

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 et de Master en Sciences de la Mer
Option : Gestion et Protection du Littoral
Thème :

**Étude de protection et d'aménagement de la façade maritime Ferhani
(Bab El Oued -Alger-)**

Présenté par :

BOUDIBA Abderrahmane

ETTAIEB Mohamed Samy

Soutenus le 06/10/2021 devant le jury suivant :

Mme. MEHDID	Maitre- conférencesB (ENSSMAL)	Présidente
Mr. MEZOUAR.KH	Maître de conférences A (ENSSMAL)	Promoteur
Mr. BOUMOULA	Ingénieur (LEM)	Co- promoteur
Mr. DAHMANIA	Maitre-assistant A (ENSSMAL)	Examineur
Mme. ABDEDDAIM.H	Maître de conférences B (ENSSMAL)	Examinatrice

Promotion : 2020/2021

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا للعلوم والبحر 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 et de Master en Sciences de la Mer
Option : Gestion et Protection du Littoral
Thème :

**Étude de protection et d'aménagement de la façade maritime Ferhani
(Bab El Oued -Alger-)**

Présenté par :

BOUDIBA Abderrahmane

ETTAIEB Mohamed Samy

Soutenus le 06/10/2021 devant le jury suivant :

Mme. MEHDID	Maitre- conférencesB (ENSSMAL)	Présidente
Mr. MEZOUAR.KH	Maître de conférences A (ENSSMAL)	Promoteur
Mr. BOUMOULA	Ingénieur (LEM)	Co- promoteur
Mr. DAHMANIA	Maitre-assistant A (ENSSMAL)	Examineur
Mme. ABDEDDAIM.H	Maître de conférences B (ENSSMAL)	Examinatrice

Promotion : 2020/2021

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, Nous tenons à adresser nos sincères remerciements au Dieu Tout Puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a données afin de réaliser ce mémoire de fin d'études.

On exprime notre profonde gratitude à notre promoteur Monsieur « MEZOUAR Khoudir » pour nous avoir encadré, aider et diriger pour faire ce mémoire, sa disponibilité, ses critiques constructives, ses conseils et son appui scientifique, et nous avons tant bénéficié de son expérience et de ses connaissances.

Nous tenons à remercier Mr KHELLAF Mohamed Cherif enseignant à USTHB pour nous avoir conseillé ce thème pour notre projet de fin d'études

Nous remercions les membres du jury :

Nous adressons nos chaleureux remerciements aux enseignants qui nous ont aidés par leurs connaissances pour réalisée ce travail Mr DAHMANI, Mme SALEM CHERIF, Mme KERAGHEL, Mr FERNANE, Mr OTMANI et Mr BOUMOULA ingénieur au Laboratoire d'Études Maritimes (LEM)

Dédicaces 01

(Dédicaces de Samy ETTAIEB)

A la mémoire de Babasidou que Dieu bénisse son âme

A mes chers parents que dieu les protèges. C'est grâce à eux que je suis arrivé la. Vous avez tant veillé sur moi depuis que je suis venu au monde.

Mes remerciements pour vous seront infinis

A mon frère Haroun, notre fierté cette année pour ta brillante réussite au BAC, merci infiniment pour tout tes encouragements

A mes Mamies que dieu leurs accordent une longues vie. Je vous remercie pour tout le bonheur et soutient que vous m'avais offert, a Papi que dieu lui accorde une longue vie pour tout ses encouragements et ses conseils

A mes chers Oncles et Tantes, mes grands Oncle, mes grandes Tantes milles merci du fond du cœur pour vos soutiens et encouragement et vos conseils

A mes chers cousins et cousines adorés

A tous les membres de ma famille qui nous ont quittés et qui sont toujours dans nos cœurs que Dieu bénisse leurs âmes

A toutes personnes qui m'ont aidé à enrichir mes connaissances, à Monsieur Serhane que Dieu bénisse son âme, et a mes enseignants

A tous mes amis, à Mohamed.H, Mossaab...

A mes amis de l'ENSSMAL, ma promo GPL, et tous mes amis de l'école de toutes spécialités et promos, j'ai fait de superbes connaissances, et j'ai passé cinq années avec vous des moments inoubliables

Et bien sur à Pinette

Dédicaces 02

(Dédicaces de Abderrahmane BOUDIBA)

Je remercie toute la famille BOUDIBA et toutes personnes ayant participé a se travaille.

Table de matières

REMERCIEMENTS	II
<i>Dédicaces</i> 01	III
<i>Dédicaces</i> 02	IV
Liste des Figure	IX
Liste des tableaux	XI
Liste des acronymes et abréviations	XII
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités	4
1 Généralités sur la zone d'étude	5
1.1 Situation géographique.....	5
1.1.1 La baie d'Alger.....	5
1.1.2 Zone d'étude : site Ferhani	5
1.2 Caractéristiques géologiques et géomorphologique	6
1.2.1 Géologie régional	6
1.3 Condition océanographique.....	8
1.3.1 Niveau marin.....	8
1.3.1.1 Marée	8
1.3.1.2 Surcote.....	9
1.3.2 La houle.....	9
1.3.2.1 Interprétations des roses de houles	18
1.3.2.2 Données de vent	18
1.3.2.3 Interprétations des roses des vents.....	18
1.3.2.4 Conditions extrêmes au large de la baie d'Alger	19
1.3.2.4.1 Estimation statistique des événements extrêmes de houle	19

1.3.2.4.2	Interprétation des résultats :.....	25
1.3.2.5	Étude granulométrique	26
1.3.2.6	Matériel et méthode	26
1.3.2.6.1	Techniques d'échantillonnages	26
1.3.2.6.2	Méthodologie.....	26
1.3.2.6.3	Les paramètres de dispersion.....	28
1.3.2.6.4	Teneur et répartition de la fraction fine	29
1.3.2.6.5	Indice de classement de TRASK So	29
1.3.2.6.6	Indice d'ASYMETRIE (SKEWNESS) SK.....	30
Chapitre II : Étude hydrodynamique et la réalisation de simulation.....		32
1.	Introduction	33
2	Généralités sur l'hydrodynamique et l'agitation portuaire.....	33
2.1	Les phénomènes en mer	33
2.2	Les différents types de modélisation en hydraulique maritime	36
2.3	Étude de propagation de houle du large vers la cote	36
3	Modélisation numérique	37
3.1	Présentation du modèle	37
3.2	Le modèle SW	38
3.2.1	Modèle de houle MIKE 21 SW	38
3.2.2	L'équation de base	39
3.2.3	Configuration du modèle et équations.	39
3.3	Le modèle HD.....	42
3.3.1	L'équation de base	42
3.4	Le modèle ST.....	43
3.4.1	Equations de base.....	44

3.5	L'étude bathymétrique.....	46
3.5.1	Création 2D Bathymétries sous le maillage	46
3.6	Simulation hydro-sédimentaire	48
3.6.1	Action des houles de direction Nord-Est N30°	49
3.6.2	Action des houles de direction Nord N360°	52
3.6.3	Action des houles de direction Nord-Ouest N340°	54
4	Conclusion.....	56
	Chapitre III : Solution de protection	57
1	Introduction	58
2	Généralité	58
2.1	Brise-lame	58
2.2	Poids des blocs de la carapace	58
2.3	Formule d'Hudson.....	59
2.4	Poids du filtre	60
2.5	Estimation du Run up	60
2.6	Le tableau justificatif de ces coefficients	61
2.7	HOULE DE PERIODE DE RETOUR 1 AN	61
2.8	HOULE DE PERIODE DE RETOUR 50 ANS.....	61
3	Variante 1: Brise-lames immergé.....	62
3.1	Justification et intérêt	62
3.2	Caractéristiques géométriques de l'ouvrage	62
3.3	Profils types	62
3.4	Paramètres d'implantation de l'ouvrage:	63
3.5	Calcul :	63
3.5.1	Formule d'Hudson	63

3.6	Paramètres structuraux de l'ouvrage:	63
3.6.1	Poids de blocs de la carapace:	64
4	Variante 02: brise-lames émergés	65
4.1	Justification et intérêt	65
4.2	Paramètres d'implantation.....	65
4.2.1	Cote d'arase et largeur de crête.....	66
4.2.2	Enrochements du talus arrière du brise-lames (ouvrage peu franchi).....	66
5	Simulation avec ouvrage immergée	68
5.1	Action des houles de direction Nord-Est N30° sur ouvrage immergée.....	68
5.2	Action des houles de direction Nord N360° sur ouvrage immergée	69
5.3	Action des houles de direction Nord-Ouest N340° sur ouvrage immergée	69
6	Simulation avec ouvrage émergée.....	73
6.1	Action des houles de direction Nord-Est N30° sur ouvrage émergée.....	73
6.2	Action des houles de direction Nord N360° sur ouvrage émergée	73
6.3	Action des houles de direction Nord-Ouest N340° sur ouvrage émergée	73
7	Comparaison des variantes	77
8	Conclusion.....	77
	Conclusion générale.....	79
9	Conclusion.....	80
	Référence bibliographique	81
10	Références.....	82

Liste des Figure

FIGURE 1 : LA ZONE D'ÉTUDE FERHANI (GOOGLE EARTH PRO 2021).....	6
FIGURE 2: CARTE GÉOLOGIQUE RÉGIONALE DE LA ZONE ALGÉROISE (INCT, 2016).....	8
FIGURE 3 : CARTE DE LA LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE DU POINT DE L'EXTRACTION (BASEMAPARCGIS, 2020)	10
FIGURE 6 : ROSE DES HOULES POUR LA SAISON ESTIVALE.....	11
FIGURE 4: ROSE DES HOULES POUR LA SAISON HIVERNALE.....	11
FIGURE 5: ROSE DES HOULES ANNUELLE 2018.....	11
FIGURE 7: ROSE DES HOULES POUR LA SAISON AUTOMNALE.....	11
FIGURE 8 : ROSE DES HOULES POUR LA SAISON PRINTANIÈRE.....	11
FIGURE 9: ROSE DES HOULES MENSUELLES (DE JANVIER À DÉCEMBRE)	12
FIGURE 10: ROSE DES VENTS ANNUELLE 2019	15
FIGURE 11 : ROSE DE VENT POUR LA SAISON ESTIVALE.....	15
FIGURE 12: ROSE DES HOULES POUR LA SAISON HIVERNALE	15
FIGURE 13: ROSE DES VENTS POUR LA SAISON AUTOMNALE.....	15
FIGURE 14: ROSE DES HOULES POUR LA SAISON PRINTANIÈRE	15
FIGURE 15: ROSES DES VENTS MENSUELLES (DE JANVIER À DÉCEMBRE).....	16
FIGURE 16: SÉRIE TEMPORELLE DES PARAMÈTRES DE HOULE – IOWAGA 1990-2018	21
FIGURE 17: LES VALEURS RETENUES POUR LE CALCUL DES EXTRÊMES – SECTEUR OMNIDIRECTIONNEL.....	22
FIGURE 18: LES VALEURS RETENUES POUR LE CALCUL DES EXTRÊMES – SECTEUR 15-60°N	22
FIGURE 19: LES VALEURS RETENUES POUR LE CALCUL DES EXTRÊMES – SECTEUR 270-315°	23
FIGURE 20: EXTRAPOLATION STATISTIQUE DES VALEURS EXTRÊMES DES HAUTEURS DE HOULE – SECTEUR OMNIDIRECTIONNEL.....	23
FIGURE 21: EXTRAPOLATION STATISTIQUE DES VALEURS EXTRÊMES DES HAUTEURS DE HOULE-AJUSTEMENT RÉALISÉ POUR LE SECTEUR 15-60°N.....	24
FIGURE 22: EXTRAPOLATION STATISTIQUE DES VALEURS EXTRÊMES DES HAUTEURS DE HOULE – AJUSTEMENT RÉALISÉ POUR LE SECTEUR 270-315°N	24
FIGURE 23 : MODÈLE D'UNE COURBE GRANULOMÉTRIQUE AVEC LES PRINCIPAUX INDICES POUR LE SITE DU STADE FERHANI (LEM, 2020).....	27
FIGURE 24 : ALLURES DES COURBES CUMULATIVES DE DEUX ÉCHANTILLONS TÉMOINS, (LEM, 2020).....	28
FIGURE 25 : INDICE DE CLASSEMENT SO POUR LE SITE DE STADE FERHANI (LEM, 2020)....	29
FIGURE 26 : INDICE D'ASYMÉTRIE SK POUR LE SITE DE STADE FERHANI (LEM, 2020).....	30
FIGURE 27 : ORGANISME PRÉSENTE LES DIFFÉRENTS PHÉNOMÈNES PHYSIQUE EN MER (CEREMA, 2018)	35
FIGURE 28: ORGANIGRAMME DU DÉROULEMENT D'UNE ÉTUDE DE PROPAGATION DES VAGUES DU LARGE À LA COTE (CEREMA, 2018).....	37
FIGURE 29: MAILLAGE DE LA CARTE BATHYMÉTRIQUE DE LA BAIE D'ALGER.....	46
FIGURE 30: CARTE BATHYMÉTRIQUE DE LA BAIE D'ALGER.....	47
FIGURE 31: MAILLAGE DE LA CARTE BATHYMÉTRIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE FERHANI..	47

FIGURE 32: CARTE BATHYMÉTRIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE FERHANI	48
FIGURE 33 : CHAMP DE HOULES DE DIRECTION NORD-EST.....	50
FIGURE 34: CHAMP DES HOULES DE DIRECTION NORD-EST.....	50
FIGURE 35: CAPACITÉ DE SÉDIMENTS INDUIT PAR LA HOULE DE DIRECTION NORD-EST ..	51
FIGURE 36: CHAMP DE HOULES DIRECTION NORD.....	52
FIGURE 37: CHAMP DES COURANTS INDUIT PAR LA HOULE DE DIRECTION NORD	53
FIGURE 38 : CAPACITÉ DE TRANSPORT DES SÉDIMENTS INDUIT PAR LA HOULE DE DIRECTION NORD	53
FIGURE 39: CHAMP DES HOULES DE DIRECTION NORD-OUEST	54
FIGURE 40: CHAMP DES COURANTS INDUIT PAR LA HOULE DE DIRECTION NORD-OUEST .	55
FIGURE 41 : CAPACITÉ DU TRANSPORT INDUIT PAR LA HOULE DE DIRECTION NORD- OUEST	55
FIGURE 42: PROFIL BRISE-LAMES IMMERGÉE (LEM 2020)	62
FIGURE 43 : PROFIL BRISE-LAMES ÉMERGÉE (LEM 2020)	66
FIGURE 44 : GRAPHIQUE D'UN TALUS DE PENTE 3/1, POUR DES NIVEAUX DE CRÊTE RELATIVEMENT ÉLEVÉS.....	67
FIGURE 45: CHAMP DE HOULES DE DIRECTION NORD-EST.....	70
FIGURE 46: CHAMP DES COURANTS DE DIRECTION NORD-EST	70
FIGURE 47: CAPACITÉ DE SÉDIMENTS INDUIT PAR LA HOULE DE DIRECTION NORD- EST	70
FIGURE 48: CHAMP DE HOULES DE DIRECTION NORD.....	71
FIGURE 49: CHAMP DES COURANTS DE DIRECTION NORD.....	71
FIGURE 50: CAPACITÉ DE SÉDIMENTS INDUIT PAR LA HOULE DE DIRECTION NORD..	71
FIGURE 51: CHAMP DE HOULES DE DIRECTION NORD-OUEST	72
FIGURE 52 : CHAMP DES COURANTS DE DIRECTION NORD-OUEST.....	72
FIGURE 53 : CAPACITÉ DE SÉDIMENTS INDUIT PAR LA HOULE DE DIRECTION NORD- OUEST	72
FIGURE 54 : CHAMP DE HOULES DE DIRECTION NORD-EST.....	74
FIGURE 55: CHAMP DES COURANTS DE DIRECTION NORD-EST.....	74
FIGURE 56: CAPACITÉ DE SÉDIMENTS INDUIT PAR LA HOULE DE DIRECTION NORD- EST	74
FIGURE 57 : CHAMP DE HOULES DE DIRECTION NORD.....	75
FIGURE 58: CHAMP DES COURANTS DE DIRECTION NORD.....	75
FIGURE 59: CAPACITÉ DE SÉDIMENTS INDUIT PAR LA HOULE DE DIRECTION NORD..	75
FIGURE 60: CHAMP DE HOULES DE DIRECTION NORD-OUEST	76
FIGURE 61 : CHAMP DES COURANTS DE DIRECTION NORD-OUEST.....	76
FIGURE 62: CAPACITÉ DE SÉDIMENTS INDUIT PAR LA HOULE DE DIRECTION NORD- OUEST	76

Liste des tableaux

TABLEAU 1: CORRÉLOGRAMME DP/HS POUR LE POINT IOWAGA : 37°N – 3°E.....	13
TABLEAU 2: CORRÉLOGRAMME TP/HS POUR LE POINT IOWAGA : 37°N – 3°E.....	14
TABLEAU 3: CORRÉLOGRAMME VITESSE DE VENT/DIRECTION DE VENT POUR LE POINT IOWAGA : 37°N – 3°E.....	17
TABLEAU 4: CARACTÉRISTIQUES SIGNIFICATIF DE LA HOULE SANS PERIODE DE RETOUR	49
TABLEAU 5: CARACTÉRISTIQUES SIGNIFICATIF DE LA HOULE AVEC PERIODE DE RETOUR	49
TABLEAU 6: FORMULE D’HUDSON	59
TABLEAU 7 : TABLEAU JUSTIFICATIF DES COEFFICIENTS.....	61
TABLEAU 8: FORMULE D’HUDSON	63
TABLEAU 9: FORMULE D’HUDSON	68

Liste des acronymes et abréviations

ECMWF : the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

EPA : Enterprise Portuaired'Alger

Dp : Direction de pic

GEV : Generalized Extreme Value

GPD : Generalized Pareto Distribution

IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

IOWAGA : Interdisciplinary Ocean Wave for Geophysical and other Applications

POT : *Peaks* OverThreshold

PAC : Plan d'Aménagement Côtier

SW : SpectralWaves

HD : HydroDynamic (Hydrodynamique)

ST : Sand Transport (Transport sédimentaire)

Introduction générale

Le littoral est un lieu de convergence et de compétition entre des nombreuses activités humaines, quelquefois concurrentes (industrie, agriculture, transport, tourisme), constitue aussi un patrimoine biologique et paysager de première importance où les équilibres écologiques sont sans cesse fragilisés par les aléas naturels mais également par l'Homme. **(Mezouar.K, 2009)**.

Donc il est le premier élément à être affecter par les changements de l'état de la mer qui sont parfois inattendus. Ceux interviennent à la fois directement et indirectement dans différents domaines (environnemental, économique, socio-économique, touristique...).

La zone Ferhani à Bab el Oued, a connus d'importants phénomènes de franchissement des vagues à la cote, jusqu'à affecter la route nationale qui borde la cote et qui est dotée d'un important trafic automobile, qui peuvent entrainer des dangers matériels et humains. Cette situation c'est beaucoup plus aggravée depuis les inondations qui ont ravageaient Bab El-Oued en 2001, des fortes vagues franchissent souvent les enrochements qui borde la cote. Un des facteurs importants qui favorise les franchissements est le phénomène d'élévation du niveau de la mer résultant du réchauffement climatique qui favorise l'atténuation des vagues.

Vue cette importance et avec l'aide de laboratoire des études maritime (LEM), on à réaliser ce mémoire qui à pour but de rétablir une étude de protection et d'aménagement en surface de la façade maritime de Bab el Oued (belvédère el Kittani _ Jardin Conàkry _ bord de er stade Ferhani); qui se constitue de :

- Chapitre I : Dans ce chapitre, on entame une synthèse générale sur la zone d'étude, la situation géographique de la zone avec ces caractéristiques géologiques et géomorphologique, les conditions océanographiques qui englobe les données des houles et des vents et conditions extrêmes au large de la baie d'Alger. Et l'étude granulométrique.
- Chapitre II : Dans ce chapitre, on étudie les phénomènes hydrodynamiques et la modélisation numériques, présentation du logiciel MIKE 21 et ces modèles (SW, HD, ST). L'étude bathymétrique de la baie d'Alger et de la zone Ferhani, et des simulations de la zone Ferhani.
- Chapitre III : Dans ce dernier chapitre on parle de la conception et le dimensionnement des ouvrages qu'on a proposés et leurs paramètres structuraux. Les calculs en utilisant

la formule d'HUDSON, et les simulations de la zone avec la présence des ouvrages, et la comparaison des deux variantes proposée pour choisir la plus efficace

Chapitre I : Généralités

1 Généralités sur la zone d'étude

1.1 Situation géographique

1.1.1 La baie d'Alger

La baie d'Alger est située dans la partie centrale de la côte Algérienne. Elle est de forme semi-circulaire, elle occupe une superficie d'environ 180 km². Il est délimité par le cap Matifou (Bordj El-Bahri) à l'est et la Pointe-Pescade (Rais Hamidou) à l'ouest et au nord par la Mer Méditerranée, elle a pour coordonnées géographiques longitude Est de 03°01'00" à 03°14'30", et une latitude Nord de 36°44'30" à 36°49'15". Le plateau continental est très étroit mais s'élargit dans le centre de la baie ne dépassant pas l'isobathe 120 m. En effet, l'isobathe 50 m est à 4,1 km de la côte. Celui de 100 m est à 7,6 km quant à celle de 1000 m est à 12,1 km de la côte (**Houma et al. 2004 (a); LEM, 1998**).

1.1.2 Zone d'étude : site Ferhani

Notre zone d'étude dite <<Ferhani>> est située dans la commune de Bab El Oued dans la wilaya d'Alger, elle a pour coordonnées géographiques 3°03'05.50''E à 3°03'13.63''E de longitude est et 36°47'51.14''N et 36°47'42.10''N de latitude Nord. Elle est délimitée par la plage Kettani au Sud-Est, la commune de Bologhine au Nord-Ouest, et par la Méditerranée à l'est et nord est, et au sud par le stade Ferhani (**voir figure 1**).

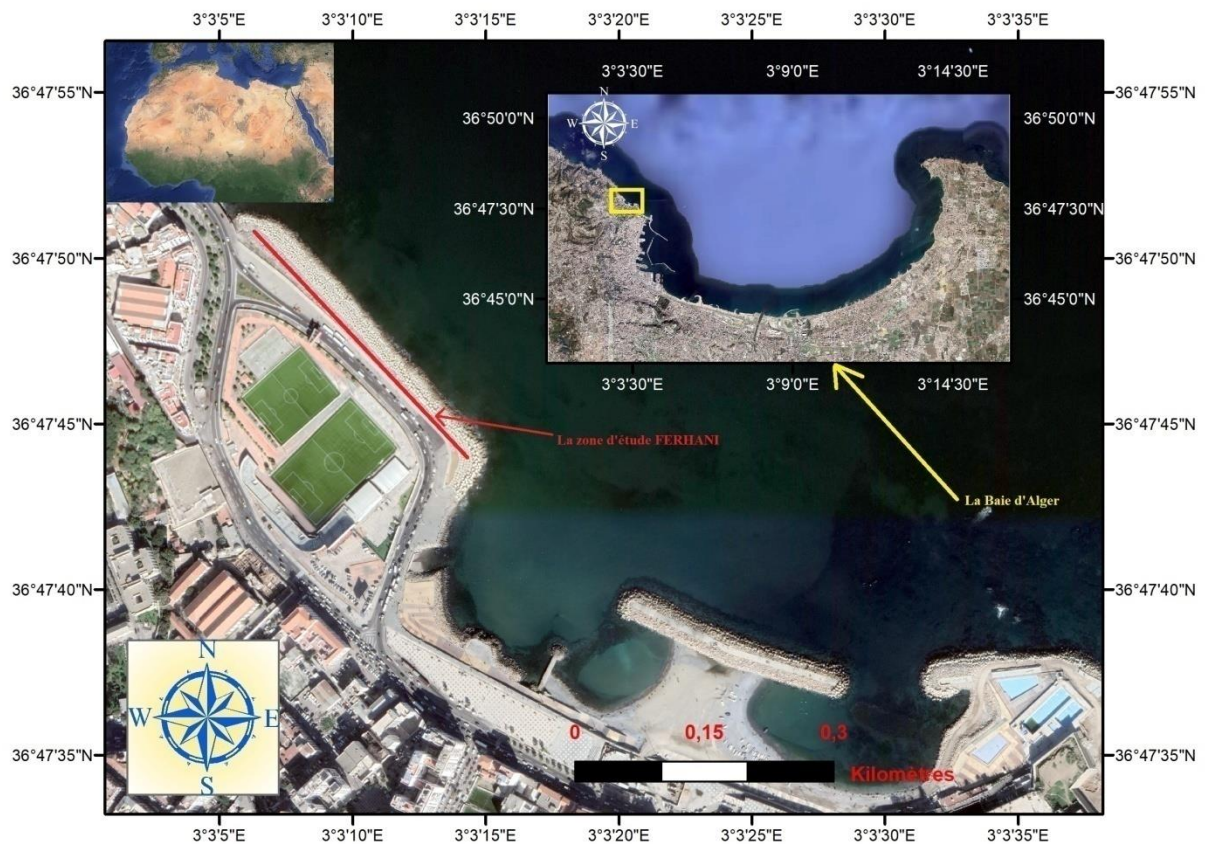


Figure 1 : La Zone d'étude Ferhani (Google Earth Pro 2021)

1.2 Caractéristiques géologiques et géomorphologique

1.2.1 Géologie régional

La géologie de la région algéroise connue sous le nom de massif d'Alger est constituée d'un socle métamorphique primaire, bordé de part et d'autre de dépôts sédimentaires du Sahel et de la Mitidja. La figure 2 permet de nous renseigner sur la géologie de la région d'Alger.

▪ Le Primaire

Les terrasses primaires forment les massifs d'Ain Benian, de Bouzareah (massif d'Alger) et ces prolongements vers Sidi Fredj à l'Ouest et Bordj El Bahri à l'Est en passant par notre zone d'étude *FERHANI Bab El Oued*. Ces massifs sont constitués de roches cristallophylliennes de nature pélitique et carbonatées (gneiss, schiste, calcaire) recoupées par des épisodes éruptifs d'âge tertiaire (Glangeaud, 1942).

- **Le Secondaire**

Plus connu dans la région blidéenne (atlas blidéen). Il ne touche pas la région d'Alger.

- **Le Tertiaire**

Marqué par le Miocène et le Pliocène qui recouvrent en discordance les faciès métamorphiques par des grès grossiers sableux et des marnes à lentilles de calcaires (**Glangeaud, 1942**).

- **Le Quaternaire**

Il comporte plusieurs faciès lithologiques d'origine marine et continentale (**Glangeaud et al, 1942**)

- Formation d'El Harrach (Villafranchien) représentée par des argiles marneuses jaunâtres et quelques lentilles de graviers ;
- Formation de la Mitidja (Tensiftien-Soltanien) représentée par des alluvions grossières provenant de l'érosion de l'atlas blidéen.
- Formation de Mazafran et Halloula (Flandrien-rharbien) représentée par des limons, argiles limoneuses et des galets provenant de l'atlas blidéen.

Les dépôts récents (Rharbien-Actuel) englobent les dépôts marins (lumachelles à pétoncles et des grès coquilliers) et les dépôts dunaires occupant la majeure partie du littoral algérois sous forme de dunes friables à consolidées.

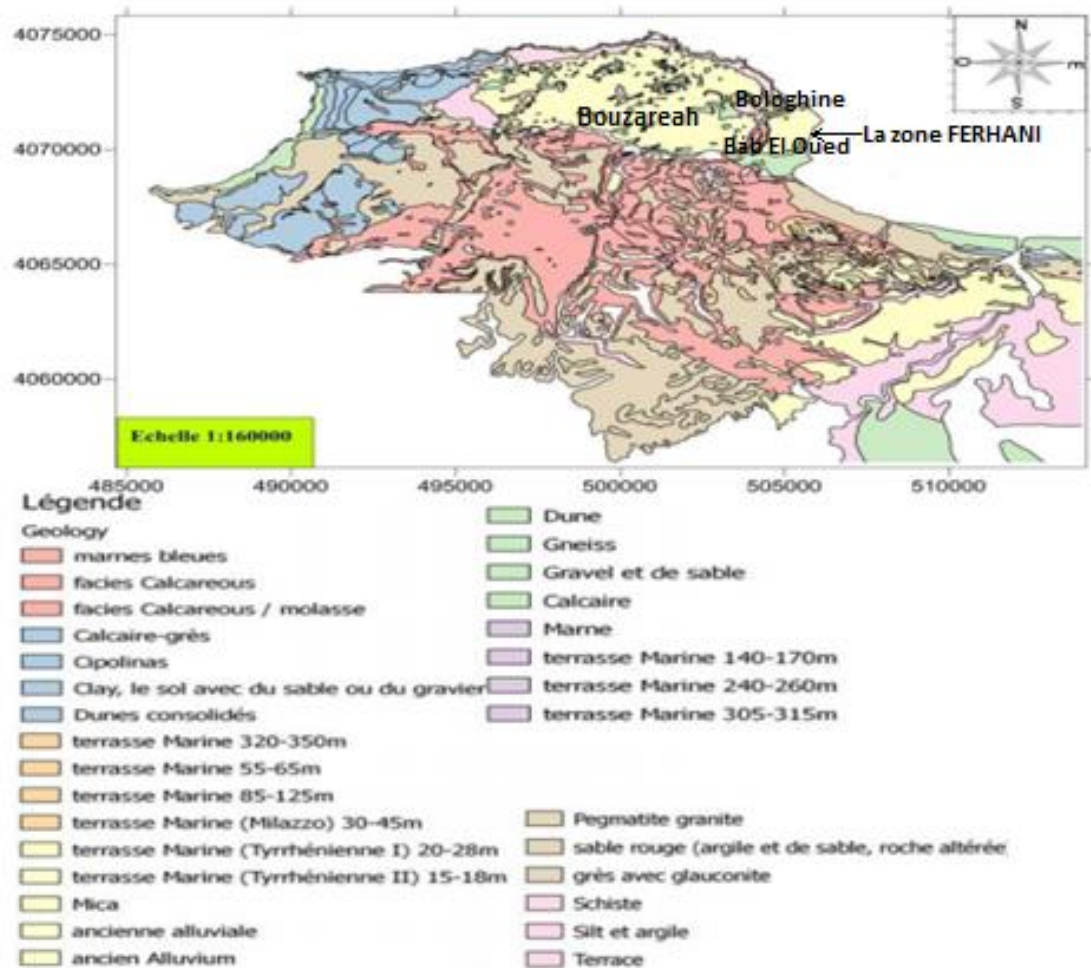


Figure 2: Carte géologique régionale de la zone algéroise (INCT, 2016).

1.3 Condition océanographique

1.3.1 Niveau marin

1.3.1.1 Marée

L'amplitude moyenne des marées astronomiques le long de la côte algérienne est de l'ordre de six (6) cm. Les variations du plan d'eau sont dues beaucoup plus à l'effet des vents (phénomène de seiche) qu'à l'attraction luni-solaire. Les variations journalières remarquées sur les côtes algériennes sont inférieures à dix (10) cm. La différence entre valeur maximale et valeur minimale de la marée ne dépasse pas 50 cm. (LEM, 1996).

1.3.1.2 Surcote

La surcote associée aux vagues est la hauteur moyenne d'un plan d'eau causée par le déferlement des vagues « Waves setup ». Cette élévation peut atteindre des dizaines de centimètres. Lors de la tempête anormale, la surcote dans la baie d'Alger était comprise entre 1,5m et 2m. **(LEM 2013)**

1.3.2 La houle

La surface de la mer présente généralement une suite indéfinie d'ondulations parallèles presque identiques qui se propagent de façon sensiblement uniforme vers le rivage. On appelle houle, cet ensemble d'ondulations ou de vagues **(Bonnefille, 1992)**.

Une analyse statistique des houles a été réalisée à partir de la base de données IOWAGA (Integrated OceanWaves for Geophysical and other Applications), développée par l'IFREMER **(Ardhuin et al. 2011)**. Ce modèle est basé sur une approche multi-échelles combinant plusieurs modèles hauturiers et une série d'emprises côtières.

Une grille globale de résolution 0.5° (~50 km) couvrant les années 1990 à 2018. Le modèle global est forcé avec les vents CFSR de 1990 à 2012 et ECMWF de 2013 à 2018 mais seuls les vents CFSR sont disponibles au téléchargement.

La position du point d'extraction est présentée ci-dessous (figure3). Il a été choisi de manière à être les plus proches des limites du modèle de propagation des houles qui sera mis en place.



Figure 3 : Carte de la localisation géographique du point de l'extraction (basemapArcgis, 2020)

L'analyse statistique des directions de houles au large nous a permis de tracer les roses mensuelles, trimestrielles et annuelles des houles (figure 4 à 9)

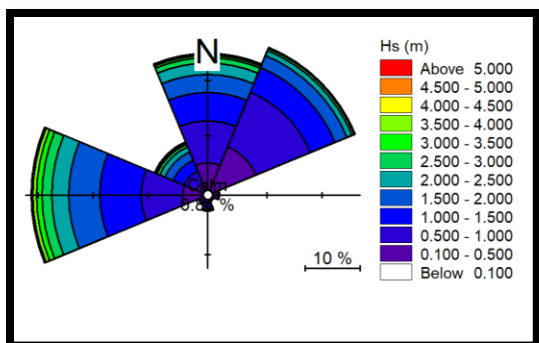


Figure 5: Rose des houles pour la saison Hivernale

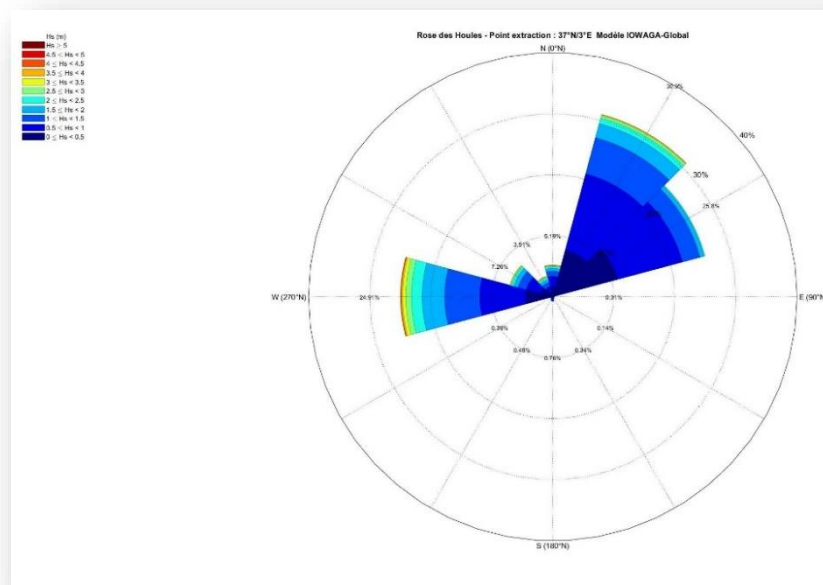


Figure 6: Rose des houles Annuelle 2018

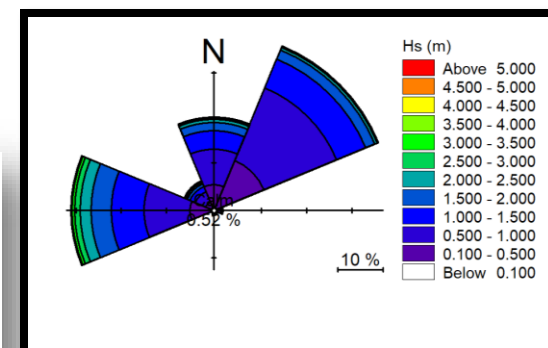


Figure 8 : Rose des houles pour la saison Printanière

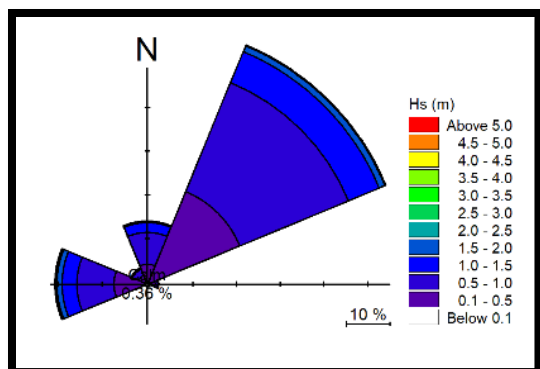


Figure 4 : Rose des houles pour la saison Estivale

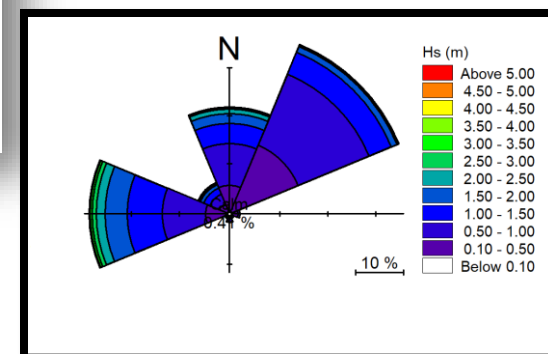


Figure 7: Rose des houles pour la saison Automnale

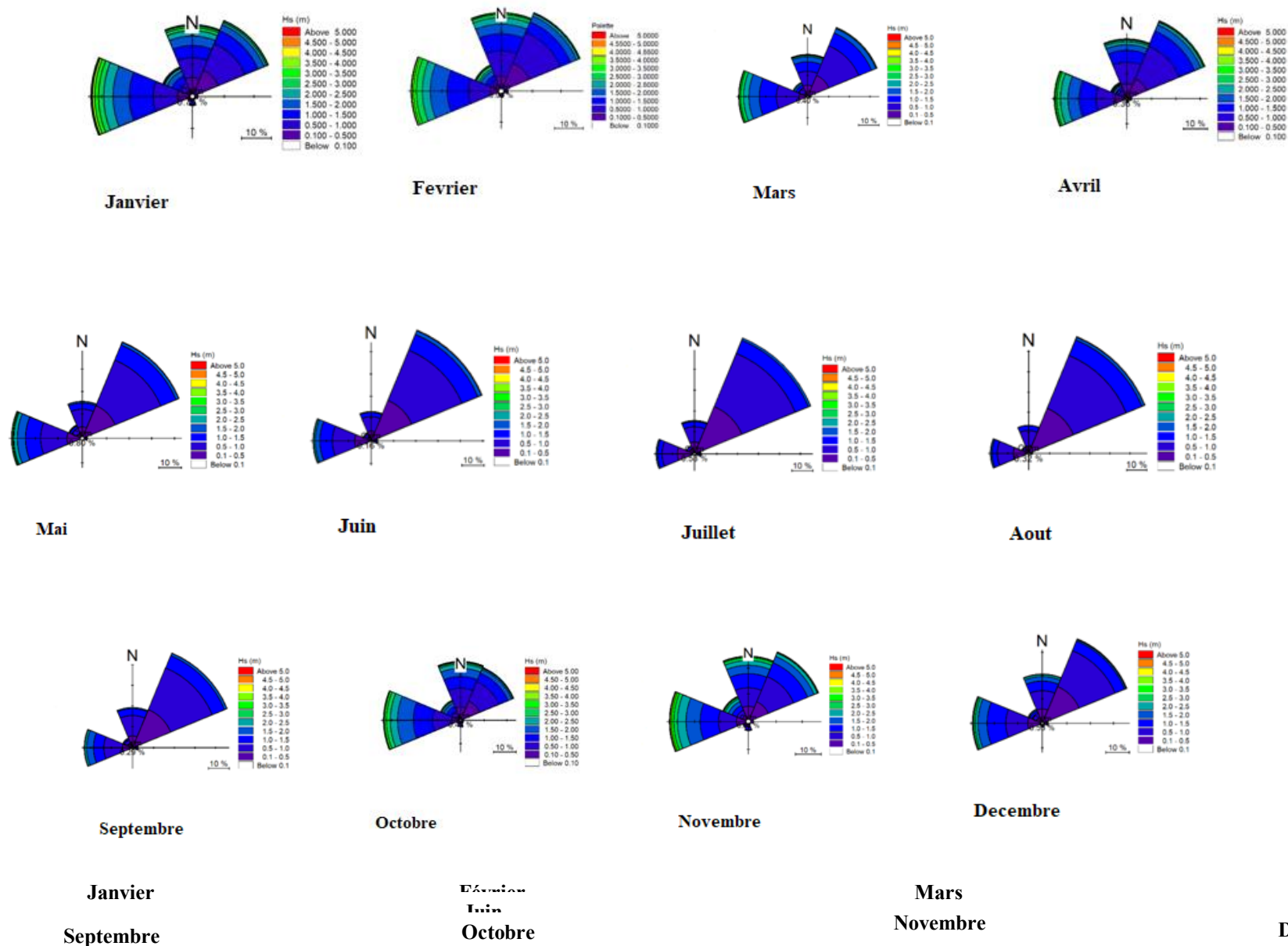


Figure 9: Rose des houles mensuelles (de janvier à décembre)

Tableau 1: Corrélogramme Dp/Hs pour le point IOWAGA : 37°N – 3°E

IOWAGA- Corrélogramme au point de coordonnées : 37°N 3°E

Dp (N)	0-0.5	0.5- 1	1-1.5	1.5- 2	2-2.5	2.5- 3 Hs (m)	3-3.5	3.5- 4	4-4.5	>=4.5	Total
>=345	295	437	284	187	107	34	24	16	9	5	1398
330-345	289	414	327	249	161	84	32	22	5	2	1585
315-330	307	422	288	188	96	53	33	15	4	3	1409
300-315	539	667	349	227	118	61	31	9	3	3	2007
285-300	1135	1477	831	396	193	96	36	11	1	2	4178
270-285	1931	3819	3162	1889	763	354	203	68	25	13	12227
255-270	1820	2622	1735	1253	718	440	219	134	37	23	9001
240-255	83	86	15	13	6	1	1	0	0	0	205
225-240	81	43	4	0	0	0	0	0	0	0	128
210-225	94	67	8	0	0	0	0	0	0	0	169
195-210	121	102	12	1	0	0	0	0	0	0	236
180-195	126	201	43	2	0	0	0	0	0	0	372
165-180	99	132	46	1	0	0	0	0	0	0	278
150-165	74	78	15	1	0	0	0	0	0	0	168
135-150	54	57	7	0	0	0	0	0	0	0	118
120-135	45	25	0	0	0	0	0	0	0	0	70
105-120	35	15	2	0	0	0	0	0	0	0	52
90-105	43	15	0	0	0	0	0	0	0	0	58
75- 90	131	62	15	0	0	0	0	0	0	0	208
60- 75	4052	2514	551	114	29	6	4	0	0	0	7270
45- 60	5311	6845	1986	458	87	19	7	1	0	0	14714
30- 45	2691	3962	1594	429	83	31	9	3	0	0	8802
15- 30	4087	7013	3641	1618	696	289	105	40	19	20	17528
0- 15	1048	1062	441	210	129	74	34	18	5	6	3027
Total	24491	32137	15356	7236	3186	1542	738	337	108	77	85208

Tableau 2: Corrélogramme Tp/Hs pour le point IOWAGA : 37°N – 3°E

IOWAGA- Corrélogramme au point de coordonnées : 37°N 3°E

>=18	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
16-18	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23
14-16	46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46
12-14	120	0	5	21	15	17	7	4	2	4	195
10-12	85	176	440	359	203	129	67	41	32	48	1580
8-10	343	2437	2109	1271	858	694	565	291	74	25	8667
6-8	3205	9440	6552	4719	2094	701	99	1	0	0	26811
4-6	12323	16610	6232	866	16	1	0	0	0	0	36048
2-4	8163	3474	18	0	0	0	0	0	0	0	11655
0-2	173	0	0	0	0	0	0	0	0	0	173
Total	24491	32137	15356	7236	3186	1542	738	337	108	77	85208
	0-0.5	0.5- 1	1-1.5	1.5- 2	2-2.5	2.5- 3 Hs (m)	3-3.5	3.5- 4	4-4.5	>=4.5	Total

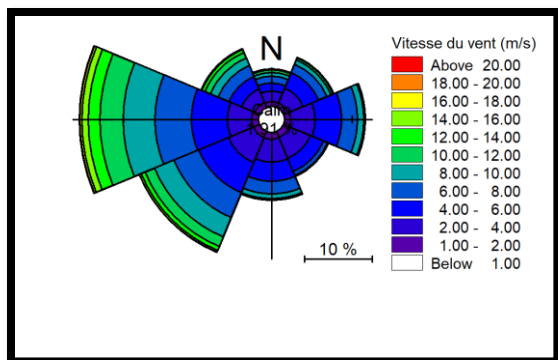


Figure 12: Rose des houles pour la saison Hivernale

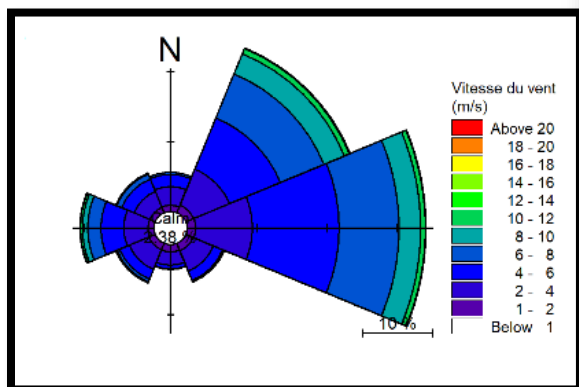


Figure 11 : Rose de vent pour la saison Estivale

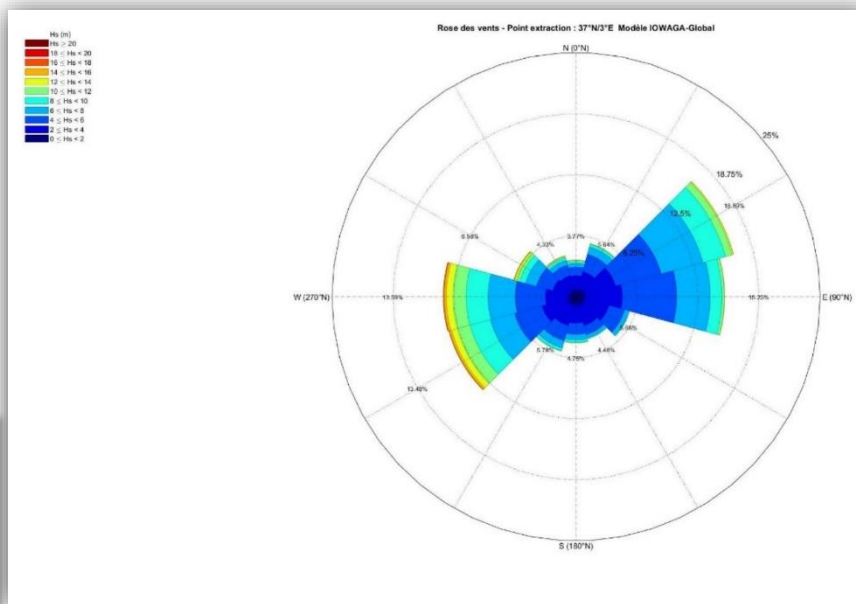


Figure 10: Rose des vents annuelle 2019

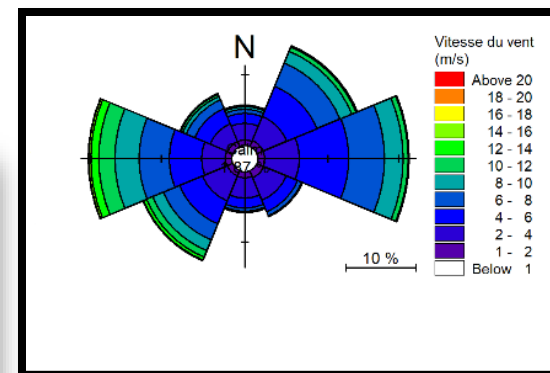


Figure 14: Rose des houles pour la saison Printanière

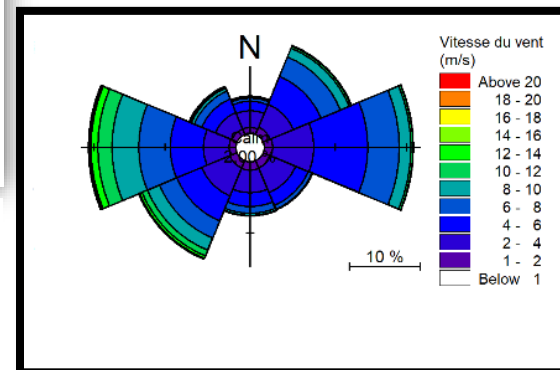
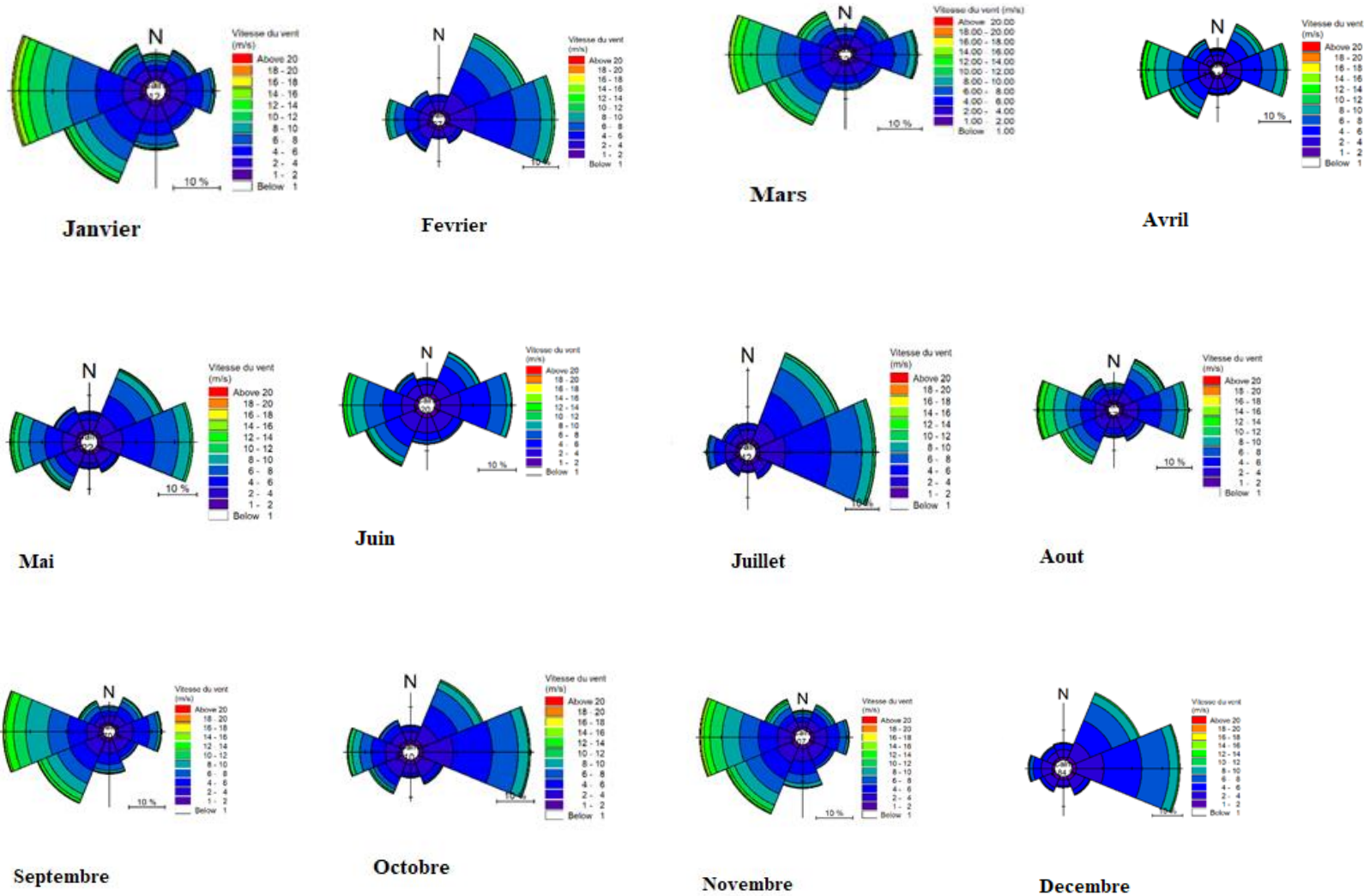


Figure 13: Rose des vents pour la saison Automnale



Février
 Figure 15: Roses des vents mensuelles mensuelles (de janvier à décembre)
 Avril

Tableau 3: Corrélogramme Vitesse de vent/Direction de Vent pour le point IOWAGA : 37°N – 3°E

IOWAGA- Corrélogramme au point de coordonnées : 37°N 3°E

Wind speed (m/s)	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150	150-160	160-170	170-180	180-190	190-200	200-210	210-220	220-230	230-240	240-250	250-260	260-270	270-280	280-290	290-300	300-310	310-320	320-330	330-340	340-350	>=350	Total
>=18	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	5	6	4	1	1	2	0	3	0	1	0	28
16-18	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	18	22	20	18	8	5	0	6	3	0	0	0	108
14-16	4	2	1	2	4	3	14	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	24	85	119	69	34	18	11	10	10	3	4	1	3	429
12-14	6	12	6	4	8	21	50	15	9	2	2	1	1	0	0	2	6	5	1	1	2	17	132	315	265	200	112	53	39	20	28	19	3	3	10	1370	
10-12	16	27	19	19	25	129	243	149	60	17	4	4	0	2	0	3	13	23	25	5	6	15	54	235	840	604	556	343	268	82	72	44	75	12	17	17	4023
8-10	32	36	46	59	121	488	666	582	313	115	39	18	13	10	14	27	38	82	71	34	41	76	326	644	735	759	727	494	238	204	97	177	109	38	41	80	7590
6-8	128	84	117	276	507	928	1029	1120	844	577	222	136	72	58	72	94	120	150	274	144	213	243	670	860	1018	1459	956	860	429	304	234	233	151	143	76	121	14920
4-6	223	255	371	507	687	889	1131	1363	1291	1179	837	507	331	312	261	230	286	408	434	391	601	936	736	840	942	982	958	808	695	450	438	348	289	238	199	192	21545
2-4	386	353	488	431	547	651	678	874	787	1027	877	829	588	551	659	537	655	498	861	588	697	754	591	733	815	701	685	679	617	442	451	442	379	326	423	275	21875
0-2	206	180	201	173	221	181	232	250	146	252	200	176	210	310	215	206	262	238	238	294	179	247	221	161	223	258	102	229	165	137	156	149	154	148	195	109	7224
Total	1002	949	1249	1471	2121	3292	4044	4356	3452	3171	2181	1671	1215	1243	1221	1097	1376	1405	1908	1457	1738	2274	2618	3633	4990	5174	4279	3581	2492	1675	1480	1437	1185	912	956	807	79112

1.3.2.1 Interprétations des roses de houles

On distingue deux parties principales de direction de provenance de la houle annuelle : Le Secteur Ouest (24.91%) et Nord-Est (30.9%), avec des hauteurs significatives variant entre 3,5 et 4 m

Pendant la période estivale La direction Nord-Est est la plus fréquemment observée (54%) avec des houles plus calme de pas plus de 2 m se produit pendant "Juin, Juillet et Août".

Pendant la période hivernal il y'a une apparition des houles de tempêtes avec des hauteurs maximales de plus de 4,5 m se produisent en Janvier et Décembre, se dirigeant vers l'ouest (33%), le nord (24%) et le nord-est (28%).

Pour les périodes printanière et automnale les deux directions dominantes sont celles du Ouest (30%) et Nord-Est (34%) ont une hauteur significative oscille entre 3 et 3.5 m et elles apparaissent davantage en Mars et Novembre.

1.3.2.2 Données de vent

Le vent joue un rôle important dans la dynamique des eaux de surface, et ils génèrent des houles et des courants d'eau de surface. Selon les coordonnées géographiques (37°N, 37°E).

1.3.2.3 Interprétations des roses des vents

Les résultats de l'analyse de la corrélation du vent de 1990 à 2019 (vent horaire à 10 mètres, moyenné sur 1h, IOWAGA_Global) au point situé en Méditerranée selon les cordonnées géographique (37°N, 3°E), mettent en évidence les répartitions suivantes :

Une importante dominance des vents venant des directions Est-Nord-Est et Ouest-Sud-Ouest, avec des vitesses qui atteignent 18 m/s selon les directions comprises entre 240° et 280° N. Pour les directions entre 45°et 100° N les vitesses maximales des vents qui atteignent 16m/s.

On remarque 16,56% d'apparition des vents de secteur Ouest-sud-ouest et 19,32% d'apparition des vents de secteur Est-Nord-Est.

Dans la saison hivernal on a l'apparition des vents les plus violents aux mois de décembre et janvier, les vents soufflent principalement depuis le secteur Ouest. Cette période est caractérisée par des vents de tempête avec des vitesses entre 16 et 18 m/s.

Hors en été c'est les vents Est-Nord-Est qui soufflent avec des vitesses qui ne dépassant pas les 12 m/s.

Pendant les autres périodes de l'année les vents apparaissent dans deux secteurs dominants (ENE et WSW) avec des vitesses ne dépassent pas 24 m/s.

1.3.2.4 Conditions extrêmes au large de la baie d'Alger

1.3.2.4.1 Estimation statistique des événements extrêmes de houle

Il existe généralement trois façons de définir la valeur de l'ensemble de données utilisé pour l'estimation statistique des événements :

1. Utiliser toutes les données disponibles dans la méthode de distribution initiale (ID) ;
2. Dans la méthode Peaks Over Threshold (POT), seule la valeur maximale au-dessus d'un certain seuil est utilisée.
3. Utilisez la valeur maximale de chaque année dans la méthode Maximum Year (MA).

L'un des avantages de la méthode 3 par rapport à la méthode 1 est que les valeurs utilisées dans ces méthodes sont statistiquement indépendantes car elles sont (généralement) éloignées dans le temps. Un ajustement de distribution approprié est effectué sur les données sélectionnées, car les valeurs extrêmes nécessaires (par exemple, Hs avec une période de retour de 100 ans) sont généralement en dehors de la plage d'observations, une extrapolation est donc nécessaire pour les déterminer.

Chacune des trois méthodes mentionnées a sa propre distribution : si la valeur extrême est déterminée par:

1. L'approche ID, deux distributions largement utilisées sont la distribution log-normale et la distribution de Weibull
2. La valeur maximale déterminée par la méthode (3), distribution asymptotique (distribution de Pareto généralisée ou GPD).
3. La valeur maximale déterminée par la méthode (3) est distribuée selon la distribution des valeurs extrêmes généralisées (VGE).

Afin d'étudier les conditions nominales extrêmes, la méthode POT est appliquée aux séries chronologiques de données de vagues horaires à des points IOWAGA sélectionnés. Afin d'obtenir des conditions plus réalistes, le secteur directionnel a été affiné. Le choix du seuil représente un compromis entre biais et variance : choisir un seuil trop bas risque de violer la base asymptotique du modèle, conduisant à un biais ; un seuil trop élevé produira moins de surestimation du modèle, conduisant à une variance élevée . Une propriété importante de la

méthode POT/GPD est la propriété de stabilité du seuil : si GPD est un modèle raisonnable à travers les seuils, alors GPD doit également être appliqué pour des seuils plus élevés ; deux GPD ont les mêmes paramètres de forme et leurs paramètres d'échelle ont une relation simple. Cette fonctionnalité de GPD est utilisée pour trouver le meilleur seuil pour ajuster le modèle GPD aux données.

Les échantillons utilisés dans la méthode POT doivent provenir de la série chronologique d'origine afin qu'ils puissent être modélisés comme des observations indépendantes.

Ceci est accompli par un processus de désagrégation uniquement dans les observations de pointe dans des groupes successifs d'un seuil spécifié sont retenus et parmi ceux-ci, des groupes qui sont, en un sens, suffisamment éloignés pour être observés sont considérés comme appartenant à l'ensemble des points POT.

Dans la présente demande, nous avons eu affaire à des maxima de cluster à des distances inférieures à 48h lorsqu'ils appartiennent à un même cluster.

Cette période de 48h correspond à la durée maximale de la tempête dans les données.

Il existe plusieurs méthodes pour estimer les paramètres GPD. Pour le type de données que nous souhaitons rapporter, la méthode des moments pondérés par les probabilités (PWM) représente un choix adéquat. Afin de fournir des bandes de confiance asymétriques fiables, la méthode de PWM a été combinée avec des estimations Bootstrap ajustées pour le calcul des intervalles de confiance. Plus d'information est disponible sur la méthodologie dans les publications de S. Caires (Os, Caires, Gent 2011).

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

Les échantillons POT de maxima de tempête sont collectés à partir de la série chronologique d'origine en utilisant différentes valeurs seuils.

Pour chaque échantillon POT, les paramètres GPD et leurs incertitudes sont estimés.

Sur la base de la variation des estimations des paramètres de forme avec le seuil, le seuil optimal est choisi. En définissant ce seuil, les estimations des valeurs de retour définies.

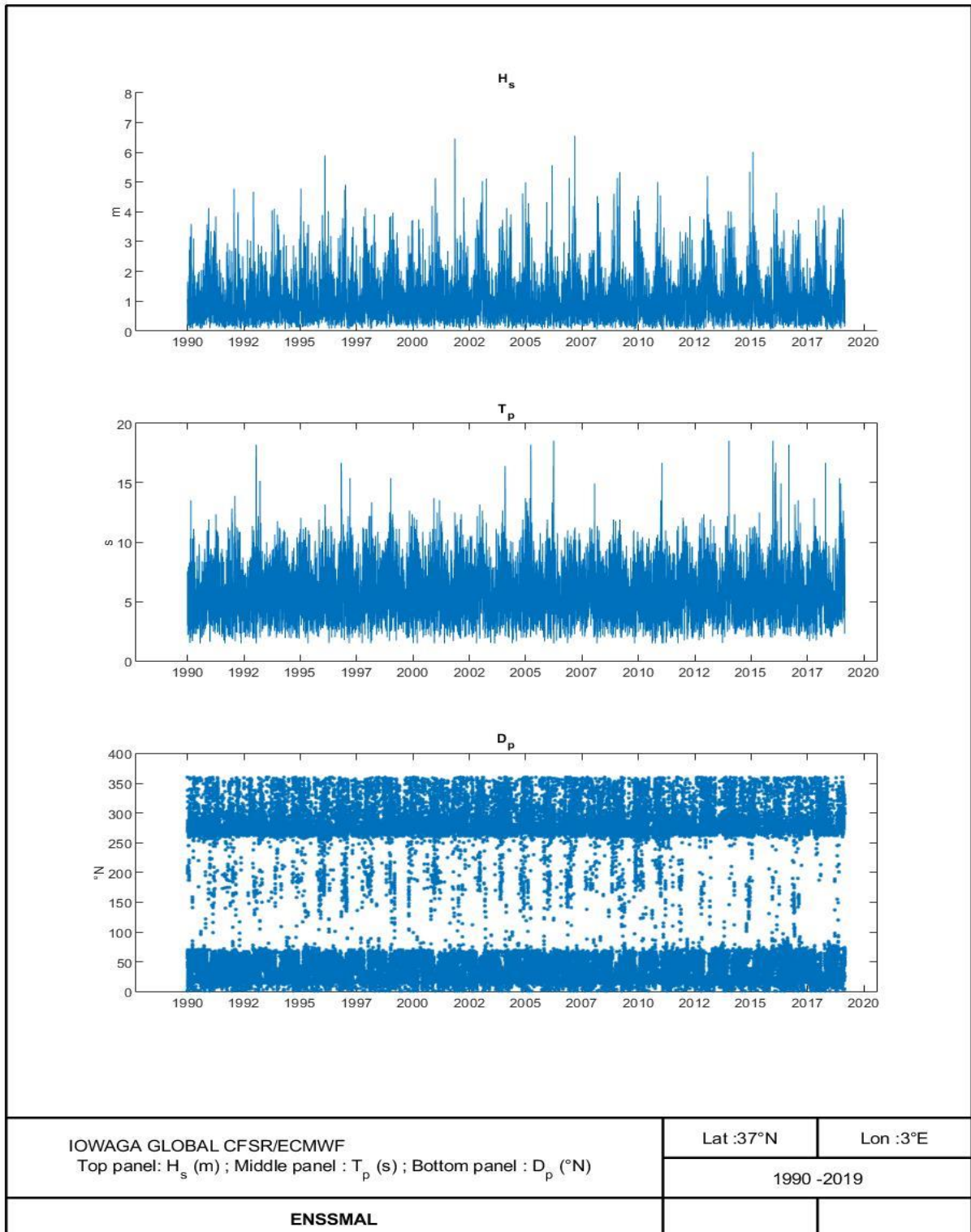


Figure 16: Série temporelle des paramètres de houle – IOWAGA 1990-2018

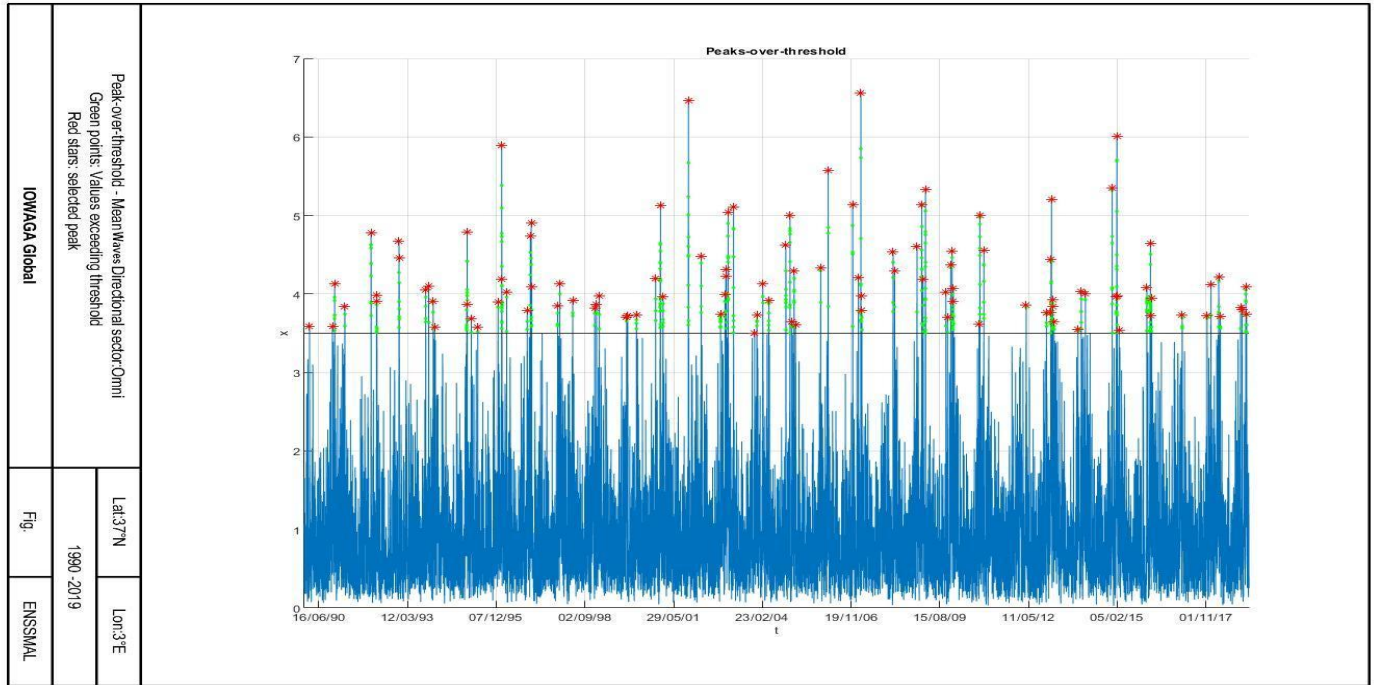


Figure 17: Les valeurs retenues pour le calcul des extrêmes – Secteur Omnidirectionnel

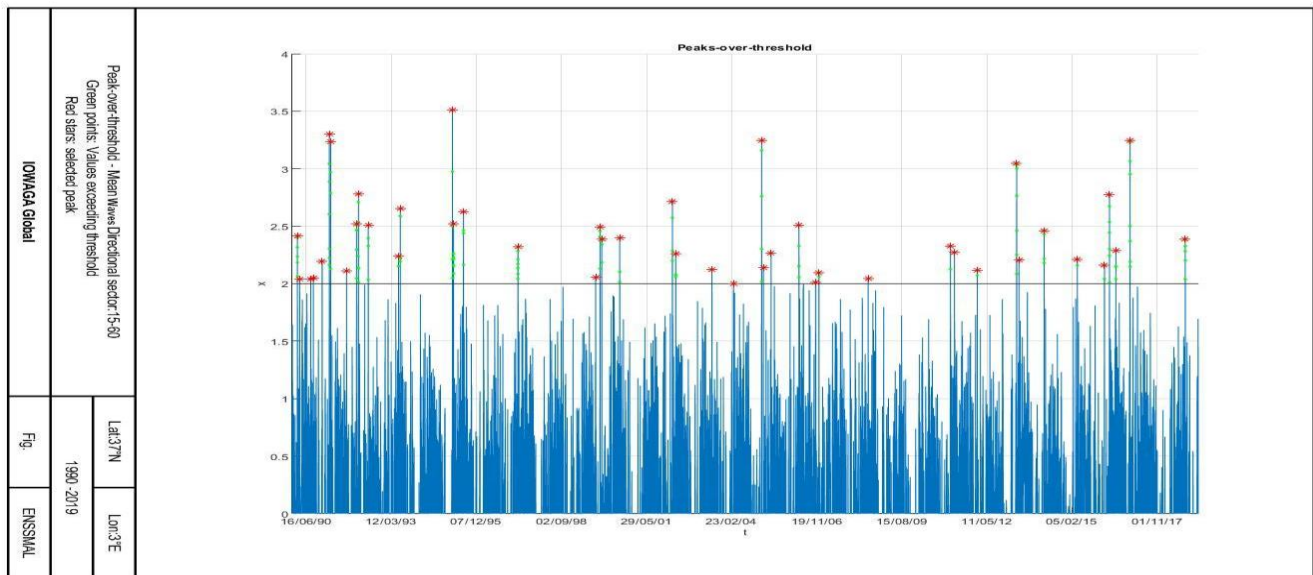


Figure 18: Les valeurs retenues pour le calcul des extrêmes – Secteur 15-60°N

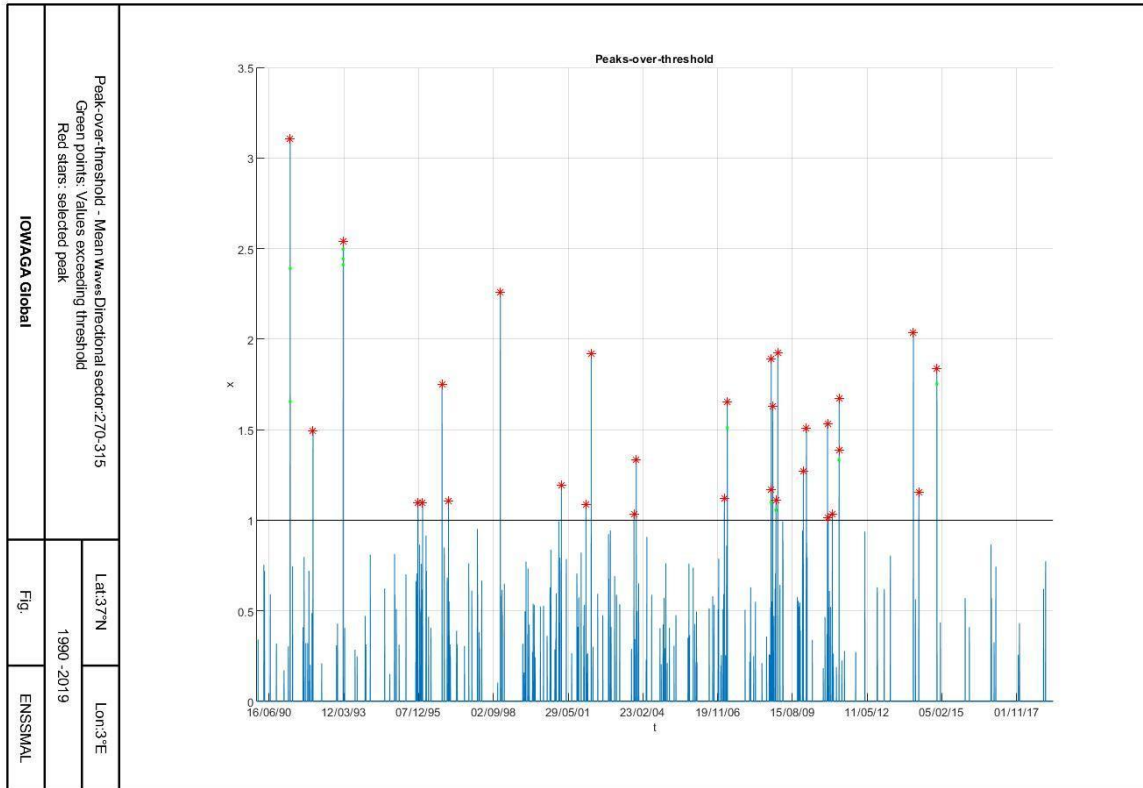


Figure 19: Les valeurs retenues pour le calcul des extrêmes – Secteur 270-315°

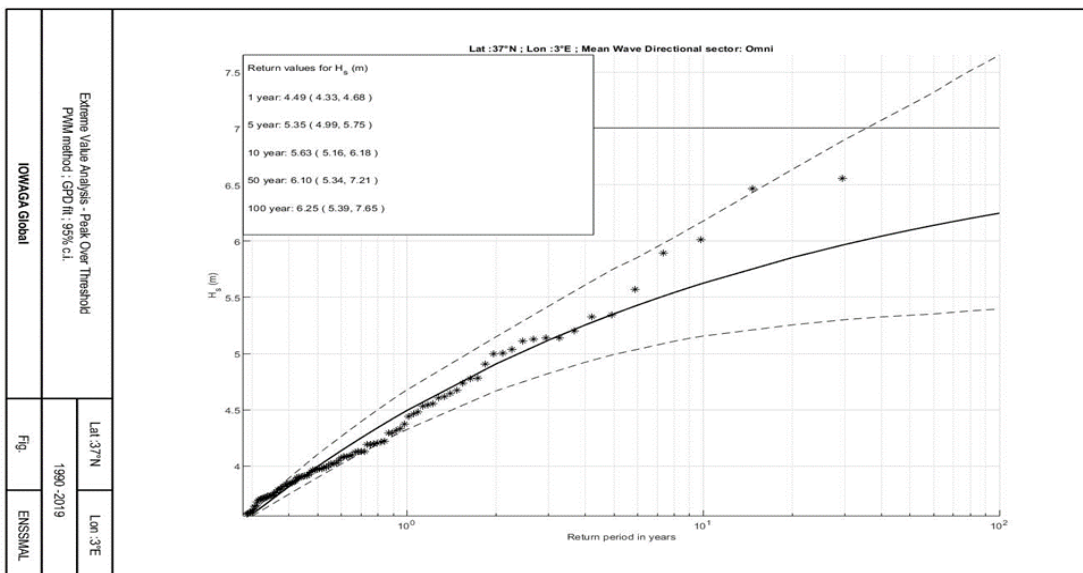


Figure 20: Extrapolation statistique des valeurs extrêmes des hauteurs de houle – Secteur omnidirectionnel

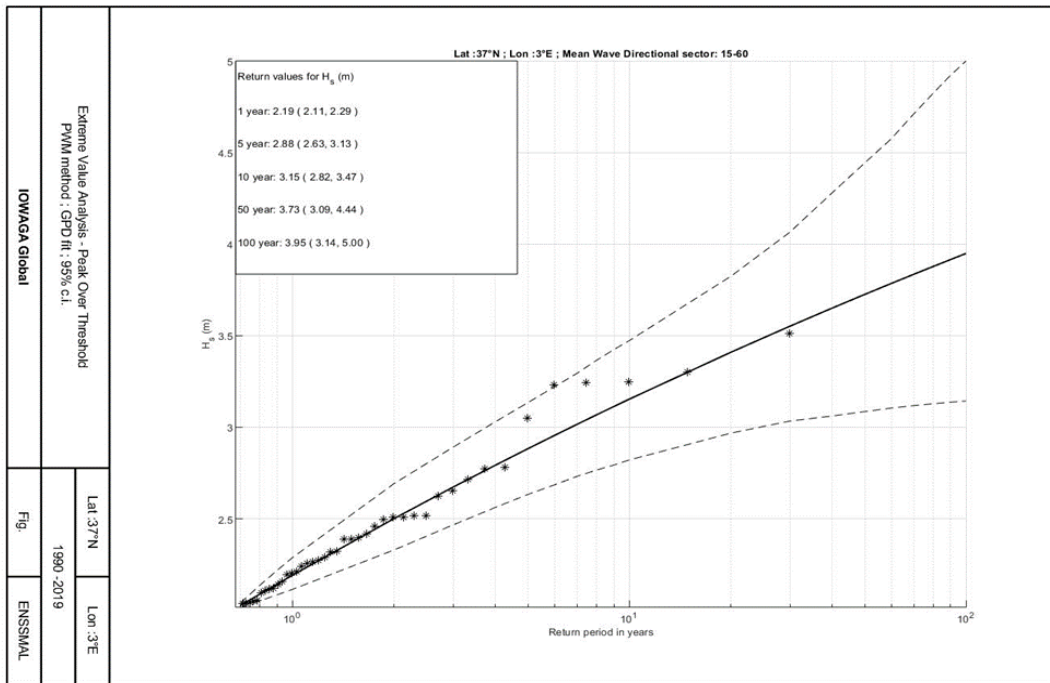


Figure Figure 21: Extrapolation statistique des valeurs extrêmes des hauteurs de houle-Ajustement réalisé pour le secteur 15-60°N

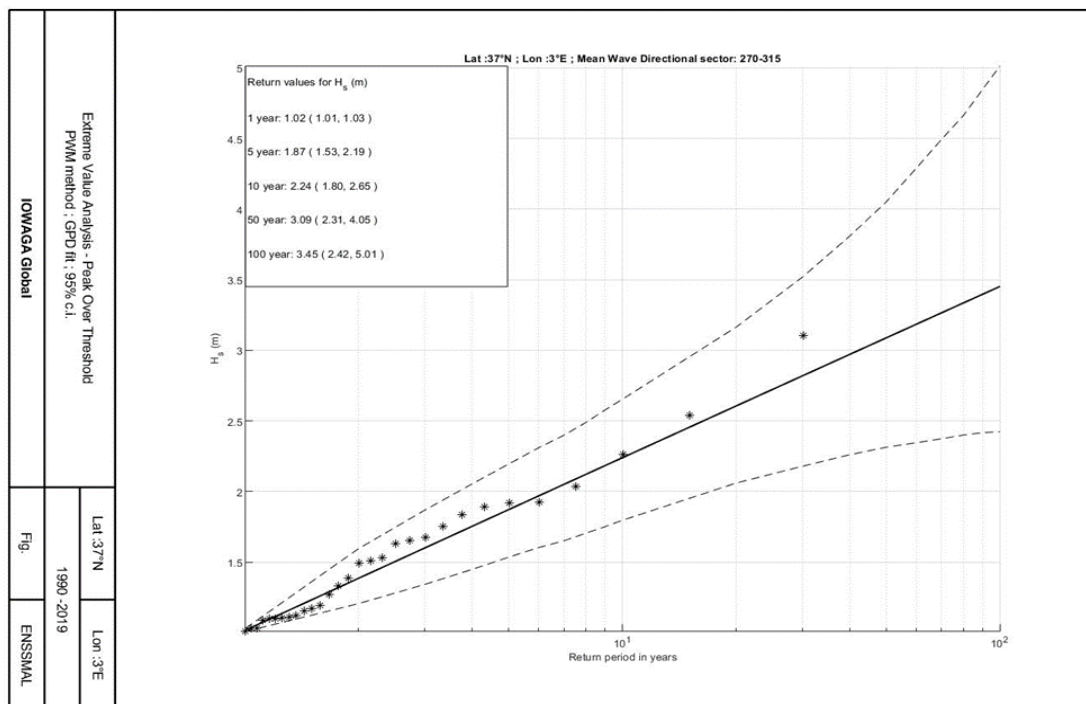


Figure 22: Extrapolation statistique des valeurs extrêmes des hauteurs de houle – Ajustement réalisé pour le secteur 270-315°N

1.3.2.4.2 Interprétation des résultats :

Tout spectre a une valeur de seuil qui représente au-dessus de cette valeur les houles de pic ‘les houles extrêmes’ pour toutes les directions de 1990 jusqu’à 2017.

Il y a une tempête de 6.6m en 2006 pour l’omnidirectionnelle

Par rapport aux deux directions du Nord-Est et Nord-Ouest nous avons durant les années 1995 et 1991 des tempêtes de 3.5 et 3.2m respectivement

A la fin nous avons les courbes semi-logarithmiques (hauteurs significatives en fonction de la période de retour) représentent juste les valeurs au-dessus de la ligne de seuil (donc juste les valeurs du pic) pour les trois spectres (les périodes des retours sont d’une année jusqu’à centennal).

Par rapport l’omnidirectionnelle, sur cette direction la hauteur significative est variée entre 4,49 <math><H_s< 6,25\text{ m}</math>. **Fig20.**

La courbe qui représente la direction Nord-Est, sur cette direction la hauteur significative est variée entre 2,19 <math><H_s< 3,95\text{ m}</math>. **Fig21.**

La courbe qui représente la direction Nord-Ouest, la hauteur significative est variée entre 10,2 m <math><H_s< 3,45\text{ m}</math>. **Fig22.**

1.3.2.5 Étude granulométrique

L'étude des sédiments superficiels a pour objectifs la caractérisation des matériaux meubles pour permettre d'apporter des indications sur la répartition spatiale de ces sédiments et le climat de leur dépôt qui est défini comme l'ensemble des relations qui s'établissent entre les agents susceptibles d'entraîner la mise en place des particules (agents du transport et du dépôt: houles, courants). De même, cette étude sert comme données d'entrée à d'autres modèles et permet aussi la connaissance de la nature des fonds lors des travaux sur site.

1.3.2.6 Matériel et méthode

1.3.2.6.1 Techniques d'échantillonnages

La campagne d'échantillonnage des sédiments de surface couvrant l'ensemble de la zone d'étude, a été effectuée par le LEM durant le mois de Mai 2020 (**LEM, 2020**). Pendant cette campagne, le prélèvement durant le mois de Mai 2020. Pendant cette campagne, le prélèvement de 50 échantillons de sédiments marins a été programmé. Toutefois, 13 prélèvements n'ont pu être effectués pour cause de la nature rocheuse des fonds.

1.3.2.6.2 Méthodologie

Le positionnement sur les stations de prélèvements d'échantillons est réalisé à l'aide du GPS de navigation, suivant des coordonnées prédéfinies.

Les prélèvements sont avec une benne de Type VAN VEEN

Les échantillons destinés à l'analyse granulométrique sont stockés dans de petits sacs en plastique, étiquetés et numérotés.

Des fiches techniques renseignant sur la nature du fond, la couleur du sédiment ainsi que l'odeur de l'échantillon sont notés pour chaque point

ECHANTILLON N° 3

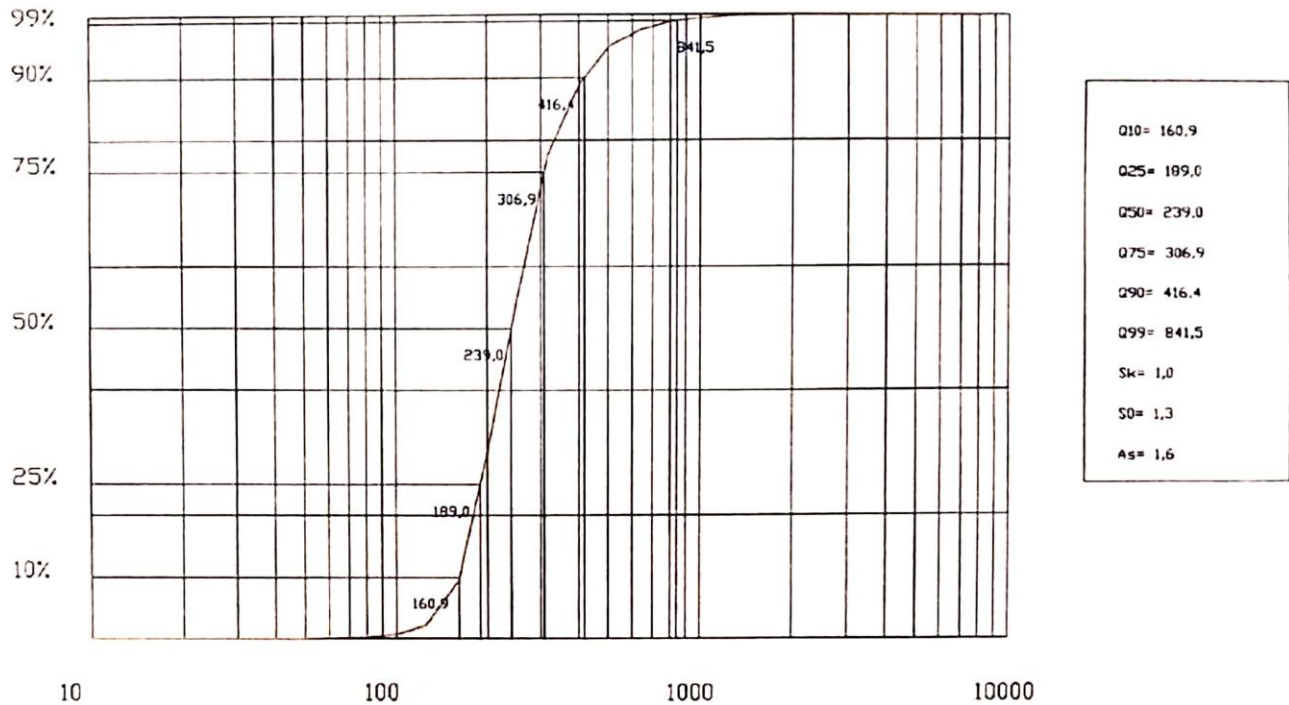


Figure 23 : Modèle d'une courbe granulométrique avec les principaux indices pour le site du stade Ferhani (LEM, 2020)

- Calcul du diamètre moyen (D_{n50})

En projetant sur la courbe, on a $\phi_{50} = 239$ pour 50 %

$$\phi_{50} = -\text{Log}_2 \cdot D_{n50} \quad (1)$$

On a :

$$\text{Log}_2(x) = \frac{\text{Log}_{10}(x)}{\text{Log}_{10}(2)} = \frac{\text{Ln}(x)}{\text{Ln}(2)} \quad (2)$$

$$-\text{Log}_2(x) = \frac{\text{Ln}(2)}{\text{Ln}(x)} \quad (3)$$

$$-\text{Log}_2(D_{n50}) = \frac{\text{Ln}(2)}{\text{Ln}(D_{n50})} \quad (4)$$

$$\phi_{50} = \frac{\text{Ln}(2)}{\text{Ln}(D_{n50})} \quad (5)$$

$$239 = \frac{\text{Ln}(2)}{\text{Ln}(Dn_{50})} \quad (6)$$

$$\text{Ln}(Dn_{50}) = \frac{\text{Ln}(2)}{239} \quad (7)$$

$$\text{Ln}(Dn_{50}) = 0.0029 \quad (8)$$

$$Dn_{50} = e^{0.0029} \quad (9)$$

$$Dn_{50} = 1.002 \text{ mm} \quad (10)$$

Et donc le diamètre moyen $Dn_{50} = 1.002 \text{ mm}$

1.3.2.6.3 Les paramètres de dispersion

Le plus ou moins bon classement d'un échantillon peut être connu en observant la pente de la courbe cumulative ou l'étalement de la courbe de fréquence.

Des indices permettent de mesurer ce classement, parmi eux :

- L'indice de Trask ou Sorting-Index So.
- L'indice d'asymétrie Sk.

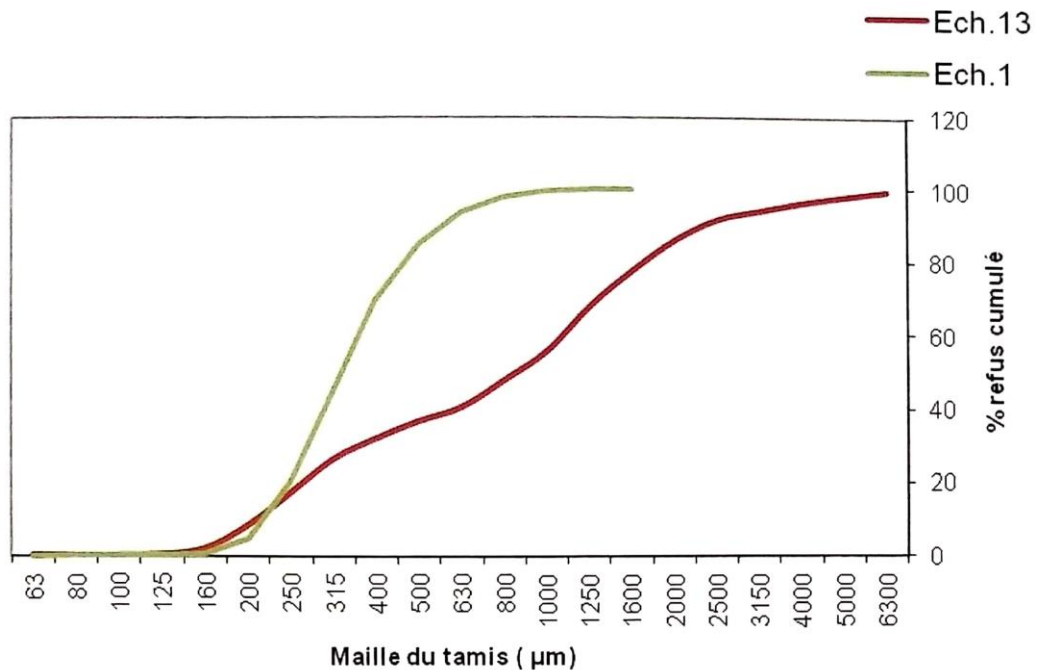


Figure 24 : Allures des courbes cumulatives de deux échantillons témoins, (LEM, 2020)

1.3.2.6.4 Teneur et répartition de la fraction fine

La considération de la teneur en fraction fine (<50µm) est importante car elle peut mettre en évidence des aires préférentielles de dépôt.

La totalité des échantillons présente de faibles teneurs en cette fraction. Celles ci sont comprises entre 0 et 4 %. Ce faible pourcentage indique que les sédiments dans la zone sont en perpétuels remaniements.

1.3.2.6.5 Indice de classement de TRASK So

Il permet de rendre compte de l'intensité du triage du sédiment .Il mesure les écarts granulométriques entre les poids symétriques (en pourcentage) par rapport à la médiane et exprime donc la dispersion du sédiment entre Q75 et Q25

$$So = \sqrt{(Q75/Q25)}$$

Les limites utilisées sont :

1 < So < 1.5 le sédiment est très bien classé

1.5 < So < 2.5 le sédiment est bien classé

2.5 < So < 3 le sédiment est normalement classé.

3 < So < 4 le sédiment est faiblement classé.

So > 4 le sédiment est mal classé.

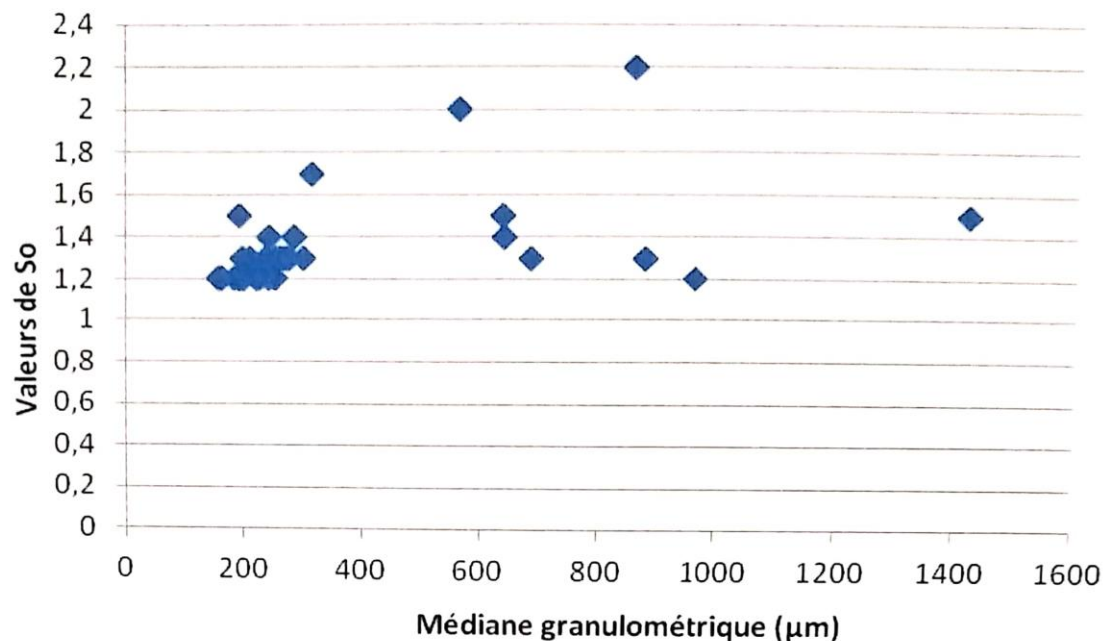


Figure 25 : Indice de classement So pour le site de stade Ferhani (LEM, 2020)

Les valeurs de S_o sont toutes comprises entre 1 et 2.2 ce qui révèle que les sédiments sont très bien à bien classés selon la classification de Folk, 1966 (voir Figure 25). Ceux ci montrent que le courant est régulier

1.3.2.6.6 Indice d'ASYMETRIE (SKEWNESS) SK

Cet indice indique le tri du sédiment par rapport à la médiane.

Il décrit l'aspect des représentations graphiques du fait qu'on peut caractériser de manière relative la prédominance des sédiments fins ou des sédiments grossiers dans un échantillon. Il est défini par la formule suivante :

$$SK = D_{75} \times D_{25} / (D_{50})^2$$

Le SK montre l'état d'évolution du sédiment vis-à-vis des conditions dynamiques au moment du dépôt

Si SK est égal à 1, le tri est régulier dans la médiane. Il existe une symétrie de la courbe par rapport au grain moyen.

Si SK est supérieur à 1, la courbe est dissymétrique avec un décalage et un tri maximum du côté de la fraction fine (inférieur à la médiane). La dispersion est plus large du côté grossier.

Si SK est inférieur à 1, le tri est maximum dans la fraction grossière (supérieur à la médiane). La dispersion est large du côté fin.

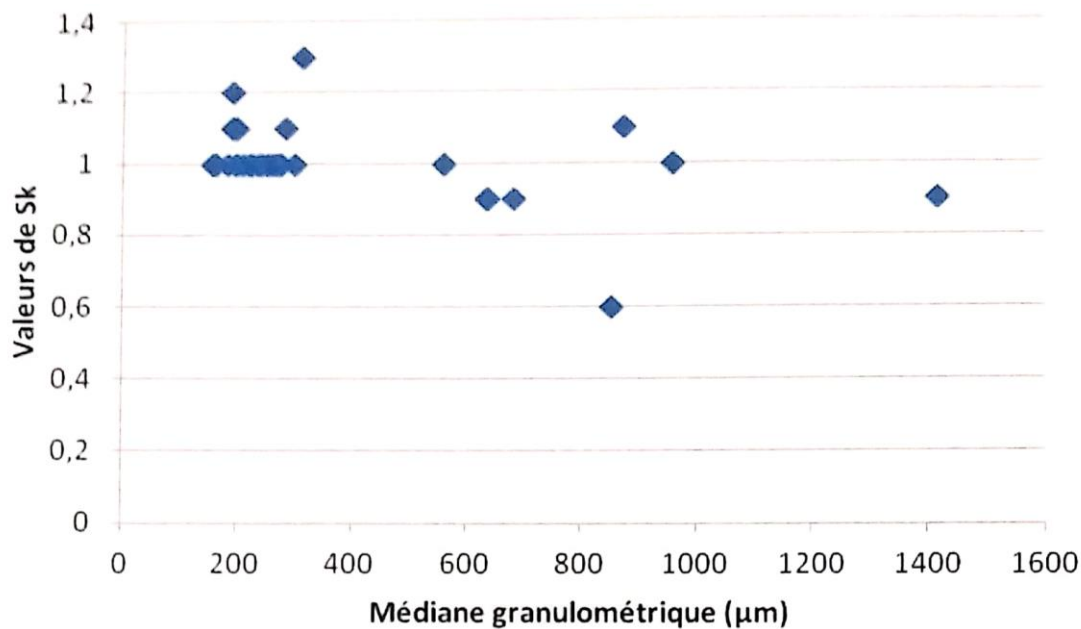


Figure 26 : Indice d'asymétrie SK pour le site de stade Ferhani (LEM, 2020)

Les valeurs de cet indice sont pour la majorité des échantillons égales à 1 (voir Figure 26). Les sédiments présentent un même classement aussi bien du côté fin que du côté grossier, donc une répartition symétrique qui correspond à un bon classement (Folk 1966). Ce qui indique que le courant est modéré.

Quelques échantillons présentent des valeurs supérieures ou inférieures à 1. Donc une dispersion plus large du côté grossier ou fin.

La composition des sédiments est représentée par un sable de diamètre médian D_{50} 0.357 mm, d'écart type δg 2.63 et de porosité 0.4.

Chapitre II : Étude hydrodynamique et la réalisation de simulation

1. Introduction

L'interaction de divers facteurs hydrodynamiques entre le vent, la houle et le courant engendrent une mobilisation des quantités considérables de sable qui se déplace de la côte vers la haute mer, ce qui contribue efficacement dans l'évolution des rivages. L'estimation du transport sédimentaire doit être basée sur l'analyse de l'évolution du trait de côte qui prend en compte les conditions de houle et de marée de la zone d'étude comme données de base pour cette étude hydro-sédimentaire, une carte bathymétrique est toujours essentiel. L'objectif principal de ce chapitre est d'étudier la zone dans un laps de temps précis en appliquant un modèle numérique calibré par les données acquises au niveau de la station de mesure afin de donner quelques éléments de réponses aux questions posées qui est de déterminer le statut de vulnérabilité de la zone d'étude.

Cette recherche s'articule autour de trois compléments :

Premièrement récolter les données nécessaires pour la simulation, qui est l'étape de base pour réaliser la modélisation

Deuxièmement faire une détermination des modules intégrés dans un système de modélisation Mike21 (SW, HD et ST) a été fait en fonction de nos besoins dans l'objectif d'avoir un aperçu hydro-sédimentaire de la zone.

Dernièrement on présente et interprète les résultats issus de la simulation sous le Mike21.

2 Généralités sur l'hydrodynamique et l'agitation portuaire

2.1 Les phénomènes en mer

La surface de la mer est perturbée par de nombreux phénomènes physiques, tels que l'effet du vent, l'effet du mouvement des fonds marins sur les plans d'eau provoqués par les tremblements de terre et les glissements de terrain, l'interaction entre la terre et les astres, ou encore la différence de pression atmosphérique. Les forces mises en jeu déforment la surface libre et provoquent le transfert d'énergie mécanique, qui se manifeste par la formation et la propagation d'ondes. Ce n'est que lorsqu'il existe une force de rappel qui tend à ramener le fluide à sa position d'équilibre, que ces perturbations peuvent osciller. Toutes les vagues qui existent dans la mer sont soumises à diverses forces de restauration, notamment la gravité, la force de Coriolis, la tension superficielle et la compressibilité des fluides. On distingue donc les forces génératrices (forces éoliennes, tectoniques, astronomiques...) qui contribuent à la déformation de la surface libre des océans, et les forces de rappel qui permettent leur propagation. La diversité de ces phénomènes

entraîne ainsi pour l'ensemble des oscillations, une plage de périodes possibles extrêmement large. (**Jarry.N, 2009**)

L'organigramme ci-dessous résume les phénomènes en mer du large vers la cote selon les différentes échelles du temps et de l'espace et aussi avec les différents facteurs.

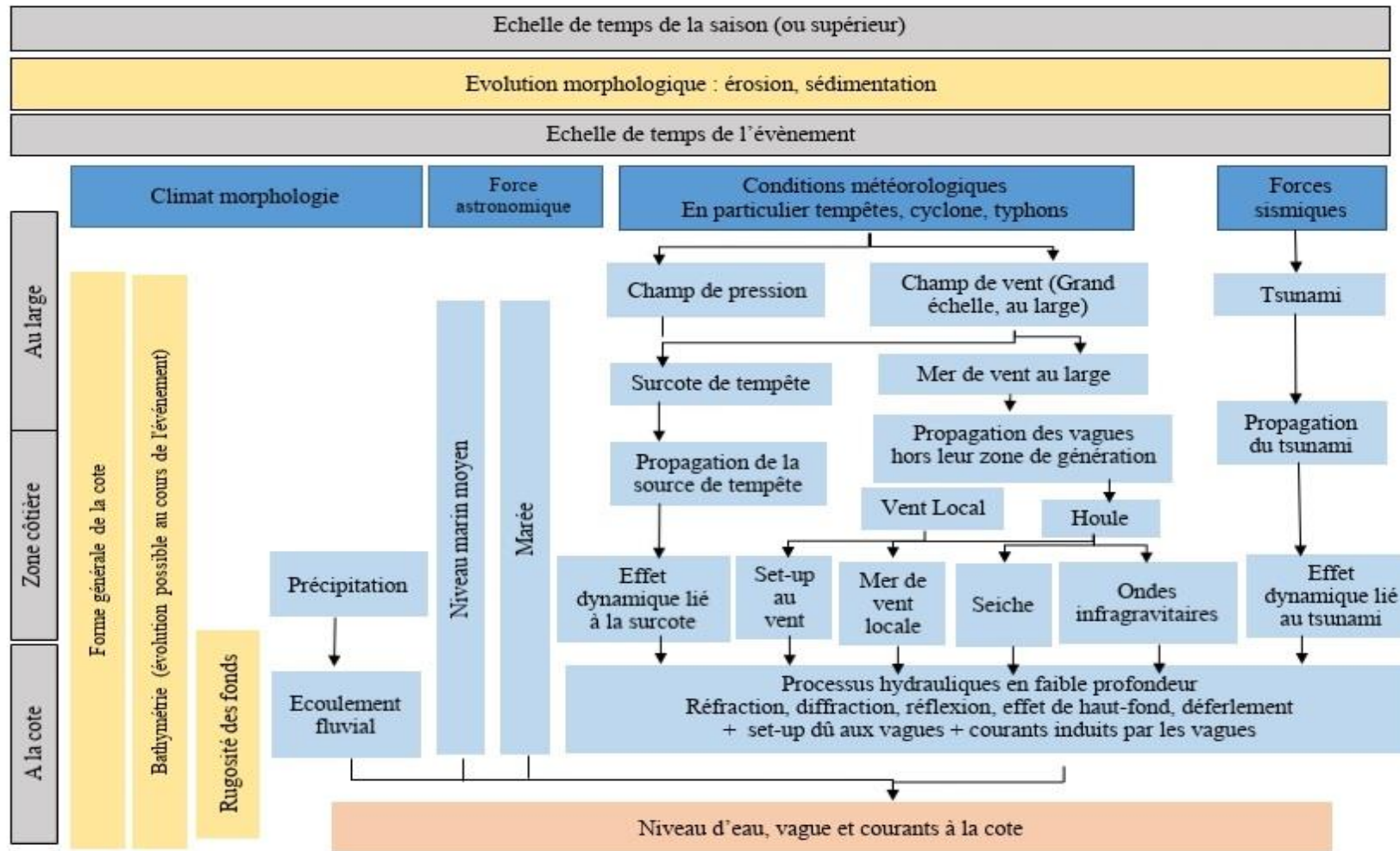


Figure 27 : Organisme présente les différents phénomènes physique en mer (CEREMA, 2018)

2.2 Les différents types de modélisation en hydraulique maritime

On trouve sept principaux types d'études hydrauliques réalisées en milieu maritime qui s'intéressent aux mouvements de la mer.

1. L'étude de courantologie ;
2. L'étude de propagation de la houle et des états de mer ;
3. Les études d'agitations portuaires ;
4. Les études relatives au dimensionnement d'ouvrage d'ouvrages de protection ;
5. Les études de submersion marine ;
6. Les études hydrosédimentaires littorales ;
7. les études hydrosédimentaires côtiers et estuariennes et études de transport de polluants et dispersion de sédiments. **(CEREMA, 2018)**.

2.3 Étude de propagation de houle du large vers la cote

La houle se crée sous l'action du vent au large sur la surface de la mer formant des ondulations qui se propagent du large vers les côtes et cela sous différents aspects causés par des déformations résultant de la variation des profondeurs, les courants marins ainsi que les différentes directions du vent. Ces études sont obligatoires et permettent d'évaluer la surcote statique (waveset-up) à la cote. **(CEREMA, 2018)**

Le déroulement d'une étude de propagation de houle se fait de la façon suivante :

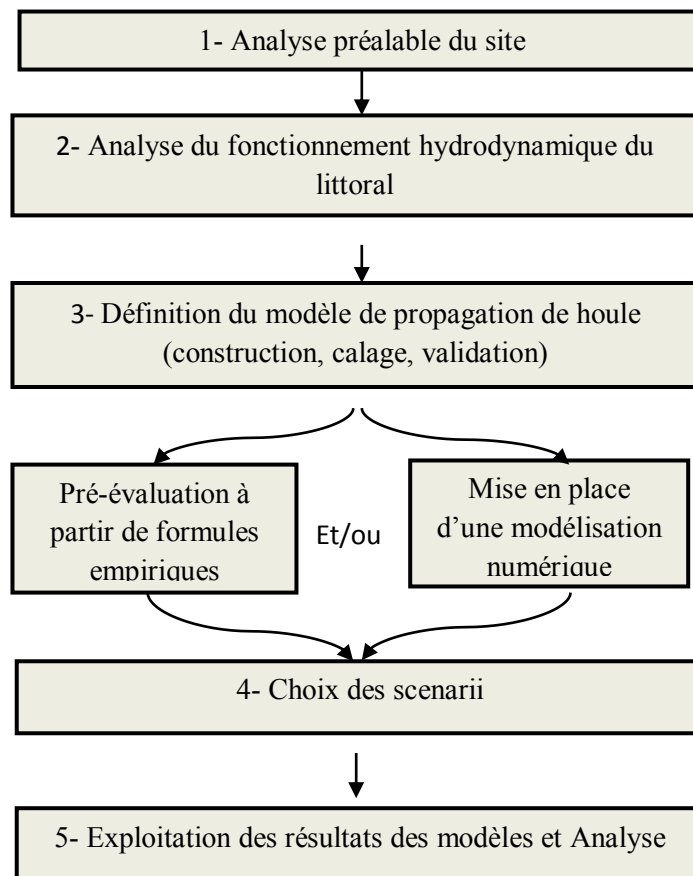


Figure 28: Organigramme du déroulement d'une étude de propagation des vagues du large à la cote (CEREMA, 2018)

3 Modélisation numérique

La représentation du phénomène hydraulique réel nécessite des moyens matériels et immatériels qui peuvent être très onéreux. Dès qu'on cherche à comprendre et prévoir, même de manière qualitative, le comportement d'un système, on essaiera de s'appuyer sur la traduction de la complexité des phénomènes sous forme d'un ensemble d'équations mathématique décrivant les processus physiques qui seront par la suite implémenter dans un système afin d'être traité et avoir le résultat souhaité : On parle de la « Modélisation numérique». (Azzi.I, Boukert.H, 2017)

3.1 Présentation du modèle

Le modèle numérique utilisé dans cette étude est MIKE21-DHI de l'Institut danois de recherche hydraulique, qui est un puissant système de modélisation numérique pour les phénomènes

physiques. Il permet des simulations à grande échelle et utilise des grilles imbriquées pour augmenter la résolution des mailles de calcul à certains endroits dans le domaine de la simulation. Mike 21 est un modèle de houle spectrale basé sur la conservation de la densité de l'action d'onde qui permet de simuler la propagation des états de mer dans les domaines offshore et côtier. Le modèle inclus les effets de la réfraction et de Shoaling liés aux variations de la bathymétrie, à la génération de houle sous le vent et à la dissipation de la houle. 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 des domaines de recherche présentant un intérêt particulier.

Le module MIKE21, comprend les calculs suivants :

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

3.2 Le modèle SW

Est un modèle de houle spectrale basé sur la conservation de la densité d'action d'onde. Il simule : la croissance des vagues en présence du vent, l'interaction vague-vague non-linéaire, la dissipation par le déferlement et par la friction sur le fond, la réfraction par les changements de profondeur et l'interaction vague-courant.

Les calculs du modèle MIKE21-SW utilisent une grille à maillage flexible.

3.2.1 Modèle de houle MIKE 21 SW

Le modèle numérique de houle MIKE 21 SW, a été appliqué pour la transformation de la houle. MIKE 21 SW est un modèle vent-houle spectral basé sur un maillage non structuré.

Le modèle simule la croissance, la décroissance et la transformation des vagues générées par le vent et la houle au large des côtes et du littoral. MIKE 21 SW inclut les phénomènes suivants :

- La croissance de la houle par l'action du vent
- Interaction houle-houle non linéaires
- Dissipation due au déferlement
- Dissipation due à la friction au fond de mer
- Dissipation due à la profondeur limitée du déferlement
- Réfraction et diminution du fond due aux variations de la profondeur

- Effet de la profondeur d'eau variant dans le temps et les inondations et le séchage

La version la plus récente du modèle, version 2017, acquise par le LEM a été utilisée pour la présente étude.

3.2.2 L'équation de base

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

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

On a $N(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$ la densité d'action, et « t » le temps,

$\vec{x} = (x, y)$ Les coordonnées cartésiennes,

∇ Est l'opérateur différentiel à quatre dimensions dans l'espace x, y, σ , θ .

S le terme source pour l'équation de l'équilibre énergétique.

$\vec{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ représente la vitesse de propagation des vagues dans l'espace de phase à quatre dimensions.

σ pulsation relative

Les quatre vitesses de propagation caractéristiques sont données par :

$$(c_x, c_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}_g + \vec{U} \quad (2)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial}{\partial \theta} + \vec{U} \cdot \nabla_{\vec{x}} \right] - c_g \vec{k} \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \quad (3)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{K} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right] \quad (4)$$

Ici, S est la coordonnée de l'espace dans la direction de l'onde θ , et m est une coordonnée perpendiculaire à S. $\nabla_{\vec{x}}$ est l'opérateur différentiel bidimensionnel dans l'espace x, y. (**DHI, 2014**).

3.2.3 Configuration du modèle et équations.

L'approche spectrale se base sur la discrétisation du spectre de variance bi-dimensionnel S (f, θ) en direction θ et en fréquence f pour résoudre une équation de conservation de l'action d'onde, par la méthode des caractéristiques pour discrétiser les termes de propagation. (**Abid.A, Gourari.B, 2020**)

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \dot{x} \frac{\partial N}{\partial x} + \dot{y} \frac{\partial N}{\partial y} + \dot{\theta} \frac{\partial N}{\partial \theta} + \dot{fr} \frac{\partial N}{\partial fr} = \tilde{B} \cdot \tilde{Q}(x, y, \theta, fr, t) \quad (5)$$

Avec $N=F/s$: l'action d'onde

- $F(f, \theta)$: Spectre de variance.
- $S(f, \theta) = \rho g F(f, \theta)$: Spectre d'énergie.
- ρ : Densité.
- g (gravité) = 9.81 m/s²
- f : fréquence.
- θ : direction de propagation.

L'équation introduit des termes sources et puits (termes de droite) pour prendre en compte les processus suivants :

- ✓ La dissipation d'énergie par frottement sur le fond et par déferlement.
- ✓ La dissipation d'énergie par moutonnement,
- ✓ La génération par le vent,
- ✓ Les interactions non-linéaires entre fréquence,

Le terme source est proportionnel au rapport entre la vitesse de frottement u_* dû au vent et la célérité de la houle et les effets de la réfraction et du shoaling sont pris en compte dans les termes de propagation. Ne sont pas pris en compte les effets de la diffraction et de la réflexion. (**Abid.A, Gourari.B, 2020**)

Le terme de proportionnalité est calculé en fonction des deux paramètres adimensionnels suivants :

$$\checkmark A = \frac{u_*^2}{c} \quad (6)$$

$$\checkmark \Omega = \frac{gz_0}{u_*^2} \quad (7)$$

z_0 représente la hauteur de rugosité à l'interface mer-océan

$g=9.81 \text{ m/s}^2$ la gravité.

Le terme source fait intervenir plusieurs coefficients empiriques qui peuvent être ajustés le cas échéant. Les valeurs par défaut du modèle ont été utilisées :

- ✓ Coefficient b de génération de la houle : $b=1.2$
- ✓ Constante de Charnock : $a=0.01$
- ✓ Coefficient de frottement quadratique : $C_d = \frac{u_*^2}{U_{10}^2} = 1.2875 \cdot 10^{-3}$

Avec U_{10} la vitesse du vent à 10m. (**Abid.A, Gourari.B, 2020**)

- **Dissipation de la houle par moutonnement**

Le terme de dissipation fait intervenir un coefficient de proportionnalité ($C=4.5$), d'après la formulation de (**Komen.G.J, 1996**)

- **Dissipation de la houle par frottement sur le fond**

La formulation de Hasselman est utilisée pour le frottement sur le fond.

- Discrétisation spectrale et directionnelle
- Un spectre bi-dimensionnel $S(f, q)$ permet de décrire de manière continue un état de mer. Par définition $S(f, q) \cdot df \cdot dq$ représente la contribution des ondes de fréquence comprises entre f et $f+df$ et de direction comprise entre q et $q + dq$.
- La discrétisation du spectre en un nombre N_f de fréquences est calculée suivant une progression géométrique de raison $r > 1$.
- $f_i = f_{\min} r^{i-1} \quad i = 1, \dots, N_f$
- La fréquence maximale correspond à $f_{\max} = f_{\min} r^{N_f-1}$
- Le spectre d'énergie de la houle est discrétisé en N_f fréquences et N_p directions.
- La variance totale de la surface libre est donnée par :
- $m_0 = \iint S(f, \theta) df d\theta$
- Le spectre bi-dimensionnel est le produit du spectre mono-dimensionnel $S(f)$ et de la distribution angulaire :
- $S(f, \theta) = S(f)D(\theta) \quad (8)$
- $D(\theta) = G \cos^{2s} \left(\frac{\theta - \theta_m}{2} \right) \quad (9)$
- Avec s : directional spreading
- θ_m : direction moyenne de propagation
- Le paramètre s contrôle l'étalement du spectre par rapport à la direction moyenne.

3.3 Le modèle HD

Le code de calcul MIKE 21 HD est un modèle bidimensionnel pour les calculs hydrodynamiques qui permet de simuler les variations du niveau de la surface libre de la mer et du courant moyenné sur la colonne d'eau, en fonction des paramètres de forçage des zones côtières et océaniques. Ce module est utilisé principalement pour simuler de nombreux phénomènes hydrauliques dont la marée, les courants induits par le vent et la houle ainsi que les surcotes.

Ce modèle prend en considération les effets suivants : Frottement sur le fond ; Frottement du vent à la surface de l'eau ; Gradients de pressions barométriques ; Force de Coriolis ; Dispersion instantanée ; les apports terrigènes et les puits ; l'évaporation ; l'inondation et la sécheresse ; les contraintes de radiation des houles.

Le modèle hydrodynamique MIKE21 HD résous 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 dues à l'action de la houle dans la zone de déferlement (**Demouche.R, 2017**)

3.3.1 L'équation de base

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = hs \quad (10)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} \quad \text{Équation de Continuité de mouvement Horizontale.}$$

$$= f\bar{v}\bar{\eta} - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \delta_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \delta_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + \eta U.S \quad (11)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} \quad \text{Equation de Continuité de la profondeur}$$

$$= f\bar{u}\bar{\eta} - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \delta_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \delta_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + \eta V.S \quad (12)$$

Où :

t : le temps.

x , y et z : les coordonnées cartésiennes.

η : la hauteur de la surface.

d : la hauteur d'eau.

h : la profondeur totale de l'eau, $h = \eta + d$.

u , v et w : les composantes de la vitesse dans les directions x , y et z .

f : le paramètre de Coriolis, $f = 2\Omega \sin\phi$.

Ω : la vitesse angulaire de révolution.

ϕ : la latitude géographique.

g : l'accélération gravitationnelle.

ρ_w : la densité de l'eau.

s_{yx} , s_{xy} , s_{yy} , s_{xx} : des composantes du rayonnement tenseur.

ν_t : le turbulent vertical (ou Eddy) viscosité.

p_a : la pression atmosphérique.

ρ_0 : la densité de référence de l'eau.

S : l'amplitude de la décharge causée par des sources ponctuelles.

u_s, v_s : la vitesse par laquelle l'eau est déchargée dans l'eau ambiante.

A : la viscosité turbulente horizontale.

τ_{sx} , τ_{sy} et τ_{bx} , τ_{by} : composantes x et y du vent de surface et des contraintes de fond.

3.4 Le modèle ST

La modélisation du transport sédimentaire associé aux courants et aux vagues est effectuée à l'aide du module ST (Sand Transport) de MIKE 21. En fonction de l'ensemble des forçages hydrodynamiques (courant de marée, agitation due aux vagues et courants littoraux), ce module permet le calcul du transport des sables et de l'évolution morphologique des plages.

Le module MIKE 21 ST repose sur le modèle sédimentaire Q3D développé par DHI Water & Environment pour simuler la dynamique sédimentaire littorale sous l'influence combinée des vagues et des courants. Le modèle Q3D calcule le transport sédimentaire et l'hydrodynamique en deux dimensions, en utilisant toutefois une approche quasi 3D permettant de prendre en compte

l'évolution dans le temps et sur la verticale du cisaillement, de la turbulence, des vitesses des courants et des concentrations de sédiments. L'évolution temporelle de la couche limite sous l'effet combiné des vagues et du courant est résolue selon la méthode d'intégration de la quantité de mouvement développé par Fredsoe (**Than.V, 2015**)

3.4.1 Equations de base

Une des options utiles lors de la simulation du transport de sable, est d'inclure une épaisseur de couche variable comme condition de départ.

Dans le cas où l'épaisseur de la couche locale Δh_{crit} , le taux de transport total Q_t est réduit selon une formulation parabolique, c'est-à-dire :

$$Q_t \text{ réduit} = Q_t (\Delta h / \Delta h_{crit})^2 \quad (13) \quad (\text{DHI, 2014}).$$

Le coefficient de rugosité alluviale, qui est fonction de la profondeur locale à chaque pas de temps. Le numéro Chezy (C) ou le numéro Manning peut être mis à jour comme suit :

$$C = a.H^b \quad (14)$$

où:

H est la profondeur d'eau locale

a est le coefficient de résistance et

b est la puissance de résistance

Le taux de transport de charge totale sans dimension (Ggr) est calculé comme suit

$$Ggr = C \left[\frac{Fgr}{A} - 1 \right]^m \quad (15)$$

C, **m** et **A** sont des paramètres du modèle qui dépendent de l'adimensionnel taille des particules

Dgr est définie comme

$$Dgr = d \left[\frac{g(s-1)}{v^2} \right]^{1/3} \quad (16)$$

d est la taille des grains ; **g** la gravité ; **s** est la densité relative du sédiment du lit ; **v** est la viscosité cinématique de l'eau ;

Fgr est un nombre général de mobilité des sédiments défini comme

$$Fgr = \frac{Uf^m}{\sqrt{(gd(s-1))}} \left[\frac{v}{\sqrt{(32 \log(\frac{10h}{d}))}} \right]^{1-n} \quad (17)$$

où

Uf est la vitesse de cisaillement totale,

h est la profondeur de l'eau,

V est la vitesse du courant moyenne en profondeur.

n est une constante qui dépend aussi de **D_{gr}** et gammes de 0 pour les matières grossières à 1 pour les matières fines.

3.5 L'étude bathymétrique

Les développements technologiques récents, notamment en imagerie, conduisent à l'acquisition de données localisées par divers organismes. Un nombre croissant de données de référence est disponible, permettant la mise en œuvre d'applications de recherche utilisant les potentialités d'analyse et de représentation des SIG (ex : Global mapper). Pour les petits fonds marins côtiers, les Modèles Numériques de Profondeur (MNP) ou bien les modèles numériques de terrain sont particulièrement appréciés des scientifiques, notamment pour leur aptitude à permettre le calcul des surfaces ou des volumes, à fournir divers indices, tels que l'inclinaison et l'orientation des pentes, ainsi que pour les possibilités de visualisation des structures en trois dimensions (Laassilia.O, 2013)

3.5.1 Création 2D Bathymétries sous le maillage

Le module "MeshGenerator" nous offre un environnement d'édition et de présentation de bathymétries numériques 2D. "MeshGenerator" crée un format de maillage souple.

Le programme fourni à ces modèles de nouvelle génération un maillage adapté est essentiel pour obtenir des résultats fiables à partir des simulations de modèles.

Les cartes bathymétriques de la baie d'Alger :

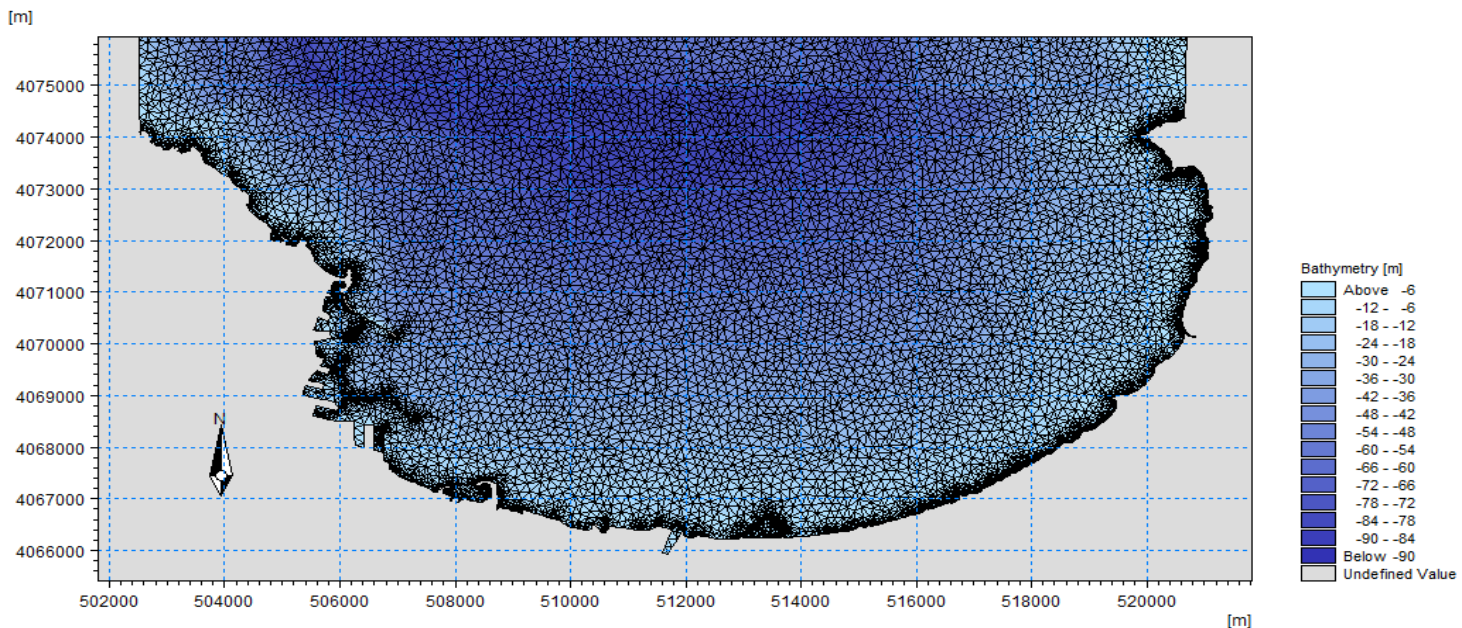


Figure 29: Maillage de la carte bathymétrique de la baie d'Alger

Les paramètres <<Mesh Generator>> nous donne ces résultats, la surface maximale d'un triangle représenter dans la carte est de 180000 m², et le plus petit angle entre les nœuds est de 26°, et le nombre maximale de nœuds est de 100000

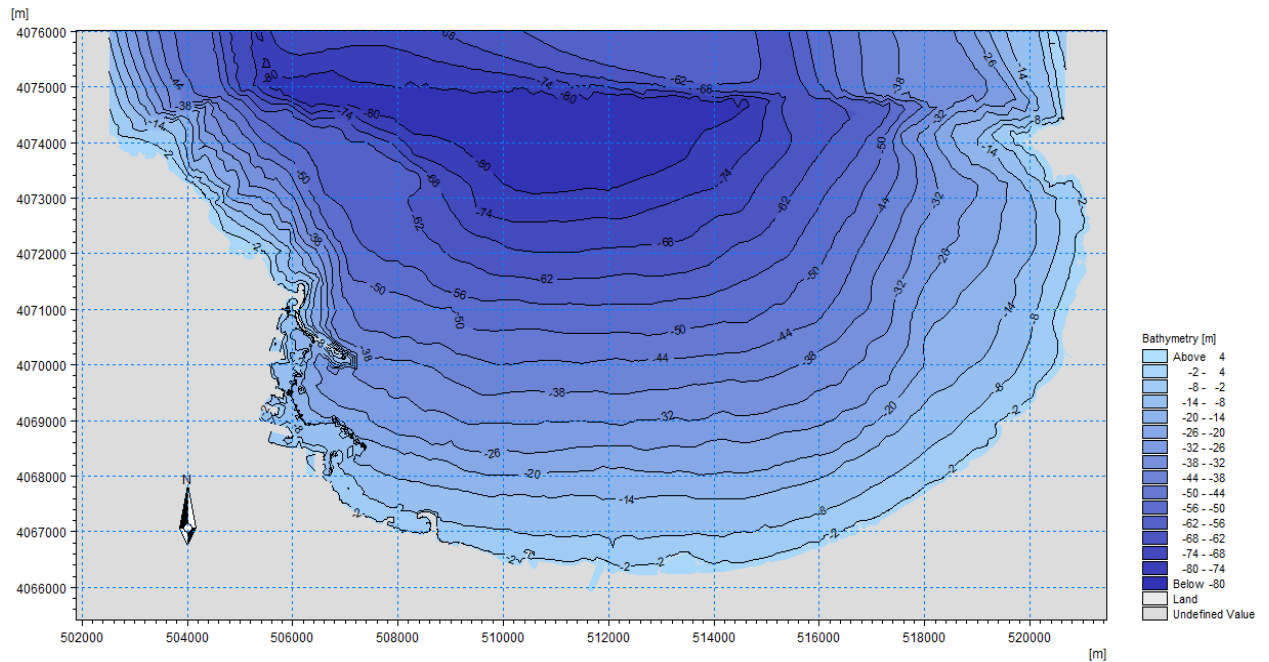


Figure 30: Carte bathymétrique de la baie d'Alger

Les cartes bathymétriques de la zone d'étude Ferhani :

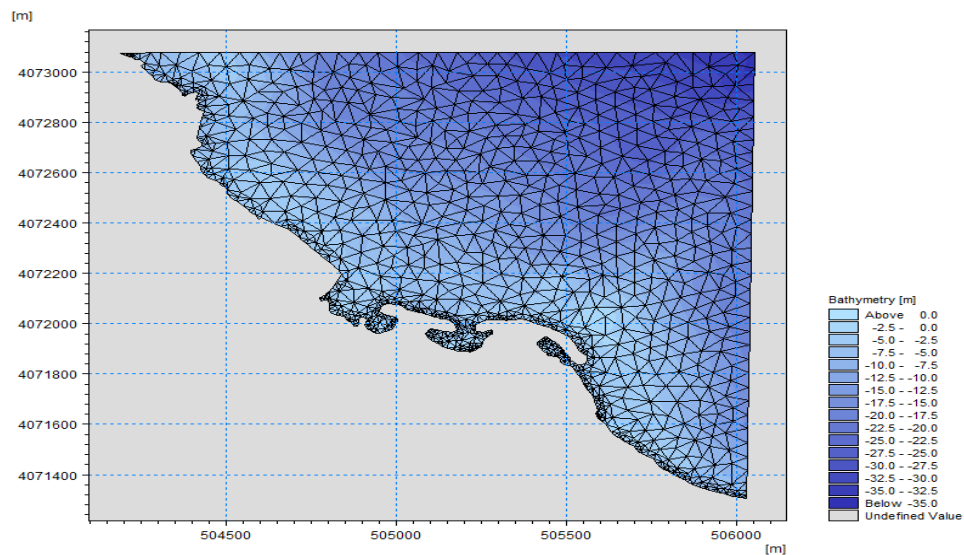


Figure 31: Maillage de la carte bathymétrique de la zone d'étude Ferhani

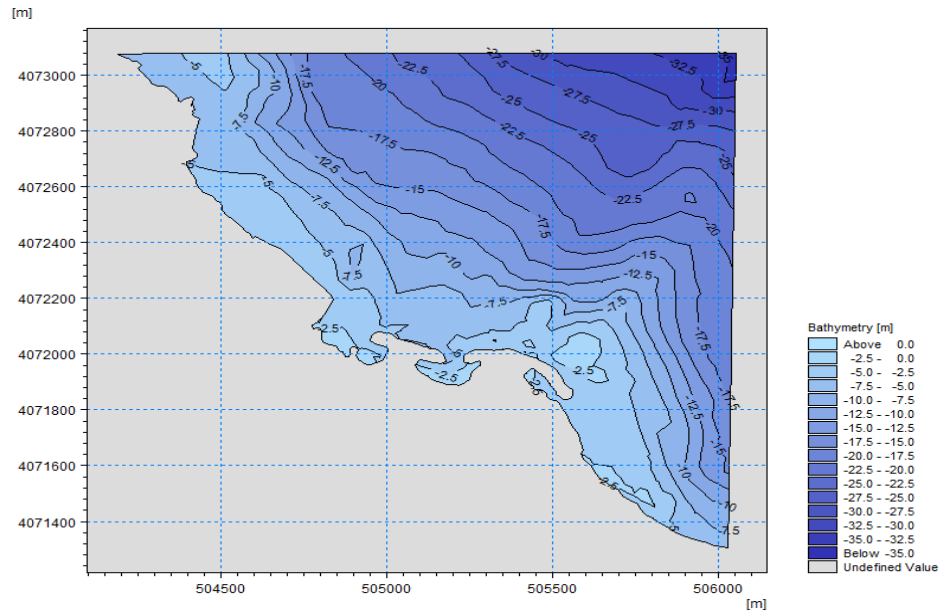


Figure 32: Carte bathymétrique de la zone d'étude Ferhani

Les paramètres <<Mesh Generator>> nous donne ces résultats, la surface maximale d'un triangle représenter dans la carte est de 2400 m², et le plus petit angle entre les nœuds est de 26 °, et le nombre maximale de nœuds est de 10000

3.6 Simulation hydro-sédimentaire

Elle est réalisée à partir des trois modèles du logiciel mentionnés précédemment, ces modèles généreront les résultats des cartes pour chaque direction.

Les conditions initiales imposées dans le module SW dans les limites des zones d'études sont les paramètres de la houle. Dans ce travail on a pris trois paramètres (Hauteur significative, période de la houle, et direction) comme le montre le tableau suivant

Tableau 4: caractéristiques significatif de la houle sans periode de retour

Hs	Tp	Direction
2.56 m	8 s	30°N (Nord Est)
2.67 m	8 s	360°N (Nord)
2.64 m	8 s	340°N (Nord Ouest)

Tableau 5: caractéristiques significatif de la houle avec periode de retour

Hs	Tp	Direction
7 m	8 s	30°N (Nord Est)
3 m	8 s	360°N (Nord)
6 m < Hs < 6.5 m	8 s	340°N (Nord Ouest)

3.6.1 Action des houles de direction Nord-Est N30°

SW : Au large, le plan des houles de la direction Nord-Est (Représenté dans la Figure 33) est frontal et ne subissent aucune modification et gardent leurs énergie ($H_{s0} = 7$ m), mais au fur et à mesure, qu'elles propagent vers la côte et l'effet de fond commence à être ressenti, la hauteur de la houle diminue avec un angle d'incidence qui reste pratiquement inchangé (houle frontale) pour atteindre des valeurs faibles entre 3 m et 2 m au niveau de la zone d'étude.

HD : Les courants littoraux induits par la houle de direction N30° (Figure 34) génèrent un courant de dérive littorale parallèle à la côte et de direction Nord Ouest à Sud Est dont les vitesses varient entre 0.15 et 1.8 m/s le long de la cote, et entre 0.3m/s et 1.05m/s au niveau de la zone d'étude.

ST : Les houles de direction Nord-Est (Figure 35) engendrent des courants dirigés vers le Sud-Est de la zone d'étude semble à transporté une quantité de sédiments de 63072m³/an/m. Il est important de souligner que les résultats de la modélisation du transit littoral dans cette étude correspondent à la capacité saturée du transport sédimentaire ce qui signifie que les valeurs indiquées sont des limites supérieures des transits, correspondant à la capacité du transport.

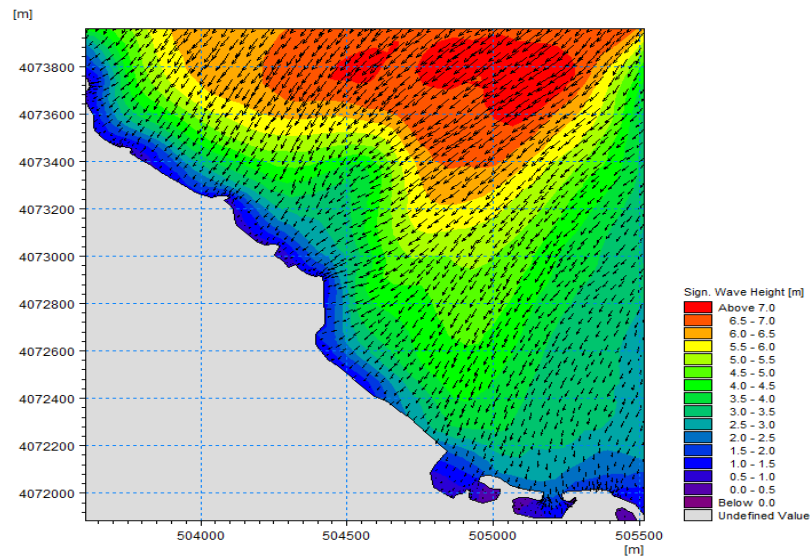


Figure 33 : Champ de houles de direction Nord-Est

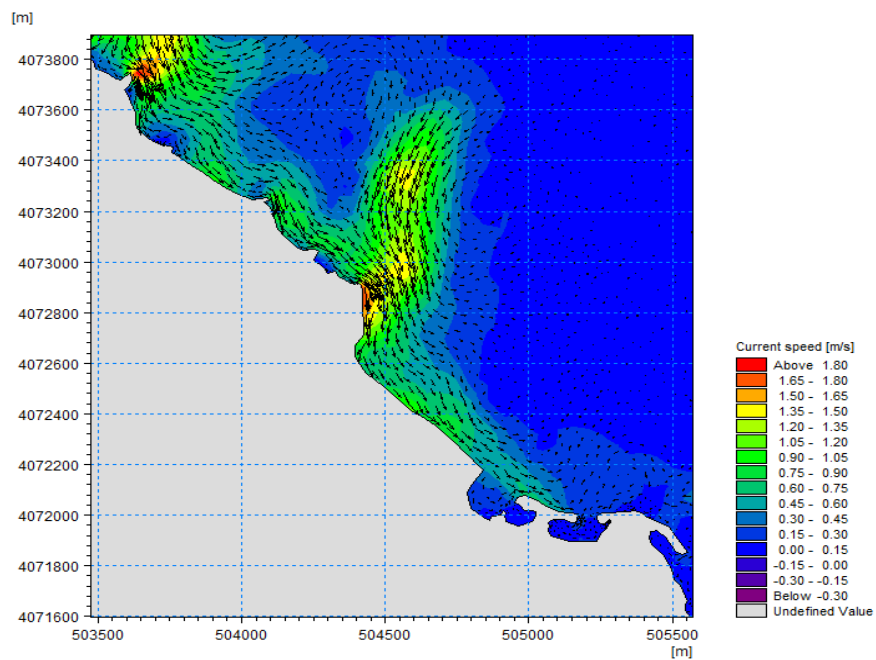


Figure 34: Champ des houles de direction Nord-Est

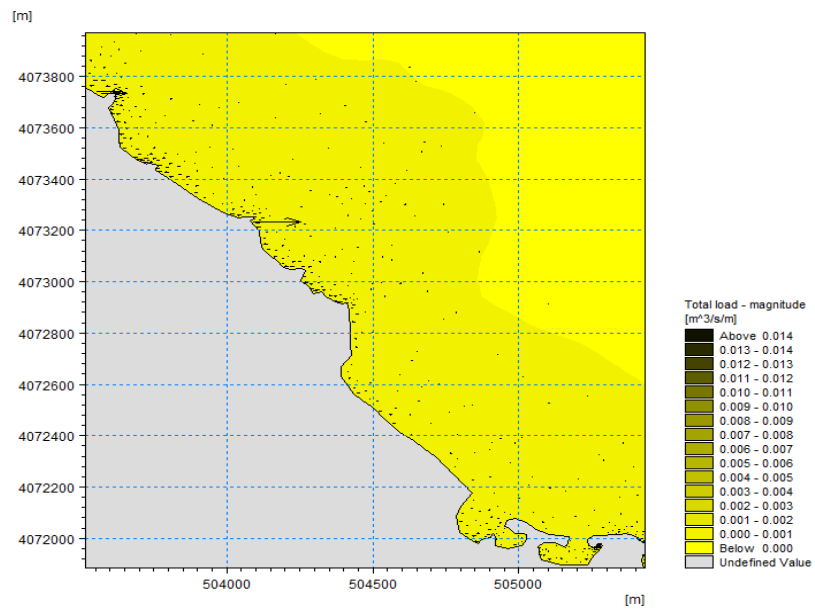


Figure 35: Capacité de sédiments induit par la houle de direction Nord-Est

3.6.2 Action des houles de direction Nord N360°

SW : Les houles de direction Nord (360°) représenté sans la Figure 36 ne subissent aucune modification ($H_{s0} = 3$ m) au large. Lorsque les houles commencent à ressentir l'effet du fond, la hauteur diminue considérablement pour atteindre des valeurs entre 0.16 et 2.0 m en arrivant à la cote et à la zone Ferhani, cela signifie que la houle ne perd qu'une partie de son énergie lors de son évolution vers la côte.

HD : Les champs des courants engendrés par la houle de secteur Nord (360°N) représenté sans la Figure 37 montrent de fortes activités hydrodynamiques dans la zone. On remarque que le champ du courant se propage du Nord Ouest vers le Sud Est suivant une direction parallèle au trait de côte avec des vitesses varient majoritairement entre 0.5 m/s à 1.4 m/s et on remarque aussi au Sud-Est de la zone à Kettani un champ de courant opposé venant du Sud-Est vers le Nord-Ouest avec des vitesses entre 0.4 m/s à 0.7 m/s, ce courant est produit principalement par le phénomène de réfraction de la houle.

ST : Sur le plan sédimentologique (Figure 38) la capacité de transport solide du Nord-Ouest au Sud-Est est très similaire au champ des courants océaniques. Dans notre zone d'étude le transport sédimentaire est globalement moyen.

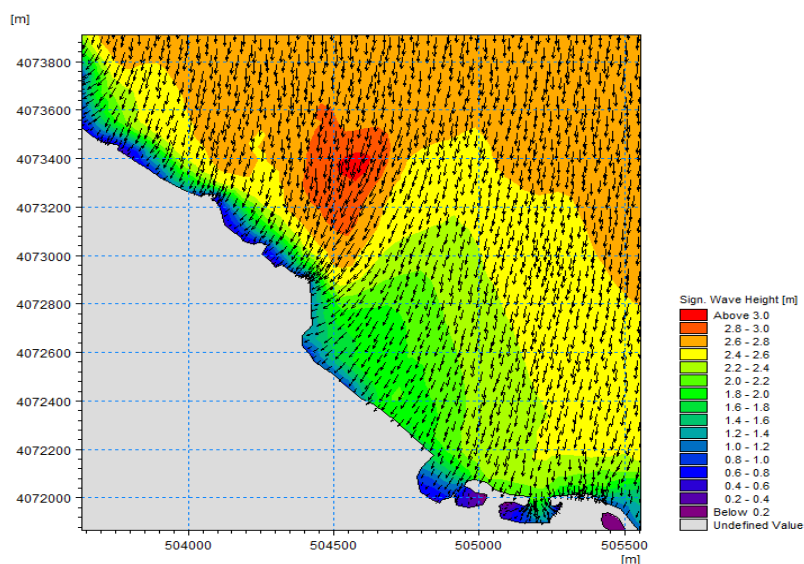


Figure 36: Champ de houles direction Nord

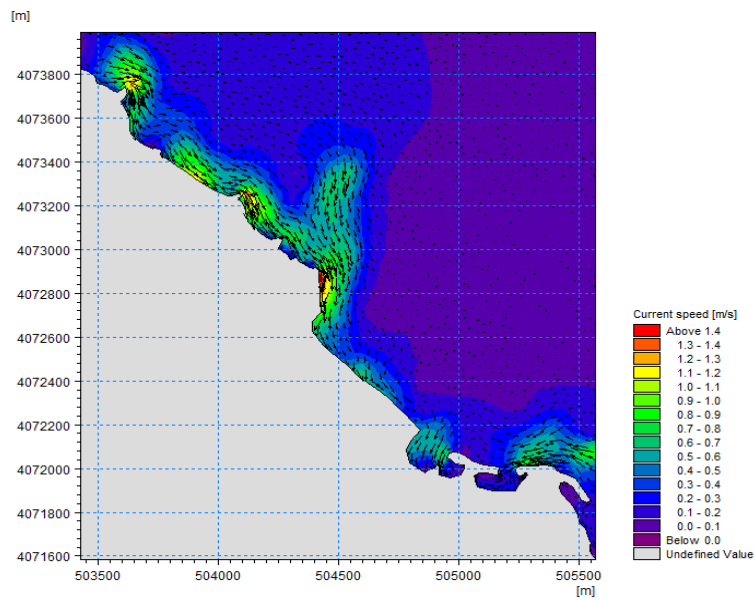


Figure 37: Champ des courants induit par la houle de direction Nord

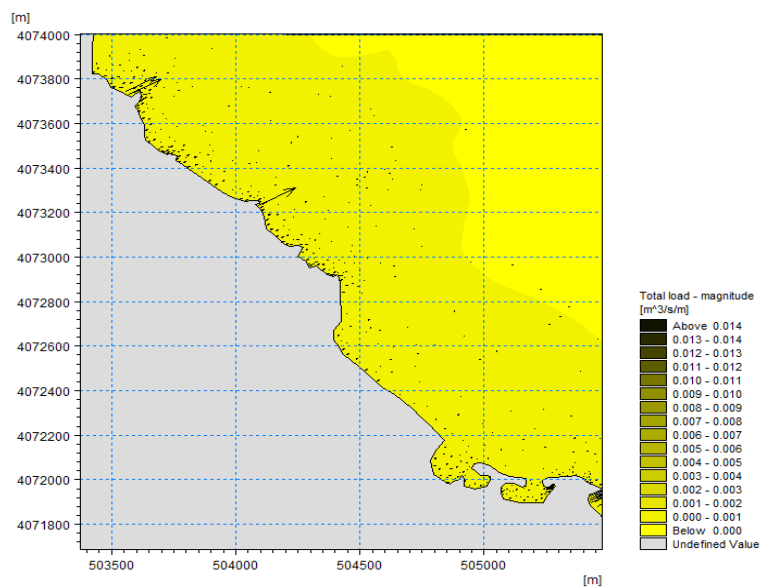


Figure 38 : Capacité de transport des sédiments induit par la houle de direction Nord

3.6.3 Action des houles de direction Nord-Ouest N340°

SW : Les houles de directions Nord-Ouest (Figure 39) au large ne subissent aucune modification (H_s entre 6 et 6.5 m), mais au fur et à mesure, lorsqu'elles commencent à ressentir le fond, la hauteur significative diminue considérablement et atteint 2.5 à 3.5 m, l'angle d'incidence de la houle à la côte montre une grande modification par rapport à celui de la houle au large (Phénomène de réfraction) et la houle perd une bonne partie de son énergie du large.

HD : Les houles issues du secteur Nord-Ouest (Figure 40) donnent naissance près de la côte à un courant de dérive dirigé vers le Sud-Est, et évoluent près du rivage de la zone Ferhani avec un gradient de vitesse de [0.3-0.5 m/s]

ST : Sur le plan sédimentologique (Figure 41) la capacité de transport solide montre que la zone d'étude est soumise à un transport sédimentaire assez moyen, (Couleur sombre) dans le même sens des courants c'est-à-dire du Nord-Ouest vers le Sud Est.

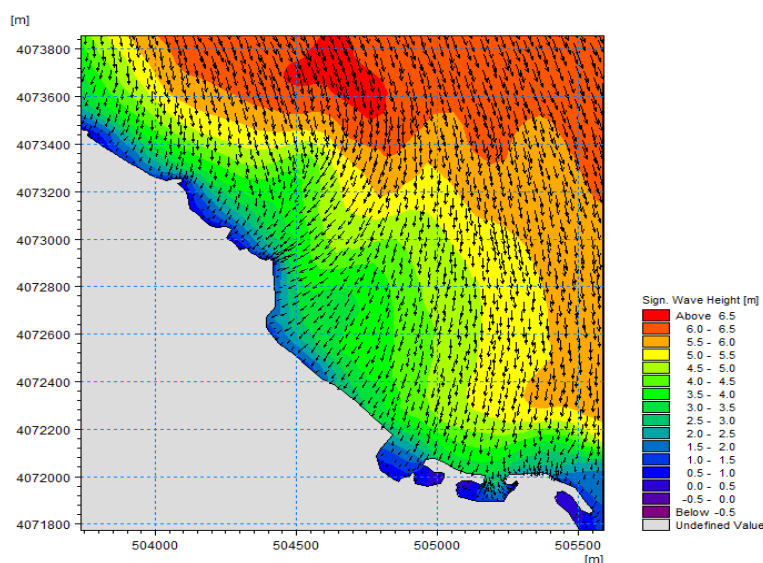


Figure 39: Champ des houles de direction Nord-Ouest

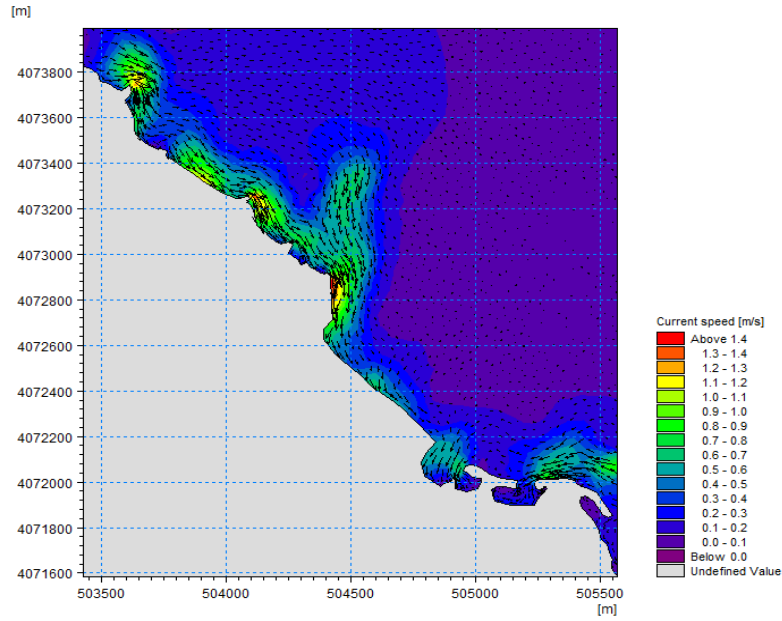


Figure 40: Champ des courants induit par la houle de direction Nord-Ouest

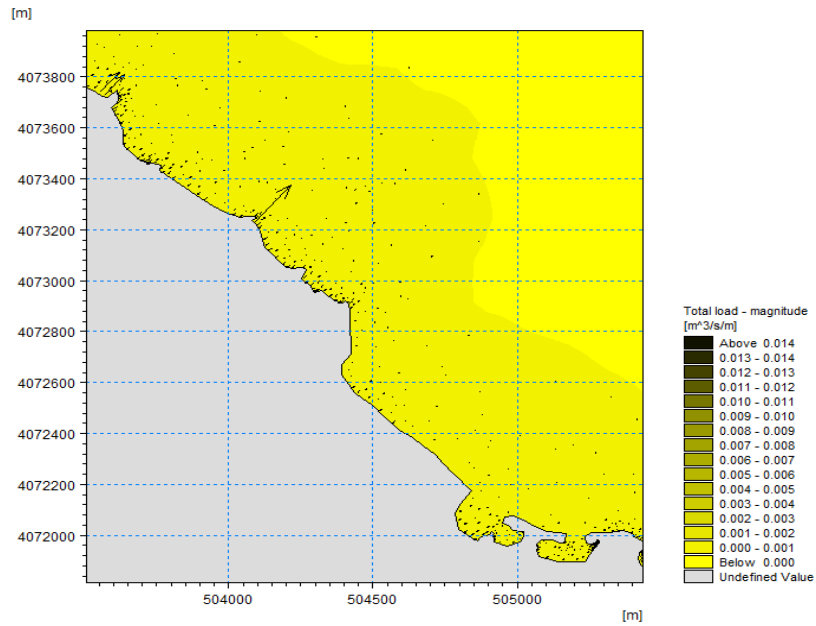


Figure 41 : Capacité du transport induit par la houle de direction Nord-Ouest

4 Conclusion

La modélisation des champs de courants et des transports sédimentaires à partir des modules de calcul du Mike 21 nous a permis d'étudier le fonctionnement sédimentaire régnant dans la zone d'étude.

D'après l'analyse de l'état initial du site, on constate que les houles de la direction 30°N sont les plus virulentes car abordant le site de façon frontale, contrairement aux directions 360°N et 340°N, qui perdent une bonne partie de leurs énergies car abordant le site d'une façon oblique.

Pour les courants et le transit sédimentaire, ils se font essentiellement dans le même sens d'écoulement à savoir Nord Ouest au Sud Est, dans les trois directions étudiées.

Chapitre III : Solution de protection

1 Introduction

Dans ce chapitre on va parler de la conception et le dimensionnement de l'ouvrage de protection ainsi que la vérification des franchissements de la houle. Pour la réalisation des calculs, on utilise les formules d'HUDSON

Pour l'aménagement de la zone Ferhani, on propose deux variantes de brise-lames, l'une immergé et l'autre émergé, et on compare les 2 variantes pour voir la quel retenir.

2 Généralité

2.1 Brise-lame

Construction élevée à l'entrée d'un port ou d'une rade pour les protéger contre la houle du large en la faisant briser en avant du plan d'eau (www.cnrtl.fr). Un brise-lames est généralement constitué d'une « digue à talus » qui n'est autre qu'un monticule en enrochements recouvert d'une carapace composée de très gros blocs de pierre ou de béton capables de résister aux attaques de la houle. La construction d'un brise-lames induit une modification des courants et donc de la sédimentation et de la configuration du fond sur une surface (www.wikipedia.org).

2.2 Poids des blocs de la carapace

Beaucoup de formules empiriques ont été développées en fonction de la stabilité de l'ouvrage depuis 70 ans. Nous choisissons d'utiliser l'approche d'Hudson (1959). Son domaine de validité est adapté à notre étude, puisqu'en effet elle peut être utilisée en eau profonde comme peu profonde et pour une houle déferlante ou non. Nous nous trouvons dans un cas intermédiaire: eau semi profonde et houle plutôt non déferlante.

2.3 Formule d'Hudson

Tableau 6: Formule d'Hudson

Formule	variables
<p>Formule d'Hudson</p> $W = \frac{1}{Kd} \frac{\gamma_s}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_0} - 1\right)^3} \frac{Hb^3}{\text{Cot}\alpha}$	<ul style="list-style-type: none"> • W : le poids des blocs de carapace, • γ_s : Poids volumique des blocs utilisés • γ_0: Poids volumique de l'eau de mer, • $\text{Cot}\alpha$: angle du talus, • KD: Coefficient de stabilité adimensionnel de • HUDSON, $KD = 2$ (musoire), $KD = 4$ (partie <ul style="list-style-type: none"> • courante) • Hb: Houle de projet, • V : Volume d'un seul bloc, • Dn: Diamètre nominale, • n : Nombres de couches, • e : Epaisseur de la carapace, • N_s : Nombre de blocs par unité de surface.
<p>Volume</p> $V = \frac{W}{\gamma_s}$	
<p>Diamètre nominale</p> $Dn = \sqrt[3]{V}$	
<p>Epaisseur de la carapace :</p> $e = nDn$	
<p>Nombre de blocs par unité de surface :</p> $N_s = \frac{n}{Dn^2}$	

L'utilisation de la formule D'HUDSON pour un coefficient de dommage 0-5% pour différentes profondeurs conduirait à des poids de blocs d'enrochement naturel très élevés qui n'existent pas en réalité. On se rabatte alors vers les blocs en béton (blocs Antifers). Sur le tableau, ci-après, on a reporté les tailles de blocs nécessaires en fonction des profondeurs des points de référence (d'extraction).

Il existe aussi une autre méthode de calcul de l'épaisseur 'E' de la carapace, extraite du manuel du C.E.R.C. suivante:

$$E = n K \Delta (W/\rho S)^{1/3} \quad (1)$$

W50 : poids médian de l'enrochement de la carapace en tonne (T) ;

ps : masse volumique des enrochements: blocs de béton 2.40 t/m³

KΔ : coefficient de couche : 1.02 pour les blocs de béton Antifer

n : nombre de couche=2

2.4 Poids du filtre

Le SPM (CERC, 1984) recommande, pour le ratio entre la masse de l'enrochement naturel de la sous-couche et celle de l'enrochement naturel de la carapace M50c une valeur donnée par l'équation:

$$M50F = M50c/15 \text{ à } M50c/10$$

La masse médiane de l'enrochement qui constitue la sous-couche pour les carapaces en enrochements artificiels, M50 F (kg), doit être d'environ 1/10 de la masse du bloc artificiel.

La limite supérieure nominale NUL de la sous-couche ne doit normalement pas dépasser 15 % de la masse du bloc artificiel, dans la mesure où il faut une surface de sous-couche relativement lisse pour pouvoir disposer les blocs artificiels avec précision.

La limite inférieure nominale NLL de la sous-couche ne doit pas être inférieure à 5 % de la masse du bloc artificiel, afin d'éviter que l'enrochement naturel ne soit emporté à travers les vides de la carapace.

2.5 Estimation du Run up

Le Run up de la houle est défini comme le niveau maximal que l'eau peut atteindre sur le talus d'un ouvrage du fait de l'action de la houle. Les formules de prédiction, fonction du nombre d'Iribarren ou paramètre de similitude résultent :

$$\text{Run\%/Hs} = a \xi^c m \quad \text{pour } \xi m \leq 1.5$$

$$\text{Run\%/Hs} = b \xi m \quad \text{pour } \xi m > 1.5$$

Le Run-up pour des ouvrages perméables ($P > 0.4$) est limité à un maximum, donné par

$$\text{Run \%}/Hs = d$$

$$\xi m = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi Hs}{gT^2 m}}} \quad (2)$$

Les valeurs de a, b, c et d se définissent en fonction des niveaux d'excédant, 0, 10%, 10/0, 5%, 10%, valeurs significantes et moyennes sur expérimentations prédictives du paramètre hydraulique de Run up

2.6 Le tableau justificatif de ces coefficients

Tableau 7 : tableau justificatif des coefficients

Niveau de remontée	Coefficient a	Coefficient b	Coefficient c	Coefficient d
0.10%	1.12	1.34	0.55	2.58
1.00%	1.01	1.24	0.48	2.15
2.00%	0.96	1.17	0.46	1.97
5.00%	0.86	1.05	0.44	1.68
10.00%	0.77	0.94	0.42	1.45
Moyenne	0.47	0.88	0.41	1.35
Significative	0.72	0.88	0.41	1.35

2.7 HOULE DE PERIODE DE RETOUR 1 AN

Pour la hauteur de houle significative annuelle à -7 m (6+1) de direction 30° égale à 4.37 m, une période ondulatoire de 10 secondes et p=47 (blocs antifers)

-Le Run up de dix pour cent (10%), $Run\%/H_s = d = 4.37 \times 1,45 = 6.34$ m

2.8 HOULE DE PERIODE DE RETOUR 50 ANS

Pour la hauteur de houle significative cinquantennale à -7 m (6+1) de direction 30° (au large) égale à 7.53 m, une période ondulatoire de 14 secondes et p = 47 (blocs antifers)

- Le Run up pour dix pour cent (10%), $Run\%/H_s=d= 7.53 \times 1,45=10.92$ m

3 Variante 1: Brise-lames immergé

3.1 Justification et intérêt

Les digues ou brise-lames immergés assimilés aussi à des digues récifs sont des ouvrages à crêtes basses (immergés) disposés approximativement parallèlement à la côte. Leur fonction est de réduire l'énergie de la houle incidente en déclenchant le déferlement des vagues les plus grosses (et les plus destructrices) mais ils n'ont que peu d'effet sur l'activité quotidienne normale.

3.2 Caractéristiques géométriques de l'ouvrage

Le brise-lames immergé de 250 ml de long est implanté à environ 90 m de la ligne de cote sur des profondeurs moyennes de -8 m .Ce brise-lames a une section trapézoïdale de pente 3/2 coté mer et 2/1 coté terre. Il est arasé à -2.00m NGA avec une largeur de berme égale à 18 m.

3.3 Profils types

En résumé le brise-lames aura un profil type se caractérisant comme suit (voir figure 42) : un noyau en enrochements naturels (de carrière) de catégorie (0.5 à 2t) arasé à la côte -6,00 m NGA, une carapace en blocs de béton de type cubiques rainurés (BCR) de 20 tonnes disposée en deux couches avec une pente de 3/2 sur le talus extérieur et 2/1 à l'intérieur, une assise de pied en enrochements naturels de catégorie 200 à 500kg.

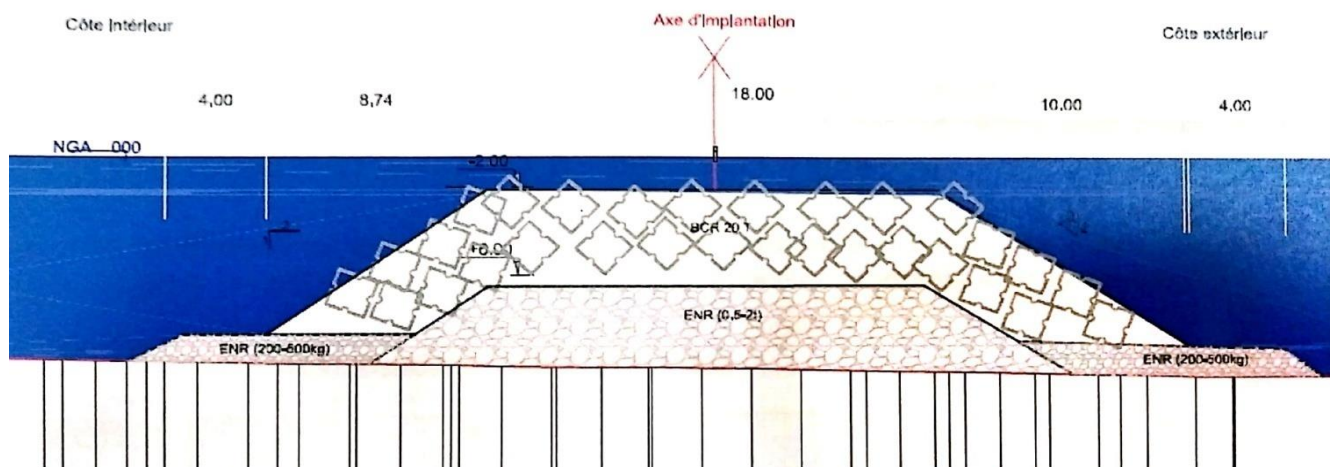


Figure 42: Profil Brise-lames immergée (LEM 2020)

3.4 Paramètres d'implantation de l'ouvrage:

Les paramètres d'implantation: la position au large, la longueur et l'espacement entre les brise-lames ont été obtenus suite à une étude en modèle numérique par Mike 21. Il s'agit d'un compromis étant donné que le but ultime est une zone calme à l'abri de ce brise-lames pour réduire l'impact de la houle sur la cote.

3.5 Calcul :

3.5.1 Formule d'Hudson

Tableau 8: Formule d'Hudson

Formule	variables
<p>Formule d'Hudson</p> $W = \frac{1}{2} \frac{2.40}{\left(\frac{2.40}{1.026} - 1\right)^3} \frac{2.6^3}{3/2}$ <p>W= 20 t</p>	<ul style="list-style-type: none"> • γ_s : 2.40 t/m³ • γ_0: 1.026 t/m³ • $Cot\alpha$: angle du talus, 3/2 • $KD=2$ • courante) • $Hb=2.6$ • $n=2$
<p>Volume</p> $V = \frac{5.85}{2.40} = 2.43 \text{ m}^3$	
<p>Diamètre nominale</p> $Dn = \sqrt[3]{2.43} = 1.34 \text{ m}$	
<p>Epaisseur de la carapace :</p> $e=2 \times 1.34 = 2.68 \text{ m}$	
<p>Nombre de blocs par unité de surface :</p> $Ns = \frac{2}{1.34^2} = 1.11 \text{ m}$	

3.6 Paramètres structuraux de l'ouvrage:

Cote d'arase "RC" et estimation de la transmission de la houle (simplifiée)

Les ouvrages tels que les digues à crête abaissée (ouvrages immergés ou semi émergés) transmettent l'énergie de la houle dans la zone qui se trouve derrière eux. L'importance de la

transmission de la houle est quantifiée par le coefficient de transmission, Ct défini par l'Équation ci après, en termes de hauteurs de la houle incidente, Hi.

$$Ct = Ht/Hi \quad (3)$$

La transmission des digues continues à crête abaissée dépend de la géométrie de l'ouvrage, principalement de la revanche de la crête, RC, de la largeur de la crête, B, et de la hauteur d'eau, h. Toutefois une méthode d'estimation qui lie la revanche relative de la crête, RC /Hs, au coefficient de transmission, Ct. de la houle au-dessus et à travers les ouvrages à crête abaissée donne ce qui suit:

$$-2.00 < Rc/Hs < -1.13 \quad Ct = 0.80$$

$$-1.13 < Rc/Hs < 1.2 \quad Ct = 0.46 - 0.3Rc/Hs$$

$$1.2 < Rc/Hs < 2.0 \quad Ct = 0.10$$

Cette relation donne une description très simpliste, mais elle peut être suffisante pour une estimation préliminaire de la performance du brise-lames.

Pour une houle du régime moyen (10 ans) de Hs d'environ 4.22m, une cote d'arase RC de -2,00 m, le rapport Rc/Hs

$$Rc/Hs = -2/4,22 = -0,47$$

$$\text{Et donc on a } -1.13 < Rc/Hs < 1.2$$

$$Ct = 0.46 - 0.3Rc/Hs$$

$$Ct = 0.46 - 0.3(-0.47)$$

$$Ct = 0.6$$

Et donc le Ct est de 0.6

Les digues immergées statiquement stables sont conçues avec une large crête. Des expériences réalisées en laboratoire ont montré que si la cote d'arase d'un brise-lames doit être abaissée, cette diminution rendant l'ouvrage plus vulnérable à l'arrière et moins efficace lors des tempêtes, peut être en partie compensée par une augmentation de la largeur en crête.

On adopte au départ une largeur en crête de 20 m

3.6.1 Poids de blocs de la carapace:

Peu de formules permettent l'estimation du poids des blocs de la carapace des digues immergées. (Vidal et al. (1995)) ont élaboré une formule de stabilité pour les ouvrages à crête abaissée statiquement stables (semi-émergés ou immergés). Ils ont divisé la couche supérieure de la

carapace de la digue en plusieurs zones : le talus avant, la crête, le talus arrière et la section totale. Toutefois, cette formule ne s'applique qu'aux enrochements naturels.

Par conséquent, pour cette phase préliminaire nous choisissons au départ des blocs de béton BCR d'un poids de 20 T pour le talus avant et arrière.

Ces dimensionnements préliminaires seront confirmés et optimisés à l'aide d'essais sur modèles réduits physiques.

4 Variante 02: brise-lames émergés

4.1 Justification et intérêt

Permet à la plage de s'allonger tout en empêchant les sables de se diriger vers le large.

Les ouvrages longitudinaux de bas de plage et de petits fonds, dénommés brise-lames, ont pour objet :

limiter voire stoppé la dissipation transversale des matériaux, lorsque des transports importants de sédiments s'effectuent dans le profil.

Diminuer l'énergie de la houle permettant aux sédiments en transit de s'accumuler à leur abri.

4.2 Paramètres d'implantation

Les paramètres d'implantation: la position au large, la longueur et l'espacement entre les brise-lames ont été obtenus suite à une étude en modèle numérique par Mike 21. Il s'agit d'un compromis étant donné que le but ultime est une zone calme à l'abri de ces brise-lames pour réduire l'impact de la houle sur la cote.

Pour le pied de la digue au large qui se situe approximativement vers la profondeur de -8 m + 1.00 de sur côte donc -9m au total, la hauteur de la houle correspondante est $HS = 4.93$ m. Ainsi, la masse des blocs BCR égale à 15 t chacun peuvent éventuellement convenir.

NB : La tenue de l'ouvrage devra être validée en phase projet par des essais en modèle réduit physique.

4.2.1 Cote d'arase et largeur de crête

Pour des considérations d'ordre esthétique, on retient une cote d'arase de la digue ne dépassant pas les + 4.50 m NGA.

4.2.2 Enrochements du talus arrière du brise-lames (ouvrage peu franchi)

Le graphique, ci-après, permet l'estimation moyenne de la réduction de la taille du matériau du talus arrière d'un ouvrage par rapport à celle du matériau du talus côté mer:

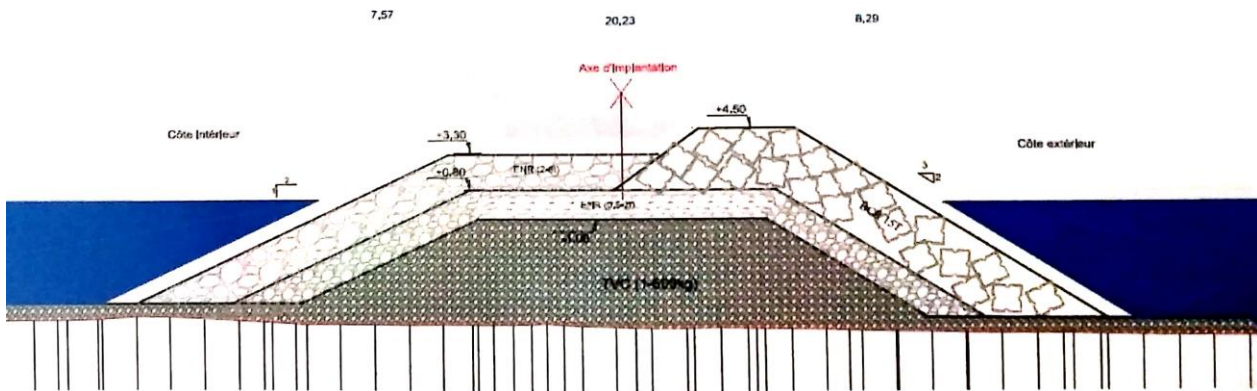


Figure 43 : Profil Brise-Lames émergée (LEM 2020)

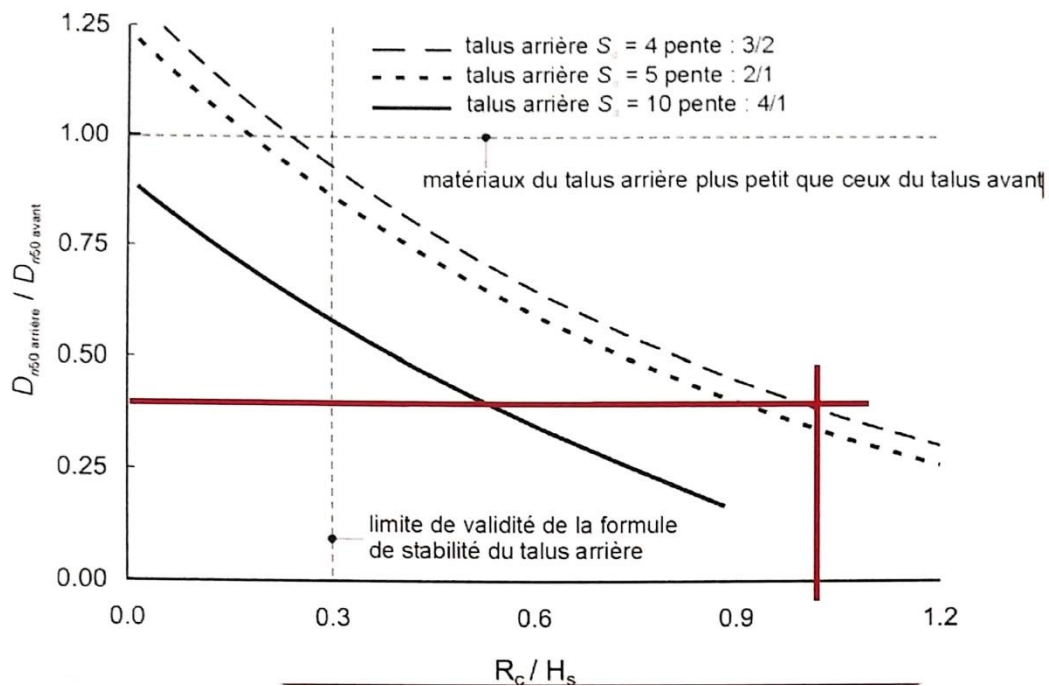


Figure 44 : Graphique d'un talus de pente 3/1, pour des niveaux de crête relativement élevés

Ce graphique donne pour un talus de pente 3/1, pour des niveaux de crête relativement élevés, ce qui suit:

La carapace extérieure pour la partie du large étant arasée à +4.50 m et les houles H_s (cinquantennale) estimée à 4.50 m, le ratio de R_c/H_s donne une valeur proche de 1,00.

$R_c/H_s = 1$ nous donne $D_{n50\text{arriere}}/D_{n50\text{avant}} = 0.45$

Pour des enrochements de la carapace extérieure équivaut à des enrochements naturels de $M50 = 15,40t$ ($D_{n50} = 1800\text{mm}$).

Les enrochements du talus intérieur sont donnés comme suit :

$D_{n50.\text{arriere}}/D_{n50.\text{avant}} = 0.45$ donc :

$D_{n50.\text{arriere}} = D_{n50.\text{avant}} \times 0.45 = 1800 \times 0.45 = 810\text{mm}$

Un D_{n50} arrière de 810 mm représente une masse moyen $M50$ de moins de 1.5 tonne.

Des enrochements de catégorie minimum 1- 3 t pourront être retenus sur le talus arrière du brise-lames.

Tableau 9: Formule d'Hudson

Formule	Variable
<p align="center">Formule d'Hudson</p> $W = \frac{1}{2} \frac{2.7}{\left(\frac{2.7}{1.026} - 1\right)^3} \frac{2.6^3}{3/2}$ <p align="center">W= 5.85 t</p>	<ul style="list-style-type: none"> • $\gamma_s : 2.7 \text{ t/m}^3$ • $\gamma_0: 1.026 \text{ t/m}^3$ • $Cot\alpha : \text{angle du talus, } 3/2$ • $KD=2$
<p align="center">Volume</p> $V = \frac{5.85}{2.7} = 2.16 \text{ m}^3$	<ul style="list-style-type: none"> • $Hb=2.6$ • $n=2$
<p align="center">Diamètre nominale</p> $Dn = \sqrt[3]{2.16} = 1.29 \text{ m}$	
<p align="center">Epaisseur de la carapace :</p> $e=2 \times 1.29 = 2.58 \text{ m}$	
<p align="center">Nombre de blocs par unité de surface :</p> $Ns = \frac{2}{1.29^2} = 1.20 \text{ m}$	

5 Simulation avec ouvrage immergée

5.1 Action des houles de direction Nord-Est N30° sur ouvrage immergée

SW : Au niveau du brise-lame immergée, les houles arrivent de manière perpendiculaire avec des hauteurs comprises entre 4 et 5 m (Figure 45), et diminue d'une manière considérable en arrivant à la zone Ferhani pour des hauteurs comprises de 2.5 à 1 m.

HD : Les houles engendrent un champ de courant de dérive littorale qui suit l'ouvrage de protection venant du Nord-Ouest allant au Sud-Est avec des vitesses de 0.4 et 0.6 m/s au niveau de l'ouvrage avec de forte agitations, mais elles diminuent au niveau de la zone Ferhani (Figure 46).

ST : Le champ des courants favorise le transport sédimentaire qui se dirige vers l'ouvrage (Figure 47). Ce transport favorise une accumulation de sédiment au niveau de l'ouvrage.

5.2 Action des houles de direction Nord N360° sur ouvrage immergée

SW : Au niveau de l'ouvrage les houles du Nord (Figure 48) arrivent avec des hauteurs comprises entre 1.6 et 1.8m et on remarque une importante diminution des hauteurs de la houle à la zone Ferhani avec des hauteurs de 1.0 à 1.2 m.

HD : Les houles engendrent des champs de courants de dérive littorale de différentes directions l'un au nord de la zone venant du Nord-Ouest allant au Sud-Est et un autre venant du Nord-Est au Sud-Ouest se dirigeant vers l'ouvrage avec des vitesses de 0.6 et 0.8 m/s (Figure 49) et on remarque une diminution du champ de courant au niveau de la zone Ferhani,

ST : Le champ des courants engendre un transport sédimentaire important au niveau de l'ouvrage (Figure 50).

5.3 Action des houles de direction Nord-Ouest N340° sur ouvrage immergée

SW : Au niveau de l'ouvrage les houles du Nord (Figure 51) arrivent avec des hauteurs comprises entre 2.0 et 2.25m et on remarque une importante diminution des hauteurs de la houle à la zone Ferhani avec des hauteurs de 1.0 à 1.5 m.

HD : Les houles engendrent un champ de courant de dérive littorale venant du Nord-Ouest allant au Sud-Est avec des vitesses de 0.25 et 0.5 m/s au niveau de l'ouvrage (Figure 52) et il y'a une diminution du champ de courant au niveau de la zone Ferhani (Moins de 0.25 m/s),

ST : Le champ des courants engendre un transport sédimentaire important au niveau de l'ouvrage (Figure 53).

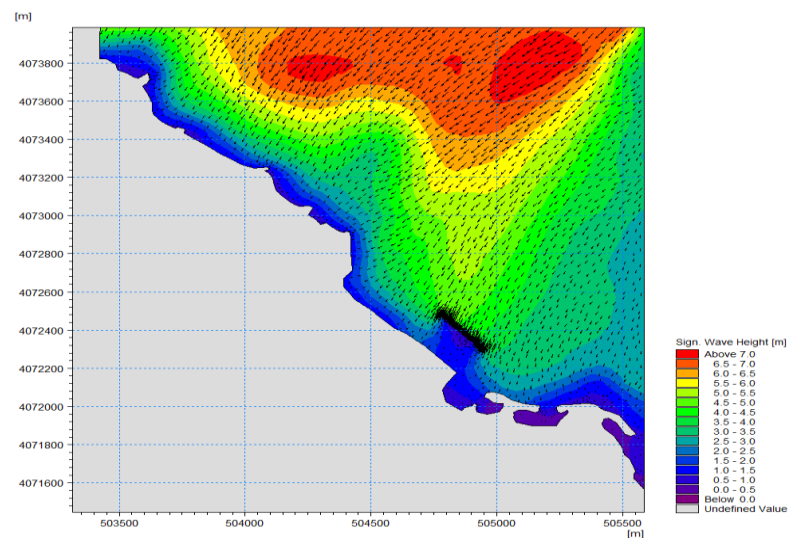


Figure 45: Champ de houles de direction Nord-Est

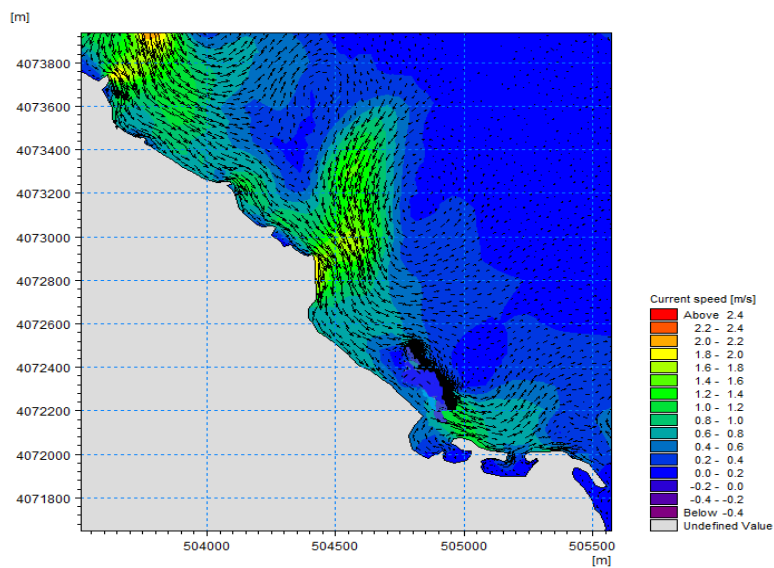


Figure 46: Champ des courants de direction Nord-Est

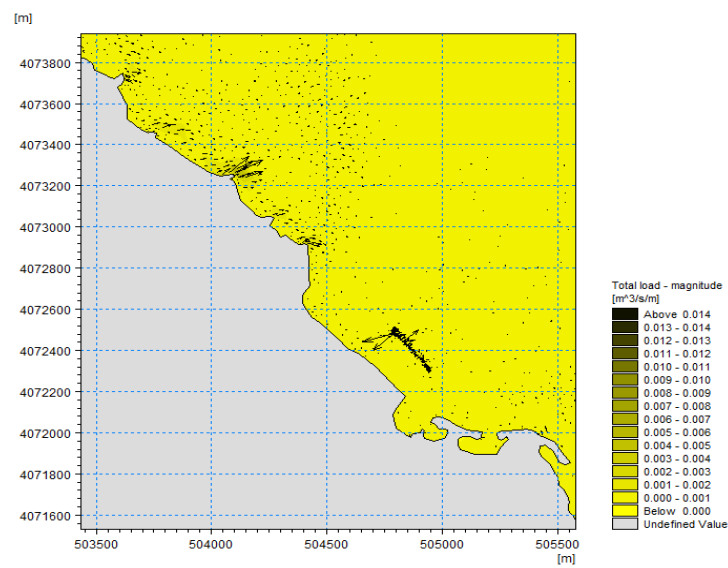


Figure 47: Capacité de sédiments induit par la houle de direction Nord-Est

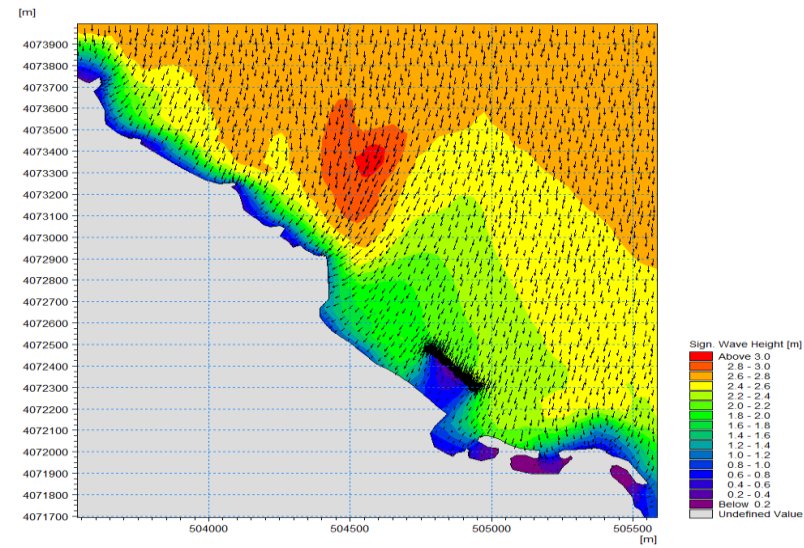


Figure 48: Champ de houles de direction Nord

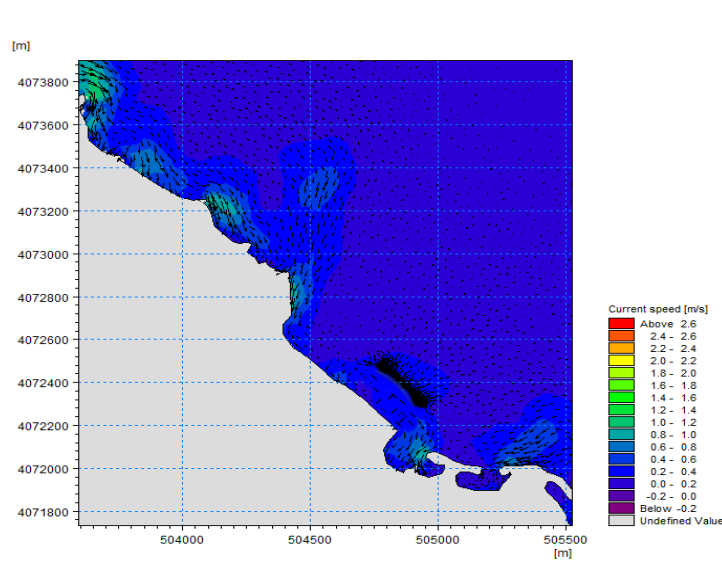


Figure 49: Champ des courants de direction Nord

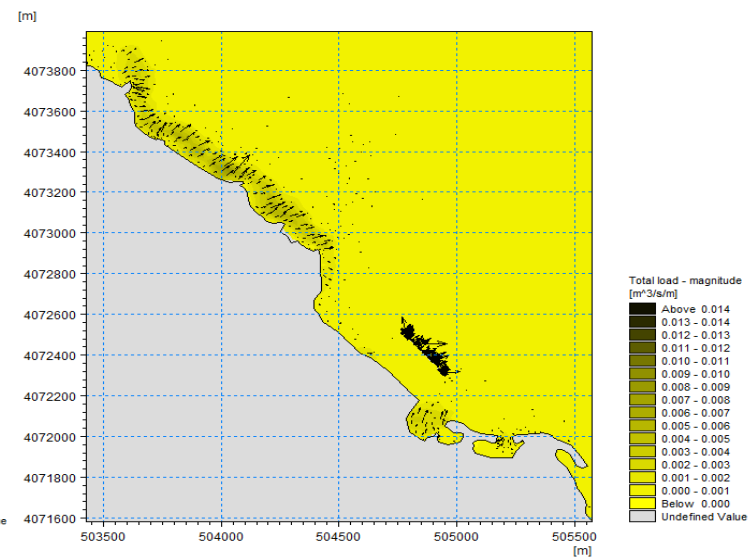


Figure 50: Capacité de sédiments induit par la houle de direction Nord

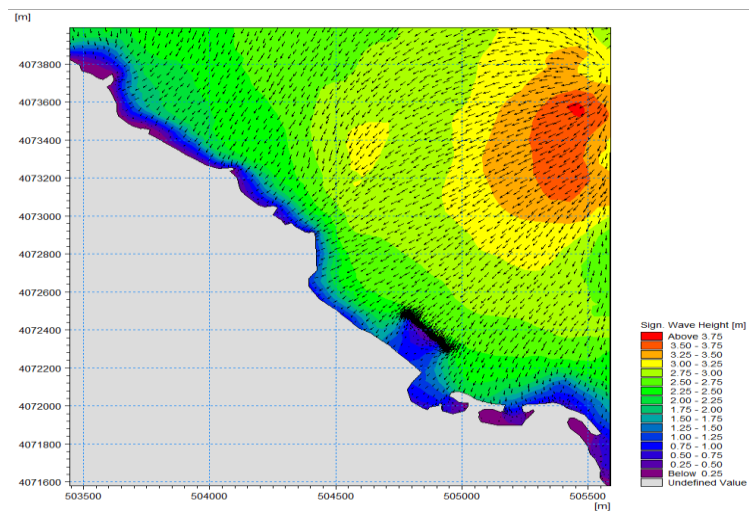


Figure 51: Champ de houles de direction Nord-Ouest

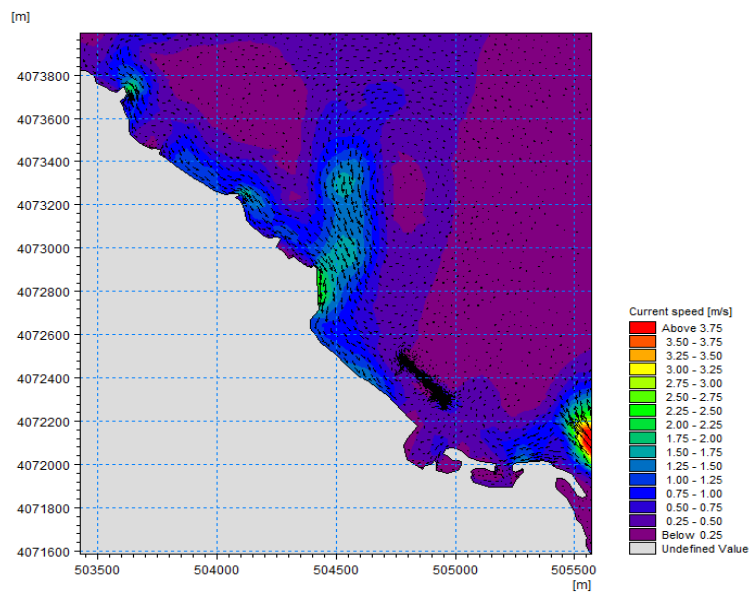


Figure 52 : Champ des courants de direction Nord-Ouest

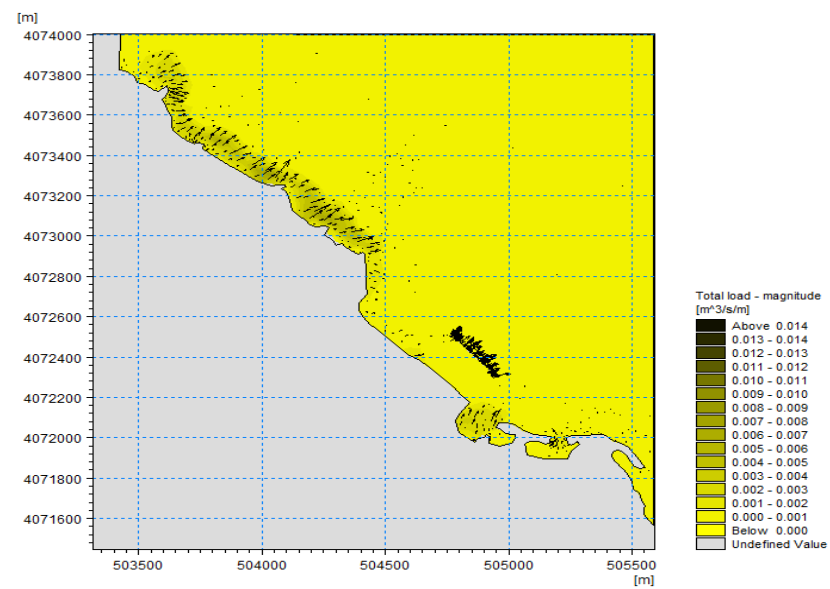


Figure 53 : Capacité de sédiments induit par la houle de direction Nord-Ouest

6 Simulation avec ouvrage émergée

6.1 Action des houles de direction Nord-Est N30° sur ouvrage émergée

SW : Dans le cas de brise-lame émergée, les houles arrivent toujours de manière perpendiculaire avec les mêmes hauteurs au niveau de l'ouvrage entre 4 et 5 m (Figure 54), et diminue en arrivant à la zone Ferhani pour des hauteurs de 2.5 à 1 m.

HD : Les houles engendrent aussi un champ de courant de dérive littorale du Nord-Ouest vers le Sud-Est qui suit l'ouvrage de protection avec des vitesses de 0.75 et 1.25 m/s avec de fortes agitations, et une diminution au niveau de la zone Ferhani (Figure 55),

ST : Le champ de courants favorise un transport sédimentaire qui se dirige vers l'ouvrage (Figure 56).

6.2 Action des houles de direction Nord N360° sur ouvrage émergée

SW : Les houles du Nord (Figure 57) arrivent au niveau de l'ouvrage avec des hauteurs comprises entre 1.6 et 1.8m et aussi une diminution des hauteurs de la houle à la zone Ferhani avec des hauteurs de 1.0 à 1.2 m, comme dans l'ouvrage immergée.

HD : Les houles engendrent un champ de courant avec des vitesses de 0.15 et 0.6 m/s au niveau de l'ouvrage (Figure 58) et on remarque une diminution du champ de courant au niveau de la zone Ferhani (Moins de 0.15 m/s),

ST : Le champ de courant engendre un transport sédimentaire important au niveau de l'ouvrage (Figure 59).

6.3 Action des houles de direction Nord-Ouest N340° sur ouvrage émergée

SW : Au niveau de l'ouvrage les houles du Nord (Figure 60) arrivent avec des hauteurs comprises entre 2.0 et 2.25m avec une diminution des hauteurs de la houle à la zone Ferhani (1.0 à 1.5 m)

HD : Ces houles engendre un champ de courant de dérive littorale du Nord-Ouest au Sud-Est avec des vitesses inférieure à 1 m/s au niveau de l'ouvrage (Figure 61) et au niveau de la zone Ferhani (Moins de 0.15 m/s).

ST : Le champ des courants engendre aussi un transport sédimentaire important au niveau de l'ouvrage (Figure 62).

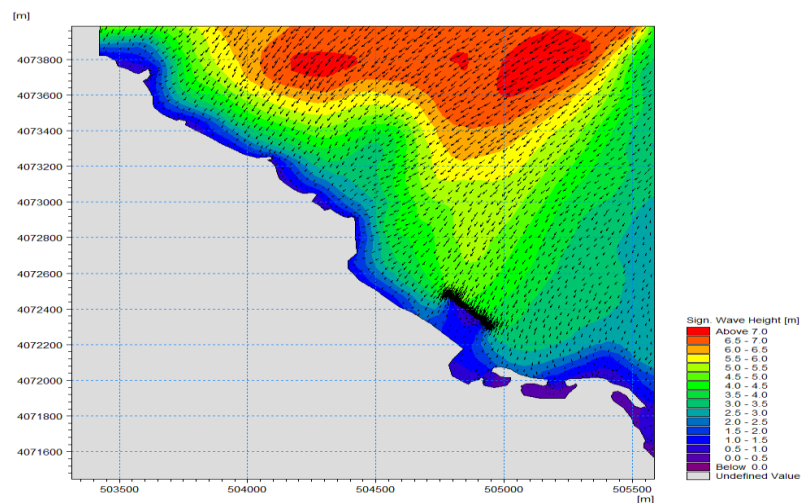


Figure 54 : Champ de houles de direction Nord-Est

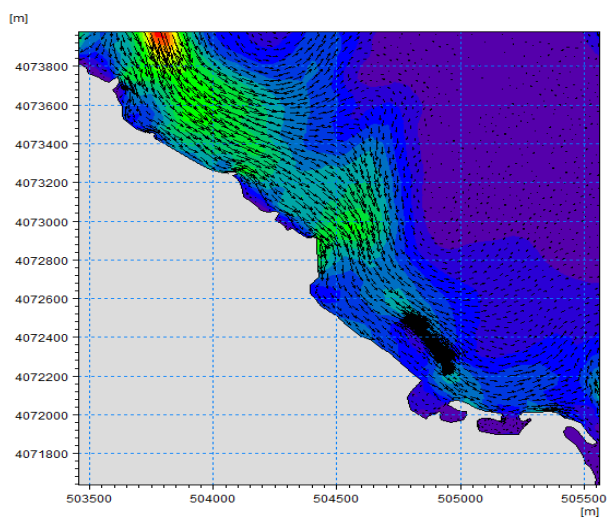


Figure 55: Champ des courants de direction Nord-Est

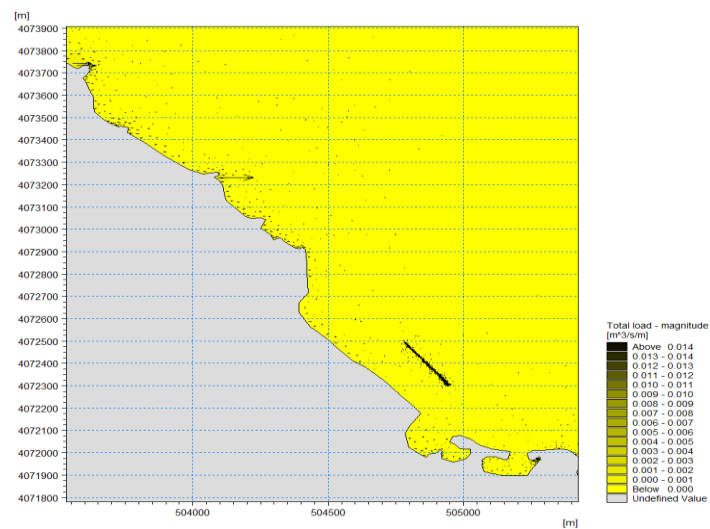


Figure 56: Capacité de sédiments induit par la houle de direction Nord-Est

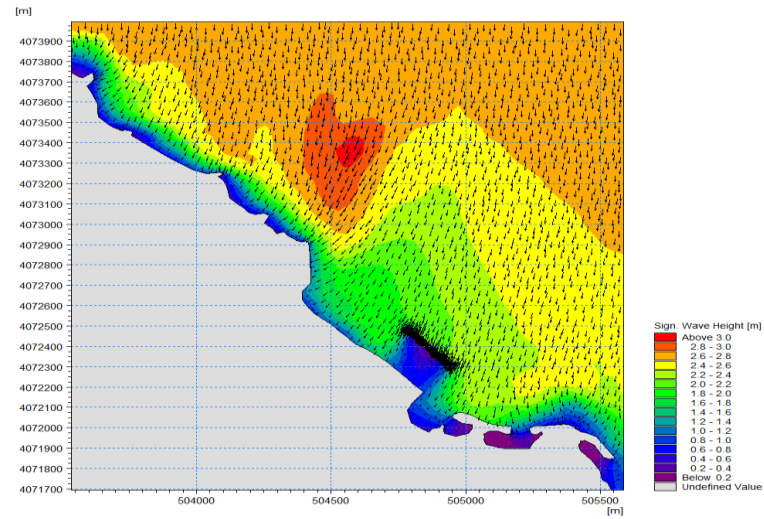


Figure 57 : Champ de houles de direction Nord

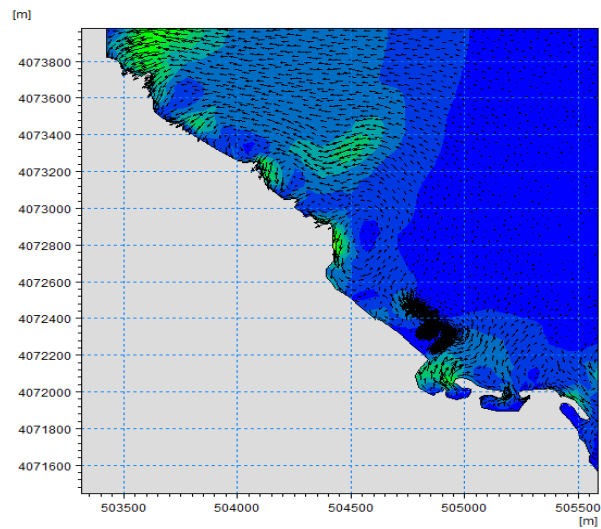


Figure 58: Champ des courants de direction Nord

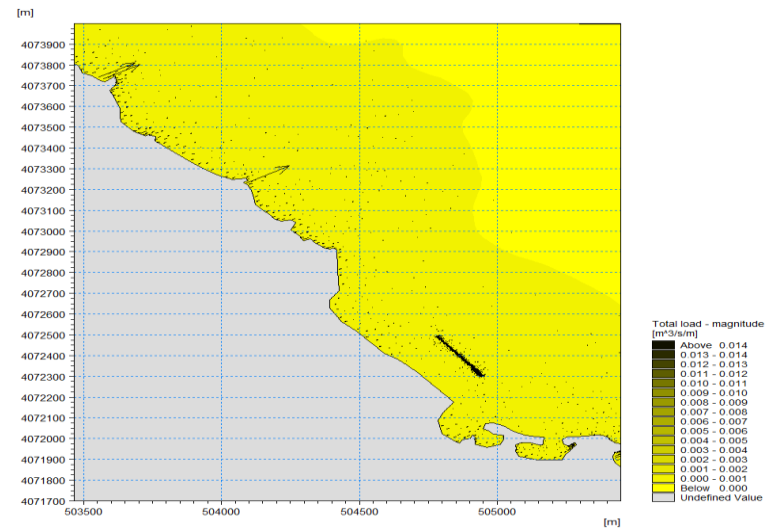


Figure 59: Capacité de sédiments induit par la houle de direction Nord

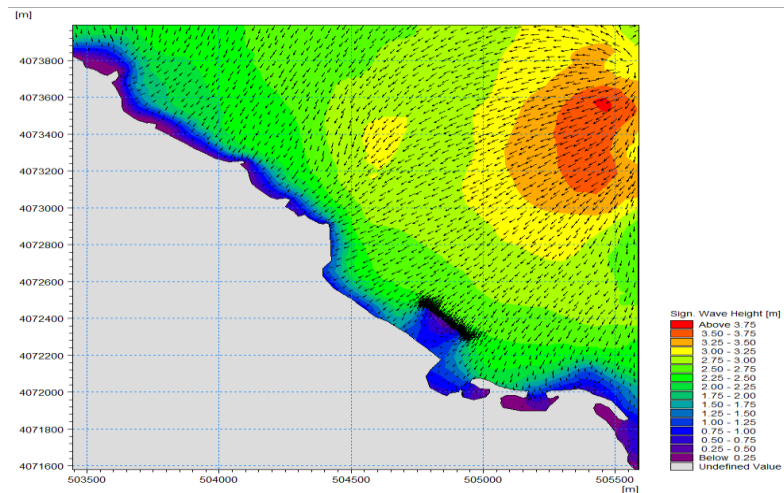


Figure 60: Champ de houles de direction Nord-Ouest

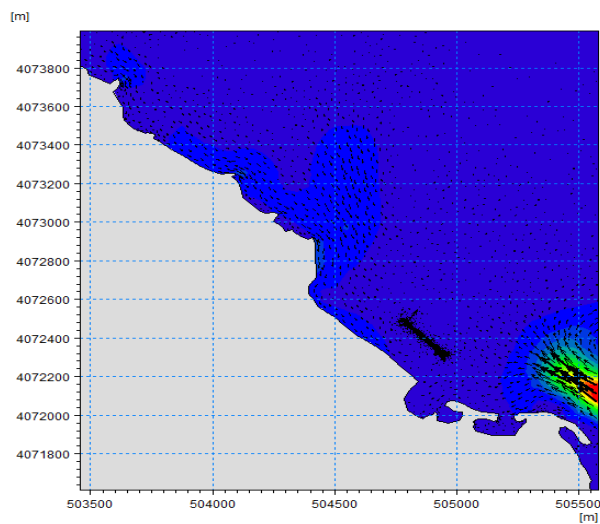


Figure 61 : Champ des courants de direction Nord-Ouest

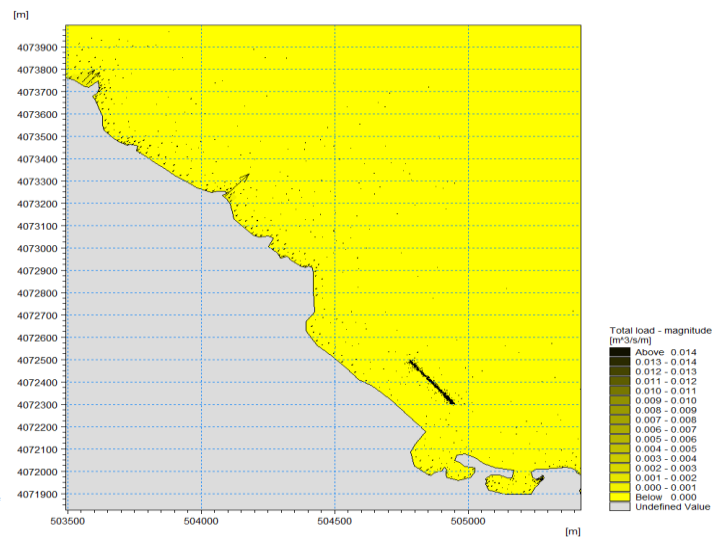


Figure 62: Capacité de sédiments induit par la houle de direction Nord-Ouest

7 Comparaison des variantes

Le choix entre ces deux variantes de protection et d'aménagement proposées, passe par une analyse multicritères. Pour cela, on classe les performances de ces deux variantes avec les critères suivants:

Efficacité : Analyse de la réponse face à la problématique.

La mise en œuvre : La facilité entre les deux de construction

La maîtrise et entretien : Le contrôle et le suivi des ouvrages

Aspects paysagers et environnementaux : Les deux variantes n'ont pas le même impact visuel et environnemental sur le milieu littoral. On évalue ici les contraintes paysagères ainsi que l'impact sur le fonctionnement morphologique et la qualité des eaux du littoral.

Coté efficacité, les deux ouvrage joue un important rôle pour la protection mais on constate que pour l'ouvrage émergée il y'a une diminution du champ des houles et des courants meilleur que celle de l'ouvrage immergée, afin d'offrir une bonne protection contre la mer notamment les franchissements.

Coté mise en œuvre, le brise-lame immergée nécessite moins de difficultés car il est moins large et moins vaste que l'ouvrage émergée.

Coté maîtrise et entretien, on est capable de maîtriser les deux ouvrages, sauf qu'en Algérie on arrive a mieux entretenir et maîtriser les ouvrages émergée que les ouvrages immergée

Enfin, concernant les aspects paysagers et environnementaux, la qualité paysagère est clairement à l'avantage de la variante 1, car le brise - lame immergé n'a point d'impact sur le paysage. Il est aussi utile de signaler que les deux variantes n'altèrent par la qualité des eaux côtières et ont un impact insignifiant sur le transit littoral.

8 Conclusion

L'objectif premier de la présente étude, à savoir, une protection contre la mer notamment les franchissements, est relativement garanti pour les 02 variantes proposées. La différence entre ces variantes réside dans le degré d'efficacité, la difficulté de mise en œuvre, le coté maîtrise et entretien , et l'aspect paysager et environnemental, et donc la variante 01 est plus avantageuse que la variante 02 à

savoir le brise-lame immergée comme variante pour la protection et l'aménagement du rivage FERHANI.

Conclusion générale

9 Conclusion

Cette étude, dont l'objectif était de réaliser une protection pour la zone Ferhani afin d'éviter les différents phénomènes de franchissement des vagues à la cote et d'éviter d'autres danger.

Pour réaliser cette protection littorale, il faut non seulement faire une étude approfondie de la zone et les facteurs intervenant à sa déstabilisation, mais on plus de ça il faut faire un suivi ponctuel et permanent en prenant compte tous les changements qui apparaissent à fin d'aboutir une maintenance durable.

Nous avons dans un premier temps réalisé une vue globale sur la zone d'étude avec des collectes de données du LEM l'étude bathymétrique de la baie d'Alger et de la zone Ferhani, et les simulations de cette dernière à l'état initial nous ont permis de bien analyser la zone pour bien choisir la méthode de protections et faire le choix des variantes selon leurs efficacité et durabilité et d'autres différents critères avec les calculs de dimensionnement et des simulations avec les ouvrages à l'aide des modèles du logiciel MIKE 21 (SW, HD, ST) qui nous offre une bonne approche des phénomènes en mer sur la zone. Et des recherches bibliographique approfondie et détaillé et ces résultats ont affirmé que la base de l'infrastructure est sûr pour la construction. Après une étude sur le comportement de la houle au large et sa propagation en utilisant la méthode numérique, nous avons pu avoir la houle de projet utilisé dans la partie dimensionnement.

Ce mémoire avait pour but d'étudier une zone côtière avec une vue d'aménagement durable pour apporter une protection valide et intarissable.

Perspectives d'avenir : Cette étude sur le littoral certes fourni des résultats importants sur la vulnérabilité/adaptation de ce littoral face à l'élévation du niveau de niveau de la mer et aux actions anthropiques, elle n'en demeure pas moins perfectible mais nécessite des études plus approfondies dans le but d'améliorer la qualité des résultats donc l'aboutissement des résultats satisfaisantes et concrètes qui reflètent exactement à la réalité

Référence bibliographique

10 Références

Houma et al.,(2004) ; LEM. (1998), Houma, (2009). *Modélisation et cartographie de la pollution marine et de la bathymétrie à partir de l'imagerie satellitaire. Thèse de doctorat. Environnement, Paris Est, dans le cadre de l'École doctorale Sciences et Ingénierie, Matériaux, Modélisation et Environnement (Champs-sur-Marne, Seine-et-Marne), en partenariat avec GEONAT (équipe de recherche) et de Laboratoire de géographie physique (laboratoire). P.20*

ABID, A, GOURARI,B (2020). *Etudes hydrodynamiques et agitation portuaire sur le port d'Alger. Mémoire d'ingénieur d'état en aménagement du littoral. Alger, ENSSMAL. P.P.38-39*

Bonnefille, (1992). *Cours d'hydraulique maritime. Paris : Masson, P.208*

CEREMA, (2018). *Rapport d'activité 2018, document publié. Lyon : CEREMA. P.72*

Glangeaud, (1942). *Complément à la notice des titres et travaux de L. Glangeaud (1939-1942).Paris : Y.Cadoret, P.29*

Ardhuin, (2011). *Ocean wave sources of seismic noise. Journal of Geophysical Research Atmospheres.P.21*

Os, Caires, Gent (2011). *Guidelines for Metocean Data Analysis. The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference, Maui, Hawaii, USA. P.P.290-297*

Komen.G.J, (1996). *Dynamics and Modelling of Ocean Waves. Cambridge University Press. P.532*

Jarry,N. (2009). *Etudes expérimentales et numériques de la propagation des vagues au-dessus de bathymétries complexes en milieu côtier. Thèse de doctorat. Université du Sud Toulon-Var. P.26*

Vidal et al. (1995). *L'invention de l'habitation moderne. AAM° Aux archives d'architecture moderne ; Hazan. P534*

Fredsøe, J. (1984). *Turbulent boundary layers in wave current motion. Journal of Hydrolic Engineering. P.P.1103-1120*

Than, V. (2015). *Modélisation d'érosion côtière : application à la partie ouest du tombolo deGiens. France : Thèse de doctorat. L'université de Marseille France. P.56*

Benallou.I, (2020). *Évaluation des impacts des changements climatiques et des activités anthropiques sur le littoral de la baie de Zemmouri : Vulnérabilité et adaptation. Mémoire d'ingénieur d'état en aménagement du littoral. Alger, ENSSMAL. P.37*

Laassilia.O, (2013). *Approche multidisciplinaire de suivi de la dynamique marine du littoral de Mohammedia. Mémoire de Master. Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech. P.142*

LEM, (2020). *Travaux de protection et d'aménagement en surface de la façade maritime de Bab El Oued (Beverde El Kittani - Jardin Conakry -Bord de Mer Stade Ferhani); Mission 2 : Etude d'Avant Projet Sommaire ; 2.4 Rapport de l'Etude d'Avant Projet Sommaire, P.P. 1-49*

LEM, (2020). *Travaux de protection et d'aménagement en surface de la façade maritime de Bab El Oued (Beverde El Kittani - Jardin Conakry -Bord de Mer Stade Ferhani); Mission 2 : Etude d'Avant Projet Sommaire ; 2.2 Rapport de l'expertise sédimentologique, P.P. 1-30*

Azzi.I,Boukert.H, (2017). *Contribution à la connaissance de la morphologie et de la dynamique sédimentaire du littoral centre de l'Algérie (cas d'étude : Boumerdès, Sidi Fredj et Hamdania).* Mémoire d'ingénieur d'état en aménagement du littoral. Alger, ENSSMAL. P.66

Demouche.R, (2017). *Processus mis en jeu dans l'évolution morpho-dynamique de la Baie de Zemmouri (Modélisation et observations hydrodynamiques et sédimentaires).* Mémoire d'ingénieur d'état en aménagement du littoral. Alger, ENSSMAL. P.56

Mezouar.K, (2009). *Etude comparative entre les méthodes de protection des deux littoraux Algérien et Roumain.* Thèse Université technique de construction de Bucarest. P.2

Source internet

DHI. (2014). *MIKE21 spectral wave manuel, scientific documentation.* [Consulté le 15-10-2021] disponible sur le web : www.manuals.mikepoweredbydhi.help

DHI. (2014). *Non-Cohesive Sediment Transport Module.* [Consulté le 15-10-2020] disponible sur le web : www.manuals.mikepoweredbydhi.help

Hamp (1908) *Brise-lames* [Consulté le 04-06-2021] disponible sur le site web: www.cnrtl.fr

Artelia (2010) *Brevet. Brise-lames* [Consulté le 04-06-2021] disponible sur le web : www.wikipedia.org

Résumé :

La zone Ferhani à Bab el Oued, a connu d'importants phénomènes de franchissement des vagues à la côte, affectant même les routes nationales bordant le littoral, ce qui peut engendrer des risques matériels et humains. Compte tenu de cette importance, on à réaliser ce mémoire qui vise à rétablir, une étude de protection et d'aménagement de la zone Ferhani de Bab el Oued et en proposant des variantes de protection.

Mots clés : Ferhani, Bab el Oued, franchissement, côte, aménagement, variante

Abstract :

The Ferhani area in Bab el Oued has experienced significant wave-crossing phenomena at the coast, even affecting the national roads bordering the coast, which can cause material and human risks. Given this importance, we have to carry out this memoir which aims to re-establish a study of protection and development of the Ferhani area of Bab el Oued and proposing variants of protection.

Keywords : Ferhani, Bab el Oued, crossing, coast, development, variants

ملخص :

شهدت منطقة فرحاني في باب الواد ظاهرة عبور موجات كبيرة على الساحل ، حتى أنها أثرت على الطرق الوطنية المنتخمة للساحل ، مما قد يتسبب في مخاطر مادية و بشرية . بالنظر إلى هذه الأهمية ، يتعين علينا تنفيذ هذه المذكرة التي تهدف إلى إعادة إنشاء دراسة الحماية و التهيئة لمنطقة فرحاني في باب الواد و اقتراح حلول للحماية.

كلمات المفتاحية:

فرحاني، باب الواد، عبور، ساحل، تهيئة، حلول