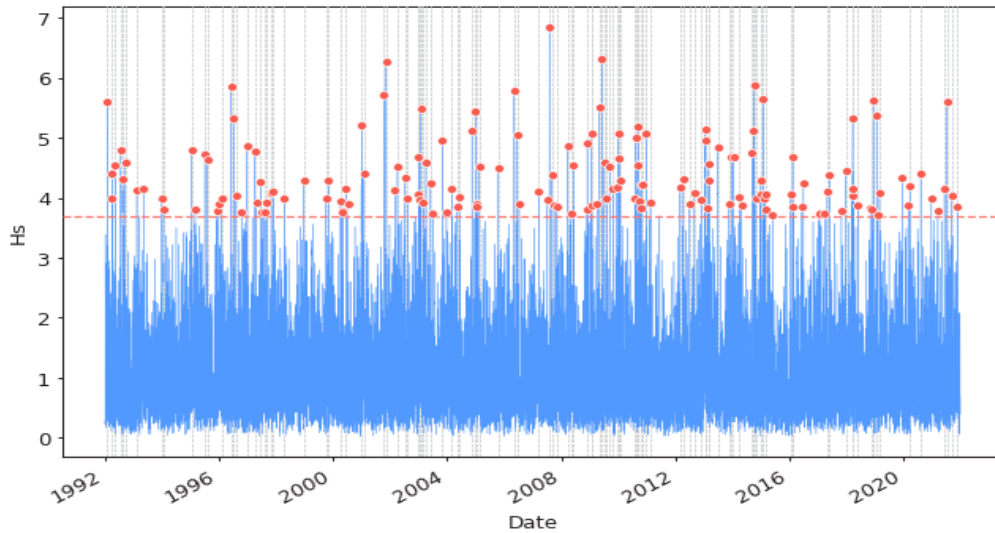


Figure 24: Représentation de méthode POT sur les hauteurs de la houle de 1992-2021

L'étape de la sélection des pics terminée, on passe au calcul des hauteurs de houles avec leurs périodes de retour via la même **bibliothèque Pyextremes** sur **Google Colab.**, ou on obtient les résultats suivant :

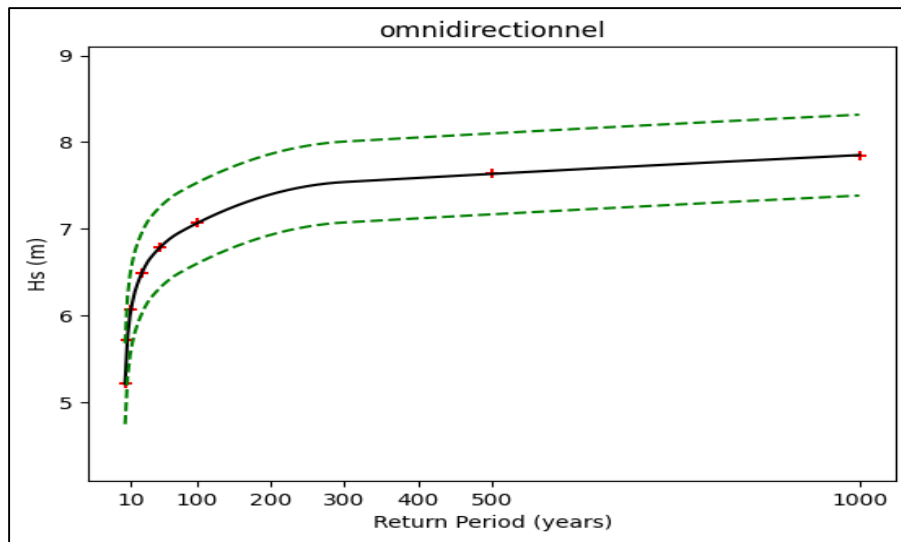


Figure 25: Estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour l'omnidirectionnel

Afin de mieux lire les résultats obtenus par l'utilisation de la distribution de Gumbel, le tableau suivant résume l'ensemble de hauteurs extrêmes obtenues selon les périodes de retour de ces évènements extrêmes par la méthode POT

Tableau 8: les résultats obtenus selon la distribution de Gumbel pour la méthode POT.

POT									
Hauteur des vagues en mètre									
Période De retour	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	Omni
2	4.79	4.29	3.99	4.17	3.90	4.10	2.87	1.59	5.30
5	5.20	4.71	4.59	4.83	4.56	4.74	3.30	1.83	5.91
10	5.46	4.96	5.04	5.33	5.05	5.23	3.68	2.01	6.38
25	5.75	5.22	5.64	6.00	5.70	5.87	4.24	2.25	7.00
50	5.92	5.38	6.10	6.50	6.20	6.35	4.74	2.43	7.46
100	6.08	5.50	6.55	7.01	6.69	6.83	5.29	2.61	7.93
500	6.35	5.71	7.60	8.17	7.84	7.96	6.86	3.03	9.01
1000	6.44	5.78	8.05	8.67	8.33	8.44	7.69	3.21	9.48

A partir du Tableau 8 qui représente les résultats des hauteurs de houles prédites par la distribution de Gumbel ; On remarque que la direction Est Nord Est la moins susceptible d'engendrer une houle extrême, autre part, les directions les plus susceptibles d'engendrer des hauteurs de houle plus élevées sont Nord Nord -Ouest devant le Nord et le Nord Nord Est et Nord avec des houles extrêmes prévenant de la direction Est Nord Est. Par contre l'analyse des hauteurs omnidirectionnelles donne les résultats les plus grands car le modèle simule avec les hauteurs maximales qui puissent exister dans la série de données.

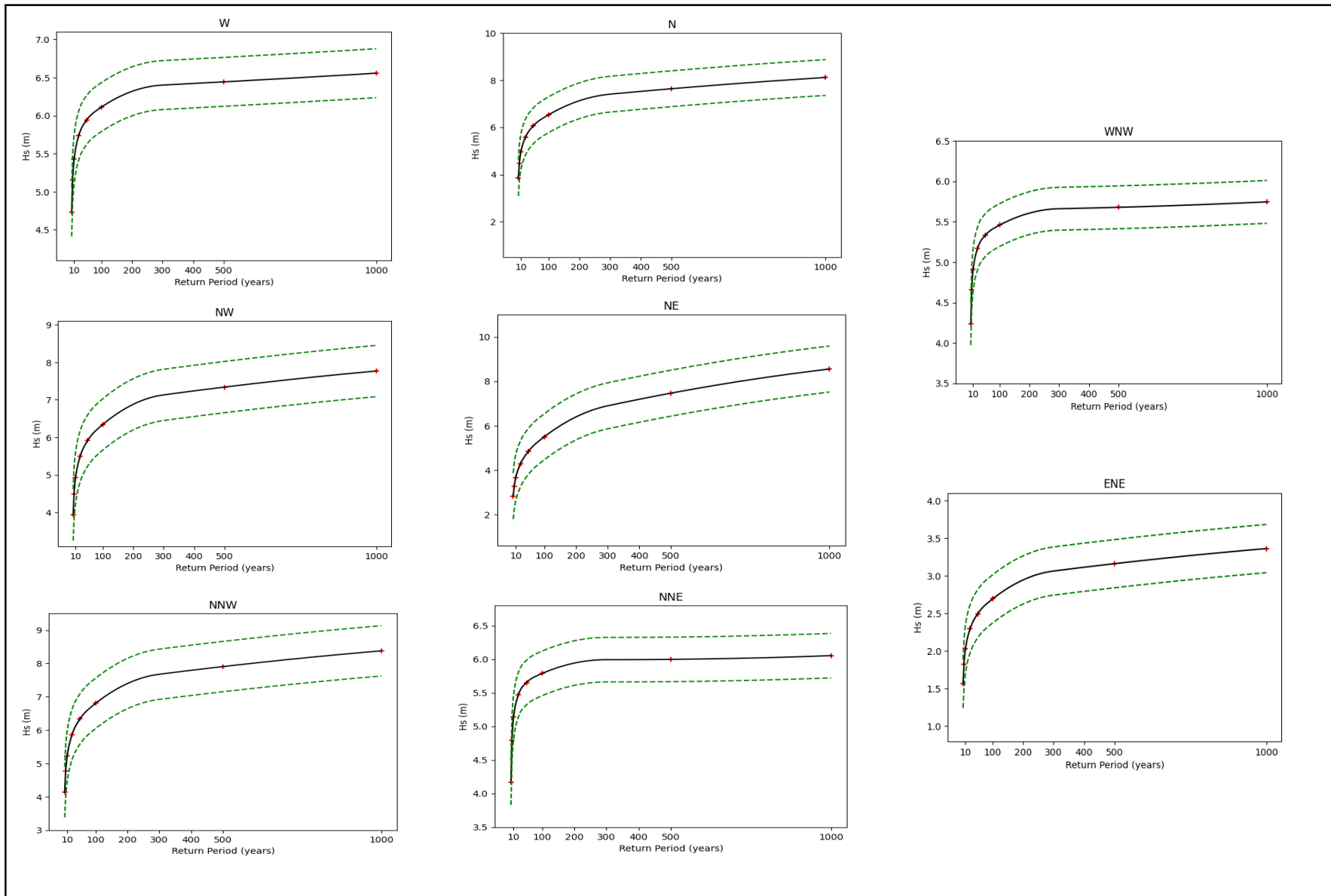


Figure 26: Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour chaque direction.

III.3 Comparaison entre les méthodes POT et Blocs Maximas (GEV distribution)

Pour trouver des résultats plus précis et plus efficaces nous avons travaillé sur les deux méthodes (POT et BM) puis on passe à la comparaison de ces deux dernières.

De ce fait dans cette partie nous allons juste travailler avec l'omnidirectionnel afin de choisir la méthode avec laquelle nous allons continuer les calculs de la performance hydraulique pour les conditions extrêmes dans le chapitre performance hydraulique.

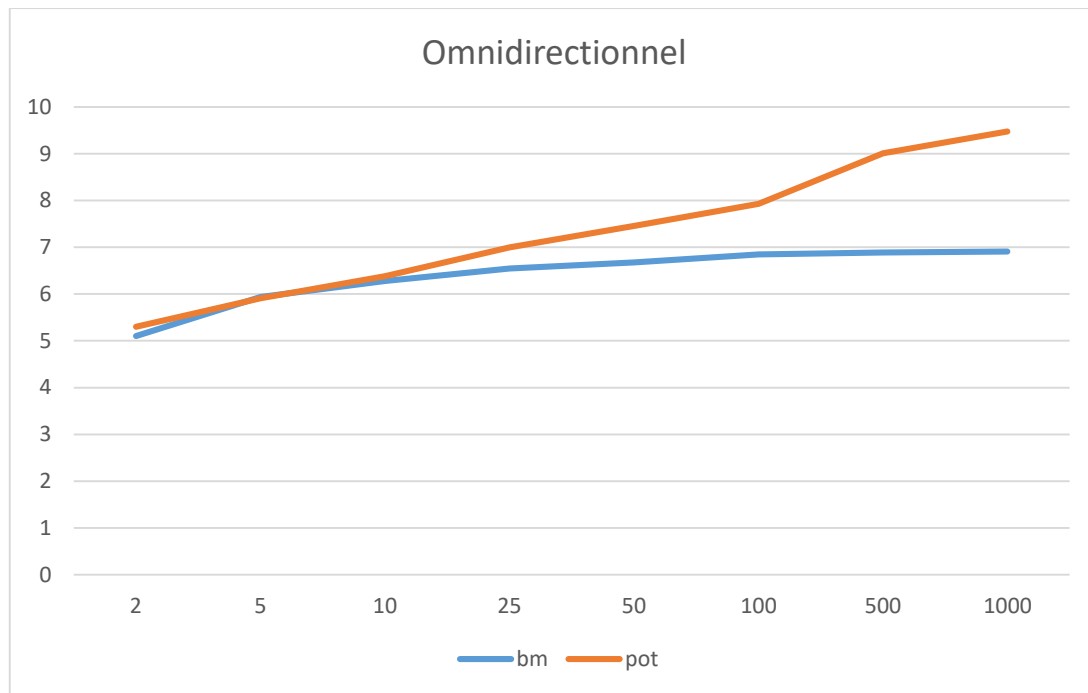


Figure 27: Comparaison des résultats obtenus avec les deux méthodes POT et BM.

A partir de la Figure 27, on constate que les deux méthodes ont presque les mêmes résultats à quelques dizaines de cm près. Aussi, on peut voir que la méthode POT propose des valeurs supérieures à la méthode BM pour l'ensemble des périodes de retour de 1000 ans. Cela s'explique par le peu de données prise en compte avec la méthode blocks maxima et de leur grandeur relative (le maximum de chaque année).

Pour les résultats des deux méthodes, on obtient $R^2 = 98\%$. Ceci nous permet de valider nos résultats pour les deux méthodes.

Pour la suite de notre travail, nous allons continuer avec les résultats de la méthode POT ; elle prend en considération plus points par rapport à la méthode POT qui est limité par un seuil point par bloc (année) même d'autres points extrêmes subsiste elle on prend que le maximum.

III.4 Elévation du niveau de la mer liée au changement climatique :

La planète est dans une phase de réchauffement climatique fortement accentué depuis le siècle dernier par les activités anthropiques croissantes. Ce réchauffement climatique a un impact direct sur la montée du niveau marin à travers le monde, soit par la fonte des glaces ou bien par la dilatation thermique des eaux. Le rapport du GIEC (Groupe d'Experts

Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) apparu en 2019, présente les derniers résultats et model à l'horizon 2100.

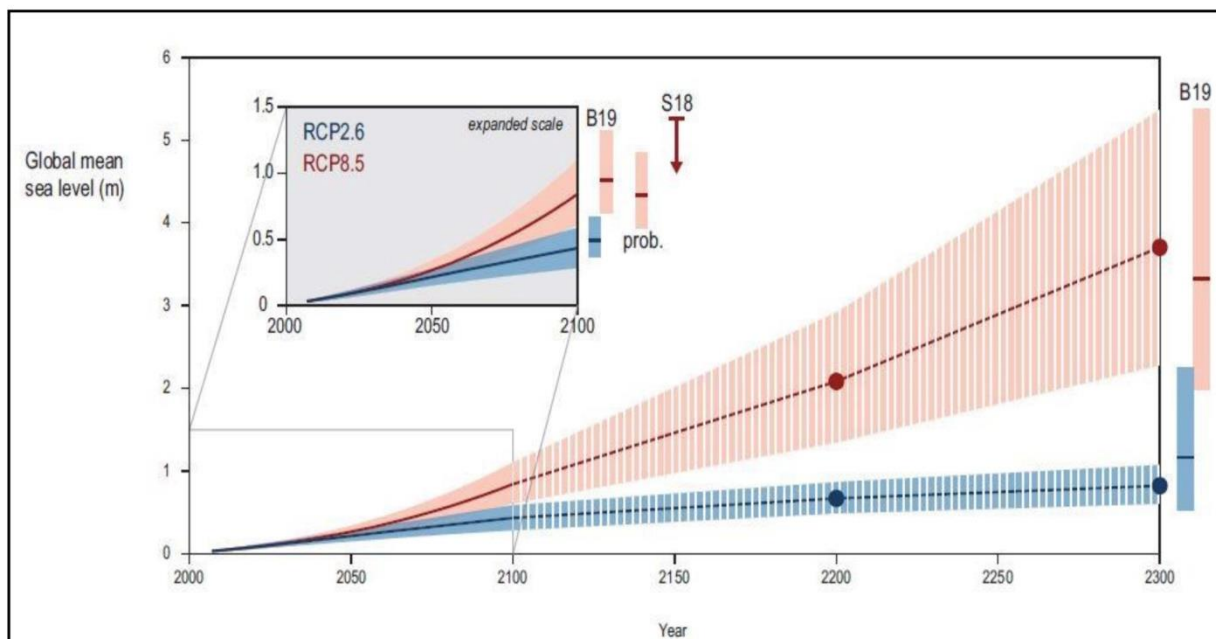


Figure 28: présente une évaluation de la fourchette probable des projections concernant RCP 2.6 et RCP 8.5 jusqu'à 2100 (BAMBER et al, 2019)

Deux scénarios sont présentés (RCP2. 6 et RCP8. 5), tel qu'après une augmentation du niveau de la mer de 1 à 2 mm par an dans la plupart des régions au cours du siècle dernier, des taux de 3-4 mm par an sont maintenant observés et augmenteront encore à 4-9 mm par an sous RCP2. 6 et 10– 20 mm an⁻¹ à la fin du siècle sous RCP8.5.

Néanmoins, jusqu'en 2050, l'incertitude quant au niveau futur de la mer induit par le changement climatique est relativement faible, ce qui fournit une base solide pour la planification de l'adaptation des infrastructures à court terme.

Conclusion

A l'issu de ce chapitre, les résultats obtenu nous permettrons de définir des scenarios de tempêtes qui peuvent avoir un impact considérable sur l'évolution du rivage. Les résultats retenus concernant les hauteurs de houles sont ceux de la méthode POT, quant au niveau extrême de l'élévation du niveau de la mer nous nous reposerons sur les résultats énoncés dans le rapport de la GIEC.

Chapitre IV : Modélisation de la
dynamique côtière du littoral de la
baie de Bou Ismail

La frange littorale subit constamment des pressions hydrodynamiques ou anthropiques, ce qui modifie automatiquement la dynamique sédimentaire au point de déséquilibrer les systèmes côtiers.

Afin d'étudier le transport sédimentaire le long du rivage, ce dernier doit reposer sur des études analytiques de l'évolution du trait de côte en prenant en considération le taux d'effet des facteurs hydrodynamiques notamment les houles et les courants et cela se fera à long terme et comme étant une donnée de base pour cette étude hydro sédimentaire.

L'objectif principal étant de comprendre le transport sédimentaire le long de la côte de Bou Ismail et de répondre à la problématique posée en étudiant la vulnérabilité de la zone et prendre en compte toutes les mesures nécessaires, en appliquant un modèle numérique calibré pour ça.

Les données utilisées à cet effet concernent des données de houle au large, du vent et nécessairement une carte bathymétrique de la zone d'étude.

L'étude consiste tout d'abord à récolter les données pour la simulation, en effectuant une étude bathymétrique, processus de base de modélisation pour le bon déroulement d'une analyse hydro-sédimentaire.

Ensuite vient l'intégration des modules intégrés dans un système de modélisation Mike21 (SW, HD et ST) afin d'interpréter les résultats obtenus à travers le Mike21.

IV.1 Modélisation numérique :

La modélisation numérique est un processus qui permet de décrire des phénomènes physiques en équations mathématiques pour faciliter la compréhension de ce dernier pour ensuite résoudre le tout en un programme informatique.

Dans le cas d'une application hydraulique, on parle d'équation de continuité et de mouvement ou d'énergie, il simule par exemple le mouvement de l'eau ou l'interaction entre l'eau et les ouvrages hydrauliques.

IV.2 Présentation du modèle utilisé :

Le modèle Mike 21 DHI développé par l'institut hydraulique Danois est un modèle de houle spectrale basé sur la conservation de la densité de l'action d'onde qui permet de simuler la propagation des états de mer dans les domaines offshore et côtier. Le modèle inclus les effets de la réfraction et de Shoaling liés aux variations de la bathymétrie, la génération de la houle par action du vent, la dissipation de la houle. La résolution par la méthode des volumes finis se base sur le maillage flexible composé d'éléments triangulaire dans le plan horizontal. Ces éléments peuvent être affinés dans les zones d'études et les zones d'intérêt particulier. (*DHI, 2014 in AMARA et CHALAL, 2022*)

IV.2.1 MIKE 21 SW :

C'est un modèle de troisième génération développé par DHI. Il simule la croissance, la décroissance et la transformation des vagues et des houles en présence du vent dans les zones côtières, l'interaction des vagues non linéaires et aussi la réfraction et le shoaling due à la variation de la profondeur. Il utilise une grille à maillage flexible.

Mike 21 SW comprend deux formulations, la première est la formulation entièrement spectrale qui est caractérisée par l'équation de conservation de l'action des vagues et la deuxième est la formulation paramétrique découplée directionnelle qui consiste à paramétrer l'équation de conservation de l'action des vagues cette dernière est basée dans le domaine fréquentiel en introduisant le zéro et le premier moment du spectre d'action des ondes.

Les principales applications du modèle MIKE 21 SW sont :

- Conception et optimisation des structures de défense des ports et marinas contre les vagues.
- Etablissement du climat des vagues dans une région côtière en fonction des vagues du large.
- Génération des cisaillements de radiations des vagues pour le calcul des courants côtiers par MIKE 21/3
- Couplage avec les modèles de transports de sables et de boues dans les zones littorales. (*BOUZROURA ET HOUA, 2018*)

Equations en eaux profondes :

Le modèle est basé sur la résolution des équations tridimensionnelles incompressibles de Reynolds moyennées de Navier-Stokes, sous les hypothèses de Boussinesq et de pression hydrostatique. L'équation de continuité locale s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = s$$

Équation 4

Et les deux équations d'impulsion horizontale pour les composantes x et y. sont respectivement

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial \eta p}{\partial y} + \frac{\partial w u}{\partial z} = f v - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_o} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_o h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s s$$

Équation 5

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial \eta p}{\partial y} + \frac{\partial w u}{\partial z} = f v - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_o} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_o h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s s$$

Équation 6

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_o} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_o h} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s s$$

Équation 7

Où (t est le temps ; x, y et z sont les ordinales cartésiennes : η est l'élévation de la surface : d est la profondeur d'eau : $h = \eta + d$ est la profondeur d'eau totale : u, v et w sont la vitesse composante dans les directions x, y et z : $f = 2\Omega \sin\Phi$ est le paramètre de Coriolis (Ω est la vitesse angulaire et Φ la latitude géographique) : g est l'accélération de gravité : ρ est la densité de l'eau ; S_{xx} , S_{xy} , S_{yx} et S_{yy} sont des composantes du tenseur radial. v_t est la viscosité verticale turbulente. p_a est la pression atmosphérique : ρ_0 est la densité de référence de l'eau. S est l'amplitude du débit dû aux sources ponctuelles et (u_s, v_s) est la vitesse à laquelle l'eau est rejetée dans l'eau ambiante.

Les termes de contrainte horizontale sont décrits à l'aide d'une relation gradient-contrainte, qui est simplifiée en :

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)$$

Équation 8

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

Équation 9

A est la viscosité horizontale

Les conditions aux limites de surface et de fond pour u, v et w sont :

$$A z = \eta$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_o v_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy})$$

Équation 10

$$A z = -d$$

$$u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_o v_t} (\tau_{bx}, \tau_{by})$$

Équation 11

Où (τ_{sx}) et (τ_{bx}) sont les composantes x et y des contraintes de vent de surface et de fond.

Équations de conservation de l'action des vagues :

L'équation déterminante est l'équation d'équilibre de l'action des vagues formulée en coordonnées cartésiennes ou sphériques.

Coordonnées cartésiennes :

En coordonnées cartésiennes horizontales, l'équation de conservation de l'action des vagues peut s'écrire :

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad \text{Équation 12}$$

Où $N(x \rightarrow, \sigma, \theta, t)$ est la densité d'action, t est le temps, $x \rightarrow = (x, y)$ est les coordonnées cartésiennes, $v \rightarrow = (C_x, C_y, C_\sigma, C_\theta)$ est la vitesse de propagation d'une onde de groupe dans l'espace à quatre dimensions x, c et $\$,$ et S est le terme source de l'équation du bilan énergétique. ∇ est l'opérateur différentiel à quatre dimensions dans l'espace $x \rightarrow, \sigma, \theta$ et $S.$

Les quatre vitesses de propagation caractéristiques sont données par :

$$(c_x, c_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}_g + \vec{U} \quad \text{Équation 13}$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla_{\vec{x}} d \right] - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial S} \quad \text{Équation 14}$$

$$(c_x, c_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}_g + \vec{U} \quad \text{Équation 15}$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right] \quad \text{Équation 16}$$

Ici, S est la coordonnée spatiale dans la direction d'onde $\theta,$ et m est une coordonnée perpendiculaire à $S. \nabla_{x \rightarrow}$ est l'opérateur bidimensionnel différentiel dans l'espace $x \rightarrow.$

IV.2.2 MIKE 21 HD :

La modélisation hydrodynamique est utilisée principalement dans le domaine marin, chaque modèle peut être manié seul ou en mode couplé avec un ou plusieurs modèles de transport de matière dissoute et/ou particulaire.

Elle élabore les simulations de transport de sédiments, différents types d'études d'épandage et de dispersion et des études de la qualité de l'eau ou des systèmes écologiques.

Il permet de spécifier une variété de conditions aux limites hydrographiques et initiales, la résistance du lit et le forçage du vent.

L'équation en eau peu profonde dans le système de coordonnées Cartésien L'intégration des équations de quantité de mouvement horizontal et l'équation de continuité de la profondeur $h=\eta+d$ en eau peu profonde produisent :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = hS$$

Équation 17

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial hvu}{\partial y} = fvh - gh \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{h}{\rho_o} \frac{\partial P_a}{\partial x}$$

$$- \frac{gh^2}{2\rho_o} \frac{\partial \rho_w}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_o} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_o} - \frac{1}{\rho_o} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + hu_s S$$

Équation 18

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} = fuh - gh \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{h}{\rho_o} \frac{\partial P_a}{\partial y}$$

$$- \frac{gh^2}{2\rho_o} \frac{\partial \rho_w}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_o} - \frac{\tau_{by}}{\rho_o} - \frac{1}{\rho_o} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{yy}) + hv_s S$$

Équation 20

Où :

- t : Temps ;
- x, y, z : Coordonnées cartésiennes ;
- η : Hauteur de la surface ;
- d : Profondeur de l'eau ;
- h : Profondeur totale de l'eau, $h = \eta + d$;
- f : Paramètre de Coriolis, $f = 2\Omega \sin\theta$;
- Ω : vitesse angulaire de révolution ;
- θ : Latitude géographique ;
- ρ_w : Densité de l'eau ;
- p_a : Pression atmosphérique ;
- ρ_o : Densité de référence de l'eau ;
- u, v, w : Composantes de la vitesse du courant dans les directions x, y, et z ;
- S_{xy} , S_{yx} , S_{xx} , S_{yy} : Composantes du tenseur de rayonnement ;
- ν_t , A : Viscosités turbulentes verticale et horizontale, respectivement ;
- S : Amplitude de la décharge causée par des sources ponctuelles ;
- (u_s , v_s) : Vitesses par laquelle l'eau est déchargée dans l'eau ambiante ;

(τ_{sx} , τ_{sy}), (τ_{bx} , τ_{by}) : Composantes x et y des contraintes de cisaillement du vent de surface et du fond, respectivement, La barre supérieure décrit une valeur moyenne.

u, v : Les vitesses des courants à la profondeur moyenne sont définies par :

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz$$

Équation 21

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad \text{Équation 22}$$

Les contraintes latérales T_{ij} comprennent le frottement visqueux, l'advection différentielle et le frottement turbulent. Ils sont estimés à l'aide d'une viscosité turbulente sur la base de la formulation des gradients de vitesse moyenne de la profondeur :

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial u}{\partial x'} \quad \text{Équation 23}$$

$$T_{xy} = A \left(\frac{\partial u}{\partial y'} + \frac{\partial v}{\partial x'} \right) \quad \text{Équation 24}$$

$$T_{yy} = 2A \frac{\partial v}{\partial y} \quad \text{Équation 25}$$

IV.2.3 Modèle de transport de sable MIKE21 ST

Modèle de transport de sédiment non-cohésif (sable). Il est normalement couplé au modèle hydrodynamique MIKE21/3-HD et au modèle de vagues MIKE21-SW. Il offre deux formulations pour le calcul du transport sédimentaire : la formulation de Biker (courants seuls) et la formulation STP du DHI (courants et vagues). Cette méthode STP dite « intra-vague » permet de prendre en compte l'influence des différences de phase de l'écoulement oscillatoire, de la tension du cisaillement sur le fond et de la concentration de sédiment en suspension sur le transport du sédiment.

On cite quelques applications du modèle MIKE21/3-ST comme suit :

- La gestion du littoral.
- L'optimisation de l'entrée d'un port ou d'une Marina.
- La conception des ouvrages de protection côtière.
- L'étude de la stabilité des passes d'entrées tidales.
- L'étude de la morphologie côtière et fluviale.
- La conception des plages artificielles. **(BOUZEROURA,HOUA,2018)**

Les principales applications des modèles MIKE21/3 sont :

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

IV.3 Création de la bathymétrie sous maillage imbriqué :

Afin de pouvoir commencer les simulations, la génération d'une mesh est indispensable. Le logiciel Mike-zéro offre la possibilité d'importation et visualisation des données bathymétriques puis la création d'un maillage (.Mesh) à l'aide du module "MeshGenerator". Le générateur de maillage offre deux possibilités d'interpolation pour les éléments triangulaires. Les deux méthodes d'interpolation possibles sont Voisin naturel et l'Interpolation linéaire (*DHI, 2014 in AMARA et CHALAL, 2022*).

La création de la mesh avec le module 'Mesh Generator' nécessite :

- La détermination du système de projection adapté à la zone d'étude, dans notre cas c'est le 'WGS_84_UTM_ZONE_31',
- Les limites terrestres (trait de côte) et la bathymétrie de la zone préalablement enregistré dans un fichier. xyz.

Un maillage imbriqué permet d'avoir des résultats de bonne résolution dans nos zones d'intérêt d'une part ; d'autre part, il permet d'optimiser les coups de calcul.

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

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

Les étapes de cette étude sont résumées dans l'organigramme suivant :

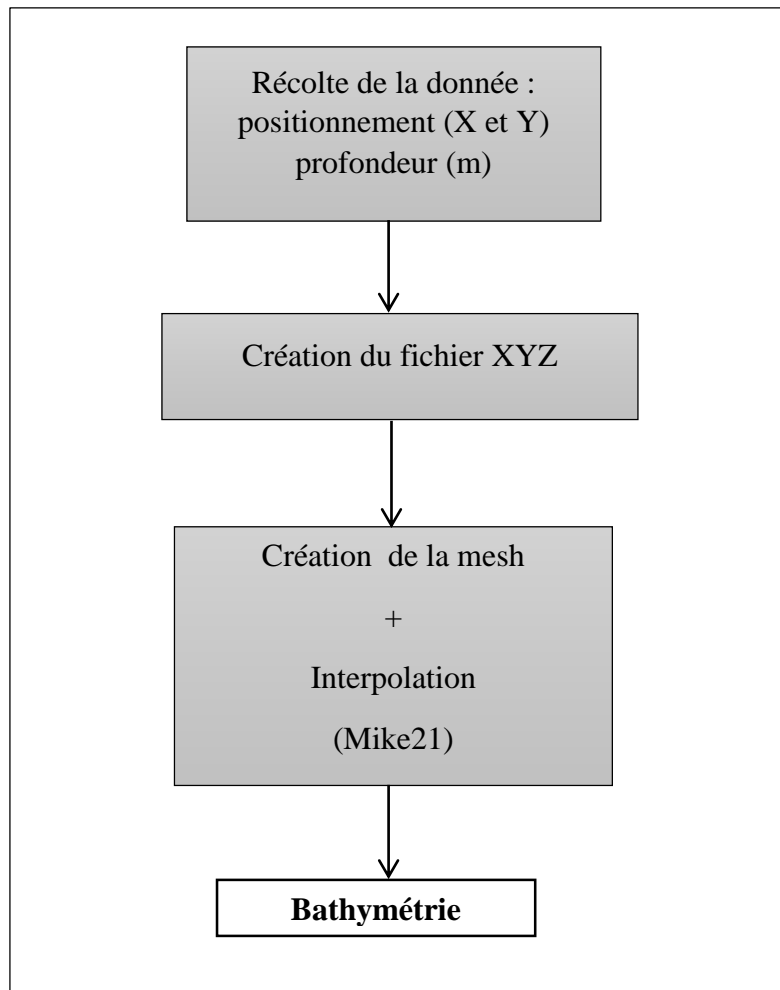


Figure 29: Organigramme de l'étude bathymétrique

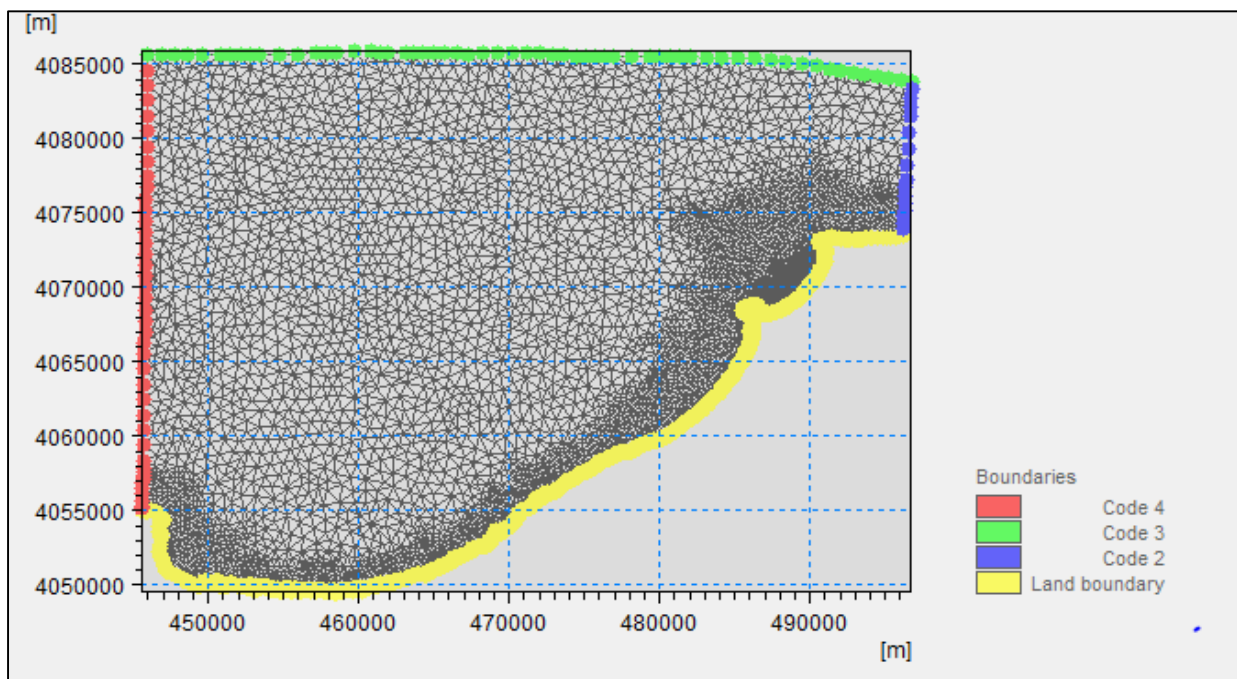


Figure 30: Emprise du maillage

La bathymétrie obtenue pour la baie de Bou-Ismaïl présente des valeurs comprises entre -1 m et -55 m au large. Bien que l'étude bathymétrique nécessite une précision assez importante pour les calculs hydrodynamiques (figure 31).

L'analyse de la carte bathymétrique de la zone Ouest montre des isobathes presque parallèle à la ligne de côte, très serrés entre -1 et -35m, cela est due généralement à morphologie complexe des fonds et les conditions hydrodynamiques ce qui montre une pente abrupte. Au-delà de cette profondeur, les isobathes se réorganisent et deviennent parallèle et un peu espacées vers le large.

L'analyse de la carte bathymétrique de la zone Est montre des isobathes plus au moins régulières, espacées et parallèles à la côte. La morphologie sous-marine dans la partie Ouest de cette zone (plage Chenoua et Grand bleu) est légèrement chahuté jusqu'à -20 m, par contre la partie Est de cette zone (plage Matares) présente des isobathes plus espacées.

L'analyse de la carte bathymétrique de la deuxième zone montre des isobathes plus au moins régulières et parallèles à la côte. La zone présente un fond marin assez régulier dont les isobathes sont très rapprochées traduisant une pente abrupte. Cependant la partie Ouest de cette zone présente une barre sous-marine et ce n'est qu'à partir de -5 m que ces isobathes redeviennent régulières traduisant une pente plus douce, généralement dû aux apports solides de cet Oued.

La bathymétrie utilisée dans le cadre de ce travail est la combinaison de données de trois sources (Données du terrain, NAVIONICS et GEBCO). La bathymétrie de la baie a été obtenue par la digitalisation de la carte publiée par NAVIONICS SonarChart™, édition 2021 à l'échelle de 1/250000 avec une résolution qui varie entre 100 et 0,5m du large vers la côte. Cette étude permet de créer une carte bathymétrique de la baie qui montre les contours sous-marins, les variations de profondeur et d'autres caractéristiques topographiques importantes.

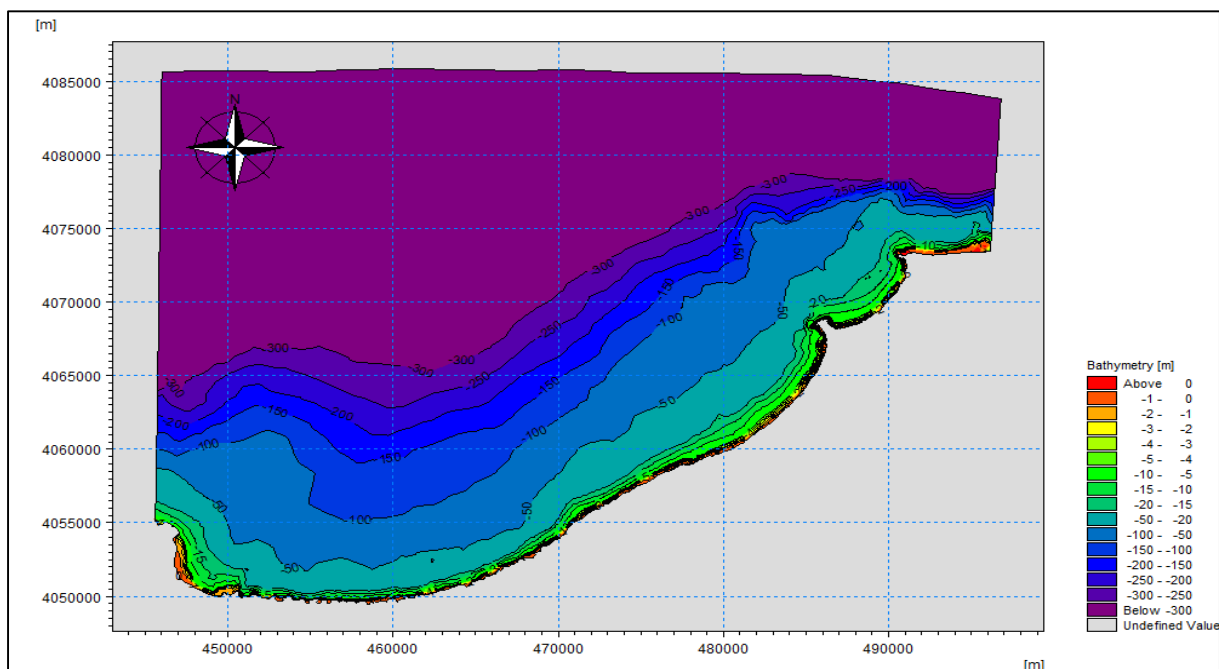


Figure 31: Carte bathymétrique de la grande baie de Bou Ismail

IV.4 Scénarios de simulation :

Une fois les directions sont détectées et les évènements extrêmes calculé (chapitre précédent). La méthode choisie est d'associer pour chaque période de retour d'un événement à l'ensemble des 3 directions de vents sa hauteur significative et son temps de pic. Ainsi, l'élévation du niveau marin (**rapport du GIEC 2019**) et voir les résultats (Tableau III-1-3) obtenus pour les houles et la courantologie sur les trois directions.

Note :

Il est à signaler, que toutes les modélisations ont été associées à un vent pour chaque direction (voir Tableau x). Les vitesse et direction moyenne du vent ont été obtenu après le traitement d'un enregistrement de 1992 à 2021 de la base de données WaveClimate dans la baie de bou ismail. Car le couplage d'un vent d'une période de retour avec une houle de la même période de retour, donne des résultats largement surestimés. Pour l'exemple, le couplage d'une houle et un vent de 100 ans, nous permet de calculer un scénario qui se produit une fois tous les 10000 ans (chose illogique vu la durée de vie des ouvrages maritimes qui est en moyenne de 100 à 500 ans). C'est une méthode qui permet de déterminer la probabilité d'occurrence des couples vents/houles est appelée généralement "analyse de fréquences conjointes" ou "analyse bi variée". Elle consiste à étudier la corrélation et la co-occurrence des variables vent et houle pour estimer la probabilité conjointe de leurs occurrences simultanées.

Cette approche permet de mieux comprendre les relations entre ces deux variables et d'évaluer les risques liés aux conditions météorologiques maritimes.

Une fois les simulations terminées, les résultats sont présentés sous forme de carte légendée et de tableaux comparatifs selon chaque direction, pour chaque paramètre d'output souhaité.

Afin, de pouvoir présenter l'ensembles des résultats obtenus lors des simulations et assurer une bonne interprétation de ces derniers, le choix des points d'extraction des caractéristiques de la houle, s'est porté sur deux points sur un même axe, répartis comme suit :

- Un point au centre de la baie de d'el djamila : $X = 499000$ m ; $Y = 4085100$ m.
- Un point au centre de la baie de bou ismail : $X = 513550$ m ; $Y = 4072000$ m.

Tableau 9:des inputs des simulations pour l'ensemble la période de retour 2ans

	Période de retour 2				Niveau de la mer
Paramètre de houle	Hs	Tp	U10	U10 direction (°)	NGA = +0.34 m Élévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
Direction					
W	4.79	12.2	8.52	249.09	
NNW	4.17	11.25	8.83	326.16	
NNE	4.10	9.4	8.7	25.38	

Tableau 10:des inputs des simulations pour l'ensemble la période de retour 5 ans.

	Période de retour 5				Niveau de la mer
Paramètre de la houle	Hs	Tp	U10	U10 direction (°)	NGA = +0.34 m Élévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
Direction					
W	5.20	9.56	20.6	249.09	
NNW	4.83	9.73	14.35	326.16	
NNE	4.74	9.75	14.3	25.38	

Tableau 11:des inputs des simulations pour l'ensemble la période de retour 10 ans.

	Période de retour 10				Niveau de la mer
Paramètre de le houle	Hs	Tp	U10	U10 direction (°)	NGA = +0.34 m Élévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
Direction					
W	5.46	20.44	10	249.09	
NNW	5.33	17.03	8.55	326.16	
NNE	5.23	14.9	6.47	25.38	

IV.5 Résultats des simulations

IV.5.1 Propagation des houles :

- Propagation des houles de direction Nord Nord-Est (22.5°)

Les houles NNE (figure 32) sont très fréquentes, surtout lors des tempêtes de printemps. Au large, les houles de direction nord-nord-est changent et ne conservent pas leurs caractéristiques initiales, la hauteur des houles diminue au fur et à mesure qu'elles se rapprochent vers la côte et commencent à ressentir l'effet de fond. Elles arrivent à une inclinaison de 20° à 40° par rapport au rivage, dérivent parallèlement au rivage, et reviennent en sens inverse. Les lignes orthogonales sont légèrement réfractées. Au voisinage des côtes et selon la morphologie du fond, les hauteurs de houle enregistrées comprises entre 0 m et 0,5 m.

Les vagues du nord-est arrivent perpendiculairement à la côte ouest (Chenoua Beach et Grand Blue), gardant la quasi-totalité de leur énergie au large. Cependant, les houles importantes du nord-nord-est (entre 1 m et 3,8 m) ont des hauteurs plus élevées que les autres directions. Zone Est (Duva Odda, El Khaloufi, Complexe Touristique, Sable d'Or, Azur, Palm Beach et plages de Sidi Fregisi).

- Propagation des houles de direction Ouest (270°)

L'image ci-dessus (Figure. 38) montre le plan de propagation de la houle à une profondeur de 60 m du rivage, venant de la direction Ouest, avec une hauteur significative de 5,6 m. Les vagues de cette direction ont tendance à arriver perpendiculairement au rivage et conservent une partie de leur énergie au voisinage de la côte. Les vagues atteignent la côte, avec des hauteurs allant de 0,8 m à 1 m, ce qui rend vulnérables les régions du centre et de l'est. Pour cette direction de houle (270° N). Des hauteurs plus basses (0 m et 0,4 m) ont été enregistrées près de Sidi Fredj.

- Propagation des houles de direction Nord Nord-Ouest (337.5°)

La figure ci-dessous montre le plan de propagation de la houle depuis une direction nord-nord-ouest jusqu'à une profondeur de 60 m du rivage. Une rotation comprise entre 20° et 40° se produit lorsque la ligne orthogonale de la vague se rapproche du rivage. Ces houles produisent une dérive côtière est-ouest le long de la côte (Figure 35). Les vagues perdent très peu d'énergie et les lignes orthogonales ne tournent que légèrement à l'approche du rivage. Ces données rendent les vagues les plus menaçantes à l'est, avec des hauteurs observées entre 1,2 m et 2,5 m.

Les houles du Nord-Ouest ont tendance à arriver de manière perpendiculaire à la côte en gardent presque la totalité de leurs énergies du large. Ces houles dont le coefficient de réfraction moyen est de 0,7 à 5 m peuvent générer des courants littoraux et entraîner l'érosion côtière. Au niveau de la zone de Sidi Fredj, la houle commence à perdre ses caractéristiques jusqu'à atteindre son minimum qui est de l'ordre de 0.50 m de hauteur prêt de la côte dû généralement à la diffraction de la houle au niveau de la jetée principale du port. Pour le port d'El Djamila

IV.5.2 Champs des courants HD

Les figures ci-dessus (Figure 33, 36, 39) montrent les champs de courants induits par les vagues calculés au moyen du modèle numérique MIKE21-HD pour les trois directions de houles sélectionnées.

D'après la figure 33, nous pouvons observer un courant important dirigé vers l'Ouest avec une vitesse de 0.20 m/s à 0.25 m/s générés par la houle de direction Nord Nord-Est .

Des vitesses importantes varient entre 0.5m /s à 0.75m /s enregistrées dans la zone centre et dû généralement à la concentration des orthogonales de la houle dans cette zone.

On remarque un changement de direction causé par la dissipation d'énergie suite à la présence des ouvrages de protection la vitesse du courant diminue à un intervalle de 0.75 m/s à 1 m/s au niveau de la plage de Moretti.

Les houles issues du secteur Nord Nord-Ouest (Figure 36) donnent naissance près de la côte à un courant de dérive dirigé vers l'Est, ce courant prend une direction avec des vitesses moyennes dans la partie centre où les vitesses des courant de dérive ne dépassent pas 0.75m /s.

Concernant la direction Ouest (figure 39), les courants sont moins importants que les autres directions. Avec une vitesse de 0.25 m/s d'après la cellule 8 dans la partie Ouest et une vitesse de 0.75 m/s d'après la cellule 4 dans la partie Est.

IV.5.3 Transport sédimentaire ST:

Au niveau de la zone de Sidi Fredj, le résultat de la carte obtenu montre qu'un transport longitudinal vers l'Est dans la zone de Moretti avec un débit de 0.0006 à 0.0012 m³/s/m ce qui provoque l'érosion de cette partie. Les houles provenant des directions Nord Nord-Est atteignent le site de façon plus ou moins frontale, engendrant la formation d'une dérive littorale dans la direction Est – Ouest, ce qui provoque l'ensablement du port.

Une forte érosion est présente au niveau du port de Sidi fredj avec un taux de 0.0042 à 0.0045 m³/s /m le sable est transporté par les courants de dérive vers la direction Ouest du port. On constate qu'il y a une tendance de perte de sédiments au voisinage d'oued de Mazafran vers le large engendré par des courants de retours avec un taux de 0.0072 à 0.0076 m³/s/m suite à la houle Nord Nord- Ouest.

Les houles en provenance du secteur Nord Nord-Est, engendrent une dérive littorale parallèle à la côte et orientée vers l'Ouest, ces courants de dérive transportent le sable vers l'Ouest sur la plage Ouest avec un débit de 0.0054 à 0.0060 m³/s /m pour la houle Nord Nord-Est. Les houles en provenance du secteur Nord Nord-Ouest engendrent une dérive littorale parallèle à la côte et orientée vers l'Est avec un taux d'environ 0.0012 à 0.0016 m³/s/m. La comparaison entre les différents débits engendrés par les houles des trois secteurs montre une prédominance du transport sédimentaire vers l'Ouest.

Remarque :

Les hauteurs de la houle, de même direction et de périodes de retour différentes, à l'approche de la côte atteignent des valeurs plus ou moins rapprochées comme dans le cas de la direction Nord Nord-Est avec une variation allant de 4.2m à 5.3m et de 3.1m à 3.7m au Nord Nord-Est.

Tandis que pour le secteur Ouest les valeurs sont plus variables allant de 2.1m à 4.3m, cela pourrait être dû à la réfraction de la houle vers la côte.

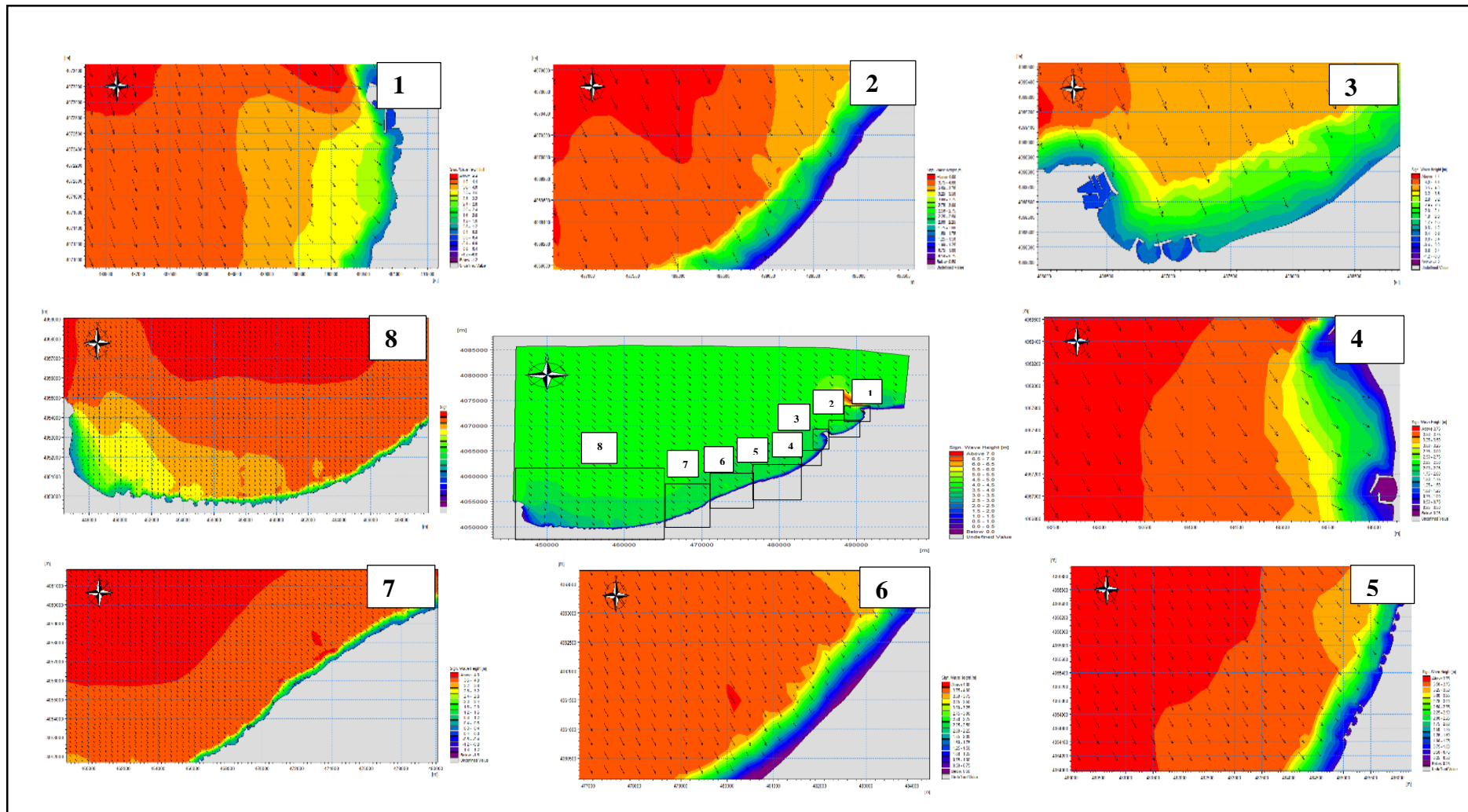


Figure 32: Le champ de vague de direction Nord Nord-Ouest de la période de 2ans

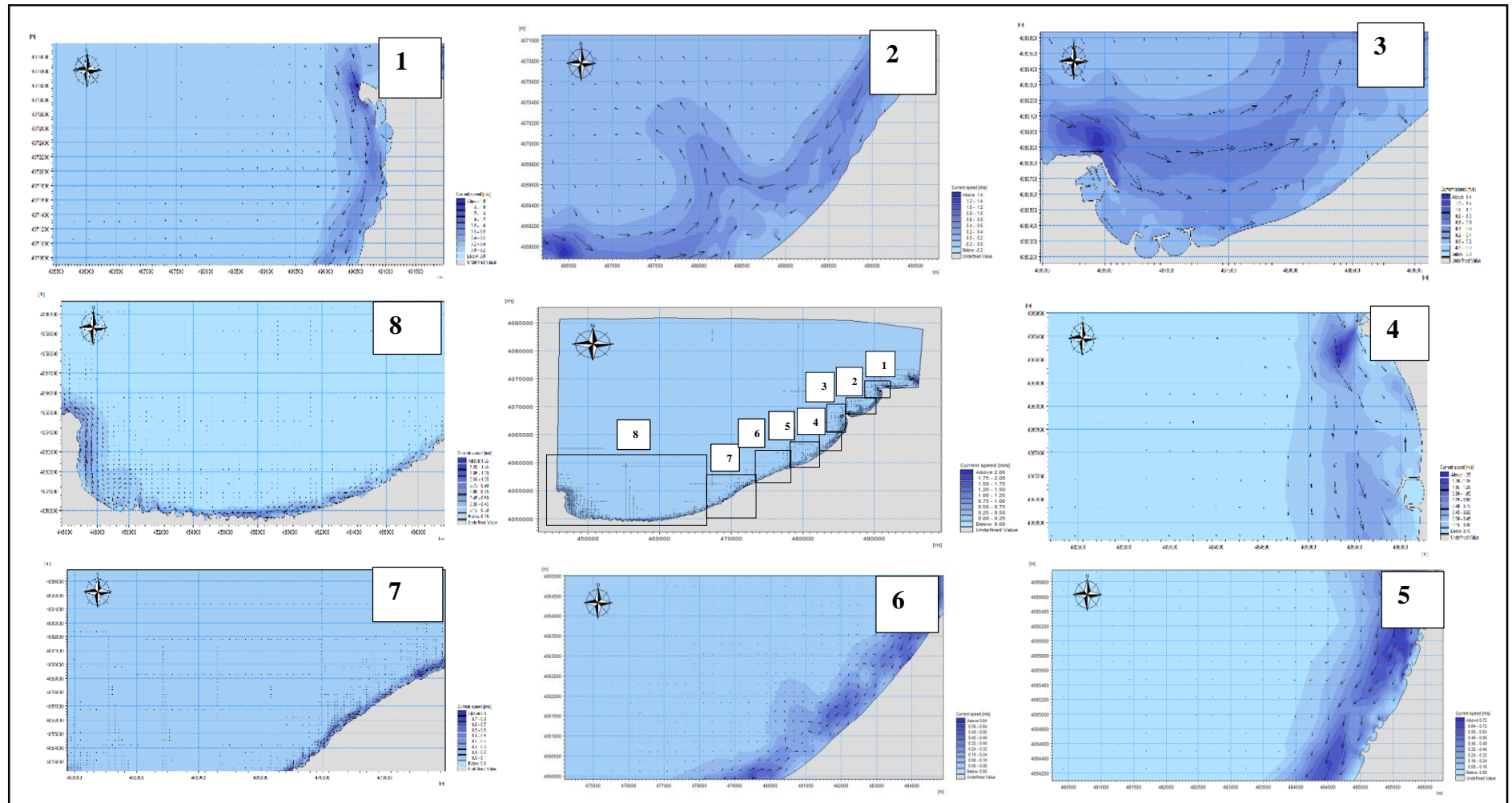


Figure 33: Le champ de courant de direction Nord Nord-Ouest de la période de 2ans

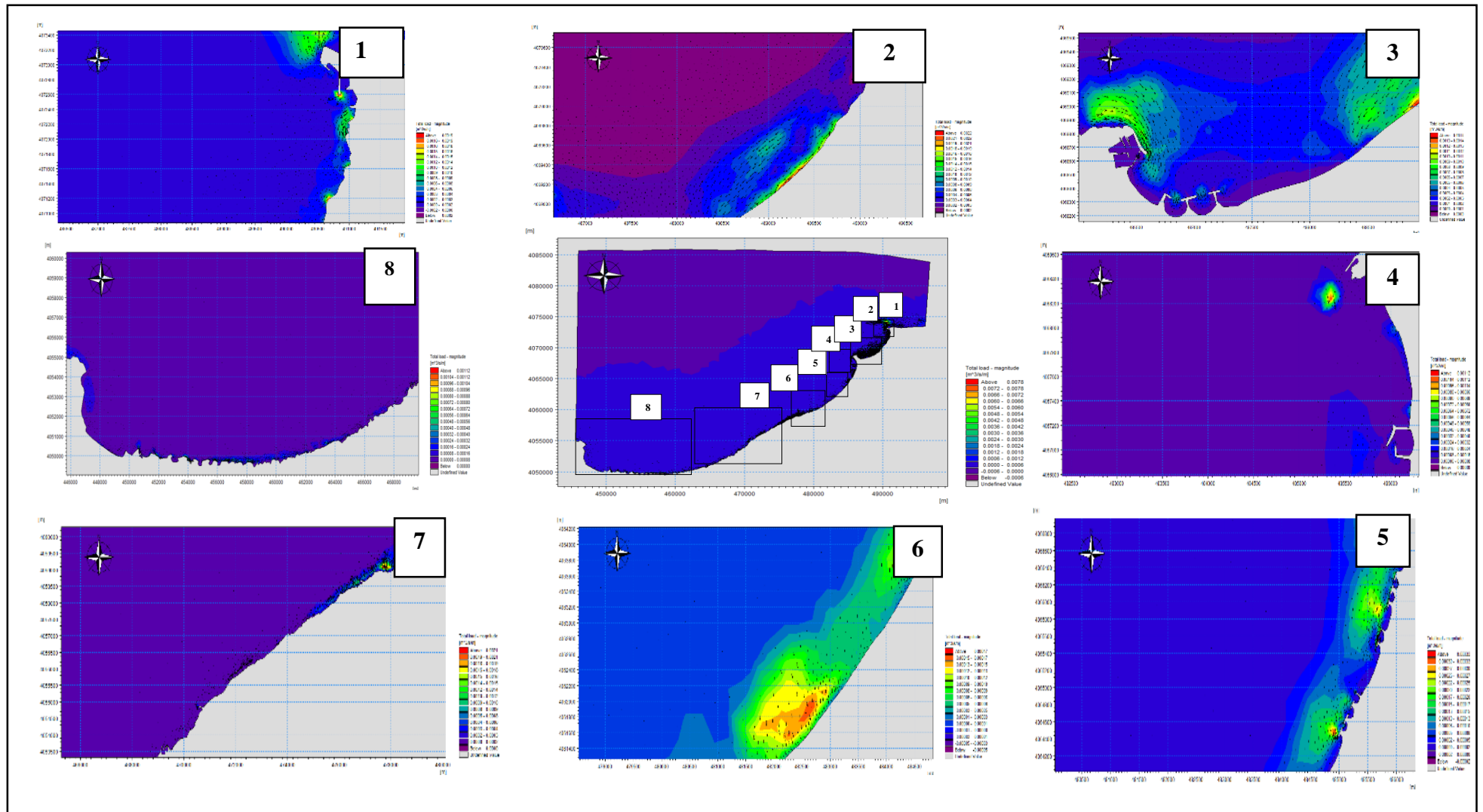


Figure 34:Transport sédimentaire engendré par les houles de direction Nord Nord-Ouest de la période de 2ans

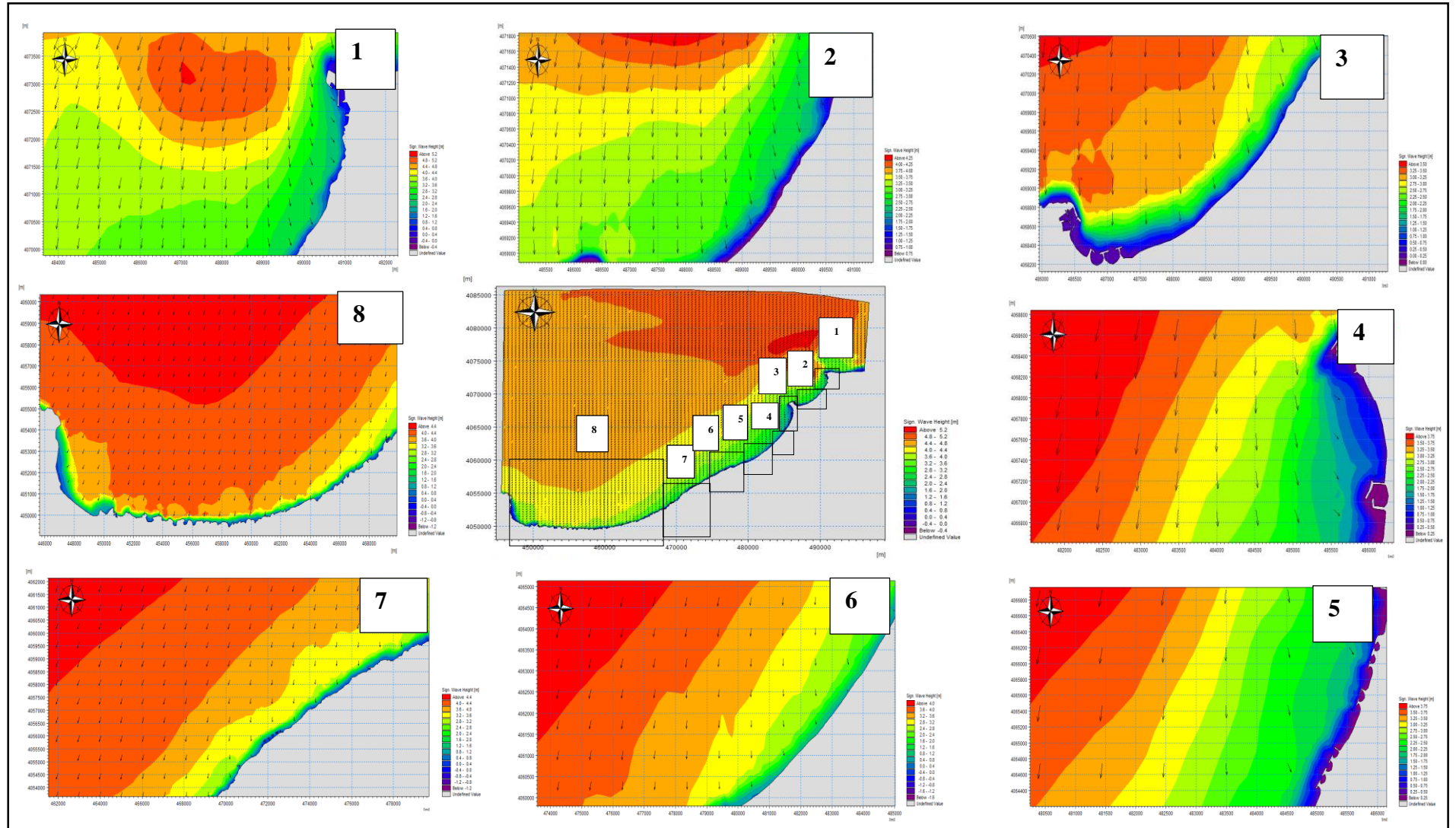


Figure 35: Le champ de vague de direction Nord Nord-Est de la période de 5ans

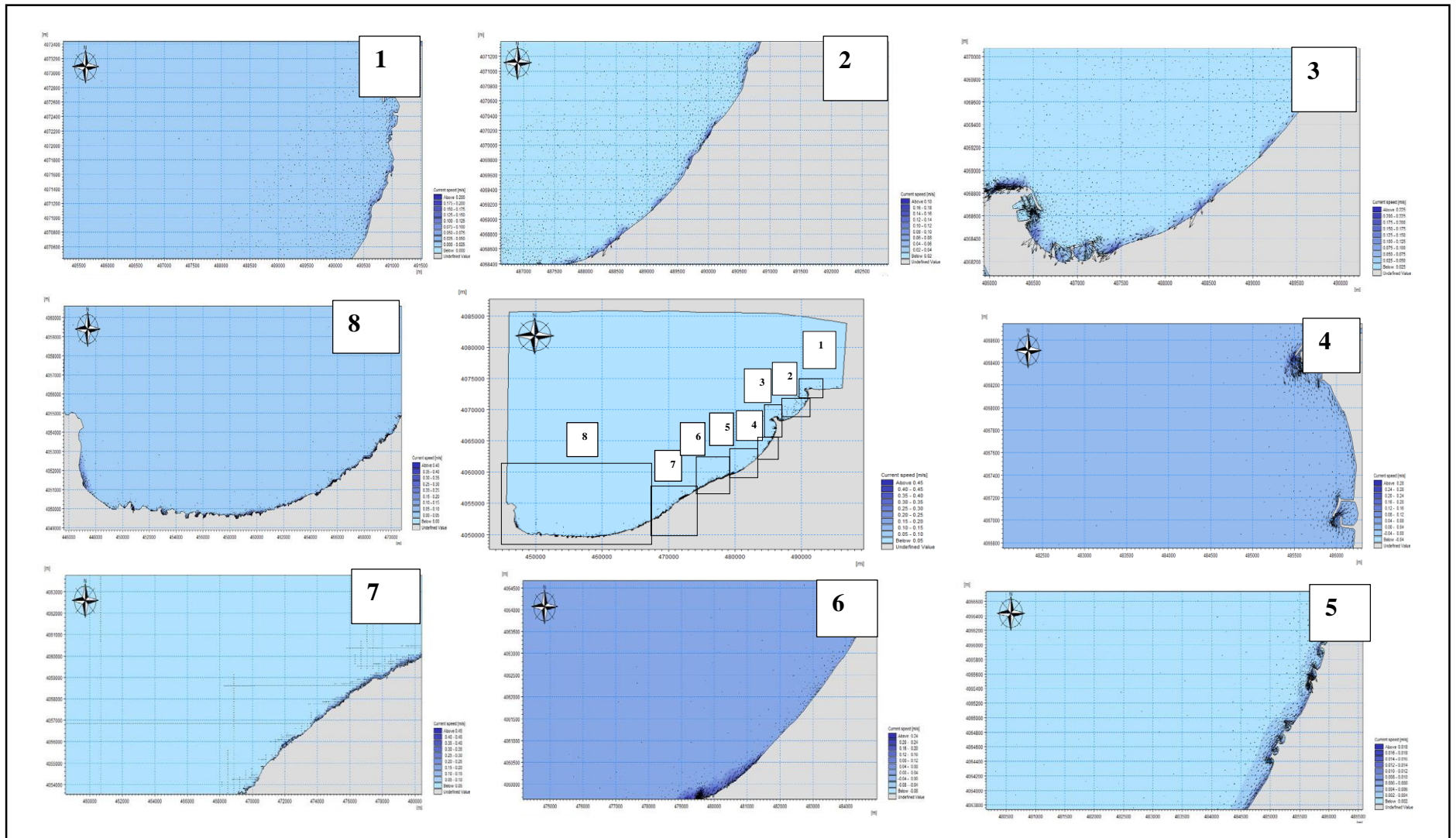


Figure 36: Le champ du courant engendré par les houles de direction Nord Nord-Est de la période de 5ans.

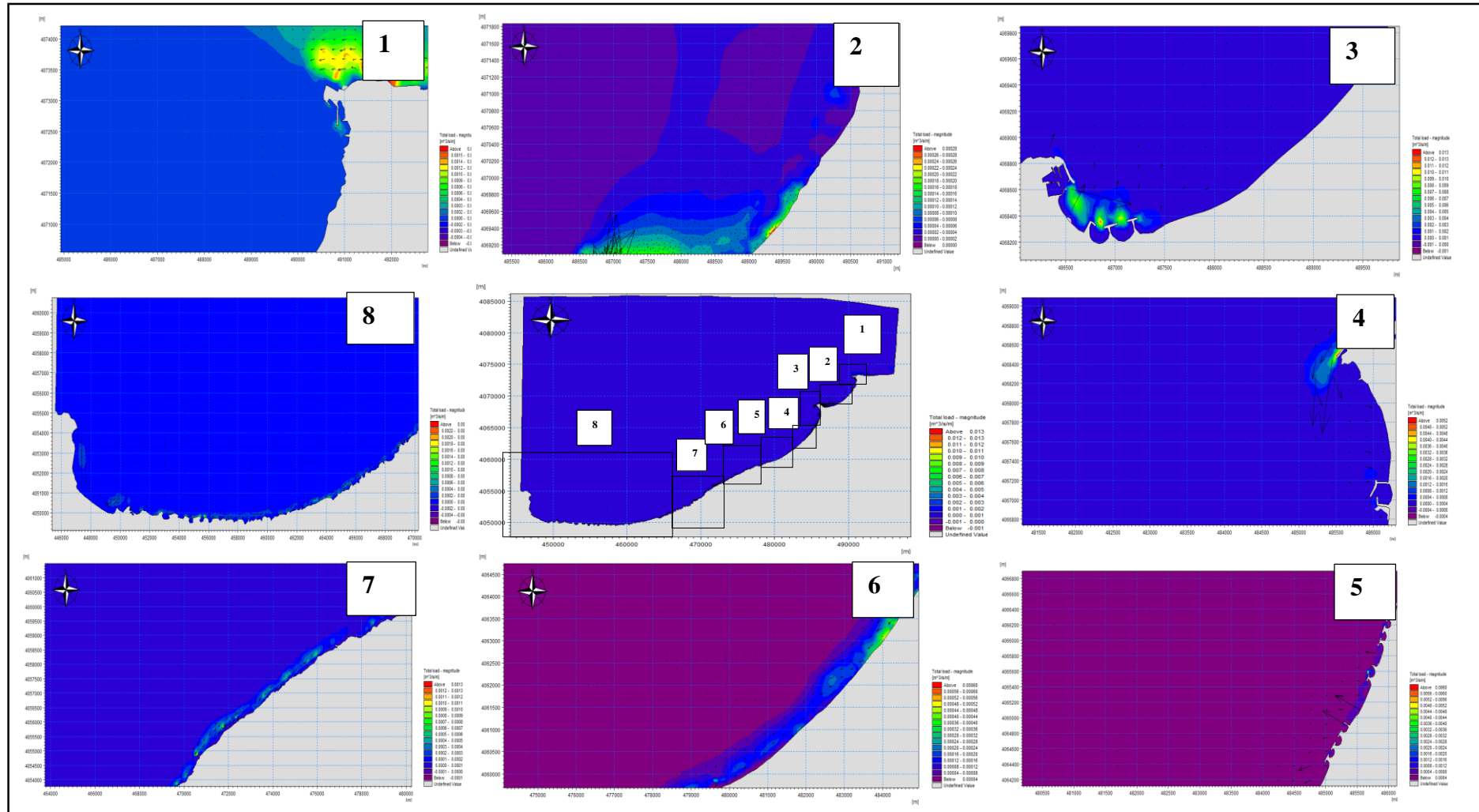


Figure 37: Transport sédimentaire engendré par les houles de direction Nord Nord-Est de la période de 5ans.

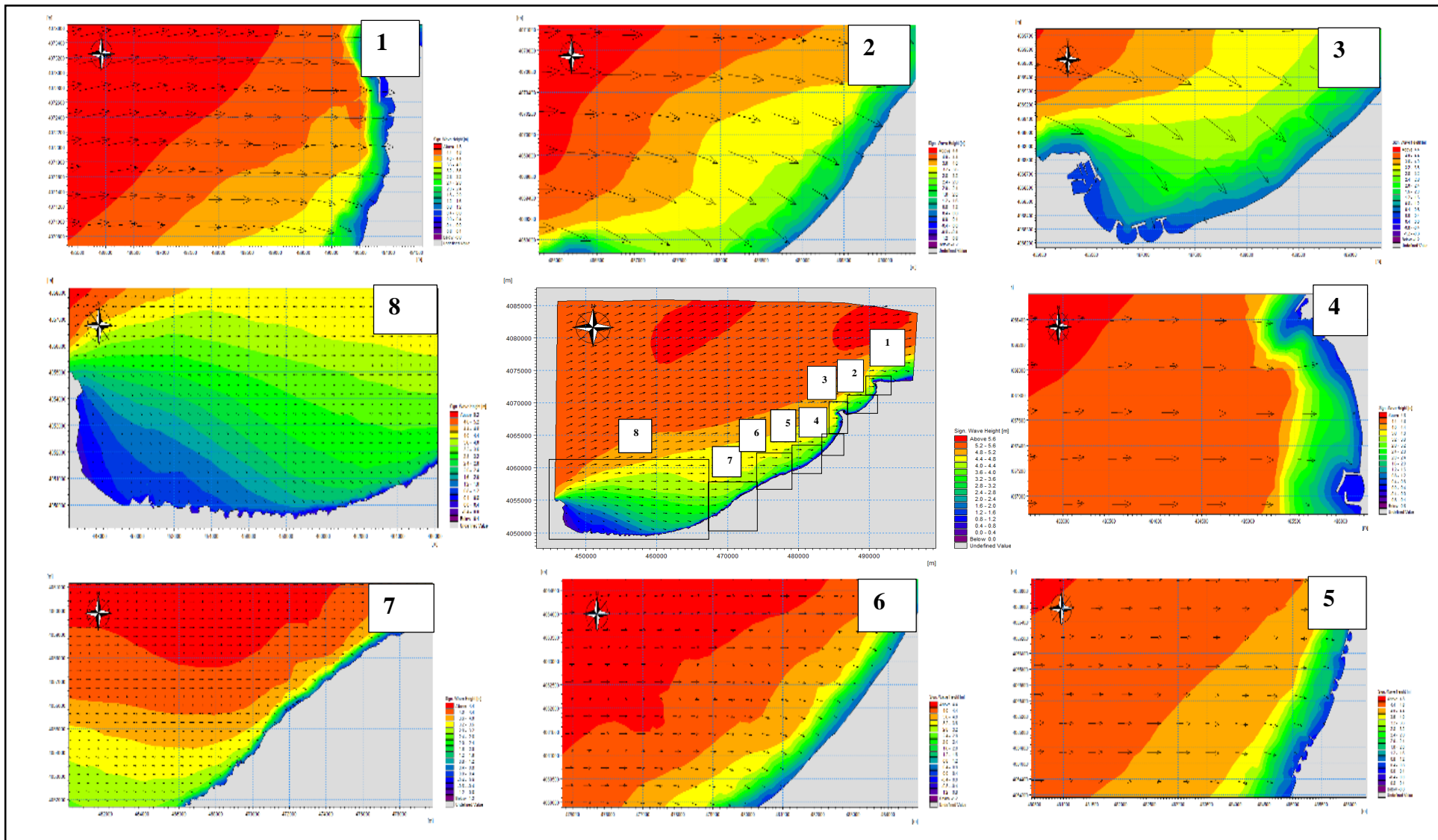


Figure 38: Le champ de vague de direction Ouest de la période de 10ans.

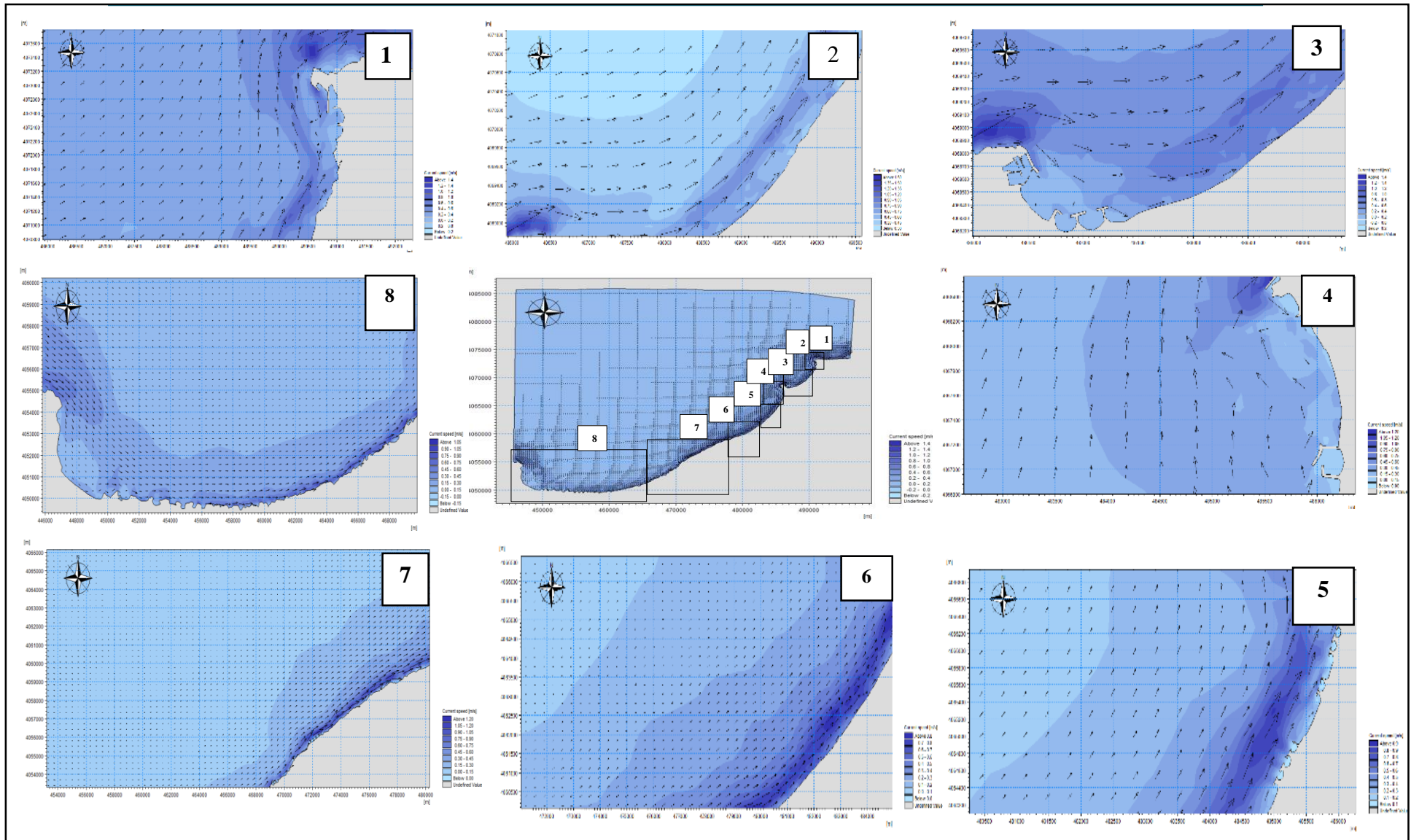


Figure 39: Le champ du courant engendré par les houles de direction Ouest de la période de 10 ans.

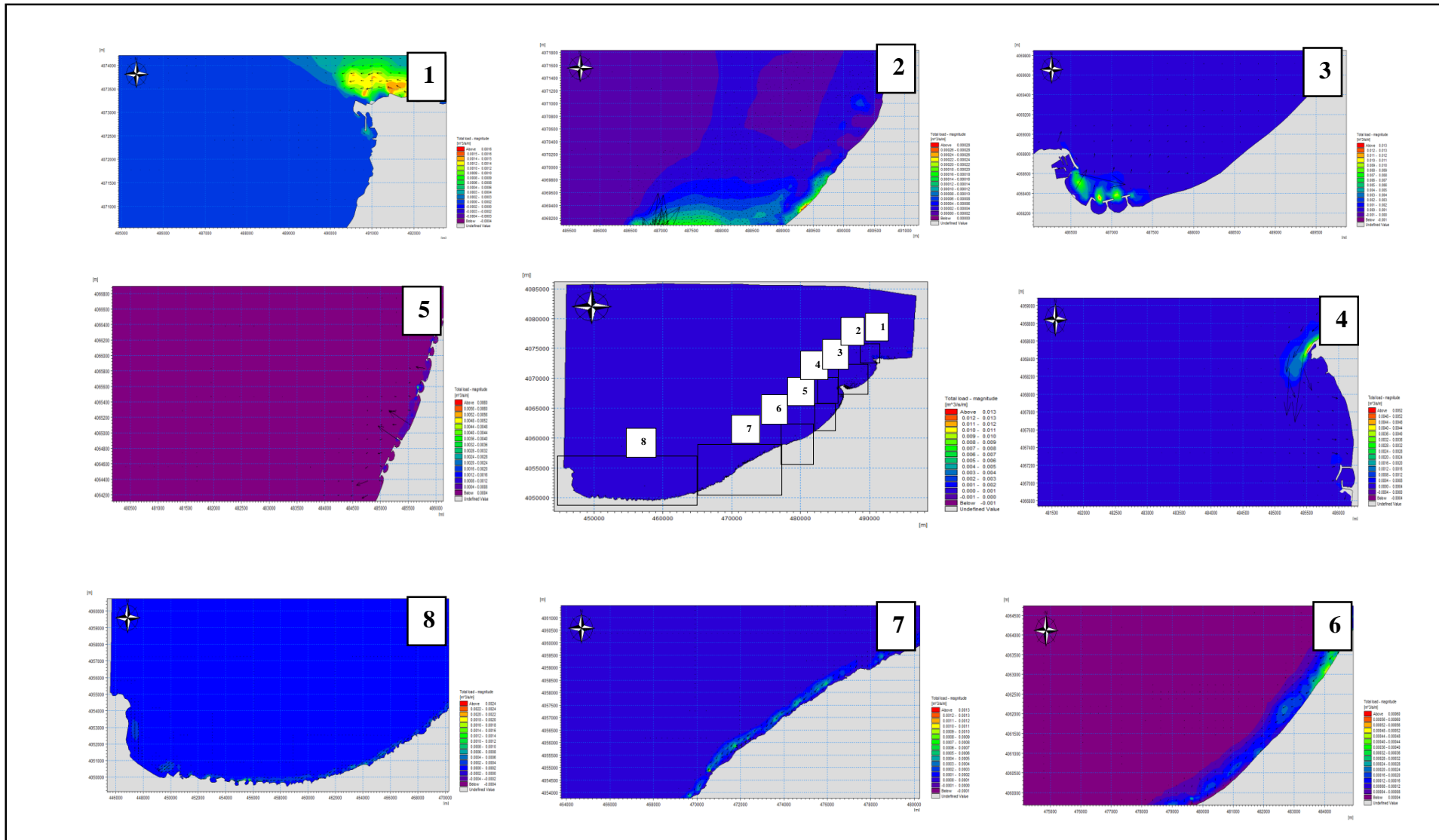


Figure 40: Transport sédimentaire engendré par les houles de direction Ouest de la période de 10 ans.

Chapitre V : Evolution spatio-temporelle du trait de côte de la baie de Bou-Ismaïl

Au cours des dernières années, le débat sur les changements climatiques, leurs causes et leurs effets a gagné en intensité (**Christy 2001 ; Nature 2002 ; Matthews 2003**). Il est nourri notamment par le fait que certaines des conséquences attendues, à l'exemple de l'élévation du niveau de la mer, pourraient être pesantes et déterminantes pour les zones côtières, très peuplées, et leurs gestion futur (**Granja et Carvalho 2000 ; Vilibic et al. 2000 ; Jenen et al.2001 ; Ravis et al. 2002 ; in DJOUDER et BOUTIBA, 2017**).

Cette élévation des plans d'eau marins et directement liée entre autres, à l'érosion des rivages qui constitue déjà l'un des problèmes mondiaux les plus épineux (**Cipriani et al. 2004 ; Cazes-Duvat 2005 ; Cai et al. 2009**) qui menacent gravement la pérennité des espaces côtiers de la planète. L'évolution globale des littoraux de la planète a été caractérisée dans l'étude menée par **Bird (1985)**. Cette étude a démontré la tendance majoritairement régressive des côtes basses sableuses mondiales avec 70% des rivages sableux qui démaigrissent contre 10% seulement qui avancent. En Algérie, c'est le cas du littoral de la baie de Bou Ismail qui connaît actuellement un important recul de son trait de côte. L'étude des changements passés d'un littoral peut se faire par différentes méthodes d'analyse. L'interprétation de photographies aériennes, l'analyse de cartes (historiques, topographiques et hydrographiques), l'étude des images satellitaires, des relevés sur le terrain et des enquêtes auprès des gens du milieu constituent autant de sources d'information pour étudier le trait de côte (**GRENIER et DUBOIS, 1990**).

Les deux points essentiels de ce chapitre sont les suivants :

1. Un suivi spatio-temporel de l'évolution du trait de côte de la grande baie de Bou Ismail entre 2007 et 2022, réalisé selon une méthode d'analyse diachronique.
2. L'établissement d'un scénario tendanciel prévisionnel à l'horizon 2044.

V.1 Méthodologie

La méthodologie utilisée dans cette étude comprend les étapes suivantes :

- Géo référencement des images satellitaires pour assurer leur positionnement géographique précis.
- Digitalisation des traits de côte de la baie de Bou Ismail entre 2007 et 2022 à partir des images satellitaires et des photographies aériennes.
- Génération de la ligne de base et des transects pour permettre une analyse plus approfondie de l'évolution du trait de côte dans la zone d'étude.
- Utilisation du logiciel de cartographie ArcGIS 10.4 avec le système de projection WGS84 UTM zone 31N pour le traitement des données.
- Lancement des calculs des paramètres statistiques des vitesses d'érosion (EPR), des taux d'évolution(LRR) et aussi les distances entre la ligne de rivage ancienne (2007) et la plus récente (2022) (NSM) à partir des traits de côtes.

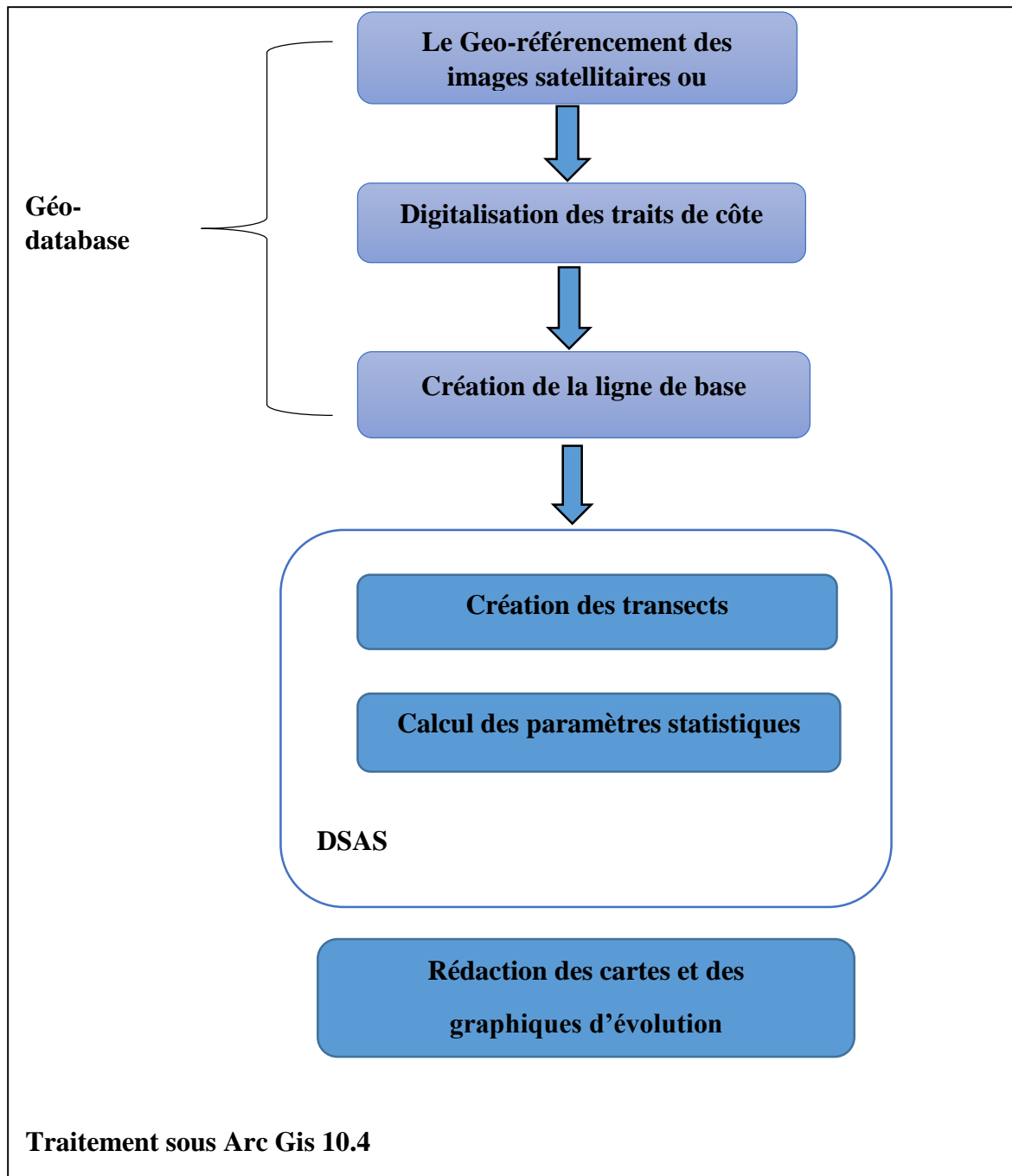


Figure 41:Étapes de la méthodologie de suivi du trait de côte. (OTMANI et al., 2019, Modifiée par ELHOUARI, HACHICHI, 2023).

V.2 Aperçus général des logiciels utilisés :

V.2.1 ArcGis :

Arc Gis est un logiciel qui offre de nombreuses possibilités pour manipuler, gérer, analyser et éditer des données géo spatiales. On peut travailler avec différentes couches d'informations spatiales pour analyser une ou plusieurs couches sous le contrôle d'autres couches.

Les seules connexions entre ces différentes couches sont des connexions spatiales, ils Appartiennent au même espace géographique et ont le même système de coordonnées. Le

logiciel Arc GIS 10.4 comprend trois applications principales : ArcCatalog, ArcMap et ArcToolbox.

- **ArcCatalog** : Un explorateur de données cartographiques tabulaires qui fournit des outils de gestion et d'organisation similaires aux systèmes d'exploitation tels que WINDOWS et DOS (copier, renommer, supprimer, créer des icônes, etc.). (BENALOU,2020).
- **ArcMap** : C'est l'application fondamentale du logiciel Arc GIS. Elle contient une boîte à outils, organisés sous forme de modules indépendants (extensions), permettant de gérer, manipuler, analyser et éditer les différentes couches d'informations de la base de données. (BENALOU,2020).
- **ArcToolbox** : C'est une boîte à outils permettant d'effectuer des conversions et de transferts de format et aussi de projection (ASBAI, 2013 in NADIR M., 2016).

V.2.2 Le DSAS (Digital Shoreline Analysis System) :

C'est une extension complémentaire au bureau Esri ArcGIS (10.4-10.7+) qui permet de calculer des statistiques de taux de changement à travers plusieurs positions historiques du littoral : vitesses d'érosion et accrétion (EPR) et des taux d'évolution (LRR) et les distances (NSM) à la base des traits de côtes digitalisés à partir des images satellitaires au cours de plusieurs années.

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

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

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

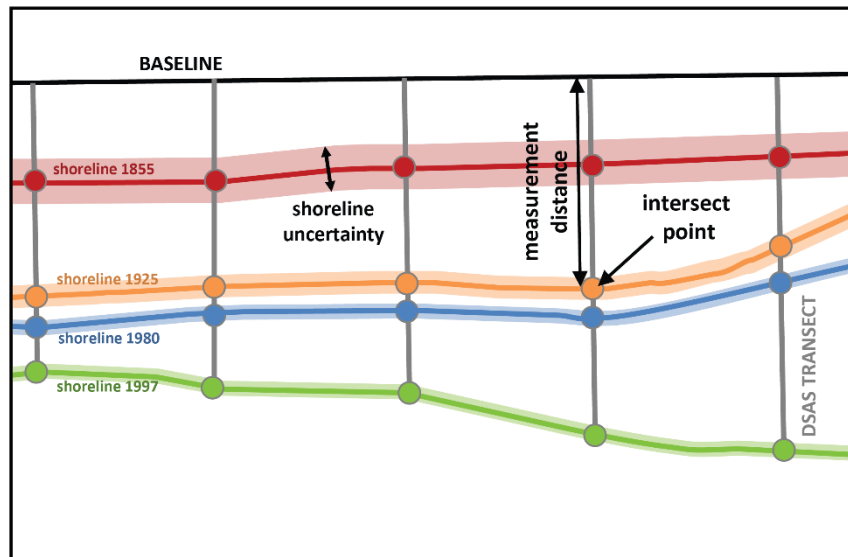


Figure 42: Transect généré DSAS (USGS, 2018).

V.2.3 Google earth pro :

Google Earth Pro est un logiciel ouvert qui, bien qu'il ne soit pas un "vrai" SIG, permet la visualisation, l'évaluation, la superposition et la création de données géospatiales. Cette ressource conviviale est souvent un intermédiaire utile pour les apprenants qui souhaitent en savoir plus sur les SIG et qui veulent commencer avec des processus et des outils de base

V.3 Analyse diachronique de la cinématique de la ligne de rivage

L'analyse des données a permis de définir la cinématique du trait de côte de l'ensemble de la grande baie avec une marge d'erreur estimée par +/- 0.6 m liée principalement à la résolution des images satellitaires utilisé dans ce traitement et aussi à la digitalisation.

La cinématique du trait de côte : Donc pour bien comprendre la dynamique de ces différents rivages selon l'échelle spatiotemporelle, on a projeté les résultats statistiques des indicateurs EPR, NSM et LPR, afin d'élaborer des cartes d'évolution représentatives de cette tendance selon les périodes suivantes

La variation spatio-temporelle de la ligne de rivage a été calculée par des intervalles de transects de 30 m sur les 58 km le long de la côte. 2046 transects ont été générés par DSAS et qui sont orientés perpendiculairement à la ligne de base. Trois techniques ont été utilisées :

EPR, LRR, et NSM pour analyser le taux de changement du rivage entre 2007 et 2022 le long de la côte de Bou Ismail

Pour une analyse diachronique complète, la zone d'étude est segmentée en 03 secteurs

(Est et Centre et Ouest). Le premier secteur qui se localise entre le port el Djamila à oued Béni Messous englobe des transects de 8 à 105. Le deuxième secteur s'étend de Oued Béni Messous jusqu'aux ouvrages de Mazafran ; il couvre les couvre les transects allant de 106 à

458. Enfin, le dernier secteur se localisant entre Ouvrages de mazafran jusqu'au port de Chenoua couvre des transects de 591 à 2046.

V.3.1 Evolution du rivage entre 2007 et 2012

Le trait de côte (tableau 12 et figure 43) connaît une position recul-avancée tout au long de la zone d'étude entre Chenoua à Tipaza et le port d'el Djamila avec une vitesse de recul moyenne de l'ordre de 0.35 m/an (accrétion modérée). Le rivage du secteur Est (transect 8 à 105) marque un important recul avec une moyenne d'EPR qui est égale à 2.70 m/an. Le niveau d'érosion maximum se trouve au niveau du transect 63 avec un recul égal à -7.59 m/an.

La côte du secteur centre est délimitée par Oued béni Messous jusqu'aux ouvrages de Mazafran (transect 106 à 458) , enregistre une accrétion très élevée avec une valeur d'EPR oscillent respectivement entre 2.43 m/an et 2.33 m/an .Concernant le secteur ouest entre les ouvrages de Mazafran et le port de Bouharoun (Transect 459 à 1105), il y a une accrétion élevée qui peut être justifiée par la présence de station d'épuration des eaux usées, les ouvrages de protection tel que le port de Khmisti et les apports dus à l'exutoire de l'oued de Mazafran avec les moyennes respectives de taux d'EPR de 1.91 m/an et 1.72 m/an. Entre le Port de Bouharoun et Chenoua (transect 1106 à 2017), une érosion d'une moyenne de taux d'EPR -1.65 m/ an est enregistrée. Cela est expliqué par une zone rocheuse au niveau ouest de la baie.

Tableau 12: Evolution du trait de côte de la baie de Bou Ismail entre 2007 et 2012.

Secteur	Transects	Cellules sédimentaires	Taux moyen d'évolution (EPR m/an, NSM m)	
			EPR	NSM
Secteur EST	8 à 105	Port el Djamila à Oued Béni Messous	EPR	2.70
			NSM	13.51
Secteur Centre	106 à 303	Oued Béni Messous au Port de Sidi Fredj	EPR	2.43
			NSM	12.16
	304 à 458	Port de Sidi Fredj aux ouvrages de Mazafran	EPR	2.33
			NSM	11.67
Secteur OUEST	459 à 590	Ouvrages de Mazafran à l'exutoir de Mazafran	EPR	1.91
			NSM	9.56
	591 à 1105	Exutoir de Mazafan au Port de Bouharoun	EPR	1.72
			NSM	8.63
	1106 à 2017	Port de Bouharoun a Chenoua	EPR	-1.65
			NSM	-8.28
Le taux moyen	EPR = 0.35 m/an		NSM + 7.8 m	

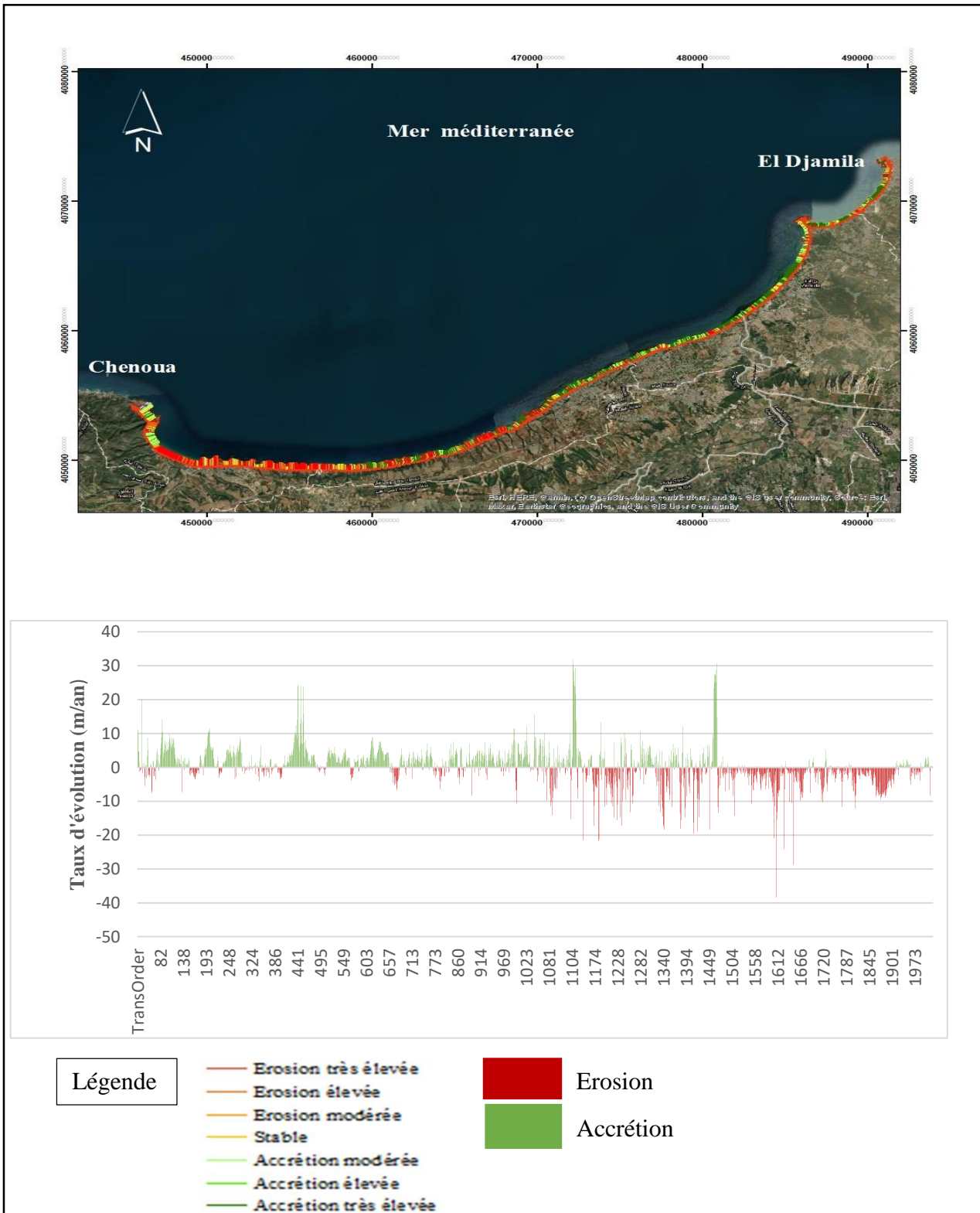


Figure 43: Evolution spatiotemporelle du trait de côte de la baie de Bou Ismail (2017) : carte de repartition spatiale (haut) et histogramme du taux d'évolution par transect (bas)

V.3.2 Evolution du rivage entre 2012 et 2017

Le trait de côte connaît une position recul-avancée tout au long de la zone d'étude entre Chenoua à Tipaza et le port d'el Djamila avec une vitesse de recul moyenne d'EPR de l'ordre de 1.91 m/an (accrétion élevée).

Le rivage du secteur Est (transect 8 à 105) marque un important recul avec une moyenne d'EPR qui est égale à 2.05 m/an. Le niveau d'érosion maximum se trouve au niveau du transect 1102 avec un recul égal à -12.65 m/an. La côte du secteur centre est délimitée par Oued béni Messous jusqu'aux ouvrages de Mazafran (transect 106 à 303) , enregistre une accrétion modérée avec une valeur d'EPR oscillent respectivement de 0.79 m/an .et de(transect 304 a 458) enregistre une accrétion trèsélevée avec un taux de 6.72. Concernant le secteur ouest entre les ouvrages de Mazafran et le port de Bouharoun (Transect 459 à 590), il y a une accrétion modérée avec une valeur d'EPR de 0.02 m/an.

On remarque qu'il Ya une accrétion élevée (transect 591 à 1105) peut être justifiée par la présence de station d'épuration des eaux usées, les ouvrages de protection tel que le port de Khmisti et les apports dus à l'exutoire de l'oued de Mazafran avec les moyennes respectives de taux d'EPR de 1.02 m/an .Entre le Port de Bouharoun et Chenoua (transect 1106 à 2017), une accrétion très élevée d'une moyenne de taux d'EPR 2.17 m/ an est enregistrée.

Tableau 13:Evolution du trait de côte de la baie de Bou Ismail entre 2012 et 2017

Secteur	Transects	Cellules sédimentaires	Taux moyen d'évolution (EPR m/an, NSM m)	
			EPR	NSM
Secteur EST	8 à 105	Port el Djamila à Oued Béni Messous	EPR	2.05
			NSM	10.25
Secteur Centre	106 à 303	Oued Béni Messous au Port de Sidi Fredj	EPR	0.79
			NSM	3.96
	304 à 458	Port de Sidi Fredj aux ouvrages de Mazafran	EPR	6.72
			NSM	33.62
Secteur OUEST	459 à 590	Ouvrages de Mazafran à l'exutoire de Mazafran	EPR	0.02
			NSM	0.13
	591 à 1105	Exutoire de Mazafan au Port de Bouharoun	EPR	1.02
			NSM	5.09
	1106 à 2017	Port de Bouharoun a Chenoua	EPR	2.17
			NSM	10.85
Le Taux moyen	EPR = 1.91 m/an		NSM = 10.85m	

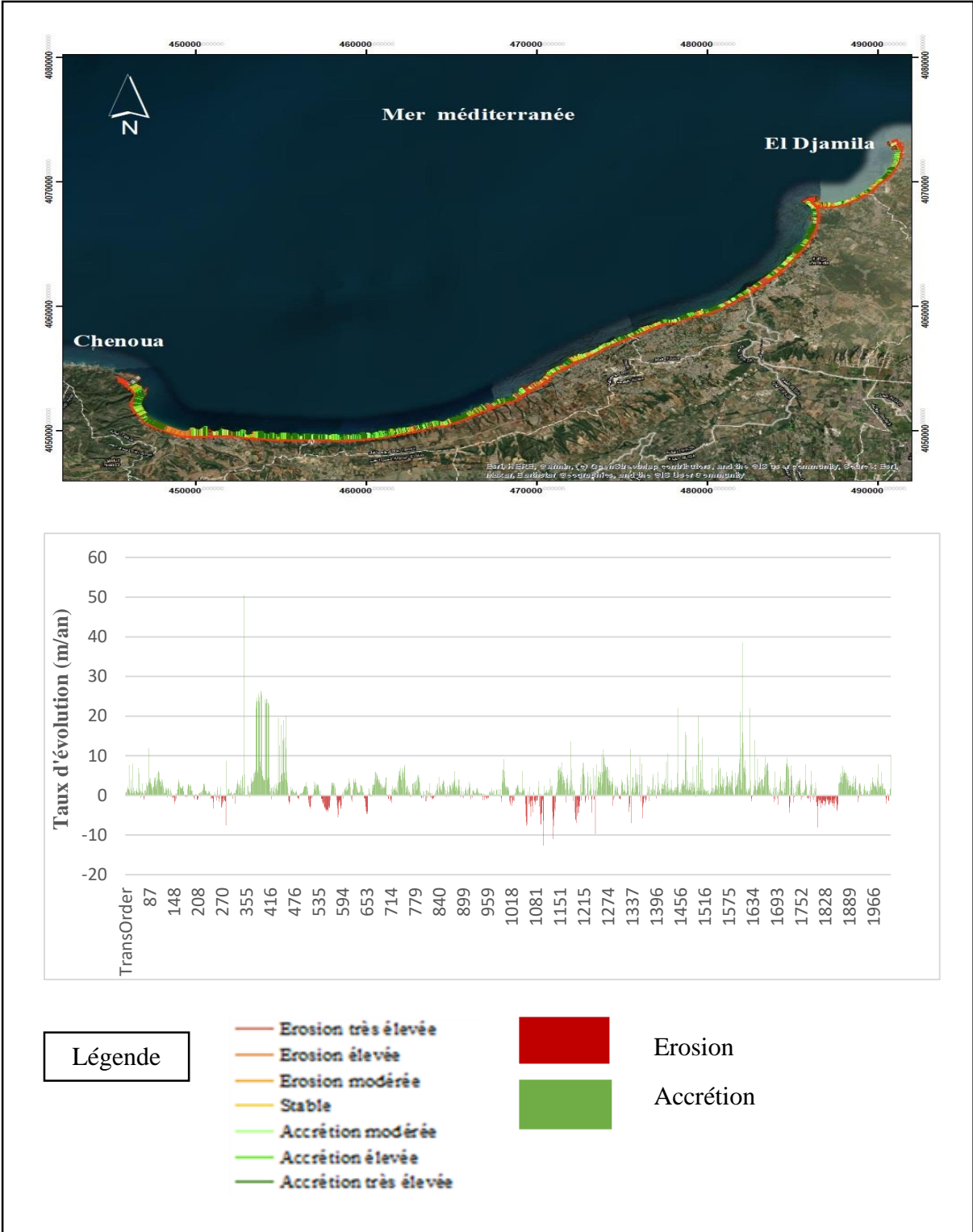


Figure 44:Évolution spatio-temporelle du trait de côte de la baie de Bou Ismail (2012-2017) : carte de répartition spatiale (haut) et histogramme du taux d'évolution par transect (bas)

V.3.3 Evolution du rivage entre 2017 et 2022

Le trait de côte connaît une position recul-avancée tout au long de la zone d'étude entre Chenoua à Tipaza et le port d'el Djamila (tableau 14 et figure 45) avec une vitesse de recul moyenne de l'ordre de 0.84 m/an (accrétion modérée). Le rivage du secteur Est (transect 8 à 105) marque un important recul avec une moyenne d'EPR qui est égale à 0.35 m/an. Le niveau d'érosion maximum se trouve au niveau du transect 263 avec un recul égal à -27.7 m/an. La côte du secteur centre est délimitée par Oued béni Messous jusqu'aux ouvrages de Mazafran (transect 106 à 458), enregistre une accrétion modérée avec une valeur d'EPR oscillent respectivement entre 0.97 m/an et 0.14 m/an.

Concernant le secteur ouest entre les ouvrages de Mazafran et le port de Bouharoun (Transect 459 à 590), il y a une accrétion élevée avec une valeur d'EPR de 1.74 m/an .On remarque qu'il y a une accrétion très élevée (transect 591 à 1105) qui peut être justifiée par la présence de station d'épuration des eaux usées, les ouvrages de protection tel que le port de Khmisti et les apports dus à l'exutoire de l'oued de Mazafran avec les moyennes respectives de taux d'EPR de 2.27m/an .Entre le Port de Bouharoun et Chenoua (transect 1106 à 2017), une accrétion très élevée d'une moyenne de taux d'EPR 1.29 m/ an est enregistrée.

Tableau 14: Evolution du trait de côte de la baie de Bou Ismail entre 2017 et 2022.

Secteurs	Nombre de transects	Cellules sédimentaires	Taux moyen d'évolution	
			EPR	NSM
Secteur Est	8 à 105	Port el Djamila à Oued Béni Messous	EPR	0.35
			NSM	1.86
Secteur Centre	106 à 303	Oued Béni Messous au Port de Sidi Fredj	EPR	0.97
			NSM	4.86
	304 à 458	Port de Sidi Fredj aux ouvrages de Mazafran	EPR	0.14
			NSM	0.74
Secteur Ouest	459 à 590	Ouvrages de Mazafran à l'exutoire de Mazafran	EPR	1.74
			NSM	8.74
	591 à 1105	Exutoire de Mazzafan au Port de Bouharoun	EPR	2.27
			NSM	2.72
	1106 à 2017	Port de Bouharoun a Chenoua	EPR	1.29
			NSM	6.48
Le taux moyen	EPR =0.84 m/an		NSM = 25.4	
	m			

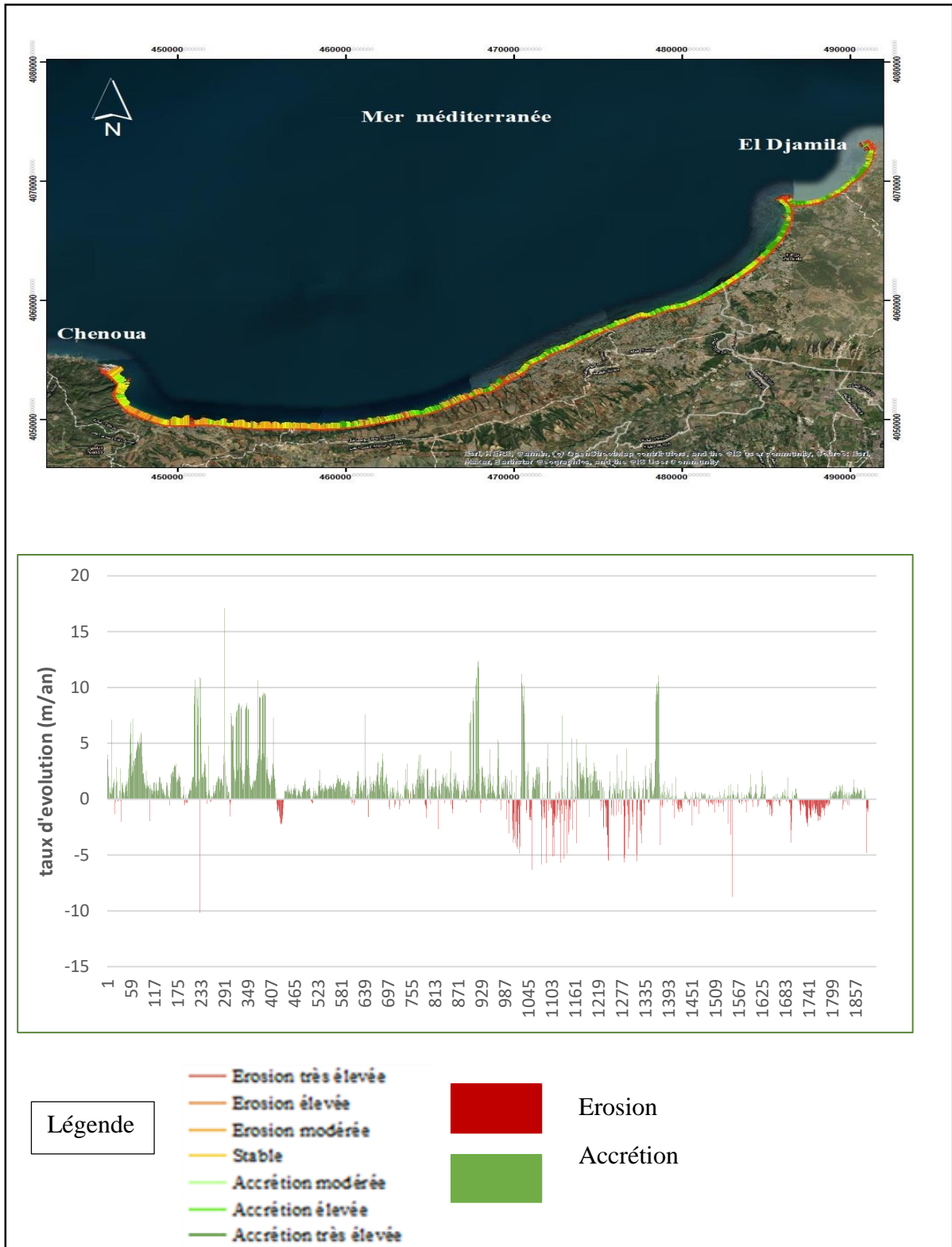


Figure 45:Évolution spatiotemporelle du trait de côte de la baie de Bou Ismail (2017-2022): carte de répartition spatiale (haut) et histogramme du taux d'évolution par transect (bas)

V.3.4 Evolution du rivage entre 2007 et 2022

Le trait de côte connaît une position recul-avancée tout au long de la zone d'étude entre Chenoua à Tipaza et le port d'el Djamilia (tableau et figure 46) avec une vitesse de recul

moyenne de l'ordre de 1.02 m/an (accrétion élevée). Le rivage du secteur Est (transect 8 à 105) marque un important recul avec une moyenne d'EPR qui est égale à 0.27 m/an. Le niveau d'érosion maximum se trouve au niveau du transect 263 avec un recul égal à -10.1 m/an.

La côte du secteur centre est délimitée par Oued Béni Messous jusqu'aux ouvrages de Mazzafran (transect 106 à 458), enregistre une accrétion modérée avec une valeur d'EPR oscillent respectivement entre 1.41 m/an et 0.69 m/an. Concernant le secteur ouest entre les ouvrages de Mazafran et le port de Bouharoun (Transect 459 à 590), il y a une accrétion élevée avec une valeur d'EPR de 3.62 m/an .On remarque qu'il y a une accrétion très élevée (transect 591 à 1105) peut être justifiée par la présence de station d'épuration des eaux usées, les ouvrages de protection tel que le port de Khmisti et les apports dus à l'exutoire de l'oued de Mazafran avec les moyennes respectives de taux d'EPR de 1.98m/an. Entre le Port de Bouharoun et Chenoua (transect 1106 à 2017), une accrétion très élevée d'une moyenne du taux d'EPR 2.01 m/ an est enregistrée.

Secteurs	Nombre de transects	Cellules sédimentaires	Taux moyen d'évolution	
			EPR	NSM
Secteur Est	8 à 105	Port el Djamila à Oued Béni Messous	EPR	0.27
			NSM	4.25
Secteur Centre	106 à 303	Oued Béni Messous au Port de Sidi Fredj	EPR	1.41
			NSM	21.22
	304 à 458	Port de Sidi Fredj aux ouvrages de Mazafran	EPR	0.69
			NSM	14.27
Secteur Ouest	459 à 590	Ouvrages de Mazafran à l'exutoire de Mazafran	EPR	3.62
			NSM	51.36
	591 à 1105	Exutoire de Mazzafan au Port de Bouharoun	EPR	1.98
			NSM	29.75
	1106 à 2017	Port de Bouharoun a Chenoua	EPR	2.01
			NSM	30.27
Le taux moyen	EPR = 1.02 m/an		NSM = 25.18m	

Tableau 15:Évolution du trait de côte de la baie de Bou Ismail entre 2007 et 2022.



Figure 46:Évolution spatiotemporelle du trait de côte de la baie de Bou Ismail (2007-2022) : carte de répartition spatiale (haut) et histogramme du taux d'évolution par transect (bas)

V.3.5 L'évolution provisionnelle du trait de côte 2022-2044

Le trait de côte à échéance 2044 est défini comme étant la limite maximale en amont où des instabilités peuvent se reproduire, Ce trait de côte a été extrapolé (figure 47) à partir des données d'évolution historique moyenne de la ligne du rivage entre 2007 et 2022. Au niveau des côtes sableuses, aucune théorie spécifique n'est utilisée pour évaluer les conséquences du réchauffement climatique.

La situation future du littoral peut être définie à partir de modèles mathématiques non linéaires basés sur le taux d'érosion et d'accumulation, la fonction temporelle, ou l'élévation du niveau de la mer. Parmi les différentes approches historiques existantes, la méthode mathématique non linéaire a été choisie, car elle est considérée comme la technique la moins aléatoire.

Parmi ces derniers, les modèles de la régression linéaire (LRR) et celui du taux du point extrême (EPR) restent les plus utilisés.

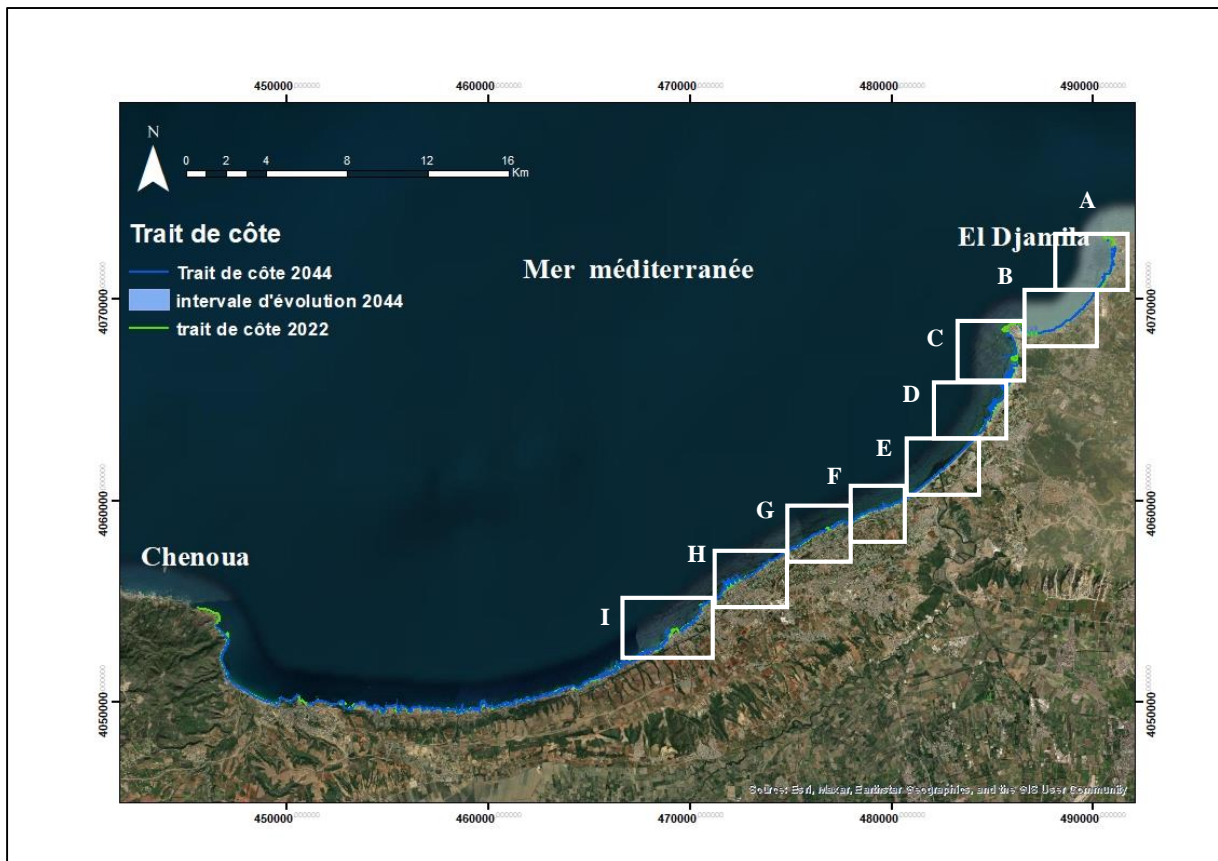


Figure 47: Carte d'évolution du trait de côte entre 2022-2044 de toute la baie de Bou Ismail

Chapitre V : Evolution spatio-temporelle du trait de côte de la aie de Bou Ismail

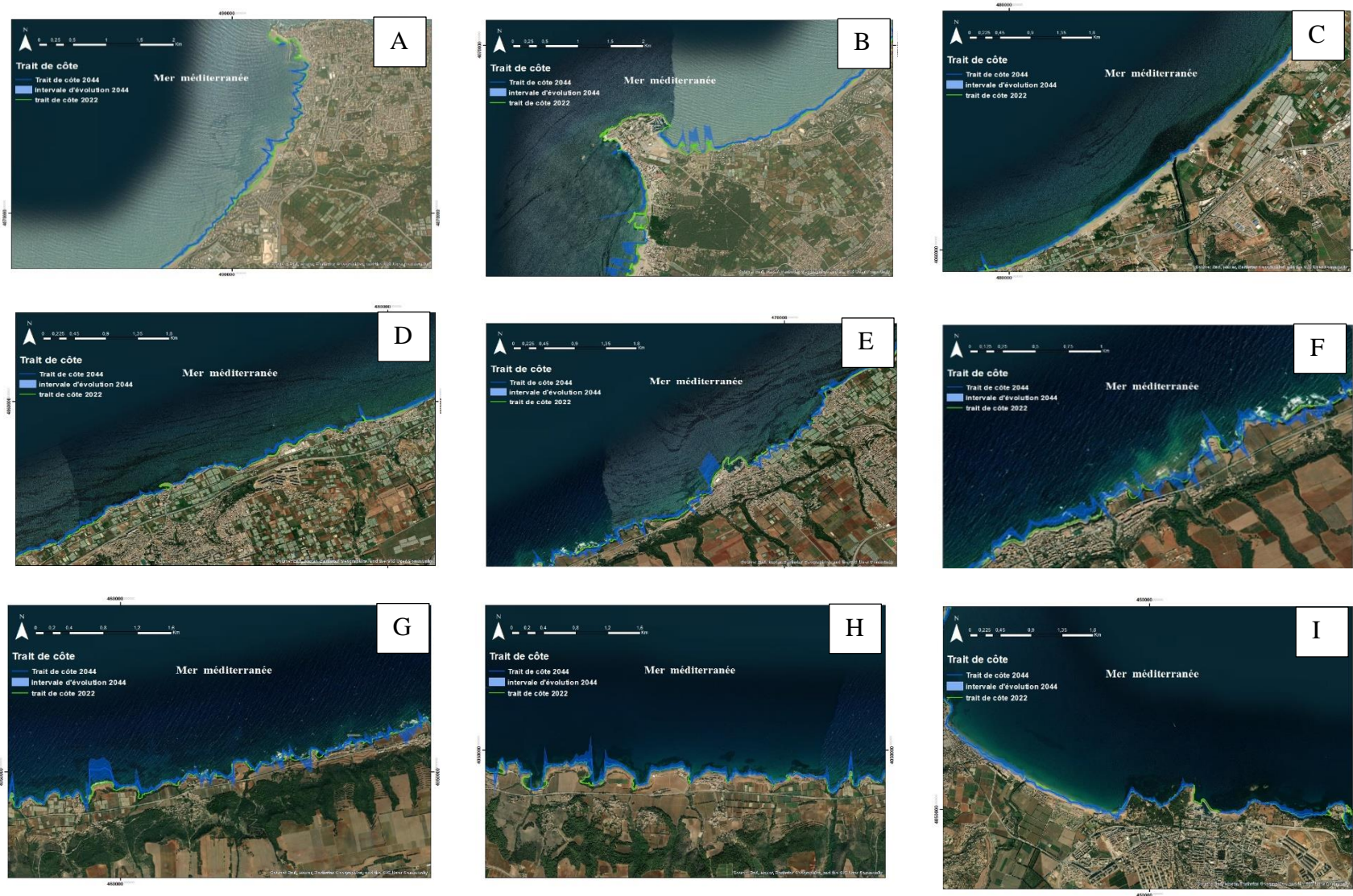


Figure 48: Carte d'évolution du trait de côte entre 2022-2044 des différentes sections de la baie de Bou Ismail

Conclusion

La détermination de l'évolution spatio-temporelle du trait de côte à l'échelle locale est basée sur l'utilisation des images satellitaires et des photographies aériennes. Les données ont été redressées et projetées dans le système de projection UTM/WGS84 Zone 31 Nord. La numérisation des lignes de rivage a été effectuée pour les différents documents (photos aériennes, image satellitaire). Les lignes obtenues ont été introduites dans une base d'informations géographiques afin d'être analysées.

L'analyse spatio-temporelle de l'évolution du trait de côte de la baie de bou ismail entre 2007 et 2022 a montré une situation d'érosion, particulièrement dans la partie orientale. Cette variation a été mesurée par trois approches (EPR, LRR, NSM),

Chapitre VI :La Submersion marine

Aujourd'hui, il est largement admis que les catastrophes côtières sont assignables au changement climatique planétaire. Ces catastrophes naturelles auront un impact négatif sur la zone côtière dans la mesure où elle abrite des établissements humains et des infrastructures. Longue d'un peu plus de 1600 km, la côte algérienne constitue un atout indéniable pour le développement économique et social de tout le territoire national algérien, en particulier le développement du tourisme. Cette côte présente également certains risques pour son exploitation et son développement, y compris les problèmes liés à l'érosion et les inondations côtières. Ces impacts peuvent augmenter avec l'élévation attendue du niveau marin (**JIMENEZ ET SANCHEZ-ARCILLA, 1997**). L'Algérie fait face à l'un des défis majeurs dans les années à venir : l'élévation actuelle et future du niveau de la mer Méditerranée. En raison de la faible topographie de la région et d'une occupation humaine excessive et parfois désordonnée, cette zone est particulièrement vulnérable à l'augmentation du niveau moyen de la mer Méditerranée, ce qui entraîne des phénomènes accrus de submersions marines et l'érosion des côtes.

VI.1 La submersion marine

On nomme submersions marines « les inondations temporaires de la zone côtière par des eaux d'origine marine lors d'évènements météorologiques (tempête ou simple conjonction d'une forte dépression et d'un vent de mer) et océanographiques (houles, tsunamis) d'ampleur très inhabituelle », généralement né de la conjonction de phénomènes extrêmes (dépression atmosphérique, vent, houle, pluie) et de forts coefficients de marée provoquant une surcote importante du plan d'eau. Les submersions envahissent généralement les terrains situés en dessous du niveau des plus hautes mers mais atteignent aussi parfois des altitudes supérieures si des projections d'eaux marines franchissent des ouvrages de protection et/ou la crête des cordons littoraux (figure 49, 50) (**BENALLOU, I., 2020**). Elles peuvent se produire lorsqu'il y a :

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

Les submersions marines sont des inondations temporaires de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques et marines défavorables.

Elles peuvent se produire de plusieurs manières :

- Par débordement, lorsque le niveau marin est supérieur à l'altitude du terrain naturel ou d'un ouvrage de protection ;
- Par franchissement de paquets de mer, lorsque les vagues passent au-dessus des protections côtières ;
- Par rupture d'un ouvrage de protection ou du cordon dunaire.

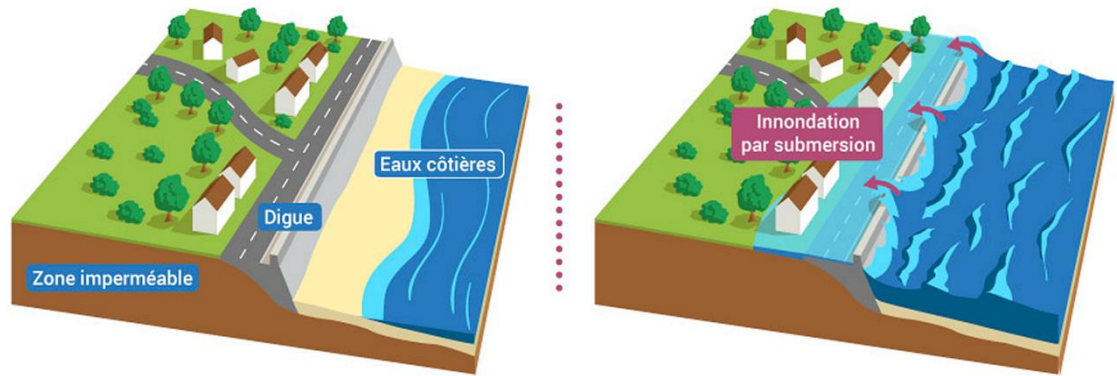


Figure 49: Typologie des submersions marines (franchissement, débordement, rupture d'ouvrage) (d'après OIEAU, 2018)

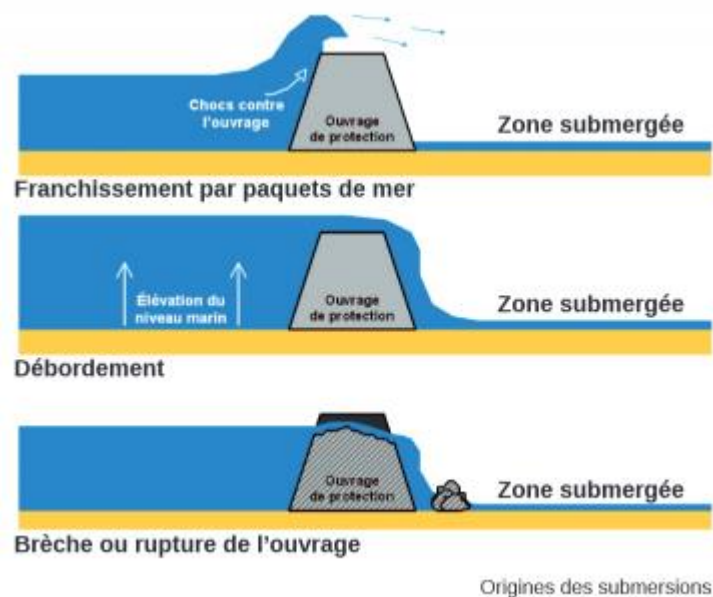


Figure 50: Typologie des submersions marines (franchissement, débordement, rupture d'ouvrage) (HAUTE-CORSE, SERVICE ETAT, 2022)

Les processus physiques responsables de la submersion marine sont liés principalement à l'action de la pression atmosphérique et du vent sur le plan d'eau (figure 46):

- La surcote atmosphérique : le passage d'un important système dépressionnaire est caractérisé par des variations du niveau marin selon deux mécanismes :

- La chute de la pression atmosphérique entraîne une surélévation du niveau du plan d'eau. C'est le phénomène de baromètre inverse. Une diminution de 1hPa équivaut à une élévation de 1cm du plan d'eau.

- Le vent exerce une contrainte à la surface de l'eau en générant une modification du niveau du plan d'eau statique (surcote ou décote) et des courants ;

La surcote associée à la houle (setup) : à l'approche de la côte, les vagues déferlent elles transfèrent leur énergie sur la colonne d'eau provoquant une élévation moyenne du niveau d'eau (setup).

- La surcote totale : la part relative de la surcote atmosphérique et de la surcote associée à la houle dans la surcote totale est fortement dépendante de la bathymétrie du domaine considéré.
- Niveau marin maximal statique et instantané : Le niveau maximal atteint par la mer est défini en tenant compte du « jet-de-rive » (swash). On appelle run-up, l'altitude maximale atteint par le jet-de-rive sur la côte.

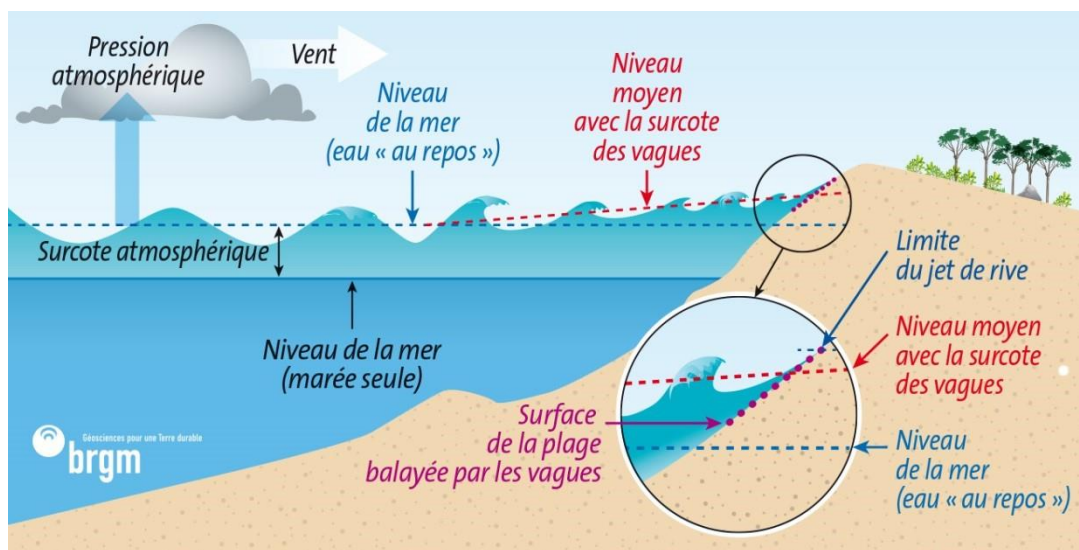


Figure 51: Processus physiques en action lors d'une tempête : agitation et surélévation du plan d'eau. (BRGM, 2012).

VI.2 Méthodologie de simulation de submersion marine :

Dans le cadre de cette étude prospective, la caractérisation et la cartographie des terres qui sont à risque de submersion dans la coôte de la zone d'étude sont basées sur des scénarios d'élévation du niveau de la mer, modélisée par l'utilisation du logiciel de cartographie « ArcGis 10.4 », ainsi pour prévenir les submersions d'ici deux échéances temporelles considérées à savoir 2021, 2022, 2040 et 2100. La méthode retenue pour l'estimation de l'aléa submersion est celle utilisée par plusieurs auteurs (**FLECHER et al., 1995 ; BELLOMO et al., 1999 ; BENAVENTE et al., 2006 ; SUANEZ et al., 2007 ; KUMAR et al., 2008**).

Le calcul des niveaux d'eaux extrêmes à la côte d'occurrence centennale, veingtenale, biennale et annuelle en tenant compte du wave set-up, wind set-up et l'élévation du niveau de la mer due à la baisse de la pression atmosphérique (Figure 51).

En deuxième lieu, ce niveau d'eau d'inondation est superposé à un modèle numérique de terrain (MNT), dont la plus petite maille est de 2 m de côté et une résolution altimétrique de 0.5 m, de la zone d'étude en vue de cartographier la zone submersible

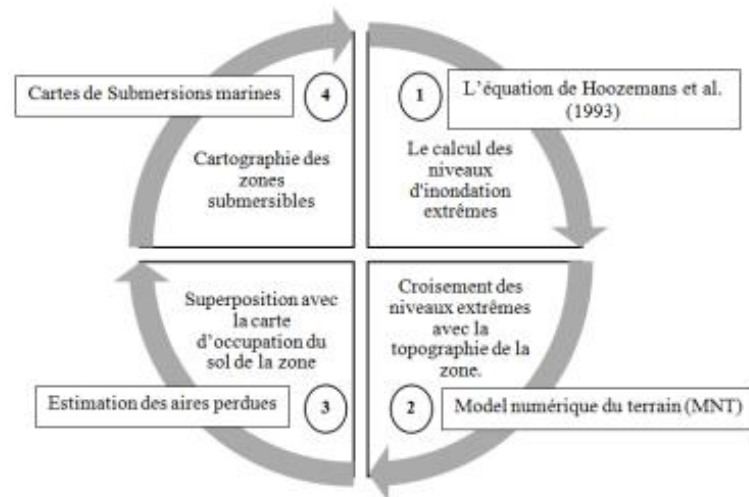


Figure 52: La démarche adoptée pour la cartographie des zones à risque de Submersion marine.

VI.2.1 2.1. Scénarios de niveaux d'eau extrêmes :

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

$$D_{ft} = MHW + St + Wf + Pf$$

Où :

MHW : Niveau moyen des hautes eaux ;

St : Elévation relative du niveau de la mer ;

Wf : Hauteur des houles de tempêtes responsables des inondations ;

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

Détermination Hauteur des houles de tempêtes responsables des inondations ;

Les houles de tempêtes considérées responsables des inondations sont définies à la cotes à partir des résultats de l'étude de la réfraction. Pour l'étude de la submersion nous considérons trois directions pénalisantes, à savoir le NNW, NNE et W.

Les houles au large :

La définition de la distribution de probabilité d'événements de grande ampleur et extrêmes est utile dans le calcul des niveaux d'inondation. La détermination du climat d'agitation à long terme a pour but d'associer une hauteur de la houle à une période de retour donnée (habituellement 25 à 100 ans). (**CIRIA, et al. 2009**).

Tableau 16: les résultats des houles extrêmes au large.

Période de retour (R)	NNW	NNE	W
Houle biennale (2 ans)	4.2	4.1	4.8
Houle Quinquennale (5 ans)	4.8	4.7	5.2
Houle Décennale (10 ans)	5.3	5.2	5.5
Houle vicennale (25ans)	6	5.9	5.7
Houle Cinquantennale (50 ans)	7	6.3	5.9
Houle Centennale (100 ans)	6.1	6.8	6.1

D'après le tableau ci-dessus, les fortes agitations marines proviennent des secteurs NNE, W et NNW avec des amplitudes qui oscillent entre 4.10 m et 6.83 m pour les houles biennale et centennale respectivement. Les houles les plus faibles proviennent d'Est avec une amplitude minimale biennale de 4.10 m.

Les houles extrêmes à la côte :

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

Tableau 17: les résultats des houles extrêmes à la cote.

Période de retour	NNW	NNE	W
Houle biennale (2ans)	4.2	3.1	2.1
Houle Quinquennale (5 ans)	4.4	3.4	2.3
Houle Décennale (10 ans)	4.5	3.3	2.7
Houle vicennale (25ans)	4.7	3.4	3.1
Houle cinquantennal (50ans)	4.8	3.6	3.2
Houle centennal (100ans)	5.3	3.7	4.3

VI.2.2 Scénarios d'inondations

À la base d'un modèle numérique de terrain MNT plusieurs traitements ont été fait, ce qui nous a permis d'établir des cartes pour l'aléa de submersion marine à des différents niveaux extrêmes d'inondation.

Tableau 18: Niveaux d'inondations extrêmes.

Période de retour	MHW	St	Wf	Pf	Dft
2 ans	34cm	2.5mm	4.2m	0.63m	5.172m
5 ans	34cm	2.5mm	4.4m	0.63m	5.372m
10 ans	34cm	2.5mm	4.5m	0.63m	5.472m
25 ans	34cm	2.5mm	4.7m	0.63m	5.672m
50 ans	34cm	2.5mm	4.8m	0.63m	5.772m
100 ans	34cm	2.5mm	5.3m	0.63m	6.272m

VI.3 Les zones à risque d'inondation :

Quel que soit son taux, l'élévation du niveau de la mer ferait monter le niveau d'attaque des vagues, car un niveau marin plus haut fournirait une plus haute base pour les mouvements puissants des tempêtes (WASA Group. 1998 in NIAZI, 2007). Cela entraînerait la submersion des terres basses et des modifications de la morphologie côtière. Les conséquences potentielles de ce phénomène dépendent du taux d'élévation du niveau de la mer, de la fréquence et de l'intensité des tempêtes, ainsi que de la sensibilité de la côte à la submersion, qui est influencée par la morphologie et la topographie de la zone côtière.

La zone côtière de la grande baie de Bou Ismail est caractérisée par un développement urbain longitudinal préférentiel. Cette urbanisation anarchique et dense rend la région très vulnérable aux aléas météorologiques, qui sont amplifiés par la faible topographie du terrain. Pour estimer les superficies des terres qui seront inondées en raison des niveaux extrêmes de l'élévation du niveau de la mer, les cotes de ces niveaux ont été comparées au modèle numérique du terrain (MNT). De plus, dans le but d'identifier les facteurs de risque pour les structures de la zone d'étude, ces mêmes niveaux d'inondation ont été superposés à une carte d'occupation des sols.

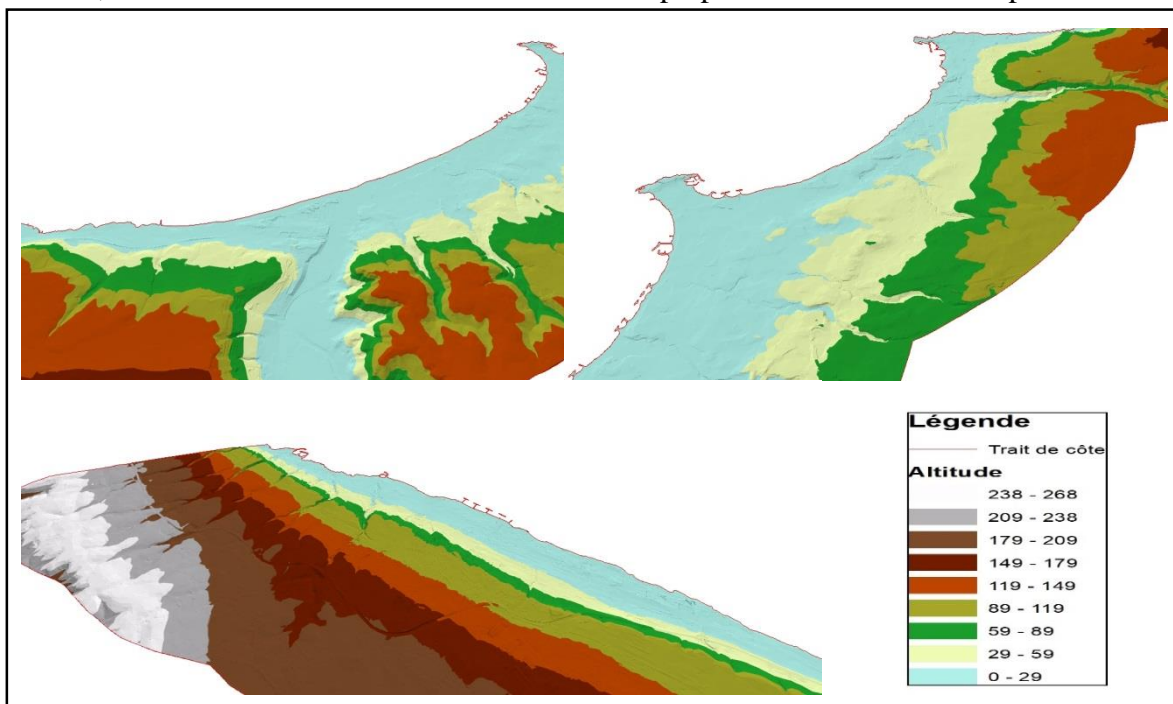


Figure 53: Le modèle numérique du terrain (MNT) de la grande baie de Bou Ismail.

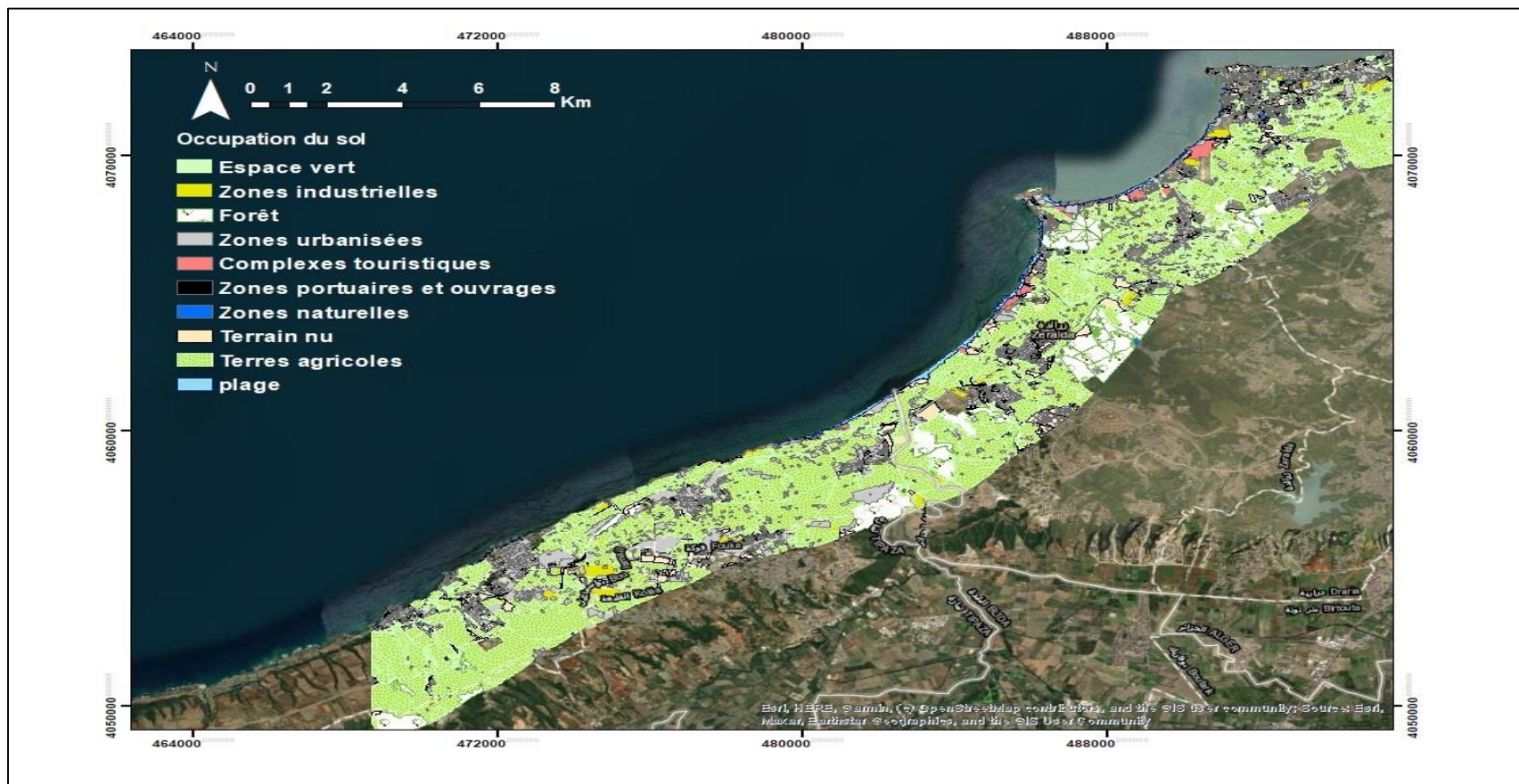


Figure 54: Carte d'occupation du sol de la grande baie de Bou Ismail.



Figure 55: Carte d'occupation du sol de la grande baie de Bou Ismail .

VI.4 Interprétation des résultats

Dans cette portion côtière, une importante érosion a été observée au cours des 15 dernières années, de 2007 à 2022 (comme indiqué précédemment dans le chapitre 5). Plusieurs facteurs de risque d'inondation contribuent à cette situation, notamment une topographie basse, un climat caractérisé par des vagues de forte énergie, une augmentation des niveaux moyens de la mer et une fréquence croissante de tempêtes violentes. Ces éléments favorisent l'expansion des zones submergées.

➤ Submersion à 2 m

Les résultats ont montré que les inondations marines par un niveau marin de 2 m au niveau de la Baie de Bou Ismail sont plus importantes par rapport à celles de la baie d'El Djamilia. Cela est expliqué par la morphologie de la zone et le cap de Sidi Fredj. L'envahissement des eaux marines vers l'arrière-pays est accentué non seulement par Oued Beni Messous à l'Est et par Oued Mazafran à l'Ouest mais aussi par la faible topographie de la zone.

Les inondations au niveau du centre de la baie (alentours de Mazafran) sont les plus menaçantes. Elles touchent presque 115.47 ha des plages, 27.3 ha des terrains nus, 61.55 ha des terres agricoles, 54.38 ha des espaces verts, 0.071 ha des forêts, 18.11 ha des ports et ouvrages de protection, 14.11 ha des zones naturelles, 6.075 ha des zones industrielles, 24.7 ha des zones urbanisées et 3.93 ha des Complexes touristiques.

➤ Submersion à 3 m

On remarque que la surface occupée par les eaux de la mer est plus importante en termes de superficie et de distance par rapport au trait de côte, en la comparant avec la submersion de 2 m. L'intrusion des eaux marines vers la terre est accentuée par les réseaux hydrographiques notamment Oued Beni Messous, Oued Mazafran. Les eaux marines occupent une superficie de 410.06 ha qui est due non seulement à la morphologie continentale à faible altitude de la baie mais aussi au climat des houles au large et les réseaux hydrographiques.

Les figures ci-dessous montrent que les inondations touchent 125.13 ha des plages, 39.26 ha des terrains nus, 81.95 ha des terres agricoles, 74 ha des espaces verts, 0.63 ha des forêts, 20.75 ha des ports et ouvrages de protection, 14.84 ha des zones naturelles, 0.37 ha des zones industrielles, 41.8 ha des zones urbanisées et 11.33 ha des complexes touristiques.

➤ Submersion 4 m

Les inondations causées par les houles de direction Nord Nord-Ouest pour une période de retour de 100 ans sont les plus menaçantes pour la zone d'étude en occupant une surface totale 514.24 ha, tout en touchant : 92.63 ha des terrains nus, 19.54 ha des forêts, 1.04 ha des terres agricoles, 54.38 ha des espaces verts, 51.31 ha des ports et ouvrages de protection, 61.55 ha des zones naturelles, 15.8 ha des zones industrielles, 132.04 ha des zones urbanisées et 116.9 ha des plages

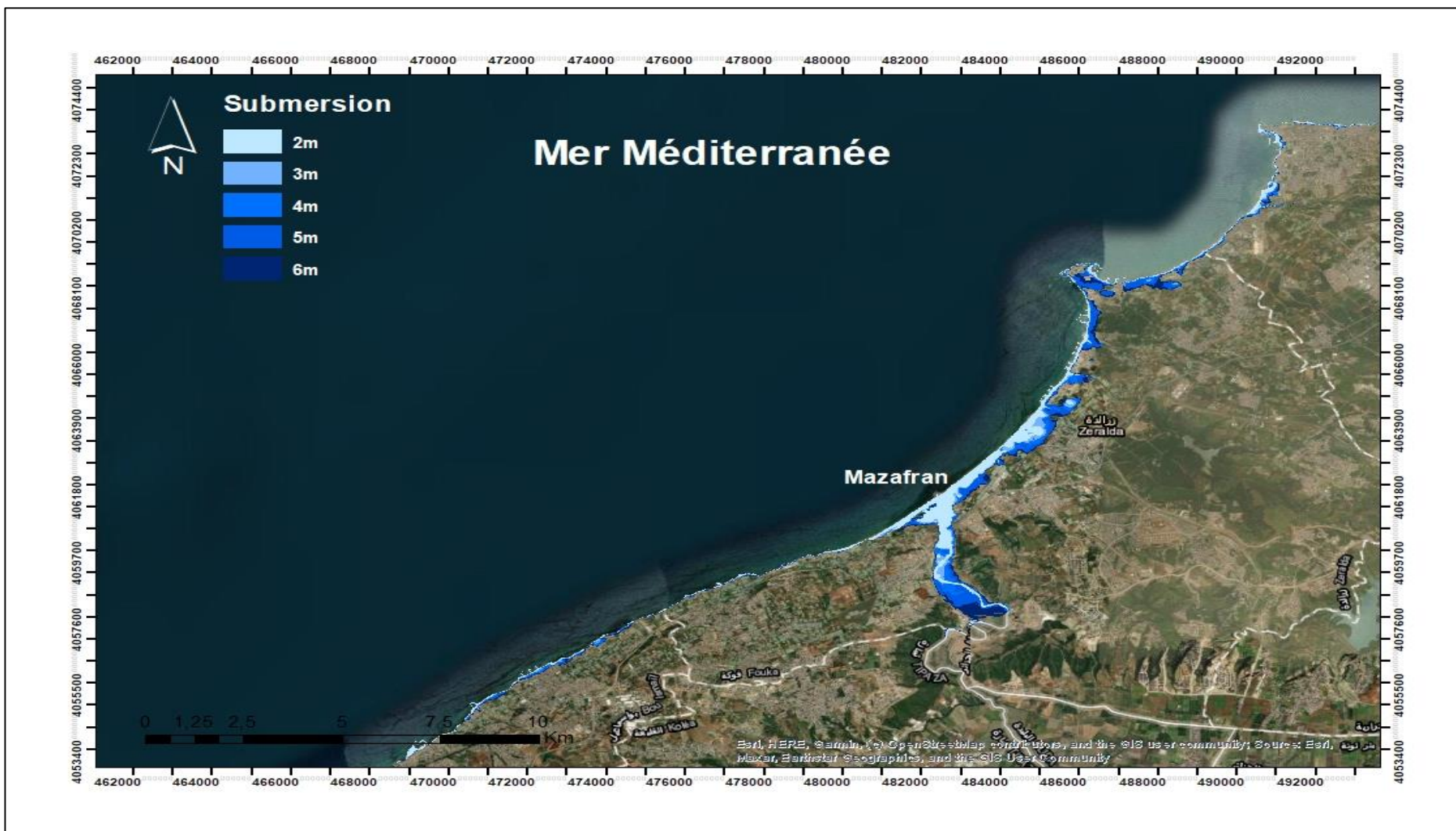


Figure 56: Le carte de submersion marie

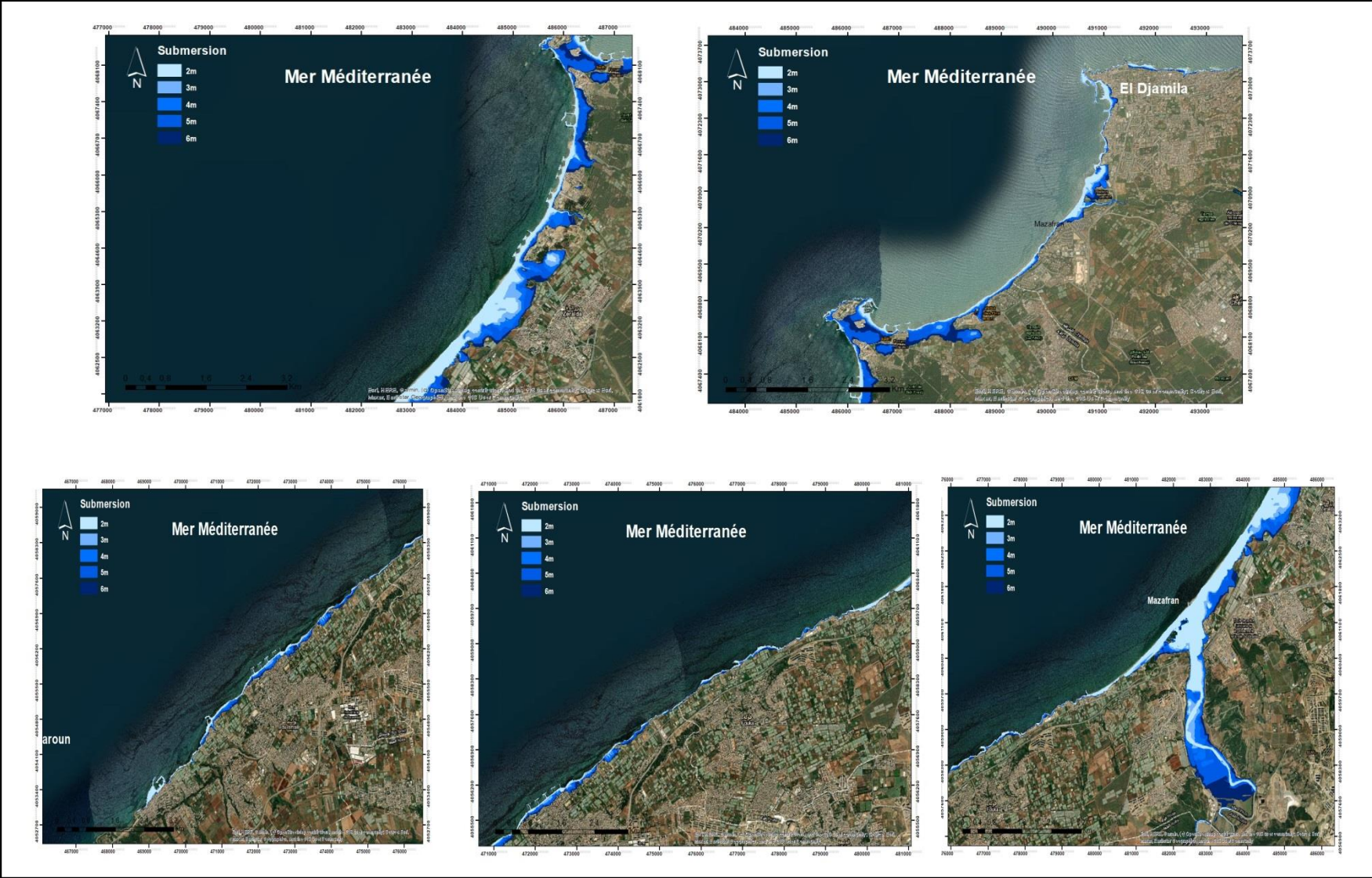


Figure 57: Les cartes de submersion marine

et 21.6 ha des complexes touristiques. Pour les directions Nord Nord-Est et Ouest, les inondations sont moins importantes. Par ailleurs, les inondations marines au niveau de la Baie de Bou Ismail sont plus importantes par rapport à celles de la baie d'El Djamila. Cela est expliqué par la morphologie de la zone ou le cap de Sidi Fredj. L'envahissement des eaux marines vers l'arrière-pays est accentué non seulement par Oued Beni Messous et Mazfran de l'Est vers l'Ouest mais aussi par la faible topographie de la zone.

➤ **Submersion à 5 m**

Le niveau marin de 5m provoque une inondation sur zone d'étude et couvre une surface totale de 827.86 ha, tout en touchant : 116.13 ha des terrains nus, 33.75 ha des forêts, 3.61 ha des terres agricoles, 8.16 ha des espaces verts, 65.79 ha des ports et ouvrages de protection, 219.95 ha des zones naturelles, 16.45 ha des zones industrielles, 135.14 ha des zones urbanisées, 206.75 ha des plages et 22.13 ha des complexes touristiques.

➤ **Submersion à 6 m**

Les résultats montrent des inondations spectaculaires au niveau de la baie d'el Djamila et surtout la baie de Bou Ismail. Cette tendance est expliquée par l'aspect morphologique et plus exactement par le cap de Sidi Fredj.

Les eaux occupent une surface totale plus élevée 863.74 ha de la zone d'étude, tout en touchant : 73.37 ha des terrains nus, 11.88 ha des forêts, 283.74 ha des terres agricoles, 127.75 ha des espaces verts, 22.16 ha des ports et ouvrages de protection, 16.72 ha des zones naturelles, 7.56 ha des zones industrielles, 138.01 ha des zones urbanisées, 137.05 ha des plages et 45.5 ha des complexes touristiques.

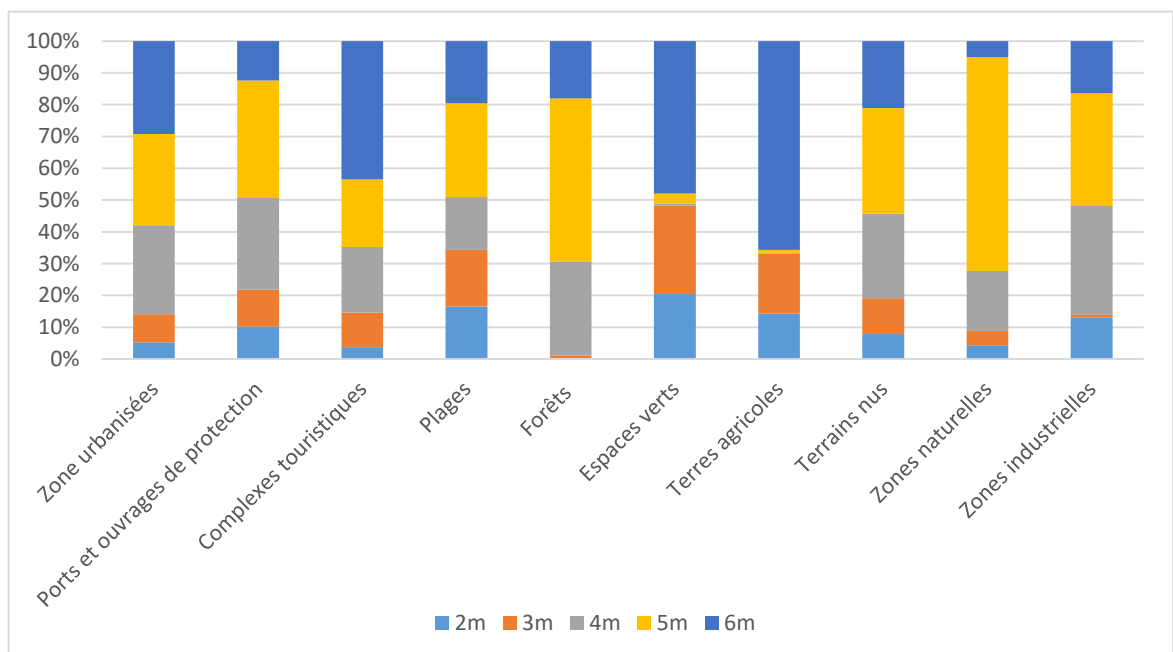


Figure 58: Superficies des terres inondées par les différents niveaux d'élévation.

Conclusion

Les résultats obtenus soulignent que l'élévation du niveau marin conjuguée à une fréquence accrue des houles de tempêtes provoquerait des inondations considérables. La cartographie des zones inondables révèle 325.726 ha de sa superficie présenteraient un risque de submersion avec un niveau d'inondation 2 m ; et 863.74 ha pour un niveau de submersion 6 m. La côte Est et Ouest sont les plus vulnérables aux inondations, en raison de la faible topographie. Quel que soit le niveau d'inondation, les conséquences seraient lourdes pour les aménagements et les infrastructures en front de mer : 24.7 % de la superficie des zones urbaines (Bou Ismail, EL Djamila) risquent d'être endommagés lors des submersions marines avec un niveau d'eau 2 m, et 138.01. % en cas d'un niveau d'inondation maximum 6 m. Le risque pour les zones agricoles est plus élevé entre 61.55 % à 283.74 % de la superficie totale seraient touchées, respectivement, pour des niveaux d'inondation minimum 2 m et 6 m.

Type d'occupation du sol	Niveau d'inondation 2 m		Niveau d'inondation 3 m		Niveau d'inondation 4m		Niveau d'inondation 5 m		Niveau d'inondation 6m	
	Superficie (ha)	Superficie (%)	Superficie (ha)	Superficie (%)	Superficie (ha)	Superficie (%)	Superficie (ha)	Superficie (%)	Superficie (ha)	Superficie (%)
Zone urbanisées	24.7	7.58	41.8	10.19	132.04	25.67	135.14	16.32	138.01	15.98
Ports et ouvrages de protection	18.11	5.55	20.75	5.06	51.31	9.97	65.79	7.94	22.16	2.56
Complexes touristiques	3.93	1.21	11.33	2.76	21.6	4.2	22.13	2.67	45.5	5.27
Plages	115.47	35.45	125.13	30.51	116.9	22.73	206.75	24.97	137.05	15.86
Forêts	0.071	0.021	0.63	0.15	19.54	3.79	33.75	4.07	11.88	1.37
Espaces verts	54.38	16.7	74	18.04	1.83	0.35	8.16	0.98	127.75	14.79
Terres agricoles	61.55	18.89	81.95	19.98	1.04	0.21	3.61	0.43	283.74	32.85
Terrains nus	27.33	8.4	39.26	9.57	92.63	18.01	116.13	14.03	73.37	8.49
Zones naturelles	14.11	4.33	14.84	3.61	61.55	11.96	219.95	26.56	16.72	1.94
Zones industrielles	6.075	1.86	0.37	0.09	15.8	3.07	16.45	1.98	7.56	0.87
Totale	325.726	100	410.06	100	514.24	100	827.86	100	863.74	100

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail a été de fournir une information fiable et facilement accessible sur la tendance évolutive de la côtes sableuse de la baie de BOU ISMAIL et l'estimation des terres perdues par submersion marine à différents niveaux d'inondation en prenant compte de tous les événements météo-océanique extrêmes sur l'évolution spatiotemporelle pouvant intervenir ou influencer de façon directe ou indirecte ce système côtier.

Nous avons dans un premier temps effectué une synthèse sur la zone d'étude, ou nous avons analysé ses paramètres climatologiques et océanographiques, pour ensuite faire une étude bathy-sédimentologique pour caractériser les sédiments marins, leurs distributions spatiales et leurs comportements dans la baie de Bou Ismail. Après étude sur le comportement de la houle au large par les méthodes statistiques, nous avons pu déterminer les caractéristiques de la houle au large et les périodes de retour des houles extrêmes, nous avons utilisé ces dernières plus les données bathymétriques collectées dans l'étude de propagation de la houle, la propagation des courants marins et le transport sédimentaire en utilisant la méthode numérique, les tests de sensibilité a montré que la direction la plus pénalisante est la direction Nord-Nord-ouest .

Cette étude nous a permis en premier lieu d'étudier le comportement de la houle au voisinage de la zone d'étude, ainsi de déduire la dérive littorale qui contrôle la morphologie des plages et détermine en grande partie l'érosion, l'accrétion/ensablement. Les résultats obtenus montrent que la zone d'étude subie l'effet des houles extrêmes de 5.3m et de direction Nord-Nord-ouest pour une période de retours de 100ans.

L'analyse diachronique de la cinématique du trait de côte, a montré que ce littoral a été fortement sollicité tout le long de la période d'étude, par les activités de développement notamment urbain et touristique ; celles-ci ont interféré avec la dynamique hydro-sédimentaire du système côtier et causé une forte érosion des plages avec un taux de recul EPR Max de l'ordre de 1.02 m/an m/an soit un NSM moyen de 17,30 m/an allant de 2007 à 2022, avec une perte de sa surface d'évolution. Deux causes probables ont joué un rôle important l'érosion généralisée le long de la côte étudiée : la cause d'ordre naturel est due aux effets répétés et cumulés des tempêtes, et les très faibles apports d'Oued Beni Messous et Oued Mazafran, tandis que la cause anthropique est liée essentiellement à la forte urbanisation observée le long de la côte, ainsi que la dégradation des systèmes dunaires.

Les constatations qui ont été faites lors de notre suivi de la dynamique de la ligne du rivage ont été confirmées par le model numérique effectué à l'aide de la suite logicielle MIKE-21 qui d'ailleurs nous a permis de modéliser les champs des courants, la propagation des vagues et du transport sédimentaire, en se basant sur trois directions principales de la houle, dont celle de Nord Nord Ouest, qui est la plus défavorable selon les traitements statistiques réalisés.

De ce fait, nous avons détaillé les paramètres de ce secteur afin d'avoir les tendances extrêmes ; ce qui a révélé que la direction Ouest la plus dominante présente un sens de transit Nord et Nord-ouest et Nord Nord Est , et un débit sédimentaire très important. Les risques de pertes de terres, naturelles et aménagées, par inondation seraient considérables en 2123, avec des intrusions marines peuvent atteindre des kilomètres en arrière-pays en immergeant une superficie de 18.11 ha et 22,16 ha pour un niveau minimal (R= 2 ans) et maximal (R= 100 ans)

d'inondation, respectivement. Ces impacts affecteront les éléments fondamentaux de la vie des populations côtière

Perspectives :

D'après l'étude réalisée en simulant la submersion pour différents scénarios, nous avons pu observer le niveau auquel la mer peut monter ainsi que les terrains et infrastructures qui seront submergés. Ces résultats sont d'une importance capitale, car ils fournissent des informations essentielles pour prendre des décisions éclairées en matière de gestion et de projection d'une meilleure protection côtière.

Ce travail pourrait donc être considéré comme étant un état des lieux et un constat de la vulnérabilité de la côte de Bou Ismail face à la submersion marine. L'étude donne une vision prospective, offrant des perspectives pour solutionner et minimiser l'étendue de la submersion face à des épisodes exceptionnels. Ce travail permettrait le dimensionnement et la simulation de l'impact des structures proposés; d'une part.

D'autre part cette étude pourrait faire l'objet d'un outil d'aide à la décision pour la planification spatiale des côtes l'élaboration de stratégies de protection en la présentant comme une étude sommaire où elle est déjà considérée comme une étude prototype du projet de création d'une startup.

Références bibliographiques

AIRY. (1845). George Biddell. Tides and waves. B. Fellowes.

AMARA, L., CHALAL, Y., 2022. Machine Learning pour l'étude de la performance hydraulique des ouvrages portuaires, cas Marina. ENSSMAL, Dely brahim (Alger).

BENALLOU, I., 2020. Evaluation des impacts des changements climatiques et des activités anthropiques sur le littoral de la baie de Zemmouri : Vulnérabilité et Adaptation. ENSSMAL, Dely brahim.

BENAVENTE, Javier, et al. (2006). Coastal flooding hazard related to storms and coastal evolution in Valdelagrana spit (Cadiz Bay Natural Park, SW Spain). Continental Shelf Research, vol. 26, no 9. London: Elsevier, 2006, 1061–1076 p.

BERKANI, M., Merzougui, S.W., 2021. Etude et valorisation des terres perdues par la submersion marine dans la région Ouest d'Alger. ENSSMAL, Dely brahim (Alger).

Bird E.C.F. (1985). Coastline changes. A global review. John Wiley & Sons, Chichester,
BONNEFILLE, René, 2010. Mouvements de la mer et leurs risques. Techniques de l'ingénieur Les aménagements des voies de transport. T. base documentaire : TIB550DUO. No ref. Article : c4610. Publisher : Editions T.I. Type : base documentaire _eprint : base documentaire : TIB550DUO.

BOUGHERARA, H., 2011. Caractérisation géologique et géotechnique de la partie occidentale de la baie d'Alger.

BOUGIS, Jean. (2003). Les Etats de Mer Naturels'. Institut des Sciences de l'Ingénieur de Toulon et du Var.

BOUTIBA, M., GUENDOZ, M, GUETTOUCHE. MS (2006). Evolution du littoral jijelien (Est-Algérie) à travers l'analyse sédiment logique des dépôts quaternaires. Bulletin du Service Géologique National, vol. 17, 113–127 p.

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

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

CARRTER R, Forbes D, Jennings S, Orford J, Shaw J, Taylor R (1989) Barrier and lagoon coast evolution 217 under differing relative sea-level regimes: examples from Ireland and Nova Scotia Marine geology 88:221-242

CHAIBAI, M.S.E., HANANI, A.Z., 2022. Modélisation hydrodynamique et étude d'agitation (Cas de la Marina Bay D'Alger). ENSSMAL, Dely brahim (Alger).

CIRIA, CUR. CETMEF. (2009). Guide Enrochement. L'utilisation des enrochements pour les ouvrages hydrauliques. Version française du Rock Manual. CETMEF, Compiègne.

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

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

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

Disponible sur le web : http://www.coastalwiki.org/wiki/Modelling_coastal_hydrodynamics

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

FOLLAND, C. Ka, et al. (1990). Observed climate variations and change. Climate change: the IPCC scientific assessment, vol. 195, Citeseer, 238 p. Disponible sur le web: "<https://www.ipcc.ch/site/assets/upload>".

GIEC, (2001). Pauvreté. Changements climatiques : Rapport sur Réduire la vulnérabilité des populations pauvres par l'adaptation aux changements climatiques. Berlin Media Company, Allemagne. Disponible sur le web : "<https://www.oecd.org/fr/env/cc/36214804.pdf> "

GIEC, (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)], 104 p. Rapport d'activité. Document non-publié. IPCC, Geneva, Switzerland.

HAMON, K. (2014) Étude de la morphodynamique et du profil d'équilibre d'une plage de poche macrotidale.. Thèse de doctorat. Laboratoire Domaines Océaniques.

HOOZMANS, F. M. J., et al. (1993). Sea level rise: A global vulnerability assessment vulnerability assessments for population, coastal wetlands and rice production on a global scale. H1588, Deltares (WL).

HZAMI, A., 2015. Approche SIG pour l'étude morphodynamique côtière en relation avec les processus hydrosédimentaires au niveau du Golfe de Hammamet. Faculté des sciences de Bizerte.

JEAN-MARC, CHAREL (2003). Titre. [En ligne]. [Consulté le 20/02/2023]

JIMENEZ, Jose A., et AGUSTIN SANCHEZ-Arcilla. (1997). Physical impacts of climatic change on deltaic coastal systems (II): driving terms ». Climatic Change, vol. 35, no 1, Springer, 95–118p

KERMANI, S., BOUTIBA, M., GUENDOZ, M., GUETTOUCHE, M.S., KHELFANI, D., (2016). Detection and analysis of shoreline changes using geospatial tools and automatic computation: Case of jijelian sandy coast (East Algeria). *Ocean & coastal management* 132, 46–58.

KLEVRI, H., 2014. Étude de la morphodynamique et du profil d'équilibre d'une plage de poche macrotidale. Université de Bretagne occidentale.

KUMAR, V. Sathish, et al. (2008). Assessment of storm surge disaster potential for the Andaman Islands. *Journal of Coastal Research*, no 24, 171–177 p.

Le Hir P et al. (2001) Fine sediment transport and accumulations at the mouth of the Seine estuary (Cannata et al.) *Estuaries* 24:950-963

LECLAIRE L (1972) sédimentation holocene sur le versant meridional du bassin algerobaleares.(Precontinent algerien)

MESSAOUD N., 1987. Hydrogéologie et pollution des eaux: exemple du bassin versant du Mazafran, Mitidja (Algérie) (PhD Thesis). Grenoble 1.

MEZOUAR, K. (2009). Etude comparative entre les méthodes de protection des deux littoraux Algérien et Roumain. Thèse de Doctorat, Université Technique de construction de Bucarest, Roumanie, p 404.

MICHE, M. (1944). Mouvements ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante [en ligne]. *Annales de Ponts et Chaussées*, 1944, pp (1) 26-78, (2) 270-292, (3) 369-406, École nationale des ponts et chaussées. Disponible sur " <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A6fceef55-d71b-4e3e-a94f> ".

MUGICA J., MALLET C., HENNEQUIN V. (2008) - Etude de l'évolution géomorphologique récente de la côte sableuse aquitaine. BRGM/RP-56874-FR, 29 ill., 9 ann., 165 p. Océanographie. 2014. dumas-01020013 New York, Brisbane, Toronto, Singapore, 219 p.

NADIR M. (2016). Modélisation numérique de la morpho dynamique d'une côte sableuse soumise à l'effet des vagues et des houles cas : Plage Est de SIDI Fredj. Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL.149 p.

OLIVEROS C. et LAMBERT A. (2004) Etude des phénomènes de submersion marine sur le littoral de la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer - Rapport n°2. BRGM/RP-52902-FR. Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service Public du BRGM 01-LIT-216. 120p. URL :- http://www.parc-camargue.fr/Francais/upload/Etude_submersion_marine_Saintes.pdf

PASKOFF, Roland. (1998). Conséquences possibles sur les milieux littoraux de l'élévation du niveau de la mer prévue pour les prochaines décennies. *Annales de Géographie*, JSTOR, 233–248 p.

PASKOFF, Roland. (2010). Les littoraux : impact des aménagements sur leur évolution. Paris : Armand Colin, 260 p.

PIRAZZOLI, P. A. (1989). Recent sea level changes in the North Atlantic. Late Quaternary sea-level correlation and applications [en ligne], Springer, 153–167 p. [Consulté le 5/7/2020]. Disponible sur " https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-0873-4_8 ".

RIHOUEY, Didier. (2004). Analyse statistique de l'évolution morphodynamique des plages sableuses : Application aux sites d'étude du Programme National d'Environnement Côtier et aux plages d'Anglet. Pau.

RIHOUEY, Didier. (2004). Analyse statistique de l'évolution morphodynamique des plages sableuses : Application aux sites d'étude du Programme National d'Environnement Côtier et aux plages d'Anglet. Pau

SAFARI, M. IMAM. (2006). Analyse de la performance... [Consulté le 21 octobre 2020]. Disponible sur "Google Scholar. <https://scholar.google.fr/scholar?hl=fr&as>".

SEKKAL, R., 1986. Hydrologie de la nappe de la Mitidja (Algérie): étude hydrodynamique des champs captants de la ville d'Alger (PhD Thesis). Université Scientifique et Médicale de Grenoble.

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

SUANEZ, SERGE, et al. (2007). Méthode d'évaluation du risque de submersion des côtes basses appliquée à la plage du Vougot, Guissény (Bretagne). Géomorphologie : relief, processus, environnement, vol. 13, no 4, Groupe français de géomorphologie, 319–334p.

Tilbi, K. and Gherda, M.E, (2018). « Distribution des valeurs extrêmes généralisées-Application en hydrologie » (Doctoral dissertation, Université Jijel).

VANRIJN, Leo C. VAN. (1986). Mathematical modeling of suspended sediment in no uniform flows [en ligne]. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 112, no 6, American Society of Civil Engineers, 1986, p. 433–455. [Consulté le 5/4/2020]. Disponible sur " <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9429%281986%29112%3> ".

VIUDEZ, A., Pinot, J.-M., Haney, R.L., 1998. On the upper layer circulation in the Alboran Sea. Journal of Geophysical Research: Oceans 103, 21653–21666.

Annexe

Annexe 1 : Cartes de simulation de direction Nord Nord-Est de période de 2ans

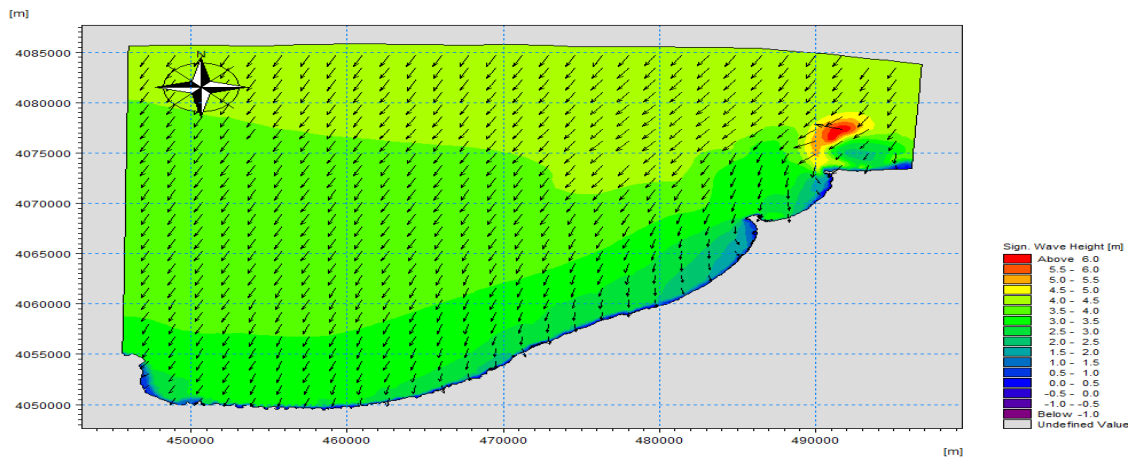


Figure 1 : Le champ de vague de direction Nord Nord-Est de la période de 2ans.

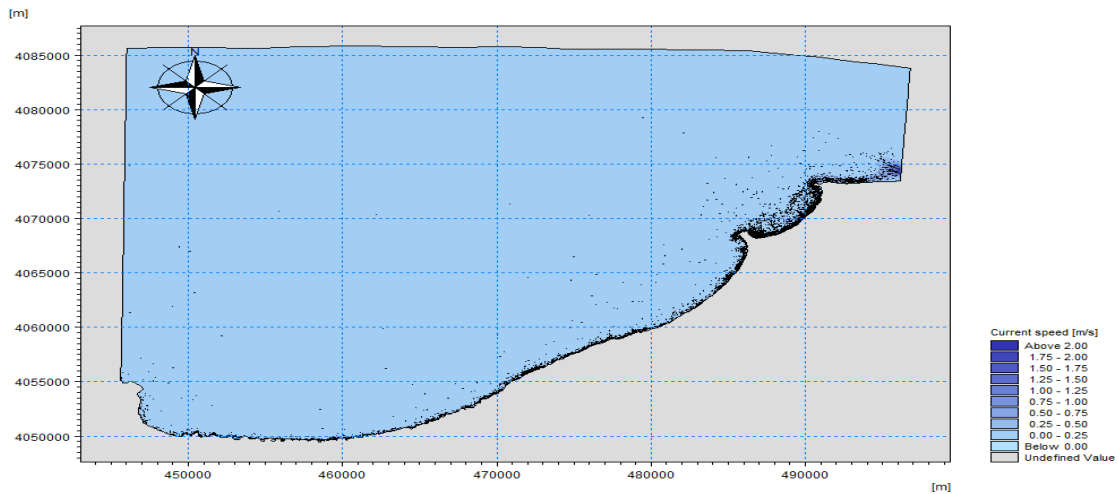


Figure 2 : Le champ du courant engendré par les houles de direction Nord Nord-Est de la période de 2ans.

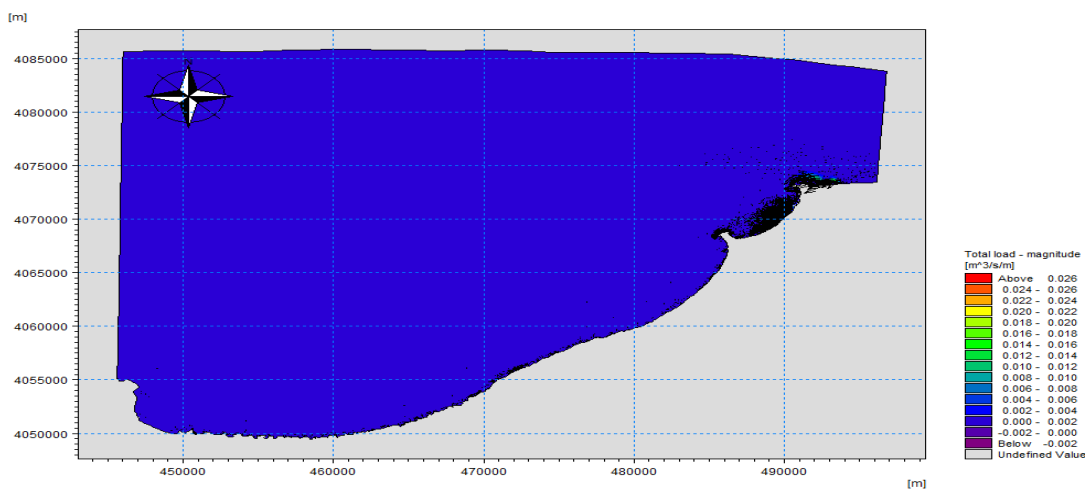


Figure 3 : Transport sédimentaire engendré par les houles de direction Nord Nord-Est de la période de 2 ans.

Annexe 2 : Cartes de simulation de direction Ouest de période de 2ans

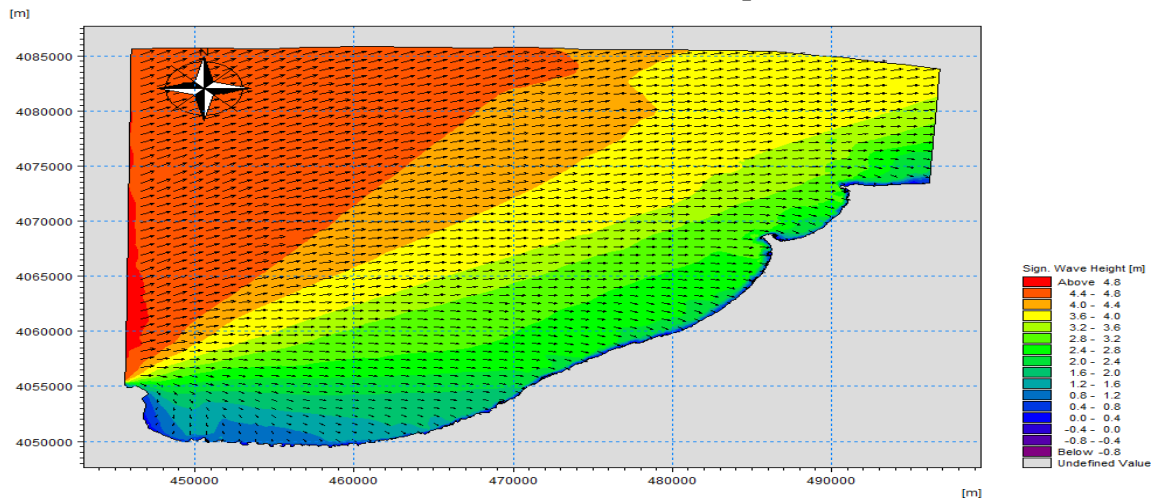


Figure 4 : Le champ de vague de direction Nord Nord-Ouest de la période de 5ans.

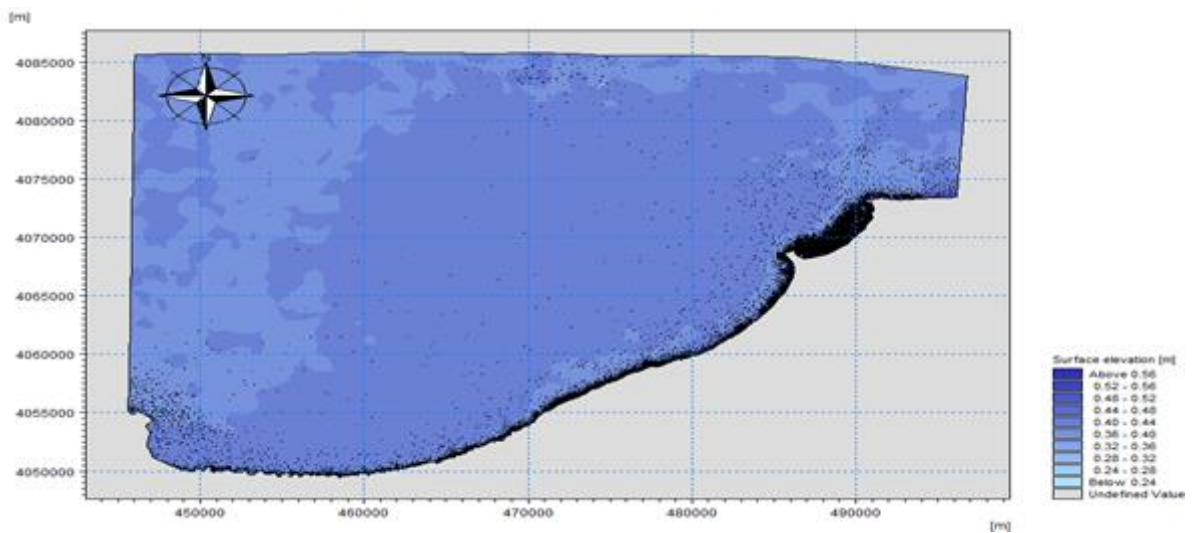


Figure 5 :Le champ du courant engendré par les houles de direction Nord Nord-Ouest de la de 5ans

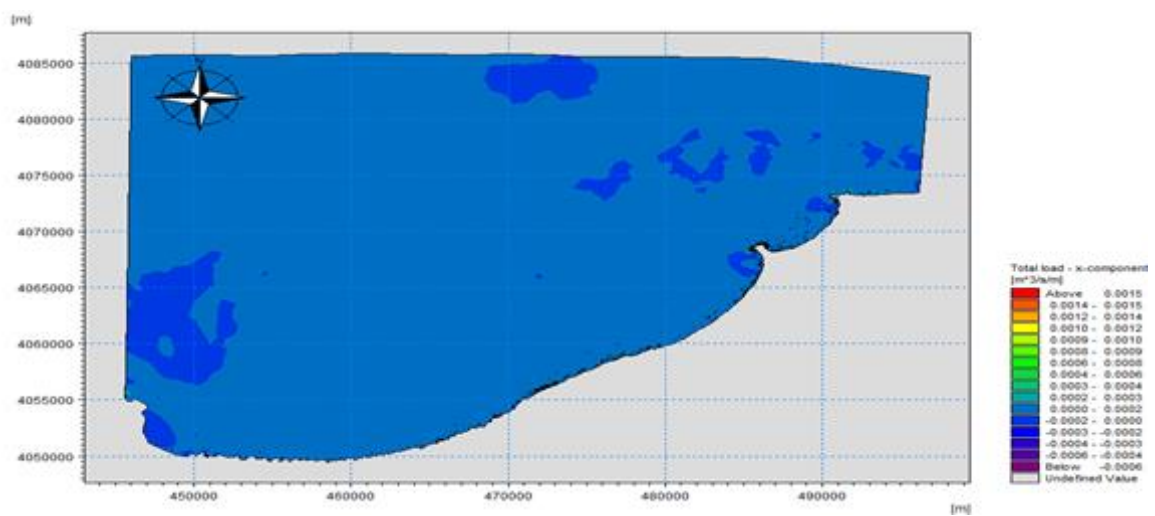


Figure 6 :Transport sédimentaire engendré par les houles de direction Nord Nord-Ouest de la période de 5 ans.

Annexe 3 : Cartes de simulation de direction Nord Nord-Ouest période de 5ans

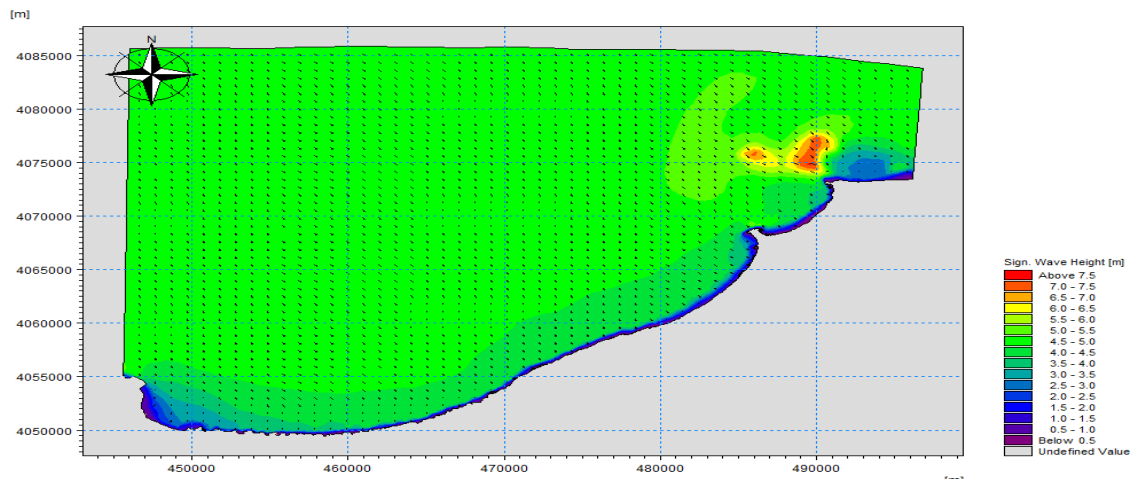


Figure 7 : Le champ de vague de direction Nord Nord-Ouest de la période de 5ans.

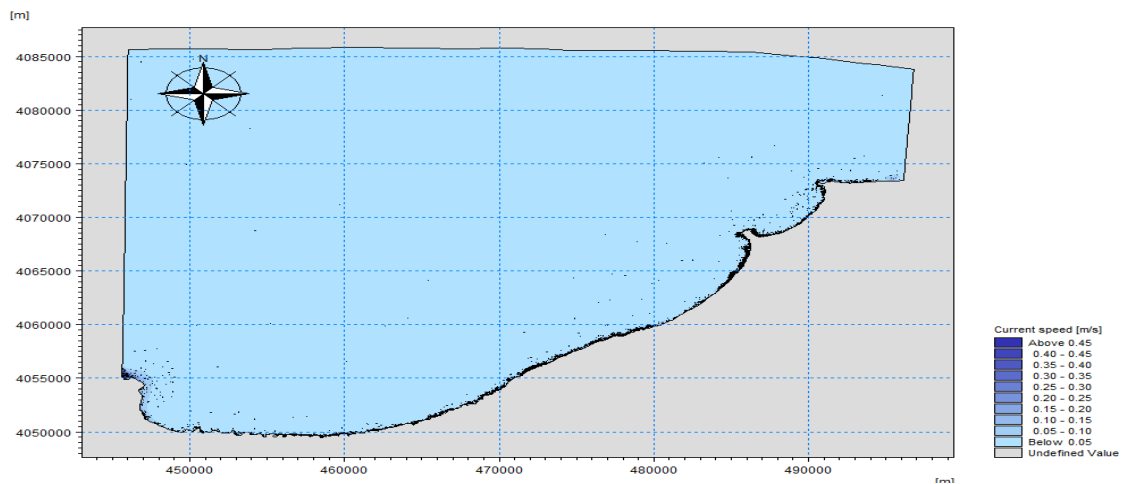


Figure 8 : Le champ du courant engendré par les houles de direction Nord Nord-Ouest de la période de 5ans.

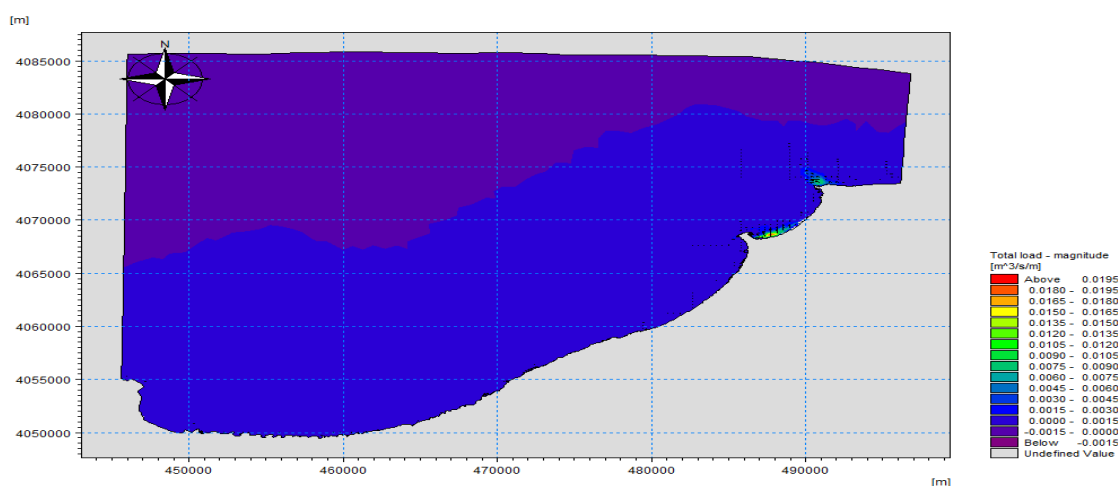


Figure 9 : Transport sédimentaire engendré par les houles de direction Nord Nord-Ouest de la période de 5 ans.

Annexe 4 : Cartes de simulation de direction Ouest période de 5ans.

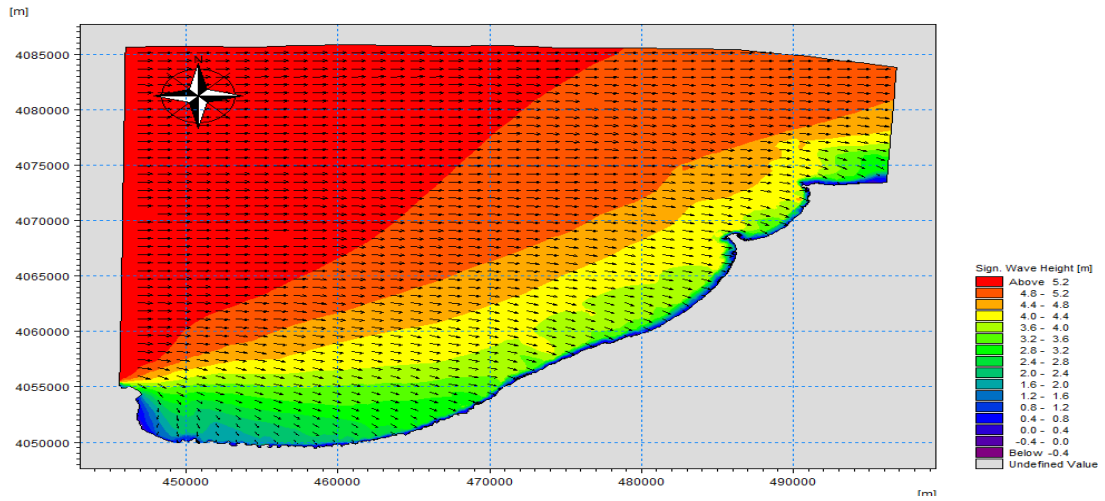


Figure 10: Le champ de vague de direction Ouest de la période de 5ans.

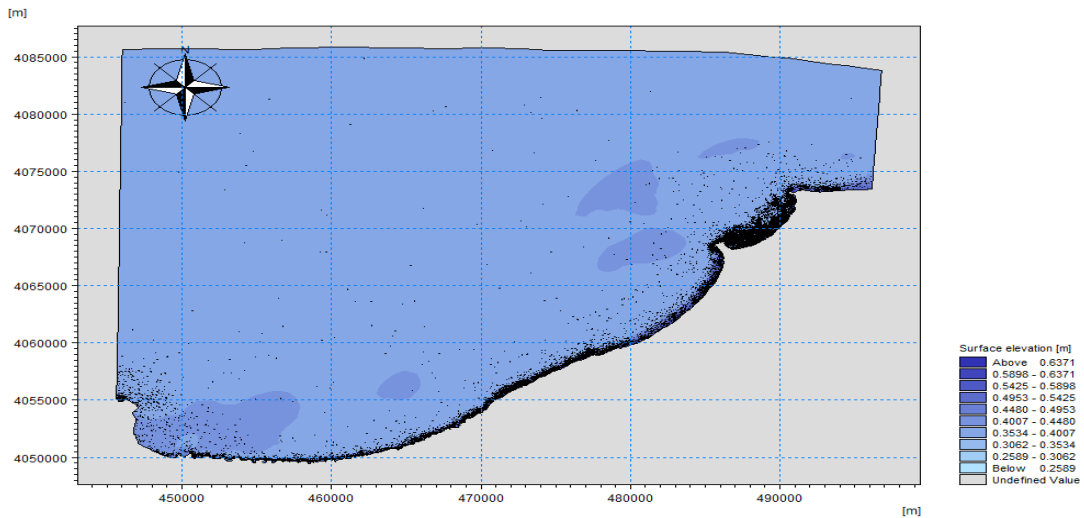


Figure 11: Le champ du courant engendré par les houles de direction Ouest de la période de 5ans.

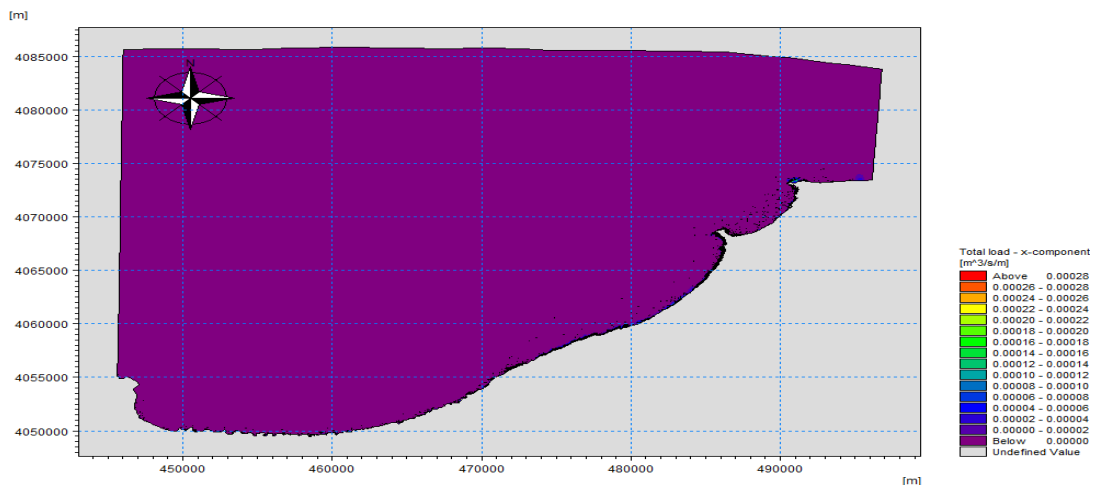


Figure 12 : Transport sédimentaire engendré par les houles de direction Ouest de la période de 5 ans.

Annexe 5 : Cartes de simulation de direction Nord Nord-Est période de 10ans.

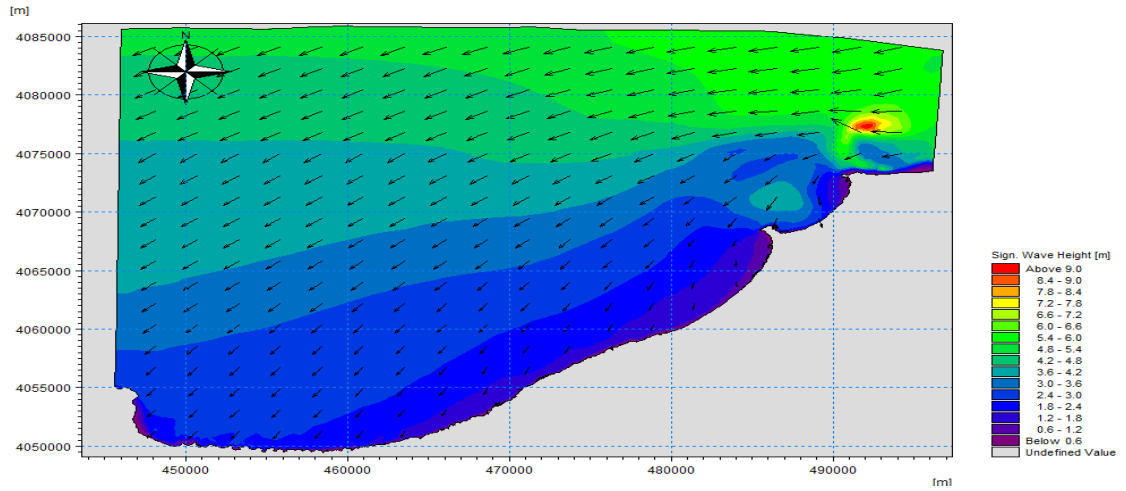


Figure 13: Le champ de vague de direction Nord Nord-Est de la période de 10ans.

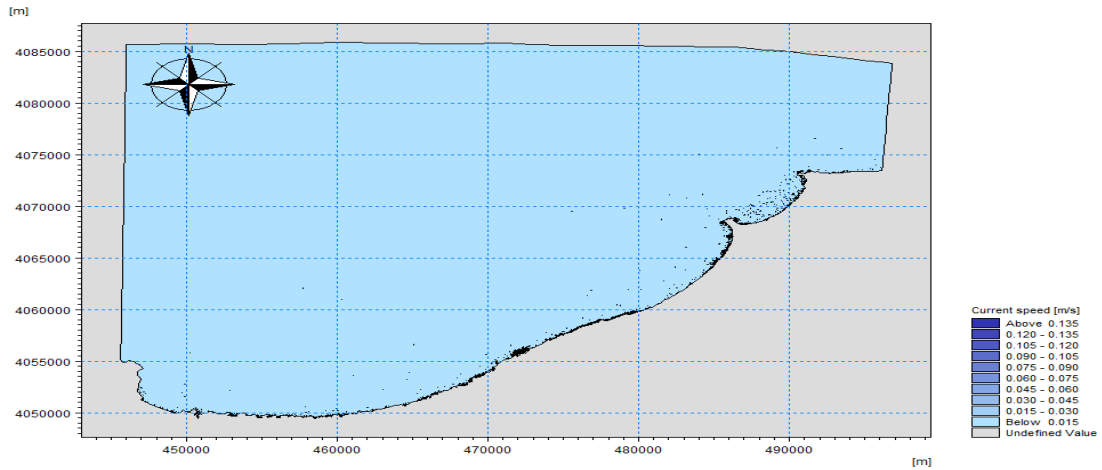


Figure 14: Le champ du courant engendré par les houles de direction Nord Nord-Est de la période de 10ans.

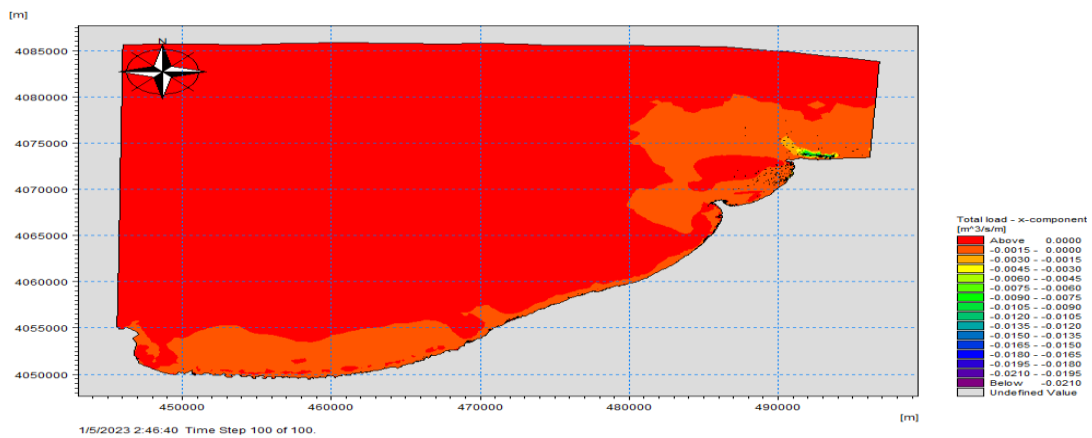


Figure 15: Transport sédimentaire engendré par les houles de direction Nord Nord-Est de la période de 10 ans.

Annexe 6 : Cartes de simulation de direction Nord Nord-Ouest période de 10ans.

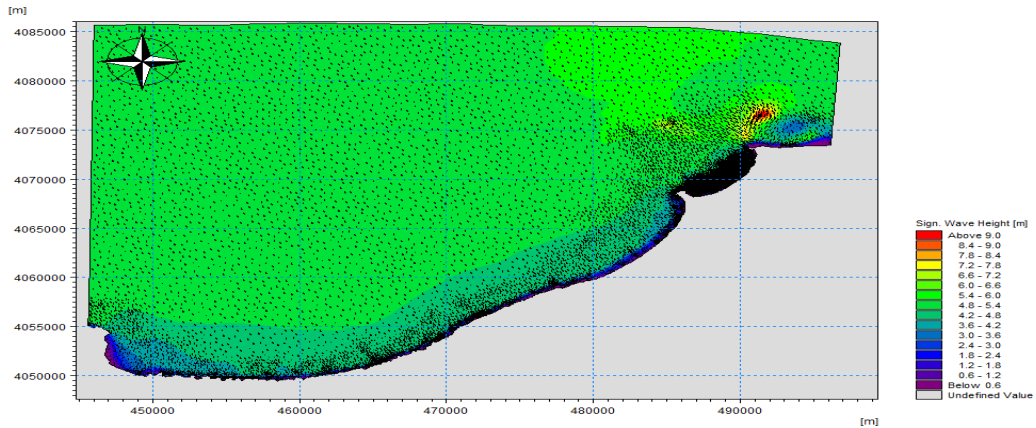


Figure 16: Le champ de vague de direction Nord Nord-Ouest de la période de 10ans.

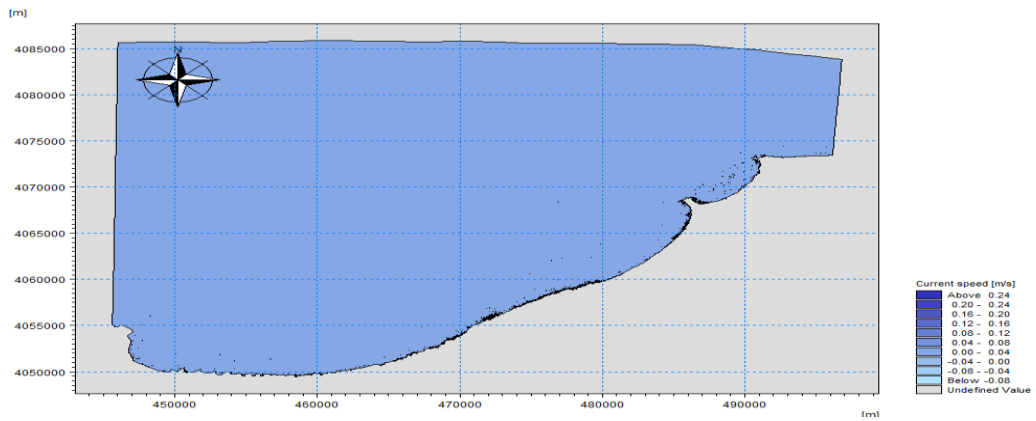


Figure 17: Le champ du courant engendré par les houles de direction Nord Nord-Est de la période de 10ans.

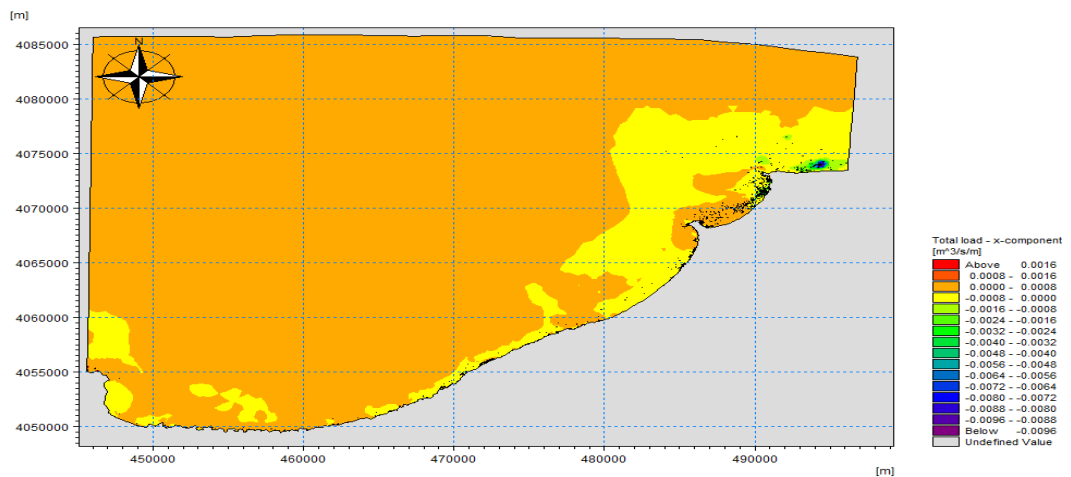


Figure 18: Transport sédimentaire engendré par les houles de direction Nord Nord-Est de la période de 10 ans

Annexe 7 : Buisness Model Canva BMC

Partenaires clés	Activités principales	Valeurs ajoutées	Relation clients	Clients
<p>-Des laboratoires de recherche universitaires (ENSSMAL)</p> <p>-Des agences gouvernementales spécialisées dans l'aménagement et la gestion du territoire (CNL, ANAAT, INCC,GIEC) .</p> <p>-Des sociétés d'ingénierie</p> <p>-Des entreprises de surveillance environnementale</p>	<p>-Des relevés et prélèvements (topographiques, bathymétrie, sédimentologie,</p> <p>-Analyse des phénomènes physiques, hydrauliques, Des analyses géologiques et géomorphologiques,</p> <p>-Des évaluations des risques</p> <p>-Des cartographies numériques</p> <p>-Traitement des bases de données Environnemental</p> <hr/> <p align="center">Ressources liées</p> <p>Personnel qualifié :</p> <ul style="list-style-type: none"> - En géographie, En géologie, - En télédétection - Modélisation - Cartographie d'analyse géo spatiale <p>Base de donnée</p> <ul style="list-style-type: none"> - Géographique - Géomorphologique et Bathymétrique - Climatologique - Démographique - Hydrographique - Occupation des sols - PDAU, POS 	<p>-Etude et modélisation des mouvements de fluides et des phénomènes naturels</p> <p>-Etude et modélisation dans la construction ou la réhabilitation d'infrastructures portuaires et d'aménagement du littoral.</p> <p>-Vérification de la pertinence des aménagements en termes de faisabilité juridique et d'impacts sur l'environnement par rapport aux textes en vigueur tant nationaux qu'internationaux.</p> <p>-Traitement et analyses des bases de données dans le domaine des géologiques littoraux (vent, houle, température, hydrologie...)</p> <p>-En matière économique nos compétences permettent d'accompagner les clients sur l'aspect financier de leurs projets côtiers en les aidant à optimiser et équilibrer leurs budgets face aux investissements que les travaux nécessitent.</p> <p>-Cartographie et traitement de données sous SIG</p>	<p>-Des réunions de suivi régulières</p> <p>-Des rapports détaillés sur les résultats de vos études</p> <p>-Une assistance technique continue</p> <hr/> <p align="center">Les canaux de distribution</p> <p>-Des partenariats avec des agences gouvernementales</p> <p>-Des présentations lors de conférences spécialisées</p> <p>-Des réseaux professionnels</p> <p>-Un site web informatif</p>	<p>-Ministère de l'environnement et des énergies renouvelables</p> <p>-Ministère de l'intérieure, des collectivités locales et de l'aménagement du territoire</p> <p>-Ministère des travaux publics et des infrastructures de base</p> <p>-Ministère des transports</p> <p>-Ministère de l'hydraulique</p> <p>-Ministère de l'énergie et des mines</p> <p>-Ministère de l'habitat, de l'urbanisme et de la ville</p> <p>-Secteurs</p> <p>-Différentes directions :</p> <p>Entreprises étatiques et privées (DAHLI , ENECU ,LEM..)</p>
<p align="center">Coûts</p> <p align="center">8 342 800,00 da</p>		<p align="center">Revenus</p> <p align="center">2 609 067,00 da (1 an)</p>		

Introduction :

Érosion, submersion, évènements extrêmes, pression démographique, urbanisation... le littoral Algérien est exposé à de nombreux phénomènes qui le fragilisent. Le réchauffement climatique a accéléré les aléas naturels et induira des conséquences non négligeables sur les ouvrages de protections maritimes. Les sollicitations prises en compte pour le dimensionnement de ces ouvrages vont subir des modifications, en particulier le niveau marin et les houles.

Notre priorité est de protéger notre environnement de tout cela en trouvant des solutions, comme faire les études nécessaires pour éviter tout problème qui pourrait l'engendrer.

Nous allons nous intéresser au littoral Algérien, surtout la baie de Bou ismail qui vient de connaître une grande inondation sur sa côte et qui a causé plusieurs dégâts suite à une tempête, Pour effectuer ces études quoi de mieux que de créer un bureau d'études afin de faciliter la collecte de données spatiales tout en s'appuyant sur l'application des systèmes d'information géographique (SIG) et sur le traitement des images satellitaires

Problématique :

A l'échelle nationale, de nombreux secteurs d'activités économiques font appel à des bureaux d'études d'ingénierie (Bâtiment; Mécanique; Informatique...), mais peu sont ceux qui étudient sur le domaine maritime,

Le présent projet répond à cette problématique en offrant des services sur les évènements extrêmes (submersion, érosion...), En plus de la formation de cartographie et SIG des thématiques en relation avec la dynamique du littoral, cartographie et télédétection, génie côtier & géotechnique, risques et ressources littorales, solutions innovantes de protection, et gestion raisonnée du littoral.

Solutions :

Nous développons des thématiques en relation avec la dynamique du littoral, cartographie et télédétection, génie côtier & géotechnique, risques et ressources littorales, solutions innovantes de protection, et gestion raisonnée du littoral.

- Etude et modélisation des mouvements de fluides et des phénomènes naturels qui s'y rattachent (houles, courants, écoulements hydrodynamiques...)
- Etude et modélisation de la courantologie et la sédimentologie dans le cadre des problématiques d'érosion côtière, d'ensablement de port, d'impacts d'ouvrages ou d'aménagements littoraux...
- Etude et modélisation dans la construction ou la réhabilitation d'infrastructures portuaires et d'aménagement du littoral.
- Vérification de la pertinence des aménagements en termes de faisabilité juridique et d'impacts sur l'environnement par rapport aux textes en vigueur tant nationaux qu'internationaux.

- Traitement et analyses des bases de données dans le domaine des géorgiques littorales (vent, houle, température, hydrologie,...)
- en matière économique nos compétences permettent d'accompagner les clients sur l'aspect financier de leurs projets côtiers en les aidant à optimiser et équilibrer leurs budgets face aux investissements que les travaux nécessitent.
- en matière économique permettent d'accompagner les clients sur l'aspect financier de leurs projets côtiers en les aidant à optimiser et équilibrer leurs budgets face aux investissements que les travaux nécessitent.
- Modélisation et utilisation des logiciels qui permettent de définir de manière très précise les travaux à réaliser à travers leur phasage et la nature exacte des prestations que devront exécuter les entreprises de travaux. Cette étape capitale permet de réduire considérablement la survenue d'aléas en phase de chantier.
- conseiller au mieux les entreprises de réalisation pour garantir une attribution des marchés de travaux dans des conditions techniques et économiques satisfaisantes.
- Cartographie et traitement de données sous sig (arcview, qgis, mapinfo,...) : Collecte et valorisation de données (utilisation régulière des référentiels géographiques usuels) ; exploitation des plateformes et bases de données géographiques liées à l'environnement ; utilisation courante des flux OGC (WMS, WFS, etc.) ; vectorisation, digitalisation, géotraitements ; création et gestion de bases de données (en bureau sur PC et pour le terrain sur tablette) ; sémiologie graphique, analyse thématique et représentation graphique (mise en page des documents cartographiques et création d'atlas).
- Cartographie et illustrations sous dao (illustrator, inkscape, autocad, draftsight, sketchup) : Réalisation et mise en page de schémas, plans, cartes, coupes et profils topographiques, blocs diagrammes, panneaux d'exposition ; saisie et digitalisation, dessin vectoriel, organisation des couches d'informations, gestion des graphismes et des couleurs

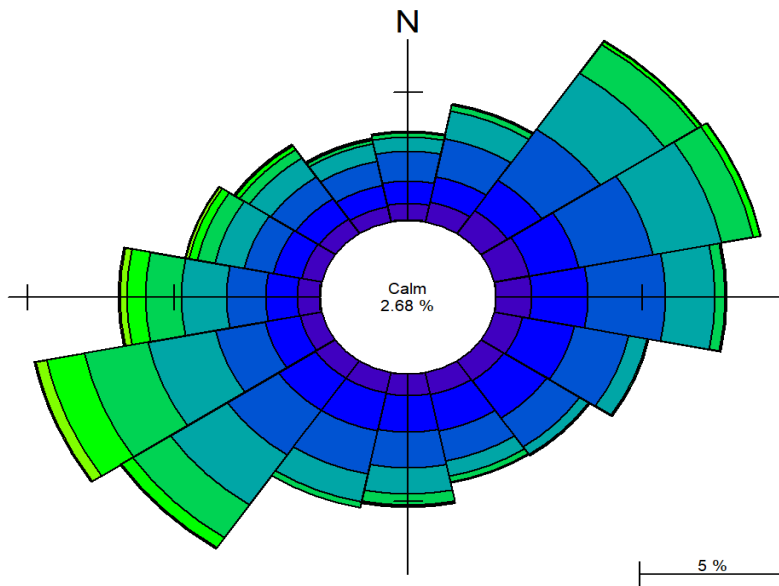
Etude de cas :

Impact des événements météo-océanique extrêmes sur l'évolution spatiotemporelle des cotes sableuses de la baie de Bou Ismail

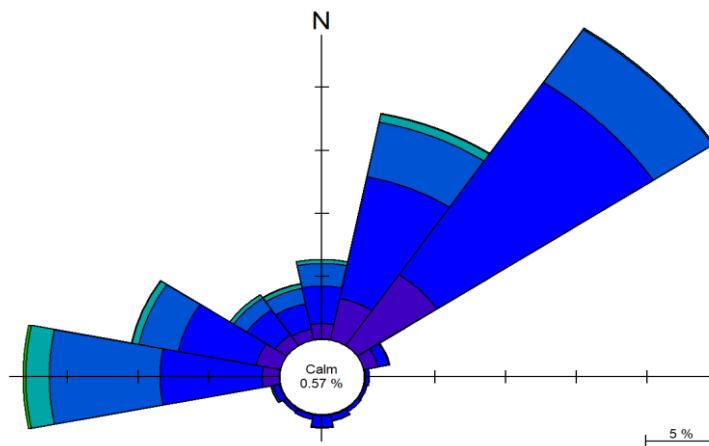
Prototype :

- **Collecte de données :**

Base de données climatiques (30 d'enregistrement 1992- 2022 (vent et houle)
waveclimate.com)



Roses des vents annuelles enregistrées de la période 1992 – 2021



Roses des houles annuelles enregistrées de la période 1992 – 2021

- Traitement évènement extrêmes : déterminer les scenarios des tempêtes qui affectent la côte (modélisation avec python)

```

# Calculate the sample size and standard deviation
n = len(hs)
s = np.std(hs, ddof=1) # use sample standard deviation

# Calculate the critical value for a 15% error
z_crit = stats.norm.ppf(1 - 0.15/2)

# Calculate the margin of error
e = z_crit * s / np.sqrt(n)

# Create a smoothed curve from all data points
xnew = np.linspace(2, 1000, 300)
spl = make_interp_spline(return_period, hs, k=2)
y_smooth = spl(xnew)

# Calculate the lower and upper confidence interval bounds
lower_ci = y_smooth - e
upper_ci = y_smooth + e

# Plot the smoothed curve with shaded confidence intervals
plt.plot(xnew, y_smooth, color='black', label='Smoothed Curve')

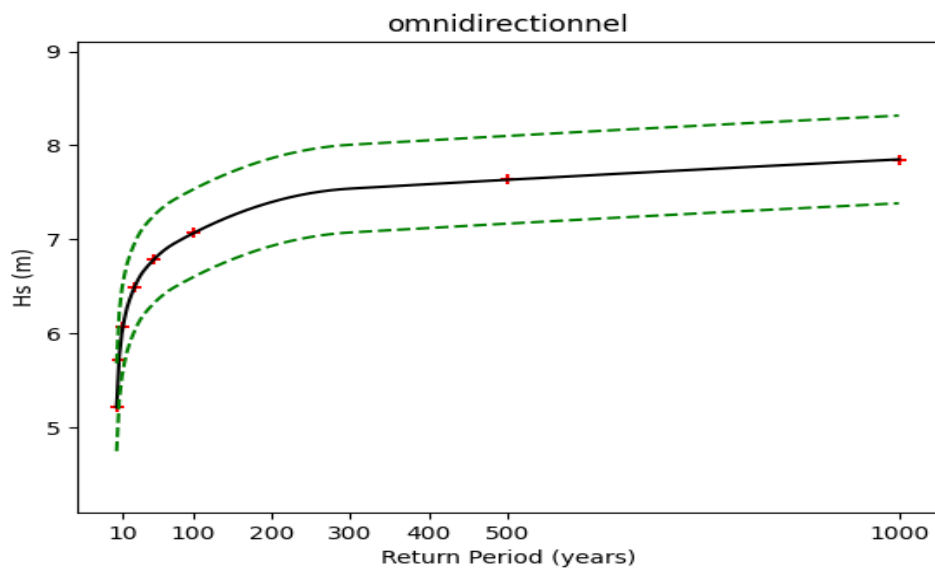
# Plot the lower and upper confidence interval bounds
plt.plot(xnew, lower_ci, color='green', linestyle='--')
plt.plot(xnew, upper_ci, color='green', linestyle='--')
# create the scatter plot
plt.scatter(new_df['return_period'], new_df['return_value'], marker='+', color='red')

# Define the x-axis tick values
plt.xticks([10, 100, 200, 300, 400, 500, 1000])

# Define the title and axis labels
plt.title('omnidirectionnel | direction:']
plt.xlabel('Return Period (years)')
plt.ylabel('Hs (m)')

# Define the y-axis limits
plt.ylim(4.01, 7.1)

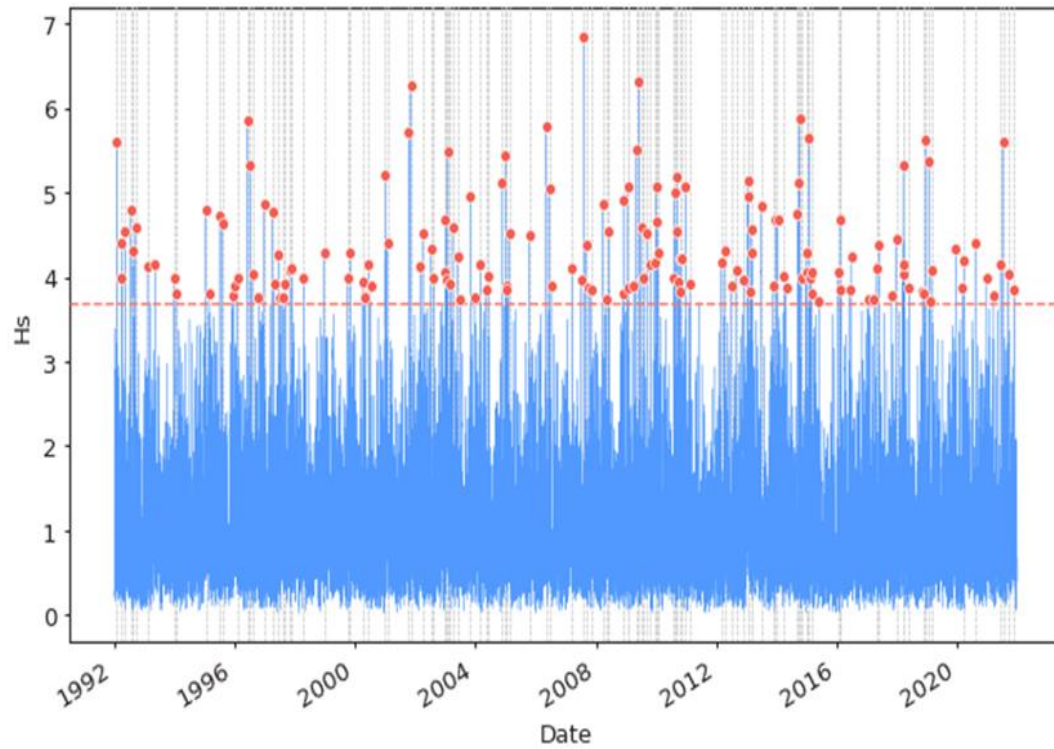
```



Estimation des événements extrêmes via la distribution de POT pour l'omnidirectionnel.

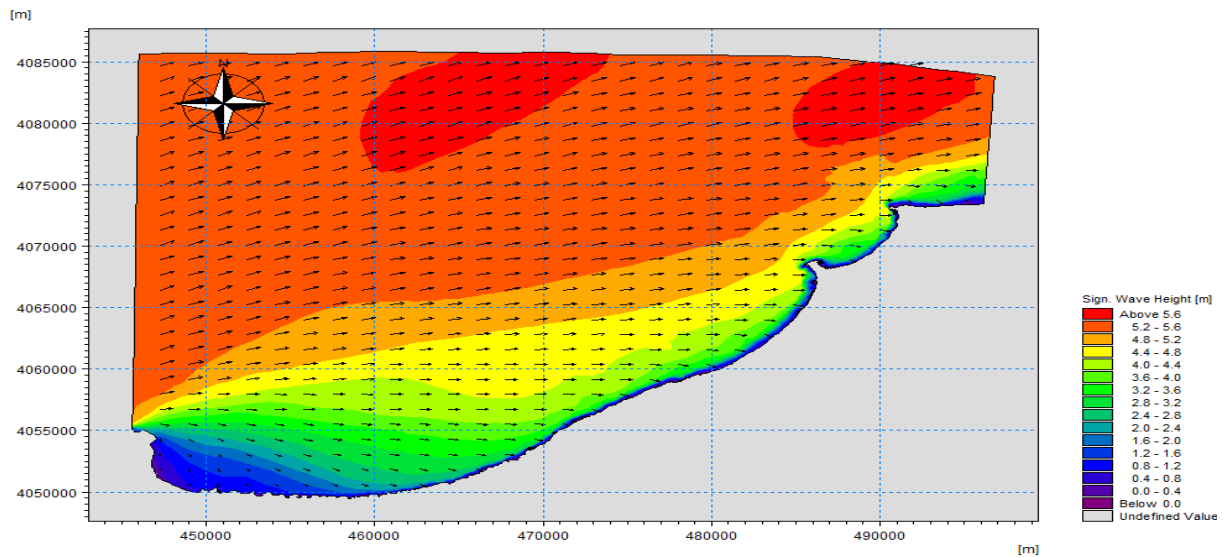
```
▶ from pyextremes import get_extremes
from pyextremes.plotting import plot_extremes

extremes = get_extremes(data, "POT", threshold=3.7, r="12H")
plot_extremes(
    ts=data,
    extremes=extremes,
    extremes_method="POT",
    extremes_type="high",
    threshold=3.7,
    r="12H",
)
```



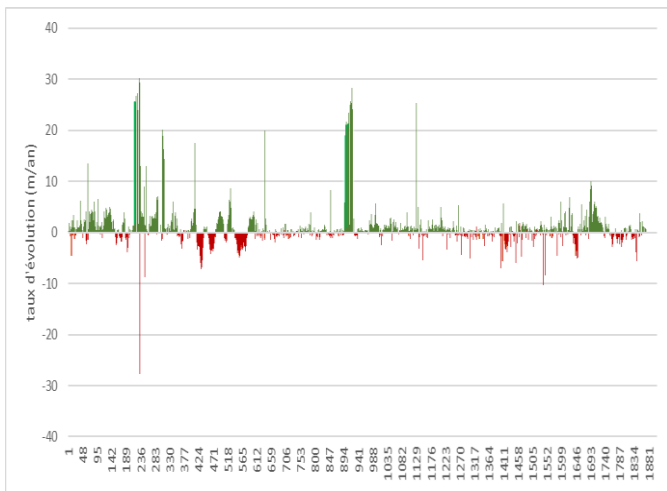
Représentation de méthode POT sur les hauteurs de la houle de 1992-2021

- Modélisation hydrodynamique : houle et courant à la côte et dynamique sédimentaire (modélisation avec Mike 21) .



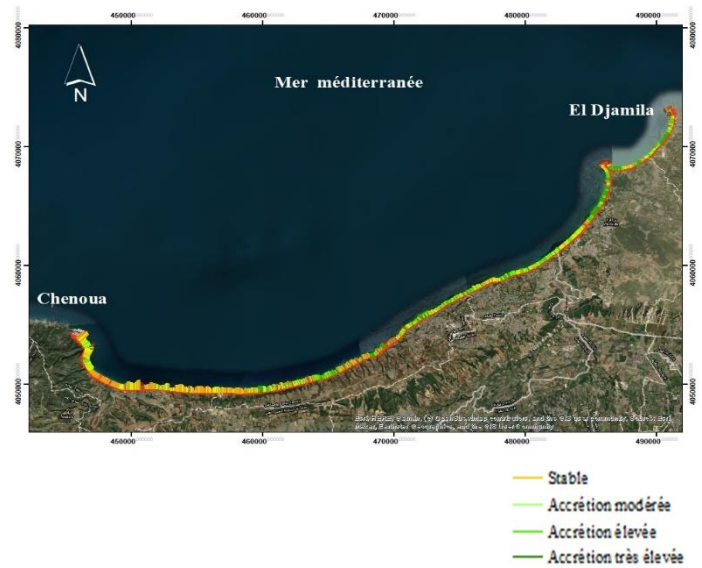
Carte de la propagation de la houle de la direction ouest (MWD = 270°W)

- Cartographie de l'évolution spatio-temporelle du trait de côte (Arcgis avec différents traits de côte)



Le taux d'évolution EPR de la baie de Bou ismail 2007-2022

- Accrétion
- Erosion



Carte de l'évolution spatio-temporelle du trait de côte de la baie de Bou ismail (2007-2022)

Projet	Frais
Ordinateurs et périphériques, Logiciels de cartographie, Matériel de stockage, Matériel de communication, Données géo spatiales, Papiers pour les cartes+ plastiques, Matériel de bureau, Matériel de collecte de données sur le terrain	7 472 800,00 da
Loyer	720 000,00 da
Dossier administratif	150 000,00 da
Coût du projet	8 342 800,00 da

Aspect Economique :

année	1 an (12 mois)	2^{ème} année	3^{ème} année
études	2 études	4 études	6 études
Formation	4 formations	8 formations	12 formations

Coût de production :

Désignation	1 an	2 ^{ème} année	3 ^{ème} année
<ul style="list-style-type: none"> • Etude préliminaire: Collecte des donnés, Cartographie, hydrologie. • Projection des solutions de protection en 2 ou 3 variantes • Levé topo-bathymétrique • Dimensionnement de ouvrages de la solution retenue • Note de calcul • Etude de génie civil • Impression et reprographie 	3 970 000 da	7 940 000 da	11 190 000 da

1 an (12 mois) FORMATION	2 ^{ème} année FORMATION	3 ^{ème} année FORMATION
500 000,00 * 4 = 2 000 000 ,00 DA	500 000,00 * 8 = 4 000 000 ,00 DA	500 000,00 *12 = 6 000 000 ,00 DA

Chiffre d'affaires :

Nous offrirons les mêmes services durant les 3 premières années, arrivé à une certaine stabilité d'autres services seront ajoutés à l'étude

Résultat		
2 609 067.00	8 579 067.00	13 829 067.00

- 1- CHIFFRE D’AFFAIRE REALISE LA PREMIER EST 3 970 000.00 DA + LA FORMATION 2 000 000.00 DA = 5 970 000.00 DA (1 année)
- 2-
- 3- CHIFFRE D’AFFAIRE REALISE LA PREMIER EST 1 985 000.00 DA* 4 + LA FORMATION 4 000 000.00 DA = 11 940 000.00 DA (2 année)
- 4-
- 5- CHIFFRE D’AFFAIRE REALISE LA PREMIER EST 1 985 000.00 DA*6 + LA FORMATION 6 000 000.00 DA = 17 190 000.00 DA (3 année)

COMMENT CALCULE NOTRE BENEFICE DE LA PREMIERE ANNEE

C.A		5 970 000.00
	-	
LES CHARGES		3 360 933.00
	=	
BENEFICE		2 609 067.00

COMMENT CALCULE NOTRE BENEFICE DE LA DEUXIEME ANNEE

C.A		11 940 000.00
	-	
LES CHARGES		3 360 933.00
	=	
BENEFICE		8 579 067.00

COMMENT CALCULE NOTRE BENEFICE DE LA TROIXIEME ANNEE

C.A		17 190 000.00
	-	
LES CHARGES		3 360 933.00
	=	
BENEFICE		13 829 067.00

Note :

Etant donné le manque de budget, nous aurons besoins d'un aide financière comme l'ANAD.

Nos spécialité :

- Définition de la problématique
- Collecte de données
- Analyse des bases de données :
 - o Météorologique et océanographique : (vents, houles, courants, température, précipitations....)
 - o Géologique et géomorphologiques : bathymétrie, sédimentologie, relief,
 - o Cartographique : images satellitaires, photos aériennes, cartes, plans, modèles numériques du terrain,
 - o Hydrographiques : bassins versants, oueds et rivières, barrages,
 - o Démographiques : répartition de la population, occupation des sols, infrastructures,
- Modélisation et traitement :
 - o Utilisation des logiciels et modèles performants (Arcgis, Mike21 (DHI), ENVI, Telemac, Delft 3D, Matlab,..
 - o Présentation des résultats sous forme : tableau, cartes, graphes,
 - o Interprétation des résultats
- Proposition des solutions :
 - o Ouvrages de protection (ouvrages, digues, rechargement artificiel, geotubes,...)
 - o Application des texts et decrets (loi littorale 02-02, PDAU et POS,...)
- Etablir un cahier de charge

Marché :

Ministères :

- Ministère de l'environnement et des énergies renouvelables
- Ministère de l'intérieure, des collectivités locales et de l'aménagement du territoire
- Ministère des travaux publics et des infrastructures de base
- Ministère des transports
- Ministère de l'hydraulique
- Ministère de l'énergie et des mines
- Ministère de l'habitat, de l'urbanisme et de la ville

Secteurs :

Différentes directions :

Entreprises étatiques et privées

Message positif

- Étant passionnées par la cartographie et la collecte des données, nous souhaitons offrir des services de la haute qualité à nos clients, en créant le déficit de créer notre bureau d'études.
- La création de notre bureau d'études nous permettra de travailler sur des projets variés et stimulants,
- Notre projet est innovant et sera le premier en Algérie.
- Il est conforme aux réglementation en matière de collecte de données et de la vie privé et respecté les lois et les règlements locaux ,nationaux et internationaux applicable a notre domaine marin,
- Le but de notre projet est d'améliorer l'économie de notre pays
- Étant passionnées par la cartographie et la collecte des données, nous souhaitons offrir des services de la haute qualité à nos clients, en créant le déficit de créer notre bureau d'études.

Resume :

À partir de l'hypothèse selon laquelle le changement climatique et l'élévation consécutive du niveau de la mer Méditerranée sont désormais les phénomènes les plus inquiétants pour la communauté scientifique, plusieurs études ont tenté de contribuer aux efforts déployés pour évaluer l'impact des événements météo-océaniques extrêmes sur l'évolution spatiotemporelle des côtes algériennes

De 2007 à 2022, le littoral de la baie de Bou ismail a subi une forte dégradation, avec une perte de 50 % de ses plages due à l'accrétion, avec un recul moyen d'environ -1.02 mètre par an. Cette situation s'explique par la combinaison de facteurs naturels tels que le climat des houles, ainsi que de facteurs anthropiques tels que le développement du tourisme balnéaire, l'industrie et l'extension de l'urbanisation.

les champs des courants, la propagation des vagues et du transport sédimentaire, en se basant sur trois directions principales de la houle, dont celle de Nord Nord Ouest, qui est la plus défavorable avec une hauteur de entre 4.1 m et 6.8 m selon les traitements statistiques réalisés.

Sur la superficie totale de 325.726, un risque de submersion est présent avec un niveau d'inondation minimum de 2 mètres, tandis que sur hectares 863.74, le niveau de submersion maximum atteint 6 mètres.

Mots-clés : Changement Climatique, élévation du niveau de la mer, Evènement météo-océanique, baie de Bous ismail, submersion.

Summary :

Starting from the hypothesis that climate change and the consequent rise in the level of the Mediterranean sea are now the most worrying phenomena for the scientific community, several studies have attempted to contribute to efforts to assess the impact of meteorological events. extreme ocean waves on the spatiotemporal evolution of the Algerian coasts

From 2007 to 2022, the coastline of the Bay of Bou ismail suffered severe degradation, with a loss of 50% of its beaches due to accretion, with an average decline of around -1.02 meters per year. This situation is explained by the combination of natural factors such as the swell climate, as well as anthropogenic factors such as the development of seaside tourism, industry and the extension of urbanization.

current fields, wave propagation and sediment transport, based on three main directions of the swell, including that of North North West, which is the most unfavorable with a height of between 4.1 m and 6.8 m depending on the treatments statistics produced.

Over the total area of 325.726 hectares there is a risk of submergence with a minimum flood level of 2 meters, while over 863.74 hectares the maximum flood level reaches 6 meters.

Keywords: Climate change, sea level rise, meteo-ocean event, Bous ismail bay, submersion.

ملخص :

انطلاقاً من الفرضية القائلة بأن تغير المناخ وما يترتب عليه من ارتفاع في مستوى البحر الأبيض المتوسط هما الآن أكثر الظواهر إثارة للقلق بالنسبة للمجتمع العلمي ، فقد حاولت العديد من الدراسات المساهمة في الجهود المبذولة لتقييم تأثير الأحداث الجوية. التطور الزمني المكاني للسواحل الجزائرية

من عام 2007 إلى عام 2022 ، عانى ساحل خليج بو إسماعيل من تدهور شديد ، مع خسارة 50 ٪ من شواطئه بسبب التراكم ، بمتوسط انخفاض يبلغ حوالي -1.02 متر في السنة. يفسر هذا الوضع بمجموعة من العوامل الطبيعية مثل المناخ المتضخم ، فضلاً عن العوامل البشرية مثل تطوير السياحة الساحلية والصناعة وتوسيع نطاق التحضر.

الحقول الحالية وانتشار الأمواج ونقل الرواسب ، بناءً على ثلاثة اتجاهات رئيسية للانتفاخ ، بما في ذلك اتجاه الشمال الشمالي الغربي ، وهو الأكثر سلبية بارتفاع يتراوح بين 4.1 م و 6.8 م اعتماداً على إحصائيات المعالجات المنتجة.

على مساحة إجمالية تبلغ 325.726 هكتاراً ، هناك خطر الغمر مع مستوى أدنى للفيضان يبلغ 2 متر ، بينما يصل الحد الأقصى لمستوى الفيضان على 863.74 هكتاراً إلى 6 أمتار.

الكلمات المفتاحية: تغير المناخ ، ارتفاع مستوى سطح البحر ، أحداث المحيطات ، خليج بوس إسماعيل ، الغمر