

République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

Ecole nationale supérieure des sciences de la mer et de l'aménagement du littoral



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en science de la mer

Option : Gestion et Protection du Littoral

Thème :

**Caractérisation de l'agitation et l'ensablement des ports
et proposition de solutions de protection cas du port
d'Annaba.**

Présenté par:

- BABOUCHE Dounia
- BOUZID Raja

Soutenu le 18 juillet 2023 devant le jury :

M. DAHMANI A.	Président de jury	MCA
M. MEZOUAR K.	Promoteur	Professeur
Mme. ABDEDAIEM H.	Examinatrice	MCB
M.FELLAH	Examinatrice	Docteur
M. SAF B.	Co-Promoteur	Ingénieur

République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

Ecole nationale supérieure des sciences de la mer et de l'aménagement du littoral



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme Master en géographie et aménagement du territoire

Option : Gestion et Protection du Littoral

Thème :

**Caractérisation de l'agitation et l'ensablement des ports
et proposition de solutions de protection cas du port
d'Annaba.**

Présenté par:

- **BABOUCHE Dounia**
- **BOUZID Raja**

Soutenu le 18 juillet 2023 devant le jury :

M. DAHMANI A.	Président de jury	MCA
M. MEZOUAR K.	Promoteur	Professeur
Mme. ABDEDAIEM H.	Examinatrice	MC B
M.FELLAH	Examinatrice	Docteur
M. SAF B.	Co-Promoteur	Ingénieur

Remerciement

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui nous voudrions témoigner toute nos gratitude.

Nous adressons de nos très vives gratitude et respects a notre encadrant, Monsieur MEZOUAR Khoudir pour son soutient, ses conseils et pour ses appréciations sur ce travail. Nous sommes très reconnaissantes pour sa disponibilité, sa bienveillance et son soutien permanent. On lui doit beaucoup pour le contenu du travail présenté.

Ainsi, pour son aide à différentes entraves rencontrées, pour sa gentillesse et ses qualités humaines.

Nous tenons à remercier madame ABDEDALEM.H d'avoir accepté d'examiner notre modeste travail.

Nous désirons remercier aussi monsieur DAHMANI.A d'être président pour notre soutenance.

Nous aimerions aussi remercier madame FELLAH d'être présente pour examiner notre Business Model Canvas (BMC) afin d'obtenir le diplôme Start up.

Un grand merci pour notre Co-encadrant SAF.B pour avoir nous aidé toute la période de notre mémoire. Et à la fin on tient à remercier énormément BENALLOU Imen et BELLABAD Fahima pour ses aides et ses conseils et ses patiences.

Dédicace 1

C'est avec une profonde émotion que je dédie ce mémoire de fin d'études à toute personnes qui ont joué des rôles irremplaçables dans mon parcours académiques

Je dédie en premier lieu mes parents, vous avez été mes premiers enseignants, m'inculquant des valeurs solides et m'inspirant à poursuivre mes rêves. Votre soutien indéfectible a été une bénédiction dont je ne saurais pas me passer.

A mes sœurs Sara Sihem et Loubna, vous avez été mes complices inséparables, partageant les rires et les larmes, et m'apportant un réconfort inestimable dans les moments de doutes. Votre présence lumineuse a été un véritable moteur pour moi, ainsi mon cher neveu Nazim.

A mes amies Rayene Saadia, Nisrine, Raja, vous avez été mes confidentes et mes alliées, m'insufflant courage et persévérance dans les moments de challenge. Votre amitié sincère et votre soutien constant ont été des trésors qui ont enrichi mon chemin.

A Imen et Fahima qui m'ont aidé tout au long de mon travail.

Ce mémoire témoigne de notre amour, de notre complicité et de nos liens indéfectibles. Vous avez été ma source d'inspiration, et je suis infiniment reconnaissante de vous avoir à mes côtés.

En dédiant ce travail à vous, mes parents, mes sœurs et mes amies, je vous exprimer toute ma gratitude pour votre présence réconfortante et votre encouragement inébranlable tout au long de cette aventure.

Avec toute ma tendresse.

Dédicace 2

A cœur vaillant rien d'impossible, a conscience tranquille tout est accessible. Je dédie mon travail à mes chers honorables parents, qui représentent pour moi la vie entière.

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'Amour l'estime le Développement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon bien être. Je souhaite de tout mon cœur que dieu les gardes pour moi.

A mes frères Anis, Islem, Iyed et sœurs Ines, Sana, Lamis qui m'ont encouragé tout le long de mon parcours d'étude que dieu les gardes pour moi et tel qu'on est toujours l'un pour l'autre ainsi à mes chers neuves (Yacine, Yanis) et nièces (Dania, Yasemine, Noorseen, Mayar).

Je dédie ce travail à ma deuxième famille LAYACHI et surtout ma chère sœur que la vie ma donnée Aya BAKHOUCHA.

A Abir et Salima que J'ai vécu les meilleurs 5 ans avec eux tellement qu'elles sont été très proche à moi, sincères, loyales, on a vécu le Meilleur et le pire ensemble, je les considère toujours comme mes Sœurs que dieu vous gardes pour moi et qu'on partagera d'autres Expériences ensemble.

Et enfin à mes chères copines que j'ai partagé avec eux mon parcours D'étude (Dounia, Rayene, Nesrine, Hadil,...)

Table des matières

<i>Remerciement</i>	II
<i>Dédicace 1</i> III	
Table des matières.....	V
Listes des figures VII	
Liste des tableaux.....	X
Liste des acronymes.....	XI
Introduction générale.....	1
Chapitre I 3	
Généralités 3	
I.1. Situation géographique	4
I.2. Historique du port d'Annaba :	5
I.4. Caractéristique du port d'Annaba	6
I.5. Géomorphologie du golfe d'Annaba :	8
I.6. Facteur climatologique et océanographique	9
Chapitre II 18	
Analyse des évènements extrêmes.....	18
II.1. Introduction	19
II.2. Théorie des valeurs extrêmes :	19
II.2.1. Méthode des Blocs Maximas (BM) :	19
II.2.2. Méthode Peaks Over Threshold (POT):	27
II.2.3. Comparaison entre les méthodes POT et Blocs Maximas (GEV distribution)	31
III. Conclusion	32
Chapitre III 33	
Etude hydrodynamique et agitation portuaire.....	33
III.1. Introduction	34
III.2. Présentation du logiciel	34
III.2.1. Modules de modélisation numérique- Mike 21	34
III.3. Collecte de données bathymétrie	38
III.3.1. Traitement des données :	40
III.3.2. Génération et interpolation de la Mesh	40
III.4. Bathymétrie :	43
III.4.1. Bathymétrie du Golf d'Annaba :	43

III.4.2. Bathymétrie du port d'Annaba :	44
III.5. Etude d'hydrodynamique	44
III.5.1. Simulation des houles extrêmes pour des périodes de retours correspondantes.	45
III.6. Etude d'agitation dans le port d'Annaba	53
III.6.1. Blue Kenue^{MC}	53
III.6.2. Le système de modélisation TELEMAC-MASCARET	55
III.7. Conclusion	61
CHAPITRE IV 62	
Solutions d'adaptation.....	62
CHAPITRE IV : Solutions d'adaptation	63
IV.1. Introduction	63
IV.2. Définition de dragage	63
IV.3. Techniques de dragage	63
IV.3.1. dragage mécanique	64
IV.3.2. le dragage hydraulique :	65
IV.3.3. Le dragage pneumatique	66
IV.4. les modalités du dragage	67
IV.5. gestion de sédiments dragués	67
IV.5.1. gestion par immersion ou en mer :	67
IV.5.2. dépôt à terre	67
IV.6. dragage du port d'Annaba :	68
IV.6.1. Interprétation des résultats de simulation après le dragage :	68
IV.7. Conclusion	70
Références bibliographiques	74
ANNEXES 77	
BMC: Creation d'une Start up	82
Résumé 92	
Abstract 92	

Listes des figures

Figure I- 1 Situation géographique du golfe d'Annaba (Basemap ArcGis, 2023).....	4
Figure I- 2 situation géographique du port d'Annaba. (Basemap ArcGis, 2023).	5
Figure I- 3 Caractéristiques du port d'Annaba. (DTP Annaba).	8
Figure I- 4 Rose de vent annuelle et saisonnière pour la période 1992-2021.	10
Figure I- 5 Roses des vents mensuels pour la période 1992-2021.	11
Figure I- 6 Courbe représentative des caractéristiques de la houle. (Bonnefille, 1980).	12
Figure I- 7 Rose de la houle saisonnière et annuelle pour la période 1992-2021.	15
Figure I- 8 Roses mensuelles des houles pour la période 1992-2021.	16
Figure II- 1 : Capture des séries temporelles des paramètres des houles (WaveClimate).	21
Figure II- 2 : Représentation de méthode des Blocs Maximas sur les hauteurs de houle (1992-2021).....	22
Figure II- 3 : Estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour l'omnidirectionnel.	23
Figure II- 4 : Estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour chaque direction.....	24
Figure II- 5 : Estimation des événements extrêmes via la distribution de Weibull pour l'omnidirectionnel.	25
Figure II- 6 : Estimation des événements extrêmes via la distribution de Weibull pour chaque direction.....	26
Figure II- 7 : Moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelle de l'enregistrement.....	28
Figure II- 8 : Représentation de méthode POT sur les hauteurs de houle de 1992 – 2021.....	29
Figure II- 9 Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour omnidirectionnel.	29
Figure II- 10 Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour chaque direction.	30
Figure II- 11 Comparaison des résultats obtenu avec les deux méthodes POT et GEV.	32
Figure III- 1 Maillage du modèle zoom sur le golfe d'Annaba.	42
Figure III- 2 Maillage du modèle zoom sur le port d'Annaba.	42
Figure III- 3 Bathymétrie du modèle zoom sur la baie d'Annaba.	43
Figure III- 4 bathymétrie du modèle zoom sur le port d'Annaba.	44
Figure III- 5 : Champs des houles de direction N au près du port d'Annaba pour la période 50 ans.....	47
Figure III- 6 Champs des houles dans le Golf d'Annaba de direction N pour la période 50 ans (HS=7.11m /Tp=5.95 / U10=16.61/s).....	47
Figure III- 7 Champs des houles de direction NNE au près du port d'Annaba pour la période 50 ans.....	47

Figure III- 8 Champs des houles dans le Golf d'Annaba de direction NNE pour la période 50 ans ($H_S=6.07m / T_p=14.55 s / U_{10}=16.25m/s$).....	47
Figure III- 9 Champs des houles dans le Golf d'Annaba de direction NE pour la période 50 ans ($H_S=4.64m / T_p=14.07s / U_{10}=15.58m/s$).....	48
Figure III- 10 Champs des houles de direction NE au près du port d'Annaba pour la période 50 ans.....	48
Figure III- 11 Champs des houles de direction ENE au près du port d'Annaba pour la période 50 ans.....	48
Figure III- 12 Champs des houles dans le Golf d'Annaba de direction ENE pour la période 50 ans ($H_S=3.91m / T_p=15.95s / U_{10}=16.94m/s$).....	48
Figure III- 13 Champs des houles de direction NNW au près du port d'Annaba pour la période 50 ans.....	49
Figure III- 14 Champs des houles dans le Golfe d'Annaba de direction NNW pour la période 50 ans ($H_S=10.26m / T_p=20.21s / U_{10}=21.01m /s$).....	49
Figure III- 15 Champs des houles dans le Golf d'Annaba de direction NW pour la période 50 ans ($H_S=10.50m / T_p=15.12s / U_{10}=25.38m /s$).....	49
Figure III- 16 Champs des houles de direction NW au près du port d'Annaba pour la période 50 ans.....	49
Figure III- 17 Champs des courants au voisinage de port d'Annaba de direction N pour la période 50ans ($H_s= 7.11m, T_p= 16.61s, U_{10}= 5.95m/s$).....	51
Figure III- 18 Champs des courants au voisinage de port d'Annaba de direction ENE pour la période 50ans ($H_s= 3.91m, T_p=16.94s, U_{10}= 15.85m/s$).....	51
Figure III- 19 Champs des courants au voisinage de port d'Annaba de direction NNE50 pour la période 50ans ($H_s= 6.07m, T_p= 16.25s, U_{10}= 14.55m/s$).....	51
Figure III- 20 Champs des courants au voisinage de port d'Annaba de direction NE pour la période 50ans ($H_s= 4.64m, T_p= 14.07s, U_{10}= 15.58m/s$).....	51
Figure III- 21 Champs des courants au voisinage de port d'Annaba de direction NW pour la période 50ans ($H_s= 10.50m, T_p= 15.12s, U_{10}= 25.38m/s$).....	52
Figure III- 22 Champs des courants au voisinage de port d'Annaba de direction NNW pour la période 50ans ($H_s= 10.26m, T_p= 21.01s, U_{10}= 20.21m/s$).....	52
Figure III- 23 Maillage du port (BlueKnue).....	54
Figure III- 24 les fichiers d'entrée par Artemis.....	58
Figure III- 25 : Résultat de l'agitation pour la période de retour 30 ans -Scénario initial- Nord-Nord-Est.....	60
Figure III- 26 Résultat de l'agitation pour la période de retour 50 ans -Scénario initial- Nord-Nord-Est.....	60
Figure VI- 1 drague à godets.....	64
Figure VI- 2 drague à pelle.....	64
Figure VI- 3 drague à benne.....	65
Figure VI- 4 drague aspiratrice stationnaire.....	65
Figure VI- 5 drague aspiratrice en marche.....	66
Figure VI- 6 drague aspiratrice à dés agrégateur.....	66

Figure VI- 7 image satellitaire du port d'Annaba	68
Figure VI- 8 Résultat de l'agitation pour la période de retour 50ans- scenario aménagé-NNE.	69
Figure VI- 9 Résultat de l'agitation pour la période de retour 50ans- scenario aménagé-N....	69

Liste des tableaux

Tableau II- 1 Tableau résumant l'ensemble des résultats obtenu par la méthode GEV selon la distribution de Gumbel.....	23
Tableau II- 2 Tableau résumant l'ensemble des résultats obtenu par la méthode GEV selon la distribution de Weibull.....	27
Tableau II- 3 Tableau résumant l'ensemble des résultats obtenu par la méthode POT.	31
Tableau III- 1 l'intervalle de profondeur.....	39
Tableau III- 2 caractéristique des houles extrêmes dans les différentes périodes de retour cas du port d'Annaba.....	45

Liste des acronymes

BM: Block Maxima

DHI: Dutch hydrodynamic institute

DTP : direction des travaux publics

GEV: Generalized Extreme values

LEM : Laboratoire des études maritimes

POT: Peaks Over Threshold

TVE: Extreme Value Theory

Introduction Générale

Introduction générale

Les océans et les mers couvrent près de 73% de la surface de la terre et constituent l'un des meilleurs moyens de communication. Ils contribuent activement à l'évolution et au développement des nations. C'est aussi un moyen majeur de transport de grandes quantités de marchandises. Les navires et les ports sont les instruments de ce moyen de communication. Les navires servent au transport et les ports servent au déchargement et au stockage des marchandises des différents produits en transit. **(Landivola, 2006)**

Nous savons que de l'eau de mer est en perpétuel mouvement. Ce mouvement dépend surtout de la position des astres et de la circulation des vents. Selon la position des astres, l'eau de mer est soumise à des marées basses et hautes, et la hauteur de la houle dépend du vent, mais aussi il faut tenir en compte de la fréquence et l'intensité des cyclones : les ports sont principalement utilisées comme abris pour les navires lors d'activités commerciales. C'est un plan d'eau entretenu pour permettre aux navires de débarquer, réparer, charger et décharger sans délai.

La gestion des structures portuaires nécessite de connaître le nombre de jours d'exploitation et de dangerosité des navires amarrées et des structures adjacentes. Ce type de problème peut être étudié par la modélisation numérique et physique, qui doit prendre en compte tous les phénomènes liés à la déformation des vagues dans le port (l'incidence et le rayonnement e la houle à travers les chenaux ouvert au large, les phénomènes de réflexion multiple, la diffraction et réfraction de la houle, etc.).

Lorsque la houle se propage depuis le large vers le port, elle peut entraîner des amplifications significatives de la hauteur de la surface libre, correspondant aux périodes propres du port. Ce phénomène connu sous le nom d'agitation, de seiche ou de déferlante portuaire, peut entraîner une navigation imprévisible et causer des dommages importants aux navires amarrés et aux structures environnantes. Afin de résoudre ce type de problème le concepteur doit être capable de calculer la réponse du port aux houles présentes dans l'environnement du site. Le calcul de l'agitation portuaire consiste à évaluer chaque point, l'agitation résiduelle (la hauteur des vagues résiduelles a l'intérieur du port) pour différentes configuration de houles (hauteur, direction, période) et à déterminer, à partir d'une base de données de houles.

Le port d'Annaba est l'un des dix principaux ports commerciaux en Algérie. Il exerce son influence sur douze wilayas du pays, où se trouvent des zones industrielles dotées d'un fort potentiel de développement et de ressources naturelles.

L'objectif de ce travail est de réaliser une étude sur le port d'Annaba, spécifiquement sur l'approche d'hydrodynamique et l'évaluation de l'agitation résiduelle aux différents postes du port afin de déterminer leur disponibilité tout au long de l'année pour les opérations prévues. Cette étude d'agitation portuaire est utilisée pour viser à préciser les régimes des vagues à l'emplacement du port et à déterminer les houles extrêmes avec leurs directions pénalisantes qui seront utilisées dans les modèles numériques Mike 21 et ARTEMIS.

Cette étude est la première et unique réalisée sur le port d'Annaba.

La structure de travail sera la suivante :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude, le plan de masse du port d'Annaba, données climatologiques et océanographique de la zone d'étude.
- Le deuxième chapitre consiste une estimation des événements extrêmes climatologiques à partir de la théorie des valeurs extrêmes (GEV, POT) par le langage de programmation Python.
- Le troisième chapitre comprend la modélisation numérique des phénomènes hydrodynamiques présents dans le golf et le port d'Annaba à partir de l'estimation des événements extrêmes et la réalisation de bathymétrie et les conditions de projet à simuler. La modélisation numérique se fait avec deux modèles :
 - Le premier modèle qui sert à étudié la propagation de la houle du large vers la cote par le couple modèle MIKE21-SW et MIKE21-HD.
 - Le deuxième modèle qui sert à étudier l'agitation portuaire par le modèle ARTEMIS après la réalisation de la mesh du port par le BlueKnue.
- Le quatrième chapitre présent le dragage qui est une opération de maintenance essentielle dans les ports. En modifiant le fond et le chenal d'accès, le dragage peut réduire le problème d'agitation et adapter le seuil de confort aux normes d'accostage des navires.

Chapitre I

Généralités

I. Généralités sur la zone d'étude

I.1. Situation géographique

I.1.1. Le golfe d'Annaba

Le golfe d'Annaba est situé sur la partie orientale de la côte algérienne. Il est caractérisé avec sa forme semi-circulaire qui s'étend sur une quarantaine de kilomètres et une profondeur qui ne dépasse pas 65m au large. Il est délimité par le cap de garde à l'ouest ($36^{\circ}58'02''\text{N} - 7^{\circ}47'49''\text{E}$) et le cap rosa à l'est ($36^{\circ}57'03''\text{N} - 8^{\circ}14'35''\text{E}$), ainsi par la mer méditerranéenne au nord.

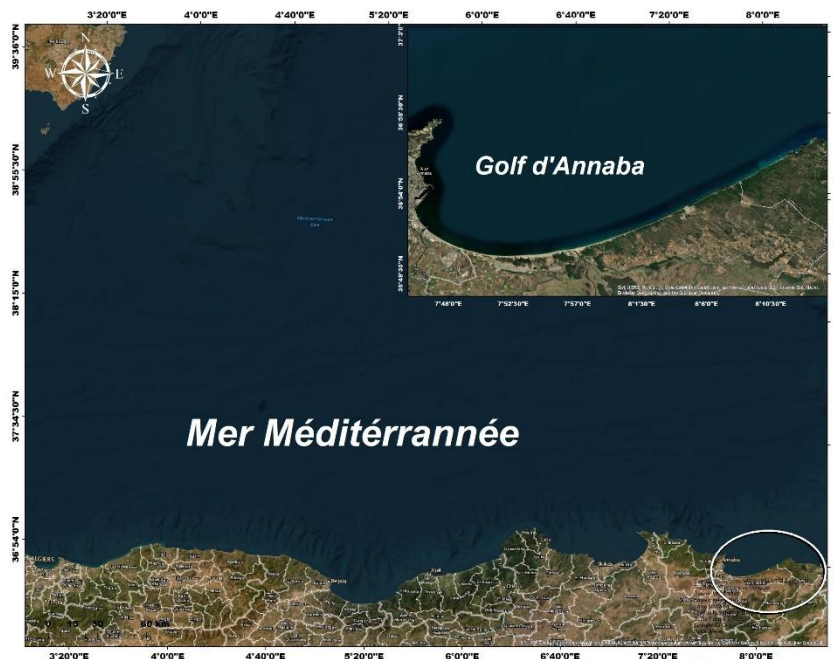


Figure I- 1 Situation géographique du golfe d'Annaba (ArcGis, Basemap 2023).

I.1.2. Le port d'Annaba

Le port d'Annaba, fait partie des dix(10) principaux ports de commerce d'Algérie. Son champ d'influence s'entend sur douze wilayas du pays ou sont situées des zones industrielles a fort potentiels de développement et ressources naturelles tels que les mines de fer, de phosphates et les champs pétroliers. (Port d'Annaba (annaba-port.com)).

Le port d'Annaba est situé au sud-ouest du golf d'Annaba ayant pour coordonnées $36^{\circ}54'11''\text{N}$ et $7^{\circ}47'9''\text{E}$. Naturellement abriter par le cap de garde des vents Nord-Ouest, l'extrémité rocheuse de la jetée du lion vient s'enraciner fermement ainsi l'avant-port d'Annaba et le protège de la houle du large au sud se déverse l'oued Seybouse qui a été détourné lors des travaux d'extension du port, ainsi que l'oued Boudjimah.(LEM, 2016).

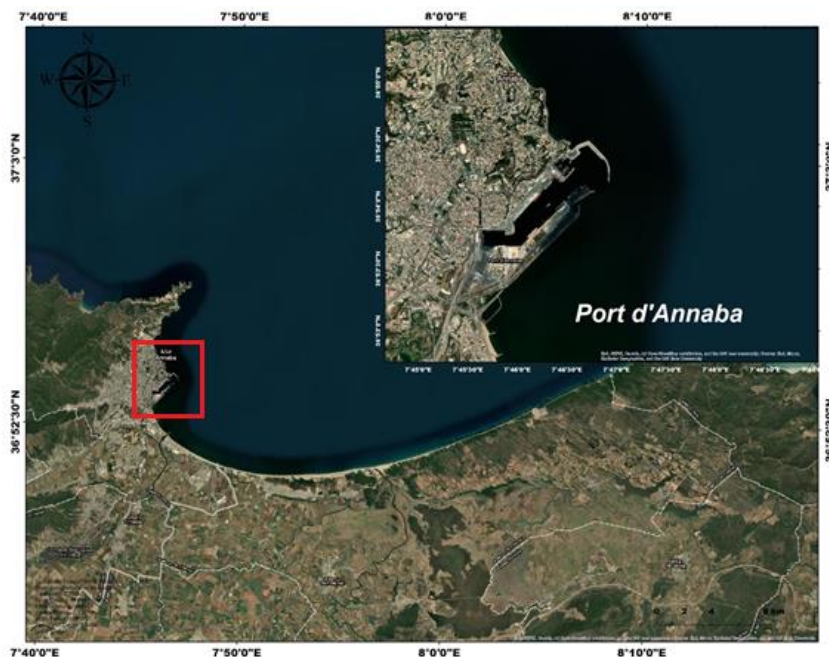


Figure I- 2 situation géographique du port d'Annaba. (ArcGis, Basemap 2023).

I.2. Historique du port d'Annaba :

L'Histoire du port est très bien contée par l'entreprise portuaire d'Annaba à travers son site internet (www.annaba-port.com) :

La position bien abritée du golfe d'Annaba, la fertilité des plaines qui s'étendent au sud du rivage, les facilités de communication qu'offrait la vallée de la Seybouse ont très tôt attiré les marchands et favorisé la création d'une grande agglomération en ce point de l'Afrique du nord.

Les phéniciens y édifièrent leur premier comptoir au *XI^{ème}* siècle avant J.C. les marchands de Carthage y fondèrent par la suite un comptoir sous le nom d'Ubbo et en firent une colonie très prospère.

Après la domination des rois de Numidie survint l'occupation romaine. La ville prit le nom de Hippo-Regius ou Hippone et devint une riche cité et un marché opulent qui rivalisait avec Carthage.

Les navires disposaient d'un excellent mouillage dans l'anse du fort génois, en attendant de gagner l'estuaire de la Seybouse et le lit du fleuve où s'effectuait le transit des marchandises.

En dépit des nombreuses invasions, la cité demeura un centre d'échange avec les cités méditerranéennes, gènes en particulier qui s'était réservé les produits de la pêche du corail. Sous l'occupation française, les premiers éléments du port consistèrent en un embarcadère situé à labri de l'éperon rocheux dit « pointe cigogne » et une petite cale de halage à proximité.

Les richesses minérales, agricoles et le mouvement commercial croissant imposèrent d'importants travaux d'aménagement du port qui commencèrent en 1856. Ainsi en 1870, 80ha de plan d'eau étaient délimités par:

- Les quais nord et ouest de la partie darse sur 590m linéaires.
- Les jetées nord et sud.

La loi du 7 septembre 1885 déclara d'utilité publique un programme de grands travaux qui portait sur :

- La création d'un nouvel avant-port de 47ha.
- La transformation de l'avant-port existant en darse.
- La construction, au nord de cette nouvelle darse d'un quai terre-pleins de la pointe cigogne à la jetée Babayaud.
- La construction d'une cale de halage à l'extrémité de ce nouveau quai.
- Des dragages généraux à la cote (-7,50m).

Après 1962, plusieurs travaux d'aménagement ont été entrepris :

- La construction du poste n°13, sur une longueur de 320m et 13m de tirant d'eau pour l'importation de charbon et l'exportation de produit sidérurgiques et métallurgiques.
- Le rempiétement des postes n°19, 20 et 21.
- L'aménagement d'un port de pêche à l'Anse de la Grenouillère.
- La construction d'un terminal polyvalent RoRo/conteneurs au quai ouest inauguré fin 1997.

I.4. Caractéristique du port d'Annaba

La zone portuaire a un plan d'eau de 107ha et couvre une surface de 13 ha, répartis comme suit :

- un avant plage : au niveau duquel se trouve une passe d'entrée de 245m de longueur, abritée au nord et au Nord-est par la jetée concave du lion (950m de longueur) et au Sud-Est par la jetée sud (402m de longueur). Il atteint 45ha d'étendue et sa profondeur varie entre 10 et 14.1m. Il offre ainsi des ouvrages d'accostage sur 720ml de quai et appontement. (LEM, 2016).
- une grande darse : qui se trouve séparée de l'avant-port par la passe BABAYAUD ayant une largeur de 270m, un plan d'eau de 40ha et une profondeur qui varie entre 9.80 à 12.5m. il offre ainsi des ouvrages d'accostage sur 2040ml de quai. (LEM, 2016).
- une petite darse : on y accède par la mole cigogne de 180m de largeur sur une étendue de 9ha et une profondeur qui varie entre 6.20 à 9.5m. Il offre ainsi des ouvrages sur 1525ml de quai. (LEM, 2016).
- la grenouillère : se situe près de l'avant-port, c'est le petit port réservé à la pêche. (LEM, 2016).

Tableau I-1: information sur les quais du port d'Annaba. (LEM, 2016).

Poste à Quai	Longueur (m)	Profondeur (m)	Affectation des postes
Quai N°1 (Nord)	886 m		
Poste 7	151	11.00	Traitement des marchandises générales et diverses.
Poste 8	145	11.00	
Poste 9	145	11.00	
Poste 10	145	11.00	
Poste 11	145	11.00	
Poste 12	155	11.00	Céréales.
Quai N°2 (Warnier)	350 m		
Poste 3	150	11.00	Conteneurs, P0/R0, car-ferries.
Poste 4	200	11.00	Car-ferries.
Quai N°3	240 m		
Poste 1	130	10.50	Conteneurs.
Poste 2	110	10.50	
Quai N°4 (Hippone)	575 m		
Poste 19	220	9.50	Phosphates
Poste 20	135	9.50	Potasse, urée en vrac, huiles usagées, produits pétroliers.
Poste 21	130	9.50	Acide phosphorique
Poste 22	90	-10.50	Marchandises divers, bitume.
Quai N°5 (Sud)	1360m		
Poste 13	320	14.00	Charbon, coke, minerai de fer
Poste 14	276	12.50	Produits sidérurgiques.
Poste 15	174	12.50	
Poste 16	155	12.50	Phosphate.
Poste 17	130	12.50	
Poste 18	125	12.50	Ammoniac, UAN, Fuel, Goudran.
Mole Cigogne	270 m		
Poste 5	125	6.50	Accostage des remorqueurs.
Poste 6	175	7	Marchandises générales de diverses.



Figure I- 3 Caractéristiques du port d'Annaba. (DTP Annaba).

I.5. Géomorphologie du golfe d'Annaba :

Le golfe d'Annaba, délimité par Cap de Garde à l'ouest et Cap Rosa à l'est, se situe comme la plupart des baies et golfes algériens dans le prolongement d'une plaine littorale basse : la plaine d'Annaba. Cette plaine représente avec le complexe humide de Fetzera : la dépression de Fetzera – Annaba, où le soubassement de cette dépression est formé d'une importante épaisseur d'alluvions récentes issues du remaniement de formations anciennes, déposées en milieu marin ou lagunaire (Caulet, 1972). Le plateau continental est accidenté et étroit au niveau de Cap de Garde, il ne dépasse pas 6 km, où le substratum rocheux affleure couramment. A l'est de Cap de Garde, le plateau continental s'étend largement atteignant 48 km en pente douce pour ensuite se rétrécir au niveau de Cap Rosa à 7 km (Caulet, 1972). La plateforme continentale très plate presque bombé, prolongée en direction du nord-est, est recouverte par une faible épaisseur de sédiments meubles. Les fonds du golfe de Annaba sont constitués de sédiments détritiques provenant des oueds Seybouse et de Mafragh, avec la présence de hauts

fonds rocheux dans le sud-ouest du golfe entourés de débris terrigènes grossiers (la petite seiche -13 mètres ; la roche du Vautour -8 mètres ; la roche Saint – Joseph -13 mètres) entre les isobathes 10 et 30 mètres (Leclaire, 1972). Sur les fonds de -100 mètres, on observe la présence de platiers rocheux à sommets plats et flancs raides encerclés et isolés par des dépressions à fonds plats supportant une mince couverture de sables et de graviers calcaire organogènes (Caulet, 1972). Ce plateau continental domine un rebord convexe qui s'étend de -130 à -200 mètres (Leclaire, 1972). (REFES, 2011).

I.6. Facteur climatologique et océanographique

I.6.1. Facteur climatologique de la zone d'étude

I.6.1.1. Vent

Les vents jouent un rôle important dans la dynamique des eaux marines superficielles, ils sont générateurs des houles et des courants superficiels. Les résultats de l'analyse de la corrélation du vent de 1992 à 2021 (moyenné sur 3h, WaveClimat.com) au point situé en Méditerranée selon les coordonnées géographiques (36°54'11''N et 7°47'9''E), mettent en évidence les répartitions suivantes :

- Période printanière, automnale et hivernal (**Figure II-4**) : Une prédominance des vents de secteur Nord- Ouest avec des fréquences d'apparition respectives de 13.8% ,11.9% et 16%.
- Période estivale (**Figure II-4**) : les vents les plus dominants sont ceux des deux directions Nord-Est avec des fréquences d'apparition respectives de 8.5%.
- Fréquence annuelle (**Figure II-4**) : nous constatons que les directions de vent les plus dominantes sur notre site d'étude proviennent du secteur, Ouest et de Nord-ouest avec des fréquences d'apparition respectivement estimées par 11.2% et 13.4%.

D'après l'analyse des roses des vents mensuelles (Figure II-5) on a distingué deux catégories des vents : durant les mois des saisons estivales les vents sont plutôt calmes avec des vitesses de (3.3-5.4 m/s) avec les directions NNE-NW. Dans les mois hivernaux des vents un peu fort d'une vitesse (5.4- 7.9m/s) dans la direction NW.

A partir des valeurs des fréquences annuelles de vent par direction, nous pouvons déduire la prédominance de vents du secteur Nord-Ouest de massif de l'Edough joue un rôle d'écran contre les vents de secteur ouest et Nord-Ouest. Ces vents n'atteignent pas le site d'étude.

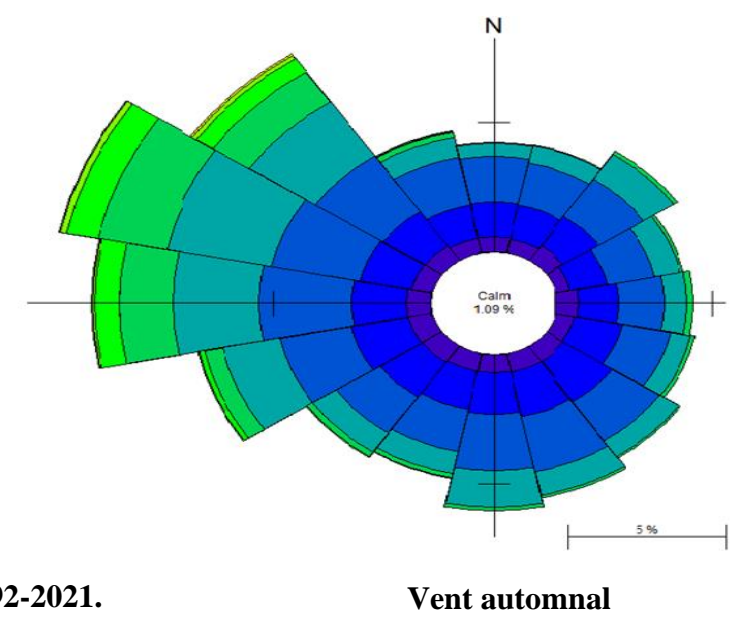
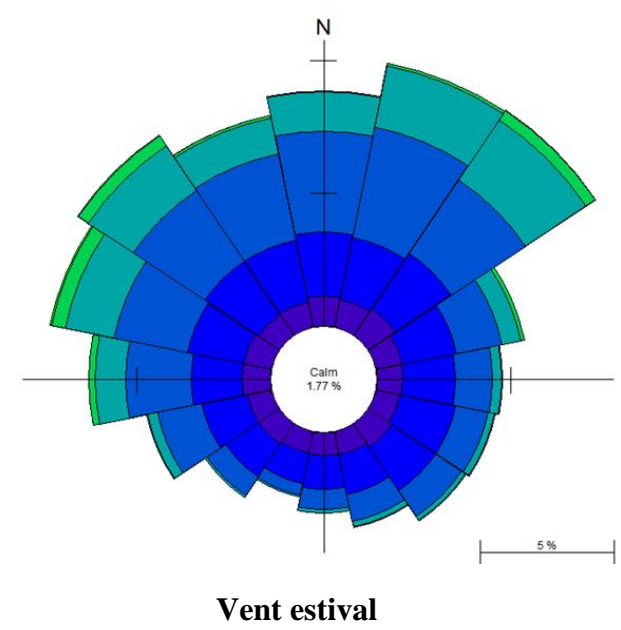
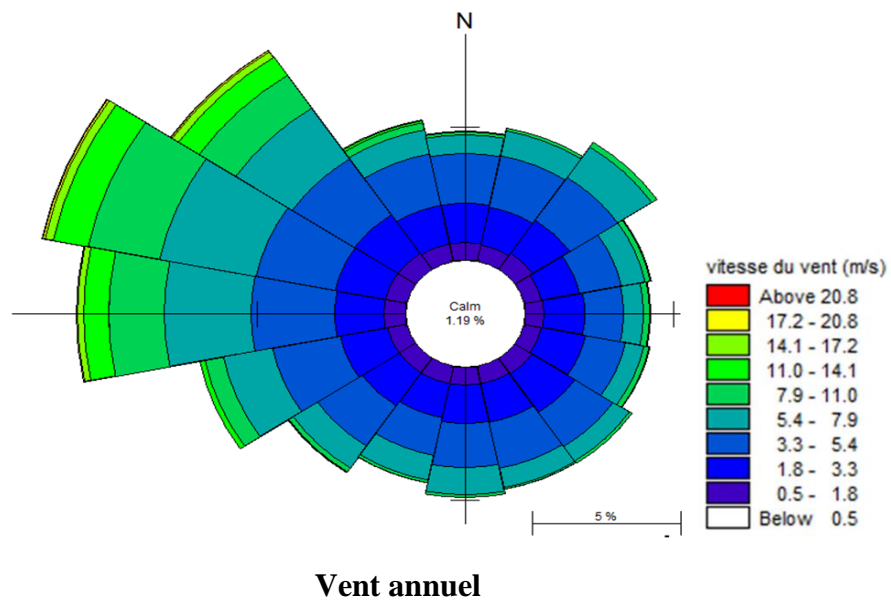
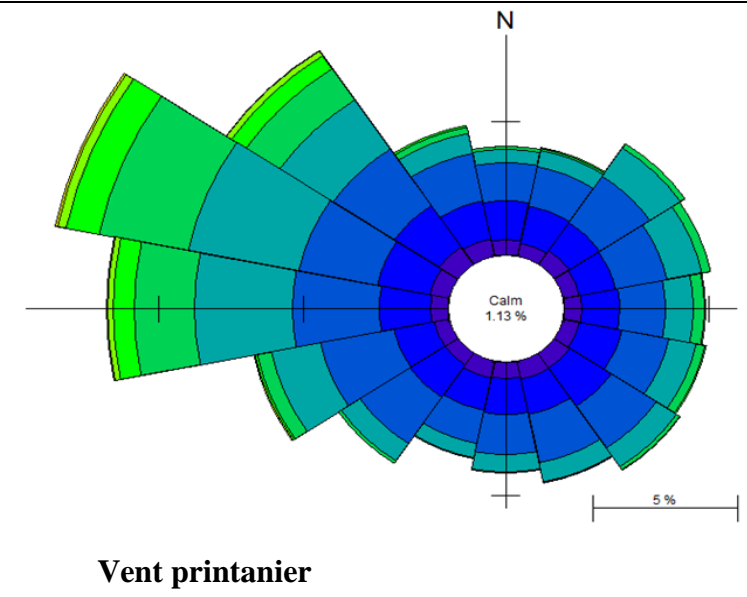
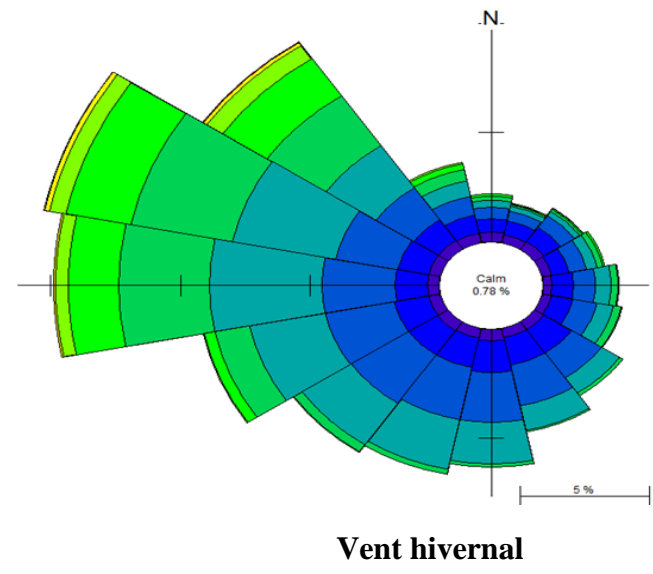


Figure I- 4 Rose de vent annuelle et saisonnière pour la période 1992-2021.

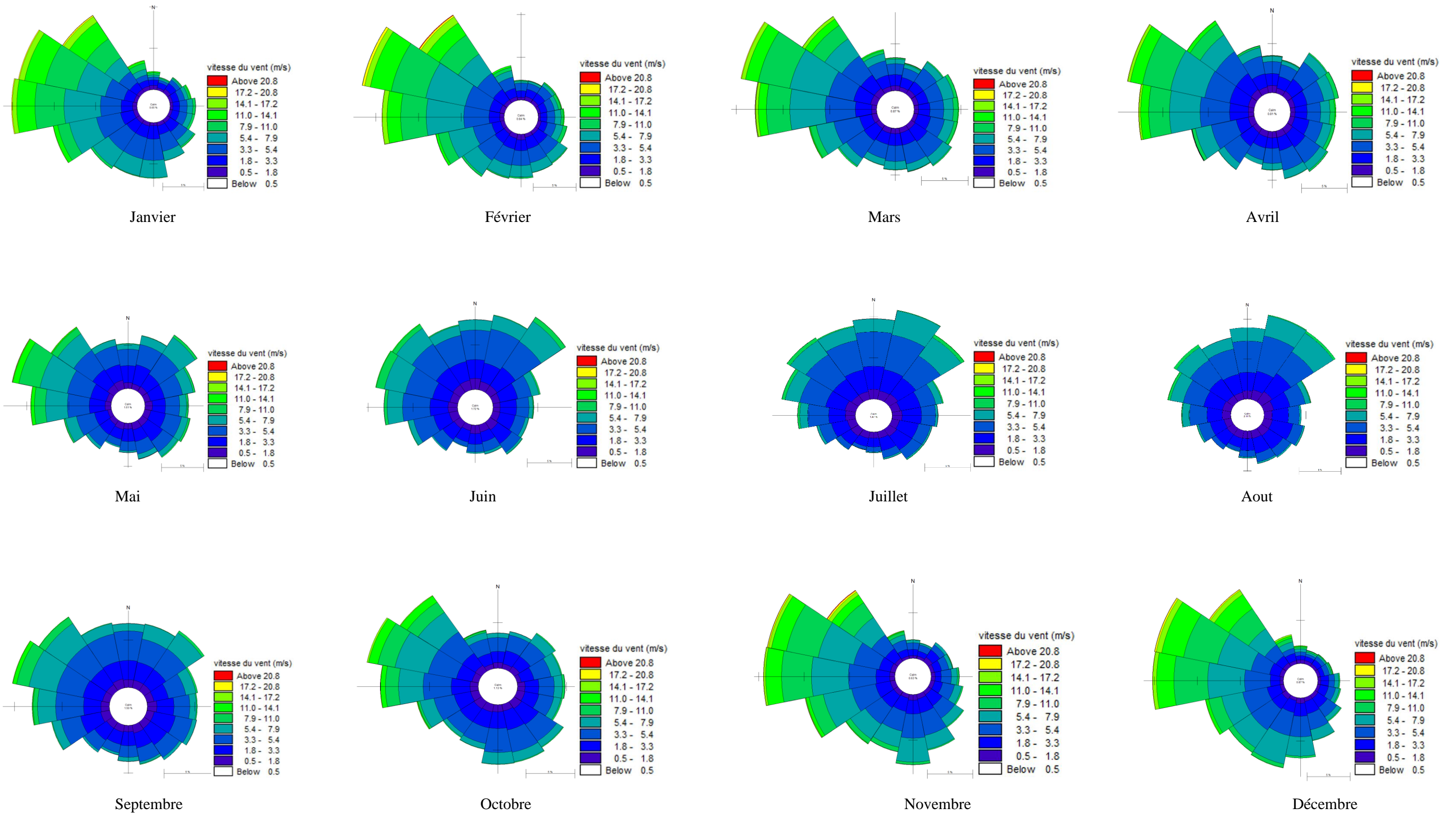


Figure I- 5 Roses des vents mensuels pour la période 1992-2021.

I.6.2. Facteur océanographique

I.6.2.1. 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'ondulation ou de vagues (Bennacer et al, 2020). La génération et la direction de propagation de la houle est liée à celle du vent, tant que la profondeur est supérieure à la longueur d'onde de la houle (**Bonnefille, 1980**).

I.6.2.1.1. Paramètres caractéristique de la houle

La houle est caractérisée par:

- Sa hauteur H ou creux : c'est la dénivellation maximale entre une crête et un creux successif ;
- Sa longueur d'onde L : c'est la distance horizontale qui sépare deux crêtes ou creux successives ;
- Son amplitude A : c'est la distance entre la crête et le niveau de l'eau au repos ;
- Sa cambrure ou rapport d'aspect $C = H/L$;
- Sa période T : c'est le temps qui sépare le passage de deux crêtes successives en un point fixe ;
- Sa vitesse moyenne de la propagation des crêtes (célérité) : $C = L/T$;
- Sa profondeur D : c'est une hauteur d'eau moyenne au repos ;
- Son fetch qui correspond à la distance sur laquelle le vent souffle pour engendrer des vagues ;
- $N(x, t)$: c'est une surface libre par rapport au niveau de repos. (**Figure I-6**)

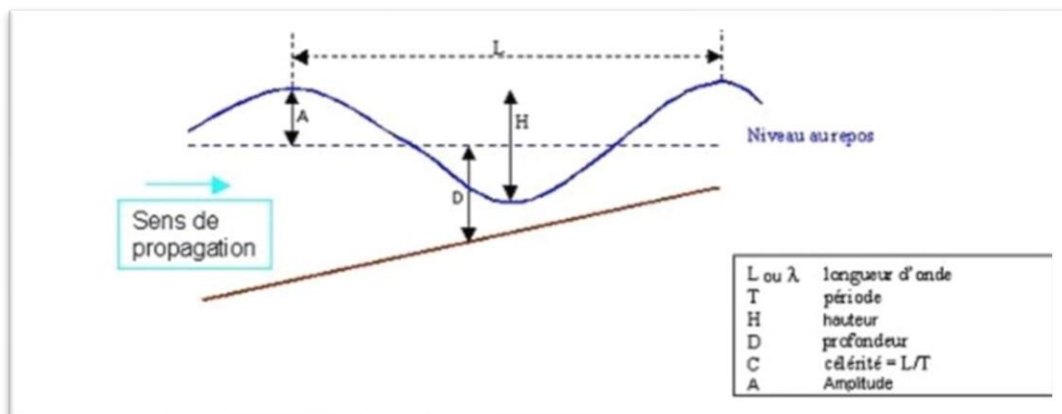


Figure I- 6 Courbe représentative des caractéristiques de la houle. (**Bonnefille, 1980**).

I.6.2.1.2. Déformation de la houle

La houle se crée sous l'action du vent sur la surface de la mer formant des ondulations qui se propagent du large (du point et leur formation) vers les côtes et cela sous différents aspects causées par des déformations résultant de la variation des profondeurs, les courants marins ainsi que les différentes directions du vent.

- **Shaoling**

Le shoaling, également appelé « levée » est une variation de la hauteur de la houle lorsque celle-ci se propage dans des hauteurs d'eau variables. L'effet de shoaling est normalement exprimé par le coefficient de shoaling, K_s , qui est défini comme étant la hauteur locale de la houle par rapport à H . À l'aide de la théorie de la houle linéaire K , pour une période de houle T donnée, peut être exprimé en fonction de la hauteur d'eau h .

$$K_s = \sqrt{\frac{\tanh(kh)(1+2kh)}{\sinh(2kh)}} \quad \text{Equation II- 1}$$

- **La réfraction de la houle :**

Lorsque la houle se propage dans un milieu à profondeur variable, sa célérité n'est plus la même tout le long du front d'onde. Les crêtes se déforment en plan la houle réfracte. Dans les zones à faibles profondeurs, inférieures à 4% de la longueur d'onde. La célérité est alors :

$$V = \frac{L}{T} = \sqrt{gd} \quad \text{Equation II- 2}$$

Dans ce cas, les vagues se propagent à la même vitesse quelles que soient leurs périodes. **(Bonnefille, 2010).**

- **La réflexion de la houle**

Lorsque la houle atteint une paroi verticale, elle se réfléchit en formant un système d'ondes stationnaires appelé « clapotis » ; l'amplitude de ces ondes est sensiblement le double de celle de la houle incidente, leur longueur d'onde et leur période restent celles de la houle incidente. **(Chapon, 1971).**

- **La diffraction de la houle**

Le passage de la houle à travers une passe ou à proximité d'une digue unique entraîne la rotation des crêtes et une réduction de l'amplitude par diffraction.

D'une façon générale l'amplitude des vagues décroît au fur et à mesure qu'on s'éloigne des musoirs et des digues dans l'ombre géométrique de la houle incidente. La longueur d'onde et la période ne sont pas modifiées par la diffraction. **(Chapon, 1971).**

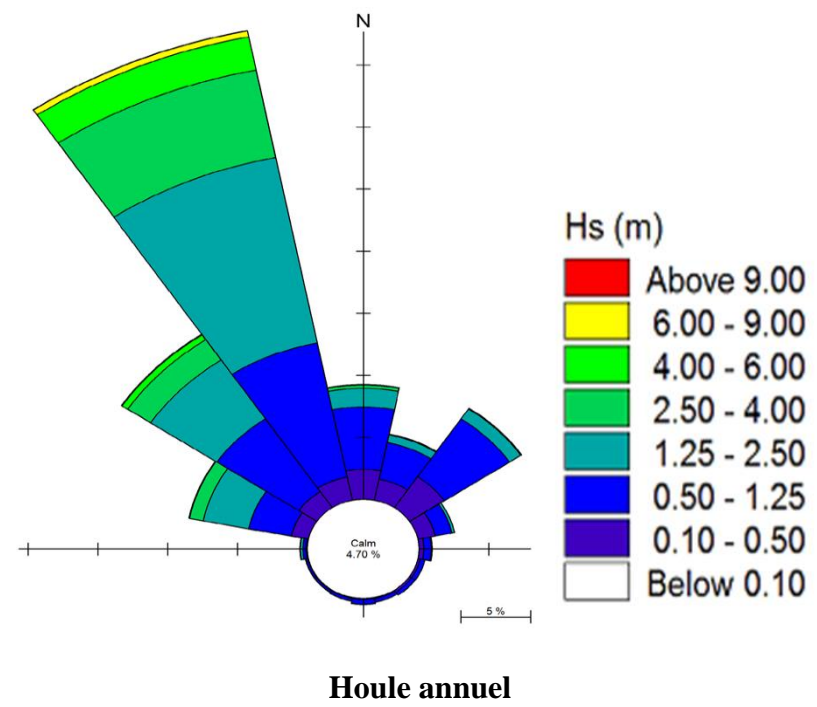
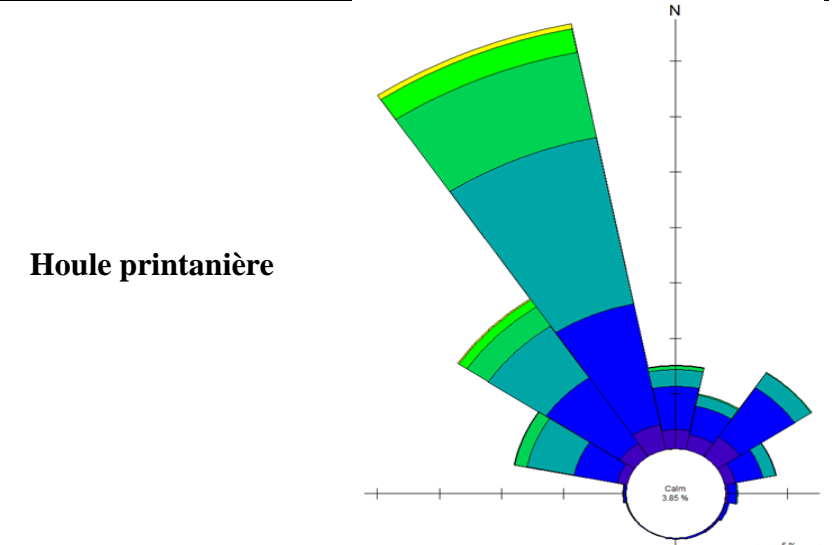
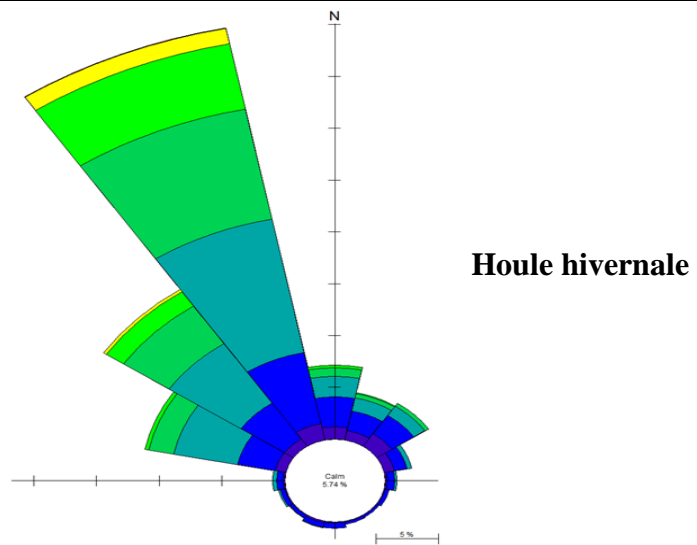
Les résultats de l'analyse de la corrélation des houles de 1992 à 2021 (moyenné sur 3h, WaveClimat.com) nous a permis de tracer les roses saisonnières, annuelle (**Figure I-7**) et mensuelles (**Figure I-8**) des houles au large de la côte d'Annaba :

- Les roses annuelles et saisonnières des houles (**Figure I-7**), montrent que les agitations qui touchent le site proviennent principalement du secteur Nord-Ouest avec des fréquences d'apparition respectives, 18.8% pour la houle annuelle, 19% pour les saisons printemps et hiver, 19.1 pour la saison d'automne, 22.5% pour la saison estivale.
- Les roses mensuelles des houles (**figure I-8**), montrent qu'il y a deux catégories des houles (Agité et peu agité). Durant les mois : Janvier, Février, Mars, Avril, Mai, Juillet,

Aout, Octobre, Novembre, Décembre on a des houles avec des hauteurs qui sont supérieurs à 2.50m dans l'ensemble. En revanche durant les mois : Juin et Septembre on a des houles moins importantes avec des hauteurs supérieures à 1.25m.

Donc les houles dominantes sont caractérisées par des hauteurs significatives oscillant généralement entre 1.25 et 2.5m.

La zone d'étude est exposé aux houles de secteurs Nord-Nord-Est et NE, mais elle est abritée des houles de secteurs Nord-Nord-Ouest et Nord-Ouest par le cap de Garde (diffraction de la houle). Les houles de secteurs nord pourraient atteindre le site, mais elles seraient atténuées par le cap de garde.



Houle estivale

Houle automnale

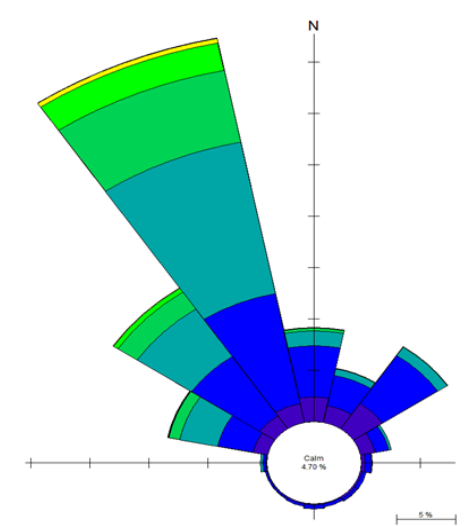
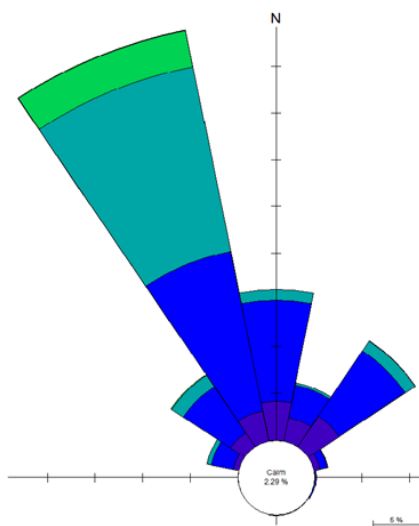


Figure I- 7 Rose de la houle saisonnière et annuelle pour la période 1992-2021.

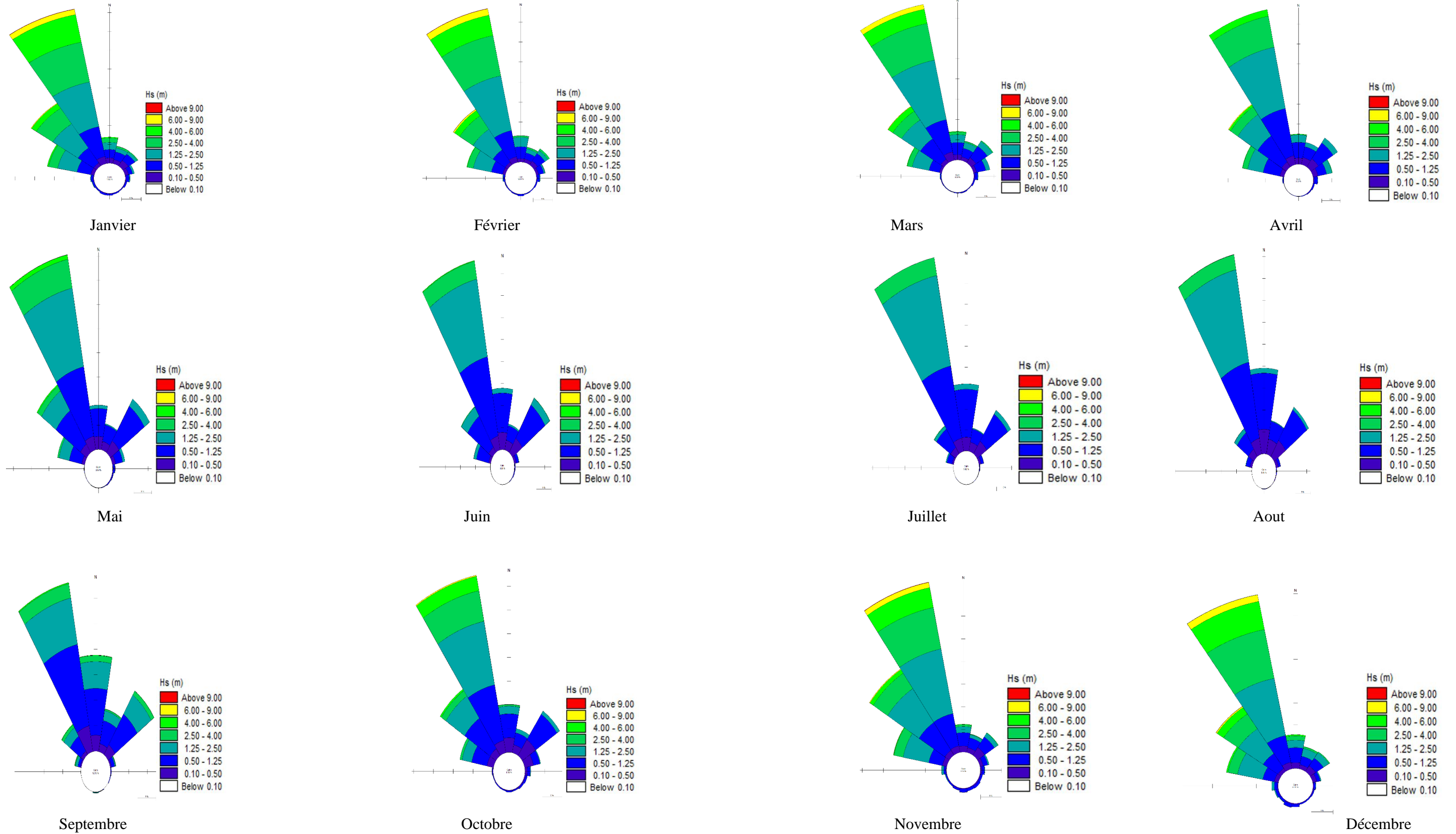


Figure I- 8 Roses mensuelles des houles pour la période 1992-2021.

I.6.2.2. Marée et niveau d'eau

Les principales forces motrices des mouvements de marée sont astronomiques, ce qui permet de prévoir avec précision le niveau des marées et les courants associées. Dans la mesure où les marées sont des ondes longues, les phénomènes de résonance et les effets de shoaling (levée, gonflement) engendrée par la géographie et la bathymétrie peuvent causer une amplification considérable des niveaux des marées dans les mers peu profondes et dans les estuaires. **(Rock Manual, 2009).**

La marée sur la cote algérienne est très faible et dépasse rarement 20cm, l'exploitation de différentes sources par le LEM(1999) a permis d'établir le tableau 6 suivant, qui présente les différents niveaux d'eau enregistrés le long de la cote algérienne. **(LEM, 2016).**

Référence	Niveau
Niveau maximum	+50 cm NGA
Moyenne haute mer de vives eaux	+10 cm NGA
Moyenne basse mer	-10 cm NGA
La plus basse mer (ZH)	-34 cm NGA

I.6.2.3. Seiches

Les seiches sont des oscillations stationnaires causées par un mécanisme d'excitation et amplifiées par la forme générale et par la bathymétrie d'un plan d'eau tel qu'un port, un bassin ou un lac. Les périodes correspondent aux périodes naturelles de l'oscillation de ces eaux. Ainsi, lorsqu'une onde longue traverse les eaux, elle est réfléchi à l'extrémité et l'interférence avec l'onde incidente entraîne un mouvement de clapotis. **(Rock Manual, 2009).**

Les seiches de la zone d'étude par très beau temps ont une amplitude de 2 à 4 cm et une période très irrégulière, en moyenne de 20cm d'amplitude avec une période de 10 à 20 minutes. **(LEM, 2016).**

I.6.2.4. Courants généraux

Les courants marins sont des masses d'eau qui se déplacent selon des trajectoires spécifiques. Ces courants océaniques sont des courants de surface et, lorsqu'ils peuvent être ressentis sous l'eau, ils sont le reflet de ce qui se passe en surface.

Les courants généraux sont connus étant des courants qui viennent par le détroit de Gibraltar et se dirigent vers l'Est (0.5 à 1 m/s), cependant, il existe un courant de 0.5 à 1.5 nœuds qui circulent plus près de la cote entre le cap de garde (ras el Hamra) et l'oued Mafragh courantologie dans la baie d'Annaba. **(LEM, 2016).**

Chapitre II

Analyse des évènements extrêmes

II.1. Introduction

L'étude statistiques des évènements météorologiques extrêmes est une étape primordiale pour l'étude les différents phénomènes marins et littoraux ; Cette probabilité est généralement estimée en modélisant les enregistrements observés au niveau de la mer à l'aide de l'une des quelques approches statistiques. Cette méthode s'appelle la théorie des valeurs extrêmes.

II.2. Théorie des valeurs extrêmes :

En définition, La théorie des valeurs extrêmes (TVE) ou "Extreme Value Theory" en anglais, est une branche de la théorie des probabilités et des statistiques mathématiques qui se concentre sur l'analyse et l'inférence sur les Evènements extrêmes, c'est-à-dire les évènements avec très faible probabilité d'occurrence.(Sana and Brahim, 2020).

L'analyse statistique des valeurs extrêmes de variables aléatoires revêt une grande importance conceptuelle et applicative en science et ingénierie (Coles, 2001; Beirlant et al. 2004;Castillo et al. 2005;Finkenstädt et Rootzén, 2004). La modélisation de la probabilité d'occurrence des valeurs extrêmes est en effet un domaine actif de recherche théorique et appliquée dans de nombreux domaines, tels que l'hydrographie et la climatologie (Katz et al.,2002), la modélisation des vagues océaniques (Rueda et al.,2016; Benetazzo et al.,2017;Barbariol et al.,2019).

L'estimation fiable de la probabilité d'occurrence d'évènements côtiers de grande ampleur est cruciale pour l'évaluation du risque environnemental (Coles et Tawn, 2005Hamdi et al. 2018) et pour la prise de décisions et la conception des mesures d'atténuation.

Dans ce chapitre, nous appliquons comparativement la distribution généralisée des valeurs extrêmes (GEV : GeneralizedExtreme Value), basée sur les formulations des maxima de bloc (BM) et des pics au-dessus du seuil (POT : Peak Over Threshold). (Maria Francesca Caruso, 2021-Marco Marani, 2021).

II.2.1. Méthode des Blocs Maximas (BM) :

Le théorème de blocs maxima suit la loi du maximum approximatif d'un grand nombre d'observations (D. Delcaillau et al, 2018). En pratique, si l'on dispose de n observations (x_1, \dots, x_n), on commence par diviser les données en k blocs de longueur l , puis on calcule le maximum pour chaque bloc.

$$m_i = \max (x_{(i-1)l+1}, \dots, x_{il}) \text{ Pour } i \in 1, \dots, k \quad \text{Equation II- 3}$$

Ensuite, la loi de la variable aléatoire m_i est approximée par une loi GEV (Generalized Extreme Value), et les paramètres de cette loi sont estimés en utilisant l'échantillon (m_1, \dots, m_k). Il est important de trouver un bon compromis entre la taille des blocs l , qui doit être suffisamment grande pour que l'approximation par la loi GEV soit réaliste, et le nombre de blocs k , qui doit être suffisamment grand pour estimer les trois paramètres de la GEV avec précision. Pour les données

météorologiques, des blocs de taille 1 an sont souvent considérés, ce qui a pour avantage de gommer les effets saisonniers.

- si $k \neq 0$:

$$F(x; \mu; \sigma; k) = \exp\left(-\left[1 + k \frac{x-\mu}{\sigma}\right]^{-1/k}\right) \text{ Définie pour } x \text{ vérifiant } 1 + k \frac{x-\mu}{\sigma} > 0 \quad \text{Equation II- 3}$$

-si $k = 0$:

$$F(x; \mu; \sigma; k) = \exp\left(-\exp\left(-\left[\frac{x-\mu}{\sigma}\right]\right)\right) \text{ Définie pour tout } x \in R \quad \text{Equation II- 4}$$

$-\mu$ est un paramètre de position et σ paramètre d'échelle :

$$\text{Si } X \sim GEV(\mu, \sigma, k) \text{ alors } \frac{X-\mu}{\sigma} \sim GEV(0,1, k)$$

-k est un paramètre de forme.

* le cas $k = 0$ correspond à la loi de Gumbel et on peut montrer que c'est bien la limite des autres cas lorsque $k \rightarrow 0$.

* le cas $k < 0$ correspond à la loi de Weibull. La formule ci-dessus définit la fonction de répartition pour $x < \mu - \frac{\sigma}{k} = x_+$ et on pose $F(x; \mu; \sigma; k) = 1$

Si $x \geq x_+$:

La variable X est donc à valeurs dans $]-\infty, x_+]$ (loi à support majorité).

* le cas $k > 0$ correspond à la loi de Fréchet. La formule ci-dessus définit la fonction de répartition pour $x > \mu - \frac{\sigma}{k} = x_+$ et on pose $F(x; \mu, \sigma, k) = 0$

Si $x \geq x_-$: la variable X est donc à valeurs dans $]x_-, +\infty[$

Étant donné qu'il est difficile de travailler avec les trois distributions limites Jenkinson(1955) et Von-Mises (1954) ont proposés une famille paramétrique appelée distribution des valeurs extrêmes généralisées standard GEV (Generalized Extreme Value), qui permet d'unifier les trois types des lois extrêmes si dessus, la fonction H devient :

$$H_\gamma(x) = \begin{cases} \exp\left(-\left(1 + \gamma x\right)^{-\frac{1}{\gamma}}\right) \text{ si } \gamma \neq 0 \\ \exp(-\exp(-x)) \text{ si } \gamma = 0 \end{cases} \quad \text{Equation II- 5}$$

γ : Indice des valeurs extrêmes

$$\begin{cases} \gamma > 0 & \text{Fréchet, distribution de type pareto: } 1 - F(x) = x^{-\frac{1}{\gamma}} f(x) \\ \gamma < 0 & \text{weibull, X admet un point terminal fini} \\ \gamma = 0 & \text{Gumbel, queue à décroissance exponentielle} \end{cases}$$

Pour l'estimation des périodes de retour dans le cadre de notre étude, nous allons utiliser deux méthodes de la distribution de GEV (Weibull et Gumbel) générées à l'aide de la bibliothèque **pyextrême** en utilisant le langage **Python**.

La base de données extraite du site **WaveClimate.com**, a été utilisée pour analyser les évènements extrêmes.

WaveClimate :

WaveClimate.com fournit des informations détaillées et spécifiques aux sites sur le climat des vents et des vagues en mer. En utilisant une méthode de transformation des vagues côtières, ce service permet également d'estimer les conditions climatiques des vagues pour les emplacements côtiers.

Les séries de données obtenues depuis WaveClimate.com couvrent la période allant du 1er janvier 1992 à 00:00:00 au 31 décembre 2021 à 21:00:00. Cela permet de comprendre les caractéristiques des vagues offshore et onshore dans la zone d'étude. Le point d'extraction se situe en eau profonde aux coordonnées 36°87'N et 36°9'N de latitudes, 7°75'E et 7°79'E de longitude. Les vagues de cette région comprennent à la fois les mers de vent générées localement et les houles provenant du Nord de la Méditerranée.

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

1	Year	Month	Day	Hour	u10	u10d	Hs	Hsd	Tp	
2	1992		1	1	0	1.20	14.0	0.40	24.0	6.89
3	1992		1	1	3	1.00	332.0	0.44	18.0	6.21
4	1992		1	1	6	1.40	6.0	0.59	14.0	6.02
5	1992		1	1	9	0.60	312.0	0.73	11.0	5.88
6	1992		1	1	12	2.00	360.0	0.76	8.0	5.84
7	1992		1	1	15	2.00	6.0	0.71	5.0	5.89
8	1992		1	1	18	2.80	28.0	0.65	4.0	5.42
9	1992		1	1	21	3.40	76.0	0.61	9.0	5.46
10	1992		1	2	0	2.80	122.0	0.61	20.0	7.99
11	1992		1	2	3	3.40	132.0	0.59	24.0	7.29
12	1992		1	2	6	3.20	138.0	0.53	25.0	7.38
13	1992		1	2	9	4.00	136.0	0.48	26.0	6.77
14	1992		1	2	12	3.80	106.0	0.46	25.0	6.81
15	1992		1	2	15	5.40	80.0	0.53	34.0	6.71
16	1992		1	2	18	4.80	90.0	0.62	38.0	7.25

Figure II- 1 : Capture des séries temporelles des paramètres des houles (WaveClimate).

Les résultats ci-dessous ont été présentés sous forme de graphiques et de tableaux pour une meilleure visualisation. Le bloc de données a d'abord été segmenté en périodes annuelles, représentées par des lignes pointillées, afin de pouvoir extraire le maximum de chaque année individuellement, comme la figure le montre ci-dessous.

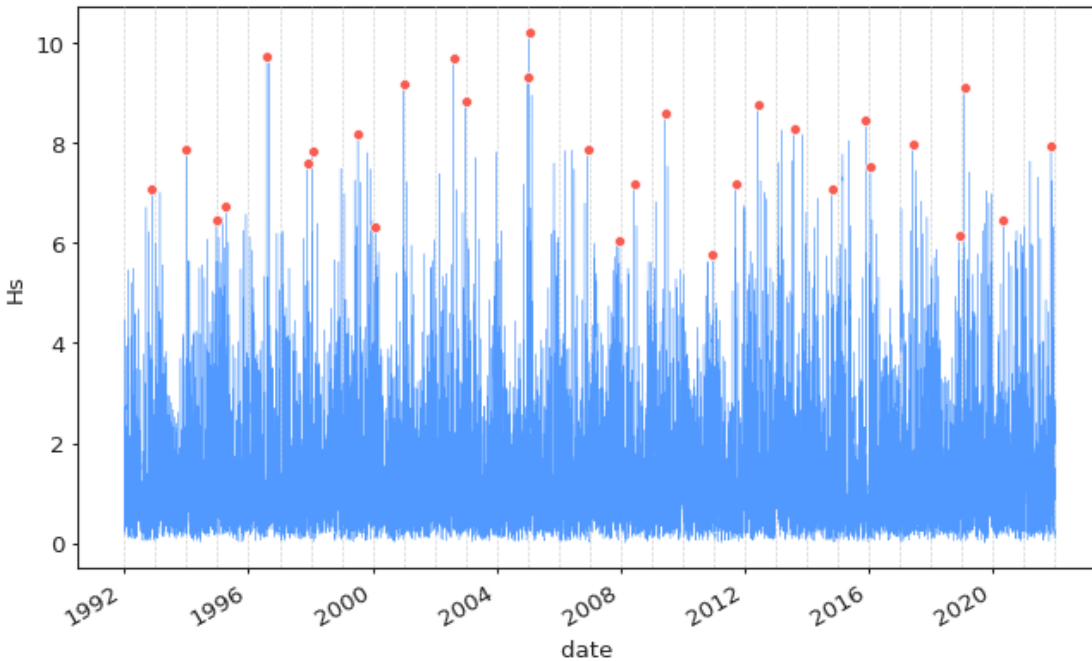


Figure II- 2 : Représentation de méthode des Blocs Maximas sur les hauteurs de houle (1992-2021).

Après avoir sélectionné les maximums pour chaque année, le calcul des hauteurs de houles correspondant à chaque période de retour a été effectué directement.

II.2.1.1. Résultats GEV avec la distribution de Gumbel :

L'estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour l'omnidirectionnel et les différentes directions pénalisantes sont représentées dans la figure II-3 et figure II-4. Les croix en rouge définissent les valeurs des hauteurs significatives des houles pour les périodes de retour « 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100 et 1000 ans. » Les limites de l'intervalle de confiance sont figurées par des traits verts.

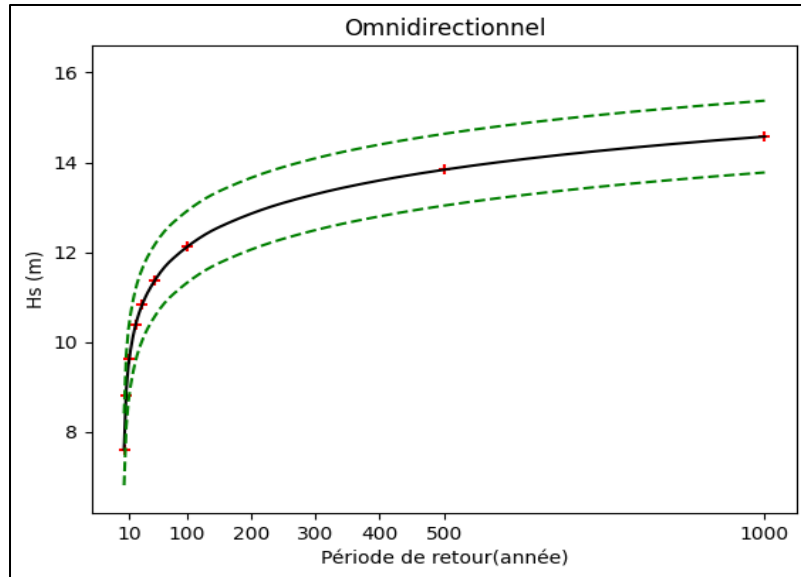


Figure II- 3 : Estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour l’omnidirectionnel.

Tableau II- 1 Tableau résumant l’ensemble des résultats obtenu par la méthode GEV selon la distribution de Gumbel.

GEV distribution de GUMBEL										
Hauteur des vagues par direction (m)										
période de retour (année)	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	OMNI
2	1,78	4,24	6,52	7,79	3,91	3,03	2,63	1,90	1,48	7,65
5	2,16	5,09	7,67	8,78	4,78	3,85	3,29	2,43	1,81	8,86
10	2,41	5,65	8,42	9,29	5,36	4,38	3,74	2,89	2,03	9,65
20	2,66	6,19	9,15	9,69	5,92	4,90	4,16	3,43	2,25	10,42
30	2,80	6,50	9,57	9,89	6,24	5,20	4,40	3,79	2,37	10,86
50	2,97	6,89	10,09	10,11	6,64	5,57	4,71	4,31	2,52	11,41
100	3,20	7,41	10,79	10,36	7,18	6,07	5,12	5,14	2,73	12,15
1000	3,98	9,14	13,12	10,94	8,97	7,72	6,48	9,35	3,41	14,60

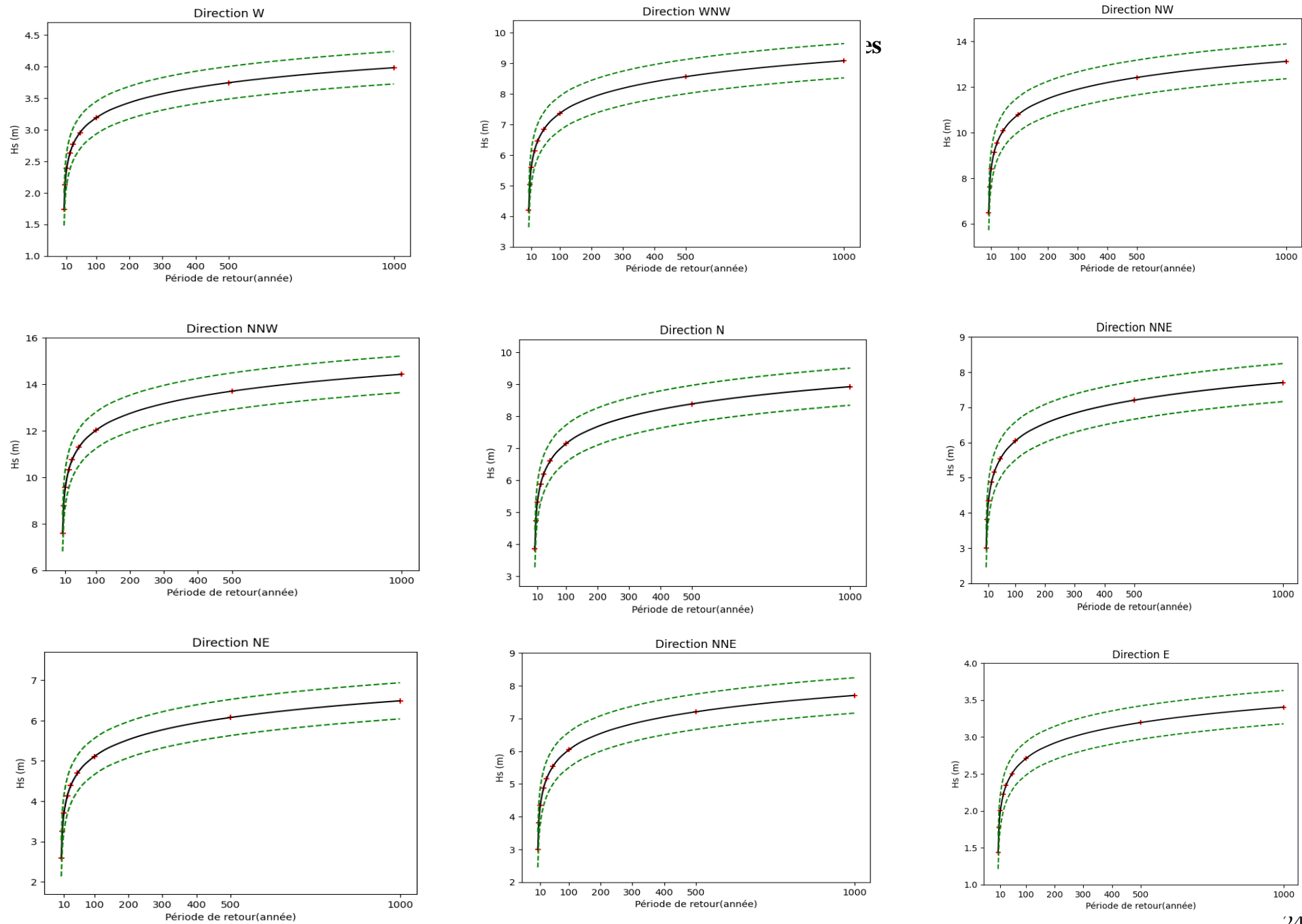


Figure II- 4 : Estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour chaque direction.

D'après le tableau II-1 qui résume les résultats obtenues des hauteurs de houles prévues selon la distribution de Gumbel, on peut constater que les directions les moins susceptibles de générer une houle extrême est l'Est, l'Est-Nord-Est, et l'Ouest, d'occurrence centennial (100ans) avec des hauteurs significatives respectives « 2.73m, 5.14m et 3.20m ». En revanche, les directions les plus susceptible qui ont généré la plus grande houle est le Nord –ouest et le Nord-nord-Ouest, pour des hauteurs significatives « 10.79m et 10.36m» respectives.

Cependant, les résultats les plus élevés ont été obtenus en analysant les hauteurs de houles omnidirectionnelles, car le modèle a traité avec les hauteurs maximales possibles dans la série de données, à l'exception de la période de retour de 1000 ans.

II.2.1.2. Résultats GEV avec la distribution de Weibull :

La figure II-5 et II-6 montrent l'estimation des valeurs extrêmes via la distribution de Weibull pour l'omnidirectionnel et pour les différentes directions, les croix en rouge définissent les valeurs des hauteurs significatives des houles pour les périodes de retour « 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100 et 1000 ans. ». Les limites de l'intervalle de confiance sont figurées par des traits verts.

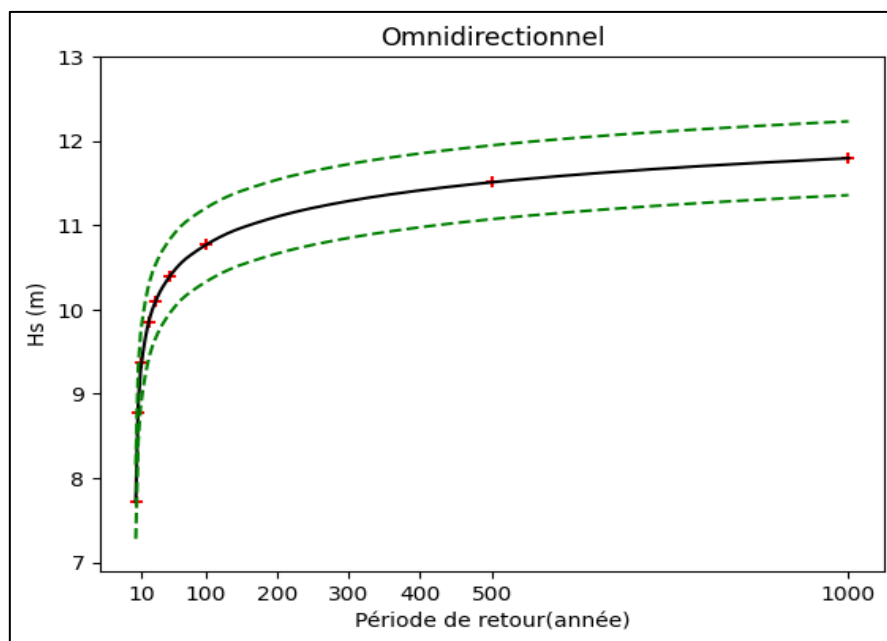


Figure II- 5 : Estimation des événements extrêmes via la distribution de Weibull pour l'omnidirectionnel.

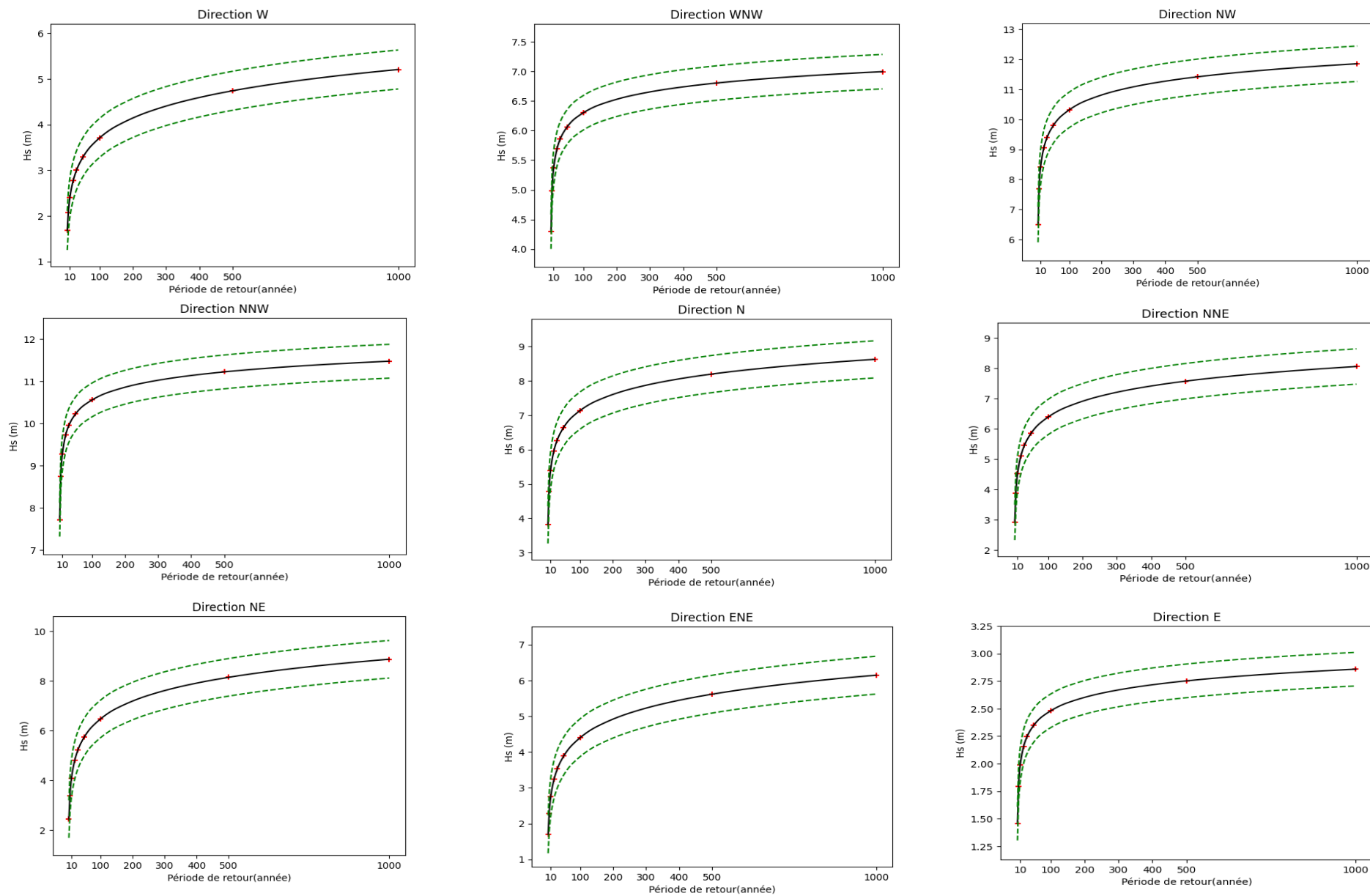


Figure II- 6 : Estimation des évènements extrêmes via la distribution de Weibull pour chaque direction.

Pour faciliter la lecture des résultats obtenus à partir de l'utilisation de la distribution de Weibull, le tableau suivant récapitule toutes les hauteurs extrêmes obtenues pour les périodes de retour de ces événements extrêmes dans le futur.

Tableau II- 2 Tableau résumant l'ensemble des résultats obtenu par la méthode GEV selon la distribution de Weibull.

GEV distribution de Weibull										
Hauteur des vagues par direction (m)										
période de retour (année)	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	OMNI
2	1,79	4,32	6,54	7,76	3,87	2,94	2,52	1,74	1,49	7,76
5	2,19	5,05	7,73	8,78	4,82	3,92	3,87	2,31	1,83	8,83
10	2,43	5,44	8,45	9,32	5,41	4,57	5,06	2,76	2,03	9,41
20	2,65	5,75	9,08	9,77	5,96	5,19	6,36	3,22	2,21	9,89
30	2,77	5,92	9,43	10,00	6,25	5,54	7,16	3,50	2,30	10,15
50	2,91	6,10	9,83	10,27	6,61	5,97	8,21	3,85	2,41	10,44
100	3,10	6,34	10,36	10,60	7,08	6,53	9,70	4,34	2,55	10,81
1000	3,65	6,98	11,89	11,52	8,48	8,29	15,10	6,01	2,96	11,84

En se basant sur le tableau II.2 qui contient les hauteurs des houles prévues selon la distribution de Weibull, on peut constater que les directions les moins susceptibles qui ont généré une houle extrême est l'Est, l'Ouest et l'Est-Nord-est, avec des hauteurs significatives « 2.55m, 3.10m, et 4.34m » respectives d'occurrence centennal En revanche, la direction la plus susceptible de causer la plus grande houle est le Nord-Nord-Ouest , suivi de Nord-Ouest, le avec des hauteurs significatives « 10.60m et 10.36m».

Cependant, les résultats les plus élevés ont été obtenus en analysant les hauteurs de houles omnidirectionnelles, car le modèle a travaillé avec les hauteurs maximales possibles dans la série de données, à l'exception de la période de retour de 1000 ans.

En outre, des anomalies ont été observées par rapport à la période de retour de 1000 ans, où la hauteur estimée dans la direction Nord-est dépasse celle estimée dans le cas omnidirectionnel. Cela soulève des doutes quant à l'applicabilité de cette distribution aux données utilisées.

II.2.2.Méthode Peaks Over Threshold (POT):

La méthode des excès au-delà d'un seuil (ou Peak Over Threshold, POT) repose sur le comportement des valeurs observées au-delà d'un seuil donné. En d'autres termes, elle consiste à observer non pas le maximum ou les plus grandes valeurs mais toutes les valeurs des réalisations qui excèdent un certain seuil élevé. L'idée de base de cette approche consiste à

choisir un seuil suffisamment élevé et à étudier les excès au-delà de ce seuil. Cette méthode initialement développée par Pickands [1975] et abondamment étudiée par divers auteurs tels que de Smith [1987], Davison et Smith [1990], ou Reiss et Thomas [2001] pour de plus amples références.

$$F_u(x) = \Pr(X - u \leq x | X > u) = \frac{F(x+u) - F(u)}{1 - F(u)} \quad \text{Equation II- 6}$$

- Soit X_1, \dots, X_n un échantillon, à partir d'un certain seuil u , on note N_u le nombre d'observation qui dépassent ce seuil.

- Soit Y_1, \dots, Y_{N_u} un échantillon des excès au-dessus du seuil u de distribution conditionnelle

Avant de définir le seuil, nous avons utilisé la bibliothèque **Pyextreme** en **Python** pour calculer la moyenne résiduelle et suivre ses variations. Cette étape nous a permis de sélectionner le meilleur seuil possible. En effet, le seuil doit être placé sur la droite avant que les variations de la moyenne résiduelle ne se produisent. Selon la figure II-7 Le seuil choisi est de 4.3m. Nous allons prendre les points qui sont au-dessus du seuil pour le calcul houles extrêmes au large.

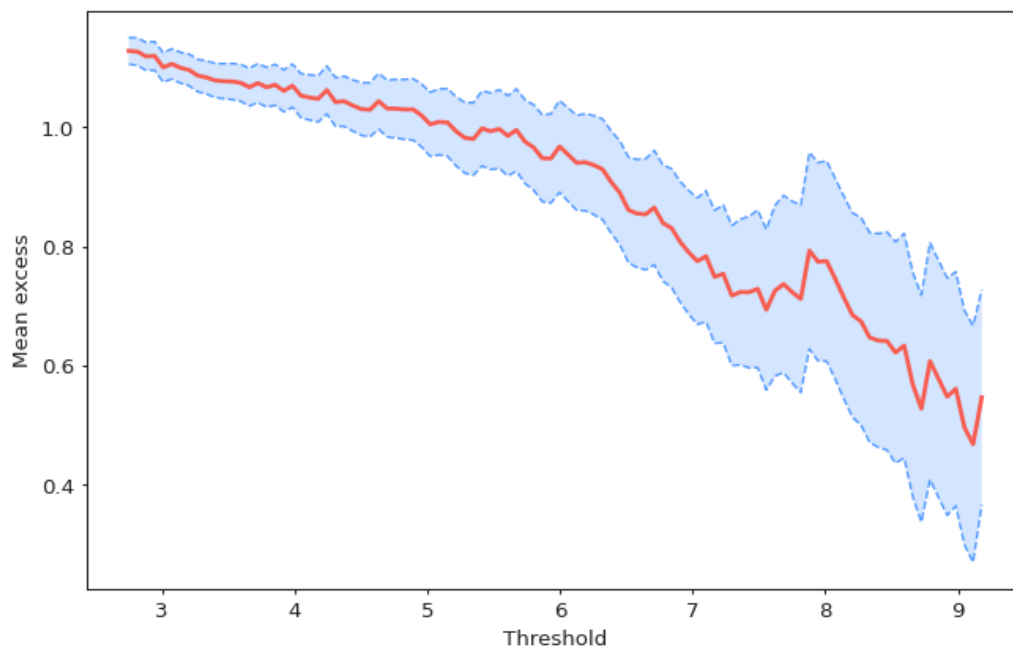


Figure II- 7 : Moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelle de l'enregistrement.

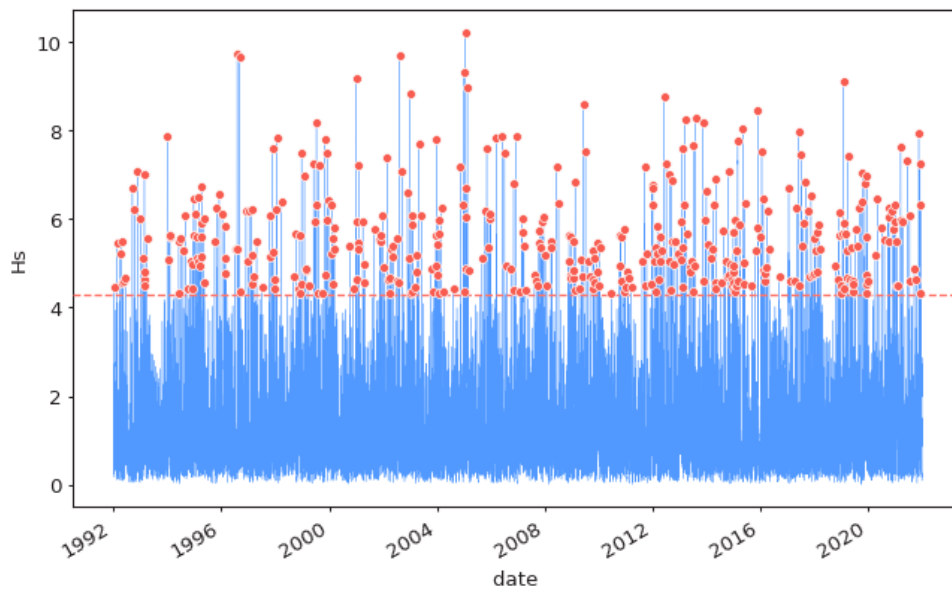


Figure II- 8 : Représentation de méthode POT sur les hauteurs de houle de 1992 – 2021.

Après le choix du seuil, nous allons passer au calcul des hauteurs des houles en fonction de leurs périodes de retour via la même bibliothèque Pyextreme sur le langage **Python**. La figure II-9 représente l'estimation des valeurs extrêmes obtenues à partir de la méthode POT.

Pour l'omnidirectionnel, les croix en rouge définissent les valeurs des hauteurs significatives des houles pour les périodes de retour « 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100 et 1000 ans. ». Les limites de l'intervalle de confiance sont figurées par des traits verts.

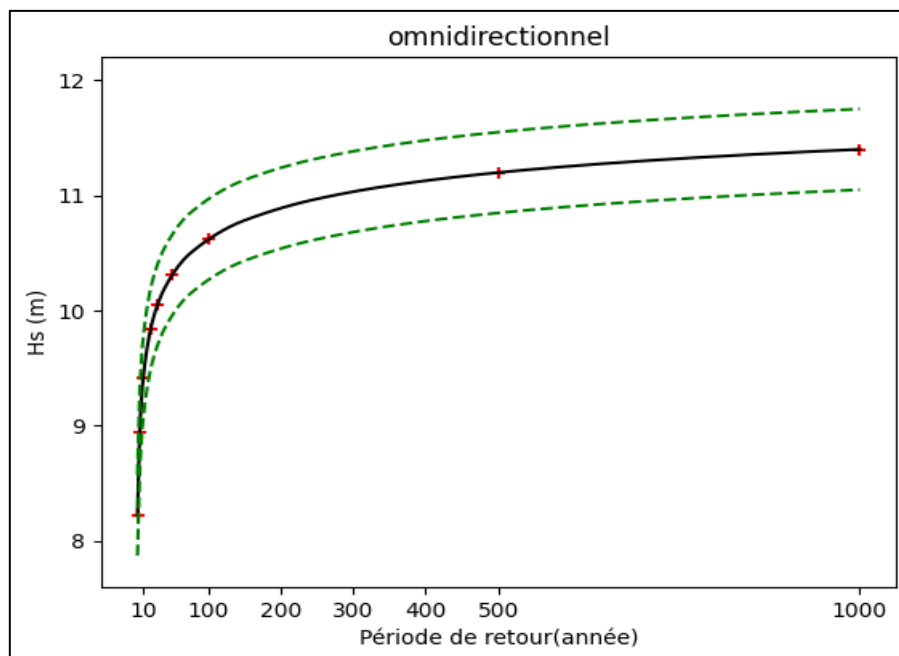


Figure II- 9 Estimation des évènements extrêmes via la méthode POT pour omnidirectionnel.

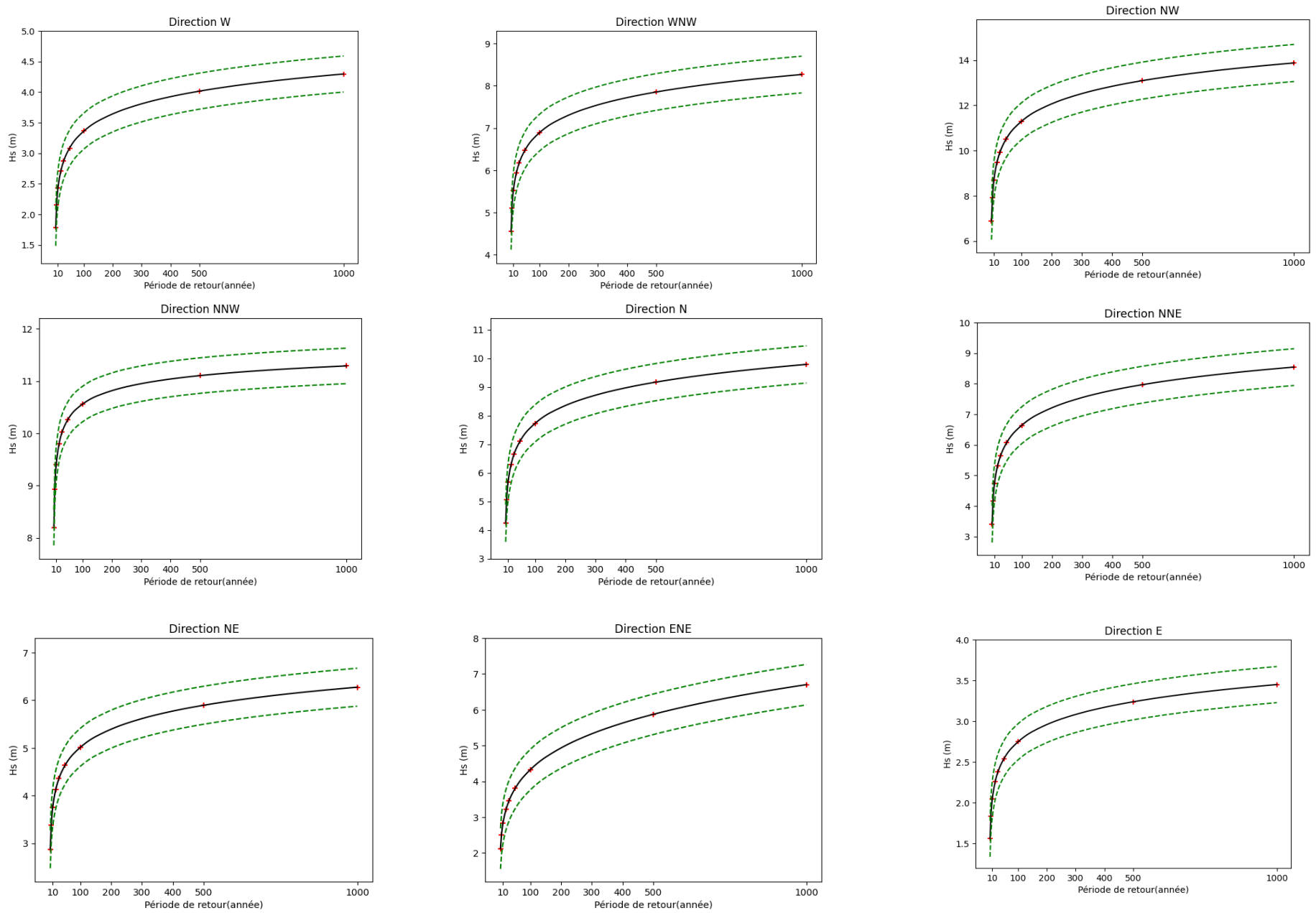


Figure II- 10 Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour chaque direction.

Les graphes représentés dans la figure II-10 montrent les résultats de l'estimation des évènements extrêmes via la méthode POT pour chaque direction.

Les résultats des graphes sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II- 3 Tableau résumant l'ensemble des résultats obtenu par la méthode POT.

POT										
Hauteur des vagues par direction (m)										
le seuil	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	OMNI
Période de retour (année)	1,79	4,32	6,54	7,76	3,87	2,94	2,52	1,74	1,49	7,76
2	2,19	5,05	7,73	8,78	4,82	3,92	3,87	2,31	1,83	8,83
5	2,43	5,44	8,45	9,32	5,41	4,57	5,06	2,76	2,03	9,41
10	2,65	5,75	9,08	9,77	5,96	5,19	6,36	3,22	2,21	9,89
20	2,77	5,92	9,43	10,00	6,25	5,54	7,16	3,50	2,30	10,15
30	2,91	6,10	9,83	10,27	6,61	5,97	8,21	3,85	2,41	10,44
50	3,10	6,34	10,36	10,60	7,08	6,53	9,70	4,34	2,55	10,81
100	3,65	6,98	11,89	11,52	8,48	8,29	15,10	6,01	2,96	11,84

D'après le tableau II-3, on constate que les directions les moins susceptibles de générer une houle extrême pour la période de retour de 100 ans sont : l'**Est**, l'**Est-nord-est** et l'**Ouest**, avec des hauteurs significatives « **2.96 m**, **6.01m** et **3.65 m** » respectives. D'autre part, les directions les plus susceptibles de causer la plus grande houle sont le Nord-ouest, suivi du Nord-nord-ouest, avec des hauteurs significatives respectives **11.89 m** et **10.52 m**.

Cependant, les résultats les plus élevés ont été obtenus en analysant les hauteurs de houles omnidirectionnelles, car le modèle a travaillé avec les hauteurs maximales possibles dans la série de données, à l'exception de la période de retour de 1000 ans.

II.2.3. Comparaison entre les méthodes POT et Blocs Maximas (GEV distribution)

Afin d'aboutir à des résultats adéquats et précis, un choix entre les deux méthodes statistiques « POT et GEV » doit être effectuées. La comparaison a été réalisées sur l'omnidirectionnel.

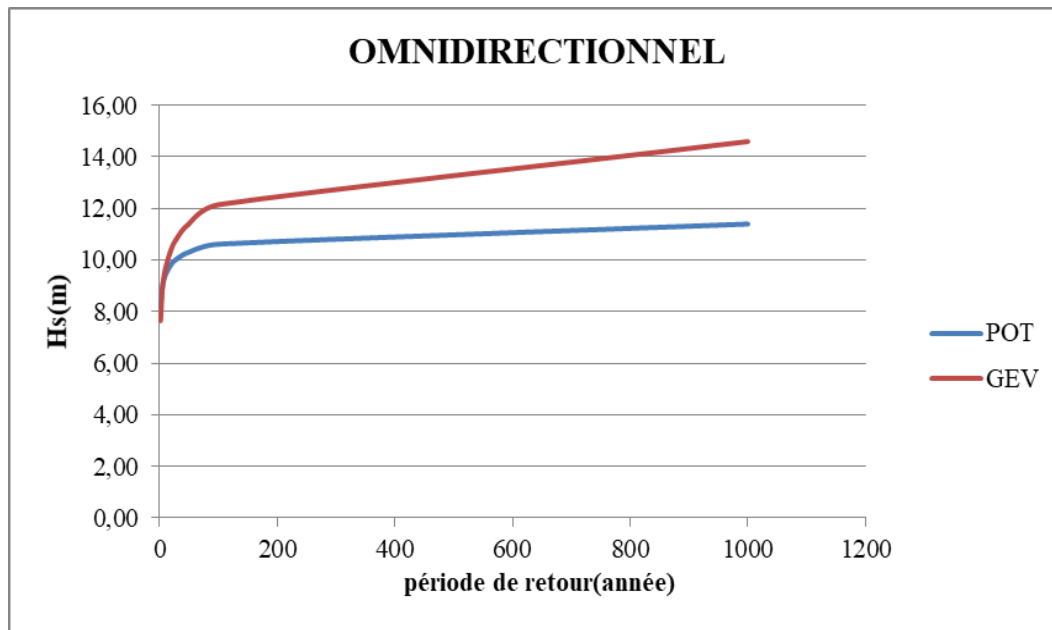


Figure II- 11 Comparaison des résultats obtenu avec les deux méthodes POT et GEV.

La figure II-11 nous montre que les deux méthodes donnent des résultats identiques pour les périodes qui sont inférieurs à 20ans. Ainsi, on constate également que la méthode GEV propose des valeurs plus élevées que la méthode du POT pour toutes les périodes de retour supérieur à 20ans.

III. Conclusion

Dans ce chapitre d'analyse des évènements extrêmes on a travaillé avec les deux méthodes : GEV et POT. D'après ces méthodes-là on a eu des résultats proches. En revanche, on constate que la méthode POT prend en compte plus de point que la méthode GEV qui se limite à un point par bloc (année). Seule la valeur maximale est prise en compte par bloc (année) même si d'autres points extrêmes subsistent.

En conclusion, dans la suite de notre travail les résultats de la méthode POT seront poursuivis dans les chapitres suivant.

Chapitre III

Etude hydrodynamique et
agitation portuaire

III.1. Introduction

La modélisation numérique des processus hydrodynamiques est une étape largement utilisée et validé depuis plusieurs années pour étudier les effets des sites et des projets sur les conditions naturelles. Cet outil numérique permet de résoudre les équations régissant le mouvement des masses d'eau (mécanique des fluides), décrivant les variations spatiales et temporelles du débit et du niveau d'eau dans différentes conditions météorologiques dans une région géographique donnée.

L'action de la houle, sa réflexion et sa diffraction peuvent provoquer au sein des ports des problèmes de résonance d'ondes très nuisibles aux opérations portuaires. Ces problèmes sont directement liés aux coefficients de réflexion des parois des ouvrages ainsi que d'autres phénomènes marins tels que l'agitation et la circulation à l'intérieur du bassin.

Dans notre étude on va utiliser le logiciel Mike 21 qui est un logiciel professionnel de modélisation numérique 2D des écoulements à surface libre à l'échelle de baie et le logiciel Telemac (modèle Artemis) pour simuler les phénomènes hydrodynamiques à l'échelle du port.

III.2. Présentation du logiciel

III.2.1. Modules de modélisation numérique- Mike 21

Mike 21-DHI : logiciel développé par l'institut hydraulique Danoise. C'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 bathymétrie, la génération de la houle par action du vent, 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 les zones d'études d'intérêt particulier (**DHI, 2014**).

Il permet la simulation de l'hydraulique et des phénomènes associés dans les rivières, les lacs, les baies, les zones côtières et les océans. Le MIKE 21 est donc particulièrement adapté aux problèmes des principaux domaines d'application suivants :

- L'hydraulique fluviale.
- L'hydraulique environnementale (qualité).
- Les processus sédimentaires.
- L'hydraulique côtière et l'océanographie.
- La houle.

Les modules utilisés dans notre étude :

III.2.1.1. Module hydrodynamique - MIKE 21 HD

Le modèle hydrodynamique MIKE21 HD résout les équations bidimensionnelles classiques de Saint-Venant par la méthode volume fini sur une grille à maillage flexible et par la méthode des différences finies sur une grille à maillage rectangulaire. Il traite le frottement sur le fond, l'effet des événements météorologiques (vent et pression atmosphérique), et la force de Coriolis, il nous permet de simuler les courants côtiers dus à l'action de la houle dans la zone de déferlement (**DHI, 2014m**).

L'équation en eau peu profonde dans le système de coordonnées Cartésien L'intégration des équations de quantité de mouvement horizontal et l'équation de continuité de la profondeur $h=\eta+d$ en eau peu profonde produisent (DHI, 2014c) :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = hs \quad \text{Equation III- 1}$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial hvu}{\partial y} = fvh - gh \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + hu_s s \quad \text{Equation III- 2}$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} = fuh - gh \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_w}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial y} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{yy}) + hv_s s \quad \text{Equation III- 3}$$

Où :

t : Temps ;

x, y, z : Coordonnées cartésiennes ;

η : Hauteur de la surface ;

d : Profondeur de l'eau ;

h : Profondeur totale de l'eau, $h = \eta + d$;

f : Paramètre de Coriolis, $f = 2\Omega \sin \theta$;

Ω : vitesse angulaire de révolution ;

θ : Latitude géographique ;

ρ_w : Densité de l'eau ;

p_a : Pression atmosphérique ;

ρ_0 : Densité de référence de l'eau ;

u, v, w : Composantes de la vitesse du courant dans les directions x, y, et z ;

$S_{xy}, S_{yx}, S_{xx}, S_{yy}$: Composantes du tenseur de rayonnement ;

ν_t, ν_h : Viscosités turbulentes verticale et horizontale, respectivement ;

S : Amplitude de la décharge causée par des sources ponctuelles ;

(u_s, v_s) : Vitesses par laquelle l'eau est déchargée dans l'eau ambiante ;

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

U, V : Les vitesses des courants à la profondeur moyenne sont définies par :

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz \quad \text{Equation III- 4}$$

$$h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad \text{Equation III- 5}$$

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

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial u}{\partial x'} \quad \text{Equation III- 6}$$

$$T_{xy} = A \left(\frac{\partial u}{\partial y'} + \frac{\partial v}{\partial x'} \right) \quad \text{Equation III- 7}$$

$$T_{yy} = 2A \frac{\partial v}{\partial y} \quad \text{Equation III- 8}$$

III.2.1.2. Module de vagues - MIKE 21 SW

Le module Mike 21 spectral waves (SW) est utilisé pour simuler la déformation des vagues offshore à l'approche du rivage sous l'influence de la réfraction et des vagues déferlantes. Le module SW intègre les derniers développements en matière de simulation de la génération et la transformation des vagues en eaux profondes et dans les zones côtières. Le module est conçu pour simuler la génération de la transformation en eaux profondes et dans les zones côtières. Les simulations reproduisent des phénomènes tels que la réfraction, la dissipation due au déferlement des vagues et à la friction du fond marin, la génération de vagues induite par le vent les interactions non linéaires entre les vagues et les interactions entre les vagues et les courants. (DHI, 2014).

Le module peut utiliser des données préétablies sur les vagues en mer, qui doivent ensuite être complétées par des mesures, d'autres données externes ou la génération de vague par le vent.

- Équations en eaux peu profondes :

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

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad \text{Equation III- 9}$$

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial \eta p}{\partial y} + \frac{\partial w u}{\partial z} = f v - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s s \quad \text{Equation III- 10}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial \eta p}{\partial y} + \frac{\partial w u}{\partial z} = f v - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s s \quad \text{Equation III- 11}$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\delta y}{\delta x} = -fu - g \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial y}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t \frac{\partial y}{\partial x} \right) + v_s s \quad \text{Equation III- 12}$$

Où :

t est le temps ;

x, y et z sont les ordinales cartésiennes ;

η est l'élévation de la surface ;

d est la profondeur d'eau ;

h = η+d est la profondeur d'eau totale ;

u, v et w sont la vitesse composante dans les directions x, y et z ;

f = 2Ω sinΦ est le paramètre de Coriolis (Ω est la vitesse angulaire et Φ la latitude géographique) ;

g est l'accélération de gravité ;

ρ est la densité de l'eau ;

Sxx, Sxy, Syx et Syy sont des composantes du tenseur radial ;

vt est la viscosité verticale turbulente ;

Pa est la pression atmosphérique ;

ρ₀ Est la densité de référence de l'eau ;

S est l'amplitude du débit dû aux sources ponctuelles ;

(Us, vs) est la vitesse à laquelle l'eau est rejetée dans l'eau ambiante ;

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

$$F_u = \frac{\partial y}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad \text{Equation III- 13}$$

$$F_v = \frac{\partial y}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) \quad \text{Equation III- 14}$$

A est la viscosité horizontale.

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

A z = η :

$$\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} - w = 0, \left(\frac{\partial y}{\partial x}, \frac{\partial y}{\partial x} \right) = \frac{1}{\rho_0 v_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad \text{Equation III- 15}$$

A z = -d:

$$u \frac{\partial y}{\partial x} + v \frac{\partial y}{\partial x} - w = 0, \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 v_t} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad \text{Equation III- 16}$$

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

- **Équations de conservation de l'action des vagues :**

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

- **Coordonnées cartésiennes :**

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

$$\frac{\partial y}{\partial x} + \nabla \cdot (\bar{v} N) = \frac{S}{\sigma} \quad \text{Equation III- 17}$$

Où :

$N(\bar{x}, \sigma, \theta, t)$ est la densité d'action,

t est le temps,

$\bar{x} = (x, y)$ est les coordonnées cartésiennes,

$\bar{v} = (C_x, C_y, C_\sigma, C_\theta)$ est la vitesse de propagation d'une onde de groupe dans l'espace à quatre dimensions x, c et s ,

S est le terme source de l'équation du bilan énergétique.

∇ est l'opérateur différentiel à quatre dimensions dans l'espace \bar{x}, σ, θ et S .

Les quatre vitesses de propagation caractéristiques sont données par :

$$(c_x, c_y) = \frac{d\bar{x}}{dt} = \vec{c}_g + \vec{U} \quad \text{Equation III- 18}$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla_{\bar{x}} d \right] - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \quad \text{Equation III- 19}$$

$$(c_x, c_y) = \frac{d\bar{x}}{dt} = \vec{c}_g + \vec{U} \quad \text{Equation III- 20}$$

$$c_\theta = \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right] \quad \text{Equation III- 21}$$

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

III.3. Collecte de données bathymétrie

En raison d'absence de données bathymétrique, on a obtenu ces données bathymétriques par le site Navionics qui fournissent des cartes détaillées des contours du fond de la mer, permettent de mieux comprendre les eaux peu profondes ainsi des données du terrain issues des compagnes du LEM.

- **Navionics sonar chart**

Navionics SonarChart est une carte bathymétrique haute définition qui montre les contours des fonds marins et des lacs dans des détails exceptionnels. Idéal pour identifier à connaître les zones peu profondes. SonarChart est constamment enrichi par les enregistrements sonar fournis

par les plaisanciers et les bateaux de navigation. Navionics accepte les enregistrements sonars enregistrés par la majorité des marques de sonars/ flotteurs et d'appareils mobiles. Ils sont intégrés aux données existantes, mis à jour dans une carte SonarChart qui reflète l'évolution constante évolution des fonds marins, des lacs et des rivières.

La bathymétrie varie en fonction de la profondeur. Voir ci-dessous le tableau pour en savoir plus sur l'intervalle de profondeur.

Tableau III- 1 l'intervalle de profondeur

Isobathes	Résolution
0 - 20 m	2m
20 - 50 m	5m
50 - 100 m	10m
100 - 500 m	100m

La carte extraite du Navionics SonarChart™ nous a fourni une carte bathymétrique représentative de la zone d'étude après analyse et traitement avec le logiciel Arcgis 10.8.

- Esri ArcGIS

ArcGIS : Est un système d'information géographique (SIG) développé par la société Esri. Il s'agit d'un ensemble de logiciels et de technologies utilisés pour capturer, gérer, analyser et visualiser des données géographiques.

ArcGIS permet aux utilisateurs de travailler avec des données géographiques provenant de différentes sources, telles que des cartes, des images satellitaires, des bases de données, des relevés sur le terrain, etc. les différentes couches de données pour analyser les relations spatiales et effectuer des recherches complexes. Il offre des fonctionnalités avancées pour la création des cartes, la modélisation et l'analyse spatiale, la gestion des données géographiques, la visualisation 3D et bien d'autres.

L'une des caractéristiques principales d'ArcGIS est sa capacité d'intégrer les différentes couches d'information géographique dans une seule carte. Cela permet aux utilisateurs de les superposer.

Logiciel ArcGIS 10.8 comprend trois applications principales : ArcCatalog, ArcMap et ArcToolbox.

ArcCatalog : est un composant clé du logiciel ArcGIS développée par Esri. Aussi un explorateur de données tabulaires et cartographiques offrant des outils de gestion et d'organisation analogues à ceux qui sont offerts par les systèmes d'exploitation comme WINDOWS ou DOS

(copier, renommer, effacer, créer des icônes, etc.). Il permet aussi de visualiser les données tabulaires et les couches géographiques ainsi que leurs explorations.

ArcMap : est utilisé pour créer, visualiser, analyser et gérer des données géographiques et des cartes. Avec ArcMap, les utilisateurs peuvent importer différents types de données tels que des fichiers de formes (Shape files), des géodatabases, des jeux de données raster et des tables, puis les symboliser et les afficher dans une vue cartographique. Il permet aux utilisateurs d'appliquer des techniques d'analyse spatiale telles que les tampons, les superpositions, l'analyse de proximité et les opérations de géo-traitement pour obtenir des informations et prendre des décisions éclairées en fonction des relations spatiales au sein des données.

ArcToolbox : s'agit d'une boîte à outils qui regroupe une collection d'outils de géo-traitement permettant aux utilisateurs d'effectuer des analyses spatiales, de gérer des données et de réaliser des opérations de géo-traitement sur des données géographiques. ArcToolbox organise ces outils, chaque outil dispose ses propres paramètres et options qui peuvent être personnalisés en fonction des besoins de l'utilisateur. Ces outils peuvent être utilisés pour réaliser des opérations telles que la création de tampons, les superpositions, les découpages, les statistiques spatiales, l'extraction de données, et bien d'autres fonctions.

III.3.1. Traitement des données :

Pour la réalisation et la conception la mesh et la bathymétrie de notre zone d'étude nous avons procédé comme suit :

- Géoréférencement de la carte marine dans le système de projection (**WGS_1984_UTM_Zone_32N**), sur Arc Gis.
- Création des shapefiles ligne pour digitaliser les isobathes et le trait de côte.
- Conversion des shapefiles ligne en point, pour les isobathes et le trait de côte (avec l'outil de conversion d'ArcToolbox). On ajoute les champs X, Y, Z, dans les tables attributaires.
- Conversion des tables attributaire en fichier Excel, puis en fichier texte. A ce stade là on vient de créer un fichier X, Y, Z lisible et exécutable par le Mike 21.
- Création d'une Mesh de la zone d'étude la baie de Annaba par l'utilisation de l'extension «MeshGenerator ».

III.3.2. Génération et interpolation de la Mesh

Le module « Mesh Generator » fournit un environnement pour la création, l'édition et la présentation de bathymétries numériques détaillées en 2D. « MeshGenerator » génère un format de maillage flexible (*. MESH) (**DHI, 2014**). Le programme fournit des utilitaires pour importer des données du trait de côte, y compris la bathymétrie. Pour faciliter le processus d'affinage et de présentation manuelle des données, des cartes graphiques d'images du fond peuvent être importées et superposées aux données bathymétriques (**DHI, 2014**).

Diverses options d'interpolation sont disponibles pour fournir la meilleure méthode possible pour notre type de données. Une fois la cartographie de la bathymétrie terminée, les données bathymétriques de sortie peuvent être exportées dans une variété de formats à l'aide d'utilitaires (DHI, 2014).

La création d'une bathymétrie est généralement divisée en plusieurs phases :

- Choisir un système de projection adapté à notre site d'étude
- le traitement des données bathymétriques XYZ (Le trait de côte et la bathymétrie du site d'étude qui ont été sauvegardés sous un fichier text.XYZ.).
- Pour la conception du maillage, le système de projection utilisé est « UTM WGS84 ZONE 32N ».
- En utilisant le module « Mesh Generator » de MIKE21, nous pouvons tout d'abord importer les données du trait de côte à partir des données pré-converties précédemment « fichier.XYZ ».
- Lors de l'importation d'une série de lignes nous devons assurer que les lignes du trait de côte sont bien fermées.
- Ensuite, pour les données bathymétriques « fichier.XYZ. » sont importés dans le fichier de maillage.
- Notez que la vitesse de calcul est proportionnelle à la taille du plus petit élément du maillage.
- En pratique, le modèle MIKE21 choisit un pas de temps pour assurer la condition de stabilité CFL inférieure à 1 pour tous les éléments.
- Dans la présente étude de cas, le maillage généré se compose de 8114 éléments pour 4790 nœuds.
- Le générateur de maillage offre deux options d'interpolation pour les éléments triangulés.

Deux routines d'interpolation sont possibles : l'interpolation par voisins naturels et l'interpolation linéaire. Celles-ci sont indépendantes du type de maillage utilisé.

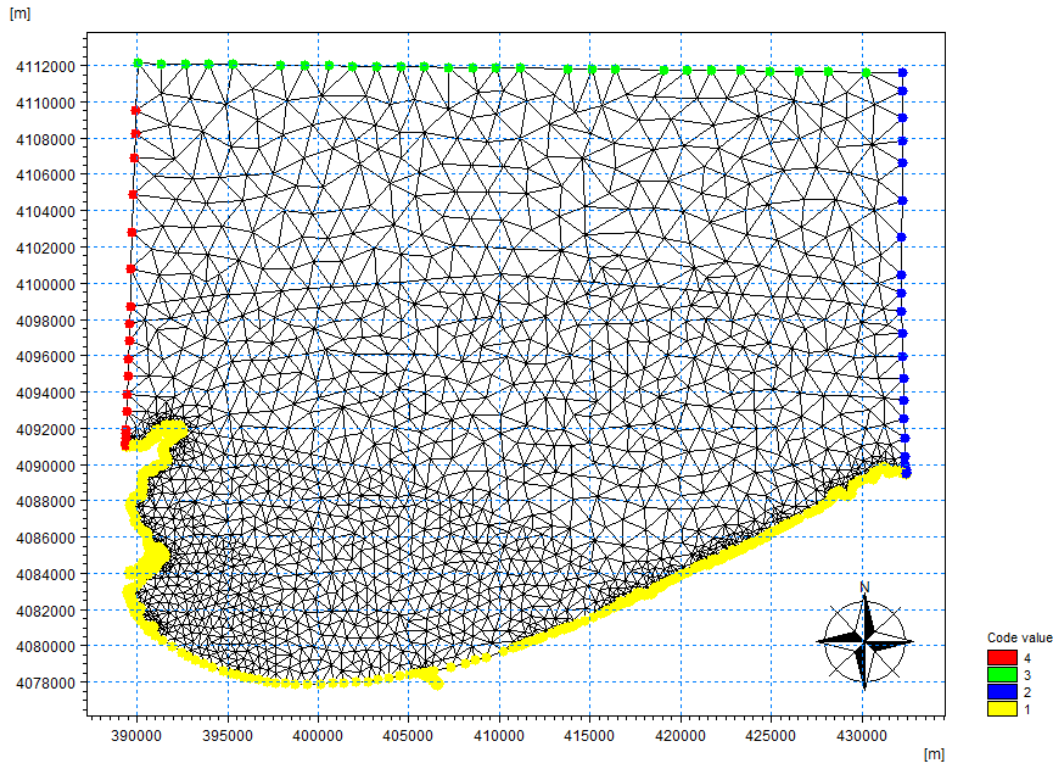


Figure III- 1 Maillage du modèle zoom sur le golfe d'Annaba.

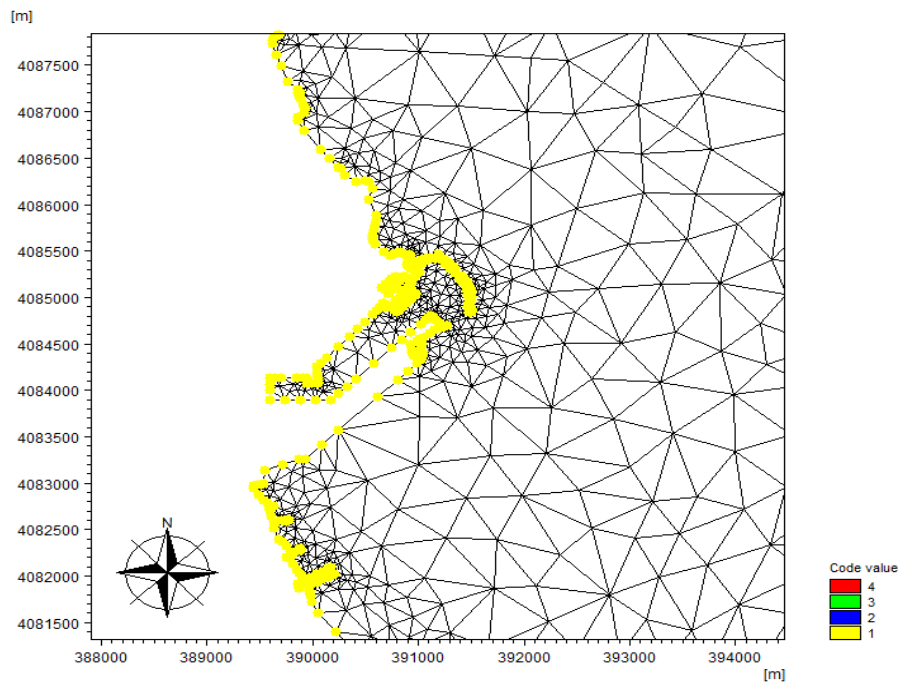


Figure III- 2 Maillage du modèle zoom sur le port d'Annaba.

III.4. Bathymétrie :

La bathymétrie du modèle importé générée avec ArcGIS vers MIKE21 (*.xyz).

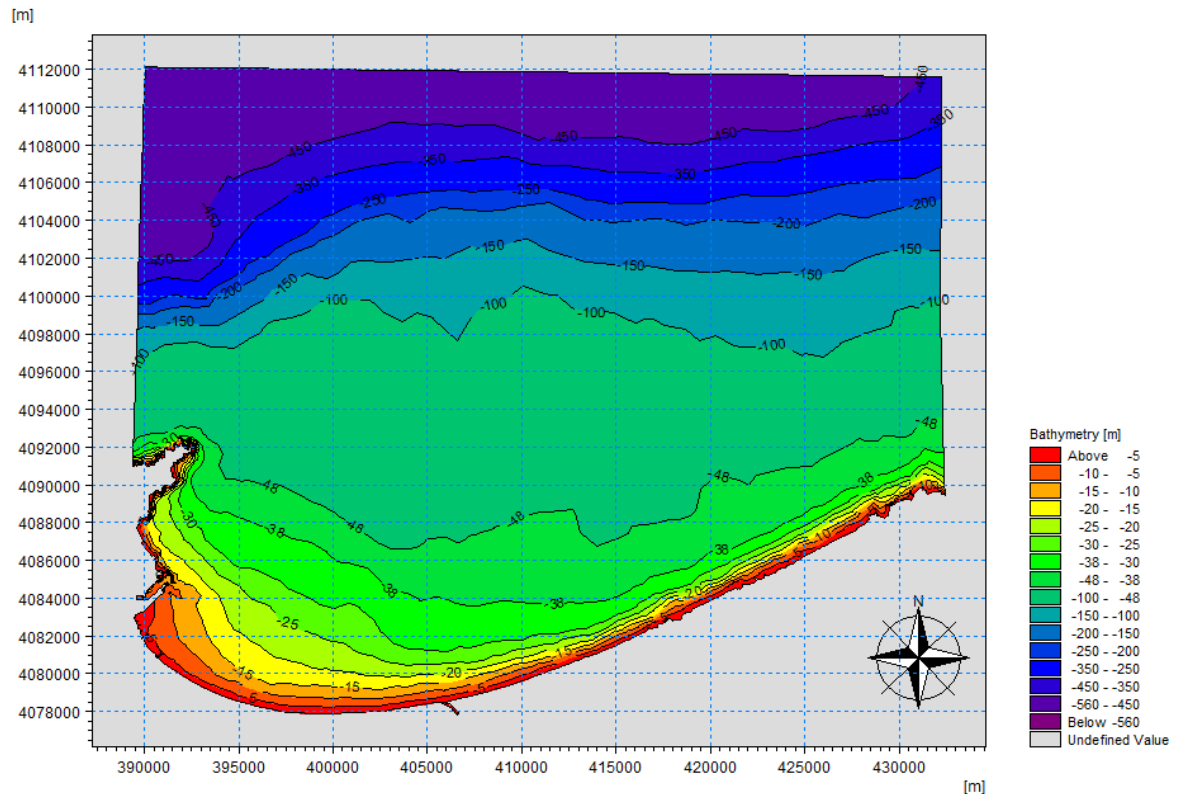


Figure III- 3 Bathymétrie du modèle zoom sur la baie d'Annaba.

III.4.1. Bathymétrie du Golf d'Annaba :

La carte bathymétrique du golfe d'Annaba montre qu'il existe deux parties distinctes (la partie côtière, la partie du large).

- La partie côtière : les isobathes sont bien serrées aux extrémités du golf ce qui indique une forte pente pour la profondeur qui varie de 0 à 38m et rapprochées près du port (0-15m) en revanche au milieu de la baie sont un peu large parallèlement à la ligne de rivage de 0m à -30m.
- La partie du large : les isobathes sont légèrement plus larges et éloignées les unes des autres ce qui indique une pente douce pour une profondeur de 50 à 450m.

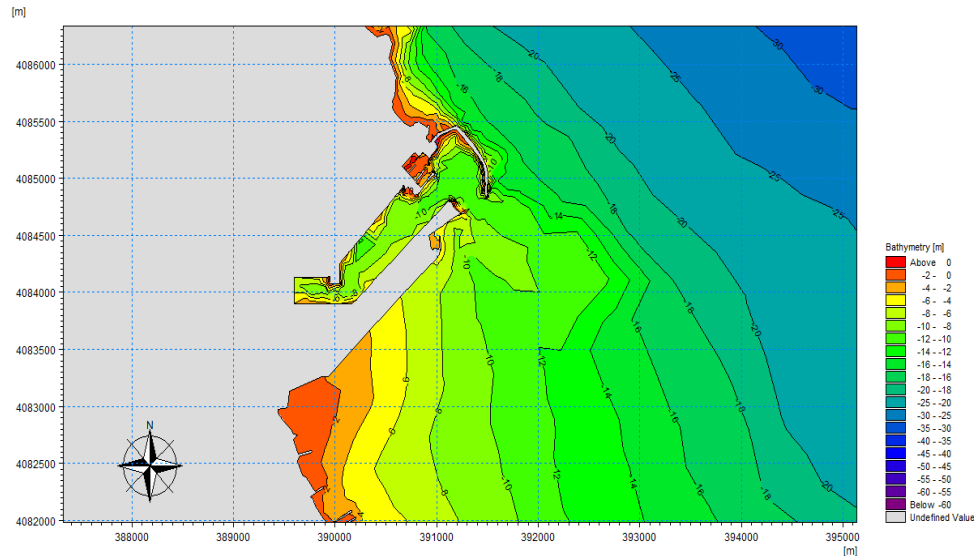


Figure III- 4 bathymétrie du modèle zoom sur le port d'Annaba.

III.4.2. Bathymétrie du port d'Annaba :

La bathymétrie du port d'Annaba varie d'une profondeur de 2m à 15m selon les différentes parties :

- une grande darse : une profondeur qui varie entre 10m à 12.5m.
- une petite darse : une profondeur qui varie entre 6 à 9.5m.
- la grenouillère (l'abri de pêche) : une profondeur qui varie de 1m a 4m avec des isobathes serrées à l'intérieur du bassin.

III.5. Etude d'hydrodynamique

L'analyse des séries temporelles de houles issue de la base de données waveclimate entre 1992 et 2022 au large du golfe d'Annaba nous a permis d'obtenir les roses des houles et des vents de la zone, ces derniers nous ont permis de choisir les directions pénalisantes par : saison, mois, par année (voir chapitre 1).

Le tableau ci-dessous présente les paramètres hydrodynamiques pour lancer les simulations dans la zone d'étude.

Tableau III- 2 caractéristique des houles extrêmes dans les différentes périodes de retour cas du port d'Annaba

période de retour (année)	Hs					U10					Tp				
	2	5	10	50	100	2	5	10	50	100	2	5	10	50	100
NNW	8,19	8,93	9,40	10,26	10,56	14,04	16,03	17,53	21,01	22,51	13,77	14,63	15,64	20,21	23,84
NW	6,88	7,91	8,69	10,50	11,29	18,65	20,57	22,02	25,38	26,83	13,69	14,18	14,51	15,12	15,34
N	4,24	5,06	5,68	7,11	7,73	9,45	11,49	13,03	16,61	18,15	4,36	4,99	5,36	5,95	6,12
NNE	3,41	4,16	4,74	6,07	6,64	10,23	11,95	13,24	16,25	17,55	12,34	13,12	13,62	14,55	14,87
NE	2,88	3,38	3,76	4,64	5,01	10,95	12,26	13,26	15,58	16,57	11,87	12,62	13,11	14,07	14,41
ENE	2,10	2,45	2,78	3,91	4,60	11,36	12,95	14,15	16,94	18,15	11,96	13,07	13,91	15,85	16,69

III.5.1. Simulation des houles extrêmes pour des périodes de retours correspondantes.

III.5.1.1. Présentation et interprétation des résultats de simulation de SW

- D'après l'analyse des figures III-13 et III-14, on constate que les houles de de direction **337.5°** (NNW) d'occurrence cinquantennale (50 ans) et des hauteurs significatives de $H_0=10.26$ m arrivent sur les côtes avec des hauteurs de 2 à 2.5m. Leur énergie initiale va se diminuer avec la profondeur, qui va les freiner. Les valeurs minimales de H_s sont enregistrées au niveau des zones abritées (cas du port .d'Annaba) avec un coefficient de réfraction K_r varie entre **0.37** et **0.44**.
- A partir des résultats obtenus des simulations des houles de direction **315°** (NW) (figure III-15) direction pour la période de retours 50 ans, on constate que les houles gardent 90% de leurs énergies initiale correspondant au $H_s=10.50$ m du large. En allons vers la cote, les houles perdent leurs énergie initiale progressivement à cause des variations bathymétriques sous l'effet de la réfraction. Les valeurs de H_s enregistrées au pied de l'ouvrage sont minimale varie entre **2.8m** et **3.5m** avec un coefficient de réfraction faible ente **0.26** et **0.33**. Figure III-16.
- les houles de la direction Nord (Scénario 50 ans) préservent leurs caractéristiques du large, Avec une hauteur significative $H_0=7.11$ m. L'effet du fond va provoquer des déformations de ces houles. Les H_s de ces derniers se diminuent et atteignent les valeurs comprises entre **4.7m** et **5.6m** pour des coefficients de réfraction **0.66**, **0.78** successifs. Figure III-5 et figure III-6.
- Les houles provenant de la direction NNE d'occurrence 50 ans atteignent des valeurs maximales (extrêmes) de $H_0=6.07$ m dans la zone de fetch (zone de génération des ondes marines). Cependant, lorsque ces houles commencent à se propager vers la côte, leur

énergie initiale diminue progressivement en raison de l'effet de la profondeur, qui agit comme un frein sur leur propagation. Les hauteurs des houles diminuent pour atteindre **4.4m** et **4.8** m à proximité de la jetée principale. Un **Kr=1.4** et **Kr=1.26** successifs. Figure III-7 et figure III-8.

- Selon la figure III-9. , les houles provenant de la direction Nord-Est avec une période de retour de 50 ans sont frontales et ne subissent aucune modification en haute mer ($H_0= 4.64$ m), à l'arrivée de l'ouvrage (figure III-10.), les houles ne perdent pas toute leur énergie initiale, un coefficient de réfraction entre **0.77** et **0.86** le long du port. Cela indique que ces houles conservent la majeure partie de leur énergie provenant des hautes mers, ce qui signifie qu'elles affectent directement l'ouvrage.

- Selon la figure III-11. , les houles provenant de la direction Est-Nord-Est avec une période de retour de 50 ans et ne subissent aucune modification en haute mer ($H_0= 3.91$ m). Lorsqu'elles approchent de la côte, les hauteurs des houles diminuent pour atteindre 4.3 m à proximité de la jetée principale (figure III.12), avec un coefficient de réfraction de **0.9** le long du port. Cela indique que ces houles conservent la majeure partie de leur énergie provenant des hautes mers, ce qui signifie qu'elles affectent directement l'ouvrage.

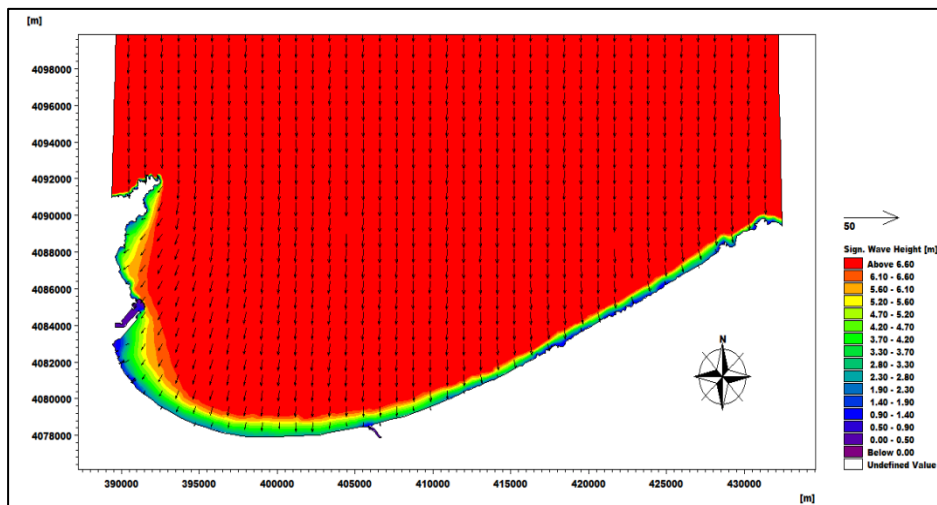


Figure III- 6 Champs des houles dans le Golf d'Annaba de direction N pour la période 50 ans ($H_S=7.11\text{m} / T_P=5.95\text{s} / U_{10}=16.61\text{m/s}$).

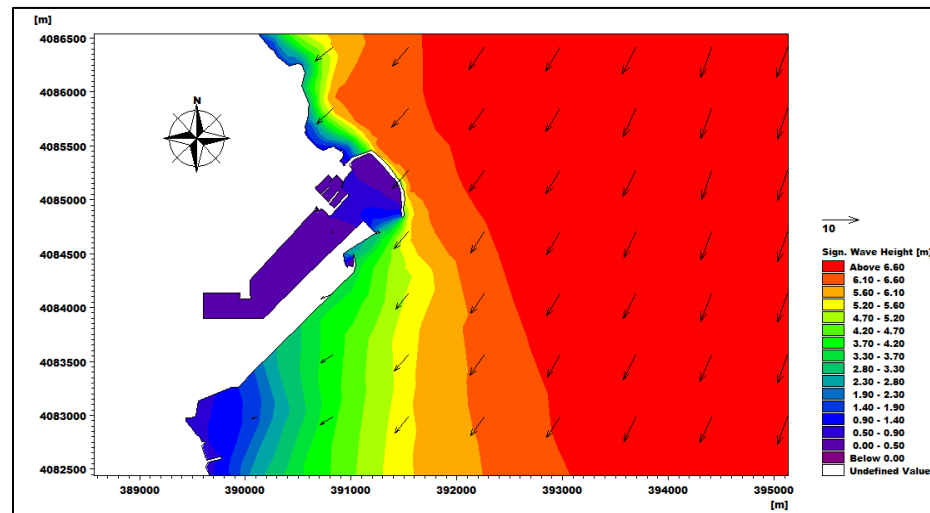


Figure III- 5 : Champs des houles de direction N au près du port d'Annaba pour la période 50 ans.

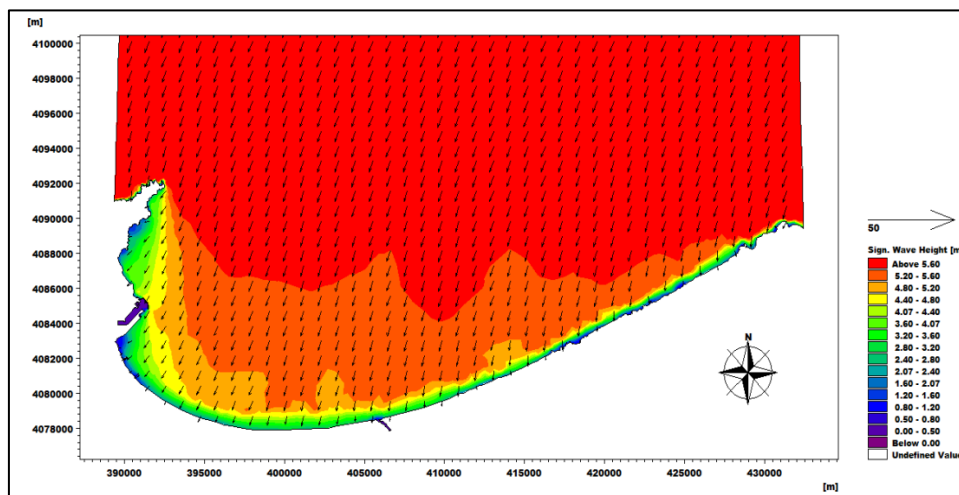


Figure III- 8 Champs des houles dans le Golf d'Annaba de direction NNE pour la période 50 ans ($H_S=6.07\text{m} / T_P=14.55\text{s} / U_{10}=16.25\text{m/s}$).

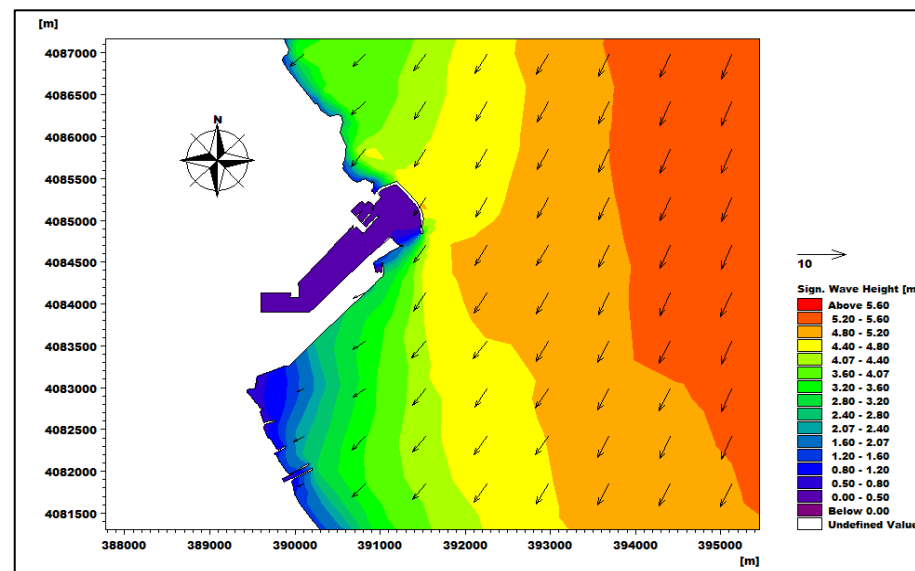


Figure III- 7 Champs des houles de direction NNE au près du port d'Annaba pour la période 50 ans

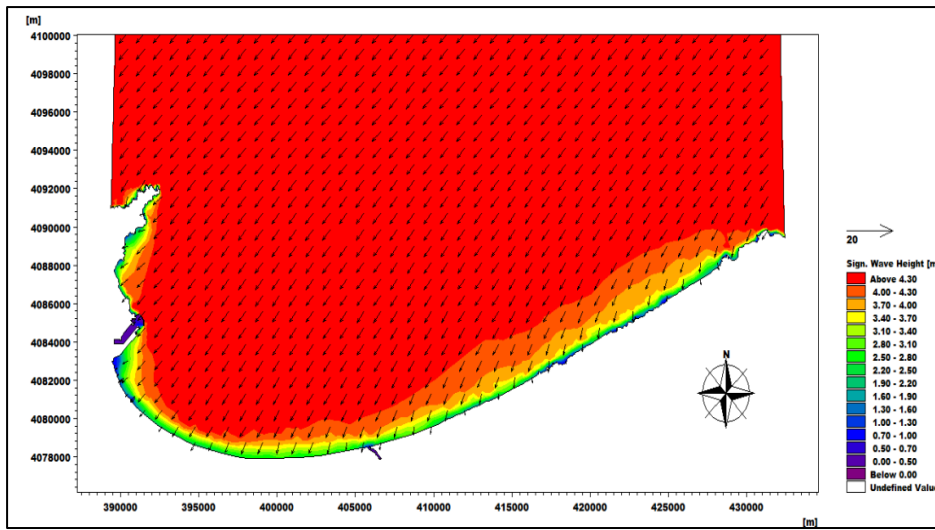


Figure III- 9 Champs des houles dans le Golf d'Annaba de direction NE pour la période 50 ans ($H_s=4.64\text{m}$ / $T_p=14.07\text{s}$ / $U_{10}=15.58\text{m/s}$).

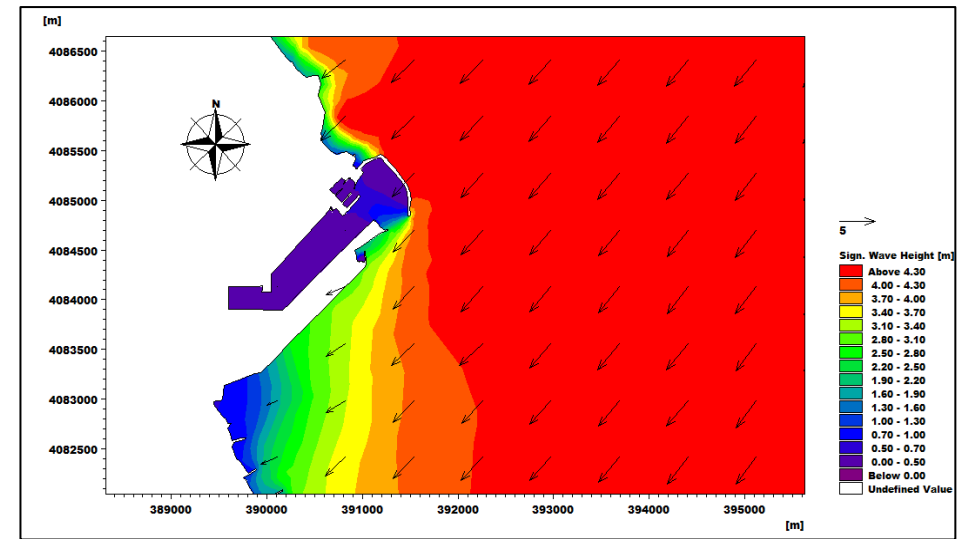


Figure III- 10 Champs des houles de direction NE au près du port d'Annaba pour la période 50 ans

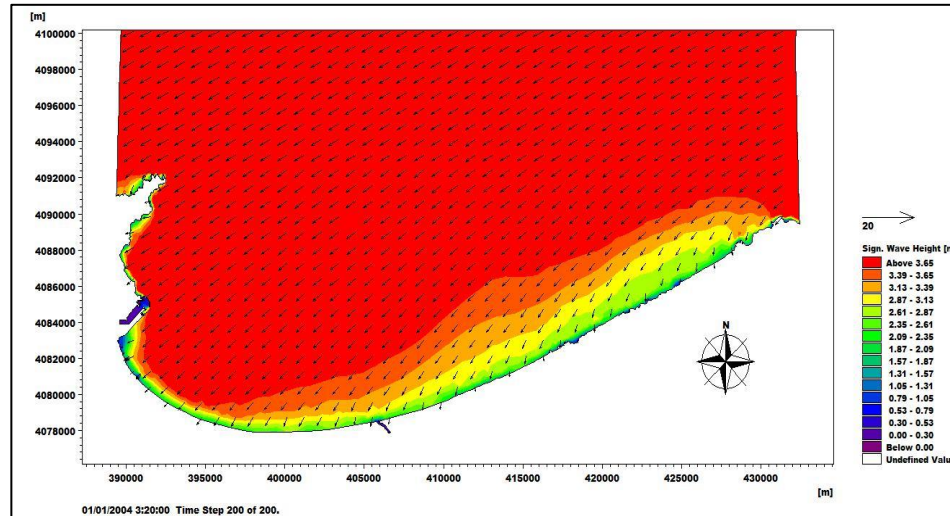


Figure III- 12 Champs des houles dans le Golf d'Annaba de direction ENE pour la période 50 ans ($H_s=3.91\text{m}$ / $T_p=15.95\text{s}$ / $U_{10}=16.94\text{m/s}$).

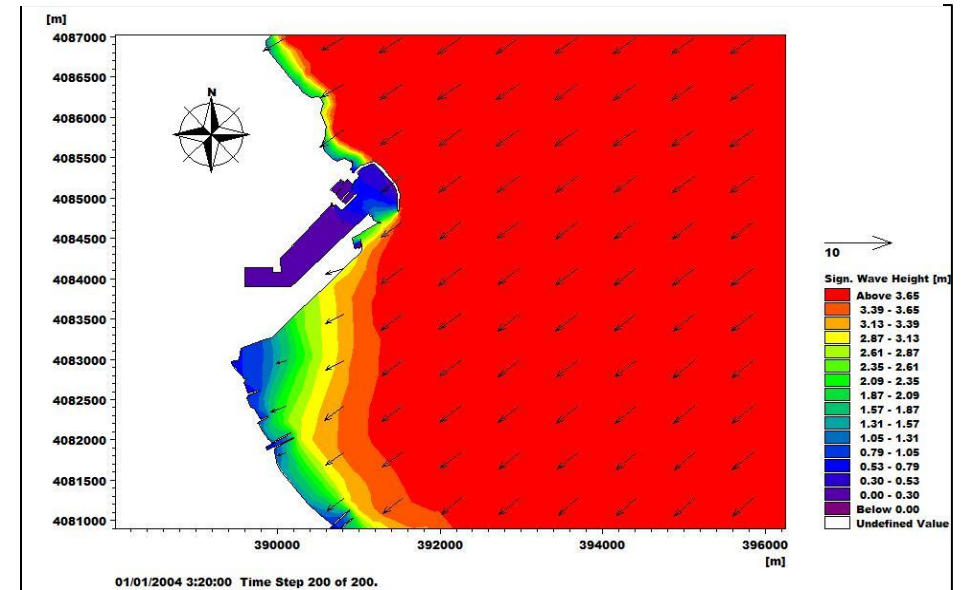


Figure III- 11 Champs des houles de direction ENE au près du port d'Annaba pour la période 50 ans

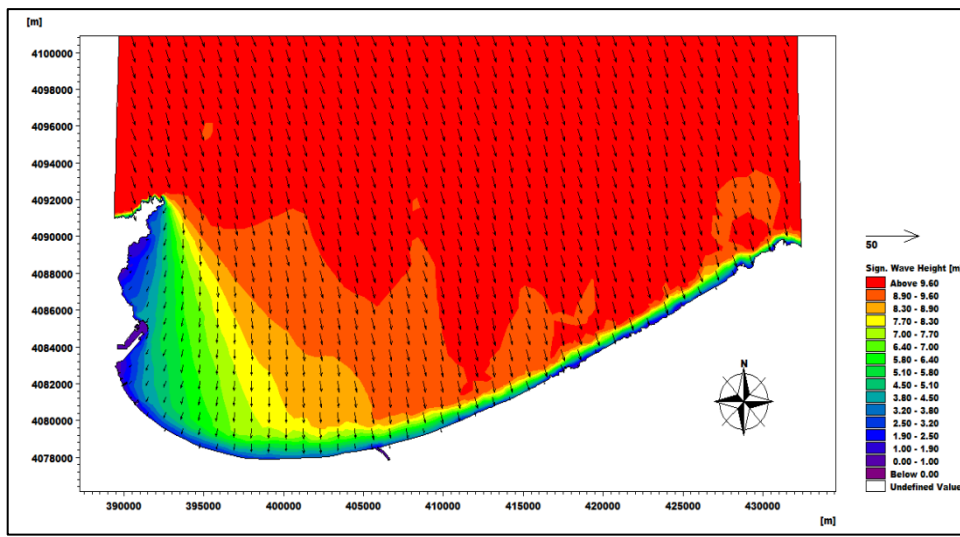


Figure III- 14 Champs des houles dans le Golfe d'Annaba de direction NNW pour la période 50 ans ($H_S=10.26\text{m} / T_p=20.21\text{s} / U_{10}=21.01\text{m} / \text{s}$).

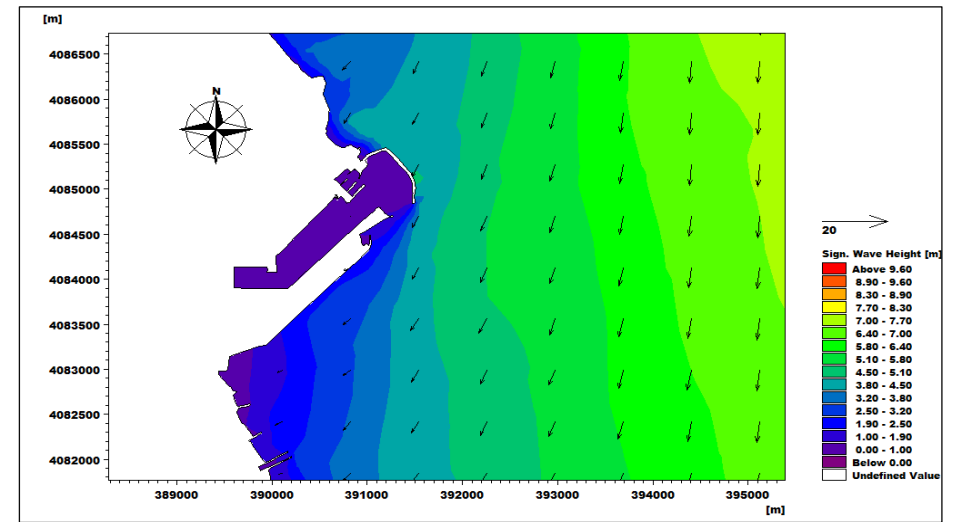


Figure III- 13 Champs des houles de direction NNW au près du port d'Annaba pour la période 50 ans

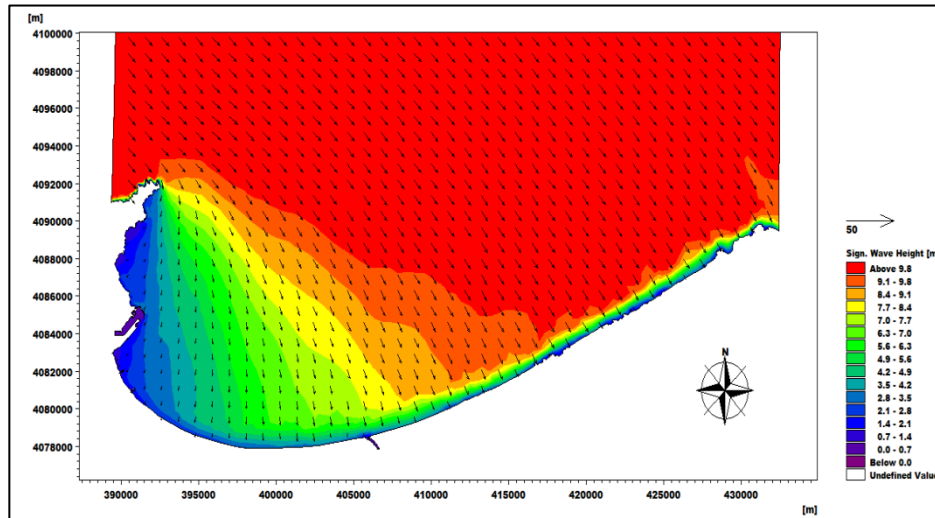


Figure III- 15 Champs des houles dans le Golf d'Annaba de direction NW pour la période 50 ans ($H_S=10.50\text{m} / T_p=15.12\text{s} / U_{10}=25.38\text{m} / \text{s}$)

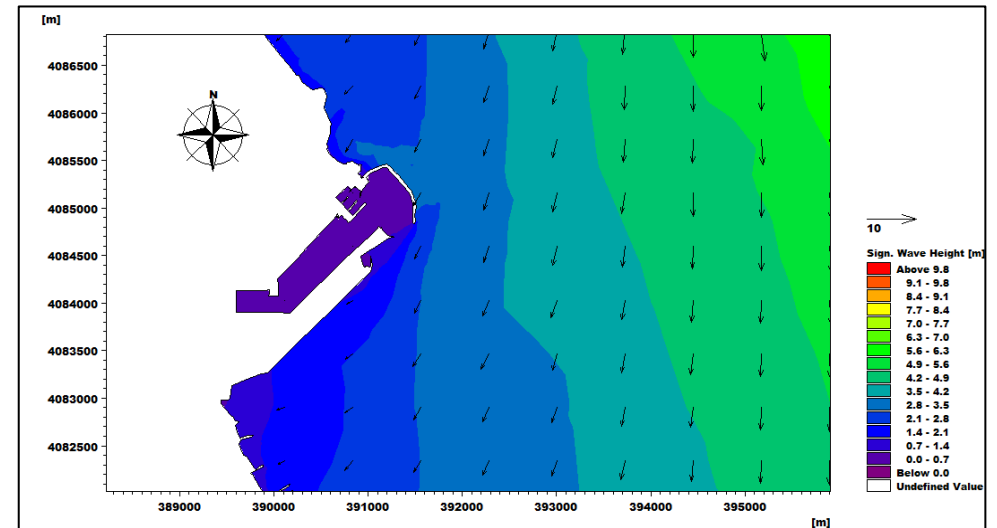


Figure III- 16 Champs des houles de direction NW au près du port d'Annaba pour la période 50 ans

III.5.1.2. Présentation et interprétation des résultats des simulations HD :

D'après les résultats des simulations HD pour la période de retour de 50ans (voir les figures de III-17 à III-22) et (2ans, 5ans, 10ans voir les annexes de 1 à 9) le flux d'énergie long-shore provient essentiellement du secteur ouest et s'oriente vers l'est le long de la cote.

- Les houles de secteur Est-Nord-Est (Figure III-18) avec une période de retour de 50 ans génèrent un courant parallèle à la côte orienté vers l'Est à une faible vitesse tout au long du littoral qui varie de 0.30 m/s à 0.60m/s.
- Les houles venant de direction Nord (Figure III-17) pour une période de retour de 50ans produisent une dérive littorale d'Ouest en tournant vers l'Est à une faible vitesse qui varie de 0.15 m/s à 0.30m/s sauf au niveau de la zone portuaire qui a une vitesse forte qui varie de 1.2m/s à 1.6m/s dans le chenal d'accès.
- Les houles de direction Nord-Est (Figure III-20) dont la période de retour de 50ans génèrent un courant parallèle à la côte d'une vitesse qui varie de 0.2m/s à 0.4 m/s sauf que pour la zone portuaire le courant est d'une vitesse de 0.6m/s à 0.9m/s
- Les houles de direction Nord-Nord-Est (Figure III-19) dont la période de retour 50ans engendrent un courant parallèle à la cote avec une vitesse qui varie de 0.80m/s à 0.90m/s cependant le courant qui est près de la jetée principale du port et lavant port est d'une vitesse de 0.96m/s à 1.04m/s.
- Les houles engendrée par la direction Nord-Nord-Ouest (Figure III-22) pour la période de retour 50ans génèrent une dérive littorale parallèle à la cote qui est orienté d'Ouest vers l'est avec une vitesse qui varie de 0.4m/s à 0.6m/s contrairement à la zone portuaire la vitesse du courant est un peu plus élevé (0.7m/s-0.9m/s).
- Le courant généré parallèle à la cote orienté de l'Ouest à l'Est qui est engendrée par la houle de direction Nord-Ouest (Figure III-21) dont la période de retour 50ans avec une vitesse qui varie 0.38m/s à 0.56m/s et dans la zone portuaire la vitesse varie 0.56 m/s à 0.72 m/s.

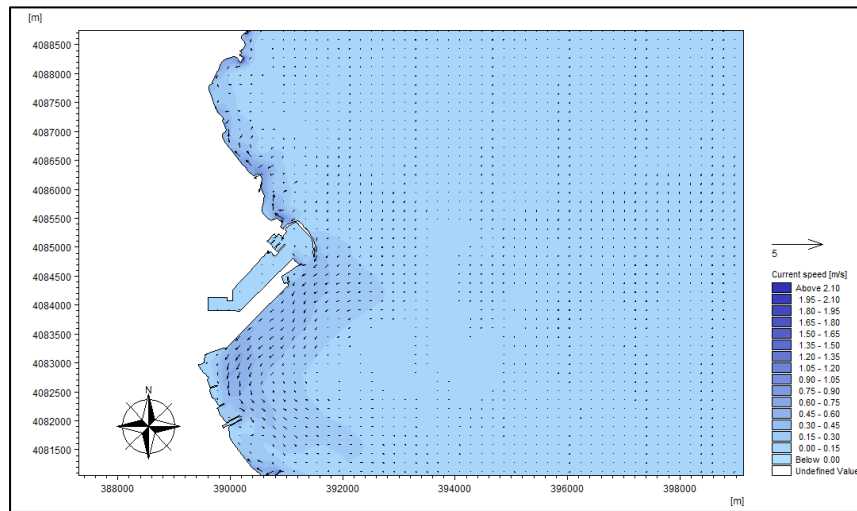


Figure III- 18 Champs des courants au voisinage de port d'Annaba de direction ENE pour la période 50ans ($H_s= 3.91m$, $T_p=16.94s$, $U_{10}= 15.85m/s$)

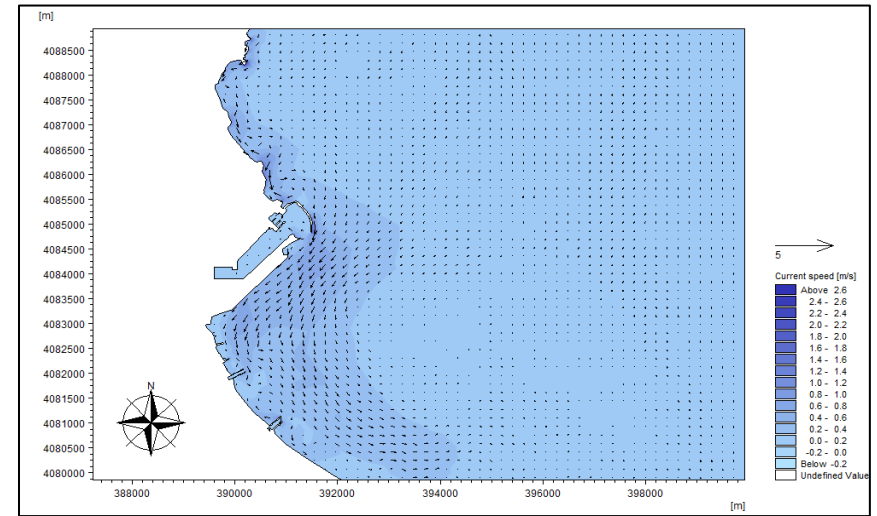


Figure III- 17 Champs des courants au voisinage de port d'Annaba de direction N pour la période 50ans ($H_s= 7.11m$, $T_p= 16.61s$, $U_{10}= 5.95m/s$)

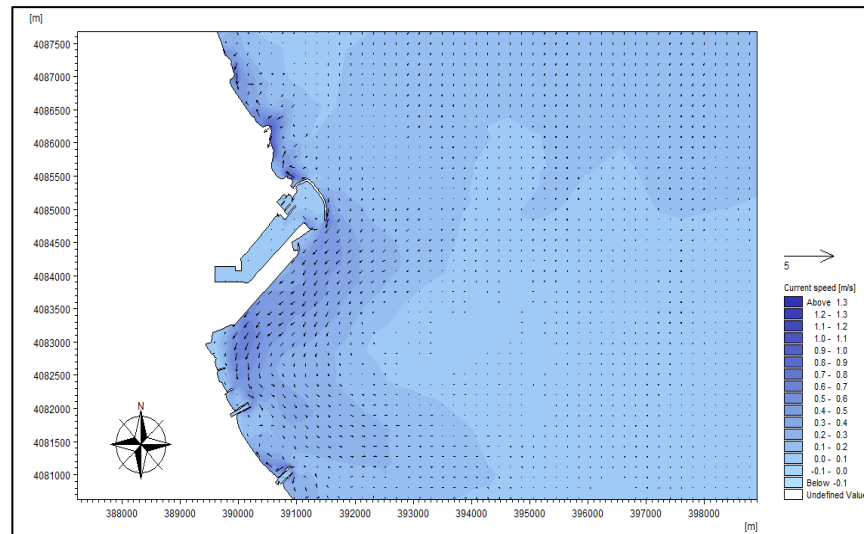


Figure III- 20 Champs des courants au voisinage de port d'Annaba de direction NE pour la période 50ans ($H_s= 4.64m$, $T_p= 14.07s$, $U_{10}= 15.58m/s$).

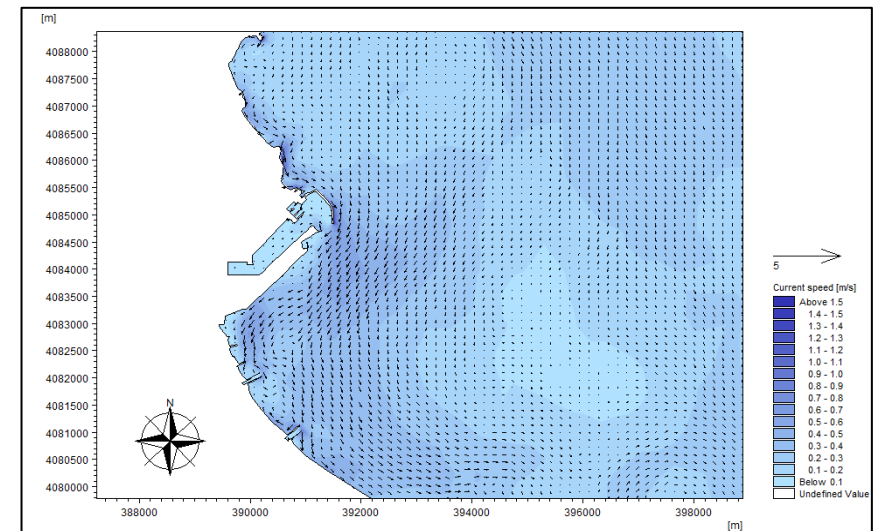


Figure III- 19 Champs des courants au voisinage de port d'Annaba de direction NNE50 pour la période 50ans ($H_s= 6.07m$, $T_p= 16.25s$, $U_{10}= 14.55m/s$).

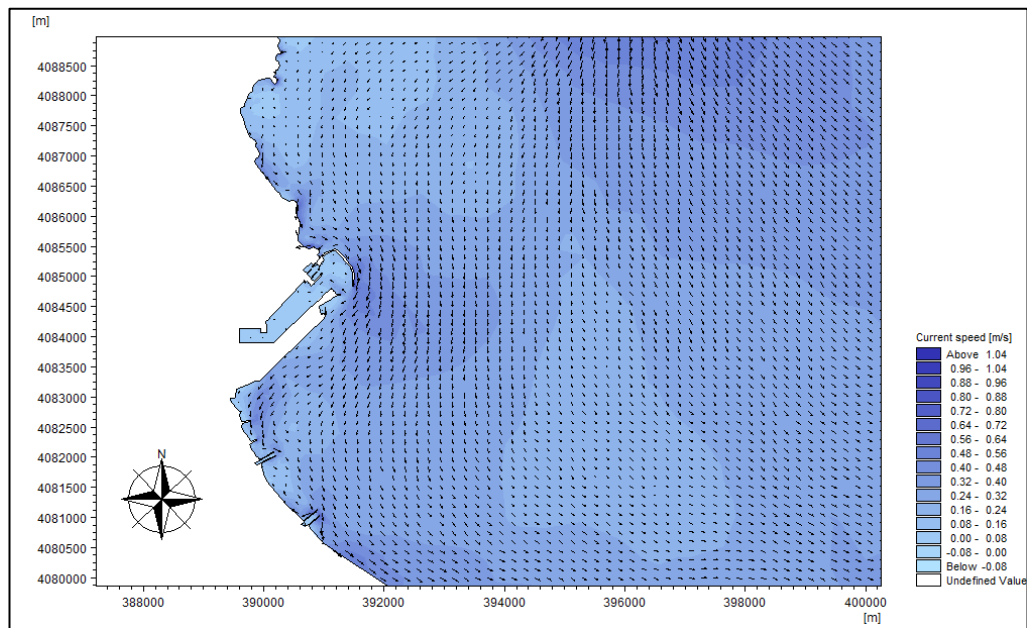


Figure III- 21 Champs des courants au voisinage de port d'Annaba de direction NW pour la période 50ans ($H_s=10.50\text{m}$, $T_p=15.12\text{s}$, $U_{10}=25.38\text{m/s}$).

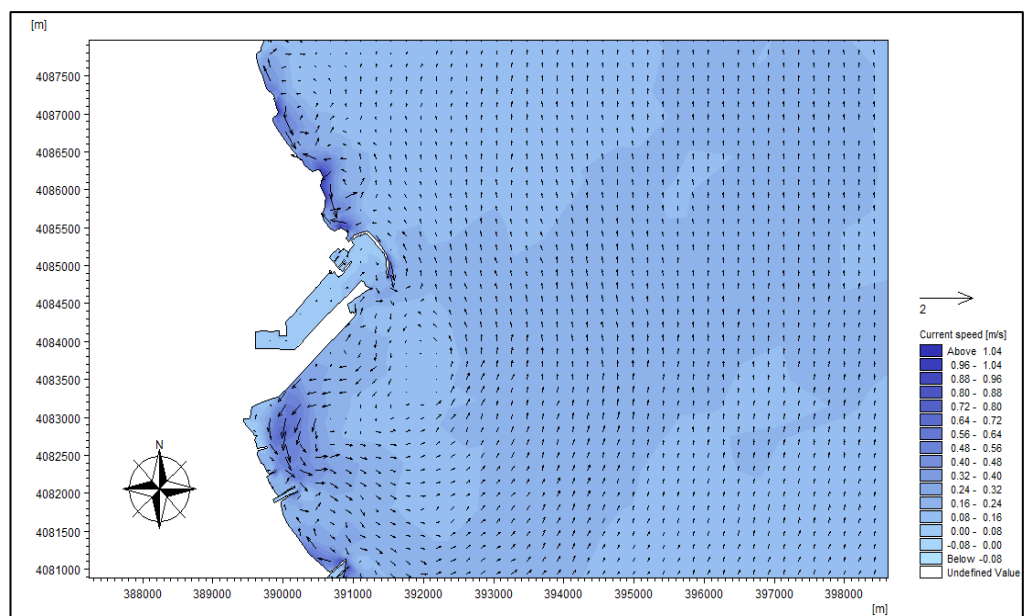


Figure III- 22 Champs des courants au voisinage de port d'Annaba de direction NNW pour la période 50ans ($H_s=10.26\text{m}$, $T_p=21.01\text{s}$, $U_{10}=20.21\text{m/s}$).

III.6. Etude d'agitation dans le port d'Annaba

L'embouchure d'un port est généralement dimensionnée pour protéger le bassin contre les vagues courtes gravitaires générées par le vent et dont la période est comprise entre 5 et 25 s. Cependant, beaucoup de ports font face à des problèmes d'agitation du plan d'eau provoqués par les ondes longues ayant des périodes supérieures à 30 s. Dans la plupart des cas, un port est une étendue d'eau semi-fermée située sur la côte et donc un système oscillant. Lorsque le forçage incident est suffisamment énergétique et que sa période est voisine de l'une des périodes propres du bassin, une onde stationnaire, associée à des oscillations verticales et des courants importants, se développe, on parle alors de seiche côtière (**Rabinovich, 2009**).

Dans notre cas d'étude d'agitation portuaire du port d'Annaba on va l'étudier avec le modèle ARTEMIS mais tout d'abord faut réaliser la Mesh du port à partir le BlueKenue.

III.6.1. Blue Kenue^{MC}

Blue Kenue^{MC} est un outil perfectionné permettant aux modélisateurs hydrauliques de préparer, analyser et visualiser leurs données. Il s'agit d'une interface graphique de pointe intégrant des bases de données environnementales et des données géo-référencées aux données de modèle (entrées et sorties). BlueKenue permet de lire directement les résultats des modèles TELEMAC, ADCIRC et HydroSim.

La visualisation de résultats dans BlueKenue se fait par le biais de vues dynamiques 1D, polaires, 2D, 3D ou sphériques que l'utilisateur peut enregistrer sous forme de films ou sauver sous forme d'images pour ses rapports et présentations.

Toutes les vues et les données sont entièrement géo-référencées. BlueKenue permet de plus la conversion entre systèmes de coordonnées (projections courantes). (**BlueKenue, 2011**).

III.6.1.1. Mesh

BlueKenue permet de générer des maillages rectangulaires et triangulaires à partir de points, de lignes, ou même à partir d'autres maillages réguliers ou triangulaires. L'utilisateur a la possibilité d'inclure des « nœuds durs » ou des « lignes de rupture » avec le générateur de grille triangulaire. Ces points et lignes seront préservés lors de la création des nœuds/éléments. La densité de nœuds est calculée à partir de cartes de densité définies par l'utilisateur (grilles rectangulaires, maillages triangulaires ou polygones). (**BlueKenue, 2011**)

Les cartes de friction hydrodynamique sont quant à elles générées facilement par mappage de données sous forme de polygones ou autres grilles.

Le maillage utilise 28308 éléments triangulaires, de taille caractéristique approximative 1 m pour la Mesh.

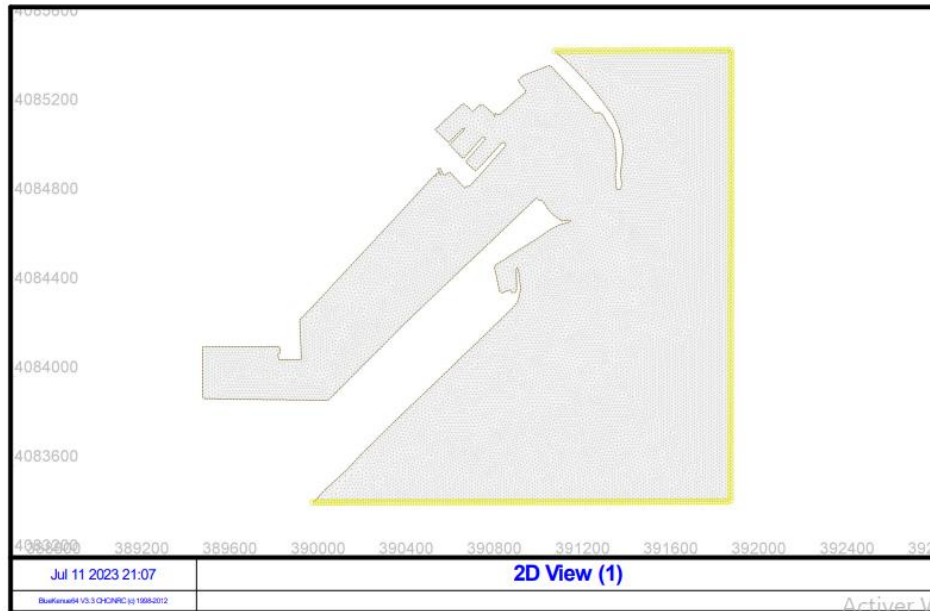


Figure III- 23 Maillage du port (BlueKnue).

III.6.1.2. Formats et types de données

BlueKenue permet d'exploiter une gamme complète de types de données utilisés couramment par les modélisateurs hydrauliques. Les formats originaux de fichiers ASCII et Binaires sont tous deux disponibles pour les données stationnaires ou variables en temps.

Il est possible d'importer et d'exporter les données aux formats SIG courants, y compris :

- ArcINFO/ArcView, MapInfo, GeoTIFF, DTED/CDED, BIL, SRTM, WMO-GRIB et Surfer.
- Séries temporelles (scalaires et vectorielles).
- Données tabulaires, Distributions, Roses de vitesse.
- Ensembles de points à attributs multiples.
- Ensembles de lignes à attributs multiples.
- Réseaux à attributs multiples.
- Données (scalaires et vectorielles) sur grille rectangulaire.
- Données (scalaires et vectorielles) sur grille triangulaire.

Toutes les vues et les données sont entièrement géo-référencées. BlueKenue permet de plus la conversion entre systèmes de coordonnées (projections courantes).

III.6.1.3. Préparation des données du modèle

BlueKenue est un logiciel qui permet de générer facilement des maillages rectangulaires et triangulaires à partir de points, de lignes ou même d'autres maillages réguliers ou triangulaires. Il offre également la possibilité d'inclure des "nœuds durs" ou des "lignes de rupture" lors de la génération d'une grille triangulaire, afin de préserver certains points ou lignes spécifiques. La

densité des nœuds peut être calculée à partir de cartes de densité définies par l'utilisateur, qu'elles soient sous forme de grilles rectangulaires, de maillages triangulaires ou de polygones.

De plus, BlueKenue permet de générer facilement des cartes de friction hydrodynamique en effectuant un mappage des données, qu'elles soient représentées sous forme de polygones ou d'autres grilles.

En résumé, BlueKenue est un outil polyvalent qui facilite la génération de maillages et de cartes pour les applications hydrodynamiques et côtières.

L'utilisateur a la possibilité d'animer un fichier de résultats dans BlueKenue, en le visualisant pas à pas en avançant ou en reculant dans le temps. Il peut également extraire des profils temporels à n'importe quel point du domaine. Une fonction de sonde interactive permet d'interroger les valeurs numériques en temps réel et de créer des lignes de courant pour les données vectorielles. En cliquant simplement avec la souris, l'utilisateur peut obtenir des statistiques sur le modèle telles que la moyenne temporelle, les valeurs minimales et maximales, les fourchettes, l'écart type, les vitesses résiduelles, etc. De plus, un calculateur intégré permet de définir des données complexes sur le maillage à partir des résultats de base du modèle.

En conclusion, BlueKenue offre une gamme d'outils de visualisation et d'analyse interactifs pour explorer et interpréter les résultats du modèle, y compris l'animation, les profils temporels, les statistiques et les calculs avancés sur le maillage.

III.6.2. Le système de modélisation TELEMAC-MASCARET

Le système TELEMAC-MASCARET est un puissant outil de modélisation intégré pour une utilisation dans le domaine des écoulements à surface libre. Ayant été utilisé dans le cadre de très nombreuses études à travers le monde (plusieurs centaines à ce jour), il est devenu l'un des standards majeurs dans son domaine.

Le système a été développé par le Laboratoire National d'Hydraulique, un département de la Direction de la Recherche et du Développement d'Electricité de France. Il est maintenant disponible en open source, et est développé par le Consortium Open Telemac-Mascaret

TELEMAC-MASCARET a de nombreuses applications en hydraulique fluviale et maritime.

III.6.2.1. Structure du système TELEMAC-MASCARET :



Nous nous intéressons sur le domaine d'hydrodynamique qui contient plusieurs modèles

ARTEMIS : Agitation des vagues dans les ports
MASCARET : Écoulements unidimensionnels
TELEMAC-2D : Écoulements bidimensionnels - Équations de +Saint-Venant (incluant le transport d'un traceur dilué)
TELEMAC-3D : Écoulements tridimensionnels - Équations de Navier-Stokes (incluant le transport de traceurs actifs ou passifs)
TOMAWAC : Propagation des vagues en zone côtière

Dans notre cas nous allons travailler avec le modèle ARTEMIS pour l'étude de l'agitation des vagues dans le port d'Annaba.

III.6.2.2. ARTEMIS

III.6.2.2.1. Présentation du modèle

Est un logiciel scientifique dédié à la simulation de la propagation des vagues vers la côte ou dans les ports, sur un domaine géographique d'environ quelques kilomètres carrés. Le domaine peut être plus étendu pour la simulation des ondes longues ou de la résonance. ARTEMIS prend en compte la dépendance en fréquence et la répartition directionnelle de l'énergie des vagues. Le calcul permet de déterminer les principales caractéristiques des vagues sur le domaine de calcul : hauteur significative des vagues, incidence des vagues, vitesses orbitales, taux de rupture, etc.

Le logiciel ARTEMIS est utilisé dans de nombreux domaines d'application. Il permet notamment d'étudier l'agitation dans les ports ou les baies, d'évaluer l'impact de la construction d'ouvrages de protection contre la houle tels que des jetées ou des digues, d'estimer l'agitation derrière une brèche, l'amortissement de la houle et de modéliser les seiches dans un chenal, entre autres.

III.6.2.2.2. Efficacité dans la modélisation des processus pertinents

ARTEMIS résout l'équation de Berkhoff ou l'équation des pentes douces (Mild Slope Equation) grâce à une formulation par éléments finis. L'équation des pentes douces a été étendue pour intégrer les processus de dissipation. Avec un ensemble cohérent de conditions aux limites. En résumé, ARTEMIS est un code de modélisation numérique (Agitation and Refraction with TElemac on a MIld Slope) utilisé pour étudier l'agitation de la houle dans des environnements côtiers ou portuaires, en prenant en compte divers facteurs influençant le comportement de la houle.

ARTEMIS est capable de modéliser les processus suivants :

- Réfraction au fond.
- Diffraction par des obstacles.
- Rupture des vagues due à la profondeur.
- Phénomène de dissipation par déferlement et/ou par Frottement au fond.

- Réflexions complètes ou partielles sur des murs, des brise-lames, des digues, etc.
- Conditions de radiation ou d'écoulement libre.
- Houle monochromatique.

III.6.2.2.3. Principe d'Artemis :

Toutes les structures de données nécessaires au fonctionnement d'ARTEMIS sont regroupées dans des fichiers fortran appelés module, le fichier spécifique à ARTEMIS est appelé <<DECLARATION_ARTEMIS>>. Pour accéder aux données d'ARTEMIS, il suffit d'insérer la commande USE DECLARATION_ARTEMIS au début de sous-programme approprié. Il peut également être nécessaire d'ajouter la commande USE BIFF pour accéder aux structure de la bibliothèque BIFF, utilisée par ARTEMIS.

III.6.2.2.4. Insertion de données :

Lors d'un calcul avec le logiciel ARTEMIS, différents fichiers d'entrée et de sortie sont utilisés. Certains de ces fichiers sont obligatoire, tandis que d'autres sont optionnels en fonction des besoins spécifiques de l'utilisateur, voici une liste générale des fichiers qui peuvent être utilisés :

Les fichiers d'entrées sont :

- Le fichier de géométrie, (*.geo).
- Le fichier des paramètres, (*.cas).
- Le fichier des conditions aux limites, (*.cli).
- Le fichier des fonds, (*.slf).
- Le fichier Fortran, (*. f).
- Les fichiers de données binaires.
- Les fichiers de données formatés.

Les fichiers en sortie sont :

- Le fichier des résultats (*. slf)
- Le listing de sortie,
- Le fichier de résultats formaté.
- Le fichier de résultats binaire.

Voici un schéma ci-dessous qui résume les fichiers d'entrée utilisés par ARTEMIS :

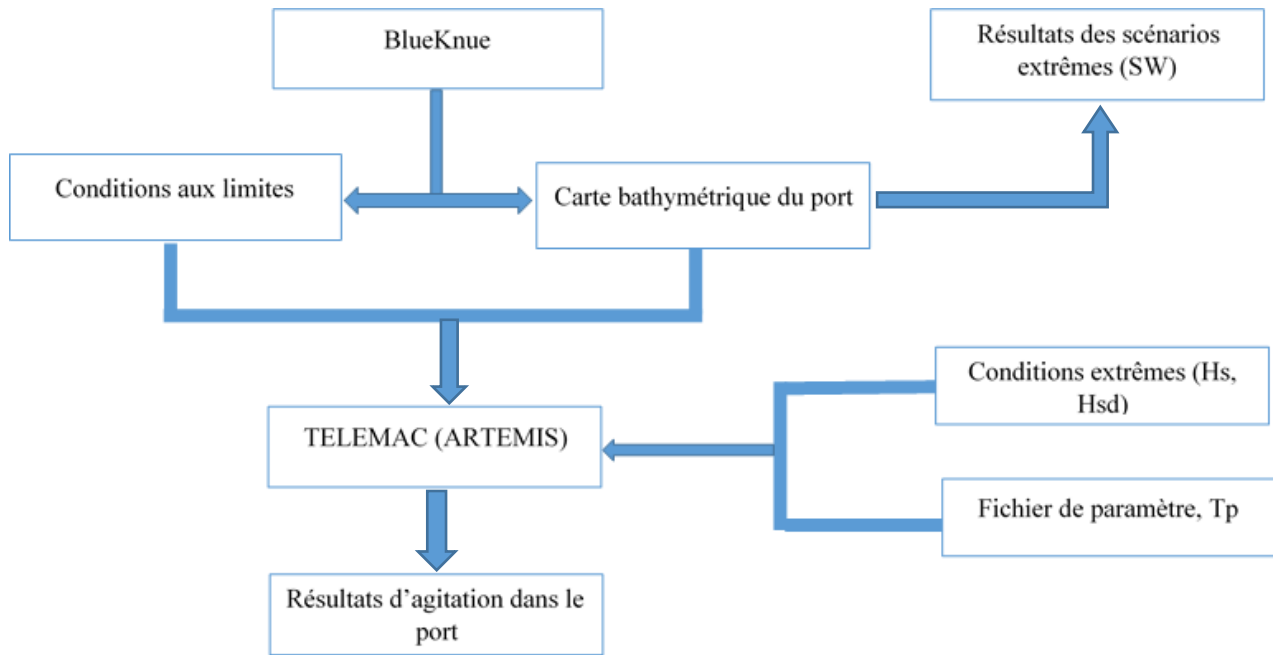


Figure III- 24 les fichiers d’entrée par Artémis.

III.6.2.3. Modèle d’agitation des vagues :

Dans les modèles de prédiction des vagues, l’équation de l’énergie ou la densité d’énergie de la vague $E(\sigma, \theta)$, est généralement utilisée. Cette densité d’énergie dépend de la pulsation ω et de la direction de la vague θ et elle varie lentement dans l’espace (x, y) et dans le temps.

Cependant en présence d’un courant ambiant, il est souvent plus pertinent de simuler la quantité de mouvement tient compte à la fois de l’énergie de la vague et de son mouvement dans le courant.

En utilisant l’équation de la quantité de mouvement de la vague $N(\sigma, \theta)$, il est possible de prendre en compte de manière plus précise les interactions entre les vagues et le courant ambiant. Cela permet d’obtenir des prédictions plus précises sur la propagation et l’évolution des vagues dans des environnements ou un courant présent.

$$N(\omega, \theta, x, y, z, t) = \frac{E(\omega, \theta, x, y, z, t)}{\sigma} \quad \text{Equation III- 22}$$

Lorsque la houle approche des côtes, son comportement peut être modélisé par l’équation de Berkhoff formulée par Berkhoff en 1972. L’équation de Berkhoff permet de décrire la propagation de la houle près des côtes en prenant compte des variations du fond marin. Elle considère les effets de réfraction, diffraction et d’interaction de la houle avec le fond.

$$\nabla \cdot (cc_g \nabla_{\theta}) + \frac{c}{c_g} \omega^2 \phi = 0 \quad \text{Equation III- 23}$$

Avec :

$$\omega^2 = gkth (kd) \quad \text{Equation III- 24}$$

L'équation peut être résolue directement, par la méthode des éléments finis (MARCERS et al. 1994). Ce type de modèle est utilisé pour étudier les problèmes d'agitation portuaire, en particulier lorsque les effets de la diffraction et de la réflexion des vagues sont important.

III.6.2.4. Présentation et interprétation des simulations d'agitation par le logiciel ARTEMIS :

La modélisation du calage du modèle nous a constaté que le port est y'a quasiment pas d'agitation l'intérieur du port cela revient que le port est bien protégé par sa jetée principale et que les houles provenant du Secteur NNE est la direction pénalisante. Cette houle à une incidence frontale par rapport la passe d'entrée du port. La houle modélisé doit représenter des conditions exceptionnelles, telle que la houle décennale, trentennale, cinquantennale, afin d'évaluer l'exploitabilité du port.

- Pour la période de retour de 10ans ($H_s=4.74$, $T_p=13.62s$) (Figure III-24), l'agitation varie entre (0.4-1.6m/s) dans l'avant-port. En revanche dans le chenal d'accès l'agitation est de (1.6-2.8m/s).
- Pour la période de retour de 30ans ($H_s=5.64$, $T_p=14.29s$) (Figure III-25 et Figure III-26), 50ans ($H_s=6.09$, $T_p=14.55s$) l'agitation est plus importante dans l'avant-port varie de (0.5-2m/s) et dans le chenal d'accès et de (2-4m/s) la jetée principale est courte ce qu'elle favorise la propagation de la houle aux niveaux de ces zones contrairement à l'intérieur du port (la grande darse et la petite darse ne subissent pas d'agitation).

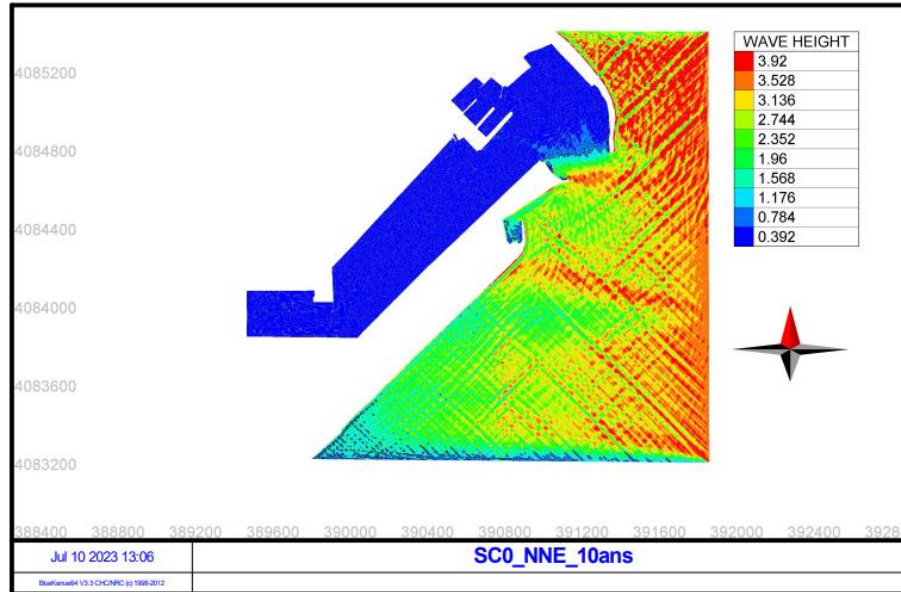


Figure III-24 : Résultat de l'agitation pour la période de retour 10 ans -Scénario initial-Nord-Nord-Est.

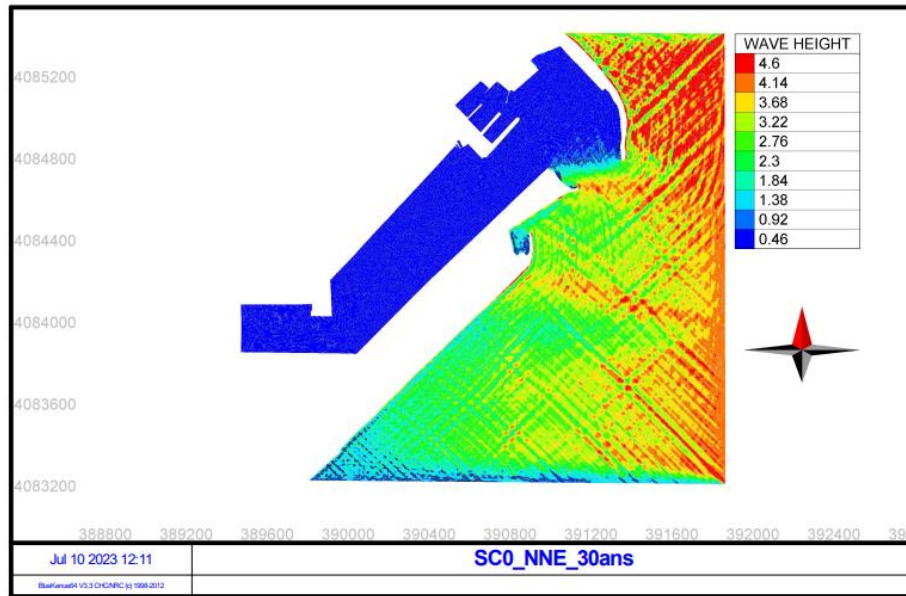


Figure III- 25 : Résultat de l'agitation pour la période de retour 30 ans -Scénario initial-Nord-Nord-Est.

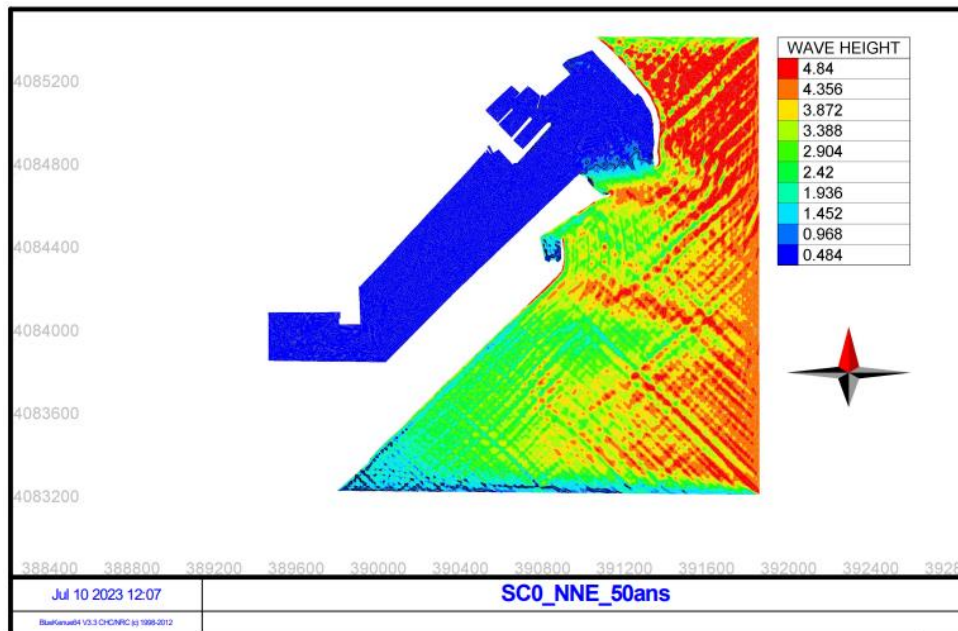


Figure III- 26 Résultat de l'agitation pour la période de retour 50 ans -Scénario initial-Nord-Nord-Est.

III.7. Conclusion

La modélisation numérique avec le logiciel Mike 21, nous a permis de définir :

- La vitesse du courant d'après le modèle hydrodynamique (HD) dans le golfe d'Annaba et auprès du port.
- La propagation des houles dans le golf d'Annaba et auprès du port avec le modèle SW spectral waves.
- Les directions pénalisantes des houles qui sont le Nord et le Nord-Nord-Est.

L'étude de l'agitation portuaire avec le modèle Telemac dans le port d'Annaba nous a permis de constater que :

- Les directions NNE et N sont les plus pénalisantes sur le port.
- Une forte agitation en dehors du port et au chenal d'accès.

CHAPITRE IV

Solutions d'adaptation

CHAPITRE IV : Solutions d'adaptation

IV.1. Introduction

La majorité des sites portuaires se situant dans des zones abritées ou à l'embouchure des estuaires où l'importance des phénomènes sédimentaires liés aux conditions hydrodynamiques tels que la marée, les courants, la houle et le vent provoquent des situations d'envasement ou d'ensablement par décantation et piégeage de sédiments (**Migniot, 1982**).

Cette sédimentation des matières en suspension d'origine continentale ou marine constitue une entrave pour l'accès des navires aux infrastructures portuaires. Pour maintenir ou améliorer les capacités d'accueil des sites portuaires, des travaux de dragage sont nécessaires ; ils consistent à excaver les matériaux sous l'eau, à l'aide d'engins flottants au moyen de procédés mécaniques ou hydrauliques, et à les mettre en dépôt généralement par rejet en mer (immersion) ou refoulement à terre (stockage, traitement, valorisation). (Pascal et al. 2004)

L'activité portuaire joue un rôle stratégique pour l'économie nationale ou internationale et de nombreux ports réalisent des travaux de dragage conduisant à l'évacuation de volumes importants de sédiments pour garantir l'accès des chenaux, des Avant-ports et des bassins à la navigation commerciale. (Ouattara, 2020)

Dans ce chapitre, nous allons proposer des variantes de solution afin de minimiser le problème d'agitation au niveau de la passe d'entrée et le chenal d'accès au port. Cette solution est le dragage de l'avant-port et le chenal d'accès du port d'Annaba.

IV.2. Définition de dragage

Le dragage est une opération d'excavation qui se déroule généralement en partie sous l'eau, dans des mers peu profondes ou des zones d'eau douce. Son objectif principal est de collecter les sédiments du fond et de les déplacer vers un autre endroit. Cette technique est fréquemment utilisée pour maintenir la navigabilité des voies d'eau en éliminant une couche de la couche de fond de la rivière, selon Aquaportail (2020).

Ces opérations de dragage constituent une activité vitale pour l'exploitation des ports et le fonctionnement de l'économie portuaire. Elles offrent des bénéfices sociaux et économiques positifs dans le monde entier. (**Pascal et al. 2004**)

IV.3. Techniques de dragage

Les techniques de dragage consiste à utiliser des engins spécialisés appelés drague, pour enlever les sédiments des pots, canaux et autres voies navigables. Les dragues sont installés sur des engins flottants et existent généralement en trois types : le dragage mécanique, le dragage hydraulique et le dragage pneumatique. Ces techniques permettent de curer et de nettoyer les voies navigables, afin d'assurer leur profondeur et leur accessibilité aux navires.

IV.3.1. dragage mécanique

Le dragage mécanique est réalisé à l'aide d'une drague spécifique qui utilise soit un godet, soit une benne pour récupérer les matériaux et les déverser dans un puits, une barge ou sur la terre ferme. Cette technique est généralement utilisée pour l'extraction de sédiments graveleux. Cependant, elle présente l'inconvénient de provoquer une importante remise en suspension des sédiments dans l'eau pendant l'opération de dragage, ce qui entraîne une perte de matériaux. Par conséquent, le dragage mécanique est plus recommandé dans les endroits difficiles d'accès.

Il existe de différents types de dragage mécanique, on distingue :

- **La drague à godets** : qui agit comme un élévateur en utilisant des godets pour collecter les matériaux.
- **La drague à pelles ou à cuillers** : qui est essentiellement une pelle mécanique montée sur un ponton et utilisée pour l'excavation.

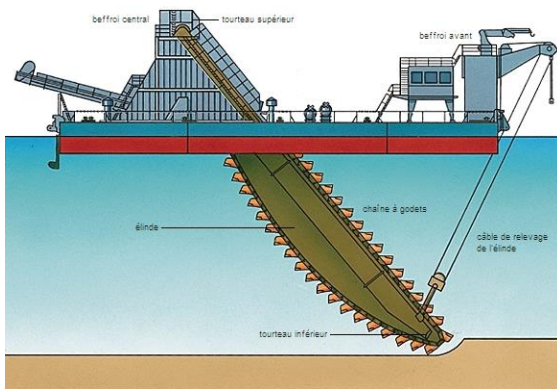


Figure IV- 1 Drague à godets

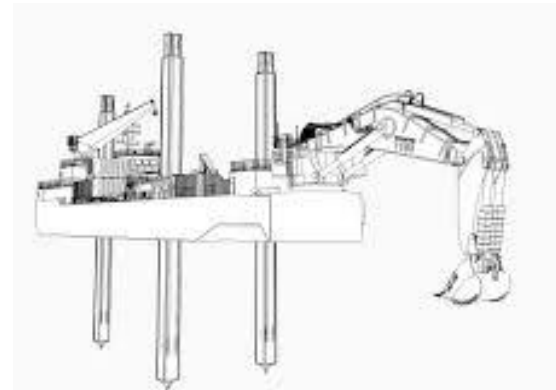


Figure IV- 2 Drague à pelle

- **La drague à benne preneuse** : qui utilise des câbles pour descendre, fermer et remonter une benne ou un godet unique afin de collecter les matériaux du fond.



Figure IV- 3 drague à benne

IV.3.2. le dragage hydraulique :

Les dragues hydrauliques sont conçues pour aspirer et/ou refouler les matériaux à l'aide de Pompes centrifuges ; le mélange extrait comporte environ 20 % de matières solides pour 80% d'eau. Parmi les types de dragage hydraulique qui existe :

- **Les dragues aspiratrices stationnaires** : sont stationnaires sur le fond marin et déchargent les sédiments dragués dans des zones aménagées ou sur des digues.



Figure IV- 4 drague aspiratrice stationnaire

Les sédiments dragués sont déversés par canalisation sur la terre ferme dans des zones aménagées ou sur des digues.

- **La drague aspiratrice en marche**: est largement utilisée dans le monde entier pour des opérations de dragage d'entretien, notamment pour les entrées et les chenaux d'accès portuaires. Elle est spécialement conçue pour aspirer les sédiments du fond des voies navigables tout en étant en déplacement, permettant ainsi de maintenir la profondeur et l'accessibilité des ports et des canaux.

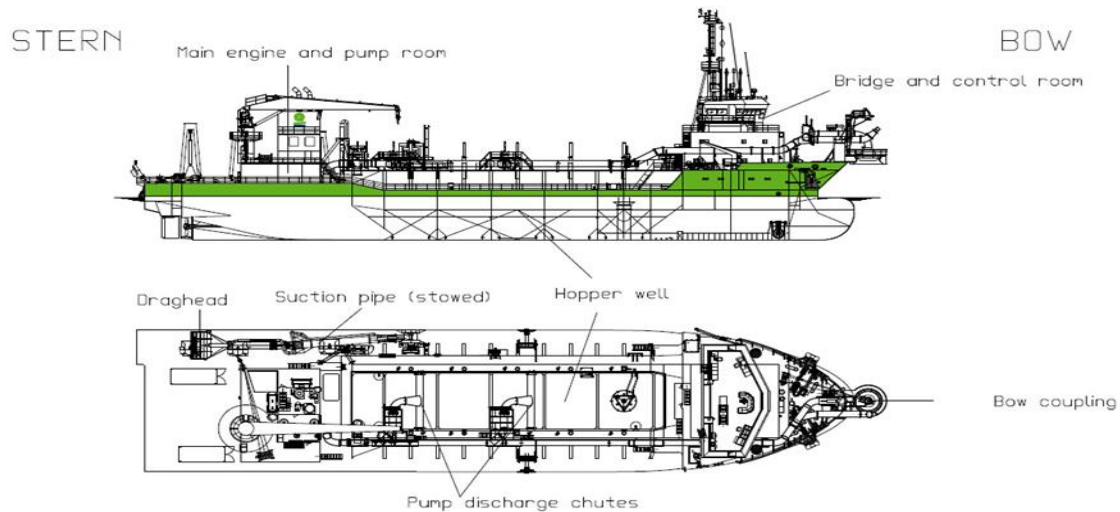


Figure IV- 5 drague aspiratrice en marche

- **La drague aspiratrice à désagrégateur** : est équipée d'un dispositif rotatif situé à l'extrémité de son élinde. Ce dispositif a pour fonction de broyer les matériaux présents sur le fond, facilitant ainsi leur aspiration. Cette caractéristique permet à la drague de traiter des matériaux plus durs ou compactés, améliorant ainsi son efficacité dans les opérations de dragage.



Figure IV- 6 drague aspiratrice à dés agrégateur

IV.3.3. Le dragage pneumatique

Est l'une des techniques de dragage utilisées. Elle implique l'utilisation de l'air comprimé ou d'autres gaz pour remuer les sédiments du fond et les transporter vers un autre endroit. Dans cette méthode, une conduite d'aspiration est utilisée pour créer un flux d'air ou de gaz qui agite les matériaux du fond et les transporte jusqu'à une trémie ou un navire de dragage. Le dragage pneumatique est souvent utilisé dans des conditions où le dragage mécanique ou hydraulique

n'est pas faisable ou efficace, comme pour des matériaux très meubles ou lorsque la présence de roches empêche l'utilisation d'autres techniques.

IV.4. les modalités du dragage

- **Le dragage d'entretien** est une opération régulière visant à éliminer les sédiments qui entravent la navigation. Il est généralement effectué de manière quasi permanente dans les ports d'estuaires en raison de leur faible profondeur, et de manière saisonnière dans les ports ouverts sur la mer.
- **Le dragage d'approfondissement** est entrepris lorsque la profondeur des voies navigables doit être adaptée à la taille des navires. Il nécessite le déplacement de volumes importants de sédiments et l'utilisation de moyens de dragage conséquents.
- **Le dragage en vue de l'aménagement de nouvelles zones portuaires** est réalisé dans le but d'agrandir les zones portuaires existantes afin d'améliorer leurs performances opérationnelles.

Ces différents types de dragage sont effectués en fonction des besoins spécifiques liés à la navigabilité, à l'approfondissement des voies navigables ou à l'expansion des installations portuaires, et ils peuvent nécessiter des moyens de dragage importants.

IV.5. gestion de sédiments dragués

La gestion des sédiments dragués est une étape essentielle dans les opérations de dragage, elle est divisée en 2 catégories principales :

IV.5.1. gestion par immersion ou en mer :

Le rejet par émissaire en mer se fait généralement à la suite d'un dragage par aspiration. Les sédiments sont alors refoulés soit en surface, soit au fond. Les caractéristiques hydrodynamiques du site de rejet conditionneront la plus ou moins grande dispersion du matériel dragué.

IV.5.2. dépôt à terre

Pour des volumes restreints de sédiments à faible teneur en eau, une option de gestion consiste à les déposer directement à terre à l'aide de bennes. Les sédiments peuvent être placés dans des chambres de dépôt spéciales qui favorisent leur consolidation. Cette méthode est souvent utilisée pour la création de terre-pleins portuaires, comme indiqué dans l'article d'Alzieu (1999).

Pour chaque cycle de dragage, les informations suivantes sont notées dans une feuille de chargement avant dragage :

- Les tirants d'eau du navire Avant/Milieu/Arrière (en m).
- Le déplacement de début du navire (en tonnes).
- La charge du navire avant dragage (en tonnes) et après dragage(en tonnes).

- Les tirants d'eau du navire Avant/Milieu/Arrière (en m).
- Le déplacement de fin du navire (en tonnes).
- La charge du navire après dragage (en tonnes).
- Le volume des matériaux dragués (en m³).
- Les tirants d'air Avant et Arrière du puits de stockage (en m).

IV.6. dragage du port d'Annaba :

D'après les résultats de l'agitation du port d'Annaba dans le chapitre précédent, on a constaté que le port ne subit pas une forte agitation à l'intérieur et plus précisément au niveau de la grande darse et petit darse, par contre une agitation modérée a été enregistrée au niveau de l'avant-port et le chenal d'accès. c'est pour cela nous avons proposé une solution de dragage des deux parties affectées par l'ensablement a fin d'augmenter le tirant d'eau à 12m spécifiquement pour le chenal d'accès et l'avant-port qui subit une forte agitation.



Figure IV- 7 image satellitaire du port d'Annaba

Pour appliquer cette solution de dragage, nous avons utilisé le logiciel arc gis 10.8 pour calculer le volume de sable à draguer en superposant les deux bathymétries (avant et après dragage). Après cette étape, on a utilisé la nouvelle bathymétrie obtenue pour faire es simulations sur le logiciel Telemac.

Enfin, la simulation nous a donnée des cartes montrant l'agitation après le dragage (voir figures IV-8 et IV-9).

IV.6.1. Interprétation des résultats de simulation après le dragage :

- D'après l'analyse de **figure IV-8**, on constate que les zones les plus agitées sont les zones situées à l'extérieur du port. L'avant-port est ensuite le plus touché, puisque il est proche du chenal d'accès. Les hauteurs des houles dans l'avant-port varient entre **0,4 m** et **1m** et au niveau chenal d'accès la hauteur moyenne est de **1m** (forte agitation) pour la direction Nord-Nord-Est d'occurrence 50 ans.
- La **figure IV-9** montre les houles prévenantes de secteur Nord caractérisées par les paramètres suivants $H_s=7.11m$, $T_p=5.95s$ et un vent de $U_{10}= 16,61m/s$, arrivent au niveau du port et provoque une faible agitation à l'intérieur du port, et au niveau de

l'avant-port et le chenal d'accès y a une agitation moins importante à celle avant le dragage.

Scénario aménagé NNE 50 ans :

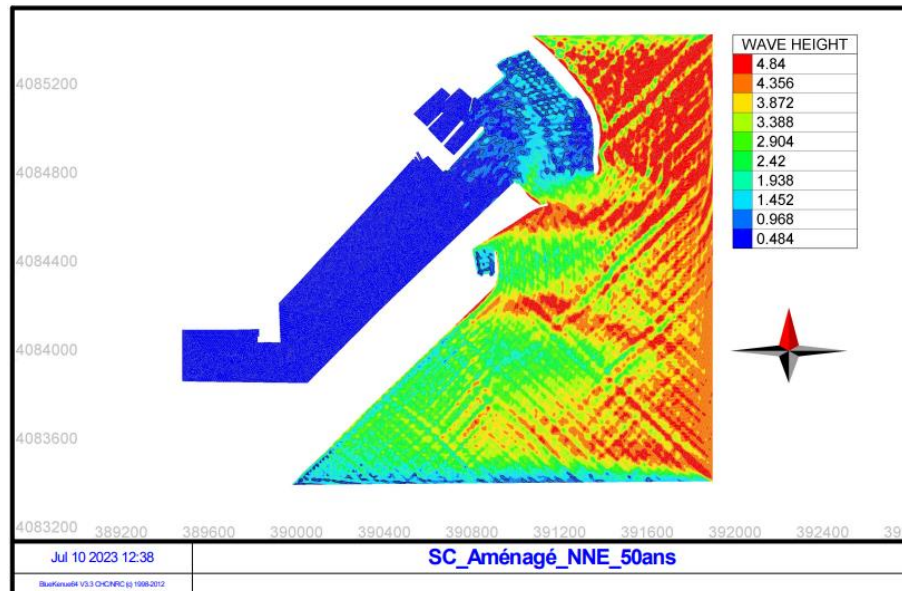


Figure IV- 8 Résultat de l'agitation pour la période de retour 50ans- scenario aménagé-NNE.

Scénario aménagé N 50 ans :

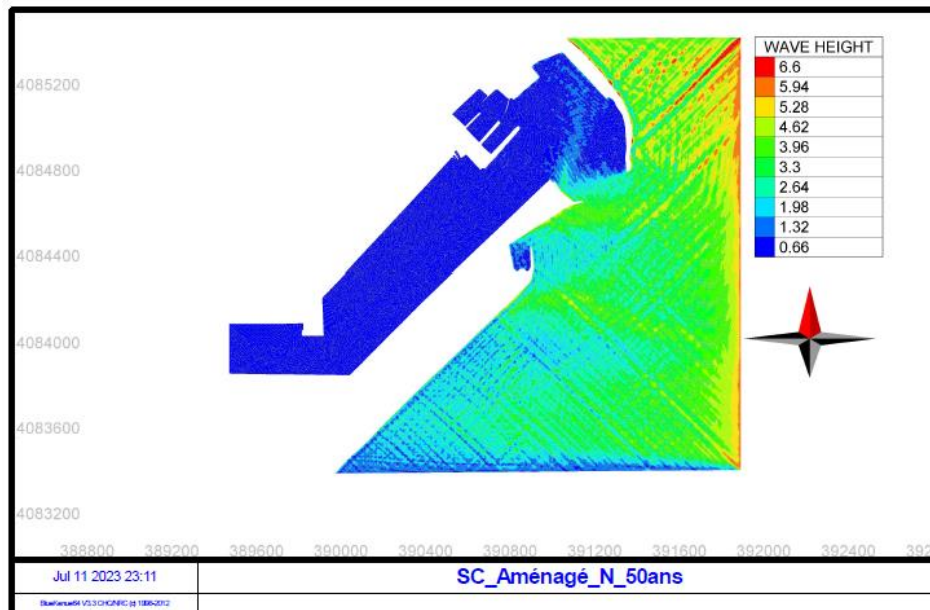


Figure IV- 9 Résultat de l'agitation pour la période de retour 50ans- scenario aménagé-N.

IV.7. Conclusion

Ce chapitre présente l'opération du dragage dans le port d'Annaba, spécifiquement dans le chenal d'accès et l'avant-port (dragage d'entretien), cela améliore le rendement du port, mais le dragage n'est qu'une solution temporaire à long terme. Pour une solution plus durable, des travaux d'extension de la jetée au niveau du chenal d'accès peuvent être entrepris, ainsi que sa réorientation afin de mieux faire face aux houles provenant du Nord-Nord-Est et du Nord-Est.

Conclusion Générale

Afin d'assurer le bon fonctionnement des infrastructures portuaires et la navigation à l'intérieur du bassin, il est essentiel d'avoir une stabilité au sein des bassins portuaires. C'est pourquoi il est nécessaire de mener une étude sur l'agitation et de garantir la meilleure qualité de l'eau à l'intérieur de ces infrastructures.

Dans un premier temps, nous avons réalisé une synthèse de la zone d'étude, pour mieux comprendre l'hydrodynamisme dans notre zone d'étude suivi d'une modélisation des différents phénomènes climatologiques et océanographiques à l'aide du logiciel Mike21 (Module SW, HD). Ce dernier nous a permis de définir les conditions hydrodynamiques à l'extérieur du port d'Annaba. Les houles les plus pénalisantes pour le port d'Annaba ont des directions Nord, le Nord-Nord-Est et le Nord-Est.

Ensuite, un traitement des valeurs extrêmes des paramètres (Hs, Tp, U10) ont été modélisées à partir de la théorie des valeurs à l'aide des deux méthodes GEV et POT utilisant le langage de programmation Python. Le Golfe d'Annaba, subit des vents de prédominance de directions Nord-Nord-Ouest, Nord-Ouest, Nord-Nord-Est, Nord avec des vitesses qui varient de 17.55m/s à 26.83m/s qui engendrent des houles avec hauteurs significatives de 6.64m à 11.29m pour une période de retour 100ans. Une étude comparative des deux méthodes nous a permis de constater que la méthode POT prend plus de points par rapport à celle de GEV qui donne des résultats supérieurs à une dizaine de centimètre.

Après l'analyse des événements extrêmes on a défini les conditions extrêmes de projet et ceux qui affectent le plus notre zone d'étude. En étudiant les houles extrêmes et les périodes de retour, ainsi qu'en prenant en compte tous les types de forçages liés à la configuration et à l'orientation du port, nous avons obtenu des résultats qui indiquent que la zone d'étude est impactée par des houles extrêmes proviennent de Nord-Nord-Est, Nord, Nord-Est, et Nord-ouest, Nord-Nord-Ouest.

Une modélisation de propagation de la houle avec les deux modules du modèle Mike-21 (SW et HD) nous a permis de modéliser les phénomènes hydrodynamiques et définir les conditions à l'intérieur du port. Dans cette étude nous avons identifié les directions les plus pénalisantes qui sont le Nord et le Nord-Nord-Est avec des hauteurs de houle qui varient de 6.07m à 7.11m au large pour une période de retour de 50ans et au pied de l'ouvrage la hauteur de la houle varie de 4.4m à 5.6m. Cela revient à la morpho-bathymétrie du golf d'Annaba.

Les houles venant du large engendrent des courants longitudinaux et transversaux selon leurs directions d'incidence qui donne un schéma de circulation spécifique à chaque direction incidente, la vitesse de ces derniers varie entre 1.04m/s à 2.8m/s.

Une modélisation d'agitation portuaire par le modèle numérique Artemis (Telemac) va enchaîner la première modélisation. Cette modélisation a pour objectif de calculer l'agitation résiduelle dans le port en prenant en compte la direction la plus pénalisante.

Afin de minimiser l'impact des agitations à l'intérieur du bassin du port d'Annaba, nous avons proposé la variante de dragage de l'avant-port et le chenal d'accès comme une solution et

de réduire l'impact du problème d'ensablement qui était provoqué par les courants côtier et le transport sédimentaire.

Références bibliographiques

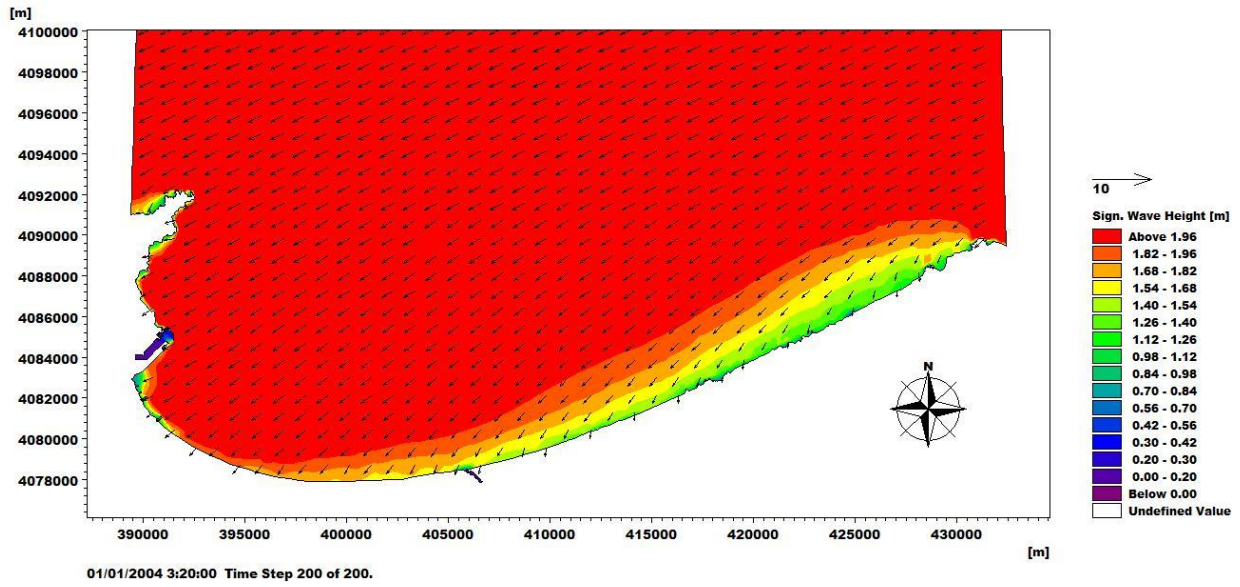
Références bibliographiques

- **Amarouche, K. (2015)**. Contribution à la recherche des zones à fort potentiel d'énergie houlomotrice à base d'un modèle hydrodynamique. Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL,
- **BCOEM France (2010)**. Extension du port de Saint-Leu – Etude d'agitation,
- **BCOEM France. (2005)**. Etude d'aménagement sur modèle numérique.
- **Becker, J., van Eekelen, E., van Wiechen, J., de Lange, W., Damsma, T., Smolders, T., & van Koningsveld, M. (2015)**. Estimating source terms for far field dredge plume modelling. Journal of Environmental Management,
- **BlueKenue References manual, (2011)**,
- **BMT ARGOSS, (2017)**. Waveclimate.com: the on-line offshore climate assessment system,
- **Bougis, Jean. (2003)**. Les Etats de Mer Naturels'. Institut des Sciences de l'Ingénieur de Toulon et du Var,
- **Briere, C. (2005)**. Etude de l'hydrodynamique d'une zone côtière anthropisée ; l'embouchure de l'Adour et les plages adjacentes d'Anglet. Pau,
- **BENNACER, BOUCHALMA. (2020)**. Etude en modèle réduit physique en bassin à houle de l'agitation et la stabilité du port de Cap Falcon d'Oran. Mémoire d'ingénieur Hydraulique. Alger. : Ecole Nationale Polytechnique. P.P.22-23.
- **BONNEFILLE, René, (1980)**. Cours d'hydraulique maritime. Paris : Masson : 1980, 180 p.
- **BONNEFILLE, René, (1980)**. Cours d'hydraulique maritime. Paris : Masson : 1992, 180 p.
- **CHAPON, Jean. 1971**, Travaux maritime Tome 1. Paris : Edition Eyrolles, 285 p.
- **Cearreta, A., Irabien, M. J., & Pascual, A. (2004)**. Human activities along the Basque coast during the last two centuries: geological perspective of recent anthropogenic impact on the coast and its environmental consequences. Oceanography and marine environment of the Basque Country. Elsevier oceanography series,
- **Chapon, J (1971)**. « Travaux maritime Tome 1 ». Edition eyrolles, 2ème Edition mise à jour / paris Ve,
- **DHI (2014)**. MIKE ZERO: Creating 2D Bathymetries. Bathymetry Editor & Mesh Generator,
- **DHI (2014)**. MIKE 21 Spectral Wave Module,
- **DHI (2014)**. MIKE 21/3 Couple Model FM,
- **Dreal, L. (2013)**. Concepts, cadres et méthodologies pour évaluer la vulnérabilité elles stratégies d'adaptation. Manuel Winograd.Vol.7, n°5,
- **El Fadili, M., & Messenger, M. (2015)**. Enquête dragage 2011. Synthèse des données. Cerema-CETMEF,
- **Foucher, Jérôme. (2005)**. « Valorisation des déblais sableux de dragage portuaire en France métropolitaine ». Maîtres de TFE. Centre d'études techniques maritimes et fluviales,

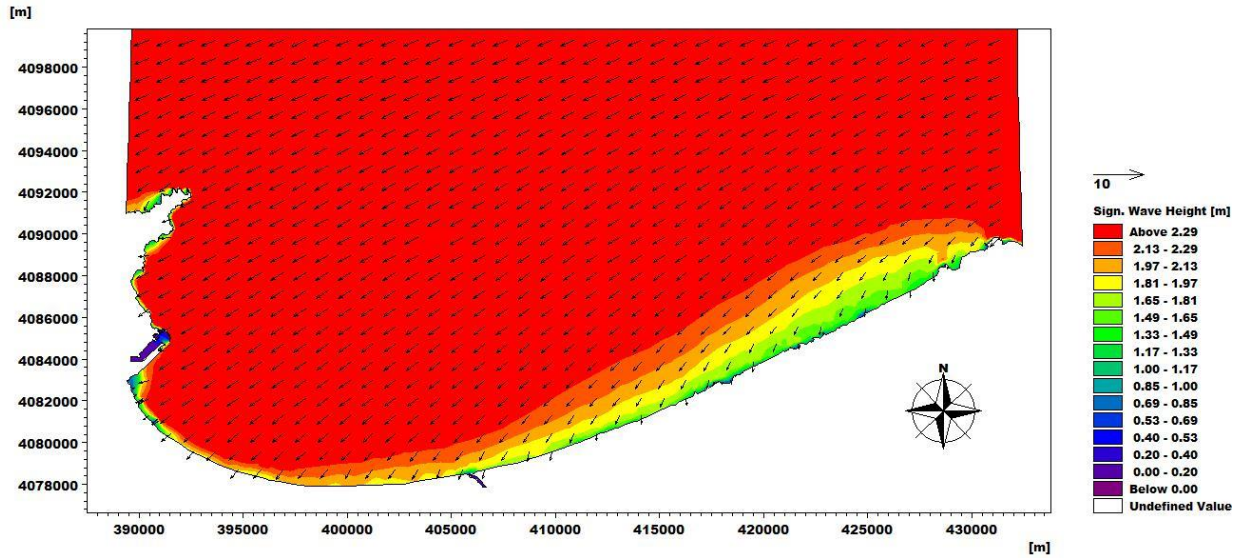
Références bibliographiques

- **Hoozmans, F. M. J., et al. (1993).** Sea level rise: A global vulnerability assessment vulnerability assessments for population, coastal wetlands and rice production on a global scale. H1588, Deltares (WL),
- **Ifremer, (2013).** Contribution de la méthodologie et de la technologie géodécisionnelle pour l'aide à l'évaluation des risques naturels dans le secteur de l'assurance en France. Journal de l'Ifremer. Vol.10, n°5,
- **Jarry, Nicolas (2009).** « Etudes expérimentales et numériques de la propagation des vagues au-dessus de bathymétries complexes en milieu côtier »,
- **Laaribi, Narimene. (2017).** « Etude de protection et d'aménagement de la zone de Verte Rive-Bordj EL Kiffan, Recours à la modélisation physique et numérique (MIKE21, LITPACK) »,
- **Logiciel Artemis (2009)** - Agitation d'un plan d'eau par la houle,
- Lzieu C. Dragages et environnement marin (1999), état de connaissances. Edition Ifremer,
- **ROCK Manual, (2009).** Guide Enrochement-L' utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques. page 333
- **ROCK Manual, (2009).** Guide Enrochement-L' utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques. page 339

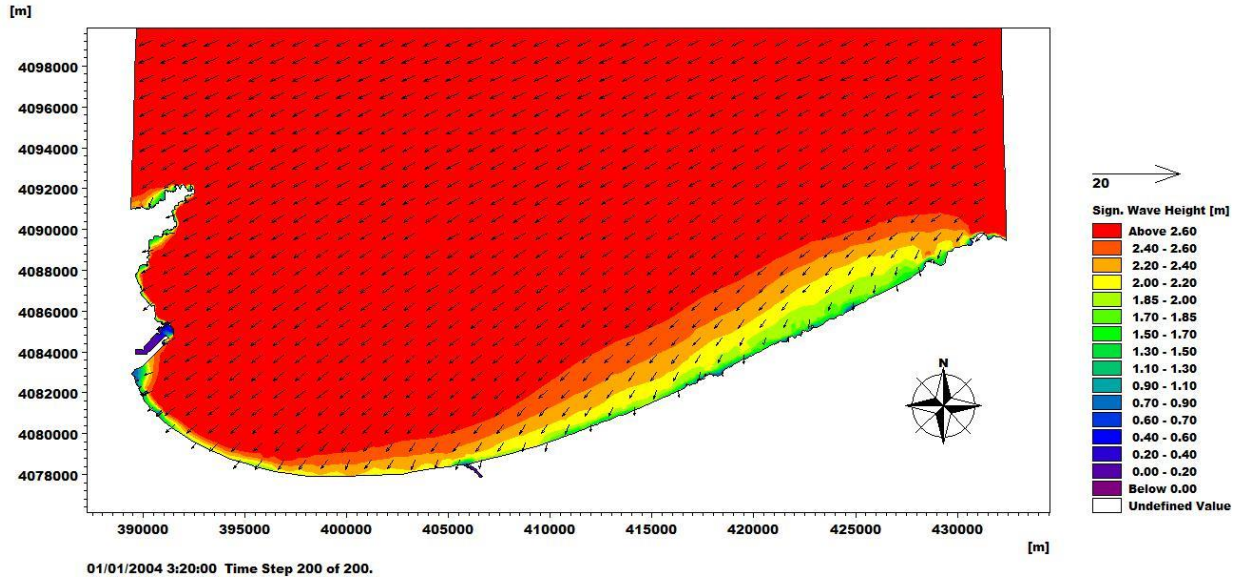
ANNEXES



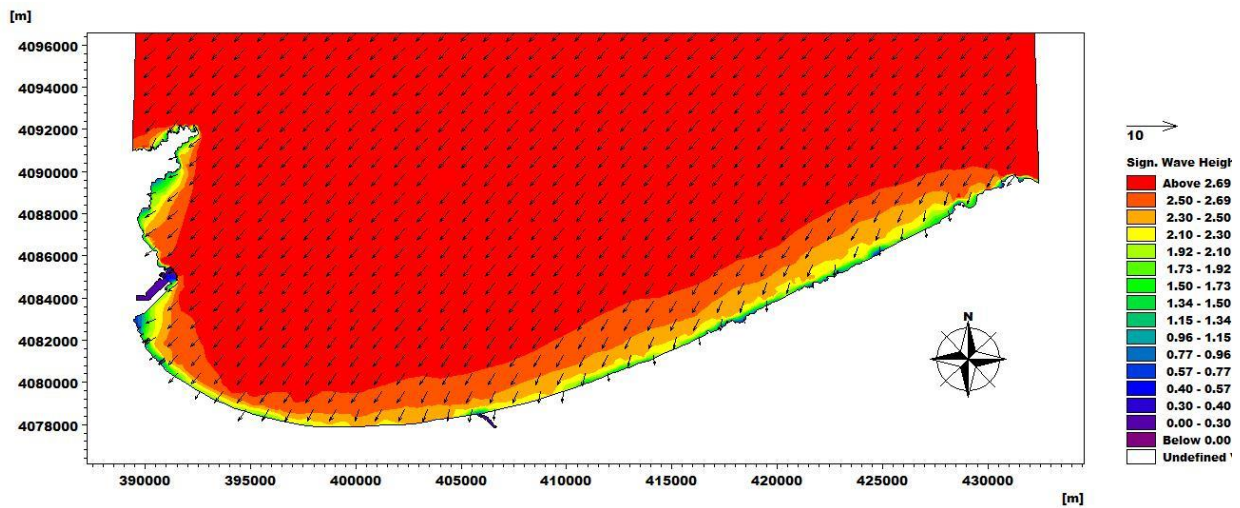
Annexe 1 : Champs de houle dans le golfe d'Annaba pour la direction ENE 2ans



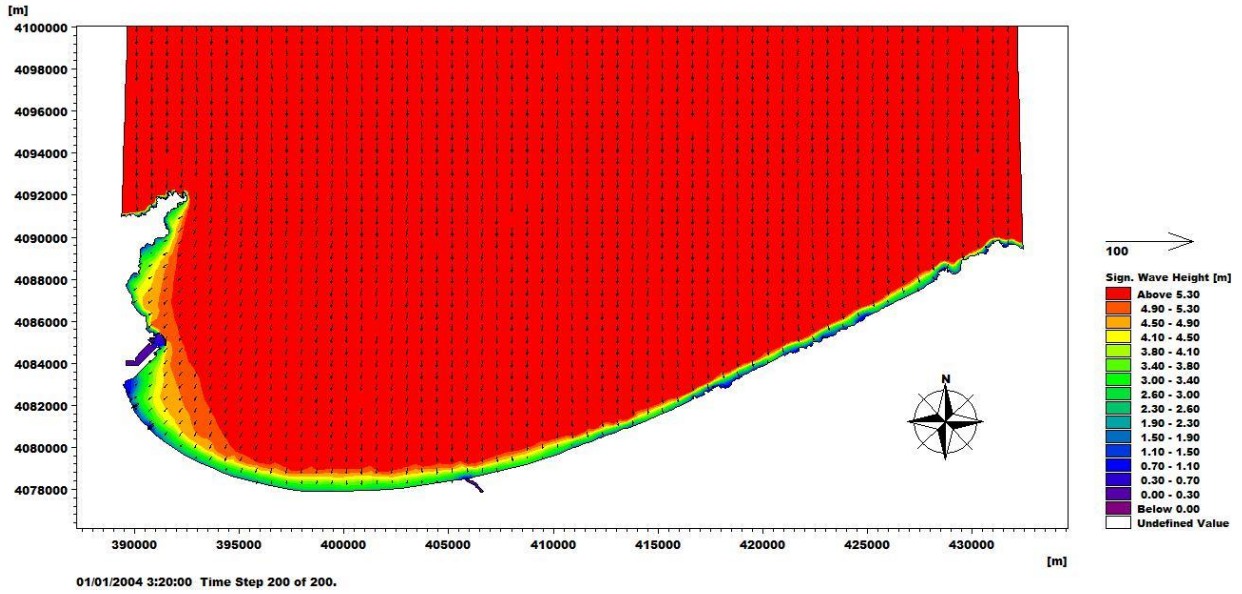
Annexe 2 : Champs de houle dans le golfe d'Annaba pour la direction ENE 5ans



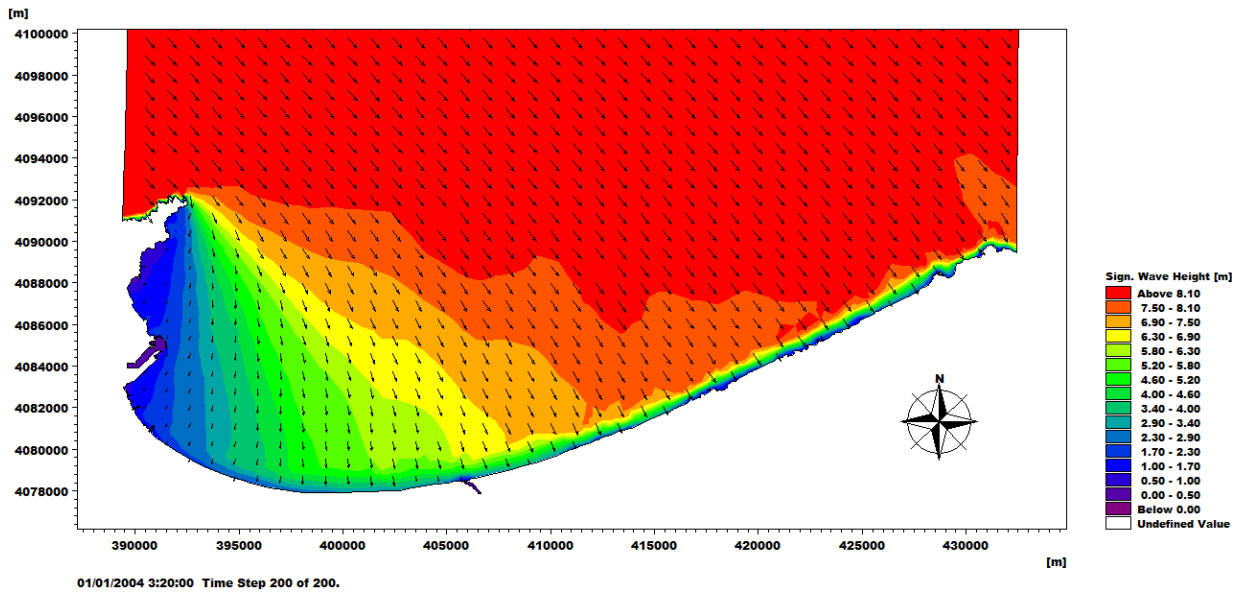
Annexe 3 : Champs de houle dans le golfe d'Annaba pour la direction ENE 10ans



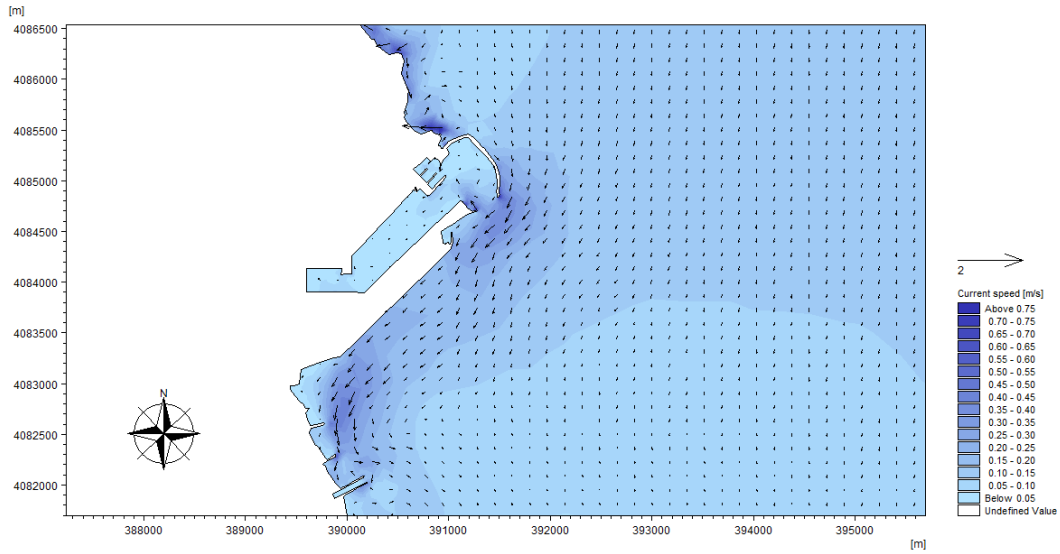
Annexe 4 : Champs de houle dans le golfe d'Annaba pour la direction NE 2ans



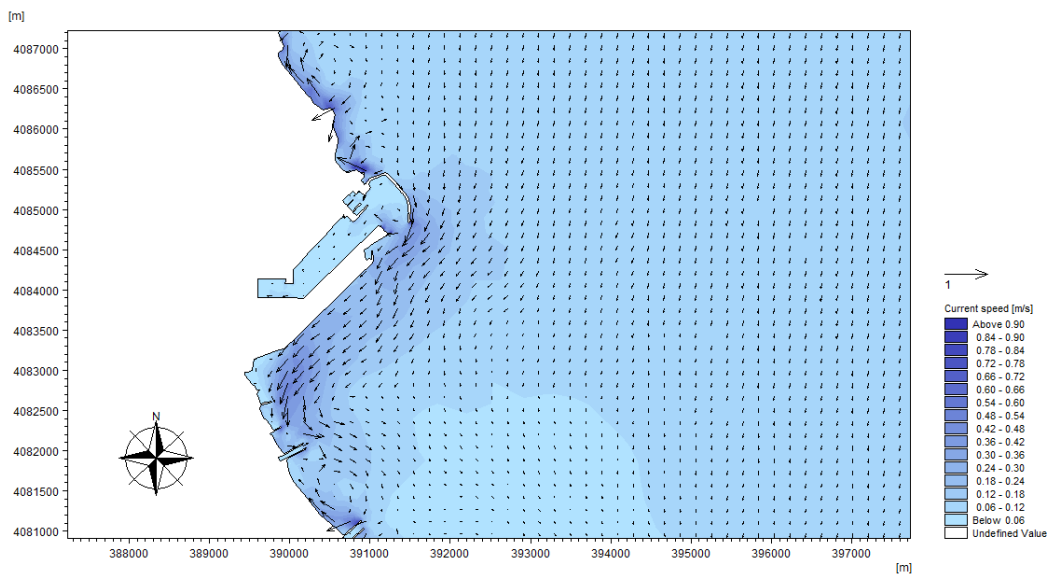
Annexe 5 : Champs de houle dans le golfe d'Annaba pour la direction 10 ans



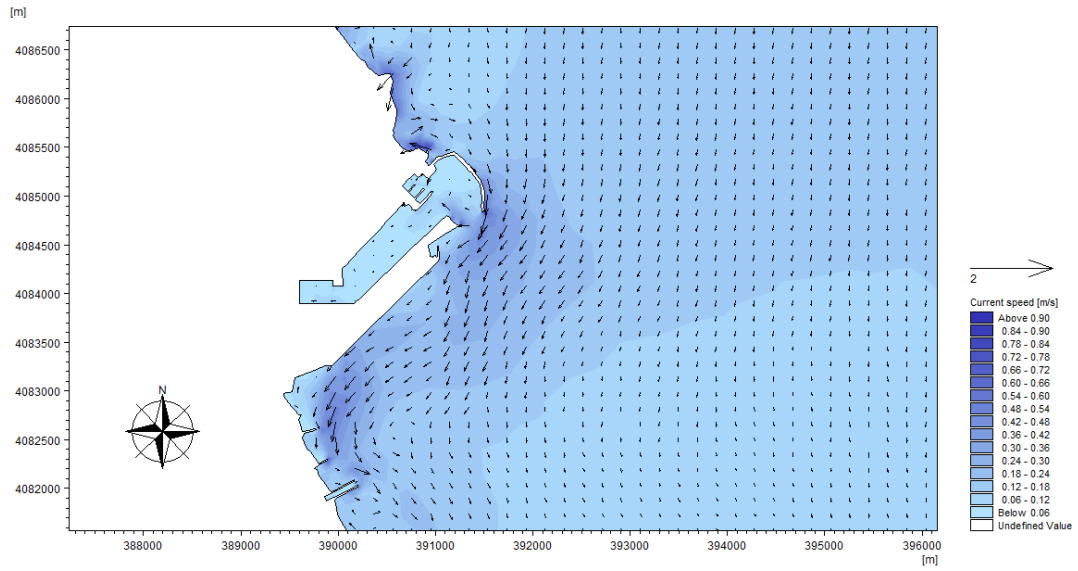
Annexe 6 : Champs de houle dans le golfe d'Annaba pour la direction NNW10 ans



Annexe 7 : Champs du courant au voisinage du port pour la direction ENE 2 ans



Annexe 8 : Champs du courant au voisinage du port pour la direction ENE 5 ans



Annexe 9 : Champs du courant au voisinage du port pour la direction NNE 2 ans

BMC: Creation d'une Start up

Introduction

Les bureaux d'études des travaux maritimes jouent un rôle essentiel dans l'industrie maritime en fournissant une expertise technique et une assistance professionnelle pour la réalisation des projets maritimes. Leur travail contribue à la sécurité et la durabilité et à l'efficacité des structures et infrastructures maritimes.

Un bureau d'étude des travaux maritimes est une entreprise spécialisée dans la fourniture de services d'ingénierie, de consultation et de conception dans le domaine des travaux maritimes. Il offre une expertise technique et une assistance aux projets liés à la construction, à la réparation et à l'entretien des structures maritimes, des ports, des quais, des digues, des canaux, implantation des plateformes offshore et d'autres infrastructures maritimes.

La problématique

La problématique de la caractérisation de l'agitation et de l'ensablement des ports se concentre sur les défis et les problèmes liés à la compréhension et à la gestion de ces phénomènes dans les environnements portuaires.

La résolution de ces problèmes est essentielle pour garantir une caractérisation précise et complète des ports, pour cette résolution il nous faut un bureau d'étude pour gérer ces problèmes.

Cependant, pour une création d'un bureau d'étude ça nécessite un BMC.

Objectif

L'objectif de notre bureau d'étude spécialisé dans les travaux maritimes est servir des services de haute qualité et fiable à nos clients, ces services se consacrent à :

Etudes de faisabilité : évaluer la faisabilité technique, économique et environnementale des projets des travaux maritimes proposés. Cela comprend l'analyse des conditions géotechniques, l'évaluation des risques, la préparation des estimations de cout et l'examen des contraintes règlementaires.

Conception et planification : développer des plans et des conceptions détaillés pour la construction, la réparation ou l'entretien des structures maritimes. Cela implique la sélection des méthodes de construction appropriées, la conception des fondations, des digues, des quais, des canaux, des ponts, des éoliennes en mer, etc.

Modélisation et simulation : utiliser des outils de modélisation et de simulation pour évaluer la performance et la stabilité des structures maritimes, y compris les effets des phénomènes hydrodynamiques et des charges environnementales. Cela aide à optimiser la conception et à anticiper les problèmes potentiels

Evaluation les risques : identifier, évaluer et atténuer les risques associés aux travaux maritimes. Cela peut inclure des études de géotechnique et génie côtier, des évaluations des risques de

submersion, des analyses des risques environnementaux, des évaluations de la sécurité des travailleurs, etc.

Gestion de projet : assister les clients dans la gestion globale des projets des travaux maritimes, en coordonnant les différentes parties prenantes, en établissant des échéanciers, en suivant les budgets et en assurant la conformité aux exigences réglementaires la gestion de projet efficace contribue à la réalisation réussie des travaux maritimes.

Contrôle de qualité : mettre en place des procédures de contrôle de la qualité pour s'assurer que les travaux maritimes sont réalisés conformément aux normes et aux spécifications requises. Cela implique des inspections régulières, des tests de qualité et la documentation appropriée des processus de construction.

La création d'une start-up nécessite un BMC.

Le BMC (Business Model Canvas) est un outil utilisé pour décrire et visualiser le modèle économique d'une entreprise. Pour la réalisation de notre start-up on a créé un BMC pour notre bureau d'étude qui est spécialisé dans les travaux maritimes.

Voici comment un bureau d'étude des travaux maritimes pourrait utiliser le BMC pour décrire son modèle économique :

1. Proposition de valeur : Définir les services clés offerts par le bureau d'étude des travaux maritimes, tels que les études de faisabilité, la conception et la modélisation, les études environnementales, la gestion de projet, etc. Mettre en évidence les avantages concurrentiels et les facteurs différenciateurs de l'entreprise.

- La modélisation numérique et Physique des ouvrages maritimes et portuaires pour vérifier et optimiser le dimensionnement hydraulique et la stabilité des structures exposées à la houle, dans la zone côtière.
- Cartographie (les systèmes d'informations géographique SIG) et télédétection.
- Utilisation de technologies avancées :
Les différents Logiciels « Mike21, TELEMAR, ArcGIS, Swan, Surfer, Seadas, autocad, BlueKnue, Envi, SNAP, OceanData, SWAN.»
Utilisation de l'intelligence artificielle (ex : python pour l'étude des événements extrêmes).
- Evaluation des risques et gestion des problématiques spécifiques.
- Gestion de projet et coordination.
- L'accompagnement des clients tout au long du processus, de la conception à la réalisation des travaux, en apportant des solutions sur mesure et en assurant la qualité et la durabilité ainsi que la fiabilité des projets maritimes.
- Développement de techniques de construction durables.

2. Segment de clientèle : Identifier les différents segments de clients auxquels le bureau d'étude des travaux maritimes s'adresse, tels que :

- **Les autorités portuaires et gestionnaires de terminaux :** les ports et les terminaux maritimes nécessitent souvent des études pour l'optimisation de leurs infrastructures, la planification de l'expansion, l'aménagement du littoral, la gestion des sédiments, etc. ces clients peuvent engager un bureau d'étude pour obtenir des conseils d'experts sur ces aspects.
- **Les entreprises offshore :** les entreprises opérant dans le secteur offshore, telles que celles spécialisées dans l'exploration pétrolière et gazière, l'énergie éolienne offshore.
- **Organismes gouvernementaux et régulateurs maritimes :** les agences gouvernementales responsables de la gestion des ressources maritimes, de la sécurité en mer, de la protection de l'environnement côtier, peuvent faire appel à un bureau d'étude pour obtenir des évaluations, des recommandations et des rapports d'expertise.
- **Entreprises de dragage et de travaux maritimes :** les sociétés spécialisées dans le dragage, la construction de digues, les travaux de génie côtier, etc. peuvent avoir besoin d'une expertise pour la planification et la conception du projet. Un bureau d'étude peut les aider dans ce domaine.
- **Universités et instituts de recherche :** les établissements d'enseignement supérieur et les instituts de recherche peuvent collaborer avec notre bureau d'étude pour mener des études et des projets de recherche dans le domaine des travaux maritimes.

3. Relation clients : la relation client dans un bureau d'études des travaux maritimes est essentielle pour assurer la satisfaction des clients et le succès des projets. Dans notre bureau d'étude on base sur ces aspects qui sont important pour une meilleure relation avec les clients :

- **Compréhension des besoins du client :** il est crucial d'établir une communication claire avec les clients afin de comprendre leurs besoins et leurs objectifs.
- **Conseils et recommandations personnalisé :** sur la base de la compréhension des besoins du client, le bureau d'études peut fournir des conseils et des recommandations personnalisées. Il est important de proposer des solutions adaptées aux objectifs du client, en prenant en compte les aspects techniques, environnementaux, réglementaires et économiques.
- **Transparence et communication régulière :** il est essentiel d'établir une relation de confiance avec le client en adoptant une approche transparente. Cela implique de fournir des informations claires sur le progrès du projet, les étapes clés, les couts associés, les éventuels défis rencontrés, etc.
- **Respect des délais et des budgets :** l'aspect important de la relation client est de respecter les délais et les budgets convenus à notre bureau d'étude assure l'épreuve de

professionnalisme et rigueur dans la gestion du projet afin de livrer les résultats dans les délais impartis et en respectant les ressources allouées.

- **Gestion des attentes** : les travaux maritimes peuvent être complexes et comporter des imprévus. Il est essentiel de gérer les attentes du client en lui fournissant une vision réaliste des défis potentiels et des risques associés.
- **Suivi après la réalisation du projet** : la relation client ne se termine pas une fois le projet achevé. Il est important de maintenir un suivi après la réalisation des travaux pour évaluer la satisfaction du client, recueillir des retours d'expérience et identifier des opportunités d'amélioration. Ce suivi nous permet de renforcer nos relations avec les clients et d'envisager d'éventuels projets futurs.

4. **Canaux de distribution** :

Notre bureau d'étude spécialisé dans les travaux maritimes peut utiliser plusieurs canaux de distribution pour commercialiser ses services, tels que :

- **Site web** : Le bureau disposera d'un site web où il présente ses services, partage des informations sur ses projets et publie les projets réalisés et des ressources pertinentes.
- **Les réseaux sociaux** : notre bureau d'étude peut promouvoir ses services sur les réseaux sociaux, tels que LinkedIn, Twitter, Facebook, YouTube, pour atteindre un public plus large, intéressé par les problématiques liées à l'environnement marin.
- **Les conférences, les évènements et les salons professionnels** : notre bureau d'étude peut participer à des conférences des ateliers et d'autres événements de l'environnement, pour présenter ses travaux et établir des partenariats, des contacts et promouvoir ses services.
- **Les partenariats** : notre bureau d'étude peut établir des partenariats avec des entreprises ou des institutions travaillant dans le domaine de l'environnement pour atteindre de nouveaux clients.
- **Appels d'offres** : Participation à des appels d'offres lancés par des organismes gouvernementaux ou d'autres organisations pour obtenir des projets spécifiques.

5. **Activités clés** : les activités clé de notre bureau d'étude des travaux maritimes comprennent une gamme de tâches et de processus nécessaires pour fournir des services spécialisés dans notre domaine des travaux maritimes. Voici quelques-unes des activités clés que notre bureau d'étude comprend :

- **Analyse des besoins des clients** : cette analyse initiale permet de définir les objectifs du projet et d'orienter les études et les recommandations ultérieures
- **Etudes de faisabilité** : on réalise des études de faisabilité pour évaluer la viabilité technique, économique et environnementale d'un projet. On inclut dans ces études des analyses géotechniques, des évaluations des risques, des études d'impact, des études de site

- **Conception technique** : on développe des solutions techniques pour les travaux maritimes en utilisant des outils tels que la modélisation numérique et physique, les simulations hydrodynamiques, les calculs des ouvrages et de résistance des structures, etc.
- **Evaluations et études spécialisées** : dans notre bureau d'étude on effectue des évaluations spécialisées pour nos clients, telles que l'évaluation de la stabilité des structures, l'analyse des courants marins, l'étude d'érosion côtier, l'analyse des données climatologiques et océanographique. Ces études fournissent des informations précieuses pour la prise de décision et la planification des projets.
- **Gestion de projet** : la gestion de projet efficace est essentielle pour garantir la réussite globale de nos travaux.
- **Support technique** : on fournit un support technique continu tout au long de la réalisation du projet. Ils répondent aux questions techniques, effectuent des vérifications sur site, fournissent des conseils en cours de constructions, participent aux réunions de suivi.
- **Rapport et recommandation** : on produit des rapports détaillés et des recommandations basées sur les études, les analyses et les évaluations réalisées. Ces rapports fournissent les informations essentielles aux clients pour la prise de décision, la communication avec les parties prenantes et la conformité aux réglementations.
- **Suivi et évaluation** : après la réalisation des travaux maritimes, nous effectuons un suivi pour évaluer la performance du projet et s'assurer de la conformité aux spécifications techniques. Des inspections, des tests seront effectués pour vérifier l'intégrité des structures maritimes.

6. Ressources clés : Identifier les ressources clés nécessaires au fonctionnement du bureau d'étude des travaux maritimes, telles que les ingénieurs techniques spécialisés, les infrastructures technique approprié pour mener à bien ses activités (Mike-21, Telemac.) Des logiciels spécialisés de modélisation et de simulation, des équipements de mesure et d'analyse.

Les données et les informations sur les travaux maritimes,
Les partenariats avec des laboratoires ou des universités, etc.

7. Partenaires clés : en ce qui concerne le partenariat Nos partenaires clés sont :

- laboratoire des études maritimes (LEM).
- Les entreprises des travaux et construction maritimes (MEDITRAM).
- Les agences gouvernementales.
- Les autorités portuaires.
- Les universités et les centres de recherche.

8. Ressources de revenus : notre bureau d'étude génère des revenus grâce à diverses sources qui sont :

- **Le service cartographique :** les tarifs de création des cartes dépendent de la zone et sa superficie aussi sur la complexité et la durée de l'étude. Les tarifs se varient de de 50 000da à plusieurs millions dinar algérien pour la cartographie bathymétrique et hydrographique et le SIG.
- **Modélisation numérique :** les tarifs de modélisation numérique du terrain se varient de 200 000 dinars algériens à 1 000 000 dinars algériens.
- **Levés bathymétrique :** les couts se varient de 500 000 dinars algériens a plusieurs millions dinars algériens.
- **Collecte et analyse des données :** les tarifs d'analyse et collecte des données se dépendent de la zone d'étude se varient de 200 000 dinars algériens a 1 000 000 dinars algériens et même plus.
- **Recherche et développement :** notre bureau d'étude mène des activités de recherche et de développement, et propose des programmes de formations dans le domaine des travaux maritimes. Cela peut inclure des formations sur les normes et les règlementations maritimes, l'utilisation d'outils logiciels spécialisés, etc. les tarifs des formations se varient au type de formation.
- **Les études d'impacts :** concernant les études d'impacts leurs tarifs dépendent du projet ils se varient de 200 000 dinars algériens à 1 000 000 da.
- **Collaboration :** faire une collaboration avec des partenaires industriels, des universités ou des instituts de recherche pour développer de nouvelles technologies, des méthodologies innovantes ou des solutions spécifiques aux problématiques maritimes.

La combinaison spécifique de ses ressources de revenus peut varier en fonction du positionnement, de l'expertise et du marché ciblé par notre bureau d'étude.

9. La structure des couts : en ce qui concerne les couts :

Investissements et financements

- **Projet :** Bureau d'étude spécialisé dans les travaux maritimes
 - **Porteur de projet :**
 - **BOUZID Raja**
 - **BABOUCHE Dounia**

INVESTISSEMENTS	Montant DA hors taxes	
Immobilisations incorporelles		708000
Frais d'établissement		700000
Frais d'ouverture de compteurs		8000
Logiciels, formations		
Dépôt marque, brevet, modèle		
Droits d'entrée		
Achat fond de commerce ou parts		
Droit au bail		
Cautions ou dépôt de garantie		
Frais de dossier		
Frais de notaire ou d'avocat		
Immobilisations corporelles		7180000
Enseigne et éléments de communication		100000
Achat immobilier		
Matériel		4840000
Matériel de bureau		2240000
Stock de matières et produits		
Trésorerie de départ		
	TOTAL BESOINS	7888000

FINANCEMENT DES INVESTISSEMENTS	Montant DA hors taxes	
Apport personnel		7888000
Apport personnel ou familial		897000
Apports en nature (en valeur)		6991000
Emprunt		0
Subvention n°1 (libellé)		0
Subvention n°2 (libellé)		0
	TOTAL RESSOURCES	7888000

Salaires et charges sociales

Statut juridique : Start up

Bénéficiaire de l'acre : oui

Statut social du (des) dirigeant (s) : travailleur non salarié

	Année 1	Année 2	Année 3
Rémunération du (des) dirigeants	700000	700000	700000
% augmentation		0	0
Charges sociales du (des) dirigeant(s)	528000	1267200	1520640
Salaires des employés	440000	440000	440000
% augmentation		0	0
Charges sociales employés	316800	316800	316800

Details des amortissements

details des amortissements	Année 1	Année 2	Année 3
Amortissements incorporels	140000	140000	140000
Frais d'établissement	140000	140000	140000
Logiciels, formations	0	0	0
Droits d'entrée	0	0	0
Frais de dossier	0	0	0
Frais de notaire ou d'avocat	0	0	0
Amortissements corporels	1436000	1436000	1436000
Enseigne et éléments de communication	20000	20000	20000
Achat immobilier	0	0	0
Matériel	968000	968000	968000
Matériel de bureau	448000	448000	448000
Total amortissements	1576000	1576000	1576000

Conclusion

Notre bureau d'étude des travaux maritimes joue un rôle essentiel dans la planification, la conception et la gestion de projets liés à l'environnement maritime. Il fournit une expertise technique et des connaissances spécialisées pour aider à résoudre les défis spécifiques rencontrés dans les travaux maritimes.

Grace à l'utilisation d'équipements et de ressources tels que le DGPS, les instruments de mesures, les logiciels ainsi qu'une équipe de professionnels compétents, notre bureau d'étude est en mesure de mener des études approfondies, de recueillir des données précises et de fournir des analyses fiables pour soutenir la prise de décision et l'exécution de projets.

Cependant, il est important de noter que la création et le fonctionnement d'un bureau d'étude des travaux maritimes nécessitent des investissements significatifs, tels que l'acquisition d'équipements, les coûts personnel, les frais de la réglementation, l'assurance et d'autres dépense liées aux activités maritimes. La gestion efficace de ces coûts et la recherche de solutions économiques tout en maintenant la qualité des services sont des éléments clés pour assurer le succès et la rentabilité d'un tel bureau d'étude.

Partenaires clés: <ul style="list-style-type: none"> laboratoire des études maritimes (LEM) Les entreprises des travaux et construction maritimes (MEDITRAM) Les agences gouvernementales Les autorités portuaires 	Activités clés <ul style="list-style-type: none"> La collecte et la réalisation des données sur le terrain. La réalisation des cartes La réalisation d'études techniques L'analyse des résultats. La coordination des équipes de projet, etc, .. Etude d'impact 	Valeur proposée <ul style="list-style-type: none"> Utilisation e la modélisation numérique (2D, 3D). Utilisation de l'intelligence artificielle pour l'analyse des données (ex : python). Utilisation de la technologie (« Mike 21, Telemac, arc gis, Swan, surfer, Seadas, autocad,.. »). La cartographie Développement de techniques de construction durables. Evaluation des risques et gestion des problématiques spécifiques. 	Relation client <ul style="list-style-type: none"> Un service rapide Des remises pour les clients fidèles Consultations techniques de rapports d'avancement, de support après-vente Avoir la satisfaction de client par la meilleure qualité de service Compréhension des besoins du client. 	Segments client <ul style="list-style-type: none"> Les entreprises des travaux maritimes. (MEDITRAM) Les entreprises des travaux offshores. Organismes gouvernementaux et régulateurs maritimes. Les autorités portuaires et gestionnaires de terminaux. Les bureaux d'études des travaux maritimes (HMI) Société des travaux maritimes (SOTRAM)
	Ressources clés <ul style="list-style-type: none"> Des experts et des ingénieurs techniques spécialisés en aménagement, hydrodynamique, génie côtier, informatique,... les logiciels de modélisation (mike21, Artémis.) données et les informations sur les travaux maritimes 		Canaux de distribution <ul style="list-style-type: none"> Les contacts directs avec les clients. Les partenariats avec des entreprises de construction La participation à des appels d'offres, La présence en ligne (plateforme). 	
Structures des coûts <ul style="list-style-type: none"> ✓ L'équipement bureautique : 4 bureaux + 4 chaises + une table de réunion + 2 imprimantes + des besoins secondaires + 4 ordinateurs performants + 4 armoires de rangement 2 120 000 da ✓ Véhicule 2 000 000da ✓ Frais de communication 100 000da ✓ Frais d'électricité, gaz, eau, téléphone : 120 000da ✓ Les instruments de mesures : DGPS, Echosondeur. 2 000 000 da ✓ Salaires des employés : 840 000 da ✓ Les logiciels : open source ✓ Frais d'établissement / frais d'ouverture de compte : 700 8000da ✓ Le cout total : 7 888 000 da 		Source de revenue <ul style="list-style-type: none"> les frais d'étude les revenus provenant de partenariats ou de collaborations les honoraires de consultation les contrats de prestation de services les formations d'apprentissage des logiciels. Location des instruments de mesures 		

Présentation du Business model Canvas du bureau d'étude

Résumé

Ce mémoire présente une étude basée sur la modélisation numérique des phénomènes d'hydrodynamique et d'agitation portuaire dans le port d'Annaba.

Ce projet de fin d'étude a pour objectif d'entreprendre le traitement et l'analyse des données climatologiques de la zone d'étude en utilisant des méthodes de prédictions des événements extrêmes telles que le POT et le GEV. Ces résultats ont été ensuite intégrés dans l'étude d'hydrodynamique en utilisant la modélisation numérique avec le logiciel DHI Mike-21 et l'Artémis pour l'agitation à l'intérieur du port d'Annaba et de proposer une solution appropriée permettant de maintenir une agitation admissible pour assurer le bon déroulement des opérations et répondre aux critères de sécurité des quais en terme d'exploitation.

Suite à l'analyse des données disponibles, la proposition de solution consiste à réaliser le dragage de l'avant-port et le chenal d'accès. Cette mesure s'est avérée essentielle pour l'aménagement du port et pour réduire l'agitation au niveau des différents postes d'accostage.

Mots clés :

Événements extrêmes, POT, GEV, Artémis, agitation portuaire, dragage, modélisation numérique, étude hydrodynamique, Mike21

Abstract

This thesis presents a study based on the numerical modeling of hydrodynamic phenomena and port agitation in the port of Annaba. The objective of this study is to process analyze climatological data of the study area using methods for predicting extreme events such as a POT (Peak and Over Threshold) and GEV (Generalized Extreme Value). These results were then integrated into the hydrodynamic study using numerical modeling with the software DHI Mike-21 and Artemis for agitation within the port of Annaba, and to propose an appropriate solution that maintains an acceptable level of agitation to ensure smooth operations and meet safety criteria for quay operation.

Based on the analysis of available data, the proposed solutions consist of dredging the harbor entrance and access channel. This measure has proven to be essential for port development and to reduce agitation at various berths.

Key words:

Extreme value, POT, GEV, Artemis, port agitation, dredging, numerical modeling, hydrodynamic study