

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 :

**MODÉLISATION DES EFFETS DE LA HOULE SUR LA
STABILITÉ ET FRANCHISSEMENT DES OUVRAGES
MARITIMES.**

Présenté par

Tamazirt Meriem

Soutenu le 13/07/2023, devant le jury composé de :

Mme. FEZAA N.	Professeur ENSSMAL	Présidente
M. MEZOUAR K.	Professeur ENSSMAL	Promoteur
M. GHOGGALI S.	Maitre conférences B ENSEREDD	Co-Promoteur
M. DAHMANI AEA.	Maitre conférences ENSSMAL	Examineur
Mme FELLAH H.	Doctorante- ENSSMAL	Examinatrice BMC
M AINOUZ O.	Directeur technique	Partenaire économique

Année universitaire : 2022/2023

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 :

**MODÉLISATION DES EFFETS DE LA HOULE SUR LA
STABILITÉ ET FRANCHISSEMENT DES OUVRAGES
MARITIMES.**

Présenté par

Tamazirt Meriem

Soutenu le 13/07/2023, devant le jury composé de :

Mme. FEZAA N.	Professeur ENSSMAL	Présidente
M. MEZOUAR K.	Professeur ENSSMAL	Promoteur
M. GHOGGALI S.	Maitre conférences B ENSEREDD	Co-Promoteur
M. DAHMANI AEA.	Maitre conférences ENSSMAL	Examineur
Mme FELLAH H.	Doctorante- ENSSMAL	Examinatrice BMC
M AINOUZ O.	Directeur technique	Partenaire économique

Année universitaire : 2022/2023

Remerciements

Au terme de ce travail, je remercie Dieu le Tout-Puissant de m'avoir donné la santé, le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Je remercie particulièrement mon promoteur M. MEZOUAR K. Professeur à l'ENSSMAL, de m'avoir encadré pendant la période de la réalisation de ce travail. Sa disponibilité, malgré ses responsabilités administratives, ses orientations et ses conseils m'ont permis de mener à merveille ce travail. Veuillez trouver ici Monsieur l'expression de ma respectueuse considération et ma profonde admiration pour toutes vos qualités scientifiques et humaines.

Je remercie énormément mon Co-promoteur M. GHOGGALI S. Maître de conférences B à l'ENSER de Batna, qui a bien voulu m'accompagner et me guider pour la réalisation de la partie de Machine Learning et du canal à houles. Je tiens à vous exprimer ma profonde gratitude pour votre soutien et votre constante bienveillance malgré vos responsabilités professionnelles et la distance.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers Mme. SALEM CHERIF Y., enseignante à l'ENSSMAL, pour son accompagnement et ses précieux conseils lors de la réalisation de mes trois premiers chapitres. Malgré ses multiples engagements, elle a consacré du temps et de l'énergie pour m'orienter de manière exceptionnelle.

Je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance envers Mme. MAOUEL D. et Mme FELLAH H, enseignantes à l'ENSSMAL, pour leur accompagnement et leurs précieux conseils lors de la réalisation de la partie BMC. Malgré leurs nombreuses responsabilités, elles ont généreusement consacré du temps pour me guider.

C'est avec un grand plaisir que je remercie M. DAHMANI AEA., d'avoir pris le temps d'examiner la partie scientifique de mon travail.

C'est également avec un grand plaisir que je remercie Mme. FELLAH H., d'avoir pris le temps d'examiner la partie BMC de mon travail.

Je tiens à remercier Mme. FEZAA N., professeur à l'ENSMAL d'avoir accepté de présider le jury de ma soutenance.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce présent mémoire.

Dédicaces

*Je dédie mon travail à toi, **ma mère** exceptionnelle ; je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance envers toi. Ton amour inconditionnel, ton soutien constant et tes encouragements m'ont toujours inspiré et motivé dans mon parcours professionnel. Ta confiance m'a donné la force de persévérer et d'atteindre mes objectifs. C'est grâce à toi que j'ai appris à croire en mes capacités et à me surpasser.*

*Mon cher **papa**, je tiens à te rendre hommage et à exprimer ma profonde reconnaissance pour tout ce que tu as fait pour moi. Tu as toujours été un modèle de force, de persévérance et de détermination. Ta présence et ton impact positif dans ma vie sont des cadeaux inestimables.*

*A mes sœurs, **Jessna, Sally, Amina**, mon frère **Yacine** et mon cousin **Amine**, je souhaite exprimer toute ma reconnaissance et mon affection envers vous. Vous êtes bien plus que des membres de ma famille, vous êtes mes compagnons de vie, mes soutiens indéfectibles et mes meilleurs amis.*

*A toi ma merveilleuse **Mamie**, je souhaite te rendre hommage et dédier mon travail à toi. Je suis profondément reconnaissante pour tout ce que tu m'as apporté. Tu as toujours été là pour moi, me prodiguant ton amour inconditionnel, ta sagesse et ton expérience de vie m'ont enseigné des leçons inestimables. Merci, mamie, pour ton amour inconditionnel, tes encouragements sans faille et ta présence réconfortante.*

*A toi **Mr Laouedj Abdesselem**, tu as été une source de soutien inestimable et un véritable pilier de force. Tu as su m'inspirer et me motiver à atteindre mes objectifs professionnels. Tes conseils précieux m'ont permis de voir les opportunités là où je ne les voyais pas. Tu as toujours cru en mes capacités et m'as poussé à me dépasser.*

A toi mon oncle Karim, je tiens à t'exprimer toute ma reconnaissance et mon admiration envers toi et rendre hommage à ton influence positive dans ma vie. Depuis mon plus jeune âge, tu as été bien plus qu'un oncle pour moi. Tu as été un modèle de détermination, de persévérance et de succès professionnel. J'ai toujours admiré ta passion pour ton métier, ta créativité et ta vision inspirante.

A vous mes oncles Hocine et Ahcene, vos encouragements ont été une source d'inspiration précieuse dans ma vie, et je suis profondément reconnaissante de vous avoir comme oncles.

À tous les membres de ma famille

A vous mes amies de l'école, Abir et Meriem

À toute la famille ENSSMAL, mes enseignant(e)s

Merci d'être toujours là pour moi

Table des matières

Table des matières	III
Liste des tableaux	VII
Liste des figures	X
Liste des équations	XIII
INTRODUCTION.....	1
Chapitre I. Données climatologiques de la zone d'étude	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Situation Géographique de la zone d'étude	3
I.3. Données climatologiques de la zone d'étude.....	3
I.3.1. Généralités sur les houles.....	3
I.3.2. Climat de houle	4
I.3.3. Climat du vent.....	13
I.4. Conclusion	19
Chapitre II. Analyse des événements extrêmes	20
II.1. Introduction	20
II.2. Théorie des valeurs extrêmes	20
II.2.1. Méthode des Maximas par blocs	20
II.2.2. Méthode de dépassements de seuil	22
II.3. Application de la distribution GEV	22
II.3.1. Résultats de la distribution GEV	23
II.3.2. Comparaison des résultats de la distribution de Gumbel et de Weibull.....	27
II.4. Application de la distribution GPD	28
II.4.1. Comparaison entre la méthode POT et celle des Blocs Maximas (GEV).....	32
II.5. Conclusion	32
Chapitre III. Modélisation numérique	33
III.1. Introduction	33
III.2. Présentation du modèle	33
III.2.1. Mesh Generator	33
III.2.2. MIKE 21 SW.....	34
III.2.3. MIKE 21 HD.....	37

III.3. Méthodologie de travail.....	39
III.3.1. Génération de la Mesh.....	39
III.3.2. Mesh et Bathymétrie résultante.....	40
III.3.3. Bathymétrie de la Baie d’Alger.....	41
III.3.4. Bathymétrie de la Marina d’Alger :	42
III.3.5. Bathymétrie du Port d’Alger:	43
III.4. Directions pénalisantes.....	44
III.5. Simulations et résultats.....	45
III.5.1. Scénarios de simulation.....	45
III.5.2. Interprétation des résultats.....	49
III.6. Conclusion.....	56
Chapitre IV. Dimensionnement des digues	57
IV.1. Introduction.....	57
IV.2. Digues à talus	58
IV.2.1. Composantes des digues à talus	58
IV.2.2. Dimensionnement des digues à talus	59
IV.3. Digues Verticales	64
IV.3.1. Les Digues Verticales mixtes.....	64
IV.4. Conclusion	74
Chapitre V. Performance Hydraulique.....	75
V.1. Introduction	75
V.2. Run-down de la houle.....	77
V.2.1. Résultats des calculs du Run-Down de la houle.....	77
V.3. Run-up de la houle	78
V.3.1. Résultats des calculs du Run-up de la houle	80
V.4. Le Franchissement de la houle	81
V.4.1. Franchissement sur les Digues à Talus.....	82
V.4.2. Résultats de calculs des débits de franchissements de houles sur les digues à talus..	84
V.4.3. Franchissement des vagues sur les Digues Verticales.....	85
V.4.4. Résultats de calcul du débit de franchissement des vagues sur les digues verticale ..	86
V.5. Conclusion.....	87
Chapitre VI. Machine Learning.....	88

VI.1. Introduction	88
VI.2. Machine Learning	88
VI.2.1. Types d'apprentissage.....	88
VI.2.2. Objectifs de Machine Learning.....	89
VI.2.3. Overfitting.....	90
VI.2.4. Underfitting.....	90
VI.2.5. Modèles de Machine Learning.....	90
VI.3. Description de la base de données CLASH	94
VI.3.1. Composition de la base de données	94
VI.4. Prétraitement des données.....	97
VI.4.1. Nettoyage des données.....	98
VI.4.2. Application de la Similitude de Froude	98
VI.5. Analyse et Validation de l'algorithme ANN.....	100
VI.6. Analyse et Validation de l'algorithme XGboost.....	101
VI.7. Modèle développé pour les digues à talus	103
VI.8. Conclusion	104
Chapitre VII. Canal à houle	105
VII.1. Introduction.....	105
VII.2. Générateur d'ondes 2D	105
VII.2.1. Description du canal à houles	105
VII.3. Synthèse du canal à houle.....	109
VII.3.1. Limite de déferlement.....	110
VII.3.2. Hauteur maximale des vagues dans le canal.....	110
VII.3.3. Accélération maximale de l'actionneur.....	110
VII.3.4. Course maximale de l'actionneur.....	110
VII.3.5. Détermination du nombre d'ondes	111
VII.4. Conclusion	113
CONCLUSIONS	114
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	117
Annexe A Buisness Model Canvas	i
A.1 Proposition de valeur	i
A.2 Activités clés.....	ii

A.3	Partenaires clés	iv
A.4	Segment Clients	iv
A.5	Relations Clients	v
A.6	Canaux de distribution	vi
A.7	Ressources clés	vi
A.8	Sources de revenus	vii
A.9	Structure des coûts	vii
A.10	Résumé du Business Model Canvas	vii
A.11	Conclusion	ix
Annexe B	Résultats de simulations numériques	x

Liste des tableaux

Tableau I-1: Valeurs marquantes des hauteurs de la houle	6
Tableau I-2: Périodes marquantes de la houle	7
Tableau I-3: Hauteurs de houles selon l'échelle de Douglas	7
Tableau I-4: Corrélogramme des directions de houles avec leurs fréquences annuelles et saisonnières	11
Tableau I-5: Vitesses marquantes du vent.....	13
Tableau I-6: Corrélogramme des directions de vents avec leurs fréquences annuelles et saisonnières	14
Tableau I-7: Vitesses du vent selon l'échelle de Beaufort	15
Tableau II-1: synthèse des résultats de la méthode GEV obtenus par la distribution de Gumbel	24
Tableau II-2: Résumé des résultats obtenus par la méthode GEV par la distribution Weibull.....	26
Tableau II-3 : Résultat de l'estimation des événements extrêmes par la méthode POT.....	30
Tableau III-1: Symboles et leur signification.....	35
Tableau III-2: Symboles et leur signification.....	36
Tableau III-3: Symboles et leur signification.....	36
Tableau III-4: Symboles et leur signification.....	38
Tableau III-5: Cordonnées (x; y) des deux points extraits	44
Tableau III-6: Inputs des simulations pour l'ensemble des périodes de retours	46
Tableau III-7 : Résumé des résultats de simulations de la houle pour le Port d'Alger	47
Tableau III-8 : Résumé des résultats de simulations de la houle pour la Marina d'Alger	48
Tableau IV-1 : Résumé des équations utilisées pour le calcul des paramètres géométriques de la carapace	60
Tableau IV-2: Formule de Van der Meer pour les eaux profondes	61
Tableau IV-3 : Formule de Van der Meer pour les eaux peu profondes.....	62
Tableau IV-4 : Résumé des Formules du dimensionnement de la sous-couche ; le filtre de transition et le noyau	63
Tableau IV-5 : Formules de dimensionnement de la butée de pied	63
Tableau IV-6: Formules d'HIROI de dimensionnement de la digue verticale (BOUGIS J .2000)	65
Tableau IV-7 : Formules de dimensionnement de la digue verticale par la méthode de Sainflou	66
Tableau IV-8 : Formules de dimensionnement de la digue verticale par la méthode de Miche. ..	66
Tableau IV-9 : Formules de résultantes de Forces et de Moments pour une houle non déferlante	67
Tableau IV-10: Formules de dimensionnement de la digue verticale par la formule de Goda.....	68
Tableau IV-11 : Dimensionnement proposé pour la jetée principale de la Marina d'Alger	71

Tableau IV-12 : Dimensionnement proposé pour la jetée principale Khireddine du Port d'Alger	72
Tableau IV-13: Synthèse des calculs des pressions, forces et moments sur la digue verticale de la Jetée Mustapha du Port d'Alger	73
Tableau V-1 : Scénarios retenus pour le calcul de la performance hydraulique des digues principales de la Marina et du Port.....	76
Tableau V-2: Signification des paramètres utilisés dans les calculs des scénarios retenus.	76
Tableau V-3 : Résumé des Equations de calcul du Run-down de la houle sur l'ouvrage.....	77
Tableau V-4: Résultats des calculs du Run-down de la houle au quel est exposé la section courante de la digue principale de la Marina	78
Tableau V-5: Résultats des calculs du Run-down de la houle au quel est exposé la section courante de la jetée principale Khireddine du Port d'Alger.....	78
Tableau V-6: Résumé des formules utilisées dans l'estimation du Run-up de la houle sur l'ouvrage	79
Tableau V-7 : Valeurs des coefficients A, B, C selon (TAW, 2002).....	80
Tableau V-8 : Résultats de calcul du Run-up de la houle au quel est exposé la section courante de la digue principale de la Marina	81
Tableau V-9 : Résultats de calcul du Run-up de la houle au quel est exposé la section courante de la jetée principale Khireddine du Port d'Alger	81
Tableau V-10: Débits et volumes franchissants critiques (Allsop et al. 2005)	82
Tableau V-11: Formules utilisées pour le calcul du franchissement des vagues sur les Dignes à Talus	83
Tableau V-12: Valeurs A, B, C, D des équations du TAW (2002a)	83
Tableau V-13: Résultats de calculs des débits de franchissements sur la section courante de la digue principale de la Marina.....	84
Tableau V-14: Résultats de calculs des débits de franchissements sur la section courante de la jetée principale Khireddine du Port	85
Tableau V-15: Formules utilisées pour le calcul du franchissement des vagues sur les Dignes Verticales (ETEMAD-SHAHIDI A et al. 2016)	85
Tableau V-16: résultats de calcul des débits moyens franchissant auxquels est exposée la digue verticale Mustapha	87
Tableau VI-1 Paramètres généraux inclus dans la base de données.	95
Tableau VI-2 : Paramètres hydrauliques inclus dans la base de données.	95
Tableau VI-3 : Paramètres structurels inclus dans la base de données	96
Tableau VI-4 : Caractéristiques des paramètres de la base de données CLASH.....	97
Tableau VI-5 : Résumé de statistiques obtenues après l'application de l'échelle de Froude	99
Tableau VI-6 : Résumé de statistiques obtenues par l'article après l'application de l'échelle de Froude.....	99
Tableau VI-7 : Features utilisées pour le développement du modèle NN.....	100
Tableau VI-8 : Features utilisées pour le développement du modèle XGBoost	101

Tableau VII-1: Résumé des dimensions du système.....	109
Tableau VII-2: Méthode itérative de résolution de l'équation de dispersion.....	111

Liste des figures

Figure I-1: Situation géographique de la Baie d'Alger et des ports concernés par l'étude.....	4
Figure I-2: Caractéristiques de la houle (Culture maritime)	4
Figure I-3: Représentation du Point d'extraction (37°Nord; 3°Est).....	5
Figure I-4: Représentation du spectre des hauteurs de houle enregistrées.....	5
Figure I-5: Représentation du spectre des périodes de houle.....	6
Figure I-6: Roses des houles annuelles et saisonnières enregistrées durant la période 1992 – 2022.	8
Figure I-7: Roses des houles mensuelles (Janvier-Juin) enregistrées durant la période 1992 – 2022.	9
Figure I-8: Roses des houles mensuelles (Juillet- Décembre) enregistrées durant la période 1992 – 2022.....	10
Figure I-9: Diagramme avec distributions marginales des hauteurs et périodes de houles	12
Figure I-10: Représentation du spectre de la vitesse du vent.....	13
Figure I-11: Roses des vents annuels et saisonniers enregistrées durant la période 1992 – 2022.	16
Figure I-12: Roses des houles mensuelles (Janvier- Juin) enregistrées durant la période 1992 – 2022.....	17
Figure I-13: Roses des houles mensuelles (Juillet- Décembre) enregistrées durant la période 1992 – 2022.....	18
Figure II-1: Représentation de la méthode des Blocs Maximas.....	21
Figure II-2: Représentation de la méthode POT	22
Figure II-3: Représentation de la Méthode des Blocs Maximas sur les hauteurs de houles entre 1992–2022.....	23
Figure II-4 : Estimation des événements extrêmes par la distribution de Gumbel pour l'omnidirectionnel.....	23
Figure II-5: Estimation des événements extrêmes via la distribution de Weibull pour l'omnidirectionnel.....	24
Figure II-6: Estimation des événements extrêmes par la distribution de Gumbel pour chaque direction.....	25
Figure II-7 : Estimation des événements extrêmes par la distribution de Weibull pour W, WNW, NW et NNW.....	26
Figure II-8 : Estimation des événements extrêmes par la distribution de Weibull pour N, NNE, NE et ENE.	27
Figure II-9 : Queues des trois distributions de la loi GEV.....	27
Figure II-10 : Représentation graphique de la distribution des hauteurs de houles Hs enregistrées	28

Figure II-11: Moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelles de l'enregistrement	28
Figure II-12: Choix du seuil par la stabilité des paramètres	29
Figure II-13: Représentation des valeurs dépassant le seuil par la méthode POT	29
Figure II-14: Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour omnidirectionnel.	30
Figure II-15 : Estimation des événements extrêmes par la méthode POT pour chaque direction	31
Figure II-16 : Comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes POT et GEV pour l'omnidirectionnel	32
Figure III-1: Maillage de la Mesh à l'échelle de la Baie d'Alger	40
Figure III-2: Maillage de la Mesh à l'échelle du Port et de de la Marina d'Alger.....	40
Figure III-3: Bathymétrie de la baie d'Alger.....	41
Figure III-4: Bathymétrie de la Marina d'Alger.....	42
Figure III-5 : Bathymétrie du Port d'Alger	43
Figure III-6: Point extrait à la Marina d'Alger.....	44
Figure III-7: Point extrait au Port d'Alger	45
Figure III-8: Champs des houles et direction de courants de direction NNE (période de retour 2 ans)	52
Figure III-9 : Champs des houles et direction de courants de direction NNE (période de retour 10 ans)	53
Figure III-10 : Champs des houles et direction de courants de direction NNE (période de retour 30 ans)	54
Figure III-11 : Champs des houles et direction de courants de direction NNE (période de retour 100 ans)	55
Figure IV-1: Coupes-types des différents types de digues (CETMEF).	57
Figure IV-2: Coupe type des éléments constitutifs d'une digue à talus.	58
Figure IV-3 : Paramètres de perméabilité nominale P de la formule de Van der Meer (1988)	61
Figure IV-4 : Types de déferlement en fonction de ξ_m (Battjes, 1974).....	62
Figure IV-5: Principales dimensions d'une digue verticale	64
Figure IV-6: Coupes-types des digues verticales mixtes. (CETMEF).....	64
Figure IV-7: Surpressions dues à la houle non déferlante sur une digue verticale	66
Figure IV-8 : Diagramme des Pressions selon GODA.....	68
Figure IV-9 : Surpressions dues à une houle déferlante sur une digue verticale	69
Figure IV-10: Abaque des Coefficients de stabilité $Ns3$ en fonction de la Profondeur relative h/d	70
Figure V-1: Interactions hydrauliques entre la houle et les ouvrages (CETMEF, 2009).....	75
Figure V-2 : Franchissement de la crête de l'ouvrage par les houles	81
Figure VI-1 Exemples de Sous-apprentissage, un bon apprentissage et un sur apprentissage (Burkov A.)	90
Figure VI-2 Architecture générale d'un neurone (Jumelle Maxime. 2022).....	91
Figure VI-3 Structure générale d'un arbre de décision	92

Figure VI-4 Structure des Forets d'arbres de décision (Maaz et al .2022)	92
Figure VI-5 Fonctionnement des Gradient Boosting (UC Buisness Analytics R Programming Guide).....	93
Figure VI-6 Structure générale de l'XGBoost (Wang et al. 2019)	93
Figure VI-7 : Paramètres de la base de données sur le déferlement des vagues (Van Gent et al. (2007)).....	94
Figure VI-8 : Aperçu de la base de données nettoyée.....	98
Figure VI-9 : Prédiction de la méthode de l'ANN répliquée.	100
Figure VI-10 : Prédiction de la méthode de l'ANN publiée (2007).....	101
Figure VI-11 : Prédiction de la méthode XGBoost répliquée.	102
Figure VI-12 : Prédiction de la méthode XGBoost publiée (2020).....	102
Figure VI-13 : Aperçu de la base de données des digues à talus.	103
Figure VI-14 : Prédiction du modèle développé pour la base des données sur les digues à talus.	104
Figure VII-1: Schéma de représentation du canal à houles bidimensionnel.	106
Figure VII-3: Schéma du canal à houle.....	109
Figure VII-4: Graphique de k en fonction de σ^2	111
Figure VII-5: Graphique des différentes limites de course de l'actionneur.....	112
Figure VII-6 : Graphique de la limite maximale des courses d'actionneur résultantes.....	112

Liste des équations

Équation II-1	21
Équation II-2	21
Équation II-3	22
Équation III-1	34
Équation III-2	34
Équation III-3	34
Équation III-4	34
Équation III-5	34
Équation III-6	34
Équation III-7	35
Équation III-8	35
Équation III-9	35
Équation III-10	36
Équation III-11	36
Équation III-12	36
Équation III-13	36
Équation III-14	37
Équation III-15	37
Équation III-16	37
Équation III-17	37
Équation III-18	37
Équation III-19	38
Équation III-20	38
Équation III-21	38
Équation V-1	76
Équation V-2	77
Équation V-3	80
Équation VI-1	90
Équation VI-2	90
Équation VI-3	98
Équation VI-4	98
Équation VI-5	98
Équation VI-6	98
Équation VII-1	106
Équation VII-2	106

Équation VII-3.....	106
Équation VII-4.....	106
Équation VII-5.....	107
Équation VII-6.....	107
Équation VII-7.....	107
Équation VII-8.....	107
Équation VII-9.....	107
Équation VII-10.....	107
Équation VII-11.....	107
Équation VII-12.....	108
Équation VII-13.....	108
Équation VII-14.....	108
Équation VII-15.....	108
Équation VII-16.....	108
Équation VII-17.....	108
Équation VII-18.....	108
Équation VII-19.....	108
Équation VII-20.....	109
Équation VII-21.....	110
Équation VII-22.....	110
Équation VII-23.....	110
Équation VII-24.....	110
Équation VII-25.....	111

INTRODUCTION

Le domaine du génie côtier est étroitement lié aux facteurs hydrodynamiques et plus particulièrement aux houles, qui jouent un rôle essentiel dans la formation des plages et la conception des infrastructures côtières. Ces structures doivent être conçues de manière à assurer une protection contre les inondations marines, l'érosion et les forçages des houles. Afin d'optimiser la conception de ces ouvrages pour la préservation des zones côtières, il est indispensable de comprendre les phénomènes marins complexes. Cela implique l'étude approfondie des aspects climatiques des houles, la prévision des événements extrêmes, le dimensionnement optimal des structures et l'étude des relations entre les vagues et les structures. Ces relations comprennent les réponses hydrauliques et les réponses structurelles. Elles sont décrites par des formules semi-empiriques basées sur des considérations physiques et des constantes ajustées aux données expérimentales.

La conception des structures portuaires vise à prévenir les franchissements et à dissiper l'énergie des houles pour assurer la sécurité des navires et des infrastructures portuaires. Les risques liés à l'élévation du niveau de la mer et aux changements climatiques doivent également être pris en compte pour la sélection des scénarios de conception. Par conséquent, on garantit ainsi la durabilité des infrastructures portuaires face aux défis du futur.

Ce mémoire se concentre sur l'étude approfondie des houles et de leur impact sur les structures portuaires. Il comprend une analyse des données climatologiques et des événements extrêmes pour identifier les conditions de houles les plus pénalisantes. L'utilisation du Machine Learning permet de prédire le franchissement des vagues, tandis que la modélisation physique reproduit fidèlement les conditions réelles. Cela rentre dans l'objectif global d'optimiser la conception des structures portuaires.

Pour aborder cette problématique de manière optimale. On a d'abord commencé par la collecte de données, notamment les données océanographiques, climatologiques et bathymétriques de la zone d'étude. Parallèlement, une recherche a été effectuée dans des ouvrages de référence en génie côtier tels que le "Shore Protection Manual" (CERC, 1984), le guide d'enrochement (CETMEF, 2009) et le "Coastal Engineering Manual" (U.S. Army Corps of Engineers, 2012) pour obtenir des informations complémentaires. Pour l'estimation du franchissement des vagues, on s'est appuyé sur les travaux réalisés dans le monde sur ce sujet par l'utilisation de différents modèles de

Machine Learning; Verhaeghe, H., Meer, J. W., et al. (2003) ; Gosse, J. S., Jentsje Wouter, v. d., et al. (2004); Gent, M. R., Boogaard, H. F., et al. (2007); Bieman, J. P., al, J. M. (2020); a, J. P., Gent, M. R. (2021 On s'est également appuyé sur le travail d'AMARA, L. et CHALAL, Y. (2022), qui ont été les premiers étudiants à introduire ce sujet à l'ENSSMAL.

Le premier chapitre comprend l'analyse du climat des houles et des vents au niveau de la baie d'Alger. L'objectif de cette partie est de visualiser les caractéristiques de houles et des vents notamment leurs directions de provenance et leurs fréquences d'apparition.

Le deuxième chapitre aborde l'analyse des états de mers exceptionnels en s'appuyant sur la théorie des valeurs extrêmes. Cette analyse permet d'identifier les directions de houles défavorables et d'extraire les hauteurs pénalisantes associées à différentes périodes de retour, auxquelles les structures côtières doivent faire face.

Le troisième chapitre met en évidence l'importance de la modélisation numérique dans le domaine marin pour la prévision des phénomènes liés aux houles et aux courants au niveau de la côte. Cela nous permet d'évaluer leur impact sur les structures portuaires implantées dans notre zone d'étude, à savoir la Marina et le Port d'Alger. Dans cette étude, le software Mike 21 a été utilisé.

La conception des structures de défense côtière est abordée dans le quatrième chapitre où on a exploité les méthodes empiriques du dimensionnement des infrastructures portuaires. L'accent est mis sur les digues à talus et les digues verticales dans l'objectif d'avoir une conception optimale qui assure la durabilité et l'efficacité face aux houles extrêmes.

Le cinquième chapitre étudie les interactions hydrauliques entre les houles et les structures marines. Cette étude comprend les réponses hydrauliques, les charges et les réponses structurelles pouvant affecter la stabilité des ouvrages. Dans ce chapitre, on s'intéresse aux interactions suivantes : le Run-up, le Run-down et le franchissement de la houle en s'appuyant sur des formules de calcul empiriques.

Le sixième chapitre explore l'utilisation du Machine Learning (ML) pour la prédiction des débits de franchissement des houles sur les structures portuaires. Dans ce chapitre, les principales études liées à la prédiction du franchissement en utilisant la technique du Machine Learning sont décrites, et elles sont reproduites à l'aide de codes Python. De plus, on présente un nouveau modèle qu'on a développé dont les résultats sont très satisfaisants.

Le dernier chapitre se concentre sur la modélisation physique en génie côtier, en mettant l'accent sur la modélisation 2D par le canal à houle. L'objectif est d'explorer les principes de conception et de fonctionnement du générateur de houles du premier ordre permettant de reproduire fidèlement les conditions réelles de houles. Cette contribution représente un travail inédit dans notre étude.

Chapitre I. Données climatologiques de la zone d'étude

I.1. Introduction

Le domaine du génie côtier est étroitement lié aux facteurs hydrodynamiques et plus particulièrement les houles. Elles influencent la formation des plages et elles ont un impact significatif sur la planification et la conception des ports, des voies navigables, des structures côtières et d'autres ouvrages côtiers. Dans ce chapitre, on va analyser le climat des houles et des vents au large de la baie d'Alger en visualisant leurs caractéristiques notamment leurs directions de provenance et leurs fréquences d'apparition.

I.2. Situation Géographique de la zone d'étude

La baie d'Alger se situe au cœur du littoral algérois. Elle présente une indentation creusée dans le rivage entre le cap Matifou à l'Est ($3^{\circ}13'$ Est et $36^{\circ}49'$ Nord) et le cap Caxine à l'Ouest ($3^{\circ}00'$ Est et $36^{\circ}49'$ Nord). Elle a la forme d'un demi-cercle presque parfait. Elle mesure 15 Km d'Est en Ouest et 7 Km du Nord au Sud. La surface qui se trouve entre la ligne d'environ 15,27 km de longueur joignant les deux caps et de contour périphérique de 42,46 km est de 98,8 km². Sa configuration géographique est presque insulaire. Elle est composée d'une terre plate centrale et d'une bande côtière entourée d'une chaîne de montagnes et de collines. La Figure I-1 illustre la Baie d'Alger et présente les deux ports sélectionnés.

I.3. Données climatologiques de la zone d'étude

I.3.1. Généralités sur les houles

La houle est un mouvement ondulatoire de la surface de la mer généré par le vent dans une zone éloignée appelée zone de Fetch. Cette houle se propage alors en formant des ondulations parallèles presque identiques qui se déplacent uniformément vers le rivage. Pour caractériser la houle, on utilise des paramètres tels que la longueur d'onde L , l'amplitude H , la célérité C et la période T . D'autres paramètres tels que la cambrure H/L et la profondeur relative d sont également nécessaires pour la classification de la houle (Bonnefille, 2010) comme illustré dans la Figure I-2.



Figure I-1: Situation géographique de la Baie d'Alger et des ports concernés par l'étude

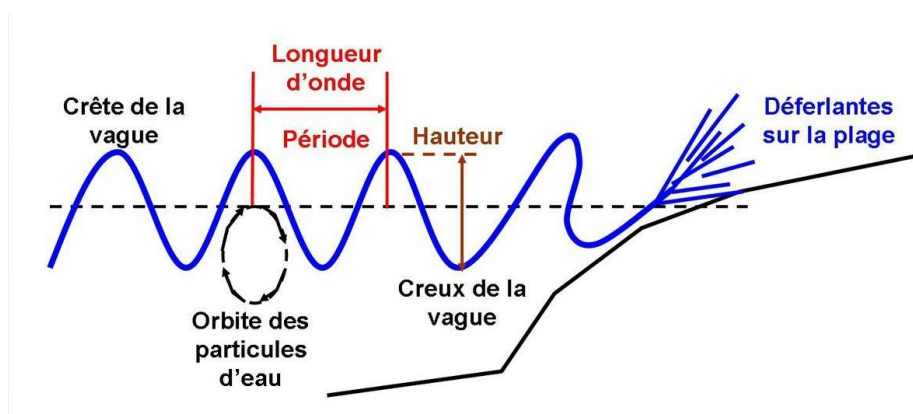


Figure I-2: Caractéristiques de la houle (Culture maritime)

I.3.2. Climat de houle

L'ensemble des analyses de houles ont été effectuées en utilisant de la base de données Wave Climate extraite d'Infoplaza. Pour l'analyse du climat de houle de notre zone d'étude, on a choisi de travailler avec les variables les plus représentatives de la houle à savoir

- H_s : La Hauteur significative de la houle en mètre (m).
- T_p : La période pic de la houle en seconde (s).
- H_{sd} : La direction de la houle en degré ($^{\circ}$).
- U_{10} : La vitesse du vent en (m/s).
- U_{10d} : La direction du vent en degré ($^{\circ}$).

Cette base de données à traiter est composée de 87664 enregistrements des variables précédemment citées pour la période qui s'étend du 1er janvier 1992 au 31 Décembre 2021, avec un pas d'enregistrement de 3 heures. On a opté pour l'utilisation du modèle Global pour extraire les données, en utilisant une grille relativement étroite avec un espacement de $0,5^\circ$ (environ 50 km) entre chaque point de mesure. Cela nous permet de sélectionner le point d'extraction le plus approprié pour notre modèle de modélisation situé aux coordonnées 37° Nord de longitude et 3° Est de latitude comme illustré dans la Figure I-3.

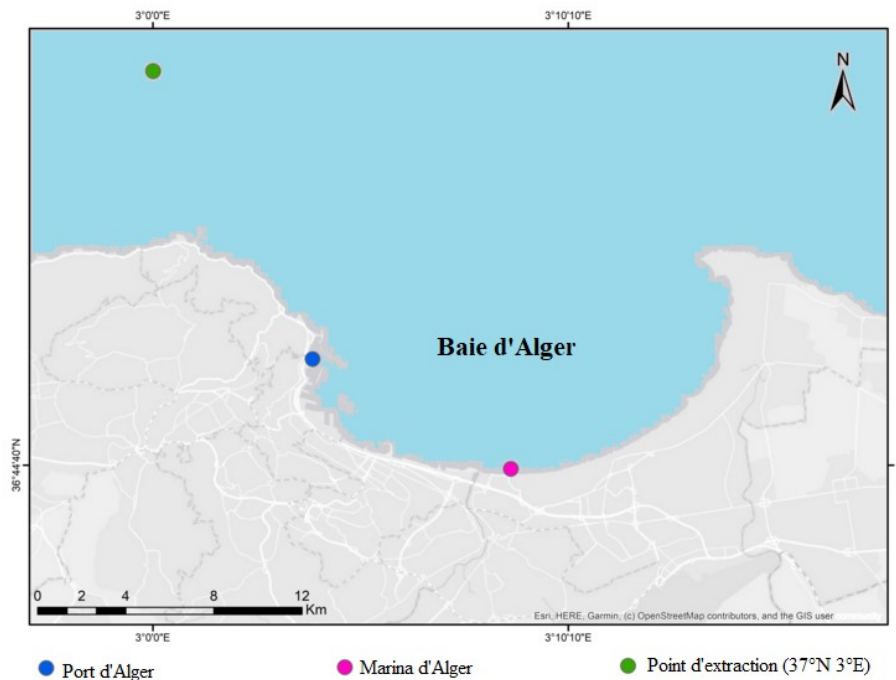


Figure I-3: Représentation du Point d'extraction (37° Nord; 3° Est)

I.3.2.1. Hauteur significative

Sur l'ensemble de la période qui s'étend sur 30 ans, la hauteur significative de la houle (H_s) varie entre 0.03 m et 7.48 m avec une moyenne de 1.16 m.

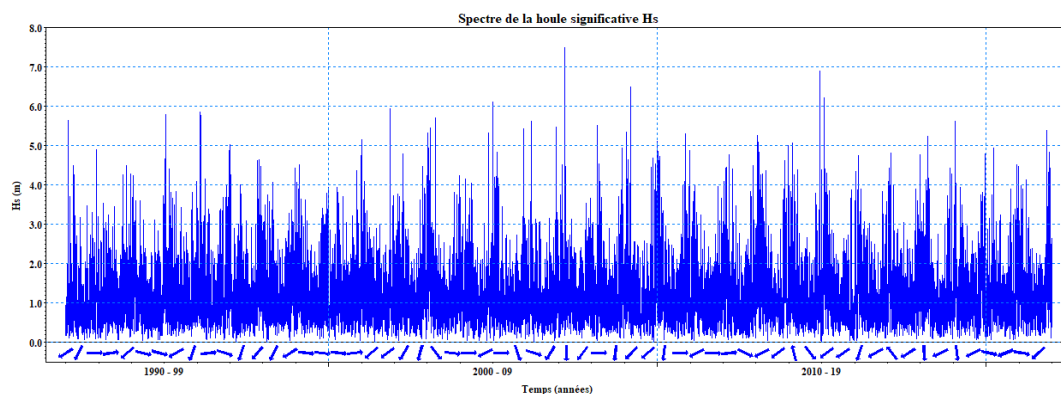


Figure I-4: Représentation du spectre des hauteurs de houle enregistrées

D'après le spectre de la Figure I-4, on constate que la plupart des houles qui se sont formés au large de la baie d'Alger mesurent moins de 3 mètres de hauteur. Cependant, il est observé qu'il y a quelques épisodes d'événements extrêmes qui se produisent environ tous les 4 à 8 ans et qui peuvent dépasser 5 mètres de hauteur. En analysant ces données, on a pu identifier certaines hauteurs remarquables de la houle, qui sont présentées dans le Tableau I-1.

Tableau I-1: Valeurs marquantes des hauteurs de la houle

Hauteurs marquantes de la houle	Valeur (m)
H_m (Hauteur moyenne)	1.16
H_s (moyenne du 1/3 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	1.99
$H_{10\%}$ (moyenne du 1/10 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	2.84
$H_{2\%}$ (moyenne du 2% des valeurs supérieures de l'enregistrement)	3.88
H_{max} (valeur maximale de l'enregistrement)	7.48

I.3.2.2. La période pic T_p

L'analyse de la Figure I-5 montre que les périodes de la houle enregistrées sont comprises dans une gamme assez large allant de 2.74 s à 15.99 s. les périodes sont globalement comprises entre 3s et 10s. Le traitement de ces données nous a aussi permis de définir quelques périodes marquantes de la houle représentées dans le Tableau I-2.

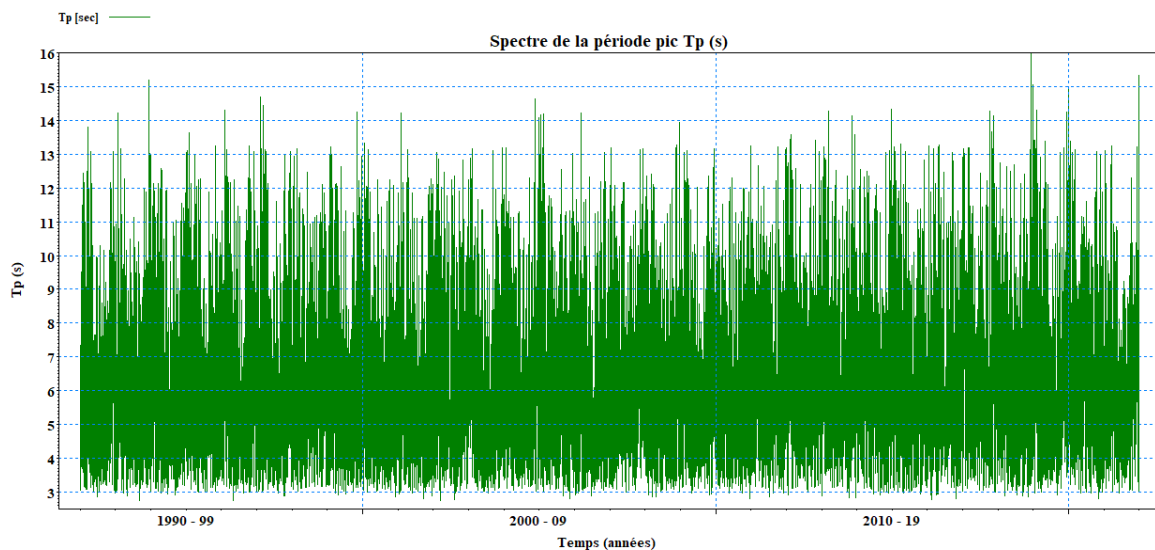


Figure I-5: Représentation du spectre des périodes de houle

Tableau I-2: Périodes marquantes de la houle

Périodes marquantes de houles	Valeur (s)
T_m (période moyenne)	6.46
T_s (moyenne du 1/3 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	8.48
$T_{10\%}$ (moyenne du 1/10 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	10.15
T_{Hmax} (période correspondant la hauteur maximale de l'enregistrement)	10.47
T_{max} (valeur maximale de l'enregistrement)	15.99

Afin de mieux comprendre l'influence de toutes les variables sur le climat de la houle au large de la zone d'étude, trois figures ont été fournies (Figure I-6, Figure I-7 et Figure I-8). Ces figures combinent les informations sur les directions dominantes de la houle et la hauteur de la houle, ce qui permet une meilleure visualisation et compréhension de la houle au large. Les intervalles des hauteurs de houles ont été sélectionnés en se référant à l'échelle de Douglas. Le Tableau I-3 résume ces intervalles.

Tableau I-3: Hauteurs de houles selon l'échelle de Douglas

Echelle de Douglas	Notification officielle	Hauteur des houles
0	Plate	0
1	Calme	0 à 0.1 m
2	Belle	0.1 à 0.5 m
3	Peu agitée	0.5 à 1.25 m
4	Agitée	1.25 à 2.5 m
5	Forte	2.5 à 4m
6	Très forte	4 à 6 m
7	Grosse	6 à 9 m
8	Très grosse	9 à 14 m
9	Enorme	14 m et plus

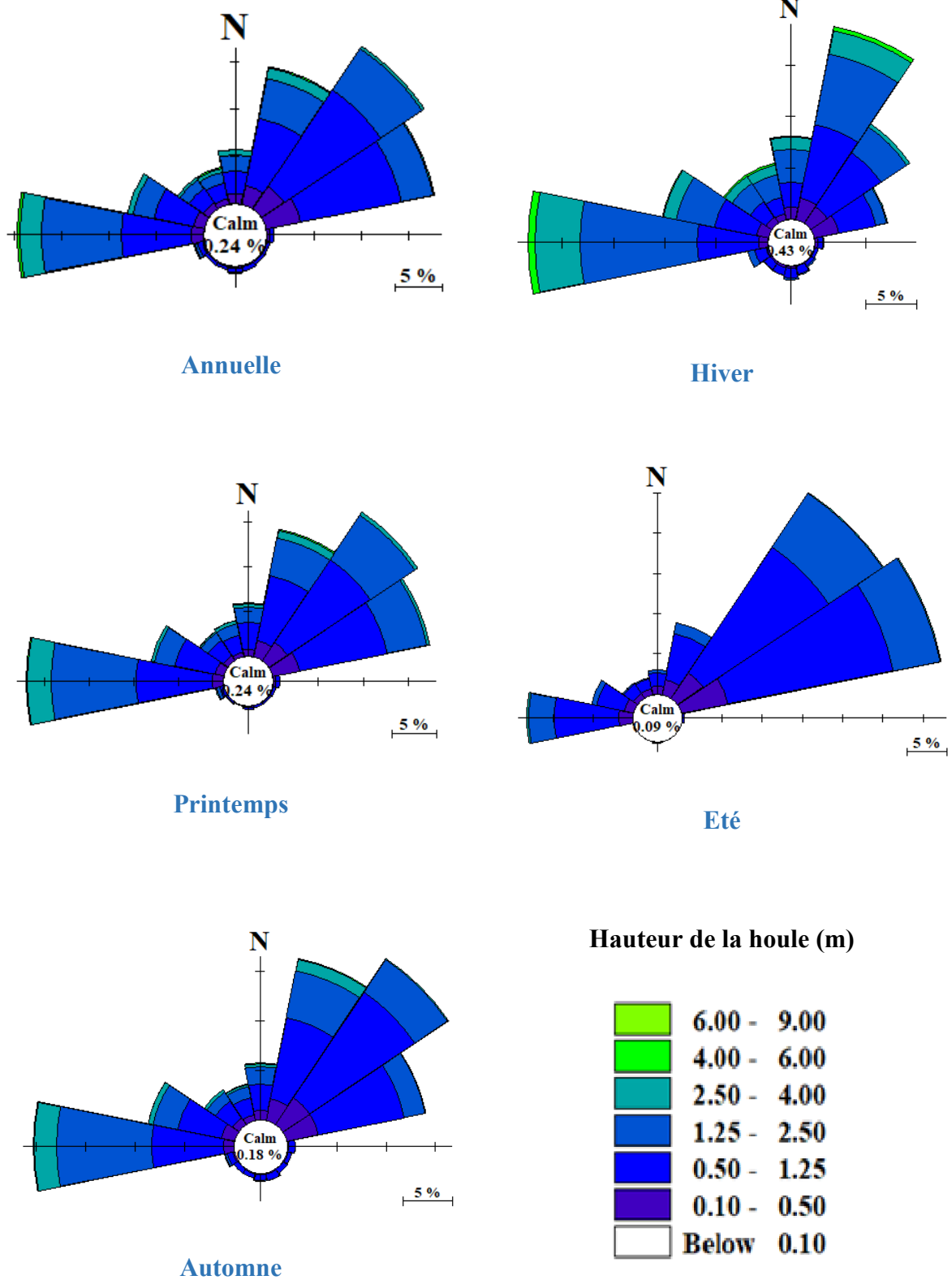


Figure I-6: Roses des houles annuelles et saisonnières enregistrées durant la période 1992 – 2022.

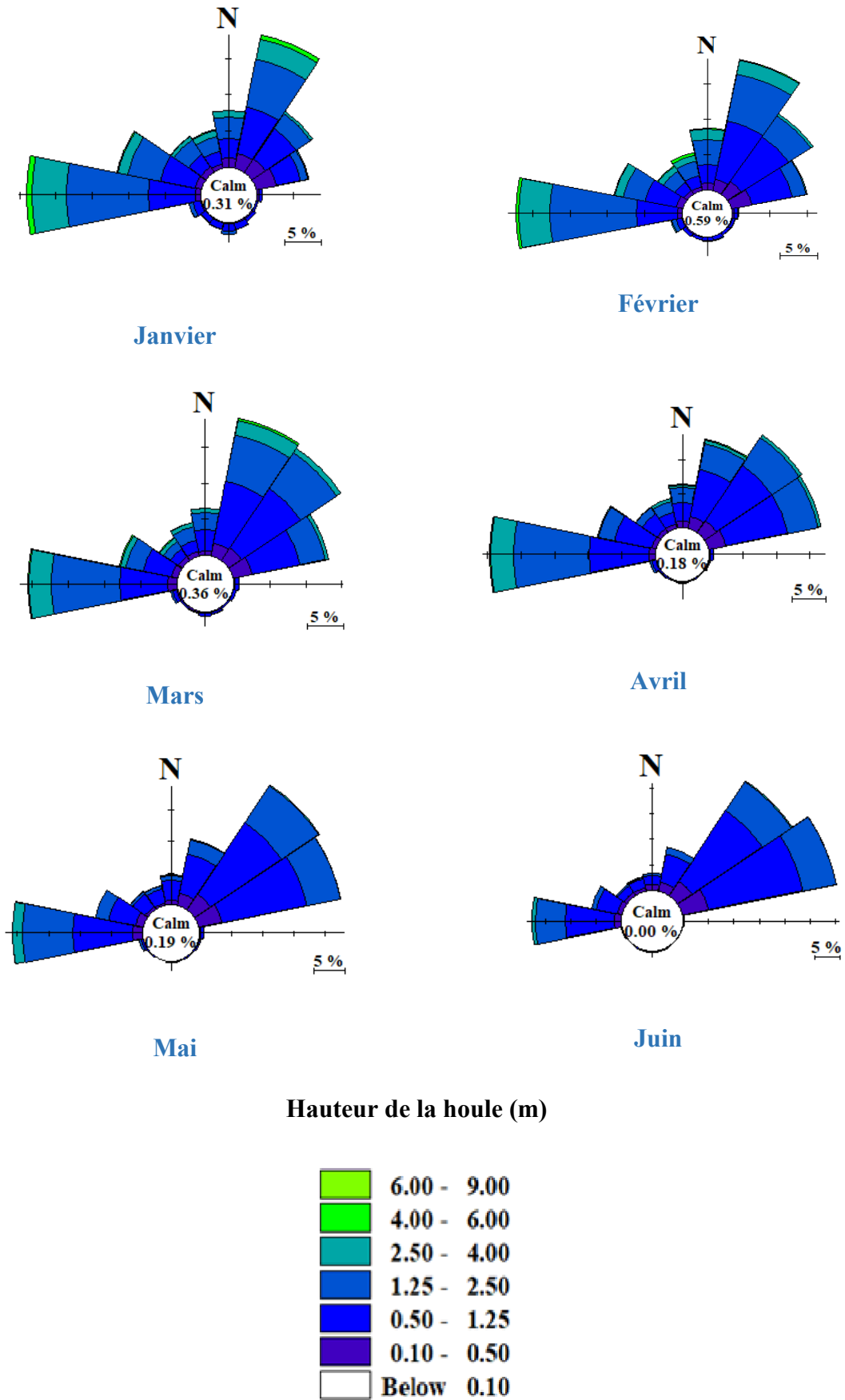


Figure I-7: Roses des houles mensuelles (Janvier-Juin) enregistrées durant la période 1992 – 2022.

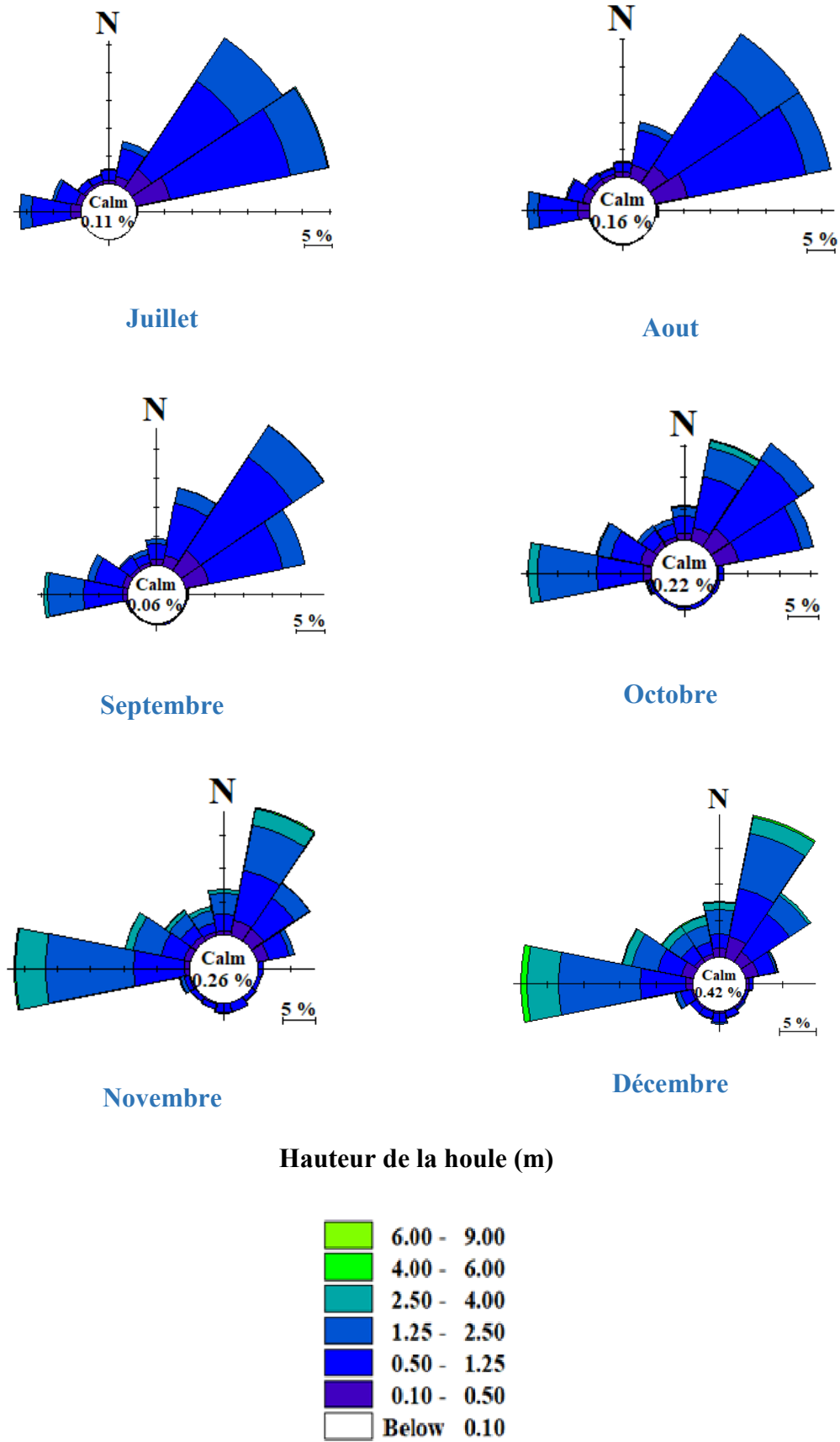


Figure I-8: Roses des houles mensuelles (Juillet- Décembre) enregistrées durant la période 1992 – 2022.

Pour faciliter la visualisation des pourcentages de provenance des houles (Tableau I-4) pour chacune de ces directions (N, NE, E, SE, S, SO, O, NO), un corrélogramme a été créé combinant les directions de provenance des houles avec leurs fréquences d'apparition. Cela permet de mieux comprendre les informations sur les pourcentages de provenance des houles en fonction de leur direction.

Tableau I-4: Corrélogramme des directions de houles avec leurs fréquences annuelles et saisonnières

Directions	Annuel	Automne	Hiver	Printemps	Été
N	14.26%	14.73%	20.90%	14.52%	7.04%
NE	44.58%	42.22%	26.87%	43.32%	65.56%
E	3.47%	2.96%	2.56%	3.59%	4.76%
SE	0.78%	1.28%	1.23%	0.49%	0.13%
S	1.20%	1.58%	2.51%	0.53%	0.21%
SO	0.96%	1.12%	2.02%	0.52%	0.19%
O	25.90%	26.93%	31.40%	28.36%	17.03%
NO	8.85%	9.18%	12.51%	8.68%	5.08%
Total	100%	100%	100%	100%	100%

I.3.2.3. Interprétation des roses de houles mensuelles et annuelles

Après l'analyse de la rose des houles annuelle (Figure I-6), il a été observé que deux directions étaient prédominantes : le Nord-Est représentant une fréquence d'environ 45 % des houles enregistrées et l'Ouest avec un pourcentage d'apparition de 25.90% ; à l'exception de certaines houles extrêmes enregistrées dans d'autres directions. Le point culminant de la hauteur des vagues enregistré a été de 7,48 mètres.

Automne : D'après la rose des houles automnales, on constate la dominance de deux directions avec des intensités différentes, le Nord Est avec une fréquence de 42.22% et l'Ouest avec un pourcentage d'apparition de 26.93%.

Hiver : Après l'analyse de la rose des houles hivernales, on peut constater que deux secteurs sont prédominants, mais avec des intensités différentes. Le secteur le plus dominant est l'Ouest, avec une fréquence de 31.40%. Ensuite, c'est le Nord-Nord-Est qui domine.

Printemps : Après l'analyse de la rose des houles printanières, on peut observer deux secteurs prédominants : l'Ouest représentant près de 43.32% des houles enregistrées en printemps et le Nord-Est, avec une fréquence de 28.36% .Il est intéressant de noter que la hauteur des vagues maximale qui est de 7.48m a été enregistrée durant cette saison.

Eté : Après l'analyse de la rose des houles estivale, on peut observer deux directions dominantes avec des intensités différentes : la direction la plus dominante est le Nord-Est avec un pourcentage d'apparition de 65.56% .Ensuite, c'est le Nord Nord-Est qui domine.

I.3.2.3.1. Interprétation des roses de houles mensuelles

En faisant l'analyse des roses mensuelles de houles (Figure I-7 et Figure I-8), on peut distinguer deux catégories de houles : calmes et agitées. Pendant les mois de Mai, Juin, Juillet, Août et Septembre, les houles étaient généralement calmes, avec des hauteurs inférieures à 4m en moyenne. Par contre, pendant les mois d'Octobre, Novembre, Février et Avril, les houles étaient plus agitées et alternaient entre des périodes calmes et agitées, avec toutefois plusieurs pics de plus de 4.5 m enregistrés. Les mois de Décembre, Janvier et Mars ont enregistré les hauteurs les plus élevées de l'année, dépassant 5 m en moyenne.

Afin d'observer la distribution des données de hauteur de houles et leurs périodes, on a créé un diagramme avec des distributions marginales représenté dans la Figure I-9 qui présente la relation entre la hauteur des houles et leurs périodes. On peut observer une concentration importante de données (représentées en bleu foncé) pour les houles dont la hauteur varie de 0.03 m à 1.2 m, avec des périodes correspondantes comprises entre 3 s et 7.5s. Les houles de hauteur inférieure à 3.5 m sont également associées à des périodes d'environ 10s, avec une forte proportion de données. Il est intéressant de noter que la distribution des hauteurs suit approximativement une courbe en forme de cloche, typique d'une distribution normale. En revanche, la distribution des périodes semble plus complexe, avec plusieurs modes dominants se situant entre 3s et 7.5s

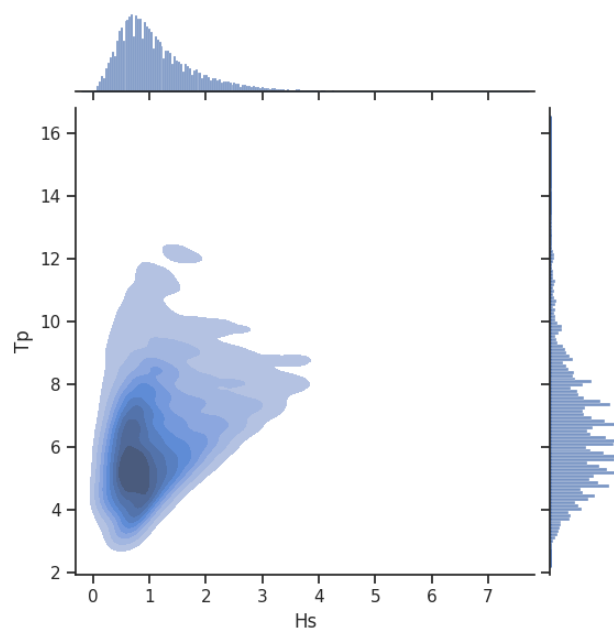


Figure I-9: Diagramme avec distributions marginales des hauteurs et périodes de houles

I.3.3. Climat du vent

Le vent local a une grande influence sur la houle. Pour comprendre son influence, une étude sur le climat du vent a été menée sur la période qui s'étend du 31 Janvier 1992 au 31 Décembre 2021 en utilisant notre base de données Wave Climate extraite d'Infoplaza.

I.3.3.1. Spectre de la vitesse du vent

Le spectre de la vitesse du vent (Figure I-10) révèle que la plupart des vents qui se sont formés au large de la baie d'Alger se caractérisent par des vitesses comprises entre 0 et 25.6 m/s mais la plupart sont comprises entre 0 et 12 m/s. En analysant ces données, on a pu identifier certaines vitesses remarquables du vent représentées dans le Tableau I-5.

Tableau I-5: Vitesses marquantes du vent

Vitesses marquantes du vent	Valeur (m/s)
U_{10m} (vitesse moyenne du vent)	5.53
U_{10_Hmax} (vitesse correspondant la hauteur maximale de l'enregistrement)	21.8
U_{10max} (valeur maximale de l'enregistrement)	25.6
U_s (vitesse de 1/3 supérieur)	9.35
$U_{1/3inf}$ (vitesse du 1/3 inférieur)	2.25

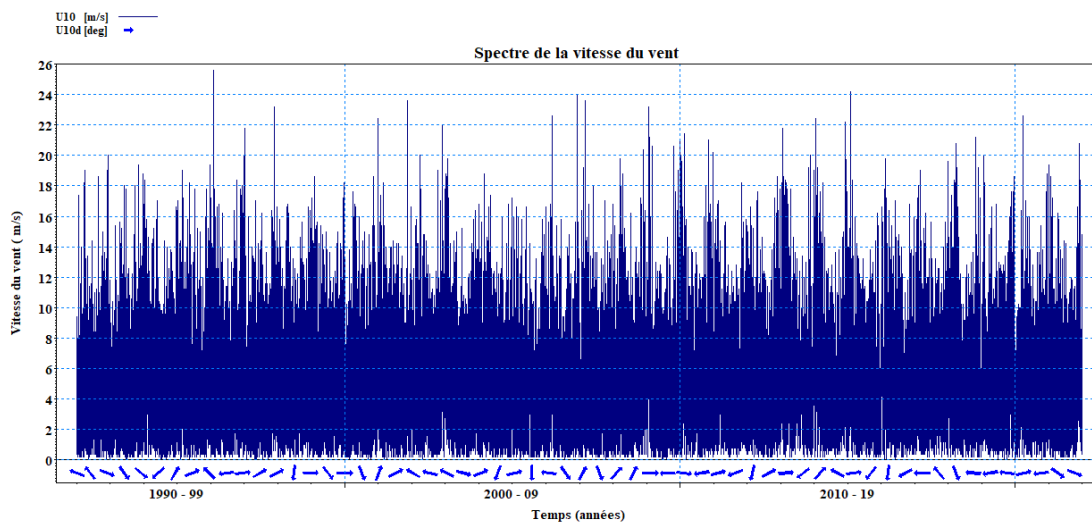


Figure I-10: Représentation du spectre de la vitesse du vent

I.3.3.2. Interprétation des roses du vent

Afin de comprendre l'effet du vent local sur le comportement de la houle en mer provenant de ces directions (N, NE, E, SE, S, SO, O, NO), un corrélogramme (Tableau I-6) a été créé combinant les directions de provenance du vent avec leurs fréquences d'apparition. Cela permet de mieux comprendre les informations sur les pourcentages de provenance des houles en fonction de leur direction.

Tableau I-6: Corrélogramme des directions de vents avec leurs fréquences annuelles et saisonnières

Directions	Annuel	Automne	Hiver	Printemps	Eté
N	5.87%	5.55%	5.25%	7.04%	6.72%
NE	15.24%	13.08%	7.49%	65.56%	24.95%
E	21.92%	20.53%	11.84%	4.76%	33.86%
SE	7.22%	8.01%	7.05%	0.13%	6.29%
S	8.14%	9.41%	11.99%	0.21%	4.28%
SO	14.25%	15.63%	20.59%	0.19%	6.19%
O	19.59%	20.59%	27.20%	17.03%	10.69%
NO	7.79%	7.21%	8.58%	5.08%	7.02%
Total	100%	100%	100%	100%	100%

I.3.3.2.1. Interprétation des roses des vents annuels, saisonniers, mensuels

La rose des vents annuels (Figure I-11) a permis de constater que les vents soufflants au large de la baie d'Alger sont dominés par deux directions principales : le Nord-Est et le Sud-Ouest, représentant le plus grand pourcentage de l'ensemble des vents enregistrés. Le pic de vitesse du vent enregistré a atteint 25,6 m/s provenant du secteur Ouest.

Automne: l'analyse de la rose des vents révèle la prédominance de deux directions : le Sud-Ouest avec un pourcentage de 15.63%, et le Nord-Est avec un pourcentage de 13.08%. Cependant, les deux directions les plus fréquentes sont l'Ouest avec un pourcentage de 20.59% et l'Est avec une fréquence de 20.53%. On remarque également que les vitesses du vent sont globalement réparties de manière équitable, ce qui montre que pendant cette période, le régime des vents est dépourvu d'événements extrêmes.

Hiver: En hiver, l'analyse de la rose des vents montre une dominance de deux secteurs, avec des intensités différentes. Le secteur le plus prédominant est le Sud-Ouest, qui génère les vagues les plus défavorables avec un pourcentage de 20.59%, ensuite c'est l'Ouest qui domine avec un pourcentage de 27.20%, il est intéressant de noter que la vitesse maximale du vent a été enregistrée en hiver.

Printemps: En printemps, l'analyse de la rose des vents révèle la prédominance de deux secteurs : le Nord-Est avec un pourcentage de temps d'environ 65.56% et c'est la direction la plus fréquente de provenance du vent caractérisée par le pourcentage le plus important ; le Sud-Ouest, avec un très faible pourcentage de 0.19%. Cependant, on observe que la variation des vitesses du vent est globalement répartie de manière équitable, ce qui montre que pendant cette période, le régime des vents est dépourvu d'événements extrêmes.

Eté: l'analyse de la rose des vents estivaux montre que la direction dominante est celle du secteur Nord-Est, avec un pourcentage de 24.95%. En revanche, l'Est représente la direction ou le vent souffle fréquemment durant cette saison avec une fréquence de 33.86%.

Pour une meilleure visualisation de ces résultats, des roses de vents annuels, saisonniers, et mensuels ont été générées et représentées dans la Figure I-11, Figure I-12 et la Figure I-13.

Les intervalles des valeurs moyennes de vitesses concernant le vent ont été sélectionnés selon l'échelle de Beaufort. Ces valeurs sont mentionnées dans le Tableau I-7.

Tableau I-7: Vitesses du vent selon l'échelle de Beaufort

Force de Beaufort	Vitesse en m/s	Définition Marine
0	0	Calme plat
1	0.5 à 1.8	Très légère brise
2	1.9 à 3.3	Légère brise
3	3.4 à 5.4	Petite brise
4	5.5 à 7.9	Jolie brise
5	8 à 11	Bonne brise
6	11.1 à 14.1	Vent frais
7	14.2 à 17.2	Grand frais
8	17.3 à 20.8	Coup de vent
9	20.9 à 24.4	Fort coup de vent
10	24.5 à 28.5	Tempête
11	28.6 à 32.6	Violente tempête
12	> 32.6	Ouragon

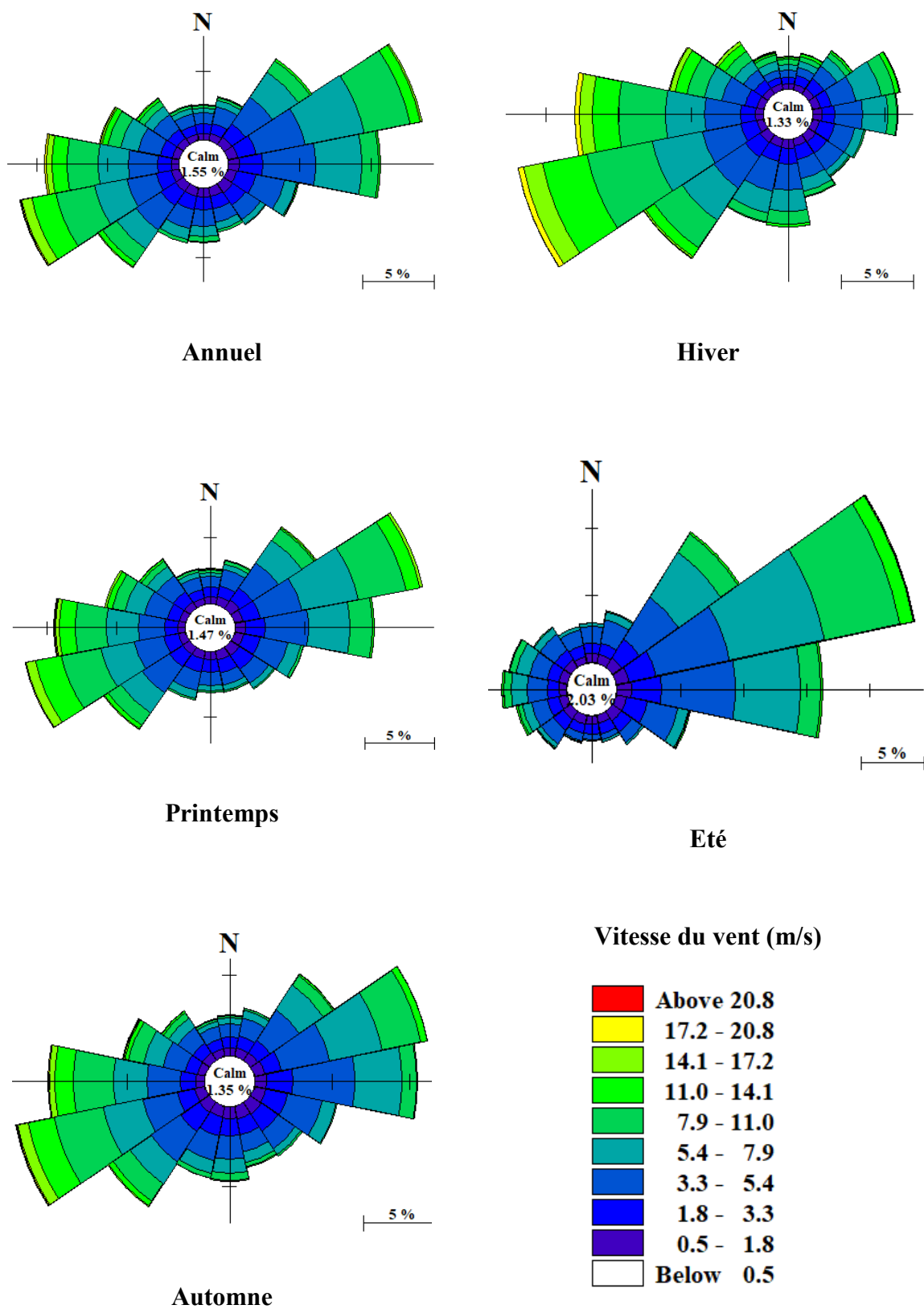


Figure I-11: Roses des vents annuels et saisonniers enregistrées durant la période 1992 – 2022.

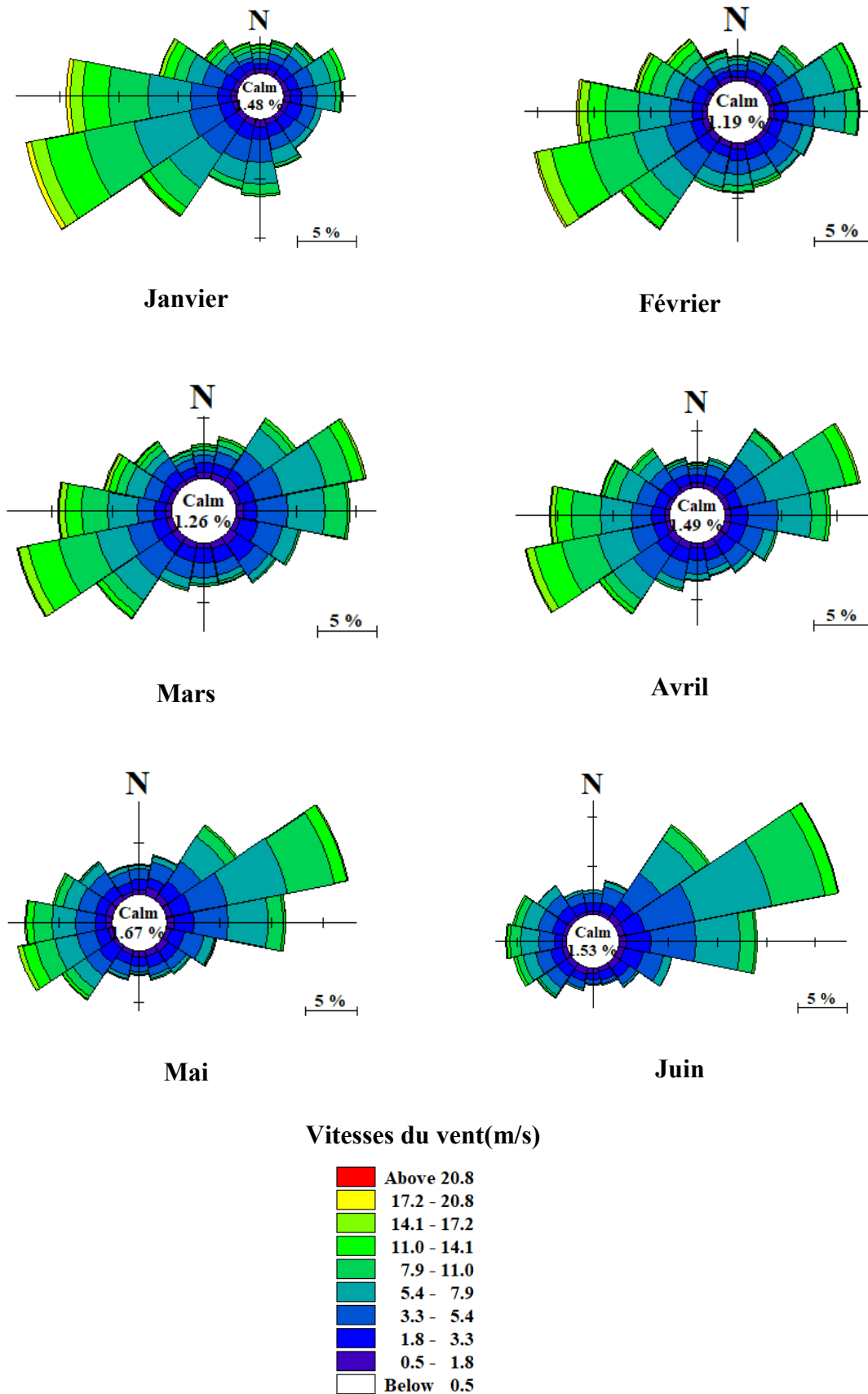


Figure I-12: Roses des houles mensuelles (Janvier- Juin) enregistrées durant la période 1992 – 2022.

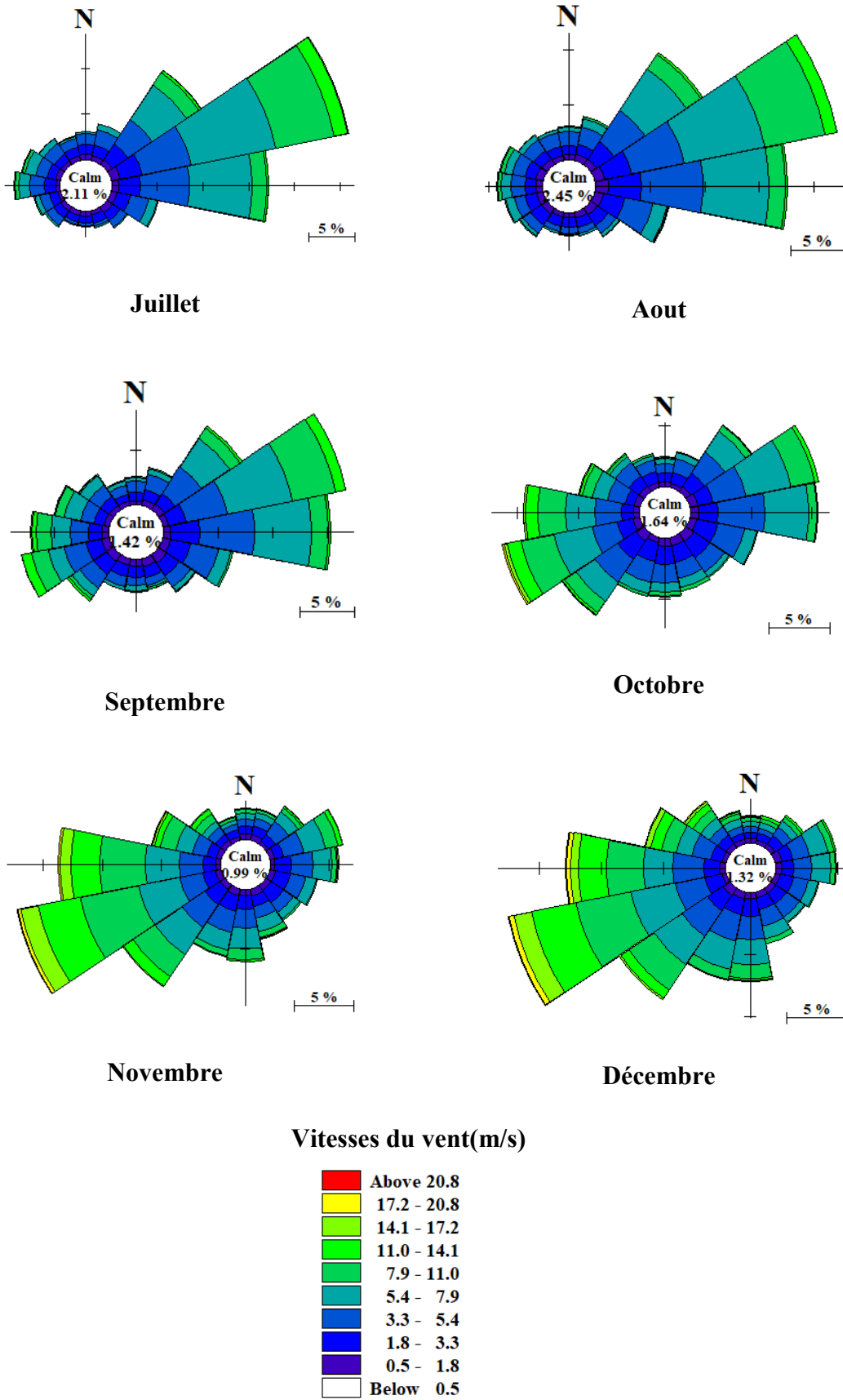


Figure I-13: Roses des houles mensuelles (Juillet- Décembre) enregistrées durant la période 1992 – 2022.

I.4. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a fourni une analyse approfondie du climat des houles et du vent dans la baie d'Alger mettant en évidence l'importance de l'ingénierie côtière dans la prise en compte des facteurs hydrodynamiques, en particulier les houles et les vents pour la planification et la conception des ouvrages côtiers dans cette région.

Chapitre II. Analyse des événements extrêmes

II.1. Introduction

Les structures de défenses côtières installées sur les sites maritimes sont conçues pour fournir une protection suffisante contre les inondations, les franchissements ou l'érosion jusqu'à une période particulière (environ 50 ans pour les ports de pêches). Pour que leur conception soit réussie, fiable et efficace, il est nécessaire de connaître les états de mer extrêmes auxquelles la défense doit faire face. Cela requiert l'estimation des hauteurs de houles à des périodes de retour souhaités ainsi qu'à leur incertitude. Ces estimations font appel à des méthodes statistiques. (Thompson et al. 2009). L'idée est de caractériser la probabilité d'occurrence.

Dans ce chapitre, nous allons aborder l'étude et l'analyse des événements météorologiques extrêmes utilisant la théorie des valeurs extrêmes.

II.2. Théorie des valeurs extrêmes

Les événements extrêmes sont des phénomènes marins rares avec de faibles probabilités d'occurrence. Ils peuvent causer des dommages et menacent ainsi les vies humaines et les infrastructures côtières. En raison de leur imprévisibilité, il est essentiel de prendre des mesures pour s'en prémunir en minimisant leurs impacts. La théorie des valeurs extrêmes utilise des méthodes statistiques pour modéliser la distribution de probabilités des événements extrêmes. Cela permet d'optimiser les valeurs des données observées et pourra ainsi aider à mieux prévoir les risques associés. (Coles 2001).

Diverses approches ont été appliquées dans le calcul des houles extrêmes. La base de données utilisée contient des enregistrements de houles de 30 ans avec un pas de 3 h. Dans ce travail, l'échantillon est sélectionné par la méthode des maximas par blocs et celle des dépassements de seuil.

II.2.1. Méthode des Maximas par blocs

La méthode des maximas par blocs (BM) consiste à répartir les données en blocs de taille identique et récupérer uniquement le maximum de chaque bloc (Figure II-1). Ces maxima sont utilisés pour ajuster la loi GEV (Generalized Extreme Value) afin de modéliser les événements extrêmes. Cependant, cette méthode a l'inconvénient de perdre de l'information sur les événements extrêmes.

En effet, des événements intéressants peuvent être négligés lorsqu'ils sont regroupés dans le même bloc de données, tandis que d'autres blocs peuvent ne pas contenir du tout d'événements intéressants. (Cornel Stander, 2015).

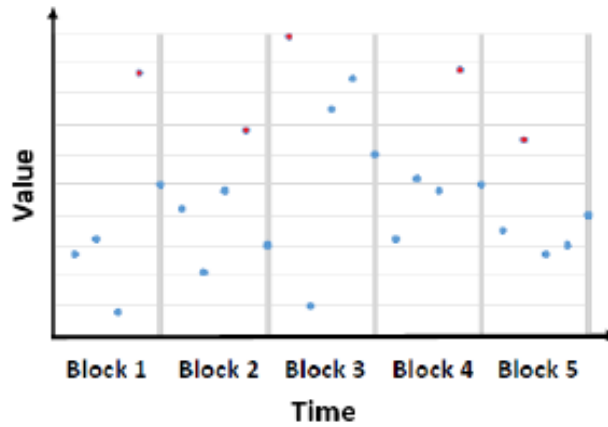


Figure II-1: Représentation de la méthode des Blocs Maximas

Le théorème des Blocs 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 regroupe les données en k blocs de longueur l et on calcule le maximum (m_i) , sur chaque bloc. Pour estimer la loi de la variable aléatoire m_i , on utilise la loi GEV (Équation II-1 et Équation II-2) et on détermine ses paramètres à partir de l'échantillon sélectionné (m_1, \dots, m_k) . Un bon équilibre doit être assuré entre la taille des blocs l et le nombre de blocs k une approximation réaliste de la loi GEV et de ses paramètres. Dans notre cas, des blocs de taille annuelle sont utilisés.

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

$$F(x; \mu; \sigma; k) = \exp\left(-\exp\left[\frac{x - \mu}{\sigma}\right]\right), \text{ pour } x \in \mathcal{R} \text{ et } k = 0 \quad \text{Équation II-2}$$

μ : Le paramètre de position

k : Le paramètre de forme :

Le cas $k < 0$: correspond à la loi de Weibull.

Le cas $k > 0$: correspond à la loi de Fréchet.

Le cas $k = 0$: correspond à la loi de Gumbel.

σ : Le paramètre d'échelle

II.2.2. Méthode de dépassements de seuil

La méthode de dépassements de seuils POT (Peaks Over Threshold) consiste à conserver toutes les observations qui dépassent un seuil choisi (Figure II-2) et à ajuster la loi GPD (Generalized Pareto Distribution) à ces dépassements pour modéliser les événements extrêmes. Cette méthode permet de conserver plus d'information sur les événements extrêmes et peut être utilisée même dans le cas d'un nombre de données plus faible. (Cornel Stander, 2015).

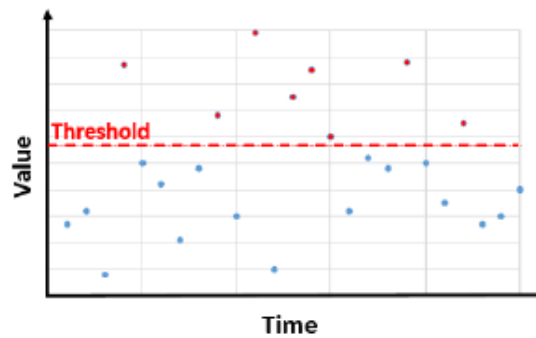


Figure II-2: Représentation de la méthode POT

Cette méthode repose sur l'approximation de la distribution des valeurs dépassant un seuil prédéfini pour la loi GPD. (Kh. Tilbi, 2018). Elle présente un avantage par rapport à la méthode des blocs maxima car il est plus simple d'obtenir un échantillon d'excès plutôt qu'un échantillon de valeurs maximales. L'équation générale de la méthode POT est montrée dans l'Équation II-3 où $F(x)$ est la fonction de distribution cumulative des valeurs excédant un certain seuil, x est la valeur et u fait référence au seuil.

$$F(x) = \exp\left(-\left(1 + \frac{k(x-u)}{\sigma}\right)^{\frac{-1}{k}}\right) \quad \text{Équation II-3}$$

II.3. Application de la loi GEV

Deux distributions de la loi GEV (Gumbel et Weibull) ont été utilisées pour estimer les hauteurs de houles associés aux périodes de retour. L'analyse des données a été effectuée en utilisant le langage Python avec la bibliothèque pyextreme. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de tableaux et de graphiques.

La Figure II-3 présente le résultat de la répartition des données en blocs de longueur d'une année. Le maximum de chacun des blocs est représenté par un point rouge.

Par la suite, on applique les distributions Gumbel et de Weibull et on calcule les hauteurs de houle par période de retour pour l'omnidirectionnel ainsi que pour les 8 directions susceptibles de générer des hauteurs de houles assez importantes.

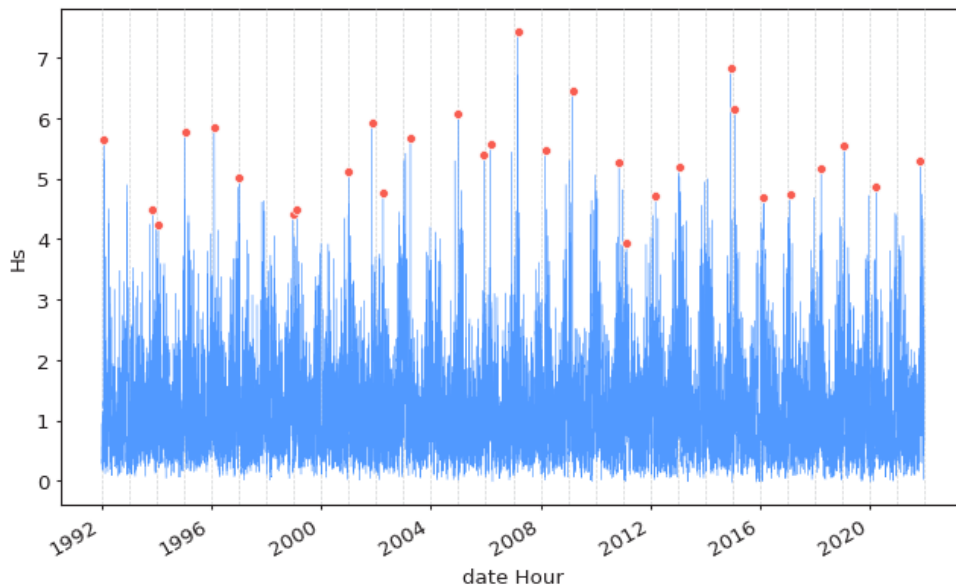


Figure II-3: Représentation de la Méthode des Blocs Maximas sur les hauteurs de houles entre 1992-2022

II.3.1. Résultats de la loi GEV

Les graphiques (Figure II-4 et Figure II-5) montrent les limites d'erreurs acceptables (15%) des résultats obtenus par les deux distributions Gumbel et Weibull. Ces limites sont représentées par des pointillés verts dans la Figure II-4 et par des pointillés bleus dans la Figure II-5. Les croix rouges indiquent les valeurs de hauteurs de houles provenant de toute direction pour les périodes de retour 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100 et 1000 ans. Pour faciliter la compréhension des résultats obtenus par les deux distributions, les hauteurs de houles extrêmes observées en fonction de leurs périodes de retour sont résumées dans le Tableau II-1 et dans le Tableau II-2.

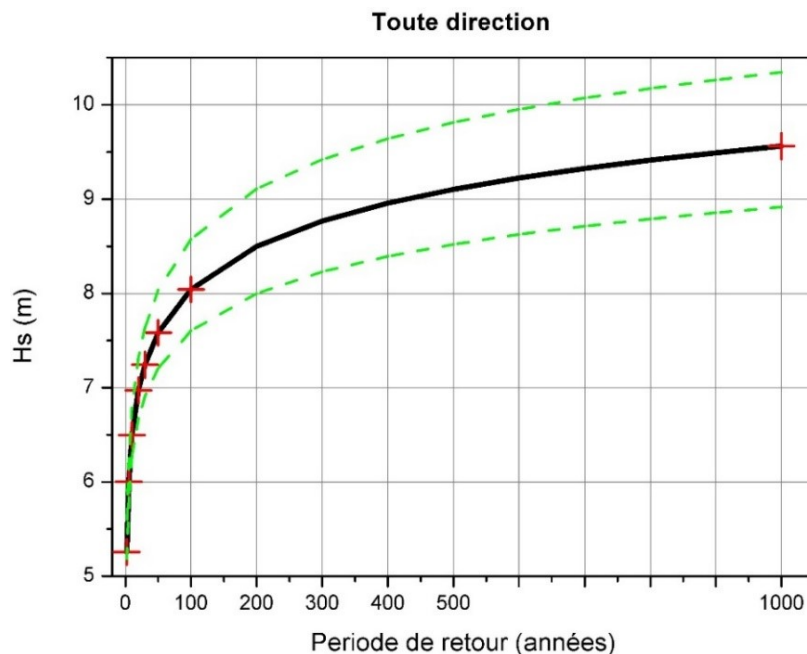


Figure II-4 : Estimation des événements extrêmes par la distribution de Gumbel pour l'omnidirectionnel

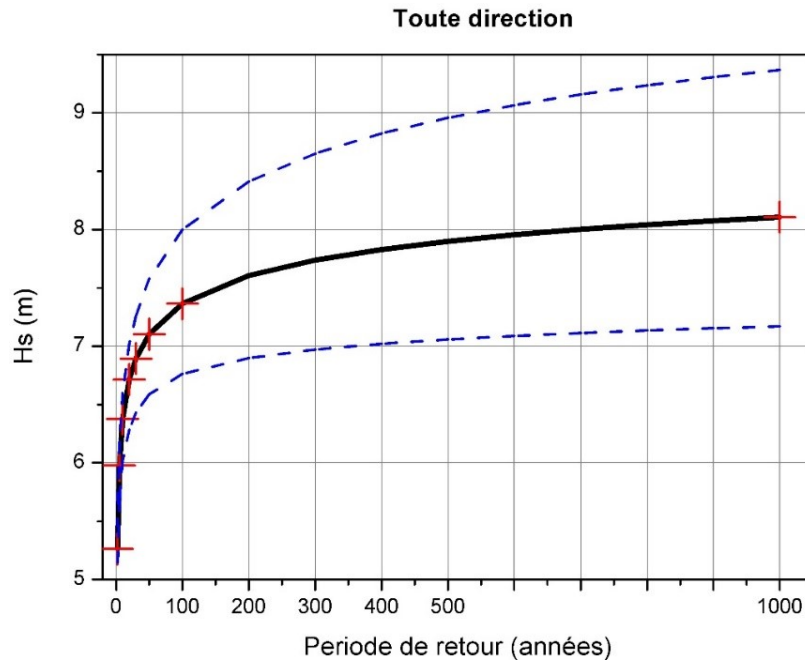


Figure II-5: Estimation des événements extrêmes via la distribution de Weibull pour l’omnidirectionnel

En se référant au Tableau II-1 et à la Figure II-6 illustrant les résultats des hauteurs de houles prédites par la distribution de Gumbel, on constate que la direction la moins susceptible de générer des houles extrêmes est la direction Est. Cependant ; les directions susceptibles de générer les hauteurs de houles les plus élevées sont le Nord-Nord-Est suivi du Nord-Ouest et du Nord, avec des houles extrêmes provenant principalement de la direction Nord-Nord-Est. Toutefois, l'analyse des hauteurs omnidirectionnelles a enregistré les résultats les plus élevés, car le modèle simule les hauteurs maximales possibles de la série de données à l'exception de la hauteur de houle provenant du NNE qui a dépassé celle estimée dans le cas omnidirectionnel correspondant à la périodes de retours 1000 ans.

Tableau II-1: synthèse des résultats de la méthode GEV obtenus par la distribution de Gumbel

GEV distribution de Gumbel										
Hauteur de houle H_s prédite pour chaque direction (m)										
Périodes de retour (années)	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	Omni
2	4.48	3.84	3.95	4.01	3.98	4.33	3.12	2.85	1.22	5.26
5	5.16	4.56	4.77	4.63	4.78	5.33	3.72	3.43	1.47	6.00
10	5.61	5.04	5.31	5.05	5.31	6.00	4.11	3.81	1.64	6.50
20	6.04	5.50	5.83	5.44	5.82	6.63	4.49	4.18	1.80	6.97
30	6.29	5.77	6.13	5.67	6.11	7.00	4.71	4.39	1.90	7.24
50	6.60	6.10	6.51	5.96	6.48	7.45	4.98	4.66	2.01	7.58
100	7.02	6.54	7.01	6.34	6.97	8.02	5.34	5.01	2.17	8.04
1000	8.41	8.02	8.68	7.62	8.60	10.11	6.55	6.19	2.68	9.56

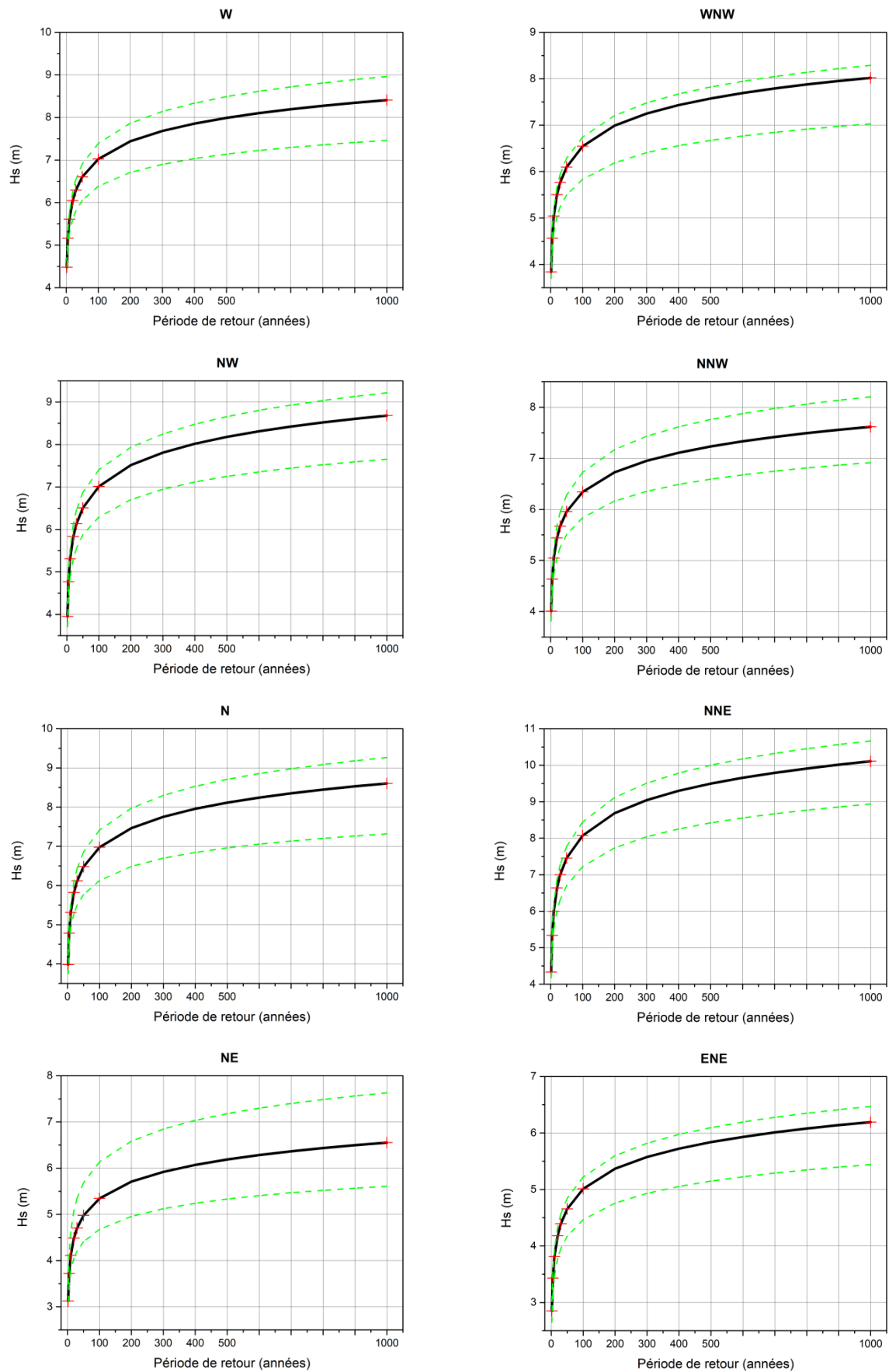


Figure II-6: Estimation des événements extrêmes par la distribution de Gumbel pour chaque direction

A partir des résultats de la distribution de Weibull (Tableau II-2, Figure II-7 et Figure II-8), on constate que la direction la moins susceptible de générer des houles extrêmes est la direction Est. Cependant; les directions les plus susceptibles sont le Nord-Est, le Nord-Nord-Est et le Nord. Malgré que l'analyse des hauteurs omnidirectionnelles a donné les résultats les plus élevés, on a détecté quelques anomalies pour les directions NE, NNE et N où on a enregistré plusieurs hauteurs dépassant celles estimées dans le cas omnidirectionnel correspondant à 50, 100 et 1000 ans.

Tableau II-2: Résumé des résultats obtenus par la méthode GEV par la distribution Weibull

GEV distribution de Weibull										
Hauteur de houle H_s prédite pour chaque direction (m)										
Périodes de retour (années)	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	Omni
2	4.55	3.91	3.95	4.03	3.96	4.28	2.71	2.86	1.20	5.26
5	5.14	4.55	4.80	4.64	4.86	5.34	3.44	3.45	1.51	5.98
10	5.45	4.90	5.30	4.99	5.42	5.99	4.22	3.81	1.72	6.38
20	5.70	5.19	5.75	5.29	5.92	6.58	5.17	4.15	1.92	6.71
30	5.83	5.35	5.99	5.45	6.20	6.89	5.80	4.33	2.03	6.89
50	5.99	5.52	6.28	5.64	6.53	7.27	6.66	4.55	2.16	7.10
100	6.17	5.74	6.64	5.88	6.96	7.76	7.95	4.84	2.34	7.36
1000	6.68	6.35	7.72	6.58	8.24	9.20	13.15	5.69	2.89	8.11

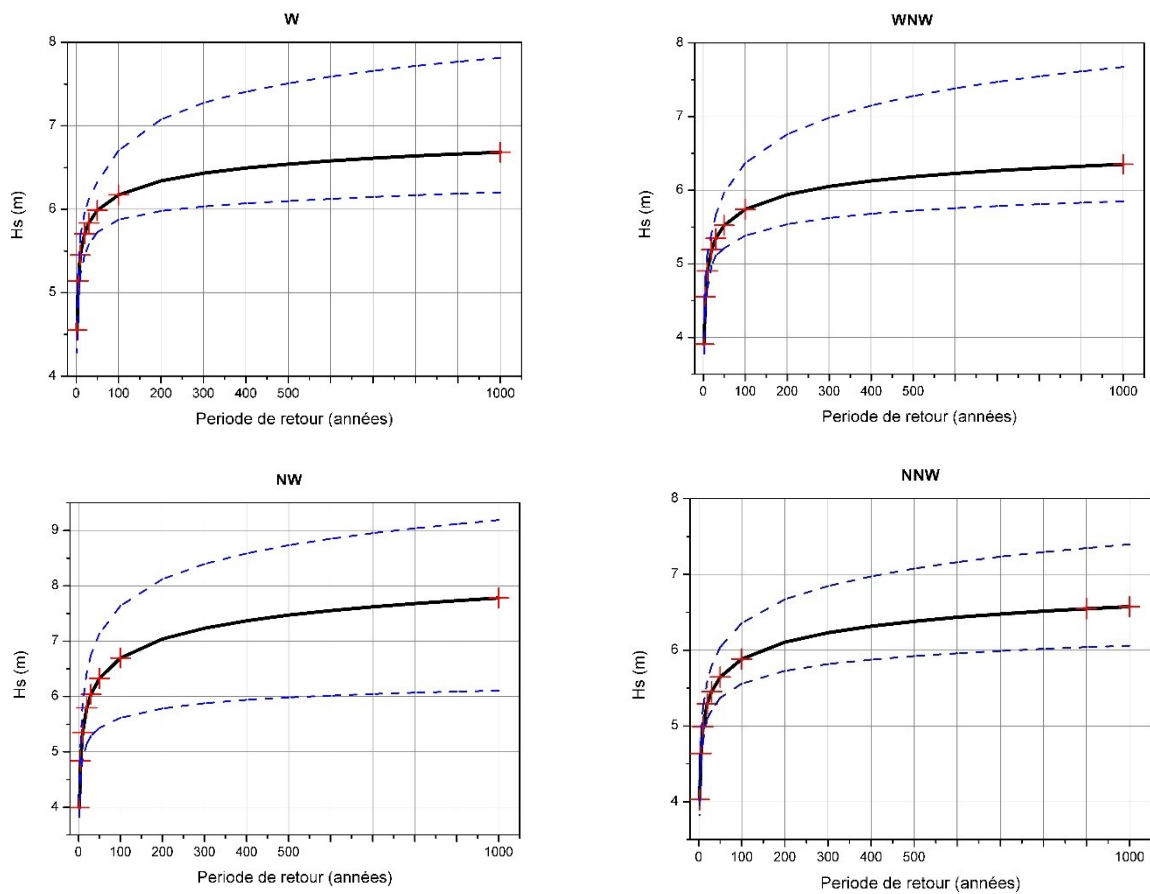


Figure II-7 : Estimation des événements extrêmes par la distribution de Weibull pour W, WNW, NW et NNW.

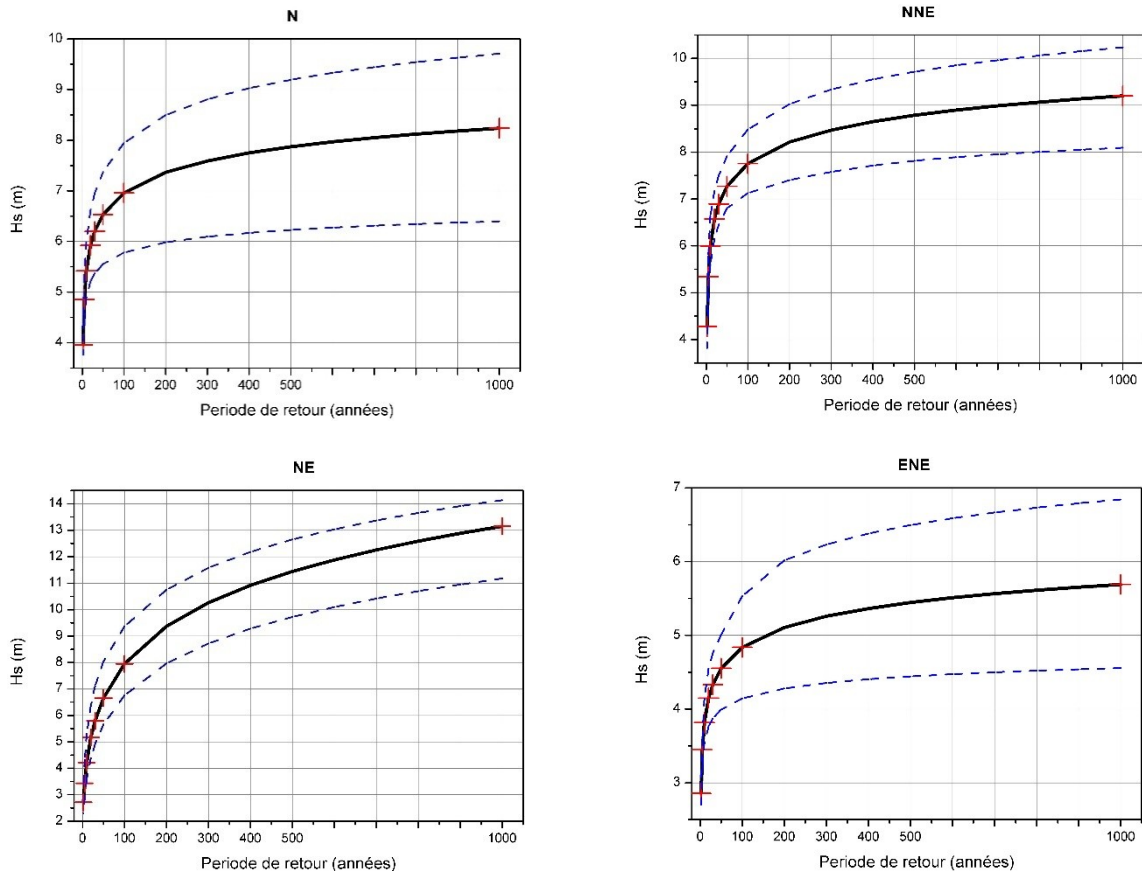


Figure II-8 : Estimation des événements extrêmes par la distribution de Weibull pour N, NNE, NE et ENE.

II.3.2. Comparaison des résultats de la distribution de Gumbel et de Weibull

Afin de déterminer quelle distribution convenant le mieux à notre cas d'étude (Gumbel ou Weibull), on représente graphiquement la distribution des Hauteurs significatives H_s de notre série de données. (Cornel Stander 2015). Un script du langage python est utilisé avec la bibliothèque seaborn et scipy, le graphique résultant est illustré dans laFigure II-10.

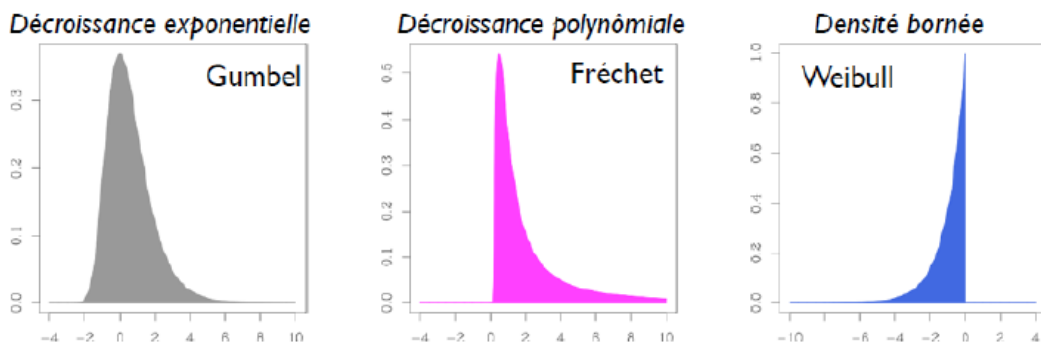


Figure II-9 : Queues des trois distributions de la loi GEV

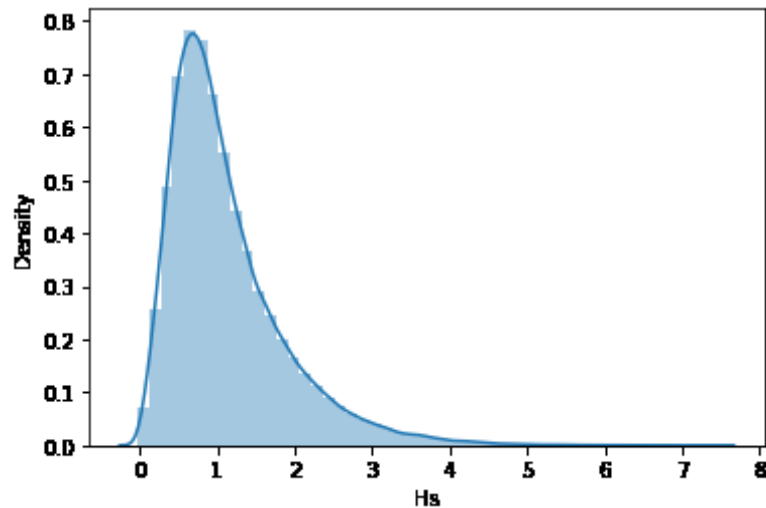


Figure II-10 : Représentation graphique de la distribution des hauteurs de houles H_s enregistrées

On remarque que la courbe (Figure II-10) de distribution des hauteurs H_s des houles enregistrées représente une décroissance exponentielle, ce qui correspond à la distribution de Gumbel et c'est la distribution qui a été retenue. Les résultats obtenus avec la distribution de Weibull ont été écartés en raison des anomalies soulevées auparavant.

II.4. Application de la distribution GPD

Après avoir sélectionné distribution GEV adéquate, on va procéder à l'application de la méthode POT et comparer les résultats obtenus. Pour définir le seuil, la bibliothèque pyextremes du langage Python est utilisée. L'objectif est de choisir le seuil optimal en observant la ligne droite de la moyenne résiduelle avant toute variation significative. Le seuil retenu est $u = 3.5 \text{ m}$. Cela est confirmé par le graphe représentant la stabilité des paramètres (Figure II-12) où on remarque le début de l'instabilité après ce seuil. Le graphique de la moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelles de l'enregistrement est illustré dans la Figure II-11.

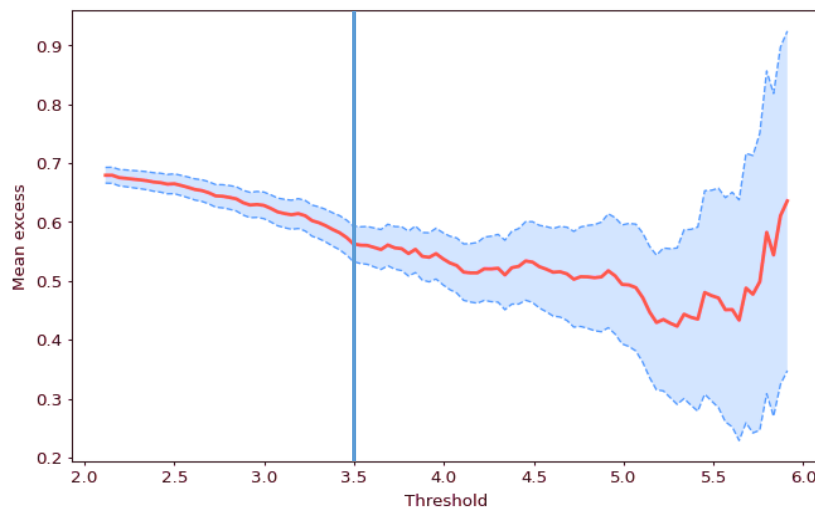


Figure II-11: Moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelles de l'enregistrement

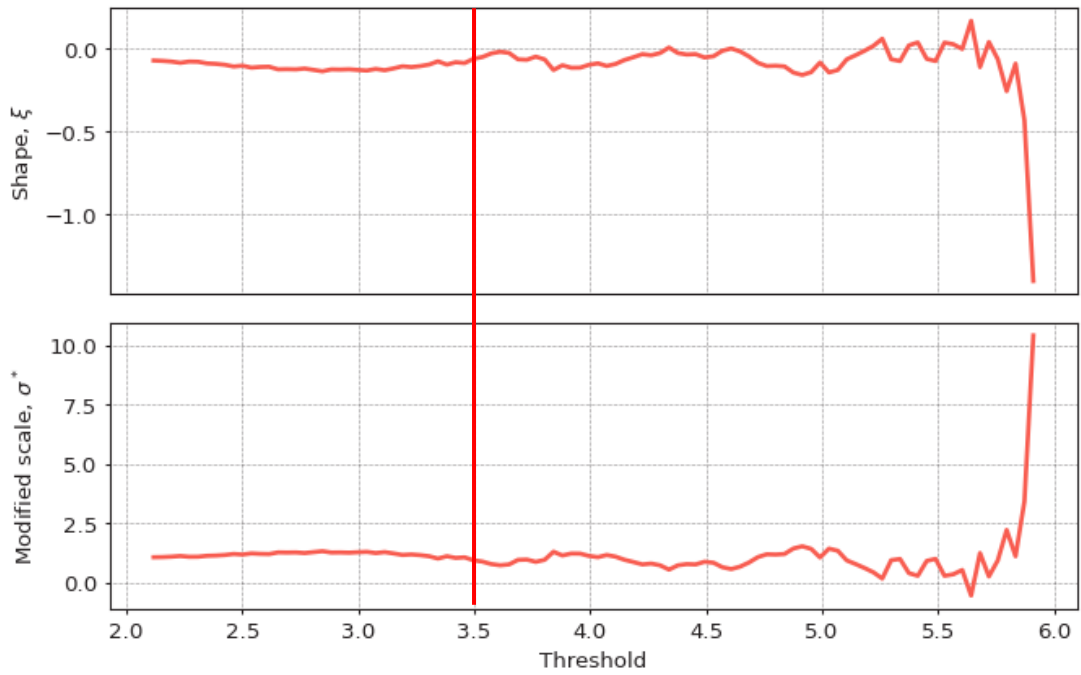


Figure II-12: Choix du seuil par la stabilité des paramètres

La Figure II-13 illustre l'ensemble des points à utiliser pour le calcul après avoir fixé le seuil. Les hauteurs de houles à prendre en compte de l'ensemble des enregistrements sont extraites en utilisant la bibliothèque pyextremes du langage Python.

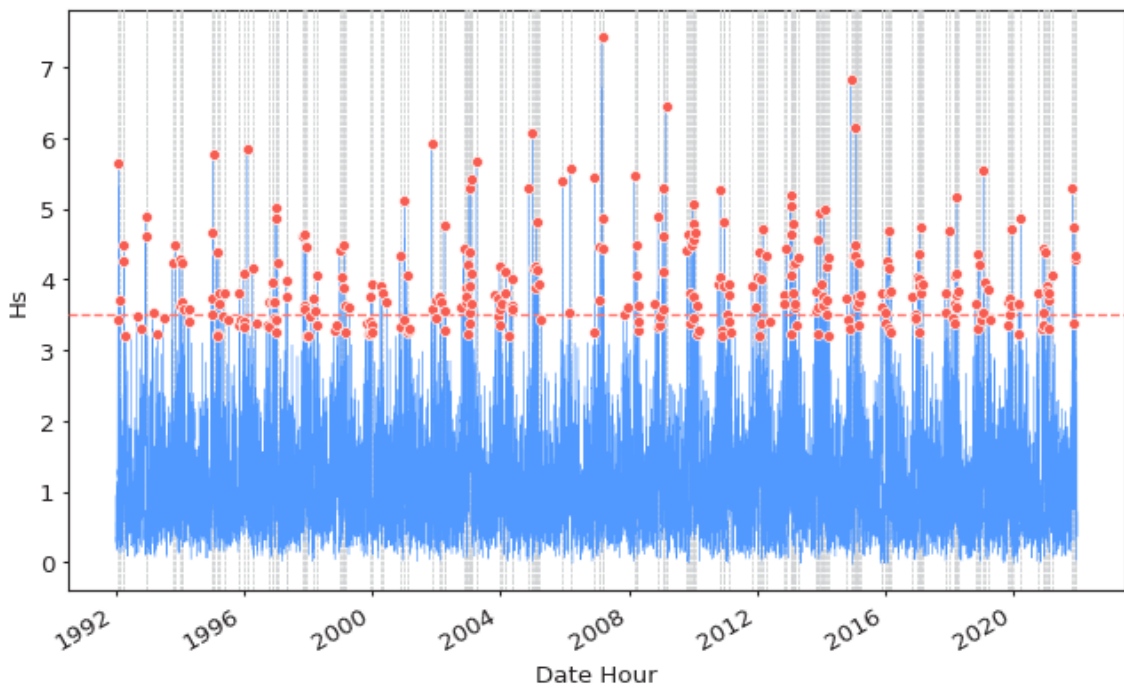


Figure II-13: Représentation des valeurs dépassant le seuil par la méthode POT

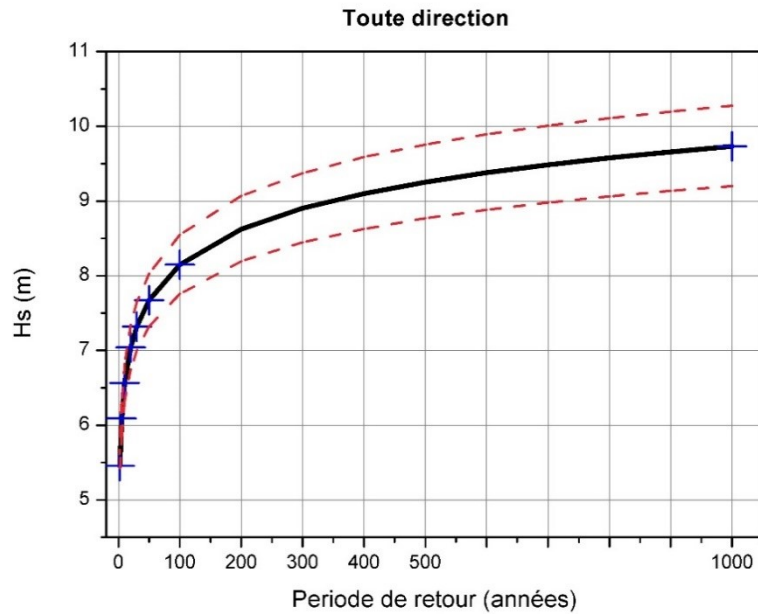


Figure II-14: Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour omnidirectionnel

Tableau II-3 : Résultat de l'estimation des événements extrêmes par la méthode POT.

POT										
Hauteur de houle prédite par direction (m)										
Périodes de retour (années)	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	Omni
2	4.21	4.19	4.25	4.16	4.24	4.65	3.31	3.01	1.34	5.21
5	4.66	4.67	4.79	4.71	4.91	5.35	3.89	3.42	1.57	5.96
10	5.00	5.03	5.20	5.12	5.41	5.88	4.32	3.73	1.74	6.45
20	5.34	5.39	5.62	5.53	5.91	6.41	4.75	4.04	1.91	6.92
30	5.54	5.60	5.86	5.78	6.20	6.72	5.01	4.22	2.01	7.19
50	5.79	5.87	6.16	6.08	6.57	7.11	5.33	4.45	2.14	7.53
100	6.13	6.23	6.57	6.50	7.08	7.64	5.76	4.76	2.31	7.98
1000	7.27	7.43	7.94	7.88	8.74	9.41	7.20	5.79	2.89	9.49

Les Figure II-14 et la Figure II-15 illustrent les résultats de l'estimation des événements extrêmes par la méthode POT par périodes de retour pour l'omnidirectionnel ainsi que pour les 8 directions. Les limites inférieures et supérieures dans la Figure II-14 sont représentées par des pointillés rouges et par des pointillés roses (Figure II-15) indiquant l'erreur maximale (15%) des résultats obtenus. Les croix bleues représentent les hauteurs de houle pour les périodes de retour choisies pour chaque direction. Ces résultats sont également montrés dans le Tableau II-3, ses résultats indiquent que la direction Est est la direction la moins susceptible de générer des houles extrêmes, tandis que les directions, Nord-Nord-Est et Nord génèrent les plus hauteurs de houles importantes. Cependant, il convient de noter que l'analyse des hauteurs omnidirectionnelles a donné les résultats les plus élevés, car le modèle utilise les hauteurs maximales possibles de la série de données.

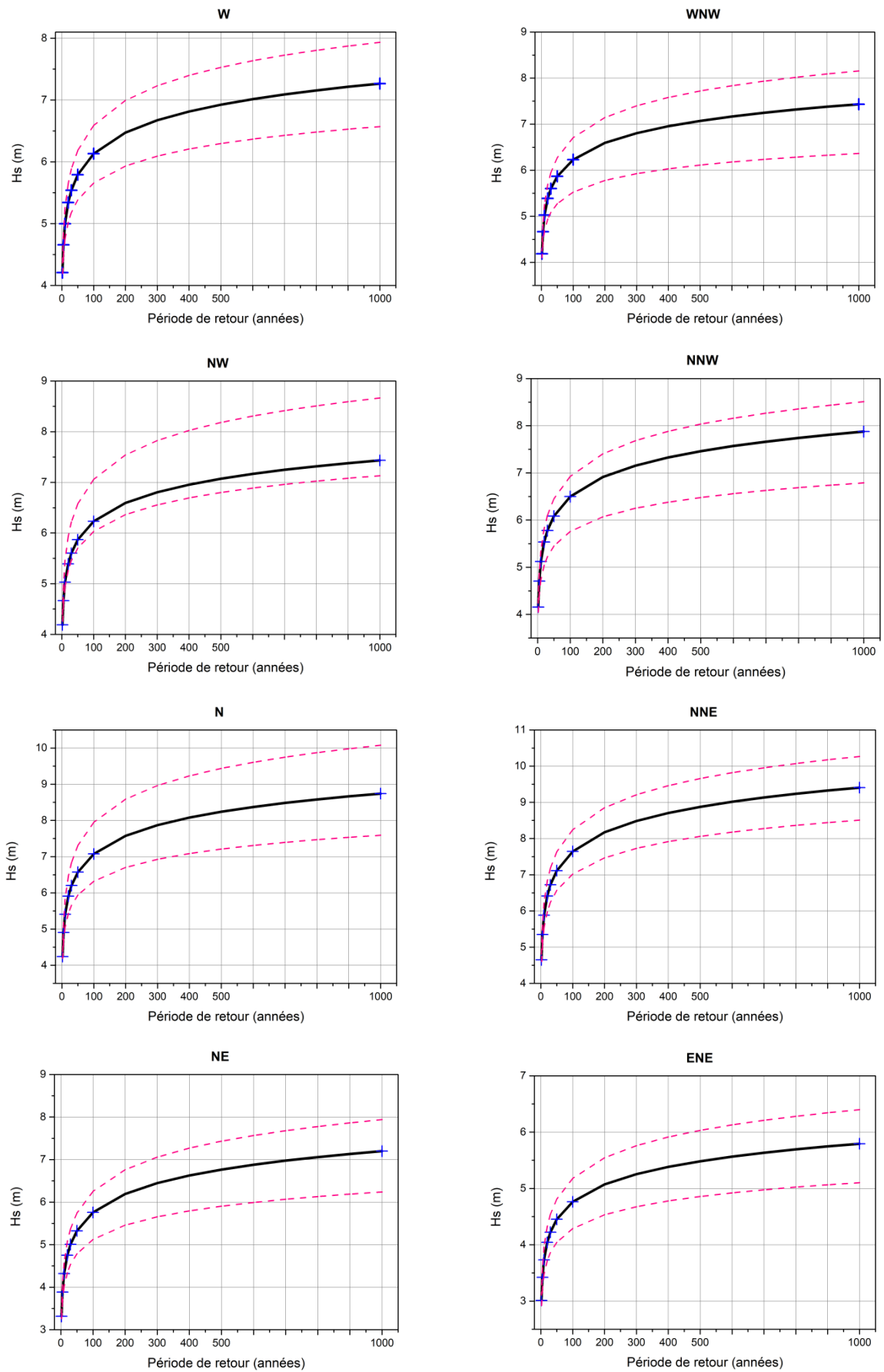


Figure II-15 : Estimation des événements extrêmes par la méthode POT pour chaque direction

II.4.1. Comparaison entre la méthode POT et celle des Blocs Maximas (GEV)

Dans le but d'obtenir des résultats plus précis et efficaces, on a étudié les deux méthodes disponibles (POT et GEV), puis comparé leurs performances. Dans cette partie, on n'a utilisé que l'approche omnidirectionnelle pour choisir la méthode à utiliser dans le chapitre suivant.

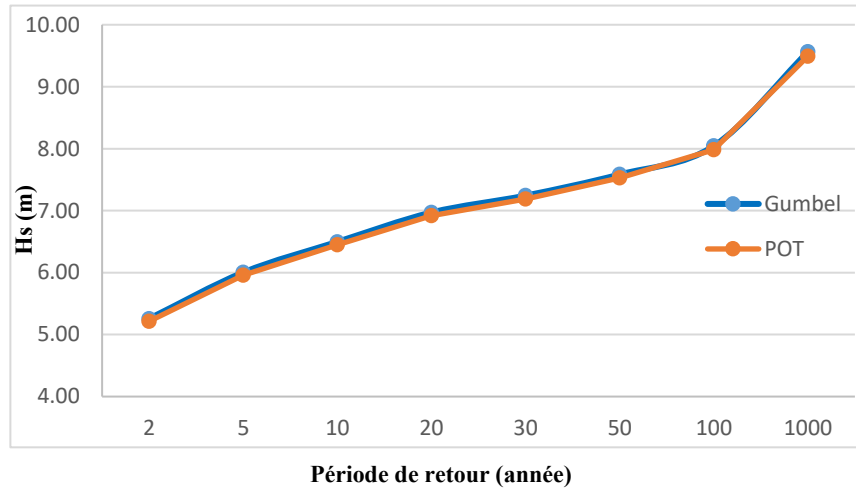


Figure II-16 : Comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes POT et GEV pour l'omnidirectionnel

D'après la Figure II-16, on constate que les deux méthodes produisent des résultats quasiment similaires. Cependant, la méthode de GEV (distribution de Gumbel) fournit des valeurs légèrement plus élevées que la méthode POT pour toutes les périodes de retour. Cette différence s'explique par la quantité limitée de données utilisées dans la méthode des blocs maxima et leur relative grandeur (le maximum de chaque année). Le coefficient de détermination R^2 pour les résultats des deux méthodes est de **99%**, ce qui confirme la convergence des résultats par les deux méthodes.

Pour la suite de notre travail, les résultats de la méthode POT vont être utilisés car cette méthode prend en compte davantage de points extrêmes par rapport à la méthode GEV qui se limite à un seul point extrême par bloc (maximum), même si d'autres points extrêmes existent.

II.5. Conclusion

Pour conclure, l'étude des événements extrêmes a permis de caractériser les probabilités d'occurrence des phénomènes marins rares et de modéliser leurs distributions de probabilités. Ces informations sont essentielles pour la conception de structures de défense côtières efficaces et la prévention des dommages causés par ces événements. Cependant, il est important de continuer à améliorer les méthodes d'estimation et de modélisation afin de mieux prévoir les risques associés aux événements extrêmes.

Chapitre III. Modélisation numérique

III.1. Introduction

La modélisation numérique marine est cruciale pour la simulation et la prévision des phénomènes maritimes. Divers logiciels développés par des institutions académiques et des entreprises privées sont disponibles. (J. Ahn et al, 2019);(A. Symonds et al, 2017). En effet, les modèles numériques permettent la prédiction des marées, des courants et des processus côtiers. Ils évaluent également l'impact des infrastructures côtières et des changements environnementaux. La modélisation numérique est donc un outil précieux pour la prise de décisions éclairées dans la gestion des zones marines, la planification des infrastructures et la préservation des écosystèmes côtiers.

III.2. Présentation du modèle

Le MIKE 21 est une suite logicielle professionnelle de modélisation numérique 2D de l'hydraulique et des phénomènes associés dans les rivières, les lacs, les baies, les zones côtières et les océans, développée par l'institut hydraulique Danois DHI Water & Environnement. Le produit MIKE 21 est un ensemble modulaire de moteurs de simulation conçu pour répondre à divers besoins applicatifs. Ces moteurs incluent la modélisation de flux de marée, de vagues de tempête, du transport de sédiments, du transport de sable, des perturbations portuaires et des états de mer dans les domaines offshore et onshore. (DHI, 2014). Néanmoins, les simulations nécessitent la création d'une maille (Mesh). Dans ce but, l'outil de génération de mailles (Mesh Generator) du logiciel Mike-Zero a été utilisé.

III.2.1. Mesh Generator

Le Mesh Generator de Mike 21 est un outil conçu pour créer des maillages numériques flexibles et fixes pour les modèles MIKE Zéro avec une possibilité d'ajustement de la résolution de la maille. L'outil offre deux options d'interpolation pour les éléments triangulaires, le voisin naturel et l'interpolation linéaire, qui peuvent être utilisées indépendamment du type de maillage. De plus, la fonction d'imbrication de plusieurs maillages est disponible pour le maillage fixe. (DHI, 2014). Pour la création de la Mesh avec le module 'Mesh Generator', on a utilisé :

1. Un système de projection adapté à notre zone d'étude: WGS_84_UTM_ZONE_31,
2. Le trait de côte et la bathymétrie de la zone enregistrés dans un fichier (.xyz),
3. Un maillage flexible avec des tailles de maille différentes pour obtenir des résultats précis et réduire les temps de calcul du logiciel.

III.2.2. MIKE 21 SW

C'est un modèle spectral de vague de 3^{ème} génération simulant la croissance des vagues en présence du vent, l'interaction vague-vague non-linéaire, la dissipation par le déferlement et par la friction sur le fond, la réfraction par les changements de profondeur et l'interaction vague-courant. Les calculs du modèle MIKE21-SW utilisent une grille à maillage flexible non structuré. (DHI, 2014).

III.2.2.1. Équations en eaux peu profondes

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

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

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

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

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

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

Les termes de contraintes horizontales sont décrits à l'aide d'une relation gradient-contrainte et sont simplifiées dans l'Équation III-5 et l'Équation III-6. Les conditions aux limites de surface et de fond pour u , v et w sont décrits dans l'Équation III-7 et l'Équation III-8

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

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

A $z = \eta$:

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

A $z = -d$:

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

Tableau III-1: Symboles et leur signification

Symbole	Signification	Symbole	Signification
T	Temps	A	La viscosité horizontale.
Pa	La pression atmosphérique	g	L'accélération de gravité
x, y et z	Les coordonnées cartésiennes,	ρ_w	la densité de l'eau
H	L'élévation de la surface	S_{xx}, S_{xy}, S_{yx} et S_{yy}	Composantes du tenseur radial
D	La profondeur d'eau	v_t	Viscosités turbulentes verticale
$h = \eta + d$	La profondeur d'eau totale	ρ_0	La densité de référence de l'eau
u, v et w	La vitesse composante dans les directions x, y et z	S	Amplitude de la décharge causée par des sources ponctuelles
(u_s, v_s)	La vitesse à laquelle l'eau est rejetée dans l'eau ambiante	$f = 2\Omega \sin\Phi$	Paramètre de Coriolis (Ω est la vitesse angulaire et Φ la latitude géographique)
(τ_{sx}, τ_{sy})	Les composantes x et y des contraintes de vent de surface	(τ_{bx}, τ_{by})	Les composantes x et y des contraintes de vent de fond.

III.2.2.2. Équations de conservation de l'action des vagues

L'équation fondamentale qui décrit l'action des vagues est l'équation d'équilibre, exprimée en coordonnées cartésiennes ou sphériques.

Coordonnées cartésiennes

L'équation de conservation de l'action des vagues peut s'écrire de la manière suivante en coordonnées cartésiennes horizontales

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

Tableau III-2: Symboles et leur signification

Symbole	Signification
$N(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$	Densité d'action des vagues.
t	Le temps.
$\vec{x} = (x, y)$	Les coordonnées cartésiennes.
σ	Pulsation.
S	Source pour l'équation de l'équilibre énergétique.
$\vec{v}(c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$	La vitesse de propagation d'un groupe de vagues (dans l'espace de phase à quatre dimensions).
∇	L'opérateur différentiel à quatre dimensions dans l'espace x, y, σ, θ .

Les quatre vitesses de propagation caractéristiques sont spécifiées par les formules suivantes:

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

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

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

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

Tableau III-3: Symboles et leur signification

Symbole	Signification
S	La coordonnée spatiale dans la direction d'onde θ .
m	Coordonnée perpendiculaire à S .
$\nabla_{\vec{x}}$	Opérateur bidimensionnel différentiel dans l'espace \vec{x} .

III.2.3. MIKE 21 HD

Le module hydrodynamique (HD) résout les équations de la conservation des propriétés physiques, spécifie des conditions initiales et limites hydrographiques, inclut différents types de sources, puits et structures, résout les équations de Saint-Venant et tient compte de différents paramètres tels que le frottement sur le fond, l'effet des événements météorologiques, la force de Coriolis, la modélisation de la turbulence de l'écoulement et la variation de géométrie du domaine au cours du temps. Le module HD permet également de calculer les courants littoraux en prenant en compte les contraintes de radiation dues à la houle dans la zone de déferlement et fournit les conditions hydrodynamiques aux autres modules du système (DHI, 2014).

L'équation en eau peu profonde

En combinant l'équation de quantité de mouvement horizontale et l'équation de continuité pour la profondeur de l'eau peu profonde ($h=\eta+d$) dans le système de coordonnées cartésiennes, on obtient l'équation suivante:

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

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} = fuh - gh \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_w}{\partial y} + \\ \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \quad \text{Équation III-16}$$

Les vitesses des courants à la profondeur moyenne sont définies comme suit:

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz \quad \text{Équation III-17}$$

$$h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad \text{Équation III-18}$$

Les forces de contrainte latérales T_{ij} : Elles sont composées du frottement visqueux, de l'advection différentielle et du frottement turbulent. Elles sont calculées à partir d'une viscosité turbulente en utilisant la formulation des gradients de vitesse moyenne à la profondeur

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

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

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

Tableau III-4: Symboles et leur signification

Symbole	Signification	Symbole	Signification
t	Temps	A	La viscosité horizontale.
Pa	La pression atmosphérique	g	L'accélération de gravité
x, y et z	Les coordonnées cartésiennes	ρ_w	la densité de l'eau
η	L'élévation de la surface	S_{xx}, S_{xy} S_{yx} et S_{yy}	Composantes du tenseur de rayonnement
d	La profondeur d'eau	ν_t	Viscosités turbulentes verticale
h = η+d	La profondeur d'eau totale	ρ_0	La densité de référence de l'eau
u, v et w	La vitesse composante dans les directions x, y et z	S	Amplitude de la décharge causée par des sources ponctuelles
(u_s, v_s)	La vitesse à laquelle l'eau est rejetée dans l'eau ambiante	f = 2Ω sinΦ	Paramètre de Coriolis (Φ :Latitude géographique)
—	La barre décrit une valeur moyenne	Ω	Vitesse angulaire de révolution
(τ_{sx}, τ_{sy})	Les composantes x et y des contraintes de cisaillement du vent de surface	(τ_{bx}, τ_{by})	Les composantes x et y des contraintes de cisaillement du vent de fond.
u, v	u, v : Les vitesses des courants à la profondeur moyenne	T_{ij}	Les contraintes latérales

III.3. Méthodologie de travail

III.3.1. Génération de la Mesh

Afin d'effectuer une analyse approfondie et réduire les erreurs susceptibles d'affecter les résultats des simulations, nous avons inclus la Marina et le Port d'Alger dans notre zone d'étude. Cette zone s'étend sur une échelle régionale d'environ 15,27 km, allant de Cap Caxine à l'Ouest jusqu'à Cap Matifou à l'Est, en passant par la baie d'Alger. De plus, nous avons également pris en compte une distance de 19 km au nord de la Marina. Cette échelle nous permet de considérer les caractéristiques côtières et les différentes structures présentes à la fois dans la Marina et dans le Port d'Alger, qui pourraient potentiellement influencer les mouvements de l'eau. En prenant en compte les effets hydrodynamiques des vagues dans ces deux zones, nous pourrions obtenir une compréhension plus complète de leur impact sur la Marina et le Port d'Alger.

III.3.1.1. Données bathymétriques d'entrées (Inputs) pour la génération de la Mesh

La bathymétrie utilisée dans le cadre de ce travail est la combinaison de données de trois sources (Données du terrain, NAVIONICS et GEBCO).

La bathymétrie de la baie d'Alger a été obtenue par la digitalisation de la carte publiée par NAVIONICS Sonar Chart™, 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 la Marina et le Port d'Alger, l'ensemble des données bathymétriques ont été disponibles pour l'intérieur des bassins et l'extérieur des ouvrages de protection.

Pour la génération de cette Mesh; la bathymétrie au large (inférieure à -200 m de profondeur) est obtenu à partir de la base de données GEBCO. Cette dernière, a été complétée 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 l'utilisation de la bathymétrie sur Mike 21, le fichier des données a été traité et a nécessité la transformation du shapfile d'ArcMap de la bathymétrie en fichiers XYZ, avec l'outil de conversion d'ArcToolBox du logiciel **ArcGis 10.4** 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,...).

La génération de la Mesh est faite avec un maillage triangulaire imbriqué offrant une précision spatiale accrue pour représenter les caractéristiques locales des deux ports. Cette approche ajuste sélectivement la densité du maillage selon les besoins, garantissant des résultats plus précis dans les zones d'intérêt et optimisant l'utilisation des ressources de calcul. La génération de la Mesh est suivie d'une interpolation ; deux méthodes d'interpolation sont disponibles pour les éléments triangulaires : le voisin le plus proche et l'interpolation linéaire. (DHI, 2014). Dans notre cas, la méthode d'interpolation du voisin le plus proche a été choisie.

III.3.2. Mesh et Bathymétrie résultante

La Mesh utilisée dans notre travail est composée de 9820 éléments triangulaires et de 5391 nœuds; l'espacement entre les nœuds varie de 13 mètres près de la Marina et de 18m près du Port d'Alger à 2 kilomètres au large. Cette résolution permet une représentation détaillée de la topographie et de la bathymétrie dans la zone d'étude. La dégradation du maillage faite sur cinq zones prédéfinies et les zones d'intérêt (Le Port et la Marina d'Alger) sont montrées dans la Figure III-1 et la Figure III-2 respectivement.

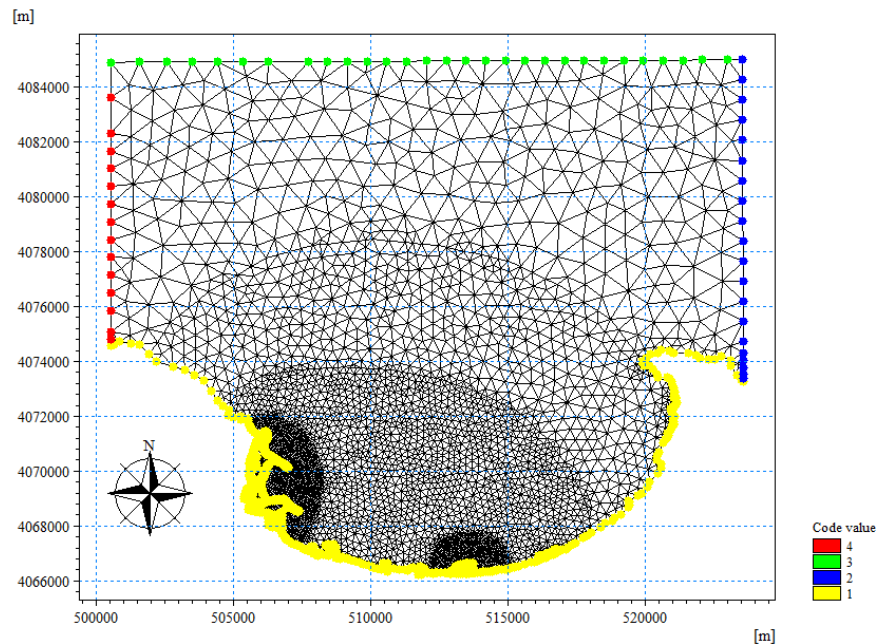


Figure III-1: Maillage de la Mesh à l'échelle de la Baie d'Alger

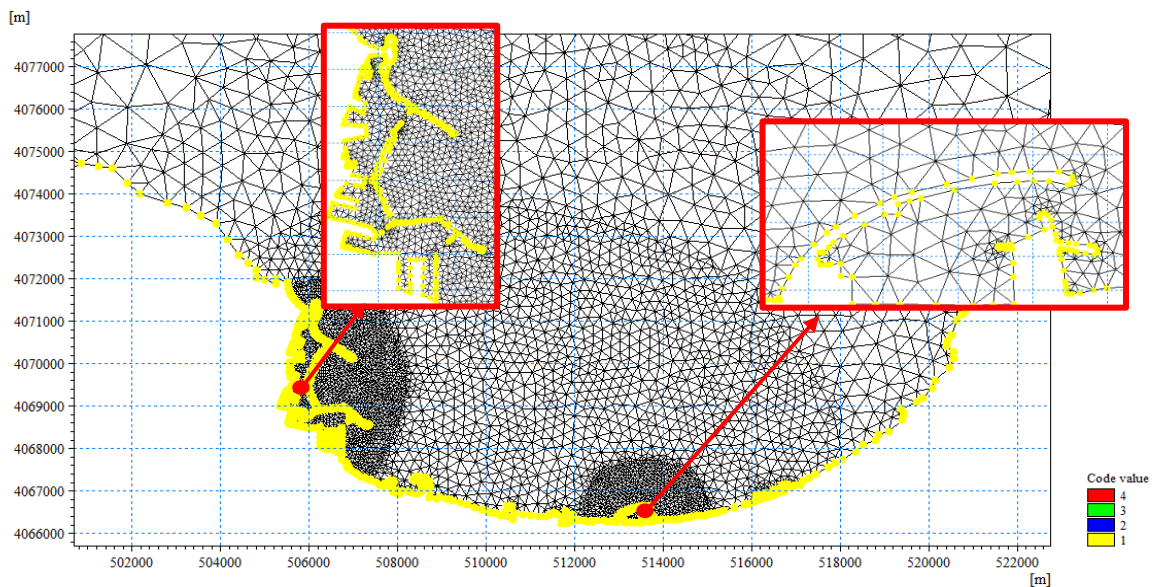


Figure III-2: Maillage de la Mesh à l'échelle du Port et de de la Marina d'Alger

III.3.3. Bathymétrie de la Baie d'Alger

Après l'interpolation de la Mesh, nous avons obtenu la bathymétrie de la zone centre algérienne, s'étendant du trait de côte jusqu'à la pleine abyssale de la méditerranée (Figure III-3).

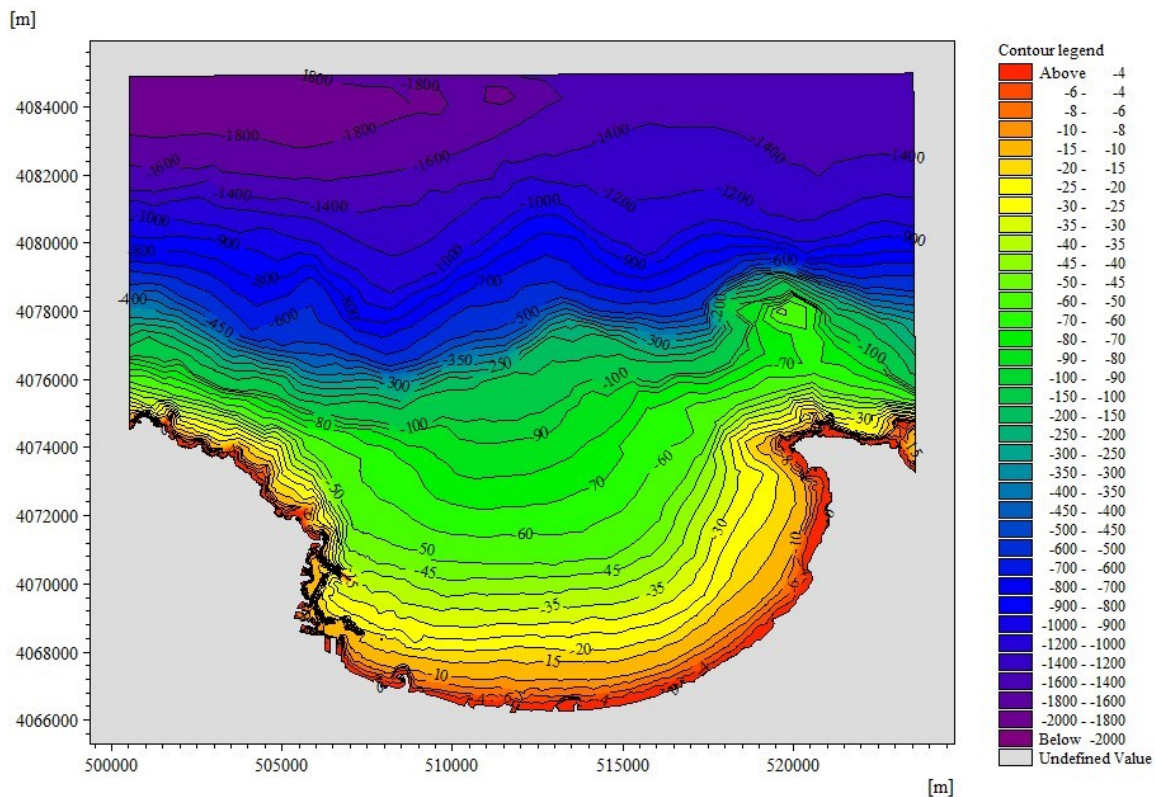


Figure III-3: Bathymétrie de la baie d'Alger

A partir de la carte bathymétrique de la baie d'Alger illustrée dans (Figure III-3), on peut distinguer trois zones différentes de bathymétrie:

- a) **Les zones Est et Ouest**, situées près des caps, sont caractérisées par une forte pente en raison de la géomorphologie des caps, qui sont constitués d'une lithologie plus dure et plus résistante (falaises). De plus, les effets hydrodynamiques créent des zones à fort potentiel énergétique, car les orthogonales de la houle convergent près des caps. Le passage de la côte à l'isobathe -50 m se fait sur une petite distance de part et d'autre de la baie d'Alger.
- b) **La zone centrale de la baie d'Alger** a une pente généralement faible, due à la lithologie friable et meuble de cette partie (présence de plages sablonneuses alimentées par les apports terrigènes des deux oueds de la baie) et aux effets de la houle qui sont moins énergétiques dans cette zone.
- c) **Le large de la baie d'Alger**, dans cette partie on observe la fin du plateau continental juste après la sortie de la baie, ce qui se traduit par des isobathes serrées.

III.3.4. Bathymétrie de la Marina d'Alger

L'intérieur de la Marina: La bathymétrie de la zone entre la digue et la contre-digue révèle des isobathes moyennement régulières et parallèles à la côte, avec des profondeurs variant de 0,5 à 2 m. Cela indique un fond régulier et une pente douce. Dans l'ensemble du bassin, les profondeurs varient de $-0,8\text{ m}$ à $-5,2\text{ m}$ au niveau de la passe d'entrée et au milieu du plan d'eau. Les profondeurs les plus faibles ($-0,8$ à -2 m) se trouvent au niveau de l'enracinement, ceci qui peut être expliqué par la géomorphologie du bassin. La bathymétrie dans le reste du bassin est caractérisée par une pente douce.

L'extérieur de la Marina: La partie externe de la jetée principale de l'ouvrage présente des isobathes très serrées ($-1,2\text{ m}$ et -6 m), ce qui traduit une pente forte causée par les matériaux de construction et aussi par rapport à la butée, les isobathes sont très car la pente de digue est $2/3$. À l'Est de la Marina, les isobathes sont relativement espacées ($-1,6\text{ m}$ à -6 m), indiquant un fond régulier et une pente douce en raison de la jetée secondaire qui bloque le transport sédimentaire longitudinal venant de l'Est vers l'Ouest à son niveau; ce qui crée une zone d'accumulation et forme une nouvelle plage. À l'Ouest de la Marina, les isobathes sont également espacées (de $-1,6\text{ m}$ à -10 m), reflétant un fond régulier avec une pente douce en raison de l'apport sédimentaire de l'Oued el Harrach plus à l'Ouest qui alimente cette région et a remplacé le piégeage de sédiments du côté Est, empêchant ainsi l'érosion de la plage Ouest.

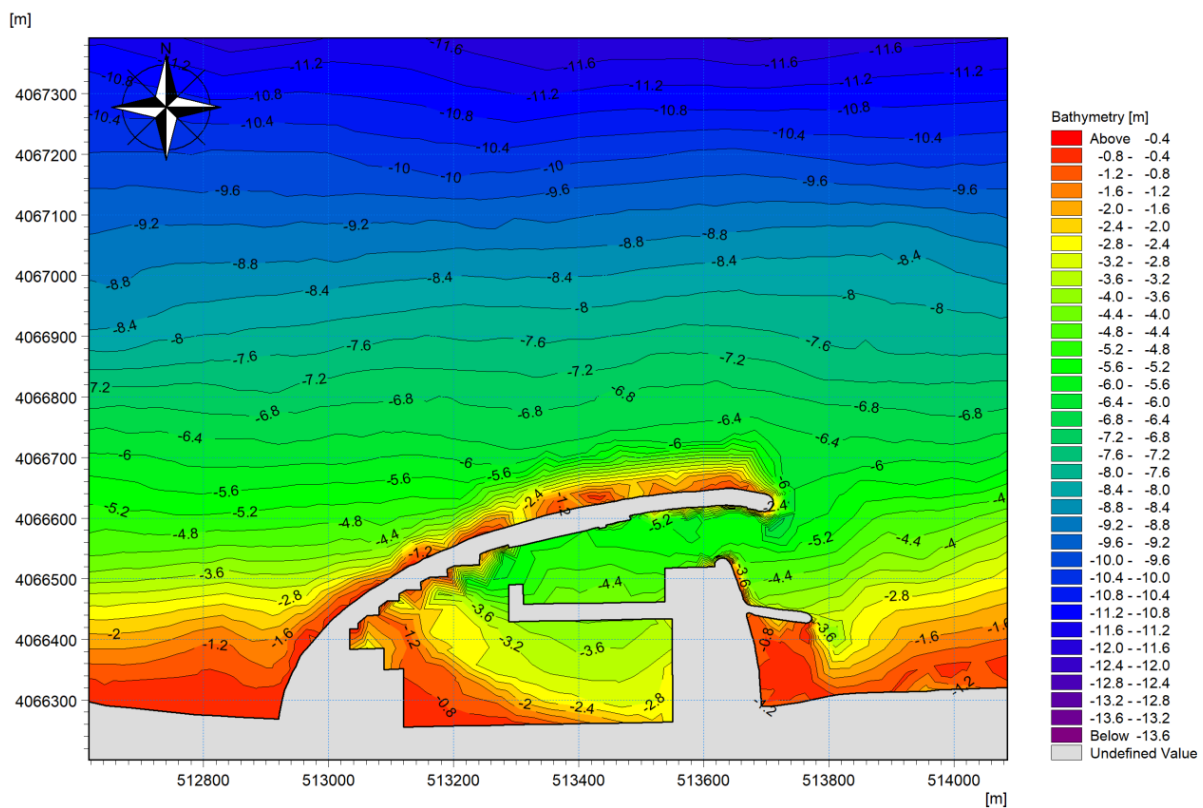


Figure III-4: Bathymétrie de la Marina d'Alger

III.3.5. Bathymétrie du Port d'Alger:

A partir de la Figure III-5, on peut diviser la bathymétrie du port en deux parties distinctes:

L'extérieur du port: la zone entre la jetée Khireddine et celle de Mustapha présente des isobathes réguliers et parallèles à la côte, avec des profondeurs allant de $-15m$ à $-30m$, avec un chenal d'accès situé à une profondeur de $-30m$, ce qui indique un fond régulier et une pente douce.

L'intérieur du port: il peut être divisé en trois parties :

Le Bassin du Vieux Port : Ce bassin est accessible par la Passe Nord et se trouve entre la jetée Khireddine et celle du Vieux Port. La bathymétrie dans cette zone varie de $-8m$ avec des isobathes serrés près des quais à $-20m$ avec des isobathes plus réguliers et espacés au milieu du bassin avec un tirant d'eau de $-10 m$ de profondeur pour accueillir de grands navires. La diminution de la profondeur près des quais peut être expliquée par l'ensablement de ce bassin.

Le Bassin de l'Agha : Ce bassin est accessible par la Passe Sud et est protégé par la jetée de l'Agha. Les profondeurs dans cette zone varient de $-6 m$ avec des isobathes serrés près des quais à $-12m$ avec des isobathes plus réguliers et espacés au milieu du bassin. La diminution de la profondeur près des quais est due à l'ensablement de ce bassin.

Le Bassin Mustapha : Ce bassin est également accessible par la Passe Sud et est protégé par la jetée Mustapha et la jetée brise-lame Est de Mustapha. Les profondeurs dans ce bassin varient de $-4m$ avec des isobathes serrés près des quais à $-15m$ avec des isobathes plus réguliers et espacés au milieu du bassin. Il y a un chenal d'accès de $-15m$ pour accueillir des navires de taille moyenne. La diminution de la profondeur près des quais est due à l'ensablement de ce bassin.

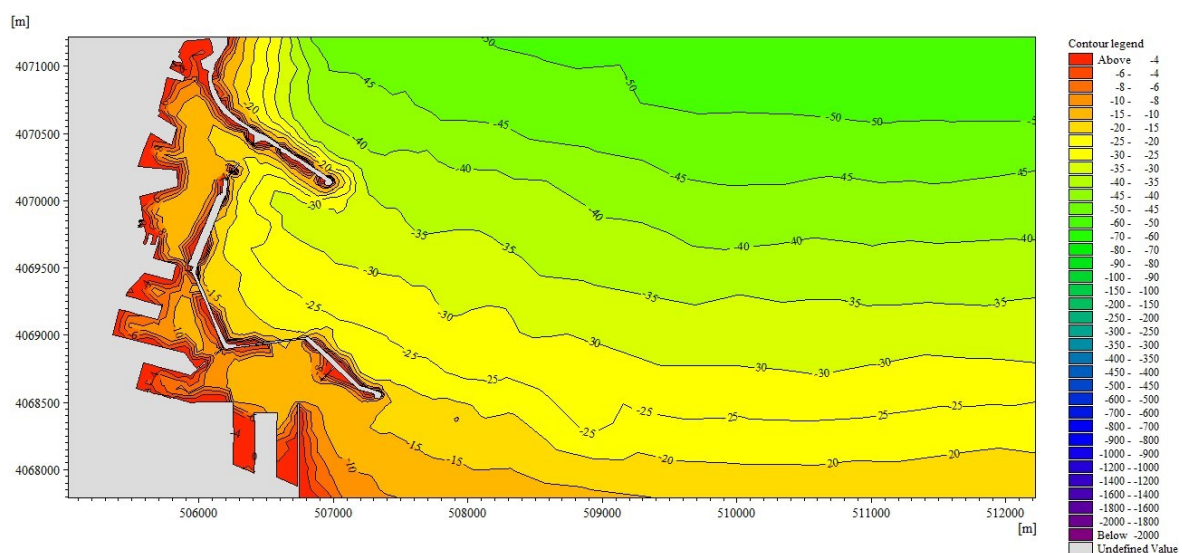


Figure III-5 : Bathymétrie du Port d'Alger

III.4. Directions pénalisantes

Dans le cadre de la modélisation de l'hydrodynamisme de la zone d'étude: la Baie d'Alger, en particulier les ports sélectionnés, le Port et la Marina d'Alger, on a analysé la base de données Infoplaza sur le climat des vagues. On a pu identifier les quatre directions les plus susceptibles d'influencer l'évolution et la stabilité des structures portuaires (NNW, N, NNE, NE) correspondant aux périodes de retour de 2 ans, 10 ans, 30 ans et 100 ans.

Pour faciliter l'interprétation des résultats, on a choisi deux points d'extraction situés à 20 m de la digue principale de la Marina et l'autre à 40 m de la jetée Khireddine du Port d'Alger, aux coordonnées (x, y) mentionnées dans le Tableau III-5 et illustrés dans la Figure III-6 et la Figure III-7.

Tableau III-5: Cordonnées (x; y) des deux points extraits

Coordonnées (X, Y)	Marina d'Alger	Port d'Alger
X (m)	513550	506978
Y (m)	4066668	4070210



Figure III-6: Point extrait à la Marina d'Alger



Figure III-7: Point extrait au Port d'Alger

III.5. Simulations et résultats

III.5.1. Scénarios de simulation

Après avoir identifié les directions pénalisantes et calculé les événements extrêmes dans le chapitre précédent, on a adopté une méthode consistant à associer la plus grande hauteur de houle aux quatre directions pénalisantes (NNW, N, NNE, NE) associés à ces périodes de retour d'événement (2 ans, 10 ans, 30 ans et 100 ans). On a également pris en compte l'élévation du niveau marin (rapport du GIEC 2019), (Amara, L., Chalal, Y., 2022). Les résultats obtenus pour les houles sur ces quatre directions sont présentés dans le Tableau III-6.

Note

- Un vent constant été associé pour chaque direction pour toutes les modélisations.
- Les vitesses et directions moyennes du vent mentionnées dans le Tableau III-6 ont été obtenues après le traitement de la base de données Infoplaza sur le climat des vagues avec des enregistrements allant de 1992 à 2022 dans la baie d'Alger.
- La détermination de la probabilité d'occurrence des couples vents/houles, appelée communément la probabilité conjointe ou croisée est la méthode qui a été utilisée pour éviter la surestimation de résultats due au couplage d'un vent d'une période de retour avec une houle de la même période de retour. (Abid et al 2020).

Tableau III-6: Inputs des simulations pour l'ensemble des périodes de retours

Périodes de retour (années)	Paramètres du vent	Paramètres de la houle					Niveau de la mer (m)
		NW	NNW	N	NNE	NE	
		U10 (m/s)	5.53	5.29	6.61	4.1	5.37
	DirU10 (°)	231.94	226.49	359.8	141.49	107.62	
2	Hs (m)	4.24	4.15	4.25	4.64	3.34	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
	Tp (s)	8.51	8.34	9.46	8.73	8.39	
5	Hs (m)	4.88	4.73	4.93	5.3	3.86	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
	Tp (s)	8.4	8.72	9.59	10.53	8.37	
10	Hs (m)	5.36	5.16	5.44	5.81	4.25	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
	Tp (s)	9.75	8.75	11.58	11.57	7.95	
20	Hs (m)	5.85	5.6	5.95	6.31	4.64	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
	Tp (s)	9.56	9.56	10.49	11.56	8.76	
30	Hs (m)	6.13	5.86	6.25	6.61	4.87	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0.25 m Totale = 0.59 m
	Tp (s)	9.13	8.69	11.04	11.54	8.76	
50	Hs (m)	6.49	6.18	6.63	6.98	5.16	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0.30 m Totale = 0.64 m
	Tp (s)	9.54	9.12	11.04	11.61	9.13	
100	Hs (m)	6.97	6.62	7.14	7.49	5.56	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0.45 m Totale = 0.79 m
	Tp (s)	9.54	9.33	10.48	11.89	10.56	
1000	Hs (m)	8.58	8.08	8.85	9.16	6.86	NGA = +0.34 m Elévation futur = 1 m Totale = 1.34 m
	Tp (s)	10.53	9.54	11.06	12.4	11.95	

Après les simulations effectuées sur la Marina et le Port d' Alger, les résultats sont représentés sous forme de tableaux comparatifs (Tableau III-7 et Tableau III-8) des quatre directions pénalisantes prises en compte. Ces tableaux donnent des informations sur les paramètres de sortie suivants:

- La Hauteur significative de la houle (Significant wave Height, Hs)
- La période pic des houles (Peak wave Period).
- La direction Moyenne de la houle (Mean wave Period).
- L'Energie de la houle (Wave Power)

Tableau III-7 : Résumé des résultats de simulations de la houle pour le Port d'Alger

Situation des points d'extraction des caractéristiques de la houle			Port d'Alger				
			Point à 40 m du pied de l'ouvrage X = 506978 m ; Y = 4070210 m				
Directions simulées	Période de retour	Hs au large (m)	Hs (m) au pied de l'ouvrage	Coefficient de Shoaling (%)	Tp (s)	Direction Moyenne de la houle (°)	Energie de la houle (KW/m)
NNW (337.5°)	2 ans	4.15	2.34	56.39	8.39	8.19	22.70
	10 ans	5.16	2.96	57.36	8.72	9.12	37.66
	30 ans	5.86	3.53	60.24	8.66	9.60	55.60
	100 ans	8.08	3.81	47.15	9.34	10.31	65.93
N (360°)	2 ans	4.25	3.13	73.65	9.36	16.66	45.51
	10 ans	5.44	4.05	74.45	11.41	17.64	86.5
	30 ans	6.25	4.42	70.72	11.11	17.92	102.35
	100 ans	7.14	4.93	69.05	10.41	17.95	124.14
NNE (22.5°)	2 ans	4.64	3.54	76.29	8.74	24.90	56.15
	10 ans	5.81	4.68	80.55	11.41	25.14	118.30
	30 ans	6.61	5.11	77.30	11.41	25.20	142.48
	100 ans	7.49	5.7	76.10	11.99	25.25	181.44
NE (45°)	2 ans	3.34	2.53	75.75	8.41	34.94	27.52
	10 ans	4.25	3.07	72.24	8.09	34.14	39.10
	30 ans	4.87	3.45	70.84	8.84	33.82	53.52
	100 ans	5.56	4.08	73.38	10.46	33.35	84.97

Tableau III-8 : Résumé des résultats de simulations de la houle pour la Marina d'Alger

Situation des points d'extraction des caractéristiques de la houle			Marina d'Alger				
			Point à 20 m du pied de l'ouvrage X = 513550 m ; Y = 4066668 m				
Directions simulées	Période de retour	Hs au large (m)	Hs (m) au pied de l'ouvrage	Coefficient de Shoaling (%)	Tp (s)	Direction Moyenne de la houle (°)	Energie de la houle (KW/m)
NNW (337.5°)	2 ans	4.15	2.19	52.77	8.46	349.51	26.03
	10 ans	5.16	2.31	44.77	8.92	350.54	19.77
	30 ans	5.86	2.32	39.59	8.80	351	20.07
	100 ans	8.08	2.35	29.08	9.42	351	20.78
N (360°)	2 ans	4.25	2.33	54.82	9.39	356.45	20.29
	10 ans	5.44	2.49	45.77	11.42	356.46	23.87
	30 ans	6.25	2.47	39.52	11.14	356.40	23.41
	100 ans	7.14	2.43	34.03	10.48	356.32	22.67
NNE (22.5°)	2 ans	4.64	2.22	47.84	8.74	2.79	17.69
	10 ans	5.81	2.49	42.86	11.40	2.46	23.76
	30 ans	6.61	2.50	37.82	11.41	2.21	23.91
	100 ans	7.49	2.53	33.78	11.98	2	24.59
NE (45°)	2 ans	3.34	1.75	52.40	8.41	8.54	9.81
	10 ans	4.25	1.86	43.76	8	7.73	11.31
	30 ans	4.87	2.02	41.48	8.75	7.78	13.98
	100 ans	5.56	2.22	39.93	10.46	7.63	17.93

III.5.2. Interprétation des résultats

Après les simulations, les résultats sont représentés sous forme de cartes légendées (Figure III-8, Figure III-9, Figure III-10 et Figure III-11 de la direction NNE) associés aux périodes de retour (2 ans, 10 ans, 30 ans et 100 ans)

III.5.2.1. Période de retour 2ans

Les résultats obtenus sont représentés dans la Figure III-8.

On remarque que les houles au large de la Baie conservent plus de 95 % de leur hauteur initiale de 4.64 m aux frontières du modèle en raison de la grande profondeur d'eau près de la baie d'Alger, qui n'affecte pas les caractéristiques de la houle.

Au voisinage de la côte, les caractéristiques hydrodynamiques de la houle (sa hauteur et sa puissance initiale de 83 KW/m) commencent à diminuer progressivement en raison de la morphologie sous-marine de la baie. Elle se caractérise par une réduction de la profondeur, l'onde de houle est alors freinée par le fond. Elle subit une forte déviation due à la diffraction et à la réfraction lorsqu'elle rencontre des obstacles ; ce qui entraîne la perte progressive de son énergie ; il est aussi observé que toutes les houles arrivent au pied de l'ouvrage avec une direction Nord dans la marina et de direction Nord-Nord-Est dans le port. Cette observation s'explique par la présence d'orthogonales perpendiculaires aux isobathes.

Les houles atteignent la base de la structure de la Marina avec une hauteur d'environ 2,22 m, et un coefficient de shoaling de 0,48, cela est due généralement à la diffraction de la houle par le Cap Matifou suivi par la diminution de la bathymétrie à la côte.

Les houles provenant de cette direction attaquent obliquement le port d'Alger ; les hauteurs qui atteignent l'ensemble des jetées sont plus importantes avec des hauteurs d'environ 3.5m et un coefficient de shoaling de 0.76 contrairement à celles enregistrées au niveau de la marina.

En ce qui concerne la courantologie de la zone, la direction d'incidence des vagues joue un rôle important dans la génération des courants dans les zones peu profondes près de la côte. Les houles prévenantes de cette direction engendrent un courant littoral de direction Est-Ouest avec une vitesse moyenne d'environ 0.33 m/s le long de la côte.

La simulation de houles de ce secteur avec une période de retour de 2 ans, montre que ces houles affectent directement les jetées principales du port d'Alger contrairement à la Marina qui reste protégée contre les assauts des houles et des courants, bien qu'une diffraction de la houle sur le musoir soit observée.

III.5.2.2. Période de retour 10 ans

Les résultats obtenus sont représentés dans la Figure III-9.

D'après les résultats obtenus, on observe que les houles au large de la Baie conservent plus de 93 % de leur hauteur initiale de 5.81 m aux frontières du modèle.

Au voisinage de la côte, ses caractéristiques hydrodynamiques, telles que la hauteur et la puissance initiale de 170 KW/m, diminuent progressivement en raison de la friction avec le fond qui freine l'onde de la houle et la dévie en raison de la diffraction et de la réfraction lorsqu'elle rencontre des obstacles, ce qui contribue à la perte progressive de son énergie.

Les houles atteignent la base de la structure de la Marina avec une hauteur d'environ 2,49 m, et un coefficient de shoaling de 0,43, cela est due généralement à la diffraction de la houle par le Cap Matifou suivi par la diminution de la bathymétrie à la côte.

Les houles provenant de cette direction attaquent obliquement le port d'Alger ; les hauteurs qui atteignent l'ensemble des jetées sont plus importantes avec des hauteurs d'environ 4.68 m et un coefficient de shoaling de 0.81 contrairement à celles enregistrées au niveau de la marina.

La courantologie de la zone générée par ces houles et le vent, de période de retour 10 ans, est pratiquement similaire à celle décrite précédemment pour les houles de période de retour 2 ans avec une vitesse moyenne d'environ 0.35 m/s le long de la côte.

Ces observations nous permettent de conclure que la courantologie de la zone n'est pas influencée par les variations de hauteur et de période de la houle au large.

III.5.2.3. Période de retour de 30 ans

Les résultats obtenus sont représentés dans la Figure III-10.

D'après les résultats obtenus, on observe que les houles au large de la Baie conservent plus de 92 % de leur hauteur initiale de 6.61 m aux frontières du modèle.

Au voisinage de la cote, les caractéristiques hydrodynamiques la houle (la hauteur et la puissance initiale de 220 KW/m), diminuent progressivement en raison de la friction avec le fond qui contribue à la perte progressive de son énergie. Il est aussi observé que toutes les houles arrivent au pied de l'ouvrage avec une direction Nord dans la marina et de direction Nord-Nord-Est dans le port.

Les houles atteignent la base de la structure de la Marina avec une hauteur d'environ 2,50 m, et un coefficient de shoaling de 0.38, cela est due généralement à la diffraction de la houle par le Cap Matifou suivi par la diminution de la bathymétrie à la côte.

Les houles provenant de cette direction attaquent obliquement le port d'Alger ; les hauteurs qui atteignent l'ensemble des jetées sont plus importantes avec des hauteurs d'environ 5.11 m et un coefficient de shoaling de 0.77 contrairement à celles enregistrées au niveau de la marina.

En ce qui concerne la courantologie de la zone, les courants littoraux créés suite au vent et aux champs de houles de direction Nord-Nord-Est sont de direction Est-Ouest avec une vitesse moyenne d'environ 0.4 m/s le long de la côte

Ces observations nous permettent de conclure que la courantologie de la zone n'est pas influencée par les variations de hauteur et de période de la houle au large.

III.5.2.4. Période de retour de 100 ans

Les résultats obtenus sont représentés dans la Figure III-11.

D'après les résultats obtenus, on observe que les houles au large de la Baie conservent plus de 91 % de leur hauteur initiale de 7.49 m aux frontières du modèle.

Au voisinage de la cote, les caractéristiques hydrodynamiques de la houle (la hauteur et la puissance initiale de 292 KW/m), diminuent progressivement en raison de la friction avec le fond qui freine l'onde de la houle et la dévie en raison de la diffraction et de la réfraction lorsqu'elle rencontre des obstacles, ce qui contribue à la perte progressive de son énergie

En ce qui concerne la Marina, les houles arrivent avec une hauteur d'environ 2,53 m, et un coefficient de shoaling de 0.34, cela est due généralement à la diffraction de la houle par le Cap Matifou suivi par la diminution de la bathymétrie à la côte.

Du côté du Port, les houles provenant de cette direction attaquent obliquement le port. Les hauteurs atteintes par ces houles sur l'ensemble des jetées sont plus importantes que les hauteurs observées près de la Marina, avec une hauteur d'environ 5.7 m et un coefficient de shoaling de 0.76.

En ce qui concerne les courants dans la zone, les courants créés suite au vent et aux champs de houles de direction Nord-Nord-Est sont de direction Est-Ouest avec une vitesse moyenne plus importante que les autres périodes de retour, elle est d'environ 0.45 m/s le long de la côte.

À partir de ces observations, on peut conclure que la courantologie de la zone n'est quasiment pas affectée par les variations de hauteur et de période des vagues au large.

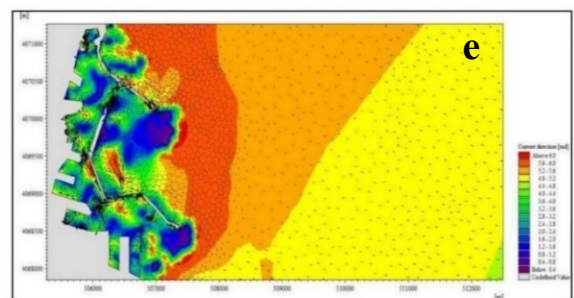
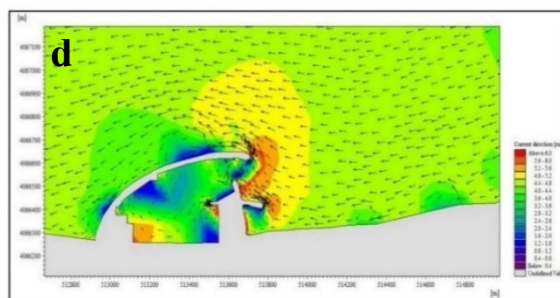
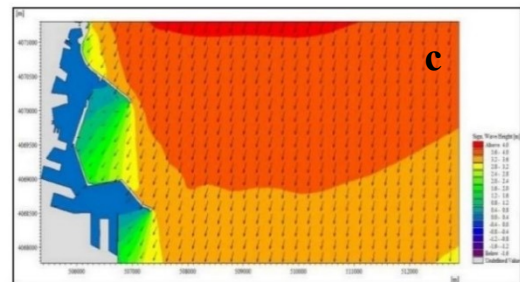
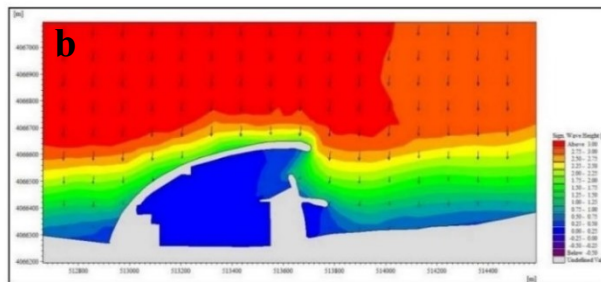
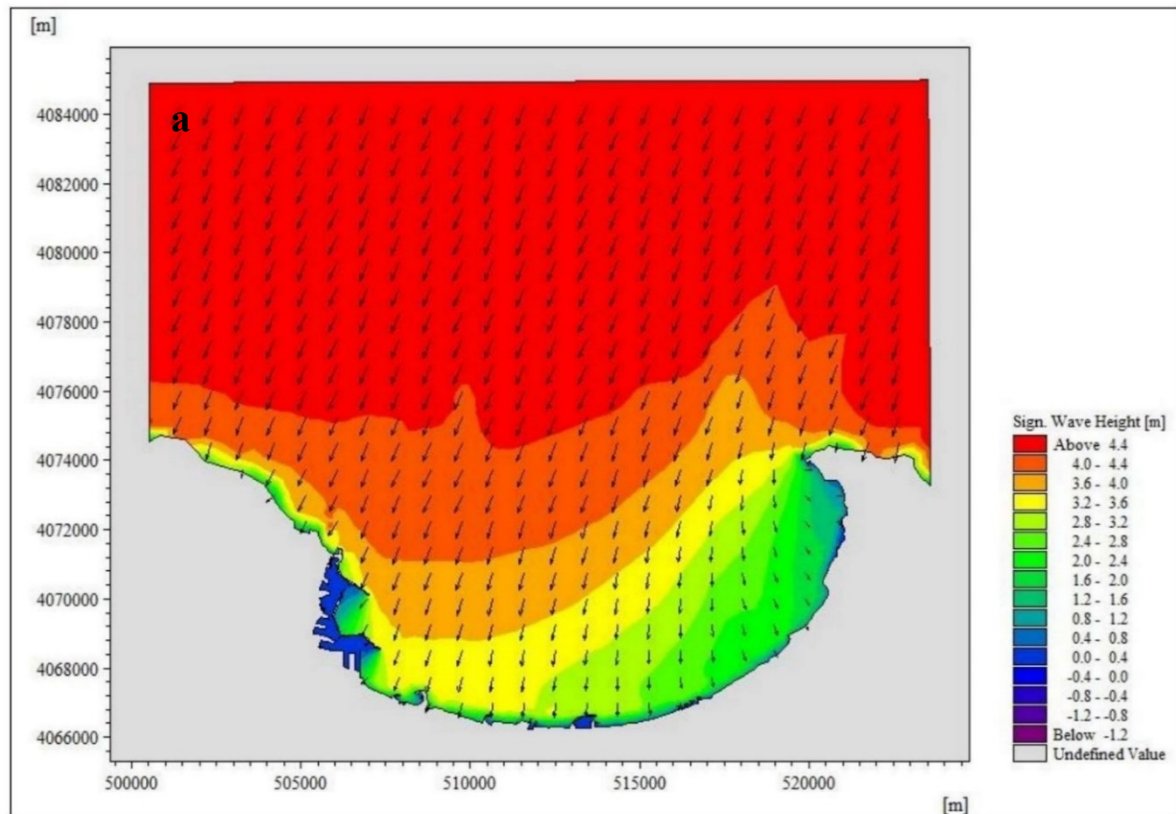


Figure III-8: Champs des houles et direction de courants de direction NNE (période de retour 2 ans)

- a) Vue d'ensemble des champs de houles de direction NNE dans la Baie d'Alger.
- b) Champs de houles de direction NNE dans la Marina d'Alger.
- c) Champs de houles de direction NNE dans le Port d'Alger.
- d) Direction des courants de direction NNE à proximité de la Marina d'Alger.
- e) Direction des courants de direction NNE à proximité du Port d'Alger.

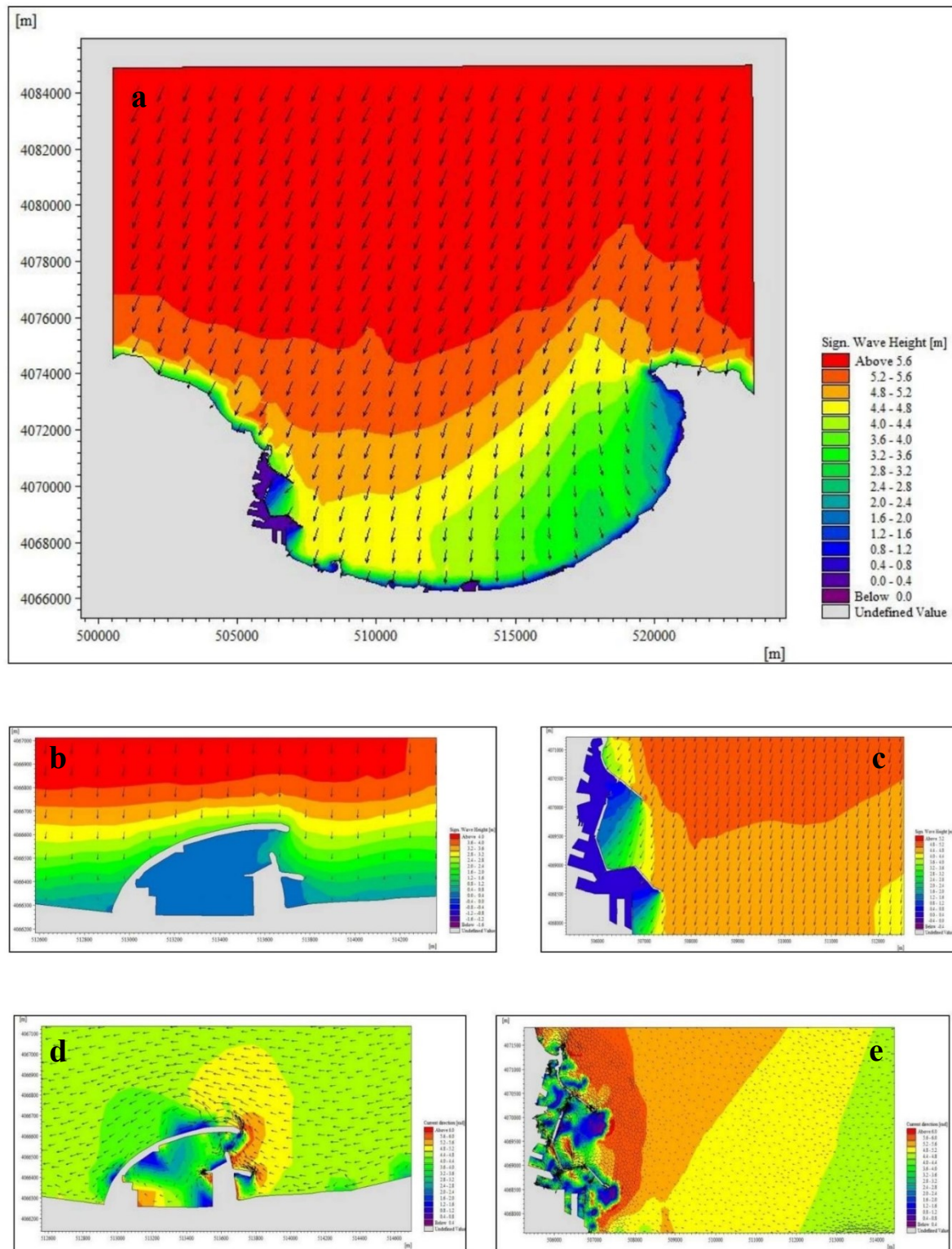


Figure III-9 : Champs des houles et direction de courants de direction NNE (période de retour 10 ans)

- a) Vue d'ensemble des champs de houles de direction NNE dans la Baie d'Alger.
- b) Champs de houles de direction NNE dans la Marina d'Alger.
- c) Champs de houles de direction NNE dans le Port d'Alger.
- d) Direction des courants de direction NNE à proximité de la Marina d'Alger.
- e) Direction des courants de direction NNE à proximité du Port d'Alger.

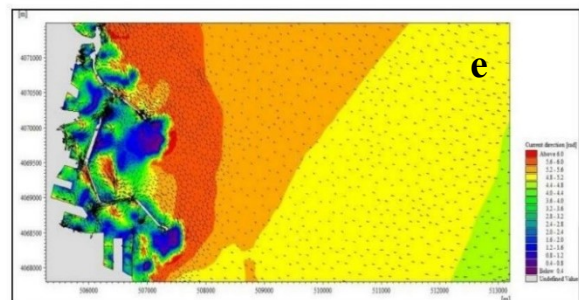
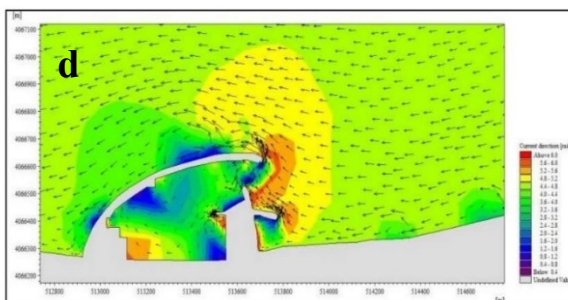
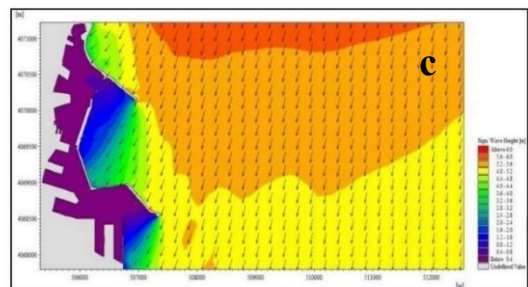
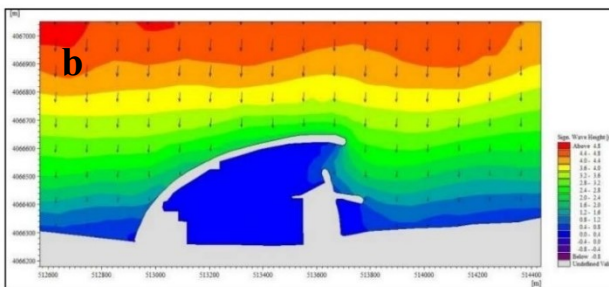
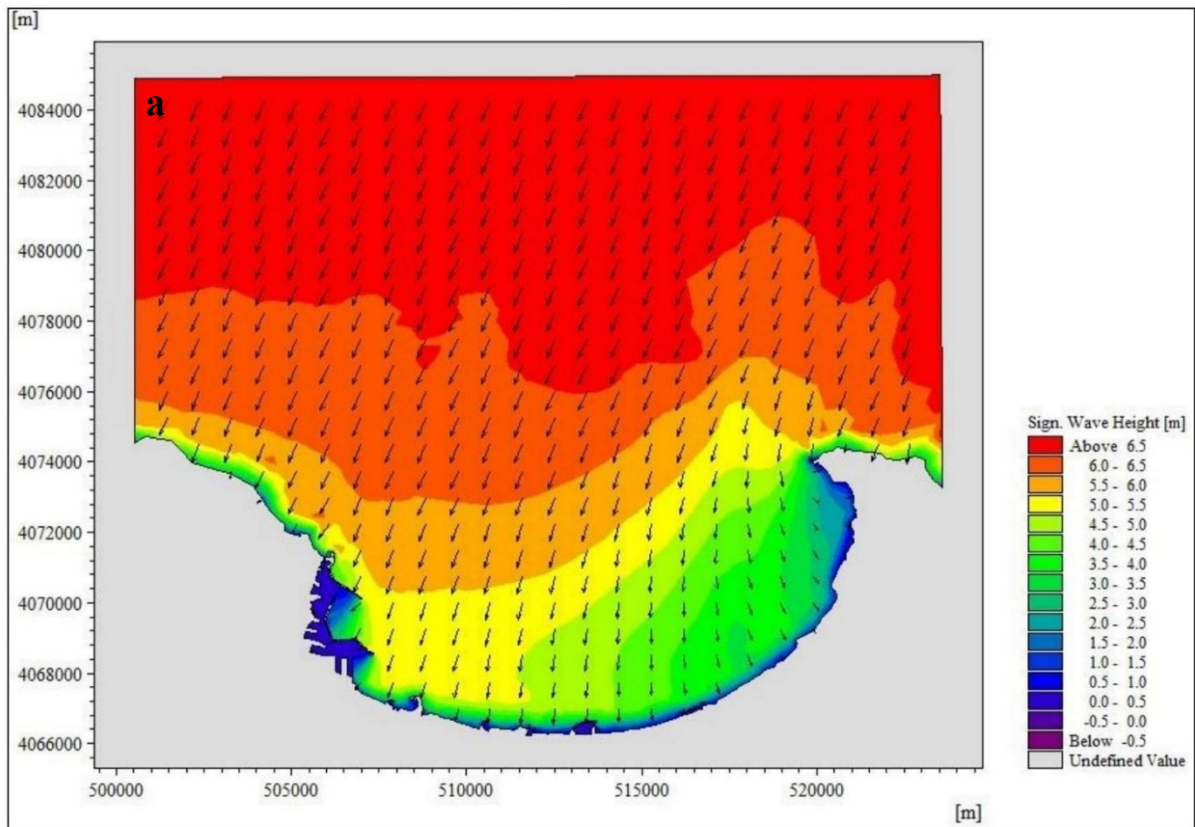


Figure III-10 : Champs des houles et direction de courants de direction NNE (période de retour 30 ans)

- a) Vue d'ensemble des champs de houles de direction NNE dans la Baie d'Alger.
- b) Champs de houles de direction NNE dans la Marina d'Alger.
- c) Champs de houles de direction NNE dans le Port d'Alger.
- d) Direction des courants de direction NNE à proximité de la Marina d'Alger.
- e) Direction des courants de direction NNE à proximité du Port d'Alger.

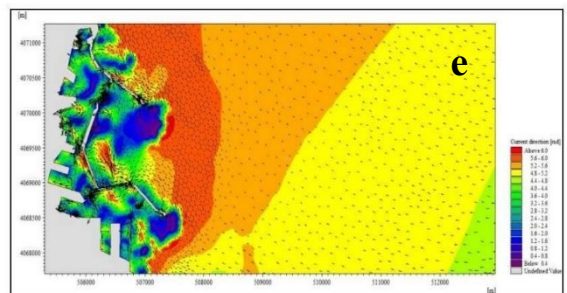
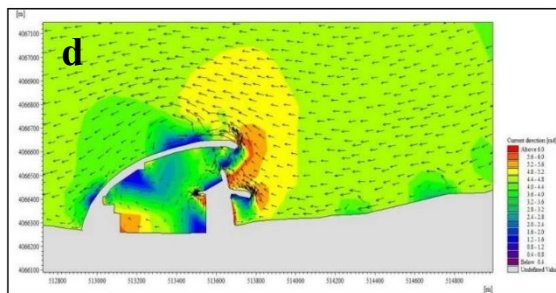
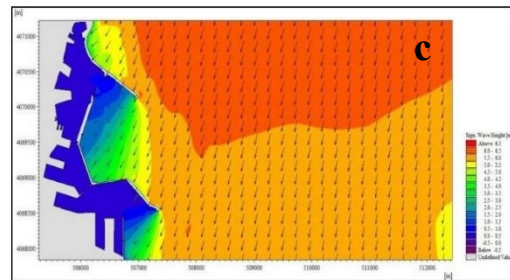
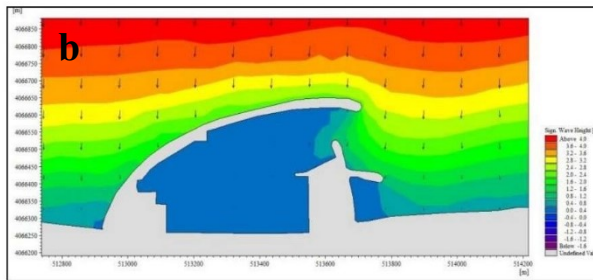
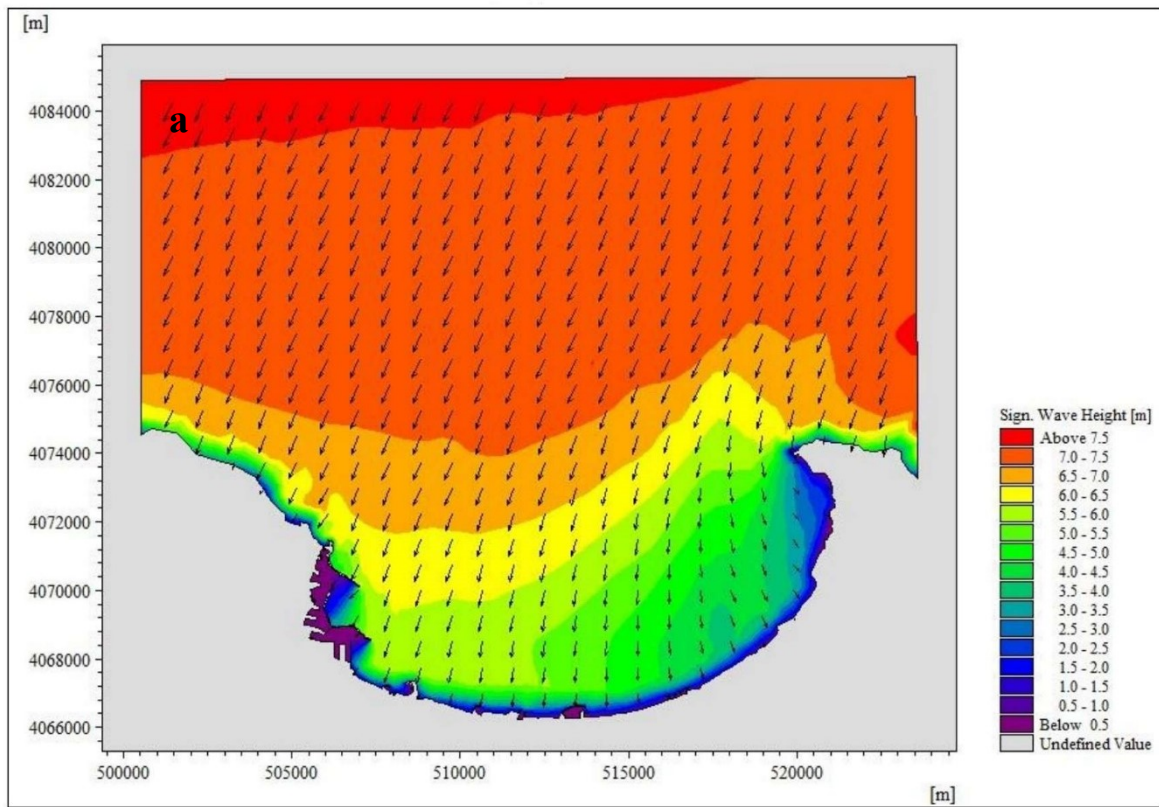


Figure III-11 : Champs des houles et direction de courants de direction NNE (période de retour 100 ans)

- f) Vue d'ensemble des champs de houles de direction NNE dans la Baie d'Alger.
- g) Champs de houles de direction NNE dans la Marina d'Alger.
- h) Champs de houles de direction NNE dans le Port d'Alger.
- i) Direction des courants de direction NNE à proximité de la Marina d'Alger.
- j) Direction des courants de direction NNE à proximité du Port d'Alger.

III.6. Conclusion

Grâce à la modélisation numérique, nous avons pu identifier les directions de houle les plus défavorables, à savoir le Nord-Nord-Ouest, le Nord, le Nord-Nord-Est et le Nord-Est.

On a pu constater que la morpho-bathymétrie de la baie d'Alger joue un rôle primordial dans la réduction significative des hauteurs de houle atteignant les structures côtières.

Au niveau de la Marina, la réduction des hauteurs de houle a atteint plus de 55 % pour les vagues de grande amplitude. De plus, l'effet du fond sur les houles fait que leur direction dans la zone de la marina est principalement Nord.

Au niveau du Port, la réduction des hauteurs de houles a été moins importante et a n'atteint qu'environ 20 % pour les vagues de grande amplitude.

Du point de vue de la courantologie, il semble que les événements extrêmes n'affectent pas la vitesse locale des courants, qui reste similaire pour de nombreuses configurations du climat simulé. Cependant, la direction d'incidence des houles exerce une influence significative sur la courantologie, avec plusieurs directions d'écoulement et des couloirs générés. L'impact le plus remarquable est celui des houles venant du Nord-Nord-Est, qui engendrent des courants circulaires de part et d'autre de la marina et du Port. Les vitesses de courant enregistrées varient entre 0,3 m/s et 0,45 m/s.

Les simulations montrent que les deux bassins « La marina et le Port d'Alger » sont bien protégés, car même lors des événements les plus extrêmes, les hauteurs de la houle restent très réduites à l'entrée de la passe d'entrée.

Dans le port, elles varient entre 0.3 m à 0.6m pour l'ensemble des périodes de retour ; et entre 0.4 m et 0.7 m juste à l'entrée de la passe d'entrée pour la marina.

Chapitre IV. Dimensionnement des digues

IV.1. Introduction

Les infrastructures littorales ont pour objectif de prévenir les problèmes liés à l'érosion du littoral, aux inondations à l'arrière-côte, ainsi que de protéger les ports et les voies de navigation contre les effets des vagues (attaques directes, franchissements, submersions). Par conséquent, il est crucial de comprendre les caractéristiques du site d'implantation et les facteurs hydrodynamiques associés. Pour assurer la durabilité et l'efficacité de ces structures face aux houles extrêmes, il est essentiel d'optimiser leur dimensionnement. Dans ce chapitre, on va déterminer les méthodes utilisées dans le dimensionnement des digues à talus et des digues verticales. (Amara, L., Chalal, Y. (2022)).

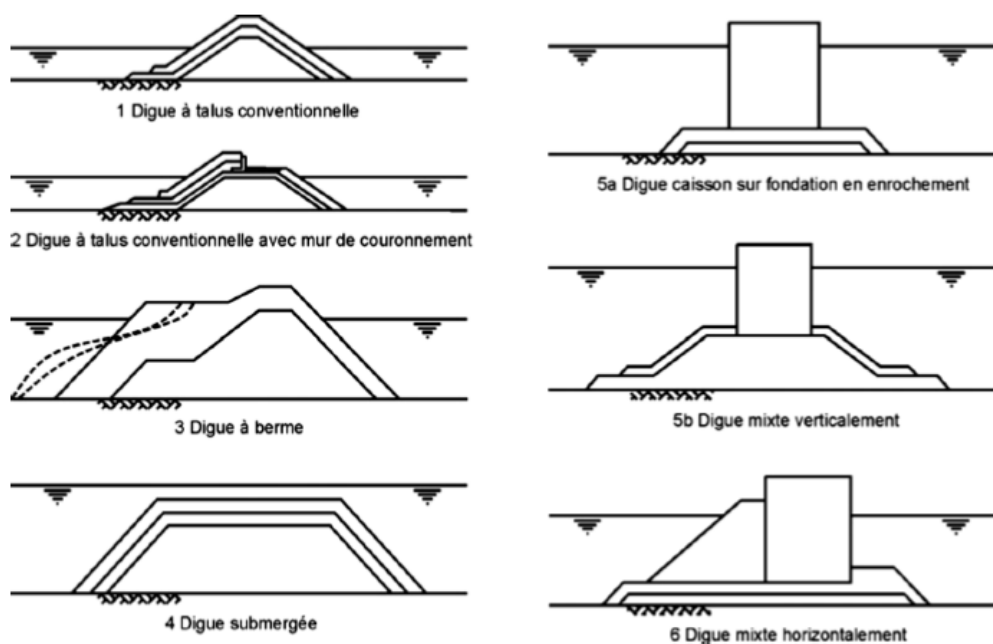


Figure IV-1: Coupes-types des différents types de digues (CETMEF).

D'une manière traditionnelle, on peut classer ces structures en

1. Digues (jetées) qui se subdivisent en:
 - a. Digues à talus (brise-lames) : construites généralement en enrochements naturels ou artificiels (béton);
 - b. Digues verticales dont la paroi exposée à la houle peut être perméable ou non;
2. Ouvrages spéciaux: employés dans des conditions spécifiques.

IV.2. Digues à talus

Les digues à talus sont des ouvrages constitués de matériaux naturels rocheux provenant de carrières ou de blocs artificiels en béton, arrangés globalement sous forme d'un trapèze. Ces digues opposent à la progression de la houle une résistance d'autant plus efficace que le massif sera élevé et peu poreux et mettent à la disposition des navires des eaux calmes pour l'amarrage ou le mouillage, à l'abri de la houle ou des courants.

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

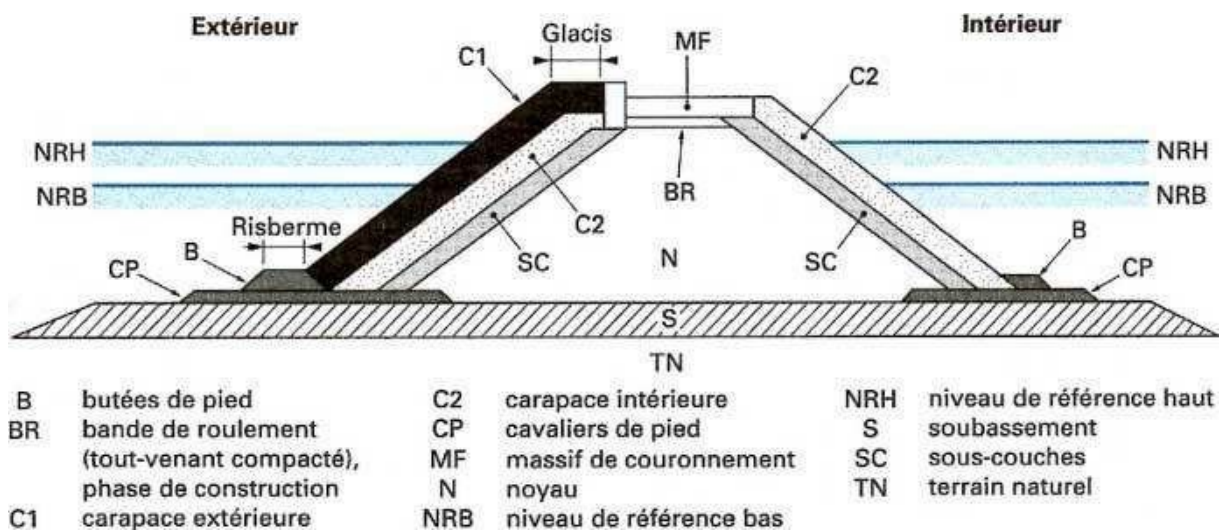


Figure IV-2: Coupe type des éléments constitutifs d'une digue à talus.

IV.2.1. Composantes des digues à talus

- **Soubassement:** la mise en place d'une digue à talus en grandes profondeurs requiert la mise d'un soubassement sur laquelle assier le corps de la digue en le surélevant de façon à économiser le cout en utilisant des matériaux provenant du site. Leur poids dépend de l'hydrodynamisme et la stabilité de l'ouvrage. (SHARP, N et al 1997).
- **Cavaliers de pied:** Ils ont pour but de limiter l'extension latérale du noyau, notamment lorsque celui-ci n'a pas la raideur souhaitée. Ils sont réalisés en enrochements dont la granulométrie est identique à celle des sous-couches. Ils servent de transition entre les éléments de carapace ou la butée de pied et le soubassement. (SHARP, N et al 1997).
- **Butée de pied:** Elle sert de 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 être sous forme d'une simple assise horizontale des blocs de carapace. Dans ces cas, il conviendrait d'adopter plutôt le terme de risberme de pied.
- **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 cout inférieur à celui des autres matériaux constitutifs de la structure proprement dite. (SHARP, N et al 1997).

- **Sous-couche:** Cette couche offre une assise permettant d'obtenir un bon accrochage de la carapace, de retenir le départ des matériaux fins du noyau au travers de couches supérieures. Elle permet également d'amortir progressivement les vitesses d'écoulement de l'eau à l'intérieur de l'ouvrage. Les poids moyens des blocs le composant représente généralement une fraction de celui du bloc de la carapace (SHARP, N et al 1997).
- **Carapace:** elle constitue l'élément clé d'une digue à talus. Elle protège l'ensemble de l'ouvrage de l'action des houles. C'est surtout à l'intérieur de cette couche que s'opère la dissipation de l'énergie de la houle (SHARP, N et al 1997).
- **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.2.2. Dimensionnement des digues à talus

Pour assurer la stabilité des digues à talus face aux attaques de houles, de nombreuses méthodes empiriques d'estimation de la taille requise des enrochements utilisés ont été proposées au cours des 60 dernières années. Les travaux de recherche d'Iribarren (1938), Hudson(1953 – 1958), Hedar (1960 – 1986) et de Van der Meer (1988*b*) ont donné les méthodes de dimensionnement les plus fréquemment utilisées en génie civil. (Rock Manual. CTMEF, 2009).

Dans ce chapitre, les formules de stabilité élaborées par Hudson (1953), Van de Meer (1988*b*) seront détaillées.

Le dimensionnement en utilisant ces deux formules comportera:

1. La détermination du poids, l'épaisseur et le nombre de blocs par mètre carré pour la carapace.
2. La détermination du Poids des filtres et de leurs épaisseurs.
3. La détermination du poids du noyau.

IV.2.2.1. Formule d'Hudson (1977)

Hudson (1977) a développé une équation basée sur des essais sur des modèles réalisés dans des conditions de houle régulière sur des ouvrages en enrochement non-franchis et à noyau perméable. Cette formule est largement reconnue et utilisée pour concevoir des structures de défense côtières et des ouvrages maritimes.

Elle offre une approche pratique en prenant en compte à la fois la pente du talus et l'effet de la houle régulière non déferlante, ce qui en fait un outil précieux pour les digues en enrochements naturels et en tétrapodes. Grâce à une relation empirique bien établie, cette formule donne la relation entre le poids (W_{50}), la hauteur de la houle en pied d'ouvrage, H et les différents paramètres structurels pertinents, une fois que le poids des blocs de la carapace a été efficacement déterminé. Le Tableau IV-1 récapitule les équations utilisées pour le calcul des paramètres géométriques de la carapace

Tableau IV-1 : Résumé des équations utilisées pour le calcul des paramètres géométriques de la carapace

Formules	Variables
$W = \frac{\gamma_s H_b^3}{K_D \left(\frac{\rho_s}{\rho_e} - 1\right)^3 \cot \alpha}$	W : le poids des blocs de carapace, γ_s : Poids volumique des blocs utilisés (naturel ou artificiel), γ_e : Poids volumique de l'eau de mer, Cotα : Angle du talus,
Volume : $V = \frac{W}{\gamma_s}$	K_D : Coefficient de stabilité adimensionnel de HUDSON variant selon le type du bloc, (Pour les Cubipods) : $K_D = 28$: section courante $K_D = 7$: Musoir
Diamètre nominal : $D_{n50} = \sqrt[3]{V}$	g : Accélération de la gravité. H_b : Hauteur de la houle au pied de l'ouvrage,
Epaisseur de la carapace $e = nK_\Delta D_n ; \quad e = nK_\Delta \left(\frac{W}{\gamma_s}\right)^{\frac{1}{3}}$	Δ : $\left(\frac{\rho_s}{\rho_e} - 1\right)$ Densité relative déjaugée des blocs de carapace. ρ_s : Masse volumique du bloc utilisé (naturel ou artificiel), ρ_e : Masse volumique de l'eau de mer
Nombre de blocs par m^2 : $N_s = \frac{n}{D_n^2} ; \quad N_s = nK_\Delta \left(1 - \frac{P}{100}\right) \left(\frac{W}{\gamma_s}\right)^{\frac{2}{3}}$	V : Volume d'un seul bloc, D_n : Diamètre nominale, n : Nombre de couches, e : Epaisseur de la carapace, N_s : Nombre de blocs par unité de surface.
Masse moyenne d'un bloc (cubipod) : $M_{50} = \frac{\rho_s H_b^3}{K_D \left(\frac{\rho_s}{\rho_e} - 1\right)^3 \cot \alpha}$	K_Δ : coefficient de couche, P : Porosité moyenne.

IV.2.2.2. Formule de Van Der Meer

Van der Meer (1988b) a élaboré des formules d'estimation de la stabilité des enrochements sur des talus uniformes (sans berme) en enrochement dont les crêtes dépassent le niveau maximal de run-up. Elles sont basées, entre autres, sur des travaux précédents et sur une grande quantité d'essais sur modèles physiques. Ces formules sont plus complexes que la formule de Hudson mais c'est un grand avantage car elles incluent les effets de la durée de la tempête, de la période de la houle, de la perméabilité de l'ouvrage ainsi qu'un niveau de dommage clairement défini. Les formules distinguent également le déferlement plongeant et le déferlement gonflant.

Condition d'utilisation

- Hauteur d'eau au pied de l'ouvrage $H_{au\ pied} > 3 H_s$ au pied : Eaux profondes.
 - Hauteur d'eau au pied de l'ouvrage $H_{au\ pied} < 3 H_s$ au pied : Eaux peu profondes.
- (H_s au pied de l'ouvrage $\leq 70\%$ de la hauteur de la houle au large : là où le déferlement se produit en grande quantité). (Rock Manual. CTMEF, 2009).

IV.2.2.3. Eaux profondes

Tableau IV-2: Formule de Van der Meer pour les eaux profondes

Formule	Variables
<ul style="list-style-type: none"> Déferlement plongeant ($\xi_m < \xi_{cr}$) : $\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = C_{pl} P^{0.18} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \xi_m^{-0.5}$	<p>N: Nombre de vagues incidentes, qui dépend de la durée de la tempête.</p> <p>H_s : Hauteur significative incidente de la houle, au pied de l'ouvrage (m).</p> <p>ξ_m : Paramètre de déferlement, calculé à partir de la période moyenne T_m.</p> <p>ξ_{cr} : Paramètre de déferlement critique</p> <p>α: angle de talus.</p> <p>$\Delta = \frac{\rho_s}{\rho_e} - 1$: Densité relative déjaugée.</p> <p>P : Paramètre de perméabilité nominale de l'ouvrage.</p> <p>C_{pl}: 6,2</p> <p>C_s: 1,0</p>
<ul style="list-style-type: none"> Déferlement gonflant ($\xi_m > \xi_{cr}$) : $\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = C_s P^{-0.13} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \sqrt{\cot\alpha} \xi_m^P$	
<p>Avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> Le paramètre de déferlement ξ_m $\xi_m = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H_b}{g T_m^2}}}$	
<ul style="list-style-type: none"> Le paramètre de déferlement critique ξ_{cr} : $\xi_{cr} = \left(\frac{C_{pl}}{C_s} P^{0.31} \sqrt{\tan\alpha} \right)^{\frac{1}{P+0.5}}$	

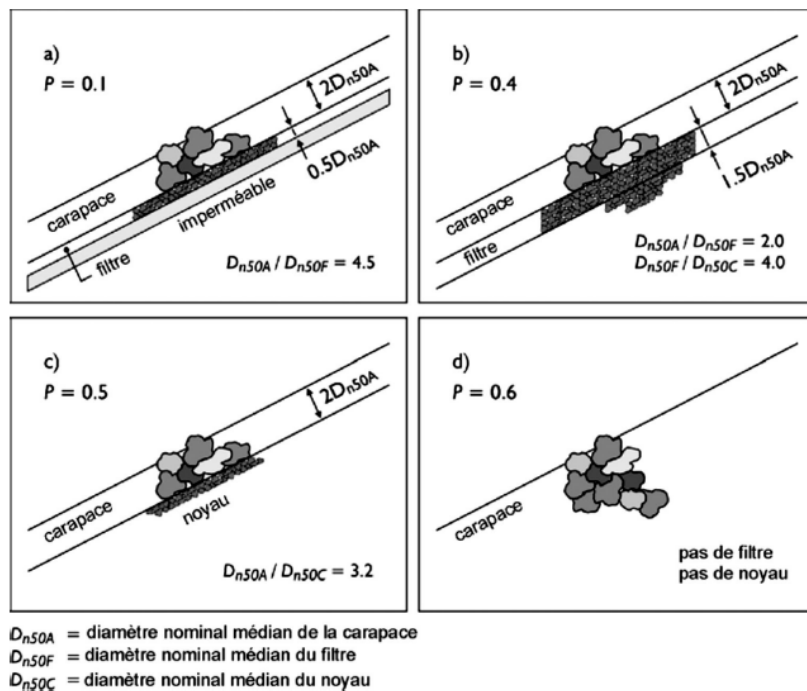


Figure IV-3 : Paramètres de perméabilité nominale P de la formule de Van der Meer (1988)

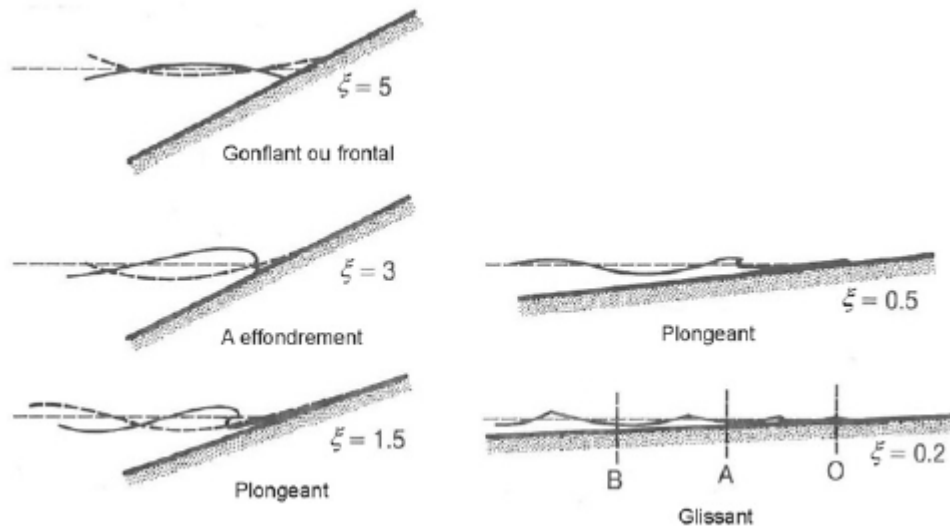


Figure IV-4 : Types de déferlement en fonction de ξ m (Battjes, 1974).

IV.2.2.4. Eaux peu profondes

Tableau IV-3 : Formule de Van der Meer pour les eaux peu profondes

Formule	Variables
<ul style="list-style-type: none"> Déferlement plongeant ($\xi_{s-1,0} < \xi_{cr}$) : $\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = C_{pl} P^{0.18} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \left(\frac{H_s}{H_{2\%}}\right) \xi_{s-1,0}^{-0.5}$ <ul style="list-style-type: none"> Déferlement gonflant ($\xi_{s-1,0} > \xi_{cr}$) : $\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = C_s P^{-0.13} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \left(\frac{H_s}{H_{2\%}}\right) \sqrt{\cot \alpha} \xi_{s-1,0}^P$ <p>Avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> Le paramètre de déferlement $\xi_{s-1,0}$ $\xi_{s-1,0} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H_b}{g T_{m-1,0}^2}}}$ <ul style="list-style-type: none"> Le paramètre de déferlement critique ξ_{cr} : $\xi_{cr} = \left(\frac{C_{pl}}{C_s} P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha}\right)^{\frac{1}{P+0.5}}$	<p>N: Nombre de vagues incidentes, en fonction de la durée de la tempête.</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>$\xi_{s-1,0}$: Paramètre de déferlement, calculé à partir de la période spectrale de la houle $T_{m-1,0}$.</p> <p>α : Angle de talus.</p> <p>$\Delta = \frac{\rho_s}{\rho_e} - 1$: 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>

Remarque

Il faut utiliser les valeurs locales de $H_{2\%}$ et $T_{m-1,0}$ extraite d'un modèle de propagation de la houle. (Rock Manual. CTMEF, 2009).

Remarque

Pour des angles de talus moins raides que 4/1 ($Cot\alpha \geq 4$). 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} . (Rock Manual. CTMEF, 2009)

IV.2.2.5. Dimensionnement de la sous-couche, le filtre de transition et le noyau

Tableau IV-4 : Résumé des Formules du dimensionnement de la sous-couche ; le filtre de transition et le noyau

Formule	Variables
Poids de la sous-couche $W_{sc} = \frac{W_{50}}{10}$	W_{50} : Poids moyen d'un bloc de la carapace, W_{sc} : Poids moyen de la sous-couche, n : Nombre de couches. K_{Δ} : coefficient de couche. D_{nsc} : Diamètre nominal du bloc de la sous couche. W_{ft} : Poids moyen du filtre de transition, W_n : Poids moyen des éléments du noyau.
Epaisseur de la sous-couche $e_{sc} = nK_{\Delta}D_{nsc}$	
Poids du filtre de transition $W_{ft} = \frac{W_{50}}{200}$	
Poids du noyau $W_n = \frac{W_{50}}{4000} \text{ à } \frac{W_{50}}{60000}$	
<p>Remarque</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ La sous-couche ne doit normalement pas dépasser 15 % de la masse du bloc artificiel, dans la mesure où il faut une surface de sous-couche relativement lisse pour pouvoir disposer les blocs artificiels avec précision. ▪ La 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). 	

IV.2.2.6. Dimensionnement de la Butée de pied

Tableau IV-5 : Formules de dimensionnement de la butée de pied

Formule	Variables
Poids moyen d'un bloc de la butée : $W_b = \left(\frac{1}{10} \frac{d}{H_b} \right) \left[\frac{\gamma_s H_b^3}{K_D \Delta^3 cot\alpha} \right]$	K_D : Coefficient de stabilité d'Hudson. $Cot\alpha$: 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. ρ_s : Masse volumique du bloc de la carapace. ρ_e : Masse volumique de l'eau de mer. n : Nombre de couches. K_{Δ} : coefficient de couche.
Epaisseur et largeur de la butée : $e; l = nK_{\Delta} \left(\frac{W_b}{\gamma_s} \right)^{\frac{1}{3}}$	

IV.3. Digues Verticales

Une digue verticale est une structure constituée d'un mur vertical en béton armé, soit monolithique, soit assemblé à partir d'éléments préfabriqués. Elle est conçue pour réfléchir l'énergie de la houle par réflexion totale. Elle repose sur un massif de fondation constitué d'enrochements de petite taille et est protégée contre l'action de la houle par des éléments de taille plus importante. Les digues verticales sont généralement installées en eau profonde car leur construction nécessite moins de matériaux rocheux que les digues à talus. La Figure IV-5 illustre le schéma d'une digue verticale, ainsi que les principales dimensions à prendre en compte en fonction de la hauteur de la houle H pour un scénario où la digue n'est exposée qu'à une houle non déferlante. (BOUGIS J .2000), (CAMINADE D.1995), (ROPERT F et al .1997).

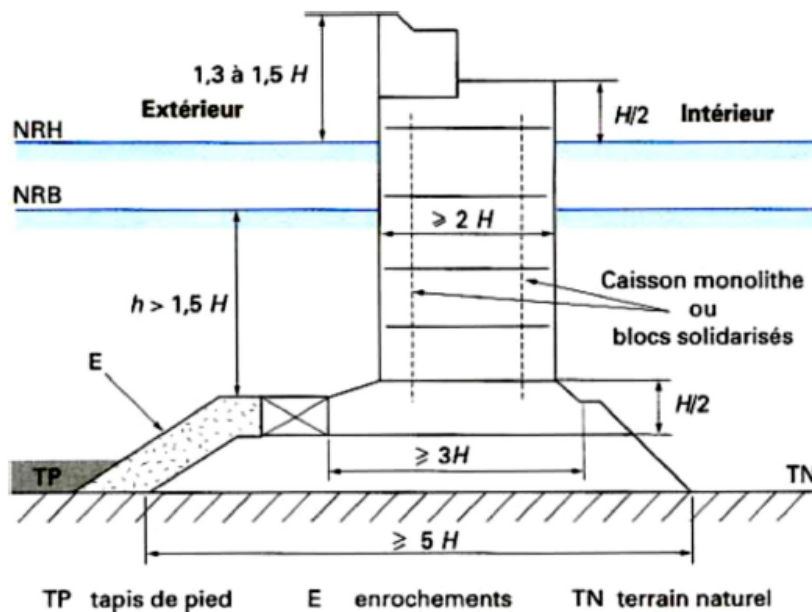


Figure IV-5: Principales dimensions d'une digue verticale

IV.3.1. Les Digues Verticales mixtes

Les digues mixtes (Composites) sont les plus utilisées en profondeurs importantes. Ces digues combinent deux structures distinctes : une partie inférieure en forme de digue à talus et une partie supérieure verticale. La digue à talus offre une base solide, tandis que l'ouvrage vertical est conçu pour résister aux forces exercées par les vagues. Il est essentiel que les dimensions et la structure de l'ouvrage vertical soient adéquates afin d'assurer la résistance de la digue.

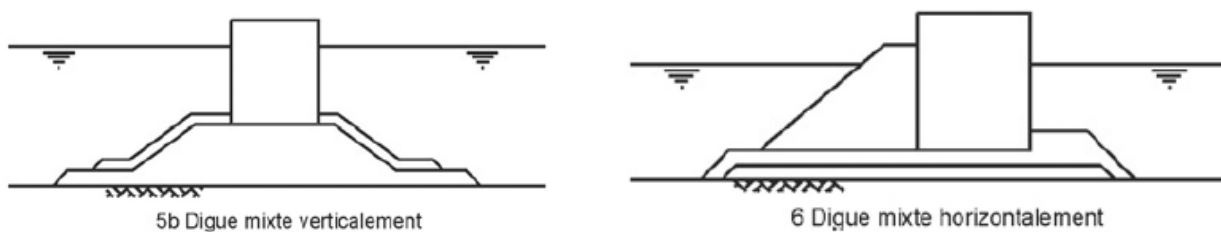


Figure IV-6: Coupes-types des digues verticales mixtes. (CETMEF)

IV.3.1.1. Dimensionnement des Digues Verticales

Dans cette partie, on va procéder au calcul des Pressions, Forces et Moments agissants sur les digues verticales ; notamment celles agissant sur la digue verticale Mustapha du port d'Alger.

IV.3.1.1.1. Formule d'HIROI

Les formules d'Hiroi de calcul des pressions, forces et moments engendrées par les houles agissant sur les digues verticales sont résumées dans le Tableau IV-6.

Tableau IV-6: Formules d'HIROI de dimensionnement de la digue verticale (BOUGIS J .2000)

Condition d'utilisation: $\frac{d}{H_s} < 2$	
Formule	Variables
Pression dynamique engendrée par les lames $P = 1.5\rho gH_l$	<p>ρ: Masse volumique de l'eau de mer. H_l: Hauteur des lames. P: la pression dynamique engendrée par les lames. b: Hauteur du mur au-dessus du niveau de la surface libre au repos. d: Profondeur. $\frac{5}{4}H_l = 1.25 H_l$: L'élévation η. F: Force supérieure exercée sur la partie supérieure du mur au-dessus de la surface libre au repos. M: Le moment par rapport à la profondeur.</p>
La Force exercée sur la partie supérieure du mur au-dessus de la surface libre au repos si $\frac{5}{4}H_l < b$ $F = \frac{1}{2}\rho g d^2 + \frac{3}{2}\rho g H_l \left(\frac{5}{4}H_l + d\right)$ Si $\frac{5}{4}H_l > b$ $F = \frac{1}{2}\rho g d^2 + \frac{3}{2}\rho g H_l (b + d)$	
Le Moment en fonction de la profondeur d si $\frac{5}{4}H_l < b$ $M = \frac{1}{6}\rho g d^3 + \frac{3}{4}\rho g H_l \left(\frac{5}{4}H_l + d\right)^2$ Si $\frac{5}{4}H_l > b$ $M = \frac{1}{6}\rho g d^3 + \frac{3}{4}\rho g H_l (b + d)^2$	

Les méthodes qui seront exposées dans les Tableau IV-7, Tableau IV-8 et Tableau IV-9 sont applicables dans le cas des houles qui ne déferlent pas sur l'ouvrage.

IV.3.1.1.2. Méthode de Sainflou

L'évaluation des variations de pression agissant sur les digues verticales peut être réalisée grâce à la méthode de Sainflou (1928). Cette méthode s'appuie sur une théorie de la houle du premier ordre et s'applique pour les houles à cambrure importante mais qui ne déferlent pas sur l'ouvrage. (Figure IV-7). (BOUGIS J.2000).Le Tableau IV-7 résume les formules de calcul utilisées dans cette méthode.

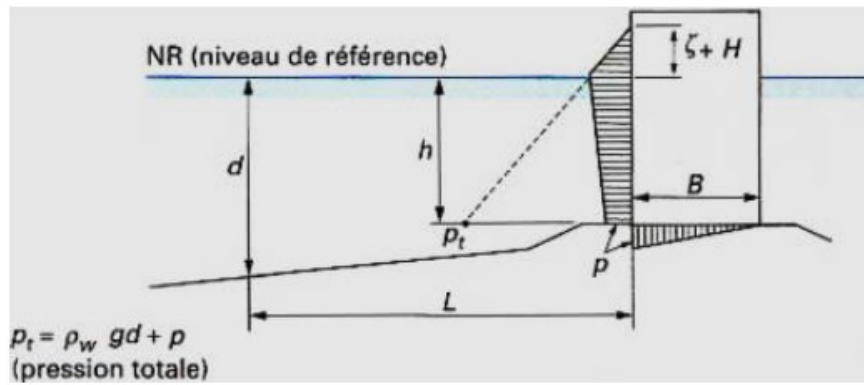


Figure IV-7: Surpressions dues à la houle non déferlante sur une digue verticale

Tableau IV-7 : Formules de dimensionnement de la digue verticale par la méthode de Sainflou

Condition d'utilisation : $\frac{d}{H_s} \geq 2$	
Formule	Variables
La surélévation de l'eau de mer $\zeta = \frac{\pi H^2}{L} \coth \frac{2\pi h_s}{L}$	$H = H_{1/3}$: Hauteur de la vague. P_1 : Pression des vagues au repos correspondant à la crête. P_2 : Pression hydrostatique. P_3 : Pression des vagues correspondant au creux. ζ : Surélévation de l'eau de mer au-dessus du niveau de l'eau calme (hauteur du niveau moyen du clapotis). h_s : Profondeur.
Les valeurs de P_1, P_2, P_3 $P_1 = (P_2 + \rho_w g h_s) \left(\frac{H + \zeta}{h_s + (H + \zeta)} \right)$ $P_2 = \frac{\rho_w g H}{\cosh\left(\frac{2\pi h_s}{L}\right)}$ (Pression Hydrostatique) $P_3 = \rho_w g (H - \zeta)$	

IV.3.1.1.3. Méthode de Miche (1944)

L'évaluation des variations de pression peut être faite aussi par la méthode de Miche (1944), qui s'appuie sur une théorie de la houle du deuxième ordre. (CAMINADE D.1995).

Tableau IV-8 : Formules de dimensionnement de la digue verticale par la méthode de Miche.

Formule	Variables
La surélévation $\zeta = \left(\frac{\pi H^2}{L} \coth \frac{2\pi d}{L} \right) \left[1 + \frac{3}{4 \sinh^2\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} - \frac{1}{4 \cosh^2\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \right]$	ζ : La surélévation. P_1 : La surpression maximale obtenue pour le niveau d'affleurement maximal. P_2 : La sous-pression maximale obtenue pour le niveau d'affleurement minimal.
Calcul de la surpression maximale P_1 $P_1 = \frac{\rho_w g H}{\cosh \frac{2\pi d}{L}} \left[1 - \frac{\pi H}{L} \left(\sinh \frac{2\pi d}{L} - \frac{3}{4 \cosh^3\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \right) \right]$	
Calcul de la sous-pression maximale P_2 $P_2 = \frac{\rho_w g H}{\cosh \frac{2\pi d}{L}} \left[1 + \frac{\pi H}{L} \left(\sinh \frac{2\pi d}{L} - \frac{3}{4 \cosh^3\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \right) \right]$	

Tableau IV-9 : Formules de résultantes de Forces et de Moments pour une houle non déferlante

Formule:	Variables:
<p>Houle non déferlante par la crête</p> <p>Maximum de Force</p> $F_c = \frac{\gamma_c}{2} (\gamma d + P_{dy})$ <p>Force absolue</p> $F_{net} = \frac{\gamma_c}{2} (\gamma d + P_{dy}) - \frac{\gamma d^2}{2}$ <p>Moment à la base</p> $M_c = \frac{\gamma_c^2}{6} (\gamma d + P_{dy})$ <p>Moment net</p> $M_{net} = \frac{\gamma_c^2}{6} (\gamma d + P_{dy}) - \frac{\gamma d^3}{6}$ $y_c = d + \Delta h + H.$ $\Delta h = \frac{\pi H^2}{L} \coth \frac{2\pi d}{L}.$ <p>Pression dynamique</p> $P_{dy} = \frac{\gamma H}{\cosh kd}$	<p>y_c : Hauteur maximale de l'eau.</p> <p>Δh : Surélévation de la houle au-dessus de la surface libre.</p> <p>d : Profondeur au pied de l'ouvrage.</p> <p>y_t : Hauteur de l'eau du au creux</p> <p>d : Profondeur.</p> <p>γ : Poids volumique de l'eau de mer : 1.027 t/m³ .</p>
<p>Houle non déferlante par le creux</p> <p>Maximum de Force</p> $F_T = \frac{\gamma_t}{2} (\gamma d - P_{dy})$ <p>Force absolue</p> $F_{net} = \frac{-\gamma_t}{2} (\gamma d - P_{dy}) + \frac{\gamma d^2}{2}$ <p>Moment net</p> $M_0 = \frac{-\gamma_t}{6} (\gamma d - P_{dy}) + \frac{\gamma d^3}{6}$ $y_t = d + \Delta h - H.$	

Les méthodes (formule de Goda et formule de Minikin's) qui seront exposées dans les Tableau IV-10 et Tableau IV-11 sont applicables dans le cas des houles cambrées mais qui déferlent sur l'ouvrage.

IV.3.1.1.4. Formule de Goda (1985)

Cette formule, basée partiellement sur la théorie non linéaire, elle a l'avantage de pouvoir être employée pour tout type de houle, clapotis (non déferlante) ou houle déferlante, tout en proposant une houle de dimensionnement plus sécurisante que la hauteur significative ; elle s'applique aussi correctement pour le calcul des efforts maximaux sur les digues verticales pleines mais ne prend pas en compte les phénomènes hydrauliques particuliers au cas des ouvrages faiblement réfléchissants. Il s'agit de la méthode la plus utilisée pour la conception de caissons et de caissons

composites. (TABET-AOUL El. 2000). La Figure IV-8 montre le diagramme des pressions proposé par Goda.

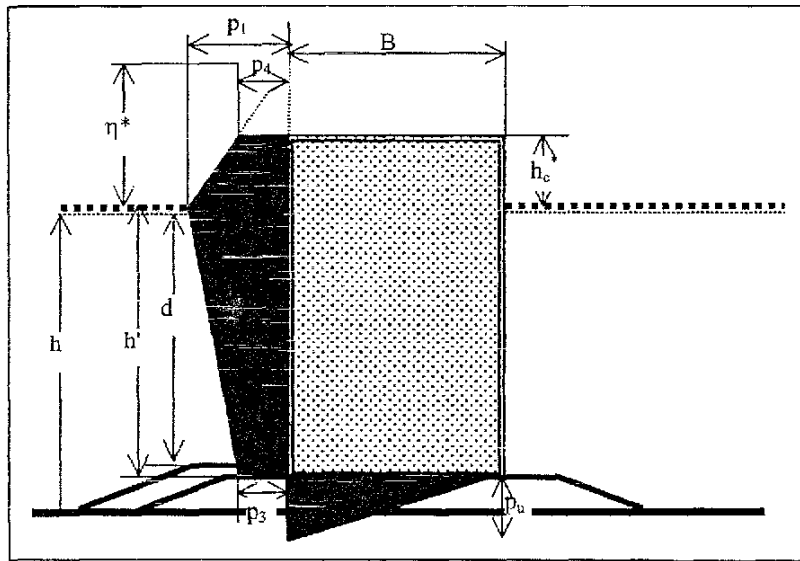


Figure IV-8 : Diagramme des Pressions selon GODA

Tableau IV-10: Formules de dimensionnement de la digue verticale par la formule de Goda

Formule	Variables
<p>Les valeurs de P_1, P_3, P_4 et P_u</p> $P_1 = 0.5 (1 + \cos\theta) (\lambda_1 \alpha_1 + \lambda_2 \alpha^* \cos^2\theta) \rho_0 g H_D.$ $P_3 = \alpha_3 P_1$ $P_4 = \alpha_4 P_1$ $P_u = 0.5 (1 + \cos\theta) \lambda_3 \alpha_3 \alpha_4 \rho_0 g H_D$ $\eta^* = 0.75 (1 + \cos\theta) \alpha_1 H_D$	<p>$H_D = H_{1/250}$: Hauteur de la houle de dimensionnement.</p> <p>η^* : Elévation maximale au-dessus du niveau d'eau sur s'exerce la pression.</p> <p>α_1 : Paramètre tenant compte de l'influence de la vague.</p> <p>α_2 : Augmentation de la pression avec la hauteur de la fondation.</p> <p>α_3 : Résulte de l'interception de α_1, α_2.</p> <p>$\alpha^* = \max \{ \alpha_1, \alpha_2 \}$ où α_1 est un coefficient dépendant de l'impact de la houle.</p> <p>P_u : Force de renversement.</p> <p>θ : Angle d'attaque de la houle</p> <p>h_b : Profondeur d'eau à une distance de la digue égale à $5H_s$</p> <p>k : nombre d'ondes.</p>
<p>Les coefficients de pression</p> $\alpha_1 = 0.6 + 0.5 \left(\frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right)^2$ $\alpha_2 = \min \left\{ \left(\frac{1-d}{h_b} \right) \left(\frac{(H_D/d)^2}{3} \right); \frac{2d}{H_D} \right\}$ $\alpha_3 = 1 - \left(\frac{h'}{h} \right) \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh(kh)} \right\}$ $\alpha_4 = 1 - \frac{h_c}{\eta^*} \text{ pour } \eta^* > h_c$ $\alpha_4 = 0 \text{ pour } h_c \leq \eta^*$	

IV.3.1.1.5. Méthode de Minikin's

Lorsque la houle déferle juste en avant de l'ouvrage, des efforts dynamiques apparaissent et la pression prise en compte sur la face exposée à la houle est la somme de deux termes. (BOUGIS J .2000).

- Le premier est celui de la pression hydrostatique en considérant que le niveau de l'eau s'établit à H/2 au-dessus du niveau de référence.
- Le second est un terme dynamique.

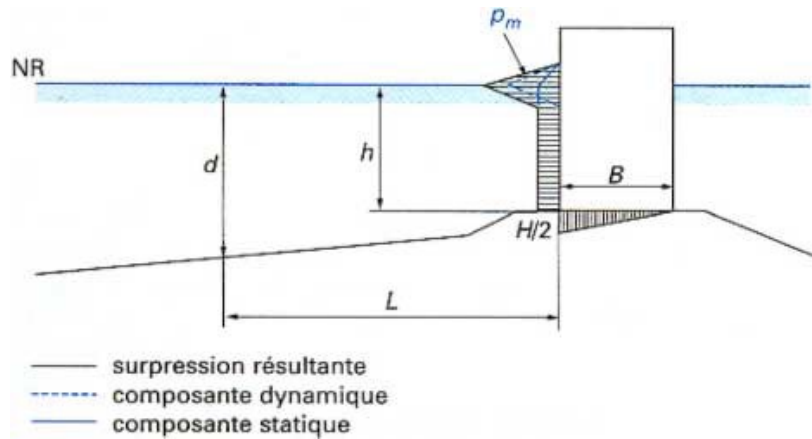


Figure IV-9 : Surpressions dues à une houle déferlante sur une digue verticale

Tableau IV-11 : Tableau de Formules de dimensionnement de la digue verticale par la Méthode de Minikin's.

Condition d'utilisation	
Cette méthode de calcul ne s'applique que si le déferlement de la houle n'est pas dû à l'ouvrage, (le déferlement doit donc avoir lieu à une certaine distance de celui-ci). (CAMINADE D.)	
Formule	Variables
La pression à la hauteur ± y par rapport au niveau de référence : $P_y = P_m \left(1 - \frac{2y}{H}\right)^2$ Où $P_m = \rho_w g d \left(1 + \frac{h}{d}\right) \frac{H}{L}$ $d = h + mL$	h : Profondeur au pied de l'ouvrage, d : Profondeur à une longueur d'onde devant l'ouvrage, H : Hauteur de la houle au moment du déferlement. L : Longueur d'onde de la houle à la profondeur d. m : Pente du fond.
La Force totale $F_{\text{totale}} = \frac{1}{2} \left(\gamma \left(\frac{H}{2} + h \right) \right) \left(\frac{H}{2} + h \right) + \frac{1}{3} P_m H$	
Le Moment total $M_{\text{total}} = \frac{\gamma}{6} \left(\frac{H}{2} + h \right)^3 + \frac{1}{3} P_m H h$	

IV.3.1.1.6. Dimensionnement du Soubassement

On peut utiliser la formule d'Hudson adaptée pour dimensionner le soubassement de la digue verticale. Le massif de protection ne doit pas être pris en compte dans le calcul de la stabilité de la fondation, sauf s'il est très important (plusieurs mètres d'épaisseur). (CAMINADE D.1995). Les valeurs du coefficient N_s^3 de stabilité peuvent être calculées à partir de l'abaque (Figure IV-10).

Tableau IV-12: Formules de dimensionnement du soubassement de la digue verticale

Formule	Variables
<p>Le poids des blocs constituant le soubassement</p> $W = \frac{\gamma_s H^3}{N_s^3 (\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1)^3}$	<p>W : Poids des blocs constituant le soubassement. H : Hauteur de la vague. N_s^3 : Nombre de stabilité. γ_s : Poids volumique des blocs utilisés. γ_w : Poids volumique de l'eau de mer.</p>

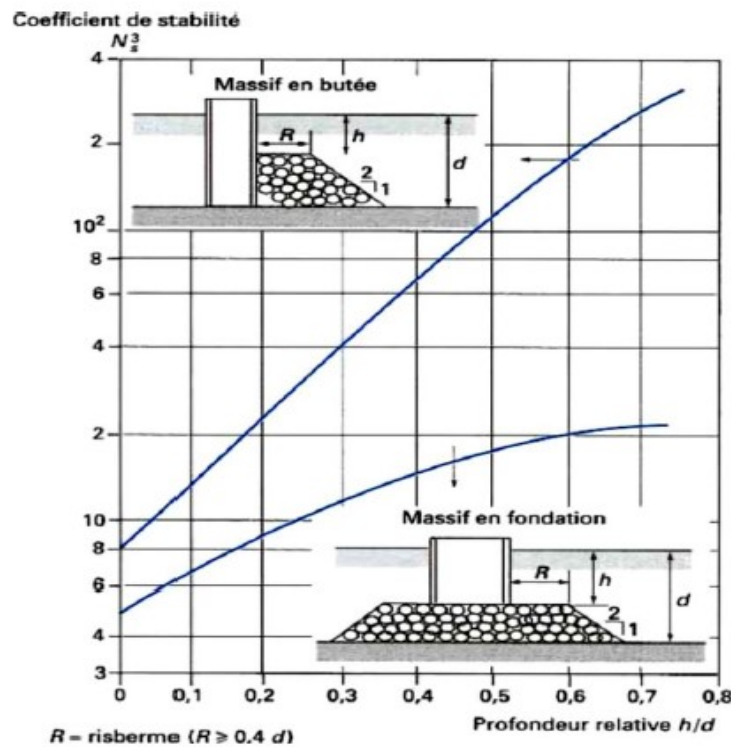


Figure IV-10: Abaque des Coefficients de stabilité N_s^3 en fonction de la Profondeur relative h/d

IV.3.1.2. Résultats des calculs de dimensionnement des Digues à Talus

Le Tableau IV-11 et le Tableau IV-12 présentent une synthèse des résultats de dimensionnement de la jetée principale de la Marina ainsi que celle de Khireddine du Port d'Alger. Les résultats obtenus dans le Tableau IV-11 pour la Marina et dans le Tableau IV-12 pour le Port mettent en évidence l'utilisation de différentes formules pour chaque type d'enrochement et chaque partie de la jetée lors de ces calculs. Pour faciliter la comparaison, les formules d'Hudson et de Van der Meer sont utilisées pour les mêmes types d'enrochement et la même hauteur de houle au pied de l'ouvrage.

La formule de Van der Meer propose un grossissement de la masse du bloc par rapport aux résultats obtenus avec la formule d'Hudson pour la carapace. Ce grossissement est dû au fait que Van der Meer prend en compte davantage de variables susceptibles d'influencer la stabilité de la digue. Il convient de noter que les résultats obtenus pour le musoir de la jetée principale confirment ceux obtenus pour la section courante. Cependant, on remarque que les dimensions de la sous-couche et du noyau ne sont pas vraiment affectées par les résultats de la carapace obtenus avec chaque formule.

L'application de la formule de Van der Meer offre un niveau de stabilité plus élevé face aux actions de la mer par rapport aux résultats obtenus avec l'application de la formule d'Hudson. Il convient également de noter que les résultats obtenus sont cohérents et logiques, où le poids des blocs constituant la jetée Khireddine est plus élevé que celui des blocs constituant la jetée principale de la Marina, ceci est dû au fait que la Marina soit naturellement protégée contre les assauts des houles.

Tableau IV-11 : Dimensionnement proposé pour la jetée principale de la Marina d'Alger

Type de Bloc		Enrochement Naturel		Cubipod	
		Enracinement		Section Courante	Musoir
Houle de Projet (Mètre)		2.34		5.00	
Formule utilisée		Hudson	Van Der Meer	Hudson adapté pour les cubipods	Hudson adapté pour les cubipods
Carapace	Masse Moyenne du bloc (Tonne)	1.6	3.6	2.9	11.95
	Epaisseur de la couche (Mètre)	1.9	2.6	2.37	1.2
Sous-couche	Masse moyenne du bloc (Tonne)	0.16	0.36	0.29	0.3
	Epaisseur de la couche (Mètre)	0.9	1.18	1.11	1.76
Noyau	Masse des matériaux TVC (Tonne)	< 0.1		< 0.1	< 0.1
Butée de pied	Masse moyenne du bloc (Tonne)	1.82			
	Epaisseur et longueur (Mètre)	2.03			

Tableau IV-12 : Dimensionnement proposé pour la jetée principale Khireddine du Port d'Alger

Type d Bloc		Blocs Parallélépipédiques		Blocs Cubiques Rainurés			
		Enracinement		Section Courante		Musoir	
Partie de la jetée principale		3.82		4.88		5.9	
Houle de dimensionnement (Mètre)		3.82		4.88		5.9	
Formule utilisée		Hudson	Van Der Meer	Hudson	Van Der Meer	Hudson	Van Der Meer
Carapace	Masse Moyenne du bloc (Tonne)	4.7	9.7	11.4	20	27.5	35
	Epaisseur de la couche (Mètre)	2.75	3.5	3.86	4.31	4.96	5.2
Sous-couche	Masse moyenne du bloc (Tonne)	0.47	0.97	0.114	2	2.75	3.5
	Epaisseur de la couche (Mètre)	1.29	1.64	1.74	2.09	2.33	2.52
Noyau	Masse des matériaux TVC (Tonne)	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Butée de pied	Masse moyenne du bloc (Tonne)	6.3					
	Epaisseur et longueur (Mètre)	3					

IV.3.1.3. Résultats des calculs des Pressions, Forces et Moments sur la Digue Verticale de la Jetée Mustapha

Le Tableau IV-13 offre une vue d'ensemble claire des résultats des calculs concernant les pressions, forces et moments exercés sur la digue en utilisant la Méthode de Sainflou (1928), ce qui permet de comprendre les charges qui lui sont imposées. Ces informations sont essentielles pour évaluer la stabilité et la résistance de la digue face aux conditions maritimes spécifiques.

Tableau IV-13: Synthèse des calculs des pressions, forces et moments sur la digue verticale de la Jetée Mustapha du Port d'Alger

Méthode Utilisée	Méthode de Sainflou (1928)			
Paramètres d'entrée	Houle de Dimensionnement (m)	Profondeur au pied de l'ouvrage (m)	Période pic (s)	Masse volumique de l'eau de mer (t/m^3)
	4.5	15	11.96	1.027
Type de Houle	Paramètres calculés			Résultats
Houle non déferlante	ζ : Surélévation de l'eau de mer au-dessus du niveau de l'eau calme.			0.72 m
	P_1 : Pression des vagues au repos correspondant à la crête.			49.71 Pa
	P_2 : Pression hydrostatique.			41.58 Pa
	P_3 : Pression des vagues correspondant au creux.			38.14 Pa
	P_{dy} : Pression dynamique			4.24 Pa
Houle non déferlante par la crête	y_c : Hauteur maximale de l'eau			20.21 m
	F_c : Maximum de Force			198.54 N
	F_{net} : Force absolue			83 N
	M_c : Moment à la base			1337.81 N.m
	M_{net} : Moment net			760.12 N.m
Houle non déferlante par le creux	y_t : Hauteur de l'eau du au creux			11.21 m
	F_T : Maximum de Force			62.62 N
	F_{net} : Force absolue			52.92 N
	M_0 : Moment net			556.82 N.m

IV.4. Conclusion

En conclusion, la comparaison des formules de conception des digues à talus utilisant les méthodes d'Hudson et de Van der Meer a fourni des connaissances précieuses pour la conception de la jetée principale de la Marina et celle de Khireddine du port d'Alger. Cette étude souligne l'importance de tenir compte des caractéristiques spécifiques de la zone d'étude et de choisir les formules de conception appropriées pour assurer des conceptions efficaces et durables. Des recherches supplémentaires et une validation des résultats sont nécessaires pour améliorer la compréhension et l'application des méthodologies de conception des digues à talus.

De plus, il est conclu que la méthode de Sainflou offre une approche fiable pour calculer les pressions, forces et moments exercés sur les digues verticales. Ces résultats sont essentiels pour la conception et l'évaluation de la stabilité des digues verticales, garantissant leur résistance face aux conditions maritimes spécifiques. La compréhension et la quantification de ces charges sont essentielles pour garantir une conception optimale de ces digues et garantir ainsi leur durabilité et une protection efficace des zones côtières contre les effets néfastes de la houle et des vagues.

Chapitre V. Performance Hydraulique

V.1. Introduction

Ce chapitre traite les interactions hydrauliques entre la houle et les structures marines. Ces interactions se manifestent par des réponses hydrauliques, des charges et des réponses structurelles, pouvant affecter la stabilité de l'ouvrage. Les types d'interactions hydrauliques abordées dans ce chapitre sont: le Run-up, le Run-down et le franchissement de la houle sur les structures portuaires. Pour mieux comprendre ces interactions, de nombreuses recherches ont été menées pour développer des relations empiriques basées sur des considérations physiques, avec des constantes empiriques ajustées à la structure. (CETMEF, 2009).

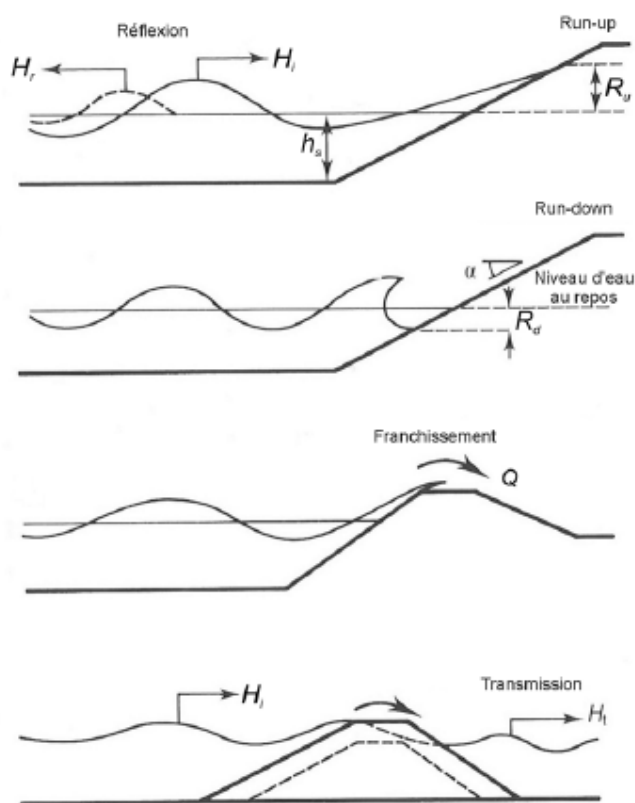


Figure V-1: Interactions hydrauliques entre la houle et les ouvrages (CETMEF, 2009)

L'ensemble des calculs seront appliqués spécifiquement à la partie courante de la digue principale de la Marina ainsi qu'à la partie courante de la jetée principale Khireddine du Port. Les calculs sont effectués pour la direction la plus pénalisante (NNE) au pied de l'ouvrage pour les périodes de retour simulées au chapitre III.

Tableau V-1 : Scénarios retenus pour le calcul de la performance hydraulique des digues principales de la Marina et du Port

Zone d'étude	Direction pénalisante	Période de retour (année)	H_s (m)	H_{mo} (m)	T_p (s)	T_m (s)
Marina	NNE	2	1.97	0.9	8.74	6.64
		10	2.21	1.12	11.4	8.66
		50	2.24	1.13	11.48	8.72
		100	2.30	1.18	11.99	9.11
Port	NNE	2	3.37	1.36	8.76	6.66
		10	3.88	1.72	11.43	8.69
		50	4.16	1.82	11.51	8.75
		100	4.28	1.89	12.01	9.13

Le Tableau V-1 présente les paramètres de houles spécifiques aux scénarios sélectionnés obtenus à partir de la modélisation numérique pour évaluer la performance hydraulique de la digue principale de la marina d'Alger, et celle de Khireddine du Port. L'équation représente la formule utilisée dans le calcul de la hauteur du spectre de la houle pour les ondes longues au niveau de l'ouvrage, calculée à partir de la formule de Kamphuis(2001).

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

Tableau V-2: Signification des paramètres utilisés dans les calculs des scénarios retenus.

H_{mo}	Hauteur du spectre pour les ondes longues au niveau de l'ouvrage, calculée à partir de la formule de Kamphuis(2001).
$H_{s,b}$	Hauteur significative de la houle au point de déferlement
g	L'accélération de la gravité.
H_s	Hauteur significative de la houle au pied de l'ouvrage.
T_p	Période de la houle
T_m	Période moyenne de la houle calculée selon le spectre de Jonswap. $\frac{T_p}{T_m} = 0.76$

V.2. Run-down de la houle

Le Run-down de la houle, appelé R_d , correspond au niveau d'eau le plus bas atteint par la houle sur un talus. Il est considéré comme positif lorsque son niveau est inférieur à celui de l'eau au repos. Le R_d est une mesure couramment utilisée pour déterminer la limite inférieure de la carapace (CETMEF, 2009). Les formules utilisées pour le calcul du Run-down de la houle sont résumées dans le Tableau V-3.

Tableau V-3 : Résumé des Equations de calcul du Run-down de la houle sur l'ouvrage

Formule:	Variables:
Pour des talus lisses et de pente constante : Pour $0 < \xi_p < 4$ $\frac{R_{d2\%}}{H_s} = 0.3 \xi_p.$ Pour $\xi_p > 4$ $\frac{R_{d2\%}}{H_s} = 1.5.$ (Thompson et Shuttler (1975) : $\frac{R_{d1\%}}{H_s} = 0.34 \xi_p - 0.17.$ Van der Meer (1988b) : $\frac{R_{d2\%}}{H_s} = 2.1 \sqrt{\tan \alpha} - 1.2 P^{0.15} + 1.5 \exp(-60 s_{om}).$	H_s : La hauteur significative de la houle au pied de l'ouvrage. ξ_p : Paramètre de déferlement calculé à partir de la période de pic T_p . $R_{d2\%}$: Run-down dépassé par 2 % des vagues. $R_{d1\%}$: Run-down dépassé par 1% des vagues. P : Perméabilité de l'ouvrage. α (°): l'angle du talus. s_{om} : Cambrure nominale de la houle.

Note

Le Run-down est une caractéristique propre aux digues à talus, il ne peut être observé sur les digues verticales qui ne possèdent pas de talus.

Afin de déterminer l'étendue E de l'ouvrage sur lequel les forces dues à la houle s'exerceront, on calcule E , l'extension minimale de la manière suivante

$$E = \frac{R_{u2\%} + R_{d2\%}}{\sin \alpha} \quad \text{Équation V-2}$$

V.2.1. Résultats des calculs du Run-Down de la houle

Les résultats du Tableau V-4 et du Tableau V-5 montrent qu'en moyenne, la hauteur du Run-down est de 1.63 m pour la Marina et de 2.5m pour le Port d'Alger. Sachant que la butée du pied de la digue principale de la Marina se trouve à 3 m et celle de la jetée Khireddine à 10 m de profondeur, on constate que pour les deux digues principales, l'ensemble des hauteurs de Run-down restent inférieures aux niveaux des butées; donc elles sont protégées.

Le calcul des extensions minimales ont permis de voir les zones où s'exercent les forces de la houle. On peut aussi constater que, l'étendu des digues subissent en moyenne sur 6.2 m pour la marina et sur 10.4 m pour le port les forces de la houle.

L'ensemble de ces forces et leurs applications peuvent créer des risques sur la stabilité de l'ouvrage tel que l'érosion interne de la digue.

Tableau V-4: Résultats des calculs du Run-down de la houle au quel est exposé la section courante de la digue principale de la Marina

Période de retour (année)	H_{mo} (m)	T_p (s)	ξ_p	$Rd2\%$ (m)	Etendu de l'ouvrage (m)
2 ans	0.90	8.74	5.19	1.35	5.38
10 ans	1.12	11.40	6.39	1.68	6.35
50 ans	1.13	11.48	6.39	1.70	6.43
100 ans	1.18	11.99	6.59	1.77	6.65

Tableau V-5: Résultats des calculs du Run-down de la houle au quel est exposé la section courante de la jetée principale Khireddine du Port d'Alger

Période de retour (année)	H_{mo} (m)	T_p (s)	ξ_p	$Rd2\%$ (m)	Etendu de l'ouvrage (m)
2 ans	1.36	8.76	3.98	2.04	8.50
10 ans	1.72	11.43	4.83	2.58	10.39
50 ans	1.82	11.51	4.70	2.72	11.05
100 ans	1.89	12.01	4.84	2.84	11.46

V.3. Run-up de la houle

Le Run-up de la houle R_u , correspond au niveau maximum que l'eau peut atteindre sur le talus d'un ouvrage en raison de l'action de la houle. Cela élève la surface libre par rapport à la houle incidente. Il est mesuré verticalement par rapport au niveau de l'eau au repos. Contrairement à la houle régulière, où il n'y a qu'une seule valeur maximale de montée d'eau, la houle irrégulière produit une distribution des montées d'eau. Il est donc essentiel que les formules de montée d'eau déterminent un paramètre représentatif de cette distribution. Le paramètre de run-up le plus couramment utilisé pour la houle irrégulière est le $Ru2\%$ (CETMEF, 2009). Les différentes formules empiriques destinées à l'estimation du Run-up de la houle sur les ouvrages côtiers sont détaillées dans le Tableau V-6.

Tableau V-6: Résumé des formules utilisées dans l'estimation du Run-up de la houle sur l'ouvrage

Formule :	Variables :
<p>Formule de base de calcul de Ru</p> $\frac{R_{u2\%}}{H_s} = A\xi + B$ <p>Ahrens (1981) $A = 1.6$ et $B = 0$ pour : $\xi_p < 2.5$. $A = -0.2$ et $B = 4.5$ pour : $\xi_p > 2.5$.</p> <p>Allsop et al. (1985) $A = -0.21$ et $B = 3.39$ pour $2.8 \leq \xi_p \leq 6$.</p> <p>Ahrens (1981) et Allsop et al. (1985) $\frac{R_{u2\%}}{H_s} = \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_h (A\xi_p + B).$</p> <p>Ahrens (1981) $A = 1.6$ et $B = 0$ pour $\xi_p < 2.5$. $A = -0.2$ et $B = 4.5$ pour $\xi_p > 2.5$.</p> <p>Allsop et al. (1985) $A = -0.21$ et $B = 3.39$ pour $2.8 \leq \xi_p \leq 6$.</p> <p>Pour des talus lisses $(\gamma_b = \gamma_f = \gamma_\beta = \gamma_h = 1.)$</p> <p>Pour des talus rugueux $(\gamma_b; \gamma_f; \gamma_\beta; \gamma_h \neq 1)$</p> <p>Le TAW (2002a)</p> <p>Pour la période énergétique moyenne $T_{m-1,0}$</p> $\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = A \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \xi_{m-1,0}$ <p>Pour une limite maximale ou supérieure des valeurs de $\xi_{m-1,0}$ les plus élevées</p> $\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = \gamma_f \gamma_\beta (B - C\sqrt{\xi_{m-1,0}})$	<p>Ru2% : Run-up dépassé par 2% des vagues.</p> <p>ξ: Paramètre de déferlement $\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_o}}$</p> <p>$s_o$: La cambrure nominale de la houle.</p> $s_o = \frac{H}{L_o} = \frac{2\pi H}{g T^2}$ <p>H (m) : Hauteur de la houle locale.</p> <p>Lo (m) : Longueur d'onde théorique de la houle au large.</p> <p>T (s) : Période de la houle.</p> <p>A et B : Coefficients d'ajustement.</p> <p>ξ_p : Paramètre de déferlement calculé à partir de la période de pic T_p.</p> <p>g: Accélération de la gravité.</p> <p>H_{m0} : La hauteur significative spectrale de la houle.</p> <p>γ_f: Facteur de la rugosité du talus.</p> <p>γ_b: Facteur de l'influence des bermes.</p> <p>γ_β: Facteur de l'obliquité de la houle.</p> <p>γ_h : Facteur de l'eau peu profonde.</p> <p>$\xi_{m-1,0}$: Paramètre de déferlement calculé à partir de $T_{m-1,0}$.</p> <p>$T_{m-1,0}$: Période énergétique de la houle.</p> $\xi_{m-1,0} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H_b}{g T_{m-1,0}^2}}}$ <p>ξ_m : Paramètre de déferlement basé sur le s_{om}</p>

Tableau V-7 : Valeurs des coefficients A, B, C selon (TAW, 2002)

Coefficients	Valeurs avec marge de sécurité ($\mu-\sigma$) – calculs déterministes	Valeurs sans marge de sécurité – tendance moyenne/calculs probabilistes
A	1.75	1.65
B	4.3	4.0
C	1.6	1.5

Pour obtenir une vision complète de l'étendue maximale du Run-up sur le talus de la digue, nous effectuons le calcul du Ru99/100% ou du Ru max en utilisant la formule proposée par (M. Yuhi, 2021), à partir du Ru2% comme suit

$$R_{u_{\frac{99}{100\%}}} = 1.54 \times R_{u_{2\%}}$$

Équation V-3

V.3.1. Résultats des calculs du Run-up de la houle

Les résultats du niveau de Run-up auquel les digues devront faire face en fonction des différents scénarios de houle définis sont présentés dans le Tableau V-8 et le Tableau V-9.

A proximité de la Marina, on constate que le Run-up de la majorité des vagues déferlantes sur le talus de la digue (Ru2%) varie entre 3.12 m et 3.76 m ; pour ces mêmes conditions, certaines houles peuvent atteindre une hauteur de Run-up ($R_{u_{99/100\%}}$) qui varie entre 4.81 et 5.79 m .

L'étendu de la variation du Run-up dans ces conditions entre le Ru2%et le Ru99/100%, est en moyenne de 1.98 m. On remarque aussi que l'ensemble des vagues ont une hauteur de Run-up inférieure à la cote d'arase de la section courante qui est de 6 m.

Près de la jetée Khireddine du port d'Alger, il est observé que le niveau de Run-up de la plupart des vagues déferlantes sur le talus de la digue (Ru2%) varie entre 5,03 m et 6,69 m. Pour ces mêmes conditions, certaines houles peuvent atteindre un niveau de Run-up ($R_{u_{99/100\%}}$) compris entre 7,75 m et 10,31 m.

En moyenne, l'étendue du Run-up dans ces conditions, entre Ru2% et Ru99/100%, est de 3,28 m. Il est également remarqué que toutes les vagues ont un niveau de submersion inférieur à la cote d'arase de la section courante, qui est de 8,5 m.

Tableau V-8 : Résultats de calcul du Run-up de la houle au quel est exposé la section courante de la digue principale de la Marina

Période de retour (année)	H_{mo} (m)	A	B	$Ru_{2\%}$ (m)	$Ru_{99/100}$ % (m)	Etendu du Run-up (m)
2 ans	0.90	-0.20	4.50	3.12	4.81	1.69
10 ans	1.12	-0.20	4.50	3.60	5.55	1.95
50 ans	1.13	-0.20	4.50	3.65	5.62	1.97
100 ans	1.18	-0.20	4.50	3.76	5.79	2.03

Tableau V-9 : Résultats de calcul du Run-up de la houle au quel est exposé la section courante de la jetée principale Khireddine du Port d'Alger

Période de retour (année)	H_{mo} (m)	A	B	$Ru_{2\%}$ (m)	$Ru_{99/100}$ % (m)	Etendu du Run-up (m)
2 ans	1.36	-0.20	4.50	5.03	7.75	2.72
10 ans	1.72	-0.20	4.50	6.07	9.34	3.28
50 ans	1.82	-0.20	4.50	6.47	9.96	3.49
100 ans	1.89	-0.20	4.50	6.69	10.31	3.61

V.4. Le Franchissement de la houle

Lorsque les niveaux du Run-Up dépassent la crête de l'ouvrage, on parle alors de franchissement. Lors de la conception d'ouvrages côtiers ou maritimes, il est essentiel de prendre en compte les situations extrêmes afin d'assurer la stabilité de ces ouvrages et la sécurité des personnes et des biens sur et derrière les structures. Pour cela, les taux de franchissement des vagues doivent être inférieurs au taux admissibles, tant dans des conditions normales de fonctionnement que dans des conditions extrêmes. (CETMEF, 2009). Par conséquent, la prédiction précise du taux de franchissements des vagues est très importante et les impacts potentiels des franchissements doivent être soigneusement évalués pour minimiser les risques liés aux effets destructeurs des houles. La hauteur de la cote d'arase de la crête est déterminée en fonction du débit franchissant de la houle.

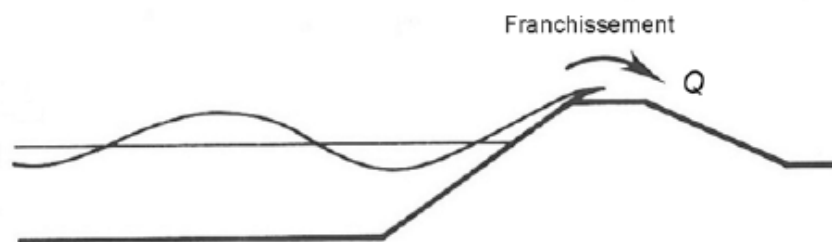


Figure V-2 : Franchissement de la crête de l'ouvrage par les houles

V.4.1. Franchissement sur les Dignes à Talus

Tableau V-10: Débits et volumes franchissants critiques (Allsop et al. 2005)

Risques et dommages	q débit franchissant moyen (m ³ /s par m)
Dignes à talus	
<ul style="list-style-type: none"> -Aucun dégât -Dégâts si la crête n'est pas protégée -Dégâts si le talus arrière n'est pas protégé -Dégâts même si la protection est complète 	$q < 2 \cdot 10^{-3}$ $2 \cdot 10^{-3} < q < 0.02$ $0.02 < q < 0.05$ $q > 0.05$
Piétons	
<ul style="list-style-type: none"> -Dangereux pour des piétons ignorant les risques, plutôt facilement contrariés ou effrayés ; pas de visibilité claire sur la mer, passages étroits ou bord très proche -Dangereux pour des piétons conscients des risques, pas facilement contrariés ou effrayés, capables de tolérer d'être mouillés ; bonne visibilité sur la mer, passage plus large -Dangereux pour le personnel formé, bien chaussé et protégé, qui s'attend à être mouillé ; franchissement à des niveaux bas seulement, pas de retombées, faible risque de chute depuis le passage. 	$q > 3 \cdot 10^{-3}$ $q > 1 \cdot 10^{-4}$ $q > 1 \cdot 10^{-3} - 0.01$
Marina	
<ul style="list-style-type: none"> -Naufrage de petits bateaux amarrés à 5-10 mètres du mur, dégâts sur les bateaux de plus grande taille -Dégâts importants sur de plus grands bateaux, voire naufrage. 	$q > 0.01$ $q > 0.05$
Véhicules	
<ul style="list-style-type: none"> -Dangereux en cas de conduite à vitesse modérée ou rapide, franchissement impulsif donnant lieu à des retombées ou à des jets très rapides. -Dangereux en cas de conduite au pas, franchissement par écoulements pulsatoires à des niveaux bas seulement, pas de retombées. 	$q > 1 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-5}$ $q > 0.01 - 0.05$

Tableau V-11: Formules utilisées pour le calcul du franchissement des vagues sur les Digue à Talus

Formule:	Variables:
$q = A \exp(BR_c)$ <p>Méthode d'Owen (1980) :</p> $R^* = \frac{R_c}{(T_m \sqrt{g H_s})} = \frac{R_c}{(H_s \sqrt{s_{om}/2\pi})}$ $Q^* = a \exp\left(-\frac{bR^*}{\gamma}\right)$ $q = Q^*(T_m g H_s)$ <p>Méthode de TAW (2002a) :</p> <p>Vagues déferlantes ($\gamma_b \xi_{m-1,0} \leq 2$) :</p> $\frac{q}{\sqrt{g H_{m0}^3}} = \frac{A}{\sqrt{\tan \alpha}} \gamma_b \xi_{m-1,0} \exp\left(-B \frac{R_c}{H_{m0}} \frac{1}{\xi_{m-1,0} \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta}\right)$ <p>Vagues non-déferlante ($\gamma_b \xi_{m-1,0} \geq 2$) :</p> $\frac{q}{\sqrt{g H_{m0}^3}} = C \exp\left(-D \frac{R_c}{H_{m0}} \frac{1}{\gamma_f \gamma_\beta}\right)$ <p>Eaux peu profondes ou très peu profondes ($\xi_{m-1,0} > 7$):</p> $\frac{q}{\sqrt{g H_{m0}^3}} = 0.21 \exp\left(\frac{-R_c}{\gamma_f \gamma_\beta H_{m0} (0.33 + 0.22 \xi_{m-1,0})}\right)$ <p>Méthode de l'Eurotop (2007) :</p> $\frac{q}{\sqrt{g H_s^3}} = \frac{0.067}{\sqrt{\tan \alpha}} \cdot \gamma_b \cdot \xi_m \exp\left(-4.75 \frac{R_c}{\xi_m H_s \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_v}\right)$	<p>A et B : dépendent de la méthode employée.</p> <p>Rc : Hauteur de la crête.</p> <p>R*: La revanche adimensionnelle.</p> <p>Q*: Le débit franchissant spécifique adimensionnel.</p> <p>T_m: La période moyenne de la houle.</p> <p>H_s: Hauteur significative de la houle au pied de l'ouvrage.</p> <p>s_{om}: Cambrure nominale de la houle</p> $s_{om} = \frac{2\pi H}{g T_m^2}$ <p>q : Débit franchissant spécifique moyen (m³/s par m).</p> <p>a et b : Coefficients dépendant de la section de l'ouvrage.</p> <p>γ_b, γ_f, γ_β : Facteurs de correction</p> <p>A, B, C, D : Coefficients de tendance moyenne de la totalité des données utilisées dans les calculs probabilistes.</p> <p>ξ_{m-1,0} : Paramètre de déferlement calculé à partir de T_{m-1,0}.</p> <p>ξ_m : Paramètre de déferlement basé sur le s_{om}.</p>

Tableau V-12: Valeurs A, B, C, D des équations du TAW (2002a)

Coefficients des équations du TAW (2002a)	Valeurs avec marge de sécurité (μ-σ) – 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

V.4.2. Résultats de calculs des débits de franchissements de houles sur les digues à talus

Les résultats de calcul des débits franchissant sur les jetées principales sont représentés dans le Tableau V-13 et le Tableau V-14 .

Marina: pour la période de retour de 2 ans, le franchissement par des écoulements pulsatoires à des niveaux bas seulement peut être dangereux lorsqu'il est effectué à basse vitesse ; ce débordement de vagues ne présente pas de risques pour les piétons mais pourrait engendrer un naufrage de petits bateaux amarrés à (5 – 10 mètres) du mur, et quelques dégâts sur les bateaux de plus grande taille et peut aussi causer des dégâts pour les digues à talus si le talus arrière n'est pas protégé.

Pour les périodes allant de 10 à 100 ans, le franchissement (0.29-0.38 m³/s/m) pourrait être dangereux pour les digues à talus et causer des dégâts même si la protection est complète et risque de causer des dégâts importants sur de plus grands bateaux, voire naufrage.

Port: pour la période de retour de 2 ans, le franchissement par des écoulements pulsatoires à des niveaux bas seulement pourrait être dangereux lorsqu'il est effectué à basse vitesse ; pourrait engendrer un naufrage de petits bateaux amarrés à (5 – 10 mètres) du mur, et quelques dégâts sur les bateaux de plus grande taille et peut aussi causer des dégâts pour les digues à talus si le talus arrière n'est pas protégé. Néanmoins, ce débordement de vagues ne présente pas de risques pour les piétons

Pour les périodes de retour de 10 à 100 ans, le franchissement (0.42 – 0.64 m³ /s/m) pourrait être dangereux pour les digues à talus et causer des dégâts même si la protection est complète.

Les résultats de franchissement obtenus pour les différents scénarios de houle, nous ont permis de constater que d'un point de vue structurel, les digues principales sont assez résistantes aux franchissements et ne posent pas de risques majeurs pour la stabilité structurelle de ces digues face aux forces hydrauliques de la mer car les valeurs sont relativement faibles.

Tableau V-13: Résultats de calculs des débits de franchissements sur la section courante de la digue principale de la Marina

Période de retour (année)	Rc (m)	ξ_m	H_s (m)	q (m ³ /s/m)
2 ans	6	3.94	1.97	0.071
10 ans	6	4.85	2.21	0.29
50 ans	6	4.86	2.24	0.30
100 ans	6	5.01	2.30	0.38

Tableau V-14: Résultats de calculs des débits de franchissements sur la section courante de la jetée principale Khireddine du Port

Période de retour (année)	Rc (m)	ξ_m	H_s (m)	q (m ³ /s/m)
2 ans	8.5	3.02	3.37	0.09
10 ans	8.5	3.67	3.88	0.42
50 ans	8.5	3.57	4.16	0.51
100 ans	8.5	3.68	4.28	0.64

V.4.3. Franchissement des vagues sur les Digues Verticales

Tableau V-15: Formules utilisées pour le calcul du franchissement des vagues sur les Digues Verticales (ETEMAD-SHAHIDI A et al. 2016)

Formule :	Variables :
<p>Houles non déferlantes :</p> <p>EurOtop : ($h_* > 0.3$)</p> <p>Pour $0.1 < \frac{R_c}{H_{mo}} < 3.5$:</p> $q_* = \frac{q}{\sqrt{gH_{mo}^3}} = 0.04 \exp\left(-2.6 \frac{R_c}{H_{mo}}\right)$ <p>Houles déferlantes :</p> <p>EurOtop: ($h_* < 0.2$)</p> <p>Pour $0.03 < h_* \frac{R_c}{H_{mo}} < 1.0$:</p> $q_* = \frac{q}{h_*^2 \sqrt{gH_{mo}^3}} = 1.5 \times 10^{-4} \left((h_* \frac{R_c}{H_{mo}})^{-3.1} \right)$ <p>Pour $h_* \frac{R_c}{H_{mo}} < 0.02$:</p> $q_* = \frac{q}{h_*^2 \sqrt{gh^3}} = 2.7 \times 10^{-4} \left((h_* \frac{R_c}{H_{mo}})^{-2.7} \right)$ <p>Digues Verticales Composites :</p> <p>Pour $0.05 < d_* \frac{R_c}{H_{mo}} < 1.0$:</p>	<p>h_* : Paramètre discriminant de déferlement :</p> $h_* = 1.35 \frac{h^2}{H_{mo} L_{m-1,0}}$ <p>Dans le cas de digues verticales composites avec berme ou butée, h_* est remplacé par d_*</p> <p>d_* : Paramètre de déferlement modifié.</p> $d_* = 1.35 \frac{h}{H_{mo}} \frac{2\pi h}{gT_{m-1,0}^2}$ <p>d : Profondeur de la berme.</p> <p>h : Profondeur de l'eau au pied de la structure.</p> <p>g: Accélération de la gravité.</p> <p>H_{mo} : Hauteur de la vague au pied de la structure.</p> <p>q : Débit moyen de débordement par unité de largeur.</p> <p>$L_{m-1,0}$: Longueur de vague en eau profonde basée sur $T_{m-1,0}$.</p> $L_{m-1,0} = \frac{2\pi}{gT_{m-1,0}^2}$ <p>q^* : Taux de débordement sans dimension par unité de largeur.</p>

$$q_* = \frac{q}{d_*^2 \sqrt{gd^3}} = 4.1 \times 10^{-4} \left((d_* \frac{R_c}{H_{mo}}) \right)^{-2.9}$$

La formule dérivée de Goda (2009) :

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{mo}^3}} = \exp \left(-A - B \frac{R_c}{H_{mo}} \right)$$

$$A = A_0 \tanh \left[\left(0.956 + 4.44 \tan \theta \right) \times \left(\frac{h}{H_{mo}} + 1.242 - 2.032 \tan^{0.25} \theta \right) \right]$$

$$B = B_0 \tanh \left[\left(0.822 - 2.22 \tan \theta \right) \times \left(\frac{h}{H_{mo}} + 0.578 - 2.22 \tan \theta \right) \right]$$

Pour : $0 \leq \cot \alpha \leq 7$

$$A_0 = 3.4 - 0.734 \cot \alpha + 0.239 \cot^2 \alpha - 0.0162 \cot^3 \alpha$$

$$B_0 = 2.3 - 0.5 \cot \alpha + 0.15 \cot^2 \alpha - 0.011 \cot^3 \alpha$$

Van der Meer et Bruce (2014) :

Digue verticale composite avec une pente du fond et une crête : ($R_c > 0.91H_{mo}$)

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{mo}^3}} = 0.2 \exp \left(-4.3 \frac{R_c}{H_{mo}} \right)$$

R_c : Franc-bord de la crête de l'ouvrage.

A et B : Fonctions de la pente du fond marin, de la pente de la digue /de la structure et de la Profondeur relative du pied ($\frac{h}{H_{mo}}$).

V.4.4. Résultats de calcul du débit de franchissement des vagues sur les digues verticale

Les résultats de calcul obtenus du débit de franchissement des vagues sur la digue verticale Mustapha du port d'Alger sont présentés dans le Tableau V-16. Ces résultats indiquent que, pour tous les scénarios considérés, des quantités de franchissements très faibles ont été observés. Cela suggère que du point de vue structurel, cette digue verticale assure la protection de la zone derrière la structure et peut résister aux franchissements. Elle présente peu de risques pour sa stabilité face aux forces hydrauliques de la mer.

Tableau V-16: résultats de calcul des débits moyens franchissant auxquels est exposée la digue verticale Mustapha

Formule utilisée : Van der Meer et Bruce (2014), appliquée pour digue verticale composite avec une pente du fond et une crête ($R_c > 0.91H_{mo}$) avec ($R_c = 5.5m$).		
Période de retour	H_{mo}	Débit franchissant moyen q
Année	m	(m ³ /s par m)
2ans	2.32	8.27×10^{-5}
5ans	2.64	3.46×10^{-4}
10ans	2.96	1.08×10^{-3}
20ans	3.15	1.92×10^{-3}
30ans	3.23	2.4×10^{-3}
50ans	3.4	3.74×10^{-3}
100ans	4.5	0.03

V.5. Conclusion

On peut conclure que les calculs réalisés dans ce chapitre démontrent que les sections courantes des digues principales de la Marina et du Port d'Alger sont suffisamment bien protégées et capables de résister à différentes conditions extrêmes.

Il est également possible de conclure que les résultats des franchissements pour les digues à talus et la digue verticale sont cohérents, ce qui confirme que ces digues sont résistantes et présentent un faible risque pour leur stabilité face aux forces hydrauliques de la mer.

Dans le prochain chapitre, on va explorer une nouvelle approche de calcul des franchissements. Cette méthode se basera sur des essais réels effectués par plusieurs laboratoires sur diverses digues à talus.

Chapitre VI. Machine Learning

VI.1. Introduction

L'Intelligence Artificielle (IA) est une branche qui vise le développement des systèmes capables de réaliser des tâches nécessitant normalement l'intelligence humaine comme la prédiction de résultats. Ces systèmes ont alors la possibilité d'apprendre à partir de données expérimentales. Elle utilise des algorithmes sophistiqués et des modèles mathématiques pour assurer cette tâche. (Aurélien, 2017). Le Machine Learning (ML) (l'apprentissage automatique) est un domaine de l'intelligence artificielle donnant à la machine la capacité d'apprendre sans qu'elle soit explicitement programmée. (Arthur Samuel, 1959).

Dans le cadre de notre étude, le Machine Learning sera appliqué pour la prédiction du volume de franchissement des vagues sur les structures portuaires.

VI.2. Machine Learning

Les étapes de création de modèles d'apprentissage automatique sont généralement les suivantes

- Compréhension du problème.
- Collecte et préparation des données.
- Choix et préparation du modèle.
- Entraînement du modèle.
- Validation du modèle.
- Évaluation des performances.
- Déploiement du modèle.

VI.2.1. Types d'apprentissage

On distingue quatre types d'apprentissage (Learning) :

VI.2.1.1. Apprentissage Supervisé

L'apprentissage Supervisé est une technique qui consiste à entraîner des modèles prédictifs d'intelligence artificielle à partir de données ou d'exemples préalablement étiquetés. L'objectif est de permettre au modèle d'attribuer des valeurs ou des classes aux nouvelles données en se basant sur les observations précédentes. Cette méthode est largement utilisée dans les systèmes de classification pour trier les données selon des classes prédéterminées, dans le but de prédire des résultats futurs.

VI.2.1.2. Apprentissage Semi-supervisé

C'est une technique qui utilise un ensemble de données contenant à la fois des exemples étiquetés et non étiquetés. L'objectif est le même que pour l'apprentissage supervisé, mais on utilise des exemples non étiquetés pour améliorer la qualité du modèle appris.

VI.2.1.3. Apprentissage non supervisé

Il consiste à entraîner des modèles sans avoir besoin d'étiquetage manuel ou automatique des données. La catégorisation des données revient à la machine. Ces algorithmes regroupent les données en fonction de leur similitude, sans intervention humaine, pour découvrir des modèles, des tendances et les relations présentes dans la base de données. Ainsi, en fonction du but recherché, il reviendra à l'opérateur ou au chercheur de les analyser afin d'en déduire les différentes hypothèses.

VI.2.1.4. Apprentissage par renforcement

Il est utilisé pour résoudre des problèmes complexes qui ne permettent pas de définir des règles de décision optimales de manière explicite. Elle se concentre sur l'apprentissage à partir de l'expérience, permettant à un agent d'IA d'apprendre à décider en interagissant avec son environnement.

VI.2.2. Objectifs de Machine Learning

Les objectifs du Machine Learning sont variés et dépendent des applications spécifiques. Cependant, les objectifs courants du Machine Learning sont la classification, la régression, le regroupement (clustering). Il est également utilisé pour d'autres objectifs tels que la détection d'anomalies et la proposition des recommandations personnalisées.

VI.2.2.1. Classification

La classification implique la modélisation de différents ensembles de données pour les regrouper dans des classes préétablies et connues. En d'autres termes, elle permet d'assigner des données à des catégories prédéfinies.

VI.2.2.2. Régression

La régression consiste à prédire une valeur cible en fonction de variables d'entrée en trouvant le meilleur modèle d'ajustement mathématique qui relie ces variables. Cela permet de modéliser la relation entre les variables et de prédire la valeur de la variable cible pour de nouvelles données d'entrée. Il existe plusieurs types de régression, chacun est adapté à des situations spécifiques et à des données particulières. (Pant A., 2019).

VI.2.2.3. Regroupement

Le regroupement (Clustering) est une technique d'apprentissage automatique non supervisée qui permet de regrouper des ensembles de données par distance ou par similarité. Cette méthode est largement utilisée pour l'analyse de données et pour la réduction des dimensions.

VI.2.3. Overfitting

Le Sur apprentissage (Overfitting) se produit lorsque le modèle prédictif s'adapte trop bien aux données d'apprentissage en capturant toutes les fluctuations et en s'entraînant même sur le bruit de ces données. Par conséquent, la fonction prédictive ne généralise pas bien, elle prédira mal sur des données qu'elle n'a pas encore vues lors de sa phase d'apprentissage.

VI.2.4. Underfitting

Le sous-apprentissage (Underfitting) se produit lorsque le modèle prédictif est trop simple et n'arrive même pas à capturer les corrélations des données d'apprentissage. Par conséquent, le coût d'erreur en phase d'apprentissage reste grand et le modèle prédictif ne se généralisera pas bien non plus sur les données qu'il n'a pas encore vues. (Benzaki Y. 2017).

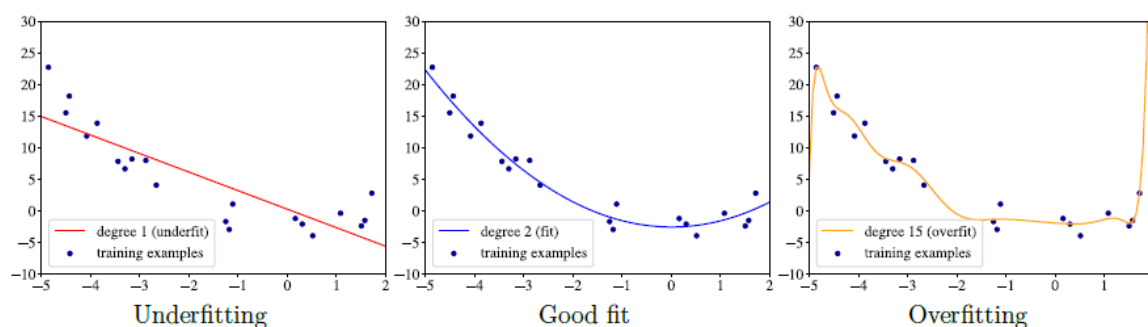


Figure VI-1 Exemples de Sous-apprentissage, un bon apprentissage et un sur apprentissage (Burkov A.)

VI.2.5. Modèles de Machine Learning

Dans la suite, on va présenter les modèles utilisés dans notre travail.

VI.2.5.1. Régression Linéaire

La régression linéaire est une méthode statistique qui consiste à trouver la relation linéaire entre une variable cible et une ou plusieurs variables d'entrée. Ce modèle utilise une équation linéaire afin de représenter la relation entre les variables. L'Équation VI-1 présente le cas linéaire d'une seule variable indépendante. Le but est de trouver alors les coefficients β_1 et β_0 minimisant l'erreur quadratique MSE (Mean Squared Error) qui représente en fait la distance entre les valeurs mesurées et prédites. Pour l'évaluer, on utilise la formule illustrée dans l'Équation VI-2. Une fois le modèle construit, il peut être utilisé pour prédire les valeurs de la variable cible pour de nouvelles données d'entrée.

$$Y = \beta_1 x_1 + \beta_0 \quad \text{Équation VI-1}$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum (Y_{réelle} - Y_{prédite})^2 \quad \text{Équation VI-2}$$

VI.2.5.2. Régression Polynomiale

La régression polynomiale est une méthode spécifique du cas de régression linéaire qui permet de trouver la relation entre une variable dépendante et une ou plusieurs variables indépendantes en utilisant une fonction polynomiale. En ajustant une courbe polynomiale aux données, ce modèle permet de modéliser des relations non linéaires entre les variables et d'approximer une relation complexe.

VI.2.5.3. Réseau de neurones artificiel

Le réseau de neurones artificiel ANN (Artificial Neural Network) est un modèle d'apprentissage automatique qui simule le fonctionnement du cerveau humain en utilisant des couches de neurones interconnectées pour traiter des données et effectuer des tâches. Le type de réseau de neurones le plus simple est appelé Perceptron qui est un algorithme d'apprentissage automatique supervisé de classification binaire (B.L. Flávio., 2018) inventé en 1943 par Walter Pitts et Warren McCulloch (DIARETDB0.Evaluation Database).

Structure d'un neurone

La structure générale du réseau de neurones artificiel est composée de 6 parties et peut varier selon la méthode de traitement et l'objectif des données (Figure VI-2).

1. Les entrées ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$).
2. Les poids ($w_1, w_2, w_3, \dots, w_p$).
3. Une fonction de somme (Σ).
4. Un biais (w_0).
5. Une fonction d'activation (h).
6. Une sortie (y).

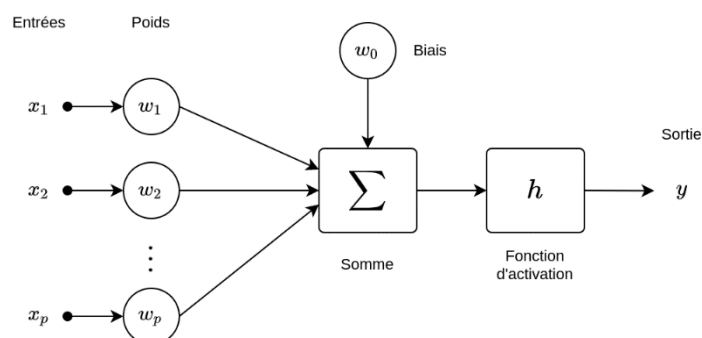


Figure VI-2 Architecture générale d'un neurone (Jumelle Maxime. 2022)

VI.2.5.4. Arbres de décision

Les arbres de décision (Decision Trees) sont une méthode d'apprentissage supervisé non paramétrique utilisée pour la classification et la régression. Ils comportent trois parties principales : un nœud racine, des nœuds feuilles et des branches (Figure VI-3). L'objectif est de créer un modèle qui prédit la valeur de la variable cible en apprenant des règles de décision simples déduites des caractéristiques des données.

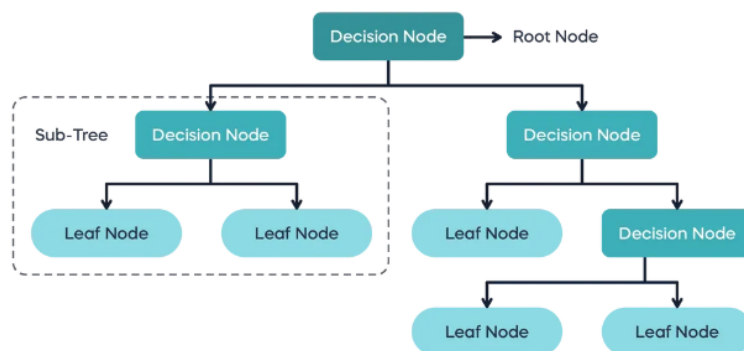


Figure VI-3 Structure générale d'un arbre de décision

VI.2.5.5. Forêts d'arbres de décision

Les Forêts d'arbres de décision (Random Forests) est une technique d'apprentissage automatique supervisé très populaire en raison de sa précision, sa simplicité et sa flexibilité. Cet algorithme peut être utilisé pour résoudre les problèmes de régression et de classification. Son principe de fonctionnement repose sur la combinaison des résultats d'un grand nombre d'arbres de décision aléatoires (Figure VI-4), pour améliorer la précision des prédictions. (BELAIDI N. 2022).

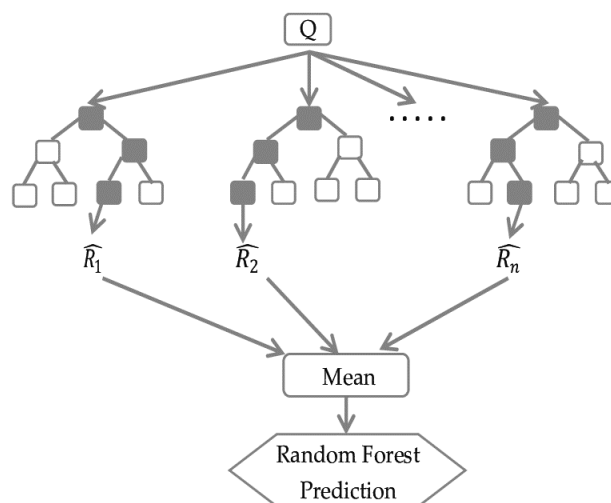


Figure VI-4 Structure des Forêts d'arbres de décision (Maaz et al .2022)

VI.2.5.6. Amplification de Gradient

L'amplification de gradient (Gradient Boosting) est un algorithme d'apprentissage automatique qui vise à trouver les relations non linéaires entre la variable cible et les variables indépendantes. Il offre une facilité d'utilisation en traitant les valeurs manquantes, aberrantes et catégorielles sans traitement spécial. Le Gradient Boosting permet également d'améliorer la précision des prédictions en combinant plusieurs modèles faibles (Figure VI-5). Il se base sur l'ajout itératif de modèles à un ensemble de modèles existants, en se concentrant sur les erreurs commises par ces derniers (TOMONORI M.2022).

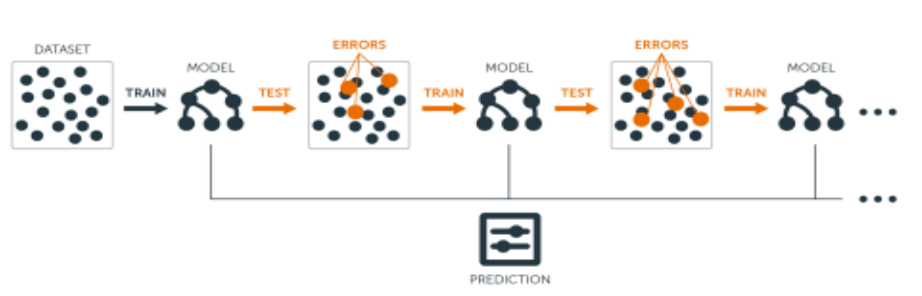


Figure VI-5 Fonctionnement des Gradient Boosting (UC Business Analytics R Programming Guide)

VI.2.5.7. XGBoost

XGBoost, ou Extreme Gradient Boosting, est un algorithme d'apprentissage automatique puissant et populaire qui s'est révélé très efficace dans de nombreux domaines. Il a été développé par Tianqi Chen en 2016 et est basé sur la technique de boosting. Le XGBoost combine plusieurs modèles d'arbre de décision faibles pour former un modèle plus fort et plus généralisable (Figure VI-6). Il est particulièrement utilisé pour sa capacité à gérer des ensembles de données volumineux et complexes, ainsi que pour son efficacité dans la réduction de l'overfitting grâce à des régularisations intégrées.

L'un des principaux avantages de XGBoost est sa vitesse d'exécution. Il utilise une méthode d'optimisation des arbres basée sur le calcul des gradients, ce qui lui permet de prendre des décisions plus éclairées lors de la construction des arbres.

Un autre aspect essentiel de XGBoost est sa capacité à gérer différentes tâches de machine learning, telles que la classification, la régression. Il offre une gamme variée d'options de paramètres qui permettent aux utilisateurs de personnaliser le modèle en fonction des besoins spécifiques de leur projet. Le XGBoost est également bien adapté à la manipulation de caractéristiques manquantes, réduisant ainsi le besoin de prétraitement des données. Grâce à son efficacité, sa précision et sa capacité à traiter des ensembles de données complexes.

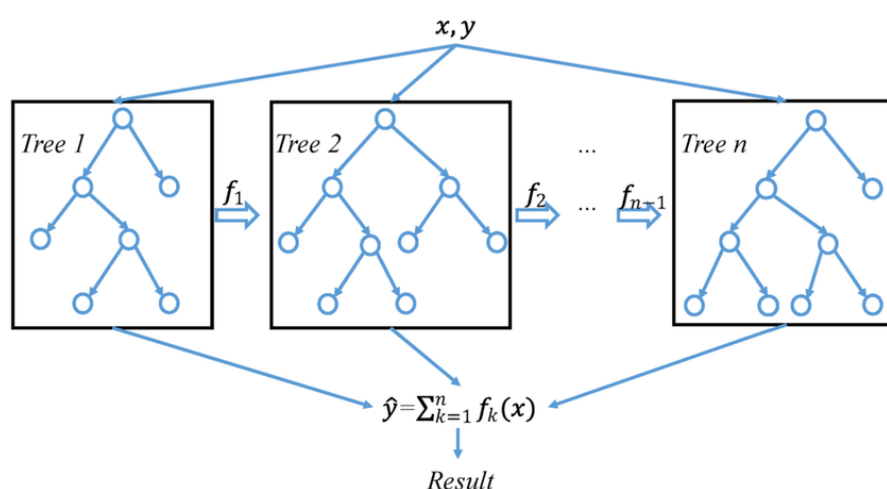


Figure VI-6 Structure générale de l'XGBoost (Wang et al. 2019)

VI.3. Description de la base de données CLASH

Les données utilisées dans cette étude ont été obtenues à partir de la base de données créée dans le cadre du projet européen CLASH (*Crest Level Assessment of Coastal Structures by full scale monitoring, neural network prediction and Hazard Analysis on permissible wave overtopping*), dont l'un des principaux objectifs était de créer un modèle de prédiction du franchissement des vagues pour une grande variété de structures côtières (De Rouck et al. 2002). Cette base de données comprend des mesures provenant de différents laboratoires à travers le monde sur plusieurs types de structures côtières. Elle est décrite en détail dans Verhaeghe et al. (2003) et Steendam et al. (2004). Cette base de données contient 10 532 entrées décrites au moyen de 31 paramètres. Ces derniers sont divisés en trois groupes : 03 paramètres généraux, 11 paramètres hydrauliques et 17 paramètres structurels. Les enregistrements ont été également évalués en termes de fiabilité et de complexité représentées par le facteur (RF) et le facteur (CF) respectivement. Les valeurs de RF peuvent varier de 1 lorsque tous les paramètres sont disponibles et que les tests sont très fiables à 4 lorsque les tests sont peu fiables, avec des estimations de paramètres inacceptables et une grande incertitude. De même, CF est attribué en fonction de la complexité de la structure testée, allant de 1 pour les structures "très simples" à 4 pour les structures (très complexes) qui ne peuvent pas être précisément décrites par les paramètres choisis.

VI.3.1. Composition de la base de données

La (Figure VI-7) illustre l'ensemble des paramètres utilisés pour analyser le champ de houles et la forme géométrique d'une structure. Pour le champ de houles, trois paramètres sont considérés : la hauteur significative des vagues (H_{m0}), la période moyenne des vagues ($T_{m-1.0}$) et la direction d'attaque des vagues (θ). Quant à la forme de la structure, douze paramètres sont pris en compte, tels que la profondeur de l'eau devant et à la base de la structure, la largeur de la plateforme, la rugosité ou perméabilité de la structure, les pentes en amont et en aval de la plateforme, la largeur et la hauteur libre de crête de la structure, ainsi que la largeur de la crête du couronnement. Le détail des paramètres utilisés est mentionné dans le Tableau VI-1, Tableau VI-2 et Tableau VI-3.

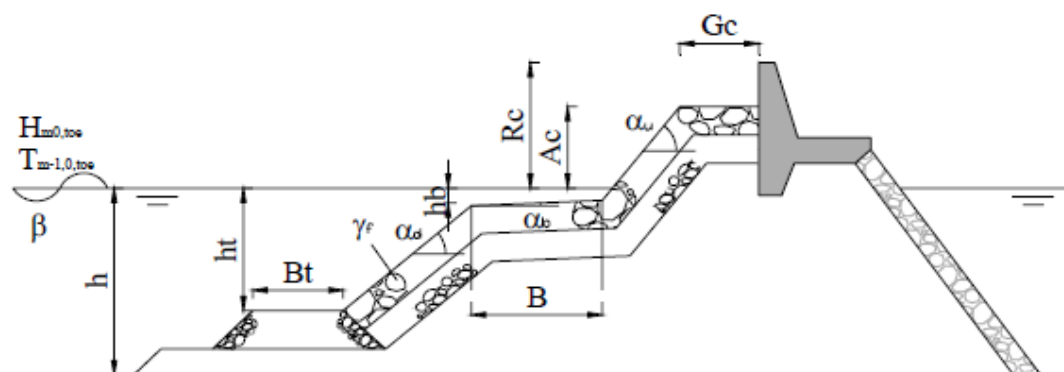


Figure VI-7 : Paramètres de la base de données sur le franchissement des vagues (Van Gent et al. (2007)).

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

Paramètre	Description	min	max
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.		
RF [-]	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).	1	4
CF [-]	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).	1	4

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

Paramètre	Description	min	max
Hm0 deep [m]	Hauteur significative des vagues à partir de l'analyse spectrale $4\sqrt{m_0}$, déterminée en eau profonde	0.003	5.920
Tp deep [s]	Période de pointe de l'analyse spectrale en eau profonde	0.545	15
Tm deep [s]	Période moyenne provenant soit de l'analyse spectrale $=m_2/m_0$, soit de l'analyse temporelle (passage par zéro) en eau profonde.	0.454	12.5
Tm -1,0 deep [s]	Période moyenne de l'analyse spectrale en eau profonde $=m_1/m_0$	0.495	13.636
β [°]	Angle d'attaque des vagues incidentes par rapport à la normale à la structure	0	80
Hm0 toe [m]	Hauteur significative des vagues d'après l'analyse spectrale $=4\sqrt{m_0}$ au pied de l'ouvrage	0.003	3.8
Tp toe [s]	Période de pointe de l'analyse spectrale au pied de la structure	0.545	16.4
Tm toe [s]	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	0.454	11.881
Tm -1,0 toe [s]	Période moyenne de l'analyse spectrale au pied de la structure $=m_1/m_0$	0.495	10.640
q [m³/s.m]	Débit de débordement par seconde et par mètre de largeur	0	0.165
Pow [-]	Pourcentage des vagues entraînant une surcharge.	0	81

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

Paramètre	Description	min	max
m [-]	Pente de fond au pied ouvrage	6	1000
h [m]	Profondeur de l'eau au pied de l'ouvrage	0.029	9.32
h_{deep} [m]	Profondeur de l'eau en eau profonde	0	100
ht [m]	Profondeur de l'eau au pied de l'ouvrage	0.025	7.78
Bt [m]	Largeur du pied de la structure	0	10
γ_f [-]	Facteur de rugosité/perméabilité de la structure	0.350	1
cotad [-]	Cotangente de la pente de la structure vers le bas de la berme	0	7
cotau [-]	Cotangente de la pente de la structure vers le haut de la berme	-5	9.7
cotaexcl [-]	Cotangente moyenne de la pente de l'ouvrage, sans contribution de la berme	-1.533	8.1
cotaincl [-]	Cotangente moyenne de la pente de l'ouvrage, avec contribution de la berme	-1.533	12.8
Rc [m]	Le franc-bord de la structure	0	8.3
B [m]	Largeur de la berme	0	8
hb [m]	Profondeur de l'eau sur la berme	-0.208	1.175
$\tan\alpha_B$ [-]	Tangente de la pente de la berme	0	0.125
Bh [m]	Largeur de la berme schématisée horizontalement	0	8
Ac [m]	Le franc-bord de la crête de blindage de la structure	0	7.87
Gc [m]	Largeur de la crête de l'ouvrage	0	5.6

VI.4. Prétraitement des données

Le Tableau VI-4 présente un résumé des caractéristiques des paramètres inclus dans la base de données brute CLASH. Il est important de noter qu'il y a des valeurs manquantes qui nécessitent une phase de nettoyage.

Tableau VI-4 : Caractéristiques des paramètres de la base de données CLASH

Numéro de la colonne	Nom de la colonne	Type de données	Valeurs manquantes
1	Name	object	0
2	$H_{mo\ deep}$ (m)	float64	435
3	$T_{p\ deep}$ (s)	float64	379
4	$T_{m\ deep}$ (s)	float64	379
5	$T_{m-1,0\ deep}$ (s)	float64	379
6	$h_{\ deep}$ (m)	float64	1
7	m (-)	float64	54
8	β (°)	float64	24
9	h (m)	float64	2
10	$H_{m0\ toe}$ (m)	float64	35
11	$T_{p\ toe}$ (s)	float64	59
12	$T_{m\ toe}$ (s)	float64	59
13	$T_{m-1,0\ toe}$ (s)	float64	25
14	h_t (m)	float64	1
15	Bt (m)	float64	0
16	γ_f (-)	float64	16
17	$cot_{\alpha d}$ (-)	float64	0
18	$cot_{\alpha u}$ (-)	float64	0
19	$cot_{\alpha excl}$ (-)	float64	26
20	$cot_{\alpha incl}$ (-)	float64	26
21	Rc (m)	float64	1
22	B (m)	float64	0
23	h_b (m)	float64	0
24	$\tan_{\alpha B}$ (-)	float64	0
25	B_h (m)	float64	0
26	Ac (m)	float64	0
27	Gc (m)	float64	0
28	RF (-)	int64	0
29	CF (-)	int64	0
30	q ($m^3/s/m$)	object	7
31	P_{ow}	float64	9792
32	Remark	object	10023
33	Reference	object	2816

VI.4.1. Nettoyage des données

Étant donné que les données erronées peuvent sérieusement compromettre les performances des modèles à créer, la base de données initiale a été réduite en éliminant les données qualifiées de tests "non fiables" (RF=4) ou les données pour lesquelles la section transversale était considérée comme "très complexe" (CF=4). Les incohérences claires au sein de la base de données ont été détectées et éliminées. Toutes les lignes ayant des valeurs manquantes ont été supprimées la base de données réduite résultante comprend alors 8091 tests.

La Figure VI-8 présente un aperçu de la base de données une fois qu'elle a été nettoyée.

	Name	Beta	h	Hm0 toe	Tm-1,0 toe	ht	Bt	gf	cotad	cotau	Rc	B	hb	tanaB	Bh	Ac	Gc	q
0	380-026	0	1.014	0.114	1.437	0.400	0.143	0.38	2.0	2.0	0.300	0.00	0.00	0.0	0.00	0.186	0.514	4.830000e-09
1	030-339	0	0.160	0.050	0.846	0.160	0.000	1.00	4.0	4.0	0.120	0.40	0.00	0.0	0.40	0.120	0.000	2.020000e-09
2	380-007	0	1.014	0.112	1.437	0.366	0.143	0.38	2.0	2.0	0.220	0.00	0.00	0.0	0.00	0.129	0.523	1.060000e-08
3	352-055	0	0.280	0.118	1.650	0.193	0.070	0.38	1.5	2.0	0.228	0.63	0.07	0.0	0.63	0.228	0.162	1.160000e-08
4	380-033	0	1.014	0.114	1.437	0.400	0.143	0.38	2.0	2.0	0.220	0.00	0.00	0.0	0.00	0.186	0.514	1.450000e-08
...
8086	102-022	0	0.800	0.127	1.775	0.800	0.000	1.00	4.0	4.0	0.000	0.00	0.00	0.0	0.00	0.000	0.000	1.040000e-02
8087	102-023	0	0.800	0.128	2.166	0.800	0.000	1.00	4.0	4.0	0.000	0.00	0.00	0.0	0.00	0.000	0.000	1.320000e-02
8088	102-019	0	0.800	0.086	2.203	0.800	0.000	1.00	4.0	4.0	0.000	0.00	0.00	0.0	0.00	0.000	0.000	8.000000e-03
8089	102-018	0	0.800	0.083	1.775	0.800	0.000	1.00	4.0	4.0	0.000	0.00	0.00	0.0	0.00	0.000	0.000	7.650000e-03
8090	102-020	0	0.800	0.077	3.033	0.800	0.000	1.00	4.0	4.0	0.000	0.00	0.00	0.0	0.00	0.000	0.000	9.020000e-03

Figure VI-8 : Aperçu de la base de données nettoyée.

VI.4.2. Application de la Similitude de Froude

La similitude de Froude est une méthode qui permet de redimensionner les paramètres hydrauliques afin d'obtenir des comportements similaires entre prototypes réduits et réels. Elle se fonde sur le rapport des forces inertielles et gravitationnelles pour maintenir les mêmes proportions et caractéristiques. La loi de similitude de Froude a été utilisée pour fournir la meilleure généralisation des applications à grande échelle. Les équations (Équation VI-3, Équation VI-4, Équation VI-5 et Équation VI-6) donnent les lois permettant le calcul de la réduction d'échelle selon la similitude de Froude.

$$n_L = 1/H_{mo, toe \text{ observée}} \quad \text{Équation VI-3}$$

$$[n_{Hm0}, n_h, n_{ht}, n_{Bt}, n_B, n_{hb}, n_{Rc}, n_{Ac}, n_{Gc}] = n_L \quad \text{Équation VI-4}$$

$$n_T = n_L^{0.5} \quad \text{Équation VI-5}$$

$$n_q = n_L^{1.5} \quad \text{Équation VI-6}$$

Après avoir effectué les mêmes procédures et appliqué la similitude de Froude, les résultats statistiques ont été résumés dans le Tableau VI-5. On remarque que les résultats obtenus sont pratiquement similaires à ceux publiés par (Gosse, J. S., Jentsje Wouter, v. d., et al. (2004)).

Tableau VI-5 : Résumé de statistiques obtenues après l'application de l'échelle de Froude

	Mean	Standard Deviation	Maximum	Minimum
H_{mo}'	1.00	1.00	1.00	1.00
$T_{m-1,0}'$	5.04	2.79	69.46	2.72
β'	3.3	11.4	79.00	0.0
h'	3.72	2.75	32.22	0.90
h_t'	3.28	2.58	25.93	0.49
B_t'	0.78	1.55	19.05	0.00
γ_f'	0.70	0.28	1.00	0.33
cot_{ad}'	2.00	1.43	7.00	0.00
cot_{au}'	1.90	1.70	9.71	-5.00
Rc'	1.42	0.64	6.42	0.00
B'	0.70	2.13	38.46	0.00
h_b'	0.05	0.41	7.89	-1.21
$tan_{\alpha B}'$	0.00	0.01	0.10	0.00
Ac'	1.32	0.65	6.24	0.00
Gc'	0.95	1.32	13.24	0.00
q'	$8.03 \cdot 10^{-3}$	$2.03 \cdot 10^{-2}$	$4.22 \cdot 10^{-1}$	$1.25 \cdot 10^{-7}$

Tableau VI-6 : Résumé de statistiques obtenues par l'article après l'application de l'échelle de Froude

Parameter	Mean	Standard Deviation	Maximum	Minimum
H_{mo}' (m)	1.0	0.0	1.0	1.0
$T_{m-1,0}'$ (s)	5.0	2.8	69.5	2.7
β'	3.4	11.3	80.0	0.0
h' (m)	3.7	2.8	32.2	0.9
h_t' (m)	3.3	2.7	25.9	0.5
B_t' (m)	0.7	1.5	19.0	0.0
γ_f'	0.7	0.2	1.0	0.3
$cot \alpha_d'$	1.9	1.4	7.0	0.0
$cot \alpha_u'$	1.8	1.7	9.7	-5.0
B' (m)	0.7	2.1	38.5	0.0
h_b' (m)	0.1	0.4	7.9	-1.2
$tan \alpha_B'$	0.0	0.01	0.13	0.0
Rc' (m)	1.4	0.6	6.4	0.0
A_c' (m)	1.3	0.6	6.2	0.0
G_c' (m)	0.9	1.3	13.2	0.0
q' (m ³ /s/m)	$8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-7}$

VI.5. Analyse et Validation de l'algorithme ANN

Dans cette partie, le modèle de réseau neuronal (NN), développé, par Gent, M. R., Boogaard, H. F., et al. (2007), est reproduit. Le Tableau VI-7 présente les features utilisés par cet algorithme.

Tableau VI-7 : Features utilisées pour le développement du modèle NN

Name	Symbol	Unit	NN	Fr Scaled
Mean wave overtopping discharge	q	$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$	✓	✓
Water depth, toe	h	m	✓	✓
Spectral significant wave height, toe	$H_{m0,toe}$	m	✓	-
Spectral wave period, toe	$T_{m-1,0,toe}$	s	✓	✓
Angle of wave attack	β	°	✓	-
Roughness factor of the structure	γ_f	-	✓	-
Cotangent of the lower slope	$\cot \alpha_d$	-	✓	-
Cotangent of the upper slope	$\cot \alpha_u$	-	✓	-
Crest freeboard	R_c	m	✓	✓
Armour crest freeboard	A_c	m	✓	✓
Difference between crest and armour crest freeboard	dA_c	m	-	✓
Crest width	G_c	m	✓	✓
Width of the berm	B	m	✓	✓
Water depth above the berm	h_b	m	✓	✓
Tangent of berm slope	$\tan \alpha_B$	-	✓	-
Water depth above the toe structure	h_t	m	✓	✓
Thickness of the toe structure	t_t	m	-	✓
Width of the toe structure	B_t	m	✓	✓
Complexity factor	CF	-	✓	-
Reliability factor	RF	-	✓	-

Après la reproduction de ce modèle comme décrit dans l'article de Gent, M. R., Boogaard, H. F., et al. (2007), les résultats obtenus sont illustrés dans la Figure VI-9. Le score R^2 indique une valeur de 0,84 pour l'ensemble d'apprentissage et de 0,82 pour l'ensemble de test. Ces scores montrent une bonne corrélation entre les valeurs mesurées et prédites, comme le confirme le diagramme de dispersion (Figure VI-9).

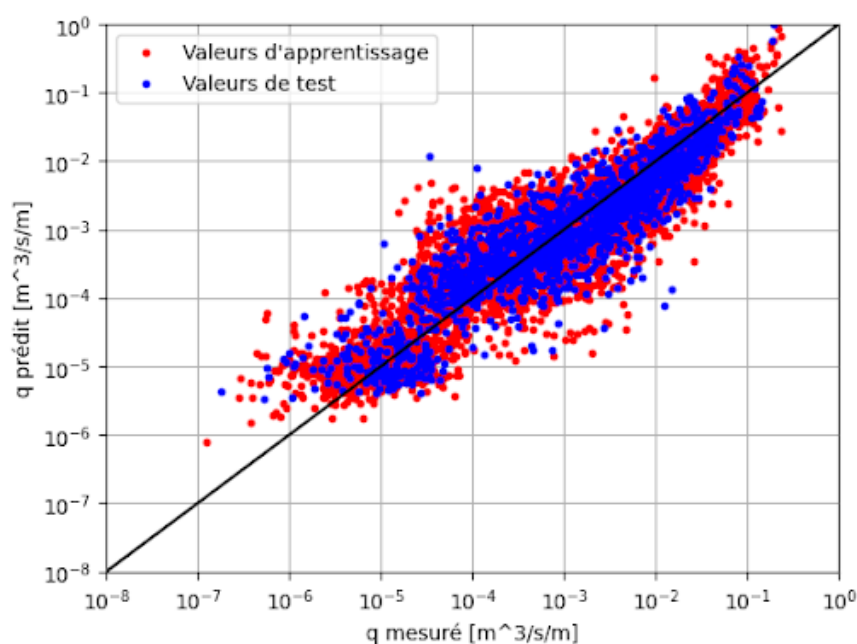


Figure VI-9 : Prédictions de la méthode de l'ANN répliquée.

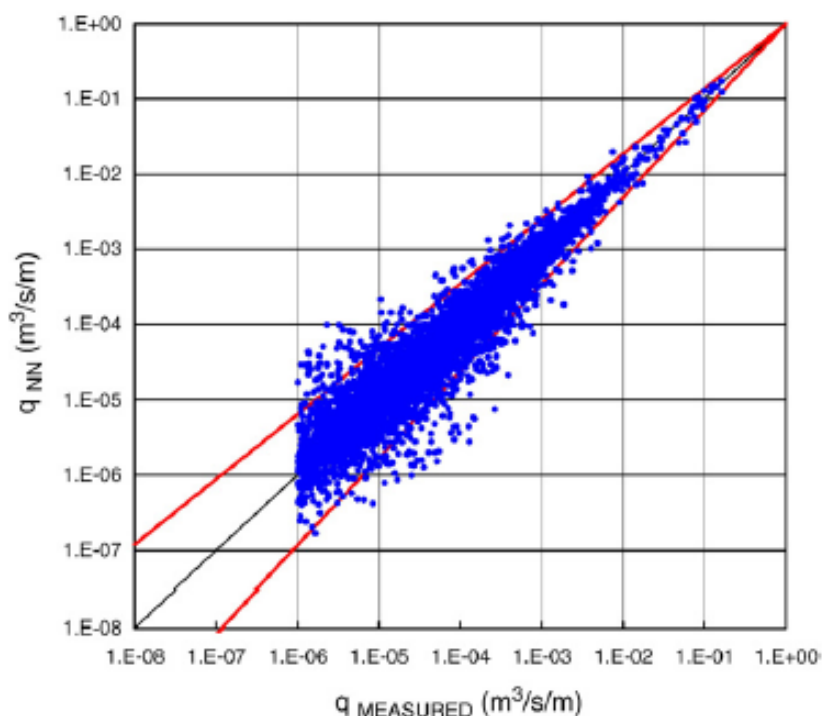


Figure VI-10 : Prédications de la méthode de l'ANN publiée (2007).

VI.6. Analyse et Validation de l'algorithme XGboost

L'algorithme XGBoost, initialement publié par Bieman, J. P., al, J. M. (2020) est reproduit dans cette partie. Les caractéristiques utilisées par cet algorithme sont présentées dans le Tableau VI-8.

Tableau VI-8 : Features utilisées pour le développement du modèle XGBoost

Name	Symbol	Unit	XGB	Fr Scaled
Mean wave overtopping discharge	q	$m^3/s/m$	✓	✓
Water depth, toe	h	m	✓	✓
Spectral significant wave height, toe	$H_{m0,toe}$	m	✓	-
Spectral wave period, toe	$T_{m-1,0,toe}$	s	✓	✓
Angle of wave attack	β	°	✓	-
Roughness factor of the structure	γ_f	-	✓	-
Cotangent of the lower slope	$\cot \alpha_d$	-	✓	-
Cotangent of the upper slope	$\cot \alpha_u$	-	✓	-
Crest freeboard	R_c	m	✓	✓
Armour crest freeboard	A_c	m	-	✓
Difference between crest and armour crest freeboard	dA_c	m	✓	✓
Crest width	G_c	m	✓	✓
Width of the berm	B	m	✓	✓
Water depth above the berm	h_b	m	✓	✓
Tangent of berm slope	$\tan \alpha_B$	-	✓	-
Water depth above the toe structure	h_t	m	-	✓
Thickness of the toe structure	t_t	m	✓	✓
Width of the toe structure	B_t	m	✓	✓
Complexity factor	CF	-	✓	-
Reliability factor	RF	-	✓	-

L'implémentation en Python de cet algorithme, comme indiquée dans l'article, est utilisée pour reproduire les résultats. La Figure VI-11 présente une représentation visuelle des résultats obtenus. L'ensemble d'apprentissage affiche un score R^2 de 0,95, tandis que l'ensemble de test atteint un score de 0,89. Ces scores établissent une forte corrélation entre les valeurs prédites et observées, ce qui est également confirmé par le diagramme de dispersion (Figure VI-11).

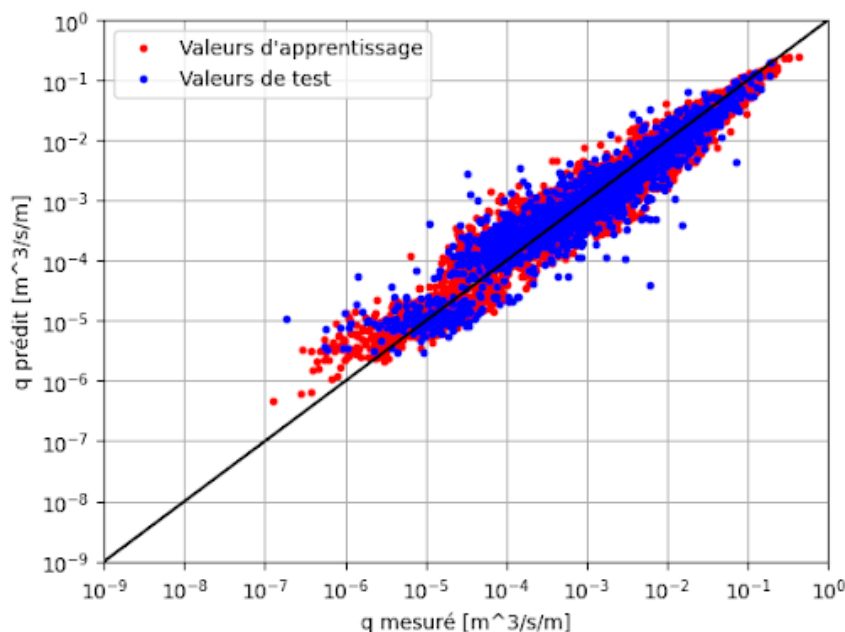


Figure VI-11 : Prédications de la méthode XGBoost répliquée.

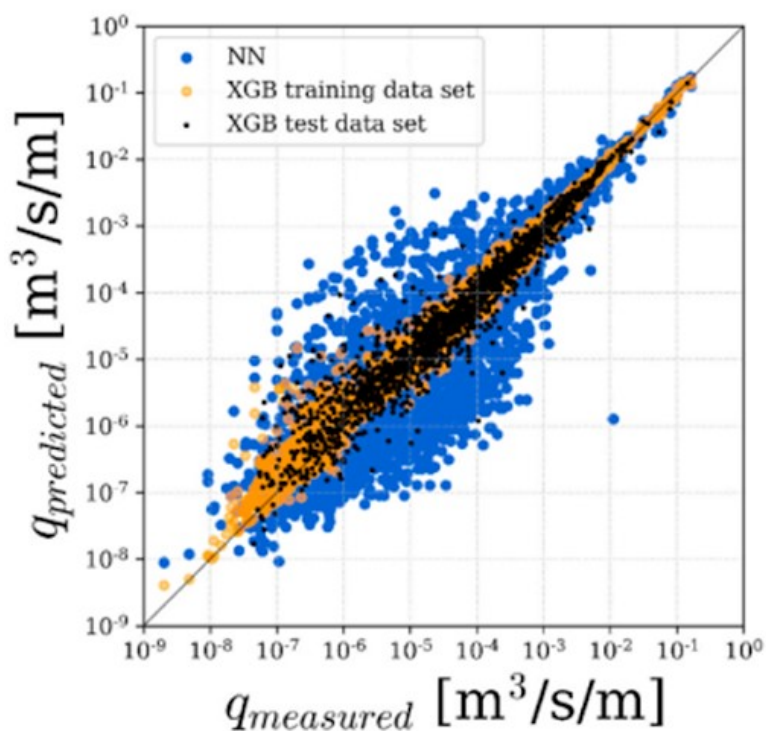


Figure VI-12 : Prédications de la méthode XGBoost publiée (2020).

VI.7. Modèle développé pour les digues à talus

La base de données nettoyée contenant 8091 essais avec différents types de structures a été réduite en adaptant que les structures les plus similaires aux digues à talus implantés au niveau de la Marina et du Port d'Alger. De plus, les données ont été filtrées en fonction de leur facteur de fiabilité, les essais avec une fiabilité de niveau 1, 2 et 3 ont été choisis.

Afin d'améliorer les performances des prédictions des franchissements des vagues pour obtenir un bon score, on a éliminé les caractéristiques ayant le moins d'influence. Les paramètres hydrauliques des eaux profondes n'ont pas été pris en compte pour éviter la redondance, car ils sont fortement liés aux paramètres au pied de l'ouvrage. En revanche, les tests correspondant à des franchissements avec $q = 0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ont été pris en compte. La base de données résultante comprend alors 848 essais, et le nombre de paramètres est réduit de 31 à 13 paramètres. La Figure VI-13 fournit un aperçu de la base de données utilisée lors du développement du modèle.

	m	h	Hm0 toe	Tp toe	Tm toe	Tm-1,0 toe	ht	Bt	gf	cotaincl	Rc	Ac	Gc
0	50	0.405	0.129	1.388	1.157	1.262	0.405	0.0	0.38	2.00	0.259	0.101	0.149
1	50	0.405	0.129	1.388	1.157	1.262	0.405	0.0	0.38	1.33	0.259	0.101	0.149
2	50	0.405	0.129	1.388	1.157	1.262	0.405	0.0	0.40	2.00	0.223	0.142	0.250
3	50	0.405	0.129	1.388	1.157	1.262	0.405	0.0	0.40	1.33	0.240	0.101	0.250
4	50	0.405	0.129	1.388	1.157	1.262	0.405	0.0	0.40	1.33	0.259	0.101	0.250

Figure VI-13 : Aperçu de la base de données des digues à talus.

Tout d'abord, cette base de données a été divisée en deux parties, avec 85% des données utilisées pour l'apprentissage et 15% pour les tests. Le choix de ce pourcentage est justifié par la taille réduite de la base de données. Ensuite, les caractéristiques ont été soumises à une transformation polynomiale de degré 4 (Amara, L, Chalal, Y. (2022)), ce qui a généré un nouveau vecteur de caractéristiques.

Diverses méthodes, telles que la régression polynomiale, la régression par vecteurs de support (Support Vector Regression), le réseau neuronal (ML Regressor) et XGboost, ont été testées sur la base de données CLASH. Malheureusement, les résultats obtenus n'étaient pas satisfaisants.

Après, le modèle XGBOOST a été appliqué avec les paramètres suivants.

- **Max depth** : La profondeur maximale d'un arbre. La valeur prise est 6. Une valeur plus élevée peut conduire à un modèle plus complexe, ce qui peut entraîner un overfitting.
- **Min child weight** : Le poids minimum requis dans une feuille de l'arbre. La valeur prise est 5.
- **Learning rate**: C'est le taux d'apprentissage, il contrôle l'ampleur des mises à jour effectuées lors de la construction de chaque arbre. La valeur prise est de 0,05.

On a obtenu des résultats très satisfaisants; (*score r2 pour l'ensemble d'entraînement = 0.97*) et (*score r2 pour l'ensemble de test = 0.92*). On remarque clairement, qu'à partir de la figure, que la performance du modèle est très élevée lorsque les débits de franchissements sont importants ($>0,01$ litre). Le diagramme de corrélation est illustré dans la Figure VI-14 où on constate une forte corrélation entre les résultats mesurés et prédits dans l'intervalle mentionné.

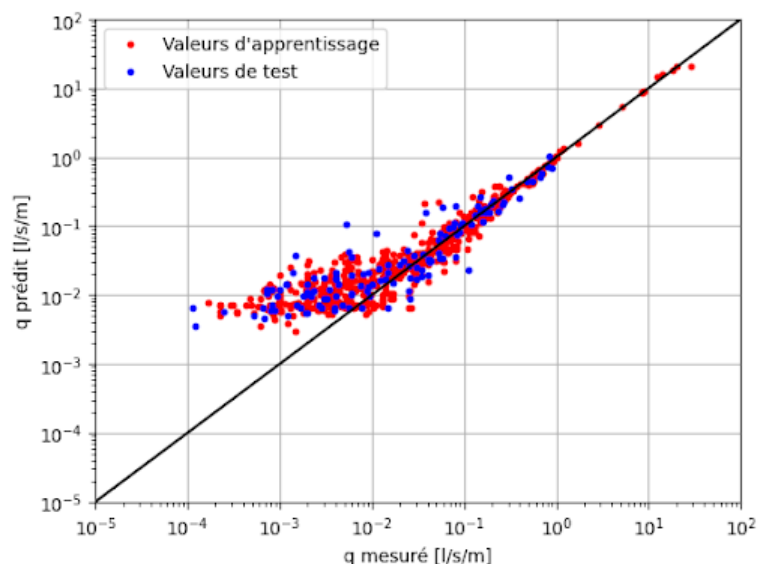


Figure VI-14 : Prédications du modèle développé pour la base des données sur les digues à talus.

VI.8. Conclusion

En conclusion, la base de données CLASH (Crest Level Assessment of Coastal Structures by Full-Scale Monitoring, Neural Network Prediction, and Hazard Analysis on Permissible Wave Overtopping) représente une ressource précieuse pour l'étude du franchissement des vagues sur les structures côtières. À partir de cette base de données, des modèles ont été développés dans le but de prédire le taux de franchissement des vagues dont deux ont été spécifiquement publiés sur ce sujet : un modèle de réseau neuronal en 2007 et un modèle utilisant l'algorithme XGBoost en 2020. Dans ce chapitre, ces deux modèles ont été reproduits et analysés. De plus, un nouveau modèle a été créé spécifiquement pour les digues à talus, en combinant les caractéristiques polynomiales avec l'algorithme XGBoost. Tous les modèles ont présenté des corrélations positives entre les valeurs mesurées et prédites, ce qui démontre leur efficacité dans la prédiction du franchissement des vagues.

Chapitre VII. Canal à houle

VII.1. Introduction

La modélisation physique joue un rôle essentiel en Génie côtier. Elle permet une reproduction fidèle des conditions réelles et l'étude des phénomènes complexes liés aux vagues et aux courants côtiers. Cela est rendu possible grâce à deux approches : la modélisation physique en 3D à l'aide du bassin à houle et la modélisation physique en 2D via le canal à houle. Ce dernier, en particulier, est un outil incontournable dans la recherche en génie côtier. Ce chapitre présente la théorie du générateur de houles du premier ordre, qui constitue une base pour comprendre la génération des vagues dans le canal à houle. En explorant les principes de conception et de fonctionnement de ce générateur, on peut acquérir des connaissances précieuses sur le comportement des vagues et leur impact sur les zones côtières. (Steve, H. (1993))

VII.2. Générateur d'ondes 2D

La problématique de la théorie du générateur de houles du premier ordre consiste en la formulation des conditions aux limites pour la planche à vagues, en supposant que la planche à vagues est plate, solide et imperméable. Les équations de Laplace sont utilisées pour décrire le comportement de la planche à vagues dans un canal à houles, en tenant compte des conditions aux limites appropriées telles que la condition de fond pour le fond horizontal, la condition cinématique pour la surface libre et la condition dynamique pour la surface libre. La formulation de ces conditions aux limites est essentielle pour comprendre le mouvement et l'interaction des vagues avec la planche à vagues dans le réservoir. (Steve, H. (1993)).

VII.2.1. Description du canal à houles

Le canal à houles se présente sous la forme d'un canal long et étroit, équipé d'un générateur de houles, permettant de créer des houles artificielles à des échelles réduites. Il reproduit les conditions réelles de la mer, telles que la hauteur des vagues, la période et la direction, afin d'analyser leur comportement et leur impact sur les zones côtières. Des systèmes de mesure sophistiqués sont souvent y intégrés pour enregistrer les données sur les vagues, les courants et les forces exercées sur les structures. Grâce à la modélisation physique réalisée dans le canal à houles, les ingénieurs et les chercheurs peuvent étudier et évaluer les performances des infrastructures côtières, développer des stratégies d'atténuation des risques d'érosion et de submersion, et concevoir des solutions d'aménagement côtier durables.

Dans la suite, on adapte le schéma illustré dans la Figure VII-1 et on considère un mouvement sinusoïdal du batteur dont l'expression est donnée par l'Équation VII-1. Cette dernière décrit le déplacement de la planche à houles à $z = 0$ et à l'instant t .

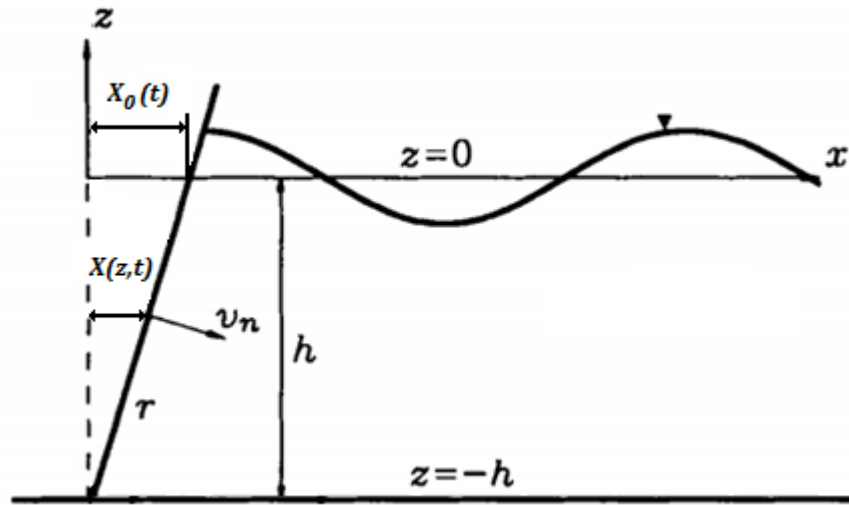


Figure VII-1: Schéma de représentation du canal à houles bidimensionnel. (Steve, H. (1993))

$$X_0 = X(0, t) = \frac{S_0}{2} \sin(\omega t) \quad \text{Équation VII-1}$$

Ce schéma représente un canal à houles bidimensionnel avec un fond plat et une planche à houles ayant un mouvement rotationnel. Dans le cas d'un écoulement non visqueux et irrotationnel, le problème est décrit par l'équation de Laplace (Équation VII-2), en tenant compte des conditions appropriées à savoir : condition aux limites pour le fond horizontal (Équation VII-3), condition cinématique de la surface libre (Équation VII-4), condition dynamique de la surface libre (Équation VII-5), condition au limite générale pour la planche du générateur d'ondes (Équation VII-6).

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad \text{Équation VII-2}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \text{ pour } z = -h \quad \text{Équation VII-3}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \text{ pour } z = \eta \quad \text{Équation VII-4}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] + g\eta = 0, \quad \text{pour } z = \eta \quad \text{Équation VII-5}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \left(1 + \frac{z}{h} \right) \frac{\partial X_0(t)}{\partial t}, \quad \text{pour } x = X(z, t) \quad \text{Équation VII-6}$$

Pour résoudre le problème précédent on a fait appel à la méthode des perturbations. (Steve, H. (1993)). Elle est une approche mathématique utilisée pour analyser les systèmes complexes en introduisant des petites variations ou perturbations dans les équations du système. Elle repose sur l'idée que des petites perturbations peuvent ne pas avoir d'effets significatifs sur le comportement global du système.

Dans le cadre de la modélisation en génie côtier, la théorie de perturbation est souvent utilisée pour étudier les phénomènes liés aux houles, aux courants et aux interactions entre les vagues et les structures côtières. Elle permet de prendre en compte les effets non linéaires et les interactions complexes entre les différentes variables du système.

Comme on s'intéresse à la génération des houles du premier ordre, on écrit alors les fonctions à déterminer sous forme:

$$\phi = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \phi_n = \varepsilon \phi_1 + O(\varepsilon^2) \quad \text{Équation VII-7}$$

$$\eta = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \eta_n = \varepsilon \eta_1 + O(\varepsilon^2) \quad \text{Équation VII-8}$$

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \theta_n = \varepsilon \theta_1 + O(\varepsilon^2) \quad \text{Équation VII-9}$$

$$X_0 = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n X_{0n} = \varepsilon X_{01} + O(\varepsilon^2) \quad \text{Équation VII-10}$$

Après avoir appliqué la méthode des perturbations, le résultat obtenu est le suivant :

Equation de Laplace

$$\frac{\partial^2 \phi_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial z^2} = 0 \quad \text{Équation VII-11}$$

Condition aux limites pour le fond horizontal

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial z} = 0, \text{ pour } z = -h \quad \text{Équation VII-12}$$

Condition cinématique et dynamique de la surface libre

$$\frac{\partial^2 \phi_1}{\partial t^2} + g \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial z^2} = 0, \text{ pour } z = 0 \quad \text{Équation VII-13}$$

Condition aux limites générale pour la planche à houles

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial x} = \left(1 + \frac{z}{h}\right) \frac{dX_{01}}{dt}, \text{ pour } x = 0 \quad \text{Équation VII-14}$$

La méthode de séparation des variables est une technique utilisée pour résoudre les équations aux dérivées partielles. Elle consiste à supposer que la solution recherchée peut être exprimée comme le produit de fonctions indépendantes de différentes variables, puis à séparer ces variables et à résoudre des équations différentielles ordinaires plus simples correspondant à chaque variable séparément. Cela permet de réduire le problème global en plusieurs problèmes plus faciles à résoudre. Une fois les solutions de chaque variable trouvées, elles sont combinées pour obtenir la solution complète de l'équation d'origine. En utilisant cette méthode, on aboutit à la solution finale de l'élevation :

$$\eta_1(x, t) = \frac{\sigma A}{g} \cosh(k_1 h) \cos(k_1 x - \sigma t) + \sin(\sigma t) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sigma C_n}{g} e^{-k_{3n} x} \cos(k_{3n} h) \quad \text{Équation VII-15}$$

$$\sigma = g k_1 \tanh(k_1 h) = -g k_3 \tan(k_3 h) \quad \text{Équation VII-16}$$

$$A = \frac{2\sigma S_0}{k (\sinh kh + 2kh)} \left[\sinh kh + \frac{(1 - \cosh kh)}{kh} \right] \quad \text{Équation VII-17}$$

Le deuxième terme devient négligeable après une distance de $x = 3h$ (Steve, H. (1993)). Cela donne la formule de l'élevation suivante :

$$\eta_1(x, t) = \frac{H}{2} \cos(k_1 x - \sigma t) \quad \text{Équation VII-18}$$

Ou :

$$H = \frac{2\sigma A}{g} \quad \text{Équation VII-19}$$

σ Représente la fréquence angulaire (ω)

En substituant l'expression A (Équation VII-17) dans l'expression de k (Équation VII-16), on obtient la Solution Générale du Générateur d'Ondes de Premier Ordre.

$$\frac{H}{S_0} = \frac{4 \sinh kh}{\sinh 2kh + 2kh} \left[\sinh kh + \frac{(1 - \cosh kh)}{kh} \right] \quad \text{Équation VII-20}$$

VII.3. Synthèse du canal à houle

Cette partie présente une méthode de conception de générateur d'ondes basée sur la théorie des ondes d'eau linéaires en évaluant les capacités du canal à générer des ondes en analysant la course maximale et la hauteur maximale atteignables pour différentes périodes. (Mario, B. (2018-2019)).

Pour la synthèse du canal à houle, le schéma illustré dans la Figure VII-2 est pris comme référence. Il convient de noter que l'eau est présente uniquement d'un seul côté du canal.

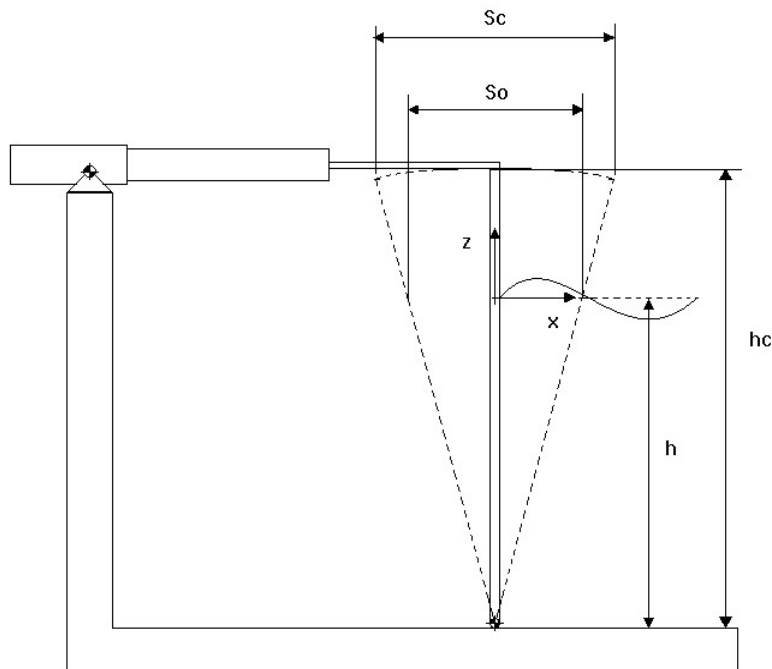


Figure VII-2: Schéma du canal à houle.(Mario, B. (2018-2019))

Les dimensions du canal à houle cible ainsi que les quantités mentionnées dans la Figure VII-2 sont détaillées dans le Tableau VII-1.

Tableau VII-1: Résumé des dimensions du système

30 m x 2.2 m x 0.88 m	Dimensions du canal à houle
$T = 0.5 s - 2.5 s$	Intervalle de période des houles d'intérêt
$h = 0.7 m$	Profondeur d'eau
$h_c = 1.1 m$	Hauteur du lien entre le volet et le cylindre électro.

Tout d'abord, on évalue la capacité du générateur d'ondes. Pour chaque période d'onde, on détermine une hauteur maximale d'onde. On introduit alors les limites suivantes qui contraignent notre système.

VII.3.1. Limite de déferlement

La houle perd son caractère régulier et commence à se briser quand le rapport $\left(\frac{H}{L}\right)$ dépasse $\left(\frac{1}{7}\right)$

Afin d'éviter ce phénomène et conserver l'aspect régulier de la houle, on se limite à $\left(\frac{H}{L} < \frac{1}{7}\right)$.

$$S_0 = \frac{\pi h}{14 \sinh kh} \frac{\sinh 2kh + 2kh}{kh \cdot \sinh kh - \cosh kh + 1} \quad \text{Équation VII-21}$$

VII.3.2. Hauteur maximale des vagues dans le canal

En se référant à la Figure VII-2, la hauteur maximale d'onde atteignable dans notre système est fixée à: $H_{max} = 0.4 \text{ m}$. Cela signifie que les houles générées dans le système n'atteindront pas cette hauteur, ce qui nous conduit à l'Équation VII-22.

$$S_{0,wh}max = 0.4 \cdot \frac{\sinh 2kh + 2kh}{4 \cdot \sinh kh \left[\sinh kh + \frac{1 - \cosh kh}{kh} \right]} \quad \text{Équation VII-22}$$

VII.3.3. Accélération maximale de l'actionneur

L'accélération a de l'actionneur doit être prise en compte, car elle dépend directement de la course S_c . Dans ce qui suit, on propose que $a_{max} = g$, ce qui nous donne l'Équation VII-23.

$$a(t) = -\frac{S_c}{2} \omega^2 \sin \omega t \Rightarrow S_{c,B}max = \frac{g}{2\pi^2} T^2 \quad \text{Équation VII-23}$$

VII.3.4. Course maximale de l'actionneur

À partir de la condition aux limites sur la planche du générateur d'ondes (Équation VII-6). La position du batteur est contrôlée par une course angulaire fixée à 10° . En tirant partie de cette information, une nouvelle limite de S_c est obtenue (Équation VII 25).

On considère

$$\theta \leq 10^\circ ; h_c = 1.1 \text{ m} ; h = 0.7 \text{ m}.$$

$$S_{c,max} = 2h_c \tan \theta = 0.46 \text{ m} \rightarrow S_{c,max} = 0.5 \text{ m} \quad \text{Équation VII-24}$$

Pour des raisons pratiques, il a été porté à $S_c = 0.5 \text{ m}$

VII.3.5. Détermination du nombre d'ondes

Avant de tracer les limites, on doit résoudre la relation de dispersion (Équation VII-25) afin de déterminer le nombre d'onde k correspondant à chaque période d'intérêt.

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh) \quad \text{Équation VII-25}$$

Pour une période fixe et une profondeur d'eau constante, il n'y a qu'une seule valeur de k qui satisfait cette équation. Cette valeur est déterminée en utilisant un processus itératif (Tableau VII 2) pour résoudre l'équation.

Tableau VII-2: Méthode itérative de résolution de l'équation de dispersion

1. Calculer la fréquence angulaire σ pour la période.
2. Choisir une valeur initiale pour k .
3. Calculer la fréquence angulaire $\bar{\sigma}$ correspondant à la valeur de k .
4. Évaluer la différence $\sigma^2 - \bar{\sigma}^2$.
5. Si la différence est supérieure à la tolérance désirée, incrémenter k par **STEP** et retourner à l'étape 3.
6. Sinon, enregistrer la valeur de k comme le nombre d'onde de la période considérée et passer à la période suivante (retourner à l'étape 1).

STEP est évaluée comme suit :

$$STEP = \text{difference} \times \left. \frac{dk}{d(\sigma^2)} \right|_{k=\text{current value of } k}$$

Il est clair d'après la que : pour toutes les valeurs de k , $\frac{dk}{d(\sigma^2)} = 0.1$.

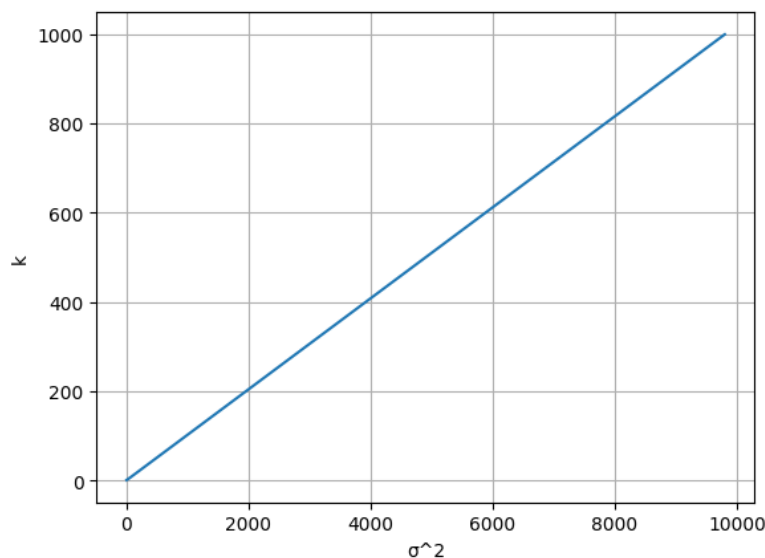


Figure VII-3: Graphique de k en fonction de σ^2 .

Pour visualiser les différentes limites de la course de l'actionneur, les équations (Équation VII-22, Équation VII-23, Équation VII-24 et Équation VII-25) sont tracées après application de la transformation $S_c = \frac{h_c}{h} \times S_0$.

D'après le graphe illustré dans la Figure VII-4, il est évident que l'étendue maximale des courses de l'actionneur, représentée par $S_{c,max}$, est initialement contrainte par la limite de rupture des vagues $S_{c,wb,max}$ jusqu'à $T = 1,23$ s. Ensuite, sa limitation se déplace vers la capacité physique de l'actionneur.

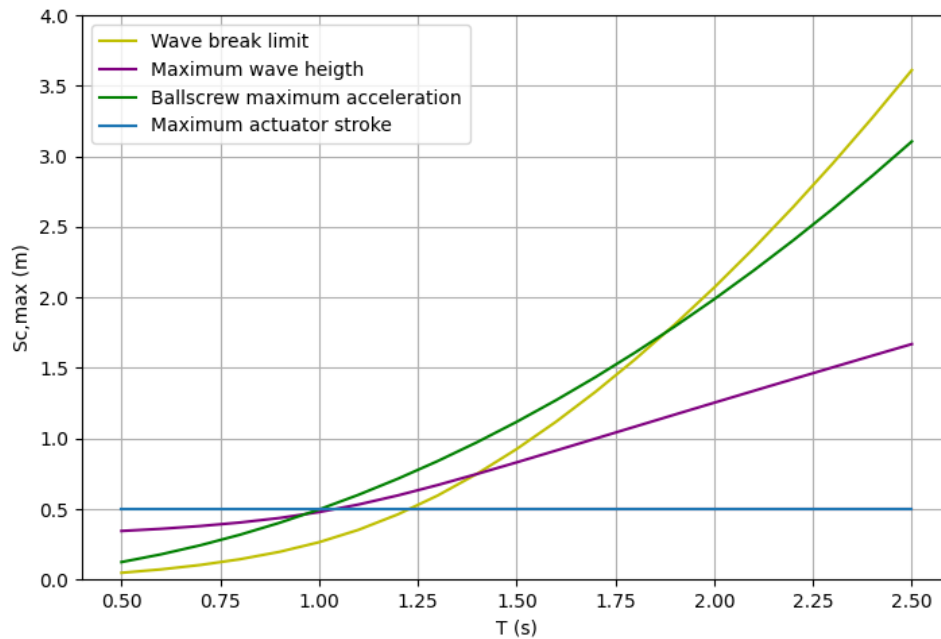


Figure VII-4: Graphique des différentes limites de course de l'actionneur.

En examinant les limitations décrites en termes de courses de l'actionneur, on peut déterminer les courses d'actionneur maximales autorisées (Figure VII 5) qui peuvent être utilisées pour chaque période.

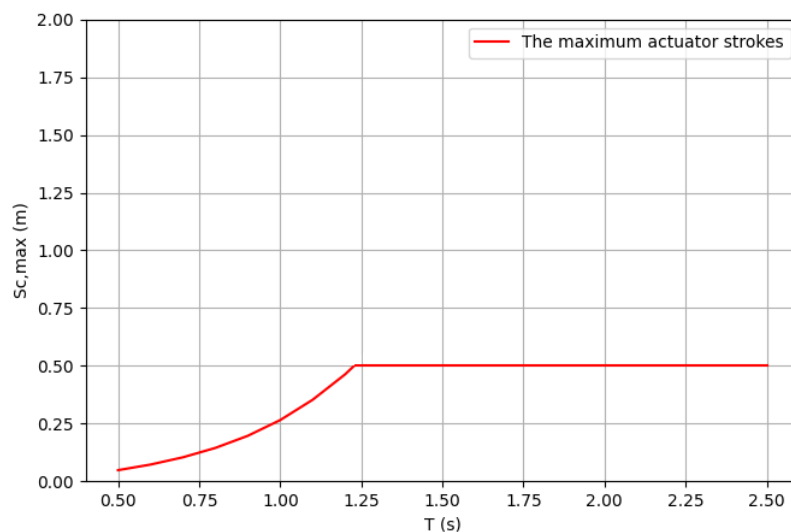


Figure VII-5 : Graphique de la limite maximale des courses d'actionneur résultantes.

Exemple

- Pour $T=0.75s$, la course maximale de l'actionneur est d'environ 0,13m.
- Pour $T=1.25s$, la course maximale de l'actionneur est de 0,5m.

VII.4. Conclusion

En conclusion, ce chapitre présente un aperçu de l'analyse et de la synthèse des houles en canal à houle en 2D. L'accent est mis sur le problème de la propagation des vagues, en étudiant spécifiquement la configuration du générateur de type volet pour une génération précise des houles. Le modèle mathématique est présenté, incluant l'équation de Laplace et différentes conditions aux limites qui régissent le potentiel de vitesse et le comportement des houles. La méthode des perturbations est utilisée pour approximer les solutions pour le problème de génération de vagues du premier ordre. La synthèse du canal à houle est discutée, en tenant compte de ses dimensions et de ses limitations telles que la limite de rupture des houles, la hauteur maximale des houles, l'accélération et la course de l'actionneur. La relation de dispersion est résolue de manière itérative pour déterminer le nombre d'onde correspondant à chaque période d'intérêt. Enfin, les courses maximales autorisées de l'actionneur sont déterminées pour différentes périodes de vagues. Dans l'ensemble, ce chapitre fournit des informations précieuses sur la théorie et les aspects pratiques des canaux à houle.

CONCLUSIONS

Le génie côtier est un domaine multidisciplinaire axé sur la compréhension des interactions complexes entre les vagues, les structures côtières et le littoral. Il joue un rôle crucial dans la conception des ports, des mesures de protection côtière et des structures de défense côtière, la compréhension des vagues façonnant les environnements côtiers. La prédiction des franchissements, où les vagues dépassent les crêtes des structures côtières et se déversent sur les zones protégées, sont essentielles pour atténuer les risques menaçant le personnel, les navires, les infrastructures, l'érosion et les perturbations des opérations portuaires.

Dans notre étude, l'analyse du climat du vent et des houles dans la baie d'Alger a fourni des résultats significatifs concernant les conditions environnementales de la région. Cette étude a révélé que la hauteur significative des vagues dans la baie d'Alger varie de 0,03 m à 7,48 m sur une période de 30 ans, avec une moyenne de 1,16 m. Les directions de vagues prédominantes provenaient du Nord-est et de l'Ouest, avec des vents du Nord-Est dominants en été et des vents d'Ouest plus fréquents en hiver.

Comprendre le climat du vent et des houles est essentiel pour concevoir des mesures de protection côtière efficaces. En analysant les événements extrêmes, il est possible de comprendre la probabilité des phénomènes marins rares (Stander, C. (2015)), ce qui permet de créer des modèles représentant leurs distributions de probabilité. Cette connaissance est utile dans la conception de structures de défense côtière fiables et dans l'atténuation de l'impact de ces événements.

Les résultats de notre modélisation numérique soulignent l'importance de prendre en compte la morpho-bathymétrie de la baie d'Alger pour réduire les hauteurs de vagues qui affectent les structures côtières. Notamment, la Marina qui a connu une réduction significative de plus de 55% des hauteurs de vagues pour les vagues de grande amplitude, principalement en raison de leur interaction le fond marin qui dévie les vagues vers le Nord dans la zone de la Marina. En revanche, le port a connu une réduction moins prononcée des hauteurs de vagues, atteignant environ 20% pour les vagues de grande amplitude.

En ce qui concerne les courants, les houles extrêmes n'ont pas eu d'impact significatif sur les vitesses locales des courants, qui sont restées presque constantes pour les différents scénarios climatiques simulés. Cependant, la direction incidente des vagues a joué un rôle significatif dans la formation des courants, entraînant plusieurs directions d'écoulement. Les vagues venant du

Nord-Nord-Est ont plus d'influence et génèrent des courants circulaires de chaque côté de la Marina et du port d'Alger. Les vitesses de courant enregistrées variaient de 0,3 m/s à 0,45 m/s.

En comparant les calculs de conception à l'aide des formules de Hudson et de Van der Meer (Nguyen, D.-T. (2012)) pour les enrochements des digues à talus, et la formule de Sainflou (Caminade, D., (1995)) pour les murs des digues verticales des informations précieuses ont été obtenues pour la conception de la jetée principale de la Marina et des jetée Khireddine et Mustapha du port d'Alger. Notamment, le poids des blocs dans la jetée principale de la Marina était plus faible en raison de la protection naturelle offerte par son emplacement. Cette étude souligne l'importance de prendre en compte les caractéristiques spécifiques de la zone d'étude et de choisir des formules de conception appropriées pour garantir des conceptions de brise-lames efficaces et résilientes. La méthode de Sainflou a offert une approche fiable pour le calcul des pressions, des forces et des moments exercés sur la digue verticale du port. Ces résultats sont essentiels pour la conception et l'évaluation de la stabilité des digues portuaires.

Les formules semi-empiriques sont utilisées pour effectuer les calculs de performance hydraulique. Ces formules sont référencées dans le guide de l'enrochement publié par le CETMEF en 2009. Les résultats de calcul montrent que les digues à talus et la digue verticale de la Marina et du Port, sont résistantes et présentent un faible risque pour leur stabilité face aux forces hydrauliques extrêmes de la mer.

Le modèle CLASH (Crest Level Assessment of Coastal Structures by Full-Scale Monitoring, Neural Network Prediction, and Hazard Analysis on Permissible Wave Overtopping) a été utilisé pour développer des modèles visant à prédire le taux de franchissements des vagues sur différents types de structures côtières. Deux modèles, un modèle de réseau neuronal en 2007 par Gent, M. R., Boogaard, H. F., et al. (2007) et un modèle d'algorithme XGBoost en 2020 par Bieman, J. P., al, J. M. (2020)., ont été reproduits et analysés. De plus, un nouveau modèle spécifique aux digues à talus a été développé, qui utilise des caractéristiques polynomiales en conjonction avec l'algorithme XGBoost. Tous les modèles ont montré de bonnes corrélations entre les valeurs mesurées et prédites, ce qui indique leur efficacité dans la prédiction du franchissement des vagues.

Le dernier chapitre a fourni un aperçu de l'analyse et de la synthèse des vagues en canal 2D, en se concentrant sur le problème de la propagation des vagues et en étudiant la configuration des générateurs d'ondes de type volet (Steve, H. (1993)). Le modèle mathématique incluait l'équation de Laplace et diverses conditions aux limites régissant le comportement des vagues. La méthode des perturbations a été utilisée pour approximer les solutions du problème de génération des vagues du premier ordre. La synthèse du canal à vagues fournit les courses d'actionneurs maximales autorisées pour différentes périodes de vagues (Mario, B. (2018-2019)). Ce chapitre a fourni des aperçus précieux sur la théorie et les aspects pratiques des canaux à houles.

Les conclusions tirées de ce travail offrent des perspectives prometteuses pour l'intégration des techniques d'apprentissage automatique dans le domaine du génie côtier. De plus, les simulations en canal à houles peuvent être explorées afin de construire une base de données qui servira de base

solide à l'établissement de bases de données complètes sur les franchissements des vagues. Cette avancée peut contribuer de manière significative à la conception et à l'évaluation de systèmes de défense côtière durables. Ces bases de données peuvent soutenir la recherche et aider les étudiants dans leur travail, en leur permettant d'accéder à des données précieuses et de contribuer au développement de solutions innovantes dans le génie côtier. De plus, les universités peuvent se concentrer sur la réalisation de canaux à houles avancés pour faciliter les expériences réelles, favorisant une compréhension approfondie du comportement des vagues et de leur interaction avec les structures côtières

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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.

Amara, L., Chalal, Y. (2022). Machine learning pour l'étude de la performance hydraulique des ouvrages portuaires, cas Marina d'Alger. Mémoire d'ingénieur. Gestion et protection du littoral. dely brahim: ENSSMAL. P. 1

Antoine, C.-D. (2022, Fevier 02). Apprentissage supervisé : définition et exemples d'algorithme. [en ligne]. [Consulté le 12/04/2023]. Disponible sur le web: <https://www.journaldunet.fr/web-tech/guide-de-l-intelligence-artificielle/1501311-apprentissage-supervise/>

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

Belaidi, N. (2022, Fevrier 04). XGBoost : Tout savoir sur le Boosting. [en ligne]. [Consulté le 03/04/2023]. Disponible sur le web: <https://blent.ai/blog/a/xgboost-tout-comprendre>

Benzaki, Y. (2017, Juillet 11). Overfitting et Underfitting : Quand vos algorithmes de Machine Learning dérapent: 2017

Bieman, J. P., al, J. M. (2020). Prediction of Mean Wave Overtopping Discharge. Water 2020, 12, 1703, 13. doi:10.3390/w12061703

Bonnfille. R., (2010). Mouvements de la mer et leurs risques. Techniques de l'ingénieur Les aménagements des voies de transport [en ligne]. [Consulté le 20/02/2023]. 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/>

Boujis, J. (2000). Ouvrages de défense des littoraux. opio, P.P 5-11

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 25/01/2023]. 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/, P. 28

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), P. 22

CIRIA, CUR, & CETMEF. (2009). Guide Enrochement - L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques - version française du rock manuel. Compiègne: CETMEF. P.P. 495-793,P.P. 8-44

Dewang, N. (2023, Juin 05). geeks for geeks. Récupéré sur Underfitting and Overfitting. [en ligne]. [Consulté le 06/06/2023]. Disponible sur le web: <https://www.geeksforgeeks.org/underfitting-and-overfitting-in-machine-learning/>

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.

Dumas, A. (1928). annales des ponts et chaussées. Paris: Ecole Nationale ds ponts et chaussées, P. 3

Etemad-Shahidi, A., Shaeri, S., et al. (2016). Prediction of wave overtopping at vertical structures. Coastal Engineering. Doi : . Disponible sur le web : www.elsevier.com/locate/coastaleng, P.P. 2-4

François, r., & François, B. (1997). Conception et dimensionnement des digues à talus. france: Service technique central des ports maritimes et des voies navigables (France), P.P. 7-10

Gent, M. R., Boogaard, H. F., et al. (2007). Neural network modelling of wave overtopping at coastal structures. vol 8. Disponible sur le web : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378383906001918>

Gent, M. V., Pozueta, B., et al. (2004, 12). Prediction method Neural network modelling of wave overtopping at coastal structures. Vol54. Disponible sur le web: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.12.001>

Géron, A. (2017). Machine learning avec Scikit-learn. 20. doi:10.1007/978-1-4842-0958-5_8

Gosse, J. S., Jentsje Wouter, v. d., et al. (2004). La base de données internationale sur le déferlement des vagues. 18. doi:10.1142/9789812701916_0347

Gosse, J. S., Jentsje Wouter, v. d., et al. (2004). The international database on wave overtopping. 15. doi:10.1142/9789812701916_0347, P.P 3-8

He, H. (2021, Janvier 13). What is Overfitting and Underfitting? . [en ligne]. [Consulté le 09/04/2023]. Disponible sur le web: <https://www.linkedin.com/pulse/what-overfitting-underfitting-he-hao/>

Jungkyu, A., & Yeji, N. (2014). Development of Two-Dimensional Inundation Modelling Process. Civil Engineering. doi:10.1007/12205-419-1588-9, P. 1

Jost, B., Marcel, V., et al. (2021). Wave overtopping predictions using an advanced machine. journal homepage, vol 12. doi:103830, P. 4

Koffi, k. (2022, Février 20). Classification Vs. Clustering - A Practical Explanation. [en ligne]. [Consulté le 04/04/2023]. Disponible sur le web: <https://blog.bismart.com/en/classification-vs.-clustering-a-practical-explanation>

Mario, B. (2018-2019). Design of a wavemaker for the water tank at the Politecnico di Torino. Torino: Politecnico Di Torino, P.P.46-70

Nguyen, D.-T. (2012). Stabilité et franchissement des digues maritimes. Mémoire d'ingénieur (thèse de doctorat). Mécanique des Milieux Fluides. Havre : Université de Havre, P.P 20-39

Offenstein, F., Thuilliez, J. (s.d.). Culture maritime. [en ligne]. [Consulté le 16/02/2023]. Disponible sur le web: [//www.culture-maritime.com/fr/page-mme4_cours.xhtml](http://www.culture-maritime.com/fr/page-mme4_cours.xhtml)

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

Stander, C. (2015). Analysis of Extreme Events in the Coastal Engineering Environment. Mémoire d'ingénieur. Applied Mathematics. Stellenbosch : University de Stellenbosch. P. 27

Steve, H. (1993). Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering. USA: Coastal Engineering Research Center, P.P. 1-15

Stuart, C. (2001). An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. London: Springer Series in Statistics, P.P. 45-58

Symonds, A. M., Vijverberg, T., et al. (2017). Comparison between Mike 21 FM, delet 3D FM Fellow models of western port bay, Australia. Coastal Engineering Proceedings, 1(35), currents.11. <https://doi.org/10.9753/icce.v35.currents.11>, P. 1

Tabet-Aoul, E.-H. (2000). Adaptation de la méthode de la Goda pour la détermination des forces horizontales maximales agissant sur les digues à paroi perforée. Cean (France), Doi : 10.5150/JNGCGC.2000.038-T disponible sur le web : <https://www.semanticscholar.org/paper/Adaptation-de-la-m%C3%A9thode-de-Goda-pour-la-de-forces-Tabet-Aoul/e27521a764413c117a7d63e543cc6f41a175cecd>, P.P 1-2

Team, T. 3. (2023, Avril 16). Introduction to Decision Trees: Why Should You Use Them? . [en ligne]. [Consulté le 10/04/2023]. Disponible sur le web: <https://365datascience.com/tutorials/machine-learning-tutorials/decision-trees/>

Thompson, P., Reve, D. et al. (2009). Automated threshold selection methods for extreme wave analysis. Coastal Engineering. doi:10.1016/j.coastaleng.2009.06.003. Disponible sur le web : <https://www.researchgate.net/publication/223739782>

Tianqi, C., & Carlos, G. (2016). XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. Washigton: Université de Washigton, P. 1

Tilbi, K. (2018). Distribution des valeurs extrêmes généralisées - Application en hydrologie. Mémoire d'ingénieur. Probabilités et statistique. Jijel: Université Mohammed Seddik Ben Yahal. P. 24

Tioguin, I., Delcaillau, D. (2018). Modélisation d'extrêmes de séries temporelles une étude empirique. Bretagne: Université de Bretagne, P.P. 14-19

Tomonori, M. (2022, Janvier 20). All You Need to Know about Gradient Boosting Algorithm – Part 1. Regression. [en ligne]. [Consulté le 16/04/2023]. Disponible sur le web: <https://towardsdatascience.com/all-you-need-to-know-about-gradient-boosting-algorithm-part-1-regression-2520a34a502>

Verhaeghe, H., Meer, J. W., et al. (2003). Wave overtopping database as the starting point for a neural network prediction method. doi:10.1061/40733(147)35. ASCE, Proc. Coastal Structures 2003, Portland, 430 p.

Xgboost developers., (2021), Introduction to Boosted Trees.2021, [en ligne].[consulté le 23/04/2023]. Disponible sur le web: <https://xgboost.readthedocs.io/en/stable/tutorials/model.html>

Yuanchao, W., & Li, M. (2019, Aout). A general architecture of XGBoos. [en ligne]. [Consulté le 17/04/2023]. Disponible sur le web t: https://www.researchgate.net/figure/A-general-architecture-of-XGBoost_fig3_335483097

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



Obtention du diplôme Start-up

Projet :

Bureau d'Etudes CoastAi : Application de l'intelligence artificielle dans le domaine du génie côtier pour la gestion des risques côtiers.

Présenté par :

Alkama Hafsa Hadil

Brahim Mohammed

Tamazirt Meriem

Soutenue le 13/07/2023, devant le jury composé de :

Mme. FEZAA N.	Professeur ENSSMAL	Présidente
M. MEZOUAR K.	Professeur ENSSMAL	Promoteur
M. GHOGGALI S.	Maitre conférences B ENSEREDD	Co-Promoteur
M. DAHMANI AEA.	Maitre conférences ENSSMAL	Examineur
Mme FELLAH H.	Doctorante- ENSSMAL	Examinatrice BMC
M AINOUZ O.	Directeur technique	Partenaire économique

Année universitaire : 2022/2023

Annexe A Business Model Canvas

Le Business Model Canvas (BMC) aide à comprendre et à communiquer de manière structurée la logique fondamentale des entreprises. Cet outil révèle les composantes clés du modèle économique et stimule une réflexion approfondie sur les parties prenantes, les revenus, les coûts, les avantages concurrentiels et les opportunités de croissance. Il est utilisé dans la planification stratégique et le développement de nouveaux produits et services. Dans cette partie de notre mémoire, on détaille le BMC de notre startup, en décrivant toutes ses composantes.

Cet outil stratégique de gestion est un cadre visuel qui se compose de neuf éléments clés. La figure 1 illustre ces éléments clés.

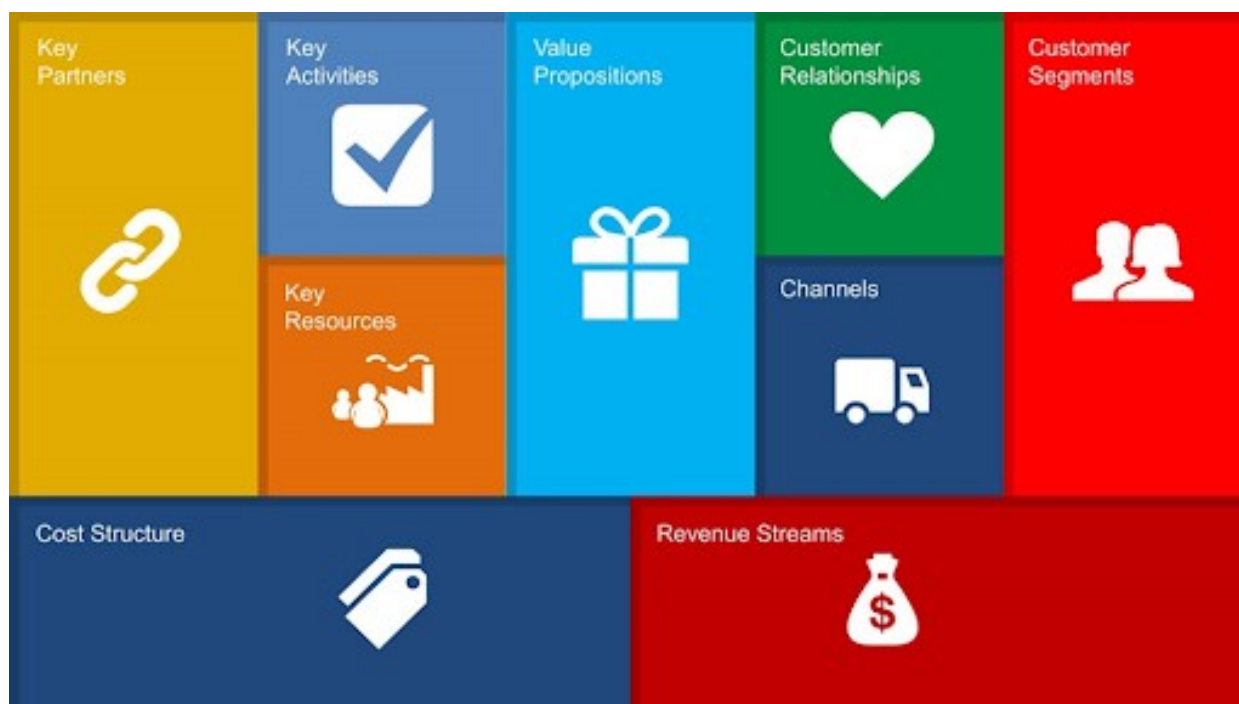


Figure 1: Business Model Canvas

A.1 Proposition de valeur

Cette composante se concentre sur les produits, les services ou les solutions uniques que l'entreprise offre à ses clients. L'objectif est de déterminer ce qui distingue l'offre de l'entreprise de celle des concurrents. Il s'agit d'identifier les caractéristiques spécifiques qui rendent les produits ou les services de l'entreprise uniques et attrayants pour les clients, et qui lui confèrent un avantage concurrentiel sur le marché.

Notre entreprise se distinguera de la concurrence par la proposition d'une combinaison unique d'expertise dans le domaine du Génie côtier et de la cartographie basés sur l'Intelligence

Artificielle. Cette approche une nouvelle démarche qui n'existe pas encore au niveau de notre marché. L'entreprise vise également à fournir des formations à la carte ainsi que des solutions de veille technologique. Cette approche innovante et attractive sera particulièrement intéressante pour les clients à la recherche de solutions de pointe de gestion des risques et de développement côtier.

Nos propositions de valeur pour les clients incluent les éléments suivants:

- La proposition de solutions avancées basées sur l'intelligence artificielle (IA) pour le génie côtier et la gestion des risques côtiers,
- La prédiction et la modélisation précise des processus côtiers.
- L'offre de solutions rentables et efficaces pour la planification côtière et le développement des infrastructures.
- L'amélioration de l'évaluation des risques côtiers et des stratégies de réduction des risques
- L'amélioration de l'efficacité de la recherche de solutions dans des délais optimaux.

A.2 Activités clés

Les activités clés font référence aux actions et aux processus clés que l'entreprise doit entreprendre pour fournir sa proposition de valeur. Les activités clés de notre entreprise incluent :

- La création de modèles prédictifs des problèmes côtiers tels que le franchissement des vagues, les submersions marines et les tempêtes marines.
- L'identification et la cartographie des zones côtières à risques élevés.
- La prévision des états de mer extrêmes futurs.
- Le traitement des grandes bases de données.
- La création de cartes pour diverses applications.
- L'offre de formations en programmation utilisant le langage Python et des logiciels spécialisés en cartographie et Système d'informations Géographiques SIG en présentiel et en ligne.
- La location d'ordinateurs performants pour la simulation d'opérations complexes.

Les figures (Figure 2, Figure 3, Figure 4) illustrent les résultats des applications effectuées sur la Baie d'Alger, qui ont abouti aux prototypes suivants.

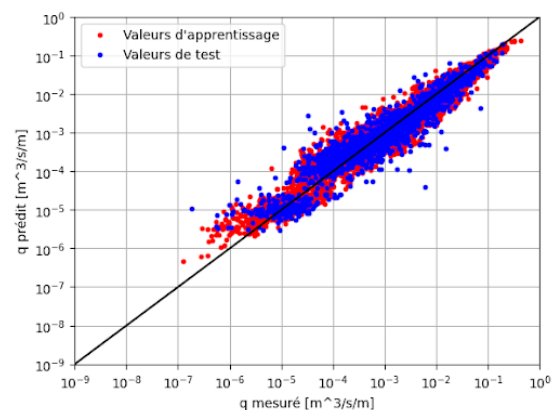
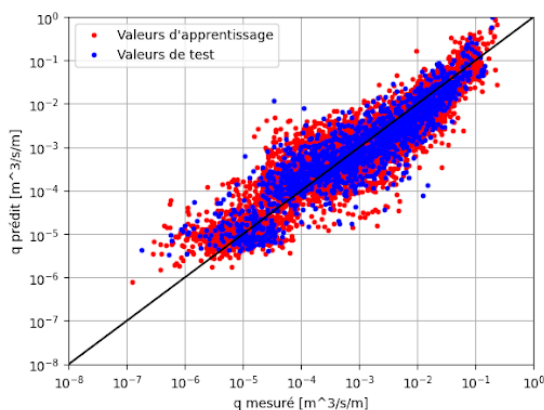


Figure 2 : Application du Machine Learning pour la prédiction du franchissement des vagues sur les digues à talus

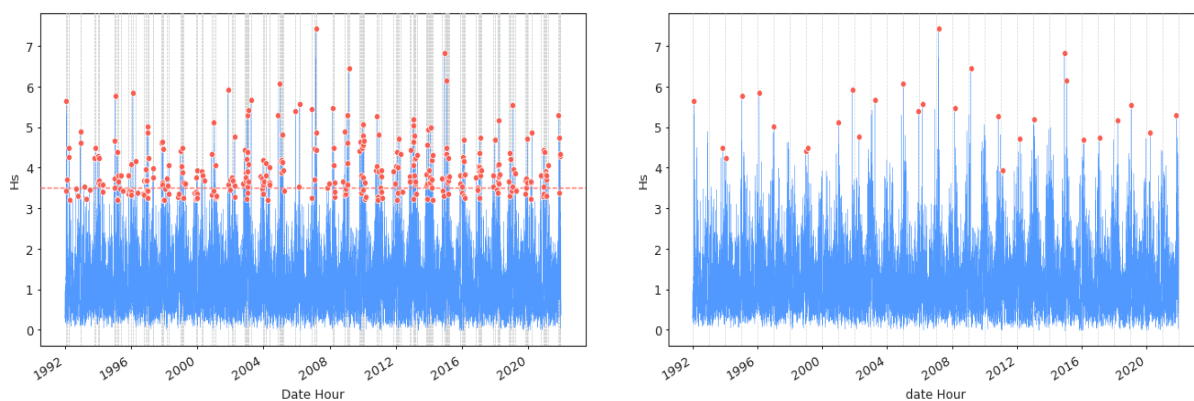


Figure 3 : Prédiction des événements extrêmes en utilisant le langage python

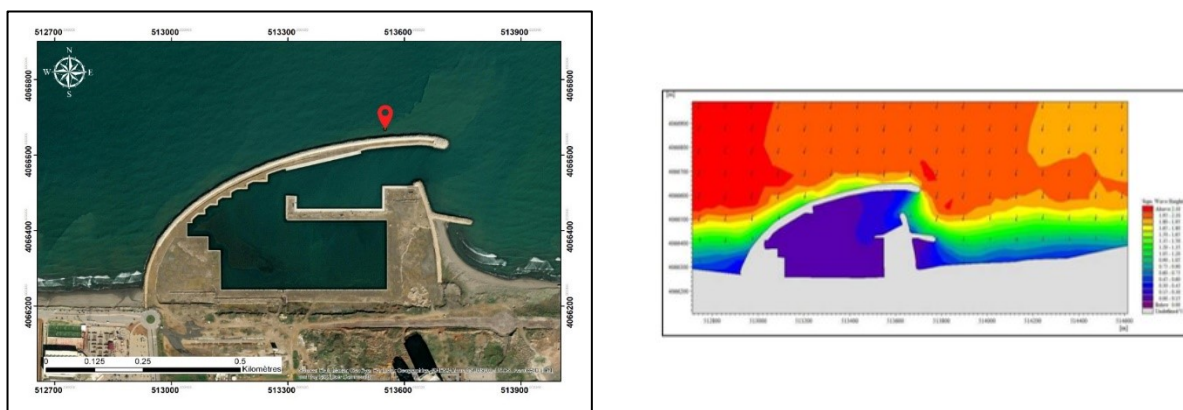


Figure 4 : Cartographie de la Marina d'Alger et modélisation de l'hydrodynamisme dans cette zone

Le Tableau 1 présente la production envisagée de notre entreprise sur les trois premières années, tandis que le Tableau 2 expose les prix fixés pour nos services après avoir calculé les coûts engagés pour la réalisation de chaque service.

Période	Etude	Formation	Vente de cartes	Location d'un PC puissant
1 ^{ère} année	6 Etudes	5	15	5
2 ^{ème} année	8 Etudes	15	30	10
3 ^{ème} année	12 Etudes	20	45	15

Tableau 1 : Production envisagée les trois premières années.

Service	Prix	Nombre	Total de la 1ère année
Etude	200,000 DA	6	120,0000 DA
Formation	12,000 DA	5	60,000 DA
Carte	2000 DA	15	10,000 DA
Location	2000 DA	5	10,000 DA

Tableau 2 : Prix fixé pour chaque service.

A.3 Partenaires clés

Il s'agit des partenariats stratégiques et des alliances que l'entreprise établit. Cela rentre dans le but de créer, distribuer et optimiser la proposition de valeur. Notre entreprise vise à établir des partenariats avec :

- Les agences gouvernementales de la gestion côtière, en leur fournissant des services, afin de renforcer leurs capacités de gestion côtière en utilisant des modèles prédictifs des problèmes côtiers. Cela leur permettrait également d'améliorer la sécurité des zones côtières, de prendre des décisions éclairées en matière de planification et de réduction des risques, et de mieux protéger les communautés vivant le long des côtes.
- Les organisations environnementales de la préservation et la protection côtière : Ces organisations seraient intéressées par l'achat de nos services dans le but de disposer d'outils de cartographie et de modélisation des zones côtières à risques élevés. Cela leur permettrait de mieux comprendre les effets du changement climatique sur les zones côtières, d'élaborer des stratégies de préservation de l'écosystème côtier et de promouvoir des actions de sensibilisation pour une meilleure gestion de ces zones.
- Les entreprises de construction et d'aménagement côtier : Elles s'intéresseraient à l'achat de nos services pour bénéficier de solutions basées sur l'intelligence artificielle pour la prédiction et la modélisation précise des processus côtiers. Cela les aiderait dans la planification et l'exécution de leurs projets de construction et d'aménagement côtier de manière plus efficace, en réduisant les risques, en optimisant les ressources et en améliorant la durabilité des infrastructures.

A.4 Segment Clients

Cet élément consiste à la description des différents groupes de clients que l'entreprise vise à atteindre et à servir. Il comprend l'identification des caractéristiques démographiques, des besoins, des comportements et des préférences de chaque segment de clientèle.

Après avoir effectué une étude de marché, on a sélectionné ces clients cibles:

- Agence Nationale des Changements Climatiques :Elle serait intéressée par nos services pour disposer de modèles prédictifs et de données sur le franchissement des vagues et les

submersions marines liées aux changements climatiques. De plus, cela permettrait d'évaluer les impacts futurs du changement climatique sur les zones côtières, d'élaborer des stratégies d'adaptation et de fournir des recommandations pour la gestion durable des écosystèmes côtiers.

- Délégation Nationale aux Risques Majeurs :Elle serait intéressée par nos services pour renforcer les capacités nationales de prévention et de gestion des risques côtiers En effet, cela va améliorer la préparation aux situations d'urgence, la coordination des mesures de réponse et la réduction des pertes humaines et économiques causées par les événements côtiers extrêmes.
- Office national de la météorologie :Elle serait intéressée par nos services pour améliorer la prévision des états de mer extrêmes. Cela leur permettrait de fournir des informations plus précises sur les conditions météorologiques et océanographiques. Cela est nécessaire pour la gestion de la navigation et assurer la sécurité en mer.
- Directions de travaux publics : Elle s'intéresse à nos services pour améliorer l'évaluation des risques côtiers dans le cadre de la planification et de la gestion des infrastructures publiques. Cela leur permettrait également de prendre des décisions éclairées concernant la construction, l'entretien et la réparation des ouvrages côtiers. Ces décisions les aideraient à minimiser les risques d'inondation et de dommages causés par les événements côtiers extrêmes.
- Étudiants, chercheurs et ingénieurs : Ils seront intéressés par nos services pour développer leurs compétences en programmation utilisant le langage Python, pour l'accès à des logiciels spécialisés en cartographie et SIG.En effet cela va améliorer leur expertise dans le domaine du génie côtier, de la modélisation des phénomènes côtiers et de la gestion des risques. Ces formations seront bénéfiques pour leur carrière professionnelle et leurs projets de recherche.

A.5 Relations Clients

Cette composante fait référence aux types de relations que l'entreprise établit pour maintenir une relation durable avec ses clients.

Pour maintenir une relation durable avec nos clients, notre entreprise met l'accent sur une collaboration étroite avec les clients. On proposera des consultations personnalisées pour comprendre les besoins spécifiques des clients et leur offrir des solutions adaptées. Des mises à jour régulières sur les nouvelles technologies d'IA et de cartographie dans le domaine seront fournies aux clients afin de les maintenir informés des dernières avancées.

Les relations avec nos clients seront construites grâce à une communication continue, des retours d'information et des réductions sur les formations proposées.

A.6 Canaux de distribution

Les canaux de distribution représentent les moyens par lesquels l'entreprise communique, distribue et vend ses produits ou services à ses clients.

Les moyens de distribution des services proposés par notre entreprise incluent :

- L'utilisation d'une plateforme en ligne comme canal de vente des modèles et des outils d'IA dédiés au génie côtier.
- Les ventes directes et les consultations avec les différentes entreprises.
- La participation aux conférences et aux salons professionnels pour promouvoir les solutions d'IA dans le domaine du génie côtier.

A.7 Ressources clés

Les ressources clés représentent les actifs tangibles et intangibles nécessaires pour faire fonctionner l'entreprise. Les ressources nécessaires au bon fonctionnement de notre entreprise sont :

- L'expertise en recherche et développement des techniques d'intelligence artificielle (IA).
- Matériel informatique puissant et performant.
- Personnel qualifié en cartographie et en programmation.
- Distributeurs et grossistes de la fourniture nécessaire (papier, stylos, marqueurs, etc.).
- Accès à des données sur le génie côtier et l'environnement.

Le Tableau 3 détaille les ressources essentielles avec leurs coûts pour créer et mettre au point notre entreprise.

Besoins	Nombre	Prix
Local (50 m ²)	1	À partir de 1,200,000 DA/an
Matériel Informatique :		
PC	5	1,600,000 DA
Imprimante Scanner	1	46,000 DA
Logiciels	/	0 DA
Matériel Bureautique :		
Bureaux	5	105,000 DA
Chaises	8	188,000 DA
Armoires	4	100,000 DA
Tableau	1	7,000 DA
Fourniture:		
Papiers	6 Rames /an	4,500 DA/an
Ancre	48 Cartouches/an	19,200 DA/an
Stylos/Marqueur/Registres	-	12,000 DA/an
Autres :		
Climatiseur	1	70,000 DA
Electricité/Eau	/	En Moyenne 64,000 DA/an
Abonnement internet	/	34,000 DA/an
Ingénieur en programmation	1	Salaire Brut : 800,000 DA/an
Création de Plateforme pour vente de services	1	300,000 DA
Site web de l'entreprise	1	400,000 DA
Outil de E-paiement (devise/dinars)	1	150,000 DA
Total		5,099,700 DA

Tableau 3 : Liste des besoins pour la création de l'entreprise

A.8 Sources de revenus

Cette partie concerne les différentes sources de revenus de l'entreprise. Ces sources peuvent être résumées dans les points suivants.

- Ventes directes de modèles prédictifs des problèmes côtiers aux agences gouvernementales, entreprises de construction et organisations environnementales.
- Vente de services de cartographie et de modélisation des zones côtières à risques élevés.
- Vente de formations en programmation et en logiciels spécialisés en cartographie et SIG.
- Location de PC performants pour les simulations d'opérations complexes.
- Vente de cartes pour diverses applications.
- Revenus publicitaires sur la plateforme en ligne.

A.9 Structure des coûts

Cette composante concerne les coûts associés à l'exploitation de l'entreprise. Cela comprend les coûts fixes et les coûts variables.

Coûts fixes

- Loyer.
- Assurance.
- Salaires et charges sociales du personnel.
- Eau et électricité.
- Internet.

Coûts variables

- Réparation et maintenance du matériel bureautique et informatique.
- Publicité.
- Distribution.
- Fourniture.
- Frais d'exploitation et de maintenance de la plateforme.

A.10 Résumé du Business Model Canvas

Le tableau 4 résume les neuf composantes de notre modèle économique en une seule page.

Partenaires clés - Agences gouvernementales responsables de la gestion côtière. - Organisations environnementales travaillant sur la préservation et la protection côtière. - Entreprises de construction et d'aménagement côtier pour la mise en œuvre des solutions d'ITA.	Activités Clés - Création de modèles prédictifs et de cartes pour les divers problèmes côtiers. - Traitement des grandes Bases de données. - Création de cartes pour diverses applications. - Offres des formations en programmation et sur les logiciels de SIG. - Location de PC performants pour les simulations d'opérations complexes.	Propositions de valeur - Solutions avancées basées sur l'intelligence artificielle pour le génie côtier et la gestion des risques côtiers. - Prédiction et modélisation précises des processus côtiers. - Solutions rentables et efficaces pour la planification côtière et le développement des infrastructures - Amélioration de l'évaluation des risques côtiers et des stratégies de réduction des risques.	Relation Client - Collaboration étroite avec les clients. - Consultations personnalisées. - Mises à jour régulières sur les nouvelles technologies d'ITA et de cartographie. - Offres de réduction sur les formations proposées.	Clients - Directions de travaux publiques. - Délégation Nationale aux Risques Majeurs. - Office national de la météorologie. - Agence Nationale des Changements Climatiques. - Etudiants, chercheurs et ingénieurs.
Ressources clés - Expertise en recherche et développement des techniques de l'intelligence artificielle. - Matériel informatique puissant et performant. - Personnel qualifié en cartographie et programmation. - Distributeurs et grossistes de fourniture - Institutions financières.		Canaux - Plateforme de vente des services - Participation à aux conférences et aux salons professionnels. - Partenariats avec des agences gouvernementales. - Ventes directes et consultations avec des entreprises de génie côtier.		
Coûts Equipement : 2,046,000 DA Matériel informatique et bureautique Fond de roulement : 3,053,700 DA Fourniture-Factures -Marketing -Recherche et développement – Loyer – Salaire et charges sociales – Transport		Revenus - Ventes directes de modèles prédictifs et des cartes - Vente de formations en programmation et en logiciels de SIG. - Location de PC performants pour les simulations d'opérations complexes.		

Figure 5 : Model Buisness Canvas

A.11 Conclusion

En conclusion, la création de notre Business Model Canvas (BMC) nous a fourni une vue claire et complète de l'ensemble de notre modèle économique. Grâce à ce modèle regroupant les neuf composantes clés, nous disposons désormais d'une approche structurée et visuelle qui constitue un outil puissant pour comprendre, analyser, expliquer et communiquer efficacement notre idée de startup. Le BMC nous a permis de mettre en évidence les relations et les interactions entre les différentes parties de notre entreprise, ce qui nous aide à prendre des décisions éclairées et à identifier les domaines d'amélioration potentiels. En établissant des liens étroits entre notre proposition de valeur unique, nos segments de clientèle, nos canaux de distribution, nos sources de revenus et nos partenariats stratégiques, nous avons créé une vision globale solide de notre projet. Ce processus a également mis en lumière les opportunités et les défis auxquels nous devons faire face, nous permettant ainsi d'affiner notre approche et de nous préparer au succès de notre entreprise. Avec ce BMC en main, nous sommes prêts à passer à l'étape suivante de notre parcours entrepreneurial avec confiance et détermination.

Annexe B Résultats de simulations numériques

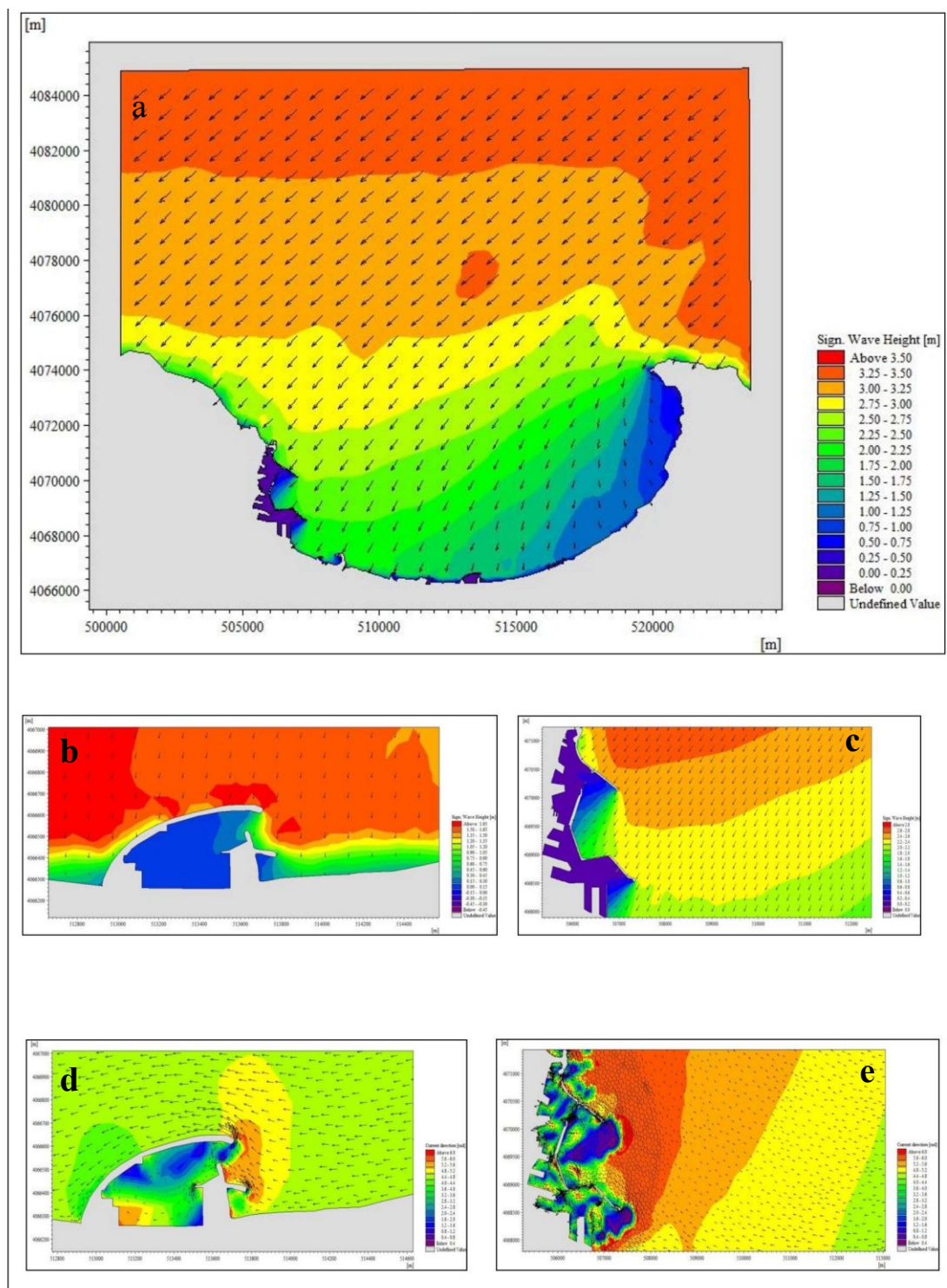


Figure 5 : Champs des houles et direction de courants de direction NE (période de retour 2 ans)

- a) Vue d'ensemble des champs de houles de direction NE dans la Baie d'Alger.
- b) Champs de houles de direction NE dans la Marina d'Alger.
- c) Champs de houles de direction NE dans le Port d'Alger.
- d) Direction des courants de direction NE à proximité de la Marina d'Alger.
- e) Direction des courants de direction NE à proximité du Port d'Alger.

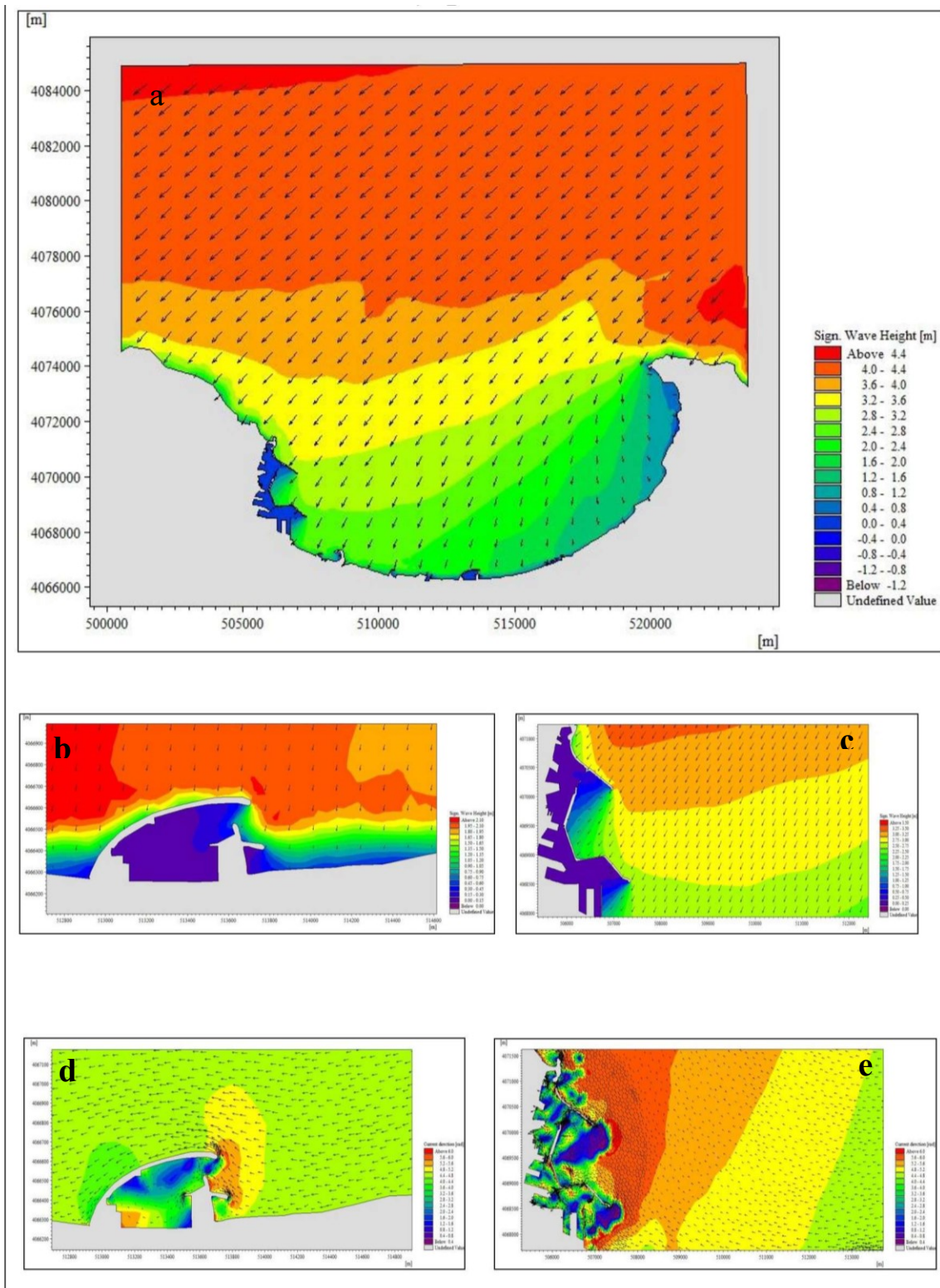


Figure 6 : Champs des houles et direction de courants de direction NE (période de retour 10 ans)

- a) Vue d'ensemble des champs de houles de direction NNE dans la Baie d'Alger.
- b) Champs de houles de direction NE dans la Marina d'Alger.
- c) Champs de houles de direction NE dans le Port d'Alger.
- d) Direction des courants de direction NE à proximité de la Marina d'Alger.
- e) Direction des courants de direction NE à proximité du Port d'Alger

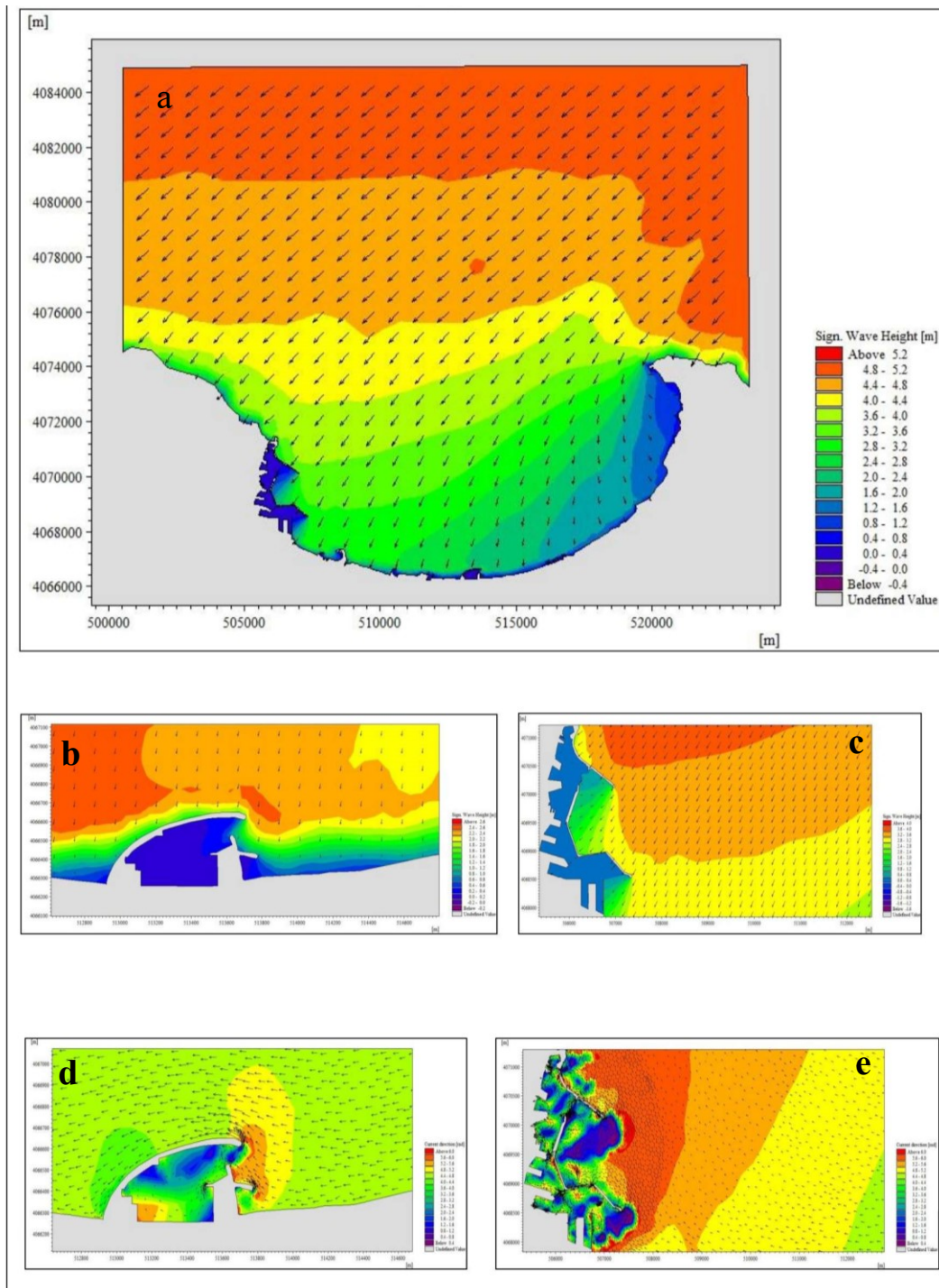


Figure 7 : Champs des houles et direction de courants de direction NE (période de retour 30 ans)

- a) Vue d'ensemble des champs de houles de direction NE dans la Baie d'Alger.
- b) Champs de houles de direction NE dans la Marina d'Alger.
- c) Champs de houles de direction NE dans le Port d'Alger.
- d) Direction des courants de direction NE à proximité de la Marina d'Alger.
- e) Direction des courants de direction NE à proximité du Port d'Alger.

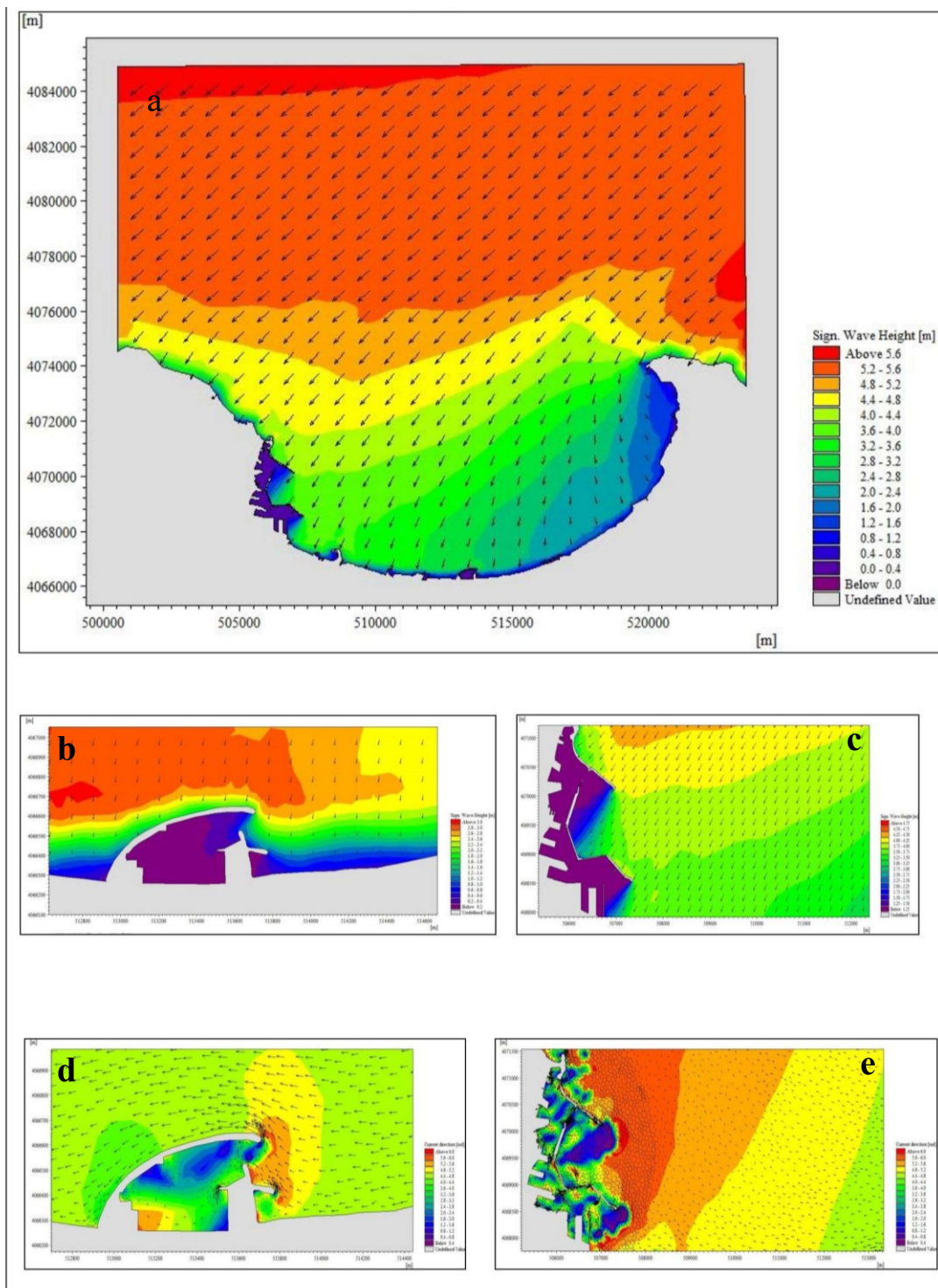


Figure 8 : Champs des houles et direction de courants de direction NE (période de retour 100 ans)

- a) Vue d'ensemble des champs de houles de direction NE dans la Baie d'Alger.
- b) Champs de houles de direction NE dans la Marina d'Alger.
- c) Champs de houles de direction NE dans le Port d'Alger.
- d) Direction des courants de direction NE à proximité de la Marina d'Alger.
- e) Direction des courants de direction NE à proximité du Port d'Alger.

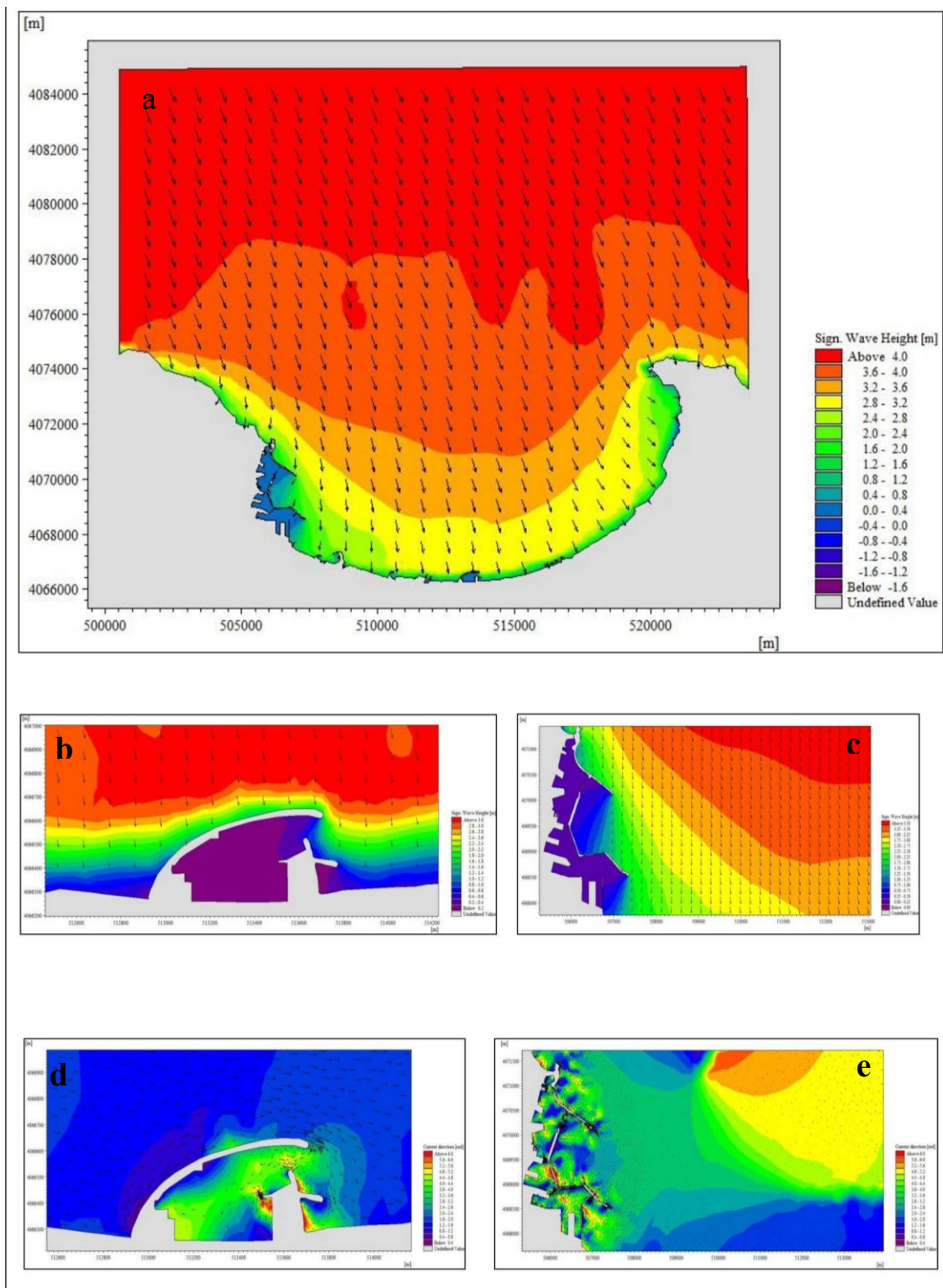


Figure 9 :Champs des houles et direction de courants de direction NNW (période de retour 2 ans)

- a) Vue d'ensemble des champs de houles de direction NNW dans la Baie d'Algier.
- b) Champs de houles de direction NNW dans la Marina d'Algier.
- c) Champs de houles de direction NNW dans le Port d'Algier.
- d) Direction des courants de direction NNW à proximité de la Marina d'Algier.
- e) Direction des courants de direction NNW à proximité du Port d'Algier.

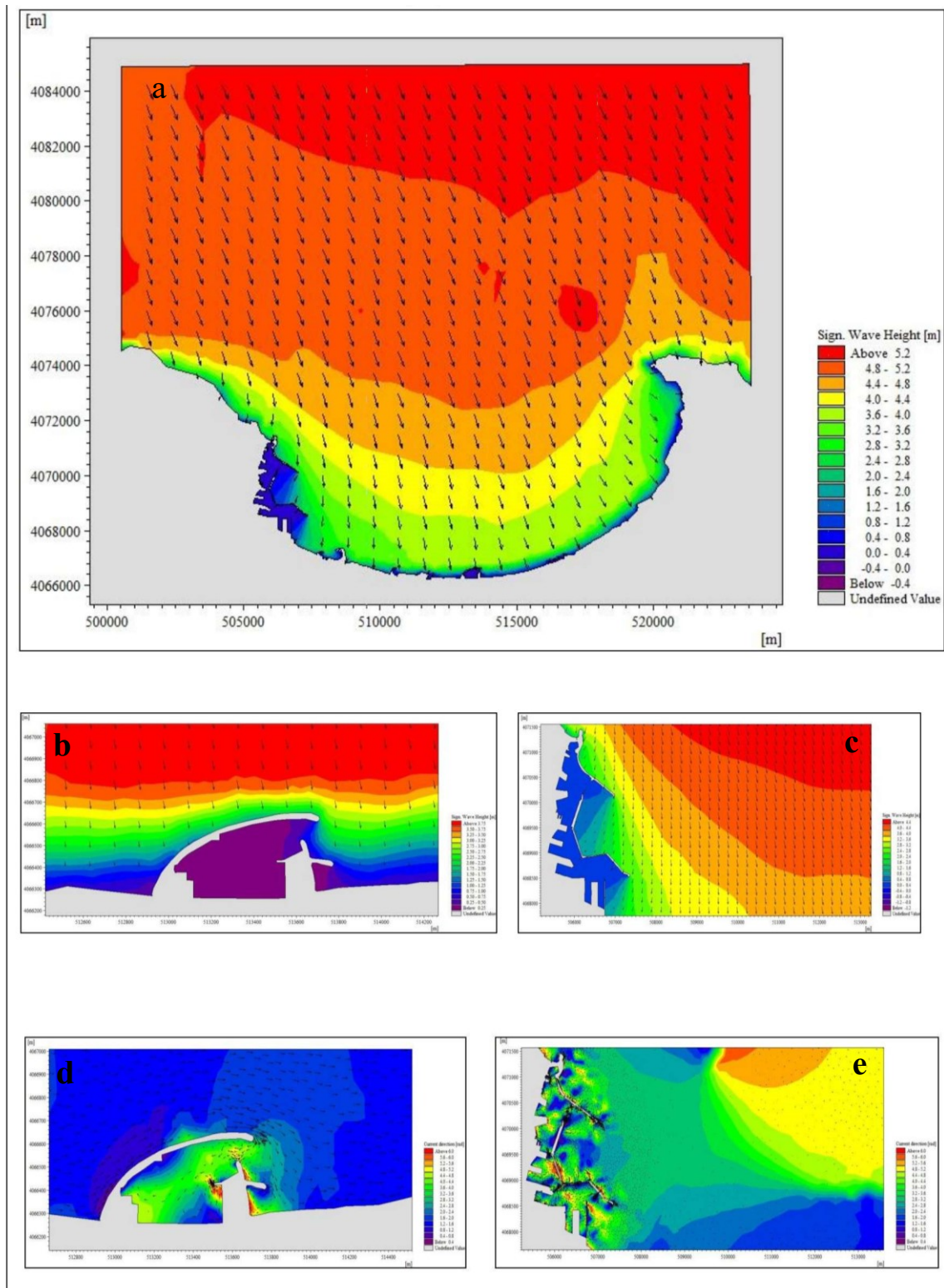


Figure 10 :Champs des houles et direction de courants de direction NNW (période de retour 10 ans)

- a) Vue d'ensemble des champs de houles de direction NNW dans la Baie d'Alger.
- b) Champs de houles de direction NNW dans la Marina d'Alger.
- c) Champs de houles de direction NNW dans le Port d'Alger.
- d) Direction des courants de direction NNW à proximité de la Marina d'Alger.
- e) Direction des courants de direction NNW à proximité du Port d'Alger.

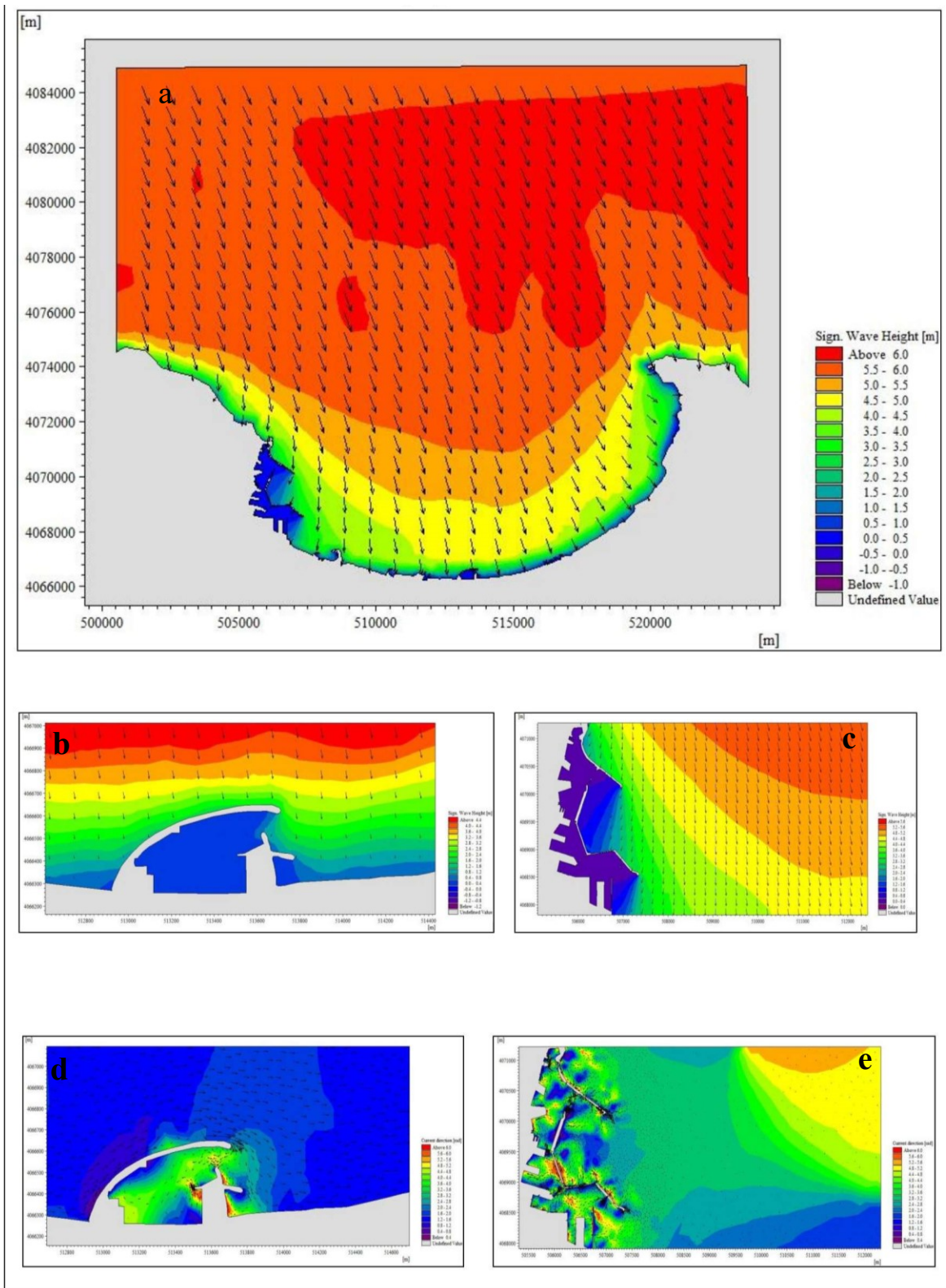


Figure 11 : Champs des houles et direction de courants de direction NNW (période de retour 30 ans)

- a) Vue d'ensemble des champs de houles de direction NNE dans la Baie d'Alger.
- b) Champs de houles de direction NNW dans la Marina d'Alger.
- c) Champs de houles de direction NNW dans le Port d'Alger.
- d) Direction des courants de direction NNW à proximité de la Marina d'Alger.
- e) Direction des courants de direction NNW à proximité du Port d'Alger.

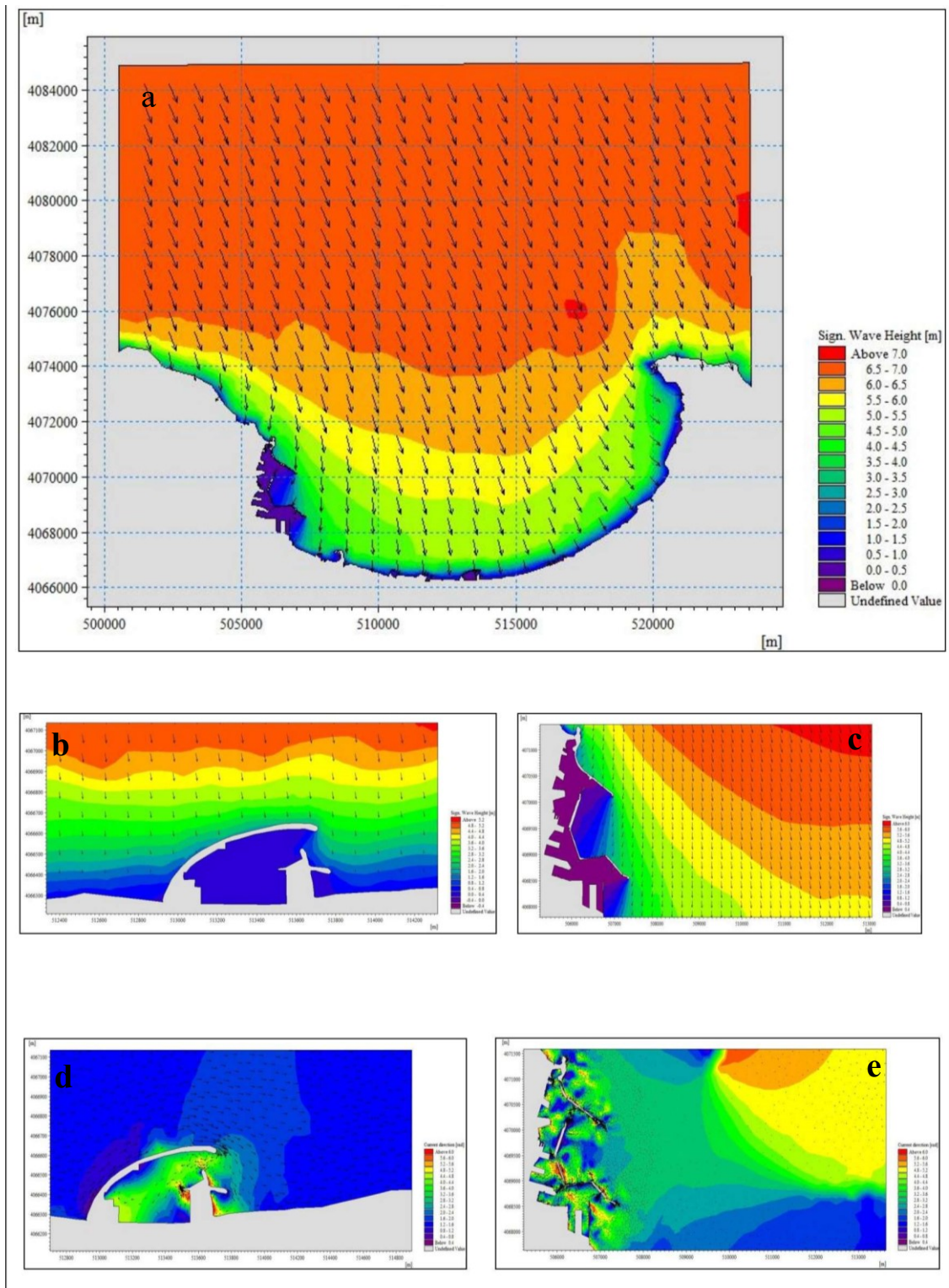


Figure 12 : Champs des houles et direction de courants de direction NNW (période de retour 100 ans)

- a) Vue d'ensemble des champs de houles de direction NNW dans la Baie d'Alger.
- b) Champs de houles de direction NNW dans la Marina d'Alger.
- c) Champs de houles de direction NNW dans le Port d'Alger.
- d) Direction des courants de direction NNW à proximité de la Marina d'Alger.
- e) Direction des courants de direction NNW à proximité du Port d'Alger.