

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

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 :

**Étude de la vulnérabilité de la région de Bou -
Ismail, recours à la modélisation pour l'étude de la
submersion marine**

Présenté par :

AID Thinhinane

MENASRI Hayat

Soutenu le 27/09/2022 devant le jury composé de :

M. OTMANI H	MCB (ENSSMAL)	Président
M BELKESSA R.	Professeur (ENSSMAL)	Promoteur
Mme MOUHOUBI I.	DOC (LEM)	Co-promotrice
Mme MAHDID S.	MAA (ENSSMAL)	Examinatrice
M LAOUADJ A.	MCB (ENSSMAL)	Examinateur

Année Universitaire : 2021 / 2022

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

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 de Master

Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière : Géologie et Aménagement du littoral

Spécialité : Gestion et Protection du Littoral

Thème :

**Étude de la vulnérabilité de la région de Bou -
Ismail, recours à la modélisation pour l'étude de la
submersion marine**

Présenté par :

AID Thinhinane

MENASRI Hayat

Soutenu le 27/09/2022 devant le jury composé de :

M OTMANI H.	MCB (ENSSMAL)	Président
M BELKESSA R.	Professeur (ENSSMAL)	Promoteur
Mme MOUHOUBI I.	DOC (LEM)	Co-promotrice
Mme MAHDID S.	MAA (ENSSMAL)	Examinatrice
M LAOUADJ A.	MCB (ENSSMAL)	Examinatrice

Année Universitaire : 2021 / 2022

Remerciements

Avant d'ouvrir ce mémoire, on tient à remercier le bon dieu le tout puissant de nous avoir donnée le privilège et la chance d'étudier et de suivre le chemin de la science et qui nous a donné le courage, la volonté et la patience pour faire ce travail.

Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de notre promoteur M.BELKASSA R, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent aussi à notre Co-promotrice Mme. MOUHOUBI N pour son aide et ses encouragements.

Un énorme merci à tous les membres de jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et de participer à cette soutenance.

M. OUTMANI H pour avoir accepté de faire partie du jury, et pour l'honneur qu'il nous a fait d'être président.

Mme. MEHDID et M. LAOUADJ pour avoir accepté de faire partie du jury d'examineurs.

Nous tenons à remercier aussi les membres de laboratoire des études maritime pour l'accueil qu'ils nous ont réservé, le temps que chacun de ses membres nous a accordé, et plus globalement pour toutes les informations, références bibliographiques, réflexions et corrections que chacun a apporté, et qui ont nourrit ce travail, grâce à eux notre travail est sorti des ténèbres à la lumière.

Nos remerciements s'adressent également à tous les professeurs, les doctorants, les enseignants et les étudiants de l'ENSSMAL pour leur générosité et leur grande patience, ils ont su faire preuve de partage de connaissances malgré leurs charges académiques et professionnelles

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

À celle qui m'arrosé de tendresse et d'espoirs, à la source d'amour incessible à la mère des sentiments fragiles qui ma bénie par ces prières à ma très chère mère.

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

À support de ma vie, qui m'a appris d'être forte et ma dirigé vers la gloire à mon très cher père.

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection paix a ton âme.

À mes très chers frères Massi et Adem et ma chère sœur céliné puisse dieu vous donne la santé, le bonheur et surtout la réussite.

À mes grands-parents paix à leurs âmes.

À mes petits bouts de sucre : Taym et Anaëlle.

À mes meilleures amies Ahlem, Khadidja, Rania, Hayat, Imen Maroua, Imen, Massilia, Manel, wawa, Hayet N, Amani.

À mes collègues de la promo GPL.

À toute l'équipe de plongée du club Bab El Oued El Kittani.

Enfin je dédie ce travail à toutes les personnes qui de près ou de loin m'ont apporté leur aide, du fond de mon cœur je vous dédie ce travail.

Thinhinane

Dédicace

Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour :

À celle qui m'arrosé de tendresse et d'espoirs, à la source d'amour incessible à la mère des sentiments fragiles qui ma bénie par ces prières ma mère.

Àu support dans ma vie, qui m'a appris d'être forte et ma dirigé vers la gloire mon père.

À mes chers frères Chouki et Nasro et mes chères sœurs Şihem, Şara, Yamena, Fatma et Kamar et mes neveux et mes nièces qui m'ont toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études.

À mes grands-parents paix à leurs âmes.

À mon binôme Tina et mes meilleures amies Cynthia, Sousou, Zahra et Manel

À tous mes chers collègues Amani, Akram, Ahlem, Khadidja, Hayet, Djouhaina, Wawa, , Marwa, Kawther, Amel, Heba, Kahina, Nawal et la promo GPL.

Et ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce mémoire soit possible, je vous dis merci.

Hayat

Table des matières

Remerciements	i
Liste des figures	ii
Liste des tableaux	v
Liste des Annexes :	vi
Acronyme :	vii
Introduction Générale	1
Chapitre I : Généralités sur la zone d'étude.....	3
I.1. Description et Situation géographique de la Baie Bou-Ismaïl :	3
I.2. Contexte physique de la Baie de Bou-Ismaïl :	4
I.2.1. Cadre géologique :	4
I.2.2. Cadre géomorphologique :	5
I.2.3. Cadre sédimentologique :	5
I.2.4. Étude climatique	7
I.a. Vent :	7
I.b. La température.....	10
I.c. Les précipitations	10
I.2.5. Cadre océanographique.....	11
I.a. Houle	11
I.b. Courant.....	12
I.c. Marée.....	14
I.2.6. Cadre hydrographique.....	14
I.a. Oued Mazafran	14
Chapitre II : Matériels et Méthodes.....	16
II.1. Introduction.....	16
II.2. Evolution du trait de côte :	16
II.2.1. Matériel d'étude :	17
II.2.2. Méthodologie de travail :	19

II.3. Étude bathymétrique :	21
II.3.1. Logiciel utilisé :.....	21
II.3.2. Traitement des données :	21
II.4. Étude hydrodynamique :.....	22
II.4.1. La bathymétrie :	22
II.4.2. La définition des directions des houles pénalisantes :.....	23
II.5. Méthodologie de la submersion marine :	24
Chapitre III : Résultats et discussion	27
III.1. Evolution du trait de côte :	27
III.1.1. Evolution du trait de côte par période :	29
• Période 2004-2008	29
• Période 2008	30
• Période 2011-2019	32
• Période 2019-2022	33
• Période 2004-2022 :	34
III.2. Étude hydrodynamique	36
III.2.1. Introduction.....	36
III.2.2. Données de base	36
III.2.2.a. Wave Climate :	36
III.2.2.b. Analyse statistique des évènements extrêmes de la houle de la cote algéroise (toute direction confondue)	37
III.2.2.c. Les conditions de projet à simuler :	43
III.3. Etude hydrodynamique	44
III.3.a. Principe de la modélisation.....	45
III.3.b. Modèle Mike.....	45
III.4. L'aléa de la submersion marine dans la baie de Bou-Ismaïl.....	73
III.4.1. Introduction :.....	73
III.4.2. La submersion marine	73

III.4.3. Principe de la cartographie des zones d'aléa submersion marine	76
III.4.4. Le phénomène responsable de ces submersions marines d'origine météorologique	77
Conclusion	89
Annexes	90
Bibliographie.....	98

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur la zone d'étude

Figure I- 1 : Situation géographique de la Baie de Bou-Ismail.	3
Figure I- 2 : Cadre géologique de la baie de Bou-Ismail (LEM, 1998).	4
Figure I- 3 : Carte sédimentologique de la baie de Bou-Ismail (LEM, 1998).	7
Figure I- 4 : Rose des vents saisonnière	8
Figure I- 5 : Rose des vents annuelle	8
Figure I- 6 : Rose des vents par mois	9
Figure I- 7 : Les variations mensuelles des températures la baie de Bou Ismail (RP5 1988-2020).	10
Figure I- 8 : Variation des moyennes annuelles des précipitations de la baie de Bou Ismail (RP5, 1988- 2020).	11
Figure I- 9 : Rose des Houles saisonniers	12
Figure I- 10 : Rose des houles annuelle.....	12
Figure I- 11 : Rose des houles par mois	13
Figure I- 12 : Réseau hydrographique d'Oued Mazafran.	15

Chapitre II : Matériels et Méthodes

Figure II- 1 : Barre d'outils DSAS.....	18
Figure II- 2 : Digitalisation des traits de côte (2022).	19
Figure II- 3 : Fenêtre du dialogue de création des transects sur l'extension DSAS/ logiciel ArcGis.....	20
Figure II- 4 : Organigramme de création d'une carte bathymétrique.	22
Figure II- 5 : Rose des vagues de la baie de Bou-Ismail (LEM,2017).	23
Figure II- 6 : Modèle numérique du terrain de la Baie de Bou-Ismail.....	25

Chapitre III : Résultats et discussions

Figure III- 1 : Carte représentative de la ligne de base et des traits de côtes (2004, 2008, 2011, 2019, 2022).	27
Figure III- 2 : Carte représentative des transects de la baie de Bou-Ismail.....	28
Figure III- 3 : Carte représentative du rythme d'évolution du trait de côte de la Baie de Bou-Ismail entre 2004 et 2008.....	29
Figure III- 4 : Changement moyen de la position de la ligne de rivage dans la Baie de Bou-Ismail durant la période (2004-2008).	29

Figure III- 5 : Carte représentative du rythme d'évolution du trait de côte de la Baie de Bou-Ismaïl entre 2008 et 2011.....	30
Figure III- 6 : Changement moyen de la position de la ligne de rivage dans la Baie de Bou-Ismaïl durant la période (2008-2011).....	31
Figure III- 7 : Carte représentative du rythme d'évolution de la position de la ligne de rivage dans la Baie de Bou-Ismaïl durant la période (2011-2019).....	32
Figure III- 8 : Changement moyen de la position de la ligne de rivage dans la Baie de Bou-Ismaïl durant la période (2011-2019).....	32
Figure III- 9 : Carte représentative du rythme d'évolution de la position de la ligne de rivage dans la Baie de Bou-Ismaïl durant la période (2019-2022).....	33
Figure III- 10 : Changement moyen de la position de la ligne de rivage dans la Baie de Bou-Ismaïl durant la période (2019-2022).....	34
Figure III- 11 : Carte représentative du rythme d'évolution du trait de côte de la Baie de Bou-Ismaïl (2004-2022).	34
Figure III- 12 : Changement moyen de la position de la ligne de rivage dans la Baie de Bou-Ismaïl durant la période (2004-2022).....	35
Figure III- 13 :Méthodes de sélection de seuil dans la modélisation POT	40
Figure III- 14 : Graphe du QQ, PP et le graphique du niveau de retour pour la détermination du seuil.....	40
Figure III- 15 : Les valeurs retenues pour le calcul des extrêmes-secteur omnidirectionnel.....	41
Figure III- 16 : Ajustement par la loi GPD secteur NNW	42
Figure III- 17 Ajustement par la loi GPD secteur NORD	42
Figure III- 18 Les valeurs retenues pour le calcul des extrêmes-secteur Nord	42
Figure III- 19 : Les valeurs retenues pour le calcul des extrêmes-secteur NNW	42
Figure III- 20 : Les valeurs retenues pour le calcul des extrêmes-secteur NW	42
Figure III- 21 Ajustement par la loi GPD secteur NW	42
Figure III- 22 : Maillage du modèle zoom sur une partie de la baie de Bou Ismaïl.....	46
Figure III- 23 : Carte bathymétrie de la baie de Bou Ismaïl.	47
Figure III- 24 : Champ des houles dans la zone d'étude N 360°	52
Figure III- 25 : Champ des courants dans la zone d'étude N 360°	53
Figure III- 26 : Champ des houles dans la zone d'étude NNW 337°	54
Figure III- 27 : Champ des courants dans la zone d'étude NNW 337°	54
Figure III- 28 : Champ des houles dans la zone d'étude NNW 315°	55
Figure III- 29 : Champ des courants dans la zone d'étude NNW 315°	55
Figure III- 30 : Champ des houles dans la zone d'étude N 360°	57

Figure III- 31 : Champ des courants dans la zone d'étude N 360°	57
Figure III- 32 Champ des houles dans la zone d'étude NNW 337°	58
Figure III- 33 : Champ des courants dans la zone d'étude NNW 337°	58
Figure III- 34 : Champ des courants dans la zone d'étude NNW 315°	59
Figure III- 35 Champ des houles dans la zone d'études NNW 315°	59
Figure III- 36 : Champ des houles dans la zone d'étude N 360°	61
Figure III- 37 : Champ des courants dans la zone d'étude N 360°	61
Figure III- 38 : Champ des houles dans la zone d'étude NNW 337°	62
Figure III- 39 : Champ des courants dans la zone d'étude NNW 337°	62
Figure III- 40 : Champ des houles dans la zone d'étude NW 315°	63
Figure III- 41 : Champ des courants dans la zone d'étude NW 315°	63
Figure III- 42 : Champ des houles dans la zone d'étude N 360°	65
Figure III- 43 : Champs des courants dans la zone d'étude N 360°	65
Figure III- 44 : Champs des houles dans la zone d'étude NNW 337°	66
Figure III- 45 : Champ des courants dans la zone d'étude NNW 337°	66
Figure III- 46 : Champ des houles dans la zone d'étude NW 315°	67
Figure III- 47 : Champ des courants dans la zone d'étude NW 315°	67
Figure III- 48 : Champ des houles dans la zone d'étude N 360°	69
Figure III- 49 : Champ des courants dans la zone d'étude N 360°	69
Figure III- 50 : Champ des houles dans la zone d'étude NNW 337°	70
Figure III- 51 : Champ des courants dans la zone d'Eude NNW 337°	70
Figure III- 52 : Champ des houles dans la zone d'étude NW 337°	71
Figure III- 53 : Champ des courants dans la zone d'étude NW 337°	71
Figure III- 54 : Typologie des submersions marines (franchissement, débordement, rupture d'ouvrage). (BRGM and Cachan, 2012).....	75
Figure III- 55 : Principe de la cartographie des zones d'aléa submersion marine.....	76
Figure III- 56 : Principe de formation du waveset-up.	79
Figure III- 57 : Carte de l'aléa submersion sur la Baie de Bou-Ismaïl en cas d'élévation de niveau de la mer.	83
Figure III- 58 : Superficies des terres inondées par les différents niveaux d'élévation	83
Figure III- 59 : L'aléa submersion sur la Baie de Bou-Ismaïl en cas d'élévation de 2m de niveau de la mer.....	84
Figure III- 60 : Superficies des terres inondées par une élévation du niveau de la mer de 2m. ..	85
Figure III- 61 : L'aléa de la submersion sur la Baie de Bou-Ismaïl en cas d'élévation de 3m de niveau de la mer	85

Figure III- 62 : Superficies des terres inondées par une élévation du niveau de la mer de 3m...	86
Figure III- 63 : L'aléa submersion sur la Baie de Bou-Ismaïl en cas d'élévation de 4m de niveau de la mer.....	87
Figure III- 64 : Superficies des terres inondées par une élévation du niveau de la mer de 4m...	87
Figure III- 65 : L'aléa submersion sur la Baie de Bou-Ismaïl en cas d'élévation de 5m de niveau de la mer.	88
Figure III- 66 : Superficies des terres inondées par une élévation du niveau de la mer 5m	88

Liste des tableaux

Tableau II- 1 : Conditions aux limites de la houle de la zone de la baie de Bous-Ismaïl.	23
Tableau III- 1 : Capture des séries temporelles des paramètres des houles (Wave Climate)	36
Tableau III- 2 : La définition des paramètres de la houle de WaveClimate.	37

Liste des Annexes :

Annexe-Tableau 1 : Classification des valeurs changement du trait de côte à partir du paramètre EPR (Nassar K et al., 2018).	90
Annexe-Figure 1 : Variation du NSM du trait de côte selon les transects de 2004-2022 au niveau de la zone de Sidi Ghiles (AID et MENASRI, 2022).....	90
Annexe-Figure 2 : 2004 2008 Variation du NSM du trait de côte selon les transects de 2004-2008 au niveau de la zone de Sidi Ghiles (AID et MENASRI, 2022).	91
Annexe-Figure 3 : Variation du NSM du trait de côte selon les transects de 2008-2011 au niveau de la zone de Sidi Ghiles (AID et MENASRI, 2022).....	91
Annexe-Figure 4 : Variation du NSM du trait de côte selon les transects de 2011-2019 au niveau de la zone de Sidi Ghiles (AID et MENASRI, 2022).....	92
Annexe-Figure 5 : Variation du NSM du trait de côte selon les transects de 2019-2022 au niveau de la zone de Sidi Ghiles (AID et MENASRI, 2022).....	92
Annexe-Figure 6 : Étape de réalisation des roses des vents sur Mike21 :	93
Annexe-Figure 7 : Réalisation des cartes d'aléa des différents scénarios à partir d'un MNT.....	97

Acronyme :

2D : Deux dimensions.

Deg : degré.

DHI : Danish Hydraulics Institute.

DSAS : Digital Shoreline Analysis System.

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

EPR : End Point Rate.

Fig : Figure.

GPD : Distributions de Pareto Généralisées Generalized Pareto (distributions).

GPS : Système de positionnement Globale (Global Positioning System).

H : hauteur.

HD : Hydrodynamic.

HS: Hauteur significative.

Km : kilomètre.

LEM : laboratoire d'Etude Maritime.

LRR : Linear Regression Rate.

m : mètre.

m/s : mètre par seconde.

Max : Maximum.

Min : Minimum.

MNT : Modèles Numériques de Terrain.

N : Nord.

NNW, Nord Nord-Ouest.

NSM : Net Shoreline Movement

NW : Nord-Ouest.

PAC : programme d'aménagements côtiers.

POT : Pic au-dessus du Seuil (Peak Over Threshold).

PPRL : Plan de Prévention des Risques Littoraux

S : seconde

.

SIG : Système d'information Géographique.

SW : Spectral Wave.

T : Période.

Tab : Tableau.

Tp : Période de rouleur de la houle.

UTM : Transverse Universelle de Mercator (Universal Transverse Mercator).

WGS : Système Géodésique Mondial (World Geodetic System 1984).

Introduction Générale

Le littoral est la bande de terre constituant la zone comprise entre une étendue maritime et la terre ferme, le continent, ou l'arrière-pays. Les littoraux constituent des environnements fragiles dans lesquels se manifestent de multiples facteurs d'évolution aux actions, interactions et rétroactions complexes. Les hommes doivent savoir utiliser ces milieux sans en abuser (Paskoff, 1992).

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 Sánchez-Arcilla, 1997).

L'élévation effective et attendue du niveau de la mer Méditerranée représente l'un des enjeux majeurs pour l'Algérie durant les années à venir.

Parmi les catastrophes côtières la submersion marine qui est une inondation temporaire de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques et marégraphiques sévères (MATE, 1997), généralement née 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.

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

- La surcote atmosphérique : le passage d'un important système dépressionnaire est caractérisé par des variations du niveau marin selon les mécanismes suivants :
- 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 cote, 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 atteinte par le jet-de-rive sur la côte.

L'objectif de cette étude prospective est la caractérisation et la cartographie des terres qui sont à risque de submersion dans la cote de la zone d'étude qui sont basées sur des scénarios d'élévation du niveau de la mer, modélisée par l'utilisation du logiciel de cartographie « ArcGis 10.5 » qui permettra de créer des cartes d'aléa pour des élévations de niveau marin différentes.

A travers ce modeste travail on va dresser un bilan général détaillé sur l'étude de submersion marine dans la zone d'étude ; tout en partageant le travail sur 4 chapitres :

Chapitre 01 : Nous avons décrit les aspects généraux du milieu ; 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 02 : Nous avons utilisé plusieurs matériels et méthodes pour effectuer des différentes études (évolution du trait de côte, bathymétrie, réfraction de la houle et transit sédimentaire)

Chapitre 03 : est consacré à la présentation des résultats de 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 et aussi les 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 et on finalise par la cartographie de l'aléa de la submersion marine.

Chapitre I : Généralités sur la zone d'étude

I.1. Description et Situation géographique de la Baie Bou-Ismaïl :

La Baie de Bou-Ismaïl, anciennement appelée Castiglione, est l'une des plus importantes baies de la côte algérienne car elle abrite plusieurs ports d'importance économique notamment le port de Bou Haroun. Située dans la partie centrale du littoral algérien, à 50 km à l'Ouest d'Alger dans la wilaya de Tipaza, entre (2°24' Est et 36°38' Nord) à l'Ouest et (2°55' Est et 36°48' Nord), à l'Est (**Braïk, 1989, in Haddouche, 2003**).

La baie est limitée par de la pointe de Cap Caxine (Ras Acrata) à l'Est de Sidi-Fredj, et par le Mont **Chenoua** à l'Ouest, par la plaine de la Mitidja au Sud et la mer méditerranéenne au Nord.

L'ouverture de la baie de Bou-Ismaïl est d'environ 40 Km, et s'oriente du Sud-Ouest à Nord-Est. Cette baie couvre une surface de l'ordre de 350 Km². (**Braïk, 1989, in Haddouche, 2003**).

La baie est le réceptacle d'oued à régime irrégulier : Mazafran, Nador et Béni-Messous. (**Khaoui, 2003**).

Concernant notre étude, nous avons choisies le site situé entre Cap Caxine (Ras Acrata) à l'Est de Sidi-Fredj et l'embouchure de l'Oued Mazafran à l'ouest sur un linéaire d'environ 15 km. Fig (I.1). Spatialement, elle se localise entre 36°48'15"N et 2°53'39"E à l'est 36°41'51"N et 2°48'6"E à l'ouest.

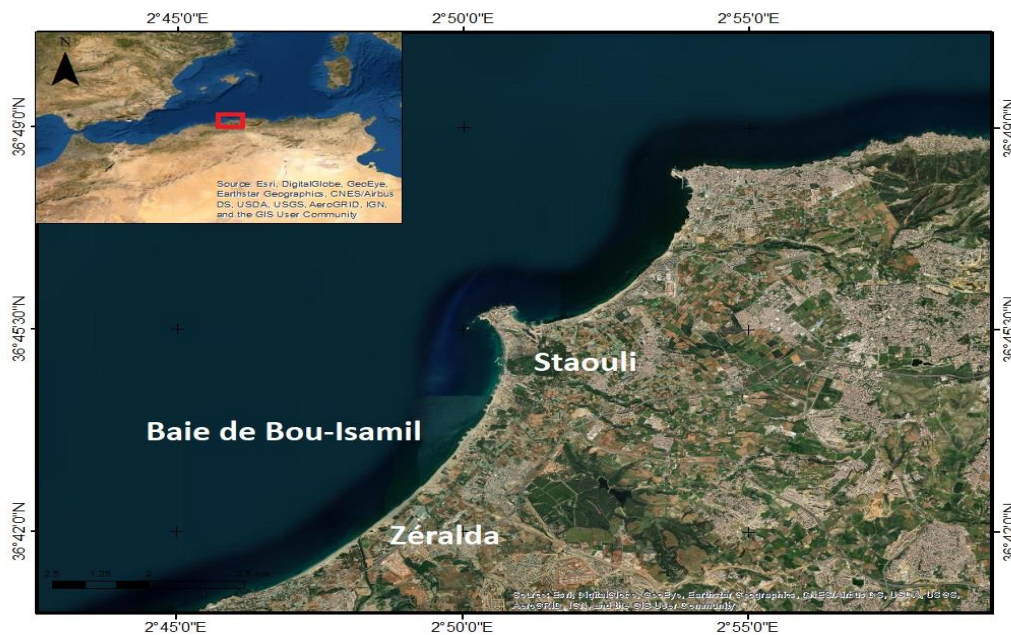


Figure I- 1 : Situation géographique de la Baie de Bou-Ismaïl.

I.2. Contexte physique de la Baie de Bou-Ismaïl :

I.2.1. Cadre géologique :

La bordure littorale de la zone étudiée est située dans la baie de Bous-Ismaïl, son littoral est caractérisé par une importante accumulation de dunes actuelles, des alluvions, de sables et graviers.

La bordure Nord du sahel d'Ain Tagourait (ex **Bérard**) à Ain Bénian est constituée de terrains d'âges Quaternaire.

Le faciès du Quaternaire marin, largement représenté tout le long du littoral offre la succession qui débute par un calcaire coquille (connue aussi sous le nom de lumachelle), un grès ou aussi dépôt de plage qui termine l'épisode marin et viennent ensuite les dépôts dunaires, plus lapidifiés quand il s'agit de terrasses plus récentes.

Les dépôts marins peuvent atteindre les 10 mètres d'épaisseur alors que les dépôts éoliens arrivent à une trentaine de mètres d'épaisseur.

Ce littoral physique est donc très diversifié, sa morphologie justifie les influences des variations du niveau marin pendant le paléocène. Les terrasses quaternaires post-calabriennes paraissent reposer sur les marnes plaisanciennes.

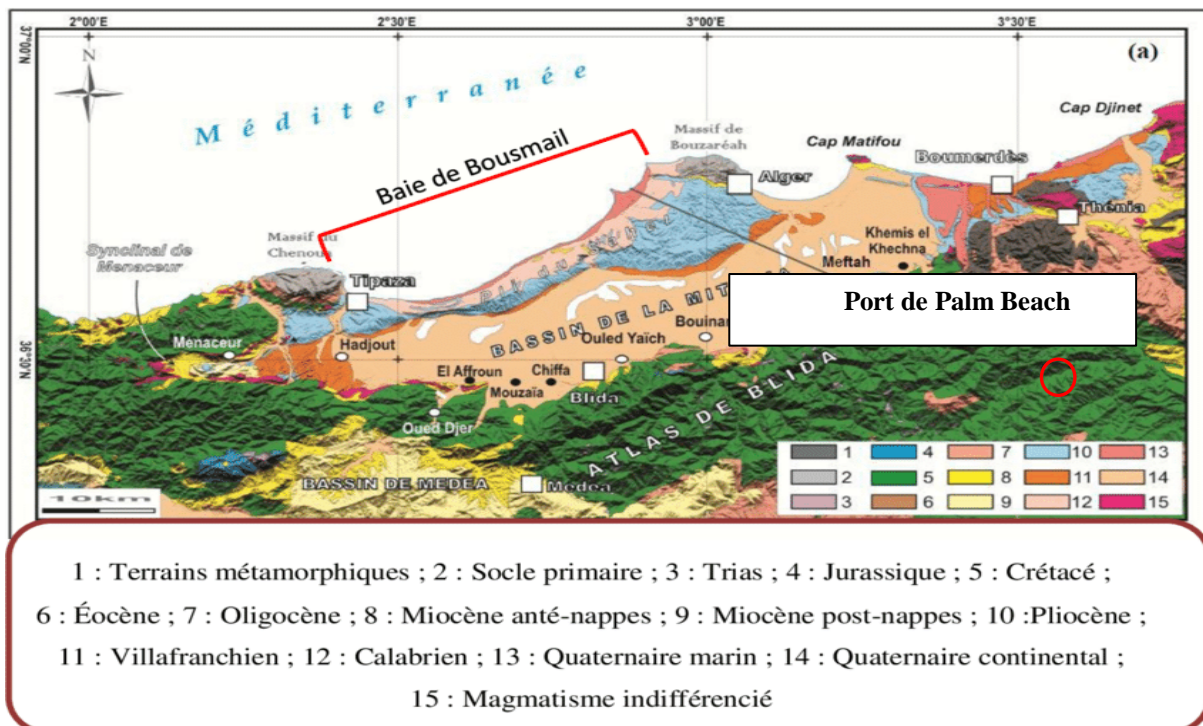


Figure I- 2 : Cadre géologique de la baie de Bou-Ismaïl (LEM, 1998).

I.2.2. Cadre géomorphologique :

La zone d'étude faisant partie du littoral du sahel occidental d'Alger correspond à une étroite plaine côtière de 500 mètres à 1 km de largeur, et une altitude comprise entre 0 et 25 mètres.

L'étude morpho-structurale constitue l'élément le plus déterminant de la compréhension de l'évolution géomorphologique de la zone d'étude (**Kerman, 2016**).

La plus grande partie de la baie de Bou-Ismaïl est caractérisée par des aspects littoraux peu diversifiés à savoir : des plages (Palm Beach, Sidi Fredj ...), des dunes (le cordon de Zéralda) et des côtes à falaises.

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 Sidi Fredj jusqu'à Oued Mazafran.

Les dunes littorales de la baie de Bou-Ismaïl constituent le prolongement oriental d'un cordon dunaire prenant naissance à l'embouchure de l'Oued Mazafran et qui continue jusqu'à Sidi Fredj.

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**).

Le cordon dunaire est considéré comme une barrière naturelle de protection de l'arrière-pays face aux forces côtières.

I.2.3. Cadre sédimentologique :

Vers l'embouchure de l'Oued Mazafran et jusqu'à une profondeur de 25m, les sables grossiers caractérisent la baie. Au-delà de ce dépôt fluviaux marin et jusqu'à une profondeur de 10 à 15m, les sables moyens réapparaissent qu'au niveau de Khemisti sur une zone étroite continue jusqu'à Tipaza. (**Al Sid Chikh et al.,2009**).

Une bande de sable fin apparaît au large de Sidi-Fredj et Palm Beach à moins de 2 m de profondeur et tapisse le fond de 15m à 25m tout le long de la baie.

Parallèlement à ces faciès, les sables fins vaseux longent la côte entre 25 à 40m de profondeur. Au large de Sidi-Fredj (2 à 3Km), un dépôt de sable moyen et gravier. (**LEM, 1998**).

L'analyse des sédiments de la baie de Bou-Ismaïl a permis de mettre en évidence la grande diversité sur le plan sédimentaire des fonds de cette baie, neuf faciès, identifiés : les sables fins, les sables envasés, les vases sableuses, les sables graveleux, les graviers envasés, les sables grossiers et fins graviers, les vases pures et le faciès rocheux.

La répartition de ces faciès n'est pas identique, ainsi deux régions apparaissent : la région Est ou orientale et la région ouest ou occidentale. Chaque région présente des caractéristiques sédimentologique propres, fut déjà signalé par **BELKESSA, (1999)**.

Les vases pures sont très développées dans la région Ouest et forment ainsi une importante vasière littorale, tandis que les graviers envasés sont dans la région est. Le faciès des sables grossiers et des fins graviers, le faciès des sables graveleux n'est présent que dans la région orientale ; les sables graveleux se limitent au secteur oriental. (**LEM, 1998**).in (**Bachari,2009**).

Leur distribution spatiale reflète les caractères dynamiques sur le plateau continental de Bou-Ismaïl. Les composants terrigènes (pélitiques et grossiers) proviennent des apports des 3 principaux oueds qui sont à l'est le Mazafran, à l'ouest le Nador et Oued El Hachem.

Deux ensembles sédimentaires ont été identifiés. Le premier ensemble regroupe les faciès coquilliers, reliques et récents. Le faciès coquillier relique est localisé sur le plateau externe à médian. Les éléments coquilliers actuels sont observés sur le plateau interne, hors des zones d'apports fluviatiles.

Le second ensemble, issu des apports fluviatiles, rassemble les sédiments terrigènes grossiers du plateau interne et les pélitites de la vasière et de la pente continentale.

La mise en place de ces sédiments s'est effectuée en trois phases :

- les sédiments reliques du plateau externe ont été mis en place durant une phase de stationnement du niveau marin, en bordure de plateau ;
- les sédiments reliques du plateau médian se sont mis en place lors d'une phase de ralentissement ou d'arrêt de la transgression holocène ;
- le coquillier de la zone côtière, les pélitites et sables côtiers résultent des conditions dynamiques actuelles (**Moulfi, 2012**).

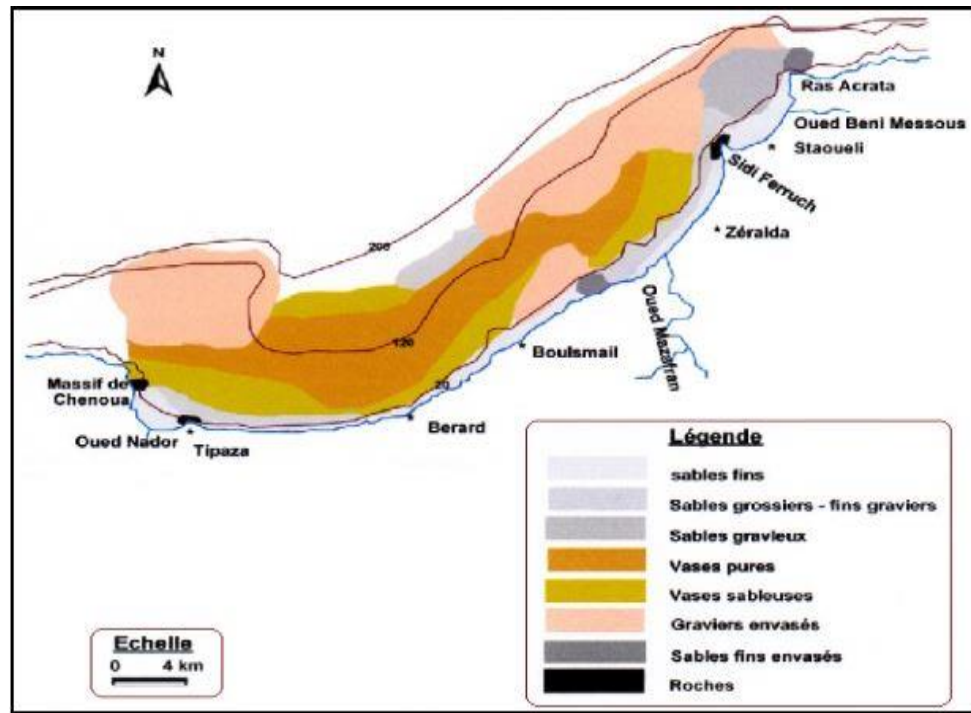


Figure I- 3 : Carte sédimentologique de la baie de Bou-Ismaïl (LEM, 1998).

I.2.4. Étude climatique

La bande côtière a un climat typiquement méditerranéen, avec des hivers doux et temps pluvieux et étés chauds et ensoleillés.

I.a. Vent :

Pour la région côtière, la connaissance des régimes de vent est extrêmement importante. En effet, ce sont des générateurs de vagues et de courants de surface, et leur influence augmente avec leur vitesse (MIL. 1978). Ils jouent donc un rôle important dans l'évolution géomorphologique des milieux. Les côtes, en particulier les côtes à faible accumulation dans les régions à climat aride (Boutiba, 1996).

Le facteur joue un rôle important dans le transfert des sédiments directement vers la partie aérienne et par des divers facteurs hydrodynamiques générés par celui-ci dans la partie immergée.

L'analyse du régime des vents locaux des dernières années est effectuée à partir d'une seule source de données météorologiques.

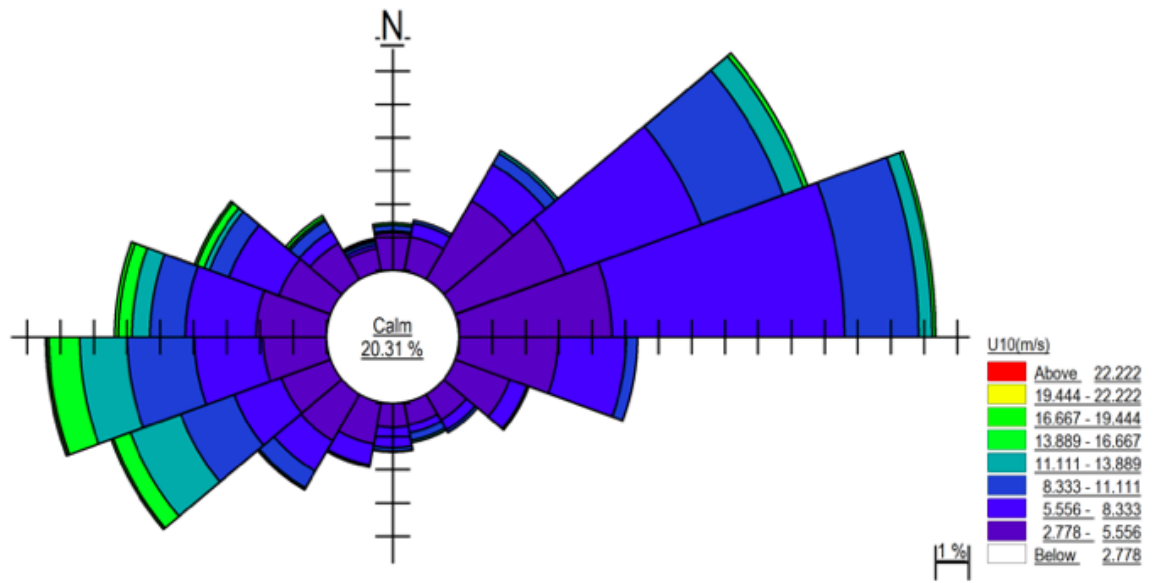


Figure I- 5 : Rose des vents annuelle

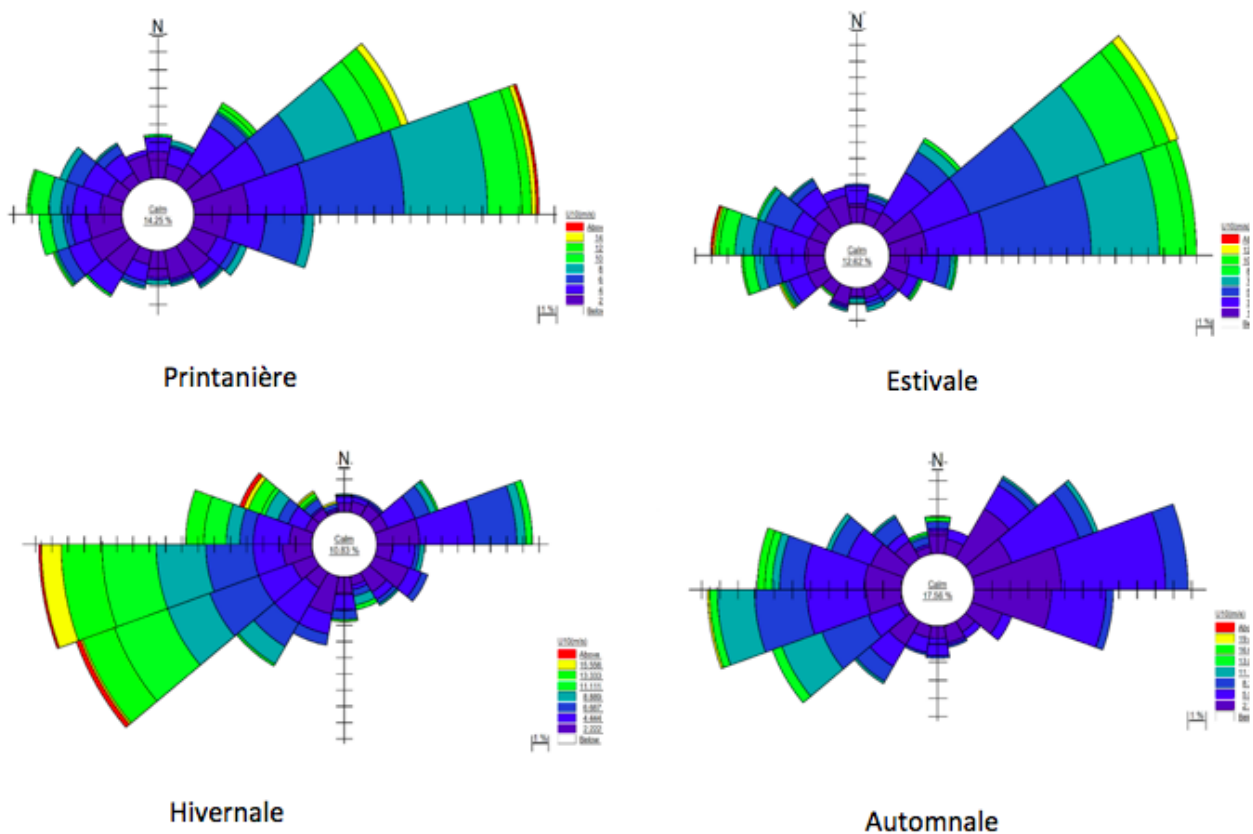


Figure I- 4 : Rose des vents saisonnière

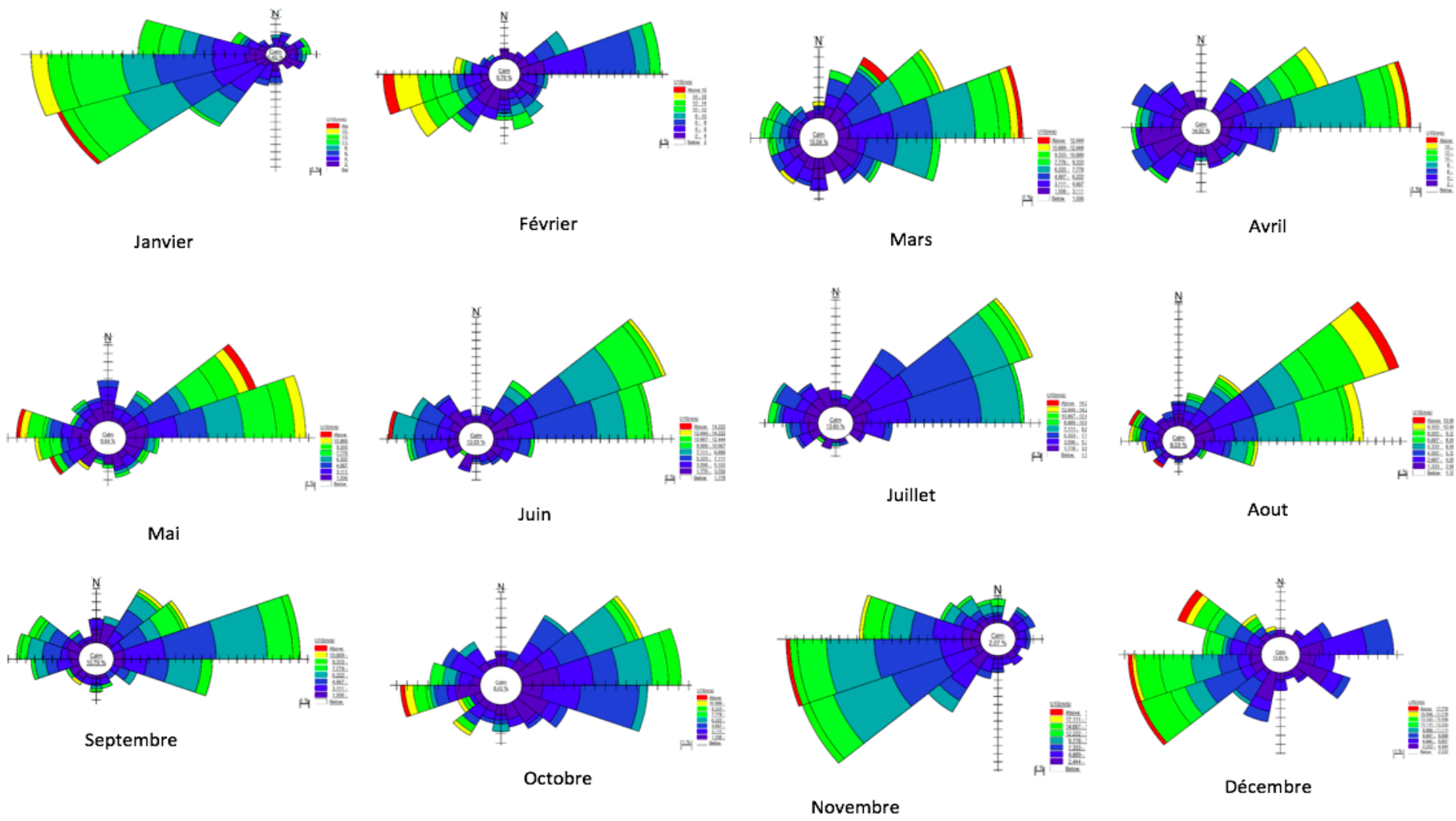


Figure I- 6 : Rose des vents par mois

I.b. La température

L'analyse de la moyenne mensuelle des températures fig (I.4) montre que le mois d'Aout est le mois le plus chaud alors que le mois de Janvier est le mois le plus froid.

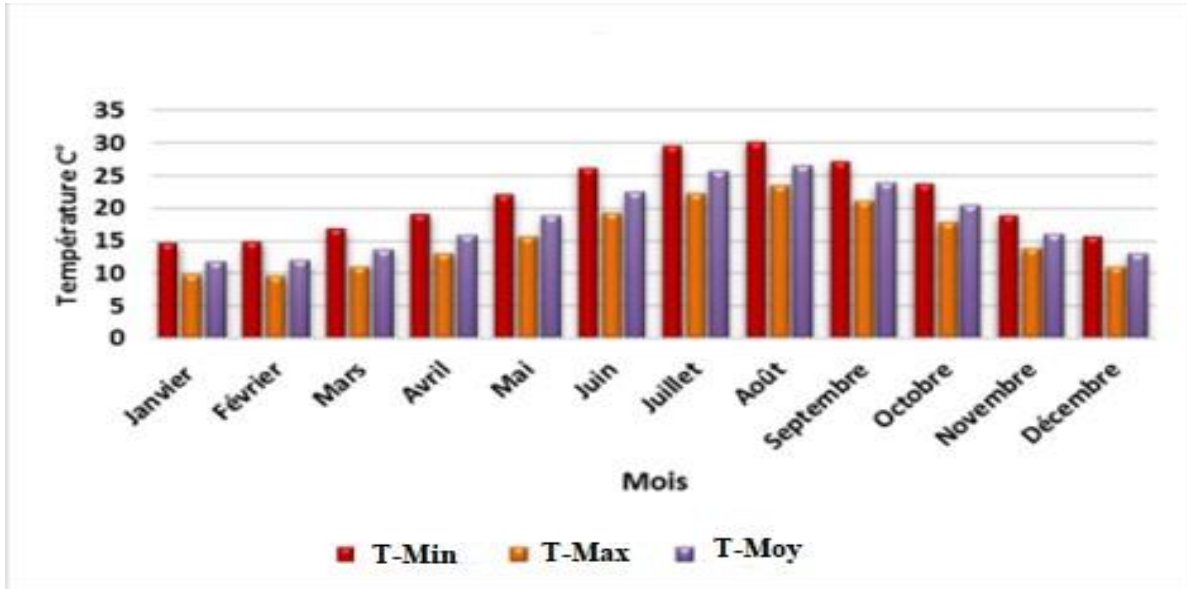


Figure I- 7 : Les variations mensuelles des températures la baie de Bou Ismail (RP5 1988-2020).

I.c. Les précipitations

Les précipitations sont le principal facteur climatique déterminant les régions menacées par la dégradation des sols et la possible désertification. (OMM, 2005). L'analyse des variations des moyennes annuelles des précipitations sur la période entre 1988 et 2020 révèle une variation dans le régime pluviométrique qui tourne autour de 600 mm entre (1988, 2006) et entre (2008, 2017), avec des pics qui dépassent les 800 mm en 2007 et 2018 Fig (I.5).

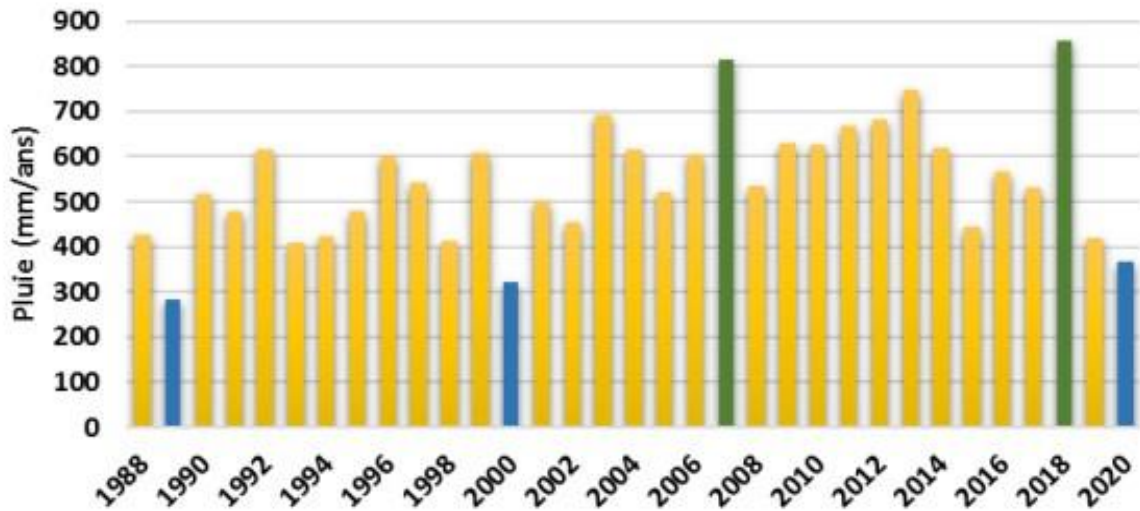


Figure I- 8 : Variation des moyennes annuelles des précipitations de la baie de Bou Ismail (RP5, 1988- 2020).

L'analyse de la variation mensuelle de la région d'étude est soumise à un climat méditerranéen, caractérisé par des pluies très importantes en automne et surtout en hiver, souvent avec des régimes orageux.

I.2.5. Cadre océanographique

L'étude hydrodynamique nous permettra de déterminer le rôle des vagues et houles, sur la dynamique littorale ainsi que celui des courants.

I.a. Houle

La houle est définie comme une oscillation de la partie superficielle du plan d'eau et dépend du régime des vents.

La houle est le facteur le plus important dans la dynamique sédimentaire des petits fonds, la direction de propagation de la houle est liée à celle du vent, tant que la profondeur est supérieure à la longueur d'onde de la houle (**Bonnefille, 1980**).

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

- Mieux analyser les constatations faites quant à l'évolution de littoral.
- Déterminer le dimensionnement des ouvrages de protection à réaliser.
- Mieux estimer le transit sédimentaire.

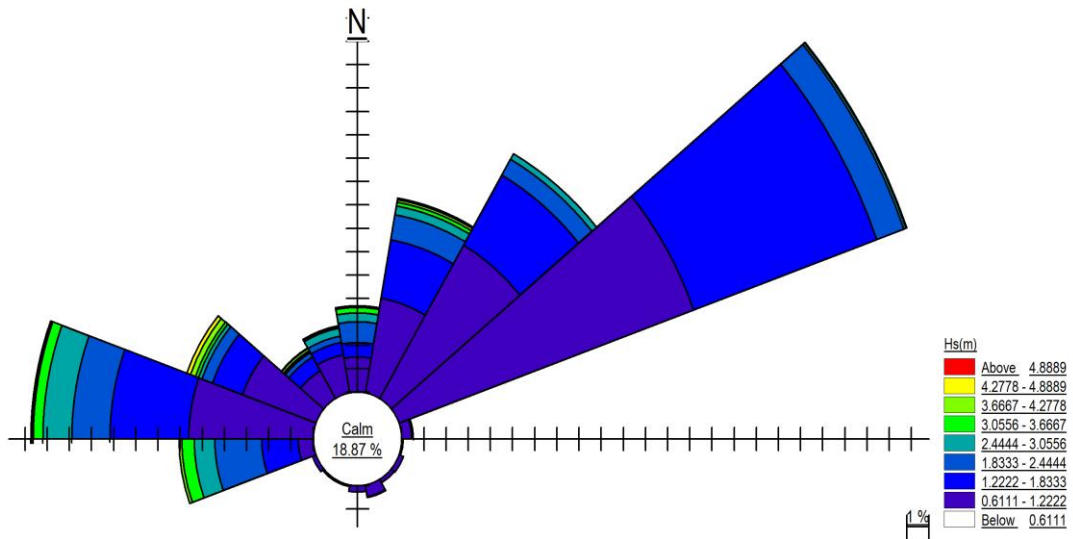


Figure I- 10 : Rose des houles annuelle

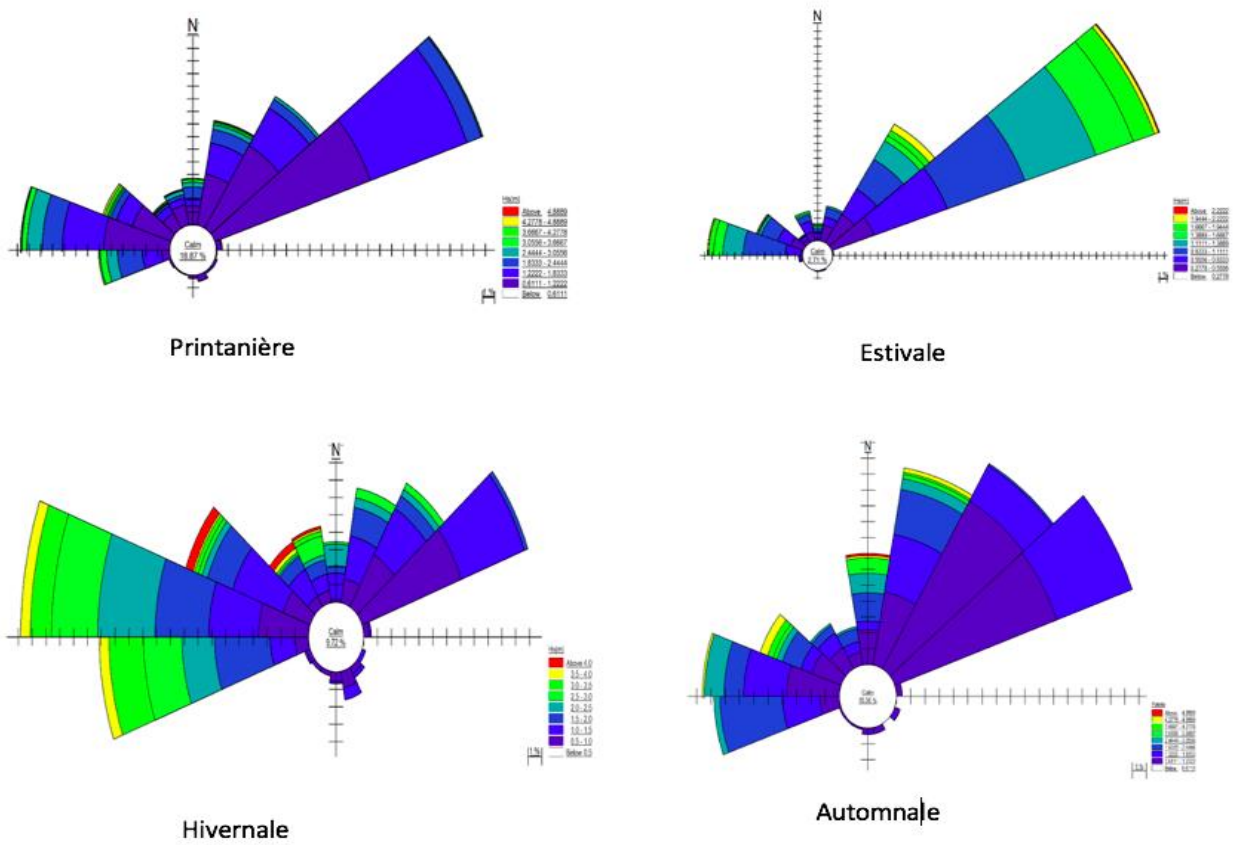


Figure I- 9 : Rose des Houles saisonniers

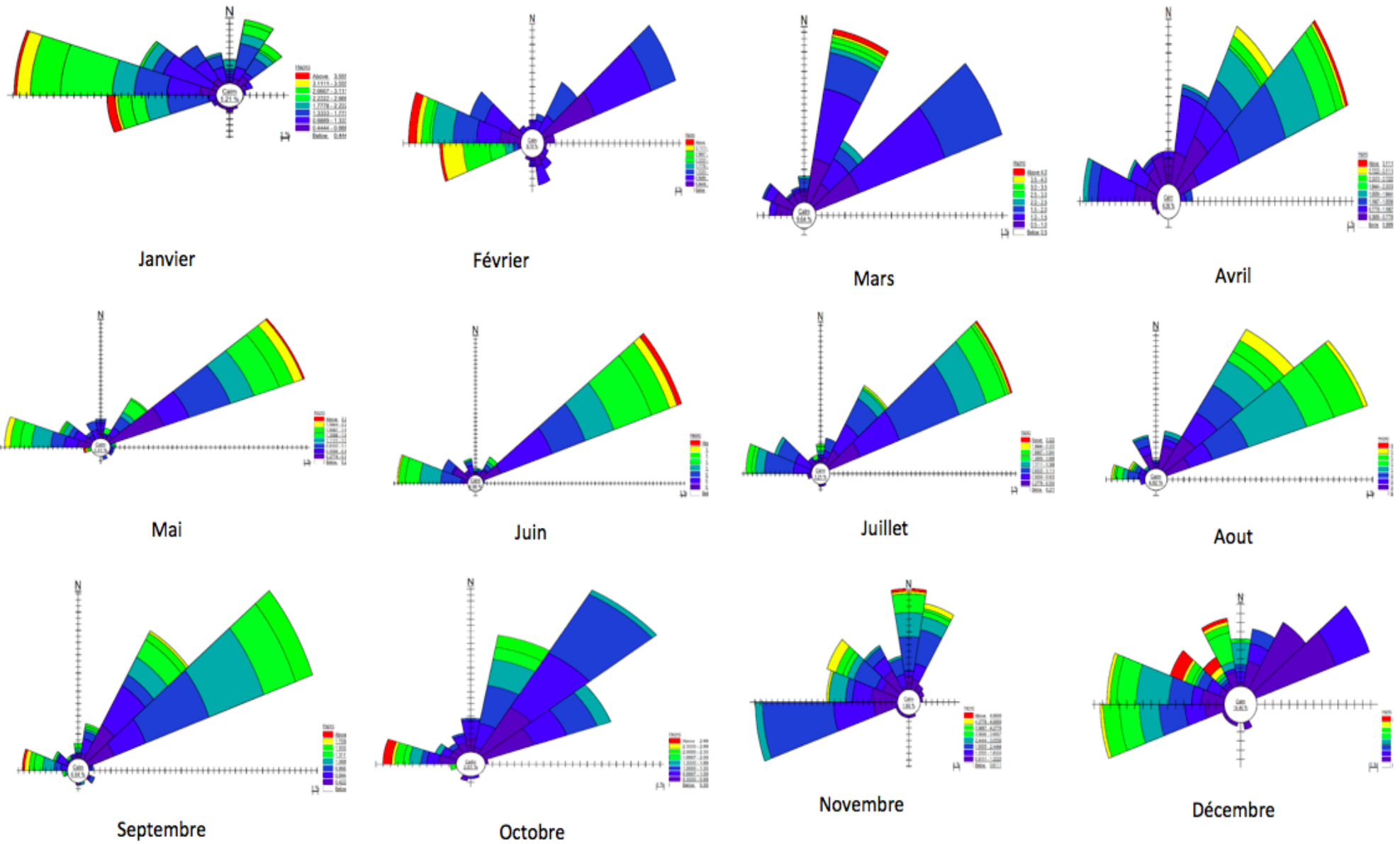


Figure I- 11 : Rose des houles par mois

I.b. Courant

Lorsque la houle arrive à la côte avec une incidence oblique celle-ci donne naissance à un courant de dérive littorale. La vitesse de ce courant est maximale pour un angle d'incidence de 45 % à 50%. La dérive littorale prend naissance au niveau de la zone de déferlement où l'énergie est maximale (Millot, 1987).

Les courants sont responsables de l'état dynamique de sédiment, (érosion, transport, submersion et sédimentation).

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

La baie de Bou-Ismaïl est soumise à un courant général de l'ouest vers l'est, entre en surface par le détroit de Gibraltar, il résulte d'un écoulement d'eau atlantique pouvant atteindre selon (Millot T, 1987) 0.5 à 0.7 m/s, passant à quelques milles au large de cotes (Dergali, 1997).

I.c. Marée

La marée a une amplitude généralement faible en Méditerranée 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. D'autres phénomènes peuvent se superposer à cet effet astronomique tels que la pression atmosphérique, les seiches, etc.

I.2.6. Cadre hydrographique

Le réseau hydrographique du côté Est de la baie de Bou-Ismaïl est constitué essentiellement d'un cours d'eau important qui affecte considérablement la morpho-dynamique côtière : oued Mazafran qui représente la limite ouest de la zone d'étude.

I.a. Oued Mazafran

Il possède un bassin versant qui s'étend sur une superficie de 1900 km², il est drainé par l'ouest vers l'est par les oueds Djer, Bou-Roumi et Chiffa. Le principal exutoire est l'oued Mazafran traversant le sahel par une cluse.

C'est le plus important des oueds qui débouchent dans la baie. Son débit solide est estimé entre 1400 et 1800 t/km², tandis que le débit liquide à 43.8 millions m³/an.

Le débit solide à l'embouchure de l'oued est d'environ trois millions t/an. Ces apports dépendent étroitement du régime hydrologique de l'oued : marqué par un long étiage de Juin à début Décembre avec des débits représentant 17,38% du débit liquide annuel.

Entre Décembre et Avril, ces débits sont 82,61%, débouchant au niveau d'une plage sablonneuse entre Douaouda et Zéralda avec un débit de 7.566 m³.

Il existe un petit oued dénommé Oued Palm Beach qui déverse à environ 500 m à l'Ouest du port, mais nous ne disposons pas de données sur ce cours d'eau. Ce dernier par ses apports pourrait avoir un impact sur le transport sédimentaire.

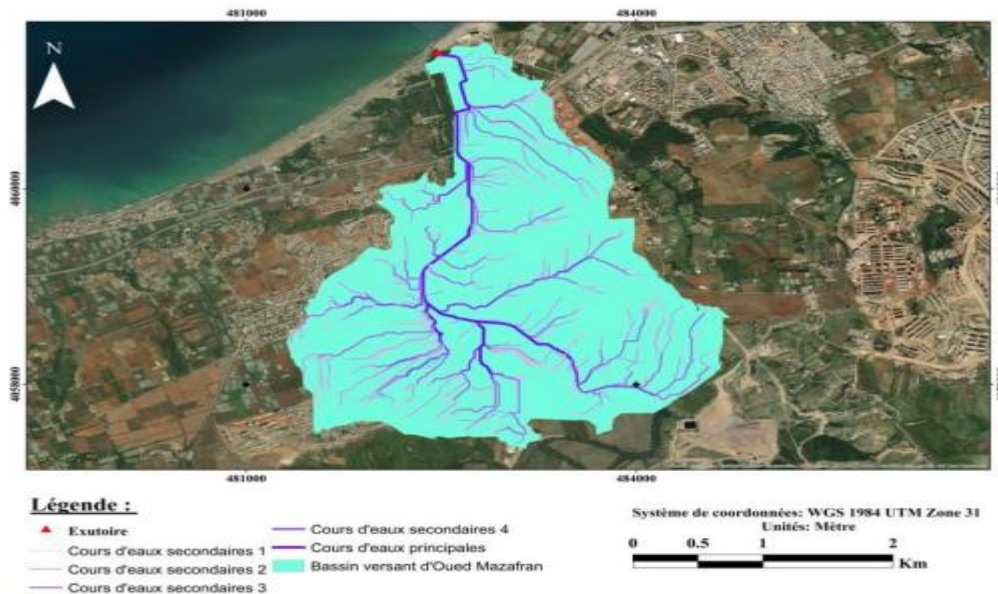


Figure I- 12 : Réseau hydrographique d'Oued Mazafran.

Chapitre II : Matériels et Méthodes

II.1. Introduction

Ce chapitre aide à la compréhension des différentes études et expérience menées, et les données récoltées dans le site d'étude « la baie de Bou-Ismaïl » par le Laboratoire d'études maritimes (LEM). Pour définir par la suite la nature des solutions qu'on va proposer en fonction des résultats obtenus.

Ce chapitre comporte trois études :

- Evolution du trait de côte.
- Etude bathymétrique.
- Etude hydrodynamique.

II.2. Evolution du trait de côte :

La variabilité de la définition du trait de côte provient de la particularité morpho dynamique du littoral : c'est une zone en mouvement, sans cesse changeante, qui n'admet pas de limite fixe. De plus, chaque façade maritime est différente en termes de conditions de marnage et de types de côte (rocheuse, meuble, artificialisée) ce qui induit des divergences de définition du trait de côte. Par exemple, sur la façade méditerranéenne où il n'y a quasiment pas de marnage, le trait de côte est souvent déterminé par les observatoires comme étant la limite supérieure de la zone du jet-de-rive (swash), ou le milieu de cette zone (**Bulteau et Garcin, 2011**).

Les études de l'évolution côtière examinent et explorent les raisons pour lesquelles la position

et la nature du trait de côte se modifient d'un moment à l'autre. En général, il a été constaté que de nombreux littoraux mondiaux sont sous la menace de l'érosion. (**Williams, 1990**)

- **Méthode d'acquisition des données :**

Pour cette étude on a utilisé un des méthodes les plus efficaces et moins coûteuse qui est :

- **La méthode de suivi photographique :** Il s'agit de prendre une série de clichés à partir d'un même point de vue (au sol ou aérien), à des intervalles réguliers qui peuvent varier de la saison au siècle. Si le suivi est rigoureux et systématique, il permet une étude diachronique avec identification des changements. Cet outil, plus qualitatif que quantitatif, est complémentaire des photographies aériennes verticales et possède un bon rapport coût/efficacité. Il est insuffisant pour estimer précisément les volumes de matériaux mobilisés et le suivi de différents compartiments sédimentaires, mais peut être porteur d'un message clair, car visuel, pour les décideurs (**Bulteau et Garcin, 2011**).

II.2.1. Matériel d'étude :

- Google Earth Pro :** Google Earth Pro est un logiciel qui permet de voyager dans le monde via un globe virtuelle d'afficher des images satellites, des plans, des reliefs et des bâtiments 3D. C'est un logiciel qui contient des images de grande résolution de l'ordre de 30m à 60cm (Spot, Quickbird, Ikonos...). Ces images sont issues d'entreprises de commercialisation d'images et sont archivées sur le serveur de Google Earth Pro qui est accessible par connexion à l'internet. Elles sont mises à jour au fur et à mesure. L'utilisation gratuite des images présentées par le logiciel n'est autorisée que par des captures d'écran ou une utilisation en ligne. Google Earth Pro permet d'imprimer des images en haute résolution, alors qu'il faut se contenter de la résolution de l'écran avec la version basique. (Ahfir et Meziane, 2016).
- ArcGis :** Le logiciel ArcGis est un système d'information géographique développé par la société ESRI (Environmental Systems Research Institute). C'est un outil pour manipuler, gérer, visualiser, cartographier, interroger et analyser toutes les données disposant d'une composante spatiale (**Teffahi, 2018**).

Un système d'information géographique (SIG) est un outil informatique permettant de représenter et d'analyser toutes les choses qui existent sur terre ainsi que tous les événements qui s'y produisent.

- c. **DSAS** : (Digital Shoreline Analysis System) : Le DSAS est un outil gratuit, qui s'ajoute comme extension à ArcGIS dédiée à l'étude de l'évolution du trait de côte. • DSAS calcule les statistiques sur le taux de changement pour une série temporelle de vecteurs de traits de côte (**Keraghel, M.**).

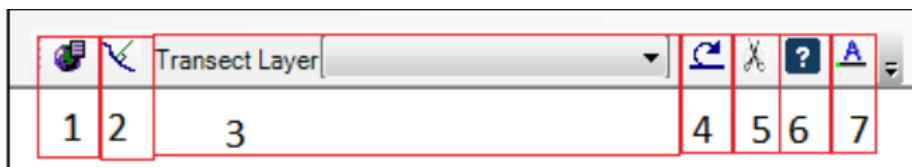


Figure II- 1 : Barre d'outils DSAS.

- **Explication de la légende :**
 - **1 : Définir/modifier les paramètres** : spécifiés les noms de fichiers pour les entrées de référence et de rivage et d'autres paramètres, tels que l'espacement des profils.
 - **2 : Transect cast** : génère une nouvelle (ou écrase un existant) classe d'entités des profils en fonction des paramètres par défaut spécifiés par l'utilisateur.
 - **3 : Le menu déroulant** : répertorie tous les fichiers de transects reconnus ajoutés au projet ArcMap actif.
 - **4 : Calculer les statistiques** : lance une boîte de dialogue peuplée avec une liste sélectionnable des statistiques de changement de taux à calculer.
 - **5 : Clip transects à SCE** : lance une boîte de dialogue offrant aux utilisateurs la possibilité de générer une copie du fichier de profils spécifié qui est accroché à l'enveloppe de changement de rivage (SCE) ou la distance maximale entre tous les rivages.
 - **6 : Lance la fonction d'aide DSAS.**
 - **7 : A propos de DSAS** : fournit des informations sur le logiciel, y compris le numéro diversion.
- **Les données utilisées :**
 - Des photos satellitaires des années : 2004, 2008, 2011, 2019, 2022 obtenue à l'aide de « logiciel de Google Earth Pro » et géoréférencée à l'aide du logiciel ArcGis.

II.2.2. Méthodologie de travail :

a. Digitalisation et exportation des traits de cote sur" Google Earth pro" :

Dans le logiciel "Google Earth pro", on cherche la zone d'étude dans search ensuite avec l'outil " show historical imagery" on choisit l'année, après avec l'outil " add path" on digitalise les traits de côte, que l'on peut voir sur la carte et dans "place" et les exporter.

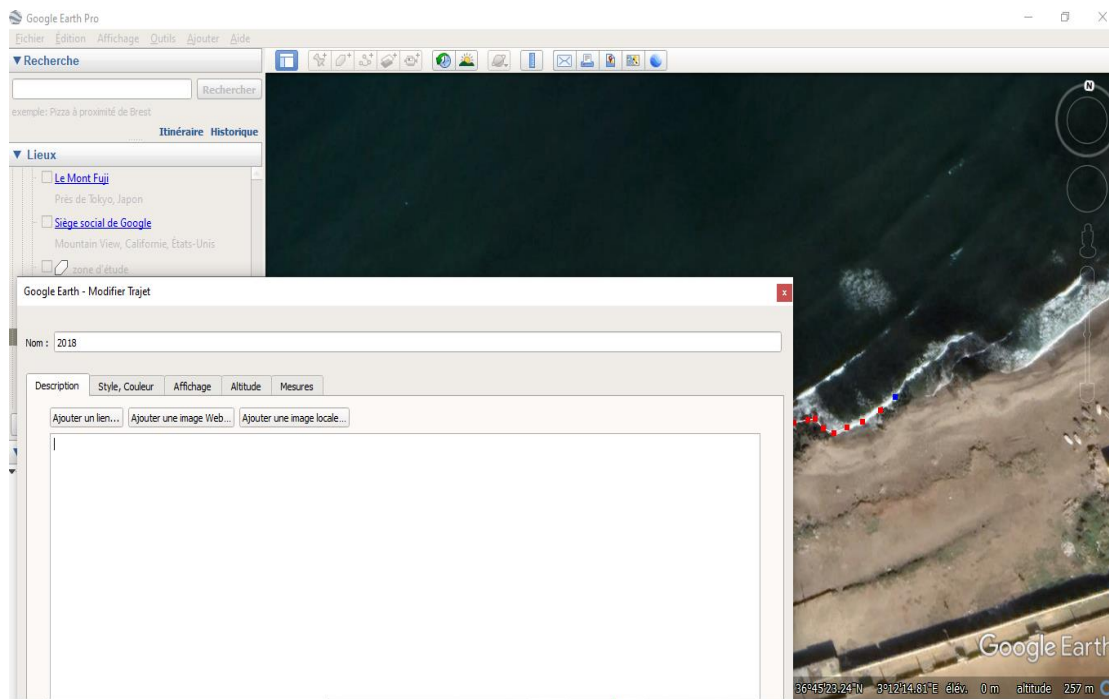


Figure II- 2 : Digitalisation des traits de côte (2022).

b. Le géoréférencement :

Le géoréférencement a pour but de rendre une image superposable à une carte ou à une autre image rectifiée ou non d'une même zone. Une image géoréférencée est donc une image brute associée à une fonction correspondance (image/ terrain). Il est alors possible de calculer pour chaque pixel ses coordonnées géographiques (**Teffahi, 2018**).

- Sur ArcMap il faut créer un shapefile pour chaque trait de côte de chaque année
- Puis les digitaliser avec l'outil "editor"
- Les géoréférencées dans le système de projection "WGS_1984_UTM_Zone_31N".

c. Création de la "géo data base ":

Toutes les données entrées dans DSAS doivent être contenues dans une "géo data base" personnelle qui doit contenir :

▪ **Un vecteur "Shoreline" :**

Qui est la fusion de tous les traits de cote (2004,2008,2011, 2019, 2022) avec l'outil "merge", en s'assurant que les tables attributaires de chaque trait de côte doit contenir les champs obligatoires : **DATE, Uncy (uncertainty), Shape length.**

▪ **Un vecteur de ligne de base "Baseline" :**

Est une de base perpendiculaire aux traits de côte qui sert de référentielle pour le DSAS, elle peut être représenté de trois façons :

- Offshore : dans la mer.
- Midshore : entre les traits de côte.
- Onshore : sur terre (le cas de notre étude).

Pour tracer la Baseline, on crée un nouveau "feature class" puis on digitalise la ligne sur des points fixe sur la carte et perpendiculaire aux traits de côte.

d. Création des transects :

Grâce à la fenêtre de dialogue DSAS, la ligne de base "Baseline" et la ligne de cote regroupées "Shore-line" ont été sélectionnées comme "entrée".

Il spécifie également la distance entre les lignes transversales, leur longueur et la direction et certains des paramètres impliqués dans la création des transects.

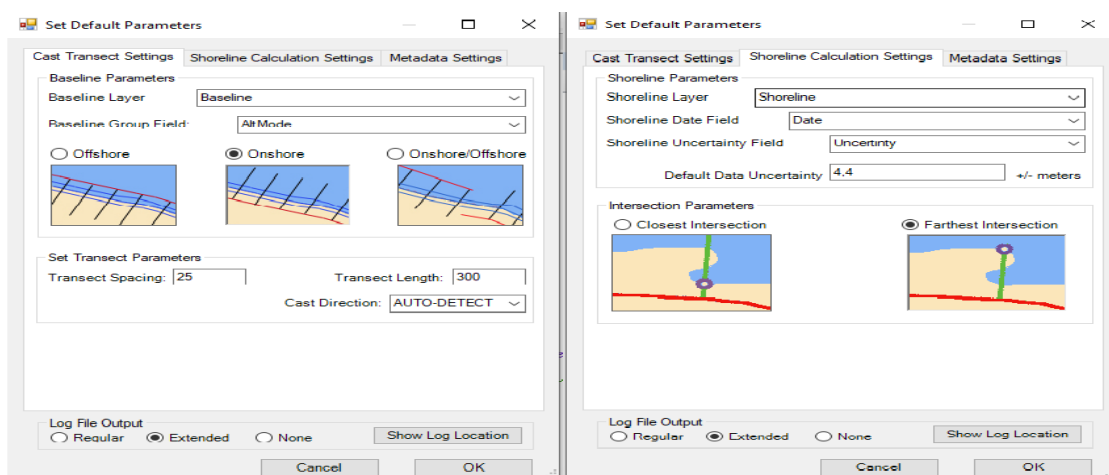


Figure II- 3 : Fenêtre du dialogue de création des transects sur l'extension DSAS/ logiciel ArcGis.

II.3. Étude bathymétrique :

Les données bathymétriques représentent une information primordiale pour la compréhension des phénomènes hydro-sédimentaire près du rivage (**NOURI et YAHIA MEDDAH,2017**).

II.3.1. Logiciel utilisé :

Mike 21 : est un système de modélisation complet pour la simulation des phénomènes hydrauliques et liés à l'hydraulique dans les estuaires, les eaux côtières et les mers. Il peut être appliqué à tout écoulement à surface libre bidimensionnel où la stratification peut être négligée. Le système a une large gamme d'applications techniques et environnementales dans les domaines de l'hydraulique côtière, de l'océanographie, de la dynamique des vagues, des ports, des rivières, de l'hydraulique environnementale et des processus sédimentaires. Un module complet de prétraitement et de post-traitement permet l'analyse et la présentation graphique des données et des résultats du modèle, qui sont stockés dans une base de données simple. Un système de menu flexible et interactif facilite la gestion des données, la saisie du modèle et l'exécution du programme. Il fonctionne sur les postes de travail UNIX, y compris les PC avec le système d'exploitation SCO UNIX.

Modèle numérique hydrodynamique (Mike 21/3 HD) : modèles hydrodynamiques en 2D ou en 3D, respectivement. Chaque modèle peut être utilisé seul ou en mode couplé avec un ou plusieurs modèles de transport de matières dissoute et/ou particulaire. Un exemple de couplage typique en zone côtière est celui du modèle **Mike 21**-HD avec le modèle de réfraction de vague MIKE21-SW et le modèle de transport de sable MIKE21-ST et cela pour l'étude du transport de sable autour d'un port. Le choix d'un modèle en 3D (**Mike 3**) est conseillé pour un environnement stratifié en densité (ex. estuaire) et/ou dans un domaine semi-renfermé (ex. lagune, baie, etc.) où la direction des courants de gradient en profondeur est généralement opposée à celle des courants de dérive en surface causés par les vents.

Sur le plan vertical, le modèle MIKE 3-HD offre une version non-hydrostatique qui permet un meilleur calcul des vitesses verticales dans des régions où celle-ci deviennent significative. Un exemple est celui de la remontée rapide d'eau douce en milieu marin à partir d'une source située sur le fond ou d'un diffuseur sous-marin d'eaux usées. (**Dahmani A.2019**),

II.3.2. Traitement des données :

- Géoréférencement de la carte marine dans le système de projection (**WGS_1984_UTM_Zone_31N**), sur Arc Gis.

- Création des shapefiles ligne pour digitaliser les isobathes et le trait de côte.
- Conversion des shapefiles ligne on point, pour les isobathes et pour le trait de côte. On ajoute les champs X, Y, Z, dans les tables attributaires.
- Convertir les tables attributaire en fichier Excel, puis en texte.

A ce stade on vient de créer un fichier X, Y, Z.

- Création d'une Mesh de la zone d'étude la baie de Bou-Ismaïl par l'utilisation de l'extension « Mesh Generator ».

Les étapes de la création de carte bathymétrique sont résumées dans la figure suivante :

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

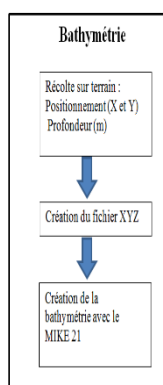


Figure II- 4 : Organigramme de création d'une carte bathymétrique.

II.4. Étude hydrodynamique :

L'étude hydrodynamique nécessite dans un premier temps de recueillir un certain nombre de données disponibles sur le site d'étude, ces données sont :

- La bathymétrie
- La définition des directions des houles pénalisantes ;

II.4.1. La bathymétrie :

On utilise les données bathymétriques obtenue lors de la précédente étude celle de la bathymétrie.

II.4.2. La définition des directions des houles pénalisantes :

Après le traitement statistique des enregistrements des houles au large sur une période de temps précise (LEM, 2017), on a pu modéliser le régime des houles au large. Le tracé de la rose des houles Fig (II.5) permet d’observer une similitude de rose des houles annuelles, mais avec des fréquences d’apparition et des hauteurs significatives différentes qui varient par direction.

Tableau II- 1 : Conditions aux limites de la houle de la zone de la baie de Bous-Ismail.

Tp (s)	N	NE	W	NW	E	SE	S	SW
6	1,00(m)	1,09(m)	1,19(m)	1,10(m)	1,06(m)	0,87(m)	0,93(m)	1,14(m)
8	2,67(m)	2,56(m)	2,67(m)	2,64(m)	2,53(m)	1,04(m)	1,12(m)	1,34(m)
10	4,92(m)	5,05(m)	5,54(m)	4,53(m)	6,52(m)	1,45(m)	1,56(m)	1,67(m)

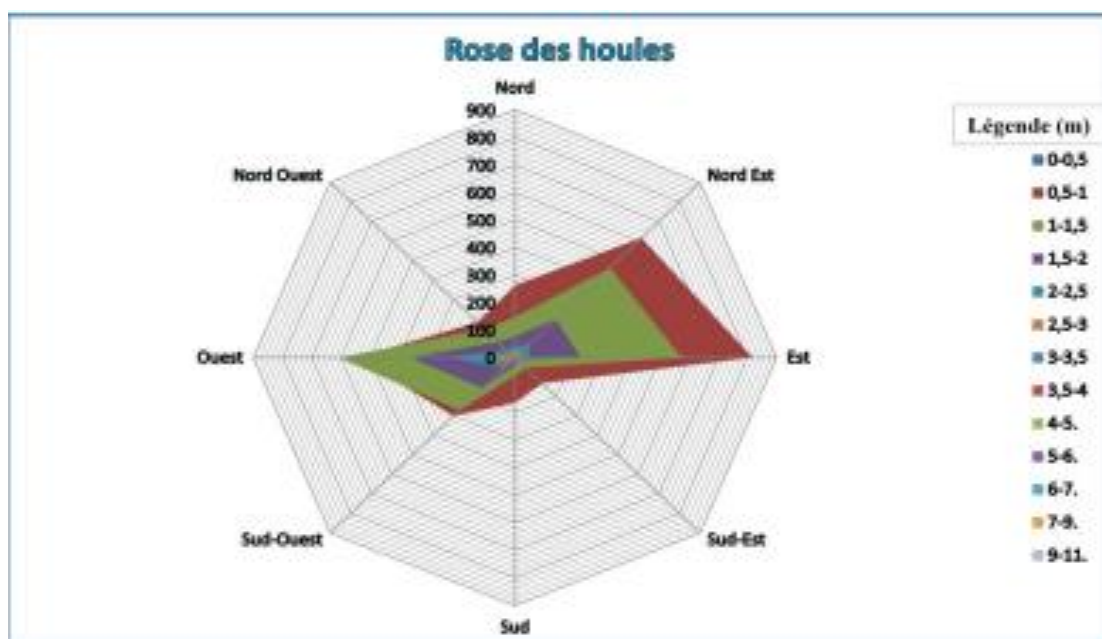


Figure II- 5 : Rose des houles de la baie de Bou-Ismail (LEM,2017).

L’analyse des roses des houles (2017) Fig (II.05) et du tableau (II.01) nous a permis de constater ce que :

- Le régime des houles est pratiquement semblable à celui des vents, ce qui nous permet de confirmer le constat que ce dernier est le moteur principal de ces houles.

- La dominance de deux secteurs ouest et nord-est.
- Les houles de secteur ouest dominant pendant la période hivernale et sont caractérisées par l'apparition des houles de tempêtes avec des hauteurs maximales qui dépassent les 5 m.
- Les houles de secteur nord-est dominant pendant la période estivale avec des houles plus calmes qui ne dépassent pas les 3 m.
- Les directions les plus pénalisantes pour notre zone sont : Nord, Nord-Nord-Ouest, Nord-Ouest.

II.5. Méthodologie de la submersion marine :

Le littoral de la baie de Bou-Ismaïl est constitué de typologies de côte très diversifiées. Chaque nature de linéaire est exposée différemment aux aléas naturels : l'érosion varie considérablement en fonction des secteurs et, de la même manière, ce sont les côtes basses qui sont les plus sensibles à la submersion marine.

La délimitation précise des zones soumises à l'aléa « submersion marine » est complexe. Elle dépend de nombreux paramètres et ne peut être définie que localement à partir d'études et de relevés de terrain importants, sur terre et en mer.

L'étude de l'emprise maximale des zones basses constitue cependant un bon indicateur des secteurs susceptibles d'être inondés lors de submersions marines.

Les perspectives historiques sur les événements climatiques éclairent également la fragilité territoriale. Enfin, les menaces ont peu évolué au cours des siècles, surtout si elles sont variables et aléatoires. En fait, c'est la vulnérabilité accrue due à l'augmentation des opérations qui crée un risque côtier.

La méthode mise en œuvre pour l'élaboration de la carte des bas-fonds permet une caractérisation simple et efficace des risques d'inondation. Cependant, cette méthode peut être la limite supérieure car l'approche suivie est basée sur un schéma statique, qui considère que le niveau centennal de la mer calculé au bord de la mer est à terrain.

Le phénomène de submersion dépend du cycle des marées lors de la tempête (le niveau marin ne reste pas longtemps à sa valeur maximale) et aussi, la dynamique de destruction structurale (destruction complète ou rupture) qui peut ralentir l'afflux d'eau sous certaines conditions.

Lorsque cette dernière est protégée ou immergée, la zone inférieure derrière ces ouvrages est limitée dans le temps pour le remplissage. Si ces zones représentent de grandes quantités d'eau qui sont "remplies", ce remplissage est susceptible de prendre plusieurs heures, donc les hauteurs d'eau maximales atteintes dans ces zones ne seront pas les mêmes.

Effectuez une modélisation numérique 2D pour calculer les courants de marée associés à l'afflux d'eau de mer dans les terres. Cela vous permet de calculer la hauteur et le débit d'eau de mer dans l'eau dans toute la zone d'étude. Cette modélisation est basée sur une enquête géotechnique précise et peut fournir des mesures d'élévation du terrain en tout point de la zone d'étude avec une précision de 10 à 20 cm.

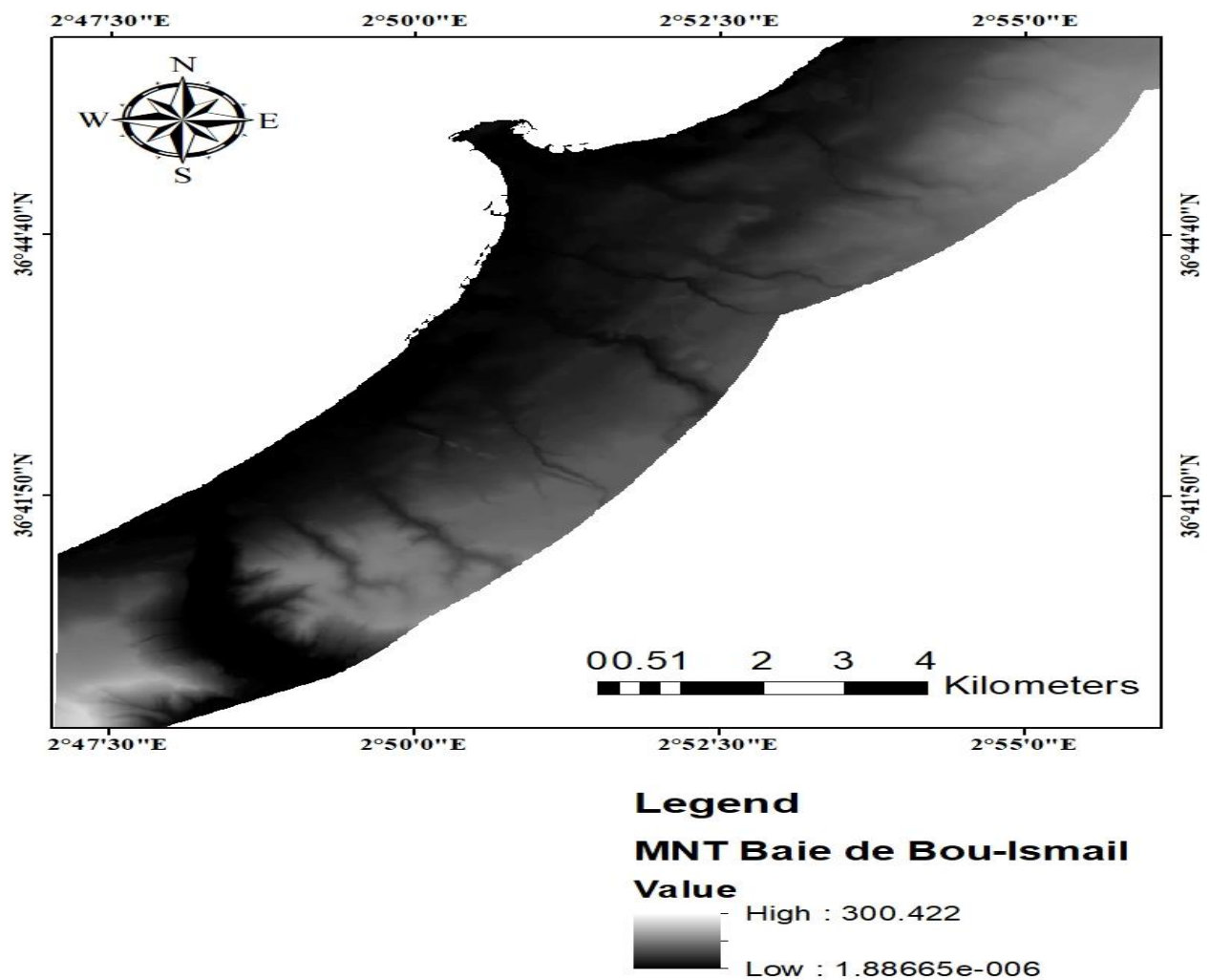


Figure II- 6 : Modèle numérique du terrain de la Baie de Bou-Ismaïl

Le résultat des calculs hydrauliques ainsi réalisés permet, en croisant la vitesse et la hauteur d'eau obtenues, de définir le niveau de risque dans les zones submersibles.

Une fois les cartes de risques définies, une analyse fine de la submersion sur l'ensemble du territoire afin d'en caractériser les enjeux, c'est à dire les personnes, les biens, les équipements, les activités ou les différentes composantes de l'environnement susceptibles, du fait de leur exposition au risque, de subir des dommages.

La superposition des enjeux recensés dans les zones exposées et de l'intensité du risque (hauteur d'eau, vitesse) permet de caractériser la vulnérabilité du territoire au risque d'inondation.

C'est sur la base de cette analyse que sont définies des orientations visant à réduire cette vulnérabilité, tant du point de vue de l'urbanisation future que des modalités de construction et des usages du territoire.

Les cartes de submersion sont obtenues après la modélisation de ce phénomène sous ArcGIS 10.5 pour plusieurs scénarios de l'élévation de niveau marin à savoir 2m, 3m, 4m et 5m.

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1. Evolution du trait de côte :

Le trait de côte n'est pas un objet géographique immuable : il peut reculer lorsque le littoral est soumis à des effets d'érosion, ou avancer dans le cas d'accumulation de sédiments (« engraissement ») ou lorsque les sociétés humaines cherchent à étendre les espaces terrestres qui sont alors gagnés sur la mer (processus de poldérisation).

L'étude de l'évolution du trait de côte se fait avec le logiciel Arc Gis, ce qui a permis d'obtenir les résultats (Shoreline, Baseline,) comme indiquer dans la fig III,01.

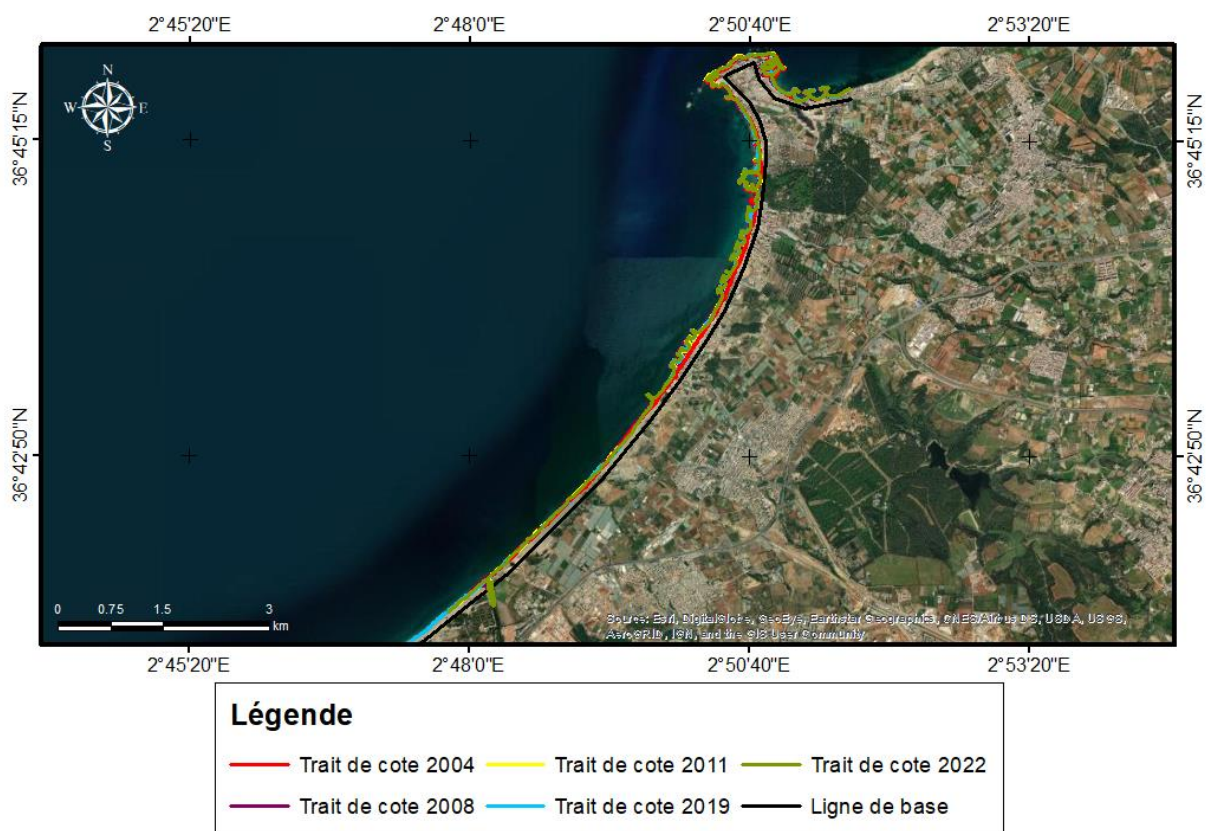


Figure III- 1 : Carte représentative de la ligne de base et des traits de côtes (2004, 2008, 2011, 2019, 2022).

Pour l'obtention de ces résultats, une ligne de base a été créé qui suit l'orientation générale de la côte. Des transects perpendiculaires à cette ligne de base tous les 20mètres ont été réalisées grâce à l'extension DSAS, l'ensemble de la baie de Bou-Ismaïl est donc couverte par 637 transects avec une longueur de 450 mètres pour chacun, et une

incertitude de 6.



Figure III- 2 : Carte représentative des transects de la baie de Bou-Ismaïl.

Pour mieux comprendre ces résultats, une nouvelle étude par période est réalisée, en prenant comme référentiel le Net Shore Mouvement (NSM) qui nous indique la distance entre les plus anciens et les plus récents rivages pour chaque profil (Faye 2012), et EPR (End Point Rate) calcule le rapport de la distance entre le trait de côte correspondant à la date la plus ancienne et à la date la plus récente.

On a obtenu trois résultats pour les trois périodes qui suit :

- Période de 2004 à 2008.
- Période de 2008 à 2011.
- Période de 2011 à 2019.
- Période de 2019 à 2022.
- Période de 2004 à 2022.

III.1.1. Evolution du trait de côte par période :

- Période 2004-2008

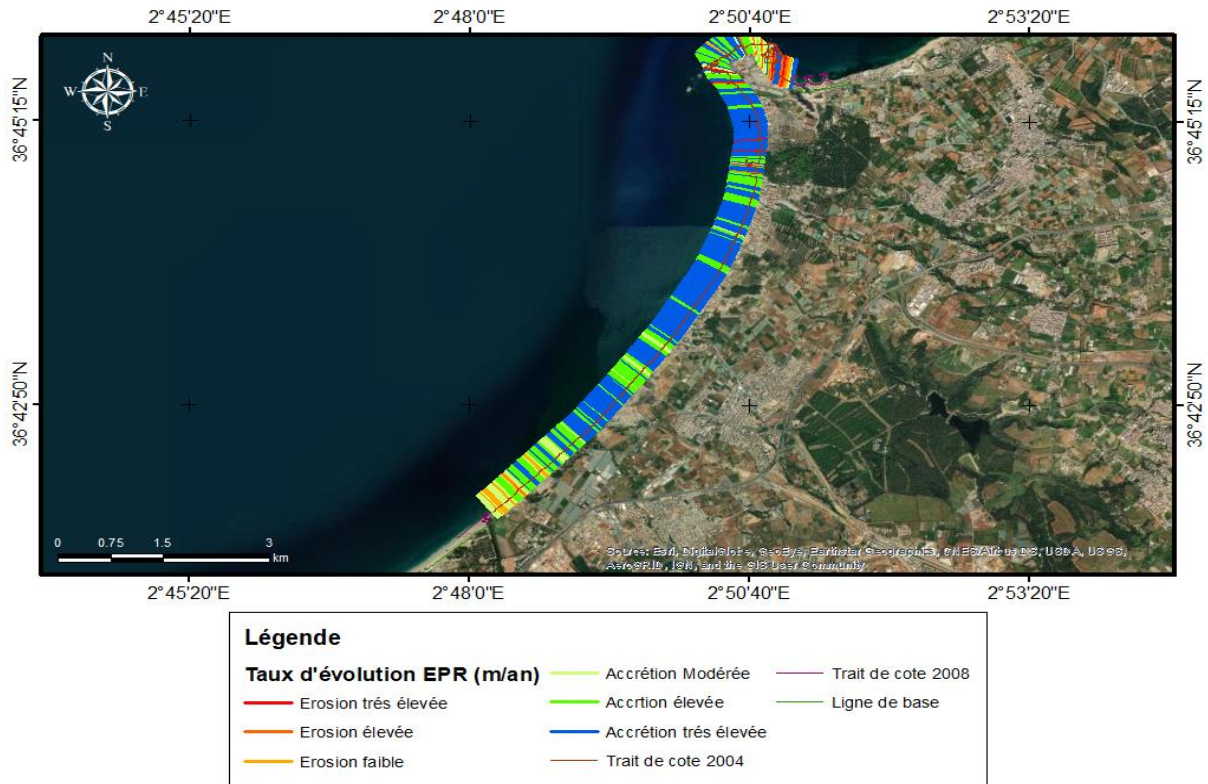


Figure III- 3 : Carte représentative du rythme d'évolution du trait de côte de la Baie de Bou-Ismaïl entre 2004 et 2008.

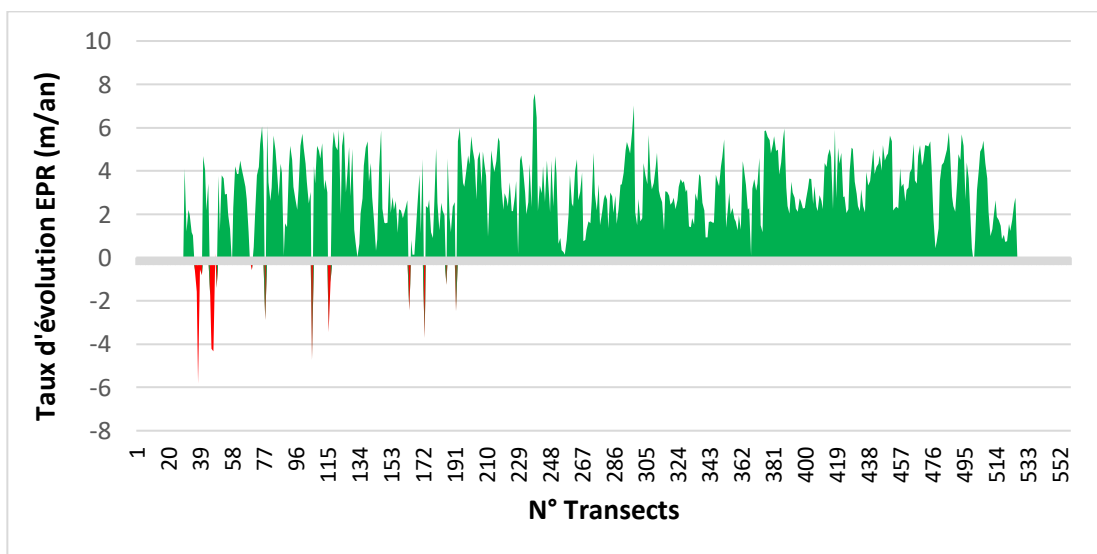


Figure III- 4 : Changement moyen de la position de la ligne de rivage dans la Baie de Bou-Ismaïl durant la période (2004-2008).

Durant cette période l'évolution de la ligne de rivage de la baie de Bou-Ismaïl nous affiche une position d'avancé tout le long de la ligne avec un EPR moyen 6,01 m/an.

Nous passons d'un secteur en accumulation de l'ordre de 30,3 m (7,52 m /an) à un secteur en érosion avec des valeurs ayant atteint moyennement plus de -311.28 m (-5,82 m/an) fig (III.4).

Cette tendance évolutive pourrait trouver son explication dans les variations annuelles des apports en sédiments d'oued Mazafran, le piétinement surtout durant la période estivale, la pression urbaine et l'arasement du cordon dunaire.

- **Période2008**

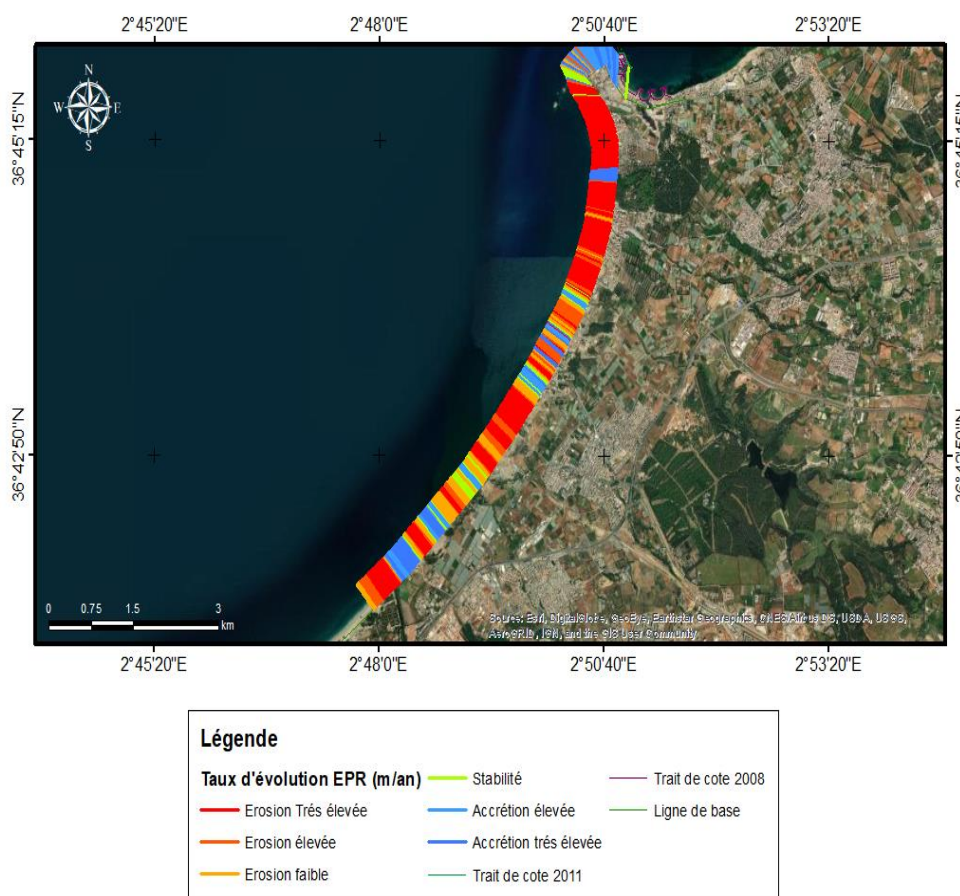


Figure III- 5 : Carte représentative du rythme d'évolution du trait de côte de la Baie de Bou-Ismaïl entre 2008 et 2011.

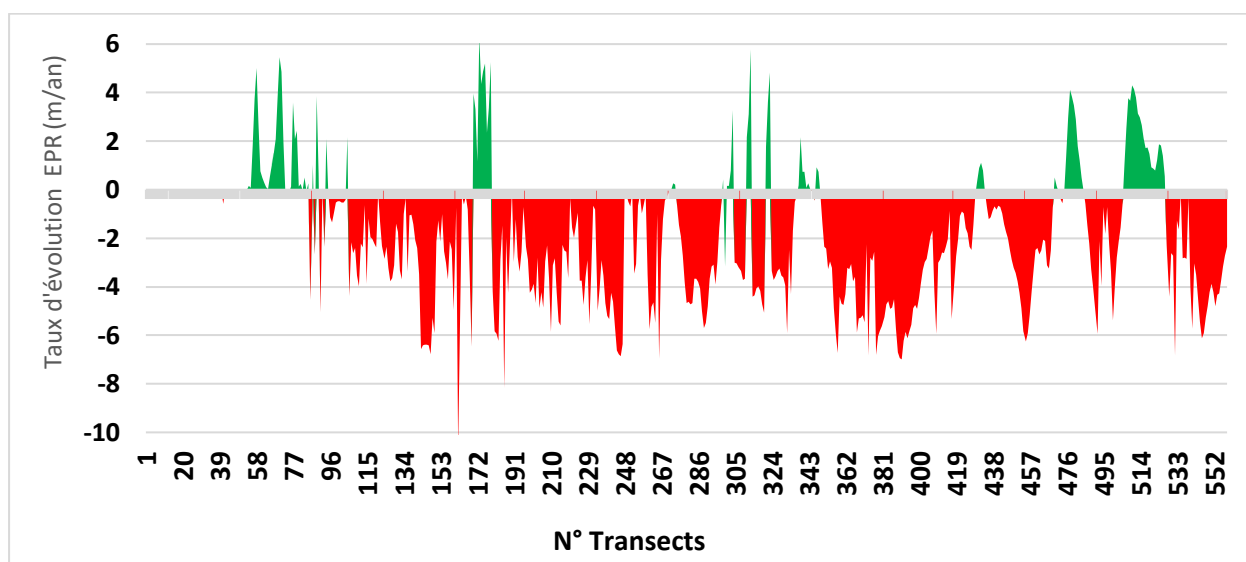


Figure III- 6 : Changement moyen de la position de la ligne de rivage dans la Baie de Bou-Ismail durant la période (2008-2011).

Cette courte période de 3 ans affiche une érosion élevée du rivage de notre zone d'étude. D'après l'analyse statistique des résultats des changements de la position du trait de côte, la baie de Bou-Ismail a connu une érosion de son rivage avec une vitesse moyenne de recul de l'ordre de -1.9 m/an.

Le secteur Est (du transects 73 à 163), c'est le secteur le plus touché par le phénomène d'érosion, il affiche des vitesses de recul oscillent respectivement entre -10.68 m/an et -3.06m/an soit des distances de l'ordre de -20.42 m et -40.96 m. Le transect 163 enregistre une vitesse de recule maximale.

Un maximum de pro gradation est enregistré au niveau d'Azur plage. Cela est expliqué par l'installation des ouvrages de protection.

• Période 2011-2019

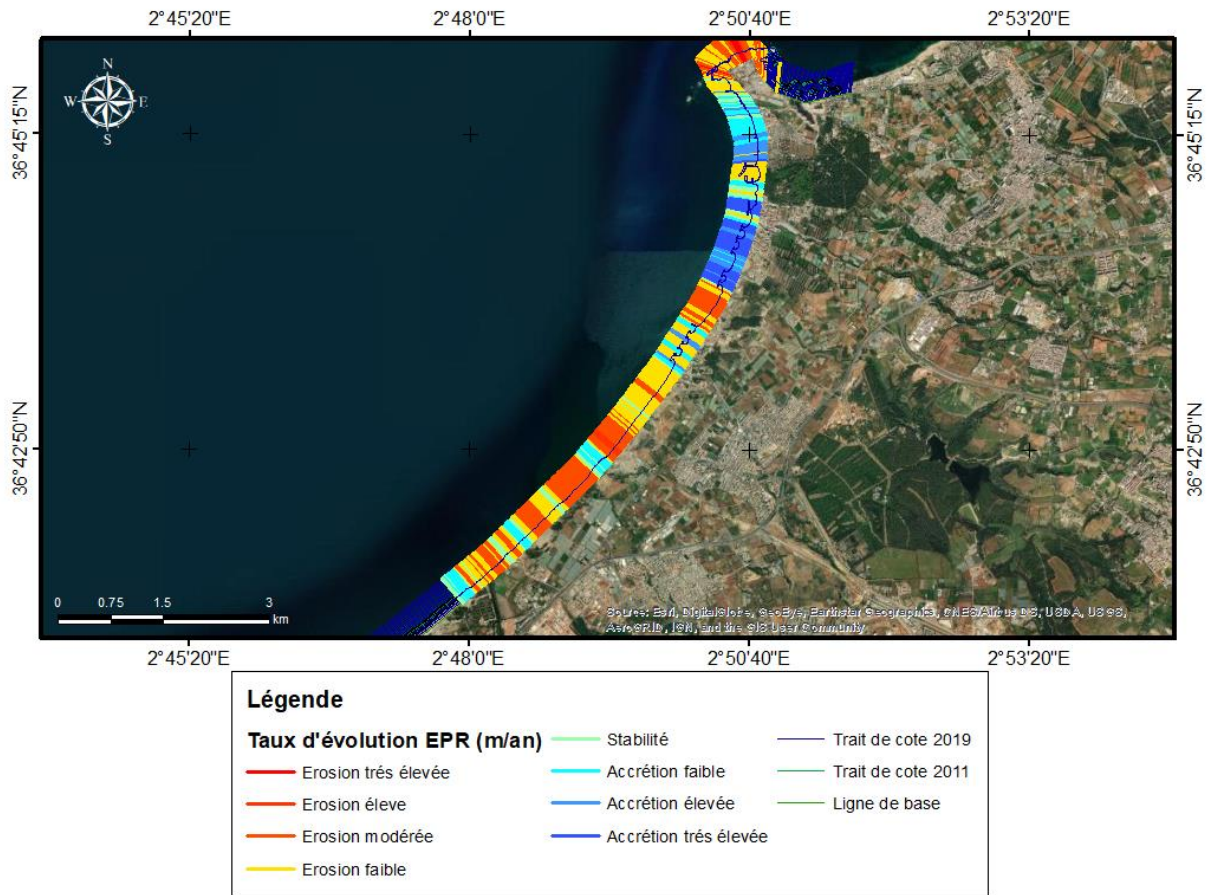


Figure III- 7 : Carte représentative du rythme d'évolution de la position de la ligne de rivage dans la Baie de Bou-Ismaïl durant la période (2011-2019).

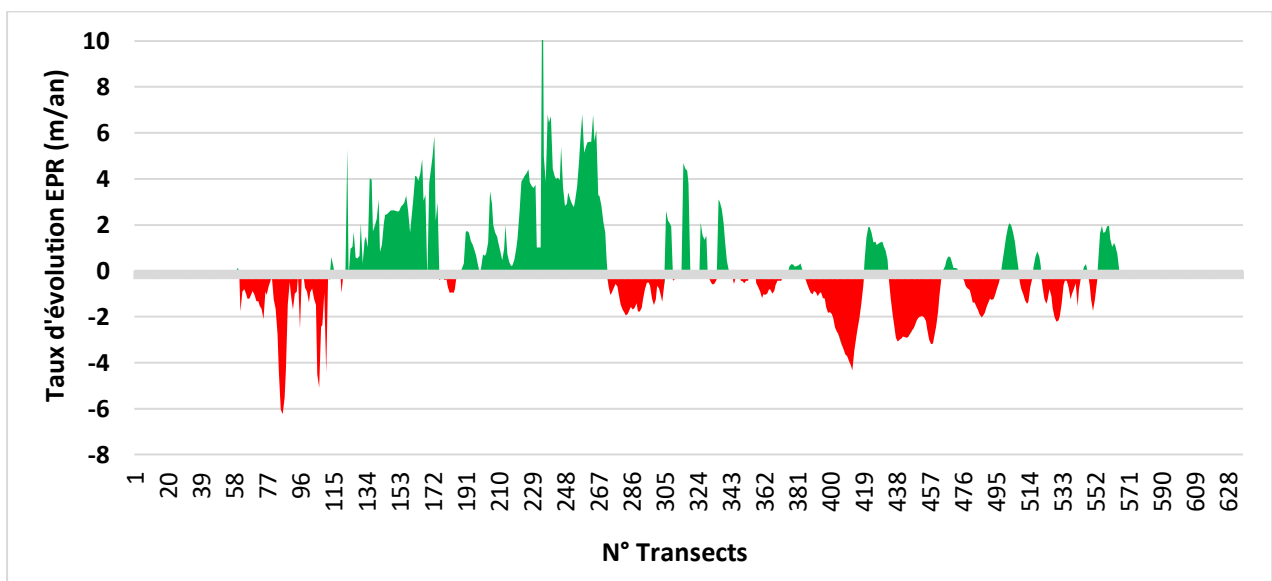


Figure III- 8 : Changement moyen de la position de la ligne de rivage dans la Baie de Bou-Ismaïl durant la période (2011-2019).

Durant cette période la ligne du rivage de la baie de Bou-Ismaïl est en perpétuelle évolution entre phase d'érosion et autre accrétion tel qu'au secteur Est entre le transect 68 à 124 qui a connu une érosion avec une moyenne d'EPR 1,57 m/an et du transect 134 à 281 vitesse d'avancé 2,85 m/an.

Par rapport au secteur centre et ouest du transect 282 à 574 l'érosion maximale (érosion faible à élever) est enregistrée au niveau du transect 422, avec une vitesse d'EPR maximale de -4,35m/an soit une distance de -34.77 m. Tandis que ces deux secteurs marquent une avancée du rivage avec des taux d'EPR qui varient respectivement de 4,7 m/an et 0.2 m/an soit des distances de 199,17 m et -0.2 m.

• Période 2019-2022

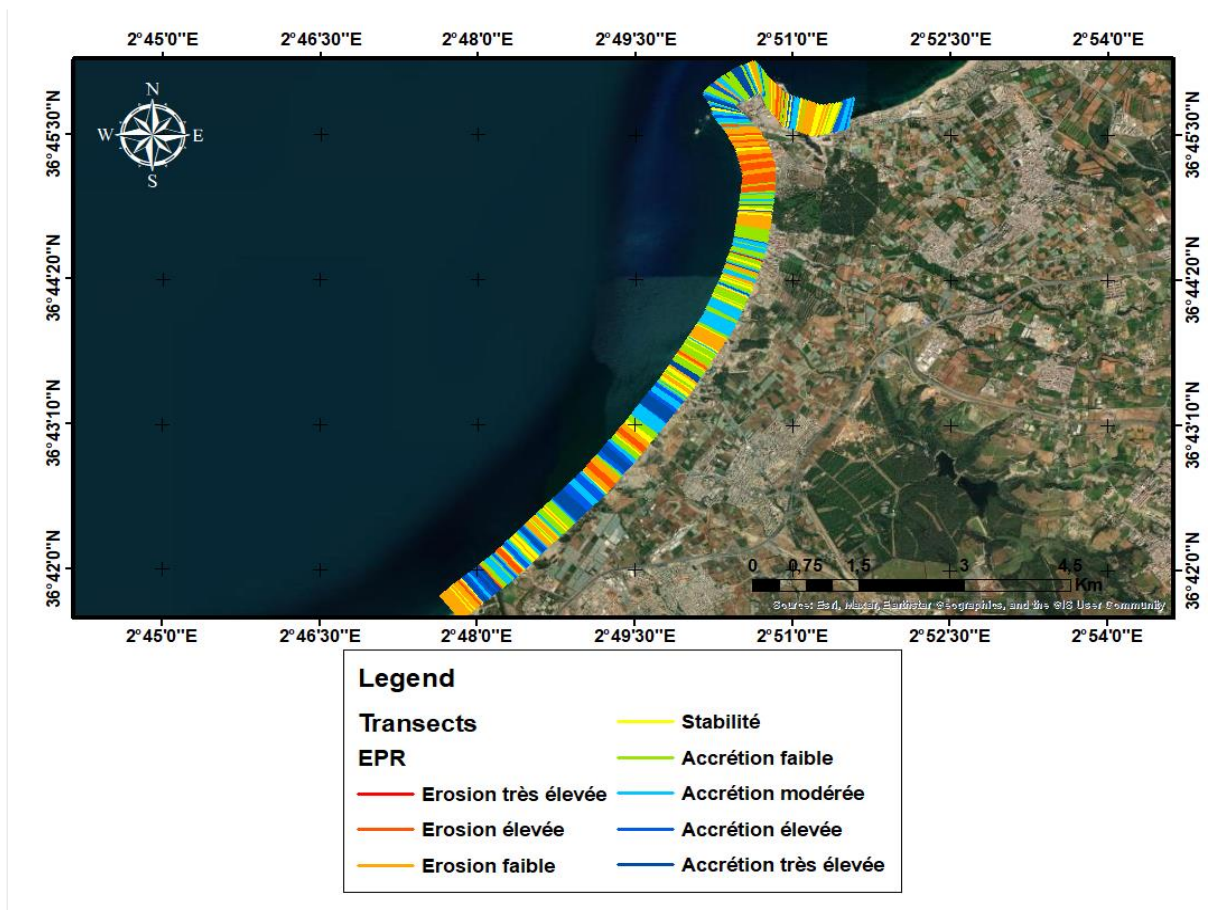


Figure III- 9 : Carte représentative du rythme d'évolution de la position de la ligne de rivage dans la Baie de Bou-Ismaïl durant la période (2019-2022).

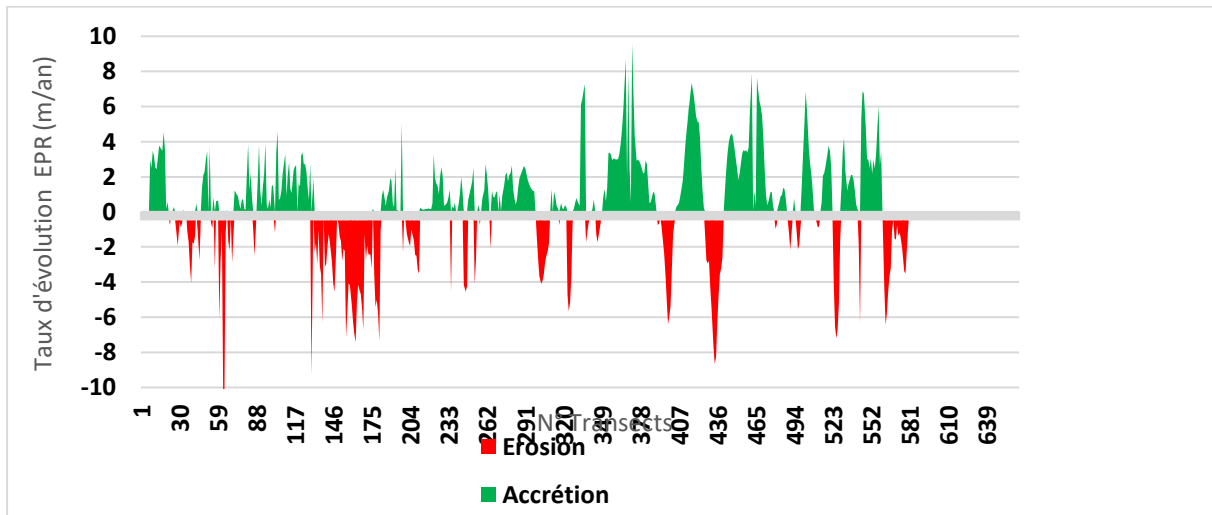


Figure III- 10 : Changement moyen de la position de la ligne de rivage dans la Baie de Bou-Ismaïl durant la période (2019-2022).

La comparaison des traits de côte de 2019 et de 2022 nous indique une variation irrégulière de la ligne de rivage entre ses deux dates, sans le secteur Est le trait de côte à reculer de 10 m/an soit une valeur de NSM de -31,1m, en revanche dans le secteur centre on observe que l'érosion est plutôt modérée et même stable au niveau de l'oued, au niveau du secteur Ouest il y'a une accumulation très importante avec une valeur de 23,65m et une vitesse maximale de 7,88m/an.

- **Période 2004-2022 :**

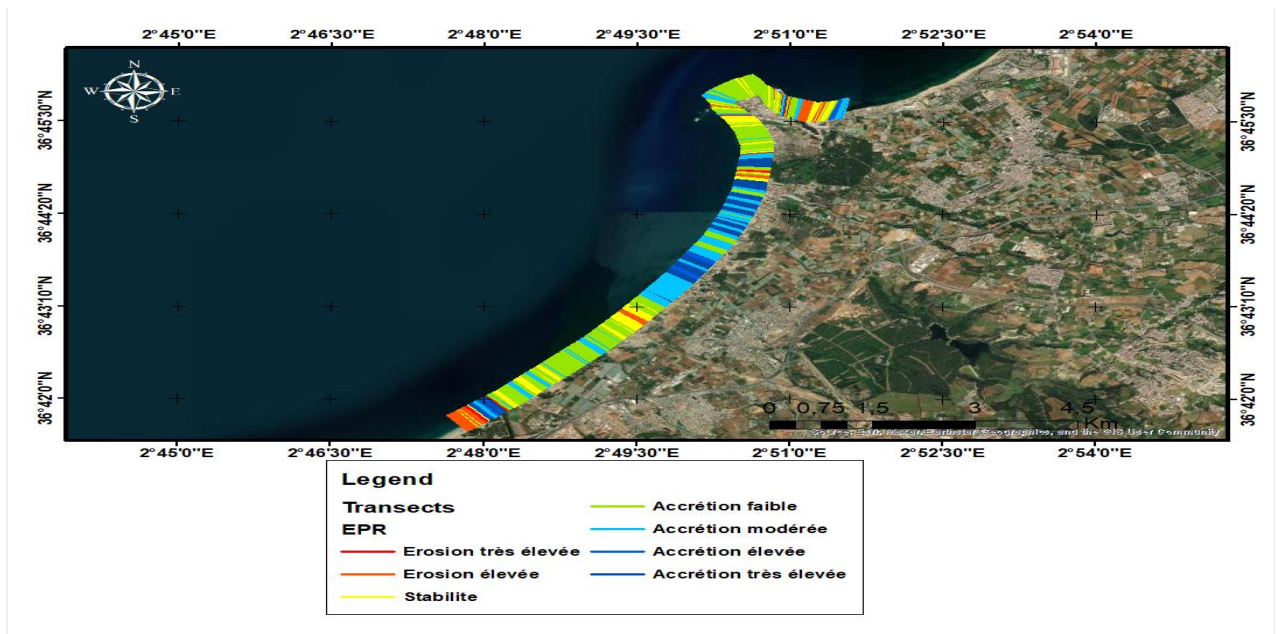


Figure III- 11 : Carte représentative du rythme d'évolution du trait de côte de la Baie de Bou-Ismaïl (2004-2022).

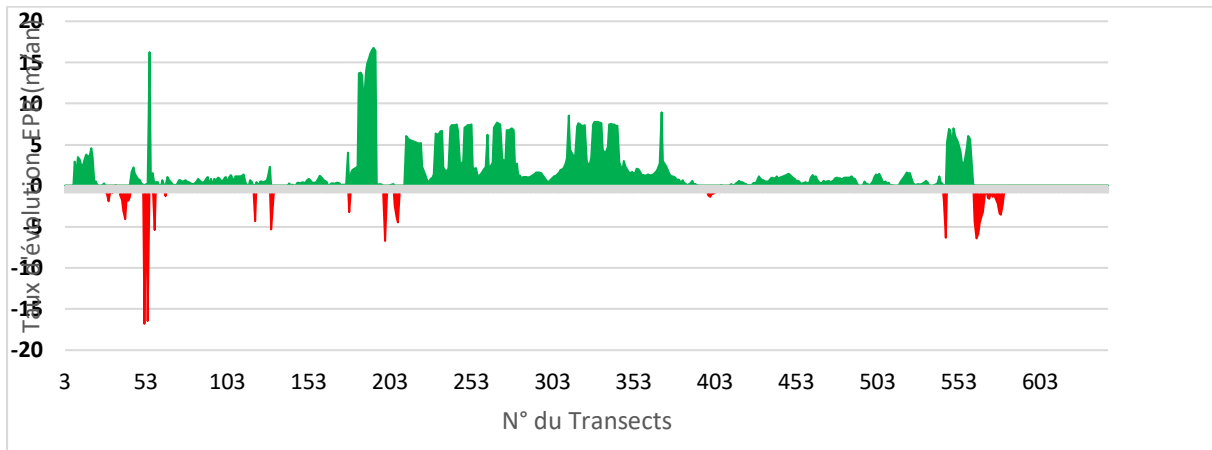


Figure III- 12 : Changement moyen de la position de la ligne de rivage dans la Baie de Bou-Ismaïl durant la période (2004-2022).

Contrairement à la période précédente, caractérisé par de forts taux de variation de la ligne de rivage, la période 2004-2022, présente une progradation le long de la baie de Bou-Ismaïl et surtout dans le secteur Centre de la baie avec un taux d'accumulation max de 301,928m, et une valeur du EPR de 16,773 m/an, Cependant on peut distinguer une forte érosion dans le secteur Est de la zone d'étude avec un recul de -302,256m à une vitesse de -16,792m/an, l'érosion est aussi présente dans le secteur Ouest mais avec une vitesse de recule moins importante que dans le secteur Est, qui est de -6,419m/an, soit un recul d'une valeur NSM de -19,25m.

III.2. Étude hydrodynamique

III.2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons développer les étapes de réalisation de l'étude hydrodynamique, en utilisant le modèle numérique Mike21, sur la Baie de Bou Ismail et discuter ses résultats pour mieux saisir le comportement hydrodynamique dans la Baie de Bou Ismail

III.2.2. Données de base

III.2.2.a. Wave Climate :

Wave Climate.com fournit des informations détaillées et spécifiques au site sur le climat des vents et des vagues en mer partout dans les océans et les mers du monde. De plus, en utilisant une transformation des vagues côtières, le service permet d'estimer les conditions climatiques des vagues aux emplacements côtiers.

Les séries obtenues depuis WaveClimate.com date de (01/01/1992 00 :00 :00 jusqu'au 31/12/2021 21 :00 :00). Cela permet de comprendre les caractéristiques des vagues offshore et onshore de la zone d'étude, un ensemble de données climatologiques à long terme a été extrait de (**Infoplazza, 2021**) à un emplacement en eau profonde (profondeur de l'eau \approx 2000 m) aux coordonnées 37°N et 3°15'E. Les vagues de cette région couvrent à la fois les mers de vent générées localement et les houles du Nord de la Méditerranée.

Les séries temporelles résument les résultats réguliers des enregistrements chaque 3h le long de l'année, ainsi que autres paramètres de la houle présentée comme suit :

Tableau III- 1 : Capture des séries temporelles des paramètres des houles (Wave Climate)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Year	Month	Day	Hour	u10	u10d	Hs	Hsd	Tz	Tm	Tp
2				[UTC]	[m/s]	[deg]	[m]	[deg]	[s]	[s]	[s]
3	1992	1	1	0	1,6	110	0,36	58	5,41	5,89	7,33
4	1992	1	1	3	2	108	0,33	58	5,45	5,87	6,73
5	1992	1	1	6	2,8	72	0,31	59	5,43	5,85	6,78
6	1992	1	1	9	1,8	92	0,28	57	5,36	5,77	6,83
7	1992	1	1	12	5,4	68	0,28	46	5,11	5,52	6,84
8	1992	1	1	15	6,8	52	0,53	44	3,44	3,63	3,27
9	1992	1	1	18	6,6	64	0,86	54	3,74	3,87	3,71
10	1992	1	1	21	6,4	82	0,95	61	3,92	4,1	4,04
11	1992	1	2	0	4,6	108	0,85	63	4,09	4,32	4,5
12	1992	1	2	3	4	128	0,76	64	4,26	4,51	4,56
13	1992	1	2	6	4,4	130	0,67	64	4,37	4,63	4,63
14	1992	1	2	9	3,8	162	0,59	64	4,48	4,74	4,71
15	1992	1	2	12	0,8	88	0,55	61	4,48	4,74	4,76
16	1992	1	2	15	3,4	54	0,5	58	4,46	4,72	4,81
17	1992	1	2	18	3,8	78	0,47	54	4,24	4,54	4,85
18	1992	1	2	21	3,8	134	0,45	51	4,21	4,48	4,44

Tableau III- 2 La définition des paramètres de la houle de WaveClimate.

Begin	1-1-1992 00 :00
End	31-12-2021 21 :00
Timestep (hours)	3
Datasource	Wavemodel
Code	Explanation
U10	One hour wind speed at 10m asl
U10d	Wind direction at 10m asl (nautical)
Hs	Significant wave height
Hsd	Mean wave direction (nautical)
Tz	Zero-crossing wave period
Tm	Mean wave period
Tp	Peak wave period

III.2.2.b. Analyse statistique des événements extrêmes de la houle de la cote algéroise (toute direction confondue)

1. Méthode des valeurs au-dessus du seuil POT

Tout d'abord, nous voudrions souligner qu'avant les méthodes basées sur l'utilisation des valeurs maximales au-dessus d'un certain seuil dans l'approche Peaks Over Threshold est devenue courante dans les analyses de données de vagues, une méthode qui était souvent utilisée pour obtenir des estimations de la valeur de retour était l'approche de la distribution initiale (ID), ou en utilisant la valeur maximale par an dans l'approche Maximale annuelle (AM).

Cependant, le processus d'échantillonnage dans le modèle AM élimine une grande partie des données des séries chronologiques de débit enregistrées. Par exemple, pour une base de 50 ans d'enregistrement de données de houle, le modèle AM ne considère que 50 éléments pour la modélisation, chacun étant les données les plus élevées en une seule année.

Plusieurs études notent que le modèle AM entraîne une perte d'informations utiles

En revanche, la méthode de la distribution initiale utilise des valeurs qui sont statistiquement dépendants et rapprochées contrairement à la méthode des maximales annuelles et la méthode Peak Over Threshold qui utilisent des valeurs (généralement) très éloignées du temps.

Pour notre cas d'étude on va extraire et étudier les conditions nominales extrêmes par la méthode POT sur les séries temporelles de données de la houle au point WAVE CLIMAT mentionné, et analyser les périodes de retours ou de récurrence (désigner l'intervalle de temps moyen séparant deux occurrences d'un évènement caractérisé par le dépassement d'une valeur particulière pour une variable aléatoire unique), (**wikhydro.developpement-durable**) selon la distribution asymptotique Distribution des Pareto Généralisée ou (GPD).

La méthode Peak Over Threshold consiste à extraire les valeurs du Peak au-dessus d'un certain seuil, le modèle POT présente également l'avantage de la flexibilité du processus d'échantillonnage, c'est-à-dire que, selon le but de l'analyse, le modèle POT peut extraire le nombre souhaité de points de données en ajustant le niveau de seuil.

Une complication connexe, est le choix du seuil, le choix d'un seuil trop bas peut violer la base asymptotique du modèle, et un seuil trop élevé donnera moins d'excès pour estimer le modèle.

Plusieurs méthodes ont été proposées pour sélectionner le seuil, qui comprend des méthodes graphiques (par exemple, le graphique de la durée de vie résiduelle moyenne) et le graphique de stabilité de forme de la distribution GPD. Ces méthodes supposent que pour tous les seuils, au-dessus d'un niveau bien choisi, il en résulte un paramètre de forme stable de la distribution GPD, le seuil varie selon le bassin versant en fonction de ces caractéristiques et son mécanisme de génération des crues.

Pour le type de données qui nous intéresse dans ce rapport le diagnostic graphique utilisé pour sélectionner un seuil approprié est le graphe du QQ, PP et le graphique du niveau de retour.

Il convient de noter qu'un seuil unique pour l'approche POT-GPD pourrait ne pas convenir à toutes les situations, donc il faut guider la sélection de seuil par rapport aux données sur le secteur directionnel choisi pour arriver à un affinement qui représente les conditions réelles de projet.

Les échantillons utilisés dans la méthode POT doivent être tirés de la série chronologique d'origine afin que les données puissent être modélisées comme des observations indépendantes, ce qui se fait par un processus de séparation où seules les observations les plus élevées du groupe de dépassement pour un seuil spécifié sont conservées, où seulement En un sens, ceux qui sont suffisamment éloignés les uns des autres, pour lesquels on considère que les maximums de clusters

espacés de 48 heures appartiennent au même cluster, ce qui correspond à la durée maximale de la tempête de données.

2. La loi GPD (Generalized Pareto distribution)

Soit H_s une variable aléatoire réelle (hauteurs significative) de fonction de répartition F , \hat{H} le seuil fixé et $Y = H_s - \hat{H}$. Sous condition que $H_s > \hat{H}$ (Y représentant ici la variable aléatoire de dépassement du seuil \hat{H}). (Pickands, 1975) a démontré que lorsque \hat{H} approche le point terminal de l'échantillon (valeur finie ou infinie dont la probabilité de dépassement est nulle). La loi des dépassements de u peut être approchée par la distribution généralisée de Pareto (GPD) (Hamm, 2010) donnée par (II-9) : $(y) = 1 - (1 + k y \alpha)^{-1/k} : 0 < y < \infty$

- k et α représente les paramètres de forme et d'échelle de l'échantillon.

La réalisation de la méthode POT et GPD ont été faites par la création d'un script sur le langage python en basant sur les bibliothèques pandas, numpy et pyextremes. Il nécessite comme «input», la série chronologique du point WAVE CLIMAT, la hauteur significative.

En résumé, la procédure d'analyse des valeurs extrêmes appliquée comprend les étapes suivantes :

- Les échantillons POT des maximas de tempête sont collectés à partir de la série chronologique originale en utilisant différents seuils.
- Pour chaque échantillon POT les paramètres GPD et leurs incertitudes sont estimés Sur la base de la variation des estimations des paramétrise formes avec le seuil, le seuil optimal a été choisi.
- En fixant le seuil, les estimations des valeurs de retours seront estimées.

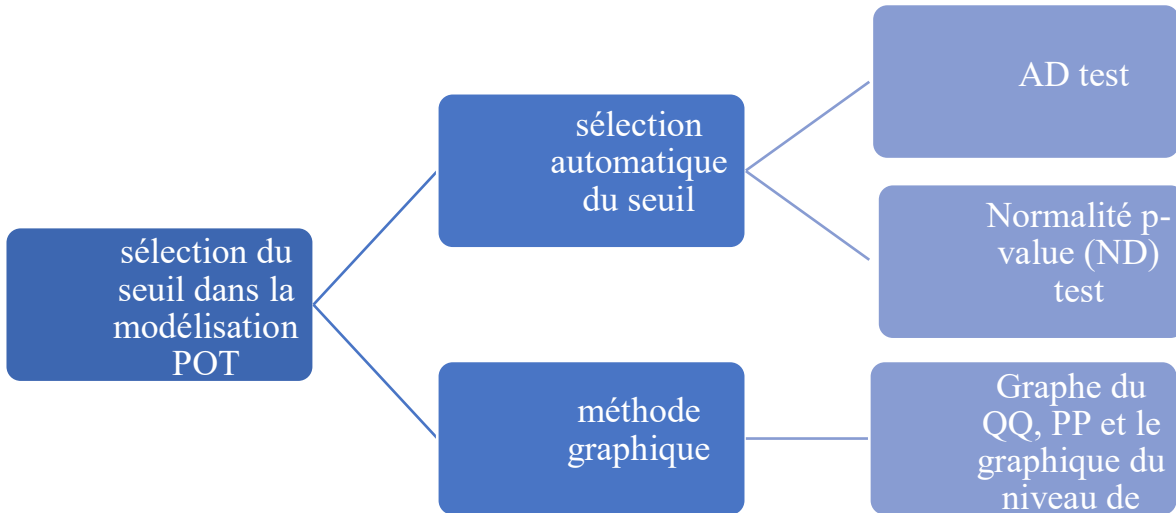


Figure III- 13 :Méthodes de sélection de seuil dans la modélisation POT

- Le seuil de 3.4m a été sélectionner pour cette étude pour le secteur omnidirectionnelle basant sur la méthode graphique ci-dessous. :

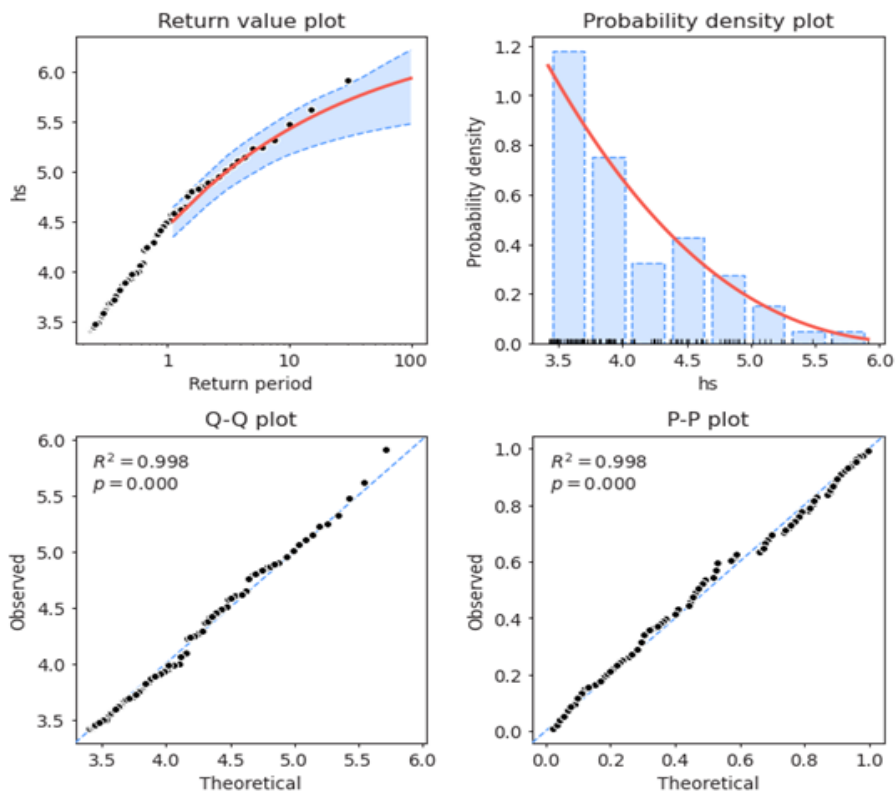


Figure III- 14 : Graphe du QQ, PP et le graphique du niveau de retour pour la détermination du seuil

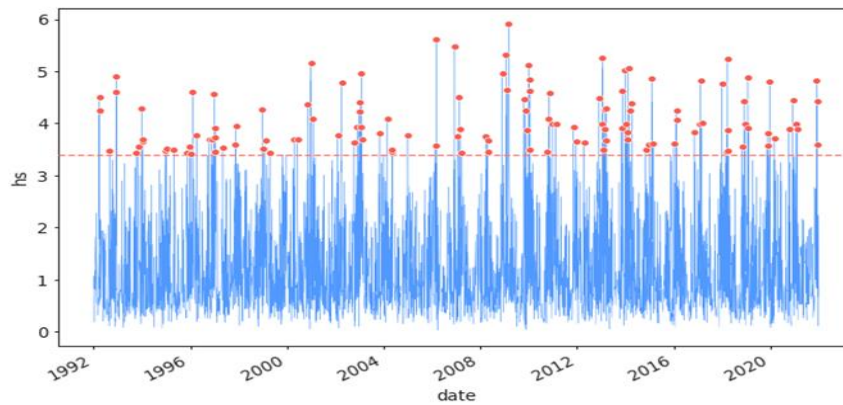


Figure III- 15 : Les valeurs retenues pour le calcul des extrêmes-secteur omnidirectionnel

3. Interprétation des résultats :

Les figures III. (14,15) présentes les spectres des houles pour les direction (N,NW,NNW) et durant la période de 1992 à 2022.

Les hauteurs significatives oscillent entre des valeurs supérieures à 0m et inférieure ou égale 7.3m. Le seuil défini pour ces spectres est varié entre 3 et 3.5 m, au-delà ce sont des valeurs extrêmes des houles.

Le Cas du secteur NW (figure III.20) montre des hauteurs significatives atteint 5.9m avec un seuil de 3.4m.

Pour le secteur N, la hauteur significative est variée entre $3 < H_s < 7.3$ m. Fig(III.18).

Pour le secteur NW, la hauteur significative est variée entre $3 < H_s < 6.2$ m. Fig(III.19).

Pour chaque direction la courbe semi-logarithmique, qui présente les valeurs de l'amplitude de la houle en fonction de chaque période de récurrence. Ces valeurs varient selon le comportement de la houle enregistré sur la période de 1992 jusqu'à 2022.

Les hauteurs significatives en fonction de la période de retour figs III(21,22,22) représentent juste les valeurs au-dessus de la ligne de seuil (donc juste les valeurs du pic) les périodes des retours sont d'une année jusqu'à centennal (toute les directions N, NW, NNW).

Le résultat de ce traitement statistique va nous donner les conditions de projet à simuler selon la direction la plus pénalisante.

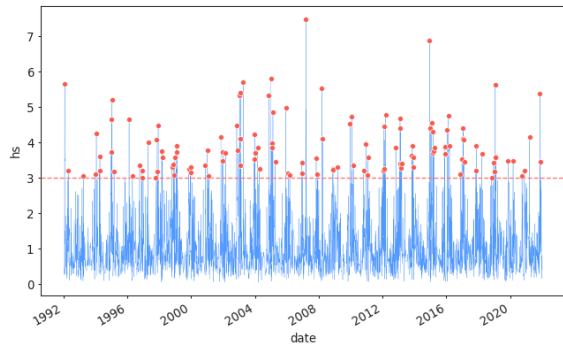


Figure III- 18 Les valeurs retenues pour le calcul des extrêmes-secteur Nord

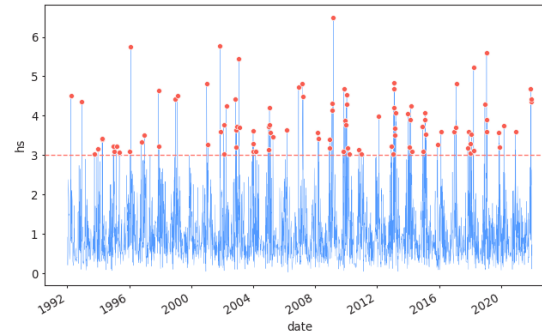


Figure III- 19 : Les valeurs retenues pour le calcul des extrêmes-secteur NNW

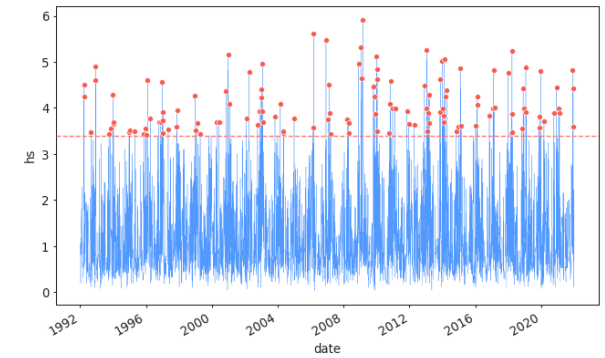


Figure III- 20 : Les valeurs retenues pour le calcul des extrêmes-secteur NW

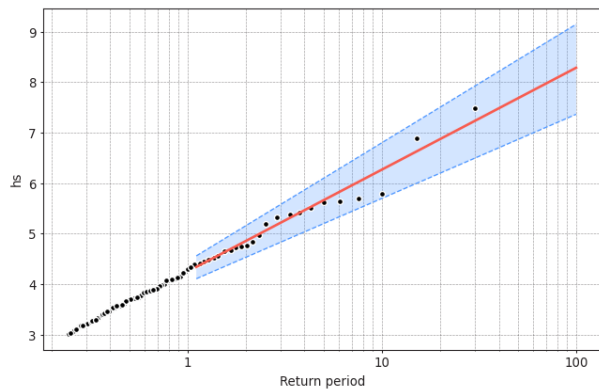


Figure III- 17 Ajustement par la loi GPD secteur NORD

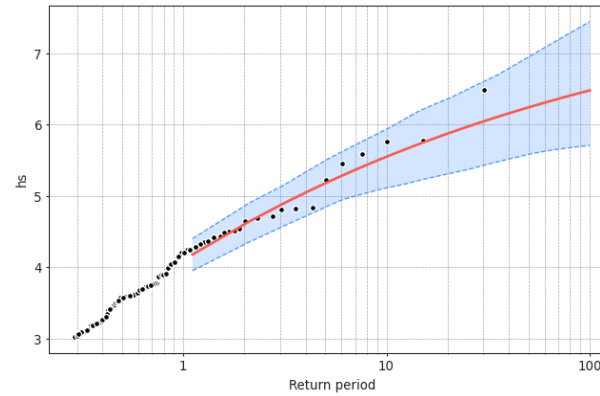


Figure III- 16 : Ajustement par la loi GPD secteur NNW

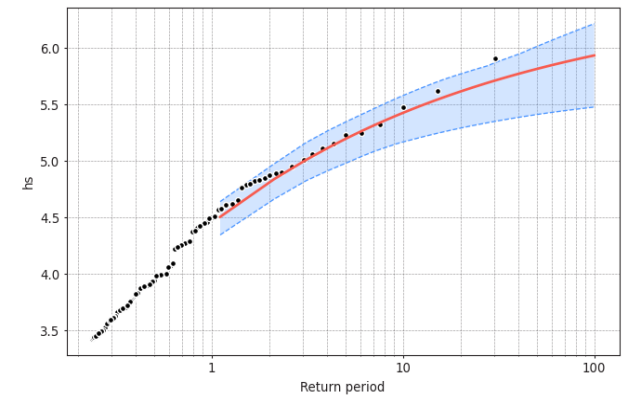


Figure III- 21 Ajustement par la loi GPD secteur NW

III.2.2.c. Les conditions de projet à simuler :

Le Tableau caractéristiques de la houle imposée à frontière ouverte suivante récapitule les états de mer en entrée du modèle. Les niveaux d'eau adoptés pour le modèle sont :

- Cas pour les périodes de retour (1 an et 5 ans) :

Il s'agit du niveau moyen de la marée haute (0.34 m).

- Cas pour les périodes de retour (20 ans) :

Le niveau est la somme du niveau moyen de la marée haute (0.3m) et de l'élévation du niveau d'eau (0.3 m)

- Cas pour les périodes de retour (50 ans) :

Le niveau est la somme du niveau moyen de la marée haute (0.34m) et la surcote de période de retour de 50 ans (+1.5 m, LEM 2013).

Cas pour les périodes de retour (100 ans) :

Le niveau est la somme du niveau moyen de la marée haute (0.34m), la surcote de période de retour de

100 ans (+1.5 m, LEM 2013) et de l'élévation actuel du niveau de la mer (+0.3m)

Il est utile de signaler, que toutes les modélisations ont été associées à un vent constant moyen équivalent à 12 m/s pour les trois directions, en effet le couplage entre un vent d'une période de retour avec une houle d'une même période de retour, ramène à des valeurs hautement surestimées.

La solution qui a été proposé est la détermination d'une probabilité d'occurrence des couples vents/houles, appelé communément la probabilité conjointe ou croisée

La probabilité d'occurrence ne fera pas l'objet de cette étude, la vitesse et direction du vent

Tableau IV- 1 : Caractéristiques de la houle imposée à frontière ouverte suivant les conditions

Période de retour	1 ans		10 ans		20 ans		50 ans		100 ans	
	HS(m)	TP(s)	HS(m)	TP(s)	HS(m)	TP(s)	HS(m)	TP(s)	HS(m)	TP(s)
N	4.25	8.43	6.27	9.24	6.87	9.5	7.68	10.12	8.28	11.52
NNW	4.44	8.55	5.42	8.7	5.61	9.62	5.81	11.11	5.93	11.8
NW	4.09	8.75	5.54	9.56	5.87	10.11	6.24	11.3	6.47	11.74

III.3. Etude hydrodynamique

On ne s'intéresse dans cette étude qu'à la modélisation de la houle, initialement générée par le vent.

La houle est un phénomène de propagation d'une perturbation depuis un endroit d'un milieu matériel à un autre, qui n'engendre pas de mouvement global du milieu lui-même.

La propagation d'une perturbation se traduit par un transport d'énergie, à une vitesse qui n'est pas forcément identique à celle de la perturbation.

La vitesse de propagation des vagues dépend de leur longueur d'onde, de leur amplitude et à l'approche du littoral, de la profondeur d'eau. Le phénomène de propagation des vagues est donc dispersif. Par ailleurs, les vagues ne se propagent pas toutes dans la même direction, d'où un aspect parfois chaotique de l'état de surface de la mer. Les vagues sont donc caractérisées par des spectres d'énergie, qui font apparaître des grandeurs caractéristiques, avec par exemple une hauteur significative H_s , une période significative T_p , etc....

Ces spectres sont larges pour les vagues de vent, plus étroits pour une houle déjà formée qui continue à se propager loin de sa zone de génération par le vent.

III.3.a. Principe de la modélisation

Le principe général et les étapes de la modélisation mises en œuvre pour étudier l'hydrodynamique de la baie de Bous Ismail :

Modélisation de la propagation de la houle à l'échelle de la baie.

Il est nécessaire de calculer au moyen d'un modèle numérique la propagation et la génération des houles depuis le large, ou elles sont connues, jusqu'au littoral (la détermination des caractéristiques de houle (hauteur, période et direction) au large de la baies

III.3.b. Modèle Mike

Mike 21-DHI développé par l'institut hydraulique Danoise 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.

La résolution par méthode des volumes finis se base sur le maillage flexible composé d'élément triangulaire dans le plan horizontal. Ces éléments peuvent être affinés dans les zones d'études d'intérêt particulier (DHI, 2014).

➤ Génération et interpolation de la Mesh

Le module « Mesh Generator » offre un environnement pour la création, l'édition et la présentation de bathymétries numériques 2D détaillées. « Mesh Generator » génère un format souple de maillage (*. MESH) (DHI, 2014) Le programme fournit les utilitaires pour importer des données du trait de côte, notamment les bathymétries. Pour faciliter le processus d'élaboration manuelle des données et leur présentation, des cartes graphiques des images de fond peuvent être importées et superposées aux données bathymétriques (DHI, 2014). Diverses options d'interpolation sont disponibles pour fournir la meilleure méthode possible pour notre type de données. Lorsque la bathymétrie a été préparée, nous pouvons utiliser les utilitaires d'exportation de données bathymétriques de sortie dans différents formats (DHI, 2014).

La création d'une bathymétrie est généralement divisée en les phases suivantes : le choix du système de projection, le traitement des données bathymétriques XYZ, la Pour la conception du maillage, le système de projection utiliser est UTM WGS84 ZONE 31. Les données obtenues sont enregistrées sous la forme d'un fichier XYZ qui contient les coordonnées des points bathymétriques ont été importé grâce au module « Mesh generator ».

A l'aide du module « Mesh Generator » dans MIKE21, nous pouvons d'abord importer le trait de côte à partir des données transformées précédemment (fichier « *.XYZ »). Nous devons assurer

que les lignes du trait de côte soient bien fermées lors de l'importation d'une série de lignes. Puis, les données bathymétriques (fichier « *.XYZ ») sont importées dans le fichier de maillage.

Nous notons que la vitesse de calcul est proportionnelle à la taille du plus petit élément du maillage. En effet, le modèle Mike21 choisi le pas de temps afin d'assurer la condition de stabilité CFL inférieure à 1 pour tous les éléments. Pour ce cas d'étude la Mesh générée est construite de 38289 éléments pour 23241 nœuds. Le générateur de maillage donne des possibilités à l'égard de deux interpolations pour les éléments triangulaires. Les deux routines d'interpolation sont possibles : le voisin naturel et l'interpolation linéaire. Elles sont indépendantes du type de maillage utilisé.

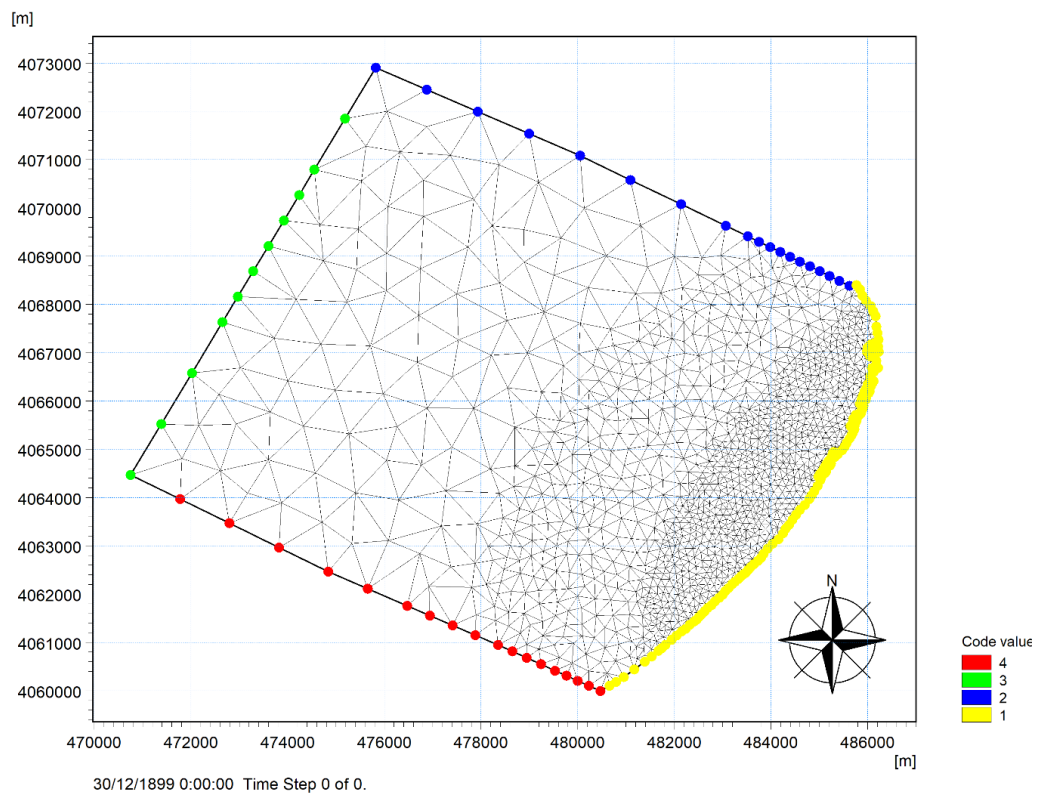


Figure III- 22 : Maillage du modèle zoom sur une partie de la baie de Bou Ismail

➤ **Bathymétrie**

La bathymétrie utilisée pour cette étude est celle issue de la digitalisation de la carte de **Ttipaza a Rras Matifou** édition 2021 intitulée à l'échelle de 1/ 200000 »

Traité sous le logiciel de cartographie Arc Gis 10.4 ; en utilisant le système de projection WGS84 / UTM zone 31N.

La bathymétrie du modèle importé générée avec ArcGIS vers MIKE21 de fichier text à (*.xyz).

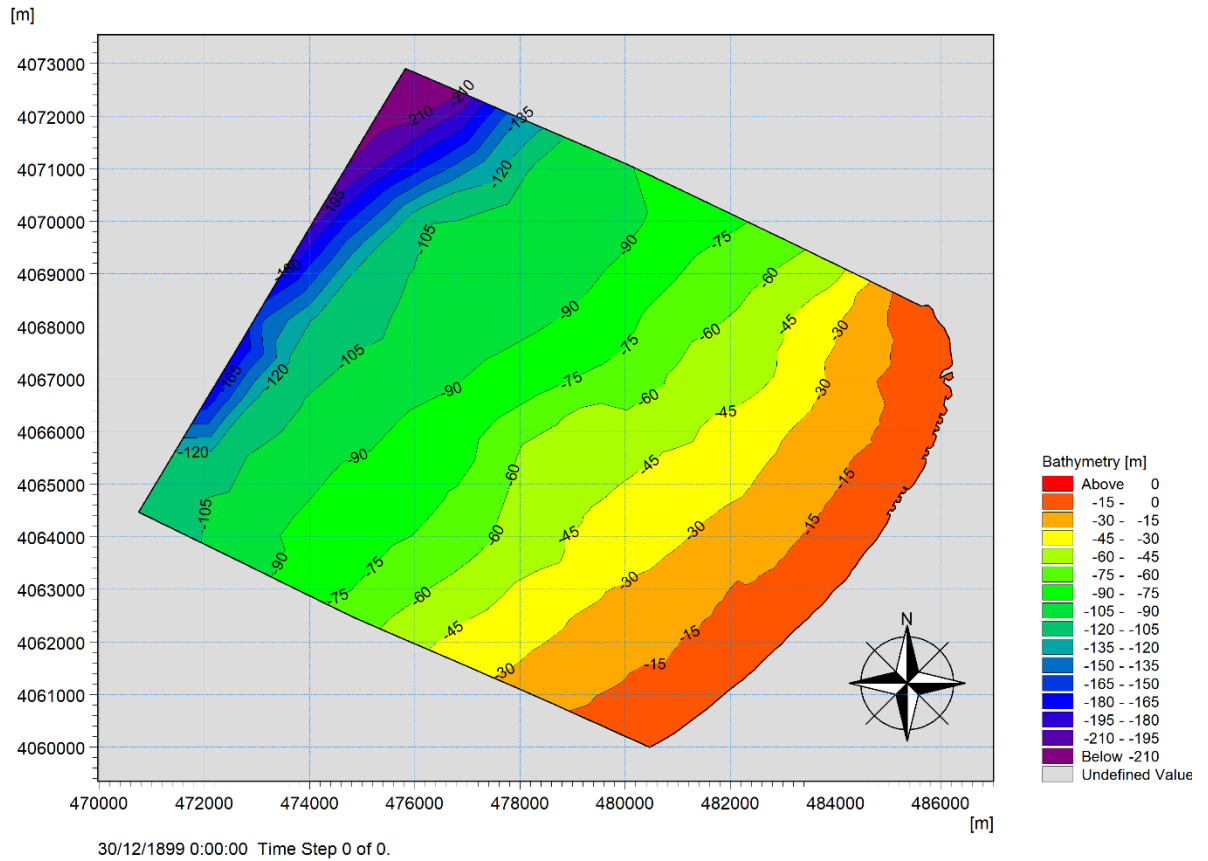


Figure III- 23 : Carte bathymétrie de la baie de Bou Ismail.

- **La bathymétrie de la baie de Bou Ismail :**

On distingue deux zones obtenues par l'analyse de la carte bathymétrique de la baie de Bou Ismail :

- **Zone côtière :** montre des isobathes espacées régulièrement parallèles à la cote qui varie de (0 m à 15 m) ce qui traduit un fond sous-marin régulier avec une pente légèrement douce.
- **Zone au large :** on remarque au centre deux isobathes espacées ce qui traduit la limite du plateau continental ensuite les isobathes sont devenues très rapprochées les unes des autres ce qui traduit une pente forte.

- **Modélisation de la houle au large à l'aide du code de calcul (SW-Mike21)**

MIKE 21 SW est le module de propagation de la houle spectrale, le modèle simule la croissance, la décroissance et la transformation des vagues et de la houle générées par le vent dans les zones offshore et côtières.

Les simulations permettent de reproduire les phénomènes de réfraction, de dissipation par déferlement et/ou frottement sur le fond, de génération des vagues par le vent, d'interaction non linéaire entre les vagues et d'interaction vagues-courants et les effets de la variation temporelle de

la profondeur. Le module permet d'utiliser des données de vagues au large préétablies, qui doivent alors être connues grâce à des mesures ou autres données externes, ou de générer des vagues par le vent. La deuxième approche a été utilisée pour la présente étude. **DHI (2014)**

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 :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (01)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial \eta p}{\partial y} + \frac{\partial w u}{\partial z} = f v - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \\ \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \end{aligned} \quad (02)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial \eta p}{\partial y} + \frac{\partial w u}{\partial z} = f v - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \\ \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \end{aligned} \quad (03)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial u v}{\partial x} + \frac{\partial w v}{\partial z} = -f u - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \\ \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \end{aligned} \quad (04)$$

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

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (05)$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (06)$$

A est la viscosité horizontale.

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

A z = η :

$$\overline{\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w} = 0, \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 \nu_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy})$$

A z = -d :

(07)

$$\overline{u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w} = 0, \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 \nu_t} (\tau_{bx}, \tau_{by})$$

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_0 : 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 :

- $K_r = \frac{H_s \text{ local}}{(H_{s0} \cdot K_s)} \quad (13)$

- $K_s = \frac{H}{H'0} \quad (14)$

- $\frac{C_0}{C_g} = K_0 \cdot d \left(1 - \frac{1}{2} K_0 \cdot d + \frac{7}{72} (K_0 \cdot d)^2\right) \quad (15)$

Avec :

- $K_0 = \frac{2\pi}{L_0} \quad (16)$

H_{s0} : La hauteur de la houle au large

H_s : Hauteur de la houle locale

K_s : Coefficient de Shaoling

K_r : coefficient de réfraction

H : Hauteur de la vague à une profondeur d

$H'0$: Hauteur de la vague équivalente au large

C_0 : Célérité de phase

C_g : Célérité de groupe

K_0 : Nombre d'onde

L_0 : Longueur d'onde

d : Profondeur

T : Période de pic

➤ **Modélisation des champs de courants générés par la houle (HD-Mike21)**

La modélisation des courants induits par la marée et les vagues (courants littoraux) repose sur le module FM (Flexible Mesh) de MIKE 21. Ce module utilise un maillage flexible aux volumes finis qui permet d'augmenter la résolution de la bathymétrie dans les zones d'intérêt. Celles-ci sont modélisées à l'aide d'un maillage relativement fin tandis que les champs éloignés sont modélisés avec un maillage plus grossier, permettant ainsi d'optimiser les temps de calculs.

Dans le cas présent, d'après les niveaux de marée imposés aux limites de la zone modélisée, le module fournit les valeurs de niveaux et de vitesses d'écoulement intégrées sur la verticale en chacun des points de maillage de la bathymétrie. Le module intègre également les contraintes de

radiation dues aux vagues (calculées à l'aide du module SW - voir section suivante), qui permettent de superposer les courants littoraux aux courants de marée. (DHI, 2014).

- **Le modèle hydrodynamique MIKE21 HD** résout les équations bidimensionnelles classiques de Saint-Venant par la méthode volume fini sur une grille à maillage flexible et par la méthode des différences finies sur une grille à maillage rectangulaire. Il traite le frottement sur le fond, l'effet des événements météorologiques (vent et pression atmosphérique), et la force de Coriolis, etc....

Il nous permet de simuler les courants côtiers dus à l'action de la houle dans la zone de déferlement (DHI, 2014m).

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 (DHI, 2014c)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hs \quad (11)$$

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_w}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial x_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + (hu_s S) \quad (12)$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_w}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial x_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{yy}) + (hv_s S) \quad (13)$$

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz \quad (14)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} hT_{xy} = A \left(\frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} \right) \end{array} \right. \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} hT_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \end{array} \right. \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} hT_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \end{array} \right. \quad (17)$$

➤ Choix des directions

L'analyse d'une série de données brutes des caractéristiques des vents et des houles (vitesse, direction, amplitude) fournie par Wave Climate pour une période entre 1992 et 2021 avec un pas de 3heures. Ces derniers ont été filtrés de deux manières :

- Par saison : saison hivernale, saison printanière, saison estivale et saison automnale et,
- Par mois. Des séries chronologiques format (*.dfs0) ont été obtenues avec l'outil « Time séries », qui seront insérées dans l'outil « plot composer » dans le logiciel Mike21.

L'analyse et le traitement de ses séries nous ont permis d'élaborer des roses des vents et des houles annuelles, trimestrielles et mensuelles. Selon les roses Fig III(9,10,11) les houles des directions Nord, Nord- Nord-Ouest et Nord-Ouest se sont les plus fréquentes et influencent directement sur notre zone d'étude.

III.3.c. Résultats des simulations HD, SW et interprétation :

- **PERIOD DE RETOURE ANNUELLE**

NORD SW et HD :

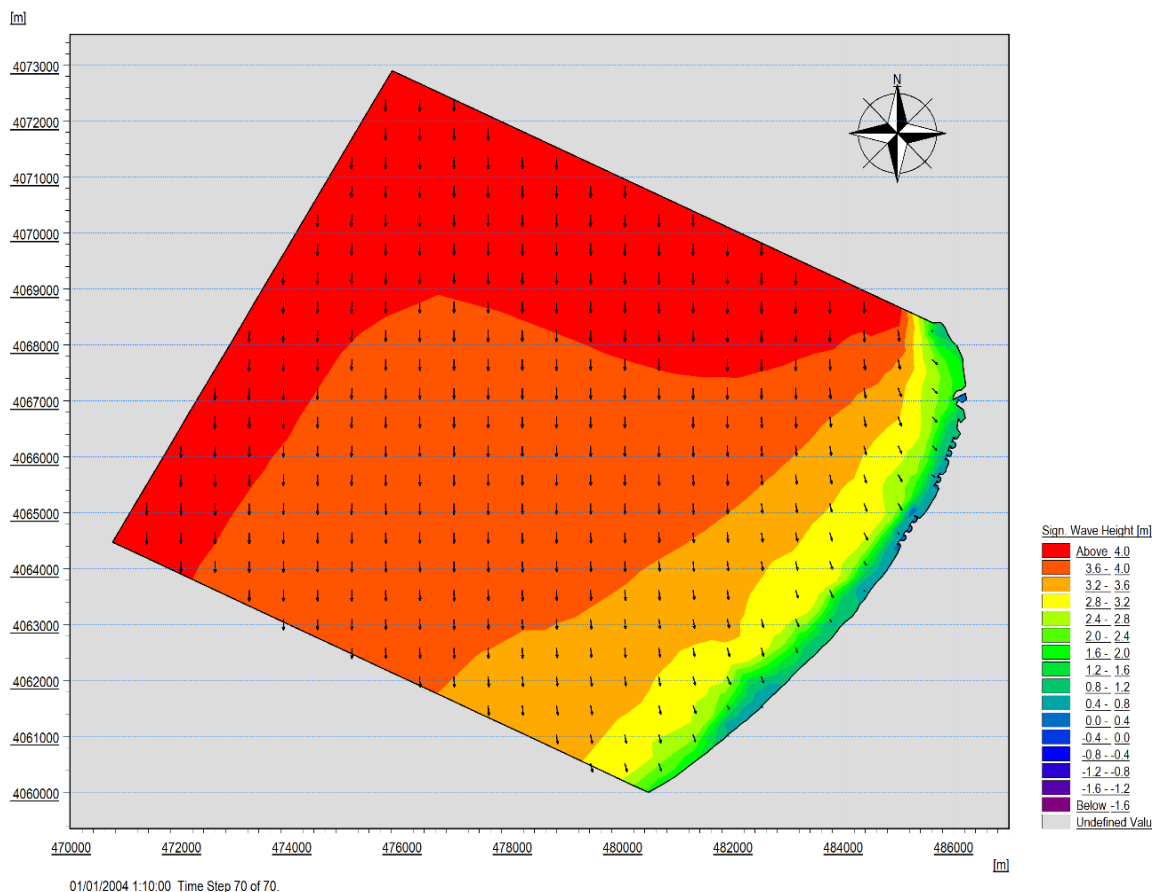


Figure III- 24 : Champ des houles dans la zone d'étude N 360°

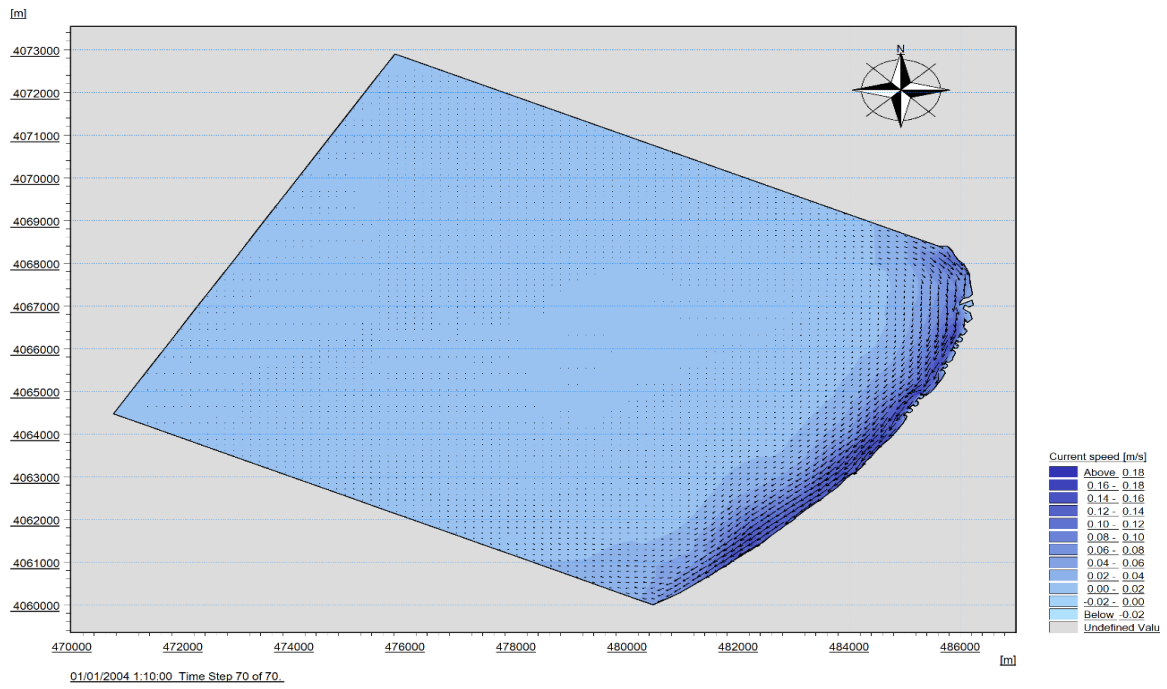


Figure III- 25 : Champ des courants dans la zone d'étude N 360°

NNW SW et HD

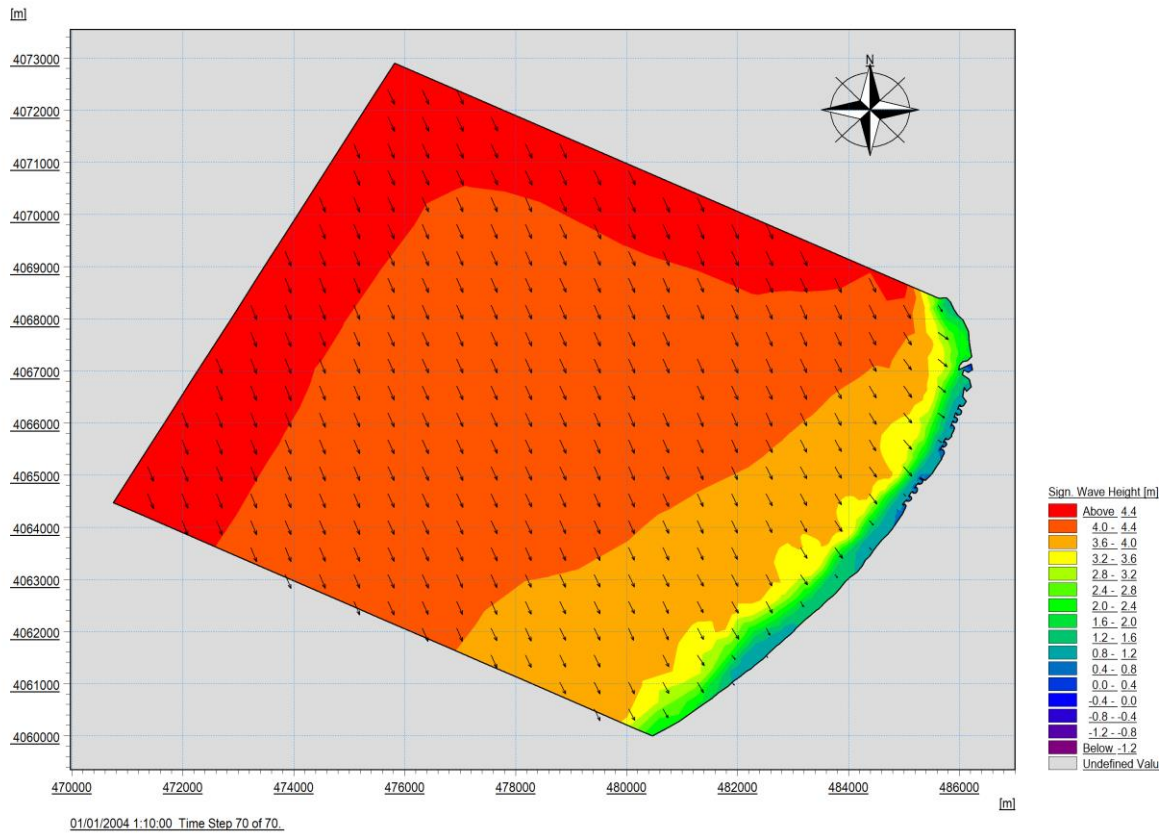


Figure III- 26 : Champ des houles dans la zone d'étude NNW 337°

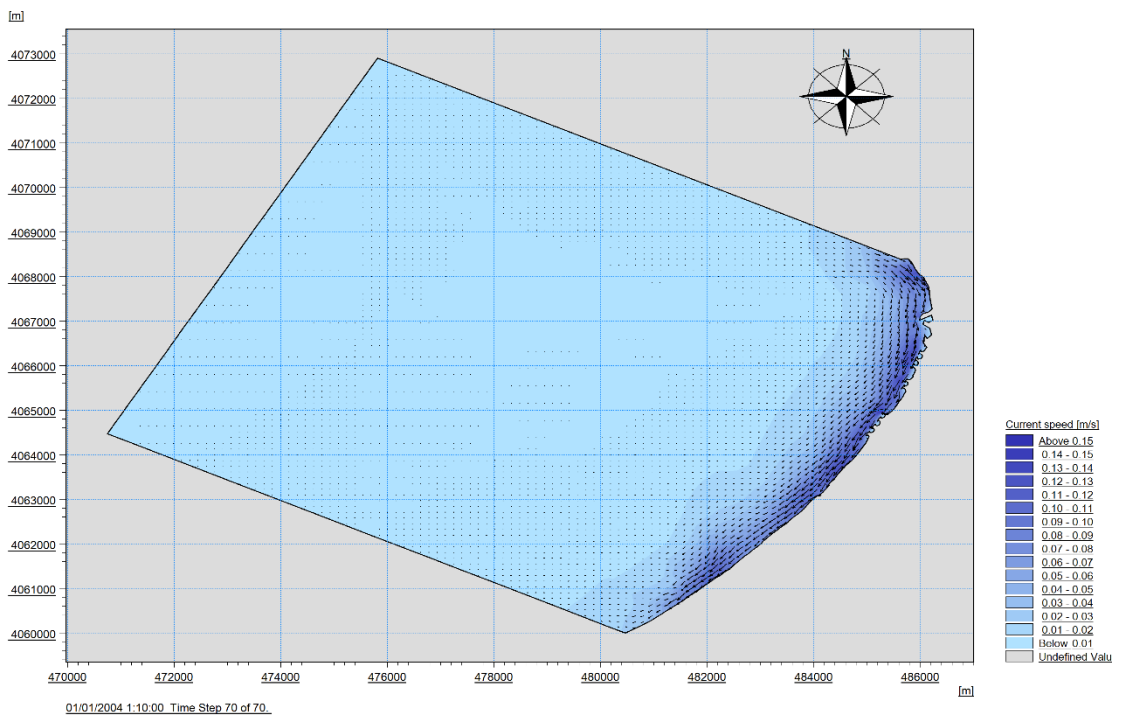


Figure III- 27 : Champ des courants dans la zone d'étude NNW 337°

NW SW et HD

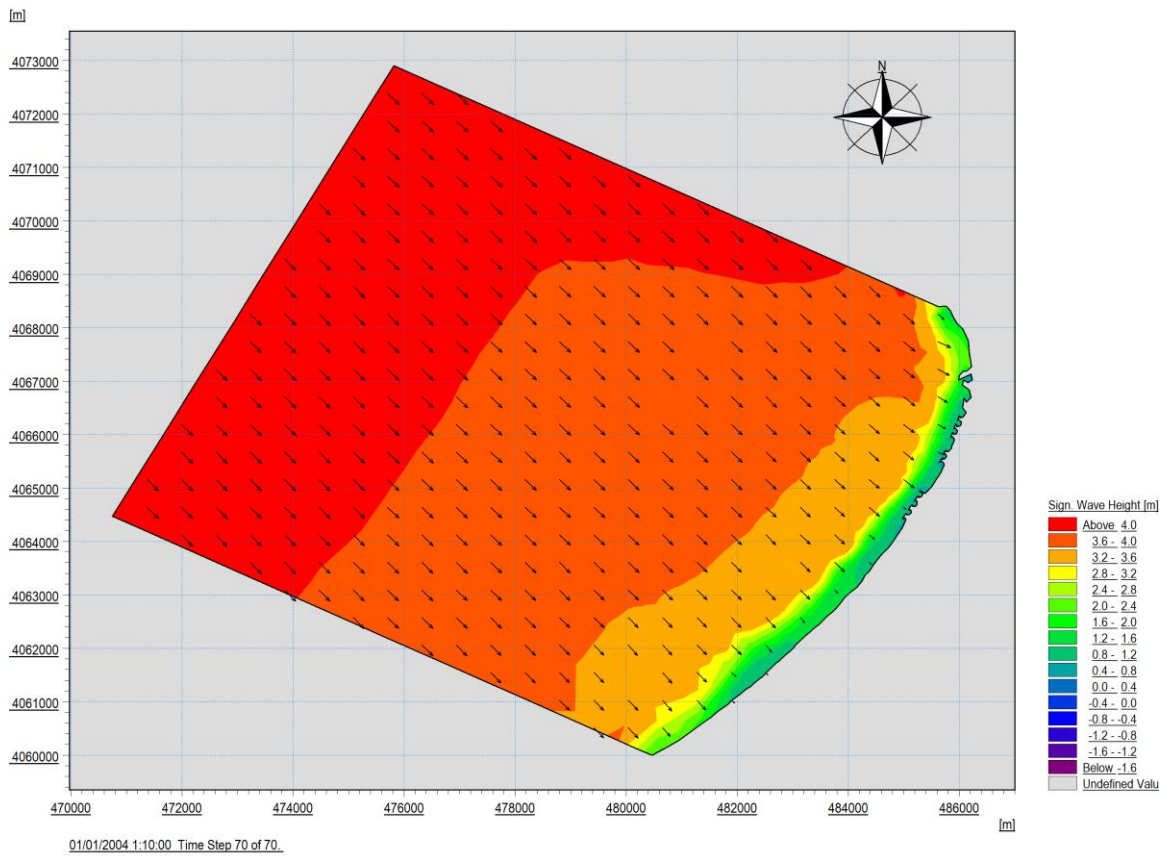


Figure III- 28 : Champ des houles dans la zone d'étude NNW 315°

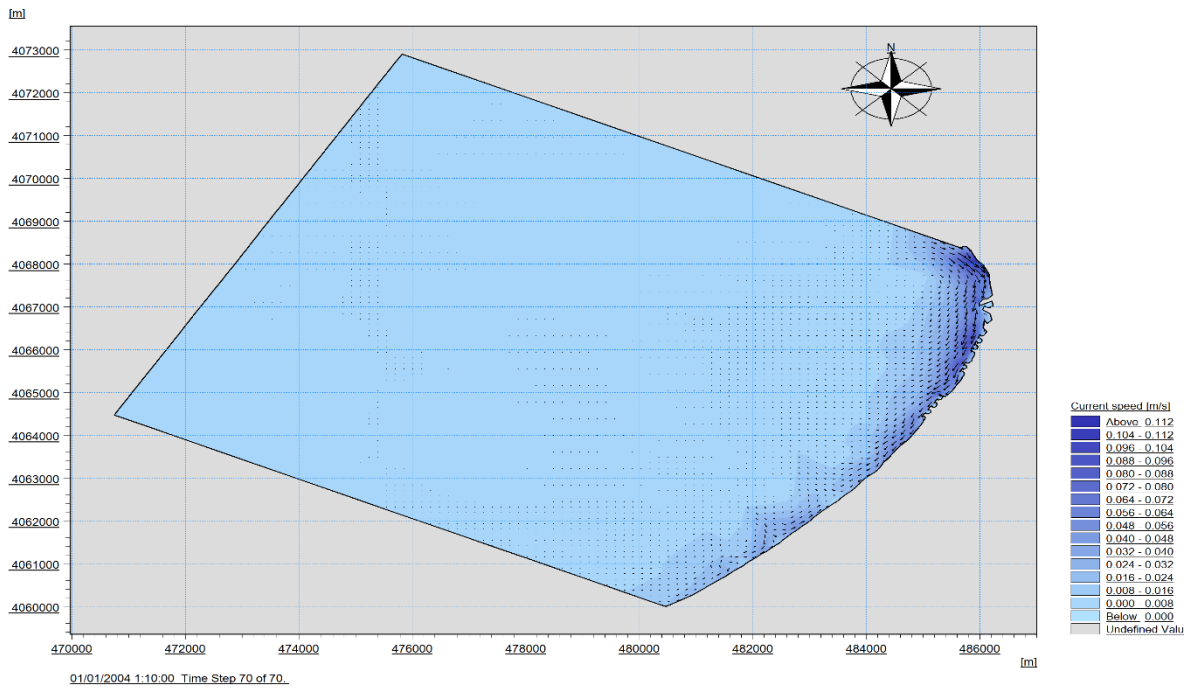


Figure III- 29 : Champ des courants dans la zone d'étude NNW 315°

- **Interprétation des résultats pour la période de retour annuelle :**

Direction N : Sur le plan annuel on remarque une hauteur d'une houle modérée de 4m au large pour et auprès de la côte atteint les 0.8m pour la plage Khelloufi et 1.2 m pour les zones aménagées par les ouvrages de protection cela n'expose pas cette côte au phénomène de submersion.

Tandis que la vitesse du courant de dérive varie entre 0.18 et 0.16 tout le long de la côte

Direction NNW : Les houles se propagent le long de la côte d'une hauteur modérée de 4 m d'une direction oblique

Au voisinage de la côte la hauteur de la houle est presque la même sur le long de notre zone d'étude de 0.8m.

Concernant les courants ; ces derniers qui sont de secteur Est de la côte sont moins importants par rapport au secteur nord est sont de 0.13 m/s

Direction NW : La propagation des houles de secteur Nord-Ouest est perpendiculaire de la côte atteignant les 1.2 à 1.6m, ceci engendre un courant de dérive littoral très faible de 0.112 m/s à 0.024 m/s de l'Est vers l'Ouest respectivement.

• PERIOD DE RETOUR DECENNALE

NORD SW et HD

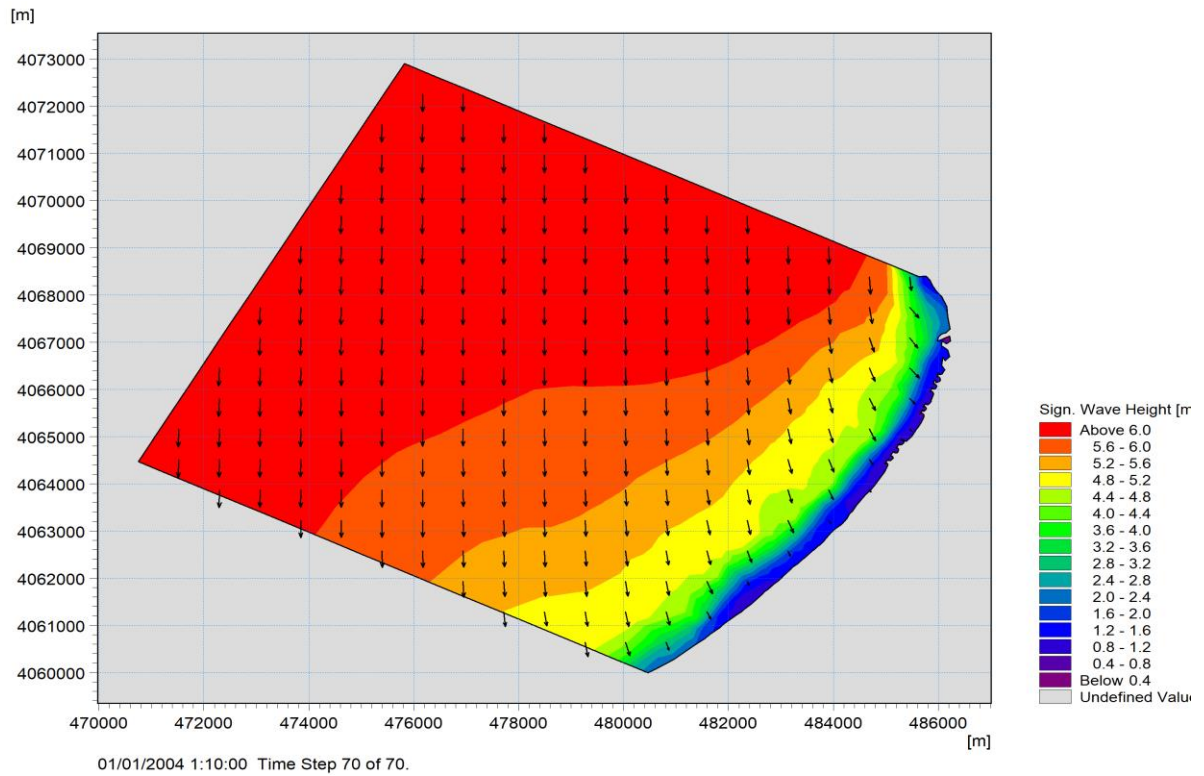


Figure III- 30 : Champ des houles dans la zone d'étude N 360°

NNW SW et HD

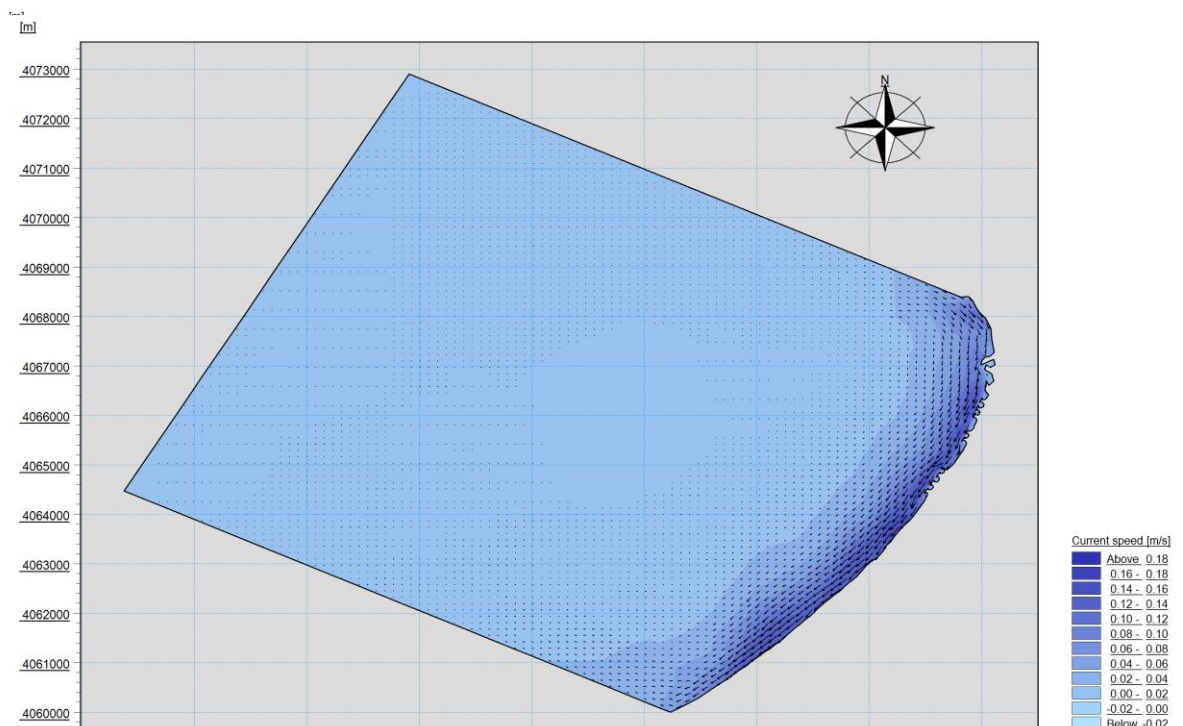


Figure III- 31 : Champ des courants dans la zone d'étude N 360°

NNW SW et HD

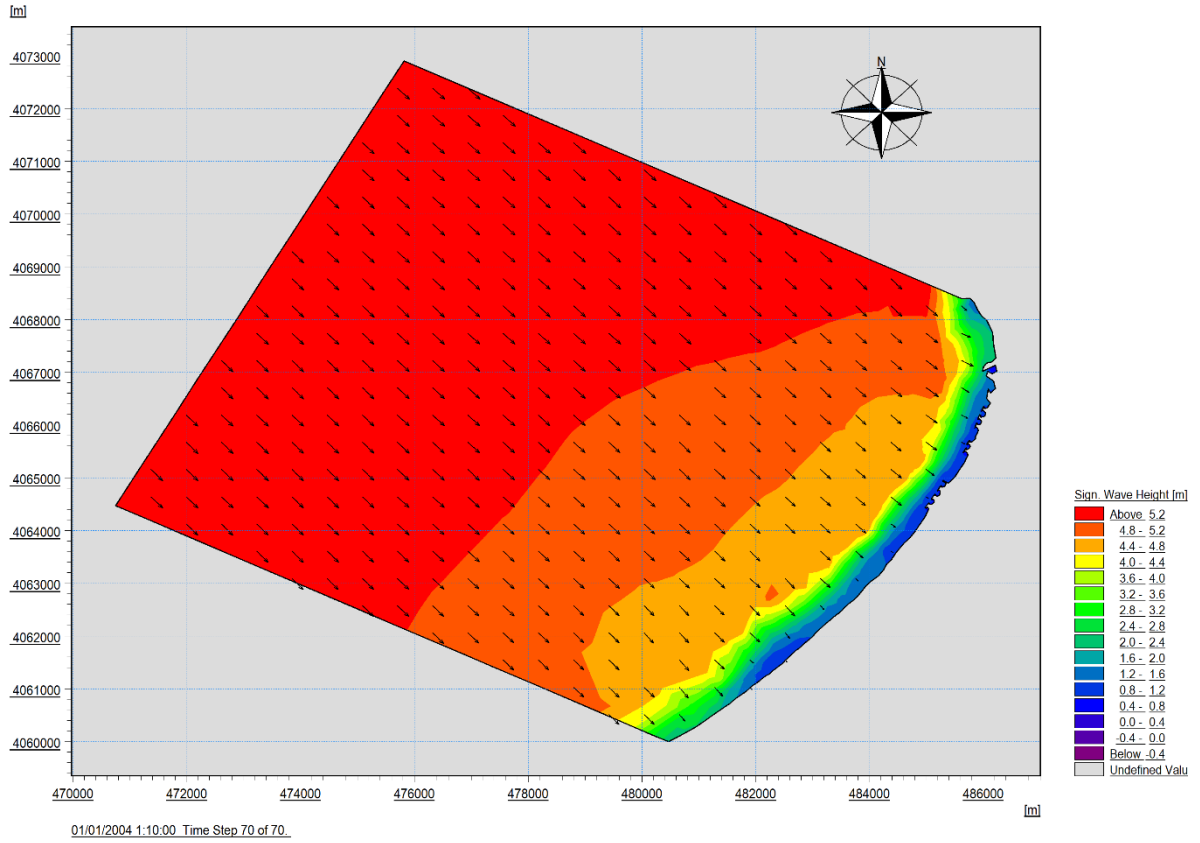


Figure III- 32 Champ des houles dans la zone d'étude NNW 337°

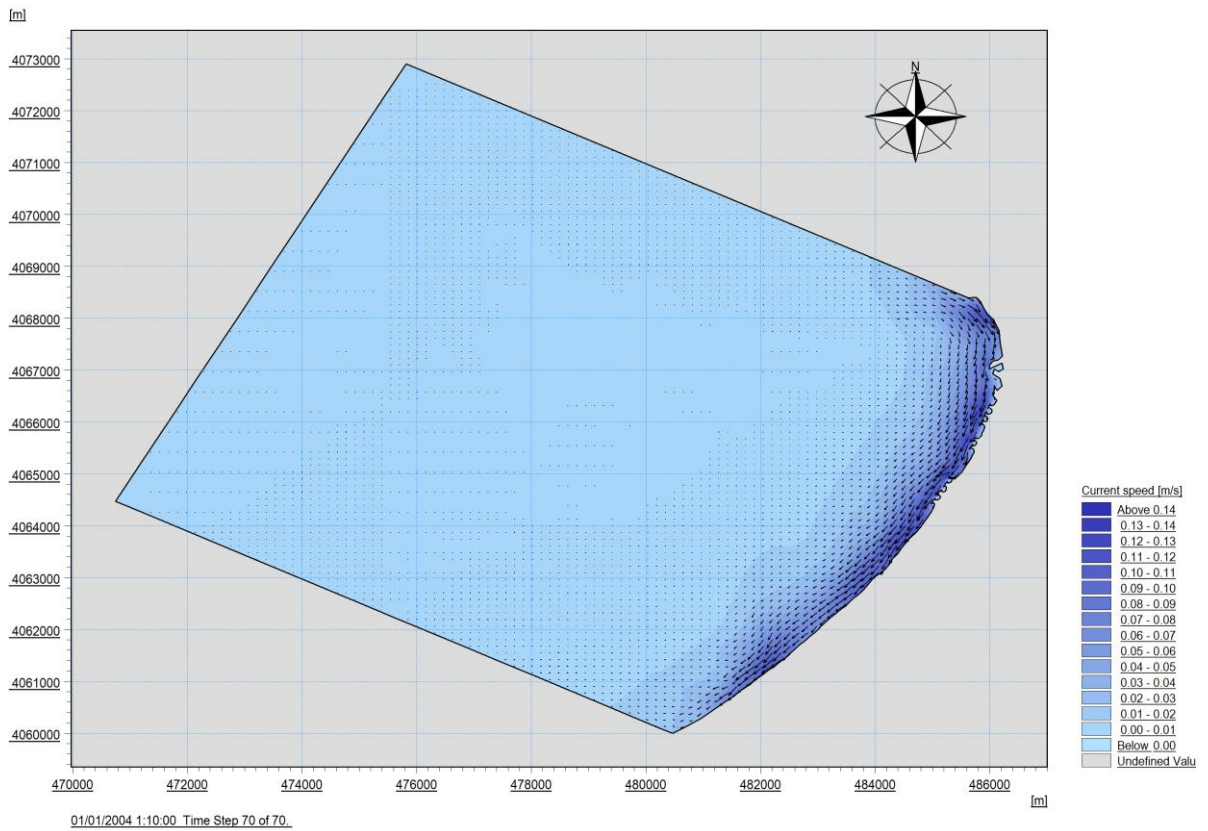


Figure III- 33 : Champ des courants dans la zone d'étude NNW 337°

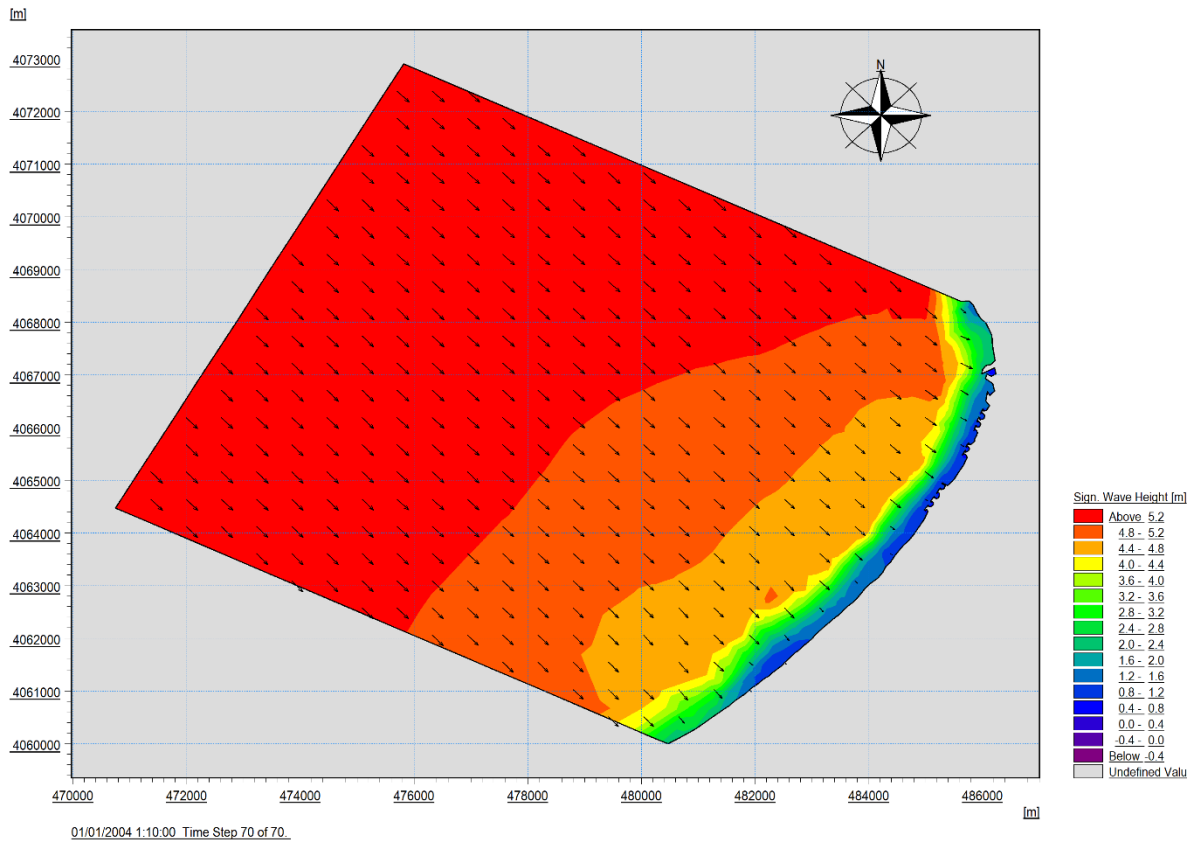


Figure III- 35 Champ des houles dans la zone d'études NNW 315°

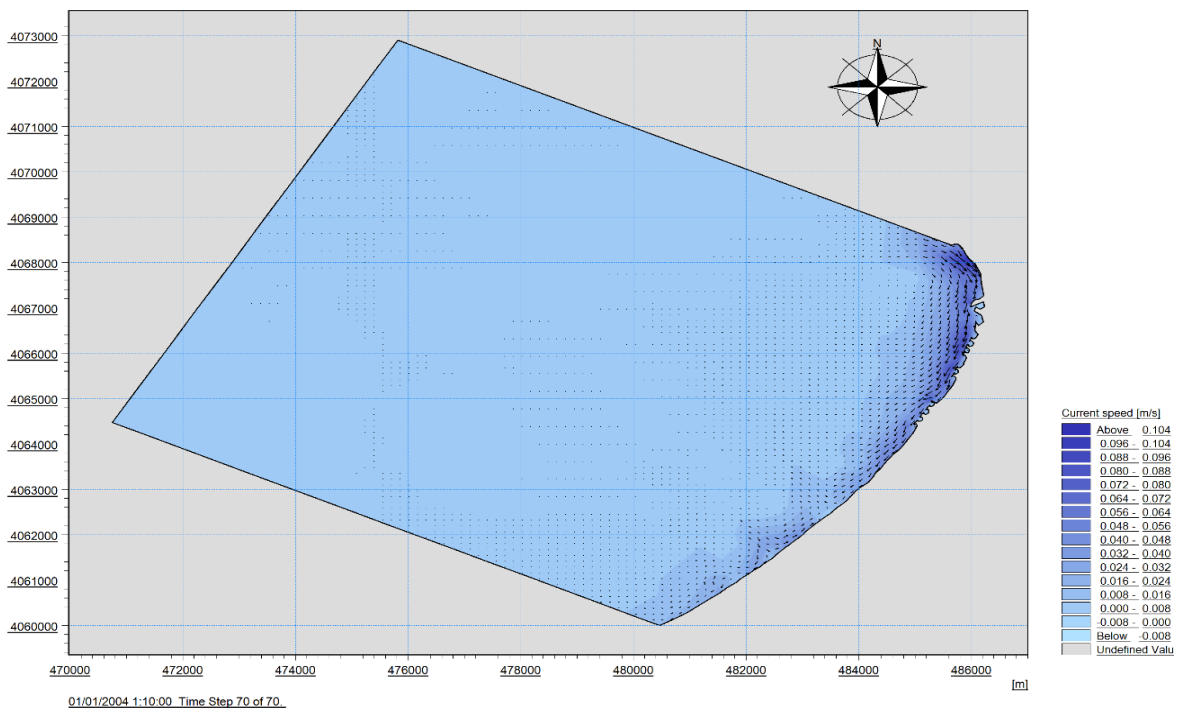


Figure III- 34 : Champ des courants dans la zone d'étude NNW 315°

- **Interprétation des résultats pour la période de retour décennale :**

Direction N : les houles de direction Nord propagent d'une hauteur importante de 6m par rapport à une période de retour annuelle, elles se propagent vers la cote pour atteindre 1.6m au niveau du cap Sidi Fredj mais aussi de 0.8 à la plage Mazafran et c'est la zone la moins influencée par l'action hydrodynamique, le courant littoral se manifeste d'une façon irrégulière où ils atteints une vitesse de 0.16m/s dans la plage de Palm-Beach, plage azure, plage zeralda1 et plage Khaloufi. L'action de ce dernier tends à s'annuler au niveau de l'embouchure d'oued Mazafran à cause de la déviation de sa direction.

Direction NNW : Les houles se propage le long de large de 5 .2 m d'une direction oblique venant du nord-nord-ouest mais en arrivant à la zone de fetch la houle atteint les 4 mètres

Au voisinage de la cote la hauteur de la houle n'est pas la même sur le long de notre zone d'étude ; au cap de Sidi Fredj sa hauteur est de 3.2m telle que la plage Mazafran c'est là où le problème d'érosion manifeste ; mais de 0.5 au centre de la zone (de Palm-Beach jusqu'à la plage Kheloufi)

Concernent les courants ; ces derniers qui sont de secteur Est de la cote sont moins importants par rapport au secteur nord est sont à 0.1 m/s

Direction NW : On remarque que dans la direction Nord-Ouest, l'effet érosif est plus accentué pour cette période de retour, vu que les houles arrivent vers la cote de manière perpendiculaire d'une hauteur de 0.8 à 0.12 m.

La vitesse du courant longitudinal est plus importante au secteur Est de notre zone d'étude au voisinage des ouvrages de protection, est-elle s'annule à l'ouest

• **PERIOD DE RETOUR VINGTENNALE**

NORD SW ET HD

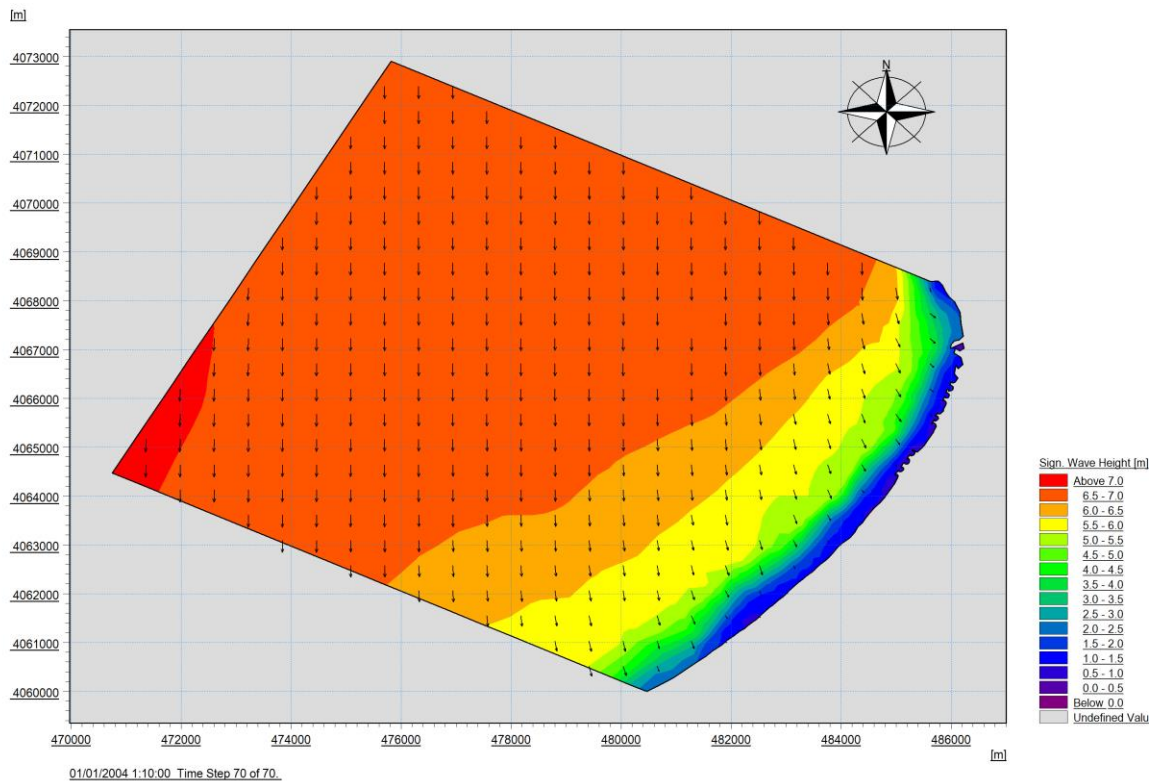


Figure III- 36 : Champ des houles dans la zone d'étude N 360°

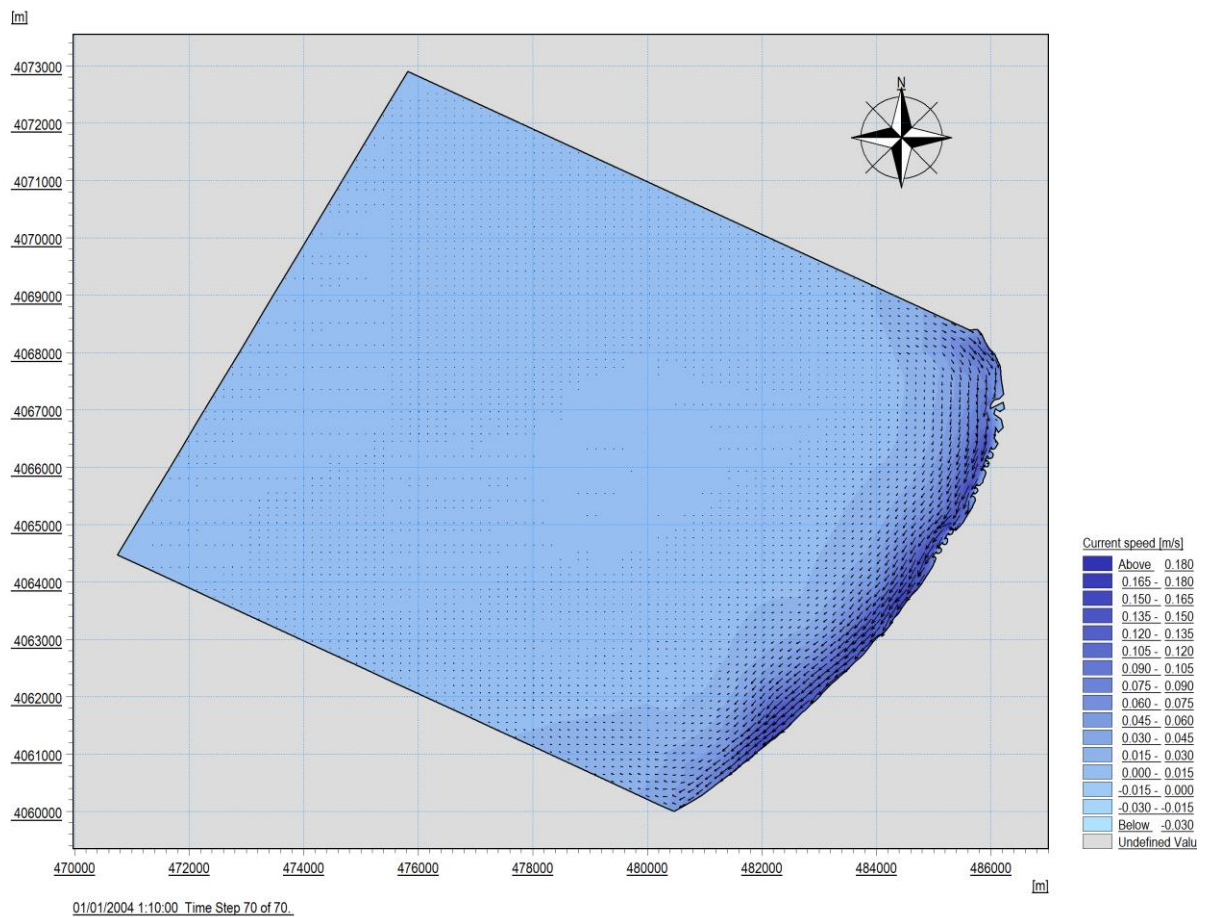


Figure III- 37 : Champ des courants dans la zone d'étude N 360°

NNW SW ET HD

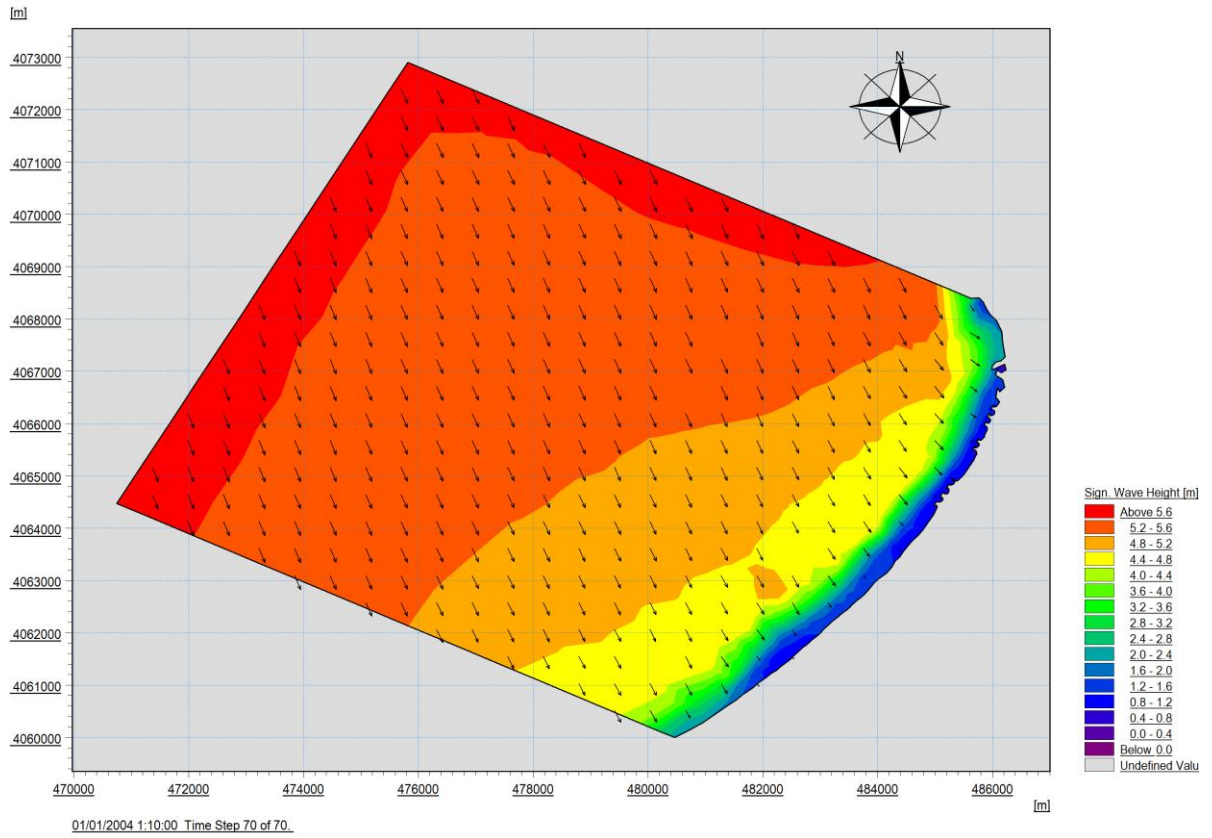


Figure III- 38 : Champ des houles dans la zone d'étude NNW 337°

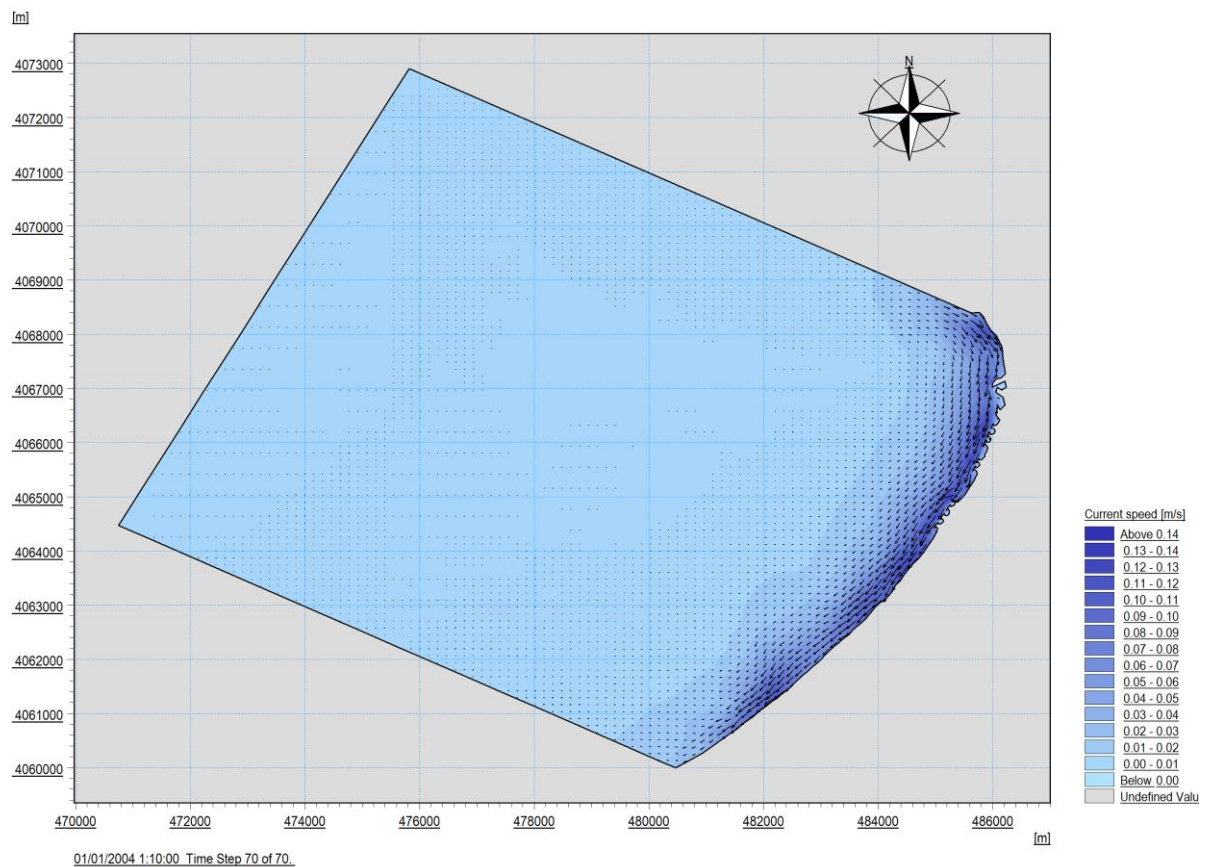


Figure III- 39 : Champ des courants dans la zone d'étude NNW 337°

NW SW ET HD

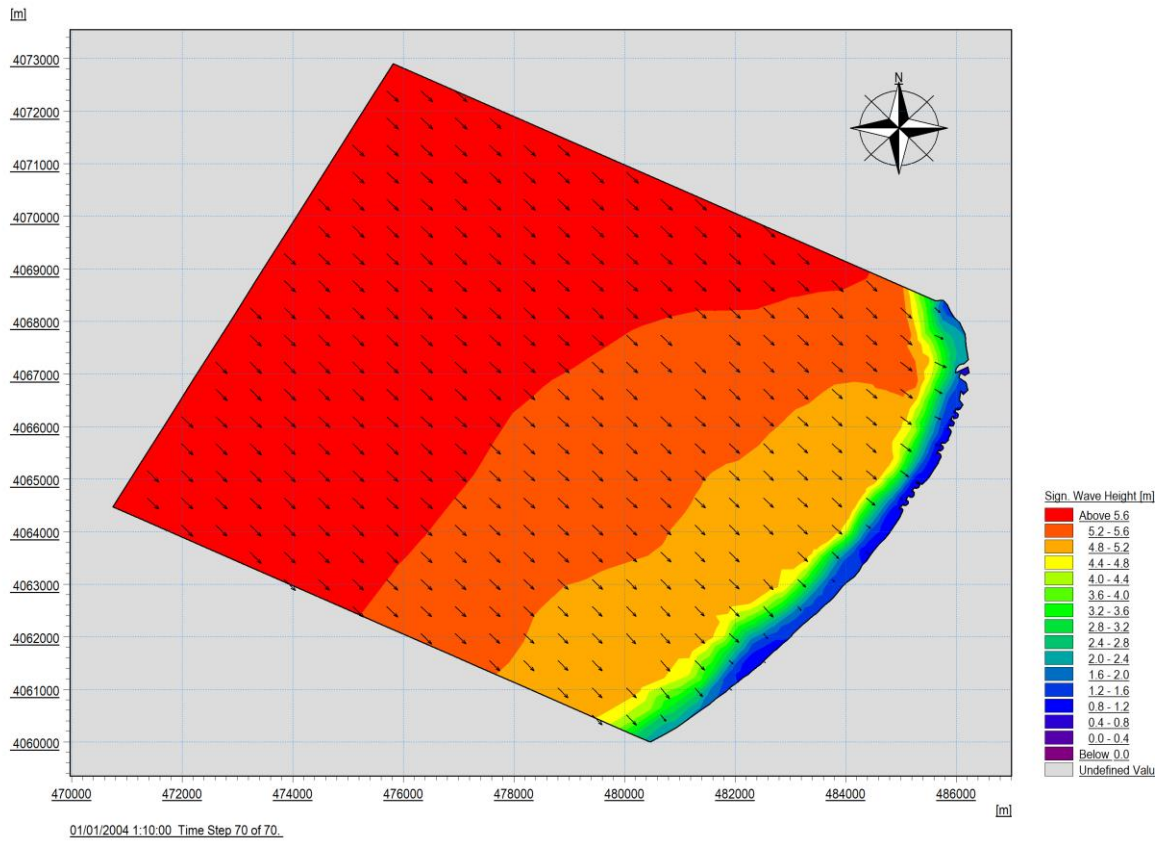


Figure III- 40 : Champ des houles dans la zone d'étude NW 315°

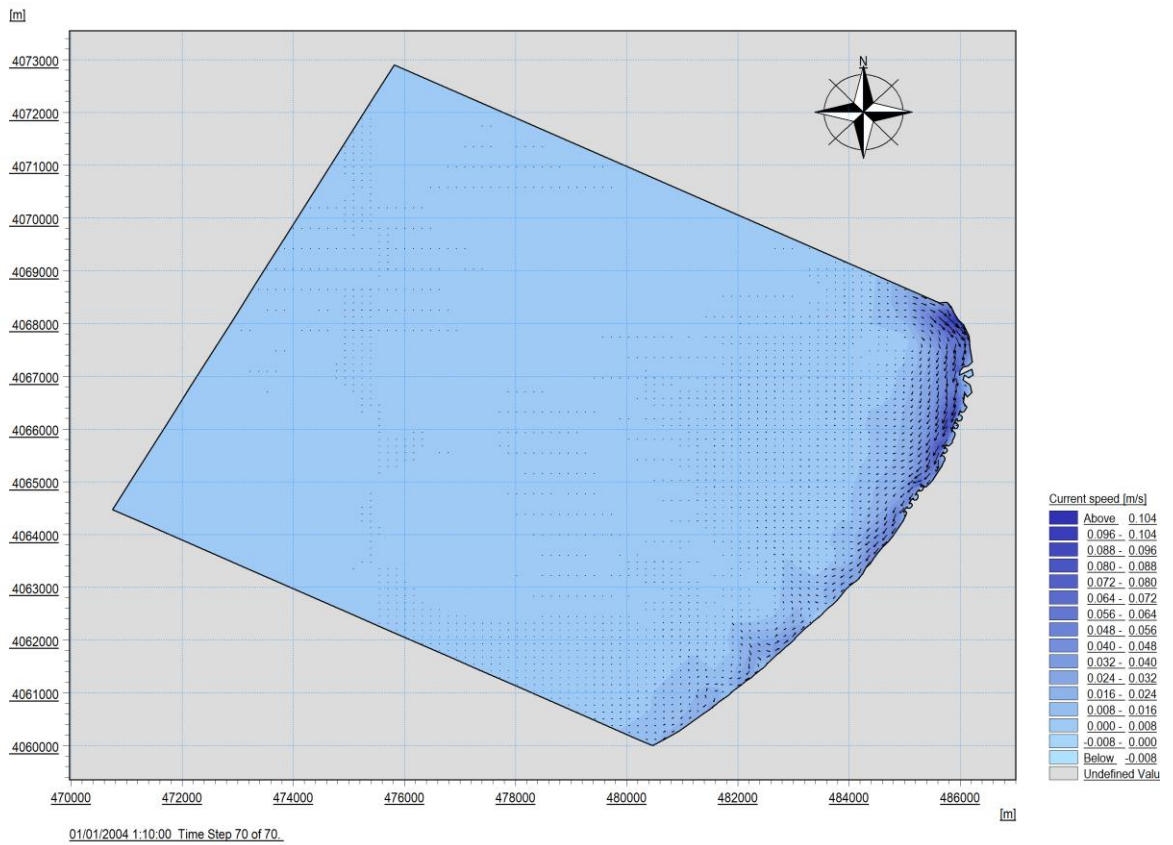


Figure III- 41 : Champ des courants dans la zone d'étude NW 315°

- **Interprétation des résultats pour la période de retour vingtennale :**

Direction N : d'après la carte les houles se propagent de 6.8m de hauteur en arrivant à la cote la hauteur se diminue jusqu'à atteindre les 1m.

Le courant de dérive se manifeste le long de la cote avec une vitesse modéré de 0.12 m/s.

Direction NNW : Les houles se propage le long de large de 5.6 à 5.2 m d'une direction oblique venant du nord-nord-ouest mais en arrivant à la zone de fetch la houle atteint les 4.8 mètres.

Au voisinage de la cote la hauteur de la houle n'est pas la même sur le long de notre zone d'étude ; au cap de Sidi Fredj sa hauteur est de 2 à 2.4m telle que la plage Mazafran ; mais de 0.4m au centre de la zone (de Palm-Beach jusqu'à la plage Kheloufi). Par rapport au courant de dérive sa vitesse est faible de 0.11 m/s

Direction NW : La propagation des houles de secteur Nord-Ouest est perpendiculaire de la cote atteignant les 5.2m au large et de 1.2m à la cote, ceci engendre un courant de dérive littoral très faible de 0.056 m/s à 0.008 m/s de l'Est vers l'Ouest respectivement

● PERIOD DE RETOUR CINQUANTENNALE

NORD SW ET HD

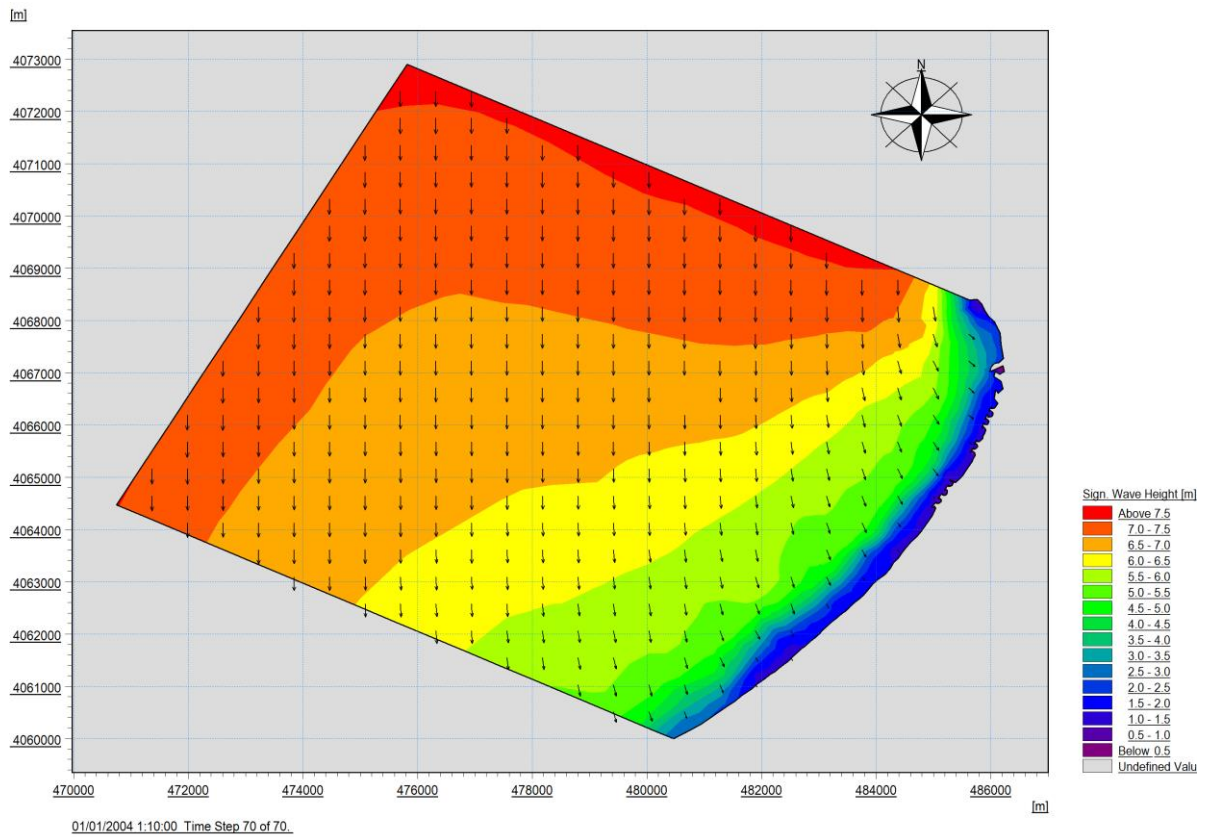


Figure III- 42 : Champ des houles dans la zone d'étude N 360°

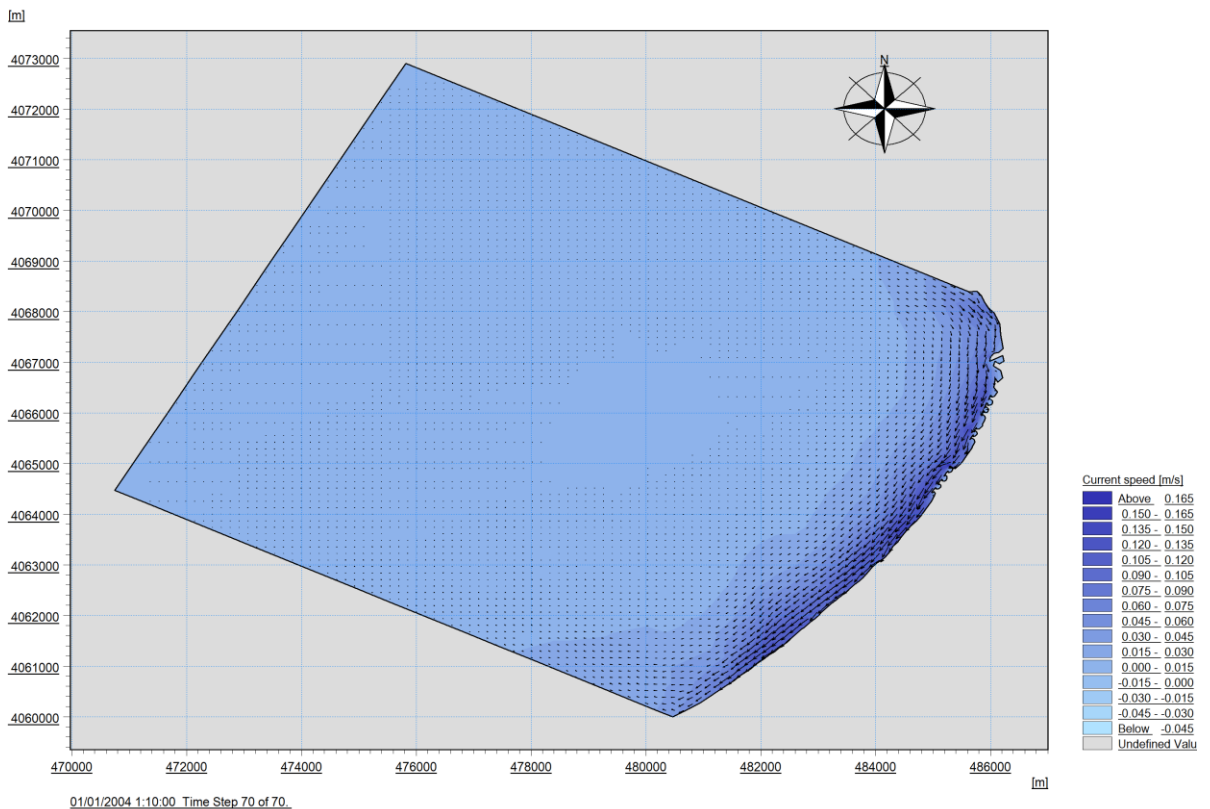


Figure III- 43 : Champs des courants dans la zone d'étude N 360°

NNW SW ET HD

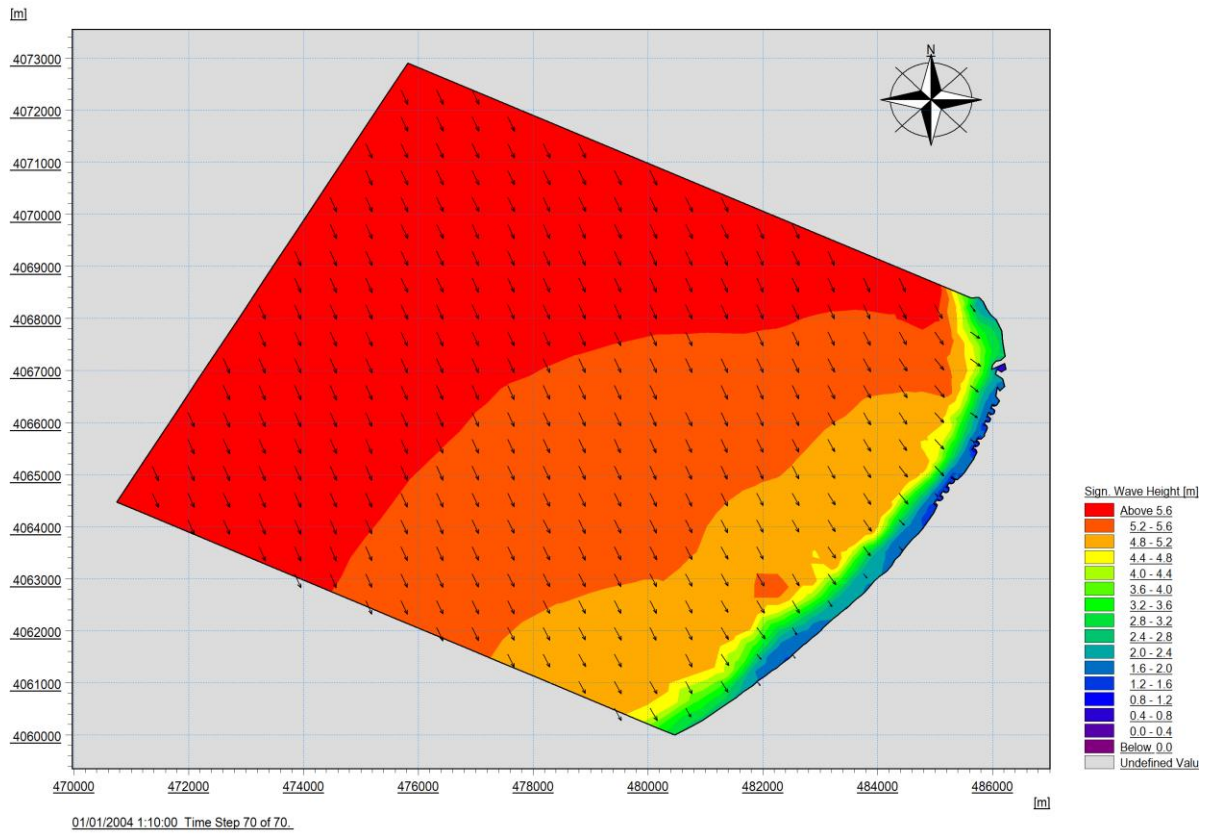


Figure III- 44 : Champs des houles dans la zone d'étude NNW 337°

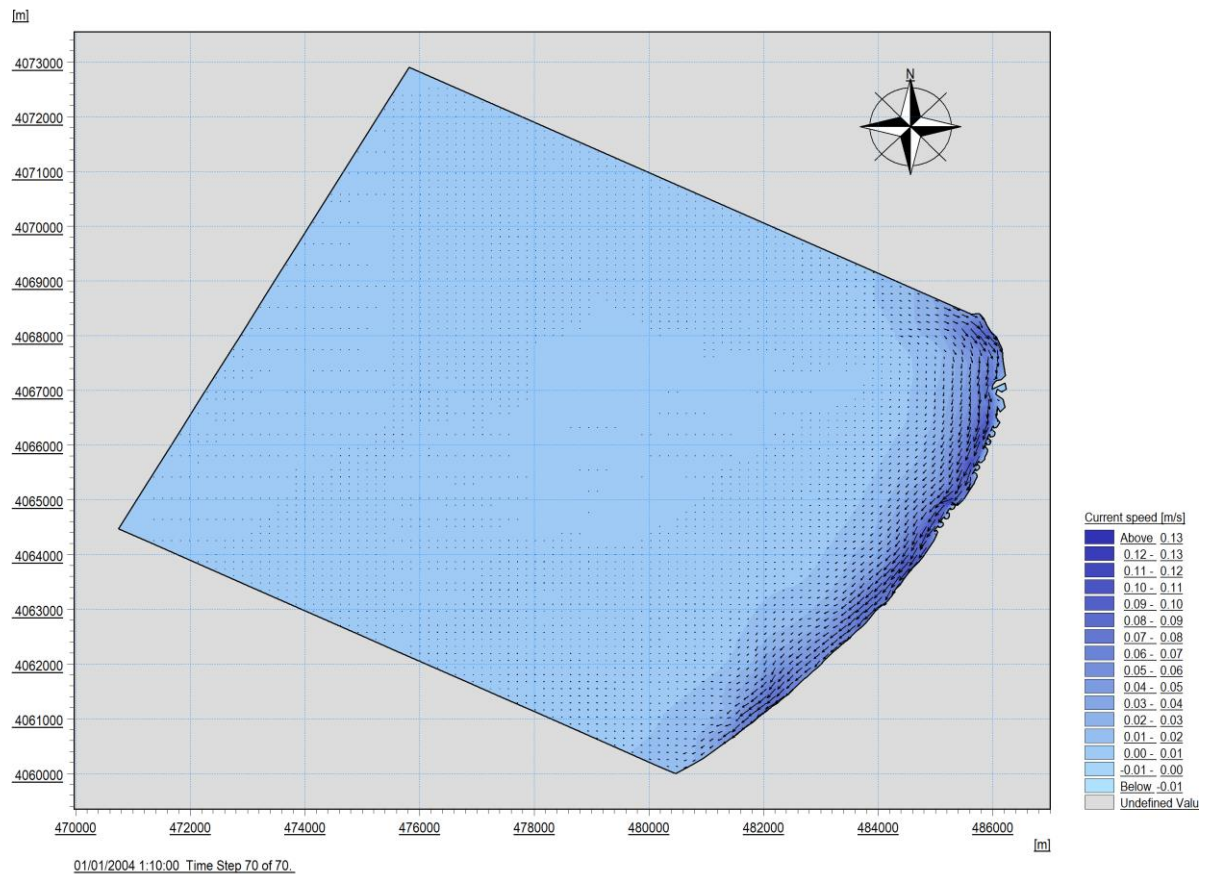


Figure III- 45 : Champ des courants dans la zone d'étude NNW 337°

NW SW ET HD

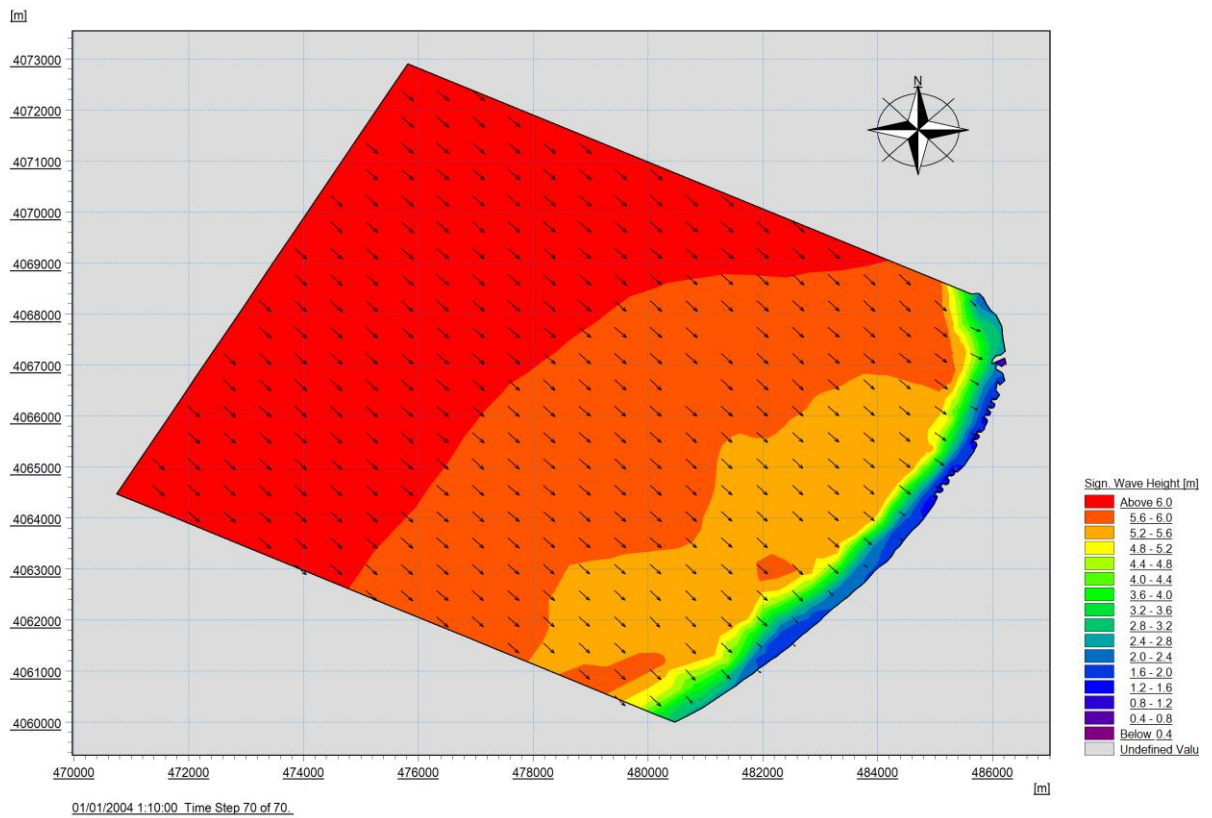


Figure III- 46 : Champ des houles dans la zone d'étude NW 315°

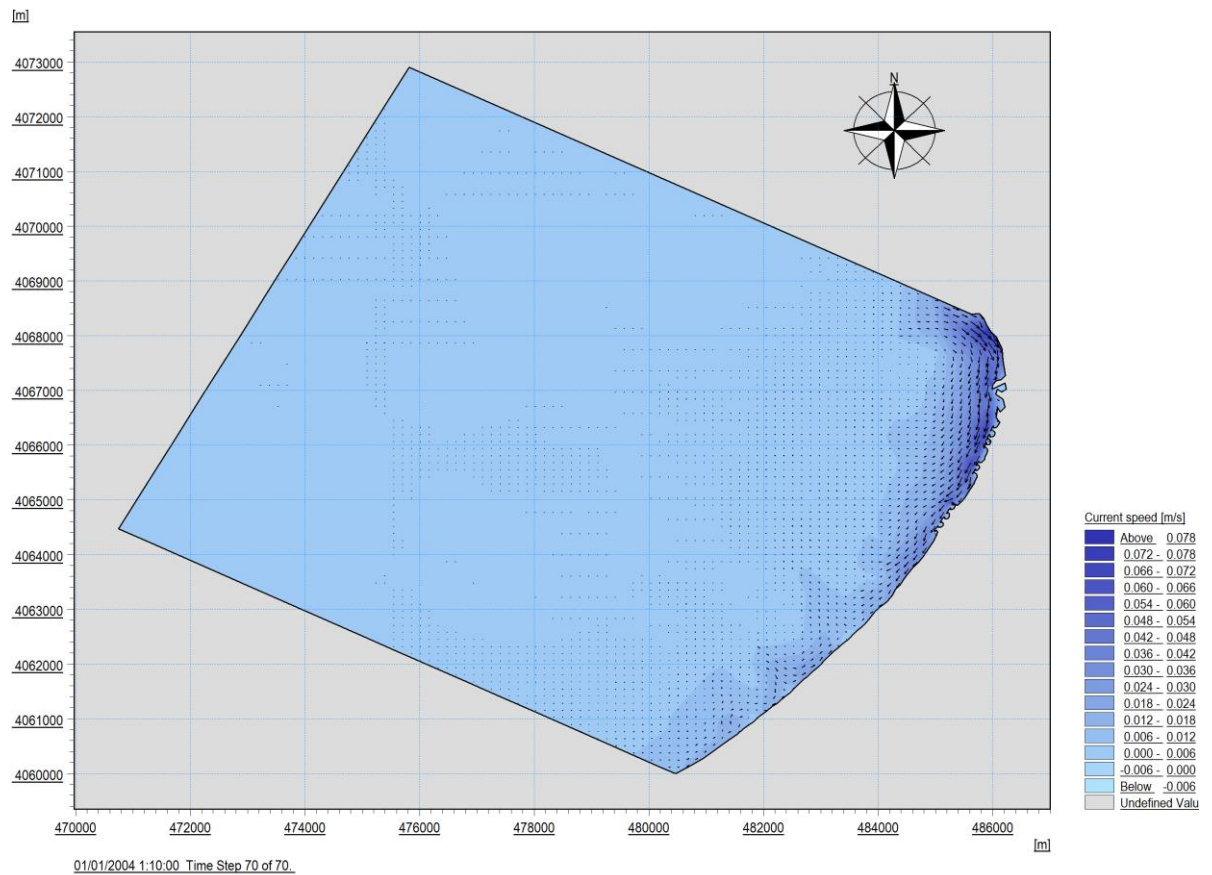


Figure III- 47 : Champ des courants dans la zone d'étude NW 315°

- **Interprétation des résultats pour la période de retour cinquantennale :**

Direction N :

Au large, la propagation des houles au large sont de la même hauteur Significative atteignant 7.5m, en s'approchant de la côte, elles commencent à se dissiper avec une hauteur significative de 1.5m, on remarque que l'angle d'incidence des houles pour cette direction est pour la création des courants parallèles à la côte que atteint la vitesse de 0.105m/s.

Direction NNW :

La hauteur significative H_s n'est pas la même au large elle varie de 5.6 à 5.2m, mais sur la cote la hauteur se balance entre 1.6 et 2m On remarque que dans cette direction l'angle d'incidence est plus important par rapport à celle du Nord, ce qui engendre des courants parallèles à la côte qu'atteint la vitesse de 0.13m/s.

Direction NW :

Cette direction montre une propagation de la houle de $H_s=6m$ au large, en arrivant vers la côte, la propagation montre que les vecteurs sont perpendiculaires à la cote, ce qui engendre une vitesse de courant de dérive fort de 0.06 m/s à l'Est et très faible au secteur Ouest à 0.006 m/s

• **PERIOD DE RETOUR CENTENNALE**

NORD SW ET HD

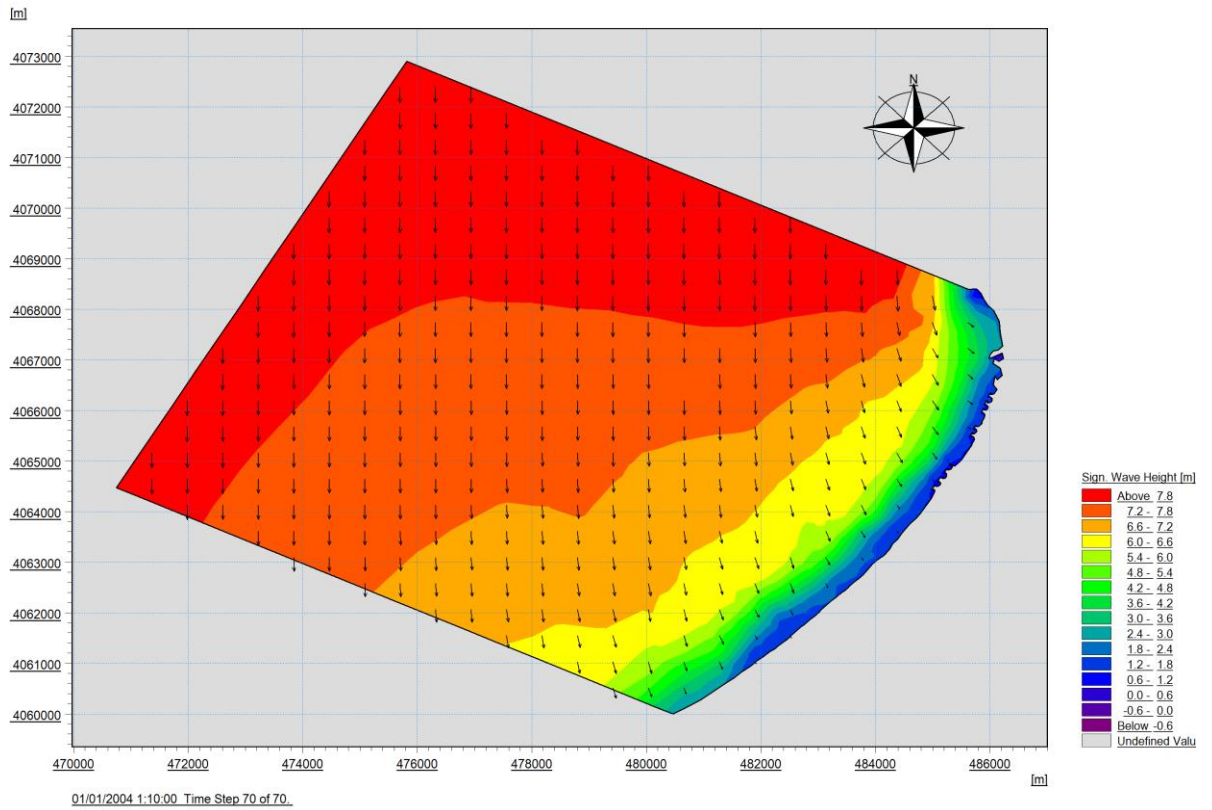


Figure III- 48 : Champ des houles dans la zone d'étude N 360°

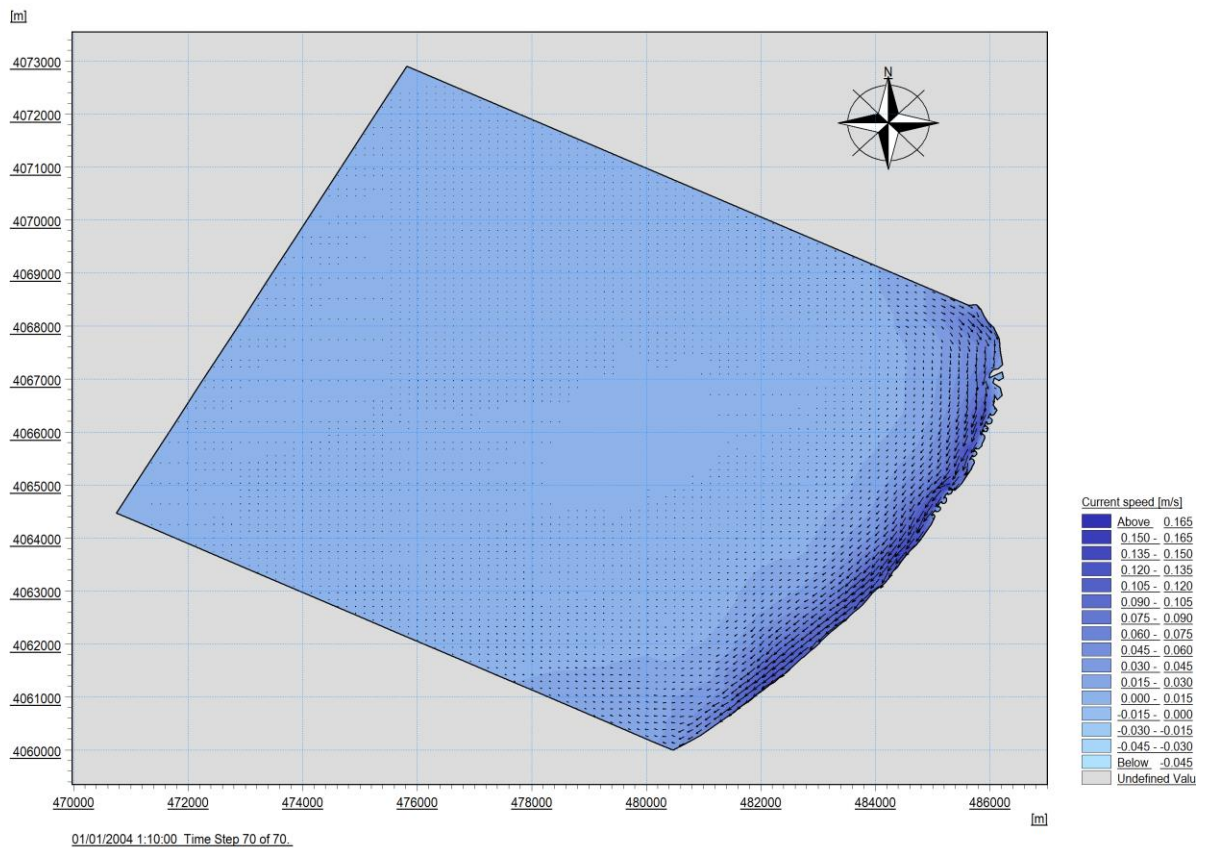


Figure III- 49 : Champ des courants dans la zone d'étude N 360°

NNW SW ET HD

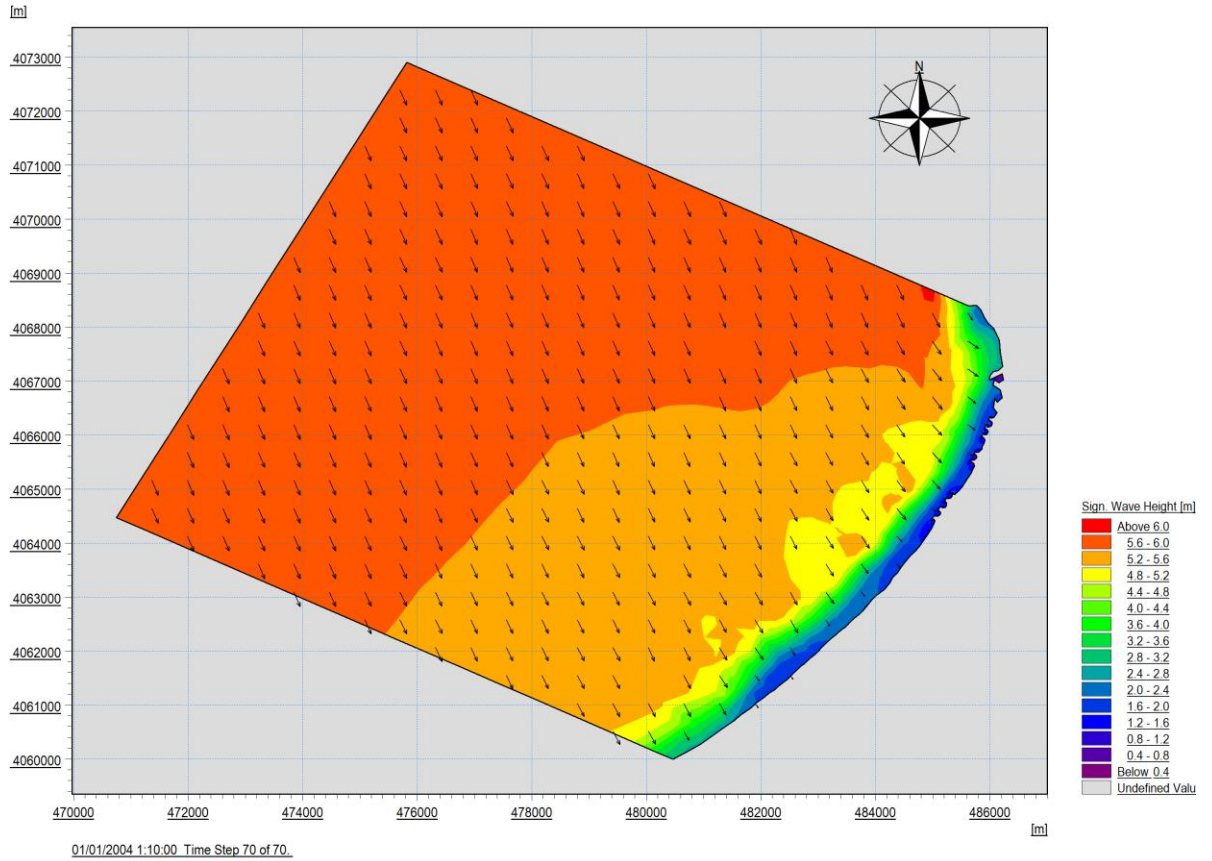


Figure III- 50 : Champ des houles dans la zone d'étude NNW 337°

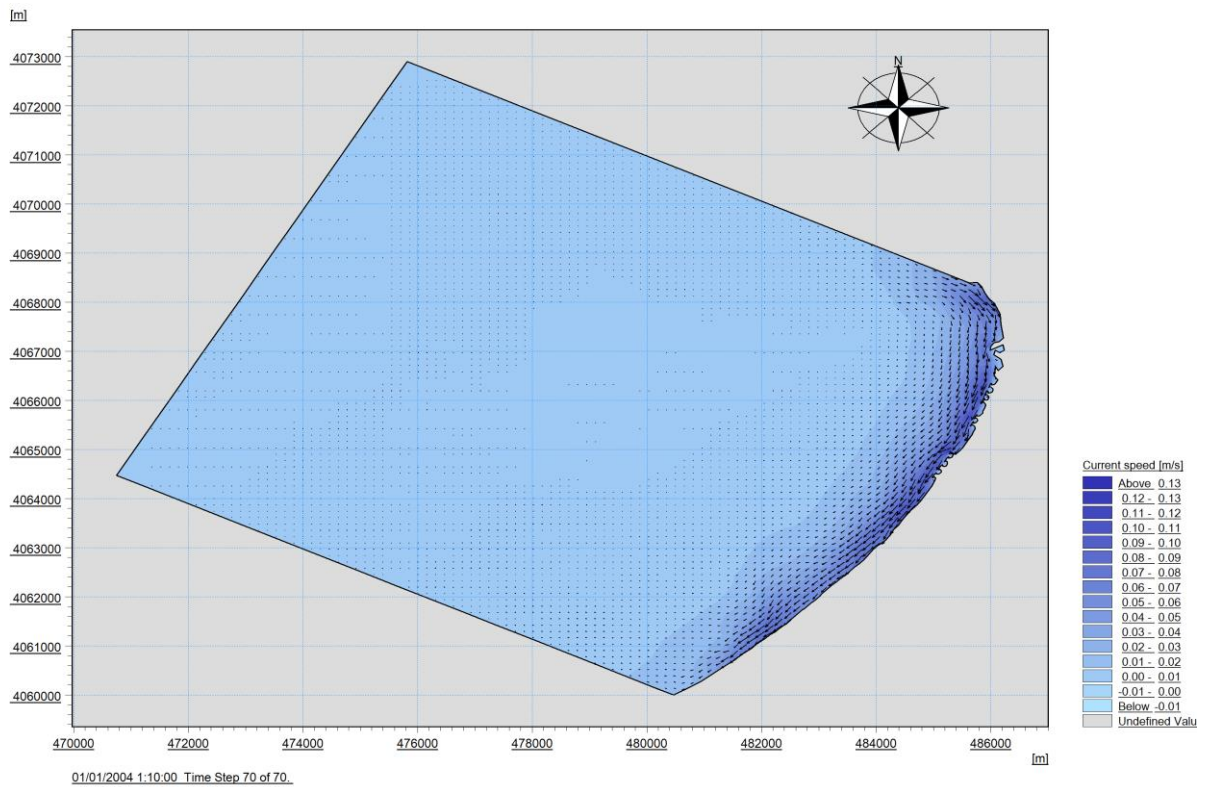


Figure III- 51 : Champ des courants dans la zone d'Eude NNW 337°

NW SW ET HD

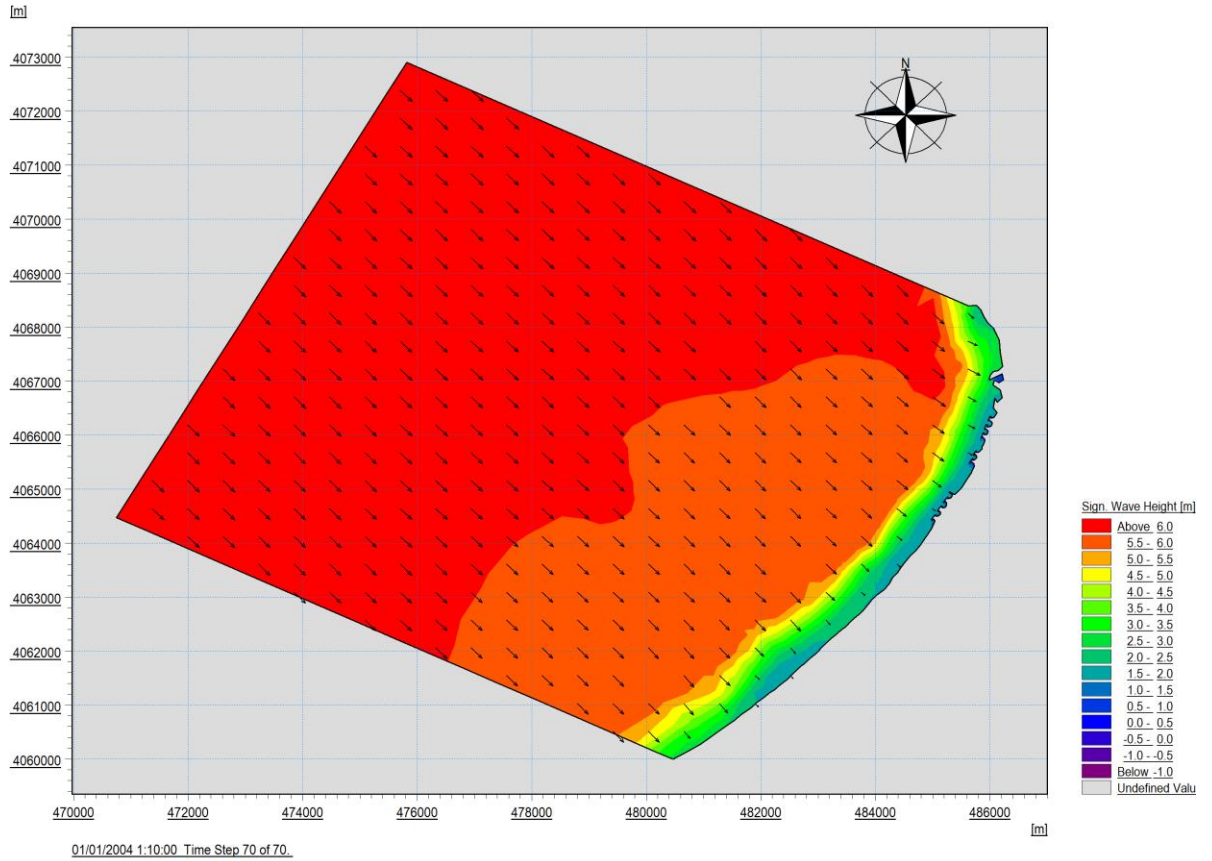


Figure III- 52 : Champ des houles dans la zone d'étude NW 337°

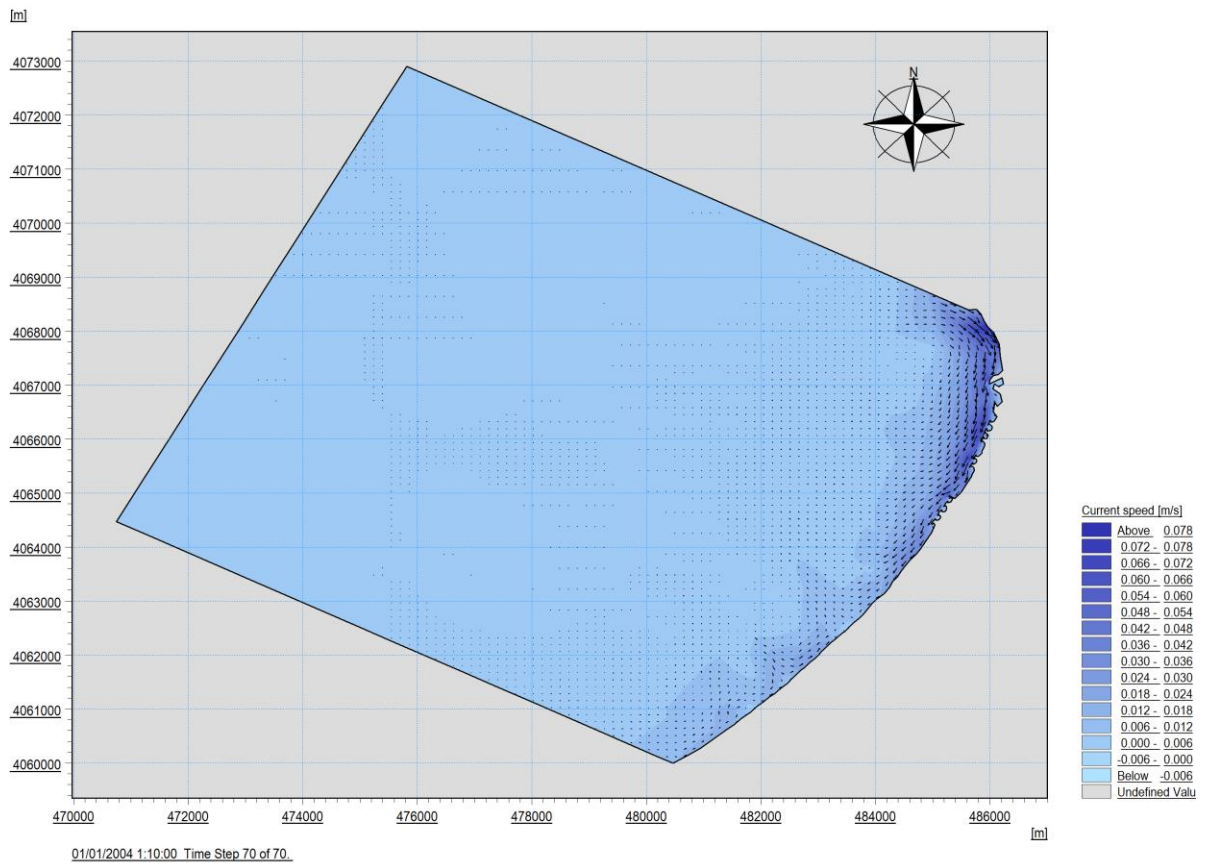


Figure III- 53 : Champ des courants dans la zone d'étude NW 337°

- **Interprétation des résultats pour la période de retour centennale :**

Direction N : on remarque une hauteur d'une houle modérée de 7.8 m au large pour et auprès de la côte atteint les 1.2 m. Tandis que la vitesse du courant de dérive varie entre 0.15 tout le long de la cote.

Direction NNW : Les houles se propagent le long de large de 5.6 m d'une direction oblique venant du nord-nord-ouest mais en arrivant à la cote la houle atteint les 1 mètre
La vitesse du courant de dérive est de 0.09 m/s le long de la cote

Direction NW : Cette direction montre une propagation de la houle de $H_s=6\text{m}$ au large, en arrivant vers la côte, la propagation montre que les vecteurs sont perpendiculaires à la cote de 1.5 m, ce qui engendre une vitesse de courant de dérive forte de 0.072 m/s à l'Est et très faible au secteur Ouest à 0.006 m/s

III.4. L'aléa de la submersion marine dans la baie de Bou-Ismaïl

III.4.1. Introduction :

Les espaces littoraux sont des zones d'interface entre la mer et la terre. Ces espaces étant sujets aux assauts de la mer, ils appartiennent même aux "espaces de l'eau" selon (Tricot, 2012). L'homme n'a pas toujours été attiré par ces espaces relativement vierges proches de la mer. En effet, le littoral a longtemps été considéré comme un espace laid et/ou dangereux où seules les populations dont le travail était lié à la mer y vivaient.

La connaissance des phénomènes météorologiques marins extrêmes est fondamentale pour la prévention des risques de submersion marine en zone côtière ou la conception des aménagements côtiers, portuaires ou des plateformes offshore, avec des périodes de probabilité intéressante qui généralement de 10 à 100 ans.

La conception ou la vérification d'une protection côtière appropriée nécessite une connaissance précise du potentiel des conditions océano-météorologiques extrêmes pouvant provoquer des inondations marines (tel que le niveau de la mer et les vagues).

La notion de niveau de retour des aléas maritimes est fondamentale en ingénierie marine et côtière. Comme pour les états de mer, caractérisés par la hauteur de vague dite significative, le niveau de retour 100 ans correspond à la hauteur de vague dépassée en moyenne une fois tous les 100 ans. En d'autres termes, c'est la hauteur de vague qui a une probabilité 10^{-2} d'être dépassée chaque année.

Les submersions marines sont le résultat de fortes tempêtes et peuvent également être affectées par le marnage de la mer ou l'océan (Hénaffand Philippe, 2014). L'ampleur du phénomène étant accentuée si les deux éléments conjuguent de fortes intensités. L'objectif de cette étape est de créer une carte des aléas sous-marins, en tenant compte de la configuration actuelle de période de retour décennales et centennales et à l'horizon 2100 pour l'événement de période de retour centennales.

III.4.2. La submersion marine

Le phénomène de la submersion marine, tel qu'il s'est manifesté depuis plus de 20 ans sur le littoral à l'occasion de fortes tempêtes, est indissociable du recul du trait de côte qui conduit à réduire la plage et détruire les dunes, barrières naturelles aux houles de tempêtes et surcote.

D'après Nielsen (2009) et Shallenger (2000), les tempêtes peuvent causer deux types de phénomènes sur les espaces côtiers du globe. Dans un premier temps, les tempêtes entraînent une

élévation du niveau moyen de l'eau car elles combinent les effets d'une faible pression atmosphérique et ceux de forts vents. Ensuite, les effets d'une forte houle s'ajoutent au phénomène : les vagues cassant sur les côtes, plus particulièrement sur les plages plates, vont s'étendre sur plusieurs mètres et générer des effets appelés "wave set up" et "swash" (Anselme et al., 2011), ce qui a pour conséquence d'amplifier le phénomène et surtout d'augmenter la taille de la zone atteinte.

Le "wave set up" correspond à l'élévation du niveau moyen de la mer par les hauteurs atteintes par les vagues, tandis que le "swash" est défini comme l'eau s'étendant sur la plage à la suite de l'arrivée d'une vague.

Le "swash" est capable de déplacer les sédiments dans le sens parallèle à l'arrivée des vagues (Whittow, 2005) et fait partie des facteurs accentuant l'érosion. La force et la zone d'impact élargie de ces vagues augmentent la vulnérabilité à l'érosion de la zone concernée (Davidson-Arnott, 2001).

De plus, le "swash" et le "wave set up" participent pour au moins deux-tiers à la hauteur totale des niveaux d'eau. La submersion marine est ainsi définie comme un aléa naturel se produisant sur les régions côtières du monde entier, mais n'étant dangereuse que si ces régions côtières sont anthropisées.

Elle commence lorsque les plus hauts jets d'eau de mer de la bordure maritime dépassent la crête des accumulations littorales provoquant un transfert d'eau et parfois des sédiments sur le versant terre du cordon littoral.

Selon le guide méthodologique des **PPRL (2014)** Fig (III.54):

- Submersion par rupture d'un cordon dunaire ou d'un ouvrage de protection lorsque les terrains situés en arrière sont en dessous du niveau marin (brèche, érosion intensive, surverse). L'attaque de la mer durant une tempête peut rompre un cordon naturel ou un ouvrage de protection. L'eau peut alors s'engouffrer dans la brèche et envahir très rapidement la zone basse située en arrière, un phénomène de débordement peut également entraîner la destruction complète d'un cordon ou d'un ouvrage. Sur les cordons, ce phénomène a été nommé « barrierovertopping ».
- Submersion par débordement, lorsque le niveau marin est supérieur à la crête du cordon dunaire ou des ouvrages. Souvent, ce type de submersion a lieu dans des zones abritées comme les estuaires ou les ports. Dans ces zones situées à l'abri de l'agitation marine, les côtes d'arase des ouvrages de protection et les altitudes des cordons sont souvent plus basses

que sur les littoraux exposés. Cependant, dans ces zones protégées les surcotes peuvent être plus importantes à cause des phénomènes de « concentration » de l'onde de tempête. En outre, les mouvements de seiches dans la plupart des ports peuvent engendrer des élévations du niveau d'eau d'amplitude métrique, en quelques minutes et ainsi contribuer de façon significative aux phénomènes de débordement.

- Submersion par franchissement de vagues « paquets de mer » : Ce mode de submersion, nommé waveovertopping en anglais, concerne toutes les inondations provoquées par le franchissement des vagues au-dessus de cordons naturels ou d'ouvrages de protection. Dans ce type de submersion, seule l'élévation du jet de rive est supérieure au sommet du cordon ou à la côte d'arase de l'ouvrage, et peut engendrer l'inondation de la zone basse située en arrière. L'énergie des vagues, le profil topographique de la plage et le cas échéant la forme de l'ouvrage, déterminent la hauteur du run-up, donc l'importance du franchissement. En outre, la direction et la force du vent influent sur le jet de rive et les projections d'eau, en favorisant leur franchissement lorsque le vent souffle de la mer vers la terre, et inversement (Cariolet,2011).

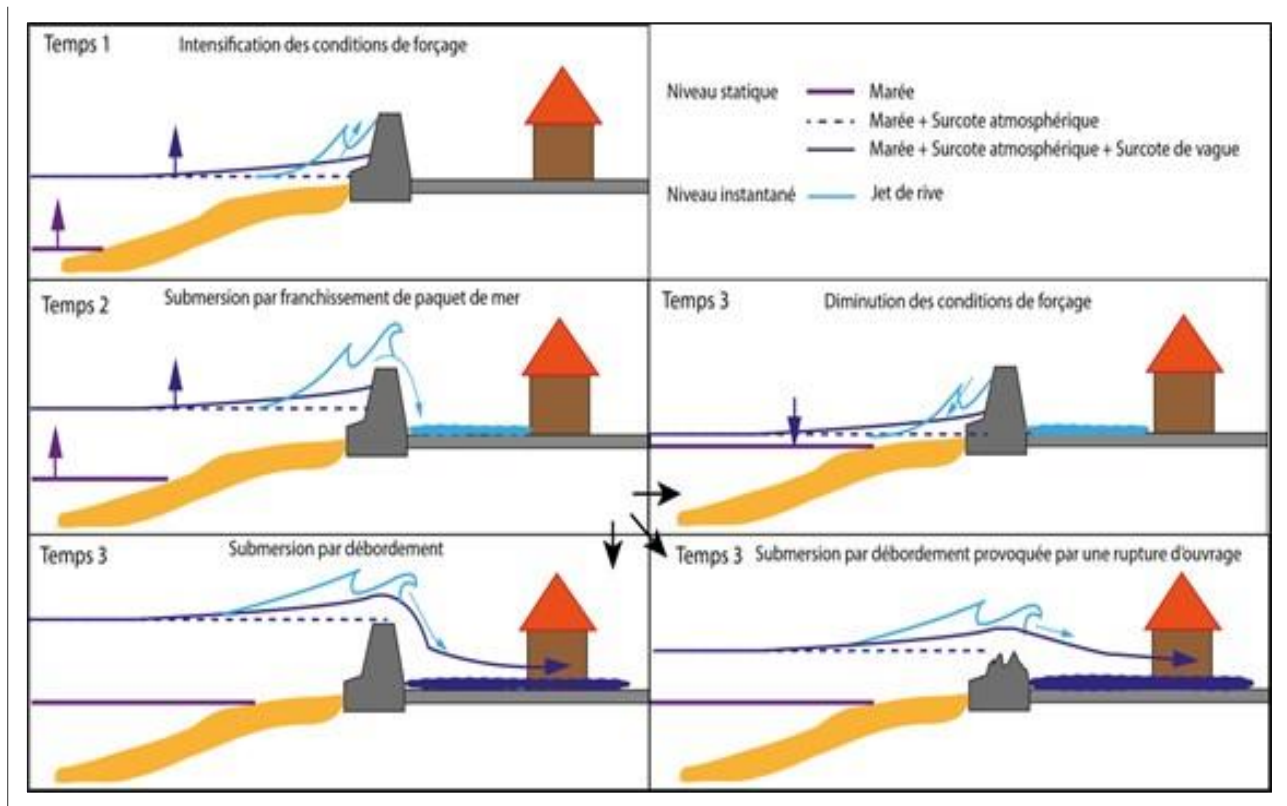


Figure III- 54 : Typologie des submersions marines (franchissement, débordement, rupture d'ouvrage). (BRGM and Cachan, 2012).

Ces trois phénomènes peuvent se produire ensemble ou indépendamment. Cependant, le phénomène de franchissement se traduit par une très faible quantité d'eau par rapport à la quantité produite par débordement ou rupture. Par conséquent, si une inondation se produit en raison d'un débordement ou d'une infraction, le franchissement n'est pas étudié. Par conséquent, Le calcul de l'aléa submersion marine est par conséquent mené pour chaque zone identifiée comme potentiellement submersible, en tenant compte les particularités du site considéré (type d'ouvrage, dunes, type de carrefour, scénario de rupture).

III.4.3. Principe de la cartographie des zones d'aléa submersion marine

La délimitation précise des zones soumises à l'aléa « submersion marine » est complexe. Elle dépend de nombreux paramètres et ne peut être déterminée que localement à partir de vastes études terrestres et maritimes et d'études de terrain.

Le zonage de l'aléa repose, au niveau du rivage, sur la prise en compte d'une zone d'impact direct de la houle et, en arrière, sur la définition d'une cote de référence. Pour un site donné, le calcul de la cote de référence prend en compte (1) le niveau de la pleine mer de vive eau (2) la surcote atmosphérique (3) le setup et (4) une valeur de l'élévation du niveau marin d'une dizaine de centimètres. Les niveaux d'aléa suivants (moyen et faible) sont définis en fonction des hauteurs de submersion uniquement, calculées en croisant la cote de référence d'une part, et l'altitude du sol d'autre part (par analogie avec ce qui est habituellement admis en matière de zonage de l'aléa inondation).

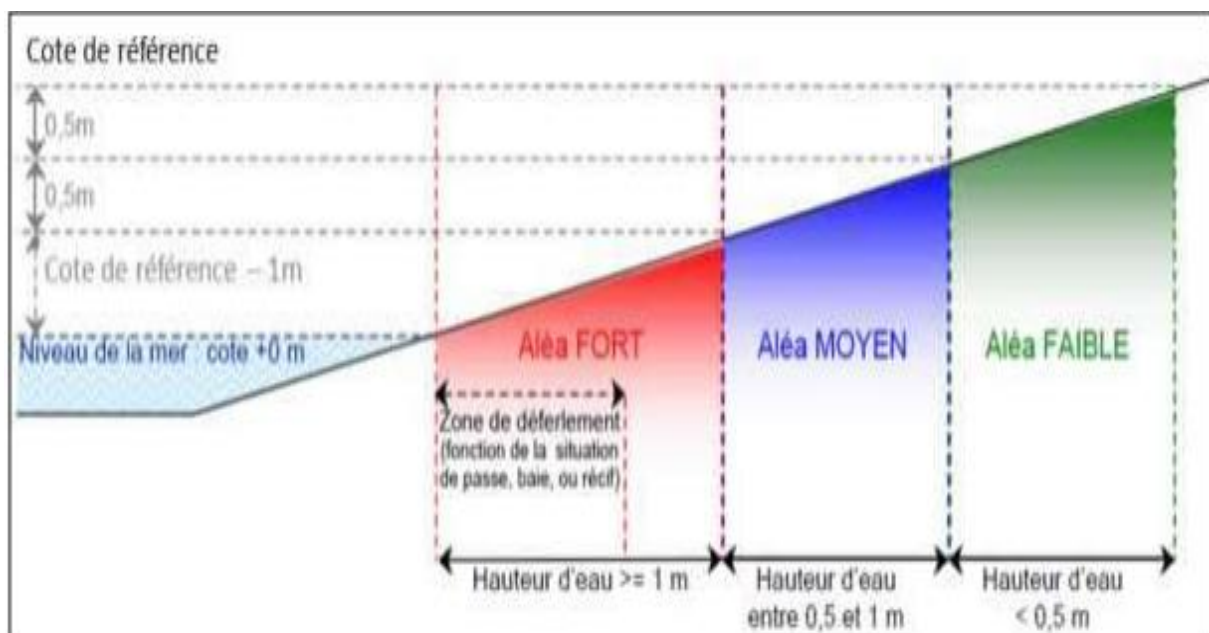


Figure III- 55 : Principe de la cartographie des zones d'aléa submersion marine.

III.4.4. Le phénomène responsable de ces submersions marines d'origine météorologique

Les processus physiques mis en jeu lors des phénomènes d'une origine météorologique

- **La surcote :**

Les surcotes sont générées par l'action de deux phénomènes météo-marins distincts : l'action d'une basse pression atmosphérique et l'action d'un vent d'afflux, c'est-à-dire qui souffle de la mer vers la terre. On peut dès lors considérer deux types de surcote, à savoir la surcote d'origine barométrique et la surcote d'origine anémométrique. Ces deux phénomènes peuvent se combiner, amplifiant alors la surcote totale.

Lors du passage d'une tempête sur l'océan, la baisse de la pression atmosphérique entraîne une réduction du poids de la colonne d'air sur l'eau, et donc une élévation du plan d'eau. Selon la règle du « baromètre inversé », une baisse de la pression atmosphérique de 1 hPa entraîne une élévation de la surface de l'eau de 1 cm (**Harris, 1963**). Les vents qui accompagnent une tempête agissent par friction sur la surface de la mer et génèrent une accumulation d'eau au niveau des littoraux exposés face à ces vents – alors qualifiés de vents d'afflux. Plus l'action du vent s'exerce sur une grande distance (*fetch*), plus l'élévation du niveau d'eau à la côte est importante (**Harris, 1963**). La direction du vent joue un rôle primordial dans ce processus d'élévation du niveau d'eau à la côte.

Lorsqu'une dépression se déplace au-dessus d'un océan, elle est donc accompagnée par une onde de pression et une onde générée par l'action du vent. La somme de ces deux ondes forme ce que l'on appelle une onde de tempête (**Hontarrède et Galli, 2001**).

- **Estimation des surcotes :**

Il existe deux moyens pour estimer une surcote. La méthode la plus sûre et la plus précise nécessite d'utiliser un marégraphe. Celui-ci mesure la marée observée qui intègre les effets météo-marins décrits précédemment. Afin d'obtenir la valeur de surcote, il suffit donc de soustraire la marée prédite (marée astronomique) à la valeur de marée observée. En l'absence de marégraphe, il est possible d'estimer la surcote en calculant séparément la part de la surcote barométrique et celle de la surcote anémométrique, à l'aide de formules empiriques. La surcote barométrique est estimée à partir de la règle du « baromètre inversé ». Chaque hectopascal inférieur à 1013 hPa entraîne une élévation du plan d'eau de 1 cm. La surcote générée par l'effet des vents d'afflux (*wind setup* en anglais) peut être estimée à partir de l'expression de **K.F. Bowden (1983)** :

$$d_{\zeta} = (\rho_a C_D W^2 / g \rho) d_x$$

Où :

ρ_{air} : densité de l'air (1,21 kg/m³)

W : vitesse du vent en m/s 10⁻³

C_D : fonction de la vitesse du vent

g : accélération de la pesanteur (9,81 m/s²)

ρ : densité de l'eau de mer (eau à 12° = 1026 kg/m³)

h : profondeur de fermeture du profil en m, calculé par l'expression $h = 2,28 H_e 68,5 (H_e^2/gT_e^2)$
où H_e et T_e sont la hauteur et la période associée des vagues excédant seulement 12h par année.

dx = fetch du centre de la dépression à la côte en m

Pour obtenir la valeur de surcote totale, il faut ensuite ajouter la surcote barométrique à la surcote anémométrique.

Au phénomène de surcote s'ajoute l'effet des vagues déferlantes dans l'élévation du plan d'eau à la côte.

Pour obtenir la valeur de surcote totale, il faut ensuite ajouter la surcote barométrique à la surcote anémométrique. Au phénomène de surcote s'ajoute l'effet des vagues déferlantes dans l'élévation du plan d'eau à la côte. La part de l'élévation du niveau d'eau à la côte induite par l'action des vagues s'exprime à travers le phénomène de runup, dont l'amplitude verticale est définie comme étant la différence entre le niveau maximum atteint par le jet de rive et le niveau moyen de la mer observé sans agitation (**Komar, 1998**) (Fig III.54). Le runup est la somme de deux phénomènes distincts : l'élévation liée à une accumulation d'eau entre la zone de déferlement et la plage, appelée wave setup, et une série d'élévations maximales atteintes par le jet de rive nommée swash runup (**Komar, 1998**).

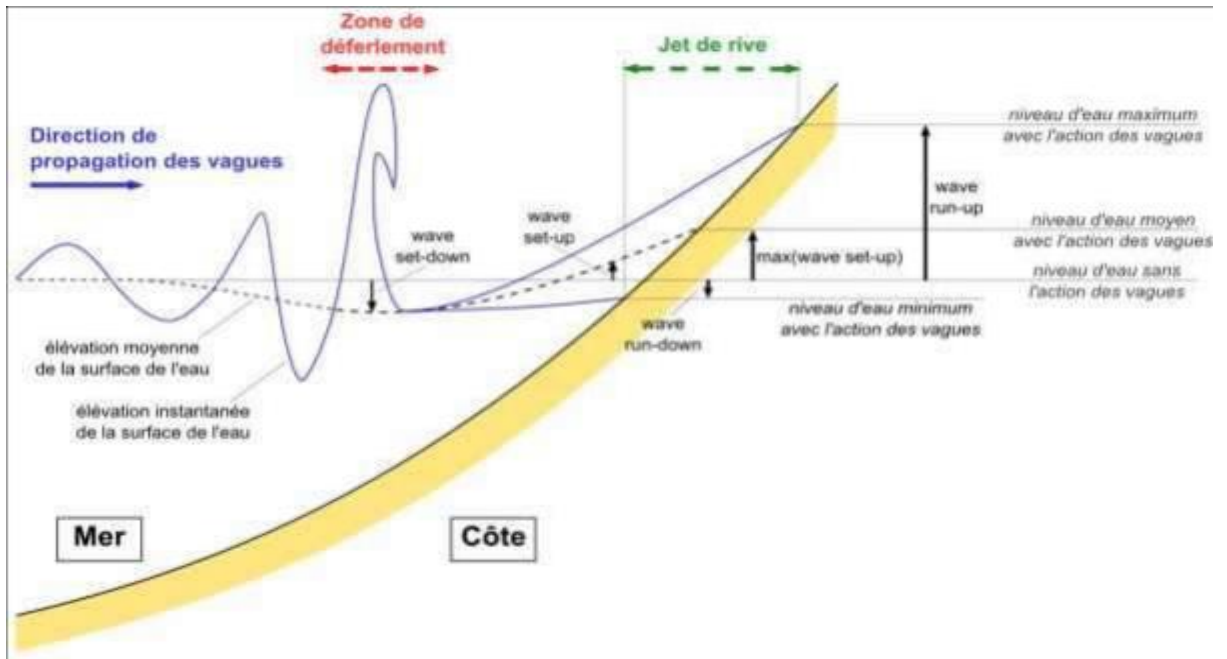


Figure III- 56 : Principe de formation du waveset-up.

- **Le Wave Setup :**

Des observations in situ ont montré que durant les tempêtes, le niveau d'eau à la côte dans les zones exposées aux vagues pouvait être un mètre plus haut que dans les zones protégées. Dans les années 60, plusieurs auteurs ont proposé une explication théorique du setup (**Doresstein, 1961 ; Longuet-Higgins et Stewart, 1962, 1963, 1964**). Selon ces auteurs, l'augmentation de l'énergie associée au déferlement des vagues dans la zone de surf sont compensés par une déformation du niveau d'eau moyen qui prend la forme d'une pente orientée vers la plage. Plus tard, des mesures in situ et en laboratoire ont permis de montrer que le setup (η) dépendait de la profondeur d'eau (h), de la hauteur de la houle et de la pente de la plage. En **1985, R.A. Holman et A.H. Sallenger** ont mis au point une formule de calcul du setup, repris par **P. D. Komar** en **1998**

$$\eta_{max} = 0.45 H_{m0} \xi_0 = 0.18 g^{1/2} \tan \beta H_{m0}^{1/2} T$$

$$\xi_0 = \tan \beta / (H_{m0}/L_0)^{1/2}$$

η_{max} : la valeur du setup maximum en m

H_{m0} : hauteur de la houle au large en m

$\tan \beta$: pente de la plage

g : accélération de la pesanteur (9,81 m/s²)

T : période (de la houle) en s

ξ_0 : nombre d'Iribarren

L₀ : longueur d'onde au large (1.56 T²)

- **Le Runup**

Représente la hauteur maximale atteinte par le jet de rive. De nombreux travaux réalisés en laboratoire et sur le terrain ont permis de mieux caractériser le phénomène du runup. Il apparaît que le runup est fonction de la pente de la plage ($\tan\beta$), de la hauteur et de la longueur d'onde de la houle au large (H_{m0} et L_0) (**Hunt, 1959**) et donc du nombre d'Iribarren ξ_0 .

Les différentes formules s'appliquent en fonction du contexte morpho-dynamique exprimé par le nombre d'Iribarren. Pour un nombre d'Iribarren inférieur à 0,3 :

$$R_{2\%} = 0.043(H_{m0}L_0)^{1/2}$$

Pour un nombre d'Iribarren compris entre 0,3 et 1,25 :

$$R_{2\%} = 1.1 * 0.35 \beta_f (H_{m0}L_0)^{1/2} + (H_{m0}L_0 * 0.563 \beta_f + 0.004^{1/2})/2$$

Où :

β_f = pente de la plage émergée sur laquelle s'effectue le jet de rive.

Enfin pour les plages où le nombre d'Iribarren est supérieur à 1,25 :

$$R_{2\%} = 0.73 \tan\beta (H_{m0}L_0)^{1/2}$$

Les niveaux d'eau extrêmes sont générés par la combinaison rare de conditions météorologiques particulières : basses pressions, vents d'afflux, agitation marine et marée de vive-eau. Les phénomènes de submersion du littoral interviennent généralement lorsque le niveau d'eau à la côte devient suffisamment haut pour franchir ou déborder un cordon littoral (**Benavente et al., 2006**).

Sur le littoral, la quantification des niveaux d'eaux extrêmes est donc primordiale, car elle permet de définir, par exemple, la côte d'arase d'ouvrages côtiers ou encore de déterminer les niveaux altitudinaux de référence des zones potentiellement inondables par la mer (**Garry et al., 1997 ; Benavente et al., 2006 ; Peeters et al., 2009**). Après avoir expliqué la genèse des niveaux d'eau extrêmes, nous allons nous intéresser dans le chapitre suivant aux différents modes de submersions marines et aux stratégies employées face à ce risque.

- **Niveau marin maximal statique et instantané**

Le niveau marin extrême atteint pendant les tempêtes va conditionner l'intensité de la submersion. En cohérence avec le modèle de **Sallenger (2000)**.

On distingue :

- Le niveau marin statique atteint pendant l'intégralité de la tempête :

$$N_{\max} = \text{setup} + \eta$$

Où :

Setup = remontée locale du niveau marin ;

η = surcote.

- Le niveau instantané maximal, atteint par le jet de rive sur la plage (run-up) :

$$N_{\max \text{ instantané}} = R_2 + \eta$$

Où :

R_2 % représente le run-up extrême (2% les plus hauts).

$R_{2\%}$, incluant le setup des vagues et le jet de rive extrême, définira l'élévation maximale atteinte par les lames d'eau extrêmes pendant quelques secondes, et non un niveau statique d'inondation. Ce choix de valeur extrême permet notamment de définir les secteurs qui pourraient être franchis lors de la tempête.

η représente la surcote pendant la tempête.

- **Evaluation des différents niveaux d'inondation**

Le niveau marin peut, schématiquement, se représenter comme la superposition de deux phénomènes principaux : la marée astronomique (déterministe), et la surcote météorologique (stochastique). Cette décomposition est valable pour le niveau marin au repos, c'est-à-dire en l'absence de vagues. Quand celles-ci sont présentes, des composantes statique et dynamique (wave setup, wave run-up) s'ajoutent au niveau marin.

L'approche empirique utilisée pour déterminer les niveaux d'inondation dans les régions côtière et d'estuaire est basée sur la formule de **Hoozmans et al. (1993)**.

$$D_{ft} : MHW + S_t + W_f + P_f$$

Avec :

MHW : Niveau moyen des hautes eaux ;

S_t : Elévation relative du niveau marin ;

W_f : Hauteur des houles de tempêtes responsables des inondations ;

P_f : Elévation du niveau marin sous l'effet d'une baisse de pression.

Les étapes méthodologiques proposées par **Hoozmans et al. (1993)** et appliquées par **Snoussi et al. (2008)**, ont été suivies, pour déterminer les niveaux d'inondation par la somme des facteurs impliqués dans l'élévation du niveau de la mer.

Par conséquent, les contributions des phénomènes induits par le niveau d'eau extrême ont été simulées : haute ligne d'eau maximale au cours des 20 dernières années ; montée du niveau de la mer due aux tempêtes : surcotes et haute vague ; montée du niveau de la mer projeté pour le prochain siècle qui peut être optimiste (+0.3 m pour 2100, approximativement 3 mm/an) ou critique (+0.5 m pour 2100, approximativement 5 mm/an).

D'après **Rohling et al., 2008** la montée du niveau de la mer pour le prochain siècle peut être jusqu'à approximativement deux fois la projection maximale trouvée.

La méthode utilisée ne tient pas compte de la subsidence et des mouvements tectoniques, alors que le littoral étudié appartient à une marge active. Malheureusement, nous ne disposons pas de données sur les taux de subsidence et sur la cinématique de la région. Les estimations restent donc limitées.

III.4.5. Résultats

Les cartes de submersion sont obtenues après la modélisation de ce phénomène sous ArcGis 10.5 pour plusieurs scénarios de l'élévation de niveau marin à savoir 2m, 3m, 4m et 5m.

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

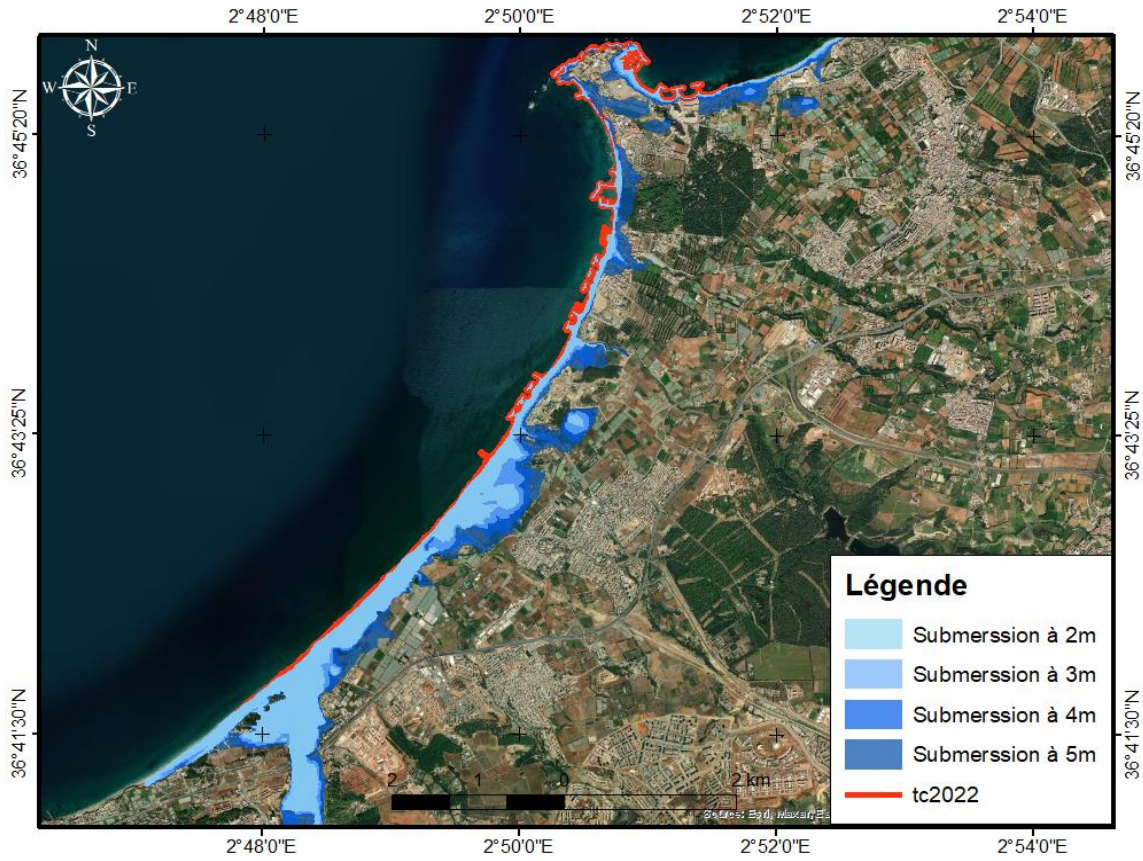


Figure III- 57 : Carte de l'aléa submersion sur la Baie de Bou-Ismaïl en cas d'élévation de niveau de la mer.

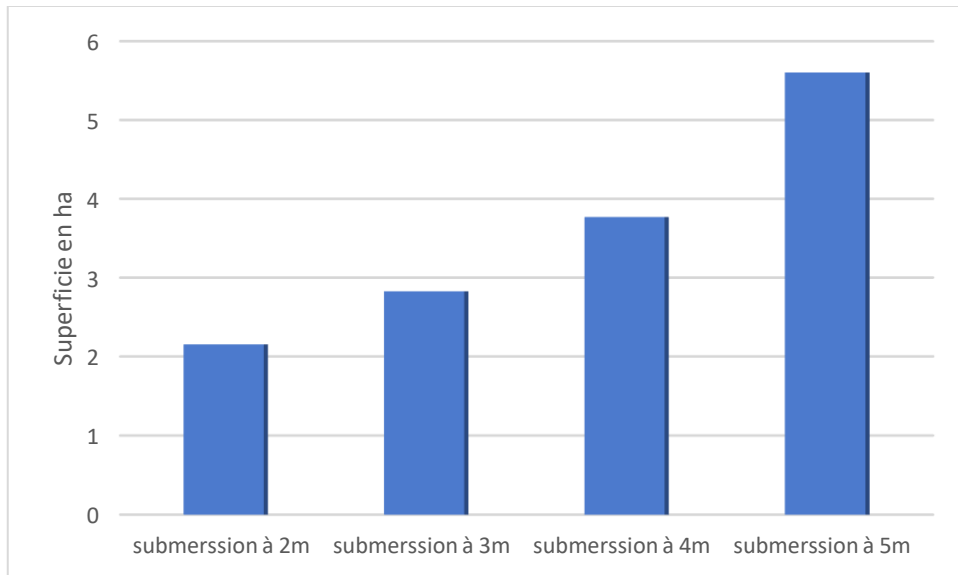


Figure III- 58 : Superficies des terres inondées par les différents niveaux d'élévation

• **Scénario d'une élévation de 2m :**

On remarque sur la Fig (III.59) que

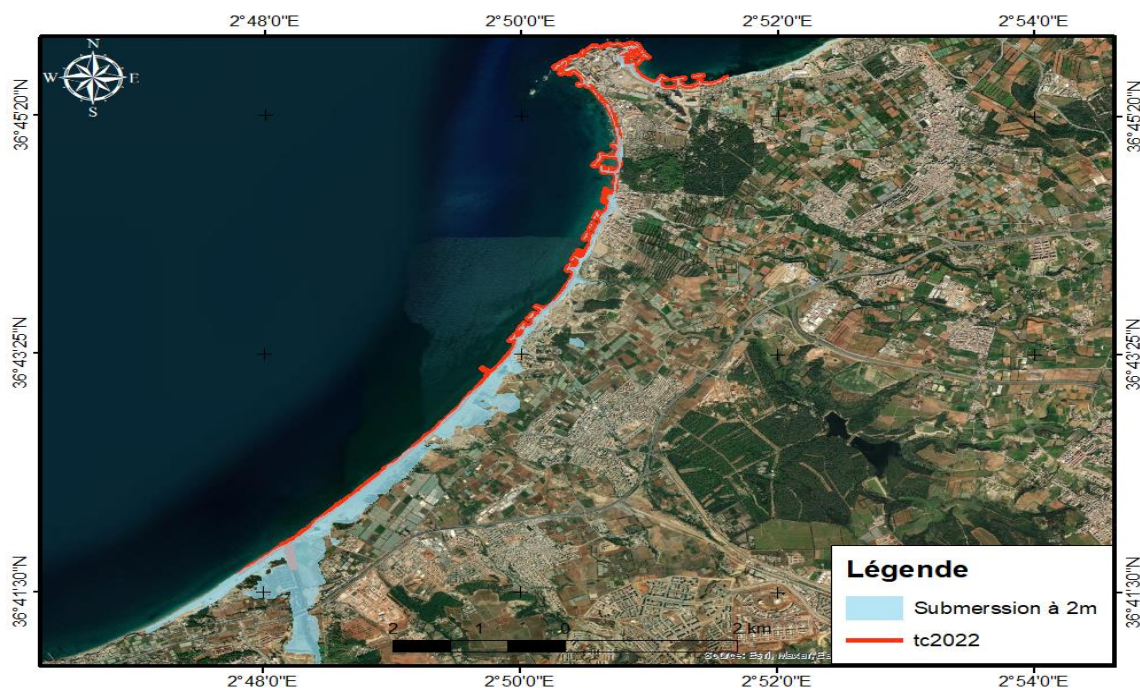


Figure III- 59 : L'aléa submersion sur la Baie de Bou-Ismaïl en cas d'élévation de 2m de niveau de la mer.

L'élévation du niveau marin de l'ordre de 2m affecte surtout la côte basse et les plages à faible pentes tel que plage Kheloufi, Zéraléda, Palm Beach...

On constate une intrusion des eaux marines vers la terre accentuée par le réseau hydrographique Oued Mazafran et la faible topographie de la zone où elles atteignent une surface importante.

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

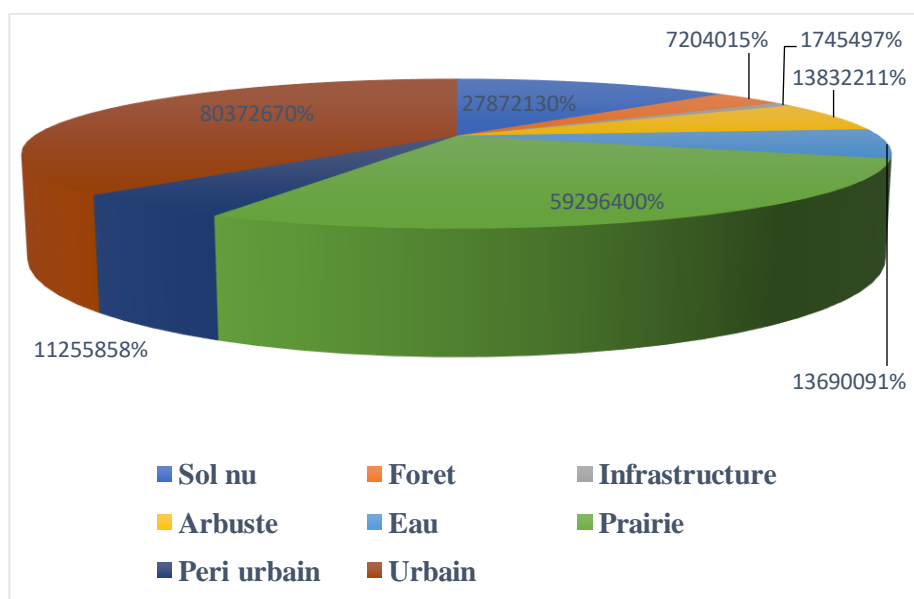


Figure III- 60 : Superficies des terres inondées par une élévation du niveau de la mer de 2m.

• Scénario d’une élévation de 3m :

Pour une élévation de 3m, on remarque que :

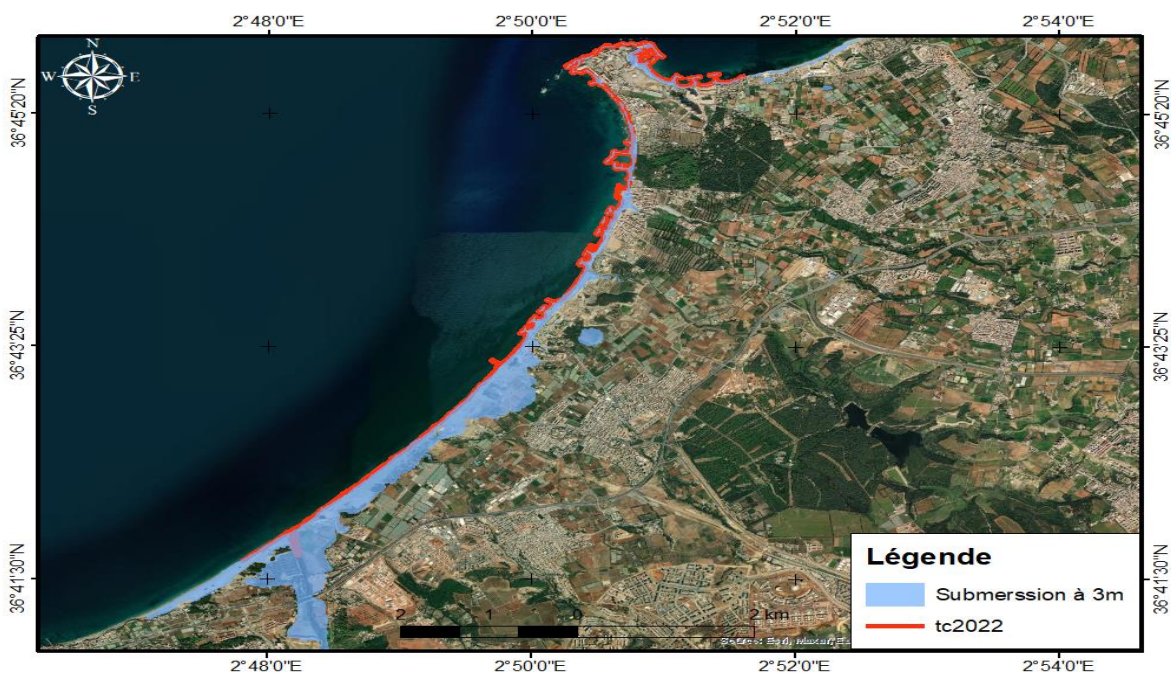


Figure III- 61 : L’aléa de la submersion sur la Baie de Bou-Ismaïl en cas d’élévation de 3m de niveau de la mer

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

D'après le graphe on remarque que les inondations occupent une surface totale 2,826 ha, tout en touchant les sols nus 321,098 ha, les infrastructures 24,051 ha, les arbustes 141,724 ha, l'eau 156,635 ha, les prairies 871,309 ha, les péris urbain 148,874 ha et les zones urbanisées 1068,256 ha.

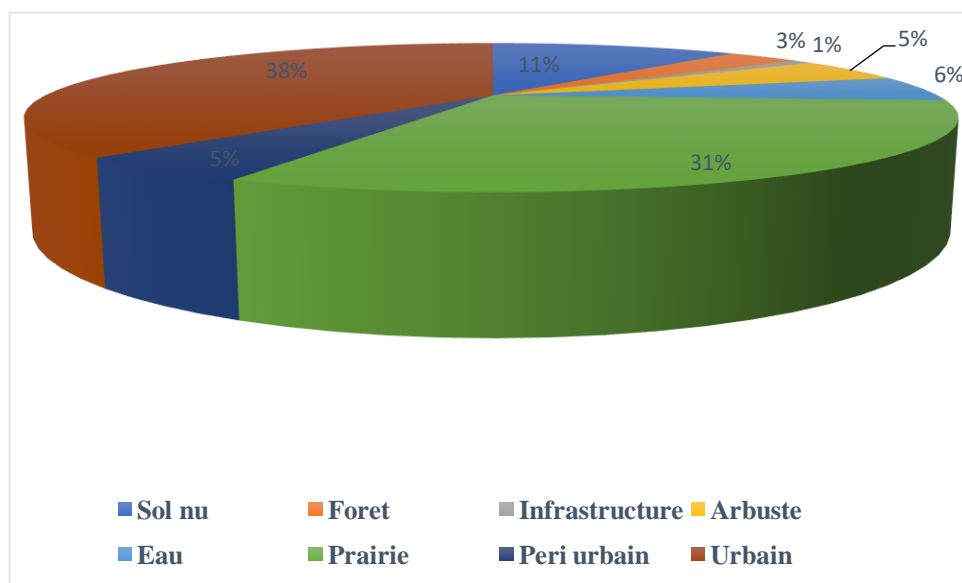


Figure III- 62 : Superficies des terres inondées par une élévation du niveau de la mer de 3m.

• **Scénario d'une élévation de 4m :**

Pour un cas extrême d'une élévation de 4m de niveau marin :

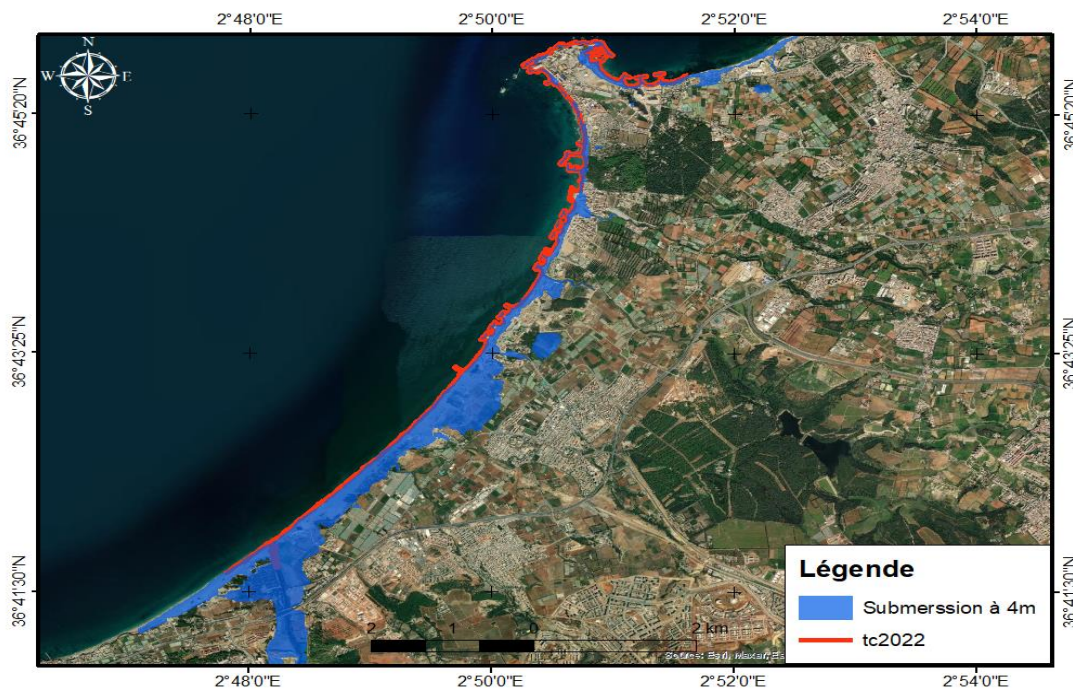


Figure III- 63 : L'aléa submersion sur la Baie de Bou-Ismaïl en cas d'élévation de 4m de niveau de la mer

Une intrusion spectaculaire de l'eau de mer sur le tissu urbain à des distances un peu loin de la côte (dizaine de Kilomètres) dans des directions très variée. Le graphe montre que 376,921 ha de la zone est perdue par les inondations.

Les sols nus et les terres urbanisées sont les composantes les plus touchées par les inondations marines.

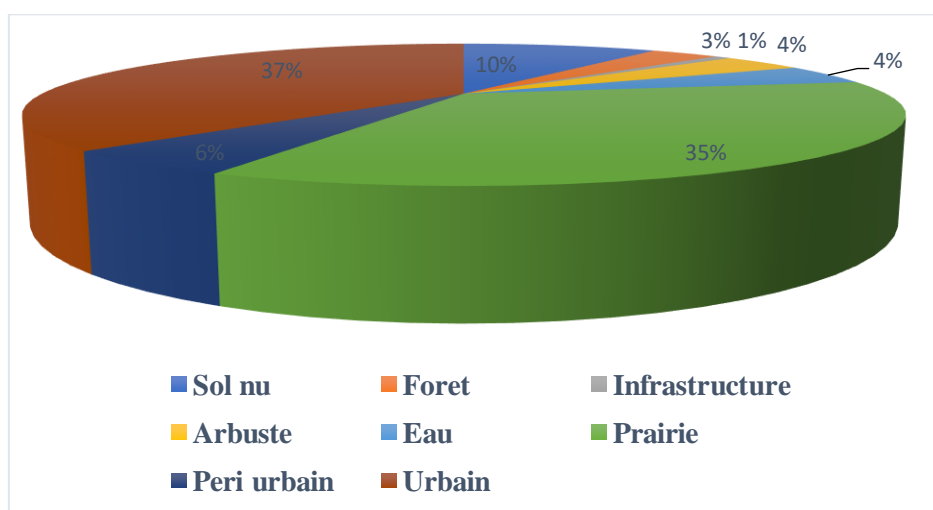


Figure III- 64 : Superficies des terres inondées par une élévation du niveau de la mer de 4m.

• Scénario d'une élévation de 5m :

D'après la carte, pour une élévation de 5 m montre :

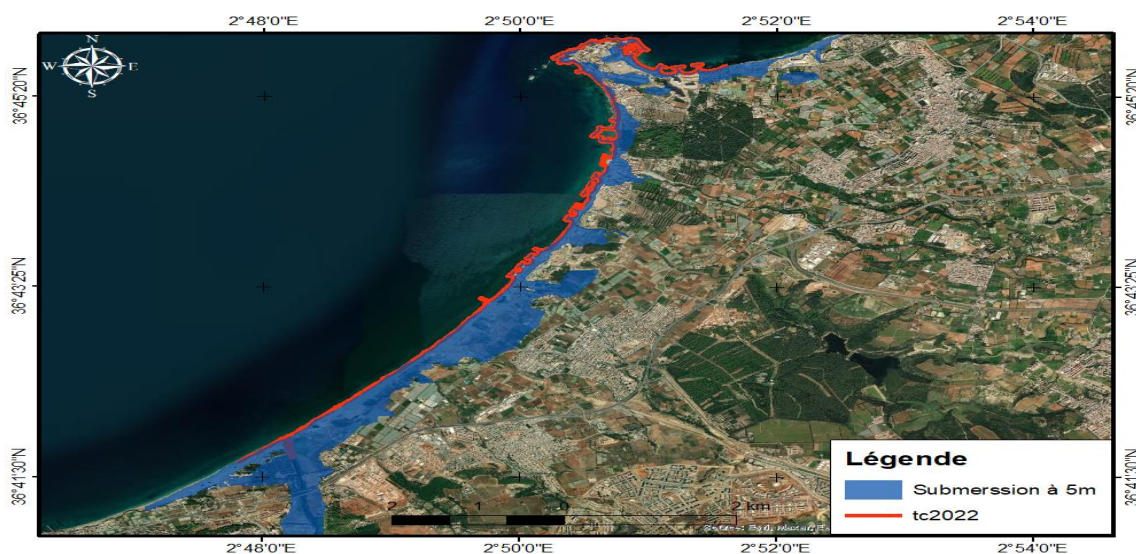


Figure III- 65 : L'aléa submersion sur la Baie de Bou-Ismaïl en cas d'élévation de 5m de niveau de la mer.

Un fort envahissement des eaux marines sur la terre au niveau des deux parties Ouest et centre de la baie en comparant avec les scénarios précédents.

L'aspect morphologique, topographique et hydrographique contribue efficacement à l'accentuation des écoulements des eaux marines vers l'arrière-pays atteignant plusieurs kilomètres vers l'arrière-pays tout en menaçant tous les types d'occupation.

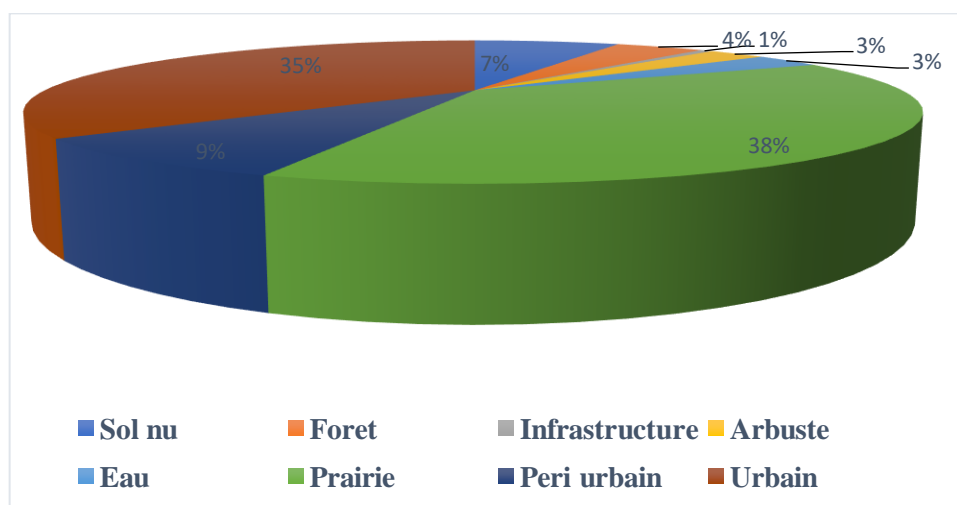


Figure III- 66 : Superficies des terres inondées par une élévation du niveau de la mer 5m

Conclusion

Ce mémoire avait pour objectif principale de fournir des informations fiables et facilement accessibles sur les tendances évolutives dans la Baie de Bou-Ismaïl, ainsi que des estimations des pertes de terres dues aux inondations marines à différents niveaux d'inondation, en tenant compte de toutes les composantes internes et externes, qui peuvent directement ou indirectement intervenir ou affecter ce système côtier.

L'utilisation du DSAS dans nous a permis de faire une étude diachronique de 18 ans pour essayer de prédire les phénomènes d'érosion et d'accumulation dans notre site d'étude, les résultats obtenus par les différent paramètres (EPR, NSM et LRR) montrent une présence une accrétion avec une vitesse moyenne de recul vitesse 2,82 m/s

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 et la propagation des vagues, en se basant sur trois directions principales de la houle, dont celle de l'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.

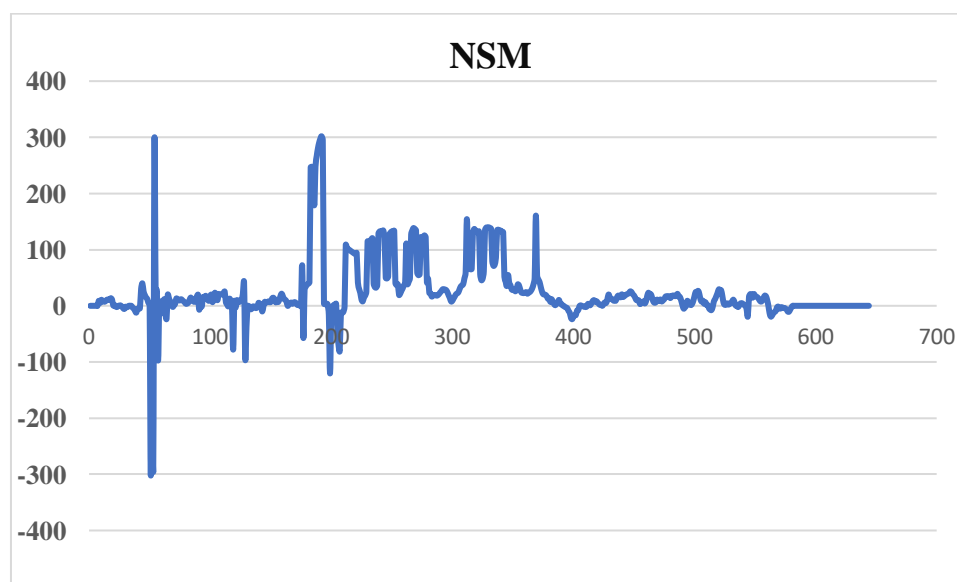
En fin, on a effectuée une modélisation de phénomène de submersion marine sur la baie de Bou-Ismaïl en prenant en considération les scénarios de l'élévation de niveau marin à savoir 2m, 3m, 4m et 5m pour y ressortir vers la fin par des cartes d'aléas exposants les envahissements des eaux marines sur les terres à des distances différentes en occupants des surfaces distingués proportionnelles avec les hauteurs.

Ce travail nous a permis d'approfondir nos connaissances avec les techniques de modélisation.

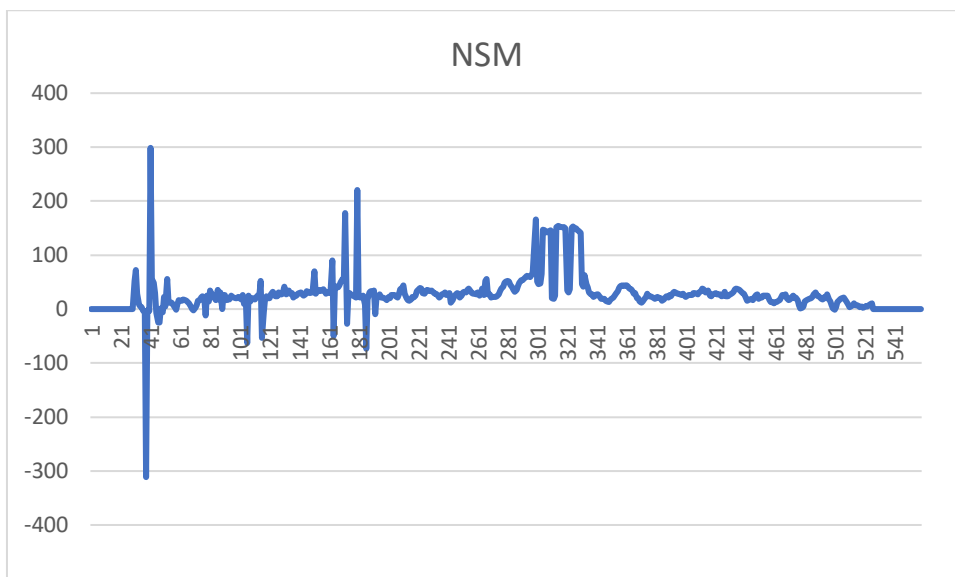
Annexes

Annexe-Tableau 1 : Classification des valeurs changement du trait de côte à partir du paramètre EPR (Nassar K et al., 2018).

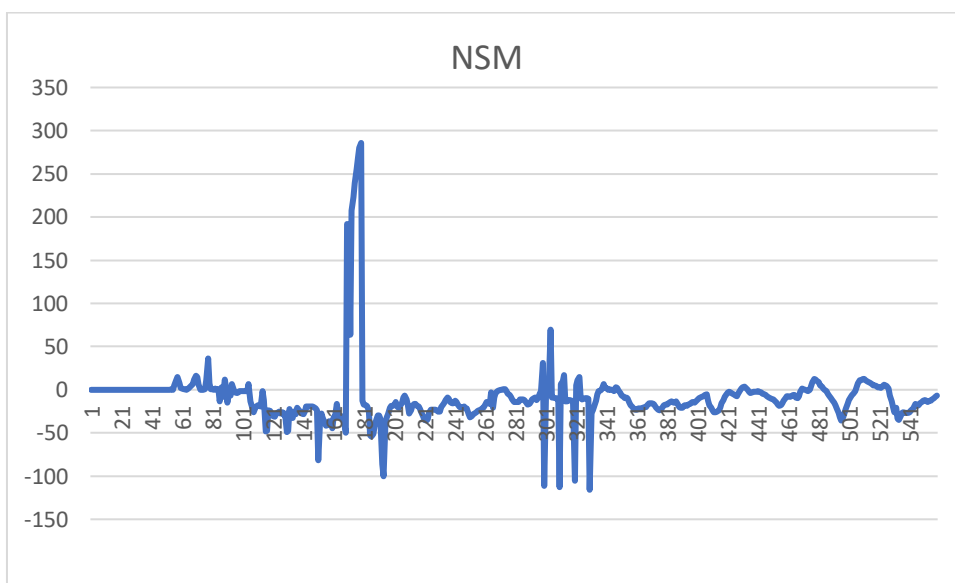
	Taux de changement de trait de côte (m/an)	Classification
1	> -2	Erosion très élevée
2	> -1 à <-2	Erosion élevée
3	> -1 à <-0	Erosion modérée
4	0	Stable
5	> 0 à <+1	Accrétion modérée
6	> +1 à <+2	Accrétion élevée
7	> +2	Accrétion très élevée



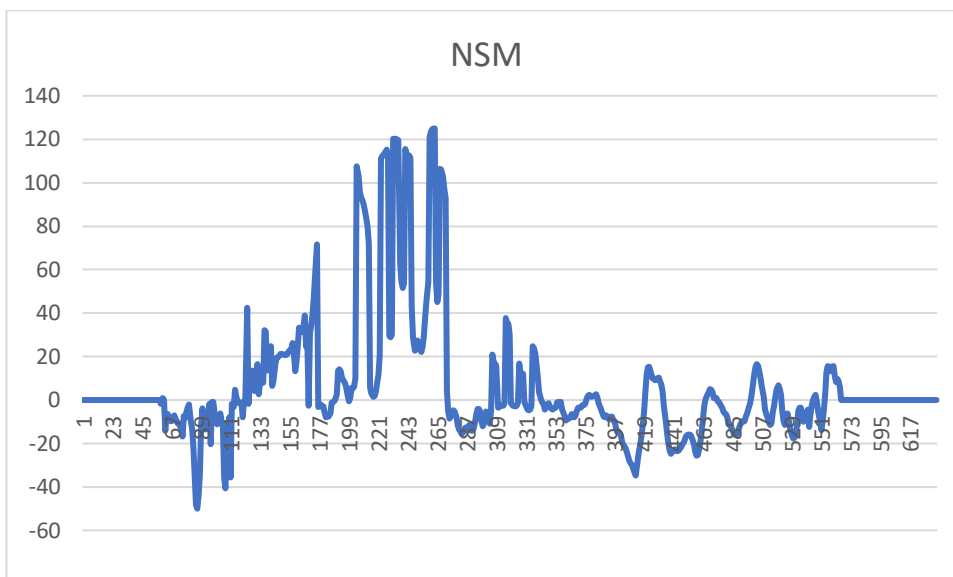
Annexe-Figure 1 : Variation du NSM du trait de côte selon les transects de 2004-2022 au niveau de la zone de la baie de Bou-Ismaïl (AID et MENASRI, 2022).



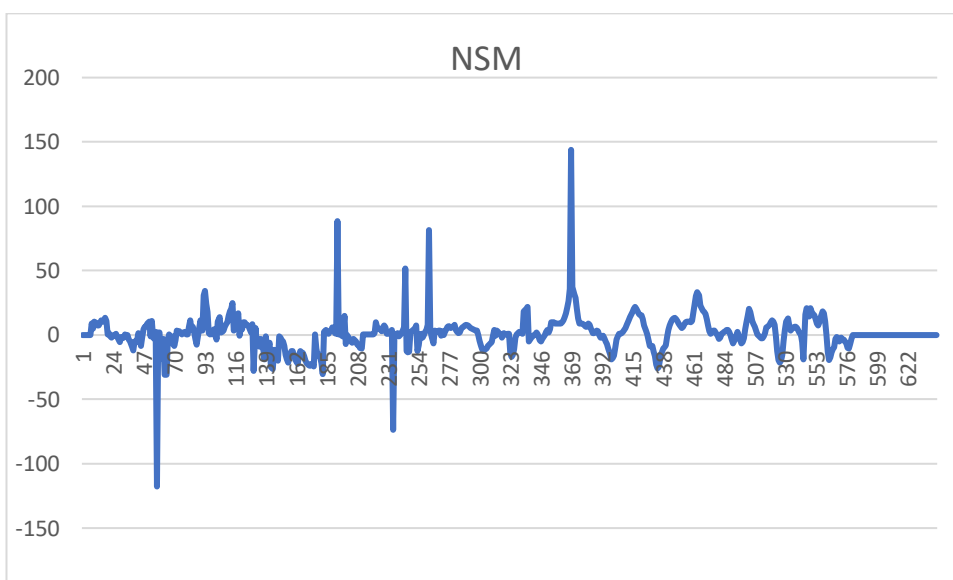
Annexe-Figure 2 : 2004 2008 Variation du NSM du trait de côte selon les transects de 2004-2008 au niveau de la zone de la baie de Bou-Ismail (AID et MENASRI, 2022).



Annexe-Figure 3 : Variation du NSM du trait de côte selon les transects de 2008-2011 au niveau de la zone de la baie de Bou-Ismail (AID et MENASRI, 2022).



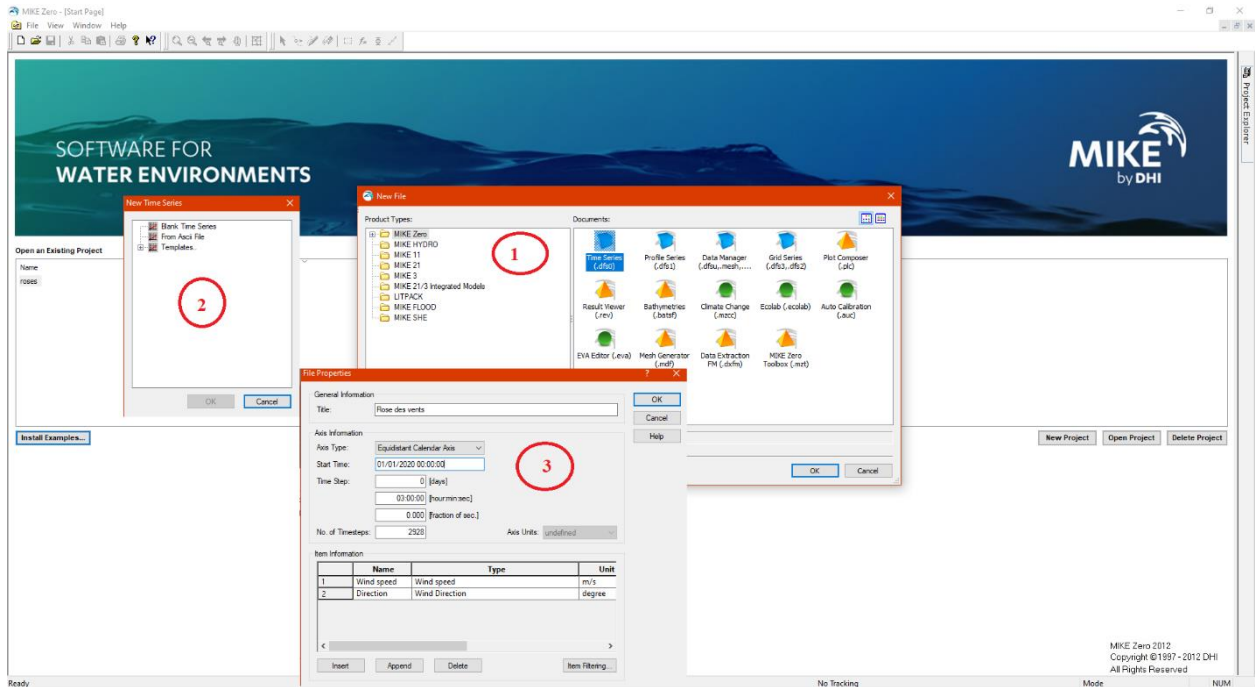
Annexe-Figure 4 : Variation du NSM du trait de côte selon les transects de 2011-2019 au niveau de la zone de la baie de Bou-Ismaïl (AID et MENASRI, 2022).



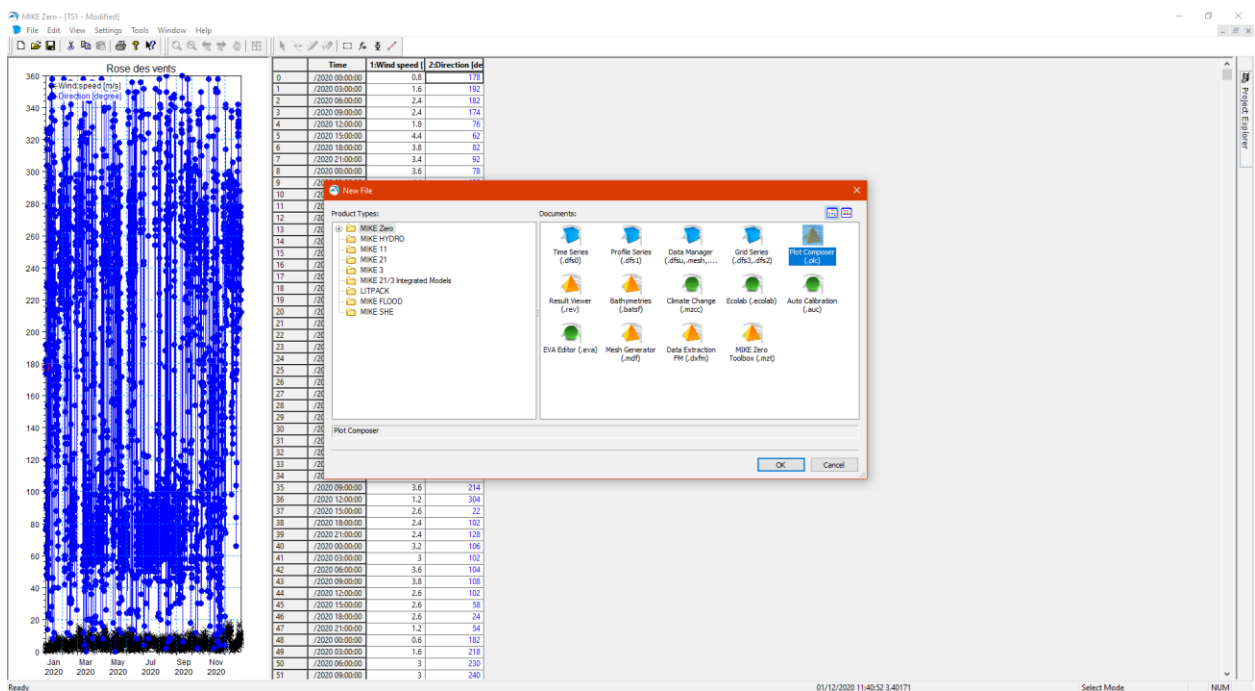
Annexe-Figure 5 : Variation du NSM du trait de côte selon les transects de 2019-2022 au niveau de la zone de la baie de Bou-Ismaïl (AID et MENASRI, 2022).

Annexe-Figure 6 : Étape de réalisation des roses des vents sur Mike21 :

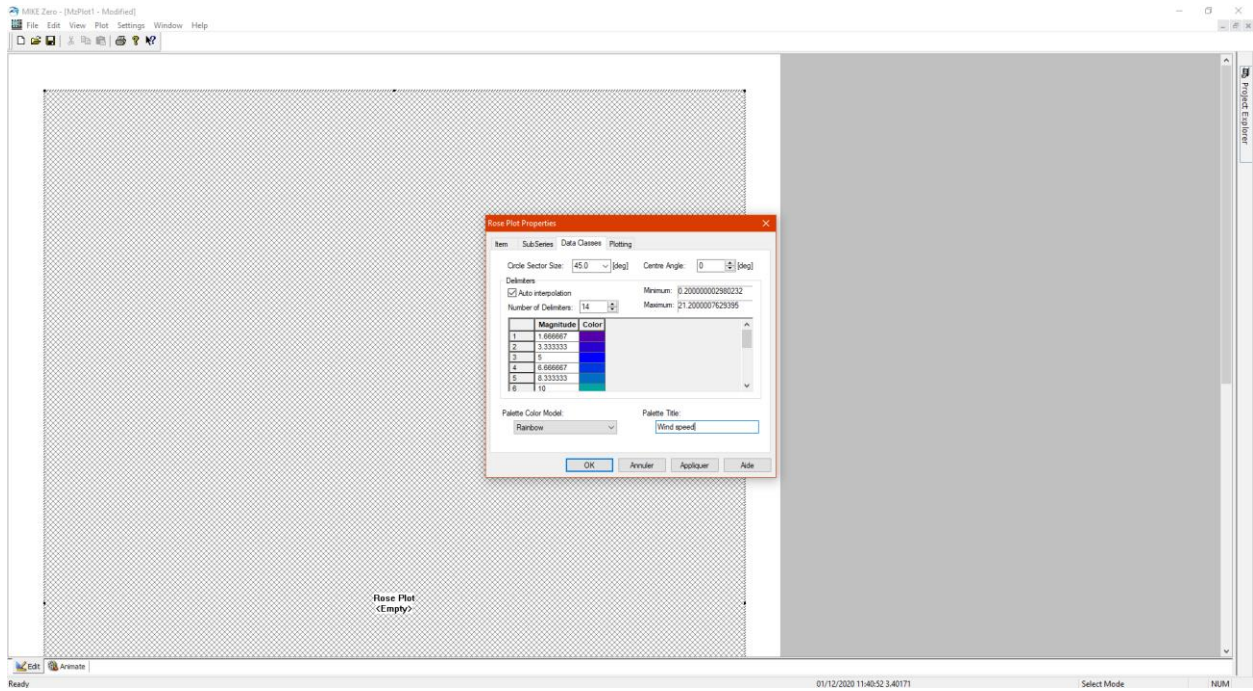
Etape 1 :



Etape 2 :



Etape 3 :



```

#=====
#initialisation du modele EVA
#=====

model= EVA(data=df_hs)
model
help(EVA.get_extremes)

extremes = model.get_extremes(
    method="POT",
    extremes_type="high",
    threshold=2.8,
    r='48h')

model.plot_extremes()

model.fit_model()
model.plot_diagnostic(return_period=np.linspace(0.1,100,100),alpha=0.95)

model.plot_return_values(
    return_period=np.linspace(0.1,100,100),
    return_period_size="1Y",
    alpha=0.95)

summary = model.get_summary(
    return_period=[1,5,10,20,30,50,100],
    alpha=0.95)
summary

#=====

```

Le script de la fonction POT (Peaks Over Threshold) et GPD (Generalized Pareto distribution)

return period	return value	lower ci	upper ci
1.0	4.252178	4.033867	4.456038
5.0	5.662689	5.198462	6.096187
10.0	6.270163	5.700026	6.802561
20.0	6.877637	6.201591	7.508935
30.0	7.232987	6.494987	7.922137
50.0	7.680675	6.864622	8.442710
100.0	8.288149	7.366186	9.149084

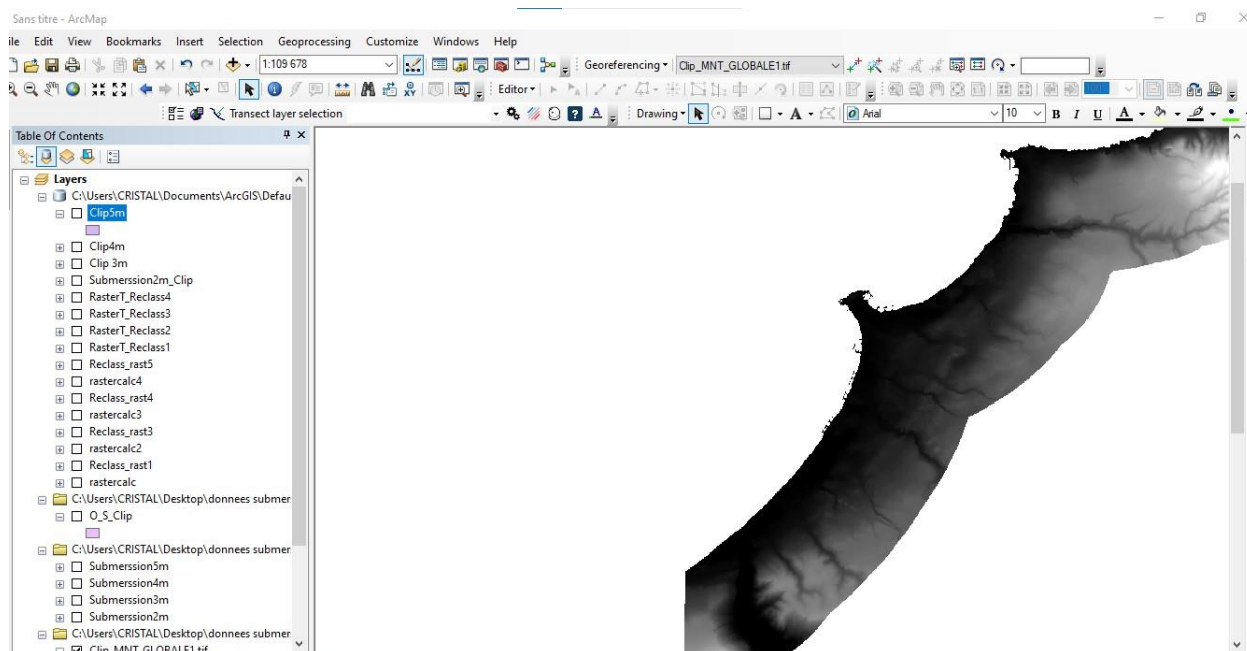
Traitement statistique du Nord

return period	return value	lower ci	upper ci
1.0	4.444546	4.289661	4.582231
5.0	5.194639	4.977225	5.344023
10.0	5.425733	5.167918	5.578860
20.0	5.615432	5.290721	5.770887
30.0	5.710228	5.349148	5.867398
50.0	5.815084	5.410770	6.013676
100.0	5.935038	5.477220	6.216376

Traitement statistique du Nord-ouest

return period	return value	lower ci	upper ci
1.0	4.097845	3.879596	4.315640
5.0	5.177744	4.842008	5.498680
10.0	5.548893	5.112047	5.936100
20.0	5.873541	5.308063	6.361504
30.0	6.044250	5.426977	6.602176
50.0	6.241136	5.582257	6.947608
100.0	6.479052	5.708290	7.442350

Traitement statistique du Nord-nord-ouest



Annexe-Figure 7 : Réalisation des cartes d'aléa des différents scénarios à partir d'un MNT

Bibliographie

- **Ahfir.Y, Meziane.I, (2016).**, Modélisation numérique de la cinématique du trait de côte et la dynamique sédimentaire des plages sableuses (Oran, Bou-Ismaïl, Alger, Bejaïa et Skikda) Cas d'étude : Sidi Fredj. *Mémoire de master, spécialité aménagement de littoral, DELLY BRAHIM, ENSSMAL.*
- **AL SID CHIKH, et al., (2009).** Baie de Bou-Ismaïl et d'el Djamila : Paramètres océanographiques, gestion littorale et imagerie bathymétrique. Mémoire d'ingénieur.
- **ALEM. A, SAFF.B, (2021).**, Etude hydrodynamique et d'agitation portuaire –cas du port d'Alger. *Mémoire de master, spécialité aménagement de littoral, DELLY BRAHIM, ENSSMAL.*
- **AOUDJ.C, BOUAZIZ.T. (2014).**, Fonctionnement morphosédimentaire du littoral Est de Bejaïa. *Mémoire de master, spécialité aménagement de littoral, DELLY BRAHIM, ENSSMAL*
- **BENALLOU.I, (2020).**, Evaluation des impacts des changements climatiques et des activités anthropiques sur le littoral de la baie de Zemmouri : Vulnérabilité et adaptation. *Mémoire de master, spécialité aménagement de littoral, DELLY BRAHIM, ENSSMAL.*
- **BENAVENTE, J., 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. p.p 1061-1076*
- **BENCHERIFE.H, (2018).**, Analyse de l'artificialisation de la zone côtière en Algérie : Cas des wilayas d'Oran (Ouest) et de Tipaza (Centre). *Mémoire de master, spécialité aménagement de littoral, DELLY BRAHIM, ENSSMAL.*
- **BERKANIA.A,(2011).**, contribution à l'étude de la croissance du Pagellus acarne (Risso.1826) dans la baie de Bou-Ismaïl.). *Mémoire de master, spécialité aménagement de littoral, DELLY BRAHIM, ENSSMAL*
- **BOUNAB.B, CHAMBLM, (2016).**, Processus morpho-sédimentaire et évolution multi-échelle de la plage Front de mer de la ville de Boumerdès.). *Mémoire de master, spécialité aménagement de littoral, DELLY BRAHIM, ENSSMAL.*
- **BOUKHENNAF.A(2016).**, Mise en place d'une base de données Littorale intégrée dans un SIG, application à la wilaya de Boumerdes. *Mémoire de master, spécialité Gestion et Surveillance du Milieu Marin et Littoral, DELLY BRAHIM, ENSSMAL.*
- **BOUTIBA, M. (1996).** *Etude en vraie grandeur du mode de fonctionnement des ouvrages de protection de la plage Est de Sidi Fredj (Ouest d'Alger). Thèse de magister. Aménagement du littoral. Alger : ISMAL, pp. 122-123.*
- **BRAIK, D. (1989). In Haddouch (2003) Etude de la dynamique sédimentaire devant BouIsmaïl: Sédimentologie –Morphologie, Problème d'érosion du littoral. Mémoire de magister. Géologie marine. Alger : UTSHB, 174 p.**

- **CARIOLET, J-M. (2011).** *Inondation des côtes basses et risques associés en Bretagne: vers une redéfinition des processus hydrodynamiques liés aux conditions météo-océaniques et des paramètres morpho-sédimentaires. Thèse de doctorat. Oceanographie physique. France : Université de Bretagne occidentale-Brest. 247 p.*
- **Chevillot-Miot.E, Mercier.D(2014).**, La vulnérabilité face au risque de submersion marine : exposition et sensibilité des communes littorales de la région Pays de la Loire (France). La revue électronique en sciences de l'environnement, vol.14n°2(septembre 2014), disponible sur le site web : <https://doi.org/10.4000/vertigo.15110>.
- **DAVIDSON-ARNOTT,R. G. D. ET DAWSON, J. C.(2001).**Moisture and fetch effects on rates of aeolian sediment transport, Skallingen, Denmark. Rapport d'activité. Document non publié..Canada: CCSEA.
- **DEMOUCHE.R, (2017).**, Processus mis en jeu dans l'évolution morpho-dynamique de la Baie de Zemmouri (Modélisation et observations hydrodynamiques et sédimentaires). *Mémoire de master, spécialité aménagement.t de littoral, DELLY BRAHIM, ENSSMAL.*
- **DERGALI, M.A. (1997).** *Reconnaissance du port d'Annaba et quelques aspects de son impact sur l'environnement côtier. Mémoire d'Ingénieur. Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL, p. 20-60*
- **DHI (2014).** *MIKE ZERO: Creating 2D Bathymetries. Bathymetry Editor & Mesh Generator,*
- **DHI (2014).** *MIKE 21 Spectral Wave Module,*
- **DHI (2014).** *MIKE 21/3 Couple Model FM,*
- **DHI (2014).** *MIKE 21 Flow Model Advection/Dispersion Modules.*
- **Hadj amor.R (2008).**, Evaluation des impacts anthropiques de l'écosystème lagunaire d'El Melah de Slimane (Tunisie) par la méthode d'Analyse Du Cycle de Vie. (document publié) disponible sur le site web : <https://www.researchgate.net/publication/329527171>.
- **HARRIS, S.W.(1963).** Ecology of Water-Level Manipulations on a Northern Marsh. Ecology. Vol. 44, n° 2. p.p. 331-343.
- **HOOZEMANS, F. M. J ET AL (1993).** Sea level rise: A global vulnerability assessment vulnerability assessments for population, coastal wetlands and rice production on a global scale H1588. Rapport. Document non publié. Holland : Deltares (WL).
- **HUNT, I.A. . (1959).**Design of sea-walls and breakwaters. Transactions of the American Society of Civil Engineers. Vol. 126, n° 4, p.p. 542-570.
- **KOMAR, P. D. (1998).** Beach processes and sedimentation.

- **LEM. (2017).** Étude d'élaboration du plan d'aménagement côtier (PAC) de la wilaya de Tipaza version 2 : Rapport d'activité. Document non publié. Alger : Laboratoire d'études maritimes.
- **MILLOT, C. (1987).** Circulation in the western Mediterranean sea. *Oceanologica Acte.* Vol 10
- **OIVIERS.C , LAMBERT.A, CHOPPIN.L, MARCOT.N, GREGORES.Y (2003).**, Etude des phénomènes de submersion marine sur le littoral de commune des Saintes – Maries –de-la –Mer . rapport de synthèse final, BRGM/RP-52747.FR.
- **MEGDOU.N, (2012).**, variations historiques de la ligne de rivage et érosion côtière entre oued reghaia et oued boumerdes. *Mémoire de magister, spécialité géomorphologie, université des sciences et techniques Houari Boumediene-ALGER, faculté des sciences de la terre, de géographie et de l'Aménagement du territoire.*
- **. MILOUDI.S, MEZOUAR.K , SALEM Cherif.Y , DAHMANI.A,(2018).**, Morphological evolution of center Boumerdes in Zemmouri Bay (Algeria) from 1922 to 2017, *Arabian Journal of Geosciences* .Disponible sur le site web : <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3950-3>.
- **MIKE 21** Flow Model Advection/Dispersion Module User Guide. Infrastructures, environnement et transport par voie d'eau. [En ligne]. [Consulté le 024/04/2022]. Disponible sur le web www.techniques-ingenieur.fr
- **NADIR.M, (2016).**, Modélisation numérique de la morphodynamique d'une côte sableuse Soumise à l'effet des vagues et des houles Cas : Plage Est de SIDI Fredj. *Mémoire de master, spécialité aménagement de littoral, DELLY BRAHIM, ENSSMAL*
- **PASKOFF, R. (1998).** *Les littoraux : impact des aménagements sur leur évolution.* 3 éd. Paris : Armand Colin, 264 p.
- **REBEHL.M, (2018).**, *Détermination spatio-temporelle de l'expansion urbaine sur la baie d'Alger et impact environnemental sur la bande côtière.* Thèse doctorat, Spécialité Environnement Marin, Option : Océanographie Spatiale et Observation de la Mer, DELLY BRAHIM, ENSSMAL.
- **ROHLING, E. J.et Al.(2008).** High rates of sea-level rise during the last interglacial period. *Nature Géoscience.* Vol.1, n°1. p.p 38-42.
- **ROUXELouxel.M(2015).**, caractérisation des aléas (PPRLI de la baie de Saint-Brieuc) rapport pour DDTM (Direction Départements des Territoires et de la Mer) côtés d'Armor.
- **SAIDA.N, (2007).**, Evaluation des impacts des changements climatiques et de l'élévation du niveau de la mer sur le littoral de Tétouan (Méditerranée occidentale du Maroc):

Vulnérabilité et Adaptation. *These de doctorat d'etat, département Géosciences de l'Environnement, Spécialité Changements Climatiques et Zones Côtières, UNIVERSITÉ MOHAMMED V – AGDAL, FACULTÉ DES SCIENCES Rabat.*

- *WILLIAMS, S. (1990). Coasts in crisis. Germany: Geological survey circular, p. 32-40*

Site web

www.climatewave.com

<https://github.com/>

<https://stackoverflow.com/questions/52455797/python-fitting-a-gev-distribution-from-these-values>

Resumé

Le littoral algérien est soumis à un recul important sur toutes ses façades maritimes (occidentale, Centrale et orientale). A l'échelle de la baie de Bou-Ismaïl est un véritable système où se conjugue l'action de plusieurs facteurs qui conditionnent l'évolution morpho-dynamique de la côte de Bou-Ismaïl. Les principaux objectifs de cette recherche, première du genre sur la baie de Bou-Ismaïl sont de parvenir à la compréhension des processus actuels qui commandent l'évolution morpho-dynamique de la côte de la baie (transferts sédimentaires). Ceci nous aidera à mieux interpréter les modalités d'érosion, de transport et de dépôt dans l'environnement côtier actuel. Ces objectifs s'appuient essentiellement sur des observations morphologiques diachroniques et des mesures qualitatives des phénomènes contribuant aux changements de la morphologie de la côte, l'acquisition des données sur les mouvements sédimentaires et les variations topographiques et morphologiques induits par ses transferts littoraux s'est effectuée selon une approche basée sur des campagnes de mesures topographiques et de quantification des transferts sédimentaires.

Mots clés : Littoral, trait de côte, évolution du trait de côte, modélisation numérique, Baie de Bou-Ismaïl, Submersion.

The Algerian coastline is subject to a significant decline on all its maritime frontages (western, central and eastern). Across the of Bay Bou-Ismaïl is a real system in which the action of several factors is combined, conditional on the morpho-dynamic evolution of the Bou-Ismaïl coast. The main objectives of this research, first of its kind on the Bay of Bou-Ismaïl. Are to understand the current processes that control the morpho-dynamic evolution of the Bay (sedimentary transfer). This will help us better interpret the erosion modalities. Transport and deposit in the present coastal environment. These objectives are mainly based on morphological observations. Diachroniques and qualitative measurements of the phenomena contributing to changes in the morphology of the coast, the acquisition of data on sedimentary movements and the topographic and morphological variations induced by its coastal transfers was carried out according to an approach based on measurement campaigns topography and quantification of sediment transfer.

Key words : Coastline, coastline, coastal evolution, numerical modeling, Bou-Ismaïl Bay, Submersion.

نظام هو بوإسماعيل خليج حجم .والشرقية الوسطى .الغربية) البحرية رحلاته جميع في كبير لتراجع الجزائري الساحل يخضع لتراجع يخضع والذي ،الجزائر لساحل المورفوي الديناميكي بالتطور مشروط ،عوامل عدة عمل بين الجمع يتم حيث حقيقي الجمع يتم حيث حقيقي نظام هو بوإسماعيل خليج نطاق على .والشرقية الوسطى .(الغربية) البحرية واجهاتها جميع في كبير نوعه من الأول ،البحث لهذا الرئيسية الأهداف .زموري لساحل المورفوي الديناميكي بالتطور مشروط ،عوامل عدة عمل بين عمليات) الخليج لساحل للمورفو الديناميكي التطور في تتحكم التي الحالية للعمليات فهم إلى التوصل هي بوإسماعيل خليج على هذه تستند .الحالية الساحلية البيئة في والترسب النقل .أفضل بشكل التآكل أنماط تفسير على سيساعدنا هذا .(الرسوبي النقل الطبوغرافية والتغيرات الرسوبية التحركات عن بيانات على الحصول تم .المورفولوجية الملاحظات إلى أساسي بشكل الأهداف لعمليات الكمي والقياس الطبوغرافية القياسات حملات على قائم نهج باستخدام الساحلية النقل عمليات عن الناجمة والشكلية التي الحالية للعمليات فهم إلى التوصل هي بوإسماعيل خليج نوعه من الأول ،البحث لهذا الرئيسية الأهداف .الرسوبي النقل بشكل التآكل أنماط تفسير على سيساعدنا هذا .(الرسوبي النقل عمليات) الخليج لساحل للمورفو الديناميكي التطور في تتحكم القياسات .المورفولوجية الملاحظات إلى أساسي بشكل الأهداف هذه تستند .الحالية الساحلية البيئة في والترسب النقل .أفضل مورفولوجيا في تغييرات إحداث في تسهم التي للظواهر والنوعية الدياكرونية

فياضاناتى بواسماعيل خليج ،العديدية النمذجة ،الساحلي التطور ،الساحلي الخط ،الساحل : مفاتيح كلمات

