

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



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

Thème :

**MACHINE LEARNING POUR L'ETUDE DE LA PERFORMANCE
HYDRAULIQUE DES OUVRAGES PORTUAIRES, CAS MARINA
D'ALGER.**

Présenté par :

**AMARA Lounis
CHALAL Yahia**

Soutenu le 06/07/2022, devant le jury composé de :

Mme. ABDEDDAIM H..	Maitre conférence - ENSSMAL	Président
M. MEZOUAR K	Professeur - ENSSMAL	Promoteur
M. GHOGGALI S	Maitre conférence - ENSER	Co-Promoteur
M. DAHMANI A	Maitre conférence - ENSSMAL	Examinateur
Mme SALEM CHRIF Y.	Doctorante - ENSSMAL	Examinatrice

Année universitaire : 2021/2022

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



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

Thème :

**MACHINE LEARNING POUR L'ETUDE DE LA PERFORMANCE
HYDRAULIQUE DES OUVRAGES PORTUAIRES, CAS MARINA
D'ALGER.**

Présenté par :

**AMARA Lounis
CHALAL Yahia**

Soutenu le 06/07/2022, devant le jury composé de :

Mme. ABDEDDAIM H..	Maitre conférence - ENSSMAL	Présidente
M. MEZOUAR K	Professeur - ENSSMAL	Promoteur
M. GHOGGALI S	Maitre conférence - ENSER	Co-Promoteur
M. DAHMANI A	Maitre conférence - ENSSMAL	Examineur
Mme SALEM CHRIF Y.	Doctorante - ENSSMAL	Examinatrice

Année universitaire : 2021/2022

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



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme
De Master en Sciences de la Mer
Option : Gestion et Protection du Littoral

Thème :

**MACHINE LEARNING POUR L'ETUDE DE LA PERFORMANCE
HYDRAULIQUE DES OUVRAGES PORTUAIRES, CAS MARINA
D'ALGER.**

Présenté par :

**AMARA Lounis
CHALAL Yahia**

Soutenu le 06/07/2022, devant le jury composé de :

Mme. ABDEDDAIM H..	Maitre conférence - ENSSMAL	Présidente
M. MEZOUAR K	Professeur - ENSSMAL	Promoteur
M. GHOGGALI S	Maitre conférence B ENSER	Co-Promoteur
M. DAHMANI A	Maitre conférence - ENSSMAL	Examineur
Mme SALEM CHRIF Y.	Doctorante - ENSSMAL	Examinatrice

Année universitaire : 2021/2022

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs circonstances, faits et personnes à qui on voudrait témoigner toute notre gratitude.

Au terme de ce travail, nous remercions **Dieu le Tout-Puissant** pour nous avoir donné la santé, le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

On remercie **nos parents** pour leur soutien tout au long de notre parcours qui n'a pas été un long fleuve tranquille. Sans leur soutien indéfectible, le parcours parcouru, qui se termine par le présent mémoire, n'aurait jamais pu voir le jour.

Nous remercions particulièrement notre promoteur **M. MEZOUAR K.** Professeur à l'ENSSMAL qui nous a encadrés pendant la période de la réalisation de ce travail. Pour sa disponibilité, malgré ses responsabilités administratives, pour ses orientations, son soutien qui nous a permis de mener à bien ce travail et surtout pour sa soif de progrès et de science qui l'a souvent conduit à plusieurs nuits blanches dans le but de nous simplifier les choses qui nous ont bloqué à certain moment critiques de ce mémoire.

Nous remercions énormément notre Co-promoteur **M. GHOGGALI S.** professeur à l'ENSER de Batna qui a bien voulu nous prendre sous son aile dans la partie Machine Learning. Pour ce travail riche d'intérêt, pour nous avoir guider à chaque étape de sa réalisation et qui nous a toujours réservé le meilleur accueil, malgré ses obligations professionnelles et la distance.

Nous tenons à remercier **Mme. ABD DAIEME H** enseignante à L'ENSSMAL d'avoir accepté de présider le jury de cette soutenance.

Nous s'adressons nos remerciements les plus vifs à **M. DAHMANI A.** Maître de conférences à l'ENSSMAL pour avoir accepté d'examiner notre travail et de nous faire part de ces retours.

C'est avec un grand plaisir que nous remercions **Mme. SALEM CHRIF Y.** Doctorante à l'ENSSMAL pour avoir pris le temps d'examiner ce travail et de nous faire part de ces retours.

On exprime nos remerciements à l'ensemble de **la famille ENSSMAL** (l'ensemble de nos profs, amis et collègues) depuis le début de l'aventure ENSSMAL en 2017 et envers l'ensemble de **nos enseignants** qui nous ont formé bien avant qui nous ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de notre démarche commencer il y a 18 ans.

Nous adressons nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce présent mémoire (une pensée particulière pour M. AZZI I.).

Au final, je remercie mon binôme pour sa confiance, son soutien inestimable et surtout pour les agréables moments passés ensemble.

Merci

Table des matières

Table des matières	2
Liste des figures	5
Liste des tableaux	8
INTRODUCTION	1
Chapter I Données climatologiques de la zone d'étude.	2
I.1. Zone d'étude	3
I.1.1. Introduction.....	3
I.1.2. Situation géographique	3
I.1.3. Caractéristiques de la Marina Bay	4
I.2. Données climatologiques de la zone d'étude.....	5
I.2.1. Introduction.....	5
I.2.2. Généralités sur les houles.....	5
I.2.3. Climat de houle	6
I.2.4. Climat du vent.....	12
Chapter II Analyse des évènements extrêmes	15
II.1. Introduction	16
II.2. Théorie des valeurs extrêmes	16
II.2.1. Méthode des Blocs Maximas.....	17
II.2.2. Méthode Peaks Over Threshold (POT)	25
II.2.3. Comparaison entre les méthodes POT et Blocs Maximas (GEV distribution)	29
II.3. Elévation du niveau de la mer liée au changement climatique :	30
Chapter III Modélisation numérique.	31
III.1. Introduction	32
III.2. Présentation du modèle	32
III.3. Méthodologie du travail	37
III.3.1. Génération de la mesh.....	37
III.3.2. Bathymétrie dans la baie d'Alger.....	39
III.4. Directions pénalisantes.....	41
III.5. Simulations et résultats.....	43

III.5.1. Scénarios de simulation.....	43
III.5.2. Résultats des simulations pour la période de retour 2 ans.....	44
III.5.3. Résultats des simulations pour la période de retour 10 ans.....	49
III.5.4. Résultats des simulations pour la période de retour 30 ans.....	53
III.5.5. Résultats des simulations pour la période de retour 100 ans.....	58
III.6. Conclusion.....	62
Chapter IV Dimensionnement des digues de la Marina.....	63
IV.1. Introduction.....	64
IV.2. Dimensionnement des digues.....	65
IV.3. Dimensionnement de la jetée principale.....	66
IV.3.1. Dimensionnement de la carapace.....	66
IV.3.2. Dimensionnement de la sous couche.....	70
IV.3.3. Dimensionnement du filtre de transition et noyau.....	71
IV.3.4. Les règles de TERZAGHI.....	71
IV.3.5. Dimensionnement de la butée de pied.....	72
IV.4. Résultats des calculs de dimensionnement.....	72
IV.5. Caractéristiques de la digue de la jetée principale de la marina.....	76
IV.5.1. Section courante.....	76
IV.5.2. Musoir.....	76
IV.6. Caractéristiques de la digue de la jetée secondaire de la marina.....	77
IV.6.1. Section courante.....	77
IV.6.2. Musoir.....	78
Chapter V Performance hydraulique de la digue principale.....	79
V.1. Introduction.....	80
V.2. Run-Up.....	81
V.2.1. Résultats des calculs du Run-Up.....	83
V.3. Run Down.....	84
V.3.1. Résultats des calculs du Run-Down :.....	85
V.4. Franchissement.....	86
V.4.1. Les résultats de calcul des franchissements :.....	88
V.5. Conclusion.....	89
Chapter VI Application du Machine Learning pour l'étude du franchissement.....	90

VI.1. Introduction	91
VI.2. Machine Learning	91
VI.2.1. Méthodes d'apprentissage.....	91
VI.2.2. Sur et sous apprentissage	92
VI.2.3. Régression.....	92
VI.2.4. Support Vector Machine for Regression SVR.....	93
VI.2.5. XGBOOST.....	95
VI.2.6. Neuronal network.....	97
VI.3. Modèle développé au franchissement	99
VI.3.1. Description de la base de données	99
VI.3.2. Description du modèle développé.....	104
VI.3.3. Apprentissage.....	104
VI.3.4. Validation.....	105
VI.3.5. Application du modèle sur Marina Bay	108
VI.4. Conclusion	109
CONCLUSION.....	110
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	113
Annexe A	I
Annexe B	III
Annexe C	XI
Annexe D	XXV

Liste des figures

Figure I-1 Carte représentant la situation géographique de la marina et de la baie d'Alger.....	3
Figure I-2 Plan de masse de la Marina Bay (BTP infraestructuras, 2015).....	4
Figure I-3 Paramètres de la houle (Bonnefille, 2010).....	5
Figure I-4 Point d'extraction des données de houle par rapport à la marina.	6
Figure I-5 Représentation du spectre des hauteurs de houle enregistrées.....	7
Figure I-6 Représentation du spectre des périodes de houle enregistrées.....	8
Figure I-7 Représentation des directions d'incidence des houle enregistrées.....	8
Figure I-8 Roses des houles annuelle et saisonnières enregistrées de la période 1990 – 2020 au point 37° N et 3° E.	9
Figure I-9 Roses des houles mensuelles enregistrées de la période 1990 – 2020 au point 37° N et 3° E.....	10
Figure I-10 Diagramme avec distributions marginales des hauteurs et périodes de houles.	11
Figure I-11 Roses des vents annuelle et saisonnières enregistrées de la période 1990 – 2012 au point 37° N et 3° E. (modifié, Abid et al, 2020)	13
Figure I-12 Roses des vents mensuelles enregistrées de la période 1990 – 2012 au point 37° N et 3° E. (Abid et al, 2020)	14
Figure II-1 Schéma représentatif des méthodes blocks maxima et POT.	16
Figure II-2 Représentation de méthode des Blocs Maximas sur les hauteurs de houle de 1990 – 2020.....	18
Figure II-3 Estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour l'omnidirectionnel.....	19
Figure II-4 Estimation des événements extrêmes via la distribution de Weibull pour l'omnidirectionnel.....	19
Figure II-5 Estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour chaque direction.....	20
Figure II-6 Estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour chaque direction.....	22
Figure II-7 représentation des distributions possible de la méthode GEV (Kh. Tilbi, 2018)	24
Figure II-8 Représentation graphique de la distribution des hauteurs de l'enregistrement.	24
Figure II-9 Moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelle de l'enregistrement.	25
Figure II-10 Représentation de méthode POT sur les hauteurs de houle de 1990 – 2020.....	26
Figure II-11 Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour omnidirectionnel. 26	
Figure II-12 Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour chaque direction. 27	
Figure II-13 Comparaison des résultats obtenu avec les deux méthode POT et GEV.....	29
Figure II-14 Projection de l'augmentation du niveau marin jusqu'à 2300. (GIEC 2019)	30
Figure III-1 Maillage de la mesh à échelle de la région de l'algerois.	38

Figure III-2 maillage de la mesh à échelle de la baie d'Alger et de la marina.....	39
Figure III-3 Bathymétrie de la baie d'Alger.....	40
Figure III-4 Bathymétrie de la Marina Bay d'Alger	41
Figure III-5 Hauteur de plusieurs houles de direction différentes pour déterminer les directions pénalisantes.	42
Figure III-6 Champs des houles dans la Baie d'Alger de direction NNE et N (paramètres de houle pour une période de retour de 2 ans).	46
Figure III-7 Champs des houles dans la Baie d'Alger de direction NNW et NW (paramètres de houle pour une période de retour de 2 ans).	47
Figure III-8 Champs des courants au voisinage de la marina d'Alger de direction NNE, N, NNW et NW (paramètres de houle pour une période de retour de 2 ans).....	48
Figure III-9 Champs des houles dans la Baie d'Alger de direction NNE et N (paramètres de houle pour une période de retour de 10 ans).	50
Figure III-10 Champs des houles dans la Baie d'Alger de direction NNW et NW (paramètres de houle pour une période de retour de 10 ans).	51
Figure III-11 Champs des courants au voisinage de la marina d'Alger de direction NNE, N, NNW et NW (paramètres de houle pour une période de retour de 10 ans).....	52
Figure III-12 Champs des houles dans la Baie d'Alger de direction NNE et N (paramètres de houle pour une période de retour de 30 ans).	55
Figure III-13 Champs des houles dans la Baie d'Alger de direction NNW et NW (paramètres de houle pour une période de retour de 30 ans).	56
Figure III-14 Champs des courants au voisinage de la marina d'Alger de direction NNE, N, NNW et NW (paramètres de houle pour une période de retour de 30 ans).....	57
Figure III-15 Champs des houles dans la Baie d'Alger de direction NNE et N (paramètres de houle pour une période de retour de 100 ans).	59
Figure III-16 Champs des houles dans la Baie d'Alger de direction NNW et NW (paramètres de houle pour une période de retour de 100 ans).	60
Figure III-17 Champs des courants au voisinage de la marina d'Alger de direction NNE, N, NNW et NW (paramètres de houle pour une période de retour de 100 ans).....	61
Figure IV-1 Coupe type d'une digue à talus, éléments constitutifs (Caminade. D., 1995).	64
Figure IV-2 Types de déferlement en fonction de ξ_m (Battjes. J. A., 1975).....	68
Figure IV-3 Paramètre de perméabilité nominale P pour la formule de Van der Meer (1988) ...	68
Figure IV-4 Coupe type de la section courante de la jetée principale. (BTP Infraestructuras., 2015)	76
Figure IV-5 Coupe type du musoir de la jetée principale. (BTP Infraestructuras)	76
Figure IV-6 Coupe type de la section courant de la jetée secondaire. (BTP Infraestructuras)	77
Figure IV-7 Coupe type du musoir de la jetée secondaire. (BTP Infraestructuras).....	78
Figure V-1 Interactions hydrauliques de la houle avec les ouvrages (Cetmef, 2009).	80
Figure V-2 Résultats des calculs des phénomènes de la performance hydraulique (le Run-down est positif dans les calculs via la formule. La valeur négative est à titre indicative dans le graphe).	89

Figure VI-1 Fonction de perte insensible à ϵ dans la régression SVR linéaire (N. Laouti.,2012)	94
Figure VI-2 Structure de type Hammerstein	94
Figure VI-3 Structure de type Wiener.....	95
Figure VI-4 Représentation graphique d'un perceptron (Rajarajan, 2015).	97
Figure VI-5 Fonctions d'activations (S. Samy. 2019).	98
Figure VI-6 Représentation du fonctionnement de l'algorithme de rétropropagation. (B.L. Flávio.,2018).	99
Figure VI-7 Illustration de la base de données CLASH.....	101
Figure VI-8 Paramètres de la base de données sur le déferlement des vagues (Van Gent et al.,2007).	103
Figure VI-9 Coupe type de la digue principale (BTP Infraestructuras, 2015).....	104
Figure VI-10 Illustration du head et du tail de la base de données traitée.	105
Figure VI-11 Comparaison des valeurs de franchissement obtenues.	106
Figure VI-12 Zoom de la comparaison des valeurs de franchissement obtenues.	107
Figure VI-13 Corrélation des résultats du modèle avec les franchissements réels.	108
Figure VI-14 Comparaison des valeurs des franchissements des modèles (développé et NN-Clash avec les tests de la marina en canal à houle).	109

Liste des tableaux

Tableau I-1	Hauteur de houle marquante.....	7
Tableau I-2	Période de houle marquante.....	8
Tableau I-3	Vitesse du vent marquante.....	12
Tableau II-1	Tableau résumant l'ensemble des résultats obtenu par la méthode GEV selon la distribution de Gumbel.....	21
Tableau II-2	Tableau résumant l'ensemble des résultats obtenu par la méthode GEV selon la distribution de Weibull.....	23
Tableau II-3	Paramètres de la distribution des hauteurs enregistrées.....	24
Tableau II-4	Tableau résumant l'ensemble des résultats obtenu par la méthode POT.....	28
Tableau III-1	Tableau des inputs des simulations pour l'ensemble des périodes de retours.....	43
Tableau III-2	Résultats des simulations de la houle pour la période de retour 2, 5, 10 et 20 ans.....	45
Tableau III-3	Résultats des simulations de la houle pour la période de retour 30, 50, 100 et 1000 ans.....	54
Tableau IV-1	Formule d'Hudson générale.....	66
Tableau IV-2	Formule d'Hudson adaptée au cubipode.....	67
Tableau IV-3	Formule de Van der Meer eaux profondes.....	67
Tableau IV-4	Formule de Van der Meer eaux peu profondes.....	69
Tableau IV-5	Paramètres géométriques de la carapace.....	70
Tableau IV-6	Dimensionnement de la sous couche.....	70
Tableau IV-7	Formule de dimensionnement du filtre de transition et noyau.....	71
Tableau IV-8	Règles de TERZAGHI.....	71
Tableau IV-9	Formule de dimensionnement de la butée de pied.....	72
Tableau IV-10	Dimensionnements proposés pour la section courante de la jetée principale.....	73
Tableau IV-11	Dimensionnements proposés pour le musoir de la jetée principale.....	74
Tableau IV-12	Dimensionnements proposés pour de la jetée secondaire. (Voir annexe C pour les calculs).....	75
Tableau V-1	Scénarios retenus pour le calcul de la performance hydraulique de la digue.....	81
Tableau V-2	Valeurs des coefficients A, B et C pour les formules Équation V-1,Équation V-4 et Équation V-7. (CETMEF,2009).....	83
Tableau V-3	Résultats du Run-up au quel est exposé la section courante de la digue principale de la marina.....	84
Tableau V-4	Résultats du Run-down au quel est exposé la section courante de la digue principale de la marina et l'extension nominale.....	85
Tableau V-5	Norme établie par (Allsop et al, 2005) sur le débit des franchissements et des dégâts engendrés.....	87
Tableau V-6	Valeurs des coefficients A, B, C et D selon (TAW, 2002).....	88

Tableau V-7 Résultats des débits de franchissement au quel est exposé la section courante de la digue principale de la marina.	88
Tableau VI-1 Paramètres généraux et hydrauliques inclus dans la base de données.....	102
Tableau VI-2 Paramètres hydrauliques inclus dans la base de données	102
Tableau VI-3 Paramètres structurels inclus dans la base de données.	103
Tableau VI-4 RMSE pour tous les modèles de prédiction de franchissement. (Joost P. den Bieman, 2021).....	106
Tableau VI-5 Résultats essais franchissement Marina en échelle réduit.	XXV

INTRODUCTION

Les zones côtières ont toujours été un endroit populaire pour les loisirs, l'habitation et le commerce. Cela est rendu possible via l'implantation de plusieurs infrastructures tel que les ports, les marinas, les ports de pêche

L'objectif principale de la conception de la plupart des types de structures portuaire et côtières est de dissiper l'énergie des vagues. Il est important de s'assurer que la montée des vagues déferlantes ne provoque pas des franchissements à l'intérieur du bassin. De plus, la perspective d'accélération de l'élévation du niveau de la mer et les modifications possibles de la fréquence et de la direction des tempêtes présentent un degré élevé de risque et d'incertitude lorsqu'il s'agit d'envisager les scénarios de conception les plus appropriés pour les structures côtières.

L'interaction houle-structure peut être séparée en réponses hydrauliques (telles que la montée des vagues, le dépassement des vagues) et la réponse des éléments structurels. Chaque interaction est décrite par une formule, qui dans la plupart des cas est de nature semi-empirique avec la forme basée sur des considérations physiques mais les constantes empiriques déterminées par ajustement aux données expérimentales. Les conditions de conception des structures côtières incluent des niveaux acceptables de réponses hydrauliques en termes de montée des vagues, de dépassement, de transmission et de réflexion des vagues.

Aucun secteur d'activité n'est à l'abri du questionnement introduit par l'abondance récente des données, il n'est donc pas étonnant que les sciences marine en particulier soient aussi touchées. Pourtant, il n'est pas si aisé de comprendre les interactions des phénomènes hydrauliques alors que des publications de plus en plus nombreuses en « Data science » traitent directement ces questions via le Machine Learning et le Deep Learning.

Pour de traiter ce sujet au mieux, une démarche a été établie. Elle consiste d'abord à la collecte des données, notamment : les données océanographiques, climatologiques, bathymétriques de la zone d'étude. De même une recherche dans les ouvrages de référence en génie côtiers tels que the Shore Protection Manuel (CERC, 1984), le guide d'enrochement (Cetmef., 2009) et Coastal Engineering Manual (U.S. Army Corps of Engineers, 2012) ont été utilisés.

Le présent mémoire de projet de fin d'études s'intéresse à l'étude de la performance hydraulique de la digue principale de la Marina Bay. Nous verrons dans le :

- **Chapitre I** : la zone d'étude, un plan de masse de la marina et les données climatologiques.
- **Chapitre II** : une estimation des événements extrêmes via la théorie des valeurs extrêmes.
- **Chapitre III** : la détermination de la propagation de la houle via la modélisation numérique.
- **Chapitre IV** : dimensionner la variante d'ouvrage via plusieurs formules de stabilité.
- **Chapitre V** : Une étude de la performance hydraulique avec les formules semi empirique.
- **Chapitre VI** : Enfin, une projection des franchissements est faite via le Machine Learning

Chapter I Données climatologiques de la zone d'étude.

I.1. Zone d'étude

I.1.1. Introduction

Le projet 'Marina Bay' fait partie du projet Médina d'Alger. Il a pour objectif le développement du tourisme balnéaire dans la région centrale du pays. Il doit en effet répondre aux besoins sociaux économiques et environnementaux pour que la ville d'Alger puisse être inscrite sur la carte touristique méditerranéenne. Dans ce chapitre, on va aborder le projet d'une manière générale à savoir : Sa situation géographique, ses caractéristiques techniques globales et les parties prenantes

I.1.2. Situation géographique

Le site de la Marina Bay d'Alger se situe dans la partie centrale de la baie d'Alger dans la commune de Mohammadia. Il est limité à l'Est par l'hôtel Hilton, au Sud-Ouest par la grande mosquée d'Alger, au Nord par la mer Méditerranée et au Sud par la route nationale n° 05. Oued El-Harrach se divise en mer à environ de 1500 m à son Ouest (Figure I-1). La Marina Bay est délimitée par les coordonnées géographiques suivantes :

- Longitude : $3^{\circ}8'41.42''\text{E}$ à $3^{\circ}9'15.45''\text{E}$ et
- Latitude : $36^{\circ}44'29.35''\text{N}$ à $36^{\circ}44'43.60''\text{N}$.



Figure I-1 Carte représentant la situation géographique de la marina et de la baie d'Alger.

I.1.3. Caractéristiques de la Marina Bay

I.1.3.1 Plan de masse

Le style de la marina est envisagé sur la base d'un design esthétique et paysagiste en réduisant l'intrusion visuelle. Dans cette idée, les travaux extérieurs du port sont projetés en bas de la côte de couronnement. Cette structure a été conçue d'une façon qu'elle peut être modifiée dans le cas des événements extrêmes. La digue et la contre-digue sont d'alignement courbé permettant ainsi un accouplement cohérent avec la baie. Cela donne à l'installation une forte parenté avec son environnement. (BTP infraestructuras., 2015)

D'un point de vue fonctionnelle des futurs usagers, la distribution de la surface pour l'usage commercial se place adossée au quai de la rive pour offrir une vue ouverte sur le bassin intérieur. Cette surface est de préférence qu'elle soit séparée de la zone de la cale de halage située dans le départ de la digue. Pour éviter ainsi les obstacles, les bâtiments de l'administration du port, les services de voile légère et le Yatch Club sont placés à côté de la contre-digue. (Figure I-2)

La conception finale de Marina Bay est le résultat d'une étude structurale et fonctionnelle qui remplit les exigences environnementales. Elle est également le fruit d'une analyse coût-bénéfice sur la base technique. (BTP infraestructuras, 2015)

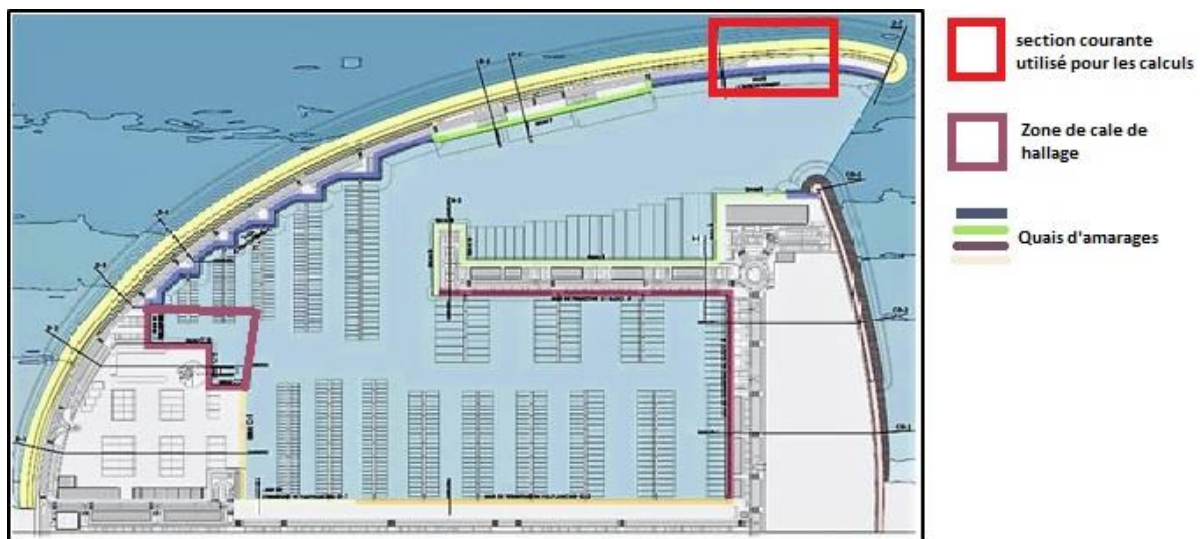


Figure I-2 Plan de masse de la Marina Bay (BTP infraestructuras, 2015)

I.1.3.2 Capacité d'accueil

La capacité choisie pour la Marina Bay d'Alger est de 705 embarcations d'entre 8 et 70 mètres de longueur. Cette configuration donne une distribution de 72,7 % des bateaux ayant une longueur inférieure à 15 m qui est raisonnable et justifiée. (BTP infraestructuras., 2015). Les quais d'accostages près de la passe d'entrée sont réservés aux navires à grand tirant d'eau.

I.2. Données climatologiques de la zone d'étude

I.2.1. Introduction

D'après **Shore Protection Manual**, les effets des houles sont d'une importance capitale dans le domaine du génie côtier. Elles représentent le principal facteur déterminant la géométrie et la composition des plages. Les houles influencent également de manière significative sur la planification et la conception de ports, des voies navigables, de la protection des rives, structures côtières et autres ouvrages côtiers.

Dans ce présent chapitre, on va analyser le climat de houle et des vents au large de la baie d'Alger et déterminer les événements extrêmes probables via le traitement statistique. Ensuite on clôture le chapitre par l'élévation du niveau de la mer dans le contexte des changements climatique. Cela est un point nécessaire pour les chapitres qui suivent.

I.2.2. Généralités sur les houles

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

La houle est caractérisée principalement par sa longueur d'onde L , son amplitude H , sa célérité C et sa période T . Il existe également des paramètres représentatifs qui sont nécessaires à la classification tel que la cambrure H/L et la profondeur relative d . voir Figure I-3.

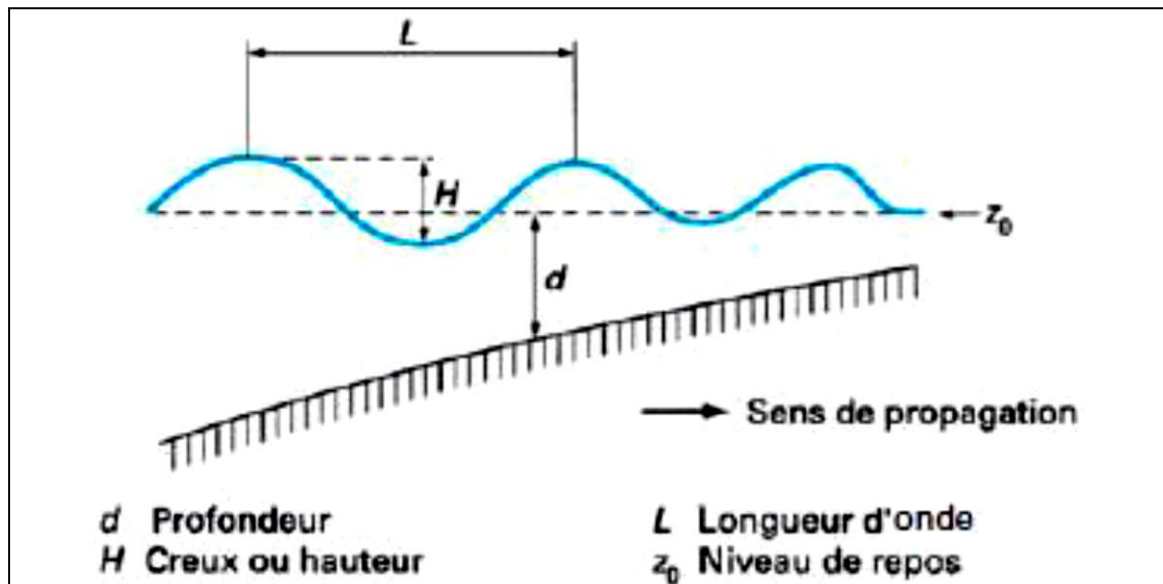


Figure I-3 Paramètres de la houle (Bonnefille, 2010)

I.2.3. Climat de houle

L'ensemble des analyses de houle ont été extraites à partir de la base de données **IOWAGA** (**I**ntegrated **O**cean **W**aves for **G**eophysical and other **A**pplications), appartenant au centre de recherche **IFREMER**.

Le choix de l'extraction des données s'est porté sur le model Globale qui procède une grille assez serrée avec un pas de 0.5° (environ 50 Km) entre chaque point de mesure. Ce dernier, nous permet de choisir le point d'extraction situé au coordonnée 37°N de latitude et 3°E de longitude (voir Figure I-4). Ce point est le plus convenable au model mis en place pour la modélisation.

Ce model globale couvre un plus grand intervalle de temps avec des données de houle allant de 1990 à 2020. Ces données suivent les modèles : CFSR pour la période allant de 1990 à 2012 et ECMWF de 2013 à 2020 qui est plus précis que le premier.

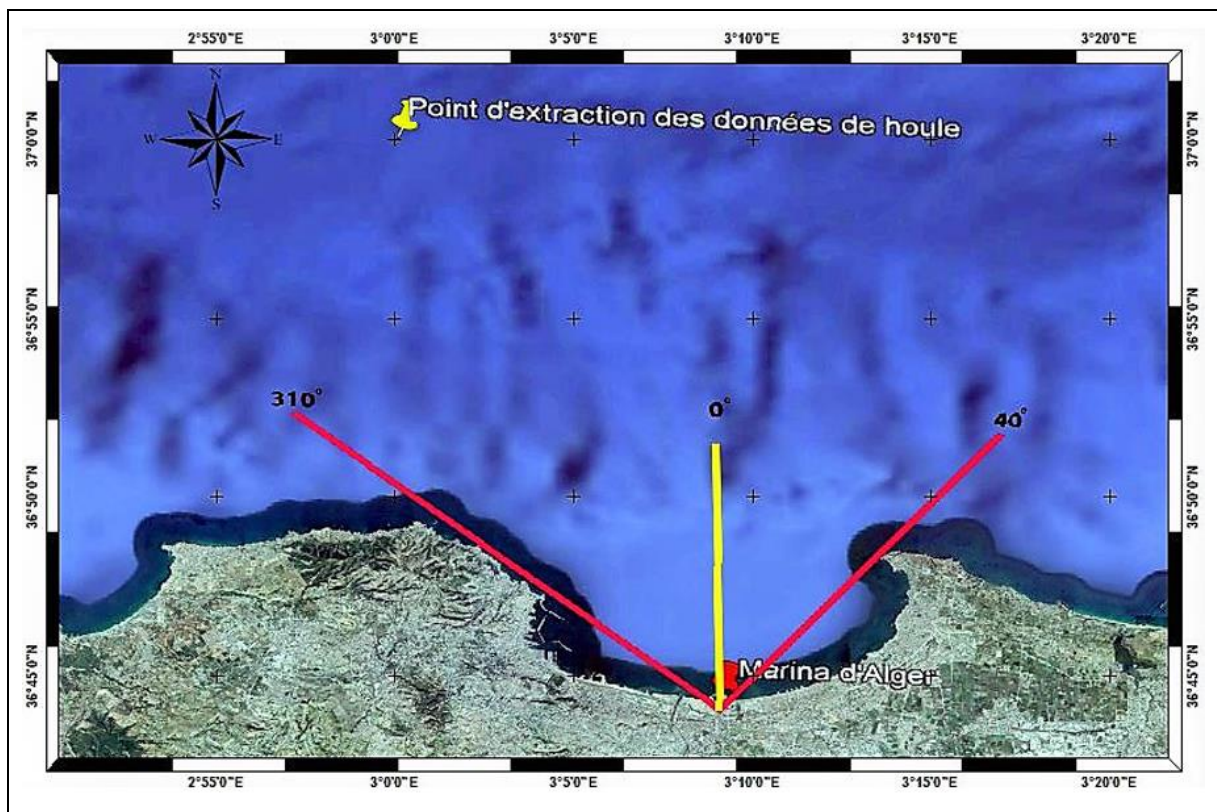


Figure I-4 Point d'extraction des données de houle par rapport à la marina.

Le point d'extraction des données de houle se situant au Nord-Nord-Ouest de la marina à environ 70 Km au Nord du cap Ouest de la baie d'Alger. Ce point reste néanmoins dans le champ des directions allant du NW jusqu'à NE ayant une influence direct sur la marina (de 310° à 40°) comme le montre la Figure I-4. Les autres directions de houle au large sont influentes via les phénomènes ondulatoires telle-que la diffraction.

Pour une meilleure analyse du climat de houle de la région, on a fait le choix de travailler avec trois variables les plus représentatives de la houle.

- **Hs** : La hauteur significative de la houle en mètre (m).
- **Tp** : La période pic de la houle en seconde (s).
- **Dp** : La direction pic de la houle en degré (°).

La série de données qui sera traitée dans cette étude est composé de 88 632 mesures pour chaque une des variables précédemment citées. Avec un pas de 3 Heures allant du 1^{er} janvier 1990 jusqu'à 1^{er} juin 2020.

I.2.3.1 Hauteur significative

Sur l'ensemble de cette période de 30 ans, la hauteur significative de la houle (Hs) varie entre de 0.03 m et 6.56 m avec une moyenne de 0.92 m.

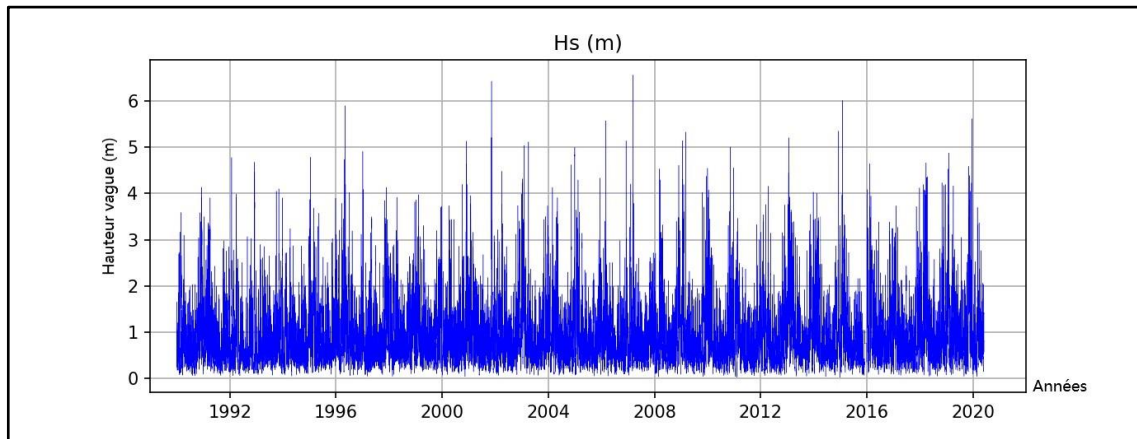


Figure I-5 Représentation du spectre des hauteurs de houle enregistrées.

A partir de la Figure I-5, on distingue que les houles au large de la baie d'Alger sont dans leurs ensemble inférieur à 3 m, avec quelques épisodes extrêmes à peu près chaque 4 à 8 ans dépassant les 5 m. Aussi, le traitement de ces données nous a permis de définir quelques hauteurs marquantes de la houle représenté dans le Tableau I-1.

Tableau I-1 Hauteur de houle marquante.

Hauteur de houle marquante	Valeur (m)
Hm (hauteur moyenne)	0.92
Hs (moyenne du 1/3 des valeurs supérieur de l'enregistrement)	1.65
H_{10%} (moyenne du 1/10 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	2.43
H_{2%} (moyenne du 2% des valeurs supérieures de l'enregistrement)	3.42
Hmax (valeur maximale de l'enregistrement)	6.56

I.2.3.2 La période de pic

Les périodes enregistrées sont dans une gamme assez large allant de 1.5s à 18.5s, les périodes sont globalement entre 3s et 9s (la plus grande densité dans la Figure I-6)

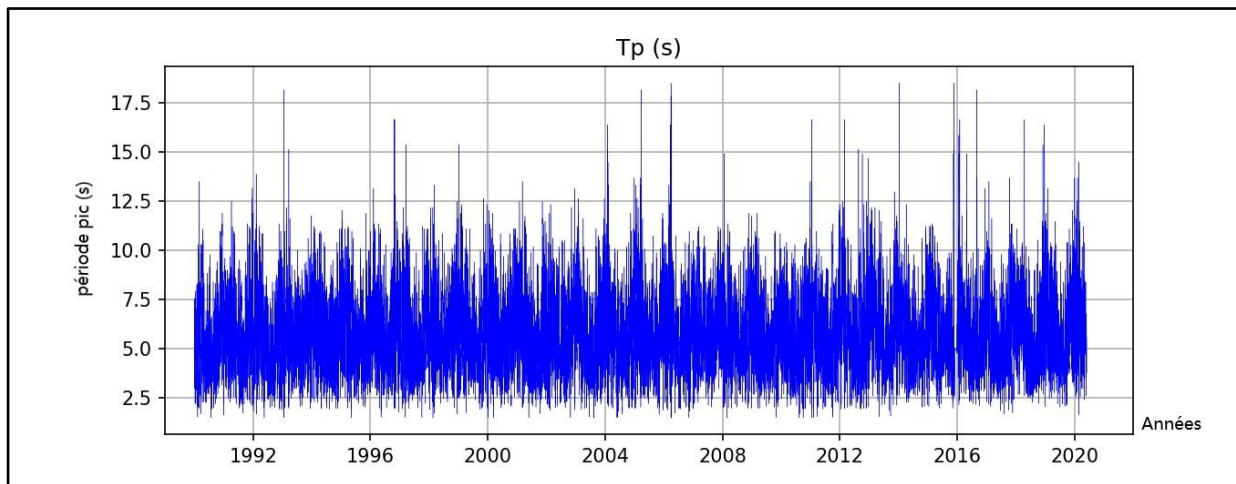


Figure I-6 Représentation du spectre des périodes de houle enregistrées.

Aussi, le traitement de ces données nous a permis de définir quelques périodes marquantes de la houle représentée dans le Tableau I-2.

Tableau I-2 Période de houle marquante.

Période de houle marquante	Valeur (s)
Tm (période moyenne)	5.95
Ts (moyenne du 1/3 des valeurs supérieur de l'enregistrement)	8
T10% (moyenne du 1/10 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	9.53
THmax (période correspondant la hauteur maximale de l'enregistrement)	11.2
Tmax (valeur maximale de l'enregistrement)	18.5

I.2.3.3 La direction de pic

La Figure I-7 nous a permet de constater une très forte dominance des vagues immanentes des directions W, NW, N et NE.

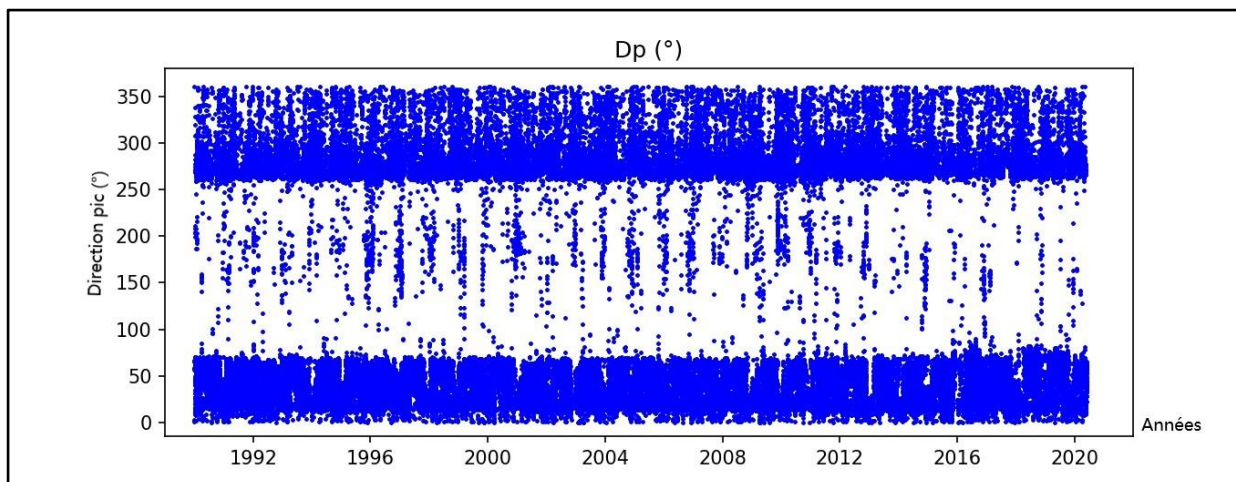


Figure I-7 Représentation des directions d'incidence des houle enregistrées.

A fin, de pouvoir voir l'influence de l'ensemble de ses variables sur le climat de houle au large de la zone d'étude. Les deux figures qui suivent nous permettent une meilleure compréhension de la houle au large, avec la combinaison des directions dominantes, la hauteur et la fréquence des la houle.

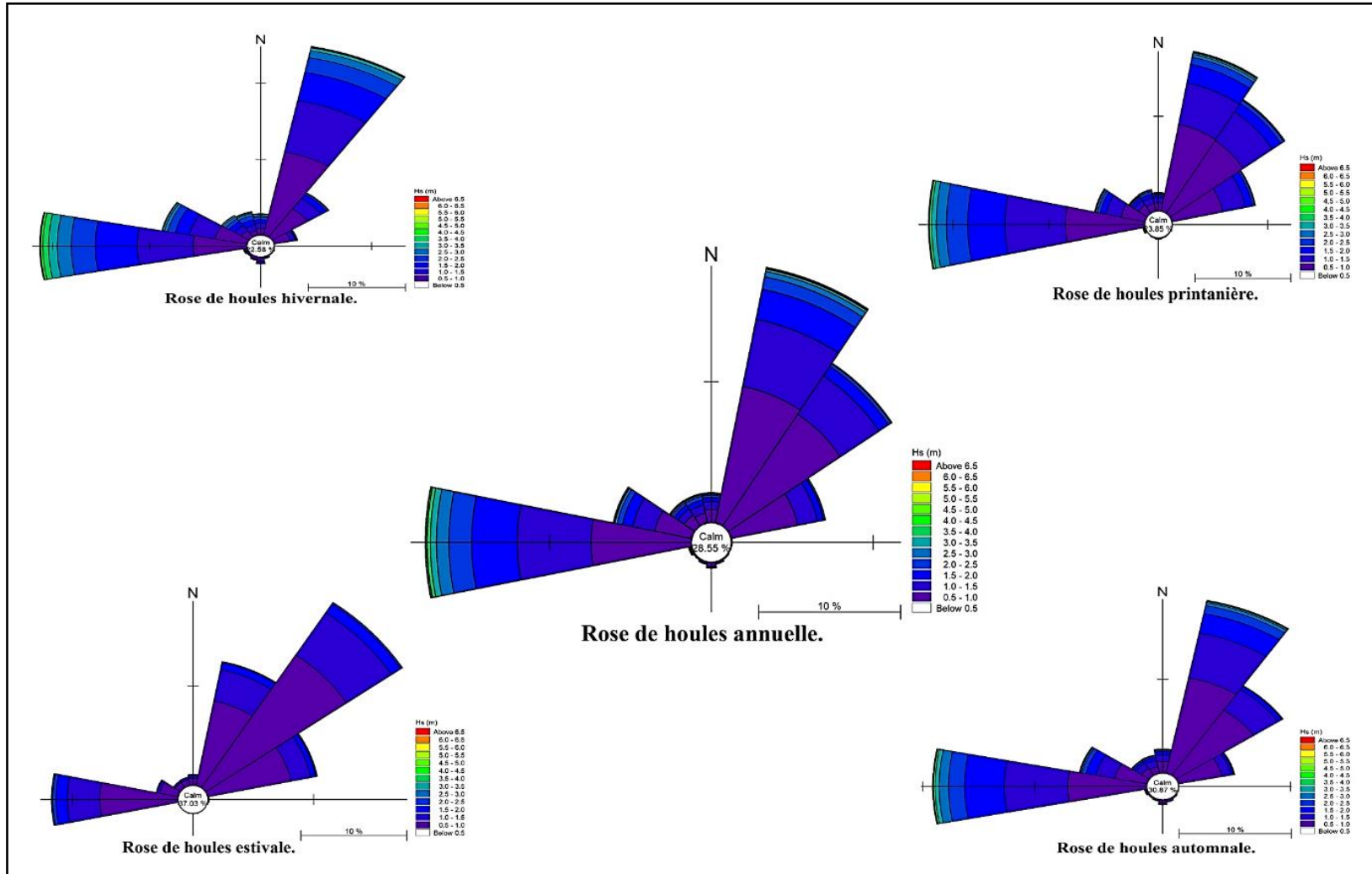


Figure I-8 Roses des houles annuelle et saisonnières enregistrées de la période 1990 – 2020 au point 37° N et 3° E.

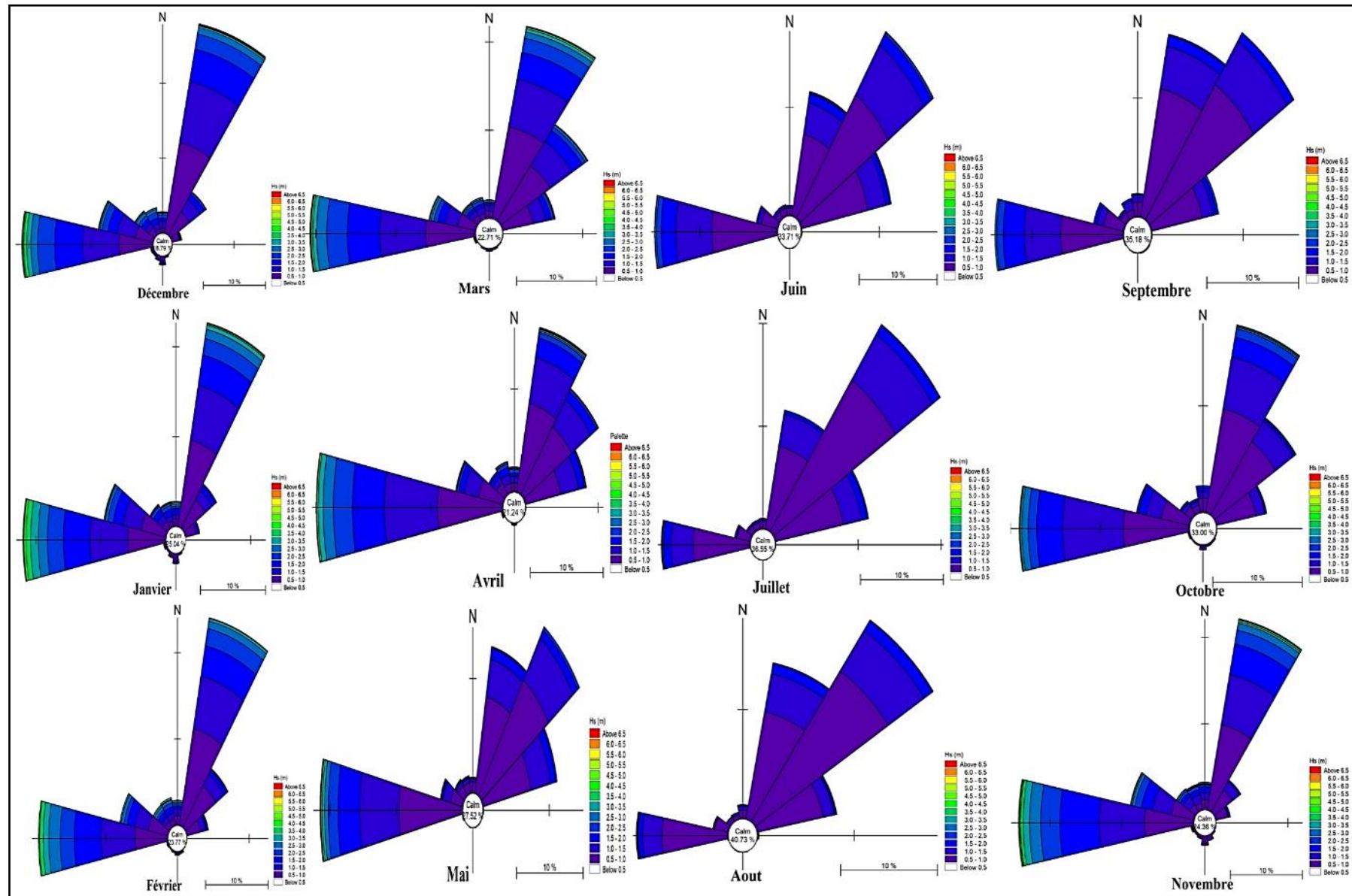


Figure I-9 Roses des houles mensuelles enregistrées de la période 1990 – 2020 au point 37° N et 3° E.

L'analyse de la rose de houle annuelle (Figure I-8), nous a permis de distinguer trois directions plus dominantes (W, NNE et NE) avec une fréquence d'apparition de (17.2%, 18.48% et 12.27%) des houles prévenantes de ces trois directions, a l'exception de certaines houles extrêmes enregistrées au niveau des autres directions.

Les roses de houle saisonnières (Figure I-8), montre une dominance des directions (W et NNE ou NE) sur l'ensemble des quatre saisons de l'année. On observe des houles très calmes durant la saison estivale avec des pics qui ne dépassent pas 2.5 m au large. Durant la saison automnale le climat de la houle est calme dans son ensemble, sauf quelques houles de direction W qui attendent des hauteurs au voisinage de 3.5 m.

Par contre les deux saisons (hivernale et printanière) sont plus agitées avec des hauteurs de houles de directions différentes (WNW, NW, NNW, N et NNE) avec des pics qui dépassent les 6 m de hauteur, plus 80 % des houles incidentes dominantes sont de directions W, NNE et NE.

L'analyse des roses de houles mensuelles (Figure I-9), nous a permis de distinguer deux catégories de houles (calme et agité). Houles calmes durant les mois : Mai, Juin, Juillet, Août et septembre mois calmes avec des hauteurs inférieur à 3.5 m dans l'ensemble. Des houles plus agitées durant les mois : Octobre, Novembre, Février et Avril avec une alternance entre temps calme et agité dans l'ensemble, tout de même plusieurs pics de plus 4.5 m de hauteur ont été enregistrés. Par contre les mois restants : Décembre, Janvier et Mars enregistrent des hauteurs qui dépassent 5 m durant l'année.

Pour voir la distribution des données de hauteur et de période, on les a représentés dans un diagramme avec distributions marginales dans la Figure I-10

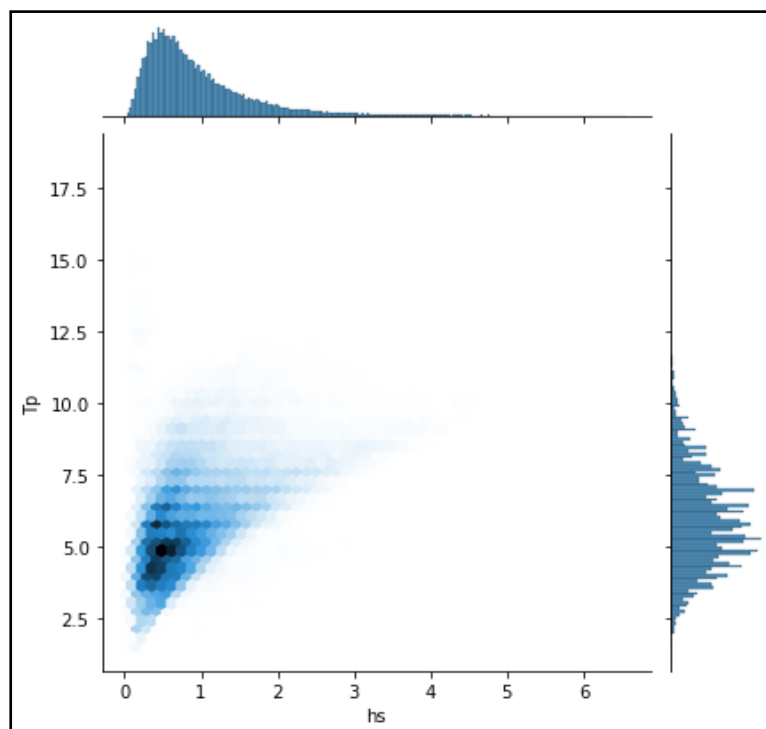


Figure I-10 Diagramme avec distributions marginales des hauteurs et périodes de houles.

La Figure I-10 montre la relation entre la hauteur de houle avec sa période. On observe une forte concentration de données (bleu foncé) pour les houles de la Hs de 0.03 m à 1.2 m avec les périodes correspondantes T_p 2.5s à 7.5s.

Les hauteurs inférieures à 3.5 m sont aussi associées à des périodes aux alentours de 10s pour un fort pourcentage de données.

On remarque que la distribution de hauteur suit une distribution presque normale. Par contre celle des périodes semble assez distordu avec plusieurs modes dominants entre 3s et 7.5 s.

I.2.4. Climat du vent

Le vent local a une grande influence sur la houle. Une étude sur le climat du vent dans le même point d'extraction 37° N 3° E a été faite sur la période 1990 – 2012 avec des données issues de la base de données IOWAGA par (Abid. A. et al., 2020).

A partir de la rose des vents annuelle, on distingue clairement la dominance de quatre directions Est, Nord Est, Ouest et Sud-Ouest avec près de 60 % de l'ensemble des vents soufflants au large de la baie d'Alger. Les pics de vitesse enregistrés atteignent plus de 18 m/s venant des secteurs Ouest et Sud-Ouest.

On constate d'après l'analyse des roses des vents semestrielles que les mêmes directions annuelles dominant, sauf durant la saison estivale dominée par les directions Est et Nord Est avec 60% des vitesses enregistrées.

L'analyse des roses mensuelles fait ressortir deux catégories de vent : des vents calmes durant les mois de la saison estivale avec des vitesses qui ne dépassent pas les 5 m/s ; des vents plus forts durant les mois hivernaux avec des vitesses qui dépassent les 18 m/s.

Le Tableau I-3 est issu à partir des calculs faits sur le corrélogramme vitesse et direction du vent de (Abid et al, 2020).

Tableau I-3 Vitesse du vent marquante.

Vitesse de vent marquante	Valeur (m/s)
V_m (vitesse moyenne)	5.35
V_s (vitesse de 1/3 supérieur)	15.8
$V_{1/3inf}$ (vitesse du 1/3 inférieur)	3.65
V_d (classe de vitesses dominantes à 55%)	2 - 6
V_{max} (vitesse maximale)	24.8

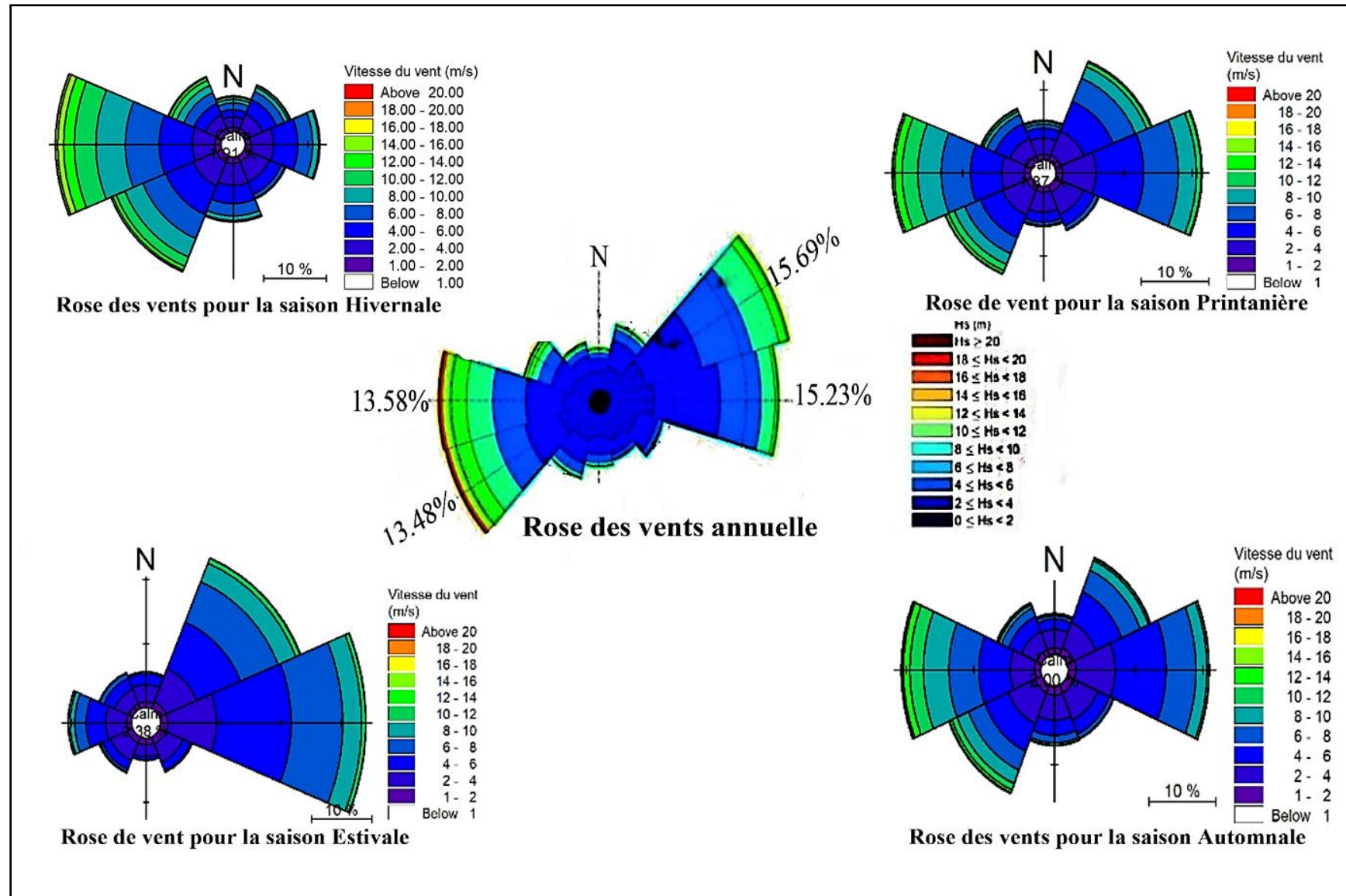


Figure I-11 Roses des vents annuelle et saisonnières enregistrées de la période 1990 – 2012 au point 37° N et 3° E. (modifié, Abid et al, 2020)

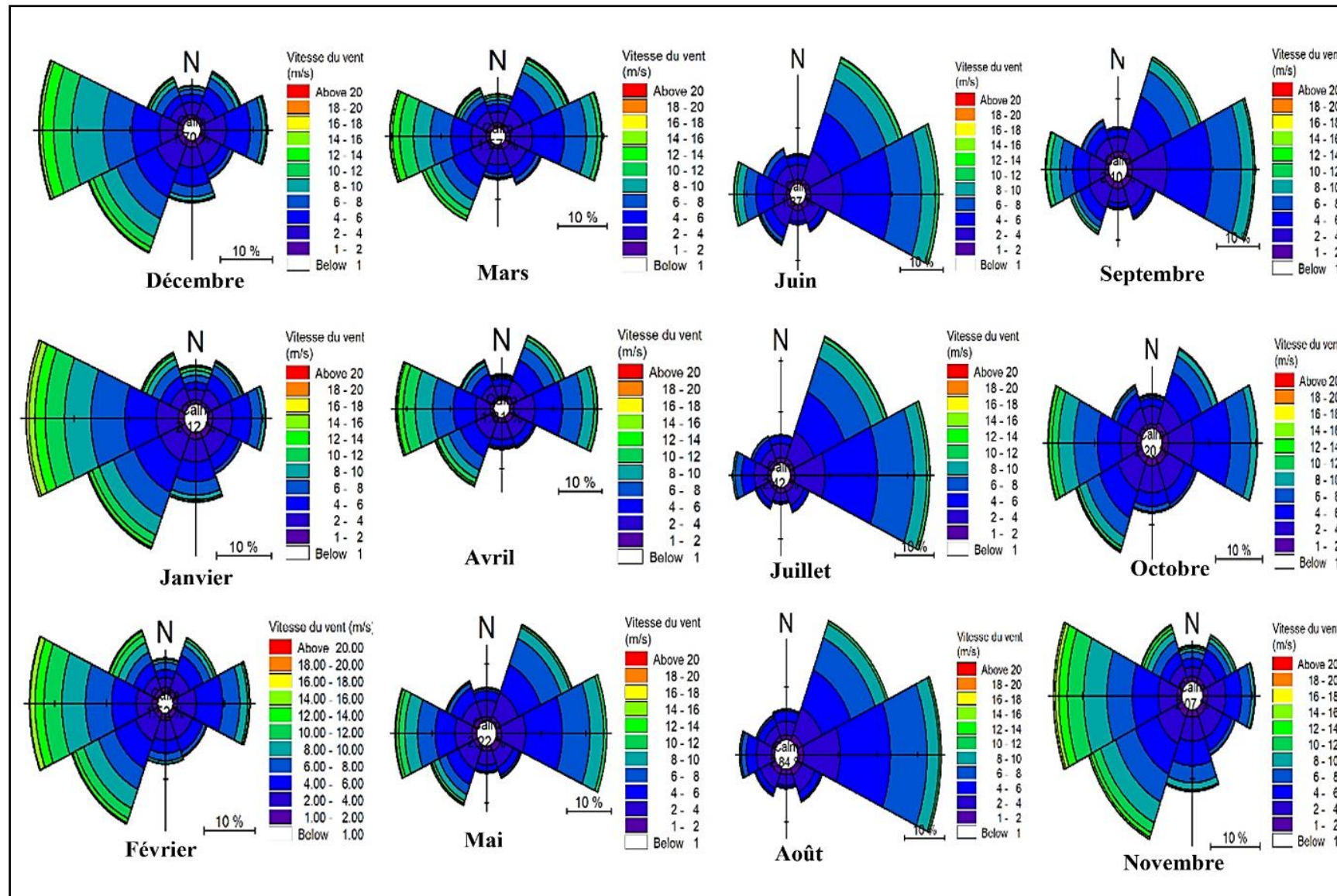


Figure I-12 Roses des vents mensuelles enregistrées de la période 1990 – 2012 au point 37° N et 3° E. (Abid et al, 2020)

Chapter II Analyse des évènements extrêmes.

II.1. Introduction

D'après **Thompson et al. 2009**, la conception réussie d'une structure de défense côtière fiable et efficace peut être associée principalement à la connaissance des conditions extrêmes futures auxquelles la défense doit résister. En règle générale, les défenses côtières sont conçues pour fournir une protection suffisante contre les inondations ou l'érosion jusqu'à un niveau de retour souhaité associé à une période de retour particulière, par ex. 100 ans. L'estimation des niveaux de retour et de leur incertitude a donc une importance technique considérable, en particulier dans le domaine de la conception de la défense côtière. Une méthodologie statistique pour de telles tâches d'estimation est nécessaire.

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

II.2. Théorie des valeurs extrêmes

La théorie des valeurs extrêmes est une méthode utilisée dans d'estimation de la probabilité des événements plus extrêmes (Coles 2001). En d'autres termes, il est utilisé pour déterminer des distributions limites en estimant des modèles statistiques qui optimisent les valeurs extrêmes des données observées.

En statistique, il existe deux méthodes principales pour définir les valeurs extrêmes. La première est l'approche des Blocs Maximas. Pour cette approche, la période couverte par l'ensemble de données est divisée en blocs, la valeur la plus extrême de chaque bloc étant utilisée pour les analyses futures (par exemple, les maxima quotidiens ou mensuels). La deuxième méthode est basée sur les dépassements d'un seuil choisi (u), appelée la méthode Peaks Over Threshold (**POT**) (Cornel Stander, 2015).

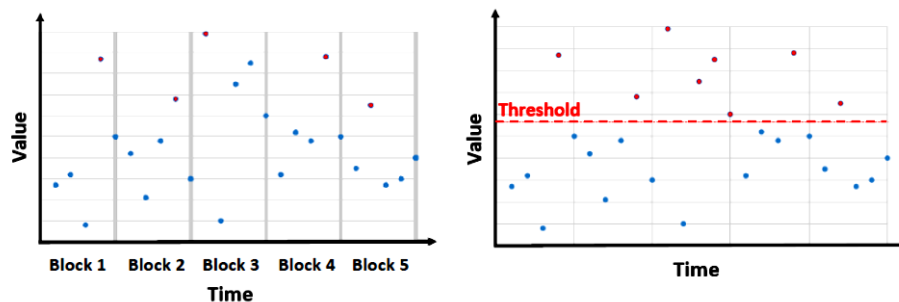


Figure II-1 Schéma représentatif des méthodes blocs maxima et POT.

L'inconvénient de l'approche des Blocs Maximas est qu'elle ne considère qu'un seul maximum dans chaque bloc. Cela crée le risque de perdre des données significatives. Par exemple, si deux grandes valeurs apparaissent dans un bloc, seule la plus grande des deux est prise en compte. La méthode POT, quant à elle, élimine ce risque en prenant en considération toutes les valeurs supérieures au seuil choisi (Cornel Stander, 2015). Néanmoins la méthode des blocs maxima reste valide car elle assure une plus grande indépendance des échantillons de données par rapport au

POT dont les échantillons sont parfois très rapprochés, ce qui mit en doute l'indépendance des échantillons.

Dans notre cas d'étude nous allons considérer les deux méthodes afin d'obtenir un maximum de résultats puis les comparer plus tard.

II.2.1. Méthode des Blocs Maximas

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

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

On approche ensuite la loi de la variable aléatoire m_i par une loi **GEV** (Generalized Extreme Value) puis on estime les paramètres de cette loi en utilisant l'échantillon (m_1, \dots, m_k) . Il faut alors trouver un bon compromis entre la taille des blocs l , qui doit être assez grande pour que l'approximation par la loi **GEV** soit réaliste, et le nombre de blocs k qui doit être assez grand pour avoir assez d'informations afin d'estimer les trois paramètres de la GEV. Pour les données météorologiques, on considère souvent des blocs de taille 1 an ce qui a pour avantage de gommer les effets saisonniers.

$$\begin{aligned} - \text{ Si } k \neq 0 : F(x; \mu, \sigma, k) &= \exp\left(-\left[1 + k\frac{x-\mu}{\sigma}\right]^{-1/k}\right) \text{ définie pour } x \text{ vérifiant} \\ &1 + k\frac{x-\mu}{\sigma} > 0 \end{aligned} \quad \text{Équation II-2}$$

$$- \text{ Si } k = 0 : F(x; \mu, \sigma, k) = \exp\left(-\exp\left(-\left[\frac{x-\mu}{\sigma}\right]\right)\right) \text{ définie pour tout } x \in \mathcal{R} \quad \text{Équation II-3}$$

- μ est un paramètre de position et σ paramètre d'échelle : si $X \sim GEV(\mu, \sigma, k)$ 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 $x < \mu - \sigma/k = x_+$ 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 majoré).

* Le cas $k > 0$ correspond à la loi de Fréchet. La formule ci-dessus définit la fonction de répartition pour $x > \mu - \sigma/k = x_-$ et on pose $F(x; \mu, \sigma, k) = 0$ si $x \leq x_-$: la variable X est donc à valeurs dans $]x_-, +\infty[$

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

L'analyse des données a été effectuée sur le langage **python** via la bibliothèque **pyextreme**, les résultats obtenus sont présentés sous forme de graphes et de tableaux.

D'abord le bloc de donnée a été divisé selon une période annuelle (représenté avec les lignes en points) pour permettre de prendre le maximum de chaque année séparément comme le montre la Figure II-2

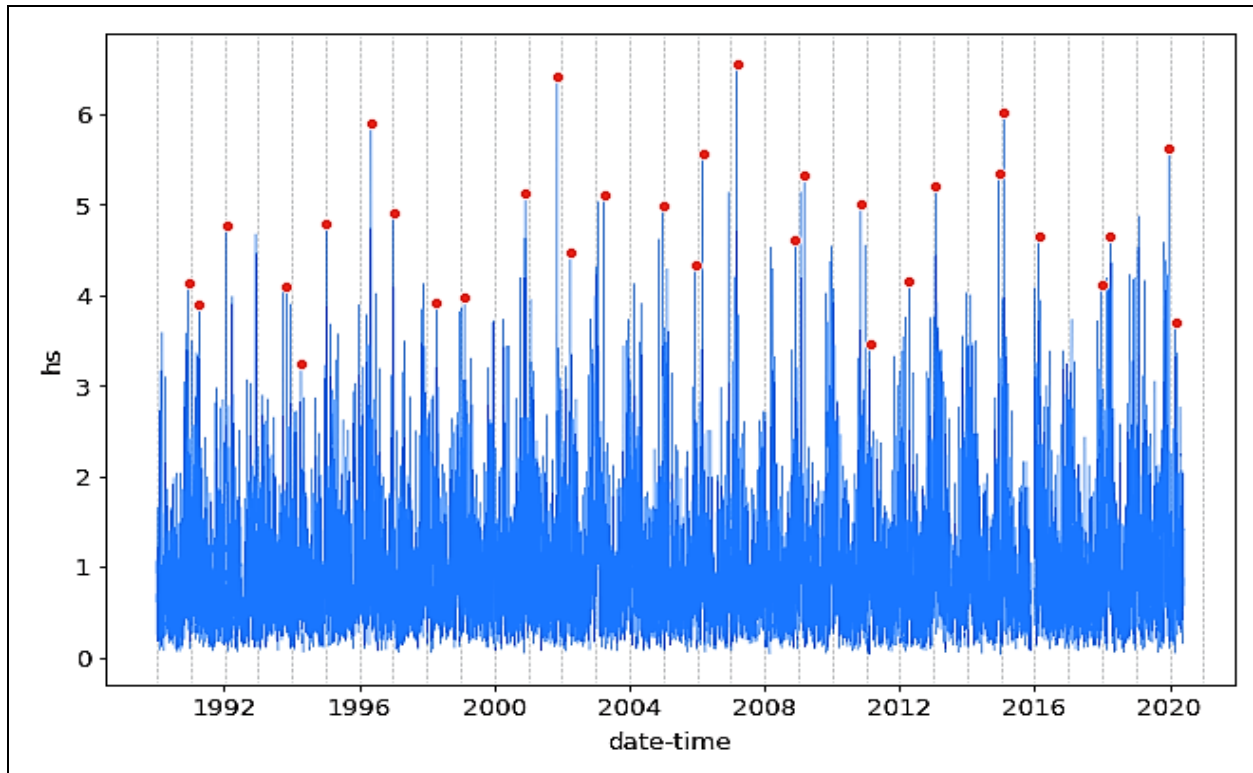


Figure II-2 Représentation de méthode des Blocs Maximas sur les hauteurs de houle de 1990 – 2020.

Une fois les maximums sélectionnés pour chaque année on passe directement au calcul des hauteurs de houles correspondant à chaque période de retour.

II.2.1.1 Résultats GEV avec la distribution de Gumbel :

Les résultats figurants dans le graphe (Figure II-3) expliqués par des traits bleus qui désignent les limites de l'intervalles de confiance acceptée pour les résultats de 15% prés. Les croix rouges indiquent les valeurs de hauteurs de houles pour les périodes de retour 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100 et 1000 ans.

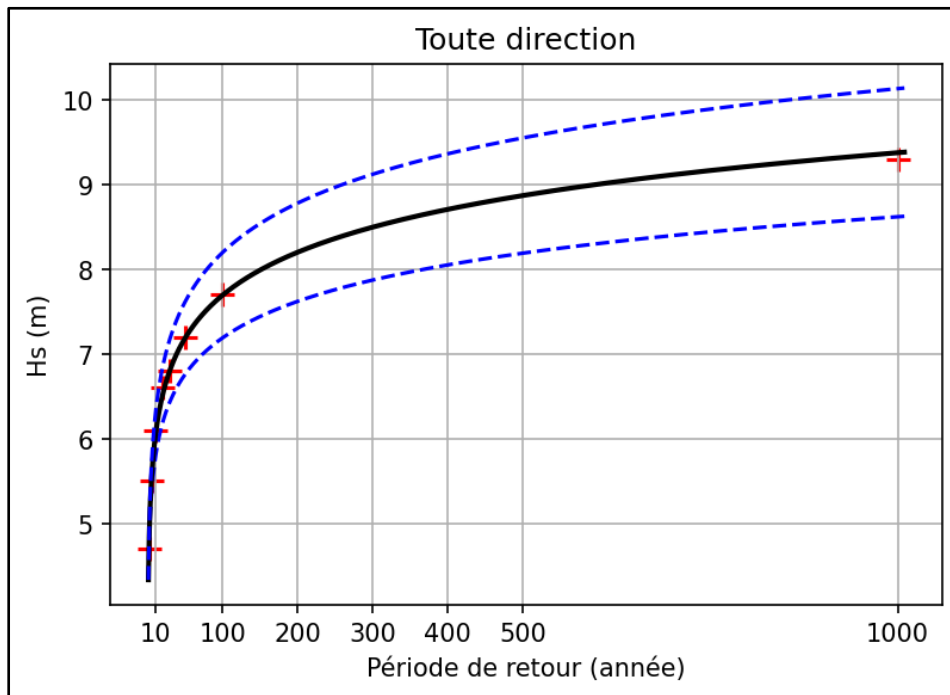


Figure II-3 Estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour l'omnidirectionnel.

II.2.1.2 Résultats GEV avec la distribution de Weibull :

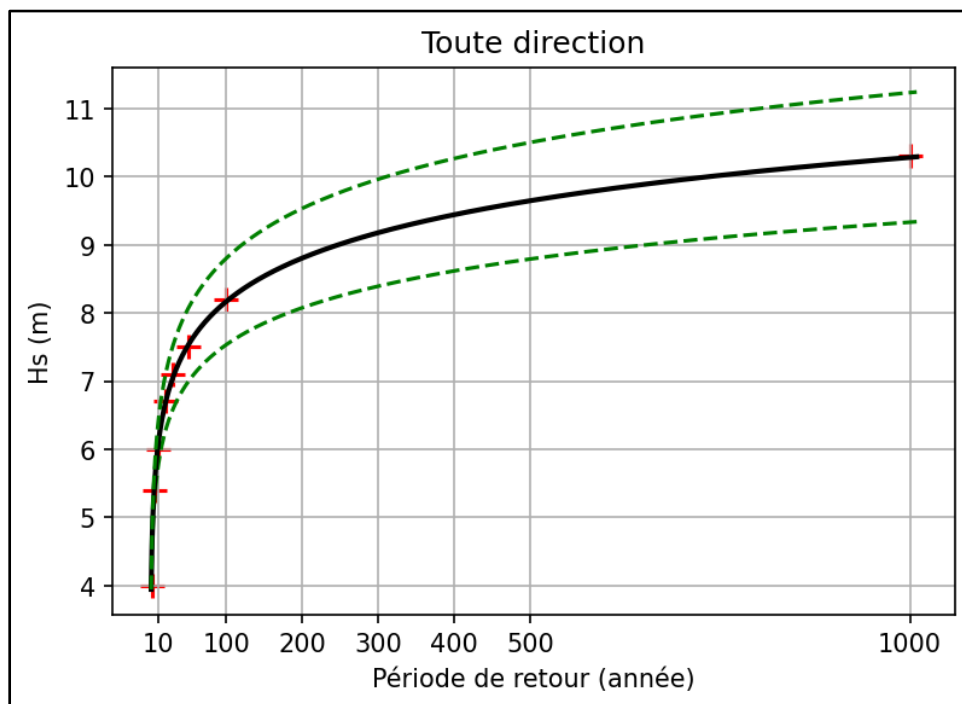


Figure II-4 Estimation des événements extrêmes via la distribution de Weibull pour l'omnidirectionnel.

Les résultats figurants dans le graphe (Figure II-4) expliqués par des traits verts qui désignent les limites de l'intervalles de confiance acceptée pour les résultats de 15% près. Les croix rouges indiquent les valeurs de hauteurs de houles pour les périodes de retour 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100 et 1000 ans.

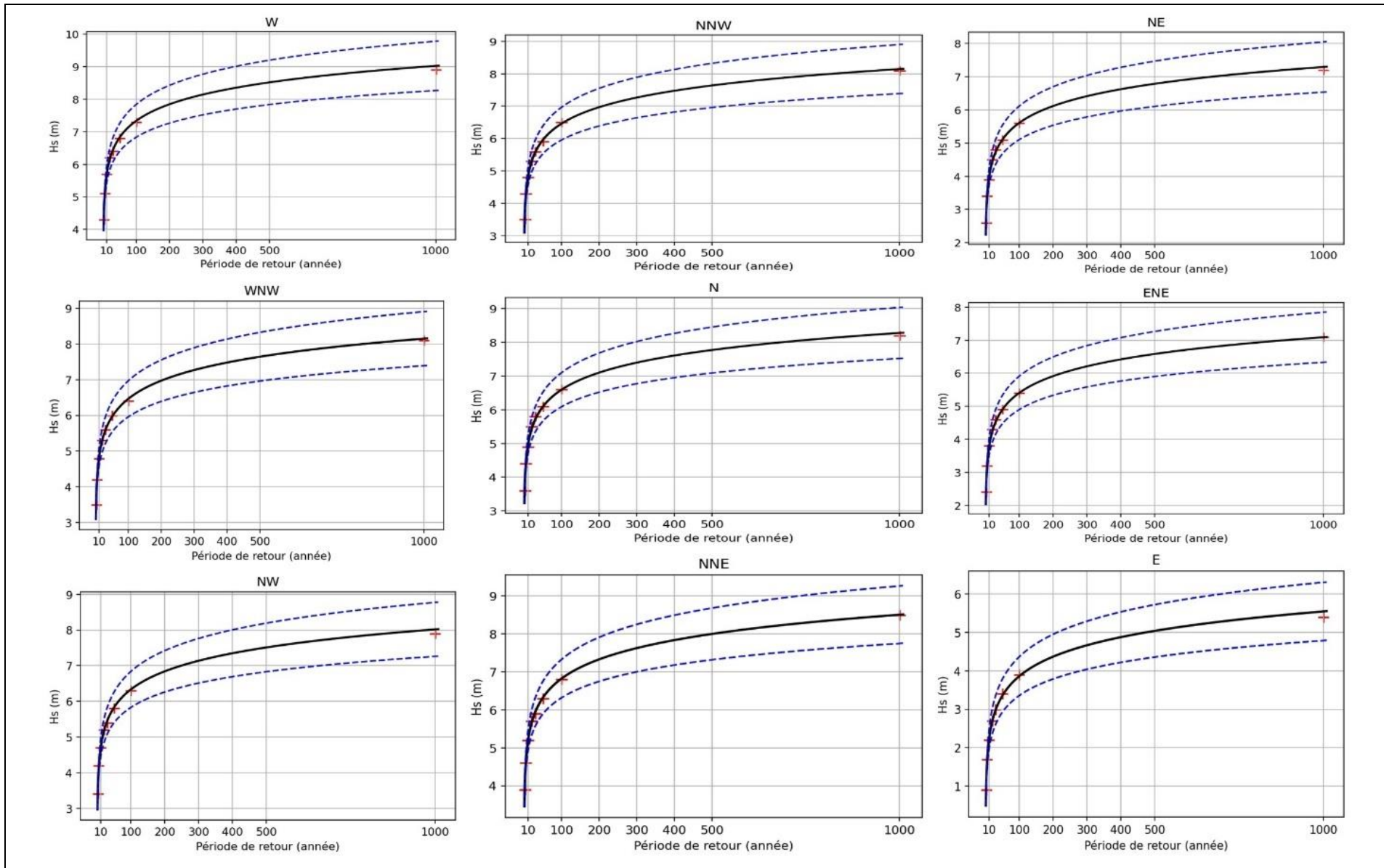


Figure II-5 Estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour chaque direction.

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

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

GEV distribution de Gumbel										
	Hauteur de vague par direction (mètre)									
Période de retour (année)	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	Omni
2	4.38	3.50	3.37	3.50	3.63	3.86	2.65	2.44	0.90	4.73
5	5.17	4.30	4.16	4.29	4.43	4.66	3.44	3.24	1.69	5.53
10	5.70	4.82	4.69	4.81	4.95	5.18	3.97	3.76	2.22	6.06
20	6.21	5.33	5.20	5.33	5.46	5.69	4.47	4.27	2.73	6.56
30	6.50	5.62	5.49	5.60	5.75	5.98	4.76	4.56	3.02	6.85
50	6.86	5.98	5.85	5.96	6.11	6.34	5.13	4.92	3.38	7.21
100	7.35	6.47	6.34	6.45	6.60	6.83	5.62	5.41	3.87	7.70
1000	8.97	8.09	7.96	8.06	8.22	8.45	7.24	7.03	5.49	9.32

A partir du Tableau II-1 représente les résultats des hauteurs de houles prédites par la distribution de Gumbel. On remarque que la direction Est la moins susceptible d'engendrer une houle extrême, autre part, les directions les plus susceptibles d'engendrer des hauteurs de houle plus élevées sont l'Ouest devant le Nord Nord Est et le Nord avec des houles extrêmes prévenant de la direction Ouest.

Par contre l'analyse des hauteurs omnidirectionnelles donne les résultats les plus grands car le modèle simule avec les hauteurs maximales qui puissent exister dans la série de données.

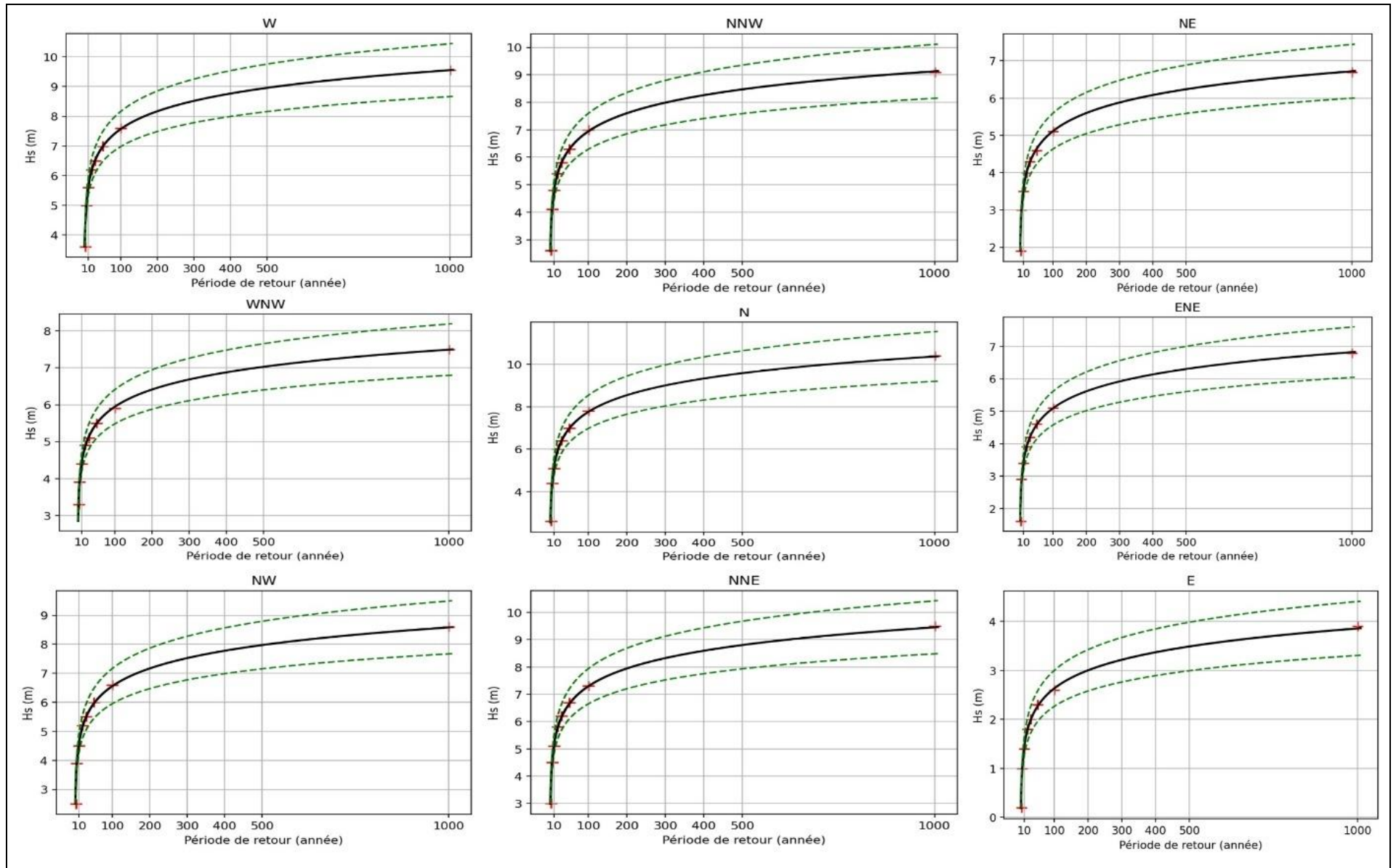


Figure II-6 Estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour chaque direction.

Afin de mieux lire les résultats obtenus par l'utilisation de la distribution de Weibull, le tableau suivant résume l'ensemble des hauteurs extrêmes obtenus selon les périodes de retour de ces évènements 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 de vague par direction (mètre)									
Période de retour (année)	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	Omni
2	3,62	2,85	2,52	2,59	2,56	2,99	1,91	1,64	0,19	3,95
5	5,00	3,93	3,93	4,11	4,38	4,49	3,03	2,85	1,04	5,42
10	5,60	4,40	4,54	4,77	5,16	5,14	3,51	3,37	1,41	6,06
20	6,19	4,87	5,15	5,42	5,95	5,79	4,00	3,89	1,78	6,69
30	6,54	5,14	5,50	5,81	6,40	6,17	4,28	4,19	1,99	7,06
50	6,98	5,48	5,95	6,29	6,98	6,65	4,63	4,58	2,26	7,53
100	7,57	5,95	6,56	6,95	7,76	7,30	5,12	5,10	2,63	8,17
1000	9,55	7,50	8,58	9,13	10,37	9,45	6,72	6,83	3,85	10,28

A partir du Tableau II-2 qui représente les hauteurs de houles prédites par la distribution de Weibull. On remarque la direction la moins susceptible d'engendrer une houle extrême est l'Est, autre part, la direction la plus susceptible d'engendrer la plus grande houle est le Nord devant l'Ouest, le Nord Nord Est et Nord Nord Ouest. Reste que l'analyse des hauteurs omnidirectionnel donne les résultats les plus grands car le modèle a travaillé avec les hauteurs maximales qui puisse exister dans la série de données, sauf pour la période de retour de 1000 ans.

Aussi, nous remarquons certaines anomalies par rapport à la période de retour de 1000 ans ou la hauteur estimée de la direction Nord dépasse celle estimée dans le cas omnidirectionnel, chose qui crée un doute sur l'application de cette distribution sur les données utilisées.

Afin de voir quelle est la distribution la plus adéquate pour notre cas d'étude (Gumbel ou Weibull). Nous avons procédé au calcul des paramètres de notre série de données. Car d'après (**Cornel Stander, 2015**) le paramètre qui détermine quelle distribution a utilisé pour la méthode GEV est le Scale (dispersion), de ce fait on :

- Scale = 0 ; c'est la distribution de Gumbel qui est la plus adéquate.
- Scale = 1 ; c'est la distribution de Fréchet qui est la plus adéquate.
- Scale = -1 ; c'est la distribution de Weibull qui est la plus adéquate

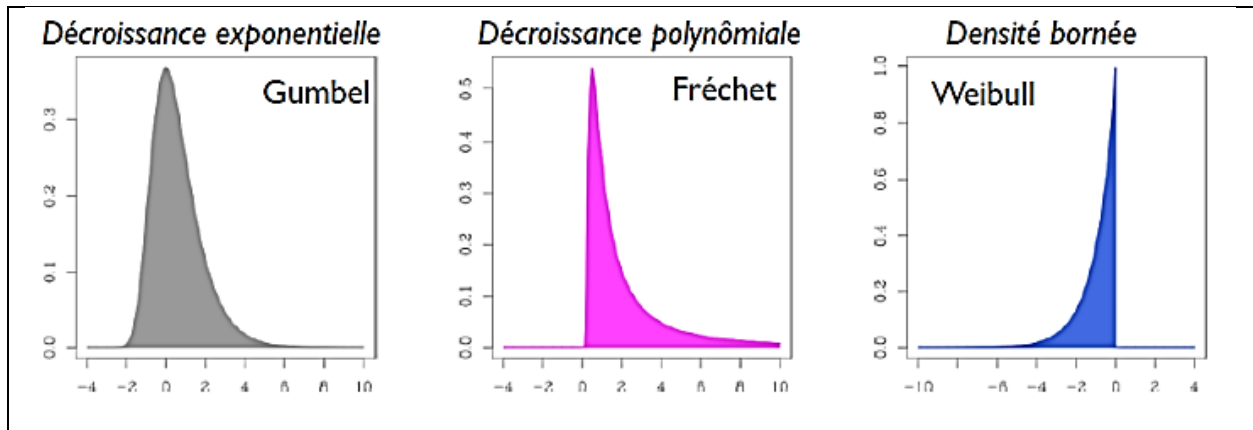


Figure II-7 représentation des distributions possible de la méthode GEV (Kh. Tilbi, 2018)

Pour calculer les paramètres de la distribution réelle de notre enregistrement, on utilise un script du langage **python** de la bibliothèque **scipy** et **scipy.stats** (voir Tableau II-3).

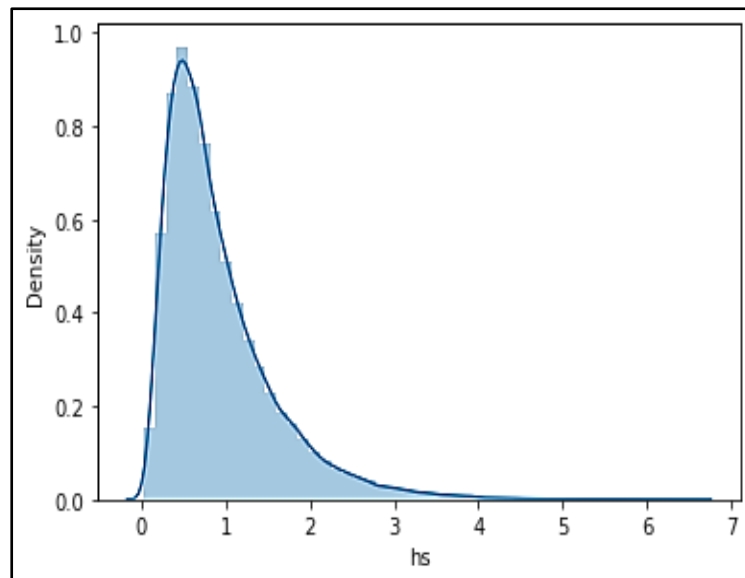


Figure II-8 Représentation graphique de la distribution des hauteurs de l'enregistrement.

Tableau II-3 Paramètres de la distribution des hauteurs enregistrées.

Paramètres calculés		
Location (position)	Scale (dispersion)	Shape (forme)
0.028	0.42	2.10

Pour procéder à la deuxième méthode (POT), nous allons opter les résultats obtenus avec la distribution de Gumbel. Par contre on néglige les résultats obtenus par la distribution de Weibull car ses dispersions obtenues pour nos enregistrements se rapprochent plus de 0 que de -1 et le graphique de la distribution des hauteurs représente une décroissance exponentielle. De plus les résultats trouvés avec la distribution de Weibull présentent quelques anomalies (soulevées au paravent)

II.2.2. Méthode Peaks Over Threshold (POT)

D'après (Tilbi. K. et al., 2018), cette méthode est basée sur l'approximation de la distribution des excès pour la loi de Pareto généralisée. De plus elle présente un avantage par rapport à la méthode des blocs, en ce sens qu'il est plus facile d'avoir un échantillon d'excès que de max. Dans la pratique, on remplace u par $X(n-k+1,n)$ qui représente la K plus grande observation de l'échantillon. Pour réaliser cette méthode, on va suivre les étapes suivantes :

1. 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.
2. Soit Y_1, \dots, Y_{N_u} un échantillon des excès au-dessus du seuil u de distribution conditionnelle

$$F_u(x) = \Pr(X - u \leq x | X > u) = \frac{F(x + u) - F(u)}{1 - F(u)} \quad \text{Équation II-4}$$

Avant de fixer le seuil, nous avons procédé au calcul de la moyenne résiduelle avec **le langage python** via la bibliothèque **pyextreme** afin de suivre ses variations et de pouvoir choisir le meilleur seuil possible. Le seuil doit être sur la ligne droite avant les variations de la moyenne résiduelle.

Le choix du seuil, c'est porté sur la valeur 3.42 m (Figure II-9).

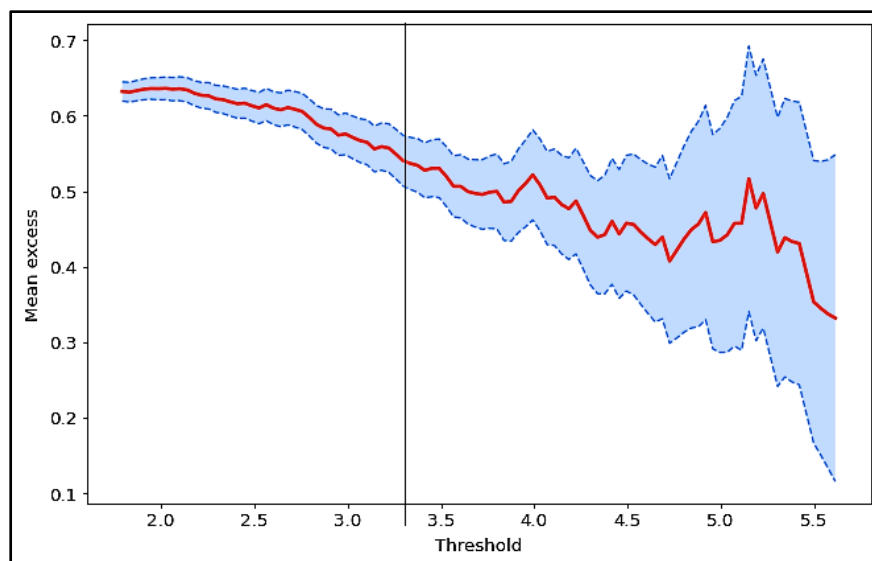


Figure II-9 Moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelle de l'enregistrement.

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

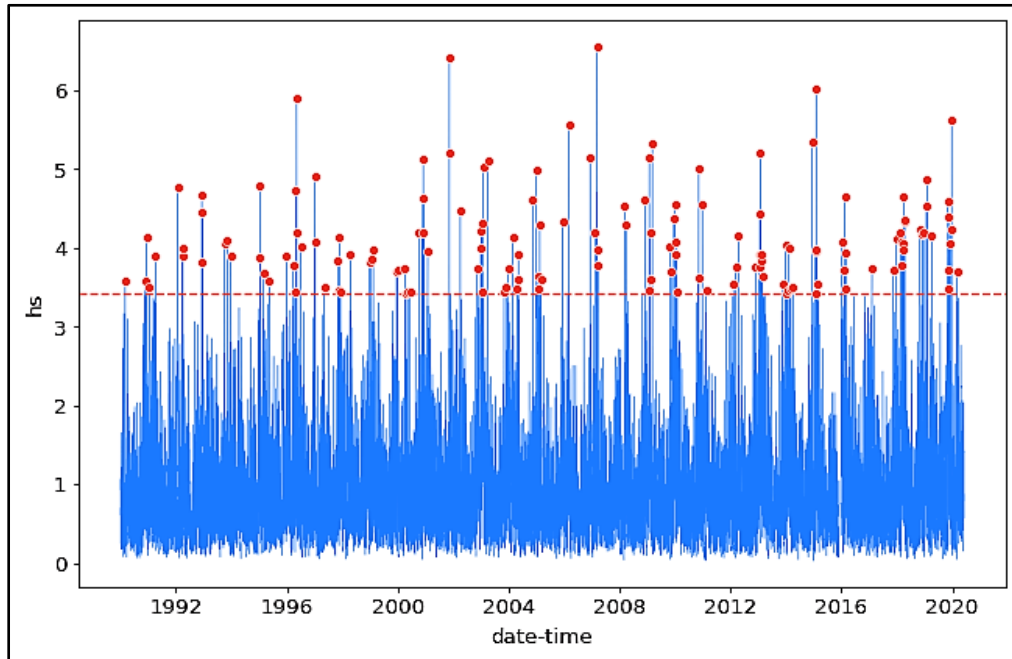


Figure II-10 Représentation de méthode POT sur les hauteurs de houle de 1990 – 2020.

L'étape de la sélection des pics terminée, on passe au calcul de hauteurs houle avec leurs périodes de retour via la même bibliothèque **pyextreme** sur le langage **python**. On obtient les résultats suivants :

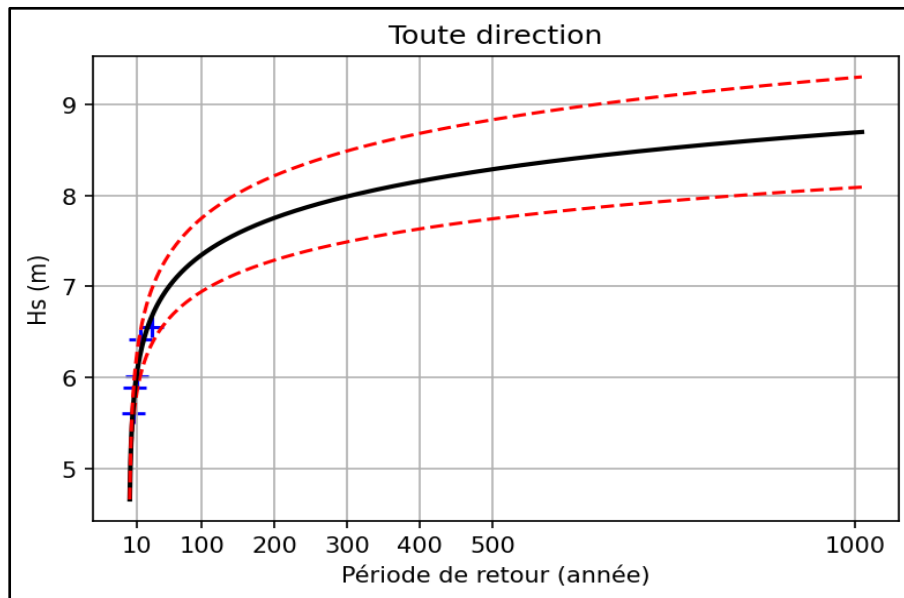


Figure II-11 Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour omnidirectionnel.

Les résultats figurants dans le graphe (Figure II-11) expliqués par des traits rouges qui désignent les limites de l'intervalle de confiance acceptée pour les résultats de 15% près. Les croix bleues indiquent les valeurs de hauteurs de houles pour les périodes de retour 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100 et 1000 ans. La même méthodologie sera appliquée pour l'ensemble des neufs autres directions. Les résultats pour chaque direction.

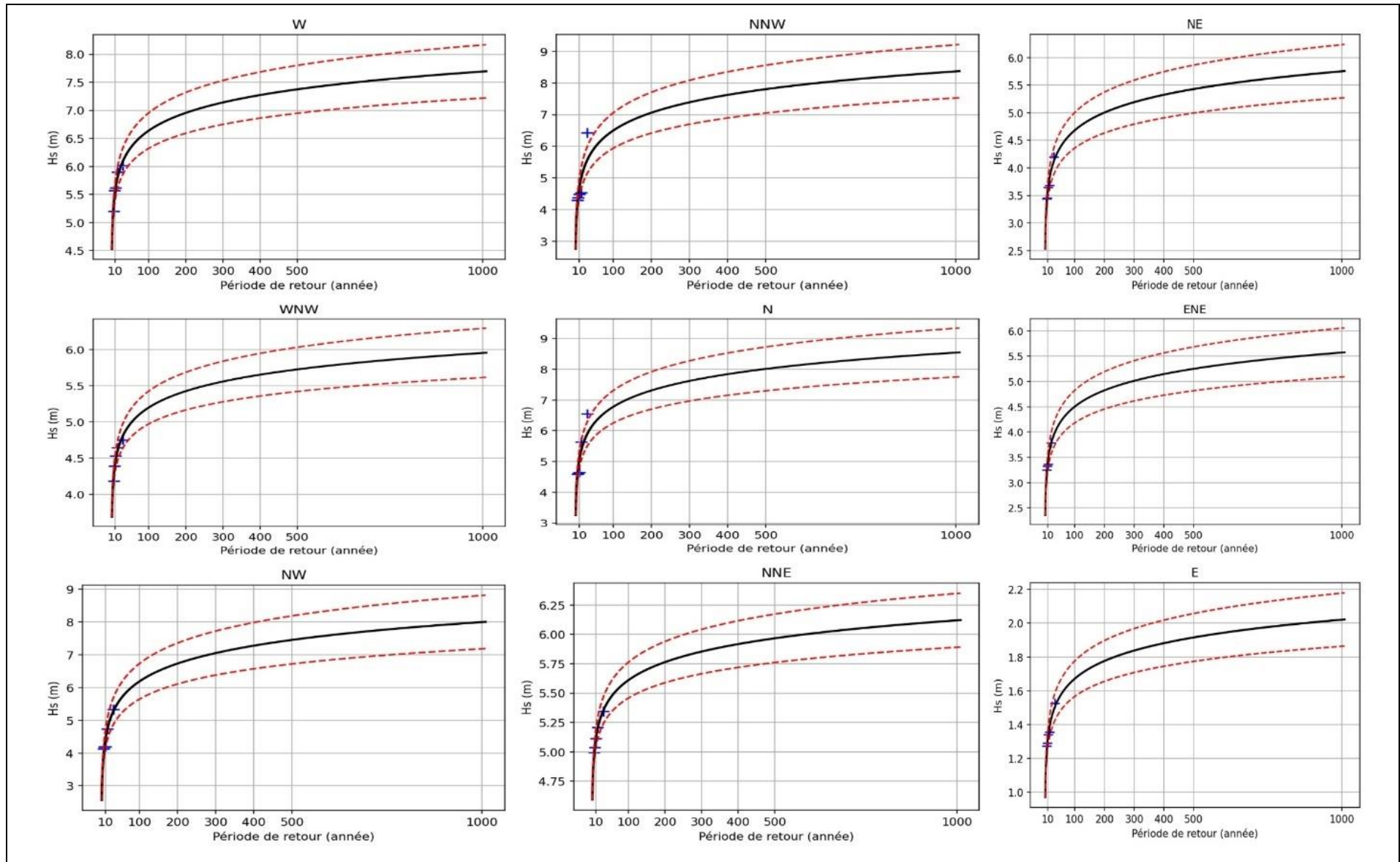


Figure II-12 Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour chaque direction.

Afin de mieux lire les résultats obtenus par la méthode POT, le tableau suivant résume l'ensemble des hauteurs extrêmes obtenus selon les périodes de retour de ces évènements extrêmes dans le futur.

Tableau II-4 Tableau résumant l'ensemble des résultats obtenu par la méthode POT.

POT										
	Hauteur de vague par direction (mètre)									
Le seuil (m)	2.98	2.74	2.83	2.92	3.01	2.74	1.65	1.63	0.97	3.42
Période de retour (année)	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	Omni
2	4.85	3.92	3.11	3.33	3.79	4.75	2.86	2.68	1.08	5.07
5	5.27	4.22	3.83	4.07	4.49	4.95	3.28	3.11	1.22	5.60
10	5.58	4.45	4.38	4.63	5.02	5.10	3.61	3.43	1.32	6.00
20	5.90	4.68	4.92	5.19	5.55	5.26	3.93	3.75	1.43	6.41
30	6.09	4.81	5.24	5.52	5.86	5.35	4.12	3.94	1.49	6.65
50	6.32	4.98	5.64	5.94	6.25	5.46	4.36	4.18	1.57	6.95
100	6.64	5.20	6.19	6.50	6.78	5.61	4.68	4.50	1.68	7.35
1000	7.69	5.96	8.00	8.37	8.54	6.12	5.76	5.57	2.03	8.70

A partir du Tableau II-4 qui représente les hauteurs de houles prédites par la méthode POT. On remarque la direction la moins susceptible d'engendrer une houle extrême est l'Est, autre part, la direction la plus susceptible d'engendrer la plus grande houle est le Nord, Nord Nord Ouest et le Nord Ouest.

Reste que l'analyse des hauteurs omnidirectionnel donne les résultats les plus grands car le modèle a travaillé avec les hauteurs maximales qui puisse exister dans la série de données.

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

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

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

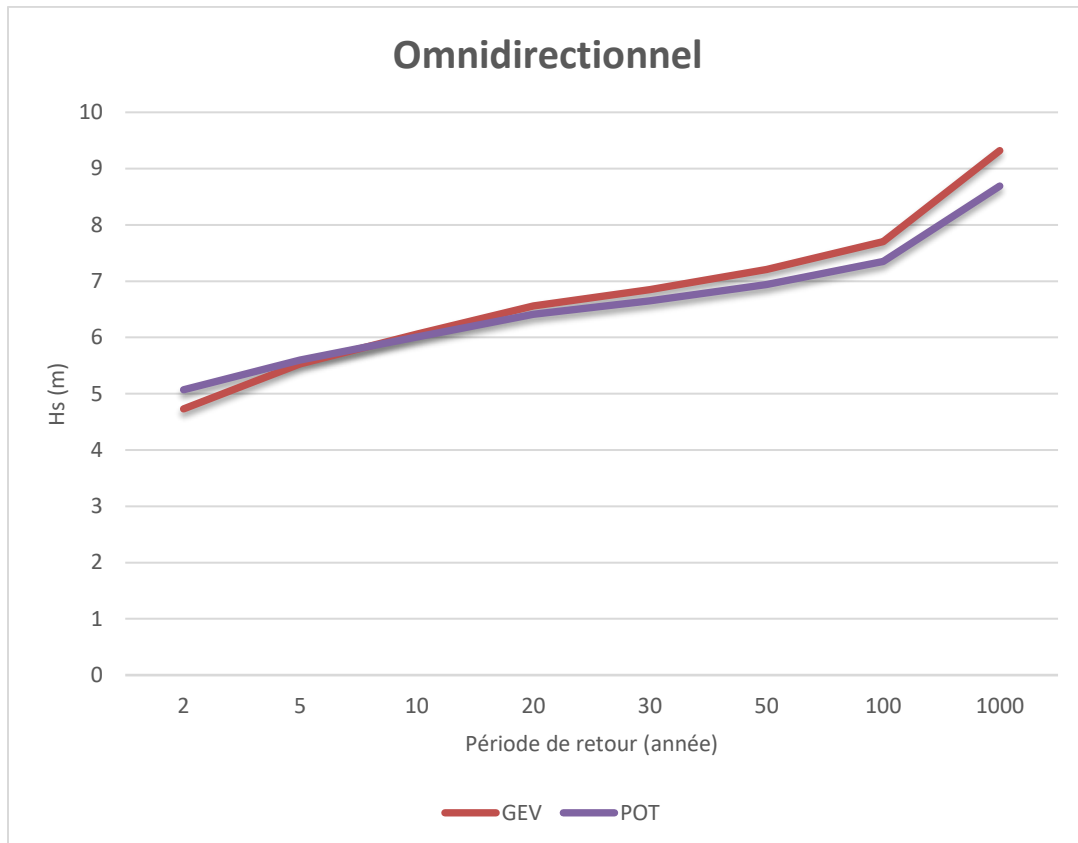


Figure II-13 Comparaison des résultats obtenu avec les deux méthode POT et GEV.

A partir de la Figure II-13, on constate que les deux méthodes ont presque les mêmes résultats à quelques dizaines de cm près. Aussi, on peut voir que la méthode GEV propose des valeurs supérieures à la méthode POT pour l'ensemble des périodes de retour dépassants les 10 ans. Par contre l'inverse c'est produit pour les petites périodes de retour ou la méthode POT propose des valeurs supérieures à GEV. Cela s'explique par le peu de données prise en compte avec la méthode blocks maxima et de leurs grandeur relative (le maximum de chaque année). Pour les résultats des deux méthodes, on obtient $R^2 = 98\%$. Ceci nous permet de valider nos résultats pour les deux méthodes.

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

II.3. Elévation du niveau de la mer liée au changement climatique :

La planète est dans une phase de réchauffement climatique fortement accentué depuis le siècle dernier par les activités anthropiques croissantes. Ce réchauffement climatique a un impact direct sur la montée du niveau marin à travers le monde, soit par la fonte des glaces ou bien par la dilatation thermique des eaux. Le rapport du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) apparu en 2019, présente les derniers résultats et model à l'horizon 2100.

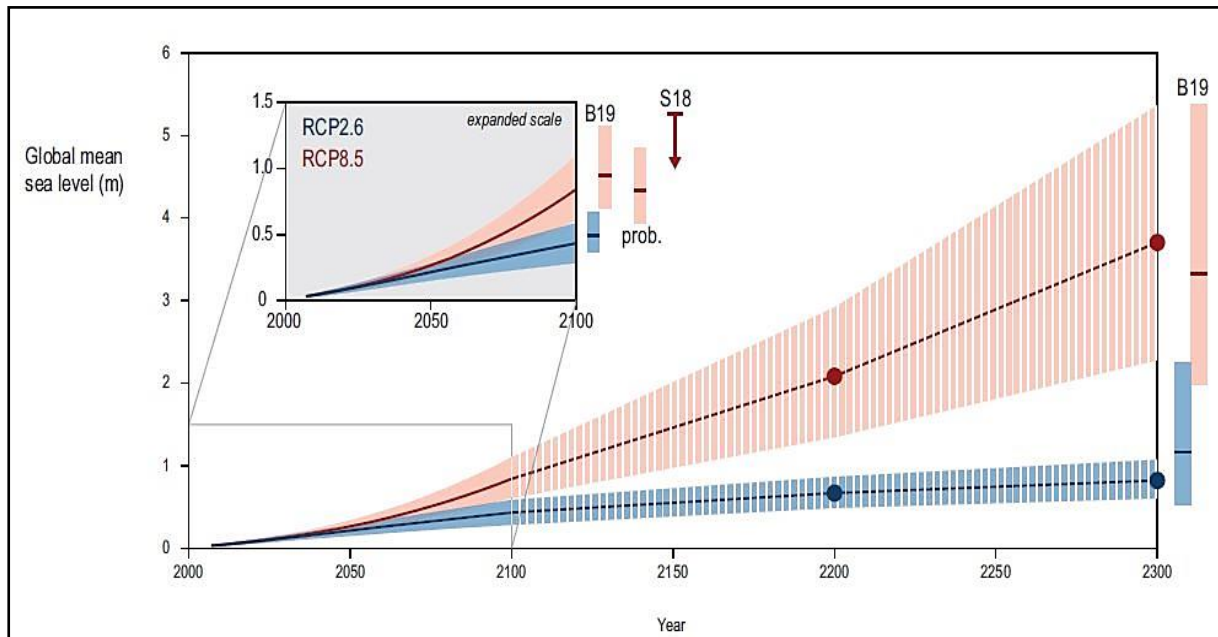


Figure II-14 Projection de l'augmentation du niveau marin jusqu'à 2300. (GIEC 2019)

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

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

Chapter III Modélisation numérique.

III.1. Introduction

Grâce aux développements remarquables de la technologie informatique et des outils d'analyse numérique, les ingénieurs et les scientifiques peuvent assurer une plus grande capacité d'investigation sur plus d'évènements. La disponibilité de la simulation numérique s'est étendue d'une moyenne transversale à une simulation tridimensionnelle combinée aux progrès de la technique de mesure sur le terrain. (J. Ahn et al, 2019)

Il existe une large gamme de logiciels de modélisation numérique disponibles pour la modélisation marine, côtière et estuarienne. De nombreux modèles ont été développés par des universités et des instituts de recherche, et des modèles ont également été développés par des entreprises privées. Certains de ces modèles ont ensuite été rendus publics et utilisés dans des projets commerciaux, tandis que certains modèles sont principalement utilisés pour la recherche dans le milieu universitaire. (A. Symonds et al, 2017)

Le modèle choisit pour les simulations de houle dans cette étude est le **DHI Mike 21**.

III.2. Présentation du modèle

Mike 21 DHI développer par l'institut hydraulique Danois est un modèle de houle spectrale basé sur la conservation de la densité de l'action d'onde qui permet de simuler la propagation des états de mer dans les domaines offshore et côtier. Le modèle inclus les effets de la réfraction et de Shoaling liés aux variations 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 et les zones d'intérêt particulier. (DHI, 2014)

Afin de pouvoir commencer les simulations, la génération d'une mesh est indispensable. Pour la création des meshes, on a utilisé l'outil (Mesh Generator) du logiciel Mike-zéro.

Mesh Generator : fournit un environnement de travail, conçu pour créer des maillages numériques à utiliser dans les modèles MIKE Zéro à maillage flexible (FM) et fixe, toutefois ce dernier permis l'imbrication de plusieurs maillages au sur la même mesh. Doter de ces modèles de nouvelle génération d'un maillage adapté est primordial pour obtenir des résultats fiables à partir des simulations du Mike.

Les méthodes d'interpolation sont valables indépendamment du type de maillage utilisé. Le générateur de maillage offre deux possibilités d'interpolation pour les éléments triangulaires. Les deux méthodes d'interpolation possibles son Voisin naturel et l'Interpolation linéaire (DHI, 2014).

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

- Système de projection adapté à la zone d'étude, dans notre cas c'est le 'WGS_84_UTM_ZONE_31',
- Le trait de côte et la bathymétrie de la zone préalablement enregistré dans un fichier .xyz.

- Un maillage de différente taille de maille et nécessaire pour avoir de bons résultats et diminuer les temps de calculs du logiciel.

MIKE SW : traite la réfraction de la houle et le shoaling, la génération par le vent, la dissipation par le frottement et le déferlement, et l'interaction houle-courant. Il s'appuie sur un maillage non structuré – type éléments finis, et de plus considère la dissipation par moutonnement et les interactions non linéaires entre les différentes composantes de la houle.

Équations en eaux peu profondes

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

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad \text{Équation III-1}$$

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

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial \eta p}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \\ \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \end{aligned} \quad \text{Équation III-3}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \\ \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \end{aligned} \quad \text{Équation III-4}$$

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 ; S_{xx}, S_{xy}, S_{yx} et S_{yy} sont des composantes du tenseur radial. v_t 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 et (u_s, v_s) est la vitesse à laquelle l'eau est rejetée dans l'eau ambiante.

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

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad \text{Équation III-5}$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad \text{Équation III-6}$$

A est la viscosité horizontale.

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

A $z = \eta$:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 v_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad \text{Équation III-7}$$

A $z = -d$:

$$u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 v_t} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad \text{Équation III-8}$$

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 :

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad \text{Équation III-9}$$

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

Les quatre vitesses de propagation caractéristiques sont données par :

$$(c_x, c_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}_g + \vec{U} \quad \text{Équation III-10}$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial\sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla_{\vec{x}} d \right] - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \quad \text{Équation III-11}$$

$$(c_x, c_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}_g + \vec{U} \quad \text{Équation III-12}$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial\sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right] \quad \text{Équation III-13}$$

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

MIKE HD : résout les équations bidimensionnelles classiques de Saint-Venant, sur maillage structuré ou non structuré, en tenant compte du frottement sur le fond, de l'effet des événements météorologiques (vent et gradient de pression atmosphérique), de la force de Coriolis, de différentes modélisations de la turbulence de l'écoulement et de la variation de géométrie du domaine au cours du temps (zones couvrantes et découvrantes au cours des variations de marée). Il permet également de calculer les courants littoraux en prenant en compte les contraintes de radiation dues à la houle dans la zone de déferlement.

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

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = hS \quad \text{Équation III-14}$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial hvu}{\partial y} = fvh - gh \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_w}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + hu_s S \quad \text{Équation III-15}$$

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

Équation III-16

Où :

- t : Temps ;
- x, y, z : Coordonnées cartésiennes ;
- η : Hauteur de la surface ;
- d : Profondeur de l'eau ;
- h : Profondeur totale de l'eau, $h = \eta + d$;
- f : Paramètre de Coriolis, $f = 2\Omega \sin \theta$;
- Ω : vitesse angulaire de révolution ;
- θ : Latitude géographique ;
- ρ_w : Densité de l'eau ;
- p_a : Pression atmosphérique ;
- ρ_0 : Densité de référence de l'eau ;
- u, v, w : Composantes de la vitesse du courant dans les directions x, y , et z ;
- $S_{xy}, S_{yx}, S_{xx}, S_{yy}$: Composantes du tenseur de rayonnement ;
- ν_t, A : Viscosités turbulentes verticale et horizontale, respectivement ;
- S : Amplitude de la décharge causée par des sources ponctuelles ;
- (u_s, v_s) : Vitesses par laquelle l'eau est déchargée dans l'eau ambiante ;

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

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

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

Équation III-17

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

Équation III-18

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

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial u}{\partial x'} \quad \text{Équation III-19}$$

$$T_{xy} = A \left(\frac{\partial u}{\partial y'} + \frac{\partial v}{\partial x'} \right) \quad \text{Équation III-20}$$

$$T_{yy} = 2A \frac{\partial v}{\partial y} \quad \text{Équation III-21}$$

III.3. Méthodologie du travail

III.3.1. Génération de la mesh

Pour minimiser les erreurs lors des simulations à venir, celles relative aux limites qui peuvent influencer les résultats, le choix de travailler avec une échelle régionale a été adopté.

L'échelle régionale : couvrant près de 40 Km de part et d'autre de la marina, incluant toute la zone de l'Algérois (de la baie de Bousmail à l'Ouest jusqu'à la baie de Zemmouri à l'Est, en passant par la baie d'Alger) et une distance de 35 Km au nord de la marina. Cette échelle a été adoptée afin de pouvoir intégrer la station de mesure de données de houle qui se situe aux coordonnées suivantes : 37° Nord et 3° Est. Cette dernière propose une précision plus importante de la bathymétrie dans la baie et un trait de côte avec les différents ouvrages susceptibles de modifier le mouvement des eaux, et ainsi voir l'impact hydrodynamique de la houle sur la marina.

III.3.1.1 Données bathymétriques d'entrées pour la mesh

Cette bathymétrie est la combinaison des données de trois sources (Données du terrain, NAVIONICS et GEBCO).

Pour la marina, des données bathymétriques de l'ensemble du projet ont été disponible pour l'intérieur du bassin et l'extérieur des ouvrages de protection.

La bathymétrie de la baie d'Alger a été obtenu par la digitalisation de la carte publiée par NAVIONICS SonarChart™, édition 2021 à l'échelle de 1/250000 avec une résolution qui varie entre 100 et 0,5m du large vers la cote (ALEM.A et SAF.B, 2021).

Pour cette mesh la bathymétrie au large (inférieur à -200 m de profondeur) est obtenu à partir de la base de données GEBCO. Cette dernière, a été complété avec une bathymétrie issue de la digitalisation des cartes marine de la région centre algérienne et la bathymétrie à échelle de baie précédemment développée.

Pour cela on a utilisé le logiciel **ArcGIS 10.3** qui est une suite de logiciels d'information géographique (SIG) développés par la société américaine Esri (Environmental Systems Research Institute). Il est composé de plusieurs modules connectés entre eux (ArcMap, ArcScène, ArcCatalogue, ...).

L'utilisation des données bathymétriques sur Mike21, nécessite la transformation du shapfile d'ArcMap de la bathymétrie en fichiers XYZ, avec l'outil de conversion d'ArcToolBox.

Suite à la génération de la mesh, une interpolation des points de la bathymétrie selon le maillage de la mesh est nécessaire.

Les méthodes d'interpolation sont variables indépendamment du type de maillage utilisé. Le générateur de maillage offre deux possibilités d'interpolation pour les éléments triangulaires. Les deux méthodes d'interpolation possibles sont le voisin le plus proche et l'Interpolation linéaire (DHI, 2014).

Dans notre cas, on a choisi la méthode d'interpolation du voisin le plus proche.

III.3.1.2 Mesh et Bathymétrie résultante

Se compose de 9 227 nœuds et 17 707 éléments triangulaires avec un pas variant de 20 m auprès de la marina à 5 Km au large. Une dégradation du maillage est faite sur six zones prédéfinies (Figure III-1 et Figure III-2).

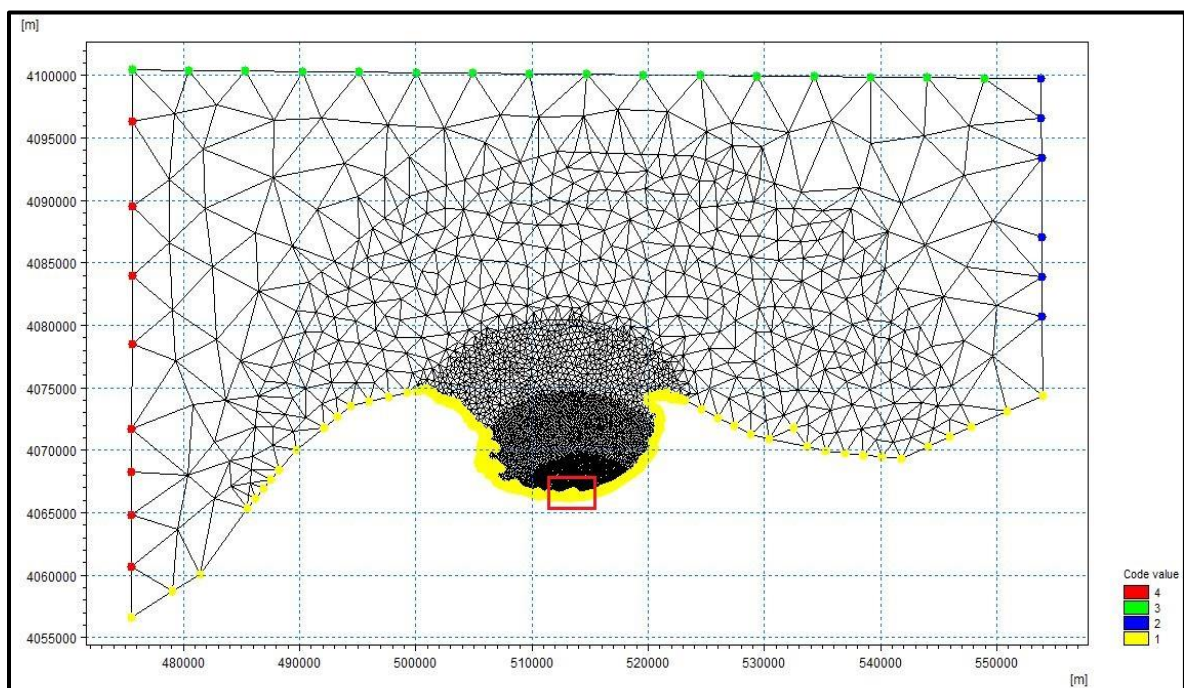


Figure III-1 Maillage de la mesh à échelle de la région de l'algérois.

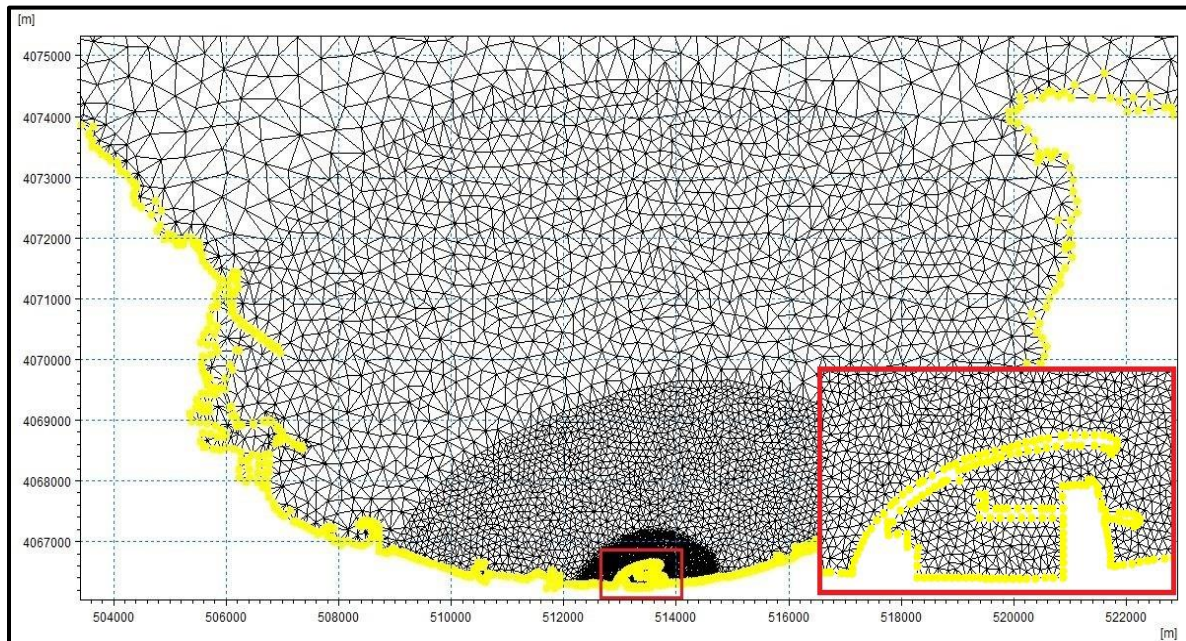


Figure III-2 maillage de la mesh à échelle de la baie d'Alger et de la marina.

Après l'interpolation de la mesh, on obtient une bathymétrie de la zone centre algérienne, allant jusqu'à la pleine abyssale de la méditerranée (Figure III-3).

III.3.2. Bathymétrie dans la baie d'Alger

La bathymétrie dans la baie d'Alger est subdivisée en trois zones distinctes :

Les zones Est et Ouest, près des caps, se caractérisent par une forte pente, ceci est due à la géomorphologie du cap généralement d'une lithologie plus dure et plus résistante (falaises), aussi les effets hydrodynamiques font que les caps sont des zones à fort potentiel énergétique (les orthogonales de la houle se converge près des cap) ; car on observe le passage de la côte à l'isobathe -50 m se fait sur une petite distance par rapport à la côte des deux côtés de la baie d'Alger.

La zone centrale de la baie d'Alger est caractérisée par une pente faible dans son ensemble. Ce pendage faible est dû nécessairement à la lithologie de cette partie plus friable et plus meuble (présence de plage sablonneuse alimentées par les apports terrigènes des deux oueds de la baie), aussi elle est due aux effets de la houle qui moins énergétiques dans cette partie.

Pour la partie au large de la baie d'Alger, on aperçoit la fin du plateau continental directement à la sortie de la baie. Ceci est caractérisé par les isobathes serrées, ce qui confirme ce qui a été dit dans la partie échelle régionale sur la morphologie globale de la région centre algérienne.

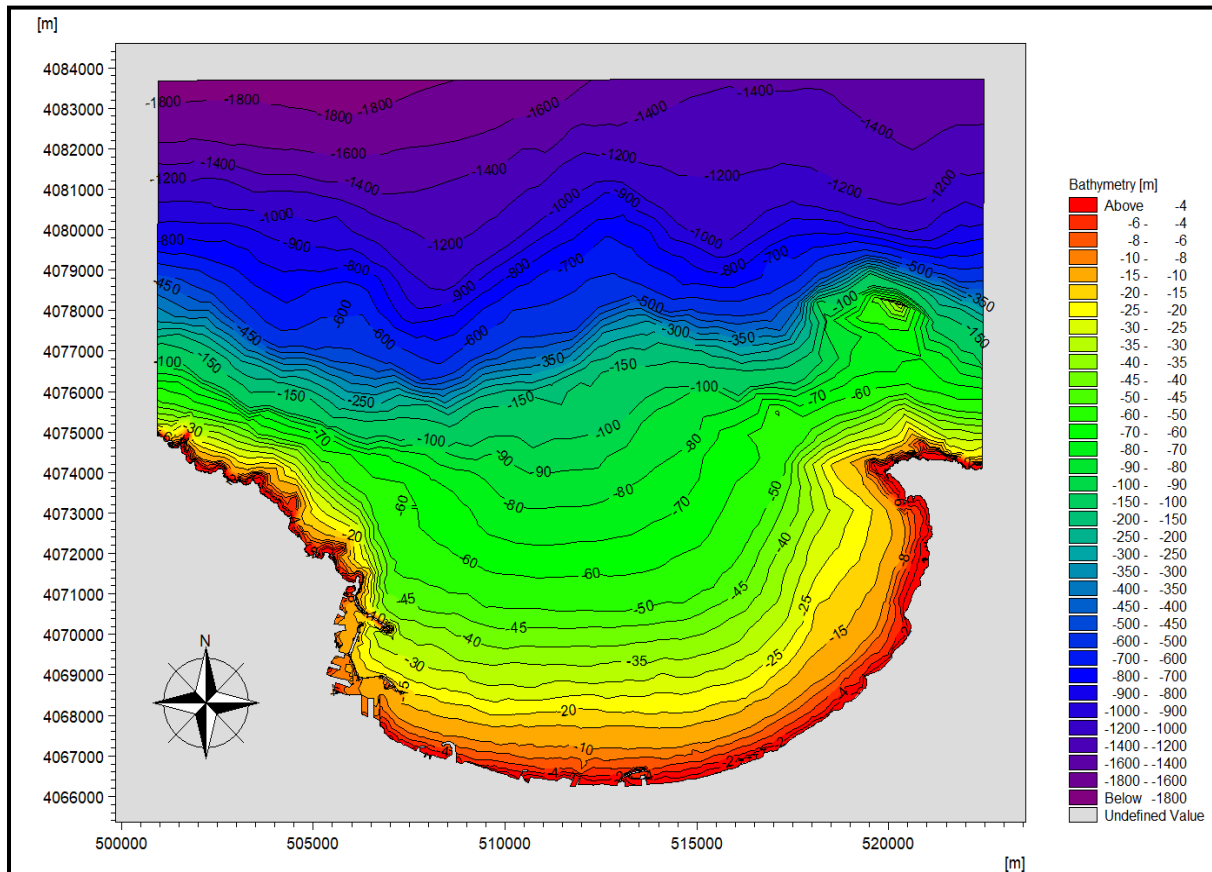


Figure III-3 Bathymétrie de la baie d'Alger.

III.3.2.1 Bathymétrie dans la zone de la marina

La Figure III-3 nous montre deux parties distinctes, qui subissent des actions hydrodynamiques et hydro-sédimentaire différentes. Pour cela on va les déviser notre interprétation en deux zones :

III.3.2.1.1 L'intérieur du Marina

Dans l'ensemble de bassin, les profondeurs varie entre -0.8m et -5.2m.

On remarque que les profondeurs les plus petites (entre -0.8 et -2m) se trouve au niveau de l'enracinement. On peut expliquer cette faible profondeur par la géomorphologie d'origine du bassin, il peut être la continuation d'une roche.

La bathymétrie dans le reste du bassin varie entre -2m et -5.2m, avec une pente douce entre le quai cotée terre-plein et le quai a pieux. Une pente un peu plus douce entre le quai a pieux et la digue principale.

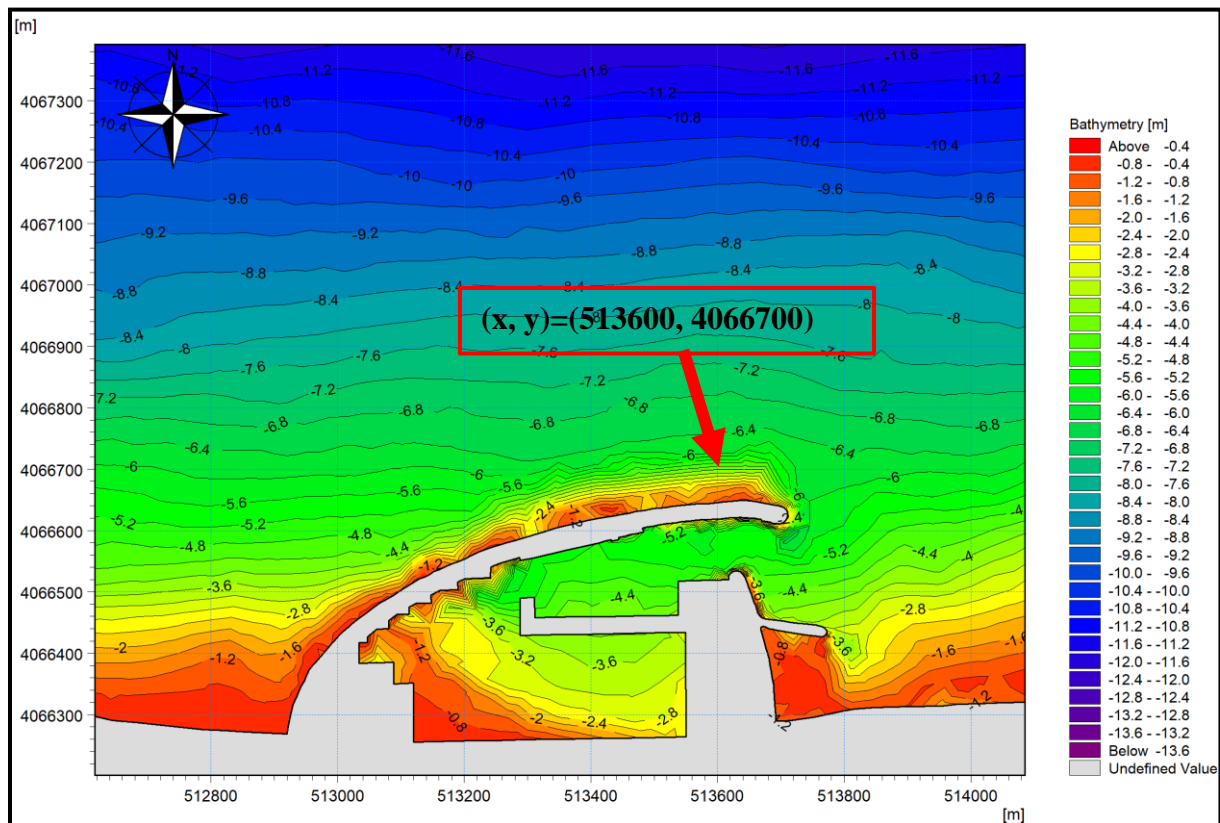


Figure III-4 Bathymétrie de la Marina Bay d'Alger

III.3.2.1.2 L'extérieur du Marina

Dans la partie externe de la jetée on a sur quelques points des profondeurs très petites qui peuvent être expliqués par les dépôts des matériaux de la construction, aussi par rapport à la butée, les isobathes sont très serrées entre -1.2 m jusqu'à -6 m car la pente de digue est 2/3.

En allant vers le large de la jetée principale, on est encore dans le plateau continental avec une pente douce.

A l'Est de la Marina on remarque une accumulation, expliquée par la jetée secondaire qui bloque le transport sédimentaire longitudinal à son niveau. Les isobathes sont à intervalle régulier entre -1.6m et -6 m dans cette partie, qui signifie une pente douce et uniforme.

A l'Ouest du la Marina on remarque aussi la présence d'accumulation, malgré le transport sédimentaire bloquer dans le cotée Est. En fait cette accumulation est due aux apports d'Oued el Harrach plus à l'Ouest qui alimente cette région. Les isobathes sont tout comme le côté Est, équidistantes moyenne de -1.6 m jusqu'à -10 m, avec une pente uniforme et douce.

III.4. Directions pénalisantes

La configuration de la baie d'Alger orientée plein Nord et la position centrale de la marina au sein de cette dernière fait que la marina est naturellement abritée des assauts directs des houles d'Est et celle de l'Ouest, comme le montre la Figure I-4 (points extraction chapitre 1).

Comme le montre la Figure III-5, la marina d'Alger est impactée par les houles dont la direction varie de 310° à celles de 40° en passant les houles de direction Nord.

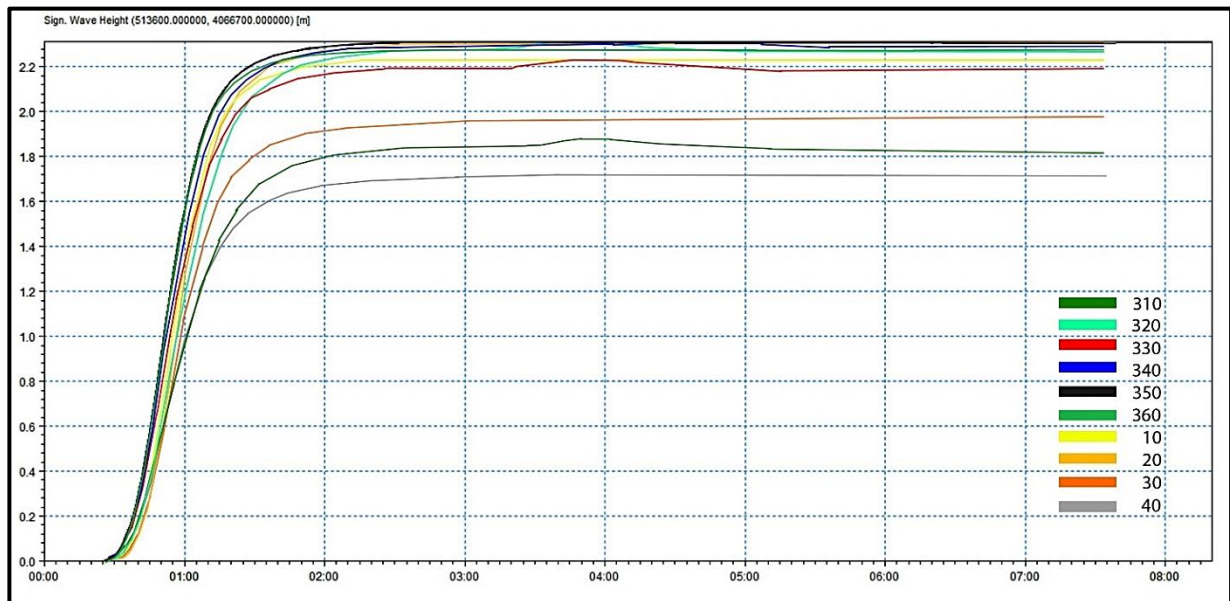


Figure III-5 Hauteur de plusieurs houles de direction différentes pour déterminer les directions pénalisantes.

Afin de voir les directions les plus pénalisantes pour la marina et se concentrer dessus pour la suite des calculs de la performance hydraulique de la digue, plusieurs simulations de houle allant de 310° à 40° ont été faites pour une houle de base dont la hauteur est de 2.5 m et la période était de 12 s, avec une configuration de 300 step et un intervalle de 100 s.

Le pas choisi est de 10° , de ce fait, 9 simulations ont résulté.

Pour une meilleure interprétation des résultats obtenus, un point d'extraction a été fixé à 50 m devant la digue principale de la marina aux coordonnées (x, y) suivantes (513600, 4066700) montré dans la Figure III-4

Les résultats obtenus sont dans la figure au-dessus. On distingue, la dominance des directions NW, NNW, N et NNE comme directions les plus pénalisantes pour cet ouvrage vu la hauteur de houle importante qui arrive via les houles incidentes de ces directions (les houles conservent en moyenne 90 % de leurs hauteurs initiales au large).

III.5. Simulations et résultats

III.5.1. Scénarios de simulation

Une fois les directions pénalisantes sont détectées et les événements extrêmes calculé (chapitre précédent). La méthode choisie est d'associer pour chaque période de retour d'un événement la plus grande hauteur de houle à l'ensemble des 4 directions pénalisantes, ainsi, l'élévation du niveau marin (rapport du GIEC 2019) et voir les résultats (Tableau III-1) obtenus pour les houles et la courantologie sur les quatre directions.

Tableau III-1 Tableau des inputs des simulations pour l'ensemble des périodes de retours.

Période de retour (ans)	Paramètres du vents	Paramètres de la houle				Niveau de la mer (m)
		NW	NNW	N	NNE	
	U10 (m/s)	8.31	6.88	6.61	6.39	
	DirU10 (°)	313.21	336.44	359.8	22.66	
2	Hs (m)	4.75	4.75	4.75	4.75	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
	Tp (s)	9.3	9.3	9.3	9.3	
5	Hs (m)	4.95	4.95	4.95	4.95	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
	Tp (s)	10.2	10.2	10.2	10.2	
10	Hs (m)	5.5	5.5	5.5	5.5	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
	Tp (s)	11.1	11.1	11.1	11.1	
20	Hs (m)	5.55	5.55	5.55	5.55	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
	Tp (s)	10.4	10.4	10.4	10.4	
30	Hs (m)	5.86	5.86	5.86	5.86	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0.25 m Totale = 0.59 m
	Tp (s)	10.1	10.1	10.1	10.1	
50	Hs (m)	6.25	6.25	6.25	6.25	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0.30 m Totale = 0.64 m
	Tp (s)	11.3	11.3	11.3	11.3	
100	Hs (m)	6.78	6.78	6.78	6.78	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0.45 m Totale = 0.79 m
	Tp (s)	11.3	11.3	11.3	11.3	
1000	Hs (m)	8.54	8.54	8.54	8.54	NGA = +0.34 m Elévation futur = 1 m Totale = 1.34 m
	Tp (s)	12.3	12.3	12.3	12.3	

Note :

Il est à signaler, que toutes les modélisations ont été associées à un vent constant pour chaque direction (voir Tableau III-1). Les vitesses et directions moyennes du vent ont été obtenues après le traitement d'un enregistrement de 1992 à 2019 de la base de données WaveClimat dans la baie d'Alger.

Car le couplage d'un vent d'une période de retour avec une houle de la même période de retour, donne des résultats largement surestimés. Pour l'exemple, le couplage d'une houle et un vent de 100 ans, nous permet de calculer un scénario qui se produit une fois tous les 10000 ans (chose illogique vu la durée de vie des ouvrages maritimes qui est en moyenne de 100 à 150 ans).

La solution qui a été proposée est la détermination d'une probabilité d'occurrence des couples vents/houles, appelé communément la probabilité conjointe ou croisée. (Abid et al 2020)

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

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

- Un point au pied de l'ouvrage (devant le musoir) : X = 513550 m ; Y = 4066668 m.
- Un point au centre de la baie d'Alger : X = 513550 m ; Y = 4072000 m.

III.5.2. Résultats des simulations pour la période de retour 2 ans

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau III-2 et Figure III-6 Figure III-7 et Figure III-8

On constate que les houles au large gardent plus de 90 % de leurs hauteurs initiales de 4.75 m aux frontières du modèle, ceci est dû à la grande profondeur d'eau présente au large de la baie d'Alger

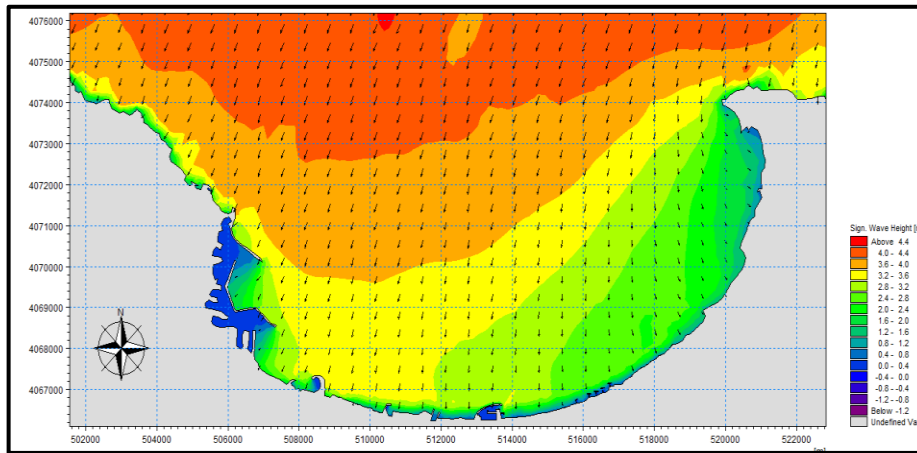
avec un coefficient de shoaling ($K_s = \frac{Hs_{local}}{Hs_{large}}$) proche de 1.

Dès que la houle entre dans la baie la hauteur et la puissance de cette dernière commence à diminuer progressivement, ceci est causé par la morphologie sous-marine de la baie (réduction de la profondeur) ; l'onde de houle est freinée par le fond sur lequel elle perd de l'énergie par l'action mécanique de friction.

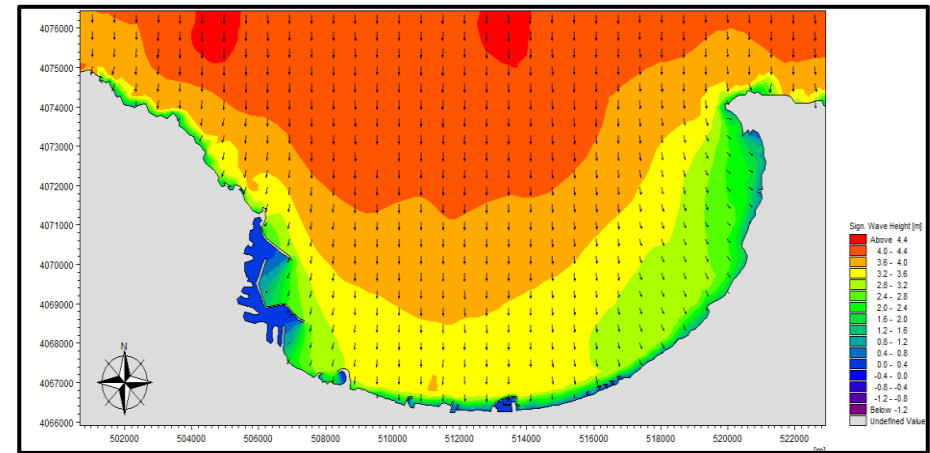
Aussi, on remarque que la marina n'est pas protégée directement par le cap Matifou à l'Est et le port d'Alger à l'Ouest pour les directions simulées. Néanmoins, la bathymétrie de la zone fait que les houles qui arrivent au pied de l'ouvrage sont de l'ordre de 2.10 et 2.30 m avec un coefficient de Shoaling en moyenne de 0,46 ce qui indique que la houle a perdu de son intensité de moitié.

Tableau III-2 Résultats des simulations de la houle pour la période de retour 2, 5, 10 et 20 ans.

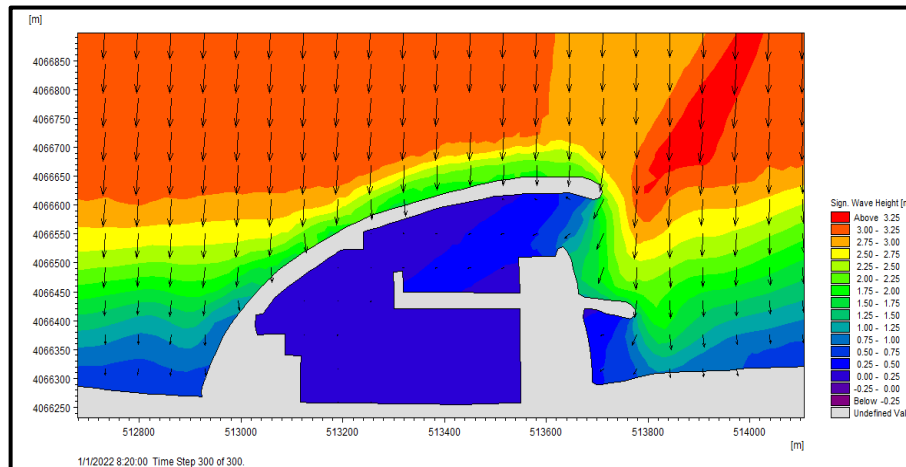
Situation du point d'extraction des caractéristiques de la houle		Point au pied de l'ouvrage X = 513550 m ; Y = 4066668 m					Point au centre de la baie d'Alger X = 513550 m ; Y = 4072000 m				
Période de retour	Directions simulées	Hs (m)	Coefficient de Shoaling (%)	Tp (s)	Direction (°)	WavePower (KN/m)	Hs (m)	Coefficient de Shoaling (%)	Tp (s)	Direction (°)	WavePower (KN/m)
2 ans	NNE (22.5°)	2.08	44	9.5	2	13	3.82	80	9.3	16	65.8
	N (360°)	2.34	49	9.5	360	17	4.04	85	9.3	359	74
	NNW (337.5°)	2.30	48	9.5	352	16	3.96	83	9.3	340	71
	NW (315°)	2.13	45	9.5	346	14	3.65	77	9.3	325	59
5 ans	NNE (22.5°)	2.40	48	10.4	2	17.5	4.12	83	10.2	16.1	83.5
	N (360°)	2.53	51	10.3	357	19.8	4.36	88	10.2	358	93
	NNW (337.5°)	2.52	51	10.3	352	19.6	4.29	87	10.2	340	91
	NW (315°)	2.22	45	10.4	346	15.2	3.95	80	10.2	323	76
10 ans	NNE (22.5°)	2.59	47	11.2	2	20.5	4.36	79	11.1	16	102
	N (360°)	2.65	48	11.2	357	22	4.61	84	11.1	358	113.5
	NNW (337.5°)	2.64	48	11.2	352	22	4.54	83	11.1	341	110
	NW (315°)	2.45	44	11.3	347	19	4.17	76	11.1	323	91
20 ans	NNE (22.5°)	2.55	46	10.5	1	20	4.53	82	10.3	16	103
	N (360°)	2.57	46	10.5	358	21	4.79	86	10.3	359	116
	NNW (337.5°)	2.57	46	10.5	352	20.6	4.71	85	10.3	340	112
	NW (315°)	2.43	44	10.6	346	18.5	4.33	78	10.3	323	93



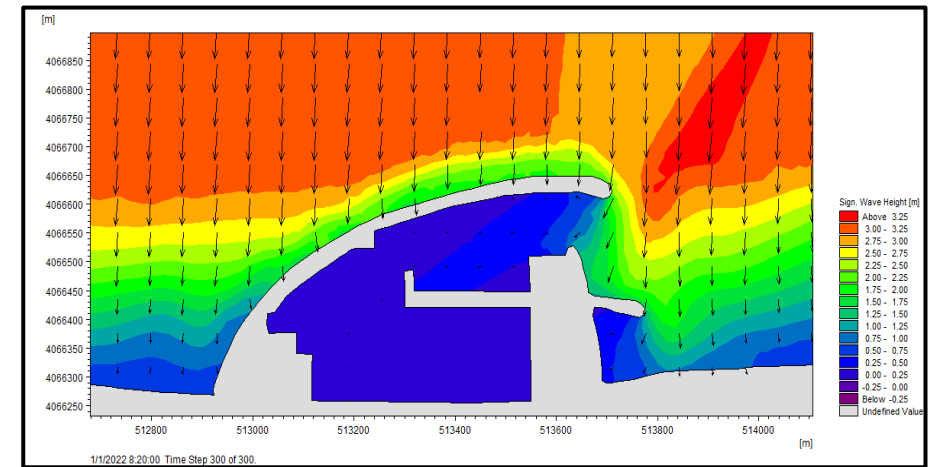
Champs des houles dans la Baie d'Alger de direction NNE (paramètres de houle pour une période de retour de 2 ans).



Champs des houles dans la Baie d'Alger de **direction N** (paramètres de houle pour **une période de retour de 2 ans**).

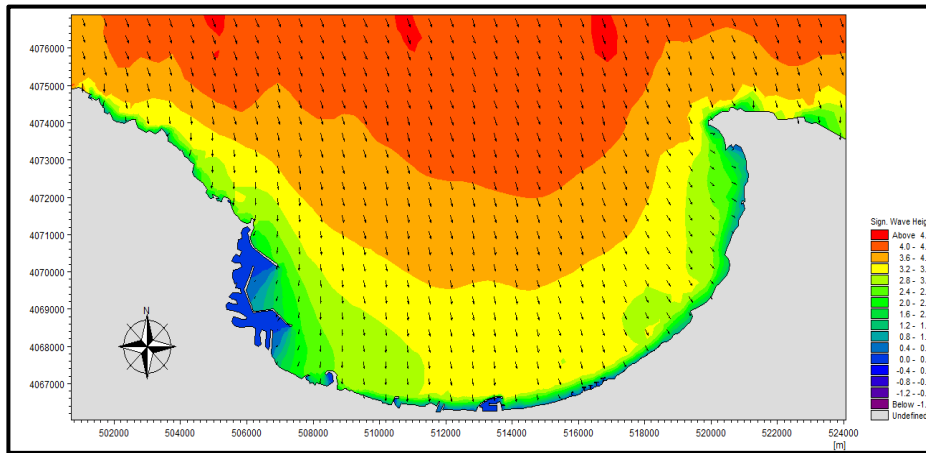


Champs des houles dans la zone de la marina d'Alger de **direction NNE** (paramètres de houle pour **une période de retour de 2 ans**).

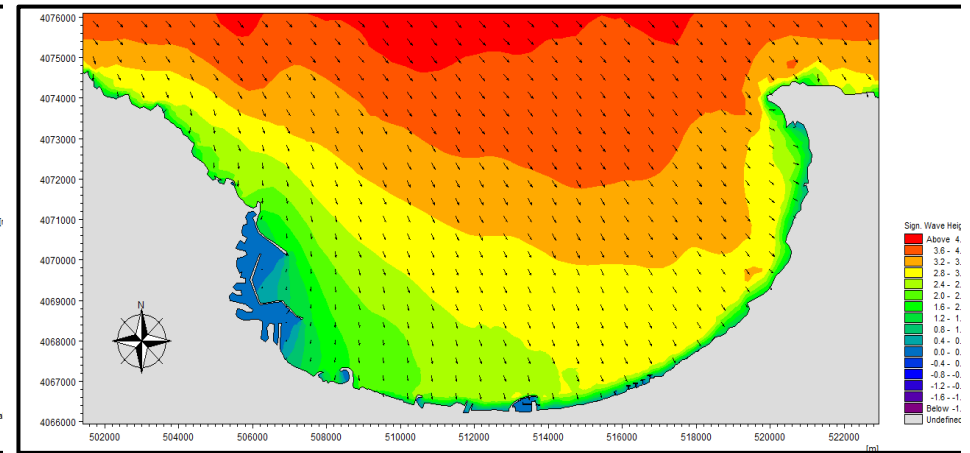


Champs des houles dans la zone de la marina d'Alger de **direction N** (paramètres de houle pour **une période de retour de 2 ans**).

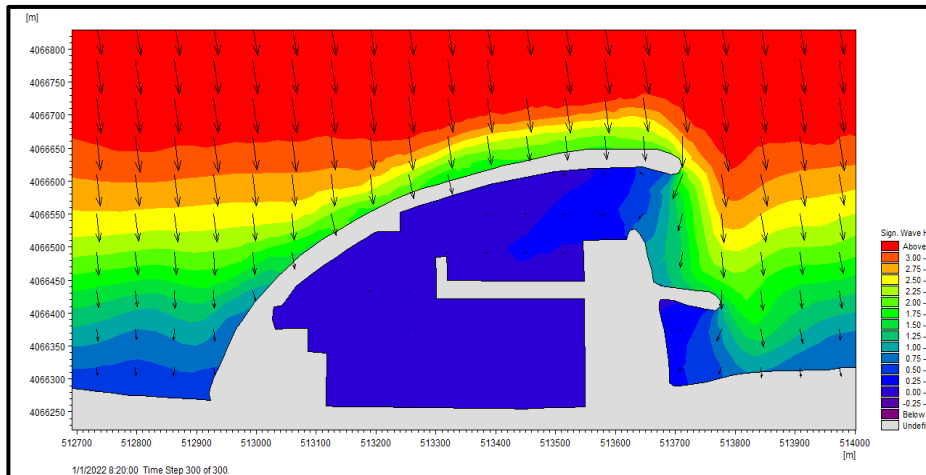
Figure III-6 Champs des houles dans la Baie d'Alger de direction NNE et N (paramètres de houle pour une période de retour de 2 ans).



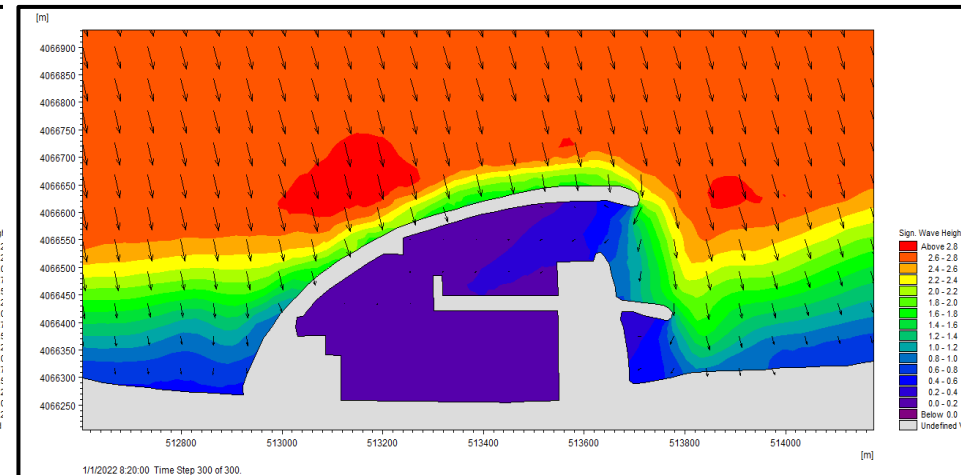
Champs des houles dans la Baie d'Alger de **direction NNW** (paramètres de houle pour **une période de retour de 2 ans**).



Champs des houles dans la Baie d'Alger de **direction NW** (paramètres de houle pour **une période de retour de 2 ans**).

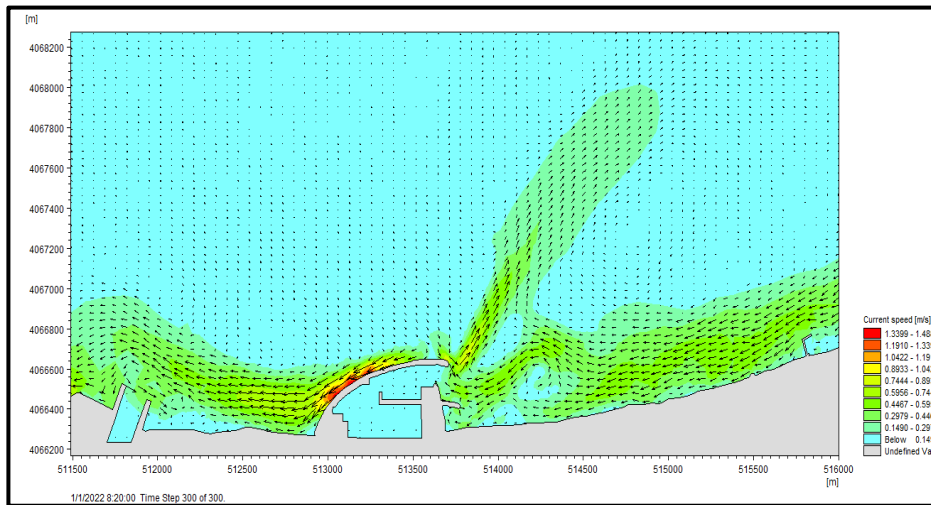


Champs des houles dans la zone de la marina d'Alger de **direction NNW** (paramètres de houle pour **une période de retour de 2 ans**).

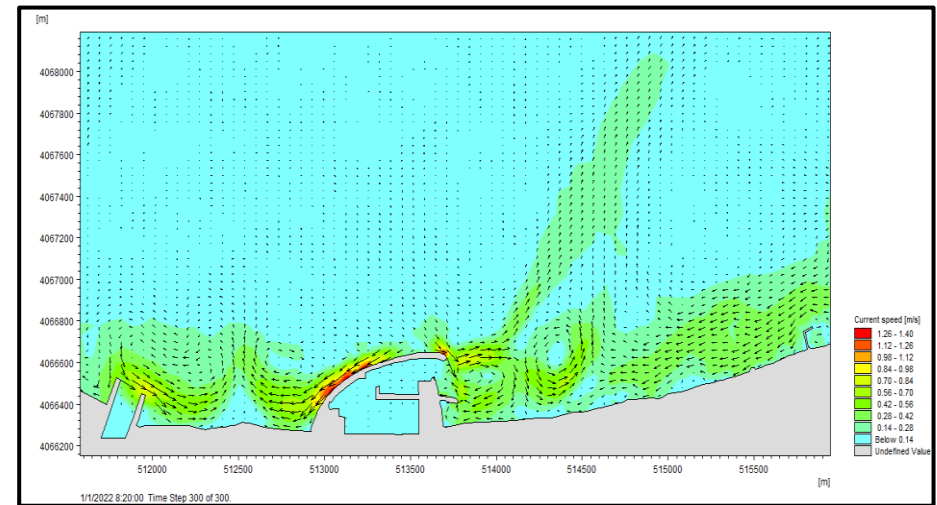


Champs des houles dans la zone de la marina d'Alger de **direction NW** (paramètres de houle pour **une période de retour de 2 ans**).

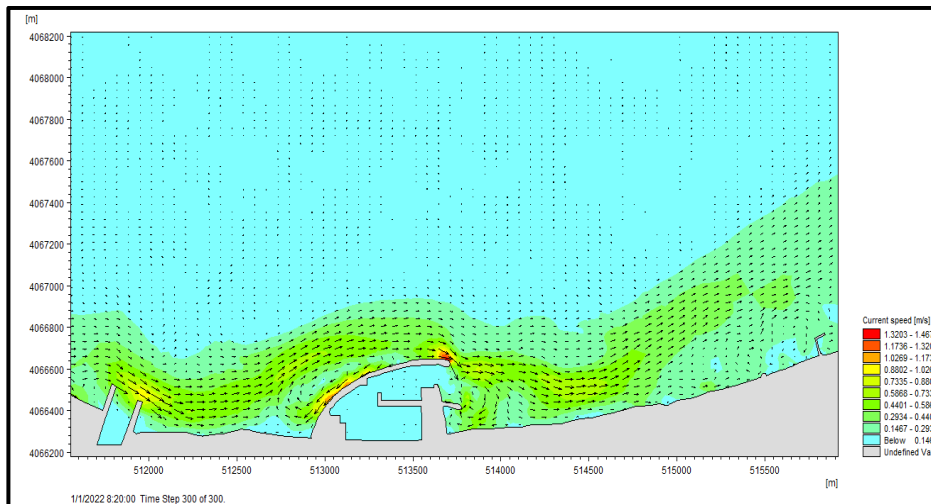
Figure III-7 Champs des houles dans la Baie d'Alger de direction NNW et NW (paramètres de houle pour une période de retour de 2 ans).



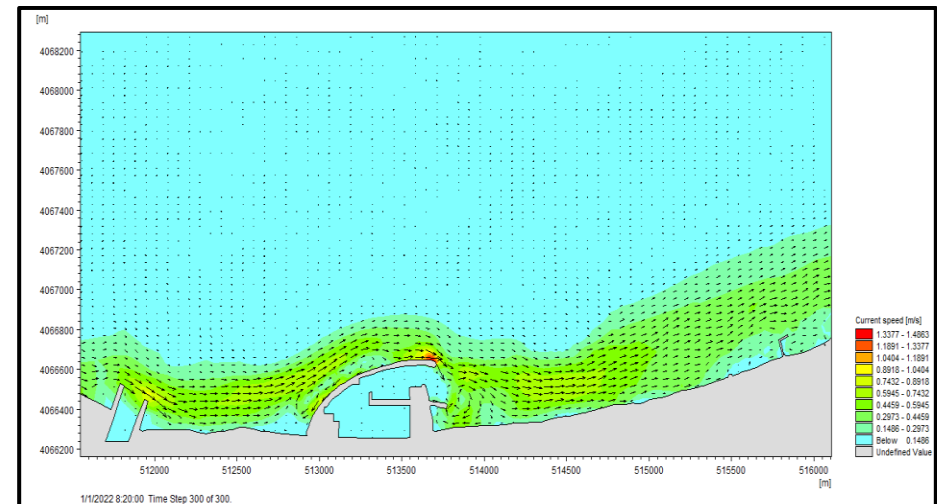
Champs des courants au voisinage de la marina d'Alger de **direction NNE** (paramètres de houle pour **une période de retour de 2 ans**).



Champs des courants au voisinage de la marina d'Alger de **direction N** (paramètres de houle pour **une période de retour de 2 ans**).



Champs des courants au voisinage de la marina d'Alger de **direction NNW** (paramètres de houle pour **une période de retour de 2 ans**).



Champs des courants au voisinage de la marina d'Alger de **direction NW** (paramètres de houle pour **une période de retour de 2 ans**).

Figure III-8 Champs des courants au voisinage de la marina d'Alger de direction NNE, N, NNW et NW (paramètres de houle pour une période de retour de 2 ans)

On remarque que, peu importe la direction d'incidence des houles, elles arrivent au pied de l'ouvrage avec une direction Nord. Ceci s'explique via les orthogonales qui sont perpendiculaire aux isobathes. Aussi, la houle subi une forte déviation suite à la diffraction et à la réfraction de la houle sur l'ensemble des obstacles rencontrer.

Pour ce qui est de la courantologie de la zone, le champ des houles et du vent engendre sur la côte un courant de vitesse moyenne de 0.5 m/s, avec des piques à plus 1 m/s qui sont localisés pré de digue de protection principale de la marina. La direction d'incidence des vagues joue un grand rôle sur les courants générés dans les zones à faible profondeur près de la cote.

On a constaté que les houles du Nord-Est provoquent un courant allant d'Est vers l'Ouest avec une gyre près de la passe d'entrée de la marina qui dévie le courant vers le large et le long la digue pour continuer vers l'Ouest.

Les deux champs de houles d'incidence Nord-Nord-Ouest et Nord-Ouest engendrent un même climat de courant dans la zone près de la marina, avec un courant de dérive de direction Ouest vers l'Est avec la plus grande intensité enregistré près du musoir.

Les houles de secteur Nord généralement ayant le plus d'énergie au pied de l'ouvrage crée un climat de courant assez varié, avec plusieurs gyres dont les sens de rotation sont cycloniques et anticycloniques de part et d'autre de la marina avant de devenir un courant parallèle à la cote en s'éloignant de la marina.

Enfin, sur l'ensemble des houles de période de retour de 2 ans simulées sur ces quatre directions les plus pénalisantes, la marina reste protégée contre les assauts des houles et des courants. Même si une diffraction de la houle sur le musoir est notée.

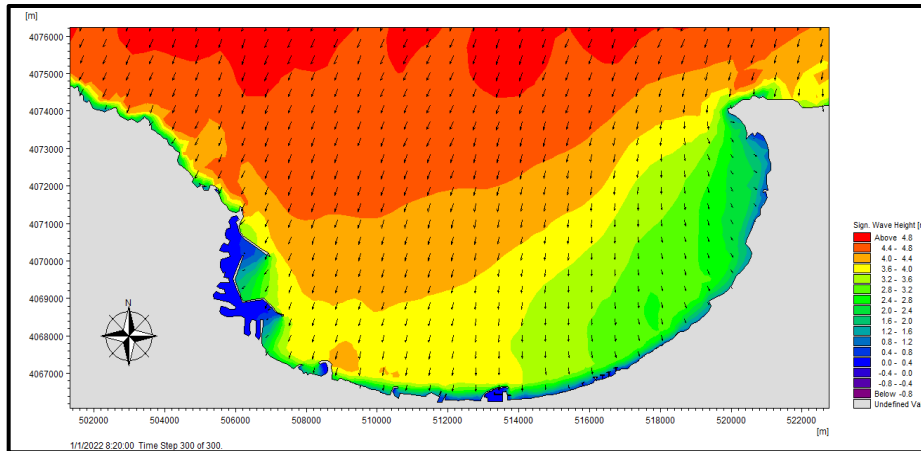
III.5.3. Résultats des simulations pour la période de retour 10 ans

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau III-2, Figure III-9, Figure III-10 et Figure III-11

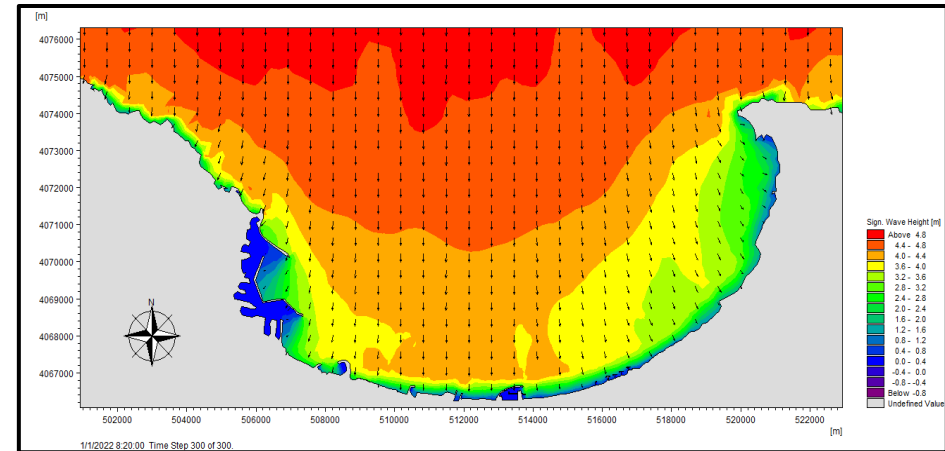
A partir des simulations faites et des résultats obtenus, on constate que les houles du large gardent 90 % de leurs hauteurs initiales de 5.5 m aux frontières du modèle. Dès que la houle entre dans la baie la hauteur et la puissance de cette dernière commence à démunir progressivement ; l'onde de houle est freinée par le fond sur lequel elle perd de l'énergie par l'action mécanique de friction.

Aussi, on remarque que la marina n'est pas protégée directement par le cap Matifou à l'Est et le port d'Alger à l'Ouest pour les directions simulées. Néanmoins, la bathymétrie de la zone fait que les houles qui arrivent au pied de l'ouvrage sont entre 2.45 et 2.65 m avec un coefficient de Shoaling en moyenne de 0.47 ce qui indique que la houle a perdu de son intensité de moitié.

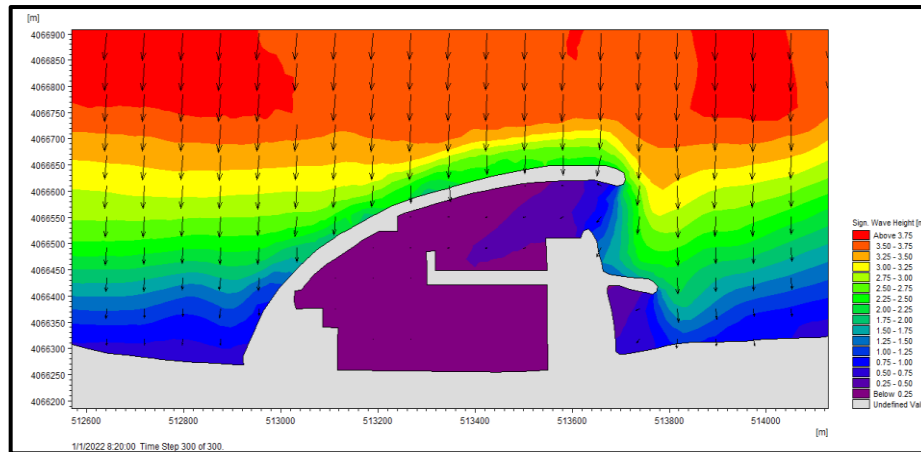
On remarque que l'ensemble des houles finissent au pied de l'ouvrage avec une direction Nord. Ceci s'explique via les orthogonales qui sont perpendiculaire aux isobathes.



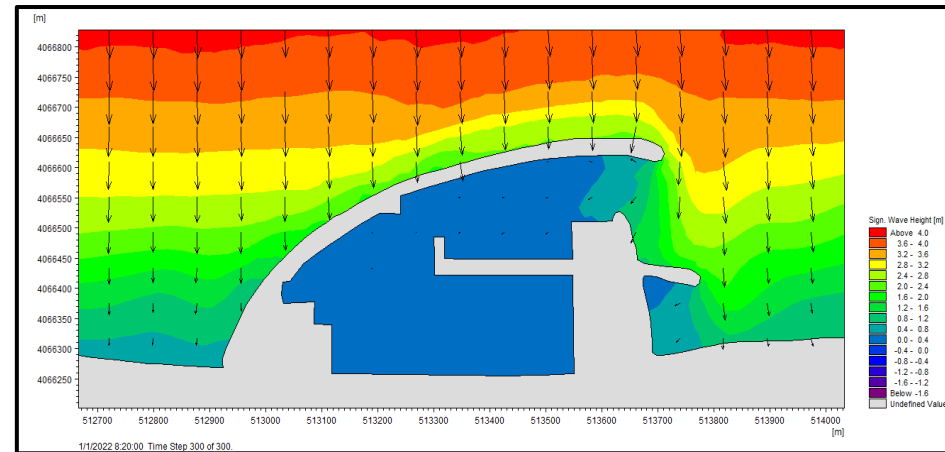
Champs des houles dans la Baie d'Algier de **direction NNE** (paramètres de houle pour **une période de retour de 10 ans**).



Champs des houles dans la Baie d'Algier de **direction N** (paramètres de houle pour **une période de retour de 10 ans**).

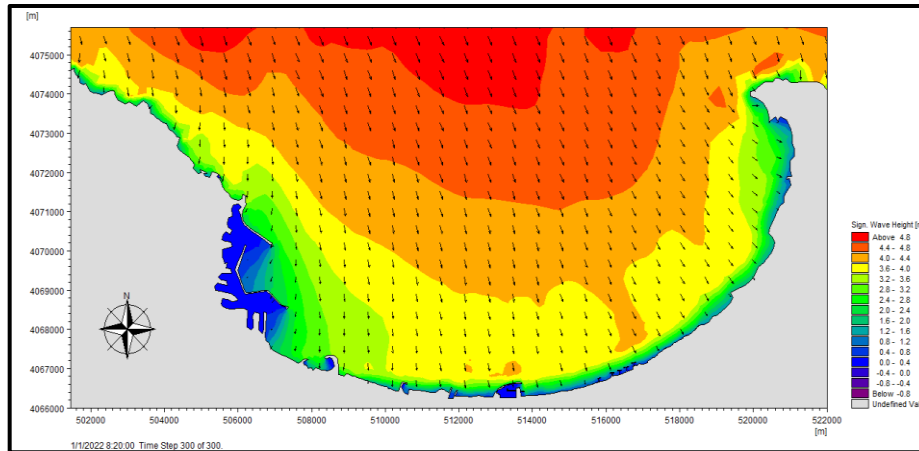


Champs des houles dans la zone de la marina d'Algier de **direction NNE** (paramètres de houle pour **une période de retour de 10 ans**).

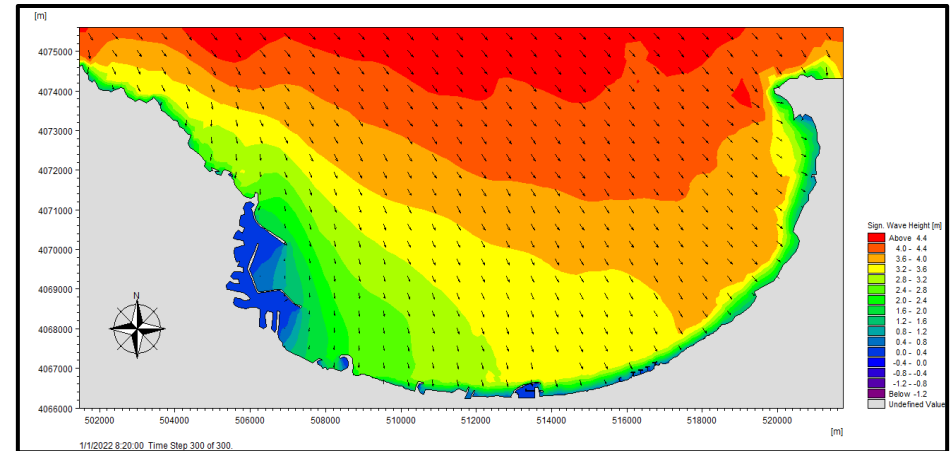


Champs des houles dans la zone de la marina d'Algier de **direction N** (paramètres de houle pour **une période de retour de 10 ans**).

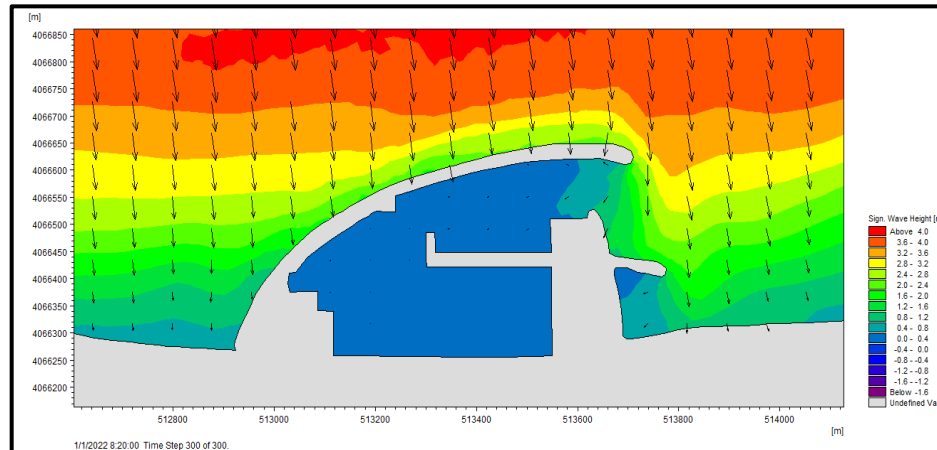
Figure III-9 Champs des houles dans la Baie d'Algier de direction NNE et N (paramètres de houle pour une période de retour de 10 ans).



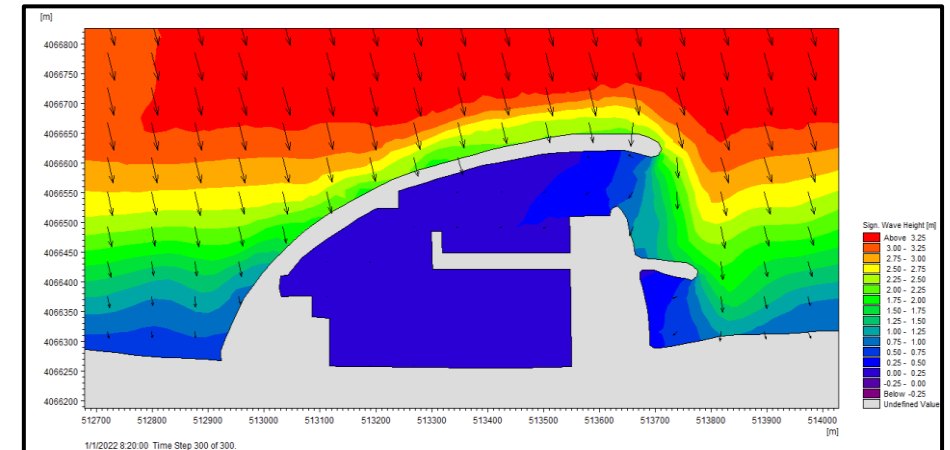
Champs des houles dans la Baie d'Alger de **direction NNW** (paramètres de houle pour **une période de retour de 10 ans**).



Champs des houles dans la Baie d'Alger de **direction NW** (paramètres de houle pour **une période de retour de 10 ans**).

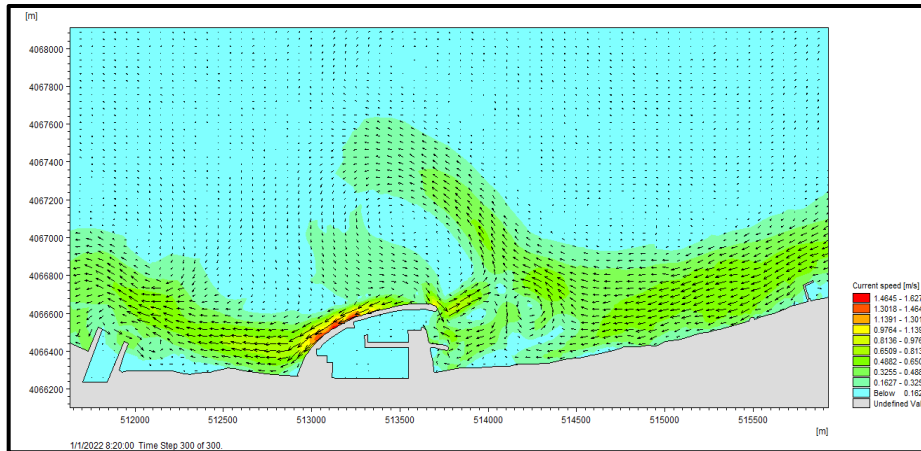


Champs des houles dans la zone de la marina d'Alger de **direction NNW** (paramètres de houle pour **une période de retour de 10 ans**).

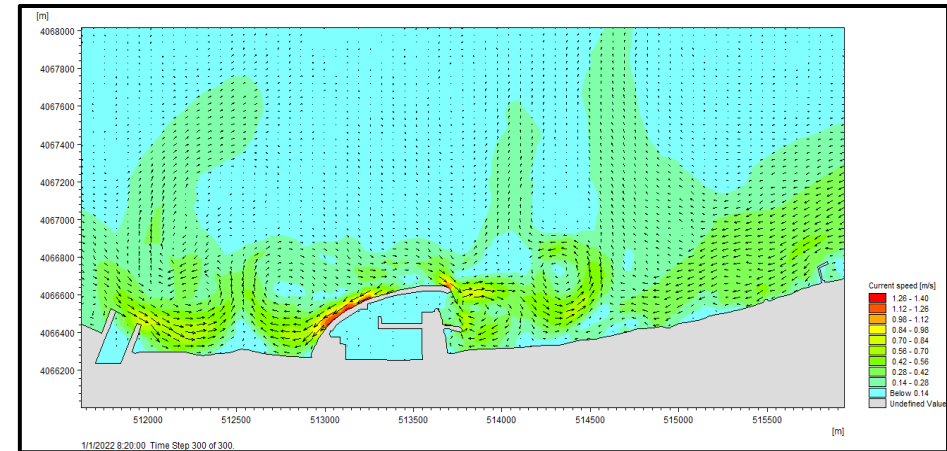


Champs des houles dans la zone de la marina d'Alger de **direction NW** (paramètres de houle pour **une période de retour de 10 ans**).

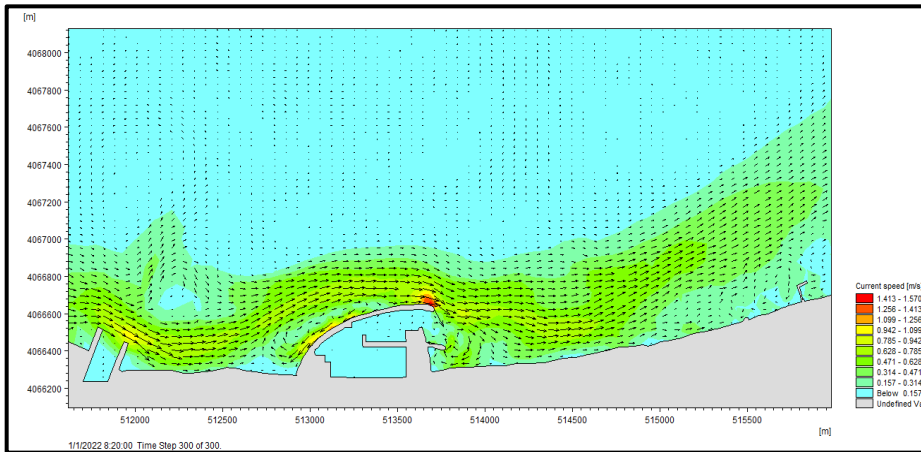
Figure III-10 Champs des houles dans la Baie d'Alger de direction NNW et NW (paramètres de houle pour une période de retour de 10 ans).



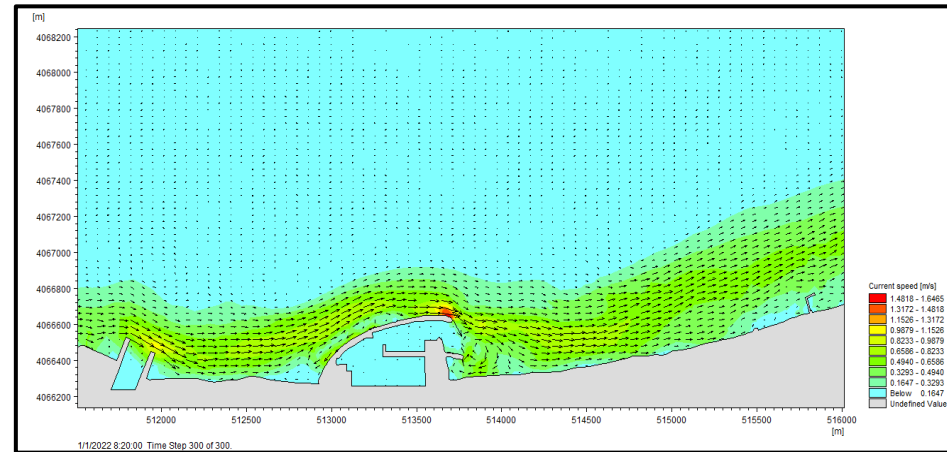
Champs des courants au voisinage de la marina d'Algier de **direction NNE** (paramètres de houle pour **une période de retour de 10 ans**).



Champs des courants au voisinage de la marina d'Algier de **direction N** (paramètres de houle pour **une période de retour de 10 ans**).



Champs des courants au voisinage de la marina d'Algier de **direction NNW** (paramètres de houle pour **une période de retour de 10 ans**).



Champs des courants au voisinage de la marina d'Algier de **direction NW** (paramètres de houle pour **une période de retour de 10 ans**).

Figure III-11 Champs des courants au voisinage de la marina d'Algier de direction NNE, N, NNW et NW (paramètres de houle pour une période de retour de 10 ans)

La différence enregistrée avec les résultats de la simulation précédente est dans le bassin et aux allons tours de la marina : les houles des secteurs Nord et Nord-Nord-Ouest ne perdent pas la totalité de leurs intensités.

La courantologie de la zone engendrée par ces houles de période de retour de 10 ans est quasiment la même que celle précédemment décrite (période de retour de 2 ans), que ce soit dans la vitesse de courant et des piques enregistrés (lieux et valeurs) ou bien dans les directions de courant engendré en fonction des directions d'incidence de la houle.

Ceci nous permet de dire que la courantologie de la zone n'est pas variable avec la variation des hauteurs et période de houle au large et qu'elle a atteint ses valeurs limites pour ce qui est du courant créé par les conditions de houle et de vent combinées.

III.5.4. Résultats des simulations pour la période de retour 30 ans

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau III-3, Figure III-12, Figure III-13 et Figure III-14. L'ensemble des houles gardent près de 80 % de hauteur au centre de la baie d'Alger c'est-à-dire entre 4.41 m et 4.92 m pour celles de direction Nord. Avec une tendance directionnelle influencée par le phénomène de réfraction de la houle via la bathymétrie de la baie.

Ensuite, une grande diffraction de la houle est observée aux alentours des deux caps de la baie d'Alger pour l'ensemble des directions d'incidence simulées avant que la houle suive la forme de la baie dans sa propagation à l'intérieur de cette dernière due à la bathymétrie.

Aux alentours de la marina la houle est comprise entre 2.44 m et 2.62 m lors des houles de direction Nord avec un coefficient de Shoaling d'environ 44 % de la hauteur de houle initiale au pied de la digue principale de la marina. Quant à la direction des houles qui touchent la digue de la marina sont de direction plein Nord à quelques degrés près.

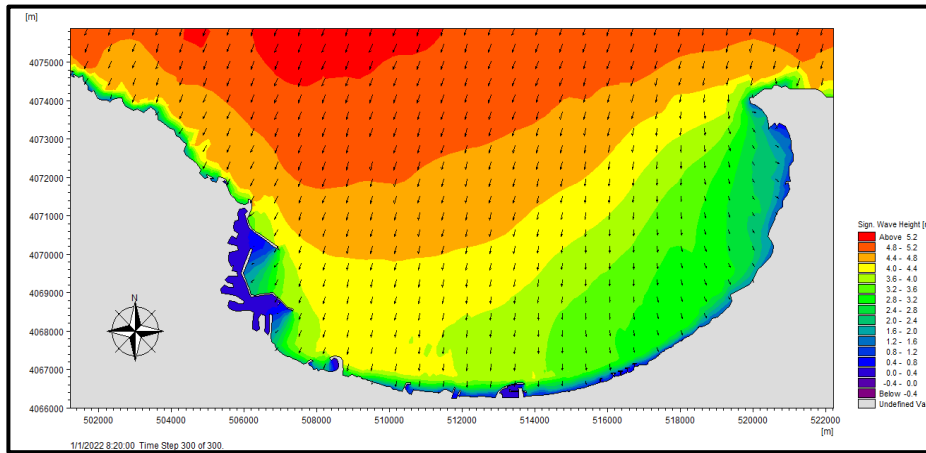
Le bassin de la marina reste abrité et ne subit les effets directs de la houle incidente même si cette dernière se diffracte sur le musoir principal qui la redirige vers la contre digue qui la pousse à l'extérieur vers l'Est de la marina, le peu d'énergie restant va se dissiper dans la passe d'entrée avant le quai d'accostage.

La courantologie engendrée par les conditions simulées pour la période de retour de 30 ans est dans son ensemble semblable à celles des différentes périodes de retours précédentes d'un point de vue d'intensité et vitesse de courant.

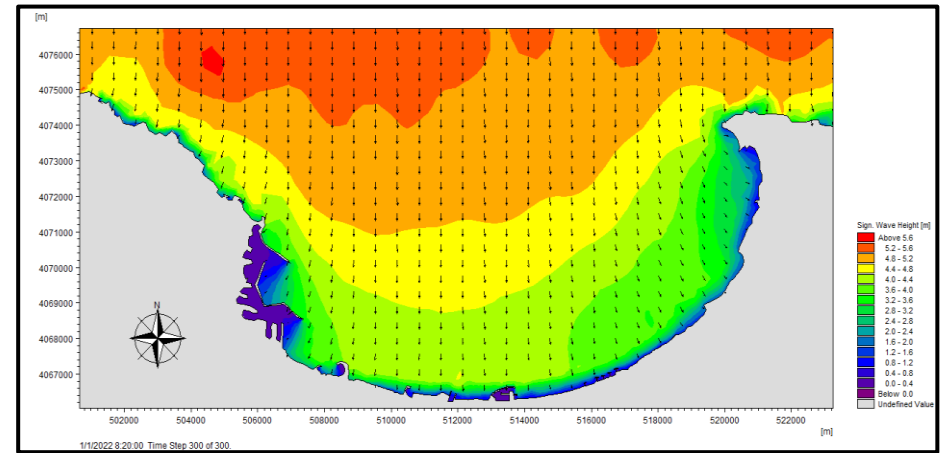
Les courants créés suite à des houles de direction Nord-Nord-Est sont de direction Est-Ouest avec une vitesse moyenne d'environ 0.6 m/s tout le long du couloir de courant avec un pic à plus 1.2 m/s le long de section courante de la digue principale.

Tableau III-3 Résultats des simulations de la houle pour la période de retour 30, 50, 100 et 1000 ans.

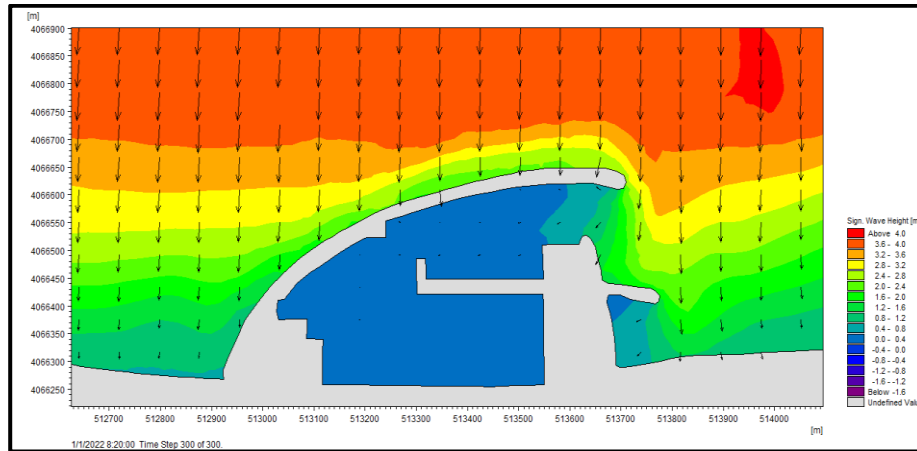
Situation du point d'extraction des caractéristiques de la houle		Point au pied de l'ouvrage X = 513550 m ; Y = 4066668 m					Point au centre de la baie d'Alger X = 513550 m ; Y = 4072000 m				
Période de retour	Directions simulées	Hs	Coefficient de Shoaling	Tp	Direction	WavePower	Hs	Coefficient de Shoaling	Tp	Direction	WavePower
		(m)	(%)	(s)	(°)	(KN/m)	(m)	(%)	(s)	(°)	(KN/m)
30 ans	NNE (22.5°)	2.52	43	10.4	2	20.5	4.66	80	10.2	16	107
	N (360°)	2.62	45	10.3	358	22	4.92	84	10.2	359	120
	NNW (337.5°)	2.59	44	10.4	352	22	4.84	83	10.2	340	116
	NW (315°)	2.44	42	10.4	347	19	4.41	76	10.2	324	95
50 ans	NNE (22.5°)	2.71	43	11.4	2	24	5.14	82	11.2	15	147
	N (360°)	2.75	44	11.4	357	25	5.44	87	11.2	358	164
	NNW (337.5°)	2.77	44	11.4	352	25	5.36	86	11.2	339	160
	NW (315°)	2.72	44	11.5	346	24	4.88	78	11.2	323	132
100 ans	NNE (22.5°)	2.77	41	11.5	1	26	5.48	81	11.2	15	167
	N (360°)	2.99	44	11.4	357	30	5.80	86	11.2	358	188
	NNW (337.5°)	2.92	43	11.5	353	29	5.72	84	11.2	340	182
	NW (315°)	2.95	44	11.6	346	29	5.18	76	11.3	324	151
1000 ans	NNE (22.5°)	3.47	41	12.6	1	44	6.75	79	12.3	14	283
	N (360°)	3.53	41	12.5	356	46	7.20	84	12.3	358	322
	NNW (337.5°)	3.59	42	12.5	352	47	7.09	83	12.3	340	312
	NW (315°)	3.48	41	12.6	347	45	6.35	74	12.3	325	253



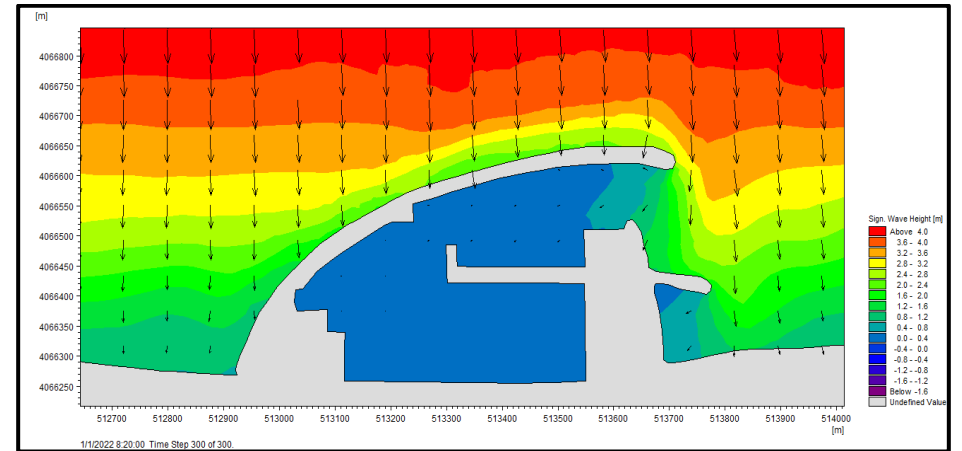
Champs des houles dans la Baie d'Algier de **direction NNE** (paramètres de houle pour **une période de retour de 30 ans**).



Champs des houles dans la Baie d'Algier de **direction N** (paramètres de houle pour **une période de retour de 30 ans**).

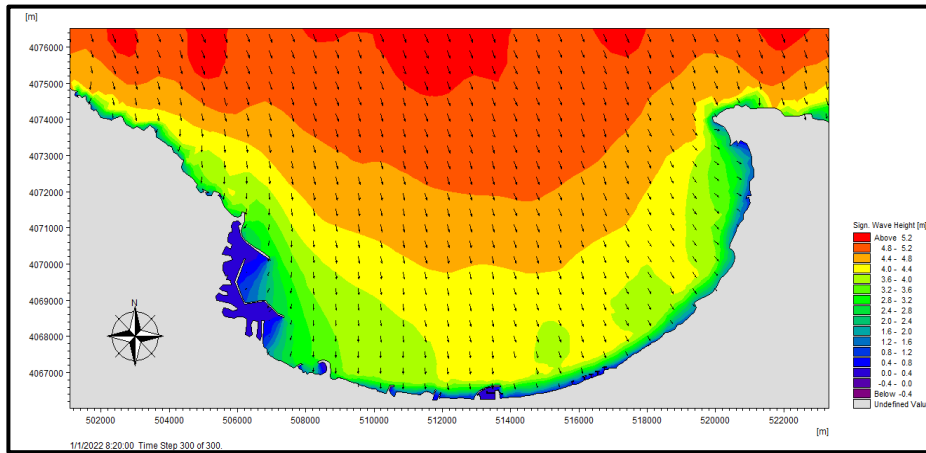


Champs des houles dans la zone de la marina d'Algier de **direction NNE** (paramètres de houle pour **une période de retour de 30**

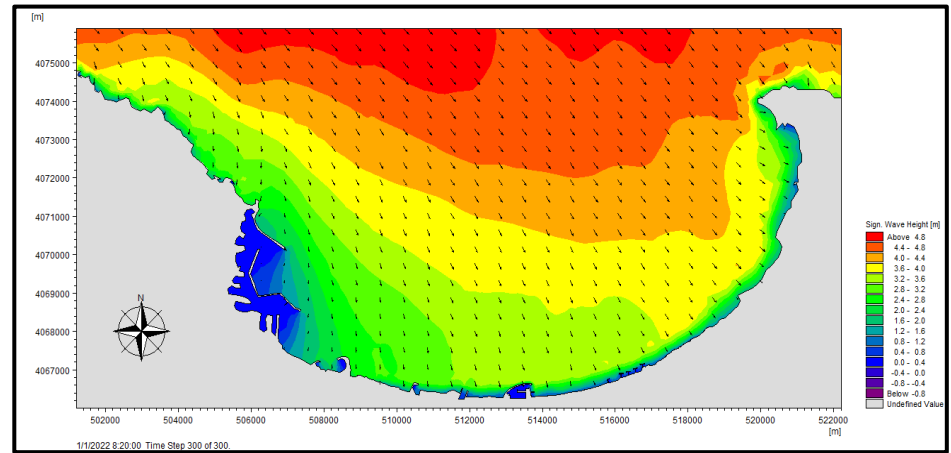


Champs des houles dans la zone de la marina d'Algier de **direction N** (paramètres de houle pour **une période de retour de 30 ans**).

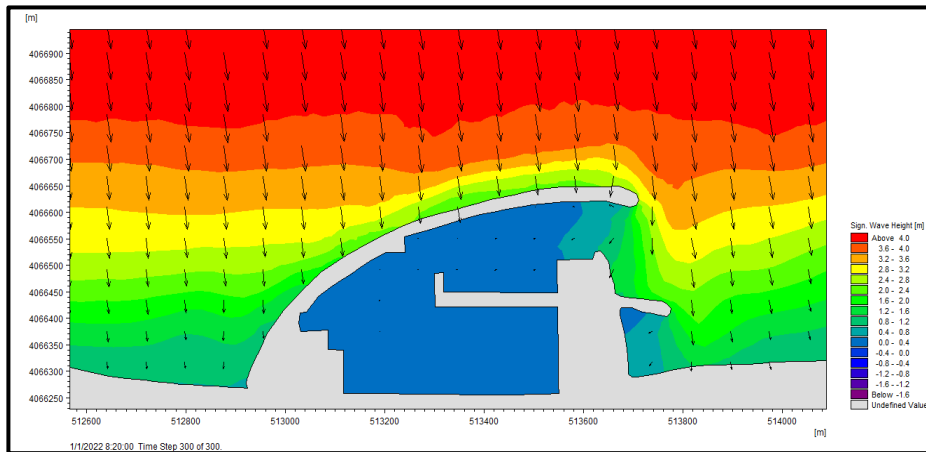
Figure III-12 Champs des houles dans la Baie d'Algier de direction NNE et N (paramètres de houle pour une période de retour de 30 ans).



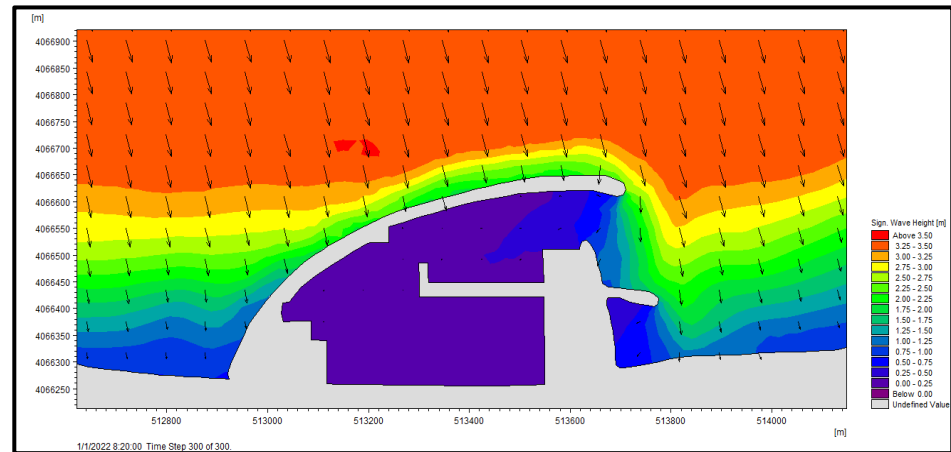
Champs des houles dans la Baie d'Alger de **direction NNW** (paramètres de houle pour **une période de retour de 30 ans**).



Champs des houles dans la Baie d'Alger de **direction NW** (paramètres de houle pour **une période de retour de 30 ans**).

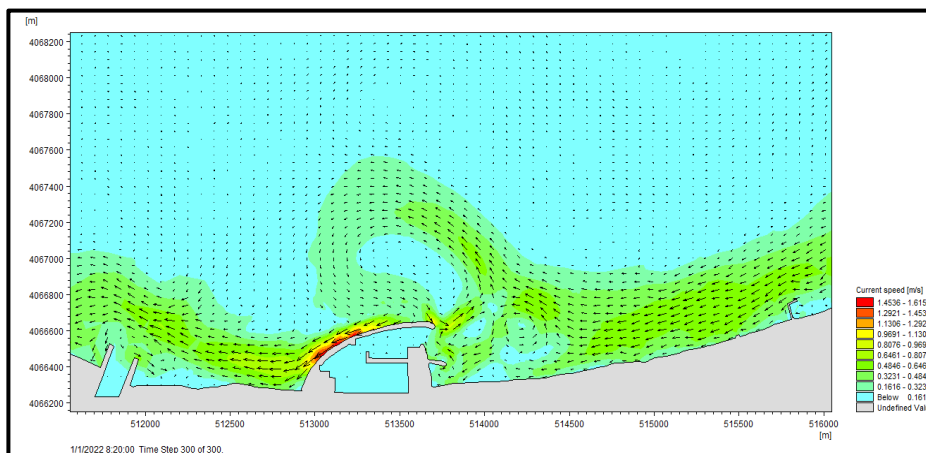


Champs des houles dans la zone de la marina d'Alger de **direction NNW** (paramètres de houle pour **une période de retour de 30**).

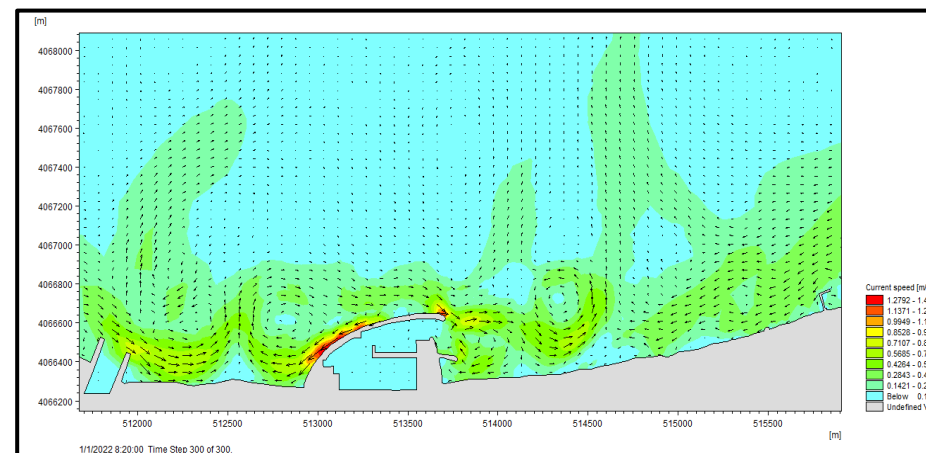


Champs des houles dans la zone de la marina d'Alger de **direction NW** (paramètres de houle pour **une période de retour de 30 ans**).

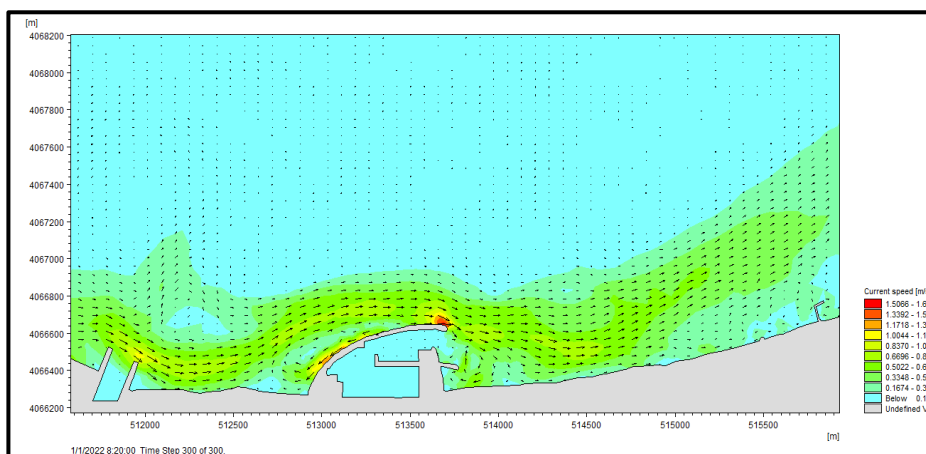
Figure III-13 Champs des houles dans la Baie d'Alger de direction NNW et NW (paramètres de houle pour une période de retour de 30 ans).



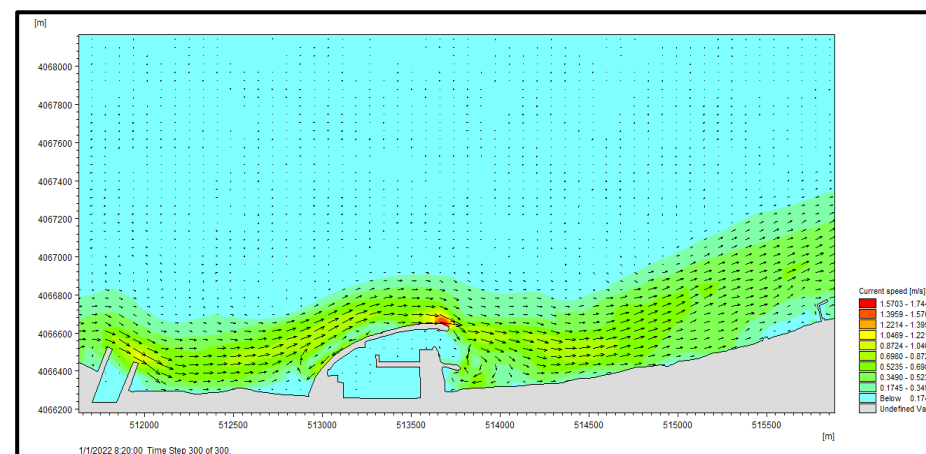
Champs des courants au voisinage de la marina d'Alger de **direction NNE** (paramètres de houle pour **une période de retour de 30 ans**).



Champs des courants au voisinage de la marina d'Alger de **direction N** (paramètres de houle pour **une période de retour de 30 ans**).



Champs des courants au voisinage de la marina d'Alger de **direction NNW** (paramètres de houle pour **une période de retour de 30 ans**).



Champs des courants au voisinage de la marina d'Alger de **direction W** (paramètres de houle pour **une période de retour de 30 ans**).

Figure III-14 Champs des courants au voisinage de la marina d'Alger de direction NNE, N, NNW et W (paramètres de houle pour une période de retour de 30 ans)

Ceux issus des houles des secteurs Nord-Ouest et Nord-Nord-Ouest se propagent d'Ouest-Est avec une vitesse moyenne de 0.7 m/s et un pic à plus 1.2 m/s près du musoir principal.

Les houles de direction nord sont les plus susceptibles de créer des courants tourbillonnants de part et d'autre de la marina avec plusieurs gires successives et opposées dans le sens de rotation sur l'ensemble de la zone près du rivage.

III.5.5. Résultats des simulations pour la période de retour 100 ans

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau III-3, Figure III-15, Figure III-16 et Figure III-17

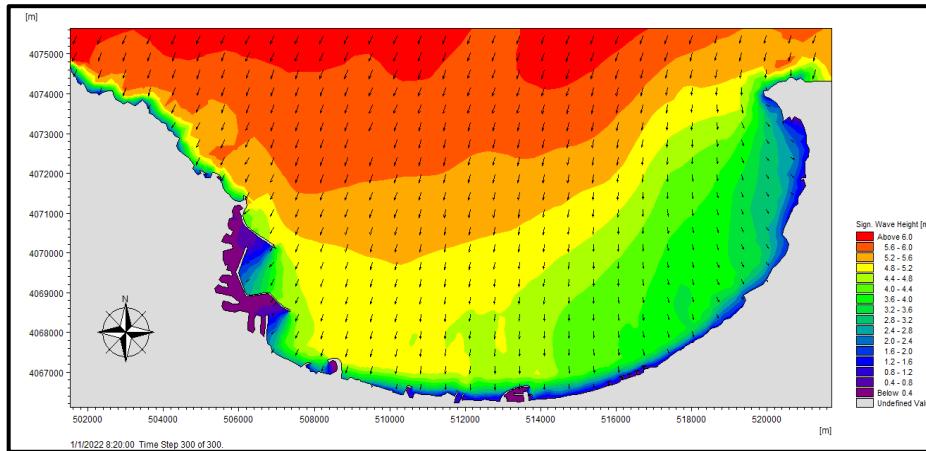
Les résultats obtenus pour la propagation d'une houle centennale sur le model SW mettent en évidence la grande capacité de réduction (de plus 40 % des hauteurs de houle au large) se dissipent à l'intérieur même de la baie d'Alger entre les deux points d'extraction des paramètres des houles simulées.

Le champ des houles incident de différentes directions dépassent les 5 m à l'intérieur de la baie, le calcul du coefficient de Shoaling montre que la houle garde en moyenne 80 % de hauteur initiale. La direction la plus pénalisante à ce stade est le Nord.

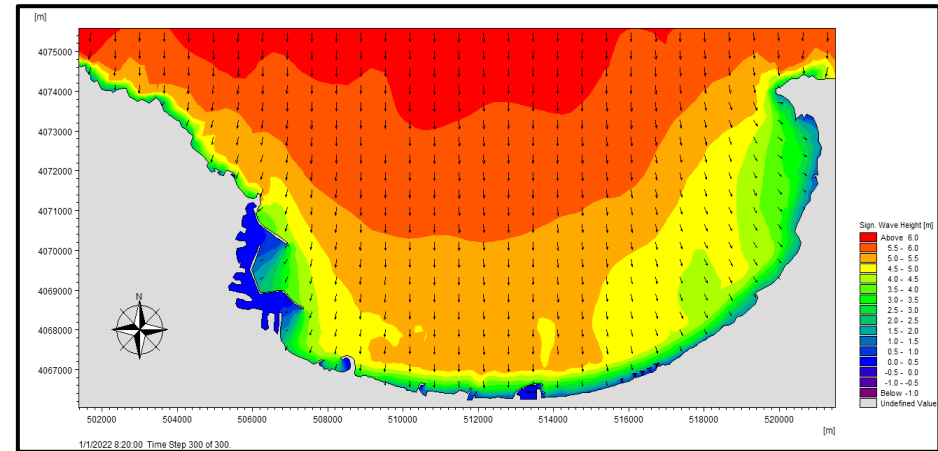
A l'intérieur de la baie la houle se propage selon la bathymétrie qui lui permet de tourner pour que les orthogonales reste toujours parallèle aux isobathes, ce qui contribue à la réduction des hauteurs de houles et de sa force restante près du rivage.

Dans la zone de la marina, les houles de toutes directions d'incidence restent sous la barre des 3 m au pied de l'ouvrage, la réfraction fait que les directions de ses dernières soit Nord au pied de l'ouvrage. L'intérieur du bassin de la marina subis une houle de 40 cm de hauteur ce qui acceptable pour un tel évènement extrême.

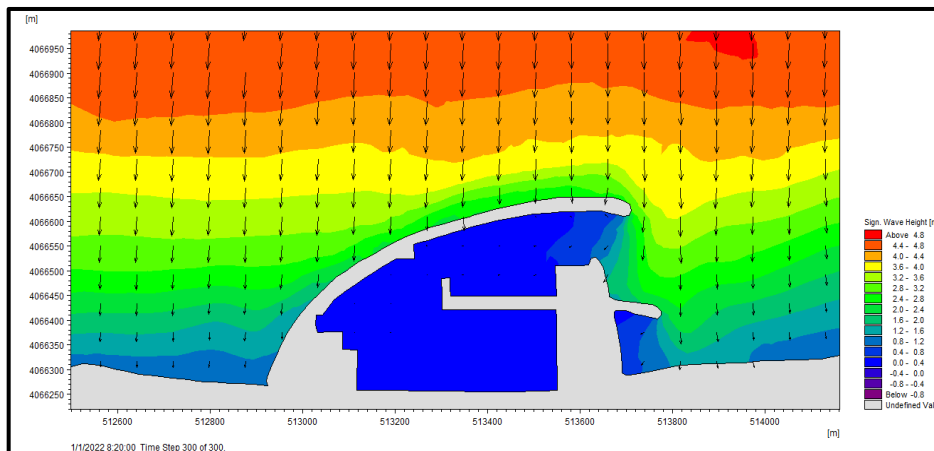
La courantologie dans cette zone se comporte exactement comme celle crée par les conditions trentennale que ce soit par rapport à la direction ou à la vitesse et des zones pics.



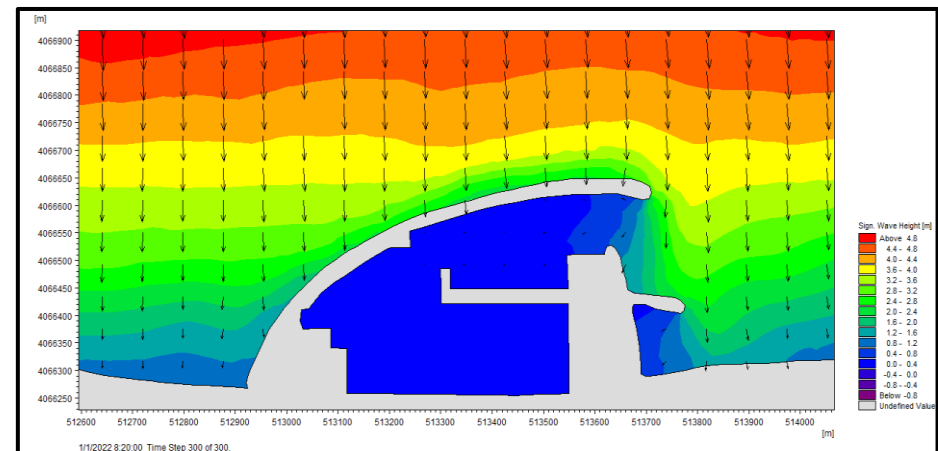
Champs des houles dans la Baie d'Alger de **direction NNE** (paramètres de houle pour **une période de retour de 100 ans**).



Champs des houles dans la Baie d'Alger de **direction N** (paramètres de houle pour **une période de retour de 100 ans**).

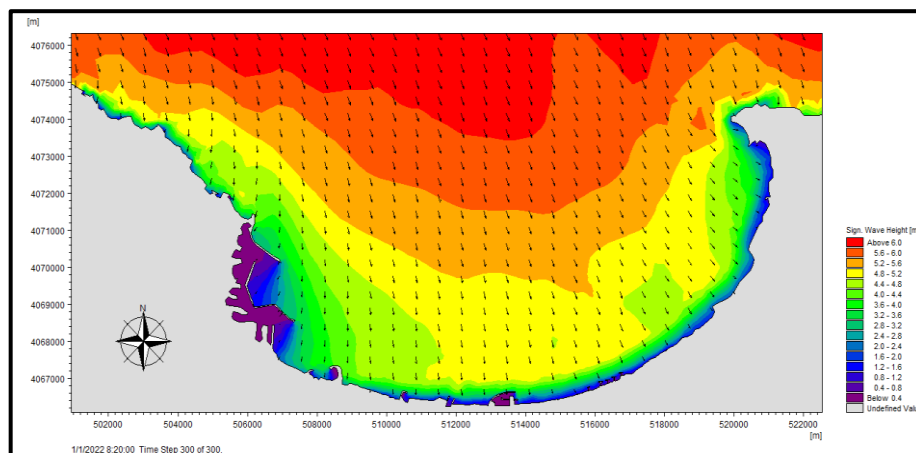


Champs des houles dans la zone de la marina d'Alger de **direction NNE** (paramètres de houle pour **une période de retour de 100**).

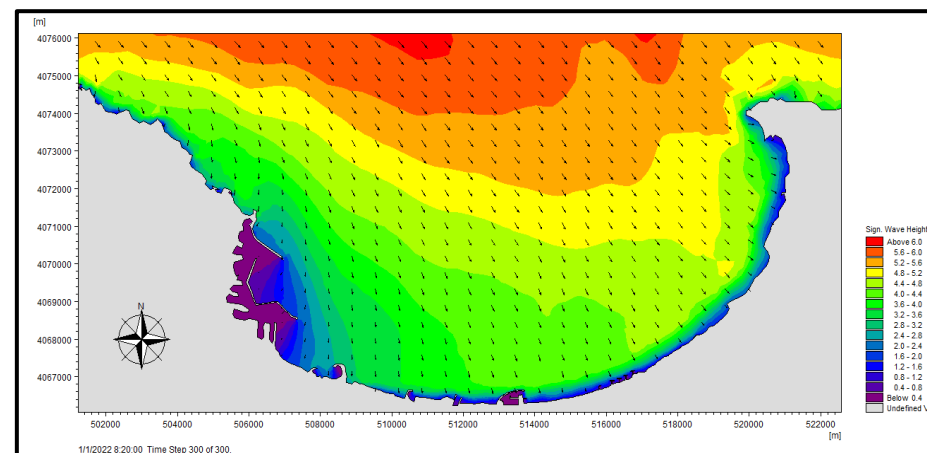


Champs des houles dans la zone de la marina d'Alger de **direction N** (paramètres de houle pour **une période de retour de 100 ans**).

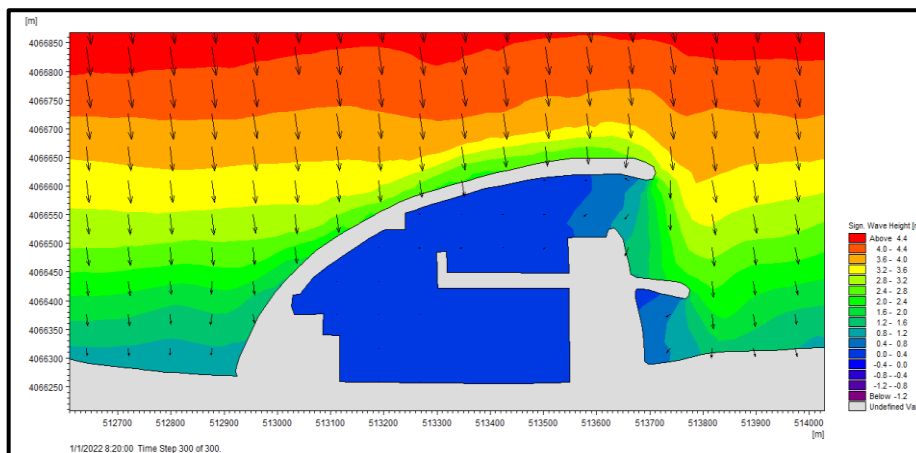
Figure III-15 Champs des houles dans la Baie d'Alger de direction NNE et N (paramètres de houle pour une période de retour de 100 ans).



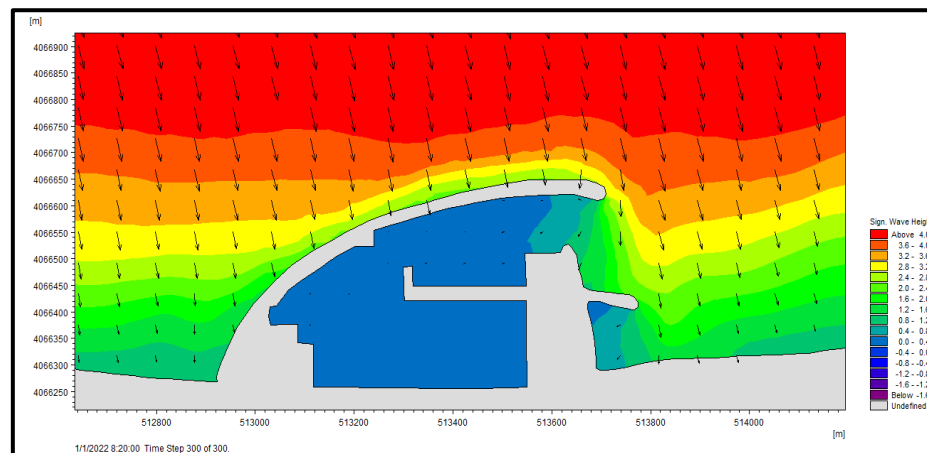
Champs des houles dans la Baie d'Alger de **direction NNW**
(paramètres de houle pour **une période de retour de 100**



Champs des houles dans la Baie d'Alger de **direction NW** (paramètres
de houle pour **une période de retour de 100 ans**

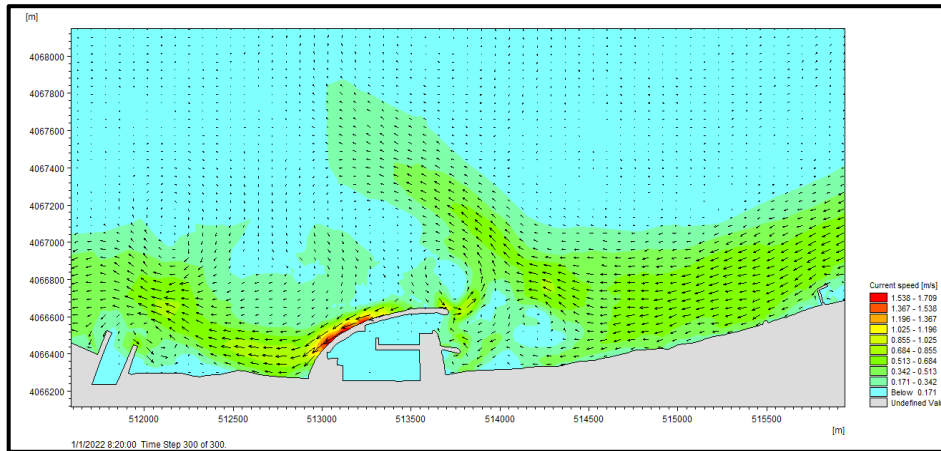


Champs des houles dans la zone de la marina d'Alger de **direction NNW**
(paramètres de houle pour **une période de retour de 100**

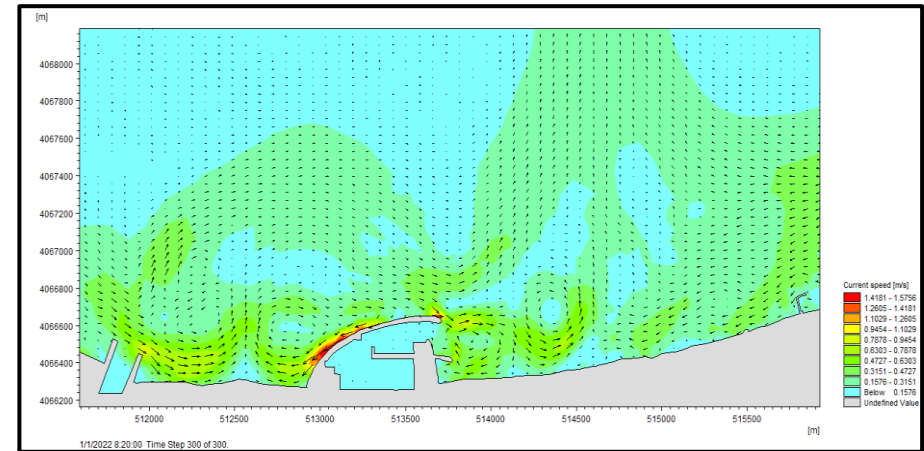


Champs des houles dans la zone de la marina d'Alger de **direction NW**
(paramètres de houle pour **une période de retour de 100**

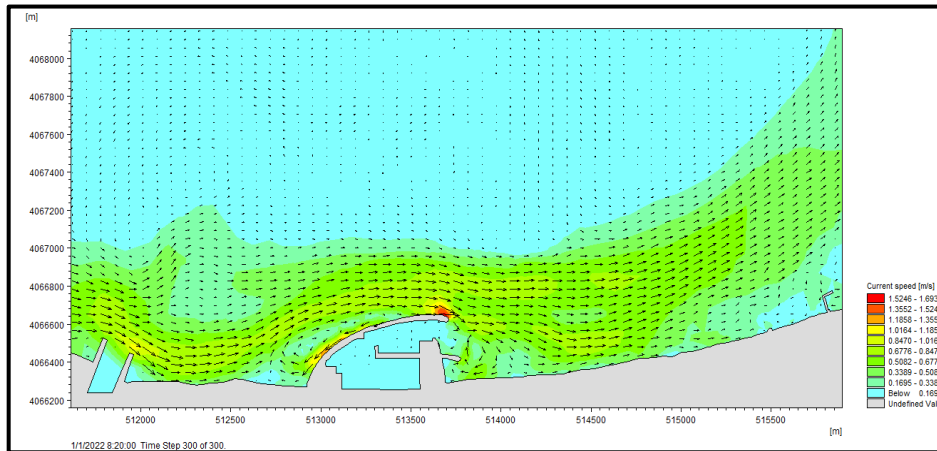
Figure III-16 Champs des houles dans la Baie d'Alger de direction NNW et NW (paramètres de houle pour une période de retour de 100 ans).



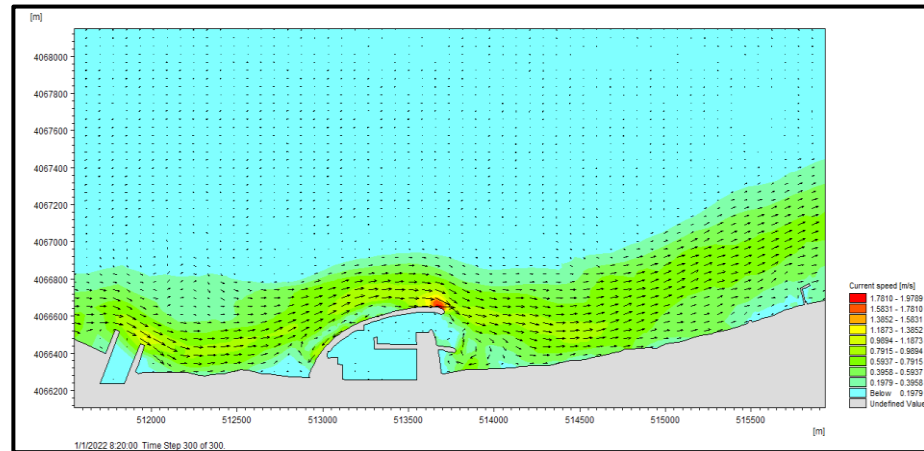
Champs des courants au voisinage de la marina d'Algier de **direction NNE** (paramètres de houle pour **une période de retour de 100 ans**).



Champs des courants au voisinage de la marina d'Algier de **direction N** (paramètres de houle pour **une période de retour de 100 ans**).



Champs des courants au voisinage de la marina d'Algier de **direction NNW** (paramètres de houle pour **une période de retour de 100 ans**).



Champs des courants au voisinage de la marina d'Algier de **direction NW** (paramètres de houle pour **une période de retour de 100 ans**).

Figure III-17 Champs des courants au voisinage de la marina d'Algier de direction NNE, N, NNW et NW (paramètres de houle pour une période de retour de 100 ans)

III.6. Conclusion

La modélisation numérique nous a permis de définir les directions pénalisantes de la houle qui sont le Nord, Nord-Nord-Ouest, le Nord-Ouest et le Nord-Nord-Est.

La morpho-bathymétrie de la baie d'Alger permet une grande réduction des hauteurs de houle grandissantes de plus de 55 % et l'effet du fond sur les houles fait en sorte qu'elle soit de direction Nord ou presque dans la zone de la marina.

La courantologie semble ne pas être affecté par les événements extrêmes d'un point de vue de vitesse local des courants qui semble la même pour les nombreuses configurations de climat simulé, par contre la direction d'incidence des houles est un facteur très influent sur la courantologie car on observe plusieurs directions d'écoulement et des couloirs engendrés, le plus remarquable est les courants créés par les houles de direction Nord qui engendrent des écoulements circulaires de part et d'autres de la marina. On enregistre des vitesses du courant variant entre 0,5 m/s et 1,5 m/s.

Le bassin de la marina est bien protégé sur ces simulations car lors des événements les plus extrêmes on enregistre une hauteur de houle de moins 40 cm juste après la passe d'entrée.

Chapter IV Dimensionnement des digues de la Marina.

IV.1. Introduction

Pour la conception et le dimensionnement de l'ouvrage de protection, on va utiliser deux formules différentes qu'on va pouvoir comparer à la fin. Les formules de dimensionnements qu'on va utiliser sont celle d'HUDSON, et la formule de Van Der Meer. Les ouvrages de protection ports :

Les ouvrages de protection permettent de protéger un port ou une partie d'un port (plan d'eau, terre-plein) contre les actions de la houle (attaque directe, franchissements, submersion, érosion...) et de dépôts sédimentaires.

Un port peut être constitué de digues, quais, etc. Dans notre cas on va dimensionner une digue à talus.

IV.1.1.1 Digue à talus

Les digues à talus sont généralement constituées d'enrochements ou de blocs artificiels de béton, arrangés globalement sous la forme d'un trapèze qui va s'opposer à la progression de la houle.

La taille des blocs des différents matériaux utilisés décroît de l'extérieur vers l'intérieur, tout comme s'atténuent les contraintes des éléments composant chaque couche qui doivent respecter les aspects de fuseau granulométrique (Sharp. N et al., 1997).

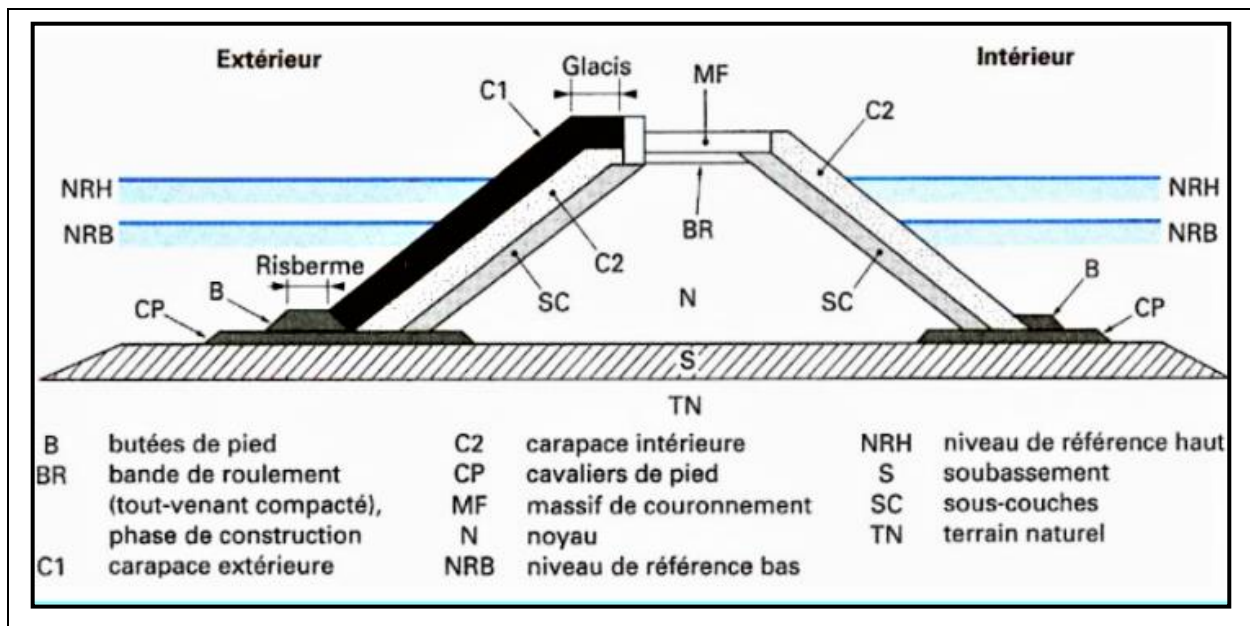


Figure IV-1 Coupe type d'une digue à talus, éléments constitutifs (Caminade. D., 1995).

Les digues à talus sont constituées de :

-Le soubassement : Dans certain cas, la mise en place d'une digue à talus dans une zone assez profonde nécessite la mise d'un soubassement sur laquelle assier le corps de la digue. Ce sont des matériaux à faible coût qui peuvent avoir des poids dépendant de l'état hydrodynamique et la stabilité de l'ouvrage (Sharp. N et al., 1997).

-La carapace : elle constitue l'élément primordial d'une digue à talus. C'est surtout à l'intérieur de cette couche que s'opère la dissipation de l'énergie de la houle.

La carapace (peut être constituée d'enrochements naturels ou artificiels) protège l'ensemble de l'ouvrage de l'action des houles. Il est essentiel que les blocs qui la composent aient un poids leur permettant de résister aux efforts engendrés par les vagues susceptibles de frapper la structure. C'est le dimensionnement du bloc de carapace vis-à-vis des houles qui a mobilisé le plus jusqu'ici l'attention des ingénieurs et chercheurs (Sharp. N et al., 1997). Et, pour chaque étude particulière, le choix des caractéristiques du bloc constitue une part essentielle du travail.

La sous-couche : Les poids moyens des blocs le composant représente généralement une fraction de celui du bloc de la carapace. Le rôle de cette couche est d'offrir une assise permettant d'obtenir un bon accrochage de la carapace, de retenir le départ des matériaux fins de noyau au travers des couches supérieures. Comme elle amortit aussi progressivement les vitesses d'écoulement de l'eau à l'intérieur de l'ouvrage (Sharp. N et al., 1997).

Le Noyau : Le Noyau est le remblai intérieur massif qui constitue l'ouvrage. Il s'agit généralement d'un matériau tout-venant de carrière. Il bénéficie d'un coût inférieur à celui des autres matériaux constitutifs de la structure proprement dite. Les avis des experts sont en particulier partagés sur le seuil admissible de teneur en fines (Sharp. N et al., 1997).

Butée de pied : Elle sert comme calage inférieur de la carapace limitant les risques de glissement de cette dernière, et elle offre une sécurité supplémentaire vis-à-vis des affouillements en pied d'ouvrage (Sharp. N et al., 1997). La butée peut prendre la forme d'une simple assise horizontale des blocs de carapace. Il conviendrait d'employer plutôt dans ce cas le terme de risberme de pied.

Couronnement : C'est une structure monolithique en béton posée en partie supérieure de l'ouvrage. Elle comporte en général une dalle horizontale et mur vertical appelé aussi mur de garde. Il limite et protège le talus arrière des franchissements dus aux houles, et offre une voie de roulement (Sharp. N et al., 1997).

IV.2. Dimensionnement des digues

La conception d'ouvrages maritimes requiert de définir des critères qui donnent le comportement attendu de la structure. Le dimensionnement des jetées principale et secondaire de la Marina Bay est fait par deux formules qui déterminent la stabilité d'une digue **HUDSON** et **VAN DER MEER**. Pour les deux formules on va déterminer :

- Poids, épaisseur et le nombre de blocs par mètre carré pour la carapace.
- Poids et épaisseur des filtres.

Et :

- Vérification des lois de **TERZAGHI**.
- Dimensionnement des butées de pied.

Ces dimensionnements seront établis selon deux profils, le profil courant, et le profil musoir.

Après la fin des dimensionnements par les deux formules, on va pouvoir comparer les résultats.

IV.3. Dimensionnement de la jetée principale

IV.3.1. Dimensionnement de la carapace

IV.3.1.1 Dimensionnements des blocs de la carapace

Dans cette partie, nous allons aborder l'aspect de dimensionnement des carapaces des digues de protections sous plusieurs formules dimensionnantes pour calculer la masse des blocs de la carapace (Hudson simple, Hudson pour Cubipod, Van der Meer).

IV.3.1.1.1 Formule d'Hudson

IV.2.1.1.1.1 Cas d'enrochement naturel :

Tableau IV-1 Formule d'Hudson générale.

Formule	Variables
Masse moyenne d'un bloc : $M_{50} = \frac{1}{K_d} \frac{\rho_s H_b^3}{\Delta^3 \cot \alpha}$	K_d : Coefficient de stabilité d'Hudson. Cot α : Pente du talus de l'ouvrage. H_b : Hauteur de la houle au pied de l'ouvrage. $\Delta = \frac{\rho_s}{\rho_e} - 1$: Densité relative déjàugée des blocs de la carapace. ρ_s : Poids volumique du bloc de la carapace. ρ_e : Poids volumique de l'eau de mer.

•

IV.2.1.1.1.2 Cas d'enrochement artificiel (Cubipod) :

Le bloc artificiel Cubipod est un élément préfabriqué en béton de masse utilisé dans la construction de carapaces principales de digues à talus et pour la protection des berges de rivières. Il s'agit d'un élément lourd qui résiste essentiellement à l'action de la houle par gravité et par friction latérale et qui est disposé sur le talus de façon aléatoire en une ou deux couches. (www.cubipod.com)

La conception de Cubipod lui confère une stabilité hydraulique élevée, avec des coefficients semblables à ceux des éléments les plus minces de type *bulky*. Ses principaux avantages sont, entre autres, un coût de production économique, une grande robustesse structurelle, auxquels s'ajoutent une facilité de fabrication, de stockage et de pose. Par ailleurs, Cubipod possède d'autres atouts : une friction élevée avec la couche de filtre, la porosité de la carapace est constante tout au long de la vie utile de la structure, un comportement flexible face à la houle et à d'éventuels tassements de terrain, et il n'a pas de limitation de taille ou de profondeur. (www.cubipod.com)

Le dimensionnement avec les cubipodes se fait uniquement via la formule d'Hudson avec un changement de paramètres issu des différents tests fait sur le bloc. Ses modifications sont comme suit : (voir annexe C pour les caractéristiques du cubipode)

Tableau IV-2 Formule d'Hudson adaptée au cubipode.

Formule	Variables
<p>Masse moyenne d'un bloc (cubipod) :</p> $M_{50} = \frac{1}{K_d} \frac{\rho_s H_s^3}{\Delta^3 \cot \alpha}$	<p>K_d : Coefficient de stabilité du cubipod. $\cot \alpha$: Pente du talus de l'ouvrage. H_s : Hauteur significative de la houle au large de l'ouvrage. $\Delta = \frac{\rho_s}{\rho_e} - 1$: Densité relative déjaugée des blocs de la carapace. ρ_s : Poids volumique du cubipod. ρ_e : Poids volumique de l'eau de mer.</p>

IV.3.1.1.2 Formule de Van der Meer

IV.2.1.1.2.1 Eaux profondes

Tableau IV-3 Formule de Van der Meer eaux profondes.

Formule de Van der Meer	
Eaux profondes	Variables
<p>Pour le déferlement plongeant ($\xi_m < \xi_{cr}$) :</p> $\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = C_{pl} P^{0.18} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \xi_m^{-0.5}$ <p>Pour le déferlement gonflant ($\xi_m \geq \xi_{cr}$) :</p> $\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = C_s P^{-0.13} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \sqrt{\cot \alpha} \xi_m^P$ <p>Avec :</p> $\xi_m = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2 \pi H_s}{g T_m^2}}}$ $\xi_{cr} = \left(\frac{C_{pl}}{C_s} P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha}\right)^{\frac{1}{P+0.5}}$	<p>N : est le nombre de vagues incidentes, qui dépend de la durée de l'état de la mer. H_s : hauteur significative de la houle, incidente en pied d'ouvrage (m). ξ_m : paramètre de déferlement, calculé à partir de la période moyenne T_m. α : angles de talus. $\Delta = \frac{\rho_s}{\rho_e} - 1$ densité relative déjaugée. P : paramètre de perméabilité nominale de l'ouvrage. C_{pl} : 6,2 C_s : 1,0</p>

Condition d'utilisation : eau profonde (hauteur d'eau au pied de l'ouvrage $H_{\text{en pied}} > 3H_{\text{au pied}}$).

NOTE : pour les angles de talus moins raides que 4/1 ($\cot a \geq 4$). Seule l'Équation pour le déferlement plongeant doit être utilisée, que le paramètre de déferlement ξ_m , soit inférieur ou supérieur à la valeur de transition ξ_{cr} . (Cetmef., 2009). Le domaine de validité par rapport au nombre de vague est : $N < 7500$

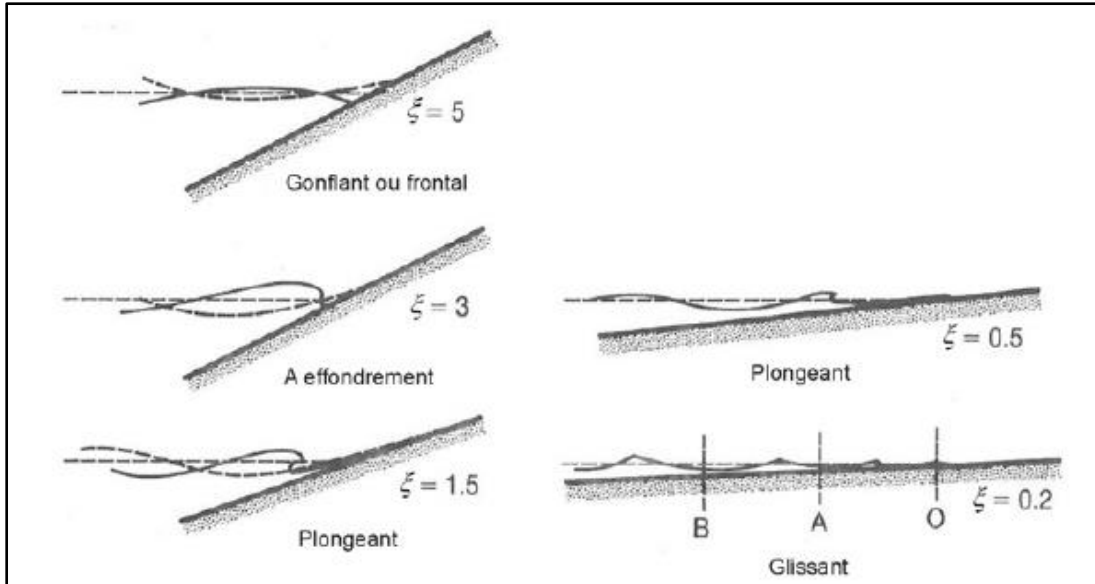


Figure IV-2 Types de déferlement en fonction de ξ_m (Battjes. J. A., 1975)

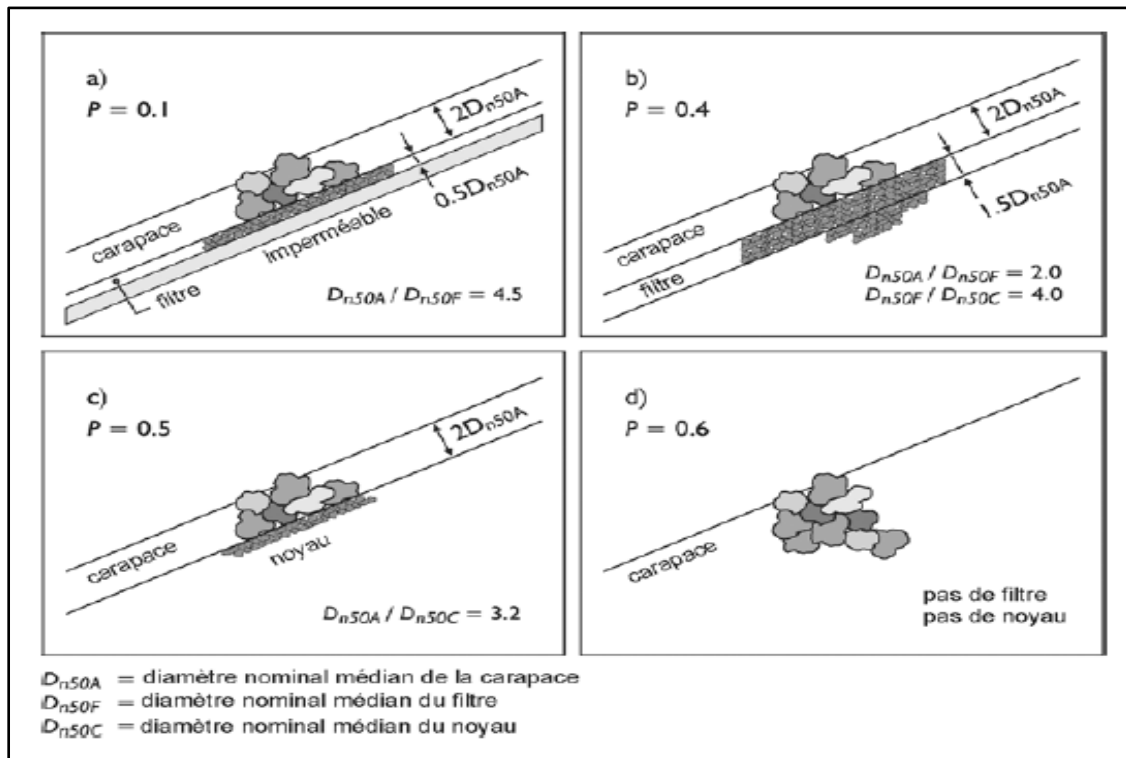


Figure IV-3 Paramètre de perméabilité nominale P pour la formule de Van der Meer (1988)

IV.2.1.1.2.2 Eaux peu profondes :

Tableau IV-4 Formule de Van der Meer eaux peu profondes.

Formule de Van der Meer	
Eaux peu profondes	Variables
<p>Pour le déferlement plongeant ($\xi_{s-1,0} < \xi_{cr}$) :</p> $\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = C_{pl} P^{0.18} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \left(\frac{H_s}{H_{2\%}}\right) \xi_{s-1,0}^{-0.5}$ <p>Pour le déferlement gonflant ($\xi_m \geq \xi_{cr}$) :</p> $\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = C_s P^{-0.13} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \left(\frac{H_s}{H_{2\%}}\right) \sqrt{\cot \alpha} \xi_{s-1,0}^P$ <p>Avec :</p> $\xi_{s-1,0} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2 \pi H_s}{g T_{m-1,0}^2}}}$ $\xi_{cr} = \left(\frac{C_{pl}}{C_s} P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha}\right)^{\frac{1}{P+0.5}}$	<p>N : est le nombre de vagues incidentes, qui dépend de la durée de l'état de la mer.</p> <p>H_s : hauteur significative de la houle, incidente en pied d'ouvrage (m).</p> <p>H_{2%} : hauteur dépassée par 2% des vagues incidente en pied d'ouvrage (m)</p> <p>ξ_{s-1,0} : paramètre de déferlement, calculé à partir de la période spectrale de la houle T_{m-1,0}.</p> <p>α : angles de talus.</p> <p>Δ = $\frac{\rho_s}{\rho_e} - 1$ densité relative déjaugée.</p> <p>P : paramètre de perméabilité nominale de l'ouvrage.</p> <p>C_{pl} : 8,4</p> <p>C_s : 1,3</p>
<p>Condition d'utilisation : eau peu profonde (hauteur d'eau au pied de l'ouvrage H_{en pied} < 3H_s au pied). Ou bien là où se produit le déferlement en grande quantité, comme la condition à laquelle H_s en- pied ≤ 70% de la hauteur de la houle au large. Le domaine de validité par rapport au nombre de vague est : N < 7500 NOTE : il faut utiliser les valeurs locales de H_{2%} et T_{m-1,0} extraite d'un modèle de propagation de la houle. (Cetmef., 2009)</p>	

IV.3.1.2 Paramètres géométriques de la carapace

Les paramètres géométriques de la carapace sont déduits via une succession du calcul simple à partir du la masse médiane des blocs de la carapace (Tableau IV-5, Tableau V-6, Tableau V-7).

Tableau IV-5 Paramètres géométriques de la carapace

Formule	Variables
Volume d'un bloc : $V = \frac{M_{50}}{\rho_s}$	M₅₀ : Masse moyenne du bloc de la carapace. ρ_s : Poids volumique du bloc de la carapace. n : Nombre de couche. K_Δ : coefficient de couche.
Diamètre nominal du bloc : $D_n = \sqrt[3]{V}$	
Epaisseur de la carapace : $e = n K_{\Delta} D_n$	
Nombre de blocs par m ² : $N_s = \frac{n}{D_n^2}$	

IV.3.2. Dimensionnement de la sous couche

Tableau IV-6 Dimensionnement de la sous couche.

Formule	Variables
Masse moyenne des blocs de la sous couches : $M_{sc50} = \frac{M_{50}}{10}$	M₅₀ : Masse moyenne du bloc de la carapace. ρ_s : Poids volumique du bloc de la carapace. n : Nombre de couche. K_Δ : coefficient de couche.
Volume d'un bloc : $V_{sc} = \frac{M_{sc50}}{\rho_s}$	
Diamètre nominal du bloc : $D_{ndc} = \sqrt[3]{V}$	
Epaisseur de la carapace : $e_{sc} = n K_{\Delta} D_{nsc}$	
<p>NOTE : la sous-couche ne doit normalement pas dépasser 15 % de la masse du bloc artificiel, dans la mesure où il faut une surface de sous-couche relativement lisse pour pouvoir disposer les blocs artificiels avec précision.</p> <p>La sous-couche ne doit pas être inférieure à 5 % de la masse du bloc artificiel, afin d'éviter que l'enrochement naturel ne soit emporté à travers les vides de la carapace. (Rock Manual. CTMEF, 2009)</p>	

IV.3.3. Dimensionnement du filtre de transition et noyau

Tableau IV-7 Formule de dimensionnement du filtre de transition et noyau.

Formule	Variables
<p>Masse moyenne des blocs du filtre de transition :</p> $M_{sc50} = \frac{M_{50}}{200}$	<p>M₅₀ : Masse moyenne du bloc de la carapace.</p>
<p>Masse du noyau :</p> $M_{n50} = \frac{M_{50}}{4000}$	
<p>NOTE : Pour la masse du noyau et du filtre, on prend une catégorie du poids limité à 50% et 150%. Toute en respectant les règles de TERZAGHI.</p>	

IV.3.4. Les règles de TERZAGHI

Les règles de TERZAGHI s'appliquent entre le noyau et le filtre de transition, afin de limiter l'entraînement des éléments fins vers les couches de matériaux plus gros.

Tableau IV-8 Règles de TERZAGHI.

Formules	Variables
<p>Les règles de TERZAGHI :</p> $\frac{D_{15} \text{ (filtre)}}{D_{85} \text{ (noyau)}} < 5 ;$ $4 < \frac{D_{15} \text{ (filtre)}}{D_{15} \text{ (noyau)}} < 20 ;$ $\frac{D_{50} \text{ (filtre)}}{D_{50} \text{ (noyau)}} < 25 ;$ <p>Avec :</p> $D_i = i (\phi_s - \phi_i) + \phi_i$ $\phi_s = 2 \times \left(3 * \frac{M_s}{4\pi \rho_s} \right)^{\frac{1}{3}}$ $\phi_i = 2 \times \left(3 * \frac{M_i}{4\pi \rho_s} \right)^{\frac{1}{3}}$	<p>D_i : diamètre des matériaux pour chaque pourcentage de la courbe granulométrique.</p> <p>i : Indice de pourcentage.</p> <p>φ_s : diamètre supérieur des matériaux de la couche.</p> <p>φ_i : diamètre inférieur des matériaux de la couche.</p> <p>M_s : masse supérieure des matériaux de la couche.</p> <p>M_i : masse inférieure des matériaux de la couche.</p> <p>ρ_s : masse volumique du matériau.</p>

IV.3.5. Dimensionnement de la butée de pied

Tableau IV-9 Formule de dimensionnement de la butée de pied.

Formule	Variables
<p>Masse moyenne d'un bloc :</p> $M_{b50} = \frac{0.1}{K_d} \left(\frac{\rho_s H_b^3}{\Delta^3 \cot \alpha} \right) \frac{H_b}{d}$	<p>K_d : Coefficient de stabilité d'Hudson. Cot α : Pente du talus de l'ouvrage. H_b : Hauteur de la houle au pied de l'ouvrage. d : profondeur au pied de l'ouvrage $\Delta = \frac{\rho_s}{\rho_e} - 1$: Densité relative déjaugée des blocs de la carapace.</p>
<p>Épaisseur et largeur de la carapace :</p> $e, l = n K_\Delta \left(\frac{M_b}{\rho_s} \right)^{\frac{1}{3}}$	<p>ρ_s : Poids volumique du bloc de la carapace. ρ_e : Poids volumique de l'eau de mer. n : Nombre de couche. K_Δ : coefficient de couche.</p>

IV.4. Résultats des calculs de dimensionnement

Les tableaux qui suivent résume l'ensemble des calculs effectués pour le dimensionnement de la digue principale et de la contre digue pour une hauteur de houle du projet est de 5 m au large.

Les résultats obtenus (Tableau IV-10) pour la section courante de la jetée principale, mettent en valeur les différentes formules utilisées lors de ce calcul pour chaque type d'enrochement. A titre de comparaison, la formule d'Hudson et Van der Meer pour des mêmes types d'enrochement et de hauteur de houle au pied de l'ouvrage : la formule de Vander Meer propose un grossissement de la masse du bloc d'environ +70 % par rapport aux résultats obtenu avec la formule d'Hudson pour la carapace. Ce grossissement vient du fait que Van der Meer prend en compte plus de variable susceptible de porter atteinte à stabilité de la digue. Aussi, il est à signaler que les dimensions de la sous couche et du noyau ne sont pas vraiment impactées par les résultats de la carapace issus de chaque formule.

Les résultats (Tableau IV-11) obtenus pour le musoir de la jetée principale, confirment les résultats obtenus pour la section courante à-propos de l'utilisation des différentes formules de dimensionnements de digues en mer ; l'application de la formule de Van der Meer offre un degré de stabilité face aux actions de la mer plus élevé que les résultats obtenus par l'application d'Hudson.

Aussi, il est à noter que pour les cubipodes, une formule sur mesure est nécessaire. Les résultats obtenus sont ceux adopté pour la conception de la marina d'Alger.

Note : les masses représentées dans le tableau sont des masses moyennes. Lors de la réalisation du projet des fourchettes de masse des blocs seront prises pour chaque couche dans lesquelles la masse moyenne sera bordé par une limite inférieure et supérieure d'environ 1 tonnes pour les enrochements naturel de la carapace et de plus ou moins 0.5 tonne pour la sous couche. (Voir annexe C pour les calculs)

Tableau IV-10 Dimensionnements proposés pour la section courante de la jetée principale.

Enrochement	Formule utilisé	Carapace		Sous couche		Noyau	Butée de pied	
		Masse moyenne du bloc (Tonne)	Epaisseur de la couche (Mètre)	Masse moyenne du bloc (Tonne)	Epaisseur de la couche (Mètre)	Masse des matériaux TVC (Tonne)	Masse moyenne du bloc (Tonne)	Epaisseur et longueur (Mètre)
Enrochements naturels	Hudson	1.9	1.80	0.2	0.82	< 0.1	0.3	0.90
	Van der Meer (eau peu profonde)	3.3	2.14	0.3	1.00	< 0.1		
Cubipode	Hudson adapté pour les cubipodes	2.9	2.46	0.3	0.96	< 0.1		
Blocs artificiels en béton (autre que Cubipode)	Van der Meer (eau peu profonde)	4.9	2.54	0.5	1.14	< 0.1		

Note : les masses représentées dans le tableau sont des masses moyennes. Lors de la réalisation du projet des fourchettes de masse des blocs seront prises pour chaque couche dans lesquelles la masse moyenne sera bordé par une limite inférieure et supérieure d'environ 0.5 tonnes pour les enrochements naturel. (Voir annexe C pour les calculs)

Tableau IV-11 Dimensionnements proposés pour le musoir de la jetée principale.

Enrochement	Formule utilisé	Carapace		Sous couche		Noyau	Butée de pied	
		Masse moyenne du bloc (Tonne)	Epaisseur de la couche (Mètre)	Masse moyenne du bloc (Tonne)	Epaisseur de la couche (Mètre)	Masse des matériaux TVC (Tonne)	Masse moyenne du bloc (Tonne)	Epaisseur et longueur (Mètre)
Enrochements naturels	Hudson	3.9	2.28	0.4	1.06	< 0.1	0.3	0.90
	Van der Meer (eau peu profonde)	5.0	2.46	0.5	1.14	< 0.1		
Cubipode	Hudson adapté pour les cubipodes	11.8	3.91	1.2	1.52	< 0.1		
Blocs artificiels en béton (autre que Cubipode)	Van der Meer (eau peu profonde)	7.5	2.93	0.8	2.42	< 0.1		

Tableau IV-12 Dimensionnements proposés pour de la jetée secondaire. (Voir annexe C pour les calculs)

Enrochement	Formule utilisé	Carapace		Sous couche		Noyau
		Masse moyenne du bloc (Tonne)	Epaisseur de la couche (Mètre)	Masse moyenne du bloc (Tonne)	Epaisseur de la couche (Mètre)	Masse des matériaux TVC (Tonne)
Section courante de la jetée secondaire						
Enrochements naturels	Hudson	1.2	1.54	0.2	0.74	< 0.1
	Van der Meer (eau peu profonde)	2.8	2.10	0.3	0.98	< 0.1
Musoir						
Cubipode	Hudson adapté pour les cubipodes	3.5	2.20	0.4	1.00	< 0.1
Blocs artificiels en béton (autre que Cubipode)	Van der Meer (eau peu profonde)	4.1	2.40	0.4	0.54	< 0.1

IV.5. Caractéristiques de la dige de la jetée principale de la marina

IV.5.1. Section courante

Le corps de la dige d'une longueur totale d'environ 785 m, se compose de plusieurs couches comme le montre la Figure IV-4.

La coupe de ce tronçon de la dige se compose d'une carapace en cubipode de 3 t placée sur deux couches, avec une épaisseur nominale de 2.18 m et un talus 3/2. La carapace est complétée par un couronnement à +6.00 m et une risberme de 4.47 m de largeur.

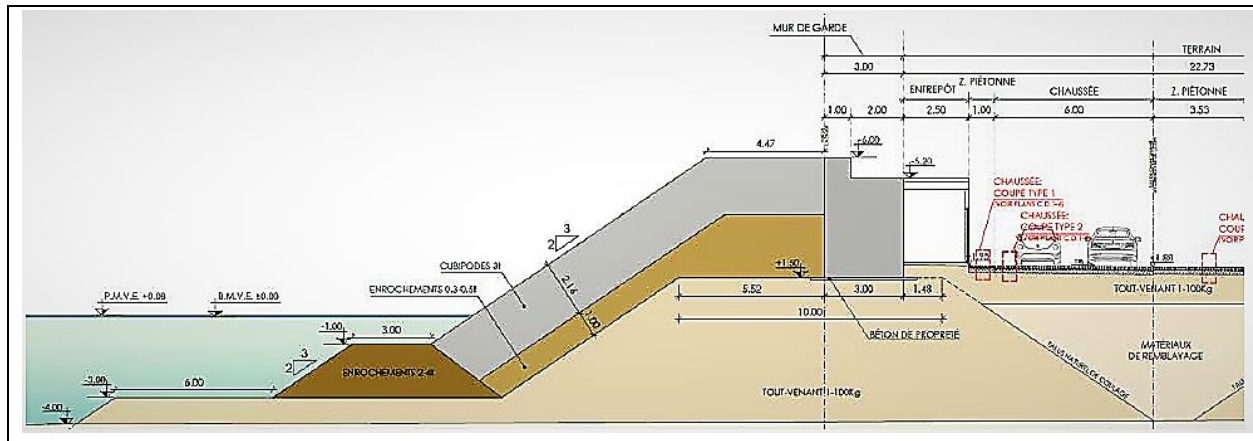


Figure IV-4 Coupe type de la section courante de la jetée principale. (BTP Infrastructuras., 2015)

La sous couche en enrochement de 0.3 – 0.5 tonne en deux couches dans le talus, et en trois couches pour la zone émergée. L'épaisseur de la sous couche est de 1m.

L'ensemble carapace-filtre, s'appuie sur une risberme d'enrochement d'une taille comprise entre 2-4 t qui assure la stabilité au pied. Le noyau en tout-venant de carrière, inférieur à 100 kg, se prolonge en dessous de la risberme pour former le tapis anti-affouillement qui se prolonge sur une longueur de 6 m depuis le pied de la risberme.

IV.5.2. Musoir

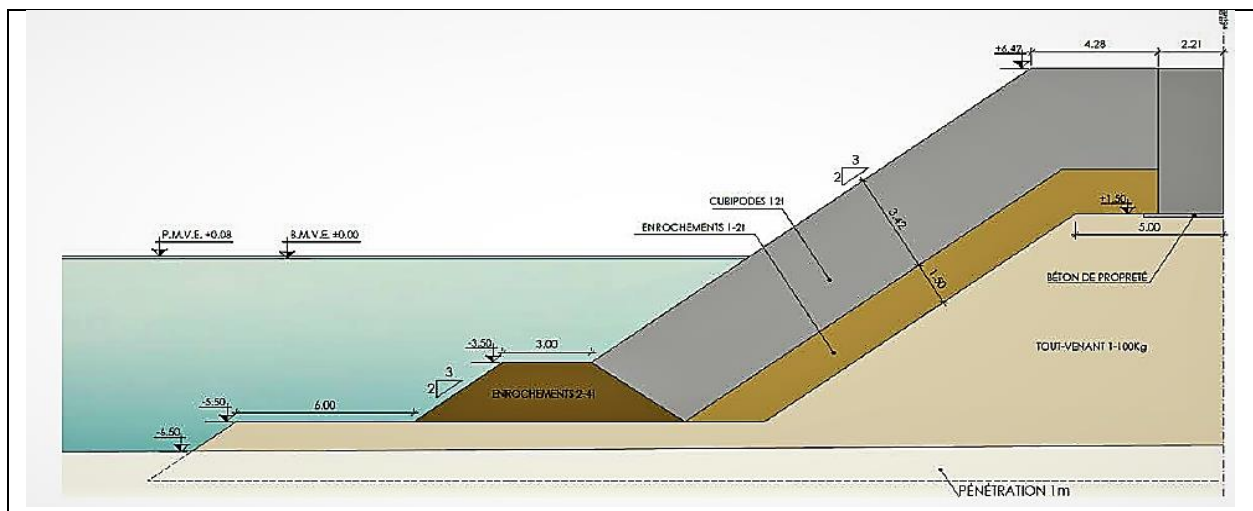


Figure IV-5 Coupe type du musoir de la jetée principale. (BTP Infrastructuras.)

Cette partie de la digue (voir Figure IV-5) se compose d'une carapace en cubipode bicouche de 12 t, avec une épaisseur de 3.42 m et un talus 3/2. Dans la partie émergée, un couronnement à +6.42 m et une risberme de 4.28 m de largeur complète la carapace.

Sous la carapace, une sous couche en d'engrochement de 1-2 tonnes est posée en deux couches, d'une épaisseur de 1.5m. La risberme émergée est à +3.00 m avec une largeur de 3.25 m. L'ensemble carapace-filtre, s'appuie sur une risberme d'engrochement pesant entre 2-4 t.

Le noyau est composé de tout-venant de carrière de 0-100 kg. Le noyau se prolonge en dessous de la risberme formant un tapis anti-affouillement.

IV.6. Caractéristiques de la digue de la jetée secondaire de la marina

IV.6.1. Section courante

La coupe du corps de la contre-digue a une longueur de 140 m. Elle est formée d'une carapace en engrochements de 3-4 tonnes avec une épaisseur de 2.30 m et un talus 3/2. (Figure IV-6)

Dans la partie émergée, la carapace couronne à la cote +5.00 m et dispose d'une largeur en couronnement de 4.0 m.

La sous couche est posée en deux couches d'engrochement de 0.1 – 0.3 tonnes. L'ensemble carapace- sous couche s'appuie sur un tapis anti-affouillement de tout-venant. Le noyau est composé de tout-venant de carrière de 0-100 kg.

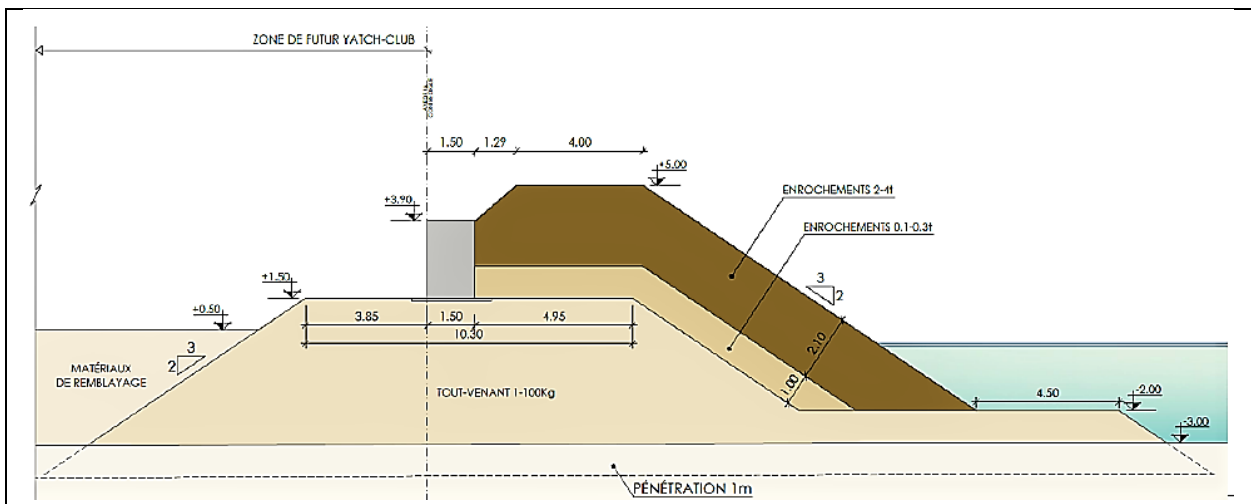


Figure IV-6 Coupe type de la section courante de la jetée secondaire. (BTP Infrastructuras)

IV.6.2. Musoir

La coupe de ce tronçon (Figure IV-7) se compose d'une carapace, composée de cubipode bicouche de 4 t. avec une épaisseur de 2.30 m et un talus 3/2. En haut une risberme de 6.0 m de largeur.

La sous couche en enrochement est posée en deux couches de 0.1 - 0.3 tonnes dans le talus. L'épaisseur de la sous couche est de 1.00 m.

L'ensemble carapace-filtre s'appuie sur un tapis anti-affouillement de 1 m d'épaisseur de tout-venant. Le noyau est composé de tout-venant de carrière de 0-100 kg.

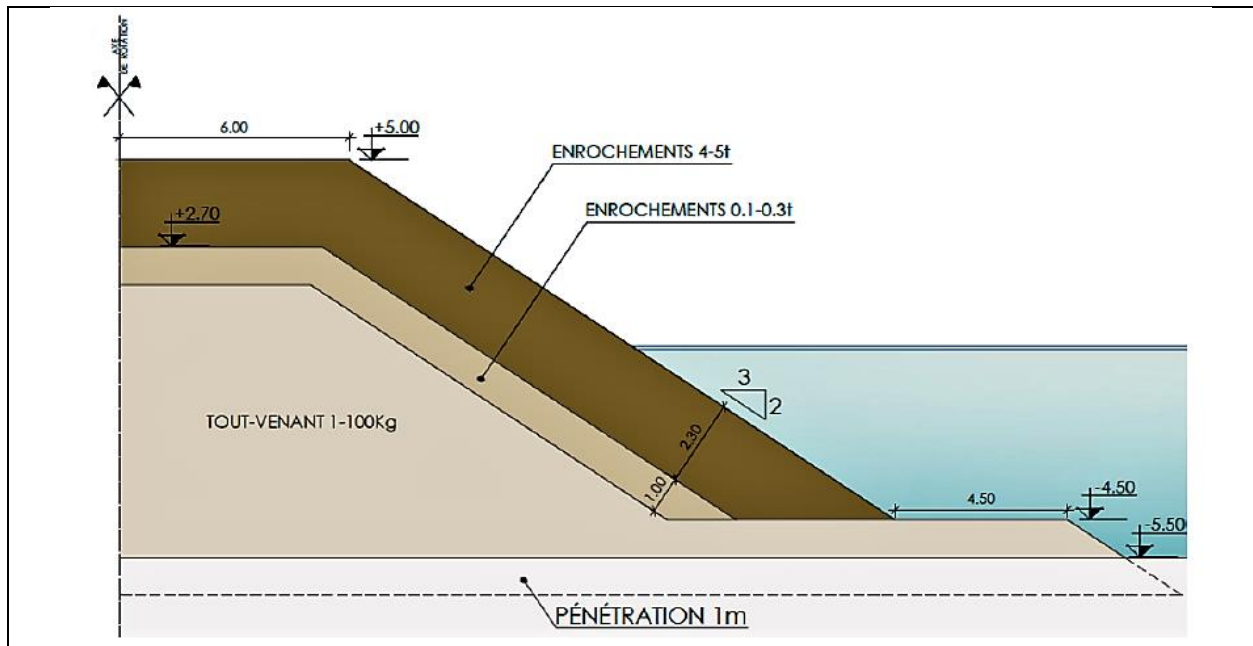


Figure IV-7 Coupe type du musoir de la jetée secondaire. (BTP Infrastructuras)

Chapter V Performance hydraulique de la digue principale.

V.1. Introduction

Dans l'ouvrage '**Coastal engineering Manual**', l'interaction entre les vagues et les structures peut être séparée en réponses hydrauliques, ainsi que les charges et la réponse des éléments structurels. Chaque interaction est décrite par une formule qui, dans la plupart des cas, est de nature empirique- la forme étant basée sur des considérations physiques-, mais les constantes empiriques étant déterminées par ajustement à la structure.

Dans ce chapitre on va déterminer les différentes actions hydrauliques exercées sur l'ouvrage.

Au-delà des actions de la houle qui influence la stabilité de l'ouvrage, il existe d'autres interactions hydrauliques entre la houle et l'ouvrage hydraulique que l'on appelle : le run-up, le run-down, la transmission et le franchissement des vagues.

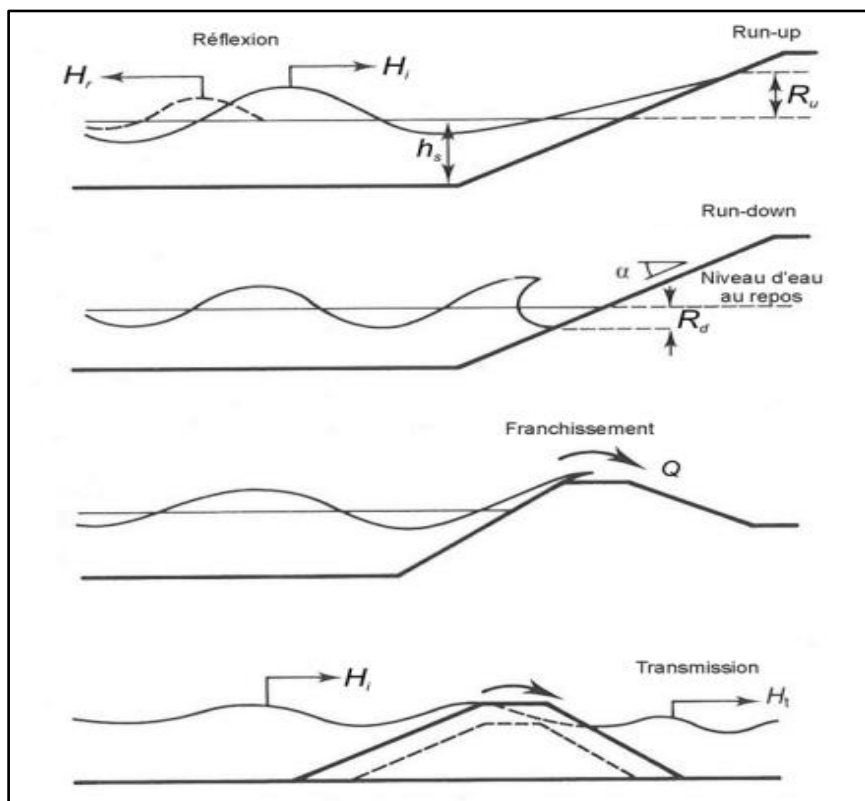


Figure V-1 Interactions hydrauliques de la houle avec les ouvrages (Cetmef, 2009).

Le Run-up et le run-down de la houle se produit sur le talus et le franchissement et la transmission de la houle sont importants pour la zone derrière l'ouvrage. Ces différents types de performance hydraulique ont fait l'objet de multiples recherches, qui ont débouché sur une grande variété de relations empiriques (Imane.S., 2011).

L'ensemble des calculs seront appliquer sur la partie courante de la digue principale (Figure IV-4) en raison des tests effectués dans le canal à houle et de résultats qui s'en sont suivis.

Les calculs vont se faire sur les évènements extrêmes calculés dans le chapitre 2. Pour la direction la plus pénalisante au pied de l'ouvrage pour toutes les périodes de retour simulées, ce sont ceux

calculés dans le chapitre 3 appliqué sur la section courante se trouvant juste avant le musoir (la partie parallèle à la côte (voir Figure I-2)).

Le Tableau V-1 montre les paramètres de houle (issus de la modélisation) spécifique aux scénarios retenus pour le calcul de la performance hydraulique de la digue principale de la marina d'Alger, avec :

- L'angle β : Angle d'incidence de la houle par rapport à la normale en degré.
- H_{m0} : calculé à partir de la formule proposée par (Kamphuis 2001) pour le calcul de la hauteur du spectre pour les ondes longues au niveau de l'ouvrage.

$$\frac{(H_{m0})_{LW}}{H_{s,b}} = 0.11 \left[\frac{H_{s,b}}{g T_p^2} \right]^{-0.24} \quad \text{Équation V-1}$$

Et, $H_{s,b}$: la hauteur significative de la houle au point de déferlement.

Tableau V-1 Scénarios retenus pour le calcul de la performance hydraulique de la digue

Période de retour	Direction pénalisante	Hs	Hmo	Tp	Tmo-1	Direction	B
Année		m	m	s	s	°	°
2	N	2.34	0.94	9.5	8.6	360	0
5	N	2.53	1.012	10.3	9.4	357	3
10	N	2.64	1.056	11.2	10.2	357	3
20	N	2.57	1.028	10.5	9.5	358	2
50	NNW	2.77	1.108	11.4	10.4	352	8
100	N	2.99	1.196	11.4	10.4	357	3
1000	NNW	3.59	1.436	12.5	11.4	352	8

V.2. Run-Up

Quand la vague atteint l'ouvrage, elle s'étend verticalement ce qui va augmenter la surface libre par rapport à la houle incidente. La houle se déferle sur l'ouvrage ce qui entraîne une remontée d'eau. Le run up de la houle est le niveau maximal que l'eau peut atteindre sur le talus de l'ouvrage.

Contrairement à la houle régulière, pour laquelle il n'existe qu'une seule valeur maximale de run-up, la houle irrégulière engendre une distribution du run-up. Il est par conséquent nécessaire que les formules de run-up déterminent un paramètre représentatif de cette distribution. À l'heure actuelle, le paramètre de run-up de la houle irrégulière le plus communément utilisé est Ru2% (m). (Cetmef., 2009).

Dans le cas général le $R_{2\%}$ est calculé comme suit :

$$R_{u2\%} / H_s = A \xi + B \quad \text{Équation V-2}$$

Avec :

$R_{u2\%}$: Le run-up dépassé par 2% des vagues.

ξ (-) : Le paramètre de déferlement, également connu sous le nom de nombre d'Iribarren :

$$\xi = \tan \alpha / \sqrt{s_0} \quad \text{Équation V-3}$$

s_0 : Cambrure de la houle :

$$s_0 = H / L_o = \frac{2\pi}{g} \frac{H}{T^2} \quad \text{Équation V-4}$$

H (m) : la hauteur de la houle locale.

L_o (m) : la longueur d'onde théorique de la houle au large.

T (s) : la période de la houle.

Pour notre cas d'étude, on va utiliser la méthode de **TAW (2002 a)** pour le calcul du run-up $R_{u2\%}$ en utilisant le paramètre de déferlement $\xi_{m-1,0}$, $T_{m-1,0}$, et la hauteur spectrale de la houle H_{m0} .

$$R_{u2\%} / H_{m0} = A \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \xi_{m-1,0} \quad \text{Équation V-5}$$

Avec :

- **H_{m0}** : la hauteur significative spectrale de la houle.
- γ_f : facteur de rugosité (γ_f cubipode 2 couches = 0,44).
- γ_b : Facteur du berme ($\gamma_b = 1 - k_B(1 - k_h)$ avec $0.6 \leq \gamma_b \leq 1.0$). Absence de berme donc ($\gamma_b = 1$).
- γ_β : facteur de correction pour les ondes obliques ($\gamma_\beta = 1 - 0.0022|\beta|$ pour $0^\circ \leq |\beta| \leq 80^\circ$).
- **$\xi_{m-1,0}$** : Paramètre de déferlement :

$$\xi_{m-1,0} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi \cdot H_s}{g \cdot T_{m-1,0}^2}}} \quad \text{Équation V-6}$$

- **$T_{m-1,0}$** : Période énergétique spectrale.
- **H_s** : hauteur significative de la houle au pied de l'ouvrage.
- **g** : l'accélération de la pesanteur a la surface de la terre (9.81m/s).

Note :

Les formules Équation V-1 et Équation V-4 sont valables pour $0,5 < \gamma_b * \xi_{m-1,0} < 8$ à 10 .

Pour les valeurs élevées de $\xi_{m-1,0}$ et ($\gamma_b * \xi_{m-1,0} > 10$), la formule 5.7 est proposée :

$$R_{u2\%} / H_{m0} = \gamma_f \gamma_\beta \left(B - C / \sqrt{\xi_{m-1,0}} \right) \quad \text{Équation V-7}$$

Les valeurs des trois coefficients A , B et C qui seront utiliser dans les deux équations ci-dessus, pour notre cas on va opter pour les coefficients avec les marges d'erreur qui sont présente dans ce tableau :

Tableau V-2 Valeurs des coefficients A, B et C pour les formules Équation V-1,Équation V-4 et Équation V-7. (CETMEF,2009).

Coefficients	Valeurs avec marge de sécurité	Valeurs sans marge de sécurité
A	1.75	1.65
B	4.3	4.0
C	1.6	1.5

Afin de voir l'ensemble de l'étendue maximale du run-up sur le talus de la digue. On calcule le $R_{u99/100\%}$ ou le $R_{u\max}$ suivant la formule utilisée par (M. Yuhi., 2021), à partir du $R_{u2\%}$ comme suit :

$$R_{u99/100\%} = 1.54 R_{u2\%} \quad \text{Équation V-7}$$

V.2.1. Résultats des calculs du Run-Up

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau V-3. Ils permettent de voir le run-up auquel devra faire face l'ouvrage dans des conditions de houle différentes selon les scénarios définis.

On constat que pour les conditions de houle dans la zone à proximité de la marina, le run-up de la majorité des vagues déferlantes sur le talus de la digue ($R_{u2\%}$) varie entre 3.40 m et 4 m pour les conditions les plus récurrentes et est le plus susceptible de se reproduire dans la zone (période de retour inférieur à 20 ans). Par contre de ces mêmes conditions, certaines vagues rares peuvent atteindre une hauteur de run-up ($R_{u99/100\%}$) qui varie entre 5.20 et 6.20 m et une distance de déferlement sur le talus de 6 à 11 m.

L'étendu de la variation du run-up dans ces conditions vingtenale, entre le $R_{u2\%}$ et le $R_{u99/100\%}$, est en moyenne de 2 m, ceci indique la hauteur de run-up dans laquelle varie l'ensemble des vagues déferlantes sur la digue pour des même conditions.

Tableau V-3 Résultats du Run-up au quel est exposé la section courante de la digue principale de la marina.

Période de retour	$\xi_{m-1,0}$	$R_{u2\%}$	$R_{u99/100\%}$	Etendu du run-up	Distance déferlement sur l'ouvrage $R_{u2\%}$	Distance déferlement sur l'ouvrage $R_{u99/100\%}$
Année		m	m	m	m	m
2 ans	4.71	3.41	5.25	1.84	6.2	9.55
5 ans	4.85	3.76	5.79	2.03	6.84	10.52
10 ans	5.16	3.96	6.10	2.14	7.2	11.09
20 ans	5.16	4.04	6.22	1.82	7.34	11.30
50 ans	5.16	4.32	6.65	2.33	7.85	12.09
100 ans	4.92	4.52	6.96	2.44	8.22	12.65
1000 ans	4.96	5.37	8.26	2.89	9.76	15.02

Pour les évènements plus extrêmes dépassant la période de retour de 20 ans, on remarque que pour les conditions de houle dans la zone à proximité de la marina, le run-up de la majorité des vagues déferlantes sur le talus de la digue ($R_{u2\%}$) varie entre 4 m et 5.4 m (pour les conditions les plus rares dans la zone). Par contre de ces mêmes conditions, certaines vagues rares peuvent atteindre une hauteur de run-up ($R_{u99/100\%}$) qui varie entre 11.30 et 15 m et une distance de déferlement sur le talus de 7 à 15 m.

L'étendu de la variation du run-up dans ces conditions extrêmes, entre le $R_{u2\%}$ et le $R_{u99/100\%}$, est en moyenne de 2.5 m, ceci indique la hauteur de run-up dans la quelle varie l'ensemble des vagues déferlantes sur la digue pour des même conditions.

Sachant que la cote d'arase de de cette section (section courante) de la digue principale de la marina est de 6 m et la distance du talus est 10.90 m, l'ensemble des vagues -dont le run-up dépassant les 6 m de hauteur et 10.90 m de distance de déferlement- sont susceptibles d'engendrer un franchissement des vagues à l'intérieurs de la marina.

V.3. Run Down

Le Run-down R_d est souvent utilisé pour déterminer l'étendue inférieure de la carapace. C'est le plus bas niveau qu'une houle peut atteindre sur un talus. Il est positif quand son niveau est inférieur à celui de l'eau au repos.

Pour le calcul de run-down, on a choisi la méthode de Van der Meer (1988b) qui a donné une relation incluant les effets de la perméabilité de l'ouvrage, de l'angle du talus et de la cambrure nominale de la houle. (CETMEF., 2009).

$$R_{d2\%} / H_s = 2.1\sqrt{\tan \alpha} - 1.2 P^{0.15} + 1.5 \exp(-60 s_{om}) \quad \text{Équation V-8}$$

Avec :

- **P** : la perméabilité de l'ouvrage.
- **α (°)** : l'angle du talus.
- **S_{om}** : la cambrure nominale de la houle.

Aussi, pour bien connaître l'étendu de l'ouvrage sur lequel les forces dues à la houle s'exerceront, on calcul E l'extension minimale, comme suit :

$$E = \frac{R_{un\%} + R_{dn\%}}{\sin(\alpha)} \quad \text{Équation V-9}$$

V.3.1. Résultats des calculs du Run-Down :

Tableau V-4 Résultats du Run-down au quel est exposé la section courante de la digue principale de la marina et l'extension nominale.

Période de retour	Sm0	Rd2%	E
Année		m	m
2 ans	0.02	2.83	11.34
5 ans	0.02	3.05	12.38
10 ans	0.01	3.32	13.23
20 ans	0.02	3.15	13.07
50 ans	0.01	3.40	14.03
100 ans	0.01	3.64	14.83
1000 ans	0.02	4.26	17.51

Les résultats du run-down sont en moyenne de 3.40 m de hauteur. Sachant que la butée du pied de la digue est à 3 m de profondeur, toute hauteur de run-down dépassant les 3 m met a découvert, lors de ces évènements, l'ensemble de la digue jusqu'au sous bassement -ce qui peut engendrer un risque sur la stabilité de cette dernière-.

Le calcul de l'extension nominale nous permet de voir la zone ou s'exerce les forces de la houle. La marina ayant une distance de pente fictive jusqu'à la butée d'environ 19 m. Les résultats obtenus (Tableau V-4) montrent que l'étendu de la digue subit, sur 13 m en moyenne, les force de la houle pour des événements cinquantennaux, ce qui représente environ 70 % du linière de la

digue. L'ensemble de ces forces et leurs applications sont un risque sur la stabilité et la survie de l'ouvrage suite à ces événements exceptionnels.

V.4. Franchissement

Lors du dimensionnement de nombreux ouvrages hydrauliques, la hauteur de la crête est déterminée par le débit franchissant de la houle. En houle aléatoire, le débit franchissant varie beaucoup d'une vague à l'autre, notamment parce qu'il y a de nombreux paramètres à prendre en compte (la houle, la géométrie du talus et de la crête). Il suffit souvent d'utiliser le débit moyen, généralement exprimé sous forme d'un débit spécifique par mètre linéaire de crête (m³/s par mètre linéaire ou l/s par mètre linéaire). (CETMEF., 2009).

Quand le Run-Up dépasse la crête de l'ouvrage, on parle de franchissement. Généralement les dimensionnements sont faits pour qu'il ne se produise que rarement (pendant les tempêtes quelques vagues dépasse la crête).

La plupart des formules utiliser pour le calcul de franchissement sont de type exponentiel :

$$q = A \exp(B R_c) \quad \text{Équation V-10}$$

Où :

A et B : dépendent de la méthode employée, des paramètres qui se rapportent à l'ouvrage.

R_c : Revanche de la crête.

Le Tableau V-5 qui suit, présente la norme établie par (Allsop et al, 2005) sur le débit de franchissement et des dégâts engendrés sur les ouvrages et les embarcations :

On remarque que même des débits relativement faibles ont un grand impact que ce soit pour les embarcations amarrées ou pour l'ouvrage en lui-même (des dégâts sont observés dès que le débit dépasse les 2 l/s par un mètre linéaire de digue).

La méthode choisie pour les calculs du franchissement est celle utilisée par (TAW 2002a) qui a proposé deux équations développées initialement par Van der Meer.

La première pour les vagues déferlantes ($\gamma_b^* \xi_{m-1,0} < \approx 2$) dans le cas où le franchissement de la houle augment avec l'accroissement du paramètre de déferlement.

Pour le deuxième cas pour les vagues non déferlantes ($\gamma_b^* \xi_{m-1,0} > 2$), le cas où le franchissement atteint son maximum.

Tableau V-5 Norme établie par (Allsop et al, 2005) sur le débit des franchissements et des dégâts engendrés.

Risques et dommages	q Débit franchissant moyen	V_{max} Volume franchissant maximum
	(m ³ /s par m)	(m ³ /s par m)
Naufrage de petits bateaux amarrées à 5 – 10 mètres du mur, dégâts sur les bateaux de plus grande taille.	q > 0.01	V _{max} > 1 - 10
Dégâts importants sur de plus grands bateaux, voire naufrage	q > 0.05	V _{max} > 5 - 50
Pour une digue à talus : Aucun dégât Dégâts si la crête n'est pas protégée Dégâts si le talus arrière n'est pas protégée Dégâts même si la protection est complète	q < 2.10 ⁻³ 2.10 ⁻³ < q < 0.02 0.02 < q < 0.05 q > 0.05	

Pour de la houle déferlante ($\gamma_b * \xi_{m-1,0} < \approx 2$):

$$q / \sqrt{g H_{m0}^3} = \frac{A}{\sqrt{\tan \alpha}} \gamma_b \xi_{m-1,0} \exp \left(-B \frac{R_c}{H_{m0}} \frac{1}{\xi_{m-1,0} \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta} \right) \quad \text{Équation V-11}$$

Pour la houle non-déferlante ($\gamma_b * \xi_{m-1,0} \geq 2$) (un franchissement maximal):

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = C \exp \left(-D \cdot R_c / \xi_{m-1,0} \cdot H_{m0} \cdot \gamma_f \right) \quad \text{Équation V-12}$$

Tel que :

- **q** : le débit franchissant spécifique moyen. q (m³/s par m).
- **H_{m0}** : la hauteur significative spectrale de la houle.
- γ_f : facteur de rugosité, (γ_f cubipode 2 couches = 0,44).
- γ_b : Facteur du berme ($\gamma_b = 1 - k_B(1 - k_h)$ avec ($0.6 \leq \gamma_b \leq 1.0$)). Dans le cas de la marina il n'y a pas de berme donc ($\gamma_b = 1$).
- γ_β : facteur de correction pour les ondes obliques ($\gamma_\beta = 1 - 0.0022|\beta|$ pour $0^\circ \leq |\beta| \leq 80^\circ$).
- $\xi_{m-1,0}$: Paramètre de déferlement local.
- **R_c** : Revanche de la crête (**R_c = 6 m** partie courante de la jetée de la Marina).

Les valeurs des coefficients A, B, C et D ont été calculées selon le modèle de TAW (2002), ils représentent la tendance moyenne de la totalité des données utilisées dans les calculs probabilistes. Le Tableau V-6 ci-dessous représente les valeurs avec et sans la marge de sécurité :

Tableau V-6 Valeurs des coefficients A, B, C et D selon (TAW, 2002).

Coefficients des Equations de calcul franchissement Van der Meer	Valeurs avec marge de sécurité ($\mu-\sigma$) - calculs déterministes	Valeurs sans marge de sécurité - tendance moyenne/calculs probabilistes
A	0.067	0.067
B	4.30	4.75
C	0.20	0.20
D	2.30	2.60

D'après les résultats, le paramètre de déferlement local $\xi_{m-1,0}$ calculée pour le Run-Up sont tous supérieure à 02 ($\gamma_b * \xi_{m-1,0} < \approx 2$), on utilise la deuxième équation lors de nos calculs.

V.4.1. Les résultats de calcul des franchissements :

On a constaté dans le Tableau V-7 que pour la période de retour de 2ans, le franchissement n'est pas problématique pour les véhicules, le piétons et les installations disposées dans la zone interne de la digue d'abri.

Par contre, pour les périodes de 10ans jusqu'à 100 ans, le franchissement est dangereux pour les digues à talus si la crête n'est pas protégée (Pour le cas de la Marina la crête est protégée) et risque de causer des dégâts importants sur de plus grands bateaux, voire naufrage.

Tableau V-7 Résultats des débits de franchissement au quel est exposé la section courante de la digue principale de la marina.

Période de retour	H _{mo}	$\xi_{m-1,0}$	q
Année	m		m ³ /s/m
2ans	0.94	4,71	0,093
5ans	1.012	4,85	0,16
10ans	1.056	5,16	0,24
20ans	1.028	5,16	0,21
50ans	1.108	5,16	0,32
100ans	1.196	4,92	0,40
1000ans	1.436	4,96	1,03

Les résultats obtenus (Tableau V-7) pour le franchissement, pour les différents scénarios de houle, nous ont permis de constater que d'un point de vue structurelle, la digue principale de la marina est assez résistante au franchissement avec des valeurs relativement faibles de < 1 l/s par mètre

linéaire. D'après ces résultats, le franchissement ne présente pas un grand danger pour la stabilité structurelle de la marina face aux actions hydrauliques de la mer.

V.5. Conclusion

L'ensemble des calculs réalisés dans ce chapitre semble indiquer que la section courante de la digue principale de la marina d'Alger est capable de résister à un certain nombre de conditions extrêmes. Néanmoins, elle reste fragile au phénomène de run-down qui risque de lui causer le plus de dégâts lors d'évènements avec une durée de retour assez courte.

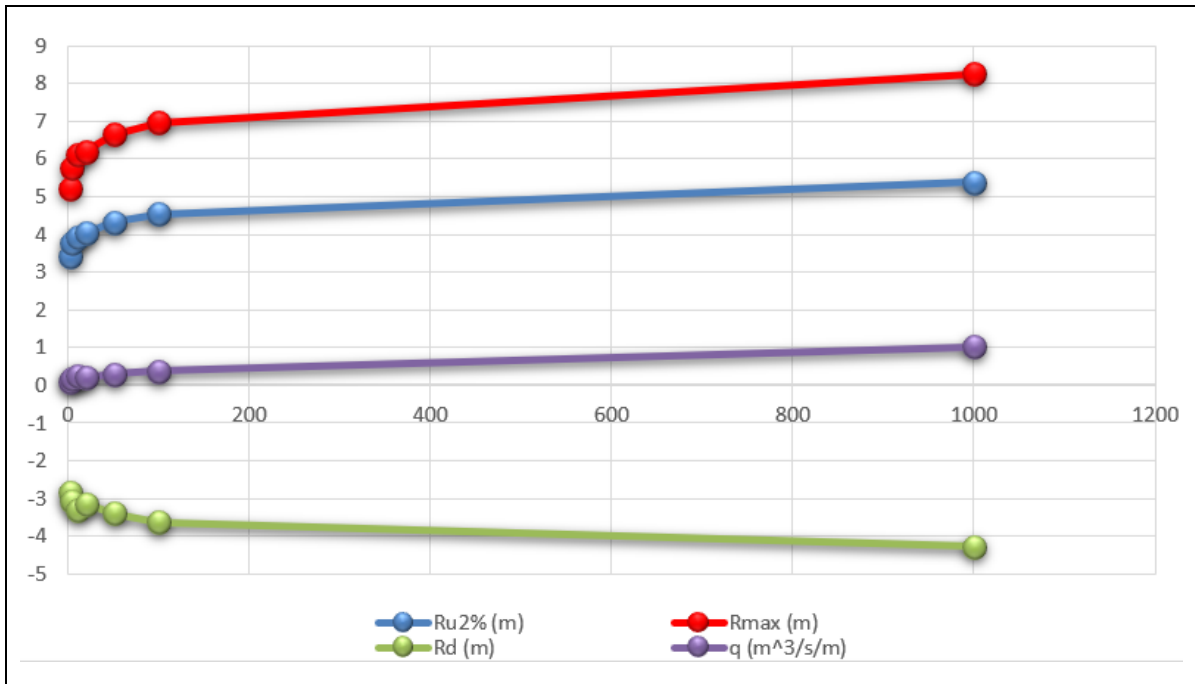


Figure V-2 Résultats des calculs des phénomènes de la performance hydraulique (le Run-down est positif dans les calculs via la formule. La valeur négative est à titre indicative dans le graphe).

Les résultats obtenus lors des calculs Figure V-2 de franchissements restent logiques, de ce fait dans le chapitre suivant, nous allons explorer une nouvelle méthode pour le calcul des franchissements en se basant sur des résultats de tests réels, effectués par plusieurs laboratoires sur différentes digues à talus.

**Chapter VI Application du Machine
Learning pour l'étude du
franchissement.**

VI.1. Introduction

Machine Learning (ML) ou apprentissage automatique est un domaine de l'intelligence artificielle (IA) qui permet aux machines d'effectuer des tâches sans être programmée explicitement. Il vise à construire des modèles qui font résoudre les problèmes par le traitement de données. Cela permet de définir les corrélations existantes entre les données pour prédire leurs implications.

L'apprentissage automatique comporte plusieurs étapes, qui se présente comme ceci :

- Comprendre le problème
- Acquérir les données
- Traiter et nettoyer les données
- Choisir des algorithmes adaptés au problème
- Optimiser les algorithmes : (Trouver les hyperparamètres optimaux des algorithmes)
- Tester : (Faire prédire sur un jeu de données indépendant des données d'apprentissage pour déterminer si l'algorithme est efficace)
- Déployer l'algorithme
- Création du modèle.

VI.2. Machine Learning

VI.2.1. Méthodes d'apprentissage

Machine Learning comporte deux types principaux d'apprentissage.

VI.2.1.1 Apprentissage supervisé

L'apprentissage supervisé utilise des valeurs ou des classes déjà déterminées qui seront mis dans un système de classement en se basant sur des observations déjà enregistrées. Le but est d'apprendre au modèle à ce qu'il donne aux nouvelles observations la classe qui lui convient.

VI.2.1.2 Apprentissage non-supervisé

Dans ce mode de fonctionnement du machine Learning, il n'est pas question de s'appuyer sur des éléments prédéfinis, et la tâche de procéder à la catégorisation des données revient à la machine. Pour ce faire, le système va croiser les informations qui lui sont soumises, de manière à pouvoir rassembler dans une même classe les éléments présentant certaines similitudes. Ainsi, en fonction du but recherché, il reviendra à l'opérateur ou au chercheur de les analyser afin d'en déduire les différentes hypothèses.

La différence entre ces deux principes de fonctionnement réside dans le fait que l'apprentissage supervisé peut être influencé a priori au moment de l'étiquetage des données. Par ailleurs, il faut noter que la data science peut également faire intervenir un mode de fonctionnement mixte qui utilise les deux types d'apprentissage pour arriver à des résultats plus précis.

VI.2.2. Sur et sous apprentissage

Il faut toujours passer par une étape de paramétrage et d'optimisation lors de la mise en place d'un modèle, pour éviter le sur et sous apprentissage.

VI.2.2.1 Sous-apprentissage

Le modèle ne s'entraîne pas suffisamment sur les données d'apprentissage, ce qui signifie qu'il ne peut pas modéliser sur de nouvelles données.

VI.2.2.2 Sur-apprentissage

C'est trop ajuster le modèle (over fitting en anglais). Le modèle s'entraîne même sur le bruit présent dans les données, ce dernier qui change aléatoirement affecte négativement la prédiction de nouvelles données.

VI.2.2.2.1 Les différents types de l'apprentissage automatique :

L'Apprentissage automatique se décompose d'une phase d'entraînement et une phase de test.

Nous pouvons dénombrer 2 méthodes basiques :

- **la Classification** : modélisation de plusieurs groupes de données dans des classes connues.
- **le Clustering** : ressemble à la classification mais ce ne sont pas des classes connues.

VI.2.3. Régression

Les données sont liées à d'autres données numériques par une corrélation. Le but ici est de prédire une valeur aussi proche de la valeur de sortie réelle que notre modèle.

VI.2.3.1 Régression polynomiale

La régression polynomiale est un cas particulier de la régression linéaires. La relation entre entrée et sortie est considérée polynômiale. Ces modèles peuvent être utilisés dans les situations où la relation entre l'étude et les variables explicatives est curviligne. Parfois, une relation non linéaire dans une petite gamme de variables explicatives peut également être modélisée par des polynômes.

Le modèle polynomial peut être utilisés pour approximer une relation non linéaire complexe.

Ainsi, pour un polynôme de degré p , le modèle correspond à (Laboratoire 2 ETS., 2012) :

$$g(x; \theta) = \omega_0 + \omega_1 x + \omega_2 x^2 + \dots + \omega_p x^p = \sum_{j=0}^p \omega_j x^j \quad \text{Équation VI-1}$$

Les poids du polynôme ω_p représentent les paramètres du modèle :

$$\theta = [w_0 \ w_1 \ w_2 \ \dots \ w_p]. \quad \text{Équation VI-2}$$

La détermination du modèle revient alors à calculer les paramètres. Cela se fait en réduisant l'erreur quadratique moyenne (MSE). La solution s'obtient à l'aide de manipulations matricielles.

Soit X la matrice dont la i – ème rangée contient les puissances de x_i (l'entrée du i – ème exemple d'entraînement) :

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^p \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \dots & x_2^p \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^p \end{bmatrix}$$

La matrice X possède donc n rangées et $(p + 1)$ colonnes. De même, on dénote y le vecteur clone contenant les sorties y_i :

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}$$

Les poids du modèle de régression polynomiale sont donnés par la formule suivante :

$$w = (X^T X)^{-1} X^T y.$$

VI.2.4. Support Vector Machine for Regression SVR

Les machines à vecteurs de support (SVM) appelés aussi (maximum margin classifier) est une méthode de classification binaire par apprentissage supervisé introduite par Vapnik (1995). Pour résoudre des problèmes de classification, cette méthode repose sur l'existence d'un classifieur linéaire dans un espace approprié, et sur l'utilisation de fonction noyau qui permet une séparation optimale des données (Mohamadally. H. et al, 2006).

Quand on utilise SVM pour des problèmes de régression, on parle de SVR qui permet de trouver le nombre d'erreur acceptable dans notre modèle, et de définir un hyperplan pour s'adapter aux données.

Soit l'ensemble D_2 de N paires données, ayant un vecteur de données x_i comme entrée et l'étiquette z_i de ce vecteur comme sortie, qui peut maintenant prendre n'importe quelle valeur réelle (N. Laouti., 2012) :

$$D_2 = \{(x_1, z_1), \dots, (x_i, z_i), \dots, (x_N, z_N)\}, \text{ pour } i = 1, \dots, N \text{ avec } : x \in R^p, z_i \in R \quad \text{Équation VI-3}$$

Avec une fonction de coût de type quadratique (moyenne des erreurs quadratique MSE), on obtient la solution de maximum de vraisemblance quand le bruit est gaussien ou normalement distribué. Mais, la présence d'une valeur aberrante risque de biaiser le modèle obtenu représenté par la fonction f . L'idée qui permet de généraliser l'utilisation des SVMs de la classification à la régression est l'adoption d'une nouvelle fonction de perte (coût) « perte de Vapnik » qui inclut la notion de distance. Cette fonction de perte ignore les erreurs qui se trouvent à une certaine distance ε de la vraie valeur. Ce type de fonction est considéré comme une fonction de perte ε -insensible (Figure VI-1). Elle a l'avantage de diminuer ainsi le surapprentissage (N. Laouti., 2012).

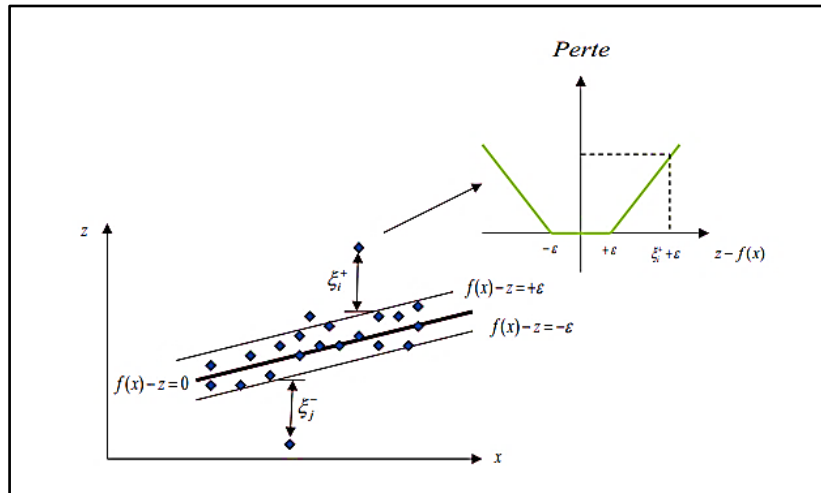


Figure VI-1 Fonction de perte insensible à ε dans la régression SVR linéaire (N. Laouti.,2012)

Donc l'objectif de SVR est de trouver une fonction plate $z = f(x) = \langle w, x \rangle + b$ qui rapproche toutes les paires (x_i, z_i) avec une précision de ε , ou en d'autres termes une fonction qui estime les cibles bruitées z_i avec au maximum un écart ε . Une façon pour assurer la platitude de la fonction $f(x)$ est de minimiser $\|w\|_1$ (N. Laouti., 2012).

VI.2.4.1 Apprentissage

L'algorithme SMO est le plus connues des SVR malgré qu'il soit inefficace par rapport au fonctionnement avec une valeur de seuil unique et de sa convergence lente.

Le système est composé de blocs reliés, dans les cas de systèmes non linéaires, pour cela on a plusieurs modèles, parmi eux :

VI.2.4.1.1 Modèle Hammerstein

Ce modèle est composé de deux blocs, un bloc statique suivi d'un autre dynamique linéaire (Figure VI-2). L'obtention du modèle Hammerstein peut se faire par l'algorithme d'identification sous-espace N4SID qui utilise SVR à moindres carrés LS-SVR (Goethals et al., 2005).

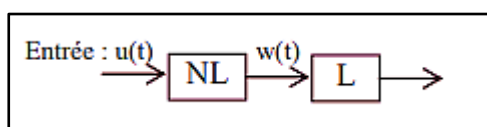


Figure VI-2 Structure de type Hammerstein

VI.2.4.1.2 Modèle de type Wiener

Comme le montre la Figure VI-3, le modèle de type Wiener est composé d'un bloc dynamique linéaire, qui est suivi par un élément non linéaire statique.

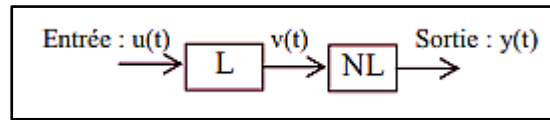


Figure VI-3 Structure de type Wiener.

VI.2.5. XGBOOST

XGBOOST (Extreme Gradient Boosting) représente une implémentation de Gradient Boosting basée sur les arbres de décision. C'est l'une des méthodes d'apprentissage supervisé les plus rapides et à grandes performances pouvant s'entraîner sur des grands ensembles de données. Il utilise trois techniques à savoir : Gradient Boosting, Stochastique Gradient Boosting et Regularized Gradient Boosting. Il peut être utilisé pour la classification et la régression.

Un modèle addition la prédiction de plusieurs arbres ensemble, écrit sous cette forme (xgboost developers., 2021) :

$$\hat{y}_i = \sum_{k=1}^K f_k(x_i), f_k \in \mathcal{F} \quad \text{Équation VI-4}$$

Avec une fonction objective à optimiser donnée par $K f_k \mathcal{F} \mathcal{F}$:

$$\text{obj}(\theta) = \sum_i^n l(y_i, \hat{y}_i) + \sum_{k=1}^K \omega(f_k) \quad \text{Équation VI-5}$$

Une fonction objective optimiser nous donne :

$$\text{obj} = \sum_{i=1}^n l(y_i, \hat{y}_i^{(t)}) + \sum_{i=1}^t \omega(f_i) \quad \text{Équation VI-6}$$

VI.2.5.1 Complexité du modèle

Le traitement traditionnel de l'apprentissage des arbres met l'accent sur l'amélioration des impuretés. Avec la régularisation, nous pouvons avoir une meilleure idée de ce que nous apprenons et obtenir des modèles qui fonctionnent bien dans la nature.

Pour la régularisation, on définit l'arbre comme $\omega(f)f(x)$

$$f_t(x) = w_{q(x)}, w \in R^T, q : R^d \rightarrow \{1, 2, \dots, T\} \quad \text{Équation VI-7}$$

Parmi les fonctions de complexité les plus utilisées en pratique, on a :

$$\omega(f) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \sum_{j=1}^T w_j^2 \quad \text{Équation VI-8}$$

VI.2.5.2 Score de la structure :

La valeur objective peut être écrite avec le -ème arbre comme suit :

$$\begin{aligned} \text{obj}^{(t)} &\approx \sum_{i=1}^n [g_i w_{q(x_i)} + \frac{1}{2} h_i w_{q(x_i)}^2] + \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \sum_{j=1}^T w_j^2 \\ &= \sum_{j=1}^T [(\sum_{i \in I_j} g_i) w_j + \frac{1}{2} (\sum_{i \in I_j} h_i + \lambda) w_j^2] + \gamma T \end{aligned} \quad \text{Équation VI-9}$$

On pourrait encore compresser l'expression avec $I_j = \{i | q(x_i) = j\}$ $G_j = \sum_{i \in I_j} g_i$ $H_j = \sum_{i \in I_j} h_i$

$$\text{obj}^{(t)} = \sum_{j=1}^T [G_j w_j + \frac{1}{2} (H_j + \lambda) w_j^2] + \gamma T \quad \text{Équation VI-10}$$

VI.2.6. Neuronal network

Les réseaux neuronaux sont des modèles qui fonctionnent de la même façon qu'un système nerveux biologique. En 1943 Walter Pitts et Warren McCulloch (T. Kauppi et 2018) ont inventé le tout premier neurone artificiel qu'ils ont nommé Perceptron à l'époque. Ces deux chercheurs en neurosciences et science cognitive se sont inspirés du fonctionnement du cortex visuel des mammifères (C. Lam et al., 2018).

VI.2.6.1 Réseau de neurone artificiel

C'est un algorithme d'apprentissage automatique supervisé de classification binaire. Il s'agit du type de réseau de neurones artificiels le plus simple (Barreiro. L et al., 2018).

VI.2.6.1.1 Structure :

La structure d'un neurone formel peut prendre plusieurs formes différentes selon la méthode de traitement et l'objet de données (Figure VI-4).

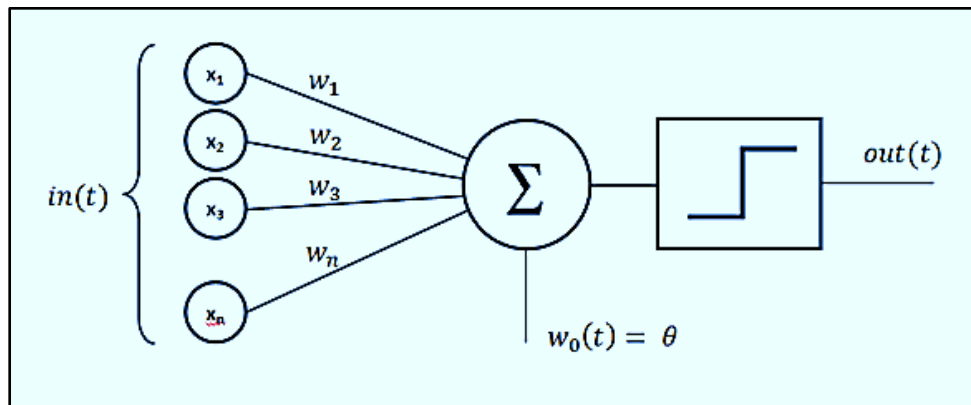


Figure VI-4 Représentation graphique d'un perceptron (Rajarajan, 2015).

Comme nous pouvons le constater, sa structure est composée de 6 parties (Janecek, 2007) :

- Les entrées ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$)
- Les poids ($w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$)
- Une fonction de somme (Σ)
- Un biais (w_0)
- Une fonction d'activation
- Une sortie

L'architecture générale des réseaux de neurones semblable, en première approximation à celle du cerveau humain, elle consiste en la représentation des neurones en couches (layers) successives, la première représentant la couche d'entrée (input layer), la dernière étant la couche de sortie (output layer), les couches intermédiaires étant les couches cachées (hidden layers) du réseau. Ces

couches sont dites cachées car de l'extérieur du réseau, on ne peut analyser clairement leur fonctionnement. Le réseau reçoit les informations sur une couche réceptrice de neurones, traite ces informations avec ou sans l'aide d'une ou plusieurs couches cachées contenant un ou plusieurs neurones et produit un signal ou plusieurs signaux de sorties. Chaque neurone qu'il appartienne à la première couche, aux couches cachées ou à la couche de sortie est lié aux autres neurones par des connexions auxquelles sont affectés des poids (Barreiro. L et al., 2018).

VI.2.6.1.2 Fonction d'activation :

Comme présenter (Figure VI-5), plusieurs fonctions d'activation existe. Selon le type de modèle qu'on souhaite modéliser ont choisi la fonction qui va avec. Les fonctions les plus utilisée sont fonction d'activation a seuil, et fonction d'activation sigmoïde borné entre 0 et 1, considérer comme la probabilité que le neurone s'active


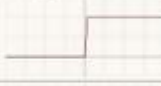







Name	Plot	Equation	Derivative
Identity		$f(x) = x$	$f'(x) = 1$
Binary step		$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{for } x < 0 \\ 1 & \text{for } x \geq 0 \end{cases}$	$f'(x) = \begin{cases} 0 & \text{for } x \neq 0 \\ ? & \text{for } x = 0 \end{cases}$
Logistic (a.k.a Soft step)		$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	$f'(x) = f(x)(1 - f(x))$
Tanh		$f(x) = \tanh(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1$	$f'(x) = 1 - f(x)^2$
ArcTan		$f(x) = \tan^{-1}(x)$	$f'(x) = \frac{1}{x^2 + 1}$
Rectified Linear Unit (ReLU)		$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{for } x < 0 \\ x & \text{for } x \geq 0 \end{cases}$	$f'(x) = \begin{cases} 0 & \text{for } x < 0 \\ 1 & \text{for } x \geq 0 \end{cases}$
Parameteric Rectified Linear Unit (PReLU) [2]		$f(x) = \begin{cases} \alpha x & \text{for } x < 0 \\ x & \text{for } x \geq 0 \end{cases}$	$f'(x) = \begin{cases} \alpha & \text{for } x < 0 \\ 1 & \text{for } x \geq 0 \end{cases}$
Exponential Linear Unit (ELU) [3]		$f(x) = \begin{cases} \alpha(e^x - 1) & \text{for } x < 0 \\ x & \text{for } x \geq 0 \end{cases}$	$f'(x) = \begin{cases} f(x) + \alpha & \text{for } x < 0 \\ 1 & \text{for } x \geq 0 \end{cases}$
SoftPlus		$f(x) = \log_e(1 + e^x)$	$f'(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$

Figure VI-5 Fonctions d'activations (S. Samy. 2019).

VI.2.6.1.3 Apprentissage :

En envoyant des données au neurone artificiel et analyser le résultat. Et on donne au perceptron le résultat attendu, ensuite il compare le résultat obtenu et celui qu'on lui a donnée. Pour en final il réduit l'écart au maximum entre les deux résultats. Pour cela, nous utilisons un algorithme appelé rétropropagation qui a pour but de changer les poids de chaque connexion (Rojas., 1996).

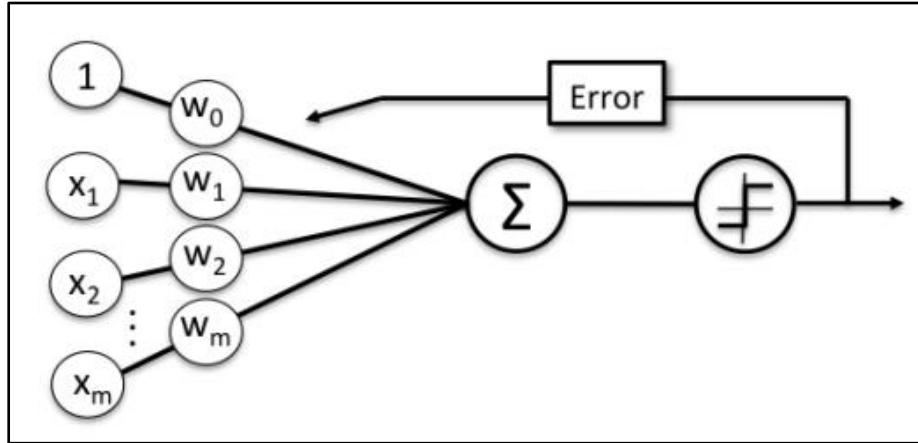


Figure VI-6 Représentation du fonctionnement de l'algorithme de rétropropagation. (B.L. Flávio.,2018).

VI.2.6.1.4 Algorithme d'optimisation :

Un algorithme d'optimisation calcule les coefficients d'ajustement pour le modèle durant la phase d'apprentissage, de nombreux algorithmes existent pour minimiser l'erreur et ajuster les poids et les biais (sert à séparer deux fonctions).

VI.3. Modèle développé au franchissement

VI.3.1. Description de la base de données

La base de données utilisée dans notre cas d'étude a été extraite de celle créée dans le cadre du projet européen CLASH (Figure VI-7). Cette dernière comprend des tests collectés auprès de plusieurs laboratoires à travers le monde. Elle est décrite en détail dans Verhaeghe et al. (2003) et Steendam et al. (2004). Elle contient plus de 10 000 essais de franchissement. Chacun de ces essais est décrit par un certain nombre de paramètres qui représentent des informations hydrauliques (c'est-à-dire les caractéristiques de la vague incidente et les débits de débordement mesurés) (Steendam G.J., J.W et al.,2004). De plus, la base de données comprend des informations générales concernant la fiabilité de l'essai et la complexité de la structure.

La fiabilité de chaque essai a été estimée et définie sous forme d'un facteur (RF). Dans la présente base de données, les valeurs du RF varient de 1 pour un test "très fiable" à 4 pour un test "non fiable". RF = 1 a été donné aux tests pour lesquels toutes les informations requises étaient disponibles dans les rapports correspondants et aucune estimation de variable n'était nécessaire, tandis que RF = 4 était attribué aux tests pour lesquels pour lesquels l'estimation de certains

paramètres n'était pas acceptable et pour lesquels les mesures comportent de nombreuses incertitudes. De la même manière, la complexité de chaque test a été estimée et définie par un facteur de complexité (CF). CF = 1 a été attribué aux essais dont la structure est "très simple" et dont les paramètres décrivent exactement la section transversale. Tandis que CF = 4 a été donné aux structure "très complexe", dans laquelle la section transversale ne peut pas être décrite avec précision par les paramètres choisis (Steendam G.J., J.W et al.,2004).

Comme mentionné, chaque essai est décrit et inclus dans la base de données au moyen de 31 paramètres. Les paramètres peuvent être divisés en trois groupes : 03 paramètres généraux, 11 paramètres hydrauliques et 17 paramètres structurels. Ils sont listés par groupe des tableaux (Tableau VI-1, Tableau VI-2, Tableau VI-3) (Steendam G.J., J.W et al.,2004). Les paramètres structuraux ont été choisis selon la structure de la digue illustrée sur la Figure VI-8 qui peut représenter la majorité des structures d'essai.

1	Name	Hm0 deep	Tp deep	Tm deepn-1,0 de	h deep	m	b	h	Hm0 toe	Tp toe	Tm toe	Γm-1,0 toe	ht	Bt	gf	cotad	cotau	cotaexcl	cotaincl	Rc	B	hb	tanaB	Bh	Ac	Gc	RF	CF	q	
2		m	s	s	s	m	°	m	m	s	s	s	m	m						m	m	m		m	m	m			m ³ /s/m	
3	001-001	0.108	1.591	1.326	1.447	0.184	43	0	0.033	0.024	1.591	1.326	1.447	0.033	0.000	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.077	0.000	0.000	0.00	0.000	0.061	0.432	4	3	1.109E-04
4	001-002	0.108	1.591	1.326	1.447	0.193	25	0	-0.021		1.591	1.326	1.447	-0.021	0.000	1.00	0.00	0.00	0.00	0.068	0.000	0.000	0.00	0.000	0.052	0.432	4	3	1.438E-04	
5	001-003	0.126	2.087	1.739	1.897	0.211	43	0	0.060	0.045	2.087	1.739	1.897	0.060	0.000	1.00	0.00	0.00	0.00	0.050	0.000	0.000	0.00	0.000	0.034	0.432	4	3	5.938E-04	
6	001-004	0.126	2.087	1.739	1.897	0.211	25	0	-0.003		2.087	1.739	1.897	-0.003	0.000	1.00	0.00	0.00	0.00	0.050	0.000	0.000	0.00	0.000	0.034	0.432	4	3	6.250E-04	
7	001-005	0.138	2.165	1.804	1.968	0.236	43	0	0.085	0.063	2.165	1.804	1.968	0.085	0.000	1.00	0.00	0.00	0.00	0.025	0.000	0.000	0.00	0.000	0.009	0.432	3	3	2.063E-03	
8	001-006	0.138	2.165	1.804	1.968	0.236	25	0	0.023	0.042	2.165	1.804	1.968	0.023	0.000	1.00	0.00	0.00	0.00	0.025	0.000	0.000	0.00	0.000	0.009	0.432	4	3	2.078E-03	
9	001-007	0.108	1.591	1.326	1.447	0.184	43	0	0.033	0.024	1.591	1.326	1.447	0.033	0.000	1.00	0.00	0.00	0.00	0.152	0.000	0.000	0.00	0.000	0.083	0.432	4	3	3.125E-07	
10	001-008	0.108	1.591	1.326	1.447	0.193	25	0	-0.021		1.591	1.326	1.447	-0.021	0.000	1.00	0.00	0.00	0.00	0.143	0.000	0.000	0.00	0.000	0.074	0.432	4	3	6.250E-07	
11	001-009	0.126	2.087	1.739	1.897	0.211	43	0	0.060	0.045	2.087	1.739	1.897	0.060	0.000	1.00	0.00	0.00	0.00	0.125	0.000	0.000	0.00	0.000	0.056	0.432	4	3	2.813E-05	
12	001-010	0.126	2.087	1.739	1.897	0.211	25	0	-0.003		2.087	1.739	1.897	-0.003	0.000	1.00	0.00	0.00	0.00	0.125	0.000	0.000	0.00	0.000	0.056	0.432	4	3	1.094E-05	
13	001-011	0.138	2.165	1.804	1.968	0.236	43	0	0.085	0.063	2.165	1.804	1.968	0.085	0.000	1.00	0.00	0.00	0.00	0.100	0.000	0.000	0.00	0.000	0.031	0.432	3	3	1.875E-04	
14	001-012	0.138	2.165	1.804	1.968	0.236	25	0	0.023	0.042	2.165	1.804	1.968	0.023	0.000	1.00	0.00	0.00	0.00	0.100	0.000	0.000	0.00	0.000	0.031	0.432	4	3	9.688E-05	
15	001-013	0.108	1.591	1.326	1.447	0.184	43	0	0.033	0.024	1.591	1.326	1.447	0.033	0.000	1.00	0.00	0.00	0.00	0.077	0.000	0.000	0.00	0.000	0.136	0.432	4	3	7.813E-07	
16	001-014	0.108	1.591	1.326	1.447	0.193	25	0	-0.021		1.591	1.326	1.447	-0.021	0.000	1.00	0.00	0.00	0.00	0.068	0.000	0.000	0.00	0.000	0.127	0.432	4	3	2.813E-06	
17	001-015	0.126	2.087	1.739	1.897	0.211	43	0	0.060	0.045	2.087	1.739	1.897	0.060	0.000	1.00	0.00	0.00	0.00	0.050	0.000	0.000	0.00	0.000	0.109	0.432	4	3	6.094E-05	
18	001-016	0.126	2.087	1.739	1.897	0.211	25	0	-0.003		2.087	1.739	1.897	-0.003	0.000	1.00	0.00	0.00	0.00	0.050	0.000	0.000	0.00	0.000	0.109	0.432	4	3	5.156E-05	
19	001-017	0.138	2.165	1.804	1.968	0.236	43	0	0.085	0.063	2.165	1.804	1.968	0.085	0.000	1.00	0.00	0.00	0.00	0.025	0.000	0.000	0.00	0.000	0.084	0.432	3	3	4.063E-04	
20	001-018	0.138	2.165	1.804	1.968	0.236	25	0	0.023	0.042	2.165	1.804	1.968	0.023	0.000	1.00	0.00	0.00	0.00	0.025	0.000	0.000	0.00	0.000	0.084	0.432	4	3	2.813E-04	
10514	959-007	0.069	0.800	0.697	0.797	0.400	40	0	0.200	0.047	0.985	0.793	0.884	0.200	0.000	1.00	5.42	5.42	5.42	5.42	0.065	0.000	0.000	0.00	0.000	0.065	0.000	1	1	7.47E-06
10515	959-008	0.065	0.826	0.630	0.717	0.400	40	0	0.200	0.045	0.853	0.753	0.820	0.200	0.000	1.00	5.42	5.42	5.42	5.42	0.065	0.000	0.000	0.00	0.000	0.065	0.000	1	1	5.10E-06
10516	959-009	0.057	0.731	0.626	0.707	0.400	40	0	0.200	0.042	0.853	0.733	0.803	0.200	0.000	1.00	5.21	5.21	5.21	5.21	0.075	0.000	0.000	0.00	0.000	0.075	0.000	1	1	1.59E-06
10517	959-010	0.060	0.914	0.688	0.787	0.400	40	0	0.200	0.042	0.914	0.776	0.870	0.200	0.000	1.00	5.21	5.21	5.21	5.21	0.075	0.000	0.000	0.00	0.000	0.075	0.000	1	1	3.37E-06
10518	959-011	0.079	0.914	0.705	0.810	0.400	40	0	0.200	0.053	0.914	0.814	0.906	0.200	0.000	1.00	5.21	5.21	5.21	5.21	0.075	0.000	0.000	0.00	0.000	0.075	0.000	1	1	1.14E-05
10519	959-012	0.051	0.753	0.684	0.779	0.400	40	0	0.200	0.036	0.985	0.748	0.845	0.200	0.000	1.00	5.21	5.21	5.21	5.21	0.075	0.000	0.000	0.00	0.000	0.075	0.000	1	1	5.23E-07
10520	959-013	0.050	0.800	0.609	0.691	0.400	40	0	0.200	0.035	0.800	0.707	0.779	0.200	0.000	1.00	5.21	5.21	5.21	5.21	0.075	0.000	0.000	0.00	0.000	0.075	0.000	1	1	2.51E-07
10521	959-014	0.085	0.853	0.703	0.816	0.400	40	0	0.200	0.056	0.914	0.810	0.915	0.200	0.000	1.00	1.95	1.95	1.95	1.95	0.065	0.000	0.000	0.00	0.000	0.065	0.000	1	1	3.07E-04
10522	959-015	0.068	0.826	0.630	0.721	0.400	40	0	0.200	0.046	0.853	0.742	0.819	0.200	0.000	1.00	1.95	1.95	1.95	1.95	0.065	0.000	0.000	0.00	0.000	0.065	0.000	1	1	1.43E-04
10523	959-016	0.060	0.731	0.625	0.710	0.400	40	0	0.200	0.041	0.853	0.727	0.805	0.200	0.000	1.00	1.95	1.95	1.95	1.95	0.065	0.000	0.000	0.00	0.000	0.065	0.000	1	1	1.05E-04
10524	959-017	0.068	0.826	0.629	0.722	0.400	40	0	0.200	0.045	0.853	0.741	0.820	0.200	0.000	1.00	1.86	1.86	1.86	1.86	0.075	0.000	0.000	0.00	0.000	0.075	0.000	1	1	1.01E-04
10525	959-018	0.051	0.800	0.617	0.703	0.400	40	0	0.200	0.034	0.853	0.694	0.777	0.200	0.000	1.00	1.86	1.86	1.86	1.86	0.075	0.000	0.000	0.00	0.000	0.075	0.000	1	1	3.00E-05
10526	959-019	0.040	0.853	0.613	0.697	0.400	40	0	0.200	0.027	0.853	0.678	0.764	0.200	0.000	1.00	1.86	1.86	1.86	1.86	0.075	0.000	0.000	0.00	0.000	0.075	0.000	1	1	7.58E-06
10527	959-020	0.049	0.753	0.674	0.778	0.400	40	0	0.200	0.034	0.914	0.738	0.843	0.200	0.000	1.00	1.77	1.77	1.77	1.77	0.085	0.000	0.000	0.00	0.000	0.085	0.000	1	1	7.94E-06
10528	959-021	0.039	0.914	0.671	0.774	0.400	40	0	0.200	0.027	0.914	0.725	0.837	0.200	0.000	1.00	1.77	1.77	1.77	1.77	0.085	0.000	0.000	0.00	0.000	0.085	0.000	1	1	9.40E-07
10529	959-022	0.066	0.826	0.623	0.721	0.400	40	0	0.200	0.045	0.853	0.733	0.816	0.200	0.000	1.00	1.69	1.69	1.69	1.69	0.095	0.000	0.000	0.00	0.000	0.095	0.000	1	1	4.66E-05
10530	959-023	0.048	0.753	0.681	0.785	0.400	40	0	0.200	0.033	0.985	0.716	0.831	0.200	0.000	1.00	1.69	1.69	1.69	1.69	0.095	0.000	0.000	0.00	0.000	0.095	0.000	1	1	6.06E-06
10531	959-024	0.062	0.914	0.689	0.795	0.400	40	0	0.200	0.041	0.914	0.739	0.853	0.200	0.000	1.00	1.69	1.69	1.69	1.69	0.095	0.000	0.000	0.00	0.000	0.095	0.000	1	1	2.09E-05
10532	959-025	0.058	0.731	0.604	0.698	0.400	40	0	0.200	0.042	0.853	0.713	0.797	0.200	0.000	1.00	1.69	1.69	1.69	1.69	0.095	0.000	0.000	0.00	0.000	0.095	0.000	1	1	2.88E-05
10533	959-026	0.038	0.826	0.592	0.681	0.400	40	0	0.200	0.028	0.853	0.668	0.758	0.200	0.000	1.00	1.69	1.69	1.69	1.69	0.095	0.000	0.000	0.00	0.000	0.095	0.000	1	1	2.40E-06
10534	959-027	0.080	0.914	0.706	0.814	0.400	40	0	0.200	0.052	0.914	0.793	0.900	0.200	0.000	1.00	1.95	1.95	1.95	1.95	0.065	0.000	0.000	0.00	0.000	0.065	0.000	1	1	2.62E-04

Figure VI-7 Illustration de la base de données CLASH.

Tableau VI-1 Paramètres généraux et hydrauliques inclus dans la base de données.

No	Paramètre	min.	max.	Description
Paramètres généraux				
1	Nom			Ce paramètre attribue un nom unique à chaque test. Il est simplement destiné à reconnaître chaque test mais n'a pas d'autre signification.
2	RF [-]	1.000	4.000	Le "facteur de fiabilité" donne une indication de la fiabilité du test. Il peut prendre les valeurs 1, 2, 3 ou 4. Des informations détaillées sur ce facteur peuvent être trouvées dans (CLASH WP2 : Verhaeghe et al., 2004).
3	CF [-]	1.000	4.000	Ce paramètre, appelé "facteur de complexité", donne une indication de la complexité de la structure du test. Il peut prendre les valeurs 1, 2, 3 ou 4. Des informations détaillées sur ce facteur peuvent être trouvées dans (CLASH WP2 : Verhaeghe et al., 2004).

Tableau VI-2 Paramètres hydrauliques inclus dans la base de données

Paramètres hydraulique				
4	H _{m0 deep} [m]	0.003	5.920	Hauteur significative des vagues à partir de l'analyse spectrale $4\sqrt{m_0}$, déterminée en eau profonde
5	T _{p deep} [s]	0.545	15.000	Période de pointe de l'analyse spectrale en eau profonde
6	T _{m deep} [s]	0.454	12.500	Période moyenne provenant soit de l'analyse spectrale $=m_2/m_0$, soit de l'analyse temporelle (passage par zéro) en eau profonde.
7	T _{m -1,0 deep} [s]	0.495	13.636	Période moyenne de l'analyse spectrale en eau profonde = m_1/m_0
8	β [°]	0.000	80.000	Angle d'attaque des vagues incidentes par rapport à la normale à la structure
9	H _{m0 toe} [m]	0.003	3.800	Hauteur significative des vagues d'après l'analyse spectrale = $4\sqrt{m_0}$ au pied de l'ouvrage
10	T _{p toe} [s]	0.545	16.400	Période de pointe de l'analyse spectrale au pied de la structure
11	T _{m toe} [s]	0.454	11.881	Période moyenne provenant soit de l'analyse spectrale $=m_2/m_0$, soit de l'analyse temporelle (passage par zéro) au pied de la structure.
12	T _{m -1,0 toe} [s]	0.495	10.640	Période moyenne de l'analyse spectrale au pied de la structure = m_1/m_0

13	q [m ³ /s.m]	0.000	$1.65 \cdot 10^{-1}$	Débit de débordement par seconde et par mètre de largeur
14	P_{ow} [-]	0.000	81.000	Pourcentage des vagues entraînant une surcharge.

Tableau VI-3 Paramètres structurels inclus dans la base de données.

no	Paramètre	min.	max.	Description
Paramètres Structurels				
15	h_{deep} [m]	0.000	100	Profondeur de l'eau en eau profonde
16	m [-]	6.000	1000	Pente de fond au pied ouvrage
17	h [m]	0.029	9.32	Profondeur de l'eau au pied de l'ouvrage
18	h_t [m]	0.025	7.78	Profondeur de l'eau au pied de l'ouvrage
19	B_t [m]	0.000	10.00	Largeur du pied de la structure
20	γ_f [-]	0.350	1.00	Facteur de rugosité/perméabilité de la structure
21	$cot\alpha_d$ [-]	0.000	7.0	Cotangente de la pente de la structure vers le bas de la berme
22	$cot\alpha_u$ [-]	-5.000	9.7	Cotangente de la pente de la structure vers le haut de la berme
23	$cot\alpha_{excl}$ [-]	-1.533	8.1	Cotangente moyenne de la pente de l'ouvrage, sans contribution de la berme
24	$cot\alpha_{incl}$ [-]	-1.533	12.8	Cotangente moyenne de la pente de l'ouvrage, avec contribution de la berme
25	R_c [m]	0.000	8.3	Le franc-bord de la structure
26	B [m]	0.000	8.00	Largeur de la berme
27	h_b [m]	-0.208	1.175	Profondeur de l'eau sur la berme
28	$\tan\alpha_B$ [-]	0.000	0.125	Tangente de la pente de la berme
29	B_h [m]	0.000	8.00	Largeur de la berme schématisée horizontalement
30	A_c [m]	0.000	7.87	Le franc-bord de la crête de blindage de la structure
31	G_c [m]	0.000	5.60	Largeur de la crête de l'ouvrage

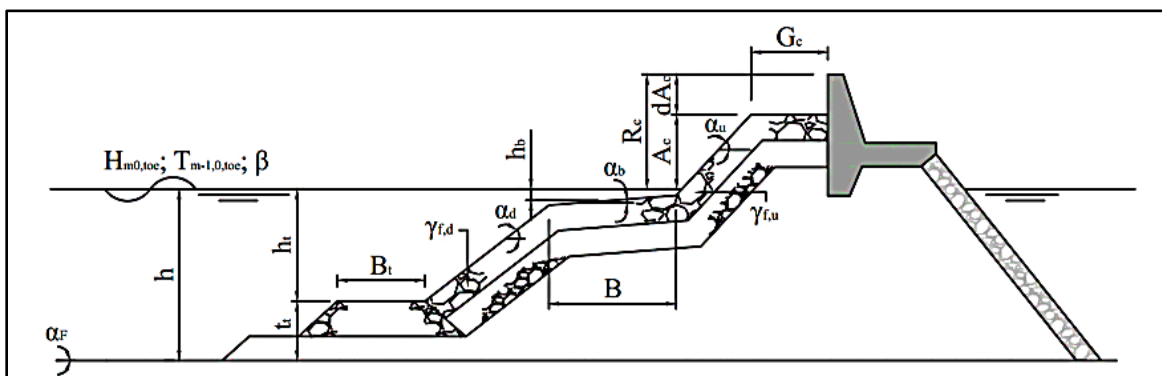


Figure VI-8 Paramètres de la base de données sur le déferlement des vagues (Van Gent et al.,2007).

VI.3.1.1 Choix de paramètres

La qualité du modèle dépend de celle de la base de données. Pour bien avoir un modèle fiable, on a décidé d'utiliser les structures les plus similaires à celle de la Marina Bay voir Figure VI-9. Comme la base de données initiale comporte plus de 10.000 essais présentant plusieurs structures, on a conservé seulement celles dont la structure est relativement simple. En effet les essais de facteur de complexité ($CF = 1$) ont été retenus. Les données ont été également filtrées selon leur facteur de fiabilité. Dans notre cas, on a choisi les essais ayant une fiabilité de l'ordre 1 et 2. Afin d'éviter la redondance, les paramètres hydrauliques des eaux profondes ne sont pas pris en compte. Il existe en effet une très forte liaison entre eux et ceux au pied de l'ouvrage.

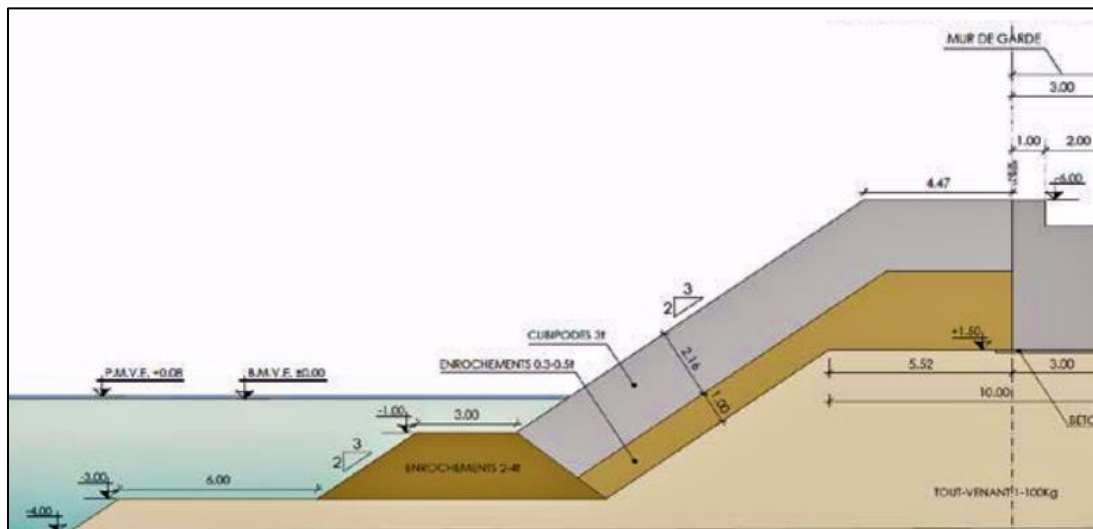


Figure VI-9 Coupe type de la digue principale (BTP Infraestructuras, 2015).

Le nombre de paramètres est réduit de 31 à 12 paramètres : h_{toe} , H_{m0toe} , $T_{p\ toe}$, $T_{m\ toe}$, $T_{m-10toe}$, ht , Bt , cot_{α} , Rc , Ac , Gc , q . Finalement la base de données s'est réduite à 4 634 essais.

VI.3.2. Description du modèle développé

Plusieurs méthodes (La régression polynomiale, Support vector régression, Neuronal Network (ML Regressor) et XGBOOST) ont été testées sur la base de données choisie. Néanmoins les résultats n'étaient pas satisfaisants. Tous ces modèles ont donné des précisions qui ne dépassent pas 63%. Afin d'obtenir un bon score on a essayé de combiner entre plusieurs techniques et d'éliminer les features les moins influentes. Cela nous a ramené à exclure le paramètre Γ_{mf} de la base de données et on a réussi ainsi à obtenir une précision d'environ 86%. Dans la suite on présente les détails de développement du modèle.

VI.3.3. Apprentissage

La Figure VI-10 présente un aperçu sur la base de données utilisée dans le développement du modèle. En premier lieu, cette base a été divisée en deux parties (80% pour l'apprentissage et 20% pour le test). Ensuite les features ont été soumises à une transformation polynomiale de degré 4 engendrant ainsi un nouveau vecteur de caractéristiques.

Après le teste de plusieurs techniques, on a retenu le modèle XGBOOST. Ce dernier a montré un score élevé de 0.932 sur l'ensemble de données d'apprentissage.

	htoe	Hm0toe	Tptoe	Tmtoe	Tm-10toe	ht	Bt	cotAlpha	Rc	Ac	Gc	q
0	0.178616	0.097484	1.276788	1.063990	1.160717	0.103145	0.172956	1.5	0.192453	0.214465	0.094340	1.672941e-07
1	0.178616	0.106918	1.319348	1.099457	1.199407	0.103145	0.172956	1.5	0.192453	0.214465	0.094340	3.345882e-07
2	0.211635	0.125786	1.361908	1.134923	1.238098	0.136164	0.172956	1.5	0.159434	0.181447	0.094340	1.505647e-05
3	0.219811	0.132075	1.383187	1.152656	1.257443	0.144340	0.172956	1.5	0.151258	0.173270	0.094340	4.851528e-05
4	0.178616	0.097484	1.276788	1.063990	1.160717	0.103145	0.172956	1.5	0.183019	0.183019	0.393082	1.115294e-07
	htoe	Hm0toe	Tptoe	Tmtoe	Tm-10toe	ht	Bt	cotAlpha	Rc	Ac	Gc	q
4628	0.2	0.03318	0.9846	0.7162	0.8309	0.2	0.0	1.693	0.095	0.095	0.0	0.000006
4629	0.2	0.04123	0.9143	0.7387	0.8534	0.2	0.0	1.693	0.095	0.095	0.0	0.000021
4630	0.2	0.04154	0.8533	0.7130	0.7968	0.2	0.0	1.693	0.095	0.095	0.0	0.000029
4631	0.2	0.02765	0.8533	0.6681	0.7577	0.2	0.0	1.693	0.095	0.095	0.0	0.000002
4632	0.2	0.05244	0.9143	0.7933	0.8999	0.2	0.0	1.947	0.065	0.065	0.0	0.000262

Figure VI-10 Illustration du head et du tail de la base de données traitée.

VI.3.4. Validation

Le modèle obtenu durant l'apprentissage a donné un score de 0.864 sur l'ensemble de test et une allure très proche de celle correspondante aux valeurs mesurées (Figure VI-11 et Figure VI-12). Ces dernières montrent que la majorité des points sont très proches. On peut observer également qu'il existe quelques divergences apparentes, ce qui a influé le score obtenu.

L'erreur moyenne quadratique RMSE pondérée présente un outil efficace pour la validation du modèle selon (Joost P. den Bieman, 2021).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{\sum_{n=1}^N (WF_n)} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(WF_n \cdot \left(\log_{10} (q_{\text{predicted},n}) - \log_{10} (q_{\text{measured},n}) \right)^2 \right)} \quad \text{Équation VI-11}$$

Le facteur de poids (WF) est déterminé avec la formule de Van Gent et al. (2007) :

$$WF = (4 - RF) * (4 - CF). \quad \text{Équation VI-12}$$

Cette formule donne le WF le plus élevé aux données d'entraînement les plus fiables et les moins complexes.

De plus, Van Gent et al. (2007) indiquent que les mesures correspondant aux faibles houles moyennes dépassant les débits, peuvent être fortement affectées par les effets d'échelle et sont donc moins fiables.

Les prédictions des franchissements de notre modèle d'apprentissage automatique pour la base de données choisie sont présentées dans les Figure VI-11 et Figure VI-12. L'erreur du notre modèle XGB est visiblement petite, avec des différences largement inférieures à un facteur 10. Cela se reflète par le calcul de RMSE appliqué sur l'ensemble des données disponible (4 632 enregistrements). Ce calcul a donné un résultat de **0.016** (totalité des données), **0.035** (données du test) et **0,017** (données du train), ce qui représente des valeurs inférieure par rapport aux précédents travaux (le modèle NN original (Van Gent et al., 2007), mais inclut également le modèle NNb (Zanuttigh et al., 2016), les formules empiriques de franchissement (TAW, 2002 ; EurOtop, 2018) pour la prédiction du franchissement des vagues et le XGB (Joost P. den Bieman, 2021)), voir Tableau VI-4 RMSE pour tous les modèles de prédiction de franchissement. (Joost P. den Bieman, 2021)Tableau VI-4. Ce RMSE réduit s'explique par le fait que la base de données ne contient que les enregistrements de structure simple (CF=1).

Une forte corrélation de 92% entre les valeurs de franchissement prédites par le modèle et les valeurs réelle des tests en modèle physique est observé dans la Figure VI-13 Corrélation des résultats du modèle avec les franchissements réels. Ceci vient confirmer la fiabilité du modèle développé.

Tableau VI-4 RMSE pour tous les modèles de prédiction de franchissement. (Joost P. den Bieman, 2021)

Data Set	TAW	EurOtop	NN	NNb	XGB	XGBr
Training data set (6943)	1.089	1.313	0.490	0.566	0.098	0.097
Test data set (1736)	0.995	1.207	0.478	0.580	0.284	0.285
Overtoppine Data Base (8 679)	1.086	1.283	0.602	0.636	0.409	0.248

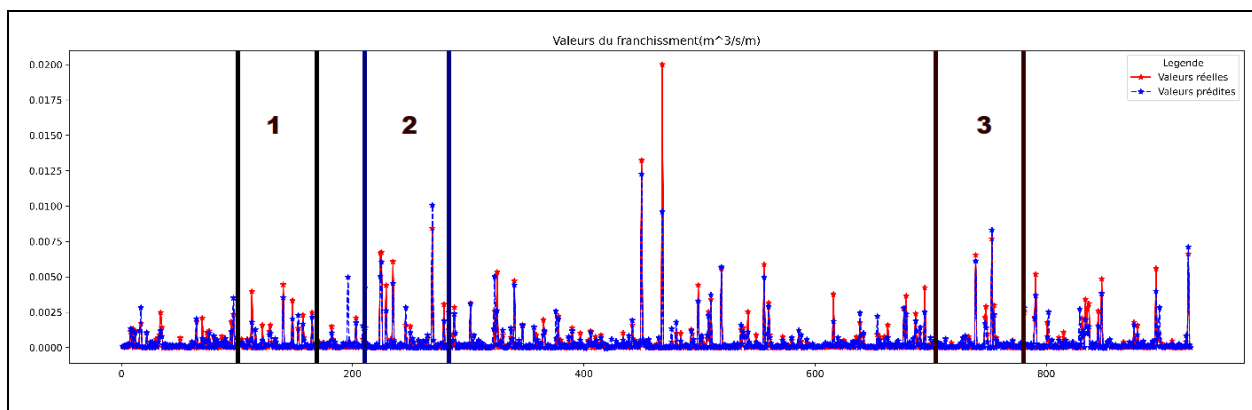


Figure VI-11 Comparaison des valeurs de franchissement obtenues.

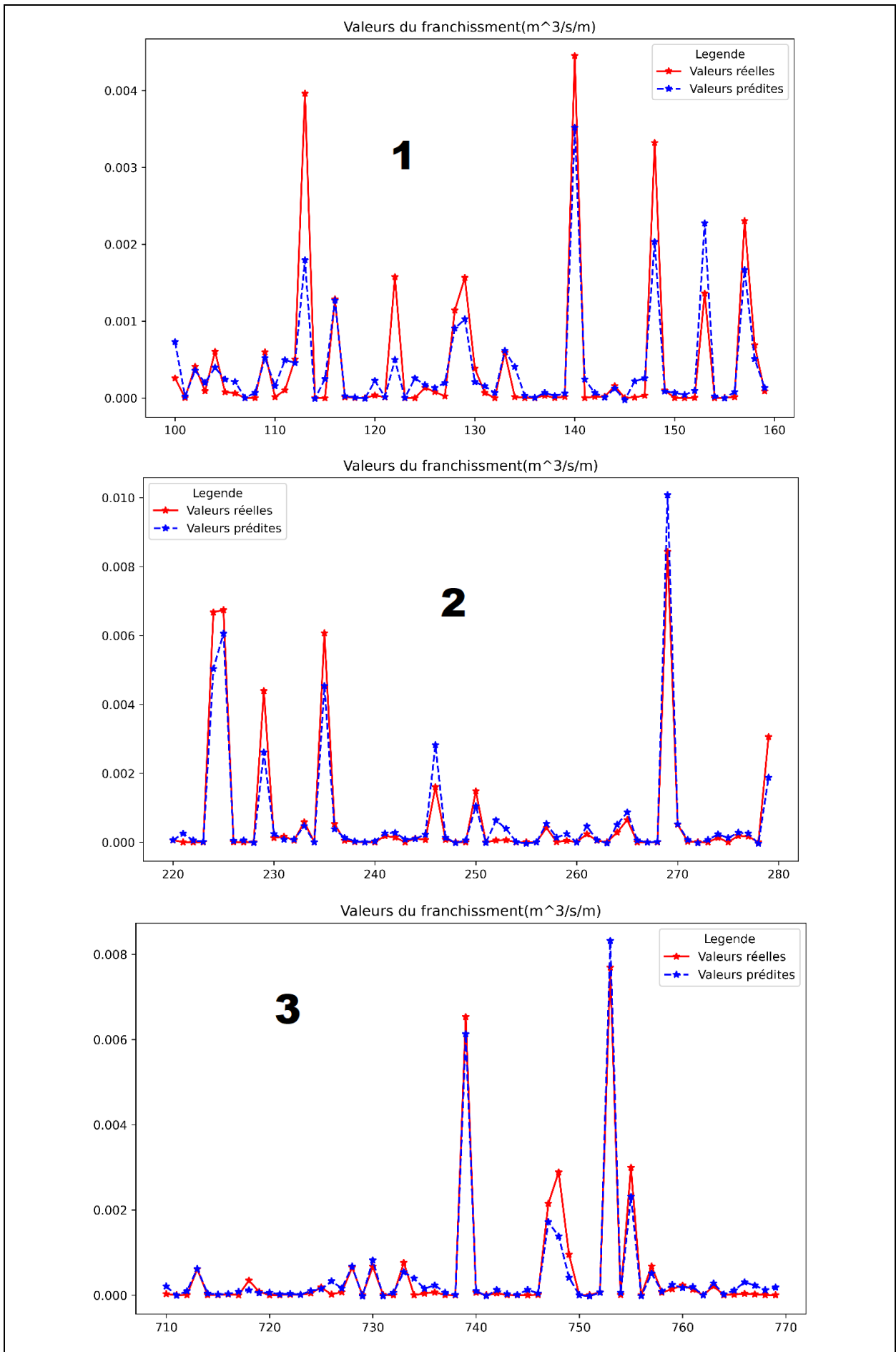


Figure VI-12 Zoom de la comparaison des valeurs de franchissement obtenues.

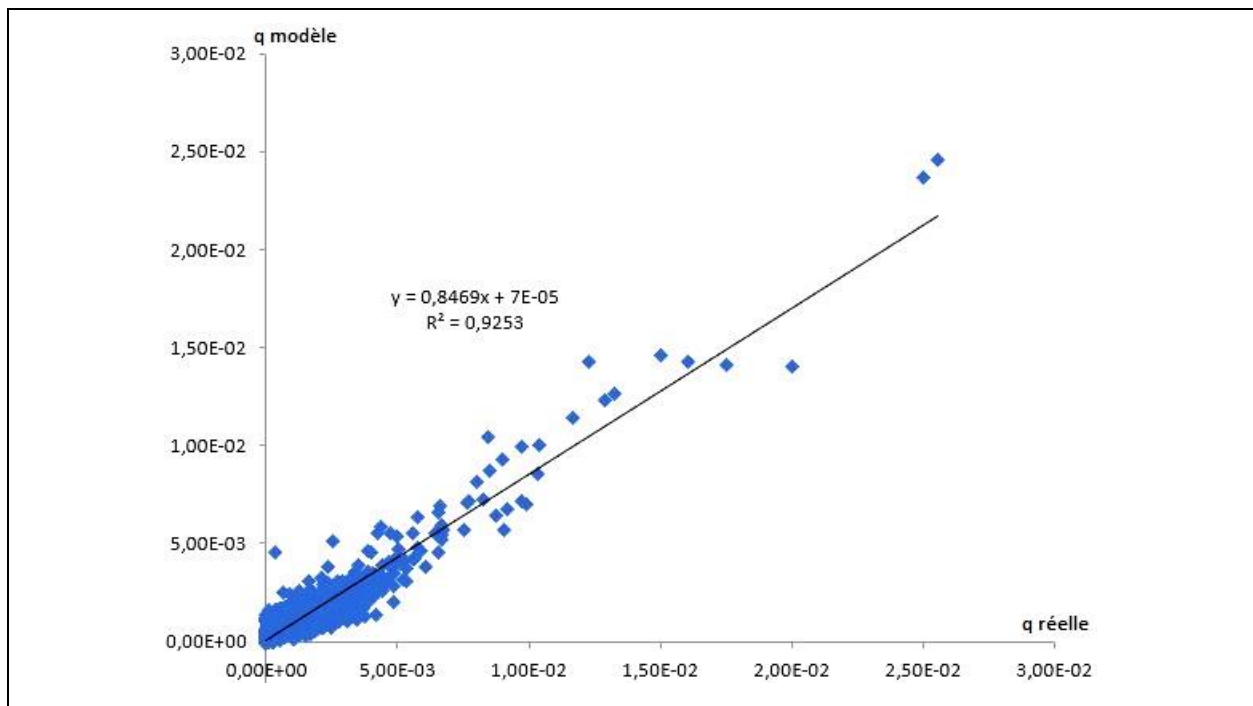


Figure VI-13 Corrélation des résultats du modèle avec les franchissements réels.

VI.3.5. Application du modèle sur Marina Bay

VI.3.5.1 Modèle réduit (Similitude Froude)

Le but de ce modèle est d'être utilisé dans les conditions à petite et à grande échelle. Tous les paramètres d'entrée et de sortie de la base de données sont mis à l'échelle de $H_{m0,toe} = 1$ m en utilisant la loi de similitude de Froude. L'avantage de l'utilisation de cette loi est qu'une meilleure généralisation pour les applications à grande échelle peut être obtenue. En fait la majorité des essais des bases de données sont principalement à petite échelle. Cette procédure permet alors de faire des prédictions à différentes échelles (M.R.A., Van Gent., Et al 2005).

De la loi de Froude découlent les relations d'échelle suivantes, exprimées en termes de l'échelle de longueur n_L . Cela est obtenu en faisant le rapport de la hauteur de vague ($H_{m0} = 1,0$ m) à la hauteur de vague mesurée : (M.R.A., Van Gent., Et al 2005).

$$n_L = 1/H_{m0, toe(observer)}$$

- $H_{m0}, h, h_t, B_t, B, h_b, R_c, A_c, G_c$ (m) : $[n_H, n_h, n_{ht}, n_{Bt}, n_B, n_{hb}, n_{Rc}, n_{Ac}, n_{Gc}] = n_L$.
- T (s) : $n_T = n_L^{0.5}$.
- q (m³/s/m) : $n_q = n_L^{1.5}$.

Le bureau d'étude de la Marina Bay a attaché 44 essais à son rapport. Ces essais ont été effectués en canal à houle. Pour avoir des données à la même échelle que celles utilisées par notre modèle développé, une réduction d'échelle a été effectuée sur ces données-là.

VI.3.5.2 Résultats du modèle sur la Marina Bay

La Figure VI-14 montre l'ensemble des résultats des franchissements obtenu.

La prédiction du modèle Neuronal Network original (Van Gent et al., 2007) a une allure similaire aux valeurs réelles (essais canal à houle BTP Infrastructuras 2015). Néanmoins la quantification des débits des franchissements est largement sous-estimée. Le modèle qu'on a développé est performant pour les essais indexés de (01 – 19 ; 25-30 ; 35-44). Il a su prédire les scénarios dont les franchissements sont très faibles. Par contre dans la partie de forts débits de franchissement notre modèle se rapproche mieux des valeurs réelles que celui de Neuronal Network.

L'allure du modèle développé n'est pas assez similaire aux autres graphes. Cela revient à l'insuffisance dans la base de données aux enregistrements représentant cette partie.

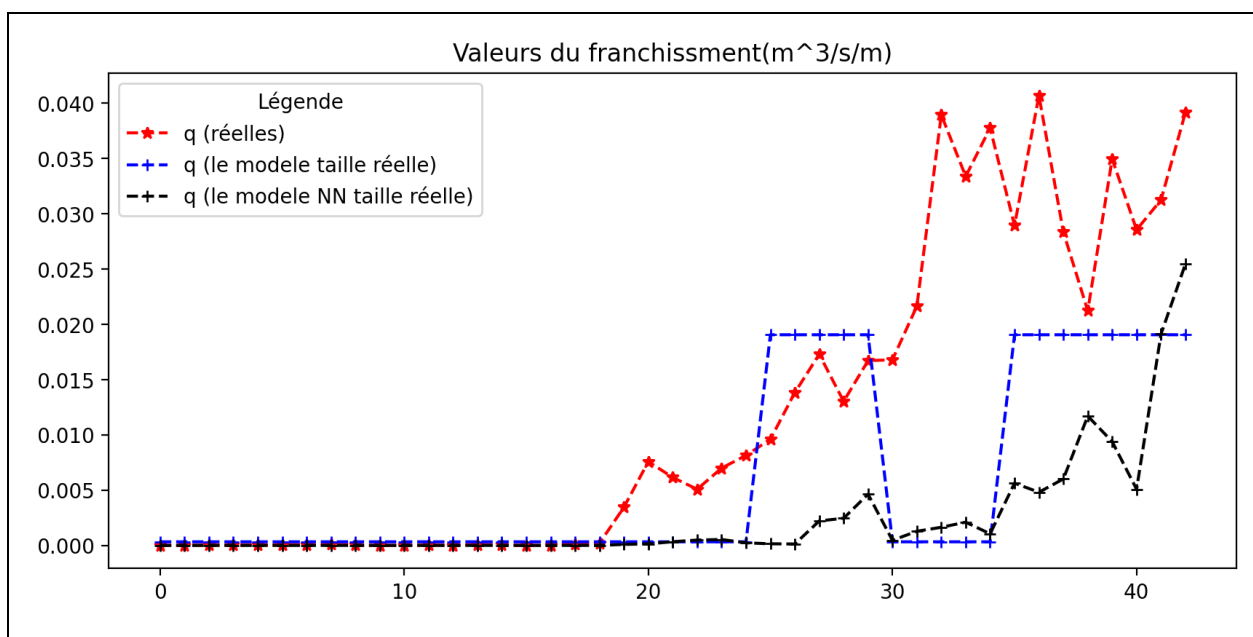


Figure VI-14 Comparaison des valeurs des franchissements des modèles (développé et NN-Clash avec les tests de la marina en canal à houle).

VI.4. Conclusion

Notre modèle XGBOOST montre dans son ensemble une allure très proche de celle correspondante aux valeurs mesurées. Le modèle est performant pour les essais dont le débit de franchissement est faible. Par contre il n'arrive pas à prédire les valeurs du franchissement sur une seule partie ce qui signifie que ce modèle n'a pas pu s'entraîner sur cette partie de données. Cela est causée par le manque d'enregistrement dans la base de données initial représentant ces scénarios dans lesquels les modèle n'ont pas prédit les franchissements.

Enrichir cette base de données avec des enregistrements qui couvre tout l'intervalle des débits des franchissements est l'objectif des études à l'avenir.

CONCLUSION

Notre étude portant comme objectif étude de la performance hydraulique des ouvrages maritimes cas Marina Bay via l'application du machine Learning.

Les digues à talus sont intéressantes parce que leur talus cote mer force la houle de tempête à déferler et que de ce fait, son énergie est dissipée, ce qui entraîne seulement une réflexion partielle (Cetmef.,2009). Pour ce qui est l'interaction hydraulique entre la houle et les ouvrages. On a le run-up, le run-down, le franchissement. Ces paramètres sont calculés par des formules semi-empirique fondées sur des expériences réelles en laboratoires ainsi que sur des observation terrain.

Les données de houles ont été extraites de la base de données IOWAGA, la série de données traitée est composé de 88 632 mesures pour chacun des trois paramètres de houle (Hs, Tp, Dp).

A l'aide des méthodes de prédiction des évènements extrêmes POT et GEV, on a déterminé les hauteurs de houle de ces derniers avec leurs périodes de retour jusqu'à 1000 ans. Une comparaison entre les deux méthodes a été faite. Les résultats montrent que la méthode POT prend plus de points par rapport à celle de GEV qui donne des résultats supérieurs à une dizaine de centimètres.

Pour mieux comprendre l'hydrodynamisme dans notre zone d'étude on a modélisé les différents phénomènes à l'aide du logiciel Mike21 (Module SW, HD). Les houles les plus pénalisantes pour la marina ont des directions Nord, Nord-Nord-Ouest, le Nord-Ouest et le Nord-Nord-Est, avec des hauteurs du houle au pied de l'ouvrage de 2,5 m en moyenne. Cela revient à la morpho-bathymétrie de la baie d'Alger

Les houles venant du large engendre des courants longitudinaux et transversaux selon leurs direction d'incidence qui donne un schéma de circulation spécifique à chaque direction incidente, la vitesse de ces derniers qui varie entre 0,5m/s et 1,5m/s.

Les calculs de performance hydraulique sont faits par des formules semi-empirique. Ces formules sont présentes dans le guide de l'enrochement (CETMEF, 2009).

Pour le Run-up on a utilisé la méthode de TAW (2002 a) qui décrit le mieux notre cas. Les résultats du calcul de $Ru_{2\%}$ varie entre 4m et 5,4 m durant les conditions extrêmes dans la Marina. Les vagues qui dépassent une hauteur de 6 m (Revanche) et une distance de talus de 10,9 m, elles peuvent causer des franchissements vers l'intérieur du bassin.

Le calcul du Run-down est fait par la méthode de Van der Meer (1988b). Les résultats obtenus montrent que risque de déstabilisation de la digue n'est pas négligeable. Les résultats de l'extension nominale montrent que la digue subit des forces de Run-down et du Run-up sur un étendu de 13 m pour les évènements cinquantennaux.

Le franchissement a été calculée par la méthode de (TAW 2002) qui propose deux équations. Les résultats du franchissement sont corrects avec les essais en canal à houle, ce qui signifie que le franchissement n'affecte pas la stabilité de digue.

Afin d'étudier la performance hydraulique de la Marina Bay, on a utilisé la base de données du projet européen CLASH. On a effectué un prétraitement sur cette dernière, en laissant que les tests du franchissement pour les structures simples, au final la base de données est réduite à 4634 essais.

Le modèle XGBOOST élaborer a pour but d'estimer les débits de franchissements des digues simple. L'application du modèle sur la Marina Bay montre que notre modèle est fiable, néanmoins, son allure ne correspond pas parfaitement aux valeurs réelles dans une partie. Cela, est due à l'insuffisance de données représentant ces scénarios dans la base de données d'apprentissage du modèle.

La base de données doit être enrichie avec des enregistrements couvrants un maximum de scénarios pour assurer une meilleure qualité dans les travaux futur.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aber. K., Ounis. F. S., (2020), « Etude D'aménagement D'une Marina au niveau de la ville d'Alger. (Exemple de la Marina Bay D'Alger) », mémoire d'ingénieur. Gestion et protection du Littoral. Dely-Ibrahim : ENSSMAL, 181p.

Abid. A., Gourari S., (2020), Etudes de faisabilité de l'augmentation du tirant d'eau du port d'Alger », mémoire d'ingénieur. Gestion et protection du Littoral. Dely-Ibrahim : ENSSMAL, 26, 27, 30p.

Ahn. J., Sunghyun. C., Suha. K., (2021). 'Weakly Supervised Learning of Instance Segmentation with Inter-Pixel Relations'. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 10p.

Alem. A., Saf. B., (2021), « Etude hydrodynamique et d'agitation portuaire – Cas du port d'Alger », mémoire d'ingénieur. Gestion et protection du Littoral. Dely-Ibrahim: ENSSMAL, 46, 880.

Andrew Mark Symonds., (2017), « Comparison Between Mike 21 FM, Delft3D and Delfts3D FM Flow Models of Western Port Bay, Australia », Coastal Engineering Proceedings, no 35: 11, <https://doi.org/10.9753/icce.v35.currents.11.>, 12p.

Barreiro. L., Flavio., (2018), "Interprétation d'images basée sur la technologie des réseaux de neurones." PhD diss., Haute École de Gestion de Genève (HEG-GE) Filière Informatique de Gestion, 86p.

Battjes. J. A., (1975), « Surf similarity». In Coastal Engineering 1974, 480p. doi:10.1061/9780872621138.029

Bonnfile. R., (2010), « Mouvements de la mer et leurs risques ». Techniques de l'ingénieur Les aménagements des voies de transport [en ligne]. [Consulté le 13/04/2022]. T. base documentaire : TIB550DUO. No ref. Article : c4610. Publisher : Editions T.I. Type. Disponible sur le site Web : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/les-amenagements-des-voies-de-transport-42550210/mouvements-de-la-mer-et-leurs-risques-c4610/>

BTP Infrastructuras, (2015), Projet d'exécution de la Marina d'Alger, Document N°01. Mémoire, 1500p.

C. Lam., MD. et al., (2018), 'Automated Detection of Diabetic Retinopathy using Deep Learning'. PhD Biomedical Informatics Department, Stanford University, Palo Alto, CA; School of Medicine, Stanford University, Palo Alto, CA; NASA Ames Research Center, Mountain View, CA, 09p.

Caminade. D., (1995), Ouvrages de protection contre la houle. Techniques de l'ingénieur Infrastructures, environnement et transport par voie d'eau. TIB617, no ref. Article : c4631. Publisher : Editions T.I. [en ligne]. [Consulté le 08/04/2022]. Disponible sur le site Web : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/ingenierie-des-transportsth14/infrastructures-environnement-et-transport-par-voie-d-eau-42617210/ouvrages-deprotection-contre-la-houle-c4631/>, 28p.

Cetmef, (2009), Conception des ouvrages à la mer, in : Guide Enrochement : L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques. Version française du Rock Manual (2e édition). Compiègne ; Pays-Bas ; Londres : Centre d'études techniques maritimes et fluviales (France), 38p.

Cornel Stander., (2015). « Analysis of Extreme Events in the Coastal Engineering Environment », s. d., 147p.

Den Bieman. J. P., van Gent, M. R. A. et al., (2021) "Wave Overtopping Predictions Using an Advanced Machine Learning Technique ", Coastal Engineering 166: 103830. Disponible sur le web : <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103830>, 12p.

DHI., (2014). MIKE 21/3 Couple Model FM.

DHI., (2014). MIKE 21 Spectral Wave Module.

DHI., (2014). MIKE ZERO: Creating 2D Bathymetries. Bathymetry Editor & Mesh Generator.

Goethals. I., Pelckmans. K. et al., (2005). Subspace Identification of Hammerstein Systems using Least Squares Support Vector Machines. IEEE Trans. on Automatic Control 50, 1519p.

Gosse Jan Steendam, (2004), " The international data base on wave overtopping ", in Coastal Engineering 2004 (Proceedings of the 29th International Conference, National Civil Engineering Laboratory, Lisbon, Portugal: World Scientific Publishing Company), 4301-13. Disponible sur le web : https://doi.org/10.1142/9789812701916_0347, 15p.

H. Verhaeghe ., J. W. van der Meer. et al., (2003). Wave overtopping database as the starting point for a neural network prediction method. ASCE, Proc. Coastal Structures 2003, Portland, 430 p.

H. O. Pörtner., D. C. Roberts. et al., (2022), "The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", IPCC, 1re éd. (Cambridge University Press.), <https://doi.org/10.1017/9781009157964>, 40p.

Janecek., (2007), 'Computational Neuroscience, Artificial Neural Network'. [En ligne]. [Consulté le 16/05/2022]. Disponible sur le web : <https://www.scribd.com/document/326923737/2007-02-01bJanecek-Perceptron>.

Jungkyu.A., Yeji.N., Sung. W.P., (2019) « Development of Two-Dimensional Inundation Modelling Process Using MIKE21 Model », KSCE Journal of Civil Engineering 23, no 9: 3968-77, <https://doi.org/10.1007/s12205-019-1586-9>, 58p.

Laboratoire 2 ETS. (2012), 'Entraînement et évaluation d'une méthode de régression' Département de génie logiciel et desti LOG770 systèmes intelligents. Internet : Laboratoire 2 ETS.08p.

M.R.A. Van Gent., B. Pozueta. et al., (2005). Prediction method Neural network modelling of wave overtopping at coastal structures. WL, delft hydraulics. Commission of the European Communities, CLASH (EVK3-2001-00058).33p.

Mohamadally. H., Fomani. B., (2006) ' SVM : Machines à Vecteurs de Support ou Séparateurs à Vastes Marges', s. d., 20.BD Web, ISTY3. Versailles St Quentin, France. 20p.

Nassim Laouti., (2012), 'Diagnostic de défauts par les Machines à Vecteurs Supports : application à différents systèmes multivariables non linéaires', s. d., 271. Université Claude Bernard - Lyon I, Français. FfNNT : 2012LYO10161ff. Fftel-00985437f, 271p.

Pozueta. B., M. R. Van Gent. et al., (2005), "Neural network modelling of wave overtopping at coastal structures." In Coastal Engineering 2004: (In 4 Volumes), 4287p.

Rajarajan., Jagadeesh., (2015), 'Multilayer perceptrons using backpropagation algorithm', [en ligne]. [Consulté le 16/05/2022]. Disponible sur le web : <https://www.quora.com/What-is-Multilayer-perceptrons-using-backpropagation-algorithm-in-simple-words>.

Samy Senani., (2019), « Réseaux de neurones convolutionnels pour la détection précoce de la rétinopathie diabétique », mémoire Master 02. Faculté de Génie électrique et d'informatique Département Informatique. Tizi-Ouzou : UMMTO, 108p.

Sharp. N., Smythe. O. et al., (1997), « CONSOLIDATION SETTLEMENT OF QUAY WALLS, QUAY APRONS AND CRANE RAILS INVOLVING ROCKFILLS ». DISCUSSION. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Maritime and Energy, 124(3), 212p. doi:10.1680/iwtme.1997.29785

Stuart Coles., (2001), « An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values», Springer London, Doi: 10.1007/978-1-4471-3675-0, 50p.

T. Kauppi., Kalesnykiene. V. et al., (2006), 'Evaluation Database and Methodology for Diabetic Retinopathy Algorithms'. Disponible sur le web: https://www.researchgate.net/publication/255610068_DIARETDB0_Evaluation_Database_and_Methodology_for_Diabetic_Retinopathy_Algorithms

Thompson. P., Cai. Y. et al., (2009), «Automated threshold selection methods for extreme wave analysis». Coastal Engineering, 56(10), 1013–1021. Doi: 10.1016/j.coastaleng.2009.06.003

Thuiller., Denis., (1997), 'Principe et application des réseaux de neurones' Revue région et développement, Québec n° 5-1997. s. d., 28, 03p.

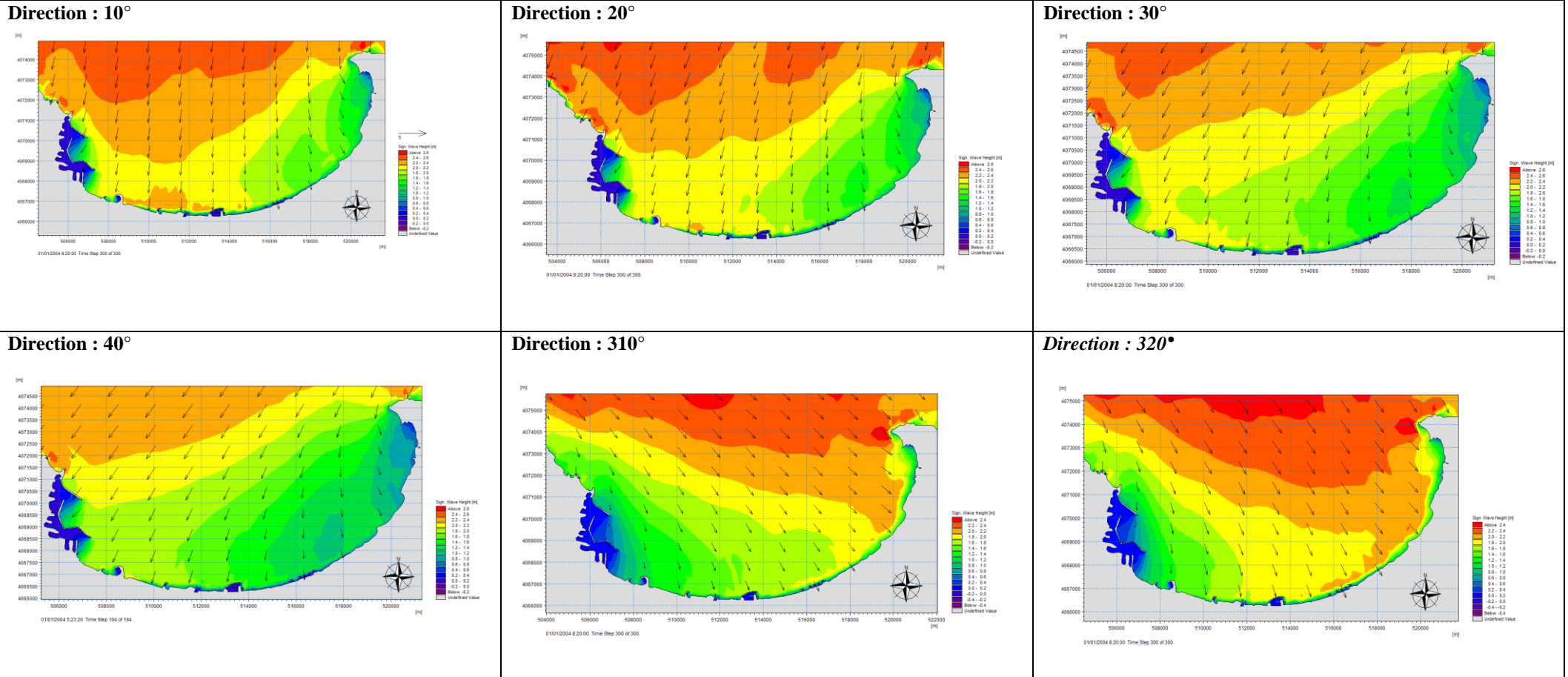
Tilbi., K., Gherda., M.E., (2018). « Distribution des valeurs extrêmes généralisées-Application en hydrologie » (Doctoral dissertation, Université Jijel).157p.

Van der Meer. J. W., (1988). Deterministic and Probabilistic Design of Breakwater Armor Layers. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 114(1), 66–80. doi:10.1061/(asce)0733-950x (1988)114:1(66)

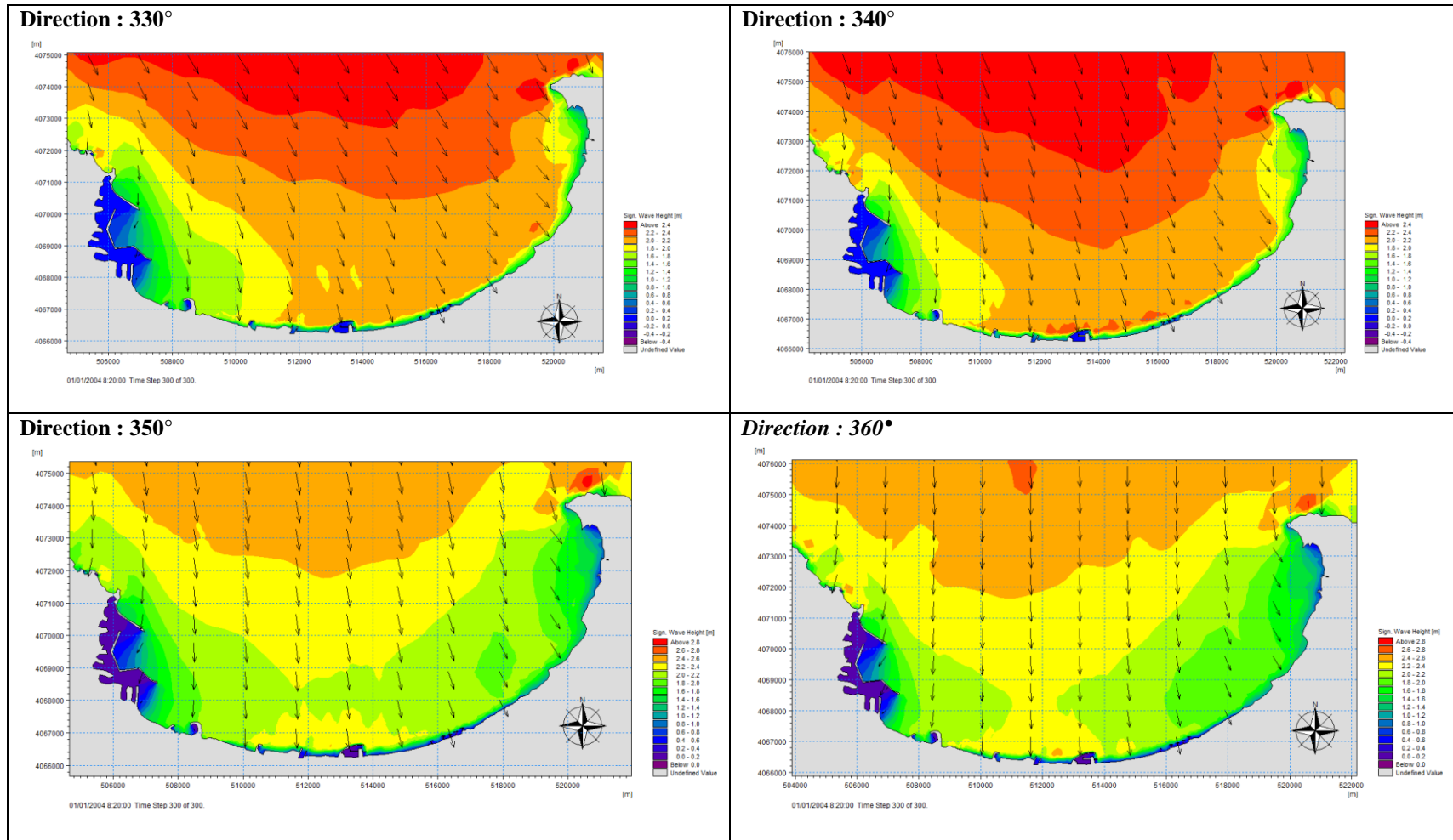
Xgboost developers., (2021), 'Introduction to Boosted Trees.2021', [en ligne].[consulté le 16/05/2022]. Disponible sur le web: <https://xgboost.readthedocs.io/en/stable/tutorials/model.html>

Yuh. M., Mase. H. et al., (2021). Refinement of integrated formula of wave overtopping and runup modeling. Ocean Engineering, 220, 108350. doi : 10.1016/j.oceaneng.2020.108350, 15p.

Annexe A



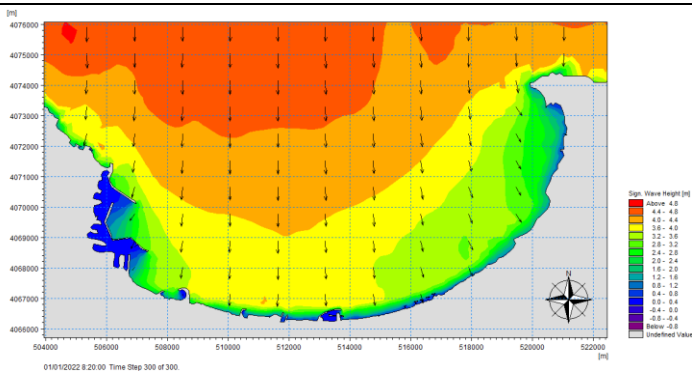
Champs des houles dans la baie d'Alger pour la détermination des directions pénalisantes ($H_s=5$ m et $T_p=12$ s)



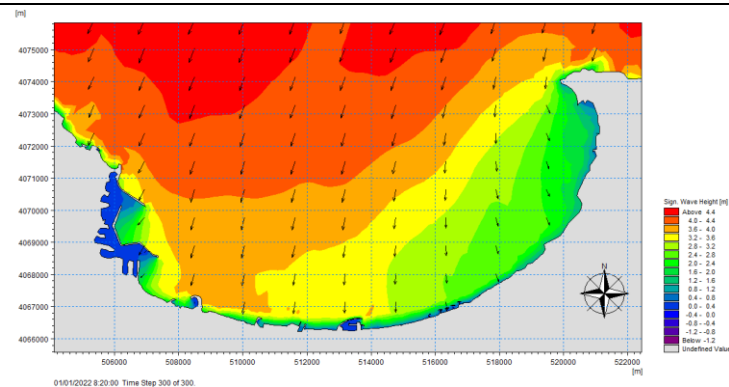
Champs des houles dans la baie d'Alger pour la détermination des directions pénalisantes ($H_s=5$ m et $T_p=12$ s)

Annexe B

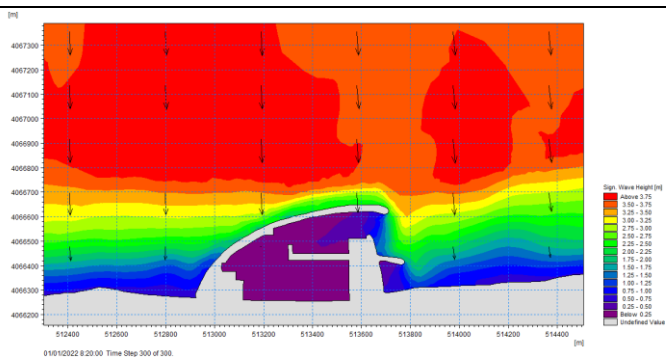
Champs des houles Baie Alger Houles période de retour 5 ans



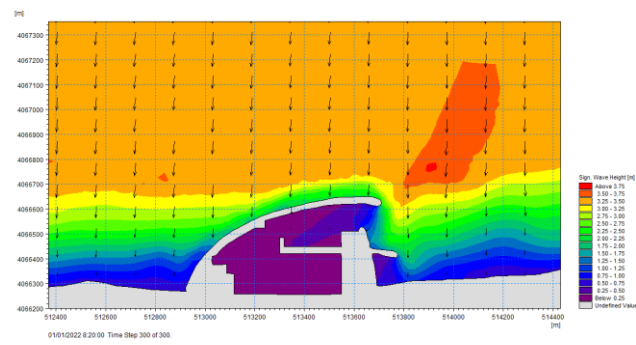
Champs des houles Baie Alger direction N (paramètres houles période de retour 5ans)



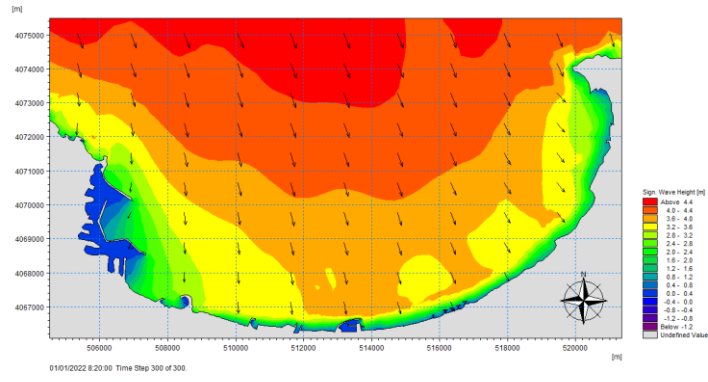
Champs des houles Baie Alger direction NNE (paramètres houles période de retour 5ans)



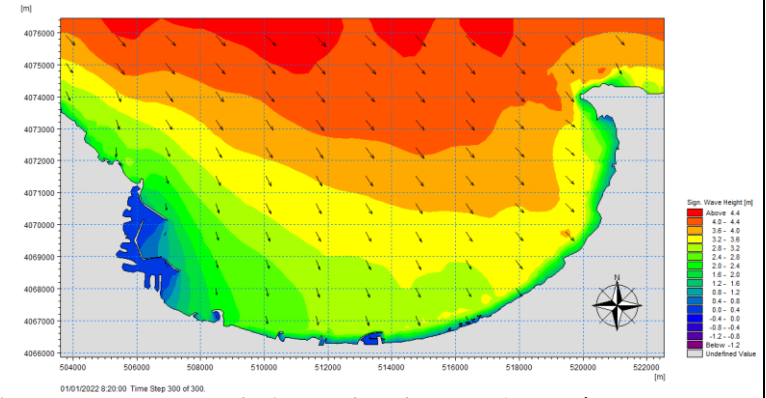
Champs des houles Marina d'Alger direction N (paramètres houles période de retour 5ans)



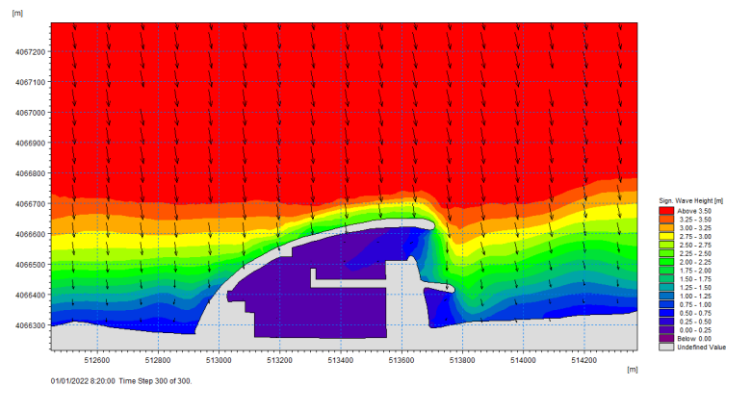
Champs des houles Marina d'Alger direction NNE (paramètres houles période de retour 5ans)



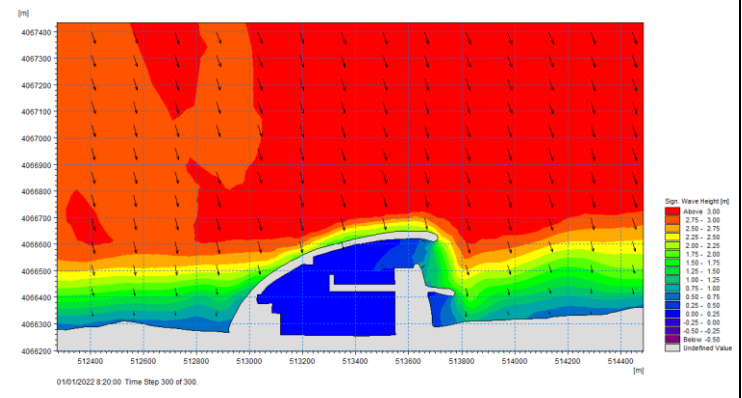
Champs des houles Baie Alger direction NNW (paramètres houles période de retour 5ans)



Champs des houles Baie Alger direction NW (paramètres houles période de retour 5ans)

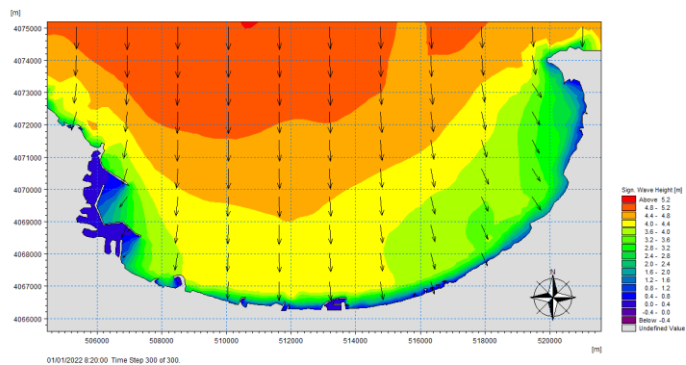


Champs des houles Marina d'Alger direction NNW (paramètres houles période de retour 5ans)

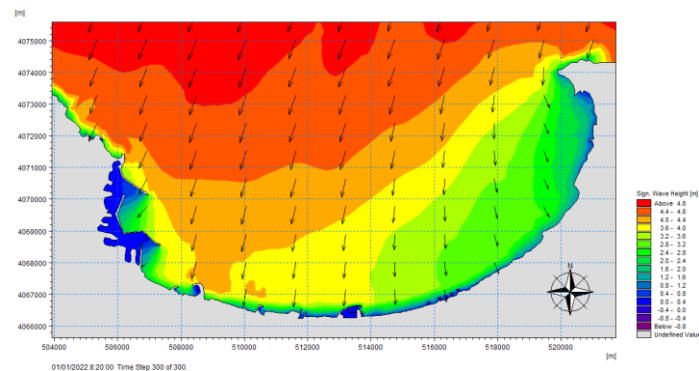


Champs des houles Marina d'Alger direction NW (paramètres houles période de retour 5ans)

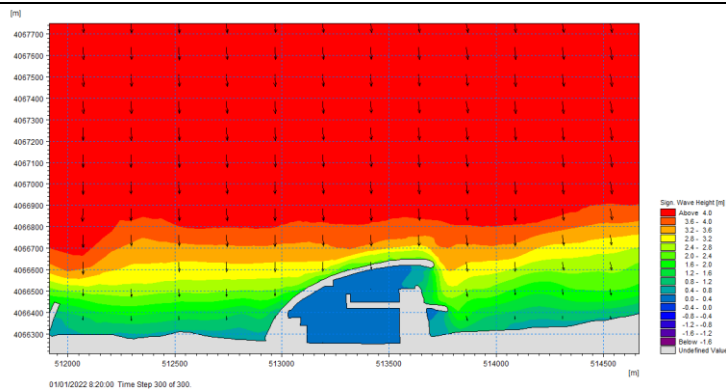
Champs des houles Baie Alger Houles période de retour 20 ans



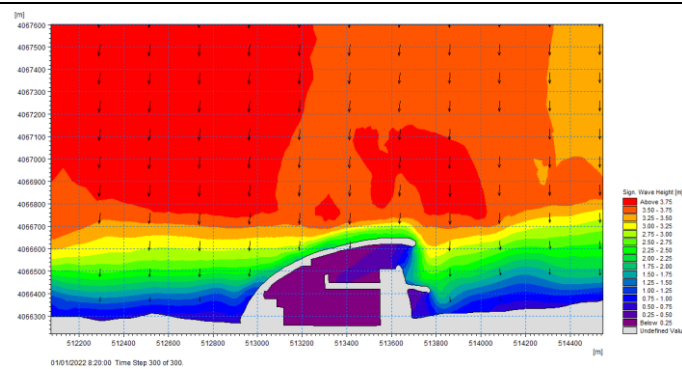
Champs des houles Baie Alger direction N (paramètres houles période de retour 20ans)



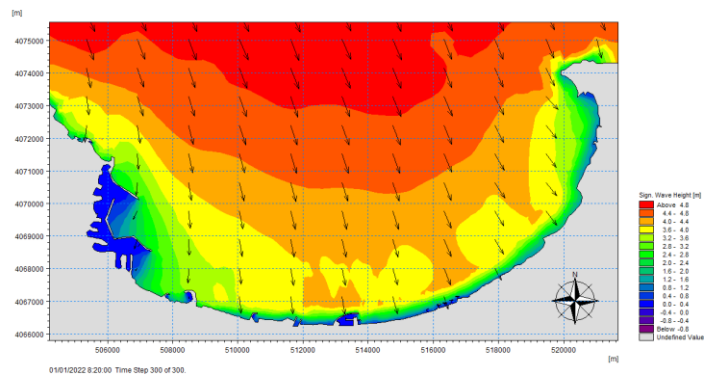
Champs des houles Baie Alger direction NNE (paramètres houles période de retour 20ans)



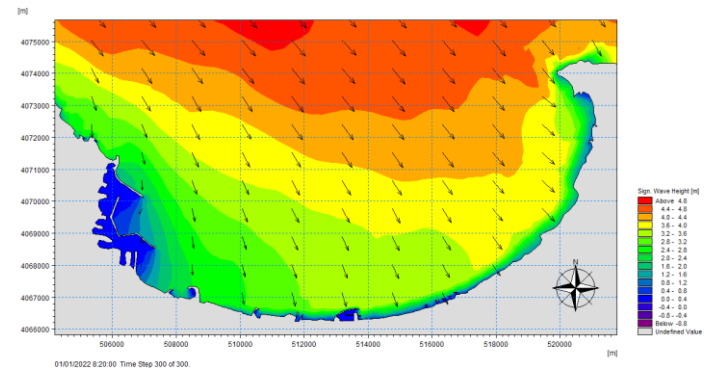
Champs des houles Marina d'Alger direction N (paramètres houles période de retour 20ans)



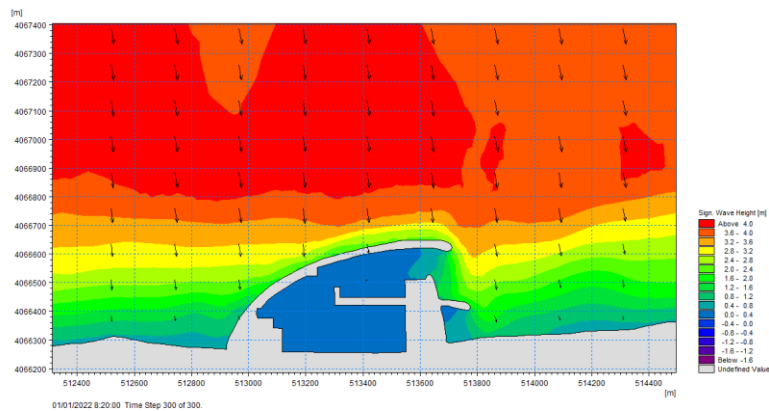
Champs des houles Marina d'Alger direction NNE (paramètres houles période de retour 20ans)



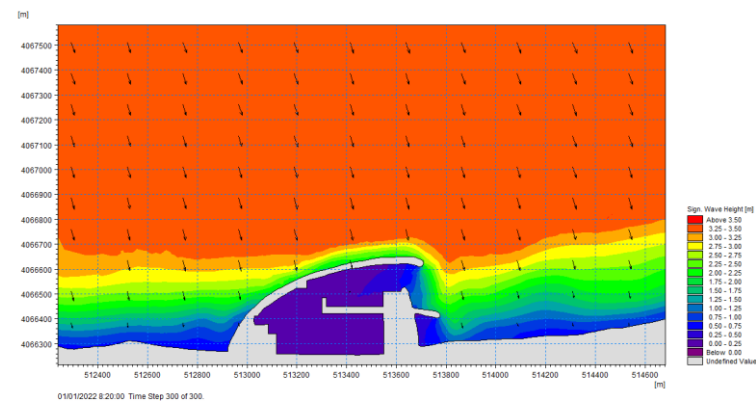
Champs des houles Baie Alger direction NNW (paramètres houles période de retour 20ans)



Champs des houles Baie Alger direction NW (paramètres houles période de retour 20ans)

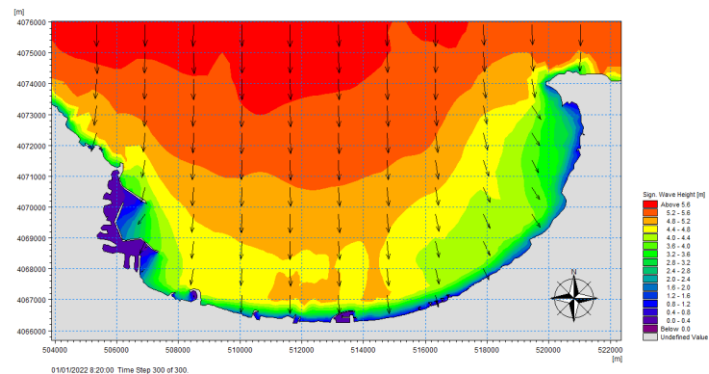


Champs des houles Marina d'Alger direction NNW (paramètres houles période de retour 20ans)

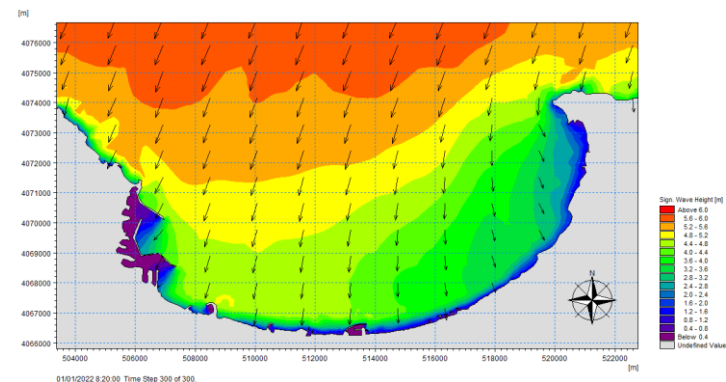


Champs des houles Marina d'Alger direction NW (paramètres houles période de retour 20ans)

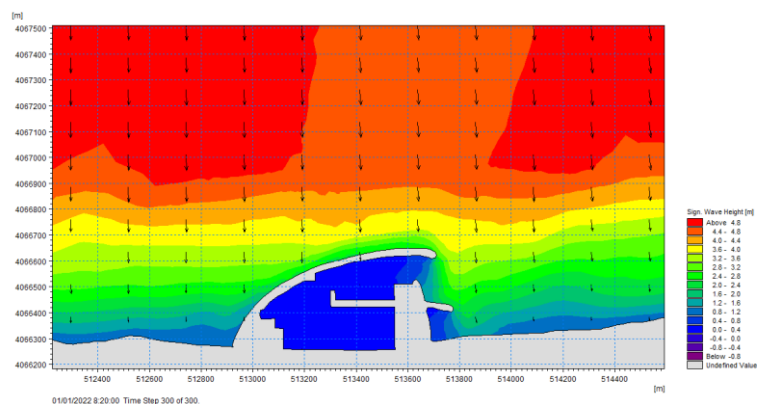
Champs des houles Baie Alger Houles période de retour 50 ans



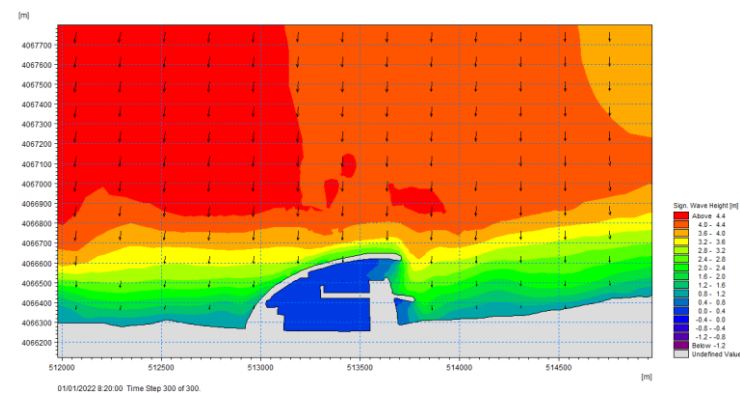
Champs des houles Baie Alger direction N (paramètres houles période de retour 50ans)



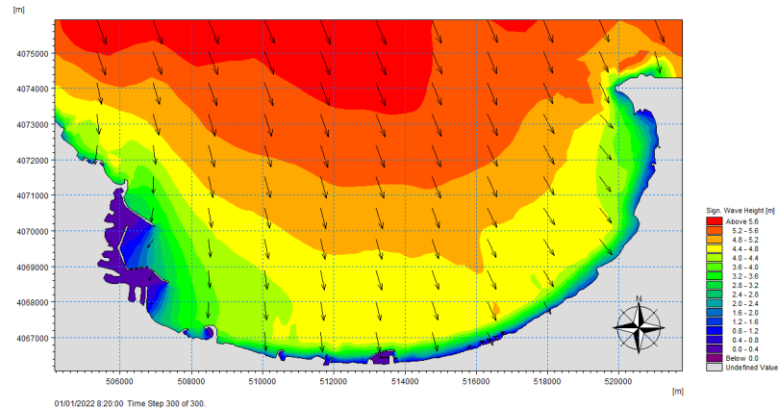
Champs des houles Baie Alger direction NNE (paramètres houles période de retour 50ans)



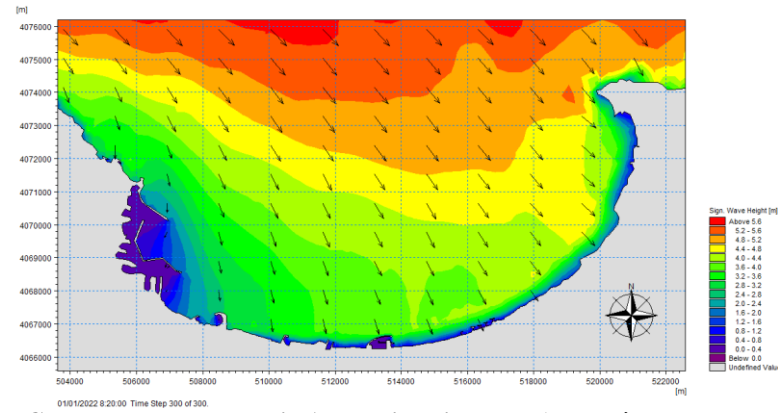
Champs des houles Marina d'Alger direction N (paramètres houles période de retour 50ans)



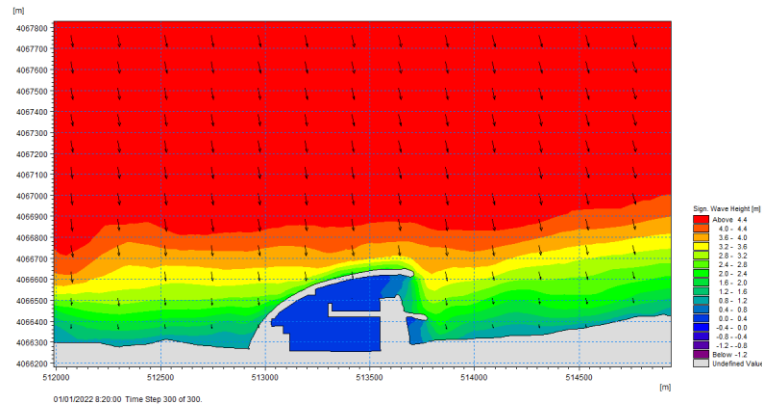
Champs des houles Marina d'Alger direction NNE (paramètres houles période de retour 50ans)



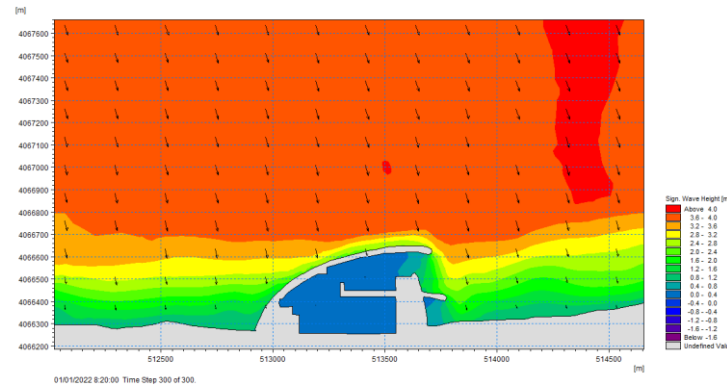
Champs des houles Baie Alger direction NNW (paramètres houles période de retour 50ans)



Champs des houles Baie Alger direction NW (paramètres houles période de retour 50ans)

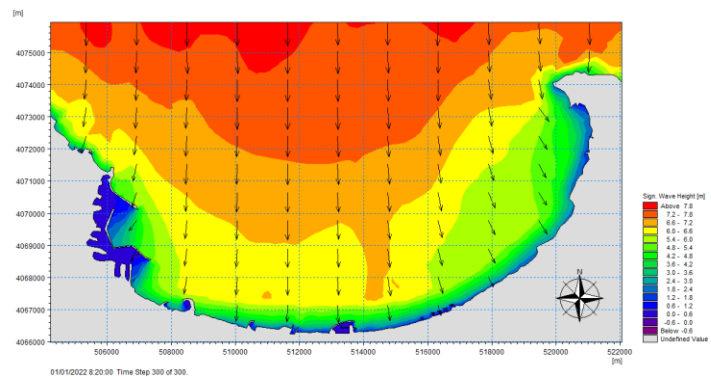


Champs des houles Marina d'Alger direction NNW (paramètres houles période de retour 50ans)

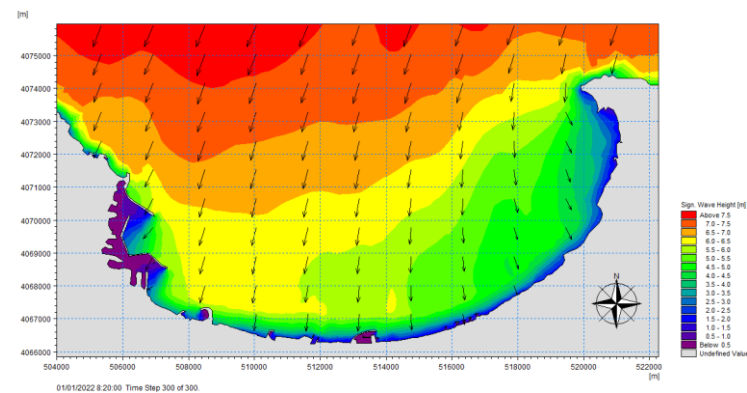


Champs des houles Marina d'Alger direction NW (paramètres houles période de retour 50ans)

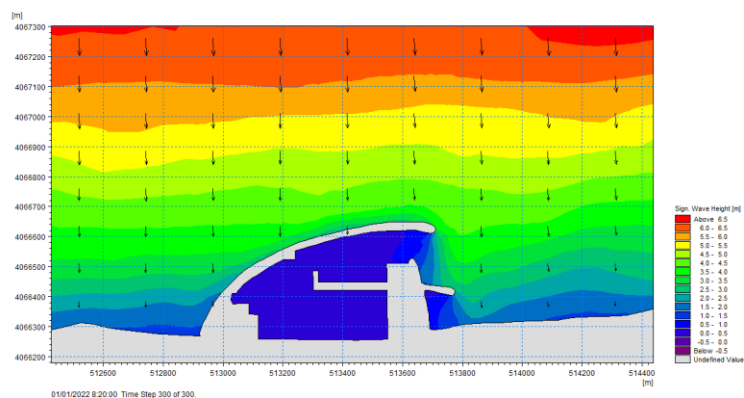
Champs des houles Baie Alger Houles période de retour 1000 ans



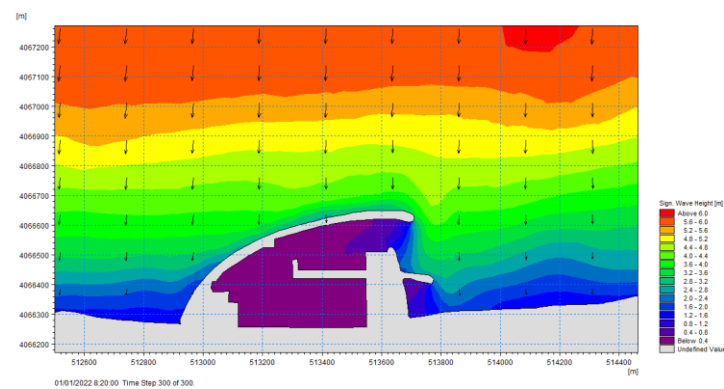
Champs des houles Baie Alger direction N (paramètres houles période de retour 1000ans)



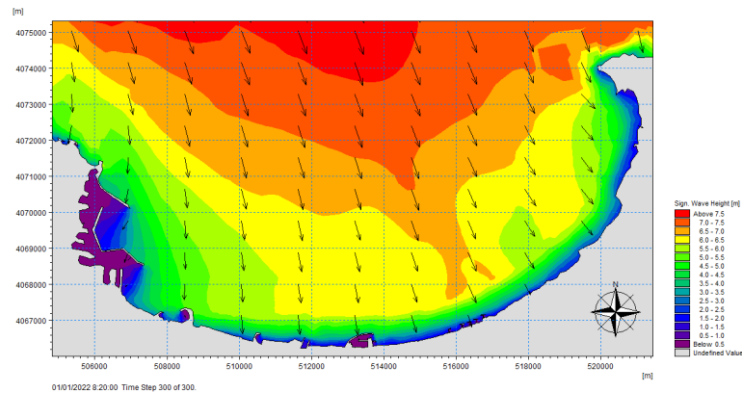
Champs des houles Baie Alger direction NNE (paramètres houles période de retour 1000ans)



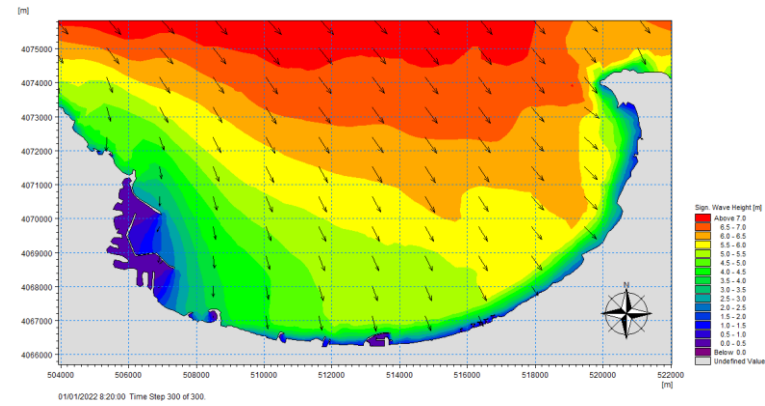
Champs des houles Marina d'Alger direction N (paramètres houles période de retour 1000ans)



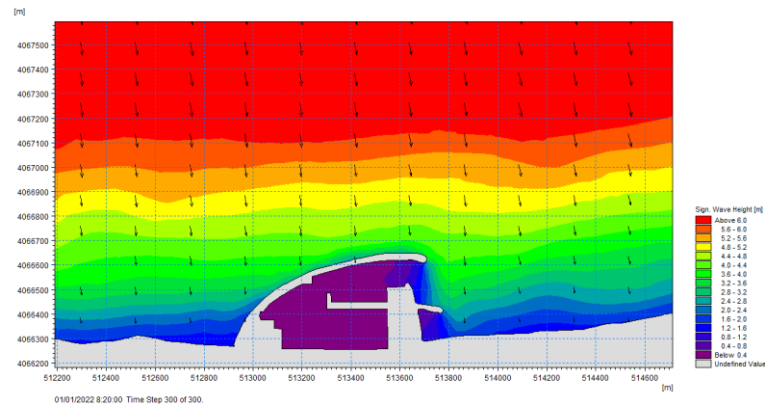
Champs des houles Marina d'Alger direction NNE (paramètres houles période de retour 1000ans)



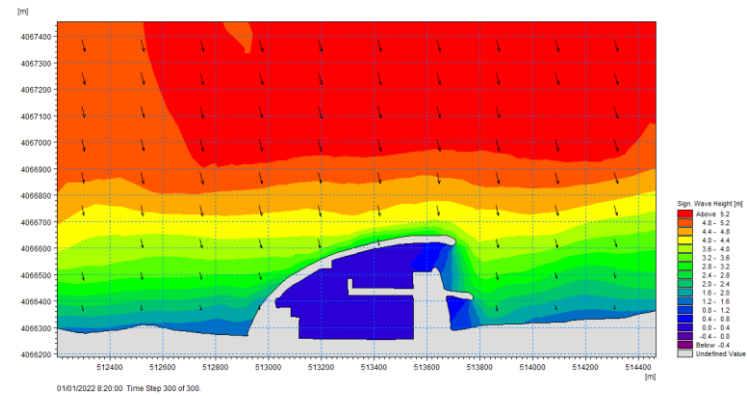
Champs des houles Baie Alger direction NNW (paramètres houles période de retour 1000ans)



Champs des houles Baie Alger direction NW (paramètres houles période de retour 1000ans)



Champs des houles Marina d'Alger direction NNW (paramètres houles période de retour 1000ans)



Champs des houles Marina d'Alger direction NW (paramètres houles période de retour 1000ans)

Annexe C

Présentation de l'enrochement artificiel utilisé Cubipode : Des chercheurs du Laboratoire de Ports et Côtes de l'Université Polytechnique de Valence ont conçu un nouvel élément pour la construction de digues inspiré sur les éléments cubiques ou parallélépipèdes traditionnels, mais capable de surmonter certains inconvénients. Conçue à partir du bloc traditionnel, elle possède une grande robustesse structurelle et une stabilité hydraulique beaucoup plus grande que celle du bloc traditionnel de carapace des digues à talus. Toutes ces caractéristiques ont été vérifiées par différents essais développés dans le cadre du Projet CUBIPOD (2007-2009), dont : les essais de chute de prototypes, les essais physiques de stabilité hydraulique en 2D et 3D des musoirs et des troncs en une et deux couches, les essais physiques de débordement, etc... (OUNIS F. S. & ABER K., 2020)

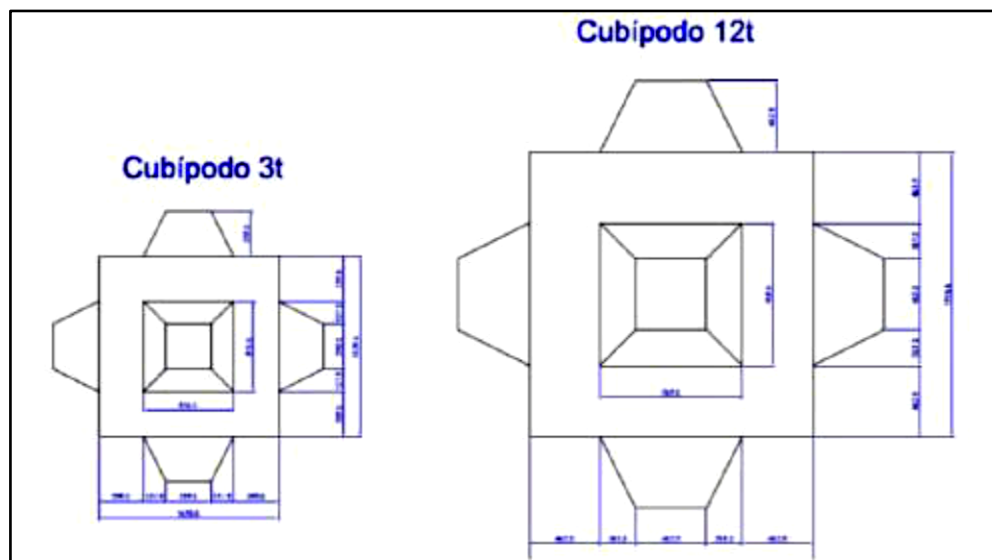


Schéma illustratif d'un bloc de cubipode 3t et 12t (OUNIS F. S. & ABER K., 2020)

Design K_D and global safety factors					Initiation of Damage (IDa)		Initiation of Destruction (IDe)	
Section	CAU	K_D	# layers	slope	SF(IDa5%)	SF(IDa50%)	SF(IDe5%)	SF(IDe50%)
Trunk	Cube	6.0	2	3/2	0.67	0.86	1.05	1.35
	Cubipod [*]	28.0	2	3/2	0.82	0.99	1.09	1.40
	Cubipod [*]	12.0	1	3/2	1.06	1.27	1.31	1.64
	Accropode TM	15.0	1	4/3	0.93 a 1.24	1.15 a 1.38	1.05 a 1.40	1.26 a 1.51
	Xbloc [*]	16.0	1	4/3	1.17	1.32	1.17	1.68
Round-head	Cube	5.0	2	3/2	0.88	1.13	1.17	1.40
	Cubipod [*]	7.0	2	3/2	0.99	1.18	1.19	1.36

Caractéristique des blocs selon leur type (Ounis F. S., Aber K., 2020)

Calcul des différents dimensionnements pour chaque formule jetée principale :

1. Cas carapace en enrochement :

1.1. Formule d'Hudson :

Dimensionnement de la section courante :

Formule	Variables
<p>Masse moyenne d'un bloc :</p> $M_{50} = \frac{1}{4} \frac{2650 * 2.6^3}{1.58^3 * 1.5} = 1968 \text{ Kg}$ <p>En arrondissant à la valeur supérieure, on aura 2 tonnes.</p>	<p>$K_d = 4$ (section courante enrochement). Cot $\alpha = 3/2$. $H_b = 2.6 \text{ m}$. $\rho_s : 2650 \text{ Kg/m}^3$. $\rho_e : 1025 \text{ Kg/m}^3$. $n : 2$. $K_A : 1$ (enrochement naturel).</p>
<p>Volume d'un bloc :</p> $V = \frac{1968}{2650} = 0.74 \text{ m}^3$	
<p>Diamètre nominal du bloc :</p> $D_n = \sqrt[3]{0.74} = 0.90 \text{ m}$	
<p>Epaisseur de la carapace :</p> $e = 2 * 1 * 0.90 = 1.80 \text{ m}$	
<p>Nombre de blocs par m^2 :</p> $N_s = \frac{2}{0.90^2} = 2.47 \text{ blocs/m}^2$ <p>Donc pour une surface de 100 m^2, on aura 247 blocs.</p>	
<p>Masse moyenne des blocs de la sous couches :</p> $M_{sc50} = \frac{1968}{10} = 196.8$ <p>Donc on aura une masse de bloc entre 186.96 kg et 226.64 kg.</p>	<p>$M_{50} : 1968 \text{ Kg}$ $\rho_s : 2650 \text{ Kg/m}^3$ $n : 2$ $K_A : 1$.</p>
<p>Volume d'un bloc :</p> $V_{sc} = \frac{196.8}{2650} = 0.07 \text{ m}^3$	
<p>Diamètre nominal du bloc :</p> $D_{ndc} = \sqrt[3]{0.07} = 0.41 \text{ m}$	
<p>Epaisseur de la carapace :</p> $e_{sc} = 2 * 1 * 0.41 = 0.82 \text{ m}$	
<p>Masse moyenne des blocs du filtre de transition :</p> $M_{sc50} = \frac{1968}{200} = 9.84 \text{ Kg}$ $4.92 \text{ Kg} < M_{sc50} < 14.76 \text{ Kg}$	<p>$M_{50} : 1968 \text{ Kg}$</p>
<p>Masse du noyau :</p> $M_{n50} = \frac{1968}{4000} = 0.5 \text{ Kg}$ $0.25 \text{ Kg} < M_{n50} < 0.75 \text{ Kg}$ <p>On prend un tous venant pour le noyau</p>	

1.1.1.1. Dimensionnement du musoir :

Formule	Variables
<p>Masse moyenne d'un bloc :</p> $M_{50} = \frac{1}{2} \frac{2650 * 2.6^3}{1.58^3 * 1.5} = 3936 \text{ Kg}$ <p>En arrondissant à la valeur supérieure, on aura 4 tonnes.</p>	<p>$K_d = 2$ (musoir en enrochement). $\text{Cot } \alpha = 3/2$. $H_b = 2.6 \text{ m}$. $\rho_s : 2650 \text{ Kg/m}^3$. $\rho_e : 1025 \text{ Kg/m}^3$. $n : 2$. $K_A : 1$ (enrochement naturel).</p>
<p>Volume d'un bloc :</p> $V = \frac{3936}{2650} = 1.48 \text{ m}^3$	
<p>Diamètre nominal du bloc :</p> $D_n = \sqrt[3]{1.48} = 1.14 \text{ m}$	
<p>Epaisseur de la carapace :</p> $e = 2 * 1 * 1.14 = 2.28 \text{ m}$	
<p>Nombre de blocs par m^2 :</p> $N_s = \frac{2}{1.14^2} = 1.54 \text{ blocs/m}^2$ <p>Donc pour une surface de 100 m^2, on aura 154 blocs.</p>	
<p>Masse moyenne des blocs de la sous couches :</p> $M_{sc50} = \frac{3936}{10} = 393,6$ <p>Donc on aura une masse de bloc entre 373.92 kg et 452.64 kg.</p>	<p>$M_{50} : 3936 \text{ Kg}$ $\rho_s : 2650 \text{ Kg/m}^3$ $n : 2$ $K_A : 1$.</p>
<p>Volume d'un bloc :</p> $V_{sc} = \frac{393,6}{2650} = 0.15 \text{ m}^3$	
<p>Diamètre nominal du bloc :</p> $D_{nsc} = \sqrt[3]{0.15} = 0.53 \text{ m}$	
<p>Epaisseur de la carapace :</p> $e_{sc} = 2 * 1 * 0.53 = 1.06 \text{ m}$	
<p>Masse moyenne des blocs du filtre de transition :</p> $M_{sc50} = \frac{3936}{200} = 19,68 \text{ Kg}$ <p>$9.84 \text{ Kg} < M_{sc50} < 29.52 \text{ Kg}$</p>	
<p>Masse du noyau :</p> $M_{n50} = \frac{1968}{4000} = 0.98 \text{ Kg}$ <p>$0.49 \text{ Kg} < M_{n50} < 1.47 \text{ Kg}$</p> <p>On prend un tous venant pour le noyau</p>	<p>$D_{15} (\text{filtre}) = 0.23$ $D_{15} (\text{noyau}) = 0.07$ $D_{50} (\text{noyau}) = 0.09$ $D_{85} (\text{noyau}) = 0.10$</p>
<p>Les règles de TERZAGHI :</p> <p>$\frac{D_{15} (\text{filtre})}{D_{85} (\text{noyau})} = 2.3 < 5$; validé</p> <p>$4 < \frac{D_{15} (\text{filtre})}{D_{15} (\text{noyau})} = 3.3 < 20$; non validé</p> <p>$\frac{D_{15} (\text{filtre})}{D_{50} (\text{noyau})} = 2.6 < 25$; validé</p>	

1.2. Formule de Van der Meer :

1.2.1. Choix de la formule adéquate :

- Pour savoir quelle formule à utiliser (eau profonde et eau peu profonde), on procède à la vérification de condition de profondeur.

- a. Eau peu profonde : hauteur d'eau au pied de l'ouvrage $H_{\text{en pied}} < 3H_s$ au pied et H_s en-pied $\leq 70\%$ de la hauteur de la houle au large H_s .
- b. Eau profonde : hauteur d'eau au pied de l'ouvrage $H_{\text{en pied}} > 3H_s$ au pied
- On $H_s = 5 \text{ m}$; H_s au pied = 2.6 m et $H_{\text{en pied}} = 6 \text{ m}$ (limite musoir). on a $6 < 3 \cdot 2.6$ et $2.6 < 0.7 \cdot 5$
- Donc on est en eau peu profonde.

Avec : $T_{m-1,0} = 8.8 \text{ s}$; $T = 8 \text{ s}$; Durée de tempête = 3 Heures.

- Section courante :

Formule de Van der Meer	
Eaux peu profondes	Variables
Pour le déferlement plongeant ($\xi_{s-1,0} < \xi_{cr}$) : $\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 8.4 \cdot 0.4^{0.18} \left(\frac{4}{\sqrt{1350}} \right)^{0.2} \left(\frac{2.6}{3.64} \right) 4.57^{-0.5}$ $D_{n50} = 1.07 \text{ m} \quad \text{Donc} \quad M_{50} = 3290 \text{ Kg}$ <p style="text-align: center;">Avec :</p> $\xi_{s-1,0} = \frac{0.67}{\sqrt{\frac{2 \pi \cdot 2.6}{9.81 \cdot 8.8^2}}} = 4.57$ $\xi_{cr} = \left(\frac{8.4}{1.3} \cdot 0.4^{0.31} \sqrt{0.67} \right)^{\frac{1}{0.4+0.5}} = 4.64$	N : 1350 Hs : 2.6 m. H _{2%} : 3.64 m. S _d : 4 cot α : 1.5. $\Delta = 1.58$ P : 0.4 Cpl : 8,4 Cs : 1,3
Epaisseur de la carapace : $e = 2 * 1 * 1.07 = 2.14 \text{ m}$	
Nombre de blocs par m ² : $N_s = \frac{2}{1.10^2} = 1.74 \text{ blocs/m}^2$ Donc pour une surface de 100 m ² , on aura 174 blocs.	
Masse moyenne des blocs de la sous couches : $M_{sc50} = \frac{3290}{10} = 329 \text{ Kg}$ Donc on aura une masse de bloc entre 312.55 kg et 378.35 kg.	M ₅₀ : 3290 Kg ρ_s : 2650 Kg/m ³ n : 2 K_A : 1.
Volume d'un bloc : $V_{sc} = \frac{329}{2650} = 0.12 \text{ m}^3$	
Diamètre nominal du bloc : $D_{nsc} = \sqrt[3]{0.12} = 0.50 \text{ m}$	
Epaisseur de la carapace : $e_{sc} = 2 * 1 * 0.50 = 1.00 \text{ m}$	
Masse moyenne des blocs du filtre de transition : $M_{sc50} = \frac{3290}{200} = 16,45 \text{ Kg}$ $8.22 \text{ Kg} < M_{sc50} < 24.68 \text{ Kg}$	M ₅₀ : 3290 Kg
Masse du noyau : $M_{n50} = \frac{3290}{4000} = 0.82 \text{ Kg}$ $0.41 \text{ Kg} < M_{n50} < 1.23 \text{ Kg}$ On prend un tous venant pour le noyau	

<p>Les règles de TERZAGHI :</p> $\frac{D_{15} \text{ (filtre)}}{D_{85} \text{ (noyau)}} = 1.9 < 5 ; \text{ validé}$ $4 < \frac{D_{15} \text{ (filtre)}}{D_{15} \text{ (noyau)}} = 2.7 < 20 ; \text{ non validé}$ $\frac{D_{15} \text{ (filtre)}}{D_{50} \text{ (noyau)}} = 2.1 < 25 ; \text{ validé}$	$D_{15} \text{ (filtre)} = 0.19$ $D_{15} \text{ (noyau)} = 0.07$ $D_{50} \text{ (noyau)} = 0.09$ $D_{85} \text{ (noyau)} = 0.10$
---	---

• **Musoir**

Formule de Van der Meer	
Eaux peu profondes	Variables
<p>Pour le déferlement plongeant ($\xi_{s-1,0} < \xi_{cr}$) :</p> $\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 8.4 \cdot 0.4^{0.18} \left(\frac{2}{\sqrt{1350}}\right)^{0.2} \left(\frac{2.6}{3.64}\right) 4.57^{-0.5}$ <p>$D_{n50} = 1.23 \text{ m}$ Donc $M_{50} = 5023 \text{ Kg}$</p> <p>Avec :</p> $\xi_{s-1,0} = \frac{0.67}{\sqrt{\frac{2 \pi \cdot 2.6}{9.81 \cdot 8.8^2}}} = 4.57$ $\xi_{cr} = \left(\frac{8.4}{1.3} \cdot 0.4^{0.31} \sqrt{0.67}\right)^{\frac{1}{0.4+0.5}} = 4.64$	<p>N : 1350</p> <p>Hs : 2.6 m.</p> <p>H_{2%} : 3.64 m.</p> <p>S_d : 2</p> <p>cot α : 1.5.</p> <p>Δ = 1.58</p> <p>P : 0.4</p> <p>Cpl : 8,4</p> <p>Cs : 1,3</p>
<p>Epaisseur de la carapace :</p> $e = 2 * 1 * 1.23 = 2.46 \text{ m}$	
<p>Nombre de blocs par m² :</p> $N_s = \frac{2}{1.25^2} = 1.32 \text{ blocs/m}^2$ <p>Donc pour une surface de 100 m², on aura 132 blocs.</p>	
<p>Masse moyenne des blocs de la sous couches :</p> $M_{sc50} = \frac{5023}{10} = 502.3$ <p>Donc on aura une masse de bloc entre 477.19 kg et 577.65 kg.</p>	<p>$M_{50} : 5023 \text{ Kg}$</p>
<p>Volume d'un bloc :</p> $V_{sc} = \frac{502.3}{2650} = 0.18 \text{ m}^3$	<p>$\rho_s : 2650 \text{ Kg/m}^3$</p>
<p>Diamètre nominal du bloc :</p> $D_{nsc} = \sqrt[3]{0.18} = 0.57 \text{ m}$	<p>$n : 2$</p>
<p>Epaisseur de la carapace :</p> $e_{sc} = 2 * 1 * 0.57 = 1.14 \text{ m}$	<p>$K_{\Lambda} : 1.$</p>
<p>Masse moyenne des blocs du filtre de transition :</p> $M_{sc50} = \frac{5023}{200} = 25,12 \text{ Kg}$ <p>12.55 Kg < M_{sc50} < 37.67 Kg</p>	<p>$M_{50} : 5023 \text{ Kg}$</p>
<p>Masse du noyau :</p> $M_{n50} = \frac{5023}{4000} = 1.26 \text{ Kg}$ <p>0.63 Kg < M_{n50} < 1.88 Kg</p> <p>On prend un tous venant pour le noyau</p>	

<p>Les règles de TERZAGHI :</p> $\frac{D_{15} (filtre)}{D_{85} (noyau)} = 1.9 < 5 ; \text{ validé}$ $4 < \frac{D_{15} (filtre)}{D_{15} (noyau)} = 2.6 < 20 ; \text{ non validé}$ $\frac{D_{15} (filtre)}{D_{50} (noyau)} = 2.3 < 25 ; \text{ validé}$	$D_{15} (filtre) = 0.21$ $D_{15} (noyau) = 0.08$ $D_{50} (noyau) = 0.09$ $D_{85} (noyau) = 0.11$
---	--

Cas d'enrochement artificiel (cubipod) :

Section courante :

Formule	Variables
<p>Masse moyenne d'un bloc (cubipod) :</p> $M_{50} = \frac{1 \cdot 2400 \cdot 5^3}{28 \cdot 1.34^3 \cdot 1.5}$ $M_{50} = 2969 \text{ Kg.}$ <p>En arrondissant à la valeur supérieure, on aura 3 tonnes.</p>	$K_d : 28.$ $\text{Cot } \alpha : 1,5.$ $H_s : 5 \text{ m.}$
<p>Volume d'un bloc :</p> $V = \frac{2969}{2400} = 1.23 \text{ m}^3$	$\Delta = 1.34$
<p>Diamètre nominal du bloc :</p> $D_n = \sqrt[3]{1.23} = 1.07 \text{ m}$	$\rho_s : 2400 \text{ Kg/m}^3.$ $\rho_e : 1025 \text{ Kg/m}^3.$ $n : 2$
<p>Épaisseur de la carapace :</p> $e = 2 * 1.15 * 1.07 = 2.46 \text{ m}$	$K_\Delta : 1.15$
<p>Nombre de blocs par m² :</p> $N_s = \frac{2}{1.07^2} = 1.74 \text{ blocs/m}^2$ <p>Donc pour une surface de 100 m², on aura 174 blocs.</p>	
<p>Masse moyenne des blocs de la sous couches :</p> $M_{sc50} = \frac{2969}{10} = 296,9$ <p>Donc on aura une masse de bloc entre 282.05 kg et 341.43 kg.</p>	$M_{50} : 2969 \text{ Kg}$ $\rho_s : 2650 \text{ Kg/m}^3$
<p>Volume d'un bloc :</p> $V_{sc} = \frac{296.9}{2650} = 0.11 \text{ m}^3$	$n : 2$
<p>Diamètre nominal du bloc :</p> $D_{nsc} = \sqrt[3]{0.11} = 0.48 \text{ m}$	$K_\Delta : 1$
<p>Épaisseur de la carapace :</p> $e_{sc} = 2 * 1 * 0.48 = 0.96 \text{ m}$	
<p>Masse moyenne des blocs du filtre de transition :</p> $M_{sc50} = \frac{2969}{200} = 14,84 \text{ Kg}$ $7.42 \text{ Kg} < M_{sc50} < 22.26 \text{ Kg}$	$M_{50} : 2969 \text{ Kg}$
<p>Masse du noyau :</p> $M_{n50} = \frac{2969}{4000} = 0.72 \text{ Kg}$ $0.37 \text{ Kg} < M_{n50} < 1.11 \text{ Kg}$ <p>On prend un tous venant pour le noyau</p>	
<p>Les règles de TERZAGHI :</p> $\frac{D_{15} (filtre)}{D_{85} (noyau)} = 1.6 < 5 ; \text{ validé}$ $4 < \frac{D_{15} (filtre)}{D_{15} (noyau)} = 2.3 < 20 ; \text{ non validé}$	$D_{15} (filtre) = 0.18$ $D_{15} (noyau) = 0.08$ $D_{50} (noyau) = 0.09$ $D_{85} (noyau) = 0.11$

$\frac{D_{15} (filtre)}{D_{50} (noyau)} = 2 < 25$; validé	
--	--

Musoir :

Formule	Variables
<p>Masse moyenne d'un bloc (cubipod) :</p> $M_{50} = \frac{1}{28} \frac{2400}{1.34^3} \frac{5^3}{1.5}$ $M_{50} = 11835.74 \text{ Kg.}$ <p>En arrondissant à la valeur supérieure, on aura 12 tonnes.</p>	<p>K_d: 7. Cot α : 1,5. H_s: 5 m. $\Delta = 1.34$ ρ_s : 2400 Kg/m³. ρ_e : 1025 Kg/m³. n : 2 K_Δ: 1.15</p>
<p>Volume d'un bloc :</p> $V = \frac{11836}{2400} = 4.93 \text{ m}^3$	
<p>Diamètre nominal du bloc :</p> $D_n = \sqrt[3]{4.93} = 1.70 \text{ m}$	
<p>Epaisseur de la carapace :</p> $e = 2 * 1.15 * 1.70 = 3.91 \text{ m}$	
<p>Nombre de blocs par m² :</p> $N_s = \frac{2}{1.70^2} = 0.69 \text{ blocs/m}^2$ <p>Donc pour une surface de 100 m², on aura 69 blocs.</p>	
<p>Masse moyenne des blocs de la sous couches :</p> $M_{sc50} = \frac{11836}{10} = 1183.6$ <p>Donc on aura une masse de bloc entre 1123.86 kg et 1361.14 kg.</p>	<p>M_{50} : 11836 Kg ρ_s : 2650 Kg/m³ n : 2 K_Δ : 1</p>
<p>Volume d'un bloc :</p> $V_{sc} = \frac{1183.6}{2650} = 0.44 \text{ m}^3$	
<p>Diamètre nominal du bloc :</p> $D_{nsc} = \sqrt[3]{0.44} = 0.76 \text{ m}$	
<p>Epaisseur de la carapace :</p> $e_{sc} = 2 * 1 * 0.76 = 1.52 \text{ m}$	
<p>Masse moyenne des blocs du filtre de transition :</p> $M_{sc50} = \frac{11836}{200} = 59.18 \text{ Kg}$ $29.59 \text{ Kg} < M_{sc50} < 88.77 \text{ Kg}$	<p>M_{50} : 11836 Kg</p>
<p>Masse du noyau :</p> $M_{n50} = \frac{11836}{4000} = 2.96 \text{ Kg}$ $1.48 \text{ Kg} < M_{n50} < 4.44 \text{ Kg}$ <p>On prend un tous venant pour le noyau</p>	
<p>Les règles de TERZAGHI :</p> $\frac{D_{15} (filtre)}{D_{85} (noyau)} = 2.1 < 5$; validé $4 < \frac{D_{15} (filtre)}{D_{15} (noyau)} = 2.7 < 20$; non validé $\frac{D_{15} (filtre)}{D_{50} (noyau)} = 2.3 < 25$; validé	<p>$D_{15} (filtre) = 0.30$ $D_{15} (noyau) = 0.11$ $D_{50} (noyau) = 0.13$ $D_{85} (noyau) = 0.14$</p>

Bloc artificiel Van der Meer :

Section courante

Formule de Van der Meer	
Eaux peu profondes	Variables
<p>Pour le déferlement plongeant ($\xi_{s-1,0} < \xi_{cr}$) :</p> $\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 8.4 \cdot 0.4^{0.18} \left(\frac{4}{\sqrt{1350}} \right)^{0.2} \left(\frac{2.6}{3.64} \right) 4.57^{-0.5}$ $D_{n50} = 1.27 \text{ m} \quad \text{Donc} \quad M_{50} = 4920 \text{ Kg}$ <p>Avec :</p> $\xi_{s-1,0} = \frac{0.67}{\sqrt{\frac{2 \pi \cdot 2.6}{9.81 \cdot 8.8^2}}} = 4.57$ $\xi_{cr} = \left(\frac{8.4}{1.3} \cdot 0.4^{0.31} \sqrt{0.67} \right)^{\frac{1}{0.4+0.5}} = 4.64$	<p>N : 1350 Hs : 2.6 m. H_{2%} : 3.64 m. S_d : 4 cot α : 1.5. Δ = 1.34 P : 0.4 Cpl : 8,4 Cs : 1,3</p>
<p>Epaisseur de la carapace :</p> $e = 2 * 1 * 1.27 = 2.54 \text{ m}$	
<p>Nombre de blocs par m² :</p> $N_s = \frac{2}{1.27^2} = 1.24 \text{ blocs/m}^2$ <p>Donc pour une surface de 100 m², on aura 124 blocs.</p>	
<p>Masse moyenne des blocs de la sous couches :</p> $M_{sc50} = \frac{4920}{10} = 492$ <p>Donc on aura une masse de bloc entre 467.4 kg et 467.4 kg.</p>	<p>M₅₀ : 4920 Kg</p>
<p>Volume d'un bloc :</p> $V_{sc} = \frac{492}{2650} = 0.18 \text{ m}^3$	<p>ρ_s : 2650 Kg/m³</p>
<p>Diamètre nominal du bloc :</p> $D_{nsc} = \sqrt[3]{0.18} = 0.57 \text{ m}$	<p>n : 2</p>
<p>Epaisseur de la carapace :</p> $e_{sc} = 2 * 1 * 0.57 = 1.14 \text{ m}$	<p>K_A : 1.</p>
<p>Masse moyenne des blocs du filtre de transition :</p> $M_{sc50} = \frac{4920}{200} = 24.6 \text{ Kg}$ $12.3 \text{ Kg} < M_{sc50} < 36.9 \text{ Kg}$	<p>M₅₀ : 4920 Kg</p>
<p>Masse du noyau :</p> $M_{n50} = \frac{4920}{4000} = 1.23 \text{ Kg}$ $0.62 \text{ Kg} < M_{n50} < 1.85 \text{ Kg}$ <p>On prend un tous venant pour le noyau</p>	
<p>Les règles de TERZAGHI :</p> $\frac{D_{15} \text{ (filtre)}}{D_{85} \text{ (noyau)}} = 2.2 < 5 ; \text{ validé}$ $4 < \frac{D_{15} \text{ (filtre)}}{D_{15} \text{ (noyau)}} = 3.2 < 20 ; \text{ non validé}$ $\frac{D_{15} \text{ (filtre)}}{D_{50} \text{ (noyau)}} = 2.44 < 25 ; \text{ validé}$	<p>D₁₅ (filtre) = 0.22 D₁₅ (noyau) = 0.07 D₅₀ (noyau) = 0.09 D₈₅ (noyau) = 0.10</p>

Musoir

Formule de Van der Meer	
Eaux peu profondes	Variables
<p>Pour le déferlement plongeant ($\xi_{s-1,0} < \xi_{cr}$) :</p> $\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 8.4 \cdot 0.4^{0.18} \left(\frac{2}{\sqrt{1350}}\right)^{0.2} \left(\frac{2.6}{3.64}\right) 4.57^{-0.5}$ <p>Donc $D_{n50} = 1.46 \text{ m}$ Donc $M_{50} = 7457 \text{ Kg}$</p> <p>Avec :</p> $\xi_{s-1,0} = \frac{0.67}{\sqrt{\frac{2 \pi \cdot 2.6}{9.81 \cdot 8.8^2}}} = 4.57$ $\xi_{cr} = \left(\frac{8.4}{1.3} \cdot 0.4^{0.31} \sqrt{0.67}\right)^{\frac{1}{0.4+0.5}} = 4.64$	<p>N : 1350 Hs : 2.6 m. H_{2%} : 3.64 m. S_d : 2 cot α : 1.5 Δ = 1.34 P : 0.4 Cpl : 8,4 Cs : 1,3</p>
<p>Epaisseur de la carapace :</p> $e = 2 * 1 * 1.46 = 2.92 \text{ m}$	
<p>Nombre de blocs par m² :</p> $N_s = \frac{2}{1.46^2} = 0.93 \text{ blocs/m}^2$ <p>Donc pour une surface de 100 m², on aura 93 blocs.</p>	
<p>Masse moyenne des blocs de la sous couches :</p> $M_{sc50} = \frac{7457}{10} = 745.7 \text{ Kg}$ <p>Donc on aura une masse de bloc entre 708.41 kg et 857.56 kg.</p>	<p>$M_{50} : 7457 \text{ Kg}$ $\rho_s : 2650 \text{ Kg/m}^3$</p>
<p>Volume d'un bloc :</p> $V_{sc} = \frac{7457}{2650} = 2.81 \text{ m}^3$	<p>$n : 2$</p>
<p>Diamètre nominal du bloc :</p> $D_{nsc} = \sqrt[3]{2.81} = 1.41 \text{ m}$	<p>$K_\Lambda : 1.$</p>
<p>Epaisseur de la carapace :</p> $e_{sc} = 2 * 1 * 1.41 = 2.42 \text{ m}$	
<p>Masse moyenne des blocs du filtre de transition :</p> $M_{sc50} = \frac{7457}{200} = 37.28 \text{ Kg}$ <p>18.6 Kg < M_{sc50} < 55.9 Kg</p>	<p>$M_{50} : 7457 \text{ Kg}$</p>
<p>Masse du noyau :</p> $M_{n50} = \frac{7457}{4000} = 1.86 \text{ Kg}$ <p>0.93 Kg < M_{n50} < 2.79 Kg</p> <p>On prend un tous venant pour le noyau</p>	
<p>Les règles de TERZAGHI :</p> $\frac{D_{15} \text{ (filtre)}}{D_{85} \text{ (noyau)}} = 2.3 < 5 ; \text{ validé}$ $4 < \frac{D_{15} \text{ (filtre)}}{D_{15} \text{ (noyau)}} = 3.2 < 20 ; \text{ non validé}$ $\frac{D_{15} \text{ (filtre)}}{D_{50} \text{ (noyau)}} = 2.6 < 25 ; \text{ validé}$	<p>$D_{15} \text{ (filtre)} = 0.22$ $D_{15} \text{ (noyau)} = 0.07$ $D_{50} \text{ (noyau)} = 0.09$ $D_{85} \text{ (noyau)} = 0.10$</p>

Calcul des différents dimensionnements pour chaque formule jetée secondaire :

Dimensionnement de la section courante en enrochements :

Formule	Variables
<p>Masse moyenne d'un bloc :</p> $M_{50} = \frac{1 \cdot 2650 \cdot 2.2^3}{4 \cdot 1.58^3 \cdot 1.5} = 1193 \text{ Kg}$ <p>En arrondissant à la valeur supérieure, on aura 1.5 tonnes.</p>	<p>$K_d = 4$ (section courante enrochement). Cot $\alpha = 3/2$. $H_b = 2.2 \text{ m}$. $\rho_s : 2650 \text{ Kg/m}^3$. $\rho_e : 1025 \text{ Kg/m}^3$. $n : 2$. $K_\Delta : 1$ (enrochement naturel).</p>
<p>Volume d'un bloc :</p> $V = \frac{1193}{2650} = 0.45 \text{ m}^3$	
<p>Diamètre nominal du bloc :</p> $D_n = \sqrt[3]{0.45} = 0.77 \text{ m}$	
<p>Epaisseur de la carapace :</p> $e = 2 * 1 * 0.77 = 1.54 \text{ m}$	
<p>Nombre de blocs par m^2 :</p> $N_s = \frac{2}{0.77^2} = 3.37 \text{ blocs/m}^2$ <p>Donc pour une surface de 100 m^2, on aura 337 blocs.</p>	
<p>Masse moyenne des blocs de la sous couche :</p> $M_{sc50} = \frac{1193}{10} = 119.3$ <p>Donc on aura une masse de bloc entre 113.3 kg et 137.2 kg.</p>	<p>$M_{50} : 1193 \text{ Kg}$ $\rho_s : 2650 \text{ Kg/m}^3$ $n : 2$ $K_\Delta : 1$.</p>
<p>Volume d'un bloc :</p> $V_{sc} = \frac{119.3}{2650} = 0.05 \text{ m}^3$	
<p>Diamètre nominal du bloc :</p> $D_{ndc} = \sqrt[3]{0.05} = 0.37 \text{ m}$	
<p>Epaisseur de la carapace :</p> $e_{sc} = 2 * 1 * 0.37 = 0.74 \text{ m}$	
<p>Masse moyenne des blocs du filtre de transition :</p> $M_{sc50} = \frac{1193}{200} = 5.97 \text{ Kg}$ <p>$2.99 \text{ Kg} < M_{sc50} < 8.96 \text{ Kg}$</p>	<p>$M_{50} : 1193 \text{ Kg}$</p>
<p>Masse du noyau :</p> $M_{n50} = \frac{1193}{4000} = 0.3 \text{ Kg}$ <p>$0.15 \text{ Kg} < M_{n50} < 0.45 \text{ Kg}$</p> <p>On prend un tous venant pour le noyau</p>	

1.3. Formule de Van der Meer section courante :

1.3.1. Choix de la formule adéquate :

- Pour savoir quelle formule à utiliser (eau profonde et eau peu profonde), on procède à la vérification de condition de profondeur.

- c. Eau peu profonde : hauteur d'eau au pied de l'ouvrage $H_{\text{en pied}} < 3H_s$ au pied et H_S en- pied $\leq 70\%$ de la hauteur de la houle au large H_s .
- d. Eau profonde : hauteur d'eau au pied de l'ouvrage $H_{\text{en pied}} > 3H_s$ au pied
- On $H_s = 5 \text{ m}$; H_s au pied = 2.2 m et $H_{\text{en pied}} = 5 \text{ m}$ (limite musoir). on a $6 < 3 \cdot 2.2$ et $2.2 < 0.7 \cdot 5$
 - Donc on est en eau peu profonde.

Avec : $T_{m-1,0} = 8.8 \text{ s}$; $T = 8 \text{ s}$; Durée de tempête = 3 Heures.

• **Section courante :**

Formule de Van der Meer	
Eaux peu profondes	Variables
Pour le déferlement gonflant ($\xi_m \geq \xi_{cr}$) : $\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 1.3 \cdot 0.4^{-0.13} \left(\frac{4}{\sqrt{1350}}\right)^{0.2} \left(\frac{2.2}{3.08}\right) \sqrt{1.5} \cdot 4.97^{0.4}$ $D_{n50} = 1.05 \text{ m} \quad \text{Donc} \quad M_{50} = 2800 \text{ Kg}$ <p style="text-align: center;">Avec :</p> $\xi_{s-1,0} = \frac{0.67}{\sqrt{\frac{2 \pi \cdot 2.6}{9.81 \cdot 8.8^2}}} = 4.97$ $\xi_{cr} = \left(\frac{8.4}{1.3} \cdot 0.4^{0.31} \sqrt{0.67}\right)^{\frac{1}{0.4+0.5}} = 4.64$	N : 1350 Hs : 2.2 m. H _{2%} : 3.08 m. S _d : 4 cot α : 1.5. Δ = 1.34 P : 0.4 Cpl : 8,4 Cs : 1,3
Epaisseur de la carapace : $e = 2 * 1 * 1.05 = 2.10 \text{ m}$	
Nombre de blocs par m ² : $N_s = \frac{2}{1.05^2} = 1.81 \text{ blocs/m}^2$ Donc pour une surface de 100 m ² , on aura 181 blocs.	
Masse moyenne des blocs de la sous couches : $M_{sc50} = \frac{2800}{10} = 280 \text{ Kg}$ Donc on aura une masse de bloc entre 266 kg et 322 kg.	M ₅₀ : 2800 Kg ρ _s : 2650 Kg/m ³
Volume d'un bloc : $V_{sc} = \frac{280}{2650} = 0.12 \text{ m}^3$	n : 2
Diamètre nominal du bloc : $D_{nsc} = \sqrt[3]{0.12} = 0.49 \text{ m}$	K _Δ : 1.
Epaisseur de la carapace : $e_{sc} = 2 * 1 * 0.49 = 0.98 \text{ m}$	
Masse moyenne des blocs du filtre de transition : $M_{sc50} = \frac{2800}{200} = 14 \text{ Kg}$ $7 \text{ Kg} < M_{sc50} < 21 \text{ Kg}$	M ₅₀ : 2800 Kg

<p>Masse du noyau :</p> $M_{n50} = \frac{2800}{4000} = 0.7 \text{ Kg}$ $0.35 \text{ Kg} < M_{n50} < 1.05 \text{ Kg}$ <p>On prend un tous venant pour le noyau</p>	
<p>Les règles de TERZAGHI :</p> $\frac{D_{15} (\text{filtre})}{D_{85} (\text{noyau})} = 1.9 < 5 ; \text{ validé}$ $4 < \frac{D_{15} (\text{filtre})}{D_{15} (\text{noyau})} = 2.7 < 20 ; \text{ non validé}$ $\frac{D_{15} (\text{filtre})}{D_{50} (\text{noyau})} = 2.1 < 25 ; \text{ validé}$	$D_{15} (\text{filtre}) = 0.19$ $D_{15} (\text{noyau}) = 0.07$ $D_{50} (\text{noyau}) = 0.09$ $D_{85} (\text{noyau}) = 0.10$

Musoir

1.3.1.1. Dimensionnement du musoir cubipodes :

Formule	Variables
<p>Masse moyenne d'un bloc :</p> $M_{50} = \frac{1}{2} \frac{2400 * 2.2^3}{1.34^3 * 1.5} = 3540 \text{ Kg}$ <p>En arrondissant à la valeur supérieure, on aura 4 tonnes.</p>	<p>$K_d = 2$ (musoir en enrochement). Cot $\alpha = 3/2$. $H_b = 2.2 \text{ m}$. $\rho_s : 2650 \text{ Kg/m}^3$. $\rho_e : 1025 \text{ Kg/m}^3$. $n : 2$. $K_A : 1$ (enrochement naturel).</p>
<p>Volume d'un bloc :</p> $V = \frac{3540}{2650} = 1.34 \text{ m}^3$	
<p>Diamètre nominal du bloc :</p> $D_n = \sqrt[3]{1.34} = 1.10 \text{ m}$	
<p>Epaisseur de la carapace :</p> $e = 2 * 1 * 1.10 = 2.20 \text{ m}$	
<p>Nombre de blocs par m^2 :</p> $N_s = \frac{2}{1.10^2} = 1.65 \text{ blocs/m}^2$ <p>Donc pour une surface de 100 m^2, on aura 165 blocs.</p>	
<p>Masse moyenne des blocs de la sous couches :</p> $M_{sc50} = \frac{3540}{10} = 354$ <p>Donc on aura une masse de bloc entre 336.3 kg et 407.1 kg.</p>	
<p>Volume d'un bloc :</p> $V_{sc} = \frac{354}{2650} = 0.13 \text{ m}^3$	<p>$n : 2$</p>
<p>Diamètre nominal du bloc :</p> $D_{nsc} = \sqrt[3]{0.13} = 0.50 \text{ m}$	<p>$K_A : 1$.</p>
<p>Epaisseur de la carapace :</p> $e_{sc} = 2 * 1 * 0.50 = 1.00 \text{ m}$	
<p>Masse moyenne des blocs du filtre de transition :</p> $M_{sc50} = \frac{3540}{200} = 17.7 \text{ Kg}$ $8.84 \text{ Kg} < M_{sc50} < 26.55 \text{ Kg}$	<p>$M_{50} : 3936 \text{ Kg}$</p>
<p>Masse du noyau :</p>	

$M_{n50} = \frac{3540}{4000} = 0.89 \text{ Kg}$ $0.44 \text{ Kg} < M_{n50} < 1.33 \text{ Kg}$ <p>On prend un tous venant pour le noyau</p>	
<p>Les règles de TERZAGHI :</p> $\frac{D_{15} \text{ (filtre)}}{D_{85} \text{ (noyau)}} = 2.3 < 5 ; \text{ validé}$ $4 < \frac{D_{15} \text{ (filtre)}}{D_{15} \text{ (noyau)}} = 3.3 < 20 ; \text{ non validé}$ $\frac{D_{15} \text{ (filtre)}}{D_{50} \text{ (noyau)}} = 2.6 < 25 ; \text{ validé}$	$D_{15} \text{ (filtre)} = 0.23$ $D_{15} \text{ (noyau)} = 0.07$ $D_{50} \text{ (noyau)} = 0.09$ $D_{85} \text{ (noyau)} = 0.10$

1.4. Formule de Van der Meer musoir (bloc artificiel):

1.4.1. Choix de la formule adéquate :

- Pour savoir quelle formule à utiliser (eau profonde et eau peu profonde), on procède à la vérification de condition de profondeur.
 - e. Eau peu profonde : hauteur d'eau au pied de l'ouvrage $H_{\text{en pied}} < 3H_s$ au pied et H_s en- pied $\leq 70\%$ de la hauteur de la houle au large H_s .
 - f. Eau profonde : hauteur d'eau au pied de l'ouvrage $H_{\text{en pied}} > 3H_s$ au pied
- On $H_s = 5 \text{ m}$; H_s au pied = 2.2 m et $H_{\text{en pied}} = 5 \text{ m}$ (limite musoir). on a $6 < 3*2.2$ et $2.2 < 0.7*5$
- Donc on est en eau peu profonde.

Avec : $T_{m-1,0} = 8.8 \text{ s}$; $T = 8 \text{ s}$; Durée de tempête = 3 Heures.

- **Section courante :**

Formule de Van der Meer	
Eaux peu profondes	Variables
<p>Pour le déferlement gonflant ($\xi_m \geq \xi_{cr}$) :</p> $\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 1.3 \cdot 0.4^{-0.13} \left(\frac{2}{\sqrt{1350}} \right)^{0.2} \left(\frac{2.2}{3.08} \right) \sqrt{1.5} \cdot 4.97^{0.4}$ $D_{n50} = 1.20 \text{ m} \quad \text{Donc} \quad M_{50} = 4147 \text{ Kg}$ <p>Avec :</p> $\xi_{s-1,0} = \frac{0.67}{\sqrt{\frac{2 \pi \cdot 2.6}{9.81 \cdot 8.8^2}}} = 4.97$ $\xi_{cr} = \left(\frac{8.4}{1.3} \cdot 0.4^{0.31} \sqrt{0.67} \right)^{\frac{1}{0.4+0.5}} = 4.64$	<p>N : 1350</p> <p>H_s : 2.2 m.</p> <p>$H_{2\%}$: 3.08 m.</p> <p>S_d : 2</p> <p>cot α : 1.5.</p> <p>$\Delta = 1.34$</p> <p>P : 0.4</p> <p>Cpl : 8,4</p> <p>Cs : 1,3</p>
<p>Epaisseur de la carapace :</p> $e = 2 * 1 * 1.20 = 2.40 \text{ m}$	
<p>Nombre de blocs par m^2 :</p> $N_s = \frac{2}{1.20^2} = 1.38 \text{ blocs}/m^2$ <p>Donc pour une surface de 100 m^2, on aura 138 blocs.</p>	
<p>Masse moyenne des blocs de la sous couches :</p> $M_{sc50} = \frac{4147}{10} = 414.7 \text{ Kg}$ <p>Donc on aura une masse de bloc entre 393.97 kg et 476.91 kg.</p>	<p>M_{50} : 4147 Kg</p>

<p>Volume d'un bloc :</p> $V_{sc} = \frac{414.7}{2650} = 0.16 \text{ m}^3$	<p>$\rho_s : 2650 \text{ Kg/m}^3$ $n : 2$ $K_A : 1.$</p>
<p>Diamètre nominal du bloc :</p> $D_{nsc} = \sqrt[3]{0.16} = 0.54 \text{ m}$	
<p>Epaisseur de la carapace :</p> $e_{sc} = 2 * 1 * 0.54 = 1.08 \text{ m}$	
<p>Masse moyenne des blocs du filtre de transition :</p> $M_{sc50} = \frac{4147}{200} = 20.73 \text{ Kg}$ $10.37 \text{ Kg} < M_{sc50} < 31.10 \text{ Kg}$	<p>$M_{50} : 3290 \text{ Kg}$</p>
<p>Masse du noyau :</p> $M_{n50} = \frac{4147}{4000} = 1.04 \text{ Kg}$ $0.52 \text{ Kg} < M_{n50} < 1.56 \text{ Kg}$ <p>On prend un tous venant pour le noyau</p>	
<p>Les règles de TERZAGHI :</p> $\frac{D_{15} \text{ (filtre)}}{D_{85} \text{ (noyau)}} = 1.9 < 5 ; \text{ validé}$ $4 < \frac{D_{15} \text{ (filtre)}}{D_{15} \text{ (noyau)}} = 2.7 < 20 ; \text{ non validé}$ $\frac{D_{15} \text{ (filtre)}}{D_{50} \text{ (noyau)}} = 2.1 < 25 ; \text{ validé}$	<p>$D_{15} \text{ (filtre)} = 0.19$ $D_{15} \text{ (noyau)} = 0.07$ $D_{50} \text{ (noyau)} = 0.09$ $D_{85} \text{ (noyau)} = 0.10$</p>

Annexe D

Tableau VI-5 Résultats essais franchissement Marina en échelle réduit.

Tests	beta	h _{toe}	n _L	H _{m0toe}	H _{m0toe} mod	n _T	T _{p_{toe}}	T _{p toe} model	ht	ht mod	Bt	Bt mod	Gamma _f	cotAlpha	Rc	Rc mod	Ac	Ac mod	Gc	Gc mod	n _Q	q	q mod
1	0	2,78	0,360	1,503	0,541	0,600	5,7	3,419	1	0,360	3	1,079	0,440	1,500	6	2,158	6	2,158	4,47	1,608	0,216	0	0
2	0	2,92	0,342	1,578	0,540	0,585	5,8	3,394	1	0,342	3	1,027	0,440	1,500	6	2,055	6	2,055	4,47	1,531	0,200	0	0
3	0	3,3	0,303	1,784	0,541	0,550	5,91	3,253	1	0,303	3	0,909	0,440	1,500	6	1,818	6	1,818	4,47	1,355	0,167	0,00002	3,34E-06
4	0	3,44	0,291	1,859	0,540	0,539	5,91	3,186	1	0,291	3	0,872	0,440	1,500	6	1,744	6	1,744	4,47	1,299	0,157	0,00002	3,13E-06
5	0	3,67	0,272	1,984	0,541	0,522	5,91	3,085	1	0,272	3	0,817	0,440	1,500	6	1,635	6	1,635	4,47	1,218	0,142	0,00003	4,27E-06
6	0	3,63	0,275	1,962	0,540	0,525	5,8	3,044	1	0,275	3	0,826	0,440	1,500	6	1,653	6	1,653	4,47	1,231	0,145	0,00004	5,78E-06
7	0	3,82	0,262	2,065	0,541	0,512	5,8	2,968	1	0,262	3	0,785	0,440	1,500	6	1,571	6	1,571	4,47	1,170	0,134	0,00003	4,02E-06
8	0	4,13	0,242	2,232	0,540	0,492	5,7	2,805	1	0,242	3	0,726	0,440	1,500	6	1,453	6	1,453	4,47	1,082	0,119	0,00008	9,53E-06
9	0	2,42	0,413	1,308	0,540	0,643	7,64	4,911	1	0,413	3	1,240	0,440	1,500	6	2,479	6	2,479	4,47	1,847	0,266	0,00002	5,31E-06
10	0	2,45	0,408	1,324	0,540	0,639	7,64	4,881	1	0,408	3	1,224	0,440	1,500	6	2,449	6	2,449	4,47	1,824	0,261	0	0
11	0	2,62	0,382	1,416	0,540	0,618	7,64	4,720	1	0,382	3	1,145	0,440	1,500	6	2,290	6	2,290	4,47	1,706	0,236	0	0
12	0	2,83	0,353	1,53	0,541	0,594	7,46	4,435	1	0,353	3	1,060	0,440	1,500	6	2,120	6	2,120	4,47	1,580	0,210	0,00003	6,30E-06
13	0	2,93	0,341	1,584	0,541	0,584	7,64	4,463	1	0,341	3	1,024	0,440	1,500	6	2,048	6	2,048	4,47	1,526	0,199	0	0
14	0	3,23	0,310	1,746	0,541	0,556	7,64	4,251	1	0,310	3	0,929	0,440	1,500	6	1,858	6	1,858	4,47	1,384	0,172	0,00007	1,21E-05
15	0	2,55	0,392	1,378	0,540	0,626	7,46	4,672	1	0,392	3	1,176	0,440	1,500	6	2,353	6	2,353	4,47	1,753	0,246	0,00003	7,37E-06
16	0	2,75	0,364	1,486	0,540	0,603	7,46	4,499	1	0,364	3	1,091	0,440	1,500	6	2,182	6	2,182	4,47	1,625	0,219	0	0
17	0	2,87	0,348	1,551	0,540	0,590	7,64	4,510	1	0,348	3	1,045	0,440	1,500	6	2,091	6	2,091	4,47	1,557	0,206	0	0

18	0	3,51	0,285	1,897	0,540	0,534	7,46	3,982	1	0,285	3	0,855	0,440	1,500	6	1,709	6	1,709	4,47	1,274	0,152	0,00014	2,13E-05
19	0	3,74	0,267	2,022	0,541	0,517	7,46	3,857	1	0,267	3	0,802	0,440	1,500	6	1,604	6	1,604	4,47	1,195	0,138	0,0002	2,77E-05
20	0	4,34	0,230	2,346	0,541	0,480	8,95	4,296	1	0,230	3	0,691	0,440	1,500	6	1,382	6	1,382	4,47	1,030	0,111	0,00345	0,000382
21	0	4,58	0,218	2,476	0,541	0,467	9,49	4,434	1	0,218	3	0,655	0,440	1,500	6	1,310	6	1,310	4,47	0,976	0,102	0,00758	0,000773
22	0	5,04	0,198	2,724	0,540	0,445	9,79	4,361	1	0,198	3	0,595	0,440	1,500	6	1,190	6	1,190	4,47	0,887	0,088	0,00615	0,000544
23	0	5,47	0,183	2,957	0,541	0,428	9,21	3,938	1	0,183	3	0,548	0,440	1,500	6	1,097	6	1,097	4,47	0,817	0,078	0,00508	0,000397
24	0	5,46	0,183	2,951	0,540	0,428	9,21	3,942	1	0,183	3	0,549	0,440	1,500	6	1,099	6	1,099	4,47	0,819	0,078	0,00699	0,000548
25	0	5	0,200	2,703	0,541	0,447	9,49	4,244	1	0,200	3	0,600	0,440	1,500	6	1,200	6	1,200	4,47	0,894	0,089	0,00814	0,000728
26	0	5,97	0,168	3,227	0,541	0,409	9,79	4,007	1	0,168	3	0,503	0,440	1,500	6	1,005	6	1,005	4,47	0,749	0,069	0,0096	0,000658
27	0	5,85	0,171	3,162	0,541	0,413	9,49	3,924	1	0,171	3	0,513	0,440	1,500	6	1,026	6	1,026	4,47	0,764	0,071	0,01382	0,000977
28	0	6,28	0,159	3,395	0,541	0,399	9,49	3,787	1	0,159	3	0,478	0,440	1,500	6	0,955	6	0,955	4,47	0,712	0,064	0,01729	0,001099
29	0	6,37	0,157	3,443	0,541	0,396	9,79	3,879	1	0,157	3	0,471	0,440	1,500	6	0,942	6	0,942	4,47	0,702	0,062	0,01303	0,00081
30	0	6,81	0,147	3,681	0,541	0,383	9,21	3,529	1	0,147	3	0,441	0,440	1,500	6	0,881	6	0,881	4,47	0,656	0,056	0,01671	0,00094
31	0	4,48	0,223	2,422	0,541	0,472	12,05	5,693	1	0,223	3	0,670	0,440	1,500	6	1,339	6	1,339	4,47	0,998	0,105	0,01679	0,001771
32	0	5,01	0,200	2,708	0,541	0,447	12,53	5,598	1	0,200	3	0,599	0,440	1,500	6	1,198	6	1,198	4,47	0,892	0,089	0,02164	0,00193
33	0	5,26	0,190	2,843	0,540	0,436	12,05	5,254	1	0,190	3	0,570	0,440	1,500	6	1,141	6	1,141	4,47	0,850	0,083	0,03894	0,003228
34	0	5,42	0,185	2,93	0,541	0,430	12,05	5,176	1	0,185	3	0,554	0,440	1,500	6	1,107	6	1,107	4,47	0,825	0,079	0,03338	0,002645
35	0	5	0,200	2,703	0,541	0,447	12,05	5,389	1	0,200	3	0,600	0,440	1,500	6	1,200	6	1,200	4,47	0,894	0,089	0,03775	0,003376
36	0	6,08	0,164	3,286	0,540	0,406	11,6	4,704	1	0,164	3	0,493	0,440	1,500	6	0,987	6	0,987	4,47	0,735	0,067	0,02894	0,00193
37	0	5,96	0,168	3,222	0,541	0,410	12,05	4,936	1	0,168	3	0,503	0,440	1,500	6	1,007	6	1,007	4,47	0,750	0,069	0,04068	0,002796
38	0	6,11	0,164	3,303	0,541	0,405	12,05	4,875	1	0,164	3	0,491	0,440	1,500	6	0,982	6	0,982	4,47	0,732	0,066	0,02835	0,001877
39	0	6,27	0,159	3,389	0,541	0,399	13,05	5,212	1	0,159	3	0,478	0,440	1,500	6	0,957	6	0,957	4,47	0,713	0,064	0,02122	0,001352
40	0	6,42	0,156	3,47	0,540	0,395	12,05	4,756	1	0,156	3	0,467	0,440	1,500	6	0,935	6	0,935	4,47	0,696	0,061	0,03495	0,002149
41	0	6	0,167	3,243	0,541	0,408	12,05	4,919	1	0,167	3	0,500	0,440	1,500	6	1,000	6	1,000	4,47	0,745	0,068	0,02855	0,001943
42	0	6,96	0,144	3,762	0,541	0,379	12,05	4,568	1	0,144	3	0,431	0,440	1,500	6	0,862	6	0,862	4,47	0,642	0,054	0,03125	0,001702
43	0	7,04	0,142	3,805	0,540	0,377	12,53	4,722	1	0,142	3	0,426	0,440	1,500	6	0,852	6	0,852	4,47	0,635	0,054	0,03915	0,002096
44	0	7,34	0,136	3,968	0,541	0,369	11,6	4,282	1	0,136	3	0,409	0,440	1,500	6	0,817	6	0,817	4,47	0,609	0,050	0,03527	0,001774



Coupe de la digue avant de commencer l'essai, TP=13 secondes (BTP infraestructuras., 2015).



Coupe de la digue après de l'essai, TP=13 secondes (BTP infraestructuras., 2015).

Résumé

La construction d'ouvrages de protection contre la houle nécessite des coûts très élevés. De ce fait la connaissance de caractéristiques du site d'implantation est primordiale, pour que ces ouvrages soient rentables en termes de coûts, durables et efficaces pour la protection contre la houle. L'objectif de ce projet de fin d'études est d'appliquer le machine learning pour l'étude de la performance hydraulique des ouvrages portuaires, cas Marina d'Alger. Pour faire, nous avons commencé par le traitement et l'analyse des données climatologiques de la zone via des méthodes de prédiction des événements extrêmes POT et GEV, ces résultats ont été utilisés pour l'étude hydrodynamique avec la modélisation numérique à l'aide de DHI Mike21. Se basant sur les résultats de cette dernière étape on a procédé aux calculs de dimensions des digues. Puis, en utilisant des formules semi-empiriques on a quantifié les différentes actions hydrauliques exercées sur l'ouvrage. Après avoir testé plusieurs méthodes pour développer un modèle de machine learning qui prédit les débits de franchissement, en utilisant une base de données extraite de celle développée dans le cadre du projet européen CLASH. On a opté pour le XGBOOST qui donne le meilleur résultat, l'application du modèle sur la Marina Bay montre que notre modèle est fiable.

Mots Clés : Marina Bay, POT, GEV, Mike21, Performance hydraulique, Modélisation numérique, Machine Learning, XGBOOST, Franchissement, Ouvrages portuaires.

Abstract

Construction of coastal protection structures requires very high costs. For this reason, the knowledge of the site characteristics is essential, so that these structures are profitable in terms of costs, durable and effective for the protection against waves. The objective of this project is to apply Machine Learning for the study of the hydraulic performance of port structures, case Marina Bay of Algiers. To do this, we started by analyzing climatological data using the extreme events theory POT and GEV. The result is used for the hydrodynamic study by numerical modeling, using the software Mike21. Then, based on the results of this last step, we proceeded to the calculation of the dimensions of the dykes and the determination of different hydraulic actions exerted on the structure, calculating them by semi-empirical formulas. After testing several methods to develop a machine learning model for the Marina Bay that predicts the Overtopping flows for simple structures on our database, extracted from the one developed in the framework of the European project CLASH. We opted for the XGBOOST models which gives the best result, the application of the model on Marina Bay shows that our model is reliable.

Keywords: Hydraulic performance, Marina Bay, XGBOOST, Machine Learning, Overtopping, POT, GEV, Numerical modeling, Port structures.