

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



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

Thème :

**ETUDE D'AMENAGEMENT DE LA FAÇADE
MARITIME DE TAMENFOUST**

Présenté par :

**CHEKRA chaima
DAHMANI marya**

Soutenu le 21 / 06 / 2025, devant le jury composé de :

Mme.FEZAA N

M. MEZOUAR K

Mme. SALEM CHRIF Y

Professeur -ENSSMAL

Professeur -ENSSMAL

Maitre conférence B -ENSSMAL

Présidente

Promoteur

Examinatrice

Année universitaire : 2024 / 2025

Remerciements

Avant toute chose, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant, qui nous a accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail. Sans Sa bénédiction et Son soutien constant, nous n'aurions pas pu surmonter les défis rencontrés tout au long de ce parcours.

Nous souhaitons également adresser nos sincères remerciements à notre encadrant, **M MEZOUAR K.** pour son accompagnement précieux, ses conseils avisés et sa disponibilité. Son expertise et son soutien ont été une source précieuse d'apprentissage et d'inspiration pour nous.

Une pensée reconnaissante à **Grebici A**, pour la présence constante tout au long de ce travail. Son aide précieuse et ses conseils efficaces ont été d'un grand soutien.

Nous remercions chaleureusement les membres du jury, **Madame FEZAA N** et **Madame SALEM CHRIF Y**, pour avoir accepté d'évaluer notre travail et pour leurs remarques constructives qui nous aideront à progresser davantage.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toute la famille **ENSSMAL** – nos professeurs, amis et collègues – qui nous accompagne depuis le début de cette aventure en 2020, ainsi qu'à l'ensemble de nos enseignants, qui nous ont formés bien avant et nous ont offert un soutien moral et intellectuel constant depuis le début de notre parcours il y a 18 ans.

Nous adressons également nos remerciements à toutes les personnes, de près ou de loin, qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Enfin, nous tenons tout particulièrement au binôme, pour la confiance, le soutien inestimable et tous les moments agréables partagés au fil de cette aventure

MERCI

Dédicace

Je dédie ce modeste travail, fruit de persévérance et d'espoir, à ceux qui occupent une place sacrée dans mon cœur :

À mes chers parents — que Dieu les protège — pour leur amour inconditionnel, leur soutien constant, leurs prières silencieuses et leurs innombrables sacrifices. Votre confiance en moi a été ma plus grande force, la lumière qui m'a guidée dans les moments d'incertitude.

À ma grand-mère bien-aimée, Mima — que Dieu la protège — pour sa tendresse infinie, ses prières discrètes et son amour sans faille qui m'ont toujours enveloppée de douceur et de force.

À mes frères, piliers de ma vie, pour leur foi en moi, leur présence rassurante et leurs encouragements sincères lorsque le doute s'installait.

À mes amis et collègues, pour leur aide précieuse, leurs mots bienveillants, et les souvenirs partagés qui ont donné à ce parcours une richesse humaine inestimable.

À mon binôme, Marya, pour sa collaboration, sa patience et les efforts conjoints tout au long de cette belle aventure.

À mon amie proche, Roufaïda, pour son écoute, sa présence réconfortante et son soutien fidèle.

À toute mon équipe : Achwaq, Belkis, Yousra et Doaa, pour l'esprit d'équipe, les fous rires, et l'entraide qui ont rendu ce chemin plus doux.

À toute la promotion GPL, pour cette ambiance unique, ces échanges constructifs et ce lien qui nous unit.

Et enfin, à toute la famille de l'ENSSMAL — mes enseignant(e)s, personnels et camarades — pour m'avoir encadrée, guidée et inspirée tout au long de mon parcours académique.

Merci à chacun d'avoir été là, d'une manière ou d'une autre. Ce travail vous appartient aussi.

Chaima

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont accompagné mon chemin avec tendresse, générosité, et bienveillance. Votre présence, vos encouragements et votre amour ont été ma lumière dans les moments de doute.

*À **ma chère maman**, qui as toujours cru en moi, sans jamais douter, me laissant poursuivre mes rêves avec une liberté pleine de confiance. Pour l'amour infini, le soutien constant et la force discrète: cette réussite est avant tout la tienne.*

*À **mon frère Mostafa** et à **mes sœurs Asma, Samiha et Madjeda**, pour votre affection constante, vos paroles réconfortantes et votre présence rassurante. Vous êtes mon pilier, mon repère, mon refuge dans ce monde en mouvement.*

*À **mes adorables neveux et nièces** : Saleh, Wissal, Anes, Seif, Salsabil, Djihene, Younes, Sofia et Mostafa, vos sourires et votre innocence ont illuminé mes journées et nourri mon cœur d'amour et d'énergie.*

*À **mes amies chères à mon cœur**,*

***Chaïma**, ma binôme et précieuse complice, ta présence a tout changé.*

***Nour**, amie d'enfance fidèle, pour sa présence rassurante.*

***Achwaq, Belkis et Yousra**, merci pour vos mots doux, vos encouragements sincères et votre amitié lumineuse. Vous êtes des étoiles dans mon ciel.*

*À **mes camarades de route** et à toute la **promotion GPL**,*

Merci pour les partages, les éclats de rire, les discussions enrichissantes et tous les souvenirs qui font de ces années une étape inoubliable.

*À **toute la famille de l'ENSSMAL** et **tous nos professeurs**, pour l'environnement stimulant, votre dévouement, les valeurs transmises et la passion partagée.*

*À **notre encadrant Monsieur Mezuoar**, Pour la bienveillance, les conseils précieux et son accompagnement tout au long de ce travail.*

*À **Grebici A**, pour l'aide généreuse, la disponibilité et le soutien toujours présent.*

*Enfin, à **tous ceux qui, de près ou de loin**, m'ont tendu la main, cru en moi, ou simplement offert un mot gentil au bon moment...*

Recevez ici toute ma gratitude et mon affection .

Marya

Sommaire

Remerciements.....	2
Dédicace.....	3
Sommaire.....	5
Liste Des Figures.....	8
Liste Des Tableaux.....	10
Liste Des Equations.....	11
Liste Des Abréviations	12
Introduction Générale :	13
Chpitre I : Généralités sur la zone d'étude.....	16
I.1 Introduction	17
I.2 Cadre géographique.....	17
I.2.1 La Baie d'Alger.....	17
I.2.2 Tamentfoust (El Marsa)	17
I.3 Description de la zone d'étude	18
I.4 Aperçu Historique (évolution dans le temps)	19
I.5 Cadre géologique.....	21
I.6 Cadre géomorphologique	22
I.6.1 Typologie de la côte.....	22
I.6.2 Les falaises.....	23
I.6.3 Les plages.....	23
I.6.4 Le réseau hydrographique.....	24
I.7 L'occupation du sol	24
I.8 Données météorologiques (températures/précipitations)	25
I.8.1 Les températures	25
I.8.2 Les précipitations	26
I.9 Données climatologiques de la zone d'étude	27
I.9.1 La Marée	27
I.9.2 Généralités sur la houle.....	27
I.9.3 Climat de houle	28
I.9.4 Climat du vent.....	33
I.10 Conclusion.....	36
Chapitre II : Analyse des évènements extrêmes	38
II.1 Introduction	39

II.2	Théorie des valeurs extrêmes (TVE).....	39
II.3	Méthode Peaks Over Threshold	40
II.4	Conclusion.....	46
Chapitre III : Modélisation hydrodynamique.....		47
III.1	Introduction	48
III.2	Présentation du modèle	48
III.2.1	Mesh	48
III.2.2	Mike SW	49
III.2.3	MIKE 21 HD	51
III.3	Méthodologie de travail.....	52
III.3.1	Génération de la Mesh.....	52
III.3.2	Meche et bathymétrie résultante	53
III.4	Directions pénalisantes.....	56
III.5	Scénarios de simulation.....	56
III.6	Résultats et discussion des simulations	58
III.7	Conclusion.....	69
Chapitre IV : Dimensionnement des ouvrages de protection		70
IV.1	Introduction	71
IV.2	Digue a talus.....	71
IV.2.1	Caractéristique des embarcations	73
IV.3	Dimensionnement des digues	73
IV.3.1	Dimensionnement de la carapace	73
IV.3.2	Dimensionnement de la sous couche :	77
IV.3.3	Dimensionnement du filtre de transition et noyau :	77
IV.3.4	Dimensionnement de la butée de pied :	76
IV.4	Résultats des calculs de dimensionnement.....	78
IV.5	Hypothèses de calcul	79
IV.5.1	Caractéristiques des matériaux de construction	79
IV.5.2	Charges et surcharges d'exploitation	80
IV.5.3	Séisme	80
IV.5.4	Combinaison de charges.....	80
IV.5.5	Coefficient de sécurité.....	80
IV.6	Calcul des efforts.....	81
IV.6.1	Calcul des coefficients de poussées	81
IV.6.2	Poussée des terres.....	82
IV.6.3	Poussée dues à la surcharge d'exploitation	82

IV.6.4	Poussée hydrodynamique	83
IV.6.5	Sollicitation due à l'amarrage	83
IV.6.6	Efforts dus au séisme.....	83
IV.6.7	Poids des blocs	83
IV.7	Calcul des poussées	84
IV.7.1	Poussée des terres.....	84
IV.7.2	Poussée due à la surcharge de 1.5 t/m ²	85
IV.8	Vérification de la stabilité	85
IV.8.1	Cas statique	85
IV.8.2	Cas dynamique avec le séisme	87
IV.9	La proposition des variantes.....	88
IV.9.1	Collecte et analyse des données relatives aux besoins de la plaisance	89
IV.9.2	Collecte et analyse des données relatives aux besoins de la pêche	90
IV.9.3	Les variantes proposées.....	91
IV.9.4	Etude d'agitation.....	94
IV.9.5	Cout de réalisation de la variante	98
IV.9.6	Comparaison des variantes et recommandations.....	99
IV.10	Conclusion.....	100
Chapitre V : L'aménagement de la façade maritime		101
V.1	Introduction	102
V.2	Objectif de l'aménagement.....	102
V.3	Contraintes identifiées sur la zone littorale	103
V.4	Conception.....	104
V.5	Description détaillé des composantes.....	105
V.5.1	Cafétéria avec terrasse flottante	105
V.5.2	Petit stade de sport.....	106
V.5.3	Promenade littorale aménagée.....	106
V.5.4	Espaces de loisirs pour enfants.....	107
V.5.5	Marché couvert de poissons	107
V.5.6	Musé maritime.....	108
V.5.7	Végétalisation et intégration écologique	109
V.6	Analyse SWOT Structurée de l'Aménagement.....	112
V.7	Conclusion.....	114
Conclusion Générale		115
Références bibliographiques.....		118
Annexes.....		123

Liste des figures

Figure I-1 : Carte de situation géographique de la zone de Tamentfoust (ArcGIS Online)	18
Figure I-2 : cartes représentant chaque période par ordre	20
Figure I-3 : carte géologique de la partie est d'Alger (Benabid m. Ahmed Gaid a. 2024).....	21
Figure I-4 : Typologie de la côte de la zone d'étude (arcGIS online)	22
Figure I-5 : Réseau hydrographique de la zone d'étude (arcGIS online)	24
Figure I-6 : Carte de l'occupation du sol de la commune d'EL MARSIA	25
Figure I-7 : Variation annuelle des températures et de l'humidité relative à Alger.	26
Figure I-8 : Évolution mensuelle des précipitations et du nombre de jours de pluie à Alger.....	26
Figure I-9 : Propagation de la houle (Bonnefille, 2010)	27
Figure I-10 : Représentation du spectre de la vitesse du vent.....	28
Figure I-11 : Roses de vents annuelle et saisonnières enregistrés durant la période 1992-2020..	29
Figure I-12 : Roses des vents mensuelles enregistrés durant la période de 1992- 2020.....	30
Figure I-13 : Représentation du spectre des hauteurs de houle enregistrées	32
Figure I-14 : Représentation du spectre des périodes de houle enregistrées	33
Figure I-15 : Roses de houles annuelle et saisonnières enregistrés durant la période de 1992-2020	34
Figure I-16 : Roses des houles mensuelles enregistrés durant la période de 1992- 2020.....	35
Figure I-17 : diagramme avec distributions marginales des hauteurs et périodes de houles	36
Figure II-1 : Schéma représentatif des méthodes blocks maxima et POT.....	39
Figure II-2 : Moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelle.....	40
Figure II-5 : Moyenne résiduelle de la série des hauteurs pour les neuf directions	41
Figure II-3 : Représentation de la méthode POT sur les hauteurs de houle de 1992-2020	42
Figure II-4 : Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour l'omnidirectionnel	42
Figure II-6 : Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour chaque direction.	43
Figure III-1 : maillage de la mesh à l'échelle de la baie d'Alger	53
Figure III-2 : maillage de la mesh à l'échelle de la zone de tamentfoust.	53
Figure III-3 : Carte bathymétrique de la baie d'Alger.....	54
Figure III-4 : Carte bathymétrique de la zone de Tamentfoust	55
Figure III-5 : Champs des houles dans la baie d'Alger de direction NNE et N (paramètres de houle pour une période de retour de 10 ans).	59
Figure III-6 : Champs des houles dans la baie d'Alger de direction NNW et NW (paramètres de houle pour une période de retour de 10 ans).	60
Figure III-7 : Champs des courants dans la baie d'Alger de direction NNE, N, NNW, NW (paramètres de houle pour une période de retour de 10	61
Figure III-8 : Champs des houles dans la baie d'Alger de direction NNE et N (paramètres de houle pour une période de retour de 30 ans).	62
Figure III-9 : Champs des houles dans la baie d'Alger de direction NNW et NW (paramètres de houle pour une période de retour de 30 ans)	63
Figure III-10 : Champs des courants dans la baie d'Alger de direction NNE, N, NNW, NW (paramètres de houle pour une période de retour de 30	64
Figure III-11 : Champs des houles dans la baie d'Alger de direction NNE et N (paramètres de houle pour une période de retour de 100ans).	65
Figure III-12 : Champs des houles dans la baie d'Alger de direction NNW et NW (paramètres de houle pour une période de retour de 100 ans).	66

Figure III-13 : Champs des courants dans la baie d'Alger de direction NNE, N, NNW, NW (paramètres de houle pour une période de retour de 100 ans).	67
Figure IV-1 : Coupe type d'une digue à talus, éléments constitutifs (Caminade. D., 1995).	70
Figure IV-2 : Types de déferlement en fonction de ξ_m (Battjes, 1974)	74
Figure IV-3 : Paramètre de perméabilité nominale P pour la formule de Van der Meer (1988)	75
Figure IV-4 : image satellitaire de l'état actuel du port (source : google earth pro avril 2025)...	88
Figure IV-5 : État d'agitation (houle incidente : dir. 270°N T=12s) pour l'état actuel	95
Figure IV-6 : État d'agitation (houle incidente : dir. 270°N T=12s) pour la variante 1	95
Figure IV-7 : État d'agitation (houle incidente : dir. 270°N T=12s) pour la variante 2.....	96
Figure IV- : État d'agitation (houle incidente : dir. 270°N T=12s) pour la variante 3.....	96
Figure V-1 : Plan globale de l'aménagement sur AutoCAD	103
Figure V-2 : Coupe technique AutoCAD de la cafétéria, la terrasse flottante et le parking avec une image générer par le AI	104
Figure V-3 : Coupe technique AutoCAD du stade	105
Figure V-4 : Coupe technique AutoCAD de la promenade et une image générée par AI.....	106
Figure V-5 : Coupe technique AutoCAD de la zone de loisirs.....	106
Figure V-6 : Coupe technique AutoCAD du marché et une image générée par AI.....	107
Figure V-7 : Coupe technique AutoCAD du musée et une image générée par AI	108

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Liste des plages de la zone d'étude (BOUKHENNAF, 2024).....	23
Tableau I-4 : Vitesses marquantes du vent.	28
Tableau I-2 : Valeurs marquantes des hauteurs de la houle.	32
Tableau I-3 : Périodes marquantes de la houle.	33
Tableau II-1 : Tableau résumant l'ensemble des résultats obtenus par la méthode POT.....	44
Tableau III-1 : Des inputs des simulations pour l'ensemble les périodes de retour (10,30 et 100 ans) pour la baie.	56
Tableau IV-1 : Caractéristique des embarcations	72
Tableau IV-2 : Formule d'Hudson générale.	73
Tableau IV-3 : Formule de can der meer eaux profondes.	73
Tableau IV-4 : Formule de van der meer eaux peu profondes.	74
Tableau IV-5 : Paramètres géométriques de la carapace.	75
Tableau IV-6 : Dimensionnement de la sous-couche.	76
Tableau IV-7 : Formule de dimensionnement du filtre de transition et noyau.....	76
Tableau IV-8 : Formule de dimensionnement de la butée de pied.	77
Tableau IV-9 : Dimensionnements proposés pour la section courante de la jetée principale.	78
Tableau IV-10 : Dimensionnements proposés pour la section musoir de la jetée principale.....	78
Tableau IV-11 : Charges d'exploitations G.....	79
Tableau IV-12 : Les coefficients de sécurité	79
Tableau IV-13 : Les coefficients de poussée	81
Tableau IV-14 : le poids des blocs à utiliser.....	82
Tableau IV-15 : Remblai au-dessus du bloc	83
Tableau IV-16 : calculs des poussées des terres	83
Tableau IV-17 : poussée due à la surcharge de 1.5t/m ²	84
Tableau IV-18 : Récapitulatif des forces (cas statique).....	84
Tableau IV-19 : Coefficient de sécurité (cas statique)	85
Tableau IV-20 : récapitulatif des forces (cas dynamique).....	86
Tableau IV-21 : Coefficient de sécurité (cas dynamique).....	86
Tableau IV-22 : Récapitulatif des besoins.....	87
Tableau IV-23 : Récapitulatif des simulation et l'agitation	94
Tableau IV-24 : la comparaison des prix par section de chaque variante	95
Tableau IV-25 : La comparaison des prix par section	96
Tableau V-1 : Tableau récapitulatif des composantes	105
Tableau V-2 : analyse SWOT de l'aménagement.....	112
Tableau V-3 : Axes Stratégiques Recommandés.....	110

Liste Des Equations

Équation II-1.....	40
Équation III-1.....	48
Équation III-2.....	48
Équation III-3.....	48
Équation III-4.....	48
Équation III-5.....	48
Équation III-6.....	49
Équation III-7.....	49
Équation III-8.....	49
Équation III-9.....	49
Équation III-10.....	49
Équation III-11.....	49
Équation III-12.....	49
Équation III-13.....	47
Équation III-14.....	50
Équation III-15.....	50
Équation III-16.....	50
Équation III-17.....	51
Équation III-18.....	51
Équation III-19.....	51
Équation III-20.....	51
Équation III-21.....	51
Équation IV-1.....	80
Équation IV-2.....	80
Équation IV- 3.....	85

Liste des abréviations

OMK : l'Oligo-Miocène kabyle

TVE : Théorie des valeurs extrêmes

POT : Peaks Over Threshold

DHI : l'Institut Hydraulique Danois

HD : Le Module Hydrodynamique

SIG : Système d'Information Géographique

Esri : Environmental Systems Research Institute

Introduction Générale

Introduction

Les zones côtières sont aujourd'hui exposées à diverses pressions liées à la croissance démographique, à l'urbanisation, au développement des activités économiques notamment le tourisme, la pêche et le transport maritime, au agents météocéaniques ainsi qu'aux effets du changement climatique, tels que l'élévation du niveau de la mer ou l'intensification des événements extrêmes. Dans ce contexte, l'aménagement des façades maritimes devient un enjeu majeur afin de trouver un équilibre entre développement économique, protection de l'environnement et amélioration du cadre de vie des populations. En Algérie, la baie d'Alger, vaste ouverture méditerranéenne au cœur du littoral central, constitue l'un des espaces littoraux les plus emblématiques. Elle concentre une grande partie des activités économiques et urbanistiques de la capitale, tout en représentant un patrimoine naturel et paysager d'une richesse considérable. Et en particulier la zone de Tamentfoust qui représente un territoire stratégique à fort potentiel touristique et économique.

La ville de Tamenfoust, située à l'extrémité est, ce site présente un grand potentiel de développement remarquable en raison de sa position géographique, de son patrimoine historique, son port mixte (pêche et plaisance), ainsi que de ses plages enregistrent une forte fréquentation durant la saison estivale. Cependant, malgré la présence d'ouvrages de protection contre l'érosion, le front de mer reste peu aménagé, fragmenté et peu exploité. L'absence de véritables espaces publics, de parcours littoraux continus ou d'infrastructures culturelles et de loisirs constitue un frein au développement et équilibre de cette zone.

Le présent mémoire de fin d'études vise à proposer un projet d'aménagement global et durable de la façade maritime de Tamenfoust, intégrant à la fois la réorganisation fonctionnelle du port existant et la création d'espaces littoraux accessibles, attractifs et résilients. L'objectif est de concevoir un projet qui respecte les spécificités naturelles du site tout en répondant aux besoins socio-économiques actuels, dans une logique d'aménagement côtier moderne, inclusif et durable. En valorisant les ressources naturelles et culturelles de la zone, tout en assurant la stabilité des aménagements face aux aléas marins.

Ce travail adopte une approche méthodologique approfondie, mêlant analyse de terrain, modélisation hydrodynamique (avec MIKE 21), dimensionnement d'ouvrages, et conception de solutions d'aménagements. Le projet inclut également des éléments innovants pour aménager la façade maritime de la zone, comme la mise en place d'un musée maritime sur pieux, de pontons flottants, d'une terrasse flottante, ainsi que des équipements légers (stade, marché aux poissons, cafétéria, etc....).

Le travail de ce mémoire de projet de fin d'études s'intéresse à l'étude d'aménagement de la façade maritime de Tamenfoust, la structure du mémoire s'organise :

Chapitre I : Présentation générale de la zone d'étude, incluant sa description physique et géographique ainsi qu'une analyse du climat des houles et des vents dans la baie d'Alger, dans son contexte géographique et géomorphologique.

Chapitre II : Une estimation des événements extrêmes à travers la théorie des valeurs extrêmes.

Chapitre III : La simulation de la propagation des houles via la modélisation numérique.

Introduction

Chapitre IV : Étude de proposition des variantes, présentant les techniques de conception et le dimensionnement des ouvrages, réalisé sur la base de l'étude du Laboratoire d'Études Maritimes (LEM).

Chapitre V : enfin, une projection du projet d'aménagement de la façade maritime.

A travers cette étude, ce mémoire ambitionne ainsi de contribuer à la réflexion sur les stratégies d'aménagements littoraux durables en Algérie. En prenant l'exemple concret de Tamentfoust pour démontrer qu'un équilibre entre développement maîtrisé, alliant innovation, préservation et attractivité, est non seulement possible, mais constitue une nécessité pour répondre aux défis actuels et futurs des zones côtières.

Chapitre I : Généralités sur la zone d'étude

I.1 Introduction

La zone de Tamentfoust consiste un site stratégique à la fois sur les plans historique, environnemental et socio-économique. Elle joue un rôle important dans les activités maritimes locales, telles que la pêche artisanale, la navigation de plaisance et le tourisme côtier. Toutefois, cette zone fait face à de multiples enjeux environnementaux. Notamment l'érosion côtière, la pollution marine urbaine croissante, qui nécessite des mesures d'aménagement et de gestion durables.

Pour comprendre les dynamiques à l'œuvre dans cet espace littoral, une caractérisation approfondie de la zone est indispensable. Ce chapitre rassemble des données générales et spécifiques permettant d'appréhender la complexité de la zone d'étude. Il couvre à la fois sa situation géographique, son historique, ses caractéristiques géologiques et géomorphologiques, ainsi que les facteurs naturels influençant sa dynamique côtière, à travers l'analyse des données météorologiques et océaniques (roses des houles et des vents). Par ailleurs, l'étude de l'occupation du sol met en lumière l'impact croissant des activités humaines sur ce milieu fragile.

I.2 Cadre géographique

I.2.1 La Baie d'Alger

La baie d'Alger se situe au nord de l'Algérie, entre les latitudes 36°43'51.52"N et 36°49'36.76"N, et entre les longitudes 3° 0'17.17"E et 3°13'59.38"E. Elle est bordée au sud par la plaine de la Mitidja, au nord par la mer Méditerranée, à l'est par le cap Matifou (El Marsa), et à l'ouest par la pointe Pescade (Raïs Hamidou).

Elle s'étend sur 46 km, adoptant une forme semi-circulaire, présente une prédominance de côtes sableuses (58,69 %). La baie d'Alger inclut 11 communes côtières sur 19 dans la wilaya d'Alger. Accueillant deux ports principaux – le port d'Alger (commerce) et le port de Tamentfoust (pêche et plaisance), elle constitue un enjeu stratégique pour la gestion et la préservation du littoral et joue un rôle clé dans l'économie de la région.

I.2.2 Tamentfoust (El Marsa)

La commune d'EL Marsa constitue le cap de l'extrémité Est de la baie d'Alger. Elle est située à 20 km à l'est d'Alger, et à 25 km de Boumerdes. Elle couvre une superficie de 3.7 km² est délimitée au Nord et à l'Ouest par la mer Méditerranée, Ain Taya au Sud-Est et Bordj el Bahri au Sud.

La zone d'étude Tamentfoust est une partie du cap qui ferme la baie d'Alger à l'Est, elle est presque de 2 km, s'étend du cap Matifou au Nord vers la plage de la Pérouse au sud.

Les Coordonnées géographique de la zone d'étude sont comme suit :

- Longitude : entre 3 13'13.86'' E et 3 13'56.55'' E
- Latitude : entre 36 48'44.54'' N et 36 48'16.36'' N



Figure I-1 : Carte de situation géographique de la zone de Tamentfoust (ArcGIS Online)

I.3 Description de la zone d'étude

La zone se caractérise par un littoral varié comprenant des plages sableuses, des zones rocheuses et un port de pêche. Sa configuration géographique spécifique réduit l'impact de la houle provenant du nord et du nord-est, tout en augmentant son exposition aux houles hivernales provenant de l'ouest et du nord-ouest.

Son régime hydrodynamique est influencé par les courants côtiers et les houles, notamment en hiver, ce qui impacte l'évolution du trait de côte et la dynamique sédimentaire.

La zone d'étude se compose de :

- **Le cap de Matifou** est une avancée rocheuse située à l'extrémité Est de la baie d'Alger dans la commune d'El Marsa. Il joue un rôle essentiel et stratégique dans la dynamique côtière de la région, et constitue un élément clé pour l'aménagement de la façade maritime de Tamentfoust grâce à sa position dominante sur la baie.
- **Le port actuel de Tamentfoust (El Marsa)** : le petit port de Tamentfoust est une infrastructure maritime dédiée à la pêche et à la plaisance. Il se distingue par sa passe orientée vers le sud. Il est délimité au nord et à l'est par le massif d'El Marsa, et au sud et à l'ouest par la mer Méditerranée. Il s'étend sur 2,61 hectares de terre-plein et 3 hectares d'un plan d'eau, avec un tirant d'eau de 5 mètres.

- **Plage d'El Marsa Centre** : est située à environ 30 km à l'Est d'Alger, se caractérise par son littoral mixte composée de sable grossier et de zones rocheuses, s'étend à une longueur de 300 mètres et une largeur de 9 mètres, elle offre un espace pour la baignade qu'aux activités nautiques telles que la plongée et la pêche. Malgré des infrastructures touristiques limitées, son cadre apaisant en fait une destination prisée pour la détente et les activités de loisirs en bord de mer.
- **La mini plage de Tamentfoust** : est localisée à l'Est de la baie d'Alger, est une petite plage aux eaux claires, proche du Bordj Tamentfoust. Son cadre naturel et son ambiance paisible en font un lieu idéal pour la détente et la découverte historique, malgré ses aménagements limités.

I.4 Aperçu Historique (évolution dans le temps)

Tamentfoust, anciennement connue sous le nom de « Rusguniae », est située à l'extrémité orientale de la baie d'Alger, dans l'actuelle commune d'El Marsa. Son nom berbère, signifiant « le côté droit », témoigne de sa position géographique stratégique. Son histoire est le reflet d'un brassage de civilisations, des Phéniciens aux Français, en passant par les Romains, les Byzantins et les Ottomans, qui ont laissé leur empreinte sur son patrimoine et son architecture.

-Période phénicienne (IV^e siècle av. J.-C.)

Dès l'Antiquité, les Phéniciens établissent le comptoir de Rusguniae. Il fut un port d'attache qui occupe une place clé dans le commerce maritime méditerranéen (**Boubhiz et Chikhi,2016**).

-Période romaine (I^{er} siècle av. J.-C. - V^e siècle apr. J.-C.)

Avec l'occupation romaine, Rusguniae devient une colonie prospère sous le règne de l'empereur Auguste, rassemblant environ 5 000 habitants. De nombreuses infrastructures étaient mises en place dans la cité, incluant des fermes, des domaines agricoles, des canaux, des ponts, des thermes et des édifices administratifs, religieux et de loisirs.

-Pour affirmer son rôle stratégique, une voie littorale était mise en place, reliant Rusguniae à Icosium (Alger) et Rusubbicari (Zemmouri), favorisant le développement des échanges et l'intégration régionale (**Boubhiz et Chikhi,2016**).

-Périodes vandale et byzantine (V^e - VII^e siècles)

Suite aux invasions du V^e siècle, la cité subit une destruction partielle avant d'être reconstruite par les Byzantins, qui y installent une Camp militaire pour maintenir leur contrôle sur la région (**Boubhiz et Chikhi,2016**).

-Période ottomane (XVI^e - XIX^e siècles)

A l'arrivée des Ottomans au XVI^e siècle, Rusguniae prend le nom de Tamentfoust. La ville devient forteresse stratégique dans la défense de la baie d'Alger. En 1661, le Bordj Tamentfoust construit sous Ali Agha, à partir de matériaux provenant des anciennes ruines. Il est construit pour protéger Alger des attaques ennemies, reflète le rôle stratégique de la localité à cette période (**Boubhiz et Chikhi,2016**).

-Période coloniale française (1830 - 1962)

Pendant la colonisation française, Tamentfoust, renommée Cap Matifou, devient un centre de peuplement et de développement militaire. Des infrastructures modernes sont mises en place, notamment dans les quartiers de La Pérouse et Jean Bart. La région se transforme avec l'installation des colonisateurs, l'extension des zones militaires et l'aménagement d'une route reliant Tamentfoust à Aïn Taya (**Boubhiz et Chikhi,2016**).

- Période postcoloniale

La ville garde la même structure, la zone militaire existante depuis la période coloniale a pris plus d'ampleur et de nouveaux noyaux ont vu le jour : les castors au sud et la cité EPLF et les carrières au nord et l'apparition de plusieurs équipements (**Boubhiz et Chikhi,2016**).

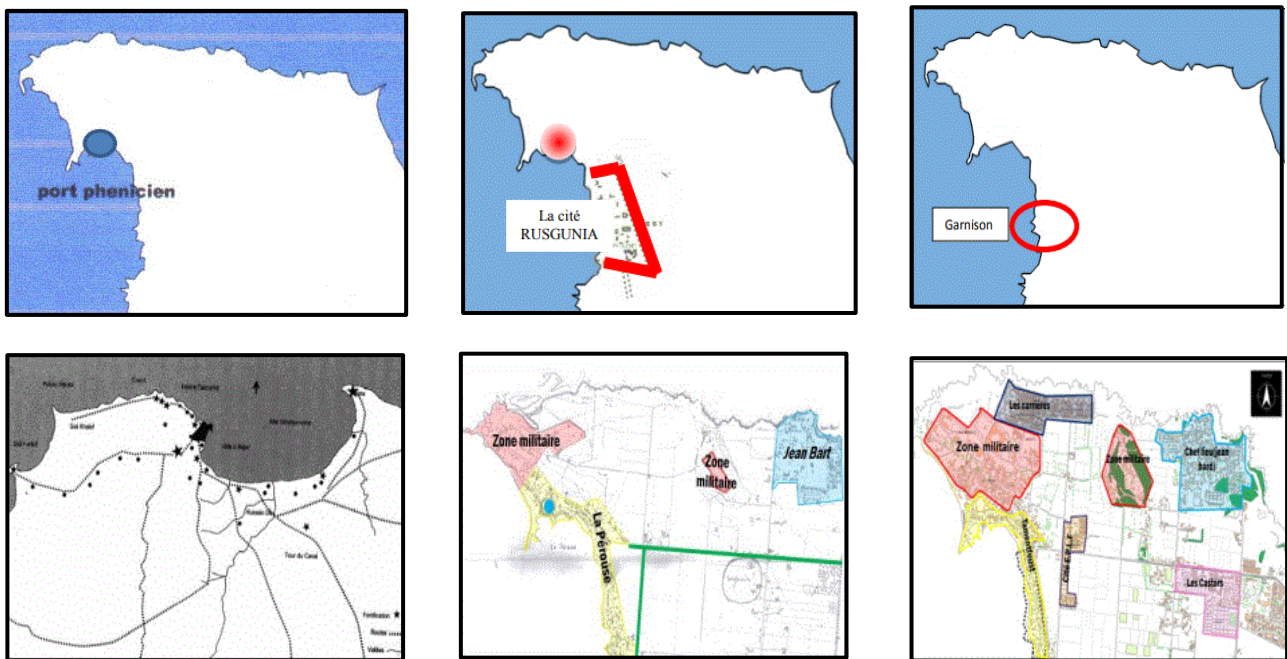


Figure I-2 : cartes représentant chaque période par ordre

Source : (archives Bastion 23) in (Boubhiz et Chikhi,2016)

I.5 Cadre géologique

Le bassin d'Alger, délimité à l'ouest par le massif d'Alger et à l'est par le cap de Bordj El Bahri, se caractérise par un littoral incurvé formant une baie régulière. Cette baie s'enfonce profondément dans les terres émergées de la Mitidja au sud (Merzouk, G. 2016).

Les dépôts continentaux de la baie d'Alger sont principalement constitués de sables dunaires et des lits des oueds actuels. Les dépôts marins, se composent de trois faciès distincts : un faciès sableux le long de la bordure littorale, un faciès carbonaté limité aux bordures rocheuses littorales et aux hauts fonds rocheux de la baie, et un faciès pélitique qui occupe la partie centrale et septentrionale de la baie. Entre l'oued El-Hamiz et Tamenfoust, on observe un platier rocheux situé entre la côte et une profondeur de 15 mètres.

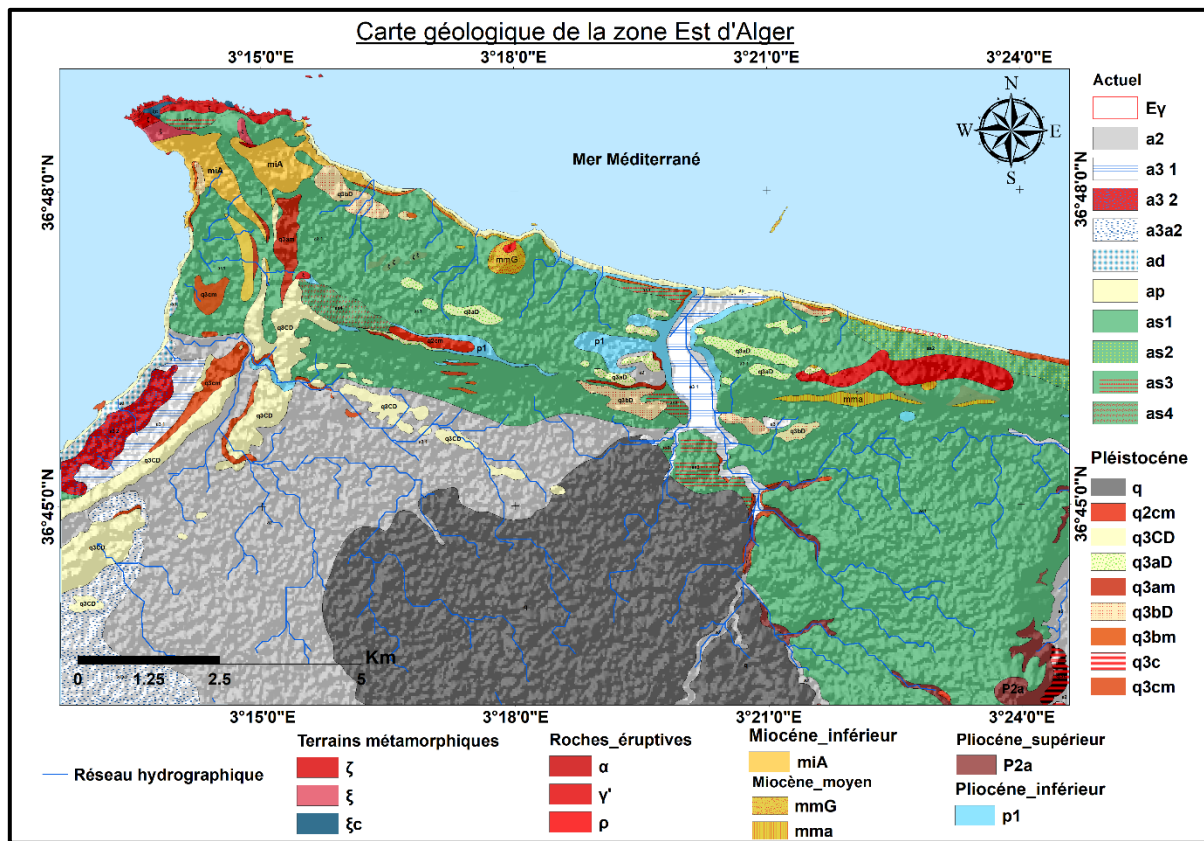


Figure I-3 :carte géologique de la partie est d'Alger (Benabid m. Ahmed Gaid a. 2024)

D'après (Benabid, M et Ahmed Gaid, A ,2024), La région côtière d'El Marsa à El Karma (Boumerdès) présente une diversité lithologique marquée par des roches sédimentaires, métamorphiques, plutoniques et volcaniques. Le socle métamorphique, composé de gneiss, marbres, paragneiss et schistes, s'étend de Cap Matifou à Boumerdès, traversé par des pegmatites et des granodiorites. Les formations sédimentaires néogènes incluent l'Oligo-Miocène kabyle (OMK) avec des conglomérats et grès micacés, et le Miocène post-nappe avec des marnes grises et calcaires gréseux.

Le Pliocène est caractérisé par des marnes argileuses bleues (Plaisancien) et des formations marno-sableuses riches en fossiles (Astien). Les dépôts quaternaires comprennent des dunes et des terrasses marines. Les formations magmatiques incluent des granodiorites, pegmatites et rhyolites volcaniques altérées. Sur le plan tectonique, les formations miocènes montrent une structure monoclinale avec des pendages vers le NE, et une faille de direction N110 sépare l'OMK de la granodiorite, créant une brèche tectonique.

I.6 Cadre géomorphologique

Notre zone d'étude se distingue par une grande diversité de formes littorales, incluant des falaises, des plages sableuses et des dunes. Ces formations résultent de l'interaction entre les processus morpho-dynamiques et la géologie du site. La morphologie de la région est principalement modelée par les processus hydrodynamiques, tels que les vagues, la houle et les courants, ainsi que par les facteurs climatiques, notamment les précipitations et les variations de température (**Benabid, M et Ahmed Gaid, A ,2024**)

I.6.1 Typologie de la côte

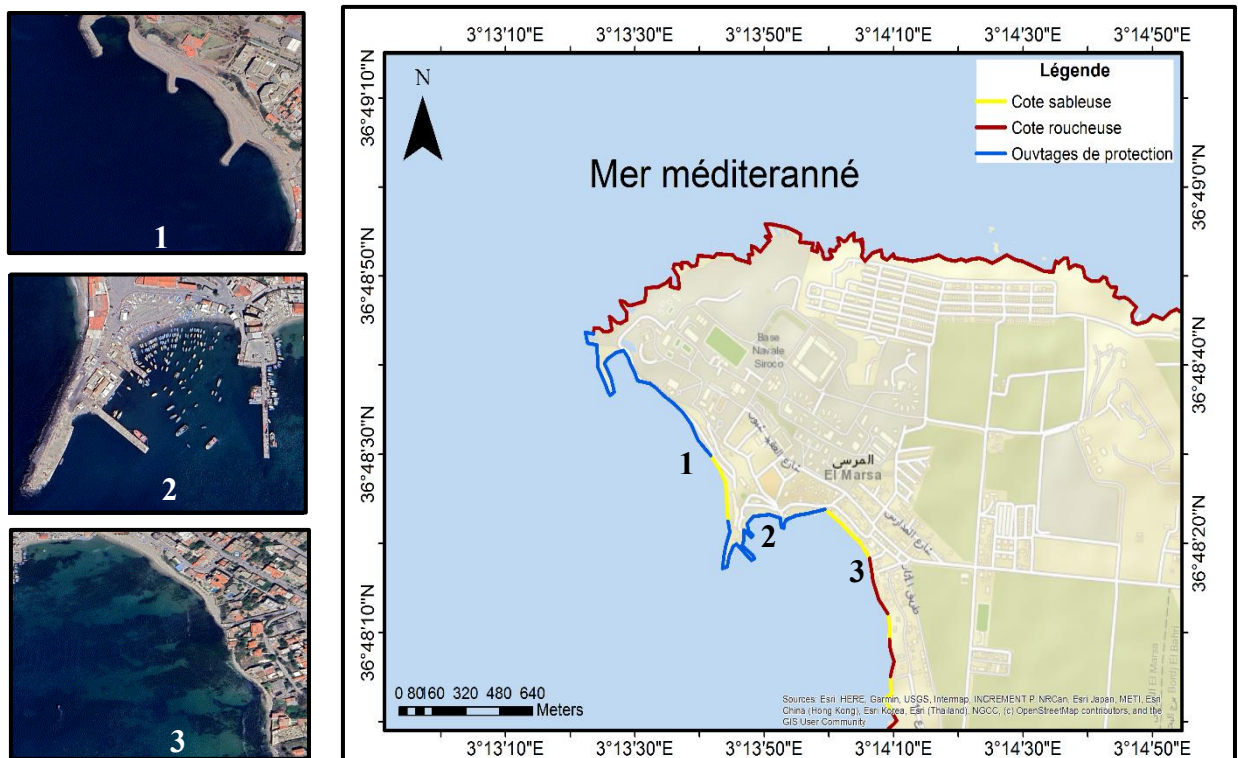


Figure I-4 : Typologie de la côte de la zone d'étude (arcGIS online)

I.6.2 Les falaises

Les falaises de la baie d'Alger sont composées de roches cristallophylliennes, notamment des gneiss, des schistes et des micaschistes, ainsi que de dépôts marins constitués de sables rouges, de poudingues et de grès grossiers (Merzouk, G., 2016).

La zone de l'Est de la baie d'Alger se distingue par un relief rocheux marqué par le **Cap Matifou**, où l'on trouve des falaises vivantes et mortes à l'extrémité de la baie. Cette zone est également caractérisée par une répartition générale des faciès sableux et carbonatés (Maouche, 1987).

I.6.3 Les plages

Les plages situées à l'est de la baie d'Alger sont majoritairement sableuses et bien développées, avec des pentes généralement inférieures à 3 %. Leur largeur varie entre 20 et 40 mètres. Elles se caractérisent par une granulométrie variée, comprenant du sable fin, moyen et grossier, ainsi que par un phénomène d'érosion notable (Benzine Y, 2024).

Tableau I-1 : Liste des plages de la zone d'étude (BOUKHENNAF, 2024).

Nom de la plage	Caractéristique	Commune	X	Y
Tamenfoust Est	D'une longueur de 300 mètres, sa largeur varie entre 10 et 20 mètres. Elle est composée de sable grossier.	El Marsa	3.23359	36.806399
Tamenfoust Ouest	D'une longueur de 680 mètres et d'une largeur variable, elle est protégée par quatre épis.	El Marsa	3.229037972 43	36.8069378 128
El Marsa Centre	Elle s'étend sur 300 mètres de long et 10 mètres de large, avec une composition de sables grossiers.	El Marsa	3.256413	36.811519
Plage Zerzouria	S'étendant sur 2000 mètres de long et 10 mètres de large, elle est constituée de galets.	El Marsa	3.273844	36.800914

I.6.4 Le réseau hydrographique

I.6.4.1 Oued El Hamiz

Avec un bassin versant s'étendant sur 160 km², l'Oued El Hamiz se jette dans la mer à proximité du Cap Matifou, à l'est de la baie d'Alger. La construction du barrage El Hamiz en amont a considérablement réduit les apports solides déversés en mer (Houma, 2009).

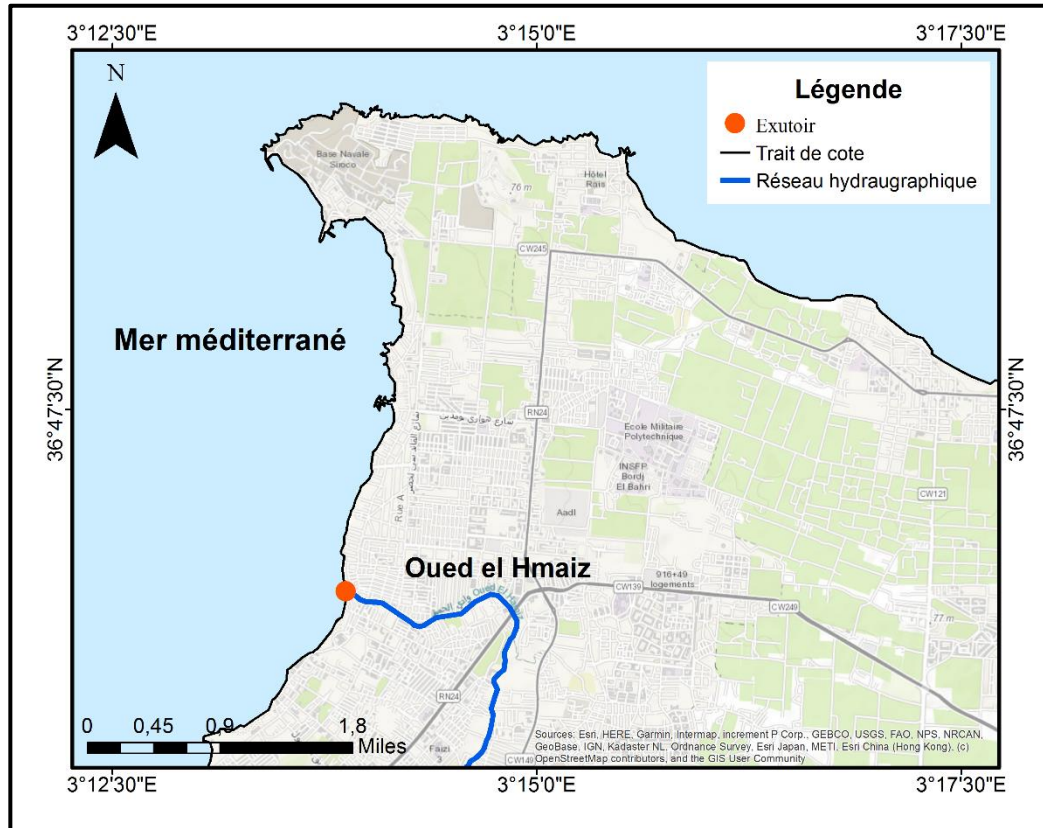


Figure I-5: Réseau hydrographique de la zone d'étude (arcGIS online)

I.7 L'occupation du sol

Le rapport PNUE souligne que le littoral algérien est fortement urbanisé (75 %) avec une érosion moyenne de 0,5 à 1 m/an. Et recommande une zone tampon de 100m pour la restauration des écosystèmes et la participation locale. La moyenne méditerranéenne d'urbanisation est de 34 %, avec une baisse des terres agricoles de 15 % depuis 2000 (Mediterranean Quality Status Report, PNUE, 2023).

Le carte de l'occupation du sol du Tamentfoust met en évidence une prédominance marquée des zones urbanisées, représentant environ 40 % de la surface totale. Les terres agricoles couvrent près de 25 %, tandis que les sols nus constituent environ 10 %. Les autres formes d'occupation sont moins représentées, avec environ 5 % d'espaces verts, 3 % d'équipements, 2 % d'infrastructures côtières, 3 % de plages et 7 % de côte rocheuse.

Cette configuration reflète une urbanisation en expansion, souvent au détriment des espaces naturels et agricoles. On note également que la façade maritime reste peu aménagée et insuffisamment valorisée, ce qui souligne l'urgence d'une meilleure gestion intégrée du littoral face à la pression urbaine croissante.

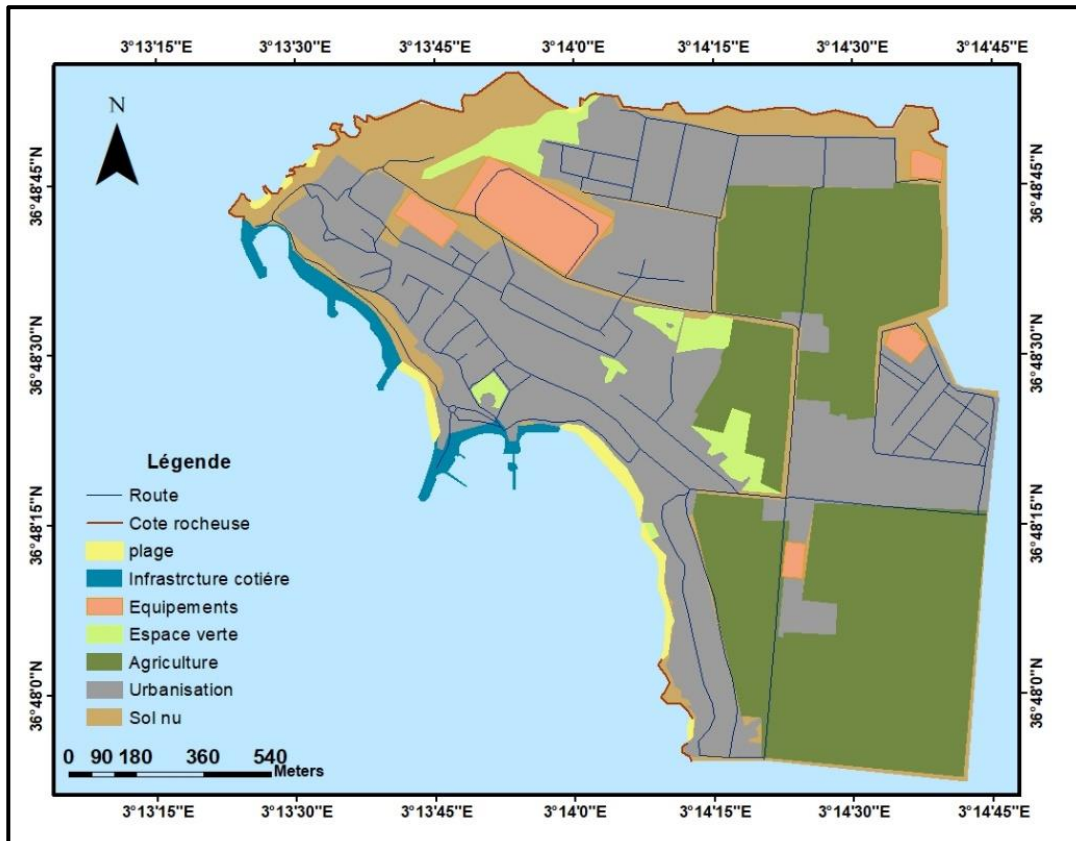


Figure I-6: Carte de l'occupation du sol de la commune d'EL MARSA

I.8 Données météorologiques (températures/précipitations)

La région d'Alger est soumise à un climat de type méditerranéen, qui se caractérise par une variabilité saisonnière marquée, par une alternance entre une saison estivale chaude et sèche, et une saison hivernale froide, humide et relativement pluvieuse (Office National de la Météologie ONM Algérie).

Les conditions météorologiques, telles que les précipitations et la température, influencent directement la dynamique côtière, l'érosion et la stabilité des infrastructures maritimes.

I.8.1 Les températures

Le graphique des températures et de l'humidité (figure II-7) montre les variations mensuelles typiques d'un climat méditerranéen. Les températures maximales atteignent $\sim 36^{\circ}\text{C}$ en juillet et descendent à $\sim 17^{\circ}\text{C}$ en janvier. Les minimales varient entre $\sim 7^{\circ}\text{C}$ en janvier et $\sim 24^{\circ}\text{C}$ en août. L'humidité est plus élevée en hiver ($\sim 79\%$) et plus basse en été ($\sim 70\%$). L'ensoleillement atteint ~ 11 h/jour en juin et son minimum en décembre (~ 5 h/jour). Une augmentation des températures annuelles a été observée, comme le confirme l'analyse des moyennes mensuelles dans la région d'Alger (wofrance, 2023).

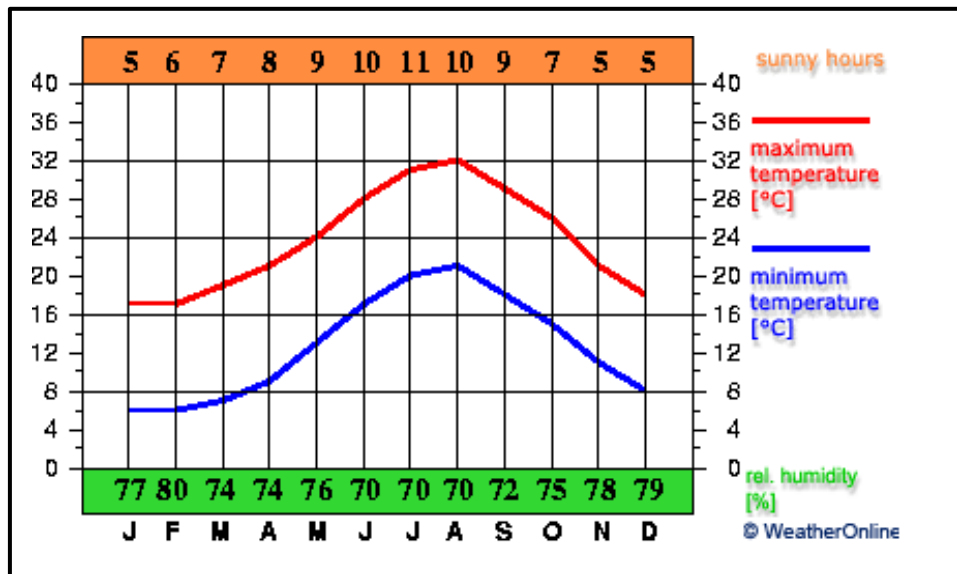


Figure I-7: Variation annuelle des températures et de l'humidité relative à Alger.
Source : wofrance ,2023

I.8.2 Les précipitations

Les précipitations mensuelles (figure II-8) présentent une variabilité saisonnière, avec un maximum en novembre (~120 mm) et décembre (~100 mm), tandis que la période estivale reste particulièrement sèche avec un minimum de (~5-10 mm en juin, juillet et août). Le nombre de jours de pluie suit cette tendance, atteignant environ ~14 jours en novembre et décembre, contre ~4 jours en juillet et août. La température de l'eau varie en fonction à celle de l'air, variant entre ~15°C en hiver (janvier-février) et ~25°C en août. La pluviométrie moyenne observée entre janvier 1982 et décembre 2021 est de 370,3 mm (wofrance ,2023).

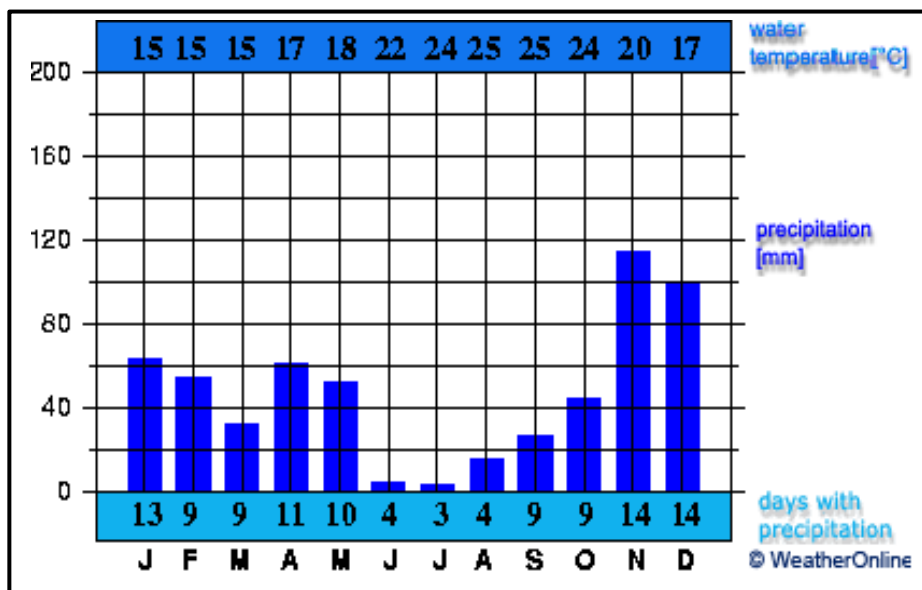


Figure I-8 : Évolution mensuelle des précipitations et du nombre de jours de pluie à Alger
Source : wofrance ,2023

I.9 Données climatologiques de la zone d'étude

I.9.1 La Marée

La marée dans la baie d'Alger, se caractérise par une faible amplitude s'explique par la configuration géographique du bassin méditerranéen, semi-fermé et peu profond, qui limite les mouvements d'eau liés aux forces gravitationnelles lunaires et solaires. La marée le long de la côte algérienne est de type microtidal avec un marnage moyen d'environ 40,6 cm (An improved Satellite Altimetry Data Processing, 2023), Toutefois, le comportement réel de la marée est fortement influencé par divers facteurs non astronomiques, tels que :

- Tourbillons côtiers de moyenne échelle (≤ 200 km) modifient localement la hauteur de la mer jusqu'à 20 cm, amplifiant les marées micro-tidales (Taupier-Lesage & Millot, 1988 ; Isern-Fontanet et al., 2016).
- Activité sismique peuvent générer des vagues pouvant dépasser 2 m et accentuer les inondations côtières (Vich et al., 2009 ; Yelles-Chaouche et al., 2024).
- Facteurs atmosphériques et climatiques et la montée accélérée du niveau de la mer (+3,7 mm/an depuis 2006) augmentent la hauteur effective des marées et les risques d'inondation (GIEC, 2021 ; An improved Satellite Altimetry..., 2023).

I.9.2 Généralités sur la houle

La houle est un mouvement ondulatoire de la surface marine, engendré par l'action du vent dans une zone éloignée appelée **fetch**. Cette perturbation se propage sous forme d'ondulations parallèles, quasi uniformes, se dirigeant progressivement vers le littoral. Sa caractérisation repose sur plusieurs paramètres, notamment la longueur d'onde L , l'amplitude H , la célérité C et la période T . D'autres grandeurs, telles que la cambrure H/L et la profondeur relative d , sont également utilisées pour classifier ce phénomène ondulatoire complexe (Bonnefille, 2010).

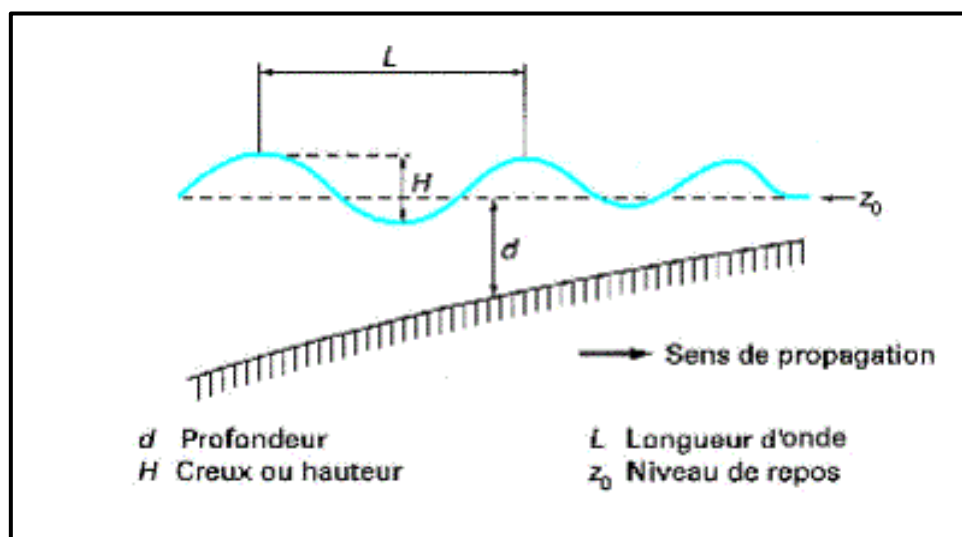


Figure I-9: Propagation de la houle (Bonnefille, 2010)

I.9.3 Climat du vent

Le vent local exerce une influence significative sur la houle. Afin d'analyser cet impact, une étude du climat du vent a été réalisée sur la période allant du **1 janvier 1992 au 31 décembre 20**, en s'appuyant sur la base de données **Wave Climate** extraite d'Infoplaza.

I.9.3.1 Spectre de la vitesse du vent

Le spectre de la vitesse du vent (figure 15) 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 24.8 m/s. Les vitesses sont globalement comprises entre 0 et 12 m/s. En analysant ces données, on a pu identifier certaines vitesses remarquables du vent représentées dans le tableau 4.

Tableau I-4 : Vitesses marquantes du vent.

vitesses marquantes de ventss	Valeur (m/s)
Umin (valeur minimale de l'enregistrement)	0.02
Umax (valeur maximale de l'enregistrement)	24.80
Um (vitesse moyenne)	5.11
U1/3 inf (vitesse de 1/3 inférieur)	2.13
Ud (classe de vitesse dominantes à 55%)	5.58
Us (vitesse de 1/3 supérieur)	8.60

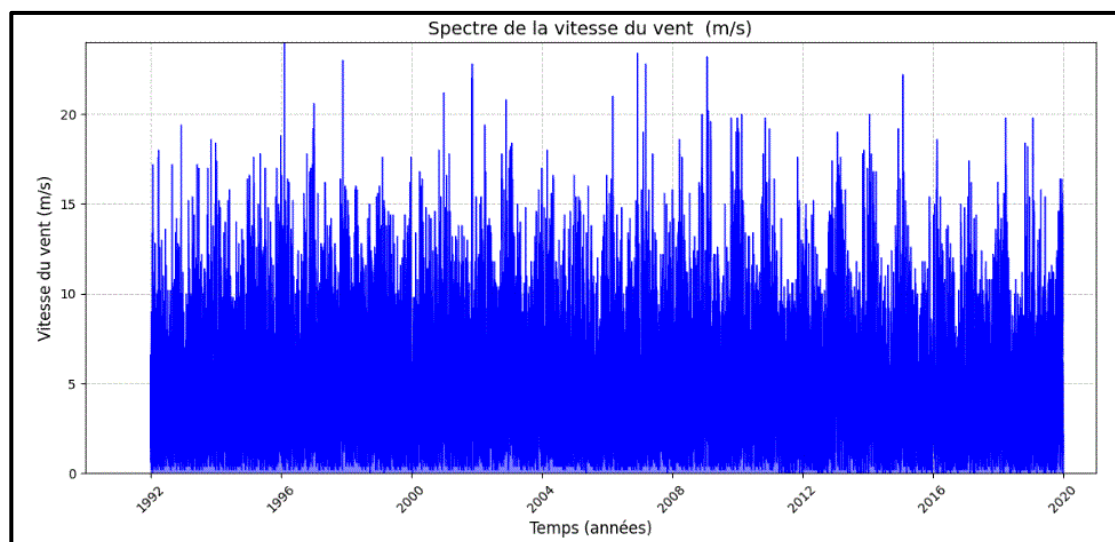


Figure I-10: Représentation du spectre de la vitesse du vent

Les roses des vents ont été réalisées à partir des données du wave climate via Infoplaza. Un tableau du time series été créée sur MIKE21 et intégré dans le Plot Composer

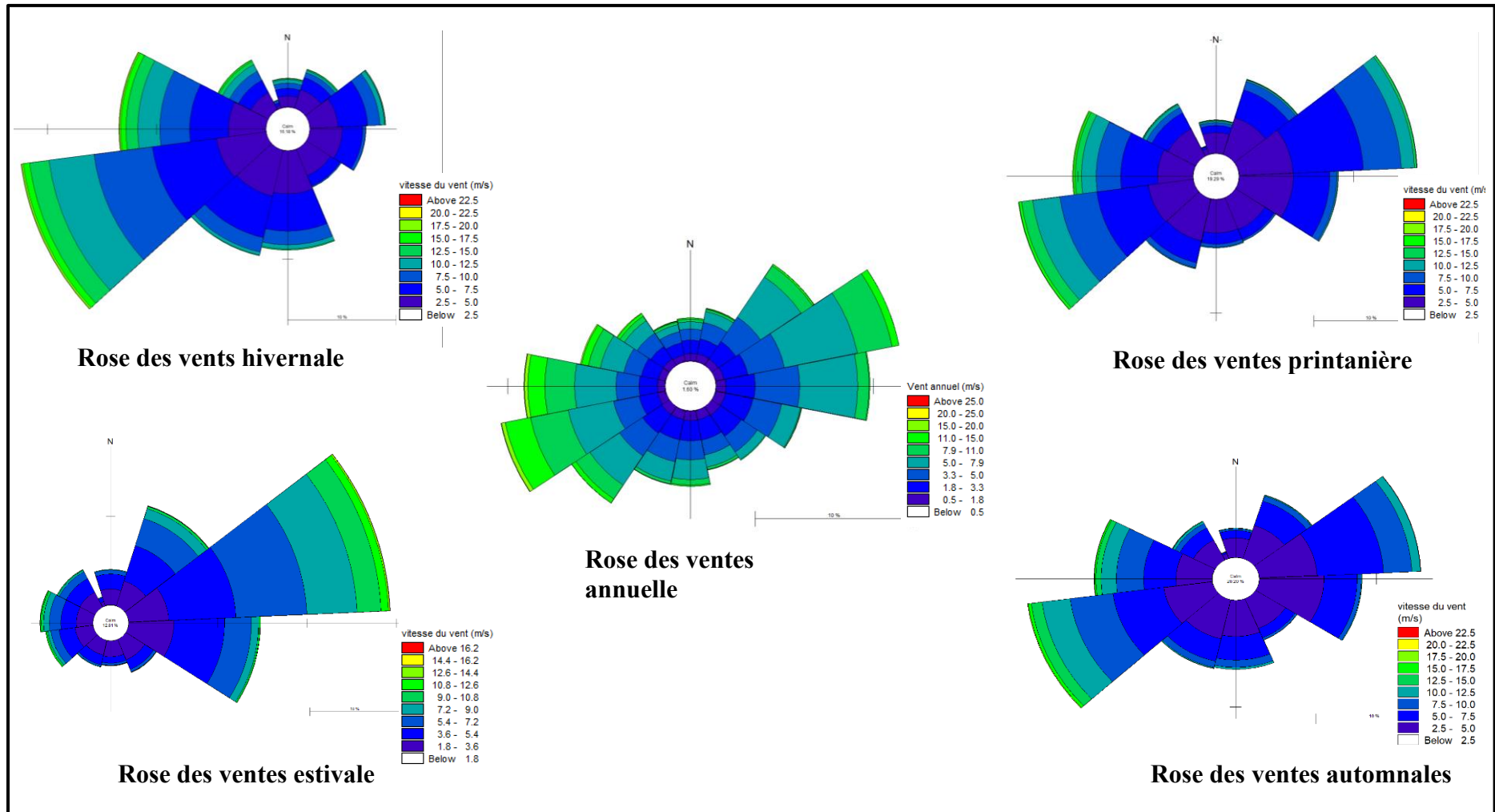


Figure I-11 : Roses de vents annuelle et saisonnières enregistrés durant la période 1992-2020 (Source : wave climate)

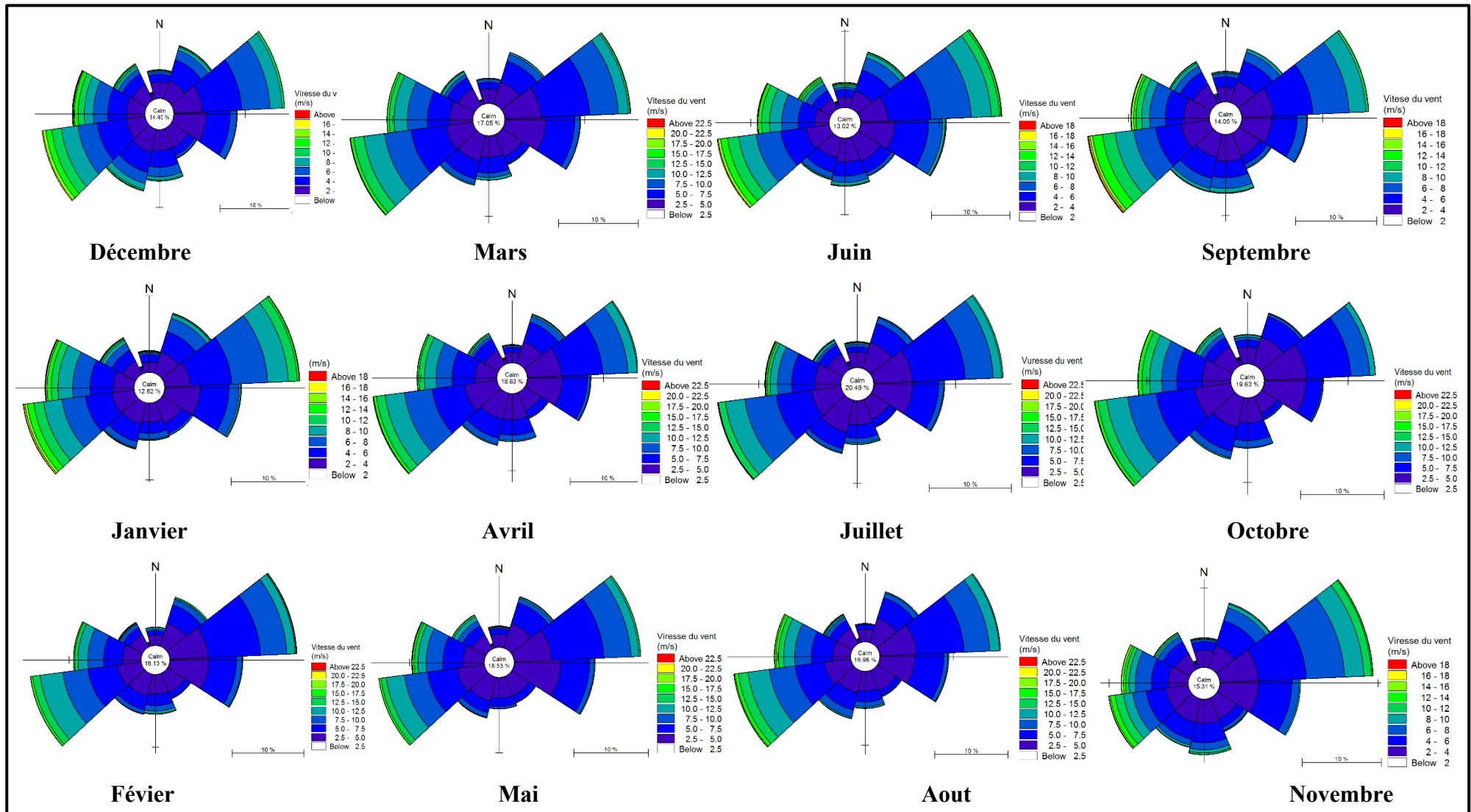


Figure I-12: Roses des vents mensuelles enregistrés durant la période de 1992- 2020 (Source : wave climate)

I.9.3.2 Interprétation des résultats des roses des vents

L'analyse annuelle des roses des vents (Figure I-16) révèle une prédominance des vents provenant du Nord-Est (11.87 %) et du Sud-Ouest (10.67 %), représentant environ 23 % de la fréquence totale des vents enregistrés. Les vitesses de vent dominantes sont généralement comprises entre 5 et 10 m/s, bien que le vent le plus fort ait été enregistré à 24,8 m/s, provenant du secteur Ouest.

- **Hiver** : Les vents dominants viennent principalement du Sud-Ouest (22.3 %) et du Nord-Ouest (13.54 %). La vitesse maximale du vent, provenant de l'Ouest (24,8 m/s), a été enregistrée en hiver.
- **Printemps** : Les secteurs dominants sont le Sud-Ouest (15.37 %), et le Nord-Est (15,67 %) avec une répartition équilibrée des vitesses entre 5 et 8 m/s, indiquant un vent calme et stable pendant cette période.
- **Été** : L'orientation principale des vents est celle du Nord-Est (29,4 %), suivie du Sud-Est (14,83 %). Ces vents sont fréquents mais sans événements extrêmes majeurs, caractérisant des conditions stables pendant la saison estivale (environ 7 m/s).
- **Automne** : L'analyse de la rose des vents montre une prédominance des directions du Sud-Ouest (15,85 %) et du Nord-Est (13,81 %). Les vitesses sont bien réparties, ce qui montre qu'il n'y a pas d'événements extrêmes cette saison. Cette répartition directionnelle et la variabilité saisonnière des vents au large de la baie d'Alger jouent un rôle clé dans la génération des houles et l'évolution du littoral étudié.

I.9.4 Climat de houle

L'analyse des houles a été réalisée à partir de la base de données **Wave Climate**, extraite d'Info-plaza. L'ensemble des données utilisées dans cette étude comprend **81 816 enregistrements** pour chacune des variables sélectionnées, avec un temps de **3 heures**, couvrant la période du **1er janvier 1992 au 31 décembre 2020**.

Pour caractériser le climat de houle dans notre zone d'étude, nous avons retenu les variables les plus représentatives :

- **H(s)** : Hauteur significative de la houle (m).
- **Tp** : Période de pic de la houle (s).
- **Hsd** : Direction de la houle (°).
- **U10** : Vitesse du vent (m/s).
- **U10d** : Direction du vent (°).

I.9.4.1 Hauteur significative

Au cours de cette période, l'ensemble de l'enregistrement indique que la hauteur significative de la houle (H_s) varie entre de 0.02 m et 6.53 m avec une moyenne de 0.79 m.

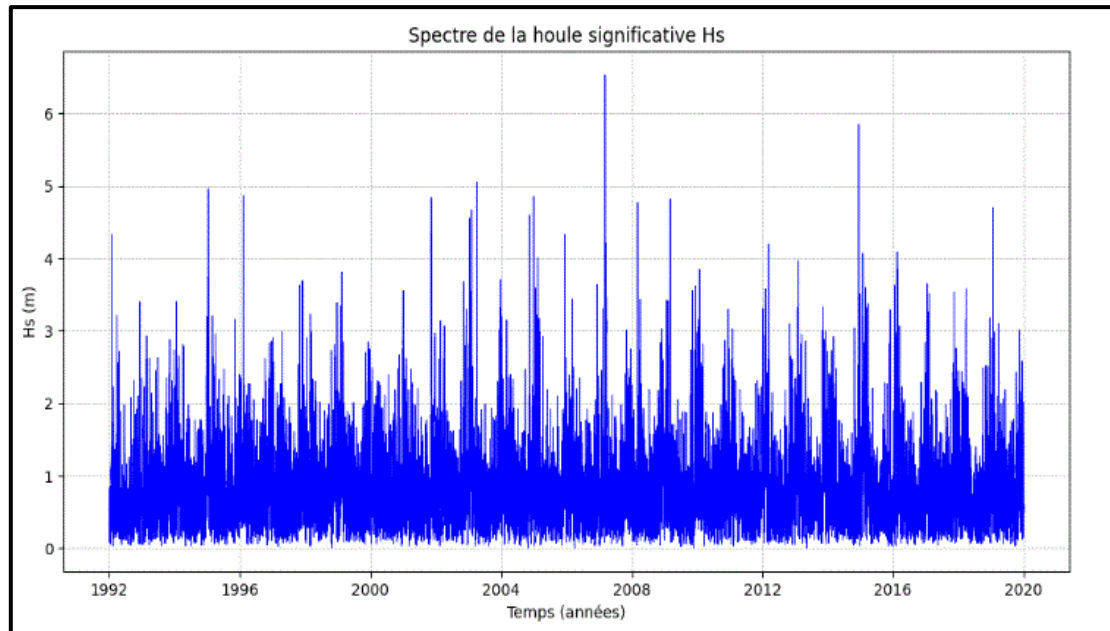


Figure I-13: Représentation du spectre des hauteurs de houle enregistrées

L'analyse du spectre présenté dans la **Figure I-10** montre que la majorité des houles formées au large de la baie d'Alger ont une hauteur inférieure à **3 mètres**. Toutefois, des événements extrêmes surviennent environ tous les **4 à 8 ans**, avec des houles pouvant dépasser **5 mètres**. L'examen de ces données a permis d'identifier certaines hauteurs remarquables de la houle, répertoriées dans le **tableau I-2**.

Tableau I-2 : Valeurs marquantes des hauteurs de la houle.

Hauteurs marquantes de la houle	Valeur (m)
Valeur minimale de l'enregistrement (Hmin)	0.02
Valeur maximale de l'enregistrement (Hmax)	6.53
Hauteur moyenne (Hm)	0.79
Moyenne du 1/3 des valeurs supérieures de l'enregistrement (Hs)	1.39
Moyenne du 1/10 des valeurs supérieures de l'enregistrement (H10%)	2.02
Moyenne du 2% des valeurs supérieures de l'enregistrement (H2%)	2.87

I.9.4.2 La période de pic

L'ensemble de l'enregistrements montre que les périodes observées sont comprises dans une gamme assez large allant de 2.89 s et 999.00 s

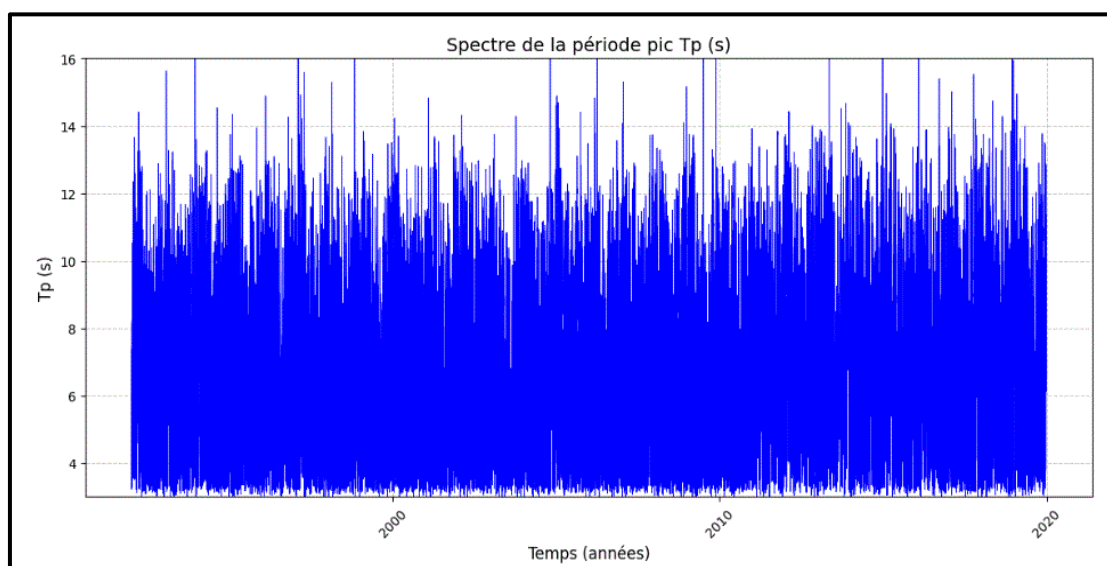


Figure I-14: Représentation du spectre des périodes de houle enregistrées

L'exploitation de ces données a permis de déterminer quelques périodes marquantes de la houle, illustrées dans le tableau

Tableau I-3 : Périodes marquantes de la houle.

Périodes marquantes de houles	Valeur (s)
Tmin (valeur minimale de l'enregistrement)	2.89
Tm (Période moyenne)	7.19
Ts (moyenne du 1/3 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	10.15
T Hmax (Période correspond la hauteur maximale de l'enregistrement)	10.84
T10% (moyenne du 1/10 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	13.27

Afin d'analyser l'influence de l'ensemble de ces variables sur le climat de houle au large de la zone d'étude, les deux figures suivantes offrent une meilleure compréhension de la houle au large, en combinant les informations sur les directions dominantes, la hauteur et la fréquence de la houle.

Les roses des houles ont été réalisées à partir des données du wave climate via Infoplaza. Un tableau du time series été créée sur MIKE21 et intégré dans le Plot Composer

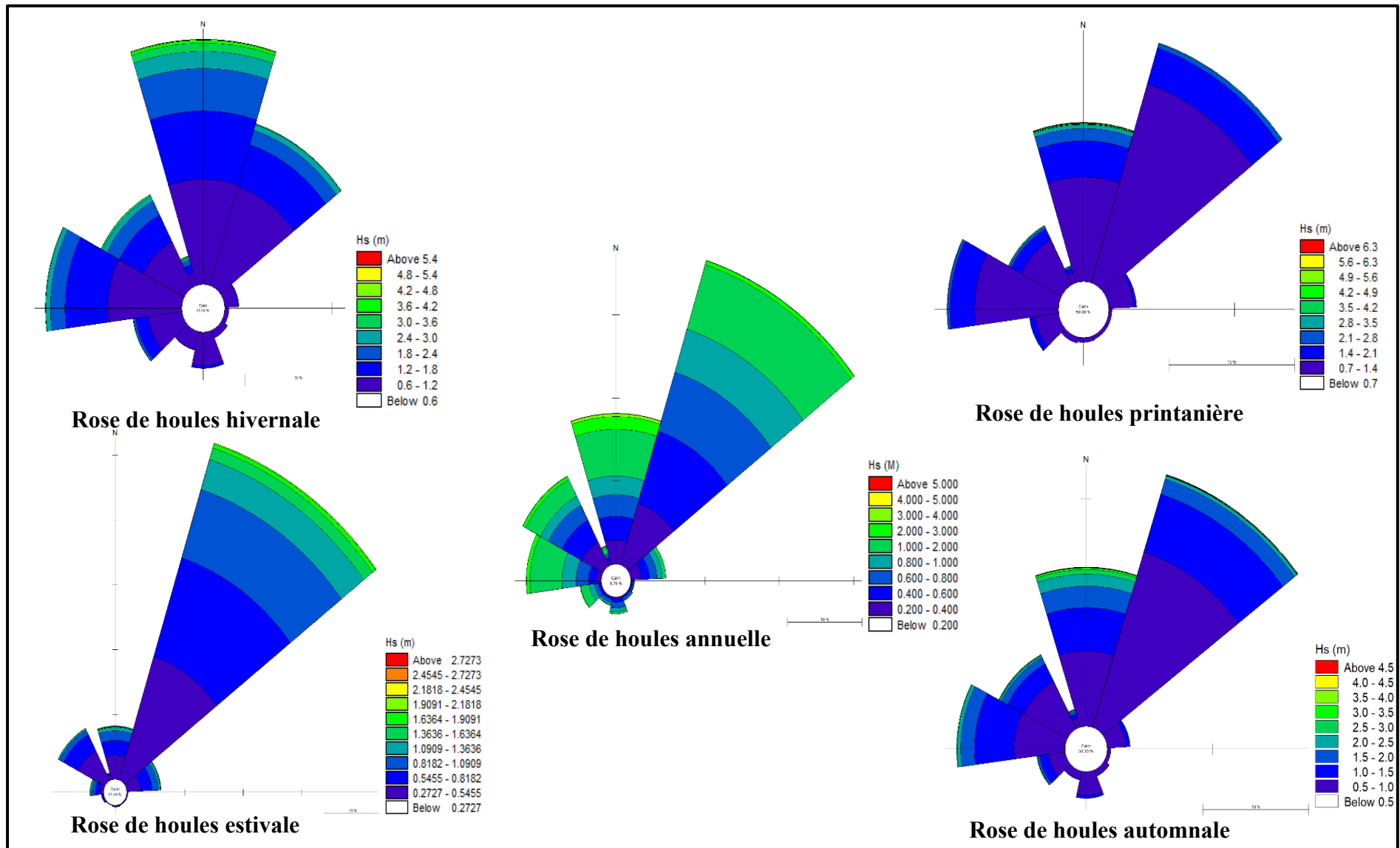


Figure I-15: Roses de houles annuelle et saisonnières enregistrés durant la période de 1992-2020 (Source : wave climate)

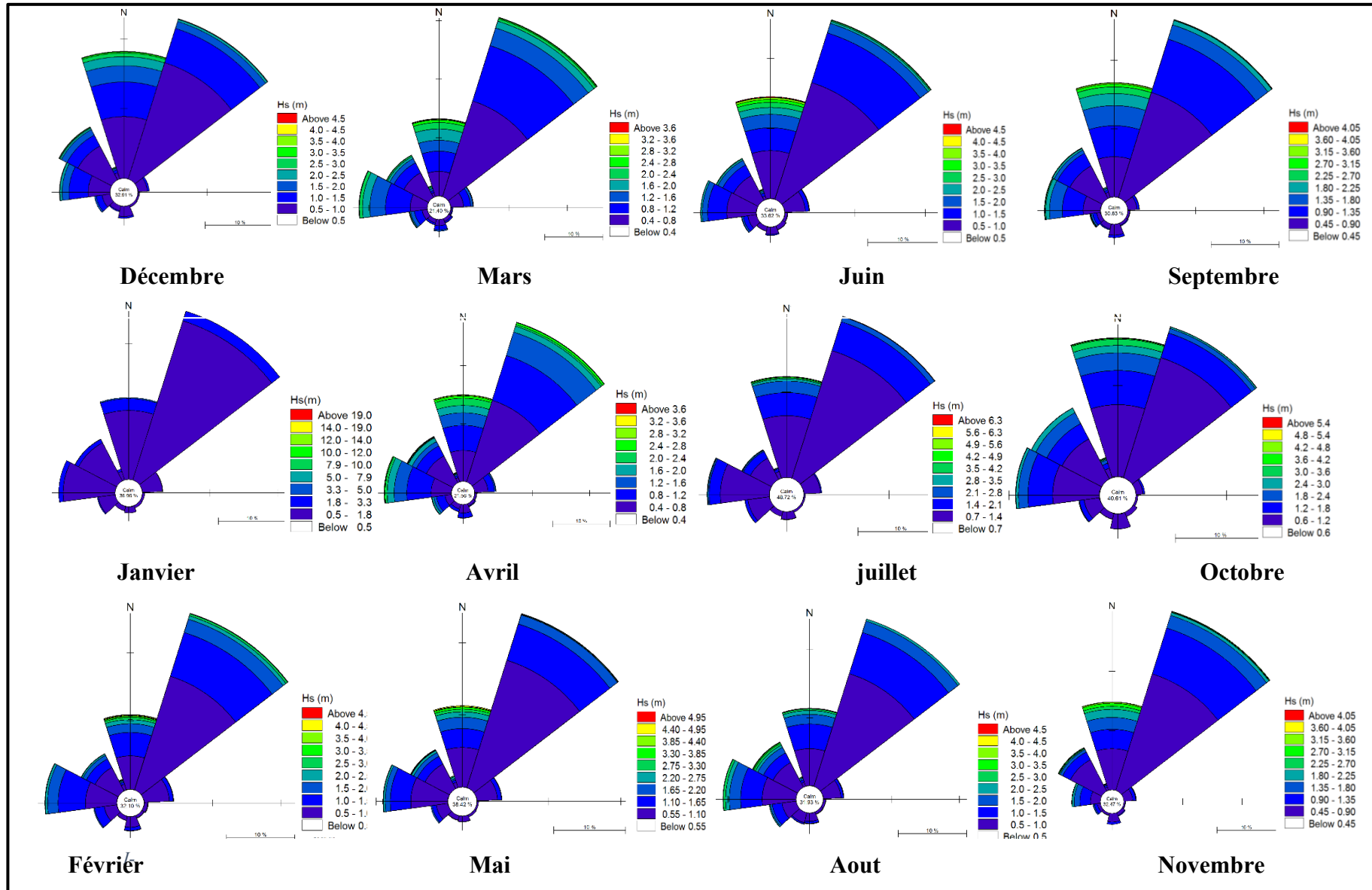


Figure I-16 : Roses des houles mensuelles enregistrés durant la période de 1992- 2020 (Source : wave climate)

I.9.4.3 Interprétation des roses de houle :

L'analyse de la rose de houle annuelle (Figure II-12), nous a permis de distinguer deux directions principales : le Nord (N) et le Nord-Est (NE).

- La houle du secteur Nord-Est (NE) présente une fréquence d'apparition la plus élevée, avec une valeur maximale de **38.47 %**.
- La houle du secteur Nord (N) suit avec une fréquence d'environ **20 %**.

Les hauteurs de houle les plus fréquentes sont comprises entre **0,5 m et 2 m**, avec une dominance autour de **1 m**.

Les roses saisonnières indiquent des variations marquées selon les saisons :

- **En hiver** : après l'analyse, les houles viennent principalement du secteur Nord (N) et Nord-Est (NE), atteignant des fréquences respectives de **20.52 %** et **14.23 %**. Cette saison est caractérisée par des hauteurs de houle plus importantes (parfois supérieures à **2 m**).
- **Au printemps** : les houles dominantes restent dirigées entre Nord-Est (NE) et Nord (N), avec des fréquences légèrement inférieures, autour de **11-18 %**, Combinées à des hauteurs modérées.
- **En été** : un changement s'effectue avec une prédominance des houles venant du Nord-Est (NE) et Nord-Ouest (NW), Obtenant respectivement **54.58 %** et **9.17 %**. Les hauteurs de houle estivales sont plus faibles, souvent inférieures à **1 m**, représentant une période plus calme.
- **En automne** : la dynamique se rapproche de celle de l'hiver, avec une reprise des houles du Nord-Est (NE) et Nord (N), Obtenant respectivement **23.45** et **14.07 %**, signalant la transition progressive vers des conditions plus énergétiques.

Pour observer la répartition des données de hauteur et de période, nous les avons représentées dans un diagramme avec des distributions marginales.

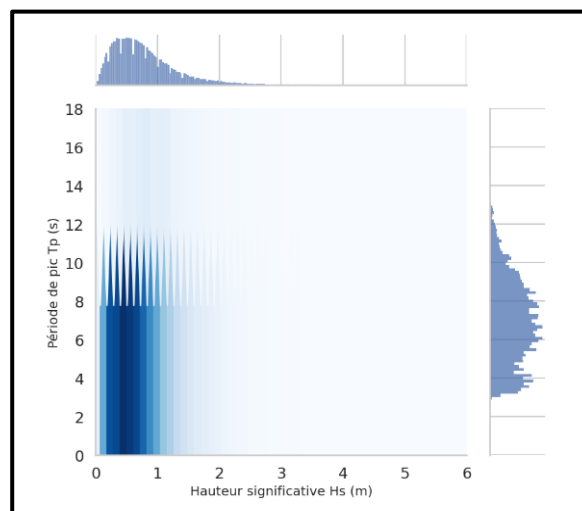


Figure I-17: diagramme avec distributions marginales des hauteurs et périodes de houles

I.10 Conclusion

L'analyse approfondie de la zone de Tamentfoust présentée dans ce chapitre a permis de mieux comprendre ses caractéristiques physiques, environnementales et historiques. Située à l'extrémité est de la baie d'Alger, cette zone se distingue par un fort potentiel de valorisation, mais reste marquée par une fragilité environnementale notable. Son patrimoine riche, ses plages, son port et ses usages multiples en font un espace stratégique, bien que sous-exploité. Les données géographiques, géologiques, climatiques et hydrodynamiques collectés constituent une base solide pour orienter les réflexions et les choix d'aménagement à développer dans la suite de l'étude.

**Chapitre II : Analyse des
évènements extrêmes**

II.1 Introduction

L'étude des valeurs extrêmes des hauteurs de houle est essentielle pour la conception et la gestion des infrastructures côtières. Ces événements rares mais intenses influencent la stabilité des ouvrages de protection, tels que les digues et les épis, et nécessitent une estimation précise des hauteurs de houle pour différentes périodes de retour

Dans ce chapitre, nous allons aborder l'analyse des événements extrêmes utilisant la méthode Peaks Over Threshold (POT), issue de la théorie des valeurs extrêmes (TVE), pour modéliser les hauteurs de houle extrêmes enregistrées afin d'arriver à des résultats fiables.

II.2 Théorie des valeurs extrêmes (TVE)

La théorie des valeurs extrêmes est une approche statistique utilisée pour évaluer la probabilité des événements les plus rares et intenses (Coles, 2001). Elle vise à établir des distributions limites en ajustant des modèles statistiques spécialement conçus pour analyser les valeurs extrêmes des données observées.

En statistique, deux principales méthodes sont utilisées pour identifier les valeurs extrêmes. La première, appelée approche des Blocs Maximas, consiste à diviser la période d'observation en plusieurs blocs et à sélectionner la valeur la plus extrême de chaque bloc pour les analyses ultérieures (par exemple, les maxima quotidiens ou mensuels). La seconde, connue sous le nom de Peaks Over Threshold (POT), repose sur la détection des valeurs dépassant un seuil prédéfini (Cornel Stander, 2015).

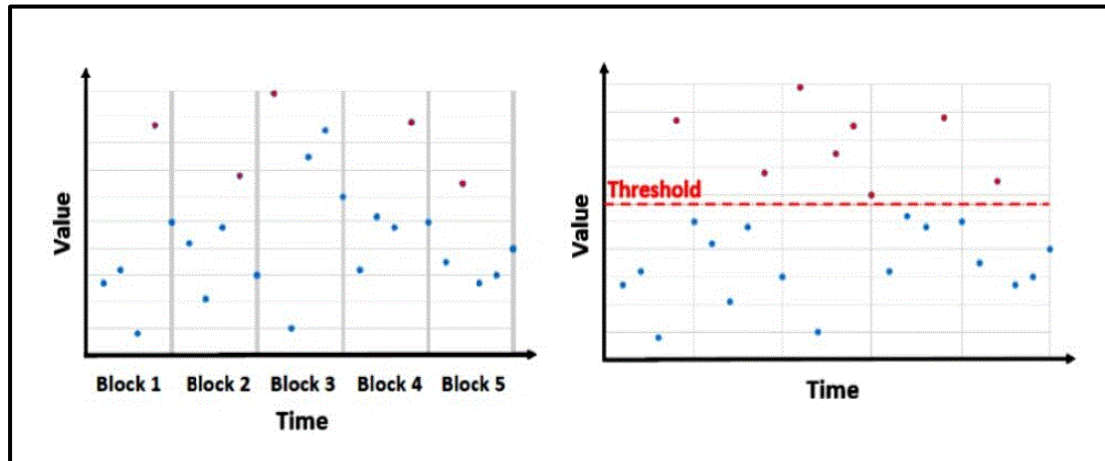


Figure II-1 : Schéma représentatif des méthodes blocks maxima et POT.

L'approche des Blocs Maximas présente l'inconvénient de ne retenir qu'un seul maximum par bloc, ce qui peut entraîner une perte d'informations importantes. Par exemple, si deux valeurs élevées apparaissent dans un même bloc, seule la plus grande est prise en compte. En revanche, la méthode Peaks Over Threshold (POT) permet d'éviter cette limitation en considérant toutes les valeurs dépassant un seuil prédéfini (Cornel Stander, 2015).

II.3 . Méthode Peaks Over Threshold

Selon (Tilbi K. et al. 2018), cette méthode fondée sur l'approximation de la distribution des excès par la loi de Pareto généralisée. De plus, elle offre un avantage par rapport à la méthode des blocs, en ce sens qu'il est plus facile d'avoir un échantillon d'excès que de max. Dans la pratique, on remplace u par X(n-k+1) qui correspond à K la plus grande observation de l'échantillon. La mise en œuvre de cette méthode suit les étapes suivantes :

-Soit X1, Xn un échantillon, à partir d'un certain seuil u, on note Nu le nombre d'observation qui dépassent ce seuil

-Soit Y1, ..., YNu un échantillon des excès au-dessus du seuil u de distribution conditionnelle.

$$Fu(x) = Pr(X - u \leq x | X > u) = \frac{F(x+u) - F(u)}{1 - F(u)}$$

Équation II-1

Avant de déterminer le seuil optimal, D'abord, Il faut calculer la moyenne résiduelle utilisant **le langage Python** et la bibliothèque **pyextreme**. Cette analyse permet de suivre l'évolution de la moyenne résiduelle et d'identifier le seuil le plus approprié. Ce dernier doit être situé sur la portion stable de la courbe, avant l'apparition de variations significatives.

Le seuil sélectionné est fixé sur la valeur 3.5 m (Figure III-2)

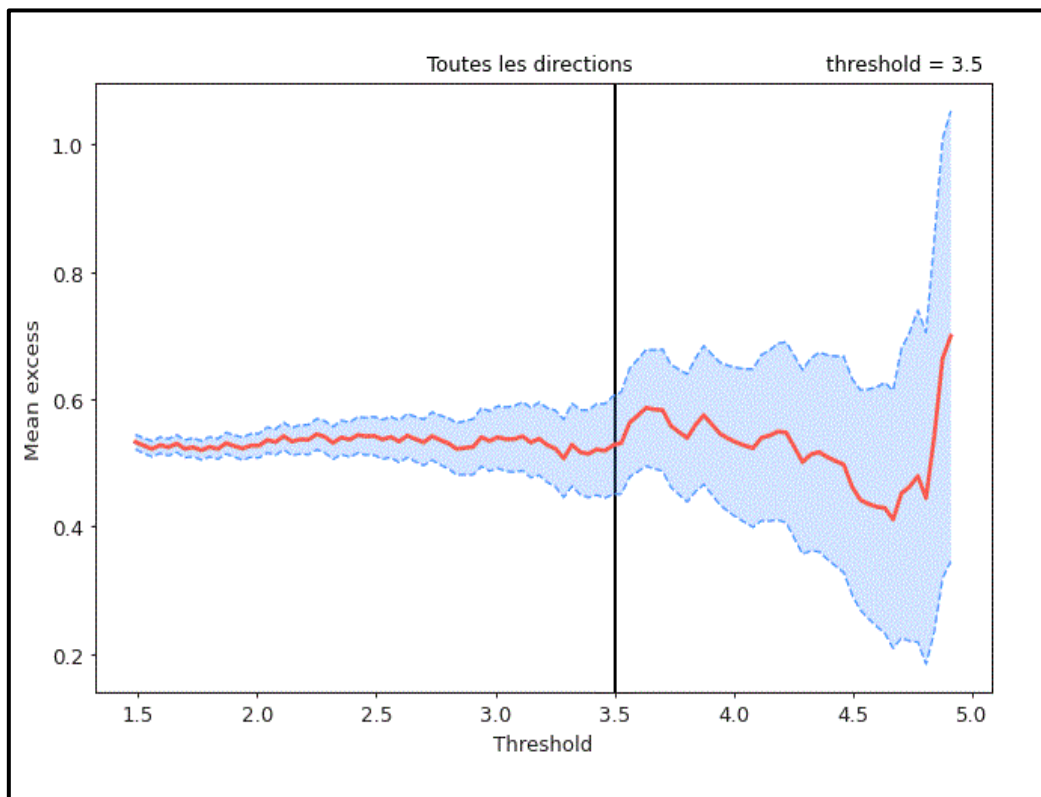


Figure II-2 : Moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelle

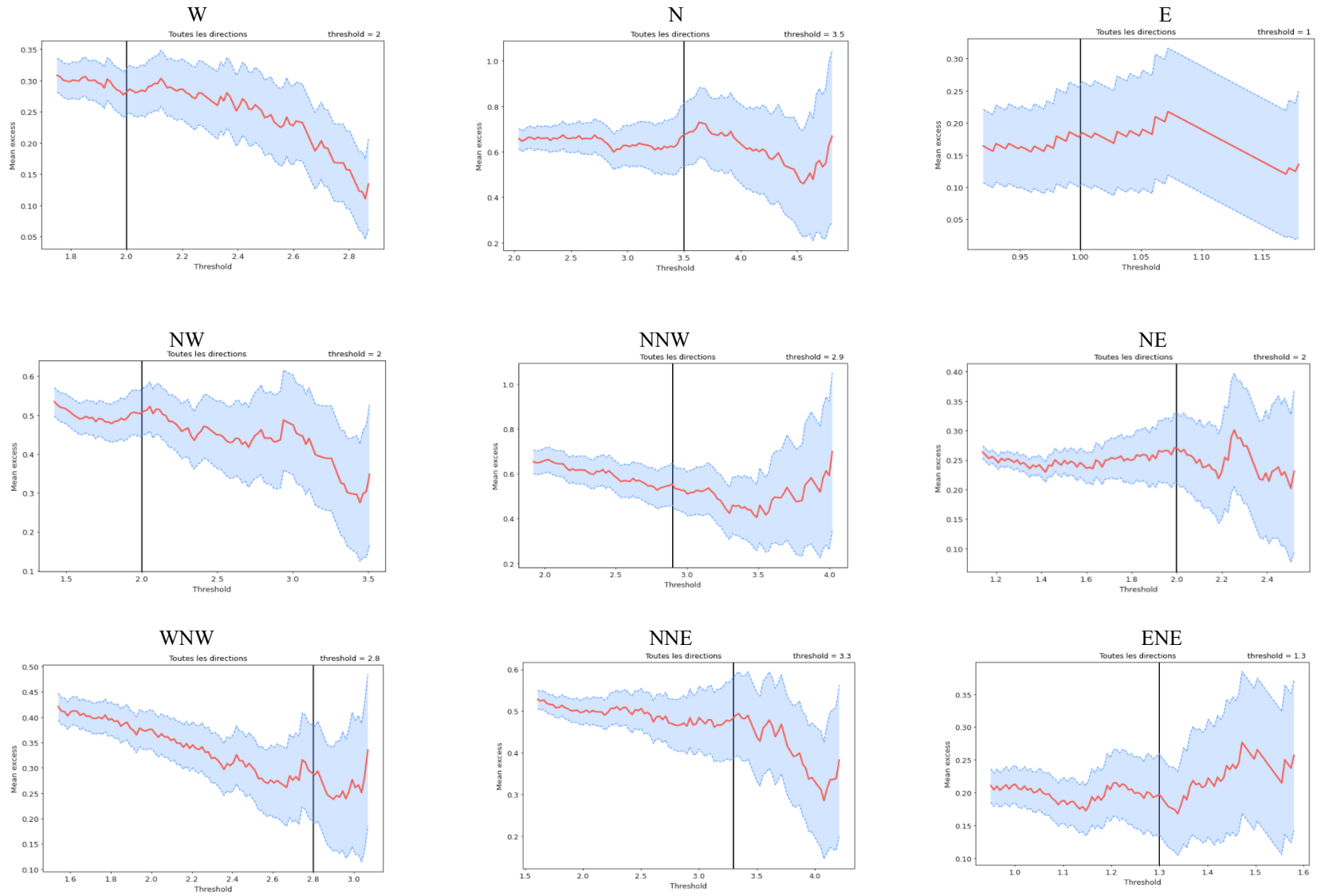


Figure II-5 : Moyenne résiduelle de la série des hauteurs pour les neuves directions

L'ensemble des points utilisés pour le calcul est illustré dans la figure ci-dessous :

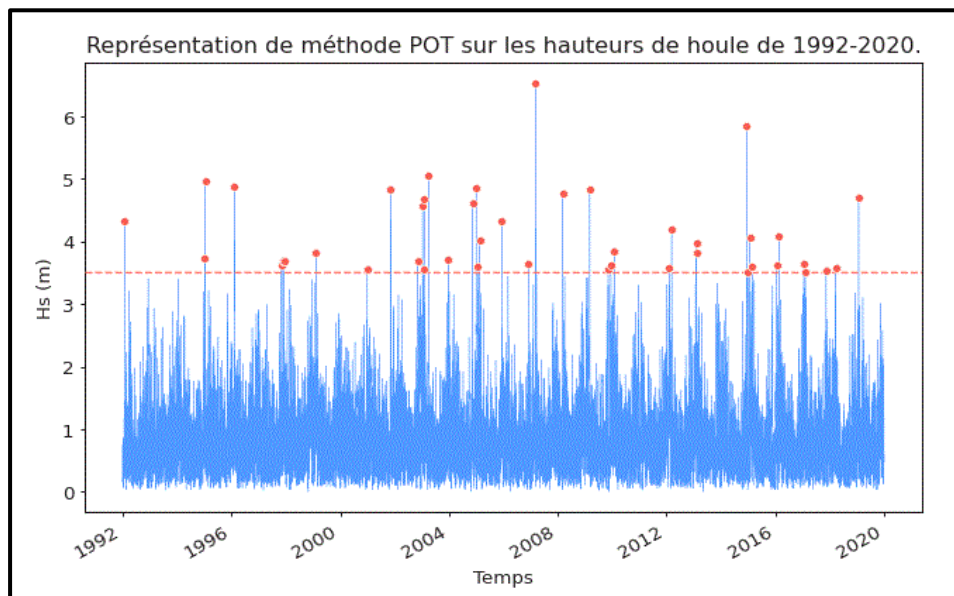


Figure II-3 : Représentation de la méthode POT sur les hauteurs de houle de 1992-2020

Une fois la sélection des pics terminée, nous exécutons au calcul des hauteurs de houle associées à leurs périodes de retour à l'aide de la même bibliothèque **PYEXTREMES** sur le langage **PYTHON**. Les résultats obtenus sont les suivants.

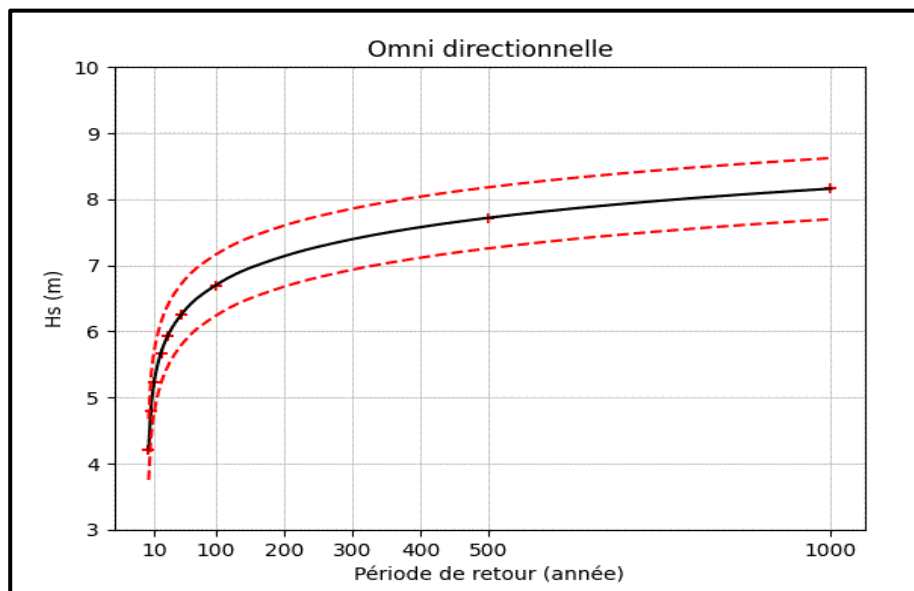


Figure II-4 : Estimation des évènements extrêmes via la méthode POT pour l'omnidirectionnel

Les résultats présentés dans le graphe (Figure II-4) sont illustrés par des traits rouges représentant les limites de l'intervalle de confiance accepté avec une marge d'erreur de 15 %. Les croix bleues indiquent les hauteurs de houle correspondant aux périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100 et 1000 ans. La même méthodologie sera appliquée aux neuf autres directions afin d'obtenir les résultats spécifiques à chacune d'elles.

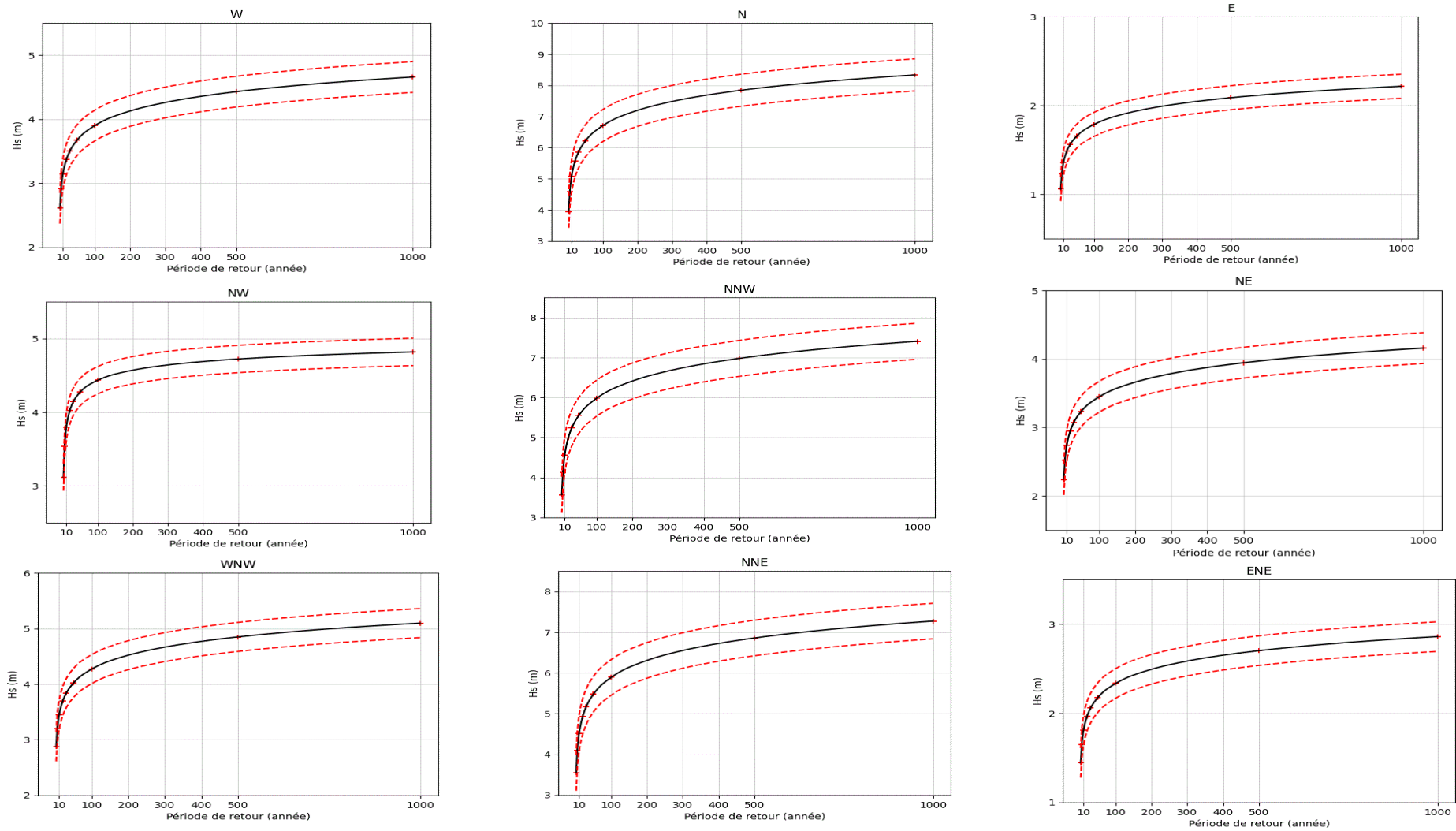


Figure II-6 : Estimation des évènements extrêmes via la méthode POT pour chaque direction

Pour une évaluation plus précise des résultats obtenus par la méthode POT, le tableau ci-dessous regroupe les hauteurs extrêmes estimées en fonction des périodes de retour de ces événements dans le futur.

Tableau II-1 : Tableau résumant l'ensemble des résultats obtenus par la méthode POT.

POT										
Hauteur de vague par direction (mètre)										
Période de retour (année)	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	Omni
2	2.60	2.90	3.11	3.57	3.92	3.54	2.24	1.44	1.05	4.21
5	2.91	3.20	3.53	4.13	4.56	4.09	2.51	1.65	1.22	4.79
10	3.13	3.39	3.79	4.56	5.06	4.51	2.73	1.81	1.35	5.23
20	3.36	3.56	4.02	4.99	5.55	4.93	2.94	1.97	1.48	5.67
30	3.50	3.65	4.14	5.24	5.83	5.17	3.07	2.06	1.56	5.93
50	3.67	3.76	4.27	5.56	6.20	5.47	3.23	2.18	1.65	6.25
100	3.90	3.89	4.43	5.98	6.69	5.89	3.43	2.34	1.78	6.69
1000	4.65	4.23	4.81	7.41	8.32	7.27	4.15	2.86	2.21	8.15

Ce tableau montre les résultats de l'estimation des événements extrêmes par la méthode POT, représentant les périodes de retour pour les 9 directions ainsi que pour l'omnidirectionnel. Ses résultats indiquent que la direction Est est la moins propice à la génération de houles extrêmes car les hauteurs de vague restent les plus faibles pour toutes les périodes de retour. En revanche, les directions Nord (N), Nord-Nord-Ouest (NNW) et Nord-Ouest (NW) et Nord-Nord-Est (NNE) sont les plus susceptibles de générer les houles les plus intenses, atteignant des hauteurs maximales qui croissent avec la période de retour. Cependant, l'analyse omnidirectionnelle donne les résultats les plus élevés, car elle prend en compte les hauteurs maximales enregistrées dans toutes les directions. L'analyse confirme que les houles extrêmes sont principalement générées par le secteur nord, qui doivent être prises en compte dans la conception des ouvrages de protection, afin d'assurer leur efficacité face aux conditions les plus sévères.

II.4 Conclusion

L'étude des événements extrêmes de houle à Tamentfoust, menée à l'aide de la méthode Peaks Over Threshold (POT), a permis d'obtenir des estimations jugées fiables des hauteurs de houle pour différentes périodes de retour, en raison de leur concordance avec les résultats obtenus par (Grebici.A et Griche.H. 2024)

Ces données sont cruciales pour la conception et la protection des ouvrages côtiers, en particulier dans un contexte d'exposition accrue aux aléas marins. Comparée à d'autres approches, la méthode POT s'est révélée plus performante grâce à une meilleure exploitation des données disponibles. Les résultats obtenus montrent une augmentation significative des hauteurs de houle avec la période de retour, ce qui souligne l'importance d'intégrer ces extrêmes dans la planification des aménagements portuaires et côtiers. Cette analyse constitue ainsi une base essentielle pour le dimensionnement des structures et la gestion des risques littoraux à Tamentfoust.

Chapitre III : Modélisation hydrodynamique

II.5 Introduction

Cette partie du travail porte sur la modélisation des conditions marines dans la baie d'Alger, et de manière plus précise dans la zone de Tamentfoust, à l'aide du logiciel MIKE 21. Ce modèle permet de simuler la propagation des vagues et des courants en tenant compte de nombreux phénomènes physiques tels que la houle, le vent, la bathymétrie et l'interaction houle-courant. Un maillage flexible a été généré à partir de données bathymétriques précises, couvrant une large zone côtière afin d'optimiser la représentation des structures et des fonds marins. Les simulations prennent en compte différents scénarios de houle extrême pour des périodes de retour de 10, 30 et 100 ans, ainsi que l'élévation du niveau de la mer. Cette approche permet d'évaluer les impacts hydrodynamiques sur les ouvrages portuaires existants et futurs.

II.6 Présentation du modèle

Le MIKE 21, développé par l'Institut Hydraulique Danois (DHI), est un modèle numérique de houle spectrale reposant sur la conservation de la densité de l'action d'onde. Il permet de simuler la propagation des états de mer en milieu offshore et côtier.

Ce modèle prend en compte plusieurs processus physiques, notamment la réfraction et le shoaling, influencés par les variations de la bathymétrie, ainsi que la génération de la houle sous l'effet du vent et la dissipation de l'énergie. La simulation repose sur la méthode des volumes finis, s'appuyant sur un maillage flexible composé d'éléments triangulaires, qui peuvent être affinés dans les zones où la houle présente un intérêt particulier (DHI, 2014).

Avant d'entamer les simulations, la création d'un **maillage adapté** est indispensable. Pour cela, l'outil **Mesh Generator** du logiciel **Mike-Zéro** a été utilisé afin de générer la grille nécessaire à l'étude.

II.6.1 Mesh

Le Mesh Generator de MIKE 21 est un outil dédié à la création de maillages numériques, aussi bien fixes que flexibles, pour les modèles MIKE Zéro, avec la possibilité d'ajuster la résolution des mailles. Il propose deux méthodes d'interpolation pour les éléments triangulaires : le voisin naturel et l'interpolation linéaire, utilisables indépendamment du type de maillage. De plus, pour les maillages fixes, une fonctionnalité d'imbrication de plusieurs maillages est disponible (DHI, 2014).

Pour générer la maille à l'aide du module Mesh Generator, les éléments suivants ont été utilisés:

1. Un système de projection adapté à la zone d'étude : WGS_84_UTM_ZONE_31,
2. Les données du trait de côte et de la bathymétrie, enregistrées dans un fichier XYZ,
3. Un maillage flexible, avec des tailles de maille variables, permettant d'améliorer la précision des résultats tout en optimisant les temps de calcul du logiciel.

II.6.2 Mike SW

Le **MIKE 21 SW** est un modèle spectral de vagues de troisième génération permettant de simuler divers processus liés à la dynamique des vagues. Il prend en compte la croissance des vagues sous l'effet du vent, l'interaction non linéaire entre les vagues, ainsi que la dissipation d'énergie due au déferlement et à la friction sur le fond marin. De plus, il intègre les effets de la réfraction induite par les variations de profondeur et l'interaction entre les vagues et les courants.

Les calculs effectués par le MIKE 21 SW reposent sur une grille à maillage flexible et non structuré, offrant une meilleure adaptabilité aux conditions de simulation (DHI, 2014).

Équations en eaux peu profondes

Le modèle repose sur la résolution des équations tridimensionnelles incompressibles de Reynolds, dérivées des équations de Navier-Stokes, en appliquant les hypothèses de Boussinesq et de pression hydrostatique. La formulation locale de l'équation de continuité s'exprime comme suit :

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

Et les équations d'impulsion horizontale pour les composantes x et y s'expriment respectivement comme suit :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial \eta p}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho a}{\partial x} - \quad \text{Équation III-2}$$

$$\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho a}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + Fu + \frac{\partial}{\partial z} \left(vt \frac{\partial u}{\partial z} \right) + usS$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial \eta p}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho a}{\partial x} - \quad \text{Équation III-3}$$

$$\frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + Fu + \frac{\partial}{\partial z} \left(vt \frac{\partial u}{\partial z} \right) + usS$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial \eta p}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho a}{\partial x} - \quad \text{Équation III-4}$$

$$\frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + Fv + \frac{\partial}{\partial z} \left(vt \frac{\partial u}{\partial z} \right) + vsS$$

Les termes de contraintes horizontales sont exprimés à l'aide d'une relation gradient-contrainte et simplifiés dans les équations III-5 et III-6. Quant aux conditions aux limites, appliquées à la surface et au fond pour les variables u , v et w , elles sont détaillées dans les équations V-7 et V-8.

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

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

A : la viscosité horizontale.

Les conditions aux limites de surface et de vent pour u , v et w sont définies comme suit :

A $z = \eta$:

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

A $z = -d$:

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

$(\tau_{sx} + \tau_{sy})$ et $(\tau_{bx} + \tau_{by})$ représentent les composantes x et y des contraintes exercées par le vent en surface et au fond.

Équations de conservation à l'action des vagues

L'équation fondamentale est celle de l'équilibre de l'action des vagues, exprimée en coordonnées cartésiennes ou sphériques.

Coordonnées cartésiennes :

Dans un système de coordonnées cartésiennes horizontales, l'équation régissant la conservation de l'action des vagues s'exprime comme suit :

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

Où $\vec{N}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\theta}, \mathbf{t})$ représente la densité d'action, \mathbf{t} est le temps, et $\vec{X} = (\mathbf{x}, \mathbf{y})$ désigne les coordonnées cartésiennes.

Le vecteur $\vec{V} = (C_x, C_y, C_\sigma, C_\theta)$ correspond à la vitesse de propagation d'une onde de groupe dans un espace à quatre dimensions $(\mathbf{x}, \boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\theta}, \mathbf{t})$.

Le terme S représente la source de l'équation du bilan énergétique.

Enfin, ∇ est l'opérateur différentiel dans cet espace à quatre dimensions $\vec{X}, \boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\theta}$ et S .

Les quatre vitesses caractéristiques de propagation sont définies par :

$$(C_x + C_y) = \frac{\partial \vec{x}}{\partial t} = \vec{Cg} + \vec{U} \quad \text{Équation III-10}$$

$$C_\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla \vec{x} d \right] - Cg \vec{K} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial \sigma} \quad \text{Équation III-11}$$

$$(C_x + C_y) = \frac{\partial \vec{x}}{\partial t} = \vec{Cg} + \vec{U} \quad \text{Équation III-12}$$

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

Ici, S représente la coordonnée spatiale dans la direction de l'onde Θ , tandis que mmm est une coordonnée perpendiculaire à S . $\nabla \vec{x}$ désigne l'opérateur différentiel bidimensionnel dans l'espace \vec{x} .

II.6.3 MIKE 21 HD

Le Module Hydrodynamique (HD) résout les équations bidimensionnelles classiques de Saint-Venant sur un maillage structuré ou non, en intégrant divers facteurs tels que le frottement au fond, les effets météorologiques (vent et gradient de pression atmosphérique), la force de Coriolis, différentes modélisations de la turbulence et l'évolution temporelle de la géométrie du domaine (zones alternativement immergées et émergées en fonction des marées). Il permet également de simuler les courants côtiers en prenant en compte les contraintes de radiation induites par la houle dans la zone de déferlement.

L'équation en eau peu profonde

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

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = hS \tag{Equation III-14}$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial hvu}{\partial y} = fvh - gh \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial pa}{\partial x} \tag{Equation III-15}$$

$$-\frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho w}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + hu_s S$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} + \frac{\partial hvu}{\partial x} = fuh - gh \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial pa}{\partial y} \tag{Equation III-16}$$

$$-\frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho w}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{yx}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{yy}) + hv_s S$$

Avec :

- **t** : Temps.
- **x,y,z** : Coordonnées cartésiennes.
- **n** : Hauteur de la surface de l'eau.
- **d** : Profondeur de l'eau.
- **h** : Profondeur totale de l'eau, définie par $h=n+d$
- **f** : Paramètre de Coriolis, $f=2\Omega \sin\theta$.
- **Ω** : Vitesse angulaire de rotation de la Terre.
- **θ** : Latitude géographique.

- ρ_w : Densité de l'eau.
- p_a : Pression atmosphérique.
- ρ_0 : Densité de référence de l'eau.
- u, v, w : Composantes de la vitesse du courant dans les directions x, y et z.
- $S_{xy}, S_{yx}, S_{xx}, S_{yy}$: Composantes du tenseur de rayonnement.
- ν_t, ν_{tA} : Viscosités turbulentes verticale et horizontale, respectivement.
- S : Amplitude de la décharge issue de sources ponctuelles.
- (u_s, v_s) : Vitesses d'injection de l'eau dans l'environnement ambiant.

(τ_{sx}, τ_{sy}) et (τ_{bx}, τ_{by}) représentent respectivement les composantes x et y des contraintes de cisaillement induites par le vent de surface et par le fond. La barre supérieure indique une valeur moyenne.

u, v : Les vitesses moyennes des courants en profondeur, définies par :

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

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

Les forces de tension latérales T_{ij} résultent de la friction visqueuse, de l'advection différentielle et de la friction turbulente. Elles sont calculées en utilisant la viscosité turbulente et en appliquant la formule basée sur les gradients de vitesse moyenne en profondeur :

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

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

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

II.7 Méthodologie de travail

II.7.1 Génération de la Mesh

Pour assurer la précision des simulations et limiter les erreurs liées aux frontières du modèle, le choix de travailler avec une échelle régionale a été adopté.

L'échelle régionale : couvrant environ 15,27 km de Cap Caxine à l'Ouest jusqu'à Cap Matifou à l'Est, avec une extension de 19 km au nord de la Marina. Cette zone inclut la Marina et le Port d'Alger, et la zone de tamentfoust permettant d'intégrer les caractéristiques côtières et les structures pouvant influencer les mouvements de l'eau.

Cette échelle a été adoptée afin de pouvoir intégrer la station de mesure de données de houle qui propose une précision plus importante de la bathymétrie dans la baie et un trait de côte avec les différents ouvrages susceptibles de modifier le mouvement des eaux.

Le maillage a été généré avec le Mesh Generator de MIKE 21, permettant un ajustement précis de la résolution et l'imbrication de plusieurs maillages. L'intégration de ces données vise à améliorer la représentation des structures côtières et l'impact des vagues

IV.3.1.1. Données bathymétriques pour la génération de la Mech

La bathymétrie utilisée dans cette étude résulte de la fusion de trois sources principales : les données du terrain, NAVIONICS et GEBCO.

La bathymétrie de la baie d'Alger a été extraite par digitalisation de la carte NAVIONICS SonarChart™, édition 2021, à une échelle de 1/250000, avec une résolution allant de 100 m au large à 0,5 m près de la côte (ALEM.A et SAF.B, 2021).

La bathymétrie en haute mer (profondeur < -200 m) a été extraite de la base de données GEBCO. Elle a été enrichie par la numérisation des cartes marines de la région centrale algérienne et par la bathymétrie détaillée de la baie, développée dans des travaux précédents de (Amara, L., Chalal, Y.2022)

Le trait de côte a été obtenu par digitalisation manuelle, garantissant une représentation détaillée du littoral surtout du côté de la zone d'étude (à l'est). Les données résultantes ont été enregistrées sous forme de fichiers XYZ.

L'intégration des données dans MIKE 21 a nécessité la conversion du shapefile d'ArcMap en fichiers XYZ, réalisée via l'outil ArcToolBox du logiciel ArcGIS.

ArcGIS est un logiciel SIG (Système d'Information Géographique) développé par Esri (Environmental Systems Research Institute). Il est composé de plusieurs modules interconnectés (ArcMap, ArcCatalogue, etc.).

Après la génération de la Mesh, une interpolation des points bathymétriques a été réalisée selon le maillage. Deux méthodes d'interpolation sont applicables aux éléments triangulaires, le voisin le plus proche et l'interpolation linéaire (DHI, 2014). La méthode du voisin le plus proche a été adoptée pour ce travail.

Projection utilisée : WGS_84_UTM_zone_31.

II.7.2 Meche et bathymétrie résultante

La Mesh utilisée dans cette étude est un maillage flexible conçu pour garantir une représentation détaillée de la topographie et de la bathymétrie tout en optimisant les temps de calcul. Elle est composée de 12126 nœuds et 19810 éléments triangulaires, avec un espacement variable en fonction de la localisation et des zones d'intérêt. Cet espacement est réduit à proximité de la façade maritime de tamenfoust pour une meilleure précision et augmente progressivement jusqu'à plusieurs kilomètres au large.

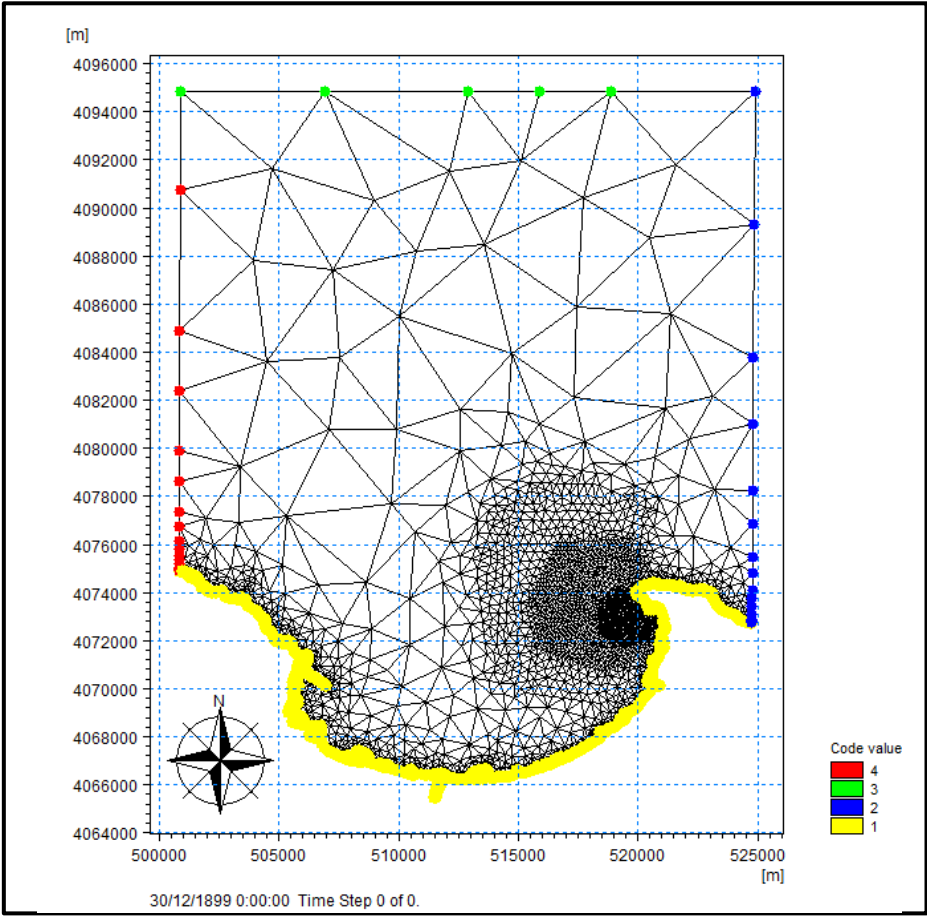


Figure III-1 : maillage de la mesh à l'échelle de la baie d'Alger

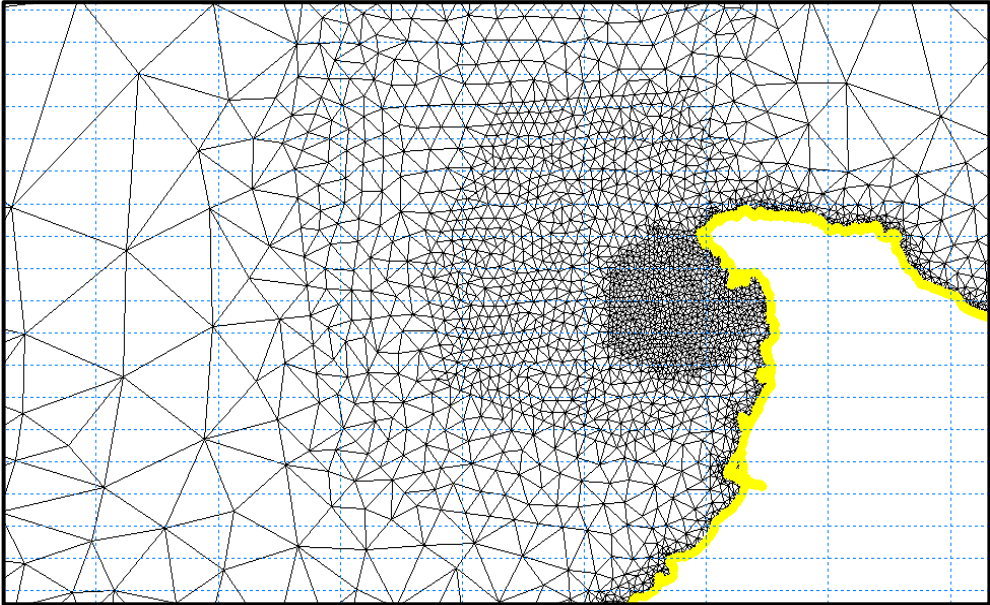


Figure III-2 : maillage de la mesh à l'échelle de la zone de tamenfoust.

II.7.2.1 La bathymétrie de la baie d'Alger

Après l'interpolation de la mesh, on obtient une bathymétrie de la baie d'Alger, allant du trait de côte jusqu'à la plaine abyssale de la méditerranée.

La bathymétrie de la baie d'Alger présente une diversité morphologique marquée, notamment dans sa partie orientale, à Tamenfoust. Elle peut être divisée en trois zones :

Les zones Est et Ouest (les caps), présentent une pente sous-marine marquée. Cette forte inclinaison est due à la géomorphologie des caps, généralement constitués de formations lithologiques dures et résistantes (falaises). De plus, ces zones sont soumises à une dynamique hydrodynamique intense : en réalité, les orthogonales de la houle convergent au niveau des caps, ce qui génère à ces secteurs un fort potentiel énergétique. Ainsi, le passage de la ligne de côte à l'isobathe des -50 mètres s'effectue sur une courte distance, notamment en caps par apport d'autres parts de la baie.

En revanche, la zone centrale de la baie se distingue par une pente globalement plus faible. Cela résulte principalement de la nature lithologique plus meuble de cette partie, marquée par la présence de plages sableuses issues des apports terrigènes des deux oueds qui se jettent dans la baie. En addition, La dissipation de l'énergie des houles est significative, ce qui limite l'érosion et favorise l'accumulation sédimentaire.

Au large de la baie, on observe la terminaison du plateau continental, visible dès la sortie de la baie. Cette zone se caractérise par un compression des isobathes, traduisant une rupture de pente marquée. Cette configuration confirme les observations faites à l'échelle régionale concernant la morphologie générale de la région centre de l'Algérie

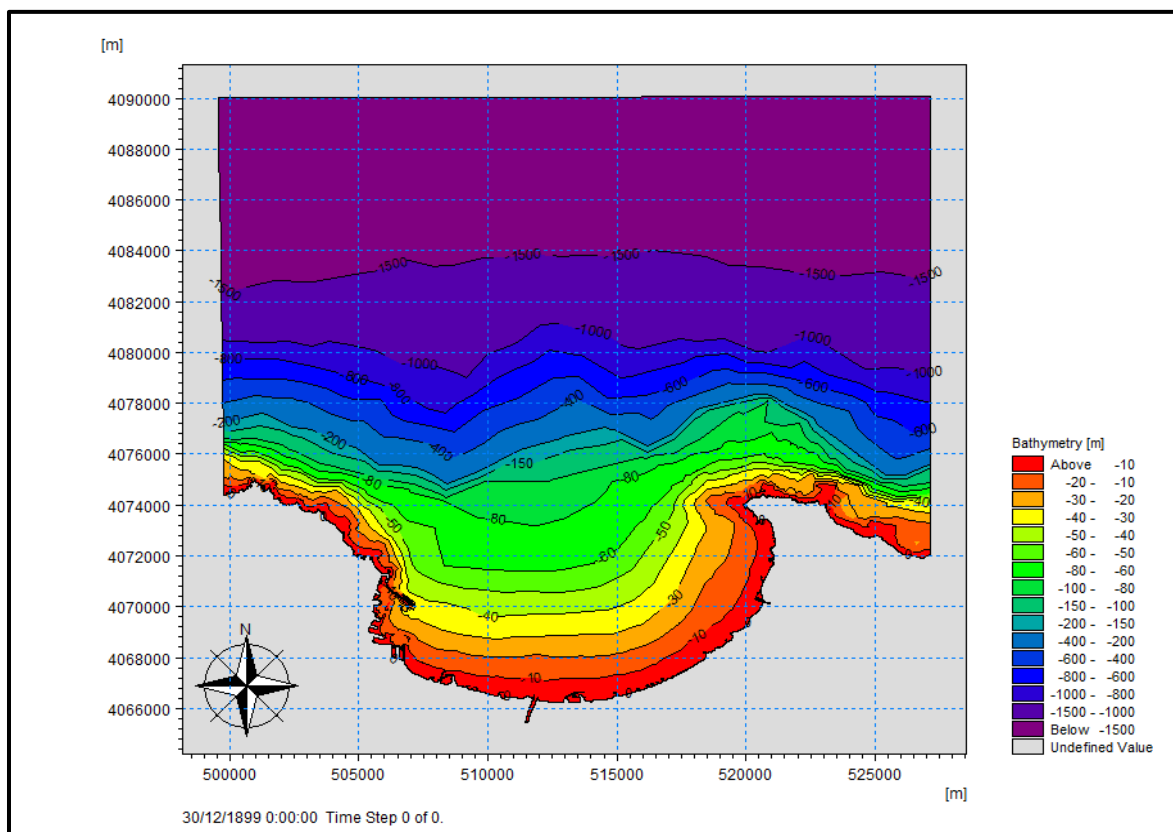


Figure III-3 : Carte bathymétrique de la baie d'Alger.

Dans l'ensemble de la baie, cette zone peu profonde (<50 m) est généralement étroite, sauf à Tamentfoust où elle s'élargit, permettant une transition plus progressive des profondeurs. Cet élargissement favorise l'accumulation de sédiments et influence la dynamique côtière.

La transition entre le plateau et la pente continentale est abrupte dans la baie d'Alger, notamment près des caps rocheux. À Tamentfoust, bien que plus douce, cette pente marque un changement progressif influençant la circulation hydrodynamique et le transport sédimentaire.

Au large, la morphologie sous-marine devient plus accidentée avec une pente marquée. Cette transition est visible par un glacis sous-marin qui précède la descente vers les abysses, témoignant des processus tectoniques et sédimentaires régionaux.

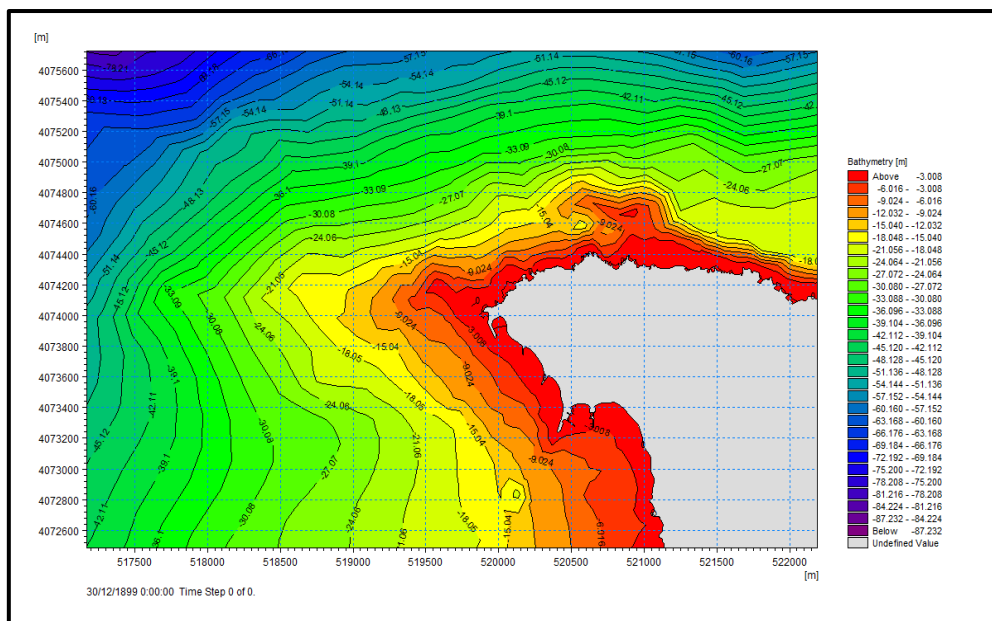


Figure III-4 : Carte bathymétrique de la zone de Tamentfoust

II.8 Directions pénalisantes

Dans le cadre de la modélisation de l'hydrodynamisme de la zone de la Baie d'Alger, en particulier la façade maritime de tamentfoust. Plusieurs analyses ont été réalisées afin d'identifier les directions de houle les plus pénalisantes (chapitre3) pour les structures portuaires.

Aussi, L'analyse de la base de données WaveClimat sur le climat des vagues nous a permis d'identifier les directions les plus susceptibles d'influencer l'évolution et la stabilité des structures portuaires (NNW, N, NNE, NW) pour des périodes de retour de 10 ans, 30 ans et 100 ans.

II.9 Scénarios de simulation

Après avoir identifié les directions pénalisantes et calculé les événements extrêmes dans le chapitre précédent, la méthode choisie consiste à attribuer la hauteur maximale de houle à ces directions. Ainsi qu'aux périodes de retour correspondantes (10 ans, 30 ans, 100 ans). L'élévation du niveau marin a également été prise en compte conformément au rapport du GIEC 2019. (Amara, L., Chalal, Y., 2022)

Les résultats obtenus pour les houles et la courantologie sur ces directions sont présentés dans les tableaux récapitulatifs (tableau 1)

Note : Dans toutes les modélisations effectuées, un vent constant a été associé à chaque direction analysée. Les vitesses et directions moyennes du vent ont été déterminées à partir du traitement des bases de données WaveClimat couvrant des enregistrements allant de 1992 à 2020 dans la baie d'Alger.

D'après (Amara, L., Chalal, Y., 2022) Il est essentiel de noter que coupler un vent et une houle de la même période de retour entraîne une surestimation significative des résultats. Par exemple, associer une houle et un vent de 100 ans reviendrait à modéliser un scénario se produisant une fois tous les 10 000 ans, ce qui est irréaliste au regard de la durée de vie moyenne des ouvrages maritimes, estimée entre 100 et 150 ans.

Pour éviter cette surestimation, la méthode de la probabilité conjointe ou croisée a été adoptée. Cette approche permet d'évaluer la probabilité d'occurrence des couples vents/houles en prenant en compte les variations réelles des conditions météorologiques et océaniques au fil du temps (Abid et al 202

Les résultats des simulations obtenus selon cette méthodologie sont présentés sous forme de tableaux comparatifs et des cartes légendées, mettant en évidence les différentes périodes de retour et leurs impacts sur les directions pénalisantes.

Tableau III-1 : Des inputs des simulations pour l'ensemble les périodes de retour (10,30 et 100 ans) pour la baie.

		Période de retour 10 ans			Niveau de la mer
Paramètres de houle	Hs (m)	Tp (s)	U10 (m/s)	U10 direction (°)	NGA= +0.34m Elévation futur= 0m Totale = 0.34m
Direction					
N	5,06	9,16	12	359.8°	
NNW	4,56	8,58	12	336.44°	
NW	3,79	7,64	12	313.21°	
NNE	4,51	8,52	12	22.66°	
		Période de retour 30 ans			Niveau de la mer
Paramètres de houle	Hs (m)	Tp (s)	U10 (m/s)	U10 direction (°)	NGA= +0.34m Elévation futur= 0m Totale = 0.34m
Direction					
N	5,83	10,02	12	359.8°	
NNW	5,24	9,36	12	336.44°	
NW	4,14	8,07	12	313.21°	
NNE	5,17	9,28	12	22.66°	
		Période de retour 100 ans			Niveau de la mer
Paramètres de houle	Hs (m)	Tp (s)	U10 (m/s)	U10 direction (°)	NGA= +0.34m Elévation futur= 0m Totale = 0.34m
Direction					
N	6,69	10,92	12	359.8°	
NNW	5,98	10,18	12	336.44°	
NW	4,43	8,42	12	313.21°	
NNE	5,89	10,08	12	22.66°	

II.10 Résultats et discussion des simulations

● Propagation des houles de direction Nord (360°)

D'après l'analyse des figures (5, 8, 11), on observe :

- Au large, les houles provenant du secteur nord conservent une énergie importante, avec des hauteurs significatives (H_s) atteignant environ 4.8 m pour une période de retour de 10 ans, 5.6 m pour 30 ans, et jusqu'à 6.5 m pour 100 ans.
- À l'approche du rivage, la houle subit une transformation progressive sous l'effet du shoaling : à mesure que la profondeur diminue, les vagues ralentissent, leur longueur d'onde se contracte, et leur hauteur augmente temporairement. Ce phénomène, dû à l'interaction avec le fond marin, provoque une dissipation d'énergie par frottement et turbulence. On observe ainsi une réduction des H_s vers 4.5 à 5 m en dirigeant vers la côte, et jusqu'à < 0,5 m dans les zones protégées.
- L'hydrodynamique observée dans cette simulation met également en évidence l'importance des interactions locales entre les vagues et la bathymétrie, qui contribuent à moduler l'intensité et la direction de la propagation. La bathymétrie joue un rôle essentiel dans la transformation des vagues, comportant des zones à haute concentration d'énergie (hot spots) à proximité des zones de faible profondeur et des caps avancés.

● Propagation des houles de direction Nord-Nord-Ouest (337,5°)

D'après l'analyse des figures (6, 9, 12), on observe :

- Les houles de secteur NNW génèrent des hauteurs significatives légèrement inférieures à celles du Nord, avec des H_s de 4.8 m (10 ans), 5.6 m (30 ans), et jusqu'à 6.5 m (100 ans) en offshore.
- L'effet de shoaling reste cependant bien présent : en arrivant dans les zones moins profondes, la houle se redresse, ralentit, et perd progressivement de l'énergie. Cela se traduit par une réduction des hauteurs à environ 4.5 m à 5 m de profondeur, et < 0,5 m dans les zones abritées.
- Dans cette simulation, l'hydrodynamique observée est influencé par la combinaison entre les vagues et la bathymétrie, qui contribuent à moduler l'intensité et la direction de la propagation. Leur incidence oblique sur le littoral modifie le comportement de transformation des vagues : la réfraction est moins concentrée, ce qui diffuse davantage l'énergie et réduit la formation de hotspots localisés.

• Propagation des houles de direction Nord-Ouest (313,21°)

D'après l'analyse des figures (6, 9, 12), on observe :

- Les houles de secteur NNW génèrent des hauteurs significatives légèrement inférieures à celles du Nord, avec des Hs de 4m (10 ans), 4.4 m (30 ans), et jusqu'à 5.6 m (100 ans) en offshore.
- L'effet de shoaling reste cependant bien présent : en arrivant dans les zones moins profondes, la houle se redresse, ralentit, et perd progressivement de l'énergie. Cela se traduit par une réduction des hauteurs à environ 4 m à 4.5 m de profondeur, et < 0,4 m dans les zones abritées.
- L'hydrodynamique observée dans cette simulation résulte l'importance des interactions locales entre les vagues et la bathymétrie, qui contribuent à moduler l'intensité et la direction de la propagation. La bathymétrie semble exercer une influence prépondérante sur la transformation des vagues, comportant des zones à haute concentration d'énergie (hot spots) à proximité des zones de faible profondeur et des caps avancés.

• Propagation des houles de direction Nord-Nord-Est (22,66°)

D'après l'analyse des figures (5, 8, 11), on observe :

- Les houles de secteur NNW génèrent des hauteurs significatives légèrement inférieures à celles du Nord, avec des Hs de 4 m (10 ans), 4.4m (30 ans), et jusqu'à 6 m (100 ans) en offshore.
- L'effet de shoaling reste cependant bien présent : en arrivant dans les zones moins profondes, la houle se redresse, ralentit, et perd progressivement de l'énergie. Cela se traduit par une réduction des hauteurs à environ 4 m à 4.4 m de profondeur, et < 0,4 m dans les zones abritées.
- L'hydrodynamique observée dans cette simulation met également en évidence l'importance des interactions locales entre les vagues et la bathymétrie, qui contribuent à moduler l'intensité et la direction de la propagation. La bathymétrie joue un rôle essentiel dans la transformation des vagues, comportant des zones à haute concentration d'énergie (hot spots) à proximité des zones de faible profondeur et des caps avancés.

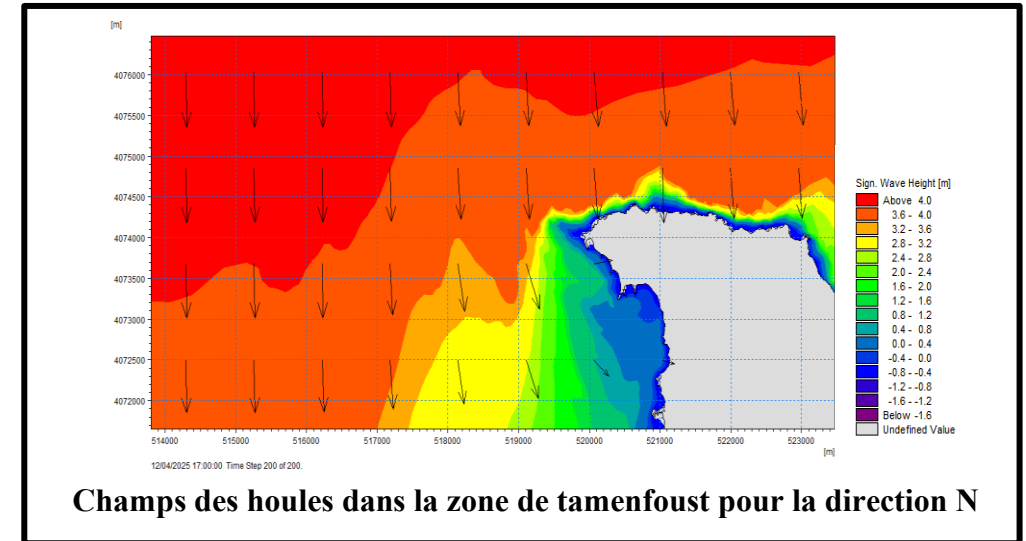
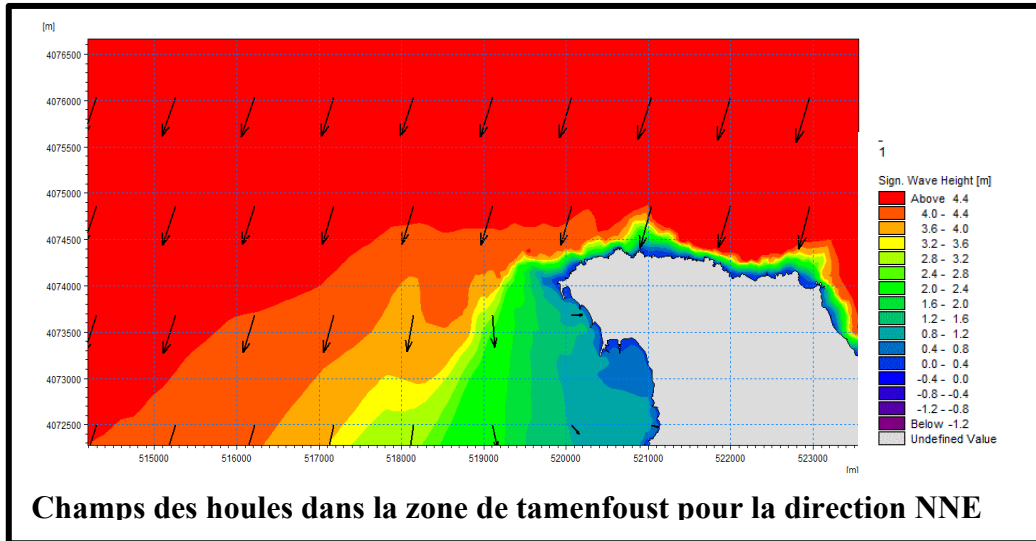
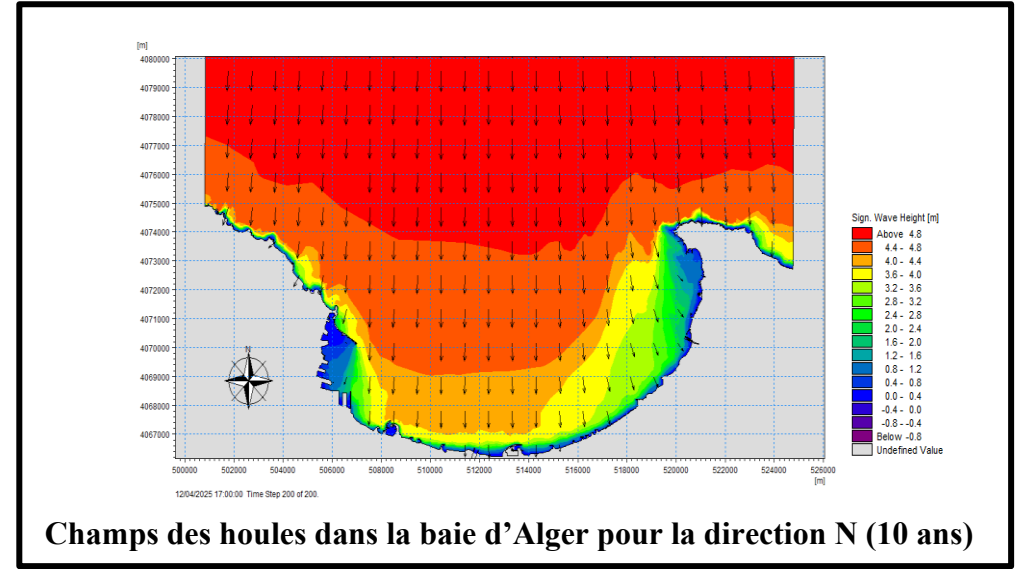
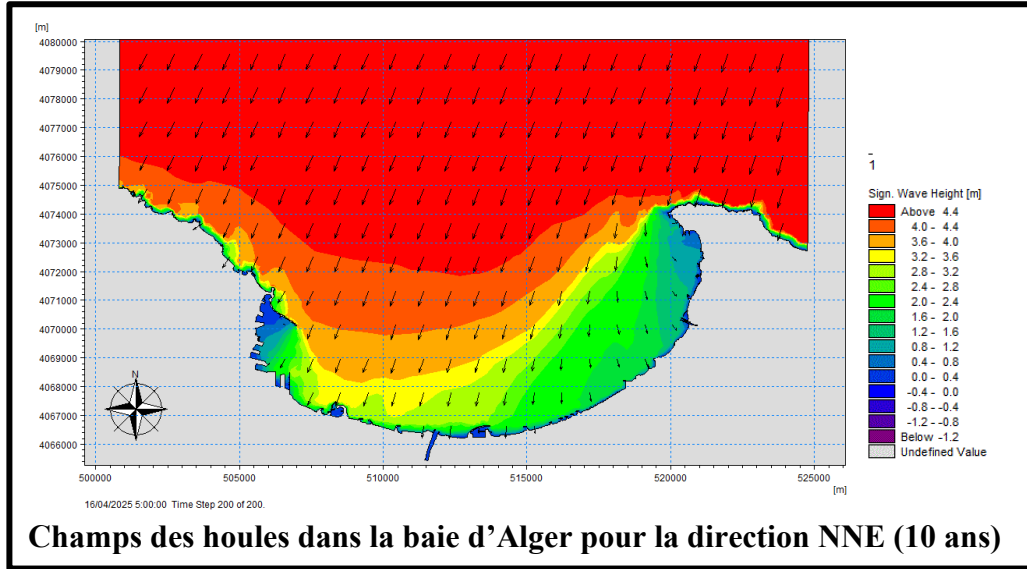


Figure III-5 : Champs des houles dans la baie d'Alger de direction NNE et N (paramètres de houle pour une période de retour de 10 ans).

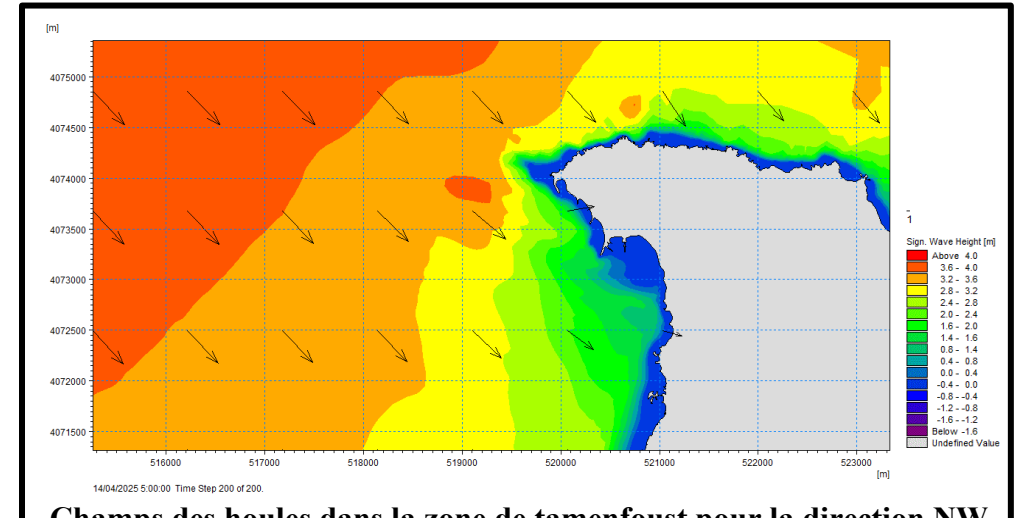
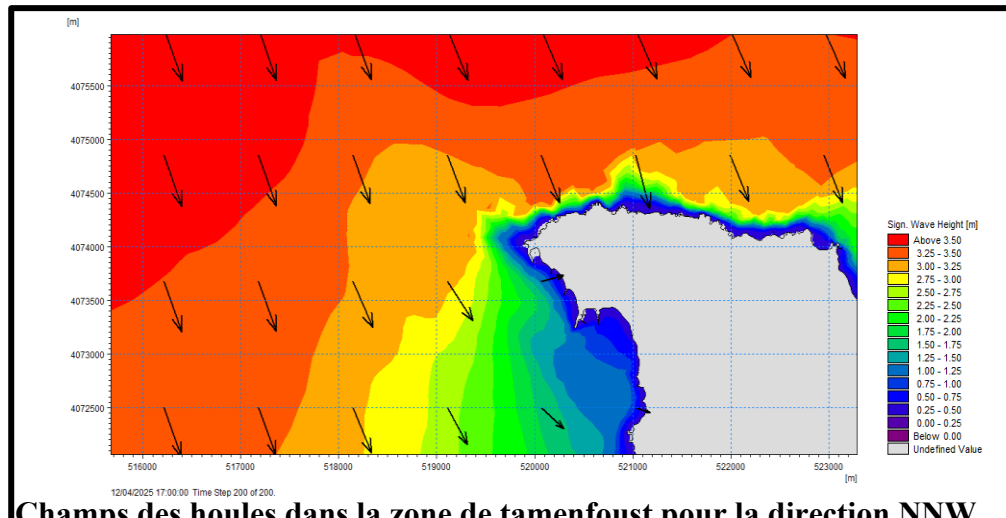
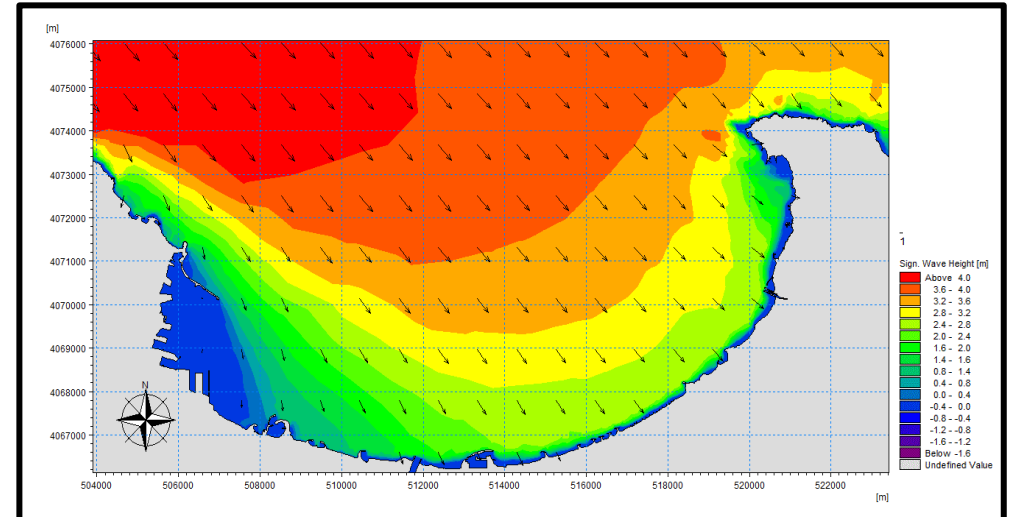
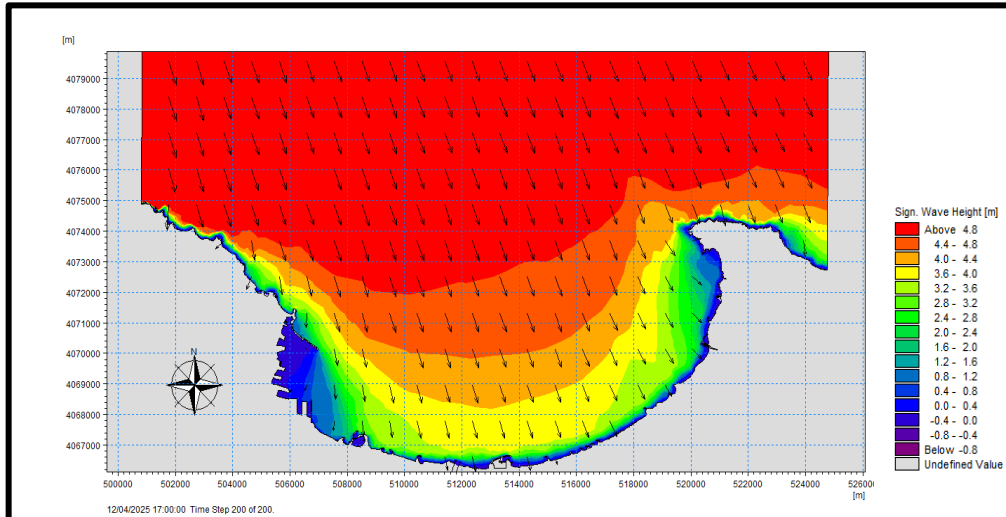
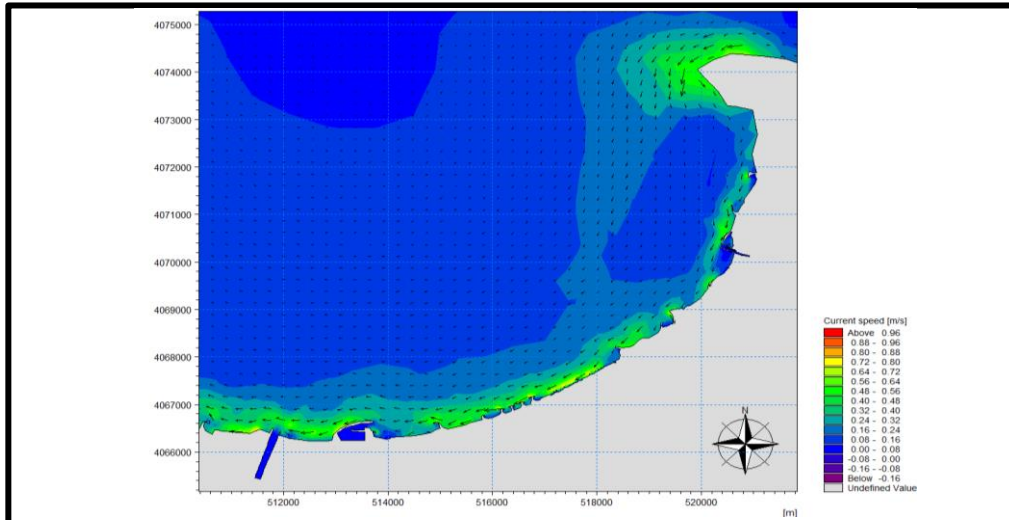
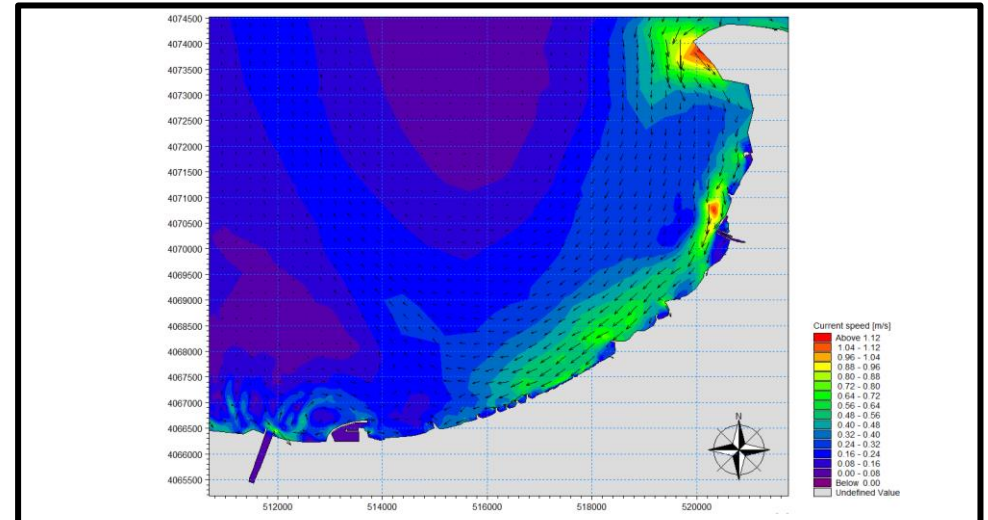


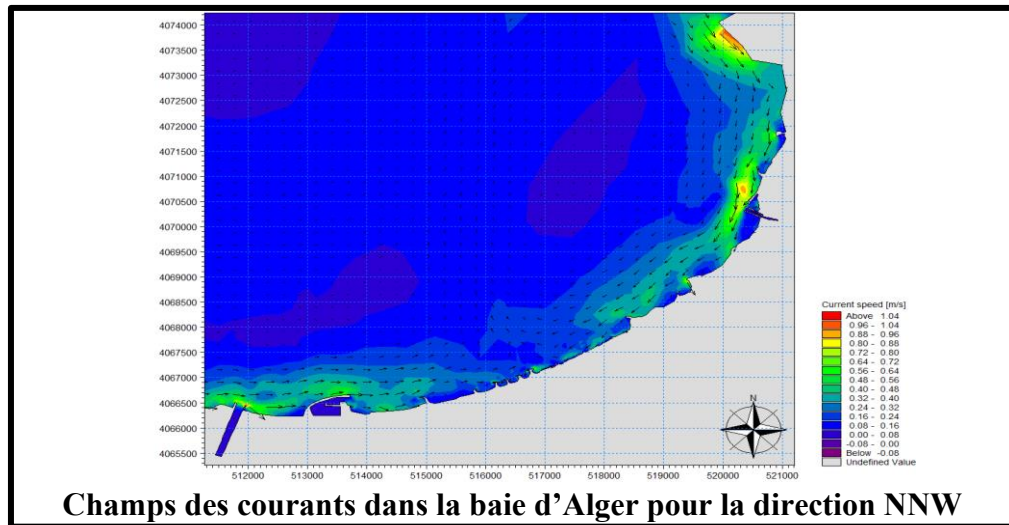
Figure III-6 : Champs des houles dans la baie d'Alger de direction NNW et NW (paramètres de houle pour une période de retour de 10 ans).



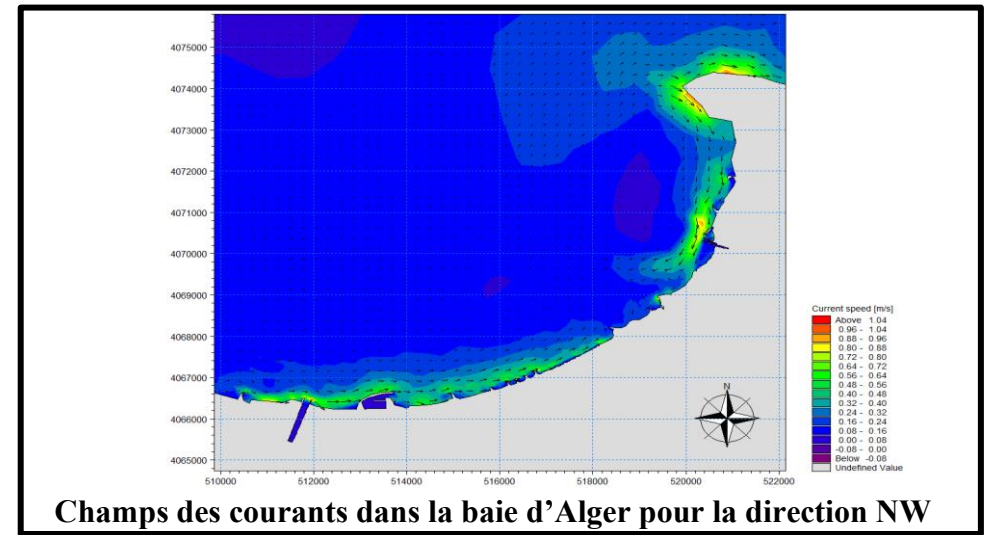
Champs des courants dans la baie d'Alger pour la direction NNE (10ans)



Champs des courants dans la baie d'Alger pour la direction N (10 ans)



Champs des courants dans la baie d'Alger pour la direction NNW



Champs des courants dans la baie d'Alger pour la direction NW

Figure III-7 : Champs des courants dans la baie d'Alger de direction NNE, N, NNW, NW (paramètres de houle pour une période de retour de 10

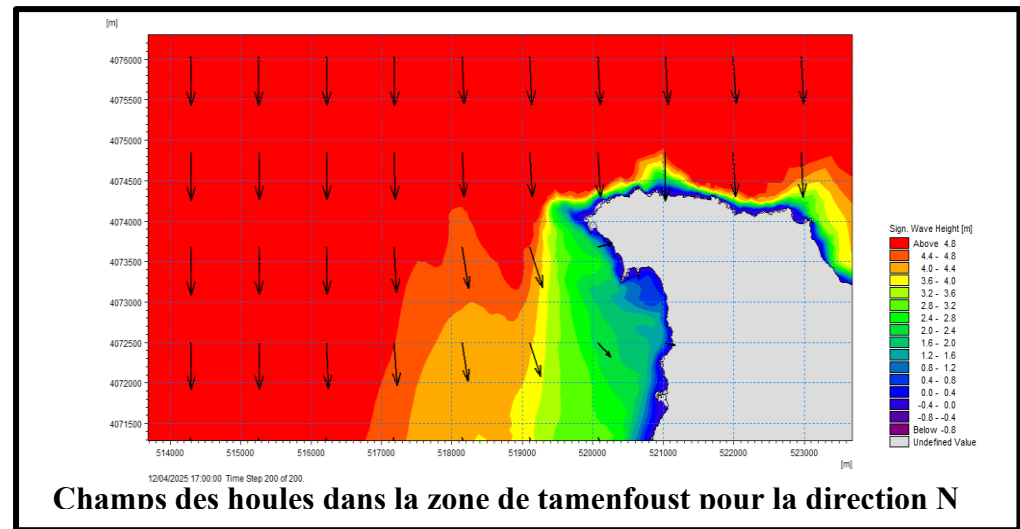
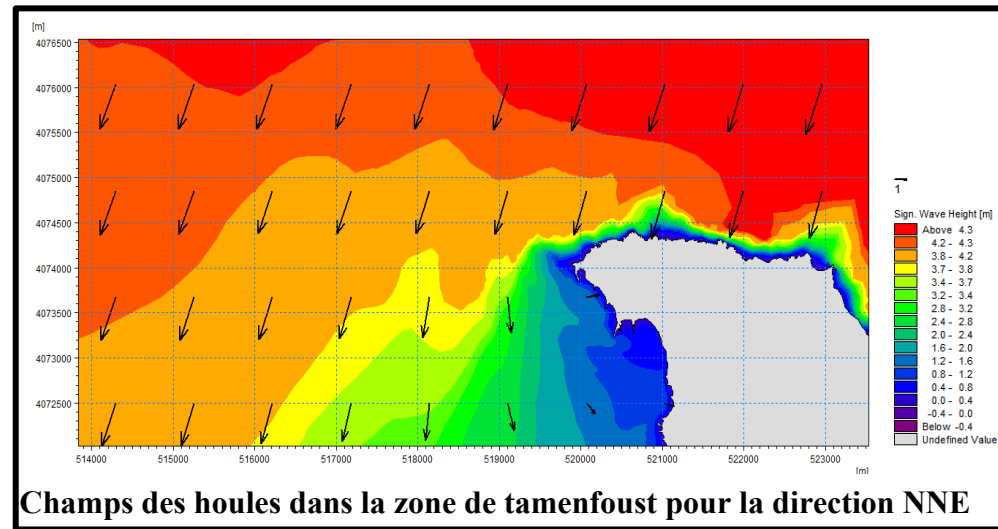
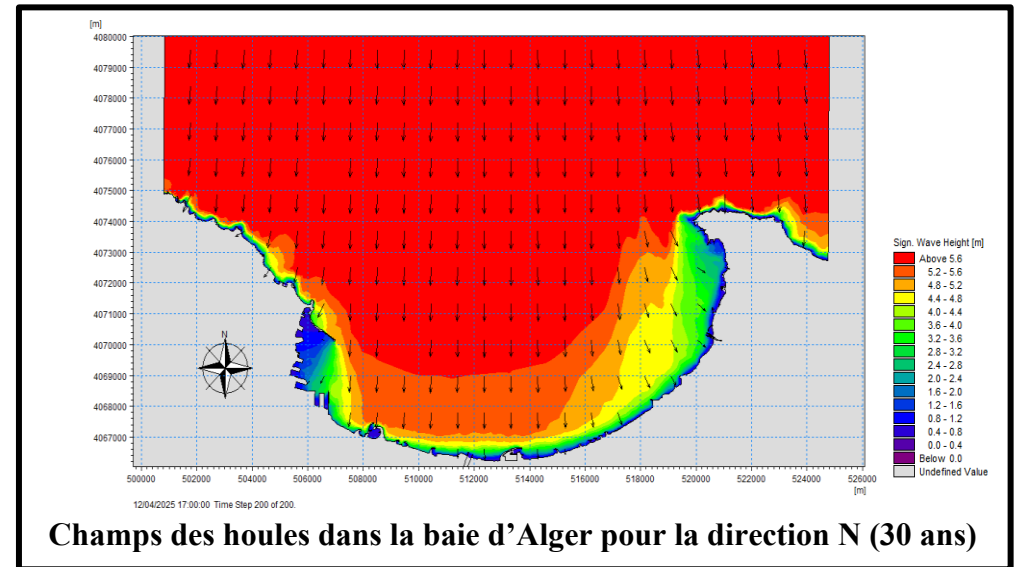
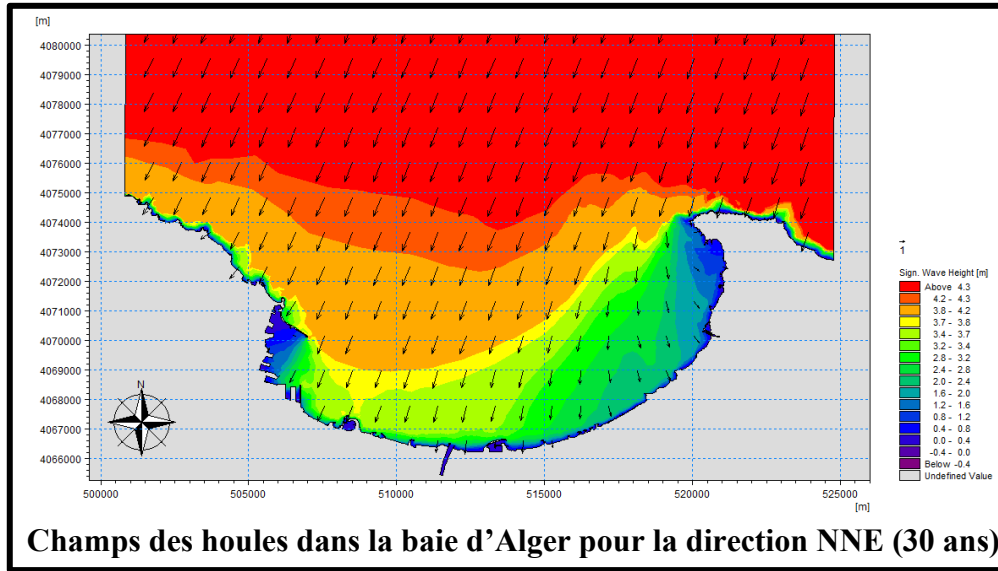


Figure III-8 : Champs des houles dans la baie d'Alger de direction NNE et N (paramètres de houle pour une période de retour de 30 ans).

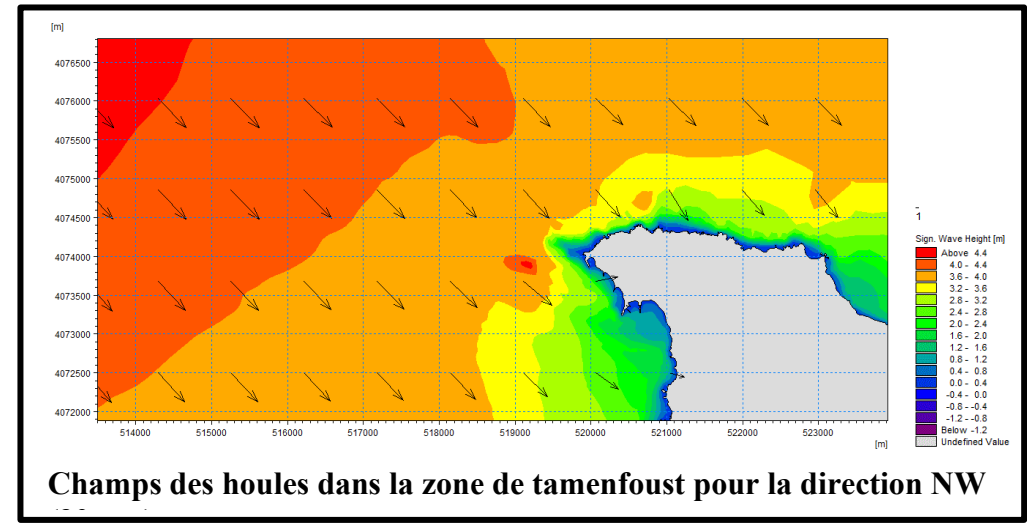
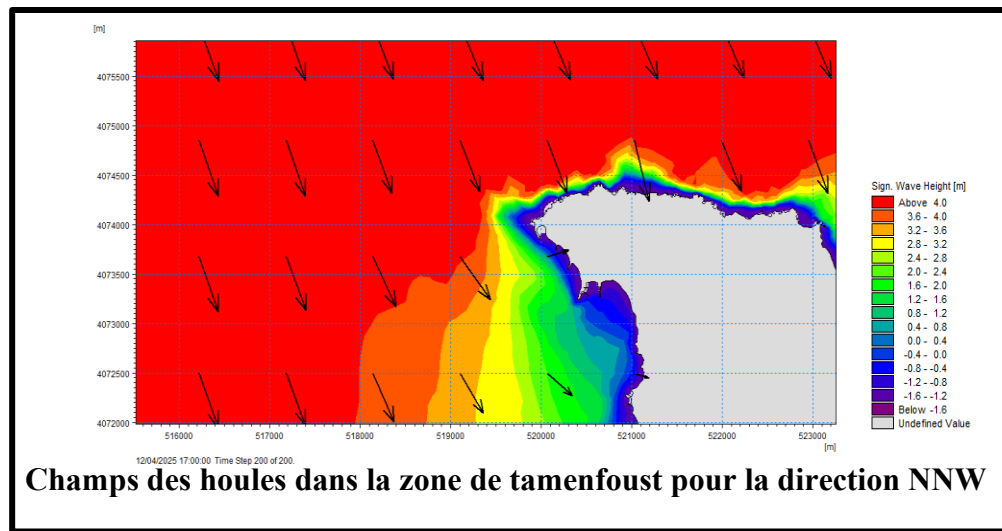
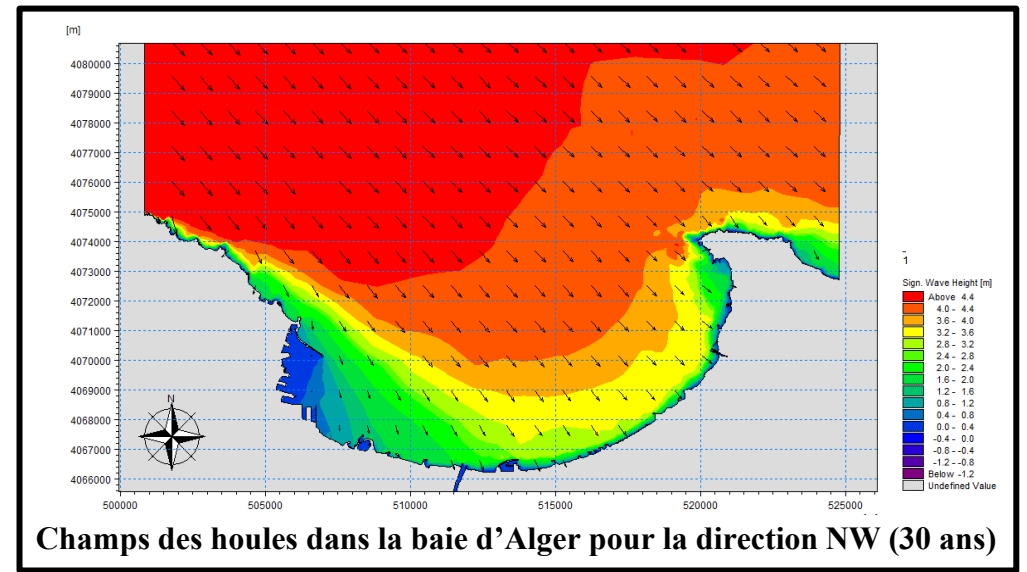
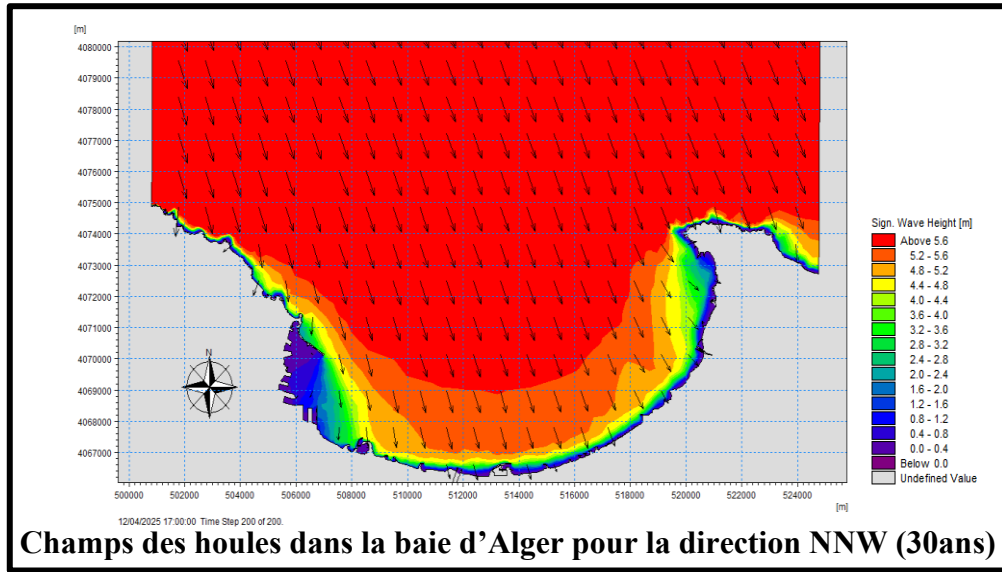


Figure III-9 : Champs des houles dans la baie d'Alger de direction NNW et NW (paramètres de houle pour une période de retour de 30 ans)

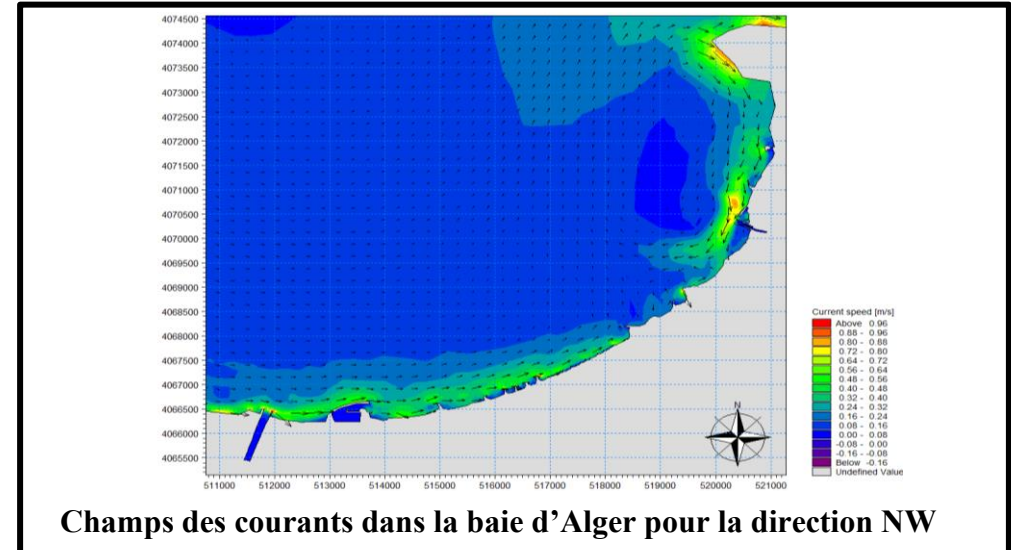
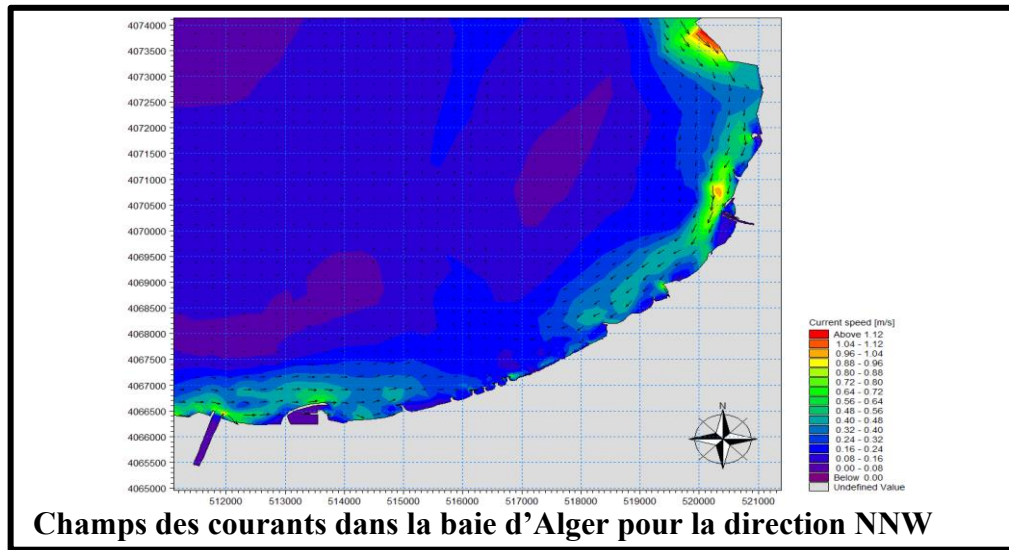
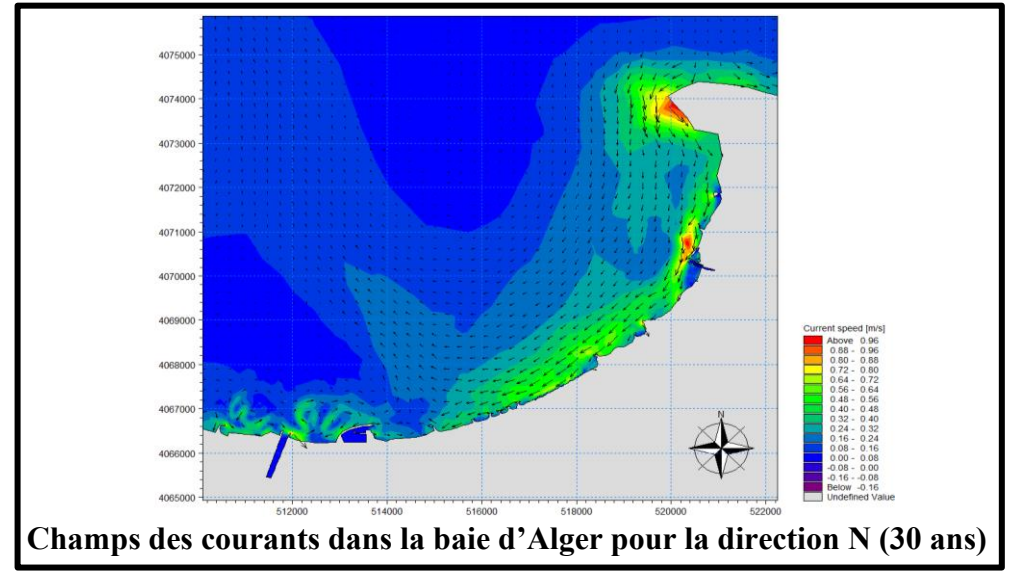
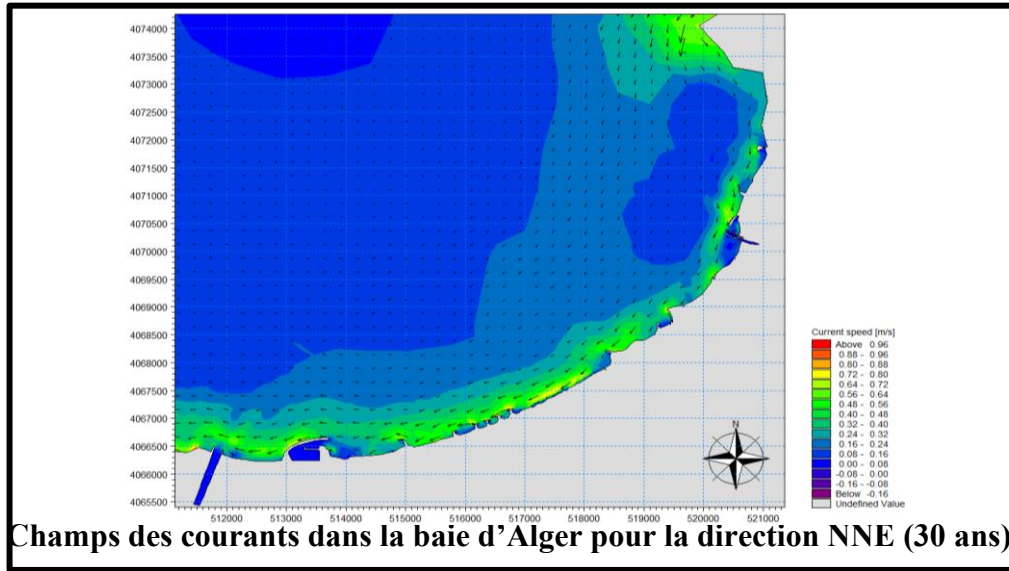


Figure III-10 : Champs des courants dans la baie d'Alger de direction NNE, N, NNW, NW (paramètres de houle pour une période de retour de 30ans)

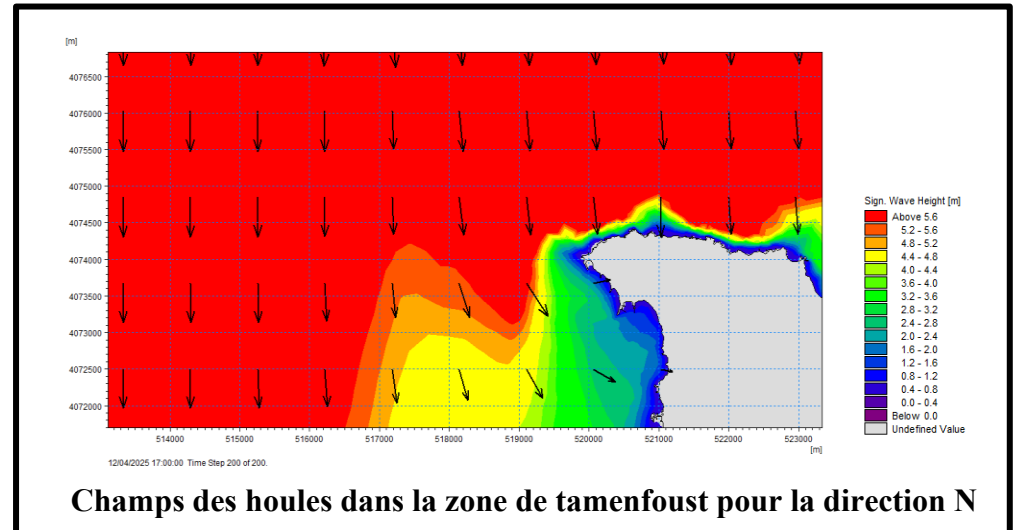
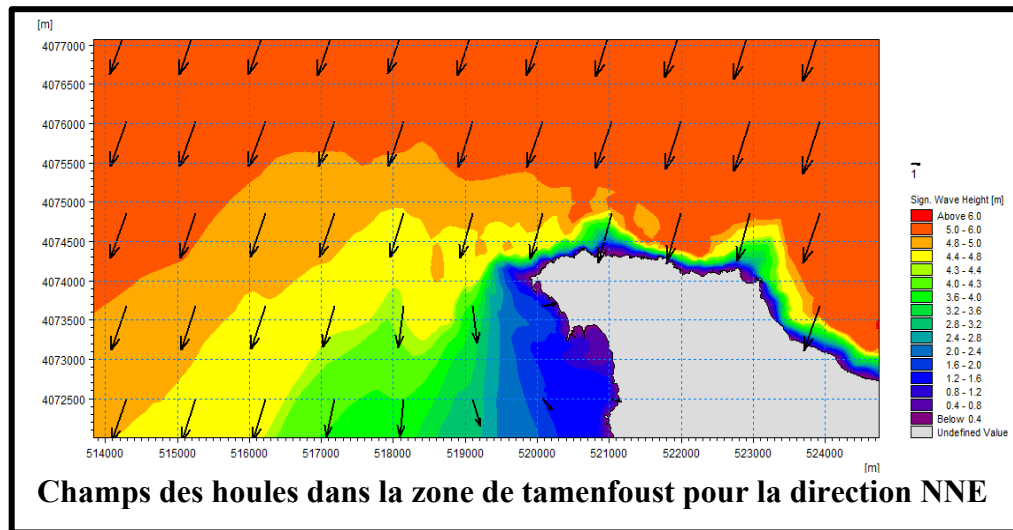
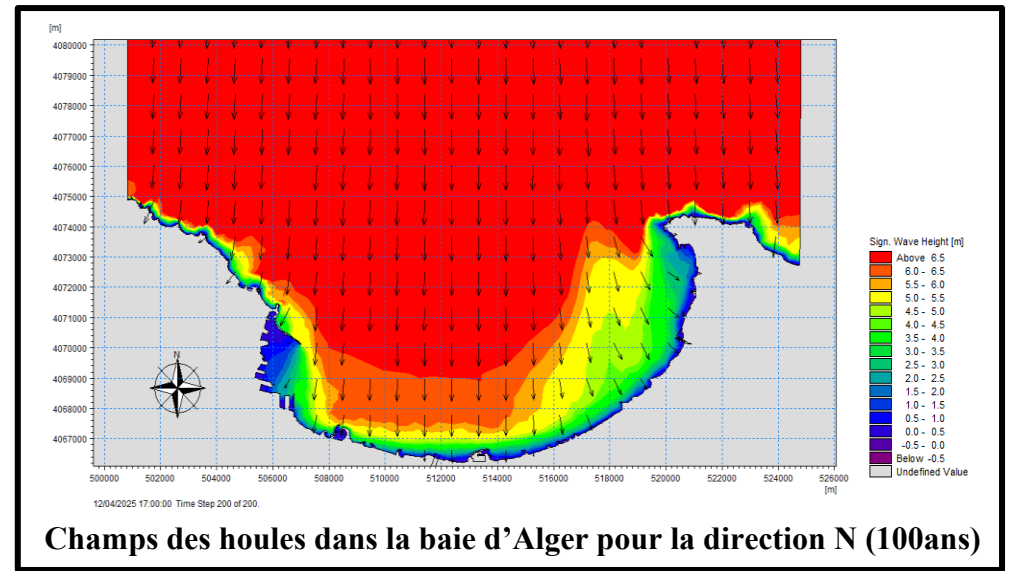
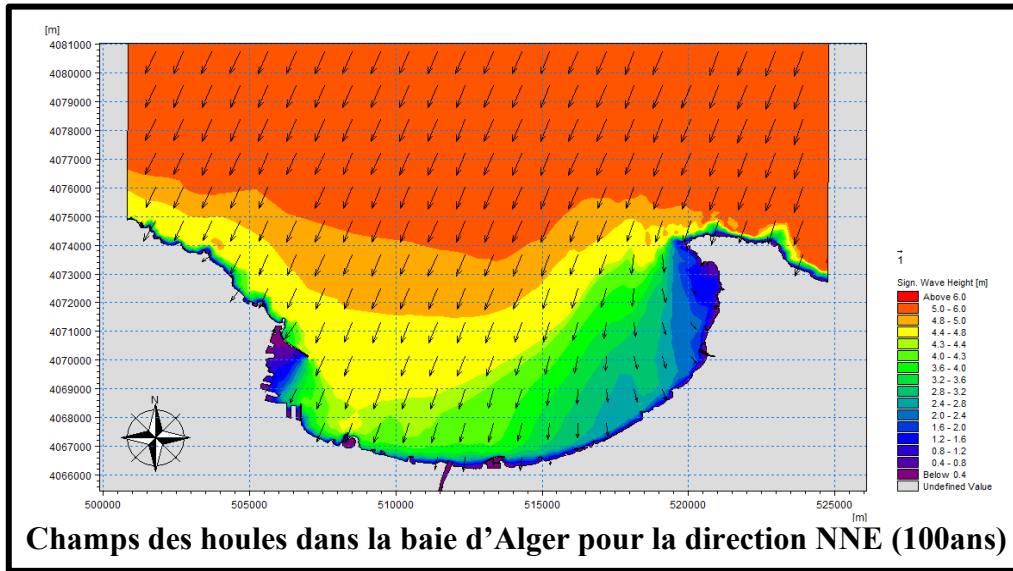


Figure III-11 : Champs des houles dans la baie d'Alger de direction NNE et N (paramètres de houle pour une période de retour de 100ans).

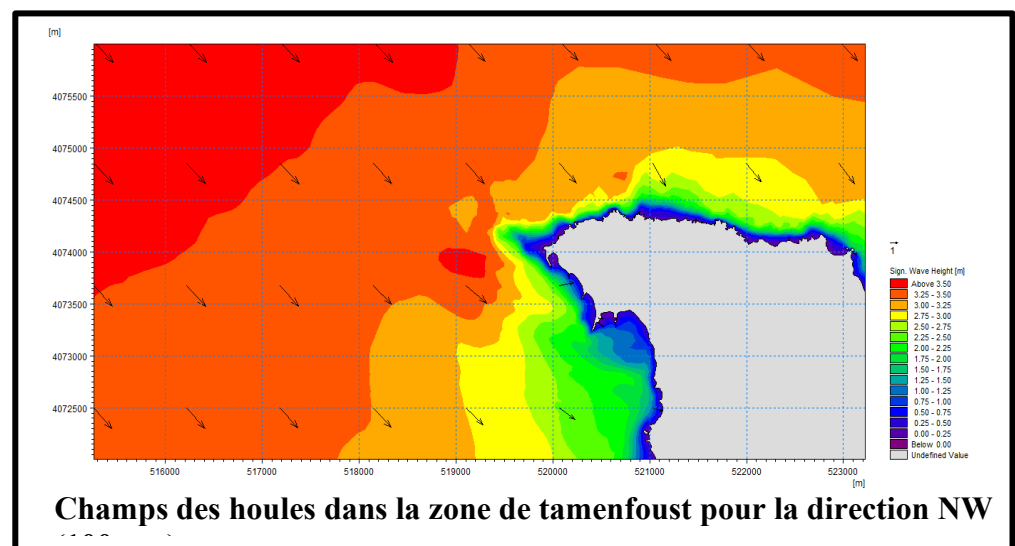
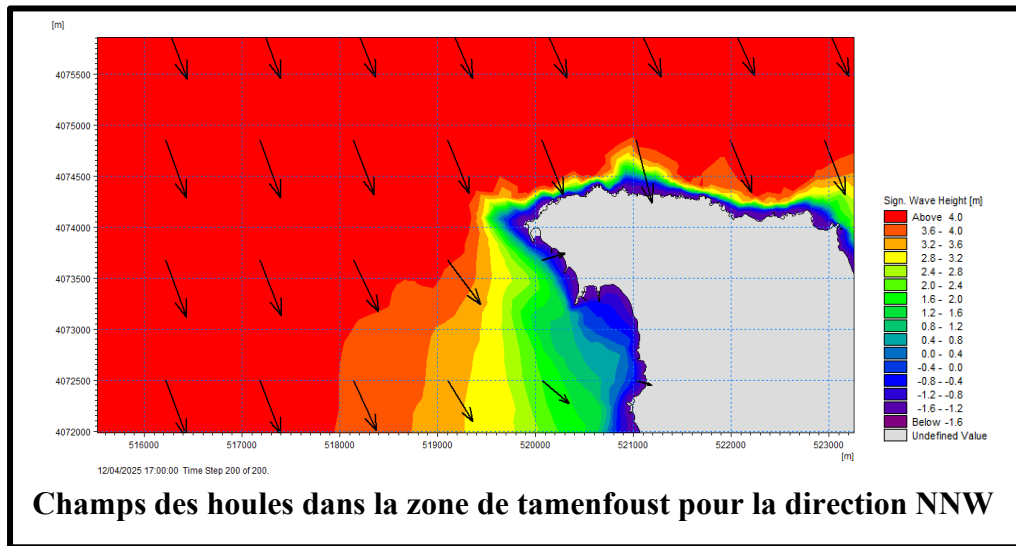
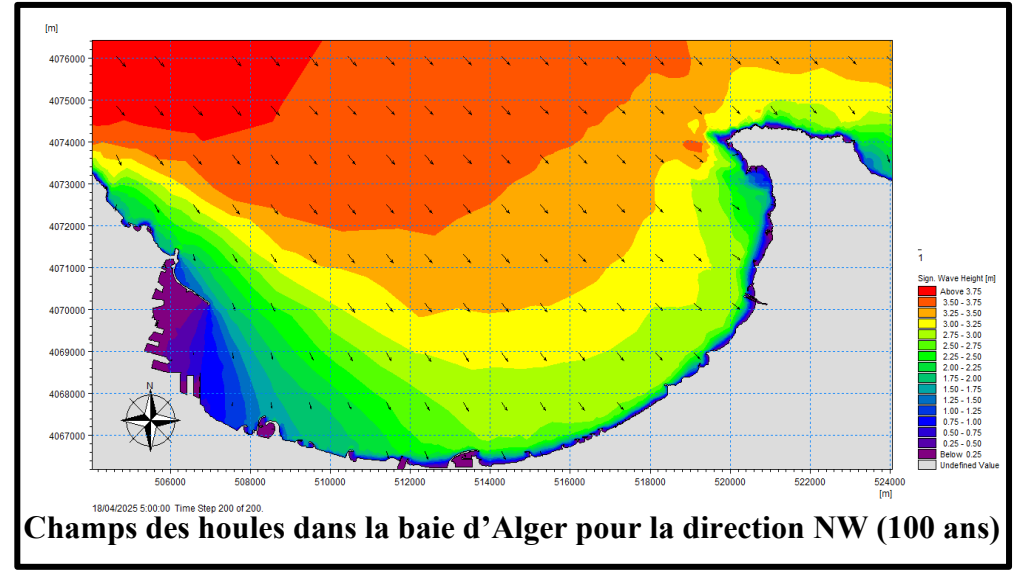
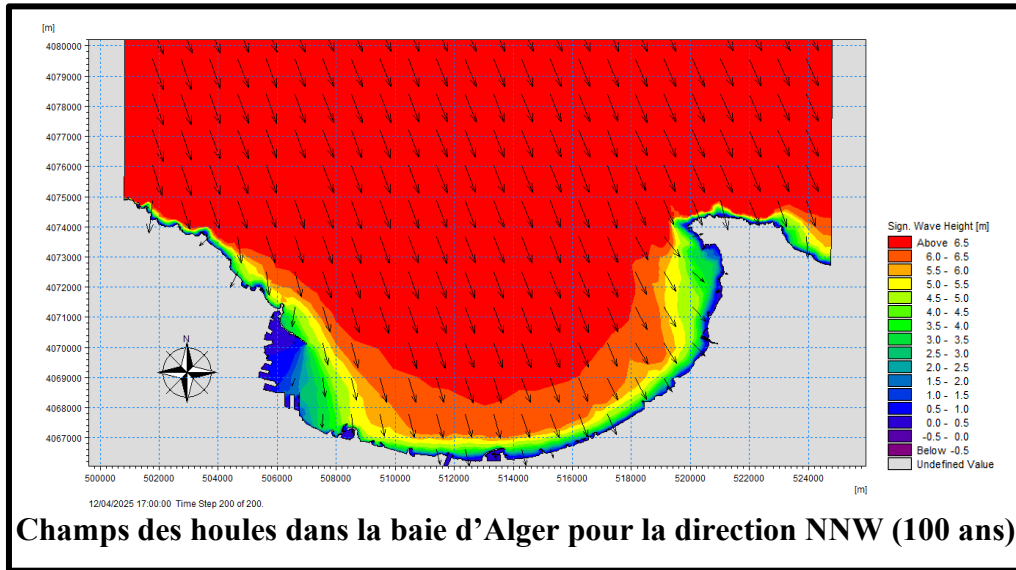


Figure III-12 : Champs des houles dans la baie d'Alger de direction NNW et NW (paramètres de houle pour une période de retour de 100 ans).

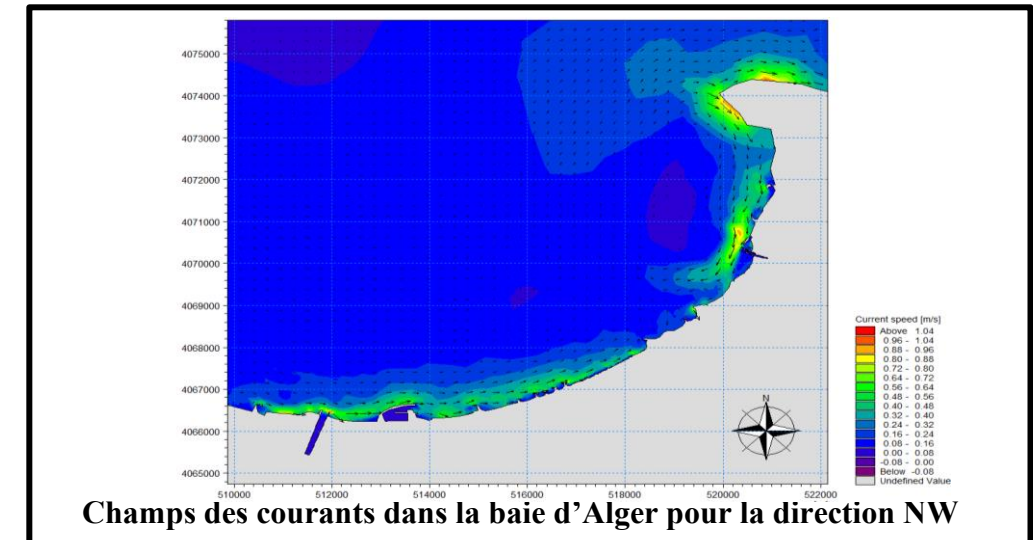
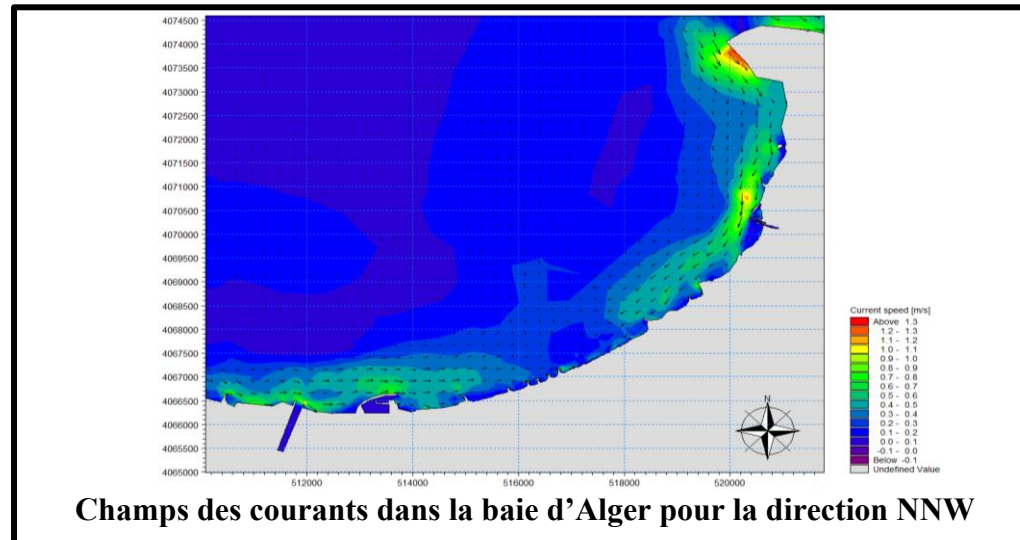
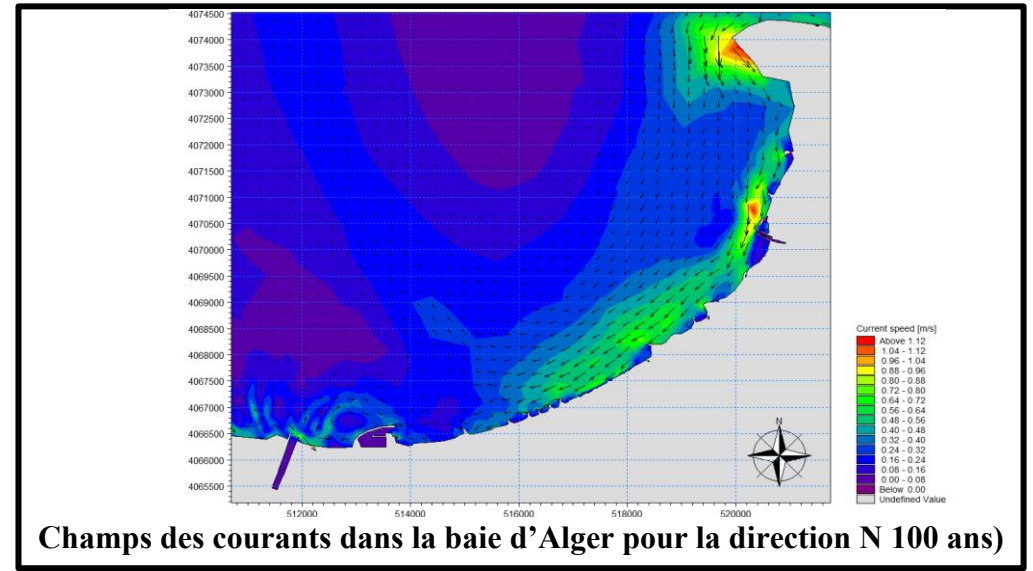
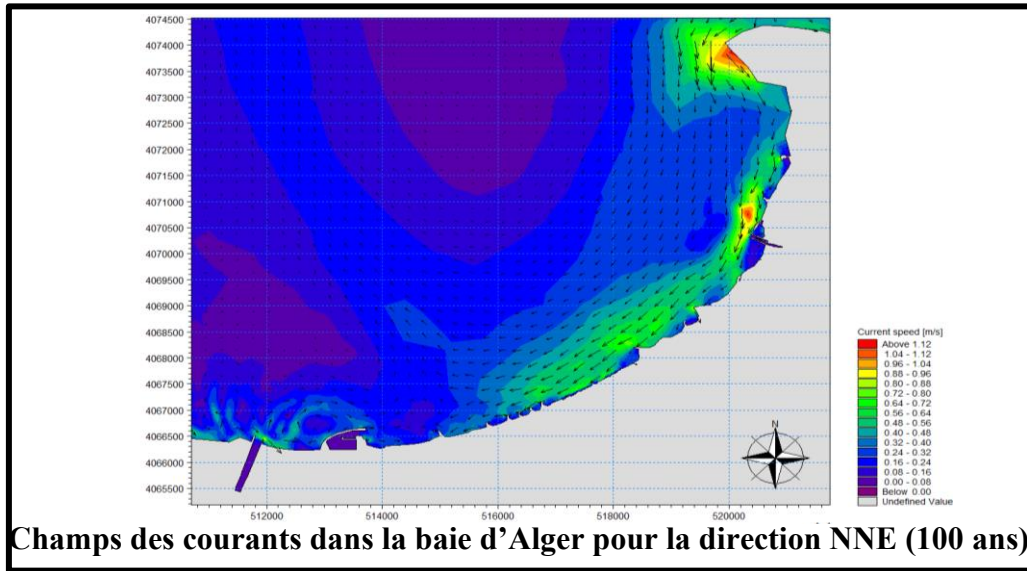


Figure III-13 : Champs des courants dans la baie d'Alger de direction NNE, N, NNW, NW (paramètres de houle pour une période de retour de 100 ans).

II.11 Conclusion

La modélisation numérique réalisée à l'aide de MIKE 21 a permis de reproduire de manière réaliste les conditions marines dans la baie d'Alger, et plus spécifiquement dans la zone de Tamentfoust. Grâce à un maillage flexible adapté à la morphologie du site, les simulations ont intégré les principaux paramètres hydrodynamiques tels que la houle, la bathymétrie et l'interaction houle-courant. L'analyse des résultats pour différents scénarios extrêmes a mis en évidence les zones sensibles aux fortes agitations marines et les contraintes que celles-ci peuvent imposer sur les infrastructures portuaires. Ces données sont essentielles pour orienter les choix d'aménagement et de protection, en tenant compte à la fois des conditions actuelles et des effets attendus du changement climatique, notamment l'élévation du niveau de la mer. Ce travail constitue ainsi une base solide pour l'évaluation des risques et la conception de solutions adaptées et durables pour la façade maritime de Tamentfoust.

Chapitre IV :Dimensionnement des Ouvrages de protection

III.1 Introduction

Dans le cadre de l'aménagement du port de Tamenfoust, ce chapitre est consacré au dimensionnement des jetées, conçues sous forme de digues à talus adaptées aux besoins de la pêche et de la plaisance. L'ensemble du dimensionnement a été réalisé sur la base des recommandations du Laboratoire d'Études Maritimes (LEM), à l'exception de l'étude d'agitation. Deux méthodes de calcul sont comparées, celles de Hudson et de Van der Meer, afin d'évaluer la stabilité des ouvrages face à l'action de la houle. L'étude intègre également les caractéristiques des embarcations et les conditions géotechniques du site. Enfin, une modélisation numérique réalisée avec le logiciel MIKE 21 permet de valider les performances des structures proposées.

III.2 Digue a talus

Les digues à talus sont généralement constituées d'enrochements naturels ou de blocs artificiels en béton, disposés globalement en forme d'un trapèze afin de s'opposer à la progression de la houle. La taille des blocs des différents matériaux utilisés diminue de l'extérieur vers l'intérieur, suivant la décroissance des contraintes mécanique exercées sur chaque couche. Ces couches doivent également respecter des critères de fuseau granulométrique (Sharp. N et al., 1997).

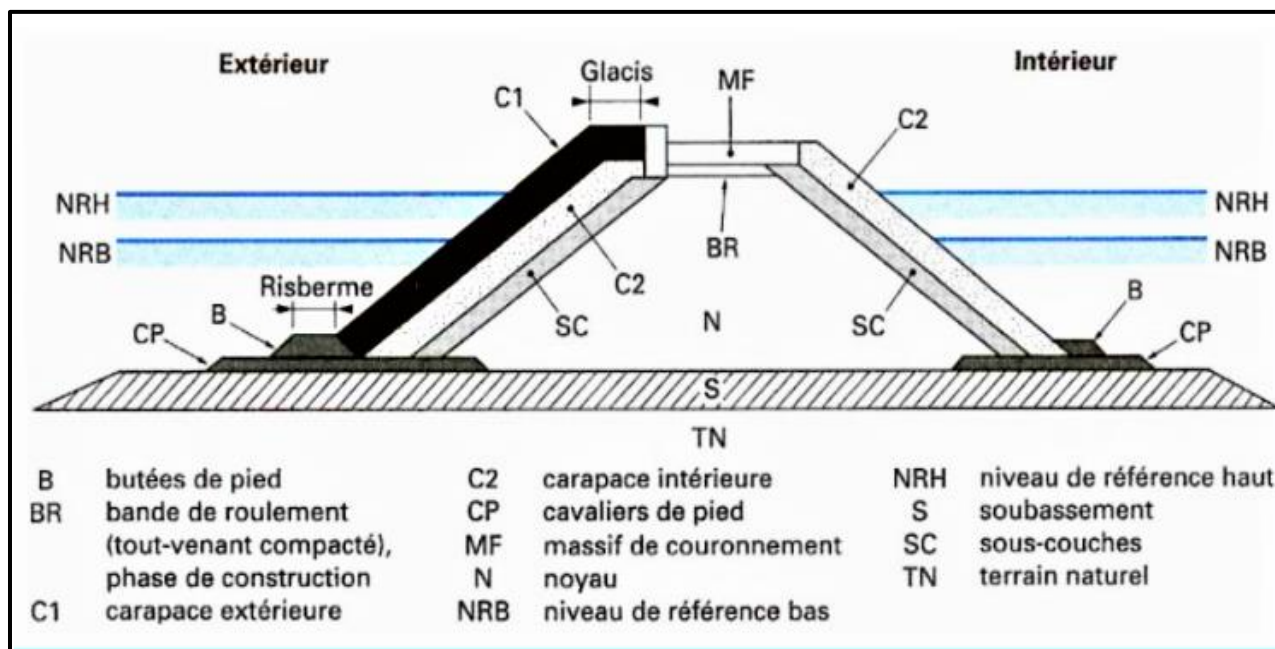


Figure IV-1 : Coupe type d'une digue à talus, éléments constitutifs (Caminade. D., 1995).

Les principaux éléments constitutifs d'une digue à talus sont :

- **Le soubassement** : Dans certains cas, l'implantation d'une digue à talus en zone profonde requiert la mise en place d'un soubassement destiné à supporter le corps de la digue. Il est généralement constitué de matériaux à faible cout, dont les caractéristiques, notamment le poids, dépendent des conditions hydrodynamiques et des exigences de stabilité de l'ouvrage (Sharp N. et al., 1997).

- **La carapace** : Elle représente la composante essentielle d'une digue à talus, assurant principalement la dissipation de l'énergie de la houle en son sein. La carapace, composée d'enrochements naturels ou de blocs artificiels, joue un rôle crucial en protégeant l'ouvrage contre l'action des houles.

Pour assurer cette protection, il est primordial que les blocs utilisés soient suffisamment lourds pour résister aux forces exercées par les vagues. Le dimensionnement de ces blocs face aux sollicitations marines a d'ailleurs été l'un des principaux sujets d'intérêt pour les ingénieurs et chercheurs (Sharp N. et al., 1997). Ainsi, dans chaque projet, le choix des caractéristiques des blocs constitue une étape déterminante du processus de conception.

- **La sous-couche** : les blocs constituant cette couche ont généralement un poids moyen inférieur à celui des blocs de la carapace. Son rôle principal est de fournir une assise stable favorisant l'ancrage de la carapace, tout en empêchant la migration des matériaux fins du noyau à travers les couches supérieures. Elle contribue également à réduire progressivement la vitesse d'écoulement de l'eau au sein de l'ouvrage (Sharp N. et al., 1997).

- **Le Noyau** : le noyau constitue le remblai intérieur principal de l'ouvrage. Il est généralement réalisé à partir de matériaux tout-venant issus de carrières, moins coûteux que les éléments de la structure. Toutefois, les experts ne s'accordent pas sur la limite acceptable de la teneur en fines dans ce type de matériaux (Sharp. N et al., 1997).

- **Butée de pied** : elle joue le rôle de support inférieur de la carapace, en limitant les risques de glissement de celle-ci, tout en apportant une protection supplémentaire contre les affouillements à la base de l'ouvrage (Sharp N. et al., 1997). Dans certains cas, la butée peut se présenter sous la forme d'une assise horizontale de blocs de carapace, on parle alors plus précisément de risberme de pied.

- **Couronnement** : Il s'agit d'une structure en béton monolithique installée au sommet de l'ouvrage. Elle est généralement composée d'une dalle horizontale et d'un mur vertical, également appelé mur de garde.

Il s'agit d'une structure en béton monolithique installée au sommet de l'ouvrage. Elle est généralement composée d'une dalle horizontale et d'un mur vertical, également appelé mur de garde. Ce dispositif protège le talus arrière contre les franchissements de houle et sert également de voie de circulation (Sharp. N et al., 1997).

III.2.1 Caractéristique des embarcations

Avant d'entamer la construction d'un port, une étude préliminaire doit être réalisée afin de prendre en compte le nombre et les caractéristiques des embarcations appelées à fréquenter le port. Dans le cadre du dimensionnement du quai, la Direction des Travaux Publics d'Alger a communiqué les caractéristiques des embarcations prévues pour le futur aménagement du port de Tamentfoust.

Tableau IV-1 : Caractéristique des embarcations

Désignation	Nombre	Longueur	Largeur	Tirant d'eau
Petits métiers	15	4.80m	1.5-2m	2.50 m
Embarcation de plaisance	80	75.45m	9.51m	3.1m

III.3 Dimensionnement des digues

La conception d'ouvrages maritimes nécessite la définition de critères permettant de garantir le comportement attendu de la structure. Le dimensionnement des jetées principale et secondaire de la Marina Bay est effectué à l'aide de deux formules d'évaluation de la stabilité des digues : **Hudson 19953** et **Van der Meer 1988**. Ces deux approches permettent de déterminer :

- Le poids, l'épaisseur et le nombre de blocs par mètre carré pour la carapace ;
- Le poids et l'épaisseur des couches filtrantes ;
- Le dimensionnement des butées de pied.

Les calculs seront réalisés pour deux types de profils : le **profil courant** et le **profil au musoir**.

III.3.1 Dimensionnement de la carapace

III.3.1.1 Dimensionnements des blocs de la carapace

Dans cette partie, nous allons aborder le dimensionnement des carapaces des digues de protection à l'aide de différentes formules permettant de calculer la masse des blocs constitutifs de la carapace, notamment les formules de **Hudson (formule simple)** et de **Van der Meer**.

III.3.1.1.1 Formule d’Hudson

Tableau IV-2 : Formule d’Hudson générale.

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

III.3.1.1.2 Formule de Van der Meer :

III.3.1.1.2.1 Eaux profondes :

Tableau IV-3 : Formule de can der meer eaux profondes.

Formule de Van der Meer	
Eaux profondes	Variables
<p>Pour le déferlement plongeant ($\xi_m < \xi_{cr}$) :</p> $\frac{H_s}{\Delta Dn_{50}} = C_{pl} \cdot P^{0.18} \cdot \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \cdot \xi_m^{-0.5}$ <p>Pour le déferlement gonflant ($\xi_m \geq \xi_{cr}$) :</p> $\frac{H_s}{\Delta Dn_{50}} = C_s \cdot P^{-0.13} \cdot \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \cdot \sqrt{\cot \alpha} \cdot \xi_m^P$ <p>Avec :</p> $\xi_m = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H_s}{g T_m^2}}}$ $\xi_{cr} = \left(\frac{C_{pl}}{C_s}\right) P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha}^{1/P+0.5}$	<p>N : est le nombre de vagues incidents, qui dépend de la durée de l’état de la mer. H_s : hauteur significative de la houle, incidente en pied de l’ouvrage(m). ξ_m : paramètre de déferlement, calculé à partir moyenne T_m. α : angle de talus. $\Delta = \rho_s - 1$: densité relative déjaugée. P : paramètre de perméabilité nominale de l’ouvrage. C_{pl} : 6,2 C_s : 1,0</p>
<p>Condition d’utilisation : eau profonde (hauteur d’eau au pied de l’ouvrage H_{en pied} > 3H_s au pied).</p>	
<p>NOTE : Pour des pentes de talus moins raides que 4/1 (soit une pente où cot α ≥ 4), seule l’équation correspondant au déferlement plongeant doit être utilisée dans le cadre du dimensionnement par la formule de Van der Meer, quel que soit le rapport de déferlement m, qu’il soit inférieur ou supérieur à la valeur critique de transition r (Rock Manual, CTMEF, 2009).</p>	

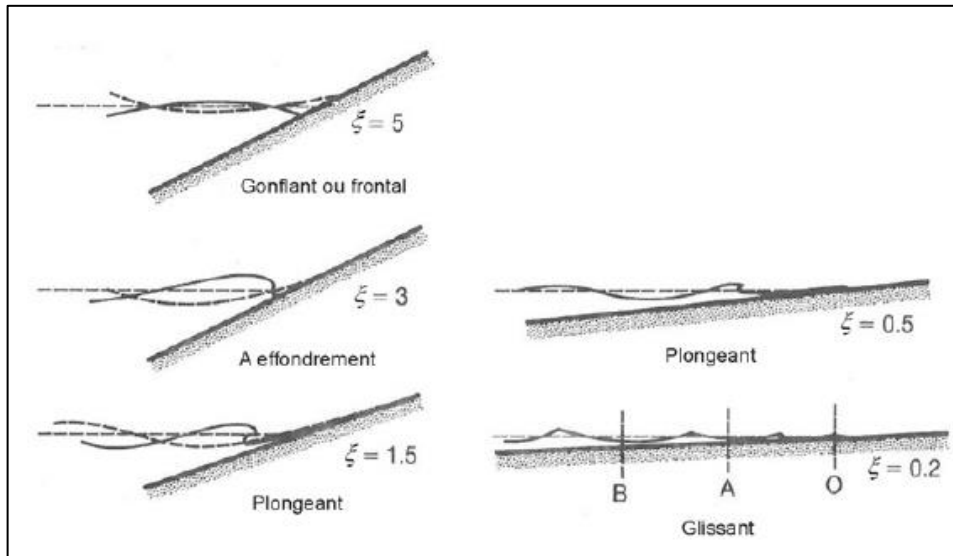


Figure IV-2 : Types de déferlement en fonction de ξ_m (Battjes, 1974)

3.1.1.2.2 Eaux peu profondes

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

Formule de van der Meer	
Eaux peu profondes	Variables
<p>Pour le déferlement plongeant ($\xi_{s-1,0} < \xi_{cr}$) :</p> $\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = C_{pl} \cdot P^{0.18} \cdot \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \cdot \left(\frac{H_s}{H_{2\%}}\right) \cdot \xi_{s-1,0}^{-0.5}$ <p>Pour le déferlement gonflant ($\xi_m > \xi_{cr}$) :</p> $\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = C_s \cdot P^{-0.13} \cdot \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \cdot \left(\frac{H_s}{H_{2\%}}\right) \cdot \sqrt{\cot \alpha} \cdot \xi_{s-1,0}^P$ <p>Avec :</p> $\xi_{s-1,0} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H_s}{g T_{m-1,0}^2}}}$ $\xi_{cr} = \left(\frac{C_{pl}}{C_s}\right) P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha}^{\frac{1}{P+0.5}}$	<p>N : est le nombre de vagues incidentes, qui dépend de la durée de l'état de la mer.</p> <p>H_s : hauteur significative de la houle, incidente au pied de l'ouvrage (m).</p> <p>H_{2%} : hauteur dépassée par 2% des vagues incidentes 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>Δ : densité relative déjaugée.</p> <p>P : paramètre de perméabilité nominale de l'ouvrage.</p> <p>C_{pl} : 8,4</p> <p>C_s : 1,3</p>
<p>Condition d'utilisation : eau peu profonde (hauteur d'eau au pied de l'ouvrage $H_{\text{en pied}} < 3H_{s \text{ au pied}}$).</p> <p>Ce cas correspond également aux zones où se produit un déferlement important, notamment lorsque la hauteur de houle au pied de l'ouvrage est inférieure ou égale à 70 % de la hauteur de houle au large :</p> <p>NOTE : Pour un dimensionnement fiable, il est indispensable d'utiliser les valeurs locales de $H_{2\%}$ et $T_{m-1,0}$, extraites d'un modèle de propagation de la houle (Rock Manual, CTMEF, 2009).</p>	

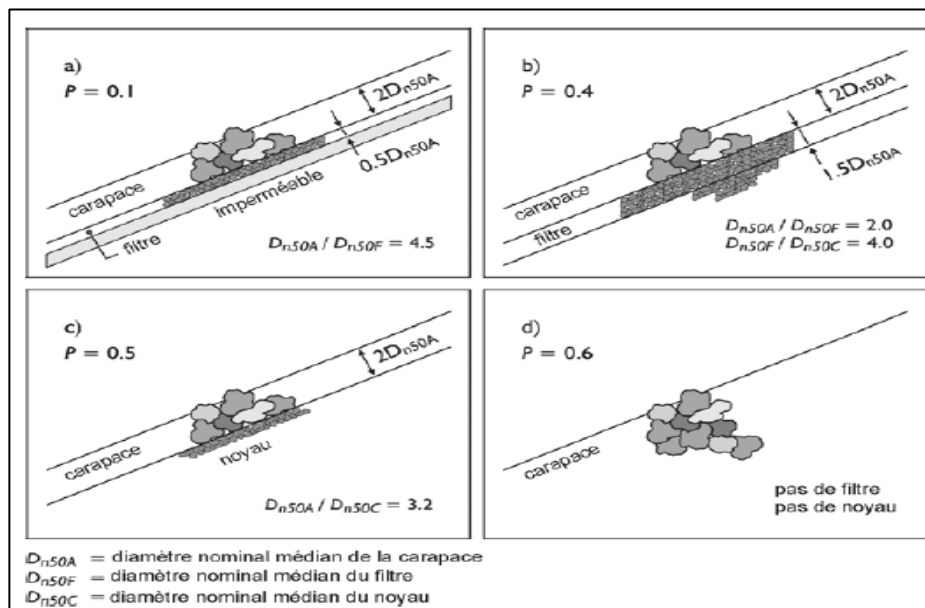


Figure IV-3 : Paramètre de perméabilité nominale P pour la formule de Van der Meer (1988)

III.3.1.2 Paramètres géométriques de la carapace :

Les paramètres géométriques de la carapace sont déterminés par une succession de calculs simples, à partir de la masse médiane des blocs constitutifs de la carapace.

Tableau IV-5 : Paramètres géométriques de la carapace.

Formule	Variables
Volume du bloc : $V = \frac{M_{50}}{\rho_s}$	<p>M_{50} : Masse moyenne du bloc de la carapace. S : Poids volumique du bloc de la carapace. n : Nombre de couche. k_{Δ} : coefficient de couche.</p>
Diamètre nominale du bloc : $D_n = \sqrt[3]{V}$	
Epaisseur de la carapace : $e = n \cdot k_{\Delta} \cdot D_n$	
Nombre de blocs par m ² : $N_s = \frac{n}{D_n^2}$	

III.3.2 Dimensionnement de la sous couche :

Tableau IV-6 : Dimensionnement de la sous-couche.

Formule	Variables
Masse moyenne des blocs de la sou couche : $M_{sc50} = \frac{M_{50}}{10}$	<p>M_{50} : Masse moyenne du bloc de la carapace.</p> <p>S : poids volumique du bloc de la carapace.</p> <p>n : Nombre de couche.</p> <p>K_{Δ} : coefficient de couche.</p>
Volume d'un bloc : $V_{sc} = \frac{M_{sc50}}{\rho_s}$	
Diamètre nominal du bloc : $D_{ndc} = \sqrt[3]{V}$	
Epaisseur de la carapace : $e_{sc} = n \cdot k_{\Delta} \cdot D_{ndc}$	
<p>NOTE : Selon le Rock Manual (CTMEF, 2009), la masse des blocs de la sous-couche doit respecter certaines limites par rapport à celle des blocs artificiels de la carapace :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elle ne doit pas dépasser 15 % de la masse du bloc artificiel, afin de garantir une surface relativement lisse, nécessaire à une pose précise des blocs de carapace ; • Elle ne doit pas être inférieure à 5 % de cette masse, pour éviter que les enrochements naturels ne soient entraînés à travers les vides de la carapace, ce qui compromettrait la stabilité de l'ensemble. 	

III.3.3 Dimensionnement du filtre de transition et noyau :

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

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

III.3.4 Dimensionnement de la butée de pied :

Tableau IV-8 : Formule de dimensionnement de la butée de pied.

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

III.4 Résultats des calculs de dimensionnement

Le tableau ci-après résume l'ensemble des calculs effectués pour le dimensionnement de la digue principale et de la butée de pied.

Les résultats obtenus pour la section courante de la jetée principale (voir tableau IV-8) mettent en évidence les différentes formules utilisées pour le calcul de l'enrochement. À titre de comparaison, pour un même type d'enrochement et une même hauteur de houle au pied de l'ouvrage, la formule de Van der Meer conduit à une augmentation d'environ 55 % de la masse des blocs de carapace par rapport aux résultats obtenus avec la formule de Hudson.

Cette différence s'explique par le fait que la formule de Van der Meer prend en compte un plus grand nombre de paramètres influençant la stabilité de la digue, notamment la période de houle, le mode de déferlement, la porosité, ou encore le nombre de trains de houle.

Il est à noter que les dimensions de la sous-couche et du noyau ne sont pas significativement affectées par la méthode de calcul choisie pour la carapace ; elles restent relativement constantes quelle que soit la formule appliquée.

Par ailleurs, les résultats obtenus pour le musoir de la jetée principale (voir tableau IV-9) confirment les conclusions tirées pour la section courante. L'application de la formule de Van der Meer permet d'atteindre un niveau de stabilité supérieur face aux sollicitations marines, comparativement à la formule de Hudson.

Tableau IV-9 : Dimensionnements proposés pour la section courante de la jetée principale.

Enrochement	Formule utilisé	Carapace		Sous couche		Noyau	Butée de pied	
		Masse moyenne de l'enrochement (Tonne)	Epaisseur de la couche (Mètre)	Masse moyenne du bloc (Tonne)	Epaisseur de la couche (Mètre)	Masse des matériaux TVC (Tonne)	Masse moyenne du bloc (Tonne)	Epaisseur et longueur (Mètre)
Enrochements naturels	Hudson	3 à 5 t	2.80	0.3	1.26	< 0.1	0.3	1.26
	Van der Meer (eau peu profonde)	5 à 8.2t	3.33	0.5	2.22	< 0.1		

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

Enrochement	Formule utilisé	Carapace		Sous couche		Noyau	Butée de pied	
		Masse moyenne du bloc BCR(Tonne)	Epaisseur de la couche (Mètre)	Masse moyenne du bloc (Tonne)	Epaisseur de la couche (Mètre)	Masse des matériaux TVC (Tonne)	Masse moyenne du bloc (Tonne)	Epaisseur et longueur (Mètre)
Enrochements naturels	Hudson	6t	3.2	0.6	1.86	< 0.1	0.6	1.86
	Van der Meer (eau peu profonde)	9t	3.8	0.9	3.32	< 0.1		

III.5 Hypothèses de calcul

III.5.1 Caractéristiques des matériaux de construction

- Remblai à l'arrière du mur et dans les évidements

- Poids volumique $\gamma_a = 1.8 \text{ t/m}^3$
- Poids volumique déjaugé $\gamma' = 1.1 \text{ t/m}^3$
- Angle de frottement interne $\varphi = 37^\circ$
- Cohésion $C = 0 \text{ t/m}^2$

- Assise en enrochement

- Poids volumique déjaugé $\gamma' = 1.1 \text{ t/m}^3$
- Angle de frottement interne $\varphi = 37^\circ$
- Cohésion $C = 0 \text{ t/m}^2$
- Contrainte admissible $\sigma_{adm} = 40 \text{ à } 60 \text{ t/m}^2$

- Sol de fondation

- Poids volumique $\gamma_a = 1.8 \text{ t/m}^3$
- Poids volumique déjaugé $\gamma' = 1.1 \text{ t/m}^3$
- Angle de frottement interne $\varphi = 30^\circ$
- Cohésion $C = 0 \text{ t/m}^2$

- **Acier : Type Fe E400**

- **Béton de masse**

- Poids volumique $\gamma_b = 2.4 \text{ t/ m}^3$
- Poids volumique déjaugé $\gamma'_b = 1.4 \text{ t/ m}^3$

- **Béton armé**

- Poids volumique $\gamma_b = 2. \text{ t/ m}^3$
- Poids volumique déjaugé $\gamma'_b = 1.4 \text{ t/ m}^3$

III.5.2 Charges et surcharges d'exploitation

- **Charges permanentes G**

- Poids propre du mur
- Poids des remblais dans les évidements et sur les blocs
- Poussée de terres
- Poussée hydrostatique liée au marnage
- Poussée hydrodynamique
- Bollard

- **Charges d'exploitations G**

Tableau IV-11 : Charges d'exploitations G

	Surcharge (t/m ²)	Effort d'amar- rage	Effort d'accos- tage
Quai à -3.50 m	1.50	10 t	-
Appontement à -3.50	1	5 t	5 t

III.5.3 Séisme

- K_h : accélération horizontale est de ($K_h = 0.25$)
- K_v : accélération verticale est de ($K_v = 0.3 K_h$)

III.5.4 Combinaison de charges

- Cas statique : $G + 1.5 Q$
- Cas dynamique : $G + Q + S1$
- Avec : $Q1 = \text{Surcharge} + \text{Amarrage}$

III.5.5 Coefficient de sécurité

Ce tableau met en évidence les coefficients de sécurité pour les différents cas

Tableau IV-12 : Les coefficients de sécurité

	Cas sta- tique	Cas dynamique
Au Revêtement	$\geq 1,5$	$\geq 1,1$
Au Glissement	$\geq 1,5$	$\geq 1,1$
Au Poinçonnement	$\geq 3,0$	≥ 2

III.6 Calcul des efforts

III.6.1 Calcul des coefficients de poussées

Le calcul des coefficients de poussée sera réalisé selon la méthode de MONONOBÉ OKABÉ en s'appuyant sur les hypothèses suivantes :

- La surface de rupture est plane.
- Le déplacement di rideau est considéré suffisant pour atteindre l'état limite d'équilibre.

Les points du prisme de rupture sont soumis à la même accélération

$$K_a = \frac{\cos^2(\varphi - \lambda - \theta)}{\cos \theta \cos^2 \lambda \cos(\delta + \lambda + \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta - \theta)}{\cos(\delta + \lambda + \theta) \cos(\beta - \lambda)}} \right]} \quad \text{Équation IV-1}$$

Avec :

K_a : Coefficient de poussée ;

Φ : Angle de frottement interne ;

δ : Angle du frottement du sol sur l'écran (frottement mur-sol ou sol-sol)

Pour un frottement mur-sol : $\delta = 2\varphi/3$

λ : Angle de l'inclinaison de l'écran avec verticale:

Pour un frottement sol-sol : $\delta = \varphi/3$

β : Angle du terre-plein avec l'horizontale;

$$\theta = \text{Arctg} \left(\frac{K_H}{1 \mp K_V} \right) \quad \text{Équation IV-2}$$

K_h : accélération horizontale est de ($K_h = 0.18$)

K_v : accélération verticale est de ($K_v = \pm 0.3 K_h$)

- **Cas statique**

- Partie verticale : $\varphi = 37^\circ ; \delta = 37^\circ ; \beta = \lambda = 0 = 0 \Rightarrow K_{a1} = 0.233$

- Partie inclinée : $\varphi = 37^\circ ; \delta = 45^\circ ; \beta = \lambda = 0 = 0 \Rightarrow K_{a2} = 0.0107$

Partie inclinée : $\varphi = 37^\circ ; \delta = 37^\circ ; \beta = -15^\circ ; \lambda = 0 = 0 \Rightarrow K_{a2} = 0.0107$

- **Cas dynamique**

Séisme ascendant : $\theta = \text{Arctg} \left(\frac{0.25}{1 - 0.075} \right) = 15,12^\circ$

- Partie verticale : $\varphi = 35^\circ ; \delta = 35^\circ ; \beta = \lambda = 0 ; \theta = 10.77^\circ \Rightarrow K_{a1} = 0.466$

- Partie inclinée : $\varphi = 35^\circ ; \delta = 23.33^\circ ; \beta = -45^\circ ; \lambda = 0 ; \theta = 10.77^\circ \Rightarrow K_{a2} = 0.109$

Séisme descendant : $\theta = \text{Arctg} \left(\frac{0.25}{1+0.075} \right) = 13.09^\circ$

- Partie verticale : $\varphi = 35^\circ ; \delta = 35^\circ ; \beta = \lambda = 0 ; \theta = 9.69^\circ \Rightarrow Ka_1 = 0.422$
- Partie inclinée : $\varphi = 37.5^\circ ; \delta = 23.33^\circ ; \beta = -45^\circ ; \lambda = 0 ; \theta = 9.69^\circ \Rightarrow Ka_2 = 0.087$

Tableau IV-13 : Les coefficients de poussée

	Paroi verticale	Paroi inclinée
Cas statique	0,233	0,0107
Cas dynamique		
Séisme ascendant	0,466	0,109
Séisme descendant	0,422	0,087

III.6.2 Poussée des terres

La pression exercée par les terres sur un écran est donnée par la formule : $P_1 = \sum (\gamma_i \times h_i \times K_i)$

Où :

h_i : désigne la hauteur de chaque couche

γ_i : Correspond au poids volumique de la couche considérée

k_i : est le coefficient de poussée de terres

La poussée totale exercée par les terres correspond à m'air du diagramme des contraintes résultant de cette répartition.

III.6.3 Poussée dues à la surcharge d'exploitation

Les divers paramètres à calculer sont données par les formules suivantes

Coefficient de poussée : $Kq = \frac{Ka}{\cos(\beta - \lambda)}$

λ : Angle d'inclinaison du parement avec la verticale

β : Angle d'inclinaison du terre-plein avec l'horizontal

La contrainte : $\sigma_1 = k_{qi} \times q$ où : $q = 1.50 \text{ t/ml}$

La poussée : $p_i = \sigma_i \times h_i$

Sachant que l'inclinaison des poussées des terres et celles dues aux surcharges fait un angle δ' (qui dépend du frottement sol-sol ou sol-mur) avec l'horizontal.

III.6.4 Poussée hydrodynamique

Elle est donnée par la formule suivante : $P_h = 0.9917 K_h \gamma_w h^2$

K_h : Coefficient d'accélération sismique horizontale ($K_h = 0.18 g$)

Poids volumique de l'eau de mer : $\gamma_w = 1.025 \text{ t/m}^3$

Le bras de levier de la poussée est $Z = 0,40 h$ à partir du fond marin

H : La profondeur au pied du quai

III.6.5 Sollicitation due à l'amarrage

Les amarres du niveau sont attachées à des bollards qui imposent des efforts dus à l'action du vent sur les navires, à l'agitation du plan d'eau et à l'action des courants sur la carène.

L'effort d'amarrage est appliqué à +0.30 m au-dessus du niveau supérieur du quai (+1.50). Le moment dû à l'effort d'amarrage est : $M = F \times (h + 1.5 + 0.30)$ pour les quais en blocs

h : Profondeur en pied de quai

F: Effort d'amarrage

III.6.6 Efforts dus au séisme

- Force horizontale due au séisme (SI) : $SI = K_h \times P$
- Force verticale due au séisme $(1 \pm K_v) \times P$
- (P) / Poids total du mur (y compris les terres dans les évidements et au-dessus des blocs)
- K_h : Accélération sismique horizontale
- K_v : Accélération sismique verticale
- $+K_h$: Séisme descendant
- $-K_h$: Séisme ascendant

III.6.7 Poids des blocs

Le tableau ci-dessous présente le poids des blocs à utiliser

Efforts	EN (m)	XG (m)	YG (m)
Bloc 1	6,36	2,21	0,7
Bloc 2	4,34	2,07	2,25
Bloc 3	6,65	1,71	3,73
COURON	5,94	1,44	5,02
Poids des blocs	23,283	1,845	2,955

Tableau IV-14 : le poids des blocs à utiliser

- Remblai au-dessus du bloc

Tableau IV-15 : Remblai au-dessus du bloc

1	2,38	3,9	2,85
1 sec 2	1,44	3,9	4,7
	1,19	3,35	360
2 Sec	1,62	3,35	4,7
COUTANTS	5,43	2,36	5,41
EVIDMT 1	1,03	1,85	0,9
EVIDMT 2	1,54	1,85	2,25
EVIDMT 3	1,23	1,85	3,6
EVIDMT 3 sec	0,84	1,85	4,45
Poids des remblais	16,697	2,737	4,036
Poids total des murs	39,98	2,22	3,41

III.7 Calcul des poussées

III.7.1 Poussée des terres

Pour faciliter la compréhension des calculs, on a réalisé le tableau ci-dessous

Tableau IV-16 : calculs des poussées des terres

EFFORTS		EV(t/m)	EH(t/m)	XG	YO	MStab (tm/ml)	MReuv (tm/ml)
e1	2.03 Kal	1.22ka2	1.62ka2	4.30	4.70	5.25 ka1	7.62ka1
e2	4.03 Kal	2.43ka2	3.22ka2	4.30	3.64	10.43ka1	11.72ka1
e3	7.27 Kal	4.38ka2	5.81ka2	4.30	2.45	18.81 ka1	14,22 ka1
e4	2,36 Kal	1.42ka2	1.88ka2	4.30	1.30	6.11 ka1	2.45 ka1
e5	6.63ka2	-2.30 ka1	6.22ka1	3.30	0.37	-7.60 ka2	2.30ka2
		9.44 ka1	12.53 ka1			40,60 ka1	36,01 ka1
		-2.30 ka2	6.22 ka2			-7,60 ka2	2.30 ka2
Cas statique		2.18	2.99	431	2.82	9.38	8.42
Cas dynamique							
Séisme ascendant		4.15	6.56	4.36	2,6	18,1	17.08
Séisme descendant		3,78	5.86	4.36	2.63	16,46	15.42

III.7.2 Poussée due à la surcharge de 1.5 t/m²

Tableau IV-17 : poussée due à la surcharge de 1.5t/m²

Poussées	E(t/ml)	Eh(t/ml)	XGi	YGi
P1=6.9 Ka1	5.51 Ka1	5.51 Ka1	4,3	4.30
P2=4.15 Ka2	0.63 Ka2	1.36Ka2	3.30	0.70

III.8 Vérification de la stabilité

III.8.1 Cas statique

Tableau IV-18 : Récapitulatif des forces (cas statique)

EFFORTS	EV(1/m)	E(1m)	XG(m)	YG(m)	Mstab (1m/ml)	Mrenv (tm/ml)
---------	---------	-------	-------	-------	------------------	------------------

Charges Permanents :

Poids propre du mur.....g1	39.98	0	2,22	3,41	88.65	
Poussée des terres .....g2	2.18	2.99	4.31	2.82	9.38	8.42
Poussée hydrodynamique...g3	0	0.35	0	4.20	0	1.47

Charges d'exploitations :

Surcharges.....q1	0.97	1.30	4.29	3.37	4.18	4.37
Amarrage q1	0	1	0	6	0	6

G = g1 + g 2 + g 3	42.16	3.34			98.03	9.88
Q1 = q1 + q2	0.97	2.30			4.18	10.37

Combinaison G +Qi : séisme Ascendant

G + 1.5 Q1	43.62	6.78			104.31	25.44
-------------------	-------	------	--	--	--------	-------

III.8.1.1 Vérification de la stabilité au renversement et au glissement

Tableau IV-19 : Coefficient de sécurité (cas statique)

Coefficient de sécurité	Au renversement $F_1 = \frac{M_S}{M_R}$	Au glissement $F_8 = \frac{E^V}{E^H} l$ $g\phi$
G + 1.5 Q1	4.10	4.48

Conclusion : Les coefficients sont satisfaisants

III.8.1.2 Vérification de la capacité portante du sol

III.8.1.2.1 Au niveau de l'assise en enrochement

$$\alpha_{adm} = 60 \text{ t/m}^2$$

Pour une assise en enrochement la contrainte admissible est inférieure en égale à 60 t/m²

$$E_v = 43.62 \text{ t/ml}, F_h = 6.78 \text{ t/ml}, M_{ren} = 104.31 \text{ t.m/ml}, M_{st} = 25.44 \text{ t.m/ml}$$

$$\text{L'excentricité : } e = \frac{104.31 - 25.44}{43.62} = 1.80 \text{ m}$$

$$B' = 3.60 \text{ m}$$

$$\text{D'où la contrainte développée dans le sol est } \sigma_s = 43.62 / 3.6 = 12.95 \text{ t/m}^2$$

En tenant compte de l'inclinaison de la résultante des forces, la contrainte admissible sera de :

$$\sigma_a = \sigma_{ax} e^{(-\delta)}$$

$$\text{Avec } \delta = \text{tg}^{-1} \frac{E_h}{H_v}, \delta = 8.83^\circ (0.15^{rd})$$

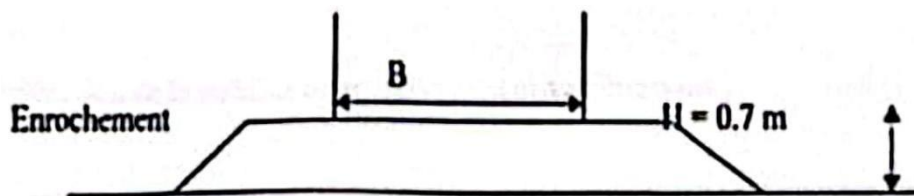
$$\text{Donc } \sigma_{a'} = 51.64 \text{ t/m}^2, \text{ d'où } \sigma_s = 12.95 \text{ t/m}^2 \text{ inférieure à } \sigma_{a'} = 51.64 \text{ t/m}^2$$

III.8.1.2.2 Au niveau du sol de fondation (sol support)

$$\sigma_{a'} = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_p \cdot S_p \cdot i_p + S_a \cdot i \cdot N + Y \cdot C + S_c \cdot i \cdot d_c \cdot C \quad \text{Équation IV-3}$$

Pour $\phi = 30^\circ$ on a

$$\alpha_{adm} = 28 \text{ t/m}^2$$



$$FZ = 43.62 + 1.10 \times 0.7 = 49.39 \text{ t}$$

$$B' = 3.36 + 0.80 = 4.16$$

$$\Sigma s = \frac{44.39}{4.16} = 10.67 \text{ t/m}^2$$

$$\sigma_{a'} = \sigma_a \times e^{-\delta} , \delta = \text{tg}^{-1} \frac{F_x}{F_z} = 8.83^\circ.$$

Donc $\sigma_{a'} = 24.01 \text{ t/m}^2$, d'où $\sigma_a = 10.67 \text{ t/m}^2 < \sigma_{a'} = 24.01 \text{ t/m}^2$

III.8.2 Cas dynamique avec le séisme

Tableau IV-20 : récapitulatif des forces (cas dynamique)

EFFORTS	EV(1/m)	E(1m)	XG(m)	YG(m)	Mstab (1m/ml)	Mrenv (tm/ml)
---------	---------	-------	-------	-------	---------------	---------------

Charges Permanents : Séisme Ascendant

Poids propre du mur.....g1	36,98	0	2,22	3,41	82	0
Séisme S1	0	10	0	3,41	0	34,05
Poussée des terres .....g2	3,84	6,07	4,36	2,6	16,74	15,8
Poussée hydrodynamique...g3	0	4,49	0	168	0	7,54

Charges d'exploitations : Séisme Ascendant

Surcharges.....q1	1,86	2,52	4,26	3,23	7,93	8,15
Amarrage q1	0	1	0	6	0	6

G = g1 + g2 + g3	40,82	10,55			98,75	23,34
Q1 = q1 + q2	1,86	3,52			7,93	14,15

Combinaison G +Qi : séisme Ascendant

G + Q1 + S1	42,68	24,07			106,68	71,53
-------------	-------	-------	--	--	--------	-------

III.8.2.1 Vérification de la stabilité au renversement et au glissement

Tableau IV-21 : Coefficient de sécurité (cas dynamique)

Coefficient de sécurité	Au renversement $F_1 = \frac{M_S}{M_R}$	Au glissement $F_8 = \frac{E^V}{E^H} l$ $g\varphi$
G + Q1 + S1	1,49	1,34

Conclusion : Donc les coefficients de sécurité sont satisfaisants

III.8.2.2 Vérification de la capacité portante du sol

- **Au niveau de l'assise en enrochement**

$$\sigma_{adm} = 90 \text{ t/m}^2$$

Pour une assise en enrochement la contrainte admissible est inférieure ou égale à $60 \text{ t/m} \cdot 100 \leq 9 \text{ m}^2$.

$$E_v = 42.18 \text{ t/ml}, F_h = 24.04 \text{ t/ml}, M_{ren} = 106.68 \text{ t.m/ml}, M_{st} = 71.53 \text{ t.m/ml}$$

$$\text{L'excentricité : } e = \frac{106.68 - 71.53}{42.18} = 0.83 \text{ m}$$

$$B' = 1.66 \text{ m}$$

D'où la contrainte développée dans le sol est $\sigma_s = 25.04 \text{ t/m}^2$

En tenant compte de l'inclinaison de la résultante des forces, la contrainte admissible sera de :

$$\sigma_{a'} = \sigma_a \times e^{-\delta}, \quad \delta = \text{tg}^{-1} \frac{E_h}{E_v}, \quad \delta = 29.71^\circ (0.518 \text{ rad}).$$

Donc $\sigma_{a'} = 53.62 \text{ t/m}^2$, d'où $\sigma_s = 25.04 \text{ t/m}^2$

- **Au niveau du sol de fondation**

$$\sigma_{adm} = 1.5 \times 28 = 42 \text{ t/m}^2$$

$$F_z = 42.68 - 1.1 \times 0.7 = 45.45 \text{ t}$$

$$B' = 1.66 \div 0.80 = 2.46$$

$$\sigma_s = \frac{43.45}{2.46} = 17.66 \text{ t/m}^2$$

$$\sigma_{a'} = \sigma_a \times e^{-\delta}, \quad \delta = \text{tg}^{-1} \frac{F_x}{F_z}, \quad \delta = 28.98^\circ$$

Donc $\sigma_{a'} = 25.47 \text{ t/m}^2$. D'où $\sigma_s = 17.66 \text{ t/m}^2 < \sigma_{a'} = 25.47 \text{ t/m}^2$

III.9 La proposition des variantes

L'aménagement principal du port de Tamentfoust est prévu pour la plaisance, avec une capacité d'accueil d'au moins 80 embarcations, de 4 à 9 mètres de long, qui stationneront de manière permanente. Cependant, afin de conserver l'activité de pêche existante, une partie du port sera réservée à cette activité, pouvant accueillir 15 petits métiers.

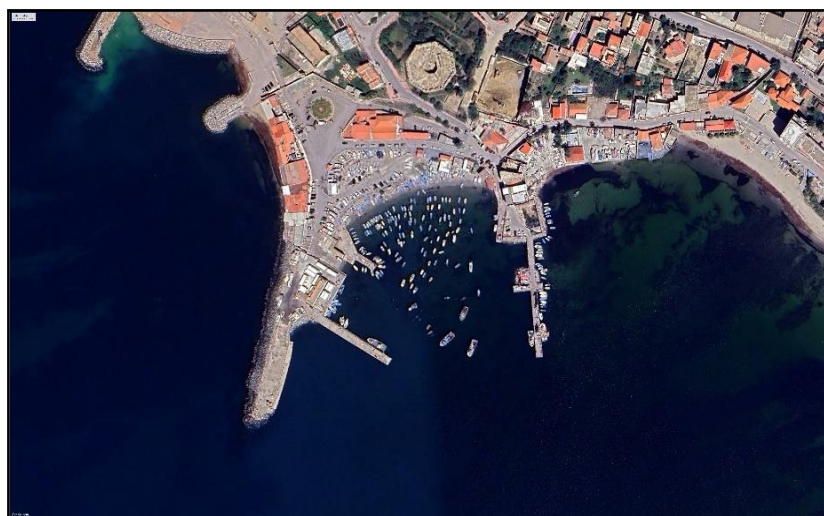


Figure IV-4 : image satellitaire de l'état actuel du port (source : google earth pro avril 2025)

III.9.1 Collecte et analyse des données relatives aux besoins de la plaisance

III.9.1.1 Capacité d'accueil

$N_p = 80$ unités, de longueurs situées entre 4 et 9m

N_p : embarcations séjournant en permanence

III.9.1.2 Linéaire des ouvrages d'accostage et d'amarrage

$$L = 3.50 * N_p = 3.50 * 80 = 280 \text{ ml}$$

III.9.1.3 Besoin en surface

- Surface du plan d'eau

$$SB = 110 * N_p = 110 * 80 = 8800 \text{ m}^2$$

- Surface des terre-pleins

- Parking: $S_p = 80 * 24 = 1920 \text{ m}^2$
- Zone de stockage pour les bateaux arrivant sur remorque : $S_s = 10 N_p = 800 \text{ m}^2$
- Surface (Dry berthing) bateaux hivernants : $S_h = 20 x N_p = 1600 \text{ m}^2$
- Surface pour les ateliers de réparation, les commerces et divers services : $S_r = 14 x N_p = 1120 \text{ m}^2$
- Cases de rangement pour l'outillage et les accessoires : $S_c = 6 x N_p = 6 x 80 = 480 \text{ m}^2$

Surface totale des terre-pleins nécessaires pour la plaisance : $S_{tp} = 5\,980 \text{ m}^2$

III.9.2 Collecte et analyse des données relatives aux besoins de la pêche

III.9.2.1 Besoins en linéaire de quai

III.9.2.1.1 Linéaire de quai nécessaire pour l'amarrage

Petites métiers $L = 15 * 4.5 = 67.5 = 68 \text{ ml}$

III.9.2.1.2 Linéaire pour le débarquement

Il est retenu un poste de 30 ml pour les besoins de débarquement

III.9.2.1.3 Linéaire pour l'avitaillement

Il est retenu un poste de 40 ml pour les besoins d'avitaillement en fuel

III.9.2.1.4 Linéaire pour la brigade maritime

Il est retenu un poste de 40 ml pour les besoins de la brigade maritime

III.9.2.2 Besoins en surfaces des terre-pleins

III.9.2.2.1 Cale de halage

Une cale de halage est prévue pour la mise à sec des petits métiers. La surface préconisée permet la mise à sec des (2/3) des petites embarcations de pêche, soit environ 10 petits métiers. En considérant une surface de 40 m² par embarcation, les besoins en terre-pleins sont estimés à **400 m²** (10 × 40 m²). Rangement d'outillages et d'accessoires.

Compte tenu de la demande exprimée la surface minimale retenue est la suivante :

Petit métier : 12 m² / unité

La surface totale dédiée aux cases des pêcheurs est de : 15 * 12 = 180 m²

III.9.2.2.2 Alimentation en énergie

Une surface de 100 m² est réservée pour la station d'avitaillement en carburant (NAFTAL), qui est implantée à 10 m de la magistrale du quai d'avitaillement.

III.9.2.2.3 Bâtiment administratif

Une surface d'environ 150 m² est réservée pour le bloc administratif du port.

III.9.2.2.4 Surface parking

Une surface de 24 m² est attribuée à chaque véhicule, en supposant qu'il y ait un véhicule par embarcation au minimum. La surface totale à réserver s'élève donc à **360 m²** (15 × 24 m²).

III.9.2.2.5 Surfaces diverses

Pour les surfaces destinées au poste de police, à la protection civile, à la brigade maritime et à la douane, une surface d'environ 800 m² doit être prévue.

• Récapitulatif des besoins pour l'aménagement du port

Tableau IV-22 : Récapitulatif des besoins

Besoins	Plai- sance	Pêche	Total
Quai ou appontement pour l'amarrage	280 ml	68 ml	348 ml
Quai d'avitaillement	40 ml		40 ml
Quai pour la brigade maritime	40 ml		40 ml
Quai pour de débarquement	..../....	30 ml	30 ml
Surface pour fabrique de glace	50 m ²		50 m ²
Surface pour réparation et entretien (pp)	1120 m ²	400 m ²	1520 m ²
Surface pour rangement d'outillage et accessoires	480 m	180 m	660 m ²
Surface pour l'alimentation en fuel	100m ²		100 m ²
Bâtiment administratif	150 m ²		150 m ²
Police - Brigade maritime - Protection civile - Douanas	800 m ²		800 m ²
Parking	1920m ²	360 m ²	2280 m ²
Voierie (circulation)	800 m ²		800 m ²
Zone astreinte pour activité de plaisances	3000 m ²	..../.....	30000 m ²

Pour récapituler, avons besoin d'un :

- ✓ Totale linéaire d'accostage de L=458 ml
- ✓ Total de surface terre-pleins de 9360m².

III.9.3 Les variantes proposées

III.9.3.1 Description des variantes

III.9.3.1.1 Variante 01

❖ Ouvrages de protection

Une jetée principale d'environ 80 mètres de longueur est fondée entre -4 m et -5 m, et est reliée au môle A de 105 mètres de long, fondé à une profondeur de -3,50 m.

❖ Ouvrages d'accostage

- Un quai de 125 mètres de long situé sur la jetée principale, fondé à -3,50 m, destiné à l'accueil des unités de pêche.
- Un quai de 25 mètres de long jouxtant la cale de halage, fondé à -3,50 m, destiné aux unités de plaisance.
- Deux quais de 42 mètres et 40 mètres de long, séparés par un appontement, fondés à -3,50 m, destinés aux unités de plaisance d'une longueur de 6 mètres.
- Un appontement flottant de 40 mètres de long, destiné aux unités de plaisance de 6 mètres de long.
- Un quai de 30 mètres de long, fondé à -3,50 m, destiné aux unités de plaisance de 6 mètres de long.
- Une mole constituée de :

- Un quai de 70 mètres de long, fondé à -3,50 m, destiné aux unités de plaisance de 8 mètres de long.
 - Un quai de plaisance de 25 mètres de long, fondé à -3,50 m.
 - Un quai de 63 mètres de long, fondé à -3,50 m, destiné aux unités de plaisance de 10 mètres de long.
- Une cale de halage pour la mise à sec des embarcations.

III.9.3.1.2 Variante 2**❖ Ouvrages de protection**

- D'une jetée principale d'environ 120 ml de longueur fondée entre -4 m et -5 m, rattachée au môle A de 115 ml fondée à une profondeur de - 3.50 m.

❖ Ouvrages d'accostage

- D'un quai de 180 ml situé sur la jetée principale, fondé à -3.50 m, accostable par les unités de la pêche.
- D'un quai de 20 ml jouxtant la cale de halage, fondé à -3.50m destiné pour les unités de plaisance.
- De deux quais de 42 m et 32 m séparés par un appontement ; fondé à -3.5 m, destiné pour les unités de plaisance de 6 m de longueur.
- D'un appontement flottant de 40 ml, destiné pour les unités de plaisance de 6 mètres de longueur.
- D'un môle B constitué :
 - D'un quai de plaisance de 57 ml, fondé à -3.50 m. destiné pour les embarcations de 6 m de longueur.
 - D'un quai de plaisance de 47 ml. Fondé à -3.50 m, destiné pour les embarcations de 6 m de longueur,
- D'un appontement flottant de 60 ml, destiné pour les unités de plaisance de 8 mètre de longueur.
- D'un appontement flottant de 60 ml, destiné pour les unités de plaisance de 10 mètres de longueur.
- Des quais situés entre les appontements d'environ 90 ml.
- De deux cales de halage pour la mise à sec des embarcations

III.9.3.1.3 Variante 03

Cette variante prend en considération dans l'aménagement du port de Tamentfoust la zone réservée aux autorités militaires. Elle est constituée de deux zones distinctes A et B.

✓ **Zone A : zone militaire**❖ **Ouvrages de protection**

D'un prolongement de la jetée existante d'environ 120 ml de longueur, fondée entre -3 m et -6 m. La longueur totale de la jetée principale devient alors de 185 ml.

❖ **Ouvrages d'accostage**

- D'un quai de 90 ml situé sur la jetée principale, fondé à -3.50 m, accostable par les unités de la défense.
- D'un quai de 174 ml situé sur le môle A, séparant la zone A de la zone B.

❖ **Ouvrages d'accostage existant**

- Un quai existant de 70 ml de longueur.

✓ **Zone B : port de pêche et de plaisance**❖ **Ouvrages de protection**

- Un seul ouvrage de protection (jetée principale) abrite les deux zones A et B.

❖ **Ouvrage d'accostage projetés**

- D'un quai de 125 ml fondé à -3.50 m situé sur le môle A, communiquons aux trois appontements qui lui sont greffés.
- D'un appontement flottant de 30 ml destiné pour les unités de plaisance de 6 mètres de longueur.
- D'un appontement flottant de 40 ml destiné pour les unités de plaisance de 6 mètres de longueur.
- D'un appontement flottant de 50 ml destiné pour les unités de plaisance de 6 mètres de longueur.
- D'un quai de 97 ml, fondé à -3.50 m, accostable par les unités de la pêche.
- D'un môle B, constitué de 90 ml linéaire de quai fondé à 3.50 m.
- D'un appontement flottant de 50 ml destiné pour les unités de plaisance de 8 mètres de longueur.
- De trois quais de 25 ml, 40 et 30 ml séparés par deux appontements, fondé à -3.50 m.
- D'une cale de halage pour la mise d/sec des embarcations.
- D'un appontement flottant de 60 ml destiné pour les unités de plaisance de 10 mètres de longueur.

III.9.3.2 Structure des ouvrages d'accostage

Les ouvrages d'accostage proposés comprennent des quais en blocs et des appontements flottants.

❖ **Quais en blocs**

Dans le cadre du nouvel aménagement, des quais fondés à -3,50 m sont projetés. Leur structure se compose de :

- Un empilement de trois (03) blocs en forme de "I". Ces piles de blocs sont disposées de manière jointive, créant des évidements qui seront remplis d'enrochements de catégories (1-15 kg). Le quai est fondé sur une assise en enrochements, préalablement réglée par une couche de ballast (20-40 mm).
- Un couronnement en béton armé, soutenu par les piles de blocs.
- Un remblai en tout-venant de carrière (0-500 kg) situé à l'arrière du quai.

❖ Appontements

Pour répondre à l'amarrage des embarcations et plaisance, des appontements flottants sont projetés dans les trois variantes 1 ; 2 et 3.

Ces appontements ont une largeur de 3 m et sont implantés dans les bassins à -3.50 m. Le système de fixation est assuré par des chaînes fixés à des corps morts.

III.9.4 Etude d'agitation

La houle de projet utilisée pour mener une étude d'agitation est généralement une houle de faible période de retour.

Dans le cadre de cette étude, les résultats de réfraction obtenus par simulation numérique dans les directions dominantes ont permis d'identifier la houle la moins réfractée, donc la plus susceptible de générer de l'agitation sur le site d'étude.

Cependant, la précision des résultats diminue à l'approche du littoral, notamment en zones côtières peu profondes. Par conséquent, le calcul de la réfraction a été repris à partir de la courbe bathymétrique des -15 m, à l'aide du module PMS de MIKE 21.

À cette profondeur, les caractéristiques de la houle (réfractée) considérées sont :

- **Direction** : 270°N
- **Période de pointe (Tp)** : 12 s
- **Hauteur significative (Hs)** : 3,6 m

Le calcul de réfraction par MIKE 21 a été effectué pour le site dans son état actuel, ainsi que pour la variante d'aménagement proposée.

III.9.4.1 Modélisation des épures

Le passage à une résolution numérique à l'intérieur du domaine d'étude nécessite au préalable de spécifier les paramètres suivants :

❖ Discrétisation spatio-temporelle

Afin d'assurer la convergence et la stabilité des calculs numériques, nous avons choisi pour la discrétisation de l'espace et du temps des pas comme suit :

Pas d'espace : $\Delta x = \Delta y = 2.5\text{m}$

Pas de temps : $\Delta t = 0.2\text{s}$

A signaler que suivant les recommandations sur l'utilisation du module MIKE21BW, une durée de simulation de 15 minutes (temps physique, non temps de calcul machine) est largement suffisante pour atteindre un régime bien établi.

❖ Effets de réflexion et de dissipation des ouvrages portuaires

Coefficient de porosité (inversement proportionnel à la réflexion (ε))

$\varepsilon = 0.3$ pour les appontements;

$\varepsilon = 0.74$ et 0.81 pour les ouvrages à talus, suivant la taille des blocs;

$\varepsilon = 1e * 1 * 0.95$ pour les ouvrages verticaux;

$\varepsilon = 1$ pour le plan d'eau (transmission totale).

Coefficient de dissipation C (artifice numérique sponge gamma) : Cet artifice numérique permet de prendre en considération la dissipation d'énergie de la houle à l'approche d'un ouvrage à talus, plage, etc...

Dans notre cas, deux couches de sponges (amortisseurs numériques) sont utilisées. L'une à dix nœuds et l'autre à cinq nœuds ce, à partir de la frontière solide avec l'eau.

L'expression générale donnant la série des coefficients de dissipation est :

$$C = a r^{i-1} \quad \text{avec : } i=1, N \text{ et ailleurs (plan d'eau) } C = 1$$

Où : a et r sont des constantes et N est le nombre de nœuds considérés.

❖ Résultats et analyse

Les résultats de simulation de l'état d'agitation des différents cas étudiés sont illustrés par les figures IV-4, IV-5, IV-6 et IV-7 respectivement pour l'état actuel et les variantes proposées.

La simulation de l'état actuel montre que le site est assez bien abrité par sa configuration géométrique (cap) et l'ouvrage de protection existant (la jetée). Le niveau d'agitation dans la zone d'étude est inférieur à 0.4 m (agitation résiduelle).

Les résultats de la variante 1 montrent que l'état d'agitation du futur bassin portuaire est acceptable (inférieure à 0.4 m avec des zones très calmes inférieure à 0.2 m).

Il est à noter également la présence de petites zones de gonflement de la houle devant la jetée en enrochements.

Les mêmes observations notées pour la variante 1, restent globalement valables pour la variante 2 (figure IV-6). Au niveau du port militaire l'agitation au niveau du quai projeté se voit accrue pour atteindre un niveau d'agitation de l'ordre de 0.7 m.

Quant à la variante 3 (figure IV-7), le prolongement de la jetée existante permet d'avoir des niveaux d'agitation relativement acceptables dans les deux bassins portuaires (militaire et projeté).

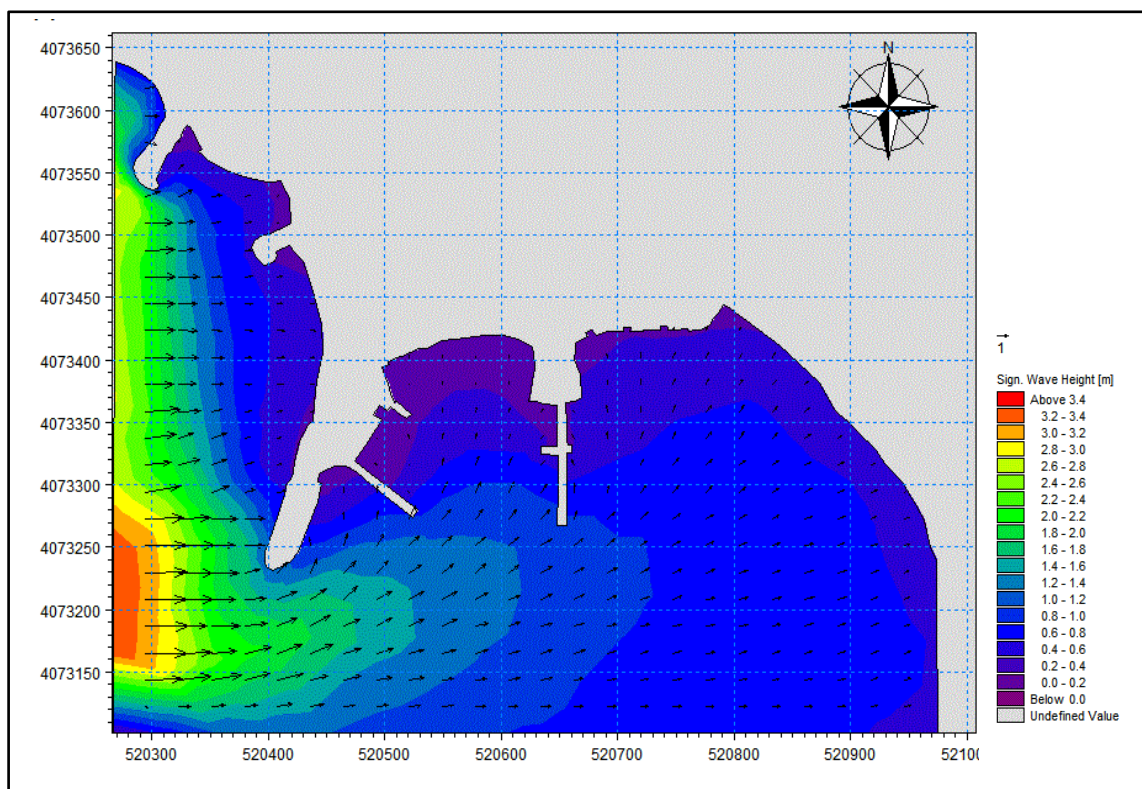


Figure IV-5 : État d'agitation (houle incidente : dir. 270°N T=12s) pour l'état actuel

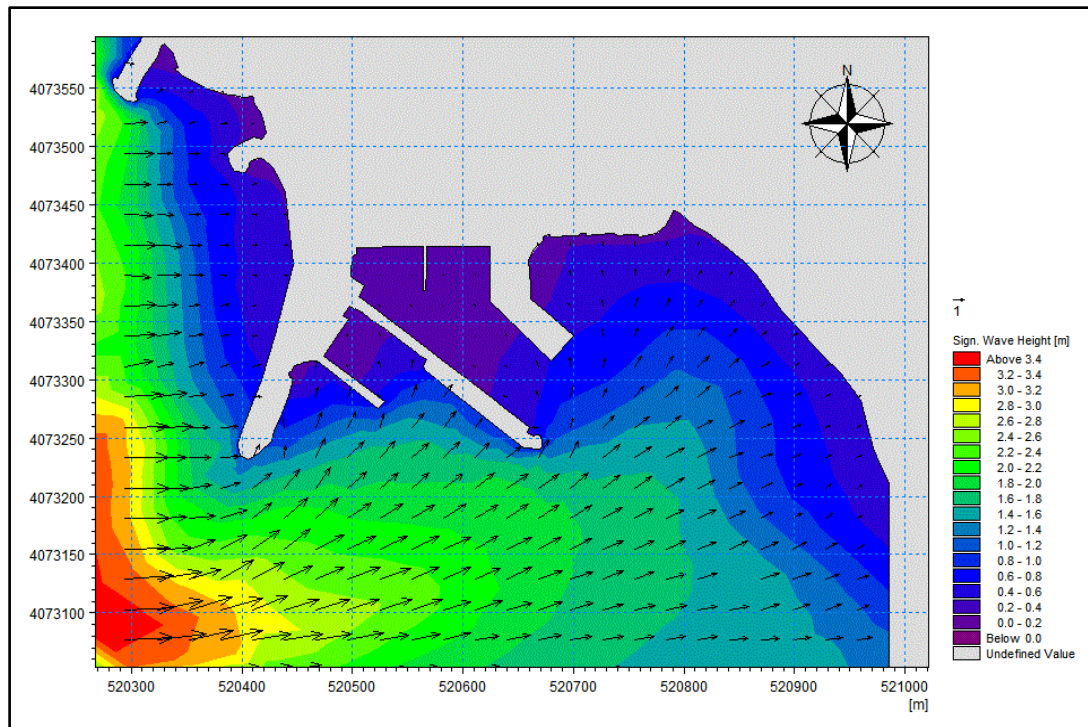


Figure IV-6 : État d'agitation (houle incidente : dir. 270°N T=12s) pour la variante 1

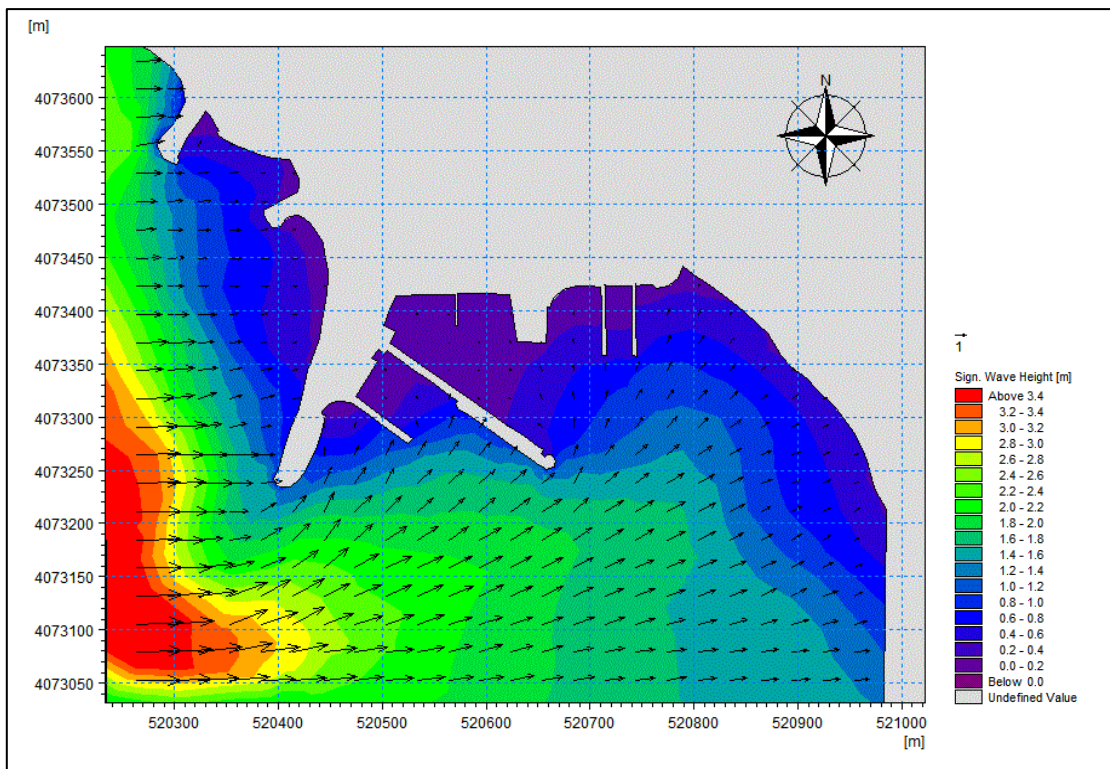


Figure IV-7 : État d'agitation (houle incidente : dir. 270°N T=12s) pour la variante 2

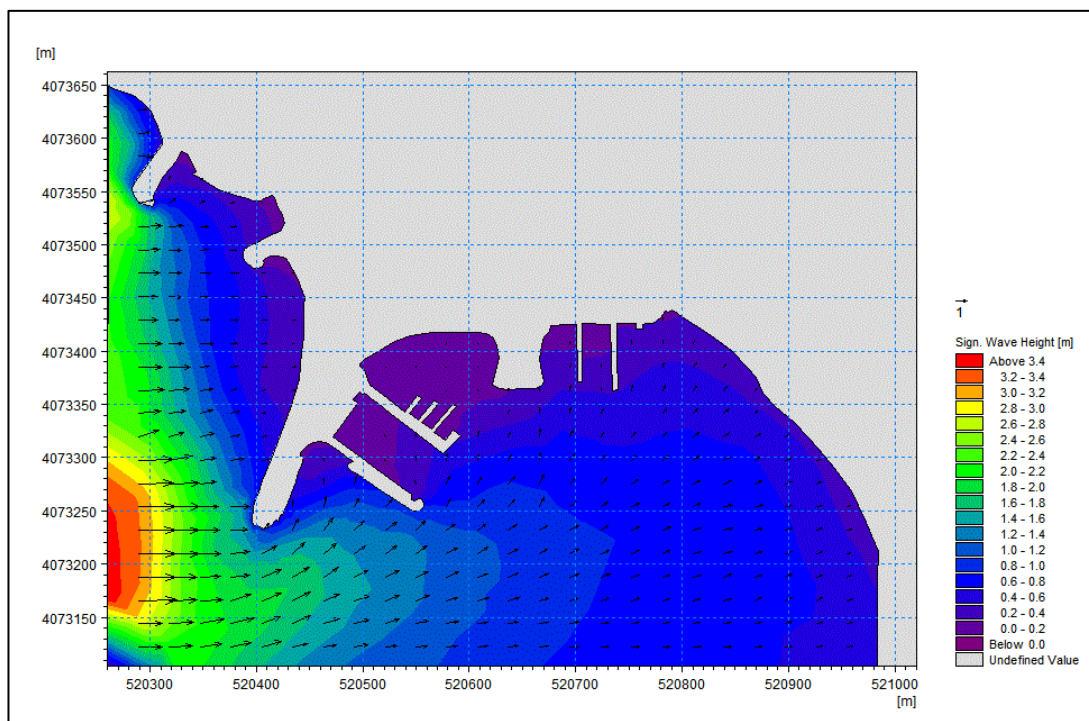


Figure IV-8 : État d'agitation (houle incidente : dir. 270°N T=12s) pour la variante 3

III.9.4.2 Conclusion

Après un examen minutieux des résultats de la simulation numérique de l'agitation de la houle, on peut conclure ce qui suit

Tableau IV-23 : Récapitulatif des simulation et l'agitation

Désignation		Variante 1	Variante 2	Variante 3
Nouveau bassin Projeté	Quai	$hr \leq 0.20m$	$hr \leq 0.20m$	$hr \leq 0.20m$
	Quai	$hr \leq 0.40m$	$hr \leq 0.20m$	$hr \leq 0.20m$
	Appontements	$hr \leq 0.20m$	$hr \leq 0.40m$	$hr \leq 0.40m$
	Mole	$hr \leq 0.40m$	$hr \leq 0.20m$	$hr \leq 0.20m$
L'ancien bassin militaire		$0,40m \leq hr \leq 0.60m$	$0,40m \leq hr \leq 0.60m$	$hr \leq 0.20m$
Au niveau de la passe d'entrée		$hr \leq 0.40m$	$hr \leq 0.40m$	$hr \leq 0.40m$

hr : houle résiduelle

Les résultats ci-dessus montrent que les conditions d'agitation au niveau du futur port de Tamentfoust sont en générale acceptables.

L'agitation résiduelle montrent qu'au niveau des trois variantes est semblables sauf qu'au niveau de l'ancien bassin réservé pour les autorités militaires ou l'agitation est plus importante pour les variantes 1 et 2, la variante n°3 offre à ce niveau une bonne protection.

III.9.5 Cout de réalisation de la variante

Sur la base des prix unitaires pratiqués par les entreprises nationales spécialisées dans les travaux maritimes et le métré, le coût de cette variante est estimé à :

- **Variante N°1** : 592 673 950 DA.
- **Variante N°2** : 870 956 400 DA.
- **Variante N°3** : 940 228 146 DA.

Tableau IV-24 : la comparaison des prix par section de chaque variante

Désignation	Variante 01	Variante 02	Variante 03
Installation de chantier	32 765 580	32 765 580	32 765 580
Terrassement - Remblai pour terre-pleins	34 839 000	87 000 000	90 000 000
Ouvrages de protection	95 046 600	10 347 500	116 240 000
Ouvrages d'accostage	21 764 850	223 809 600	263 823 400
Cale de halage	7 353 400	14 542 500	14 542 500
Revetements et protection des terre-pleins	29 592 000	53 472 000	48 228 900
Dragage - décortage	83 465 000	194 340 000	2336 000

III.9.6 Comparaison des variantes et recommandations

A la lumière des résultats précédents, une étude comparative des variantes a été établie sur la base des critères suivants :

- L'agitation au niveau des ouvrages d'accostage.
- Agitation dans le bassin.
- Agitation dans le bassin militaire.
- Coûts de construction.
- Capacité d'accueil.
- Prise en compte de la zone militaire.

Les notations A, B, C sont attribuées à chacun des critères cités ci-dessus. Ces notations correspondent aux qualifications suivantes :

- ✓ A : cas favorable
- ✓ B : cas peu favorable
- ✓ C : cas défavorable

Tableau IV-25 : La comparaison des prix par section

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
L'agitation au niveau des ouvrages d'accostage	B	B	B
Agitation dans le bassin	B	A	A
Agitation dans le bassin militaire	C	C	A
Coût de construction	A	B	C
Capacité d'accueil	C	B	A
Prise en compte de la zone militaire	C	C	A
Notation globale	1 A + 2 B + 3 C	1 A + 3 B + 2 C	4 A + 1 B + 1 C

Sur la base des critères sus cités, la variante n°1 est la moins avantageuse par rapport aux deux autres variantes sauf en ce qui concerne le coût de réalisation, elle est la moins chère.

La variante n°2, plus coûteuse que la variante n° 1 (+47%), présente également des avantages non négligeables du point de vue de l'étendue des surfaces des terre-pleins et du linéaire accostable disponible. Aussi les conditions d'agitation restent acceptables dans le bassin du port et peu favorable dans le bassin de la zone militaires.

La variante n°3 est la plus avantageuse par rapport aux autres variantes (V1, V2), malgré son coût de réalisation élevé (+05%/V2 et +59%/V1). Elle présente des avantages très appréciables notamment dans la prise en compte de la zone militaire dans l'aménagement du port de Tamentfouss. L'amélioration des conditions de l'agitation dans cette zone et une grande capacité d'accueil des embarcations dans le port.

Sur la base de ces critères, la variante n°3 se distingue favorablement par rapport aux variantes 1 et 2. A cet effet. Le Laboratoire d'Etudes Maritimes recommande la variante n°3 pour ces avantages et met ainsi à la disposition de l'Administration l'ensemble des éléments lui permettant de fixer son choix sur la variante à retenir et à étudier en détail.

III.10 Conclusion

Ce chapitre présente le dimensionnement des digues à talus du port de Tamenfoust, en comparant les méthodes de Hudson et Van der Meer. Cette dernière, plus complète, permet un dimensionnement plus fiable face aux houles. Les calculs ont montré que les structures conçues sont stables, même en conditions sismiques. Les simulations MIKE 21 confirment un bon niveau de protection contre l'agitation, notamment pour la variante 3, qui distingue par sa performance. Ce chapitre valide donc la faisabilité technique des ouvrages de protection proposés.

Chapitre V :
L'aménagement de la
façade maritime

IV.1 Introduction

La façade maritime de Tamentfoust constitue une interface stratégique entre un environnement marin dynamique et une zone urbaine en croissance. Toutefois, cet espace littoral reste sous-valorisé et fait face à des pressions croissantes. Ce chapitre présente une stratégie d'aménagement durable et multifonctionnel, par la création d'un espace littoral, public attractif, articulant l'efficacité et l'usages fonctionnels, la résilience et la protection du milieu marin conforme aux orientations du SNAT (Schéma National d'Aménagement du Territoire), aux principes de l'Agenda 2030 et aux normes HQE (Haute Qualité Environnementale).

L'objectif est de valoriser les activités humaines et touristiques, de développer l'économie locale et de préserver l'environnement côtier fragile.

IV.2 Objectif de l'aménagement

Cet aménagement vise à répondre à un ensemble de besoins sur les plans social, environnemental et culturel, à travers une approche intégrée et durable. Il s'agit de concevoir un espace public cohérent, fonctionnel et respectueux de l'environnement. En Assurant le Minimalisme écologique, Multifonctionnalité des espaces et accessibilité universelle

Trois besoins majeurs ont guidé la conception :

- Renforcement des activités sociales, à travers la création d'un espace de loisirs, un musée, une cafétéria, un stade polyvalent, et la zone de baignade, en s'appuyant sur l'attractivité. La conception des espaces publics qui offrent des choses à faire et des activités humaines attire les personnes. Selon Gehl (2011), il est donc essentiel de proposer des actions, des activités et des éléments d'interaction, au-delà des simples possibilités de marcher ou de s'asseoir.
- Reconnexion au milieu marin, suivant les principes de la biophilie urbaine (Wilson, 1984). La conception d'une promenade littorale, une terrasse flottante et la mise en place de végétations rendent la zone plus vivable, mettant en valeur le charme de la mer sans avoir de mauvaises conséquences sur la nature.
- Valorisation de l'identité locale : Inspiré de la présence d'un port de pêche et de loisirs à proximité, la conception d'un marché couvert de poissons crée un lien social et culturel pour la zone. Afin de préserver le patrimoine et assurer la modernité en même temp. (Choay, 1992)

IV.3 Contraintes identifiées sur la zone littorale

Notre zone d'étude (Tamentfoust), comme de nombreuses zones côtières méditerranéennes, est soumise à un ensemble de contraintes réglementaires, environnementales et territoriales qui influencent fortement toute démarche d'aménagement durable.

Tout d'abord, la réglementation en vigueur impose des restrictions strictes à l'urbanisation. En particulier, la loi n°02-02 du 5 février 2002 relative à la protection et à la valorisation du littoral, interdit toute construction dans une bande de 100 mètres à partir de la limite du rivage, Cette distance peut être étendue à 300 mètres dans les zones sensibles pour protéger les écosystèmes côtiers, à prévenir les risques naturels tels que la submersion marine, et à préserver le caractère naturel du littoral. Cette réglementation s'inscrit également dans le cadre plus général de la loi n°90-29 du 1er décembre 1990 relative à l'aménagement et à l'urbanisme, qui promeut une gestion rationnelle et durable de l'espace territorial et aussi, la loi n°01-19 du 12 décembre 2001, qui définit les orientations générales en matière d'aménagement durable du territoire national, notamment dans les zones littorales.

Par ailleurs, la pression de la compétition entre les usages résidentiels, touristiques, agricoles et de conservation écologique constitue une contrainte importante. Cette concurrence peut freiner l'implantation d'activités économiques durables, comme l'agriculture littorale ou la pêche artisanale, souvent en raison de la rareté de la propriété du sol.

La vulnérabilité environnementale représente une autre contrainte majeure. Les phénomènes d'érosion côtière, de submersion marine, et les événements climatiques extrêmes, de plus en plus fréquents en Méditerranée, affectent la stabilité des infrastructures et la viabilité des projets en zone littorale. À cela s'ajoute la présence d'espaces naturels remarquables qui nécessitent des mesures de protection, limitant de fait les possibilités d'aménagement.

La gouvernance du littoral en Algérie reste un défi. À cause du chevauchement des compétences entre l'État, les collectivités locales et les usagers. Le Plan National d'Aménagement du Littoral (PNAL) a été mis en place pour organiser cette coordination, mais son application est limitée par le manque de financement et de moyens concrets (Kacemi, 2004). Les outils comme les SIG, pourtant essentiels pour le suivi et la gestion des risques, sont encore peu utilisés à cause de problèmes techniques et de formation (Gourmelon et al., 2019). Une coordination efficace est pourtant nécessaire pour gérer durablement les zones côtières

Donc, toute proposition d'aménagement sur la façade maritime de Tamentfoust doit nécessairement tenir compte de ces contraintes multiples, en adoptant des approches intégrées, résilientes et respectueuses des spécificités du milieu littoral.

IV.4 Conception

On s'inspirons de la logique de triple résilience : (écologique, sociale, économique) définie par Toudert & Brakni (2020). L'aménagement proposé repose sur une organisation harmonieuse de plusieurs éléments intégrés à l'espace côtier, chacun répondant à une fonction précise et complémentaire.

- **AutoCAD**

Dans le cadre de ce projet, le logiciel AutoCAD a été utilisé pour la réalisation des plans techniques en 2D. 1. AutoCAD est un logiciel de dessin assisté par ordinateur (DAO), Développé par Autodesk et lancé en 1982, il permet la création précise de géométries vectorielles grâce au système de coordonnées cartésiennes (World Coordinate System) avec une précision millimétrique, les formats utilisés .dwg et .dxf, assurant une bonne interopérabilité avec d'autres outils techniques comme les systèmes SIG ou les logiciels de simulation hydraulique. Ce software est largement utilisé dans les domaines de l'ingénierie, de l'urbanisation et de l'infrastructure côtière (Autodesk, 2023).

- **Représentation 2D sur AutoCAD**

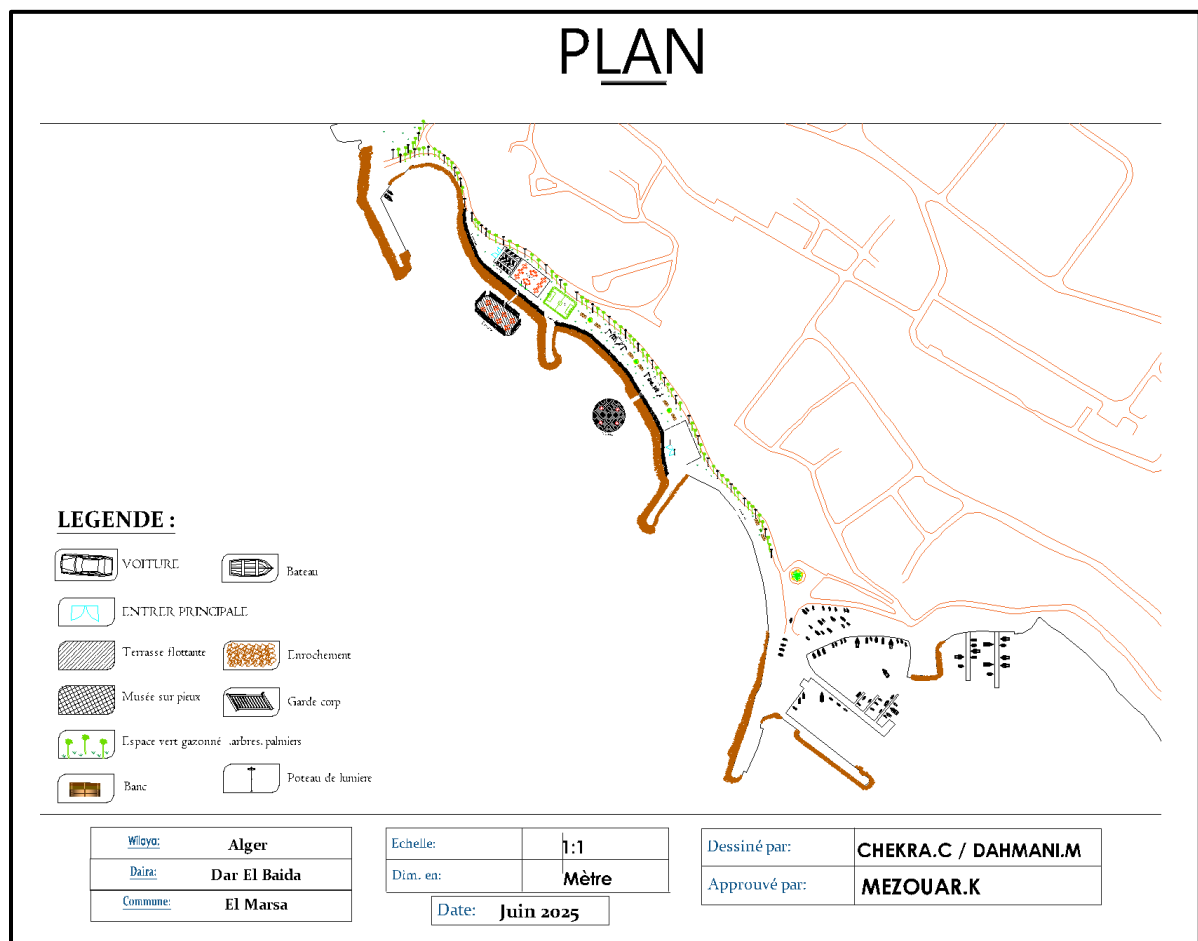


Figure V-1 : Plan globale de l'aménagement sur AutoCAD

IV.5 Description détaillé des composantes

IV.5.1 Cafétéria avec terrasse flottante

Un espace de restauration au bord de la mer, d'une surface de 300 m² (20 m × 15 m), se compose d'une cuisine, d'une salle de restauration et de sanitaires. Elle est prolongée par une terrasse flottante de 96 m² (12 m × 8 m), accessible par une passerelle en bois (NF EN 335). L'architecture privilégie les matériaux naturels (bois, pierre, acier galvanisé) et une intégration paysagère douce, tout en assurant la résistance aux conditions marines. (NF EN 1992-1-1)

Le bâtiment repose sur une structure en béton armé marin (C35/45) ou, alternativement, en acier galvanisé, avec une hauteur variant de 2,5 à 3 mètres. Le toit à pente $\geq 10\%$ est réalisé en tôle aluminium, ou bac acier anti-corrosion, tandis que les murs extérieurs (épaisseur 20–25 cm) sont enduits et protégés par une peinture marine ou un bardage composite. De grandes baies vitrées (3×2 m) en aluminium thermolaqué et vitrage feuilleté assurent l'ouverture vers la mer et l'apport de lumière naturelle. Le sol intérieur est revêtu de carrelage antidérapant ou de béton lissé, garantissant sécurité et confort. La structure repose sur une fondation adaptée aux sols sableux, avec une dalle continue en béton armé d'une profondeur de 60 à 100 cm, armée de cadres en HA10 ou HA12.

La terrasse flottante, conçue pour accueillir entre 10 et 15 tables (jusqu'à 40 personnes), repose sur un système modulaire de type FloatFlox en polyéthylène haute densité (PEHD). Le platelage est réalisé en bois composite (mélange bois/PVC), assurant durabilité et résistance à l'humidité. Elle s'élève à 0,5m au-dessus du niveau marin extrême et peut supporter une charge admissible de 500 kg/m², ce qui garantit sa sécurité d'usage en conditions normales. Un garde-corps en acier inoxydable longe l'ensemble de son périmètre (40 m), assurant la sécurité des usagers sans obstruer la vue sur la mer. (NF EN 1993-1-1). Elle est reliée à la cafétéria par une passerelle de 2 m de large sur 4 m de long, construite en bois traité ou métal galvanisé avec un plancher composite marin. L'inclinaison de la passerelle est adaptée aux variations de marée.

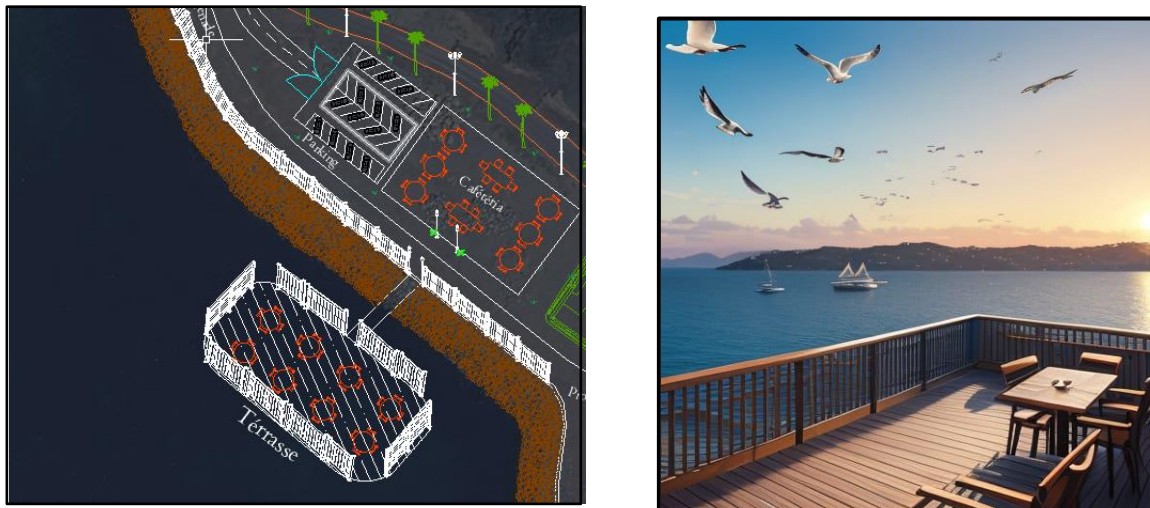


Figure V-2 : Coupe technique AutoCAD de la cafétéria, la terrasse flottante et le parking avec une image générée par le AI

IV.5.2 Petit stade de sport

Il s'agit d'un terrain de sport polyvalent destiné principalement aux jeunes. D'une surface de 660 m² soit (33m sur 20m), il peut accueillir des activités variées : mini-foot, jeux collectifs, entraînements libres, mais aussi des événements socioculturels.

Il est doté d'un revêtement souple et drainant, garantissant un confort d'usage et une bonne résistance aux intempéries (Normes FIFA Quality). Des gradins légers et une clôture haute en filet ou grillage métallique assurent la sécurité du public et le maintien des ballons à l'intérieur du terrain. Le choix des matériaux vise la durabilité, la facilité d'entretien et la conformité aux usages sportifs collectifs, dans un esprit de cohésion sociale et d'accessibilité (NF EN 1993-1-1).



Figure V-3 : Coupe technique AutoCAD du stade

IV.5.3 Promenade littorale aménagée

La promenade littorale constitue l'axe structurant de l'aménagement de la façade maritime. Elle longe toute la côte sur une distance de 500 mètres, combinant un cheminement piéton de 4 mètres de large et une bande cyclable de 2 mètres, séparée par une zone de sécurité.

Elle est conçue comme un espace public polyvalent, favorisant la marche, le jogging, le vélo, la contemplation du paysage. Des aires de pause sont aménagées tous les 50 mètres, équipées de bancs, d'éclairage solaire LED et de poubelles. (Règlement ERP)

L'élévation est portée à +1,5 m NGA pour anticiper les risques de submersion marine à l'horizon décennal. La structure repose sur un sol compacté, renforcé par des couches techniques de géotextile, grave naturelle ou recyclée, et revêtement de surface en béton désactivé ou pavés en béton, assurant une résistance mécanique et une esthétique côtière intégrée (NF EN 1997-1)



Figure V-4 : Coupe technique AutoCAD de la promenade et une image générée par AI

IV.5.4 Espaces de loisirs pour enfants

Deux aires de jeux sécurisées ont été intégrées à l'aménagement. Chaque aire occupe une surface de 160 m², comprenant des équipements, installés sur un sol sablonneux d'épaisseur 8 cm, conforme à la norme EN 1177 relative à l'absorption des chocs. Les aires sont entourées de zones végétalisées, avec des arbres d'ombrage, des palmiers, des fleurs, ainsi que du mobilier urbain (bancs en bois, poubelles, poteaux décoratifs).

Une clôture en bois délimite chaque aire pour garantir la sécurité des enfants tout en préservant une esthétique douce et naturelle. L'ensemble s'intègre dans une grande zone de loisirs gazonnée de 1200 m², en retrait de la route et agrémentée de plantations linéaires et d'éléments de protection visuelle.



Figure V-5 : Coupe technique AutoCAD de l'espace de loisirs

IV.5.5 Marché couvert de poissons

Le marché couvert, implanté à proximité immédiate du port de pêche, est conçu pour favoriser la vente directe des produits halieutiques par les pêcheurs locaux. Il s'agit d'un bâtiment fonctionnel de 600 m² (30 × 20 m), doté d'espaces dédiés à la réfrigération, au stockage, la gestion des déchets organiques et à une ventilation naturelle, assurant la fraîcheur et la qualité

des produits. On a privilégié des matériaux durables et résistants aux conditions marines, avec une structure en béton armé marin ou acier galvanisé, une toiture en tôle anti-corrosion à forte pente, et des ouvertures larges permettant une bonne aération naturelle. Le sol intérieur est conçu avec un revêtement antidérapant et des plans inclinés pour faciliter le nettoyage et le maintien des normes d'hygiène strictes.

Ce marché joue un rôle essentiel dans la dynamisation économique locale et la valorisation des savoir-faire traditionnels de la pêche.



Figure V-6 : Coupe technique AutoCAD du marché et une image générée par AI

IV.5.6 Musé maritime

Le musée maritime se présente sous la forme d'une structure circulaire implantée sur quatre pieux robustes (NF EN 1992-1-1), situés à environ 10 mètres du rivage. Surplombant la mer, il propose une expérience immersive et éducative centrée sur le patrimoine marin local.

Cette construction allie une architecture moderne à une résistance élevée aux contraintes environnementales côtières, avec l'utilisation de matériaux durables et adaptés, notamment du béton armé marin et de l'acier galvanisé.

Le bâtiment comprend des espaces d'exposition, une zone d'accueil, des vitrines, des supports interactifs, ainsi que des hublots au sol permettant l'observation directe de l'eau. Un grand lanterneau central vitré optimise la lumière naturelle, renforçant ainsi la dimension pédagogique et écologique du musée. Ce projet cocilie valorisation culturelle, sensibilisation envirenmentale et developpement touristique durable.

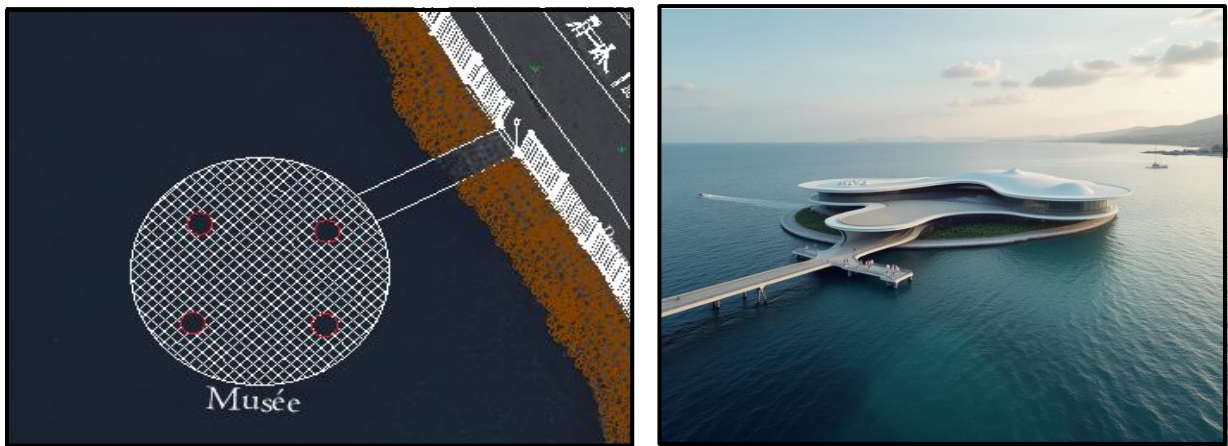


Figure V-7 : Coupe technique AutoCAD du musée et une image générée par AI

IV.5.7 Végétalisation et intégration écologique

Le projet intègre une stratégie de végétalisation adaptée aux conditions spécifiques du milieu littoral. La palette végétale se compose d'espèces tolérantes au sel et aux vents marins, telles que les palmiers, tamaris, agaves, lauriers-roses et un gazon rustique résistant à la salinité (NF P 90-322). Ces choix sont fondés sur des critères de résilience écologique, de faible besoin en entretien et de compatibilité avec les sols sableux.

Cette végétation remplit plusieurs fonctions complémentaires :

- **Fonction paysagère** : amélioration de la qualité visuelle du site, création d'ambiances naturelles et attractives le long des cheminements ;
- **Fonction environnementale** : réduction de l'érosion éolienne, fixation des sols sableux, et amélioration du microclimat local (réduction des îlots de chaleur, augmentation de l'humidité ambiante) ;
- **Fonction écologique** : renforcement de la biodiversité locale par l'attraction d'insectes pollinisateurs et d'espèces avifaunes.

Tableau V-1 : Tableau récapitulatif des composantes

Caféteria			
Elément	Dimension (m)	Matériaux	Détails
Surface	20 m × 15 m = 300 m ²	.....	incluant cuisine, salle, sanitaires
Hauteur	2.5 à 3 m	Béton armé marin (C35/45) ou acier galvanisé	Un niveau avec de grandes baies vitrés
Toiture	300 m ²	Tôle aluminium, zinc ou bac acier anti-corrosion	penne ≥ 10%
Murs extérieurs	Épaisseur 20–25 cm	peinture marine / bardage composite	Maçonnerie enduite
Ouvertures	Baies 3×2m	Aluminium thermolaqué + vitrage feuilleté	.....
Sol intérieur	.....	Carrelage antidérapant ou béton lissé	.....
Fondations	Sol sableaux/dur, profondeur 60 à 100 cm Largeur 40 a 60m ou plus	Dalle continue en béton armé, ferrailage double en fer HA10 ou HA12 en cadres	.....
Terrasse			
Elément	Dimension (m)	Matériaux	Détail
Surface	12 × 8 m = 96 m ²		suffisante pour 10-15 tables (40personnes)
Structure flottante	96 m ²	Polyéthylène haute densité (PEHD)	.....
Platelage	96 m ²	Bois composite (bois + PVC)	.....
Accès	Passerelle légère de 2 m de large × 4 m de longueur	Bois traité ou métal galvanisé, plancher composite marin	sécurisée, inclinée selon marée
Hauteur sous terrasse	0,50 m au-dessus du niveau marin extrême	.....	Système modulaire FloatFlox
Charge admissible	500 kg/m ²	.....	Charge admissible 500 kg/m ²
Garde-corps	Périmetre de la terrasse 2×(12+8)=40m	Acier inoxydable	.....
Stade			
Elément	Dimension (m)	Matériaux	Détails
Surface	33 × 20 m = 660 m ²	...	...
Revêtements	660 m ²	Gazon synthétique ou sol souple, Drainant	Entretien facile, usage public
Clôture	Hauteur: 4 à 6 m	Filet ou grillage en acier/fer maillage <10 cm	Sécurité et limitation des ballons, Conforme FIFA Quality

Promenade			
Élément	Dimension (m)	Matériaux	Détails
Largeur	4 m piétons +2 m cyclable	...	Zone de pause tous les 50 m (banc,LED,poubelle,..)
Longueur	Linéaire cotière de 500m	...	...
Élévation	+1,5 m NGA	...	Anticipe la submersion décennale
1er couche (en bas)	...	Sol existant compacté et stabilisé	...
2ème couche	De 150–200 g/m ²	Géotextile Polypropylène	anti-poussée
3ème couche	Couche de forme 15 à 25 cm	Grave naturelle ou recyclée, concassée 0/31	compacté à 95 %
Revêtement	Revêtement de sol 6 à 10 cm	Béton désactivé / pavés en béton	...
Bande de sécurité	50 cm entre le chemin et les garde-corps	...	...
Garde-corps	Hauter = 1,10 m	Inox 316L ou alu thermolaqué	espacement vertical ≤ 11 cm
Drainage	pente de 2 % vers mer	ou caniveau	transversal
Espace de loisirs			
Élément	Dimension (m)	Matériaux	Détails
Surface unitaire	80 × 20 m = 1200 m ² 1200-(160×2) = 880 m ²	Espace vert gazonné , arbres, palmiers, fleurs ..	Mené des bancs en bois, poteaux, poubelles ..
Zones périphériques	2 rectangles de 20 × 8 m = 160 m ²	8cm de sable avec bordures en bois	Mené des jeux publiques des enfants
Limite de la route	550m linéaire	Sol gazonné et végétalisé	Palmiers et poteaux le long de la route
Marché couvert			
Élément	Dimension (m)	Matériaux	Détails
Surface	30 × 20 m = 600 m ²	.....	Incluant chambres de réfrigération , storage ..
Hauteur	3.5 à 4 m	Béton armé marin (C35/45) ou acier galvanisé	Un niveau avec nombreux baies
Toiture	600 m ²	Tôle aluminium, zinc ou bac acier anti-corrosion	pente ≥ 10%
Murs extérieurs	Épaisseur 25–30 cm	peinture marine / bardage composite	Maçonnerie enduite
Ouvertures	Baies 4×4m	Aluminium thermolaqué + vitrage feuilleté	.....
Sol intérieur	.....	Carrelage antidérapant ou béton lissé	Plans inclinés pour nettoyage facile
Fondations	Sol sableaux/dur, profondeur 60 à 100 cm	Dalle continue en béton armé, ferrailage double en fer HA10 ou HA12 en cadres	.....

	Largeur 40 a 60m ou plus		
Stands de vente	20 à 25 box avec un couloir centrale	Comptoirs réfrigérés	Menés d'exits d'évacuation
Musé sur pieux			
Elément	Dimension (m)	Matériaux	Détails
Surface	$3.14 \times (16 \text{ m}/2)^2 = 201.06 \text{ m}^2$	...	incluant sections d'exhibition, reception..
Diamètre	16 m	...	...
Hauteur	3 to 3.5 m	Béton armé marin (C35/45) ou acier galvanisé	1 niveau et grand lanterneau central vitré
Troiture	201.06 m ² circulaire	Structure bois/métal et verre	penne $\geq 10\%$
Murs extérieurs	Épaisseur 25–30 cm	peinture marine / bardage composite	Maçonnerie enduite
Ouvertures	Baies 4×4m	Aluminium thermolaqué + vitrage feuilleté	.....
Sol intérieur	.....	Résine époxy antidérapante	Plans inclinés pour nettoyage facile
Fondations	6m Du pieux Enfoncé dans le sol (+3 m NGA libre)	Pieux marins Espacement de 4m	Installé sur une profondeur autour 8m (dépend de l'étude géotechnique)
Pieux	Longueur de 15 à 20 m Diamètre de 1.2 m	Béton armé résistant d'eau de mer Ø1.2 m	Longueur = 6m en sol + 8m en eau + 3m libre

IV.6 Analyse SWOT Structurée de l'Aménagement

L'analyse SWOT (strength, weakness, opportunity, threat) appliqué sur notre projet d'aménagement de Tamentfoust, nous permet d'identifier les atouts internes, les contraintes techniques, les dynamiques externes favorables et les risques environnementaux, afin de dégager des axes stratégiques d'action cohérents.

Le tableau V-2 met en évidence un potentiel important de valorisation du patrimoine maritime et de diversification des usages (culturels, touristiques et récréatifs). Elle révèle toutefois des faiblesses structurelles telles que le coût élevé des aménagements sur pieux et la sensibilité au vandalisme. Sur le plan externe, les opportunités liées au tourisme durable, aux financements verts et à la politique nationale de mise en valeur du littoral s'opposent à des menaces sérieuses : érosion accélérée, conflits d'usage et événements climatiques extrêmes. À travers des stratégies combinées (renforcement végétal, partenariats public-privé, zonage des usages), l'étude propose des réponses adaptées, conformes aux normes techniques (ISO, PNLC, NF EN 206) et aux enjeux de durabilité.

Tableau V-2 : analyse SWOT de l'aménagement

	POSITIF (+)	NÉGATIF (-)
INTERNE	<p>Forces (S)</p> <p>S1. Multifonctionnalité du site (loisirs, culture, économie locale)</p> <p>S2. Végétation résiliente (ex. Tamarix) limitant l'érosion</p> <p>S3. Respect rigoureux des normes techniques (PNLC, ISO, FIFA)</p>	<p>Faiblesses (W)</p> <p>W1. Coût élevé des structures (musée sur pieux, terrasse flottante)</p> <p>W2. Risque de dégradation du mobilier public</p> <p>W3. Maintenance complexe des dispositifs flottants</p>
EXTERNE	<p>Opportunités (O)</p> <p>O1. Croissance du tourisme durable en Méditerranée (+15 % d'ici 2030)</p> <p>O2. Financements verts</p> <p>O3. Politique nationale de valorisation du patrimoine maritime</p>	<p>Menaces (T)</p> <p>T1. Érosion côtière accélérée</p> <p>T2. Conflits d'usage (pêcheurs vs tourisme)</p> <p>T3. Fréquence accrue d'événements climatiques extrêmes</p>

• **Axes Stratégiques Recommandés**

Ce plan d'amélioration propose de créer un circuit éco-touristique reliant le musée, le stade et le marché, avec l'objectif d'obtenir le label "Pavillon Bleu". Il prévoit aussi l'utilisation de normes techniques pour bénéficier de financements européens.

Pour réduire les risques naturels, des tamaris seront plantés contre l'érosion, et les fondations du musée adaptées aux tempêtes.

Certaines faiblesses seront compensées par des partenariats public-privé et par une gestion participative avec les associations locales.

Enfin, un protocole de maintenance et un zonage temporel entre pêche et tourisme permettront de mieux gérer les conflits d'usage et les risques techniques.

Tableau V-3 : Axes Stratégiques Recommandés

Axe	Combinaison	Action stratégique	Justification / Référence
SO	S1 + O1	Créer un circuit éco-touristique intégrant musée, stade et marché.	Labellisation possible "Pavillon Bleu"
	S3 + O2	Valoriser les normes techniques pour capter des subventions européennes.	Appel à projets FEM (Fonds pour l'Environnement Mondial)
ST	S2 + T1	Renforcer les plantations (3 rangées de tamaris) contre l'érosion.	-40 % de réduction du vent (DREAL, 2022)
	S3 + T3	Adapter les pieux du musée maritime à l'intensité des tempêtes modélisées.	+20 % de sécurité en fondations contre les houles extrêmes (Chap. 4 – modélisation Mike 21)
WO	W1 + O3	Co-financer les pieux via des partenariats public-privé (PPP).	Ministère de la Culture, secteur du tourisme
	W2 + O1	Réduire le vandalisme via gestion participative (associations locales).	Contrats de quartier, modèle CEREMA
WT	W3 + T3	Mettre en place un protocole de maintenance semestriel ISO 17357.	Spécifications sur structures flottantes
	W1 + T2	Gérer les conflits d'usage par un zonage temporel entre pêche et activités touristiques.	Marché matinal réservé aux pêcheurs traditionnels

IV.7 Conclusion

Grâce à une organisation fonctionnelle cohérente, à une intégration harmonieuse des usages (promenade, loisirs, pêche, culture), et à une attention rigoureuse portée à la végétalisation et à l'esthétique paysagère, cette proposition s'affirme comme un modèle innovant d'aménagement littoral. Elle présente un fort potentiel de requalification urbaine, tout en intégrant les impératifs de résilience face aux enjeux climatiques, environnementaux et socio-économiques à venir.

En ce sens, ce plan vise à faire du littoral de Tamentfoust un espace de référence conjuguant modernité, mémoire du lieu et durabilité, au service des populations actuelles et des générations futures.

Conclusion générale

Ce travail de fin d'études nous a permis de développer une réflexion approfondie sur l'aménagement durable d'une zone littorale stratégique : la façade maritime de Tamentfoust. À travers une approche pluridisciplinaire mobilisant des données environnementales, des outils de modélisation, des principes d'ingénierie côtière et de planification territoriale, ce mémoire a exploré l'ensemble des dimensions naturelles, techniques, sociales et climatiques, indispensables à une requalification cohérente et résiliente de ce front de mer.

L'analyse générale de la zone d'étude (chapitre 1) nous a permis de mettre en lumière les spécificités géographiques, physiques et humaines du site, tout en révélant les déséquilibres existants liés à l'érosion, à la fragmentation des usages, à l'absence d'équipements publics de qualité. En examinant les roses de vent et de houle, ainsi que les caractéristiques morphologiques de la baie d'Alger, les principales contraintes naturelles ont été identifiées et intégrées dans la suite du travail.

L'évaluation des événements extrêmes (chapitre 2) à partir de la méthode peaks over threshold (POT) nous a permis de constater que la baie d'Alger est vulnérable aux quatre directions (Nord, Nord-Nord-Est, Nord-Ouest et Nord-Nord-Ouest) pénalisantes qui vont causer des dégâts importants. La théorie des valeurs extrêmes, a apporté une base rigoureuse pour concevoir des ouvrages adaptés aux aléas climatiques.

Cette base a été renforcée par une modélisation numérique de la propagation des houles via le logiciel MIKE 21 (chapitre 3). Ces simulations ont permis de mieux comprendre les interactions entre les houles dominantes, les courants et les infrastructures projetées, afin d'assurer une compatibilité maximale entre les dynamiques naturelles et les aménagements proposés.

Les propositions d'aménagement du port (chapitre 4) ont été élaborées en prenant en compte non seulement les résultats techniques obtenus, mais aussi les contraintes sociales, topographiques et réglementaires du site pour les trois variantes et vers la fin en prenant une décision et choisir la plus résiliente aux contraintes et satisfaire les besoins : la variante 3.

Le projet final, développé dans le dernier chapitre (chapitre 5), combine des solutions à la fois architecturales, paysagères et environnementales : musée maritime sur pilotis, terrasse flottante, pontons, promenade, végétalisation, marché de poissons et espaces publics de détente et de loisirs. Cette proposition cherche à renforcer l'attractivité de la zone tout en assurant sa durabilité, sa résilience et son intégration dans le tissu urbain et environnemental. L'analyse multicritère SWOT a permis de consolider la robustesse du projet en évaluant ses forces, faiblesses, opportunités et menaces face aux enjeux actuels.

À l'heure où les zones côtières sont soumises à une pression croissante liée à l'urbanisation, au changement climatique et aux enjeux touristiques, ce travail constitue une contribution concrète à la réflexion engagée dans la construction d'un littoral algérien plus moderne, plus juste et mieux préparé aux défis de demain.

Au final, Ce travail montre qu'un aménagement durable est non seulement possible, mais absolument nécessaire. Il démontre qu'en combinant l'intelligence du territoire, la rigueur technique et l'implication des acteurs locaux, il est possible de repenser l'aménagement du littoral de manière plus résiliente, inclusive et durable.

Notre mémoire constitue un cas d'étude exemplaire capable d'inspirer d'autres initiatives le long du littoral algérien. Il reste perfectible et nécessite des études plus approfondies dans le but d'améliorer la fiabilité, la précision et la qualité des résultats. À cet effet, plusieurs éléments restent indispensables : des levés topographiques et bathymétriques de haute précision, des données actualisées sur le climat des houles, des modèles numériques de terrain détaillés, des observations de terrain, ainsi que la mise en place d'un système efficace de partage des données scientifiques. Ces compléments permettront d'approfondir les connaissances, d'affiner les analyses, et d'améliorer la gestion durable du littoral algérien face aux risques naturels et aux transformations à venir.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- **Agence Nationale du Littoral Algérien. (2019).** Plan National d'Aménagement du Littoral. Ministère de l'Aménagement du Territoire.
- **AIT AMIR, Ae et MADOUN, I. (2013).** Proposition d'aménagements du port de Tamentfoust. Mémoire de master. Aménagement du Littoral. Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral, Delly Brahim. P.P.14-19
- **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, P.P.45-70
- **Anthony, E. J. (2018).** The human influence on the Mediterranean coast over the last 200 years. Geomorphology. 312. P.P.42-56.
- **Battjes, J.A. (1974).** Surf Similarity. Proceeding of the Fourteenth International Conference on Coastal Engineering, Honolulu, HI, P.P.446-480.
- **Benabid,m et Ahmed Gaid,a. (2024).** Comportement des formations géologiques de la zone côtière d'El Marsa (Alger) vis-à vis l'érosion marine. Mémoire de master. Aménagement du Littoral. Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral, Delly Brahim. P.P.46-51
- **Benzine,y . (2024).** Etude de l'extention du port de Tamenfoust-Est. Mémoire de master. Aménagement du Littoral. Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral. Delly Brahim. P.P.20-25
- **BOORI M. S. (2010).** Coastal vulnerability, adaptation and risk assessment due to environmental change in ApodiMossoro estuary. Northeast Brazil. International Journal of Geomatics and Geosciences 1. 3. P.P. 620-638.
- **Boubhiz, S et Chikhi, N. (2016).** El Marsa d'Alger, du littoral a la ferme agricole. Memoire de master. Architecture ville et patrimoine. Faculté du Génie de la Construction Département d'Architecture. Tizi Ouzou. P.P.32-36
- **Carmona, M. (2010).** Contemporary Public Space, Part Two: Classification. Journal of Urban Design.vol15. P.P.157-173.
- **CEREMA (2023).** Outils de planification intégrée pour le littoral méditerranéen. Rapport d'activité : CEREMA
- **CEREMA (2023).** Recommandations sur les structures flottantes. Rapport TECHnique-045 : CEREMA
- **Chadenas, C., & Poulain, M. (2019).** Les espaces agricoles dans les territoires littoraux : tensions et adaptations. Rapport pour le Ministère de l'Agriculture.
- **Chalal,y et Amara,L. (2022).** Machine Learning pour l'étude de la performance hydraulique des ouvrages portuaires : cas Marina d'Alger. Mémoire de master. Aménagement du Littoral. Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral, Delly Brahim. P-57

Références bibliographiques

- **Champy, F. (1995).** Compte rendu de L'Allégorie du patrimoine (F. Choay, Paris, Le Seuil, 1992). Revue d'histoire moderne et contemporaine, 42(2).Rapport d'activité. P.P.348–352.
- **Cornel Stander., (2015).** Analysis of Extreme Events in the Coastal Engineering Environment. s,d. P.147.
- **DAHMANI, A (2023).** Evolution morpho-dynamique de la baie d'Alger : Observation et Modélisation hydrodynamique et sédimentaire Dely-Ibrahim : ENSSMAL.P.P.78-90
- **Direction de la Culture de la Wilaya d'Alger. (2010).** Plan permanent de sauvegarde et de mise en valeur de Tamentfoust. Alger : Ministère de la Culture.
- **DJEMIL, W. (2021).** Valorisation et potentialité de la réutilisation des eaux usées traitées pour un développement intégré durable. Cas des STEP dans la région d'Alger. Risques socio-sanitaires et environnementaux. Diplôme de Doctorat. Eau et Environnement. Dep de Géologie. Faculté des Sciences de la Terre. Annaba : universite Badji Mokhtar. P.48
- **DREAL Méditerranée. (2022).** Fiches espèces végétales littorales. Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement – Méditerranée.
- **[Elif Kutay Karacor. Ezgi Akcam.\(2016\).](#)** [Comparative Analysis of the Quality Perception in Public Spaces of Duzce City. Current Urban Studies, Vol.4 No.3](#), August 12, 2016
- **Emily J. Powell, Megan C. Tyrrell, Andrew Milliken, John M. Tirpak, Michelle D. Staudinger. (2019).** A review of coastal management approaches to support the integration of ecological and human community planning for climate change. Journal of Coastal Conservation 23.P.P.1–18.
- **Françoise Gourmelon. (2003).** Contribution des SIG à la connaissance et à la gestion de l'environnement littoral. January 2003.P.44
- **Gehl, J. (2011).** Life between Buildings: Using Public Space. Washington DC: Island Press.
- **Grebici,a et Griche,h. (2024).** Modélisation et cartographie de la vulnérabilité du littoral centre algérien face aux risques d'inondation et de submersion marine. Mémoire de master. Aménagement du Littoral. Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral, Delly Brahim. P.P.26-100
- **Gsell, S. (1911).** Atlas archéologique de l'Algérie. Alger : Imprimerie officielle.
- **Hudson, R. Y. (1961).** Wave forces on breakwaters. Journal of the Waterways and Harbors Division, 87(3), P.P.49–68.
- **ISO. (2018).** ISO 17357 : Systèmes flottants de haute résilience. Organisation internationale de normalisation.
- **Jeanne Jacintha Naby, Jérôme Quirant, Julien Averseng.(2023).** Optimisation du dimensionnement de pieux hélicoïdaux pour fondations en milieu maritime. Congrès Français du Génie Civil CFGC 2023, May 2023, Gif sur Yvette, France. Ffhal-04805272 (Actes de conférence)

Références bibliographiques

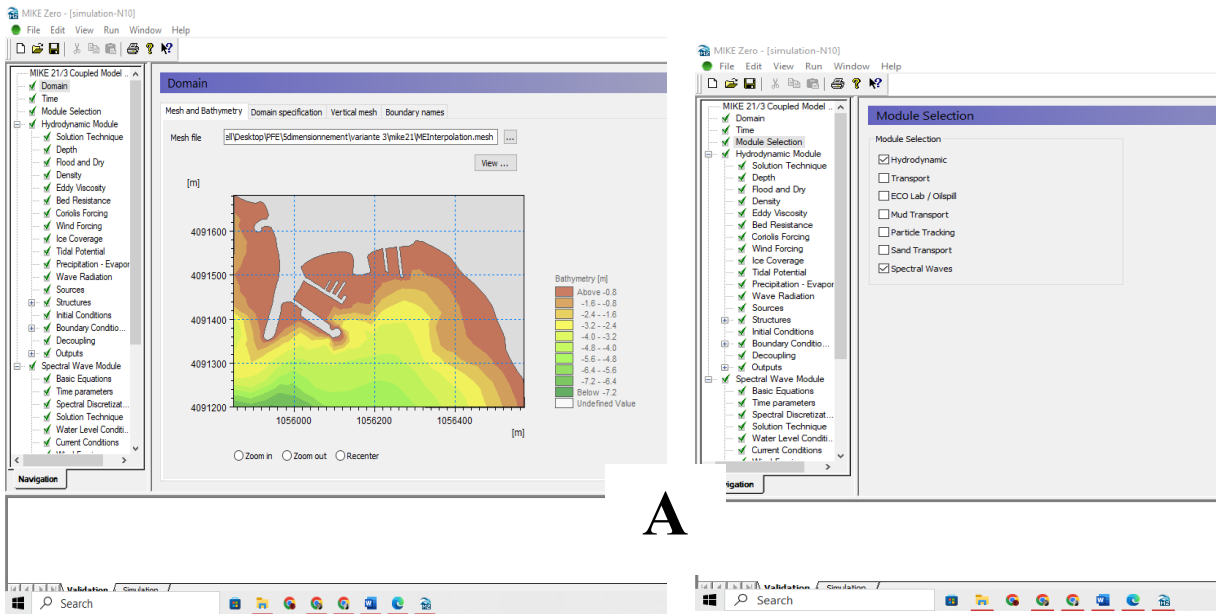
- **Journal Officiel de la République Algérienne. (2002, 6 janvier).** Loi n°02-02 du 5 février 2002 relative à l'aménagement et à la protection du littoral.[en ligne].[consulté le 23/04/2025].disponible sur le web <https://www.joradp.dz>
- **Journal Officiel de la République Française. (1986, 4 janvier).** Loi n°86-2 du 3 janvier 1986 relative à l'aménagement, la protection et la mise en valeur du littoral.[en ligne].[consulté le 01/06/2025].disponible sur le web <https://www.legifrance.gouv.fr>
- **Kéfi, F., & Colozza, D. (2021).** Pressions urbaines et dynamiques agricoles sur le littoral tunisien : enseignements pour l'Algérie. Revue Méditerranéenne de Développement. 45(2). P.P.78-94.
- **Laboratoire d'études maritimes (2007).** Etude d'Aménagement du port de Tamentfoust en port de plaisance. Dimensionnement. Hydra :LEM
- **Laboratoire d'études maritimes (2007).** Etude d'Aménagement du port de Tamentfoust en port de plaisance. L'étude des variantes. Hydra:LEM
- **Laboratoire d'études maritimes (2007).** Etude d'Aménagement du port de Tamentfoust en port de plaisance. Étude de la réfraction de la houle. Hydra:LEM
- **M. Micheau, B. Coloos, V. Renard, M. Sauvez & T. Vilmin, Coord. (S.d).** Aménagement et projet urbain. Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Île-de-France. Fondation Nationale des Sciences Politiques.
- **MEZOUAR, K. (2009).** Etude comparative entre les méthodes de protection des deux littoraux
- **Office National de la Météorologie. (N.d).** [Page de climat en algerie].[en ligne].[consulté le 10/05/2025].disponible sur le web de <https://www.meteo.dz>
- **PNLC. (2022).** Directives techniques des ouvrages maritimes. Ministère des Travaux Publics,
- **PNUD (2021).** Guide des aménagements côtiers résilients.
- **Programme d'Aménagement Côtier (PAC) "Zone côtière algéroise" - RAPPORT FINAL INTEGRE.** Programme d'Actions Prioritaires Centre d'Activités Régionales, Février 2006.
- **Programme des Nations Unies pour l'Environnement. (2020).** État de l'environnement marin et côtier en Méditerranée.
- **Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD). (2021).** Stratégies de résilience côtière en zones urbaines. PNUD.
- **Rabehi,W.Guerfi,M.Hbib,M(2019).**la baie d'Alger, un espace côtier prisé, entre pressions d'urbanisation et gouvernance territorial. Geo-Eco-Marina.vol.25. P148
- **Sharp, D., Medlin, J., Spratt, S., & Hodanish, S. J. (1997, June).** Doppler radar observations which identify a spectrum of outer spiral rain band mesocyclones associated with tropical cyclones. Paper presented at the 22nd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Ft. Collins, CO.
- **Stratégie nationale de gestion intégrée des zones côtières pour l'Algérie - élaborée en 2015 et actualisée en 2021.**

Références bibliographiques

- **Summary of Synoptic Meteorological Observations. SSMO. (1970).** U.S Naval Weather Service Command. Mediterranean marine, Volume 2, Octobre 1970, p 632.
- **Tamazirt,m. (2023).** Modélisation des effets de la houle sur la stabilité et franchissement des ouvrages maritimes. Mémoire de master. Aménagement du Littoral. Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral, Delly Brahim.P.P.12-16
- **Toudert, A. & Brakni, M. (2020).** Aménagement littoral durable en Méditerranée. Éditions PUCA.
- **UICN (2022).** Guide des écosystèmes récréatifs méditerranéens.
- **Van der Meer, J. W. (1987).** Stability of breakwater armor layers—Design formulae. Coastal Engineering, 11(3), 219–239. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(87\)90013-7](https://doi.org/10.1016/0378-3839(87)90013-7)
- **wofrance, (2023).** Climat - Graphique - Alger Algérie - wofrance. URL . [en ligne].[consulté le 20/03/2025].disponible sur le web de <https://www.weatheronline.co.uk/weather/maps/city>.
- **Yoshihito Kurazumi, Emi Kondo, Kenta Fukagawa, Reiko Hashimoto, Agnes Nyilas, Tomonori Sakoi, Tadahiro Tsuchikawa. (2017).** The Influence of Foliage Plants on Psychological and Physiological Responses. Health, Vol.9 No.4, April 12, 2017.
- **Zerrouki,Ch .(2021).** Etude des mouvements du niveau de la mer, dans une zone portuaire. Cas du littoral centre (Algérie). Mémoire de docteurat. Océanographie. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene. Bab ezzouar. 26 Sep 2021. Français.P.22

Annexes

Annexe A : Manipulation MIKE21 (coupled model)



A

```

simulation-N10 - Netpad
File Edit Format View Help
----- Computing Environment -----
Computer name : MARVA
Number of processors: 4

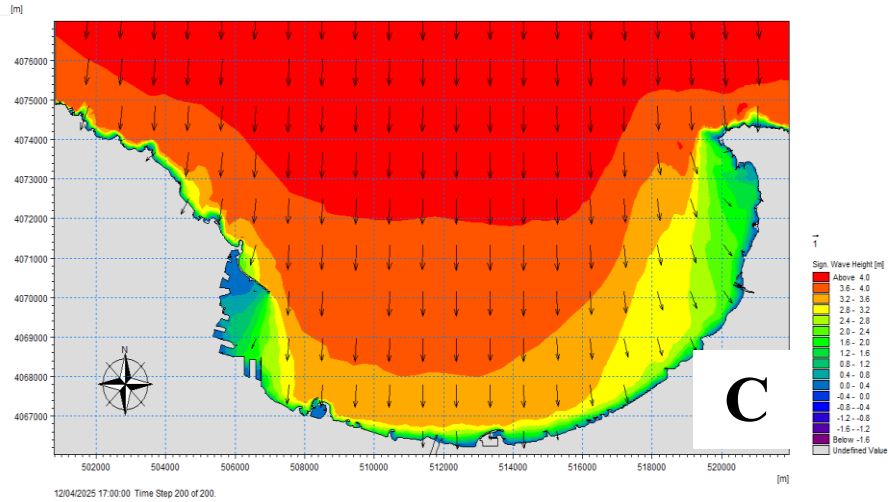
-----
Section: SYSTEM -----

Section: TIME -----
start_time : 2025 4 12 12 0 0
time_step_interval : 90
number_of_time_steps : 200

Section: DOMAIN -----
number_of_dimensions : 2
number_of_meshes : 1
file_name : C:\Users\Deill\Desktop\PEF\5dimensionnement\variante 3\mike21\MEInterpolation.mesh
check_mesh : 1 (default)
datum_depth : 0
minimum_depth : 0
threshold_depth : 0 (default)
number_of_domains : 16
type_of_reordering : 1

----- Mesh information -----
Number of elements : 805
Number of faces : 1329
Number of nodes : 525
Number of sections : 4
Min x-coordinate (m) : 1055850.39
Max x-coordinate (m) : 1056571.77
Min y-coordinate (m) : 4091308.13
Max y-coordinate (m) : 4091681.85
Min z-coordinate (m) : -7.305788
Max z-coordinate (m) : 0
    
```

B



C

A : Figure qui Montre l'interface de coupled model

B : Tableau de fin de simulation pour la direction nord

C : Résultat des simulations sur la baie d'alger

Annexe B : Évaluation comparative des variantes

Tableau : comparaison des variantes selon différents critères

Critère	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Agitation aux ouvrages d'accostage	B	B	B
Agitation dans le bassin	B	A	A
Agitation dans le bassin militaire	C	C	A
Coût de réalisation	A	B	C
Capacité d'accueil	C	B	A
Prise en compte de la zone militaire	C	C	A
Notation globale	1A – 2B – 3C	1A – 3B – 2C	4A – 1B – 1C

A : Cas favorable / B : Cas peu favorable / C : Cas défavorable

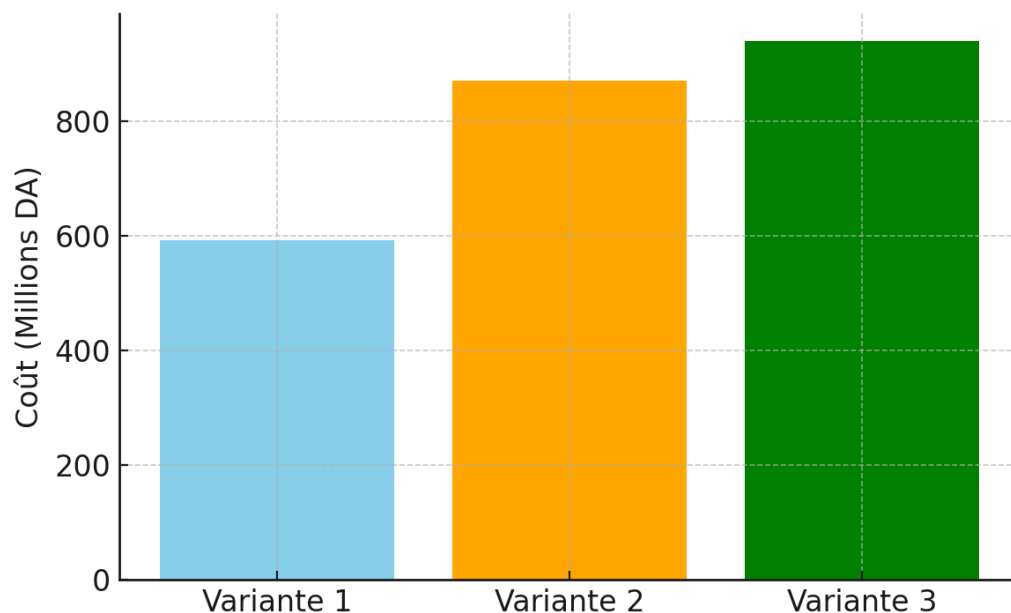
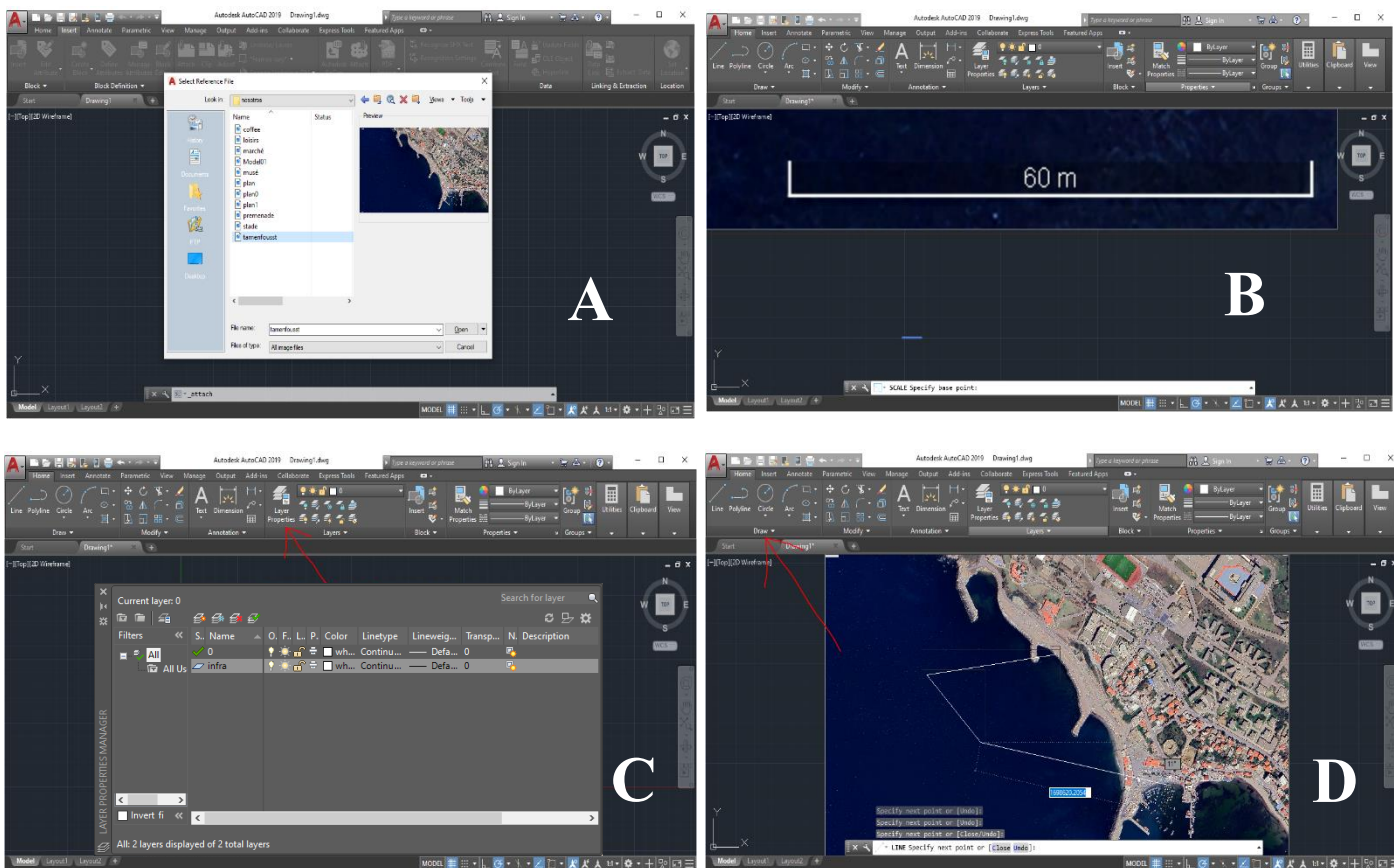


Figure : Représentation des coûts des variantes en millions dinar algérien

Annexes

Annexe C : Manipulation AutoCAD (Création de surface de travail)



A : Insertion de l'image satellitaire de la zone d'étude

B : Mise en échelle de la carte

C : Création d'une couche de dessin

D : Dessin via la barre d'outils

Annexe D : Normes à suivre pour l'aménagement

• Cafétéria avec terrasse flottante

NF EN 1992-1-1 (Eurocode 2) : Norme de conception des structures en béton armé, utilisée pour dimensionner les fondations et murs en béton de la cafétéria, en assurant leur résistance en milieu marin.

NF EN 1993-1-1 (Eurocode 3) : Norme de calcul des structures en acier, appliquée aux éléments métalliques comme la structure de la terrasse flottante et les garde-corps, garantissant résistance et durabilité.

NF EN 335 : Norme sur la durabilité et le traitement du bois, essentielle pour la passerelle en bois et le platelage de la terrasse afin d'assurer leur résistance à l'humidité et à la corrosion saline.

Règlement ERP (Établissements Recevant du Public) : Prescriptions de sécurité et d'accessibilité pour garantir la sécurité incendie et l'accès aux personnes à mobilité réduite dans la cafétéria.

• Petit stade de sport

Normes FIFA Quality: Critères relatifs aux matériaux et maillage des clôtures, assurant leur résistance aux impacts et conformité pour les installations sportives publiques.

NF EN 1993-1-1 (Eurocode 3) : Norme pour la conception des structures métalliques, utilisée pour dimensionner la clôture métallique et autres éléments en acier du stade.

• Promenade littorale aménagée

NF EN 1997-1 (Eurocode 7) : Norme de calcul géotechnique appliquée aux fondations et sols stabilisés de la promenade, assurant la stabilité face aux contraintes du milieu côtier.

Règlement ERP: Garantit la sécurité des usagers avec notamment la conformité du mobilier urbain et des garde-corps.

• Espaces de loisirs pour enfants

NF EN 1177 : Norme sur les surfaces amortissantes des aires de jeux, assurant la sécurité des enfants en cas de chute grâce à une épaisseur et un matériau adapté.

DREAL Méditerranée (2022) : Recommandations pour le choix des végétaux et aménagements adaptés au climat littoral, assurant sécurité et confort dans les zones de jeux.

• Marché couvert de poissons

NF EN 1992-1-1 (Eurocode 2) : Norme pour la structure bétonnée résistante aux agressions marines, utilisée pour les murs et fondations du marché.

NF EN 1993-1-1 (Eurocode 3) : Calcul des structures métalliques comme la toiture et les cadres de fenêtres, avec traitement anti-corrosion.

Annexes

Règlement ERP: Sécurité incendie et accessibilité pour le public et les travailleurs, notamment dans les espaces de vente.

- **Musée maritime sur pieux**

NF EN 1992-1-1 (Eurocode 2) : Calcul des pieux et fondations en béton armé pour assurer stabilité en sol marin.

NF EN 1993-1-1 (Eurocode 3) : Dimensionnement des structures métalliques (charpente, lanterneau) exposées à l'environnement marin.

NF EN 12664 : Norme pour les revêtements de sol en résine époxy, assurant une surface antidérapante et facile à nettoyer dans le musée.

NF EN 1997-1 (Eurocode 7) : Calcul géotechnique approfondi des pieux en fonction du sol et de la profondeur d'implantation.

Règlement ERP

Normes de sécurité et accessibilité pour les visiteurs du musée.

- **Végétalisation et intégration écologique**

DREAL Méditerranée (2022) : Recommandations spécifiques pour la plantation d'espèces adaptées au milieu littoral méditerranéen, assurant durabilité écologique et lutte contre l'érosion.

NF P 90-322 : Norme sur le choix et la mise en œuvre des végétaux en aménagement paysager en milieu salin.

Code de l'environnement : Cadre légal protégeant les zones naturelles littorales et encadrant les interventions écologiques.