



**MEMOIRE de FIN D'ETUDE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR SCIENCES DE LA MER ET AMENAGMENT
DU LITTORAL**

Option : **Gestion et Protection du Littoral**

Thème

**MODELISATION DE L'IMPACT DES EVENEMENTS
METEOROLOGIQUES EXTREMES SUR LE
FONCTIONNEMENT DES OUVRAGES MARITIMES**

Présenté par :

BELACEL Yasmine

-Soutenu le 08/7/2024

Devant le jury composé de

- M. DAHMANI A.	Maitre conférence - ENSSMAL	Président
- M. MEZOUAR K.	Professeur - ENSSMAL	Promoteur
- Mme SALEM CHRIF Y.	Maitre conférence – ENSSMAL	Examinatrice

Remerciements :

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de recherche, Monsieur MEZOUAR Khoudir. Je le remercie chaleureusement pour son encadrement, ses orientations, son aide précieuse et ses conseils avisés. Sa disponibilité constante, ses critiques constructives, ses recommandations éclairées et son soutien scientifique inestimable ont été essentiels à la réussite de ce mémoire.

Je tiens également à remercier sincèrement les membres du jury, Monsieur DAHMANI A. et Madame SALEM CHRIF Y., pour avoir accepté de présider et d'examiner ce travail. Leurs conseils et observations contribueront certainement à améliorer la qualité de cette recherche.

Un grand merci du fond du cœur à ma mère ma source de motivation, mes frères et ma chère sœur, pour leur soutien inébranlable et leur amour inconditionnel.

Je voudrais aussi exprimer mes remerciements les plus sincères à Madame Abbas Ferial pour sa patience, son soutien indéfectible et ses encouragements tout au long de ce projet.

Enfin, je profite de cette occasion pour exprimer ma gratitude profonde à l'ensemble des enseignants de l'ENSSMAL. À tous ceux qui m'ont aidé dans l'accomplissement de ce travail, je souhaite exprimer ma reconnaissance sincère.

Dédicace :

Je dédie ce travail à la mémoire de mon père BELACEL SAAD , dont l'amour et le soutien indéfectibles ont été ma plus grande source de force et de motivation. Ses enseignements et ses valeurs continuent de guider mes pas chaque jour, m'inspirant à persévérer et à donner le meilleur de moi-même. Ce mémoire est un hommage à l'homme exceptionnel qu'il était

Table des matières

Table des matières	3
Listes des figures	5
Liste des tableaux	8
Liste des équations :	9
Introduction Générale	1
I. Chapitre I. Données climatologiques de la zone d'étude	4
1.1. Introduction :	5
1.2. Situation Géographique de la zone d'étude :	5
1.3. Géomorphologie et sédimentologie de la zone d'étude :	6
1.4. Données océanographiques :	8
1.4.1. Généralités sur les houles :	8
1.4.2. Climat de la houle :	8
1.4.3. Climat du vent :	21
1.5. Conclusion :	32
II. Chapitre II. Caractérisation des ouvrages de protection dans la zone d'étude	33
2.1. Introduction :	34
2.2. Les Ouvrages de protection :	34
2.2.1. Les Types des Ouvrages de protections :	34
2.3. Les Ports :	36
2.3.2. Infrastructures et installations d'un Port :	37
2.4. Classification des ouvrages maritimes de la zone d'étude :	38
2.5. Conclusion :	45
3. Chapitre III. Analyse des Evénements Extrêmes	46
3.2. Introduction :	47
3.3. Théorie des valeurs extrêmes :	47
3.3.2. La méthode des Peaks Over Threshold (POT):	48
3.3.3. La méthode des Blocks Maximas (BM) :	58
3.4. Comparaison entre les méthodes POT et Blocs Maximas :	68
4. Chapitre IV. Modélisation Numérique de l'hydrodynamique côtier	70
4.2. Introduction :	71
4.3. Présentation du Model :	71
4.3.2. Mesh Generator :	71
4.3.3. MIKE SW :	71
4.3.4. MIKE HD :	75
4.4. Méthodologie de travail :	76
4.4.2. Génération de la Mesh et création de la bathymétrie :	76

4.4.3.	Scénarios de simulation :	81
4.4.4.	Résultats :	85
4.5.	Conclusion :	108
5.	Chapitre V. Performance hydraulique	109
5.2.	Introduction :	110
5.3.	Run-up de la houle :	112
5.3.2.	Résultats des calculs du Run-up de la houle :	114
5.4.	Le Run Down :	116
5.4.2.	Résultats des calculs du Run-Down de la houle :	117
5.5.	Conclusion :	118
	Conclusion générale	119
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	122
	Annexes	i
	Annex 1 <i>Business Model Canvas</i>	ii
	Premier axe : Présentation du projet	ii
	Deuxième axe : Aspects innovants	vii
	Troisième axe : Analyse stratégique du marché	viii
	Quatrième axe : Plan de production et organisation	x
	Cinquième axe : Plan financier	xi
	Annex 2 : Résultats de Simulation	xiv

Listes des figures

Figure 1 Carte de la zone d'étude.....	6
Figure 2 Caractéristiques de la houle (Culture maritime)	8
Figure 3 Représentation du spectre des hauteurs de houle enregistrées (baie d'Alger)	9
Figure 4:Représentation du spectre des périodes pics enregistrées (baie d'Alger)	10
Figure 5 Roses trimestrielles et annuelles des houles au large de la baie d'Alger entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com)	11
Figure 6 Roses mensuelles des houles au large de la baie d'Alger entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com	12
Figure 7 Représentation du spectre des hauteurs de houle enregistrées (baie de Zemmouri).....	13
Figure 8 Représentation du spectre des périodes pics enregistrées (baie de Zemmouri)	14
Figure 9: Roses trimestrielles et annuelles des houles au large de la zone de Zemmouri entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com).....	15
Figure 10 Roses mensuelles des houles au large de la Baie de Zemmouri entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com).....	16
Figure 11 Représentation du spectre des hauteurs de houle enregistrées (baie de Bousmail).....	17
Figure 12 Représentation du spectre des périodes pics enregistrées (baie de Bousmail).....	18
Figure 13 Roses trimestrielles et annuelles des houles au large de la baie de Bou ismail entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com)	19
Figure 14 Roses mensuelles des houles au large de la Baie de Bou ismail entre 1992 et 2021. (Source : www.waveclimate.com).....	20
Figure 15 : Représentation du spectre de la vitesse du vent (baie d'Alger)	22
Figure 16 Roses trimestrielles et annuelles des vents au large de la baie d'Alger entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com).....	23
Figure 17 Roses monstruelles des vents au large de la baie d'Alger entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com).....	24
Figure 18: Représentation du spectre de la vitesse du vent (baie de Zemmouri)	25
Figure 19 : Roses annuelles et saisonnières des vents au large de la baie de Zemmouri entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com).....	26
Figure 20 : Roses mensuelles des vents au large de la baie de Zemmouri entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com).....	27
Figure 21: Représentation du spectre de la vitesse du vent (baie de Bousmail)	28
Figure 22: Roses annuelles et saisonnières des vents au large de la baie de Bousmail entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com).....	30
Figure 23 : Roses mensuelles des vents au large de la baie de Bousmail entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com).....	31
Figure 24 coupe type des différents types des digues (SETMEF 2007).....	35
Figure 25 Processus de transport et hydrodynamisme près des brise-lames (source : joas.free.fr)	35
Figure 26 Représentation des épis (source : révérenciel digue 2015 www.barrages-cfbr.eu/)	36
Figure 27 Représentation des composants d'un site portuaire (source : infovisual.info).....	37
Figure 28 Ouvrage portuaire de la baie d'Alger (source : Google earth).....	42
Figure 29 Ouvrage portuaire de la baie de Zemmouri (source : Google earth).....	43
Figure 30 Ouvrage portuaire de la baie de Bousmail (source : Google earth)	44
Figure 31: Schéma représentatif des méthodes blocks maxima et POT (libertyRoad,2023)	47
Figure 32 Moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelles de l'enregistrement de la baie d'Alger.....	48
Figure 33 : Moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelles de l'enregistrement de la baie de Zemmouri.....	49
Figure 34 Moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelles de l'enregistrement de la baie de Bousmail	49

Figure 35 :Représentation de méthode POT sur les hauteurs de houle de la baie d'Alger entre 1992-2019.....	50
Figure 36 : Représentation de méthode POT sur les hauteurs de houle de la baie de Zemmouri entre 1992-2019.....	50
Figure 37 : Représentation de méthode POT sur les hauteurs de houle de la baie de Bousmail entre 1992-2020.....	51
Figure 38 : Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour omnidirectionnel (baie d'Alger).....	51
Figure 39 : Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour omnidirectionnel (baie de Zemmouri).....	52
Figure 40 : Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour omnidirectionnel (baie de Bousmail).....	52
Figure 41 : Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour les directions dominantes (baie de Zemmouri).....	55
Figure 42 Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour les directions dominantes (baie de Bouismail).....	56
Figure 43: Représentation de la Méthode des Blocs Maximas sur les hauteurs de houles entre 1992–2020 (baie d'Alger).....	60
Figure 44 : Représentation de la Méthode des Blocs Maximas sur les hauteurs de houles entre 1992–2020 (baie de Zemmouri).....	60
Figure 45: Représentation de la Méthode des Blocs Maximas sur les hauteurs de houles entre 1992–2020 (baie de Bousmail).....	61
Figure 46: Période de Retour en années pour l'omnidirectionnel (baie d'Alger).....	61
Figure 47: Période de Retour en années pour l'omnidirectionnel (baie de Zeemmouri).....	62
Figure 48: Période de Retour en années pour l'omnidirectionnel (baie de Bousmail).....	62
Figure 49 : Estimation des événements extrêmes par la distribution de Gumbel pour les directions dominantes (baie d'Alger).....	63
Figure 50: Estimation des événements extrêmes par la distribution de Gumbel pour les directions dominantes (baie de Zemmouri).....	64
Figure 51 : Estimation des événements extrêmes par la distribution de Gumbel pour les directions dominantes (baie de Bousmail).....	65
Figure 52: Comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes POT et GEV pour l'omnidirectionnel. (baie d'Alger).....	68
Figure 53 : Comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes POT et GEV pour l'omnidirectionnel. (baie de Zemmouri).....	69
Figure 54 : Comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes POT et GEV pour l'omnidirectionnel.	69
Figure 55 Emprise de maillage de la baie d'Alger.....	77
Figure 56 Emprise de maillage de la baie de Bousmail.....	78
Figure 57 Emprise de maillage de la baie de Zemmouri.....	78
Figure 58: Bathymétrie de la baie d'Alger(change bathy).....	79
Figure 59 Bathymétrie de la baie de Zemmouri.....	80
Figure 60 Bathymétrie de la baie de Bousmail.....	81
Figure 61 champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Ouest (10ans).....	87
Figure 62: champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord (10ans).....	87
Figure 63: champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Est (10ans).....	87
Figure 64 champs des Courants dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Ouest (10ans).....	88
Figure 65: champs des Courants dans la baie d'Alger pour la direction Nord (10ans).....	88
Figure 66: champs des Courants dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Est (10ans).....	88
Figure 67 : champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Ouest (30ans).....	89
Figure 68 : champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord (30ans).....	89

Figure 69: champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord (30ans)	89
Figure 70 16: champs des Courants dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Ouest (30ans) .	90
Figure 71: champs des Courants dans la baie d'Alger pour la direction Nord 30ans).....	90
Figure 72: champs des Courants dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Est (30ans).....	90
Figure 73: champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Ouest (100ans).....	91
Figure 74: champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord (100ans)	91
Figure 75 : champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Est (100ans).....	91
Figure 76: champs des Courants dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Ouest (100ans)....	92
Figure 77 : champs des Courants dans la baie d'Alger pour la direction Nord (100ans)	92
Figure 78 : champs des Courants dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Est (100ans).....	92
Figure 79: champs des houles dans la baie de Zemmour pour la direction Nord Nord-Ouest (10ans) .	95
Figure 80: champs des houles dans la baie de Zemmour pour la direction Nord (10ans).....	95
Figure 81: champs des houles dans la baie de Zemmour pour la direction Nord Nord-Est(10ans)	95
Figure 82: champs des courants de la baie de Zemmouri NNW (10ans)	96
Figure 83: champs des courants de la baie de Zemmouri N(10ans).....	96
Figure 84: champs des courants de la baie de Zemmouri NNE (10ans)	96
Figure 85: champs des houles dans la baie de Zemmour pour la direction Nord Nord-Ouest (30ans) .	97
Figure 86: champs des houles dans la baie de Zemmour pour la direction Nord (30ans).....	97
Figure 87: champs des houles dans la baie de Zemmour pour la direction Nord Nord-Est(30ans)	97
Figure 88: champs des courants de la baie de Zemmouri NNW (30ans)	98
Figure 89: champs des courants de la baie de Zemmouri N (30ans).....	98
Figure 90 : champs des courants de la baie de Zemmouri NNE (30ans)	98
Figure 91: champs des houles dans la baie de Zemmour pour la direction Nord Nord-Est (100ans) ...	99
Figure 92: champs des houles dans la baie de Zemmour pour la direction Nord (100ans).....	99
Figure 93: champs des houles dans la baie de Zemmour pour la direction Nord Nord-Est (100ans) ...	99
Figure 94 : champs des courants de la baie de Zemmouri NNW (100ans)	100
Figure 95: champs des courants de la baie de Zemmouri N (100ans).....	100
Figure 96 : champs des courants de la baie de Zemmouri NNE (100ans)	100
Figure 97: champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord Nord-Ouest (10ans) 102	
Figure 98: champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord (10ans)	102
Figure 99: champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord Nord-Est (10ans)....	102
Figure 100 : champs des courants de la baie de Bousmail NNW (10ans).....	103
Figure 101: champs des courants de la baie de Bousmail N (10ans)	103
Figure 102 champs des courants de la baie de Bousmail NNE (10ans)	103
Figure 103 : champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord Nord-Ouest (30ans)	
.....	104
Figure 104: champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord (30ans)	104
Figure 105 : champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord Nord-Est (30ans) .	104
Figure 106: champs des courants de la baie de Bousmail NNW (30ans).....	105
Figure 107 : champs des courants de la baie de Bousmail N (30ans)	105
Figure 108: champs des courants de la baie de Bousmail NNE (30ans).....	105
Figure 109: champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord Nord-Ouest (100ans)	
.....	106
Figure 110: champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord (100ans)	106
Figure 111 : champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord Nord-Est (100ans)	
.....	106
Figure 112: champs des courants de la baie de Bousmail NNW (100ans).....	107
Figure 113: champs des courants de la baie de Bousmail N (100ans)	107
Figure 114 : champs des courants de la baie de Bousmail NNE (100ans)	107
Figure 115 : Interactions hydrauliques entre la houle et les ouvrages (CETMEF, 2009)	110

Liste des tableaux

Tableau 1 Hauteurs marquantes de la houle (baie d'Alger).....	9
Tableau 2 Périodes Pics de la houle (baie d'Alger).....	10
Tableau 3: Hauteurs marquantes de la houle (Baie de Zemmouri)	14
Tableau 4 Périodes Pics de la houle (baie de Zemmouri).	14
Tableau 5 Hauteurs marquantes de la houle (Baie deBousmail).....	18
Tableau 6 Périodes Pics de la houle (baie de Bousmail).....	18
Tableau 7 Vitesses marquantes du vent (baie d'Alger).....	21
Tableau 8 Vitesses marquantes du vent (baie de Zemmouri).....	25
Tableau 9 Vitesses marquantes du vent (baie de Bousmail)	28
Tableau 10: Les infrastructures maritimes de la Baie d'Alger :	38
Tableau 11: Les infrastructures maritimes de la Baie de Zemmouri.....	39
Tableau 12: Les infrastructures maritimes de la Baie de Bousmail :	40
Tableau 13 Résumé de l'ensemble des résultats obtenu par la méthode POT (baie d'Alger).....	57
Tableau 14 Résumé de l'ensemble des résultats obtenu par la méthode POT (baie de Zemmouri)	58
Tableau 15 Résumé de l'ensemble des résultats obtenu par la méthode POT (baie de Bousmail).....	58
Tableau 16 Résumé de l'ensemble des résultats obtenu par la méthode BM distribution de gumbel (baie d'Alger).	66
Tableau 17 Résumé de l'ensemble des résultats obtenu par la méthode BM distribution de gumbel (baie de Bousmail).....	67
Tableau 18 : Résumé de l'ensemble des résultats obtenu par la méthode BM distribution de gumbel (baie de Zemmouri)	67
Tableau 19 Signification des symboles:	73
Tableau 20 : Signification des symboles:	74
Tableau 21 : Signification des symboles:	74
Tableau 22 : Signification des symboles	76
Tableau 23 : Inputs des simulations pour l'ensemble des périodes de retours (Baie d'Alger).....	82
Tableau 24 : Inputs des simulations pour l'ensemble des périodes de retours (Baie de Zemmouri)	83
Tableau 25 : Inputs des simulations pour l'ensemble des périodes de retours (Baie d Bousmail)	84
Tableau 26: Scénarios retenus pour le calcul de la performance hydraulique des digues principales des ports étudiés.....	111
Tableau 27 Signification des paramètres utilisés dans les calculs des scénarios retenus.	112
Tableau 28: Résumé des formules utilisées dans l'estimation du Run-up de la houle sur l'ouvrage ...	113
Tableau 29: Valeurs des coefficients A, B, C selon (TAW, 2002)	114
Tableau 30 Résultats des calculs du Run-up de la houle au quel est exposé la section courante des digues principales des ports étudiés	115
Tableau 31 Résumé des Equations de calcul du Run-down de la houle sur l'ouvrage	116
Tableau 32 Résultats des calculs du Run-down de la houle au quel est exposé la section courante des digues principales des ports étudiés	117

Liste des équations :

Equation III.1.....	50
Equation III.2.....	61
Equation III.3.....	61
Equation IV.1.....	74
Equation IV.2.....	74
Equation IV.3.....	74
Equation IV.4.....	74
Equation IV.5.....	74
Equation IV.6.....	75
Equation IV.7.....	75
Equation IV.8.....	75
Equation IV.9.....	75
Equation IV.10.....	76
Equation IV.12.....	76
Equation IV.13.....	76
Equation IV.14.....	77
Equation IV.15.....	77
Equation IV.16.....	77
Equation IV.17.....	77
Equation IV.18.....	77
Equation IV.19.....	78
Equation IV.20.....	78
Equation IV.21.....	78
Equation V.1.....	114
Equation V.2.....	116

Introduction Générale

Introduction

Le domaine du génie côtier, intrinsèquement lié aux phénomènes hydrodynamiques, se focalise sur les ouvrages portuaires, des éléments cruciaux dans le développement des infrastructures portuaires et les activités commerciales maritimes. L'efficacité de ces ouvrages en matière de protection contre les inondations marines, l'érosion et les forces des vagues repose sur une compréhension approfondie des interactions complexes entre les structures et l'environnement marin.

Dans le contexte actuel du changement climatique, l'importance de ces ouvrages portuaires est plus cruciale que jamais. Les modifications des régimes climatiques entraînent une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques extrêmes, ainsi qu'une élévation du niveau de la mer (GIEC, 2021). Ces changements exercent une pression accrue sur les infrastructures portuaires, remettant en question leur capacité à soutenir efficacement les activités maritimes à long terme. Les travaux récents d'étudiants tels que Chaalal.Y (2022), Brahim. M (2023), et Tamazight. M (2023), dans le cadre de leurs mémoires sur la performance hydraulique, ont mis en lumière les défis spécifiques auxquels sont confrontés les différents ports de la région face à ces nouvelles réalités climatiques. La présente étude s'inscrit dans la continuité de leurs travaux, visant à approfondir notre compréhension de ces enjeux cruciaux.

Cette étude s'inscrit dans une démarche visant à modéliser l'impact des événements météorologiques extrêmes sur le fonctionnement des ouvrages portuaires dans la zone allant de Cap Djinet à El Hamdania, en incluant les baies de Boumerdès, Alger et Bousmaïl. Cette région, caractérisée par une forte concentration d'infrastructures portuaires et maritimes stratégiques, est particulièrement exposée aux houles du nord, nord nord-est et nord nord-ouest, générées par les dépressions méditerranéennes.

L'importance de cette zone, tant sur le plan économique que social, souligne la nécessité d'évaluer la performance des ouvrages portuaires existants face aux événements météorologiques extrêmes et de proposer des solutions pour renforcer leur résistance et leur durabilité. Cette étude vise à répondre à cette problématique en s'attaquant à plusieurs volets complémentaires :

- Analyse des conditions climatiques et hydrodynamiques de la zone d'étude, abordée dans le chapitre 1, en s'appuyant sur des données météorologiques et océanographiques collectées auprès de sources fiables. Une recherche a été effectuée dans des ouvrages de référence en génie côtier tels que le "Shore Protection Manual" (CERC, 1984), le guide d'enrochement (CETMEF, 2009) et le "Coastal Engineering Manual" (U.S. Army Corps of Engineers, 2012) pour obtenir des informations additionnelles.
- Caractérisation et localisation des ouvrages portuaires de la zone d'étude, abordées dans le chapitre 2.
- Caractérisation des événements météorologiques extrêmes, en identifiant les types d'événements les plus susceptibles d'affecter la zone d'étude et en estimant leur fréquence et leur intensité, présentée dans le chapitre 3.

- Modélisation numérique de l'impact des événements extrêmes sur les ouvrages portuaires, détaillée dans le chapitre 4, en utilisant des modèles hydrodynamiques adaptés et en tenant compte des caractéristiques spécifiques de chaque ouvrage.
- Étude de la performance hydraulique des ouvrages portuaires de la zone d'étude avec les formules semi-empiriques dans le dernier chapitre.

Les chapitres suivants exploreront en détail les différents aspects de la recherche, en s'appuyant sur des références scientifiques rigoureuses et des outils de modélisation avancés. L'objectif final est de contribuer à la connaissance des risques côtiers liés aux événements météorologiques extrêmes dans la zone d'étude et de proposer des recommandations pour une meilleure gestion et protection des infrastructures portuaires algériennes.

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

1.1. Introduction :

La compréhension approfondie de la zone d'étude maritime et de ses divers facteurs géologiques, climatologiques et hydrodynamiques est essentielle pour appréhender les défis potentiels auxquels font face les ouvrages maritimes. Dans le cadre de cette étude, l'objectif principal de ce chapitre est de dresser un portrait clair et précis des paramètres physiques de notre région côtière spécifique. En établissant une base solide de connaissances sur les caractéristiques géographiques, géomorphologiques et océanographiques de la zone, nous sommes mieux équipés pour analyser l'impact des événements météorologiques extrêmes sur les infrastructures maritimes.

Ce chapitre sera également l'occasion de fournir une brève définition et explication des ouvrages portuaires, soulignant leur importance dans le maintien de la sécurité côtière et leur rôle crucial dans la protection contre les aléas naturels. Et de localiser et de donner les caractéristiques des ouvrages maritimes le long de notre zone d'étude. En comprenant le contexte dans lequel ces structures opèrent, nous pouvons mieux apprécier les enjeux associés à leur conception, leur construction et leur maintien dans des conditions environnementales souvent rigoureuses.

1.2. Situation Géographique de la zone d'étude :

La zone d'étude s'étend du Cap Djinet à l'est jusqu'à El Hammdania à l'ouest, incluant les trois baies remarquables : la baie de Zemmouri, la baie d'Alger et la baie de Bou-Ismaïl. Ces baies sont des caractéristiques emblématiques du littoral algérien, chacune présentant des particularités géographiques distinctes.

- **Baie de Zemmouri**

Située au Nord-Est d'Alger, la baie de Zemmouri, anciennement nommée baie de Courbet, offre un panorama côtier remarquable. Délimitée au nord par la Méditerranée occidentale et au sud par la plaine de la Mitidja, elle est encadrée à l'est par le Cap Djinet et à l'ouest par le Cap Matifou. Son linéaire côtier s'étend sur environ 54 kilomètres, avec une ouverture significative vers le nord. La baie est caractérisée par la présence d'un promontoire rocheux imposant, le Rocher Noir, émergeant à environ 100 mètres au-dessus de sa surface. Sa superficie totale avoisine les 600 kilomètres carrés, avec un trait de côte de 54 kilomètres, comprenant 42 kilomètres de plages sableuses et 12 kilomètres de falaises rocheuses. En termes de profondeur, la baie présente une moyenne de 50 mètres, avec une zone côtière peu profonde de moins de 20 mètres sur environ 5 kilomètres de large, et une zone centrale plus profonde dépassant les 50 mètres, atteignant jusqu'à 120 mètres par endroits.

- **Baie d'Alger**

Au sein du littoral algérien, la baie d'Alger est remarquable par une indentation profonde le long du rivage, s'étendant entre le cap Matifou à l'est (3°13' Est et 36°49' Nord) et le cap Caxine à l'ouest (3°00' Est et 36°49' Nord). Son contour évoque celui d'un demi-cercle presque parfait, couvrant une distance de 15 kilomètres d'est en ouest et 7 kilomètres du nord au sud. La zone comprise entre une ligne d'environ 15,27 kilomètres reliant les deux caps et un contour périphérique de 42,46 kilomètres carrés totalise une superficie d'environ 98,8 kilomètres carrés. (M. TAMAZIGHT 2023) Cette baie est également caractérisée par sa topographie singulière

Le plateau continental est très étroit mais s'élargi au centre de la baie. Ce dernier ne dépasse pas l'isobathe 120 m. En effet, l'isobathe 50m est à 4,1Km de la côte, celui de 100m est à 7,6Km quant à celui 1000 m il ne se trouve qu'à 12,1Km de la côte.

- **Baie de Bou-Ismaïl**

Positionnée au centre du littoral algérien, à une distance de 50 kilomètres à l'ouest d'Alger, dans la wilaya de Tipaza, la baie de Bou-Ismaïl s'étend entre les coordonnées de 2°25' à l'ouest et 2°55' à l'est. Délimitée à l'est par la pointe du Cap Caxine (Ras Acrata) près de Sidi-Fred, et à l'ouest par le Mont Chenoua, elle est bordée au sud par la plaine de la Mitidja et au nord par la mer Méditerranée. L'ouverture de la baie, d'environ 40 kilomètres, s'oriente du sud-ouest au nord-est. Sa superficie s'élève à environ 350 kilomètres carrés). Cette baie joue le rôle de réceptacle pour les oueds à régime irrégulier tels que Mazafran, Nador et Béni-messous

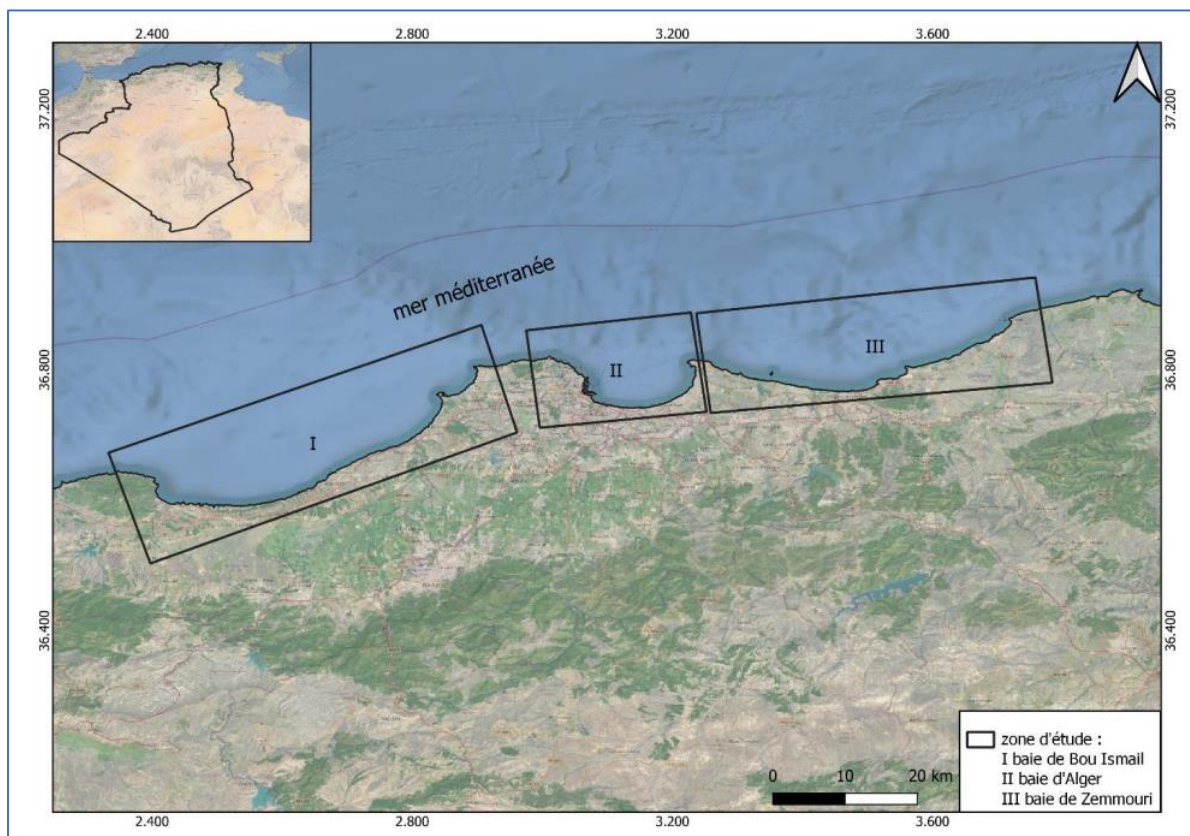


Figure 1 Carte de la zone d'étude

1.3. Géomorphologie et sédimentologie de la zone d'étude :

➤ **Baie d'Alger :**

La baie d'Alger est un bassin semi-elliptique sous forme d'un plateau d'environ 16 km de largeur (E-W) à l'ouverture, et d'une longueur de 8290m (N-S) à partir du point central. Le plateau de la baie d'Alger bordé à l'Est par le cap rocheux d'El Marsa, et à l'Ouest par le massif de Bouzaréah, et présente une pente faible de 1.8% (Atroune 2012). Cette pente est relativement faible d'aux premiers 80m de profondeur, et passe du massif d'Alger au cap El Marsa avec une

forme quasi rectiligne, et le rivage se courbe entre les deux crêtes donnant lieu à une baie très régulière (Leclaire 1972).

Directement exposée aux facteurs hydrodynamiques marins, la baie d'Alger composée essentiellement de plages de poche, de promontoires rocheux et de falaises subit une érosion significative (MAOUCHE et al., 2009) ; Plusieurs oueds débouchent dans la baie, dont les plus importants sont l'oued El Harrach, l'oued El Hamiz et l'oued Koriche , La plaine est aussi bordée par la présence des reliefs prononcés (zone est, mont de Bouzareah)

➤ **Baie de Bousmail :**

La baie de Bou Ismail présente une diversité géomorphologique avec des côtes rocheuses, des falaises, et une variété de plages. Le plateau continental entre Tipaza et Bouharoun est peu différencié, avec un glacis au nord-est du Mont Chenoua. La baie est caractérisée par une grande diversité sédimentaire avec des différences entre les parties est et ouest. Les plages s'étendent de Douaouda à Tipaza, avec des variations de sédiments. Les caps Arcata et Mont Chenoua bordent la baie, avec des plages sableuses à l'est et des côtes rocheuses à l'ouest. Les dunes littorales de la baie d'El Djamila varient en fonction des vents dominants, avec des zones de dunes mobiles et fixes. (BOUGHERARA, H., 2011).

Dans la baie de Bou Ismail, les zones rocheuses se trouvent principalement du côté ouest, notamment dans la commune de Ain Tagourait. On y trouve des anses et une morphologie côtière plus accidentée. En revanche, les plages sableuses prédominent dans la partie est de la baie, le long de la côte de Douaouda jusqu'à l'extrémité est de la baie. Cette partie est caractérisée par des plages ouvertes de sable fin. (AMIS, 2004).

Les dunes littorales de la baie d'El Djamila s'étendent à l'est de la baie, formant un cordon dunaire qui prend naissance à l'embouchure de l'Oued Mazafran et se prolonge jusqu'à l'est de l'Oued Béni Messous. Ces dunes varient en fonction des vents dominants, avec une zone de dunes mobiles le long de la haute plage et une zone de dunes fixes plus à l'intérieur des terres, avec une couverture végétale dense. (AMIS, 2004).

En résumé, la baie de Bou Ismail présente une diversité géomorphologique avec des plages sableuses à l'est, des zones rocheuses à l'ouest, et des dunes littorales le long de la côte est. (BOUGHERARA, H., 2011).

➤ **Baie de Zemmouri :**

La baie de Zemmouri se distingue par une pléthore de formations côtières, engendrées par des interactions complexes entre les processus morphodynamiques. Cette dynamique a entraîné une segmentation de la baie en trois secteurs principaux.

Secteur Ouest : De Cap Matifou à l'oued Boudouaou, cette zone est une zone de dépôt de sédiments marqués par des plages de sable fin, comme celles d'El Marsa, Ain Beida, Ain Taya, le sable d'or et Boudouaou El Bahri, ainsi que des îles telles que Sandjas et Agueli.

Secteur Central : S'étendant de l'oued Boudouaou à l'embouchure de l'oued Isser, cette partie présente un littoral concave avec des criques rocheuses et des plages de sable fin. Ces plages souvent situées à l'embouchure des oueds ; ont subi une forte accumulation sableuse qui a engendré la formation des dunes. Ce phénomène s'explique par le tri sélectif des sédiments par les vents dominants en raison de l'absence de la végétation. La formation de dunes est observée le long de cette zone, entre Cap blanc et Cap Djinet, généralement stabilisées par la végétation.

Secteur Est : Allant de l'embouchure de l'oued Isser à Cap Djinet, ce secteur se caractérise par un profil de plage convexe, parfois entrecoupé de formations rocheuses plongeant abruptement dans la mer offrant des points de vue panoramiques.

1.4. Données océanographiques :

1.4.1. Généralités sur les houles :

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

La hauteur significative des vagues est définie comme étant la hauteur moyenne, différence de hauteur entre le creux et la crête, du tiers des ondes les plus élevées (Vanem, 2016).

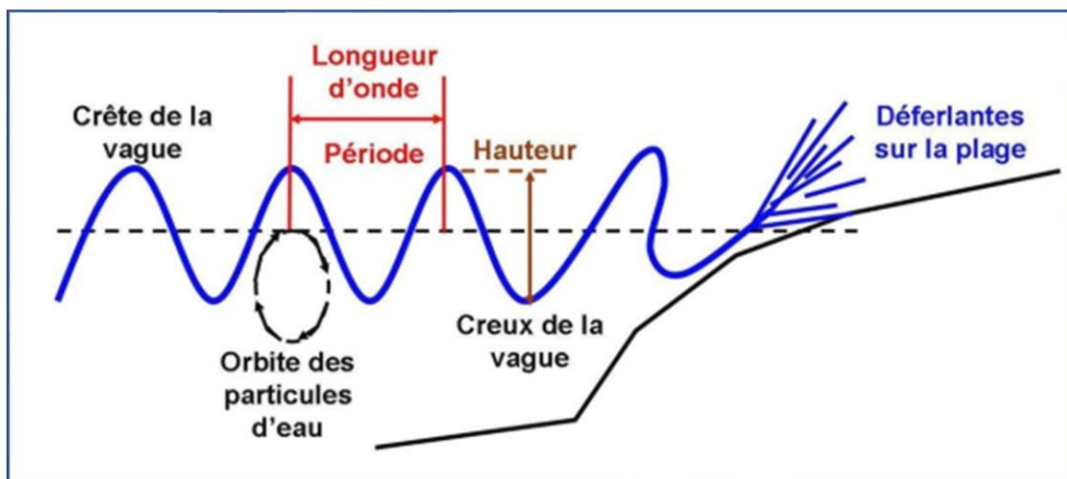


Figure 2 Caractéristiques de la houle (Culture maritime)

1.4.2. Climat de la houle :

L'ensemble des analyses de houle ont été extraites à partir de la base de données « Wave Climate ». Ces données consistent en une vaste collection d'enregistrements de vagues pour la zone de littoral centre algérien (la baie d'Alger, la baie de Bousmail et la baie de Zemmouri) ; capturés à des intervalles réguliers de trois heures. Chaque enregistrement comprend 21 paramètres, capturant divers aspects des caractéristiques des vagues.

1.4.2.1. Climat de la houle de la baie d'Alger :

➤ La hauteur significative :

La hauteur significative de la houle (H_s) varie entre 0,03 m et 6,53 m avec une moyenne de 0,91 m sur l'ensemble de la période de 30 ans de 1992 à 2021.

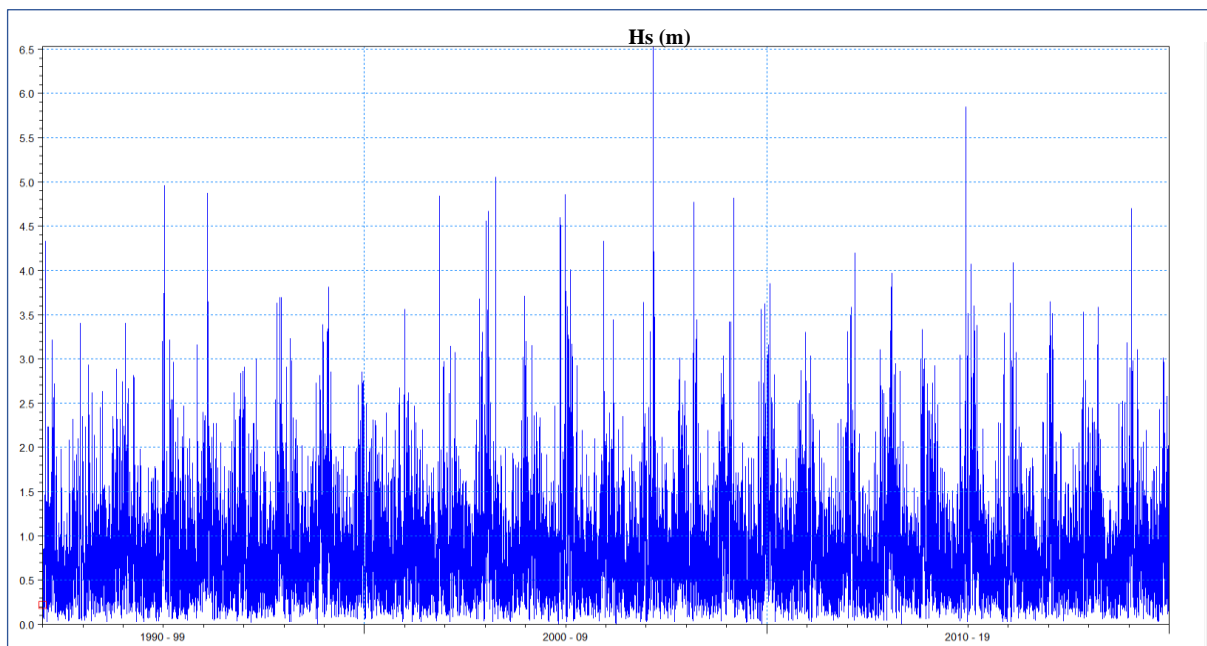


Figure 3 Représentation du spectre des hauteurs de houle enregistrées (baie d'Alger)

À partir du spectre Figure I-3, nous pouvons voir que la plupart des houles sont inférieures à 3m, avec des valeurs extrêmes tous les 3 à 6 ans qui dépassent 4m. L'analyse de ces données nous a permis de déceler des hauteurs de houle notables, qui sont les suivantes :

Tableau 1 **Hauteurs marquantes de la houle (baie d'Alger).**

Hauteurs marquantes de la houle	Valeur (m)
H_m (Hauteur moyenne)	0.81
H_s (moyenne du 1/3 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	1.67
$H_{10\%}$ (moyenne du 1/10 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	2.44
H_{max} (valeur maximale de l'enregistrement)	6.53

➤ **La période pic :**

Les périodes enregistrées varient considérablement, allant de 2,5 secondes à 17,57 secondes, mais se concentrent principalement entre 3 et 10 secondes. Le traitement de ces données nous a aussi permis de définir quelques périodes marquantes de la houle représentées dans le Tableau I-2.

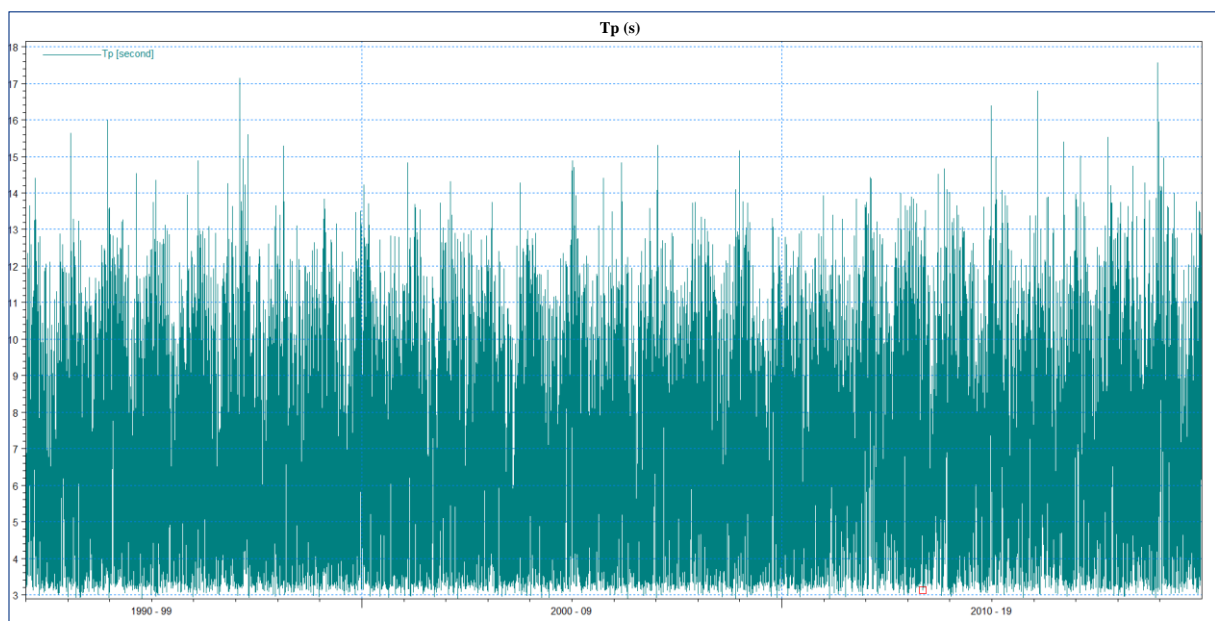
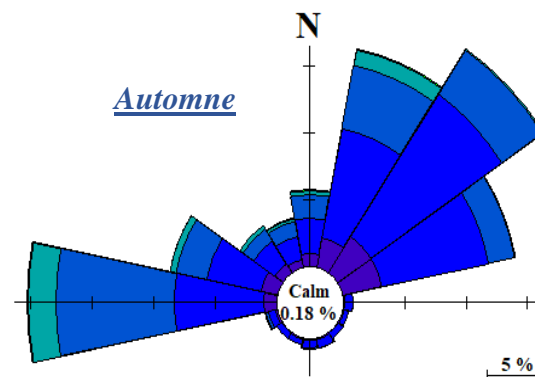
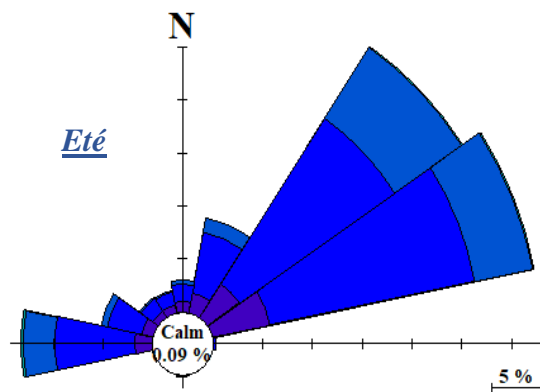
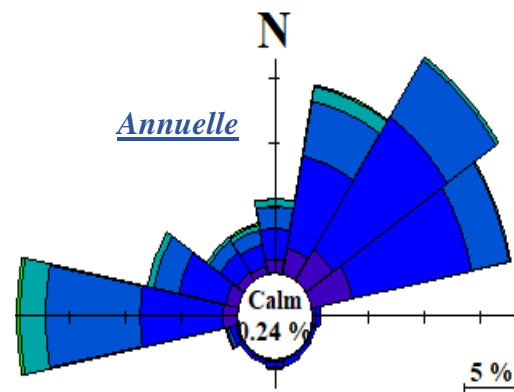
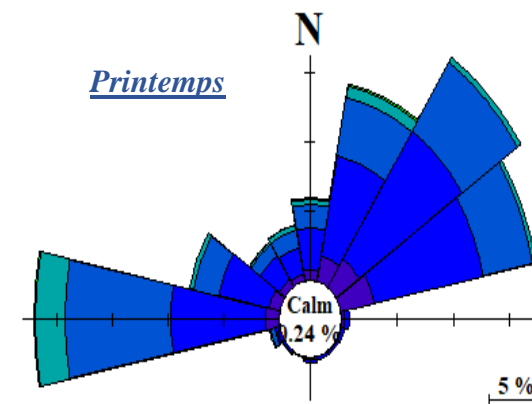
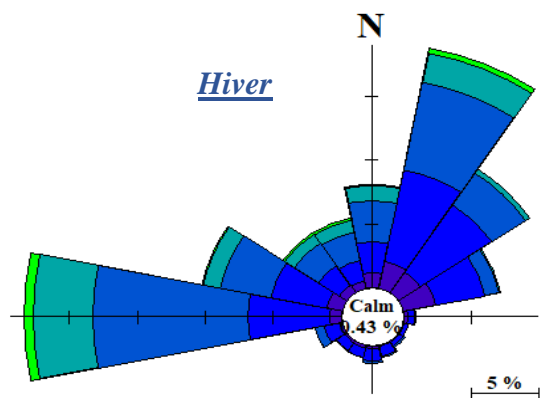


Figure 4: Représentation du spectre des périodes pics enregistrées (baie d'Alger)

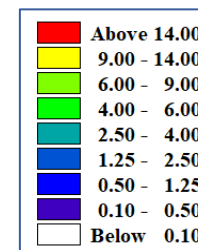
Tableau 2 Périodes Pics de la houle (baie d'Alger).

Périodes marquantes de houles	Valeur (s)
T_m (période moyenne)	7.19
T_s (moyenne du 1/3 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	9.5
$T_{10\%}$ (moyenne du 1/10 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	11.09
T_{Hmax} (période correspondant la hauteur maximale de l'enregistrement)	10.37
T_{max} (valeur maximale de l'enregistrement)	17.57

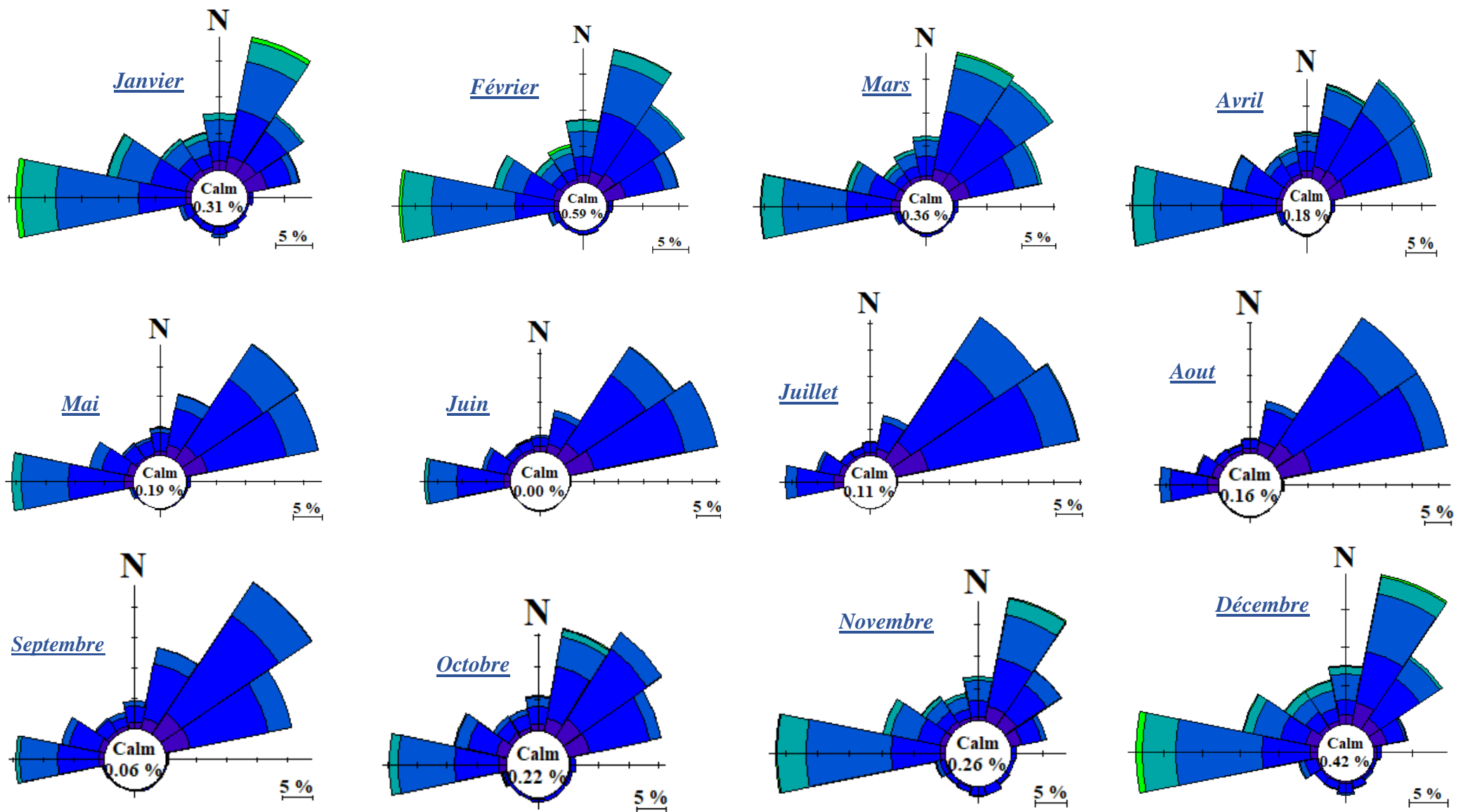
Les données acquises ont permis également de tracer les roses de houles annuelles, scissionnaires et menstruelles de la zone illustrée dans les figures qui suivent.



Hauteurs de la houle (m)



Roses mensuelles des houles au large de la baie d'Alger entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com)



Hauteurs de la houle (m) :

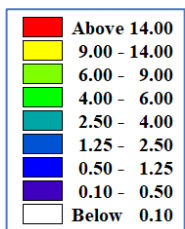


Figure 6 Roses mensuelles des houles au large de la baie d'Algier entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com)

➤ Interpretation des Roses des houles :

La rose des houles annuelle, illustrée dans la Figure 5, révèle clairement la prédominance de trois directions principales, le nord-est, le nord nord-est et l'ouest, qui ensemble représentent près de 70 % de toutes les vagues soufflant sur la baie d'Alger. Ces données indiquent également des hauteurs de crête dépassant les 6m dans ces directions.

En examinant les saisons spécifiques, nous observons :

- le nord-est reste dominant en automne, suivi de près par l'ouest
- Pendant l'hiver, c'est l'ouest qui prend le dessus suivi par le nord-nord-est.
- Au printemps, l'ouest représente le pourcentage le plus élevé des houles, tandis que le nord-est suit de près.
- En été, le nord-est domine suivi du nord-nord-est.

Ces observations nous fournissent un aperçu crucial des tendances saisonnières et directionnelles des houles, ce qui est essentiel pour la sécurité et la planification des activités maritimes et côtières.

En regardant les roses des houles mensuelles comme illustré dans la Figure 6, nous pouvons catégoriser les vagues en trois groupes : calmes, agitées et alternant entre les deux.

- Les mois de juin, juillet, août et septembre présentent généralement des vagues calmes, avec des hauteurs inférieures à 3 mètres.
- En revanche, les mois d'octobre, novembre, avril et mai sont plus agités, avec une alternance entre calme et agitation, mais aussi plusieurs pics de plus de 4 mètres enregistrés.
- Pour les mois restants : décembre, janvier, février et mars ; les hauteurs dépassent généralement les 5 mètres tout au long de l'année

1.4.2.2. Climat des houles de la baie de Zemmouri :

➤ La hauteur significative :

La hauteur significative de la houle (Hs) varie entre 0,03 m et 6.98 m avec une moyenne de 1.17 m sur l'ensemble de la période de 30 ans de 1992 à 2021.

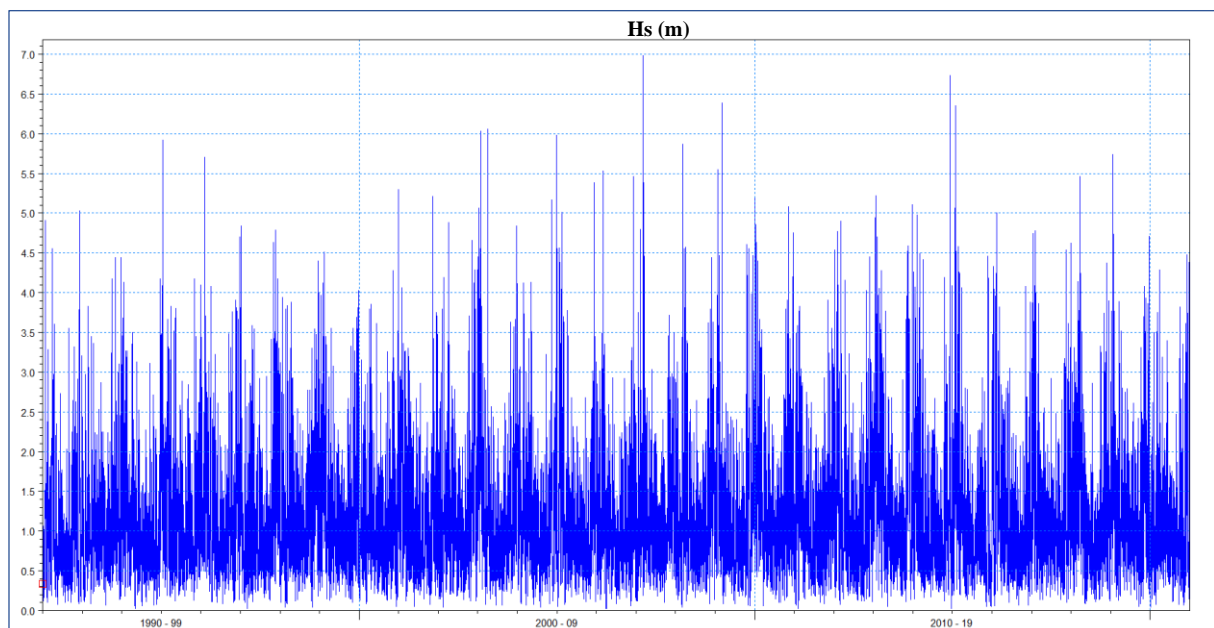


Figure 7 Représentation du spectre des hauteurs de houle enregistrées (baie de Zemmouri)

D'après le spectre présenté à la Figure 7, on observe que la majorité des houles ont une hauteur inférieure à 4 mètres, tandis que les valeurs extrêmes, survenant tous les 2 à 4 ans, dépassent les 5 mètres. Cette analyse a permis d'identifier des hauteurs de houle notables, telles que :

Tableau 3: Hauteurs marquantes de la houle (Baie de Zemmouri).

Hauteurs marquantes de la houle	Valeur (m)
H_m (Hauteur moyenne)	1.17
H_s (Moyenne du 1/3 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	2.00
$H_{10\%}$ (Moyenne du 1/10 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	2.89
H_{max} (Valeur maximale de l'enregistrement)	6.98

➤ **La période pic :**

Les périodes enregistrées varient considérablement, allant de 2,5 secondes à 17,57 secondes, mais se concentrent principalement entre 3 et 10 secondes. Le traitement de ces données nous a aussi permis de définir quelques périodes marquantes de la houle représentées dans le Tableau I-4.

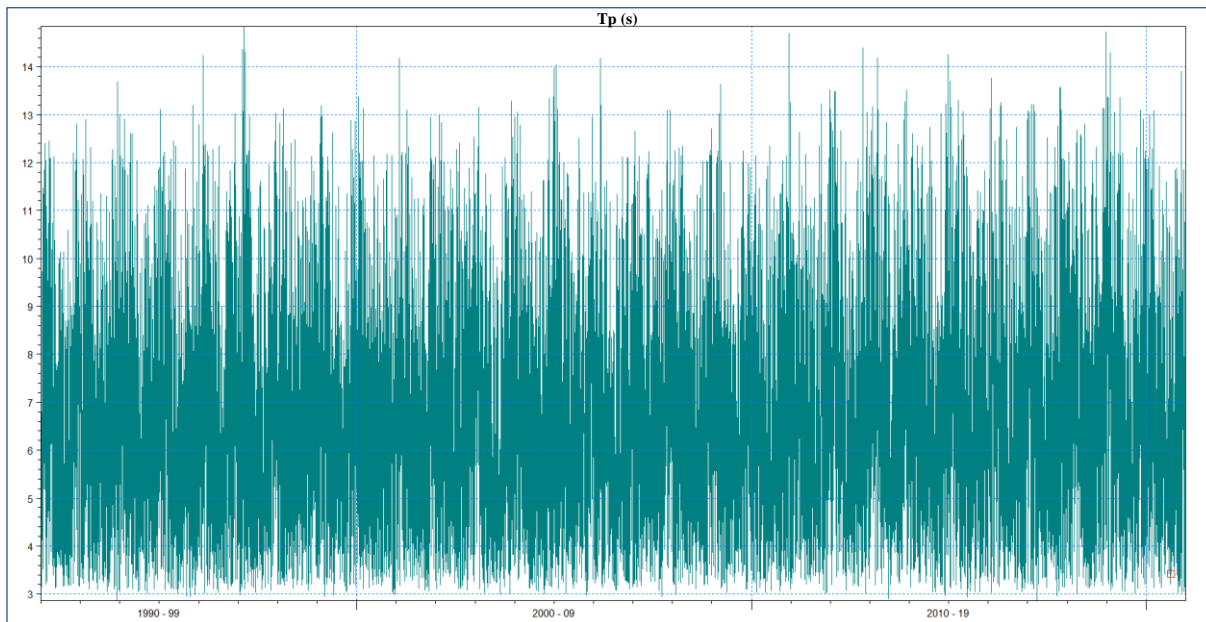


Figure 8 Représentation du spectre des périodes pics enregistrées (baie de Zemmouri)

Tableau 4 Périodes Pics de la houle (baie de Zemmouri).

Périodes marquantes de houles	Valeur (s)
T_m (période moyenne)	6.74
T_s (moyenne du 1/3 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	8.80
$T_{10\%}$ (moyenne du 1/10 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	10.36
T_{Hmax} (période correspondant la hauteur maximale de l'enregistrement)	9.48
T_{max} (valeur maximale de l'enregistrement)	14.84

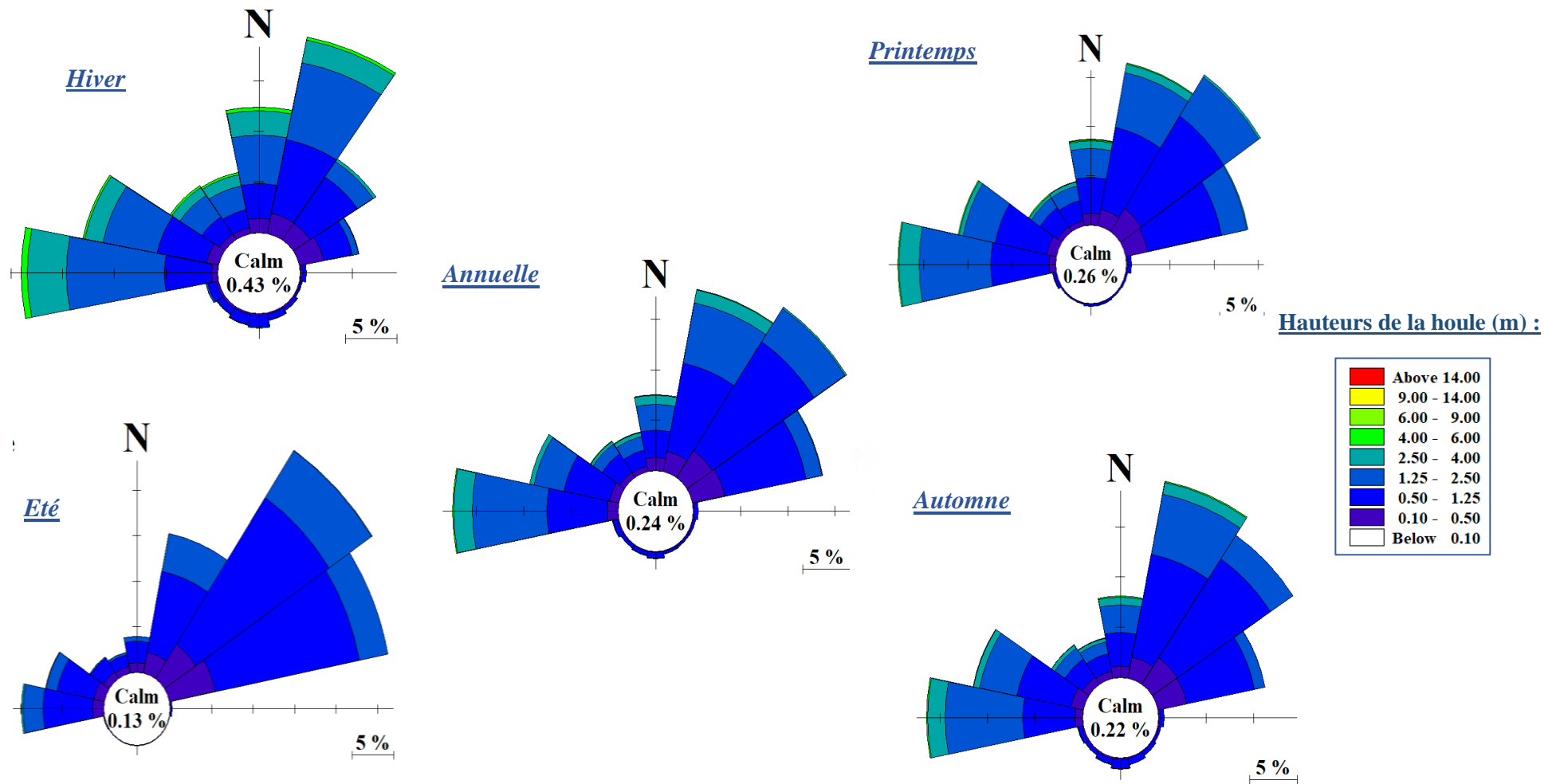


Figure 9: Roses trimestrielles et annuelles des houles au large de la zone de Zemmouri entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com).

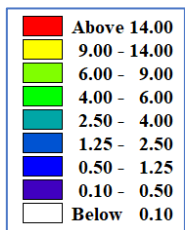
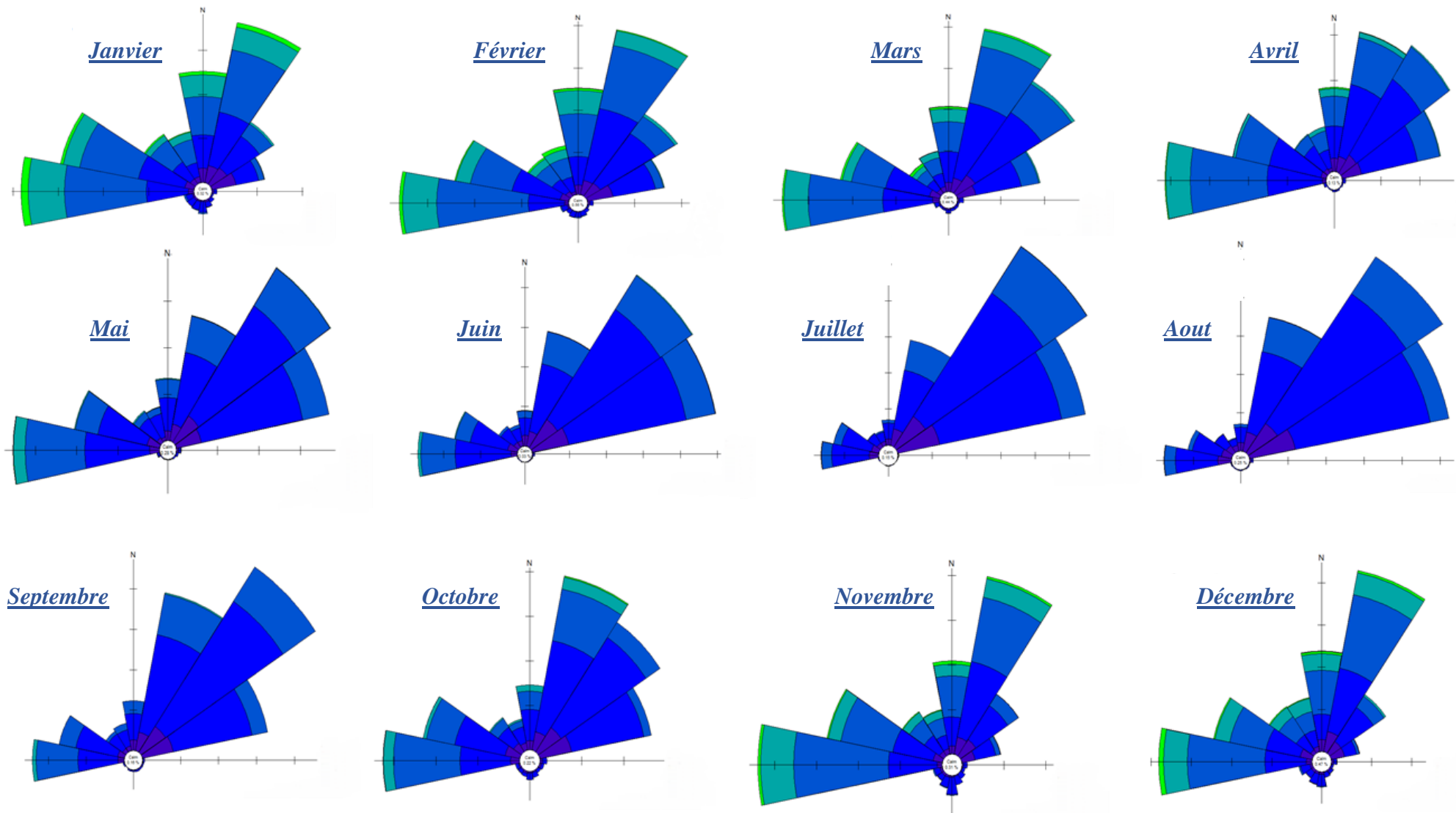


Figure 10 *Roses mensuelles des houles au large de la Baie de Zemmouri entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com)*

➤ Interpretation des Roses des houles :

Au large des côtes de la zone d'étude, la rose annuelle des houles (Figure 9) indique que les vagues touchant le site proviennent principalement de l'Ouest, du Nord-Nord-Est et du Nord-Est. L'analyse des roses des houles trimestrielles révèle les observations suivantes :

- En été, les houles les plus fréquentes proviennent du Nord-Est, avec une hauteur significative ne dépassant pas 2,5 mètres.
- En hiver, au printemps et en automne, les vagues dominantes viennent de l'Ouest, avec des hauteurs significatives oscillant entre 3 et 5 mètres.
- En hiver, des vagues provenant du Nord-Nord-Est peuvent atteindre des hauteurs allant jusqu'à 6 mètres.

En examinant les roses des houles mensuelles illustrées dans la Figure 10, nous constatons des résultats similaires à ceux observés dans la baie d'Alger :

- Juin, juillet, août et septembre : Ces mois présentent généralement des vagues calmes, avec des hauteurs inférieures à 3 mètres.
- Octobre, novembre, avril et mai: Ces mois sont plus agités, avec quelques pics de vagues dépassant les 5 mètres.
- Novembre, décembre, janvier, février et mars : Durant ces mois, les conditions sont encore plus agitées, avec des hauteurs de houle dépassant généralement les 5 mètres.

1.4.2.3. Climat des houles de la baie de Bousmail :

• **La hauteur significative :**

Sur une période de 30 ans allant de 1992 à 2021, la hauteur significative de la houle (Hs) varie de 0,02 mètre à 6,85 mètres, avec une moyenne de 1,05 mètre.

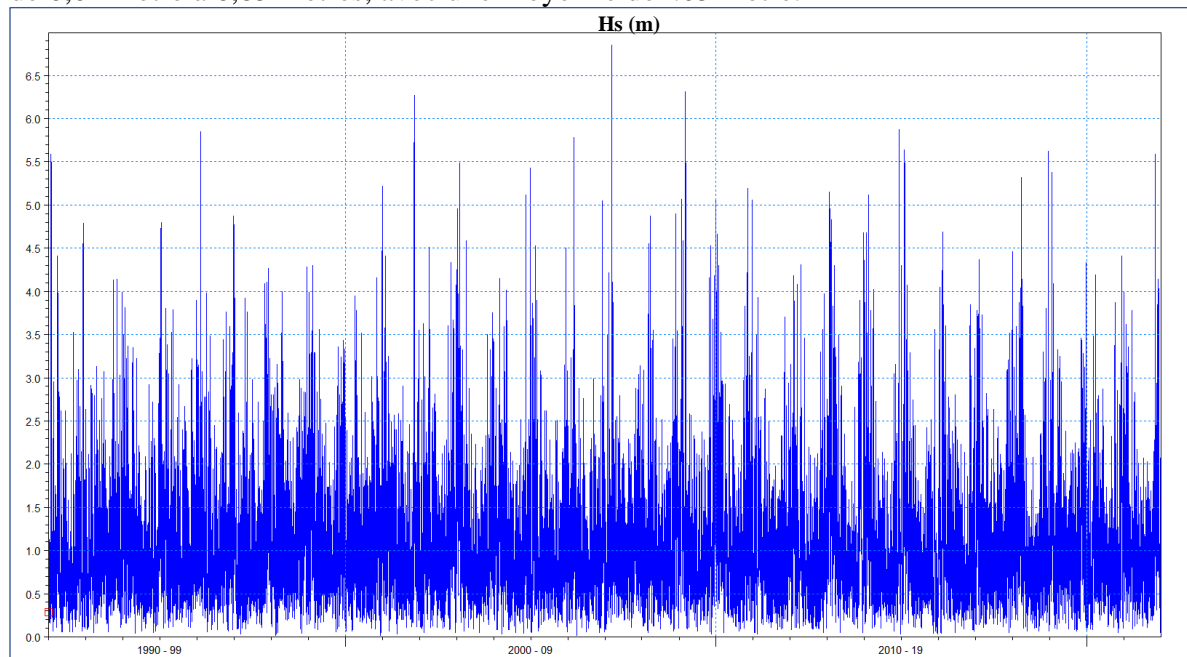


Figure 11 Représentation du spectre des hauteurs de houle enregistrées (baie de Bousmail)

Selon le spectre illustré à la Figure 11, la plupart des houles atteignent des hauteurs de moins de 4 mètres. Cependant, des valeurs extrêmes, qui se produisent tous les deux ans, dépassent cette limite. Cette analyse a permis de mettre en évidence des hauteurs de houle significatives, notamment :

Tableau 5 Hauteurs marquantes de la houle (Baie deBousmail).

Hauteurs marquantes de la houle	Valeur (m)
H_m (Hauteur moyenne)	1.05
H_s (Moyenne du 1/3 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	1.81
$H_{10\%}$ (Moyenne du 1/10 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	2.59
H_{max} (Valeur maximale de l'enregistrement)	6.85

➤ **La période pic :**

Les périodes observées varient largement, de 2,93 secondes à 17,25 secondes, avec une concentration majeure entre 3 et 10 secondes. L'analyse de ces données nous a également permis d'identifier quelques périodes significatives de la houle, comme indiqué dans le Tableau I-6.

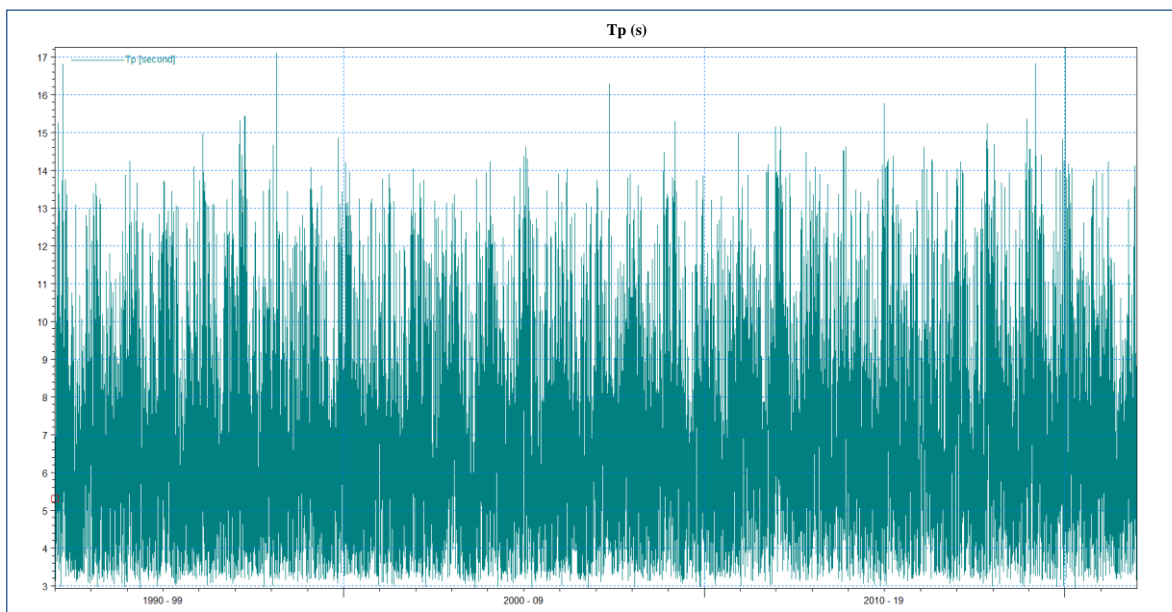


Figure 12 Représentation du spectre des périodes pics enregistrées (baie de Bousmail)

Tableau 6 Périodes Pics de la houle (baie de Bousmail).

Périodes marquantes de houles	Valeur (s)
T_m (période moyenne)	6.83
T_s (moyenne du 1/3 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	9.05
$T_{10\%}$ (moyenne du 1/10 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	10.79
T_{Hmax} (période correspondant la hauteur maximale de l'enregistrement)	10.55
T_{max} (valeur maximale de l'enregistrement)	17.25

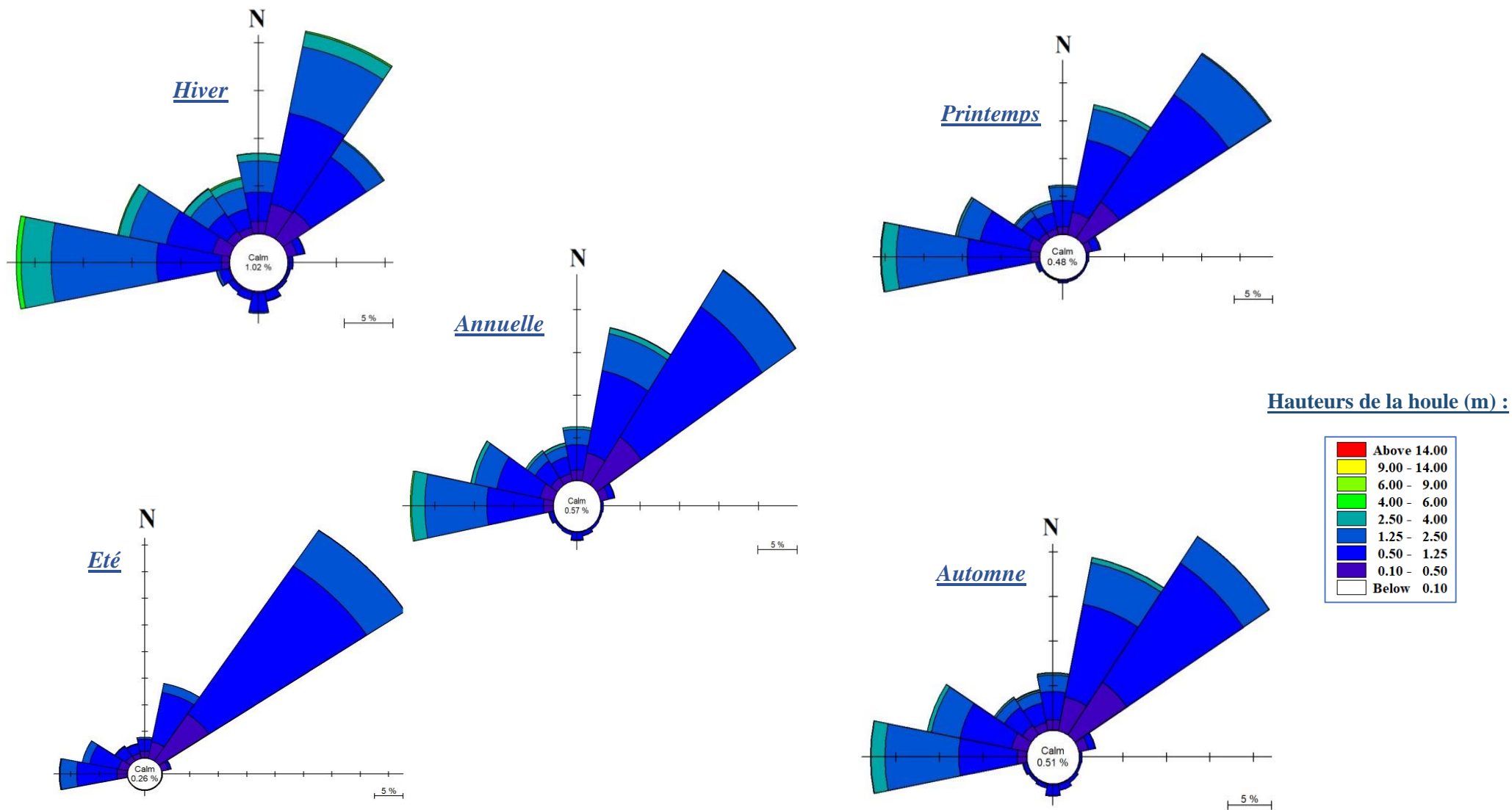
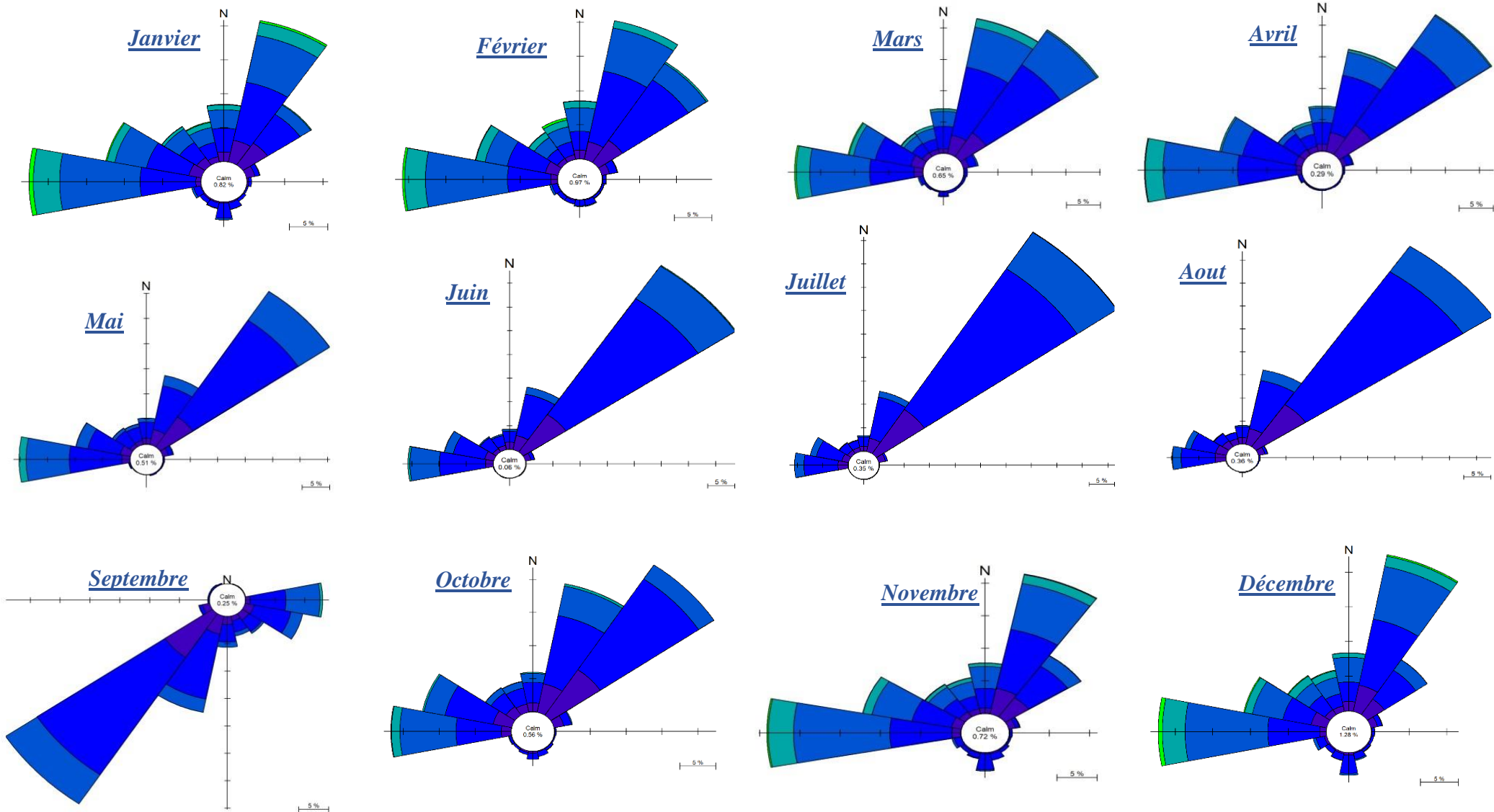


Figure 13 Roses trimestrielles et annuelles des houles au large de la baie de Bou ismail entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com)



Hauteurs de la houle (m) :

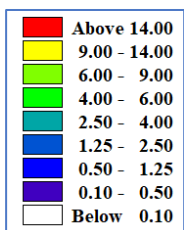


Figure 14 Roses mensuelles des houles au large de la Baie de Bou ismail entre 1992 et 2021. (Source : www.waveclimate.com)

➤ Interpretation des Roses des houles :

L'analyse statique des roses de houle montre que :

- Tout au long de l'année, les houles dominantes proviennent du nord-est. Ces houles maintiennent généralement une hauteur modérée, allant de 0,5 à 1,25 mètres.
- Durant la saison hivernale, les houles les plus notables sont observées et se concentrent dans deux régions principales. Le secteur ouest, où sont présentes des houles avec une hauteur prédominante allant de 1,25 à 2,5 mètres avec quelques pics de 5m. De même, le secteur nord-est, connaît des houles d'ampleur comparable.
- Au printemps, les houles dominantes proviennent du nord-est. Ces houles présentent des amplitudes et des directions similaires à celles observées en automne.
- Pendant les mois d'été, les houles dominantes proviennent principalement du nord-est. Leur ampleur reste conforme à celle des saisons précédentes.
- Au cours de la saison d'automne, les données révèlent que la majorité des houles proviennent du nord-est, avec une direction principale allant de 22,5 à 67,5 degrés. Ces houles ont généralement des amplitudes qui fluctuent entre 0,5 et 1,25 ; et peuvent aussi atteindre les 4 mètres

Pour les roses mensuelles, comme dans d'autres baies, les hauteurs les plus importantes ont été observées en Janvier, février, mars, novembre et décembre où les houles atteignent jusqu'à 5,5 mètres.

1.4.3. Climat du vent :

Le vent, en tant que force naturelle, exerce une influence significative sur les conditions maritimes locales, notamment sur la formation et le comportement des houles ainsi que la genèse d'événements météorologiques extrêmes, comme les tempêtes, et leur impact sur les activités maritimes et côtières de ces régions. Pour appréhender son impact, une analyse du climat éolien s'avère essentielle. Cette étude se base sur les données recueillies entre le 01 janvier 1992 et le 31 décembre 2021 de la zone d'étude qui englobe les trois baies d'Alger, Zemmouri et Bou ismail, extraites de la base de données sur le climat des vagues, provenant d'Infoplaza

1.4.3.1. Climat du vent de la baie d'Alger :

Le spectre de la vitesse du vent (Figure 15) montre que la plupart des vents au large de la baie d'Alger ont des vitesses allant de 0 à 24.80 m/s, avec une majorité comprise entre 0 et 13 m/s. Cette analyse a permis d'identifier certaines vitesses remarquables du vent, présentées dans le Tableau I-7.

Tableau 7 Vitesses marquantes du vent (baie d'Alger)

Vitesses marquantes du vent	Valeur (m/s)
U_{10m} (vitesse moyenne du vent)	5.11
U_{10_Hmax} (Vitesse correspondant la hauteur maximale de l'enregistrement)	21.8
U_{10max} (valeur maximale de l'enregistrement)	20.6
U_s (vitesse de 1/3 supérieur)	8.60

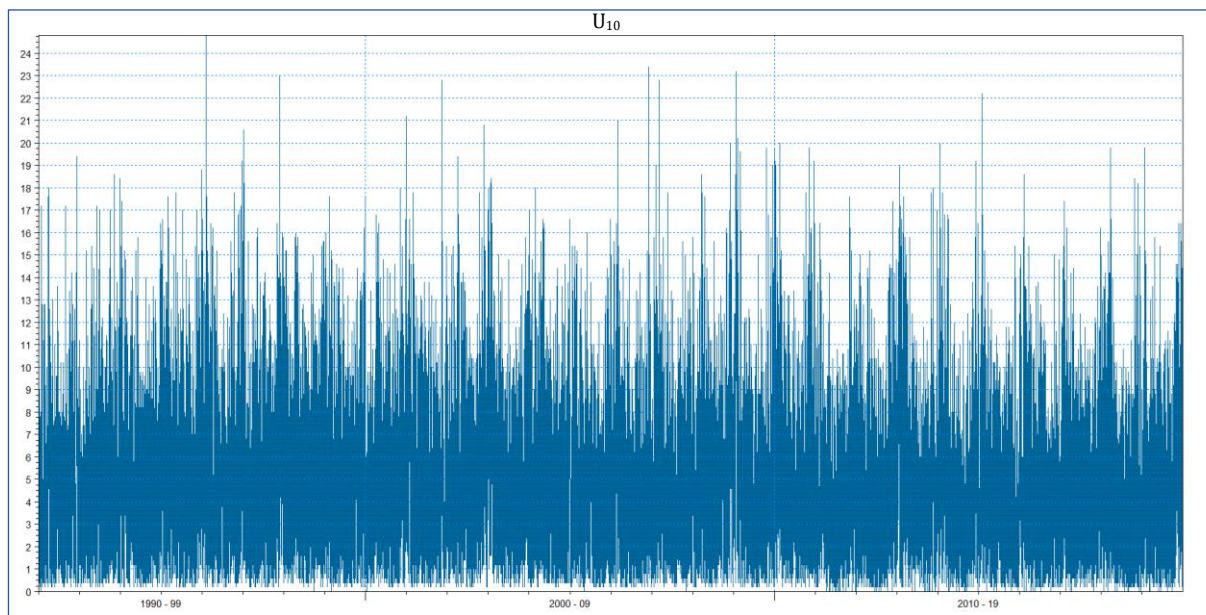


Figure 15 : Représentation du spectre de la vitesse du vent (baie d'Alger)

➤ **Interprétation des roses de vent :**

La rose des vents annuelle (Figure 16) révèle que les vents au large de la baie d'Alger sont principalement dirigés vers le Nord-Est et le Sud-Ouest, représentant la majeure partie des enregistrements. La vitesse maximale du vent atteinte était de 25,6 m/s, provenant du secteur Ouest.

- Automne : L'analyse de la rose des vents montre une prédominance des directions Sud-Ouest et Nord-Est, bien que les directions les plus fréquentes soient l'Ouest et l'Est. Les vitesses de vent sont réparties de manière relativement uniforme, indiquant l'absence d'événements extrêmes durant cette saison.
- Hiver : En hiver, les vents sont principalement dirigés vers le Sud-Ouest et l'Ouest, avec une intensité variable. La vitesse maximale du vent a été enregistrée en hiver, soulignant la puissance des vents durant cette période.
- Printemps : Au printemps, les vents dominant principalement du Nord-Est, suivis du Sud-Ouest. Les vitesses de vent sont réparties de manière équilibrée, indiquant que cette saison est également dépourvue d'événements extrêmes.
- Été : L'analyse de la rose des vents estivaux montre que la direction dominante est celle du secteur Nord-Est. Cependant, l'Est est la direction où le vent souffle fréquemment durant cette saison.

En observant les roses mensuelles, on note que durant les mois de janvier, février, novembre et décembre, les vents dominants proviennent de l'ouest et du sud-ouest, avec des vitesses pouvant atteindre jusqu'à 20 m/s. En revanche, pour les autres mois, les vitesses sont moins élevées, ne dépassant pas 12 m/s en juillet, août et septembre, et atteignant jusqu'à 15 m/s pendant les mois intermédiaires.

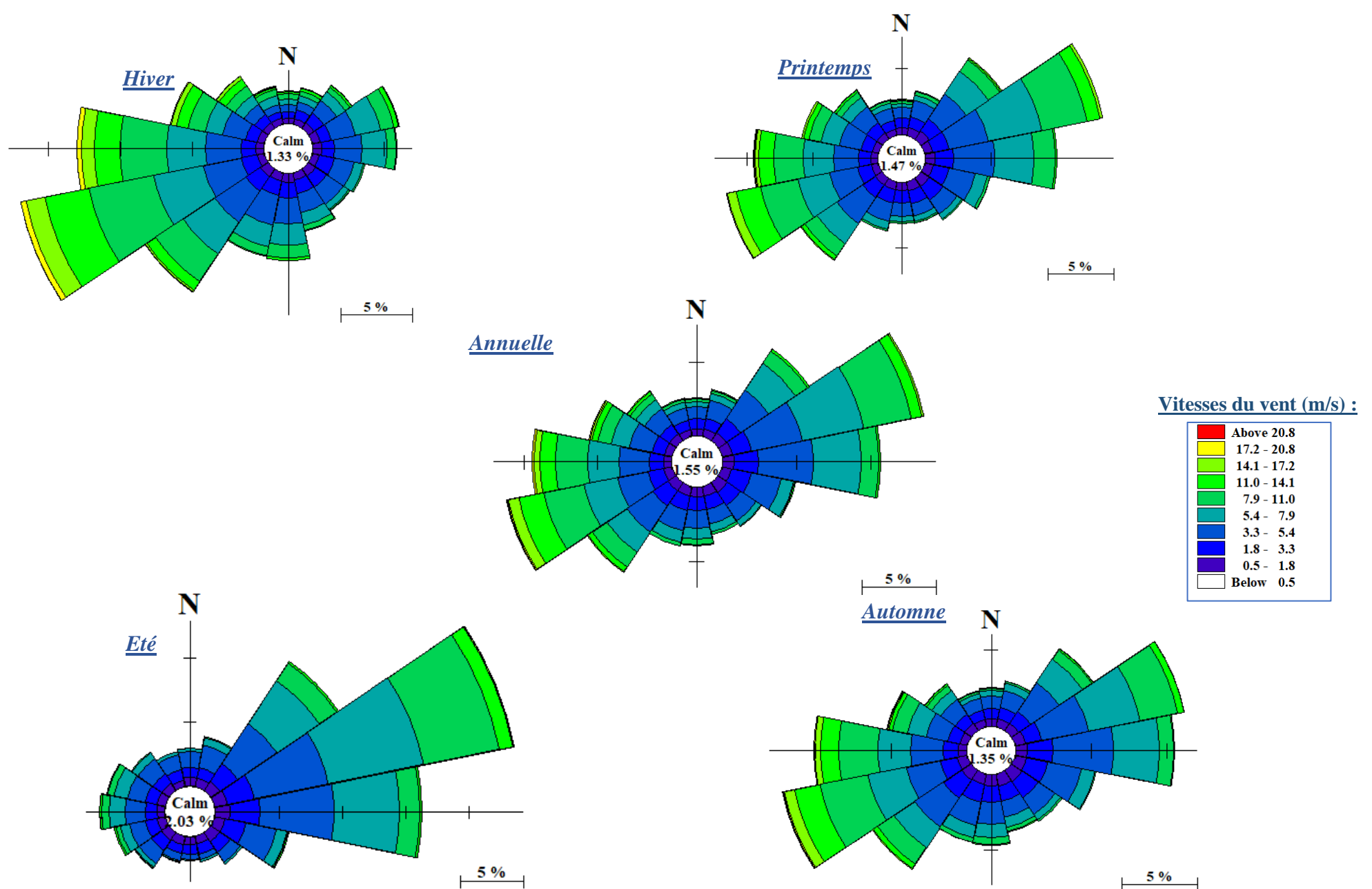
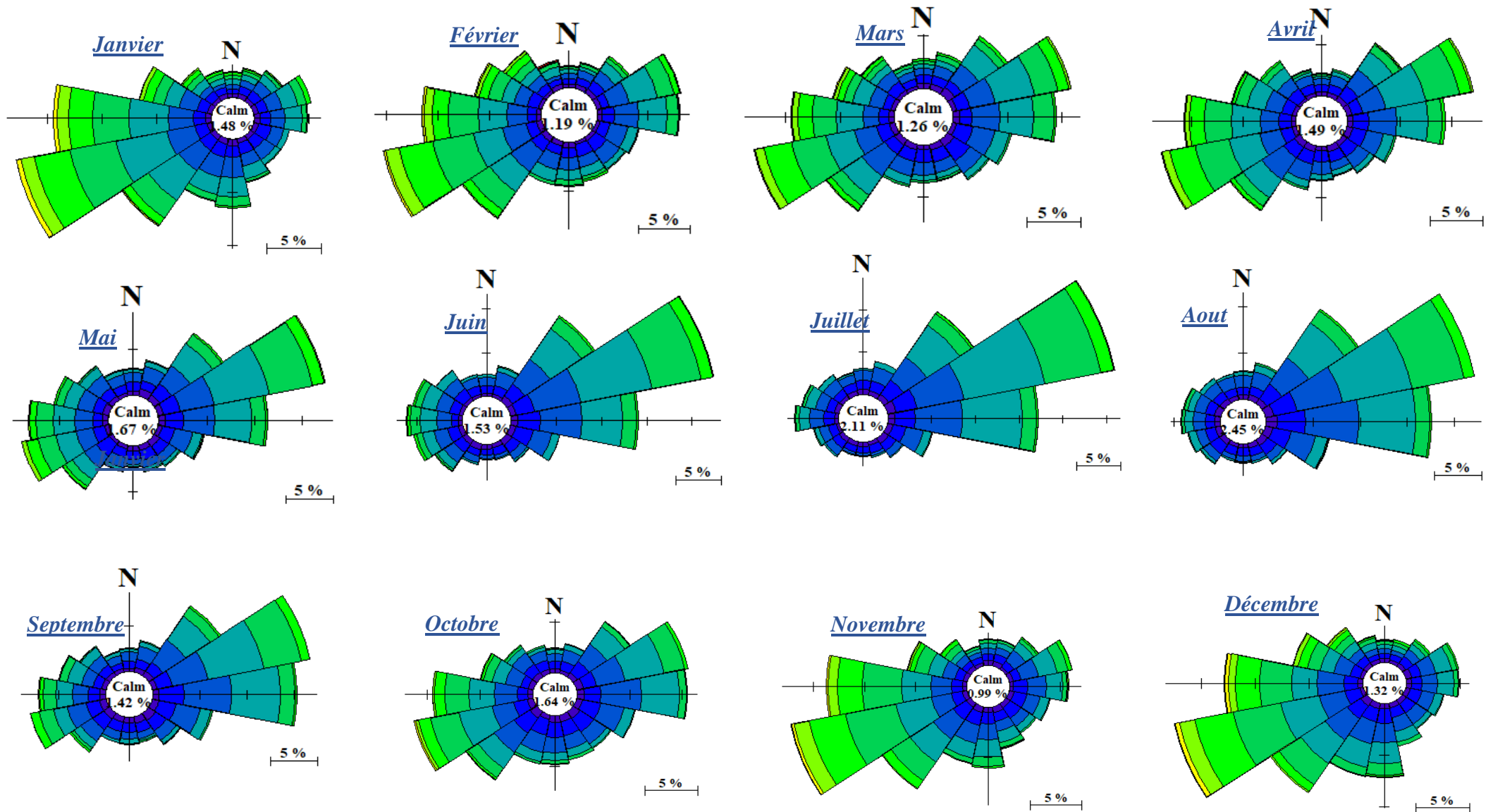


Figure 16 Roses trimestrielles et annuelles des vents au large de la baie d'Alger entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com)



Vitesses du vent (m/s)

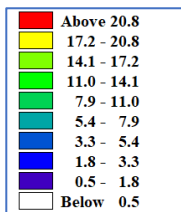


Figure 17 Roses mensuelles des vents au large de la baie d'Alger entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com)

1.4.3.2. Climat du vent de la baie de Zemmouri :

Le diagramme de la vitesse du vent révèle que la majorité des vents observés au large de la baie de Zemmouri varient de 0 à 22.2 m/s, avec une majorité significative entre 0 et 13 m/s. Cette étude a également permis de repérer des vitesses de vent particulières, répertoriées dans le Tableau I-8.

Tableau 8 Vitesses marquantes du vent (baie de Zemmouri)

Vitesses marquantes du vent	Valeur (m/s)
U_{10m} (vitesse moyenne du vent)	5.00
U_{10_Hmax} (vitesse correspondant la hauteur maximale de l'enregistrement)	20.2
U_{10max} (valeur maximale de l'enregistrement)	22.2
U_s (vitesse de 1/3 supérieur)	8.11

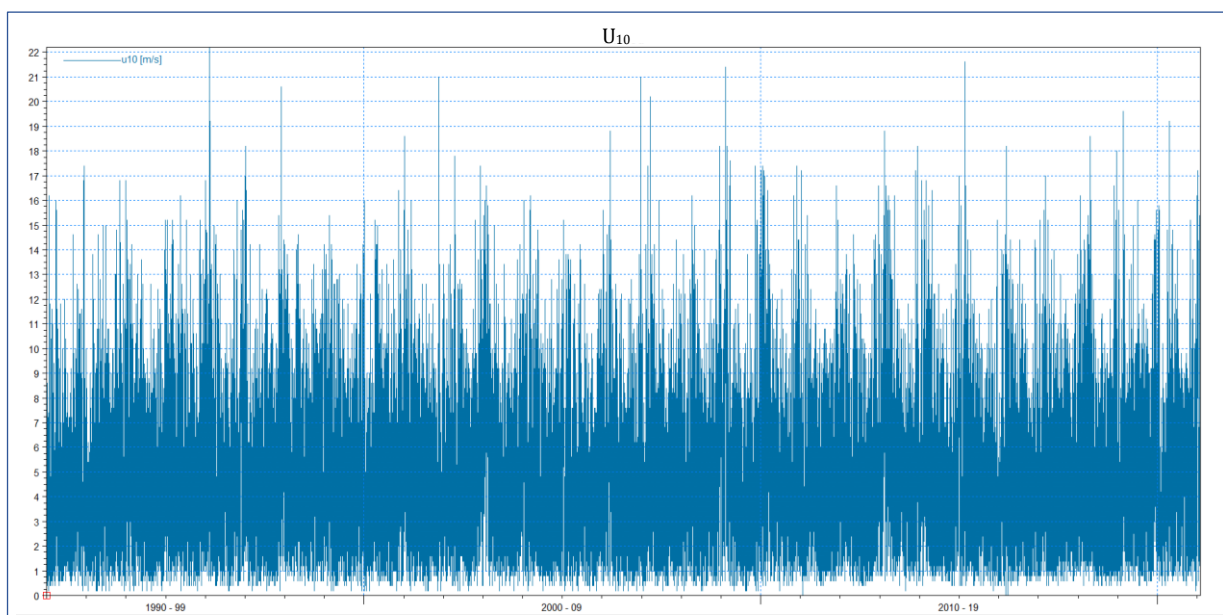


Figure 18: Représentation du spectre de la vitesse du vent (baie de Zemmouri)

➤ Interprétation des roses de vent :

L'analyse statique de ces données de vent révèle les directions les plus dominantes :

- Fréquence annuelle : Les vents les plus dominants sur la baie de Zemmouri proviennent de l'Est, de l'Ouest et du Nord-Est.
- Période printanière et automnale : Les vents prédominent dans les secteurs allant de l'Ouest au Sud-Ouest et de l'Est au Nord-Est, avec des vitesses dépassant les 16 m/s.
- Période hivernale : Les vents provenant du secteur Ouest sont les plus fréquents, avec des vitesses comprises entre 12 et 16 m/s. Les autres directions sont moins courantes et ont des fréquences relativement faibles.
- Période estivale : Les vents dominants proviennent principalement du Nord-Est et surtout de l'Est. Les vents du Nord-Ouest et du Nord sont également présents, mais avec une prédominance moins marquée.

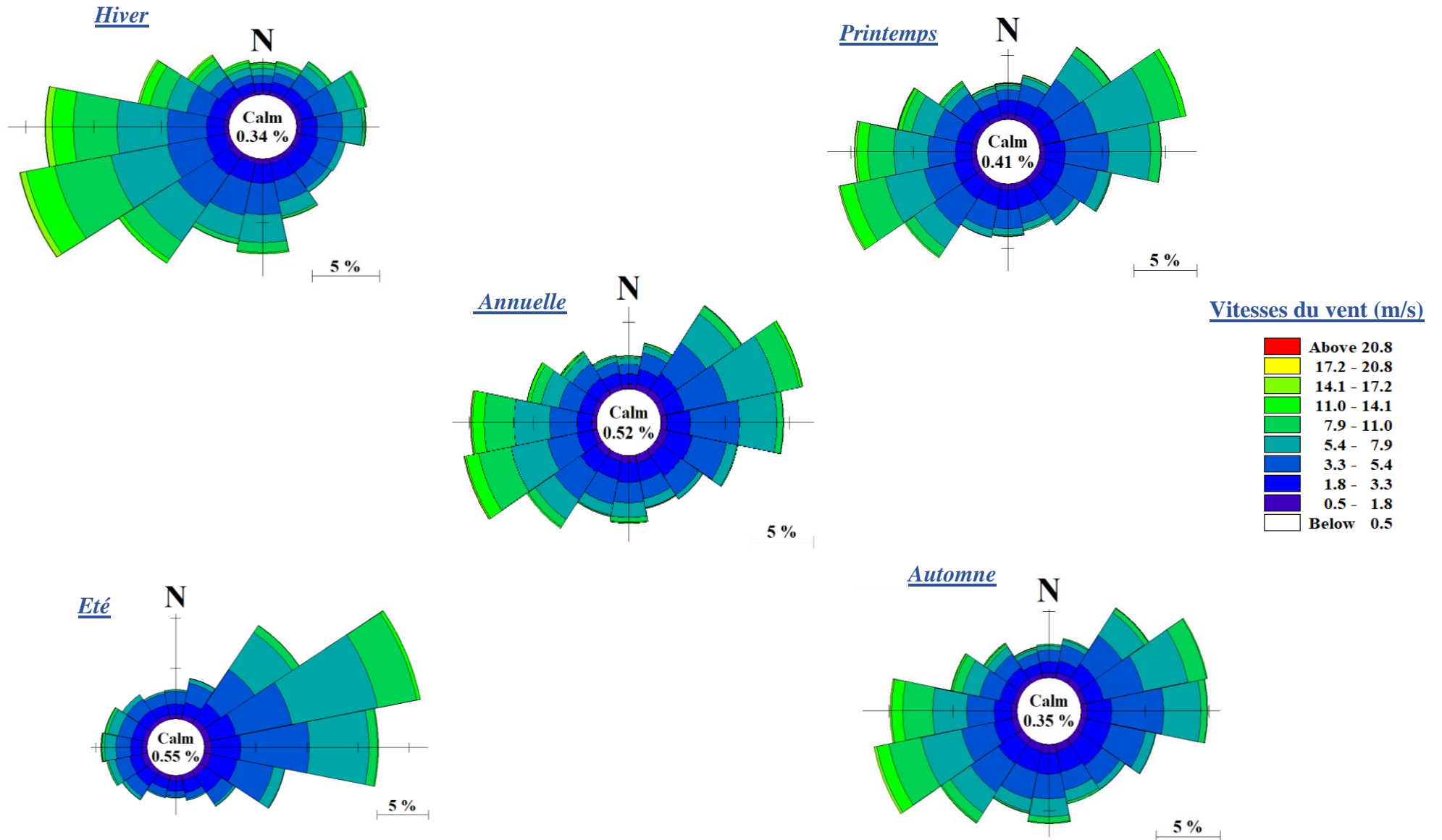
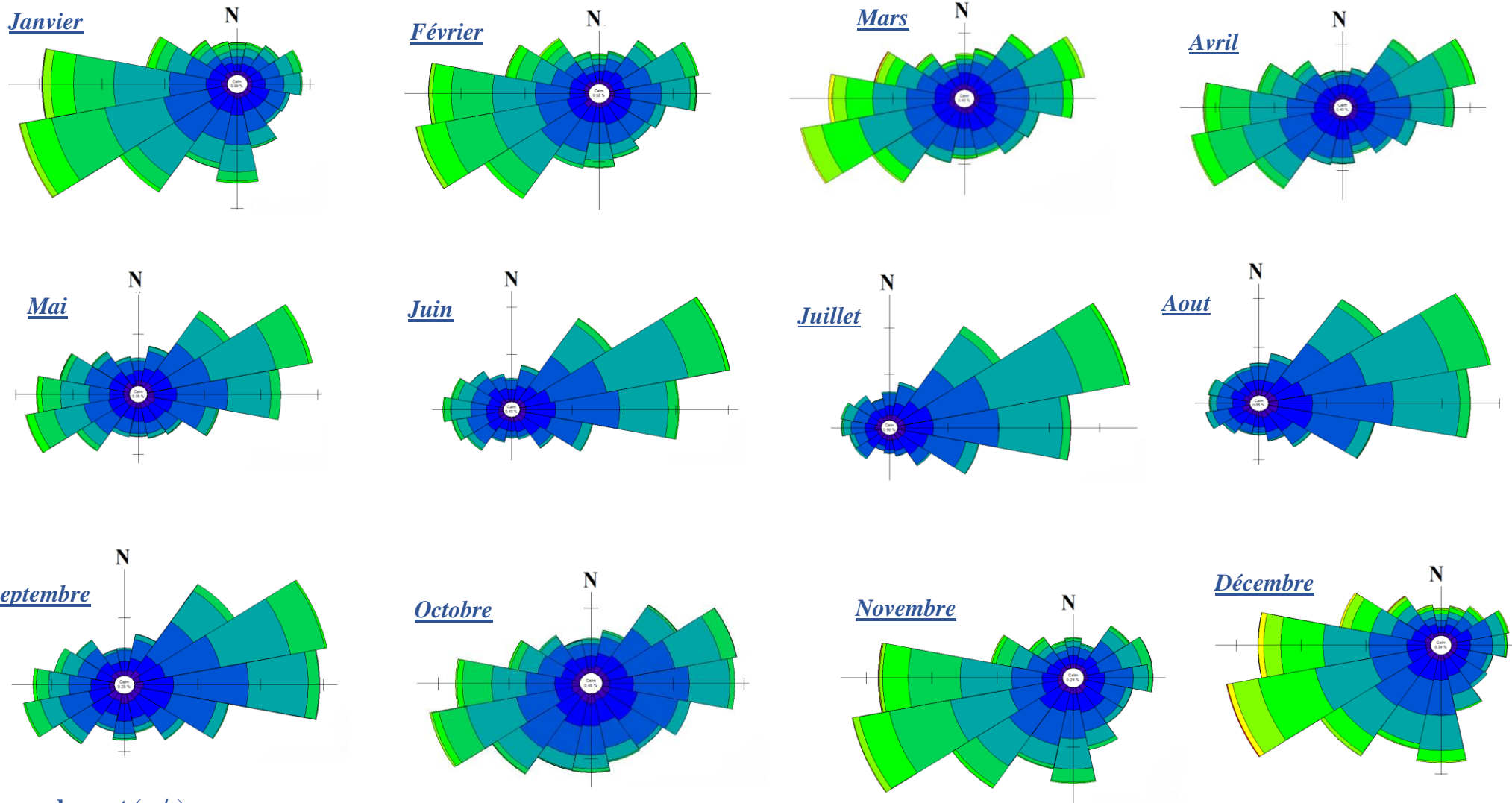


Figure 19 : Roses annuelles et saisonnières des vents au large de la baie de Zemmouri entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com).



Vitesses du vent (m/s)

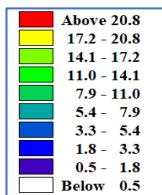


Figure 20 : Roses mensuelles des vents au large de la baie de Zemmouri entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com).

1.4.3.3. Climat du vent de la baie de Bousmail :

Le spectre des vitesses du vent illustré dans la Figure 21 indique que la plupart des vents enregistrés près de la baie de Bousmail oscillent entre 0 et 25,6 m/s, avec une prédominance notable entre 0 et 12 m/s. Cette analyse a identifié plusieurs valeurs remarquables de vitesses de vent, détaillées dans le Tableau 9.

Tableau 9 Vitesses marquantes du vent (baie de Bousmail)

Vitesses marquantes du vent	Valeur (m/s)
U_{10m} (vitesse moyenne du vent)	4.72
U_{10_Hmax} (vitesse correspondant la hauteur maximale de l'enregistrement)	21.2
U_{10max} (valeur maximale de l'enregistrement)	25
U_s (vitesse de 1/3 supérieur)	8.29

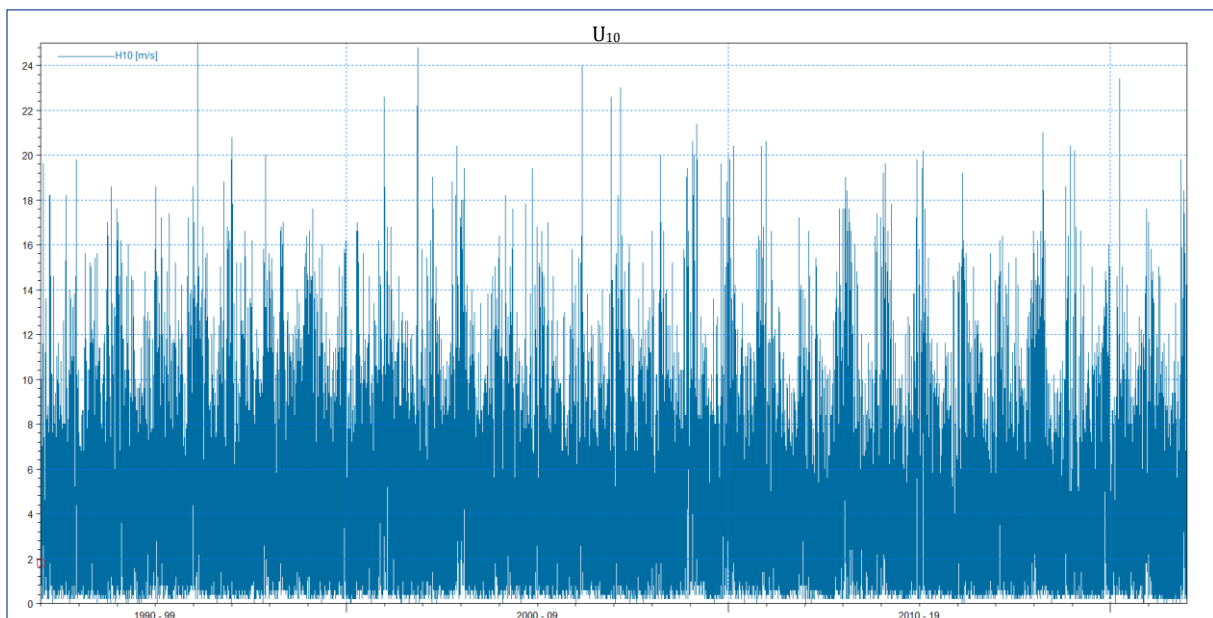


Figure 21: Représentation du spectre de la vitesse du vent (baie de Bousmail)

À partir de ces résultats, On a étudié la fréquence d'apparition du vent selon sa direction et son intensité à différentes échelles : annuelle, saisonnière et mensuelle. Cela a également permis de générer les roses des vents correspondantes (Figure 22 et Figure 23).

➤ **Interprétation des roses de vent :**

L'analyse statique de la rose annuelle de vent montre que les directions de vent les plus dominantes proviennent du sud-Ouest et de Nord-Est avec des vitesses pouvant atteindre 17m/s suivis par le Nord nord-est et le sud sud-ouest

Les données des fréquences de vent par direction et classe de vitesse pour chaque trimestre révèlent une prévalence des vents provenant des secteurs sud-ouest et nord-est, avec des vitesses généralement comprises entre 12 et 15 m/s pendant les saisons automnale et estivale. Au

printemps, la direction nord-est est dominante, tandis qu'en hiver, c'est la direction sud-ouest qui prédomine.

En examinant les roses des vents mois par mois, on observe une forte prédominance de la direction sud-ouest pendant les mois de novembre, décembre, janvier et février, tandis que la direction nord-est domine en avril et mai. Pour les autres mois, les deux directions sont souvent combinées.

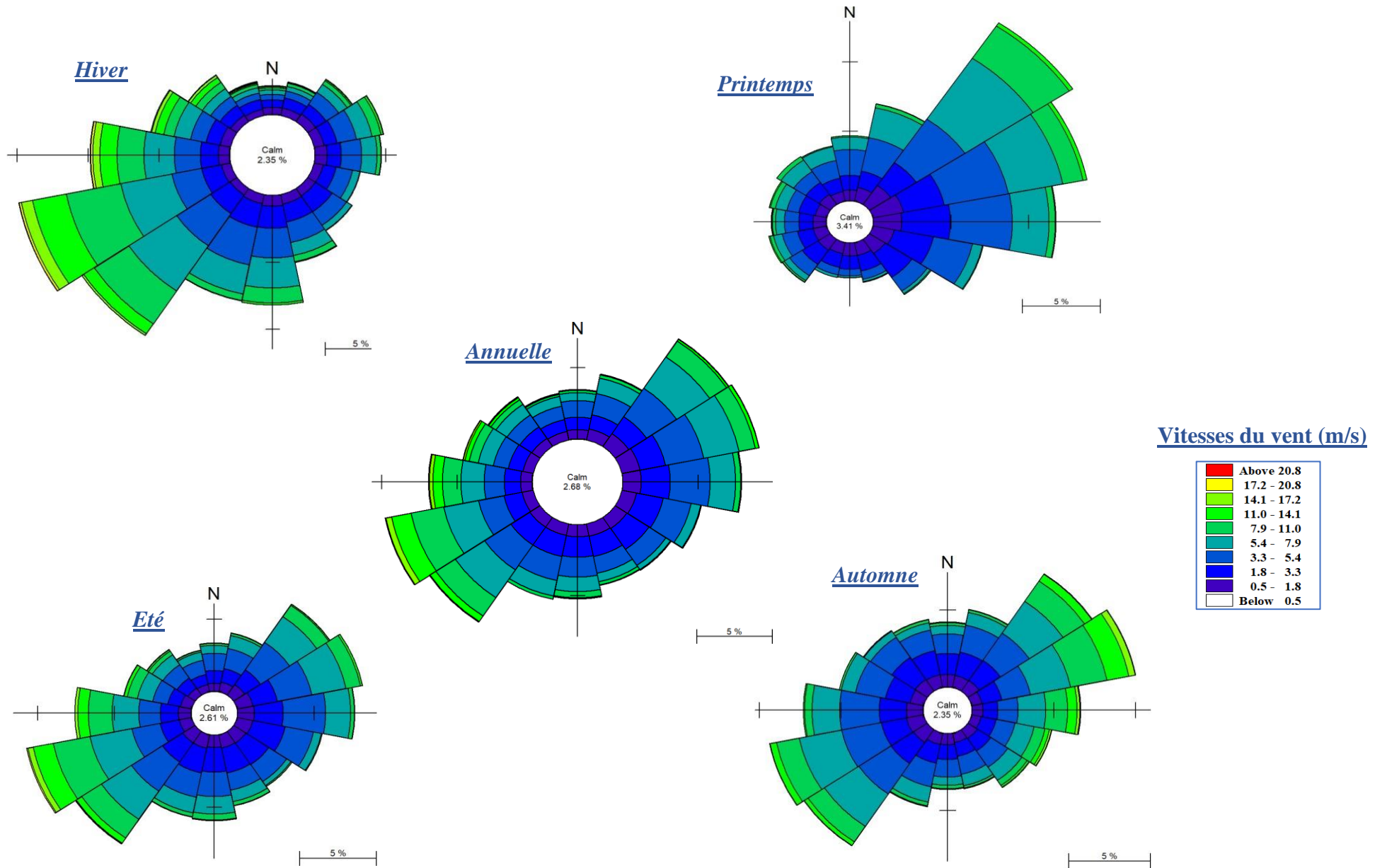
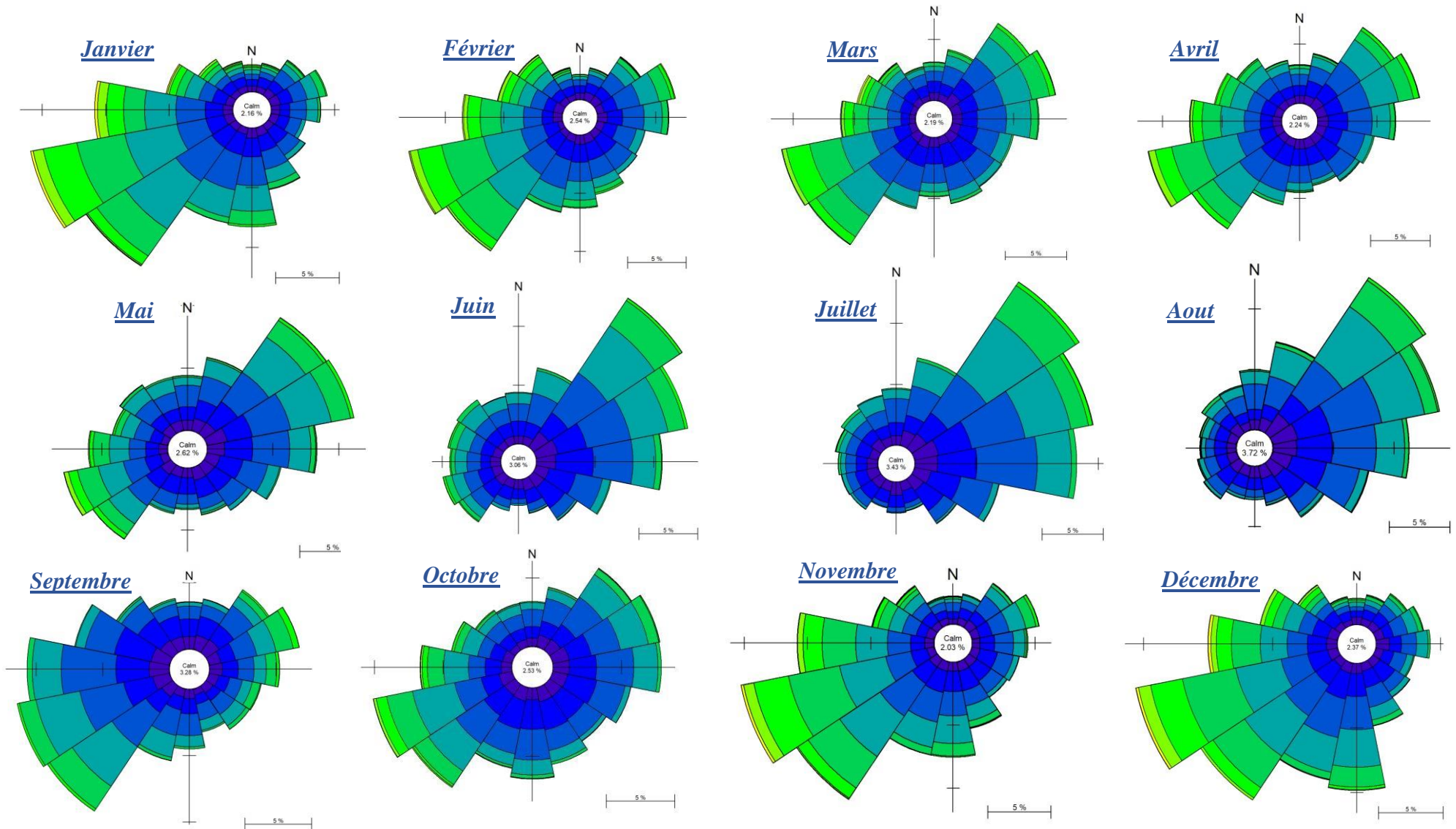


Figure 22: Roses annuelles et saisonnières des vents au large de la baie de Bousmail entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com).



Vitesses du vent (m/s)

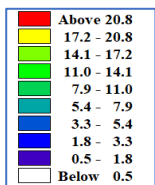


Figure 23 : Roses mensuelles des vents au large de la baie de Bousmail entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com).

1.5. Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a présenté une analyse approfondie du climat des vagues et du vent le long du littoral central algérien, soulignant l'importance cruciale de l'ingénierie côtière pour intégrer les facteurs hydrodynamiques, notamment les vagues et les vents, dans la planification et la conception des infrastructures côtières dans cette région.

II. Chapitre II. Caractérisation des ouvrages de protection dans la zone d'étude

2.1. Introduction :

La caractérisation et la localisation des ouvrages portuaires et des ouvrages de protection constituent une étape essentielle dans l'étude des impacts des événements météorologiques extrêmes dans la zone de la baie d'Alger, Bousmaïl et Zemmouri. Les informations recueillies dans ce chapitre permettront d'évaluer la vulnérabilité de ces infrastructures et de développer des stratégies de prévention et de protection adéquates.

2.2. Les Ouvrages de protection :

Il s'agit d'infrastructures artificielles érigées par l'homme dans le but de protéger les ports, les zones portuaires ainsi que les zones côtières contre les effets néfastes de la houle. Ces structures peuvent également être déployées pour sécuriser des installations isolées telles que les prises d'eau ou les émissaires en mer. (D. Cominade)

2.2.1. Les Types des Ouvrages de protections :

Les ouvrages de protection maritime peuvent être divisés en deux catégories principales : les ouvrages longitudinaux et les ouvrages transversaux. Chaque type d'ouvrage présente des caractéristiques et des fonctions spécifiques qui les rendent adaptés à différentes situations et conditions environnementales.

2.2.1.1. Ouvrages Longitudinaux :

Les ouvrages longitudinaux, comme leur nom l'indique, s'étendent parallèlement à la côte, offrant une protection continue sur de longues distances. Ils constituent la première ligne de défense contre les vagues et les courants, en dissipant leur énergie et en réduisant leur impact sur le littoral (CETMEF 2007). Ces ouvrages sont souvent utilisés pour protéger de vastes étendues de littoral contre l'érosion côtière et les inondations. Il existe plusieurs modèles de ces ouvrages dont les plus importants sont :

Les Dignes :

Les digues, des remblais de terre ou de roches construits en bordure de côte, jouent un rôle essentiel dans la protection des zones côtières contre les inondations marines et l'érosion. Elles servent également à abriter des bassins portuaires des houles et des courants, facilitant ainsi l'amarrage ou le mouillage des navires. Plusieurs types de digues existent, comme illustré dans la Figure 24. Cette diversité permet de répondre aux besoins spécifiques de protection côtière et de s'adapter aux conditions environnementales variées, telles que des vagues puissantes, des marées hautes et des tempêtes, ainsi qu'aux considérations géotechniques telles que la pente de l'ouvrage, la hauteur et la largeur de la crête, les conditions de fondation et la disponibilité en matériaux.

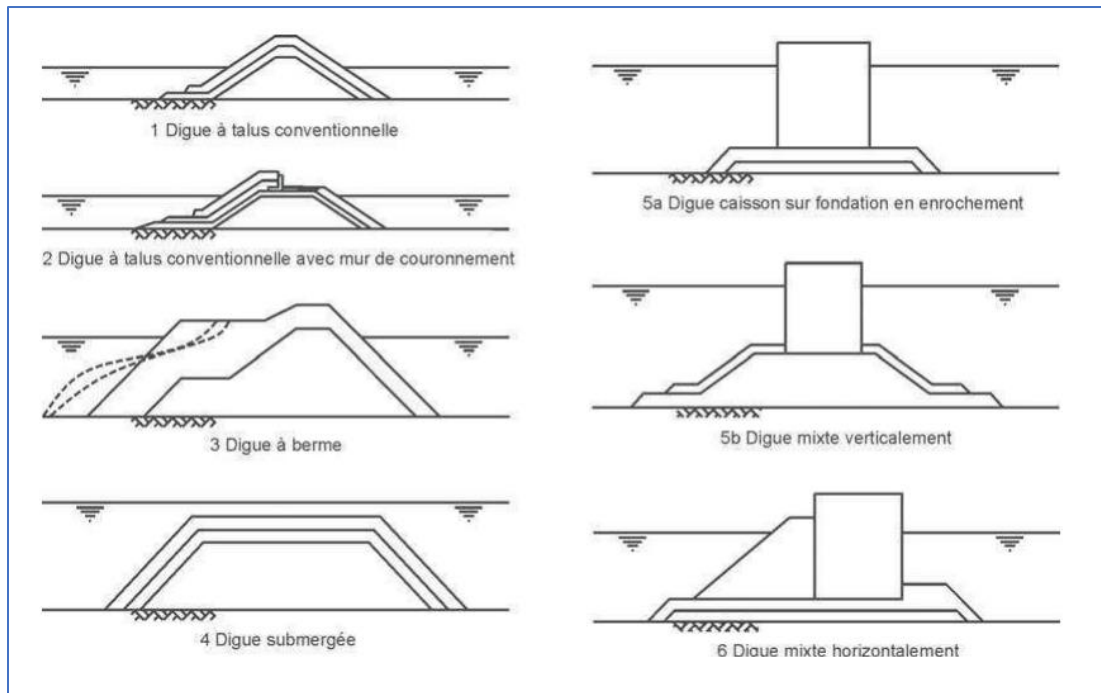


Figure 24 coupe type des différents types des digues (SETMEF 2007)

Les brises lames :

Les brise-lames sont des structures maritimes souvent visibles en surface (au moins pendant la majeure partie du cycle de marée), sont généralement disposés de manière parallèle à la côte. Leur rôle principal est de diminuer l'impact des vagues et de favoriser l'accumulation de sédiments à l'arrière de la structure (Pilarczyk, K.W. 2003). Ils sont particulièrement efficaces pour protéger les portions de littoral sujettes à l'érosion, où le transport de sédiments dans le sens longitudinal est plus prononcé. Idéalement, la construction d'un brise-lames vise à réduire ce transport à une valeur similaire à celle des zones côtières avoisinantes. De plus, les brise-lames peuvent être aménagés pour créer et maintenir des espaces récréatifs exclusifs, tels que des plages, dans des zones où elles ne se développeraient pas naturellement. (SETMEF 2007)

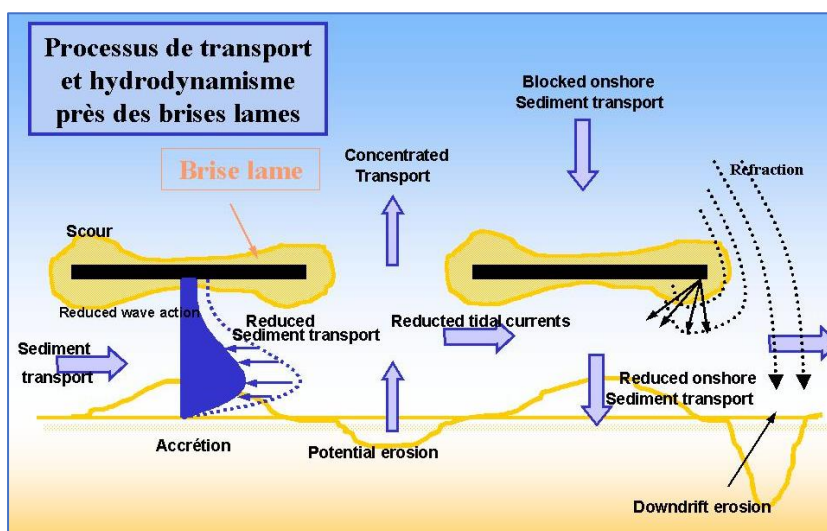


Figure 25 Processus de transport et hydrodynamisme près des brise-lames (source : joas.free.fr)

2.2.2.2. Ouvrages Transversaux :

Les ouvrages transversaux, disposés perpendiculairement à la ligne de rivage, sont des structures conçues pour intercepter le flux des vagues et des courants, ainsi que pour interrompre le transit littoral de sédiments. Leur objectif principal est de diminuer l'énergie des vagues et de stabiliser le littoral en capturant le sable transporté par les courants (U.S. Army Corps of Engineers, 2002). Ces structures sont souvent déployées pour protéger des zones spécifiques telles que les ports, les plages et les estuaires, où la préservation de l'environnement côtier est cruciale. Les ouvrages transversaux peuvent varier en taille et en forme selon les caractéristiques locales et les besoins de protection côtière ; Le type le plus important de ces ouvrages sont **les épis**

Les épis :

Un épi est un ouvrage en enrochement relativement court qui avance dans la mer depuis la plage et dont la fonction principale est d'interrompre le transit littoral de sédiments afin de constituer ou de retenir des plages à un niveau plus élevé (et souvent, par-là même, de protéger un ouvrage de défense contre la mer existant).

Les épis en enrochement ont habituellement une longueur de l'ordre de 50 m, mais ils peuvent être plus grands dans le cas des épis d'extrémité qui se trouvent au bout d'une longue plage par ailleurs dépourvue d'épis. Il existe d'autre type d'épis, comme les épis en T ou en L, qui retiennent les sédiments également à l'arrière par diffraction de la houle autour de leur musoir. (SETMEF 2007)

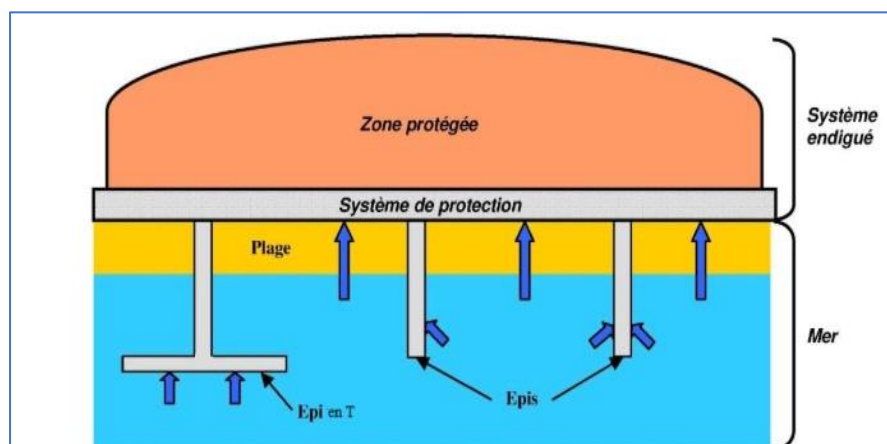


Figure 26 Représentation des épis (source : révérenciel digue 2015 www.barrages-cfbr.eu/)

2.3. Les Ports :

Un port est un Ouvrage hydraulique constitué par un plan d'eau abrité, généralement relié à la mer par un chenal, et destiné à l'accostage et au stationnement des navires, à leur chargement et déchargement, à l'embarquement et au débarquement des passagers, ainsi qu'à diverses opérations commerciales et industrielles (SETMEF 2007)

Les ports jouent un rôle central dans le développement économique en remplissant diverses missions fondamentales. Ces missions comprennent la facilitation du commerce extérieur et intérieur à travers le transit efficace de marchandises à des prix compétitifs, la promotion de l'industrialisation en encourageant l'implantation d'industries liées au port ou à proximité, et la

contribution à l'aménagement de l'espace économique et territorial pour favoriser une intégration harmonieuse des activités économiques et sociales (UNCTAD 2020). Les caractéristiques des ports varient en fonction de plusieurs critères, notamment leur nature, leur localisation, leur activité spécifique, leur statut juridique et leur génération. Ces critères permettent de classer les ports en différentes catégories, telles que les **ports maritimes**, les **ports fluviaux**, les **ports lacustres** et les **ports à sec**, selon leurs natures et leurs emplacements respectifs.

2.3.2. Infrastructures et installations d'un Port :

Le port est un complexe d'infrastructures maritimes essentielles, comprenant divers ouvrages tels que les épis, qui ont déjà été abordés. En plus de ces structures, d'autres éléments contribuent au bon fonctionnement et à la sécurité des activités portuaires.

- **Les écluses**, ouvrages hydrauliques cruciaux sur les voies d'eau, permettent le passage des navires entre des plans d'eau de niveaux différents.
- **Les digues et les jetées** sont des constructions essentielles pour protéger le port des vagues, offrant un bassin calme et stable pour les navires accostés.
- **Les réservoirs**, qu'ils soient naturels ou artificiels, servent au stockage ou à la conservation des produits liquides.
- **Les docks**, vastes bassins entourés de quais, offrent aux navires la possibilité de déposer leurs cargaisons, avec des entrepôts adjacents pour le stockage des marchandises.
- **Les bassins de radoub** qui sont destinés à la réparation et à l'entretien des navires, assurant leur bon état de fonctionnement.
- **Les appontements**, plates-formes fixes soutenues par des pieux, facilitent l'accostage et l'amarrage des bateaux.
- **Le canal** s'agit d'un cours d'eau, qu'il soit naturel ou artificiel, pouvant être navigable ou non. Les canaux sont habituellement alimentés en eau douce, bien que certains, comme le canal de Suez, demeurant au niveau de la mer, soient salés. (Thoresen, C.A. 2014)

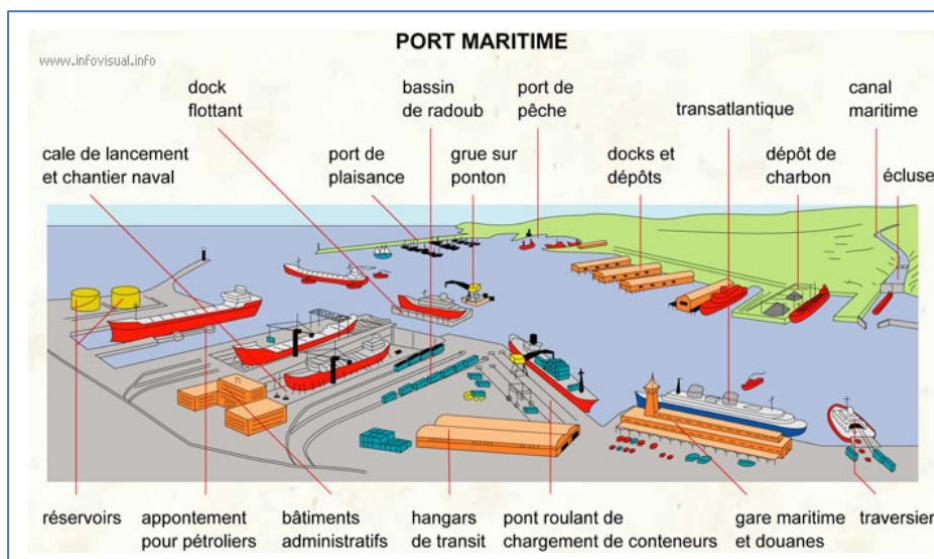


Figure 27 Représentation des composants d'un site portuaire (source : infovisual.info)

2.4. Classification des ouvrages maritimes de la zone d'étude :

Dans ce chapitre, nous nous sommes concentrés sur les ouvrages portuaires, qui englobent les structures intégrées dans les plans d'un port.

Les tableaux suivants présentent une compilation de tous les ouvrages portuaires identifiés dans les trois baies Alger, Bousmail et Zemmouri, les données ont été acquises à partir des fiches techniques portuaires publiées par la SGPP (SOCIETE DE GESTION DES PORTS DE PECHE) et complétées avec google earth

Tableau 10: Les infrastructures maritimes de la Baie d'Alger :

Type d'ouvrage	Zone	Coordonnées X	Coordonnées Y	Ouvrage	Caractéristiques
Ouvrages portuaires	Port de Tamentfoust	36°48'23" N	3° 13' 48" E	Jetée principale	Longueur : 200m
				Digue de fermeture	Longueur : 200m
				Quai pour sardiniers	Longueur : 300m
				Quai pour chalutiers	Longueur : 180
				Quai pour petits métiers	Longueur : 136
				Quai de débarquement	Longueur : 30m
				Quai d'avitaillement	Longueur : 35m
	Small port the Fregate	36°47'05"N	3°13'54"E	Jetée	Longueur : 225m
				Épi	Longueur : 50m
	Marina d'Alger	36°44'33"N	3° 8'58"E	Jetée principale	Longueur : 988 m Profondeur max :6,5 m
				Jetée secondaire	La longueur : 283,43m
				Epi en L	Longueur_ environ 255m
				Epi en enrochements	Longueur : 100m
	Port des Sablottes	36°45'1"N	3°05'48"E	Jetée principale :	Longueur : 500m Profondeur : -8m
				Jetée secondaire :	Longueur : 530m
				Epi	Longueur :83m
				Epi en L	Longueur :100m
	Port d'Alger	36° 50'N	3° 2' E	Jetée Kheir Eddine	Longueur : 1290m
				Jetée du Vieux Port	Longueur : 1500m
				Jetée el Agha	Longueur : 1500m
				Jetée Mustapha	Longueur : 1304m
				Brise-lames Est	Longueur : 1500m
	Bassin du "Vieux Port, Port d'Alger	36°46'31"N	3° 3'56"E	Môles n°1 et 2	Réservé au marchandise
				Môles de Guelma	Stockage du fuel et des navires
				Quai n°11	Occupés par le trafic de passagers

				Quai n° 12	Capitaineries du port avec une station de remorquage
				Quai n°13	Réparation navale à flot.
	Bassin de l'Agha ; Port d'Alger	36°46'3"N	3° 3'57"E	Môles n° 3, 4 et 5	Destinés aux navires marchand
	Bassin de "Mustapha"	36°45'48"N	3° 4'26"E	Môles n°6 et 7	
				Quai n°37	Port pétrolier

Tableau 11: Les infrastructures maritimes de la Baie de Zemmouri

Type d'ouvrage	Zone	Coordonnées X	Coordonnées Y	Ouvrage	Caractéristiques
Ouvrages portuaires	Port de Cap Djinet	36°52'33"N	3°43'04"E	Jetée principale	Longueur :575m
				Jetée secondaire	Longueur :170m
				Quai pour chalutiers	Longueur :147m
				Quai pour petits métiers	Longueur :50m
				Quai pour plaisance	Longueur :40m
				Quai de débarquement	Longueur :60m
				Quai d'avitaillement	Longueur :30m
	Port de zemmouri	36°48'9"N	3°33'48"E	Jetée principale	Longueur :380m
				Jetée secondaire	Longueur :410m
				Quai d'accostage	Longueur :640m
				Quai de débarquement	Longueur :75m
				Quai d'avitaillement	Longueur :40m
	Centrale électrique de Cap Djinet	36°51'03"N	3°41'52.8"E	Jetée	Longueur : 285m
				Epi en L	Longueur : 100m
	Port de Jean-Bart	36°48'40.5" N	3°15'31.6"E	Jetée	Longueur : 55m
				Épi	Longueur : 15m
				Brise-lame	Longueur :85m

Tableau 12: Les infrastructures maritimes de la Baie de Bousmail :

Type d'ouvrage	Zone	Coordonnées X	Coordonnées Y	Ouvrage	Caractéristiques
Ouvrages portuaires	Port d'El Djamila	36° 48' 01"N	2° 54' 05"E	Jetée principale :	Longueur :300m
				Jetée secondaire :	Longueur :180m
				Quai pour sardinières	Longueur :118m
				Quai pour chalutiers	Longueur :300m
				Quai pour petits métiers	Longueur :118m
				Quai pour plaisance	Longueur :118m
	Port de Sidi Fedj	36 45' 54"N	2° 50' 52" E	Jetée principale	Longueur :230m
				Jetée secondaire :	Longueur :215m
				Un quai et un appontement	Longueur :777m
	Port de Fouka marine	36°40'21.5" N	2°44'29.4"E	Jetée	Longueur : 180m
	Port de Khemisti	36°38'10"	2°40'17"	Jetée principale :	Longueur : 200m
				Jetée secondaire :	Longueur : 120m
				Linéaire de quai :	Longueur : 260m
	Port de pêche Bouharoun	36° 37N	2° 39E	Jetée Ouest	Longueur : 270m, protège le port contre les houles du Nord-Est à Nord-Ouest.
				Jetée Nord	Longueur : 375m Protège le port contre les houles du Nord-Ouest à Nord-Est.
				Quai pour chalutier	Longueur 272 m et profondeur : 3m
				Quai pour sardinières	Longueur 118 m
				Quai pour petits Métiers	Longueur :145 m Profondeur :2m
				Quai de débarquement	Longueur :118 m
	Port de pêche de Tipaza	36°35'39"N	2°26'59"E	Jetée principale	Longueur : 25m
				Jetée secondaire	Longueur : 142m
				Quai pour sardinières	Longueur : 25m
				Quai pour petits métiers	Longueur : 25m
				Quai pour plaisance	Longueur : 100m
				Quai de débarquement	Longueur : 50m

				Quai d'avitaillement	Longueur : 30m
--	--	--	--	-------------------------	----------------

L'analyse de la distribution des ouvrages dans les trois baies étudiées met en lumière plusieurs tendances significatives. Dans la baie d'Alger, les ouvrages portuaires sont clairement dominants, principalement en raison du statut de capitale d'Alger, qui abrite le principal port commercial du pays. Cette concentration est également motivée par les besoins en protection portuaire et le développement urbain croissant dans la région.

La baie de Zemmour I La majorité des infrastructures maritimes se concentrent dans la partie ouest de la baie, notamment autour de Cap Djinet et du port de Zemmouri. Cela s'explique par la présence de sites plus favorables en termes de profondeur d'eau et d'abri contre les vents et les courants dominants.

Pour la baie de bouismail ; L'analyse de la distribution des ouvrages portuaires révèle une répartition plus diffuse par rapport aux baies d'Alger et de Zemmouri. Cette observation s'explique par un développement urbain modéré et une concentration sur la pêche artisanale (Le port de Bouharoun, situé dans la baie de Bou-Ismail, est considéré comme le deuxième plus important port de pêche en Algérie).



Port commercial d'Alger



Marina d'Alger



Port des Sablettes

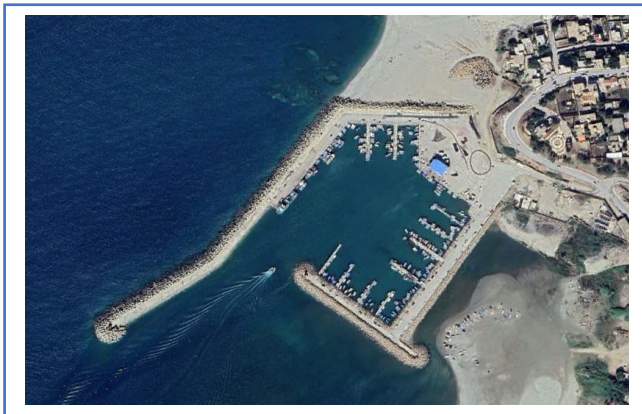


Petit port La Frégate



Port de Tamenfoust

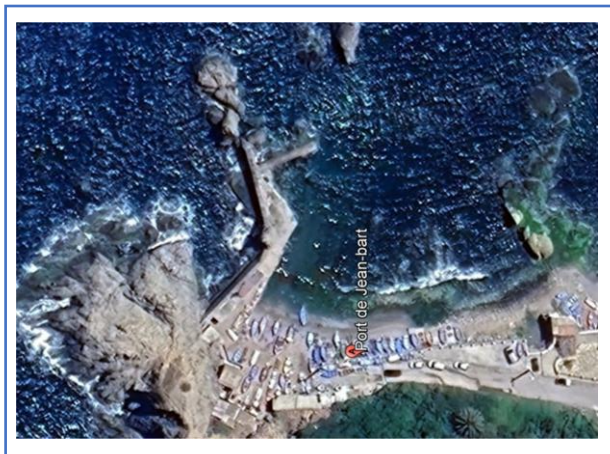
Figure 28 Ouvrage portuaire de la baie d'Alger (source : Google earth)



Port de Cap Djinet



Port de Zemmouri



Port de Jean Bart



Centrale électrique de Cap Djinet

Figure 29 Ouvrage portuaire de la baie de Zemmouri (source : Google earth)



Port d'El Djamila



Port de Sidi Fredj



Port de Fouka marine



Port de Khemisti



Port de Tipaza



Port de pêche Bouharoun

Figure 30 Ouvrage portuaire de la baie de Bousmail (source : Google earth)

2.5. Conclusion :

L'analyse menée a permis de dresser un panorama complet des ouvrages portuaires et de protection libres présents dans la zone d'étude. Leur localisation et leur caractérisation, notamment en termes de longueur, constituent des informations précieuses pour le développement du mémoire. Cette connaissance approfondie des infrastructures maritimes permettra d'évaluer leur vulnérabilité face aux événements météorologiques extrêmes et de proposer des mesures de protection et d'adaptation adéquates.

3. Chapitre III. Analyse des Evénements Extrêmes

3.2. Introduction :

Dans les régions côtières, les ouvrages de défense maritime revêtent une importance capitale pour prévenir les inondations, les submersions et l'érosion, garantissant ainsi la sécurité des infrastructures telles que les ports de pêche, généralement conçues pour résister à des événements extrêmes sur une période d'environ 50 ans. Pour assurer leur efficacité et leur fiabilité, il est impératif de comprendre les conditions de mer les plus extrêmes auxquelles ces défenses pourraient être confrontées. Cela requiert une évaluation précise des hauteurs de vagues pour des périodes de retour spécifiques, accompagnée d'une estimation de leur incertitude, un processus souvent réalisé à travers des méthodes statistiques (Thompson et al., 2009). Cette approche vise à caractériser la probabilité d'occurrence des événements extrêmes.

Dans ce chapitre, nous nous attarderons sur l'étude et l'analyse des phénomènes météorologiques extrêmes en appliquant la théorie des valeurs extrêmes.

3.3. Théorie des valeurs extrêmes :

La théorie des valeurs extrêmes (TVE) est une méthode qui offre un cadre permettant l'extrapolation afin d'estimer la probabilité d'événements plus extrêmes que tous ceux qui ont déjà été observés (Coles, 2001). En d'autres termes, elle est utilisée pour déterminer des limites en estimant des modèles statistiques qui s'adaptent aux valeurs extrêmes des données observées (Cornel Stander, 2015).

Bien que diverses approches statistiques existent pour analyser les valeurs extrêmes, elles sont généralement classées en deux catégories principales :

La première, appelée l'approche des ***Blocs Maximas***, consiste à diviser la période étudiée en intervalles fix et à retenir la valeur la plus extrême de chaque bloc pour les analyses ultérieures, comme les maxima quotidiens ou mensuels. La seconde méthode, connue sous le nom de ***Peaks Over Threshold (POT)***, se concentre sur les dépassements (pics) qui dépassent un seuil choisi (u), sans se limiter à une seule valeur par bloc (Jacob, Neves, & Greetham, 2020).

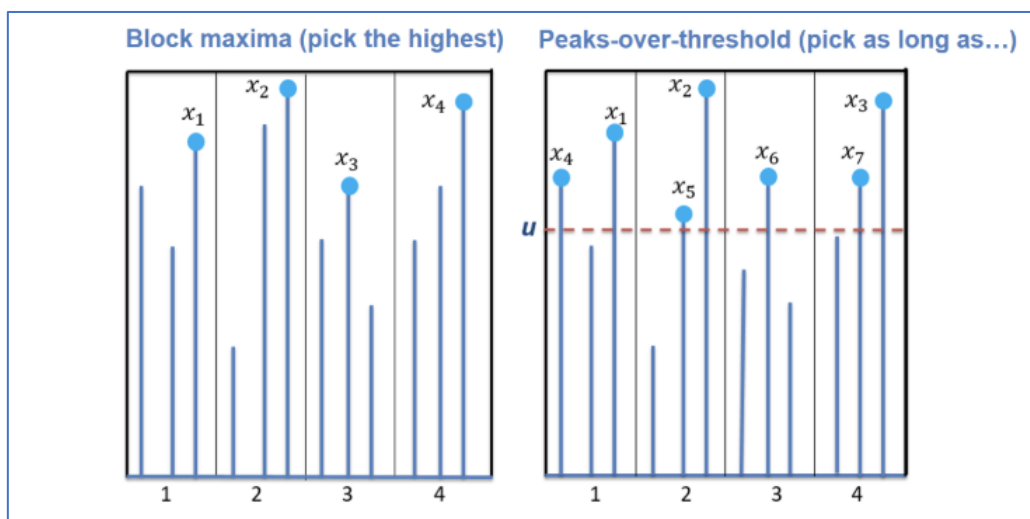


Figure 31: Schéma représentatif des méthodes blocks maxima et POT (libertyRoad,2023)

Ces méthodes sont illustrées dans la Figure où l'approche des maxima par blocs est représentée dans le graphique de gauche et l'approche des points de dépassement du seuil (POT) est représentée dans le graphique de droite. Les points **X** indiquent les valeurs à utiliser pour l'analyse. L'approche des maxima par blocs (BM) dans la théorie des valeurs extrêmes (EVT) implique de diviser la période d'observation en périodes non chevauchantes de taille égale et de se concentrer sur l'observation maximale dans chaque période

3.3.2. La méthode des Peaks Over Threshold (POT):

Considérons X_1, X_2, \dots, X_n comme une séquence de variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées, dont la fonction de distribution est inconnue et notée F . Dans ce contexte, la méthode POT vise à déterminer la distribution de toutes les valeurs excédentaires dépassant un seuil préalablement défini u . Cette distribution est représentée par (x) tel que :

$$F_u(x) = \Pr(X - u \leq x \mid X > u) = \frac{F(u+x) - F(u)}{1 - F(u)} \quad \boxed{\text{Équation III.1}}$$

Le choix du seuil n'est pas évident. On peut déterminer le seuil idéal en inspectant visuellement le graphique du résidu moyen. Le seuil doit se situer sur la ligne droite avant que les variations du résidu moyen ne deviennent significatives. En se basant sur cette analyse, On a procédé au calcul de la moyenne résiduelle avec le langage python via la bibliothèque **pyextreme** afin de suivre ses variations et de pouvoir choisir le meilleur seuil possible ; la valeur choisie pour le seuil est de 3.3 m pour la baie d'Alger (Figure 32), 3.8 m pour la baie de Zemmouri (Figure 33) et 3,5 pour la baie de Bousmail (Figure 34)

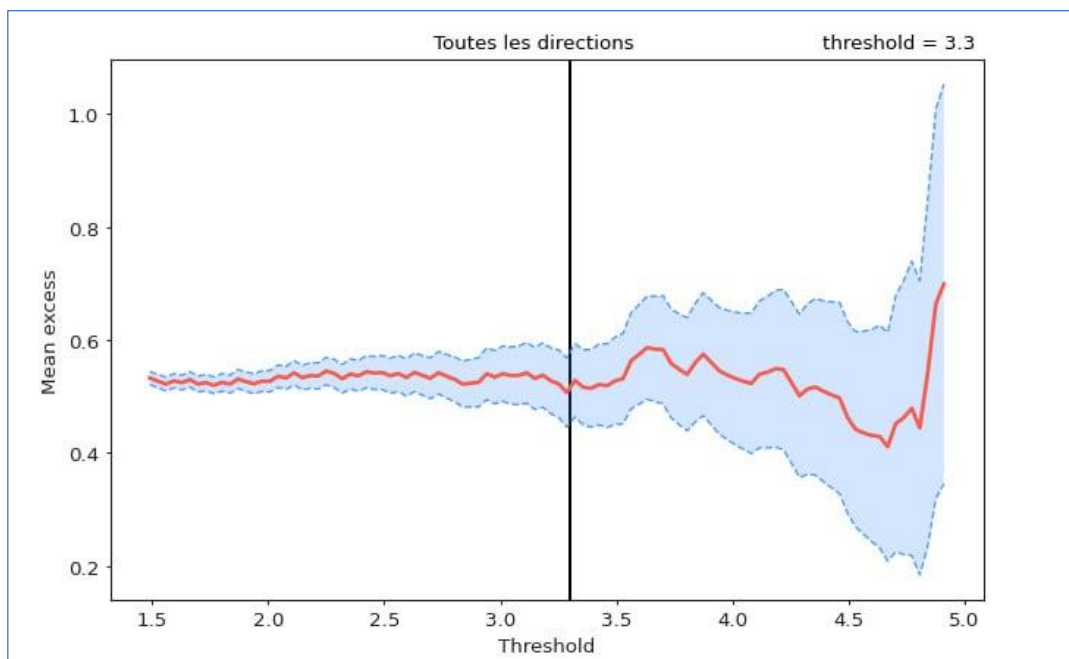


Figure 32 Moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelles de l'enregistrement de la baie d'Alger

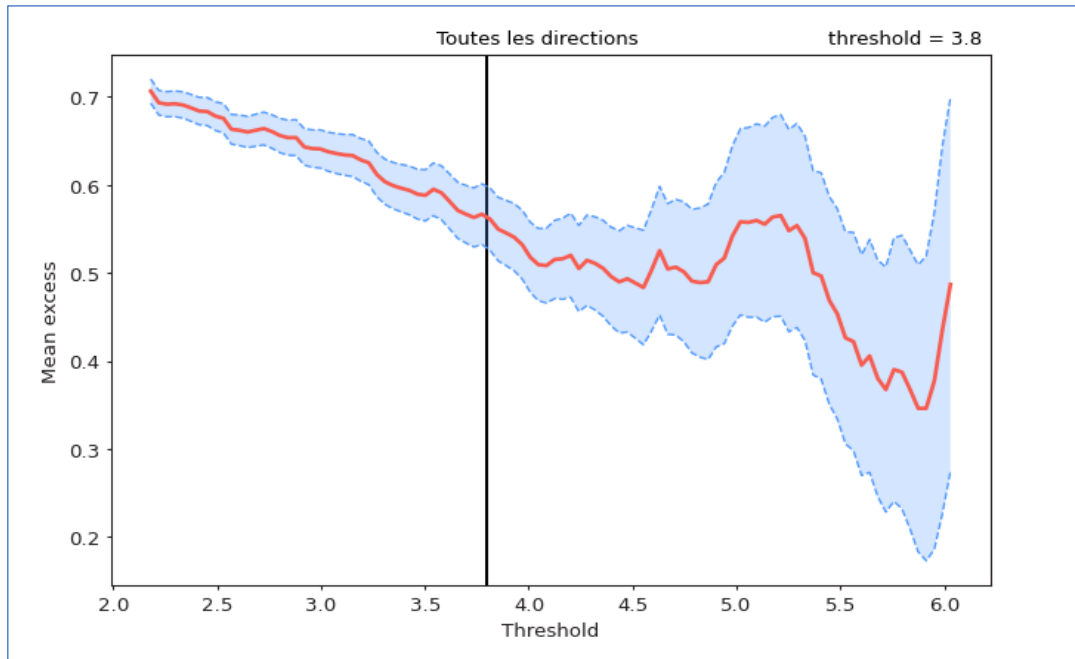


Figure 33 : Moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelles de l'enregistrement de la baie de Zemmouri

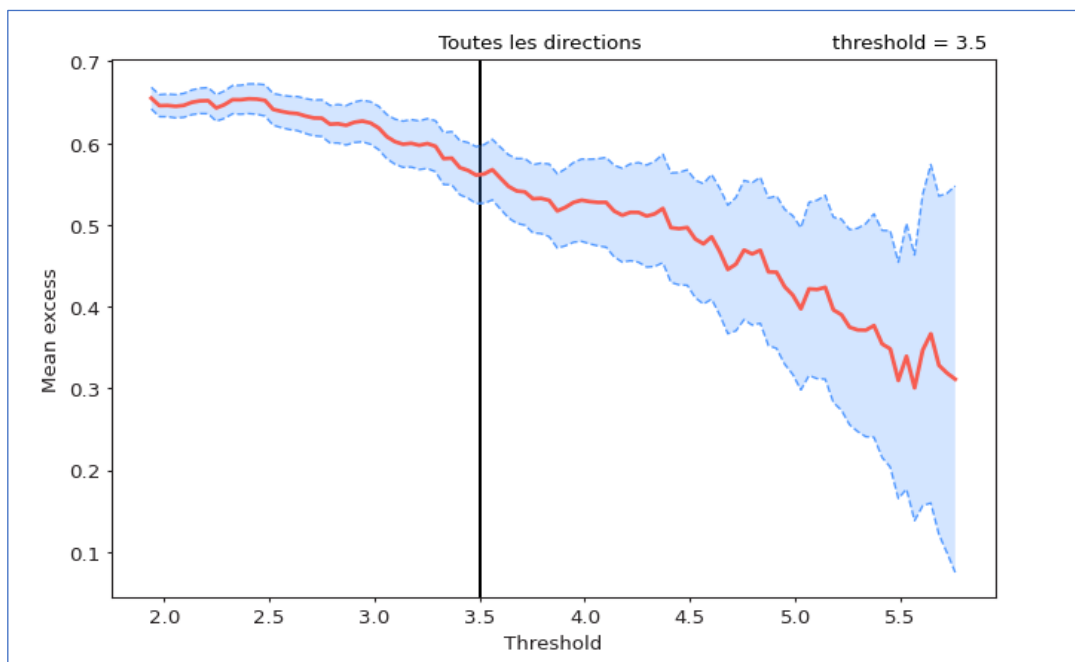


Figure 34 Moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelles de l'enregistrement de la baie de Bousmail

Après avoir déterminé le seuil, la prochaine étape consiste à estimer la distribution des valeurs extrêmes qui dépassent ce seuil. Ces valeurs sont représentées dans les figures suivantes

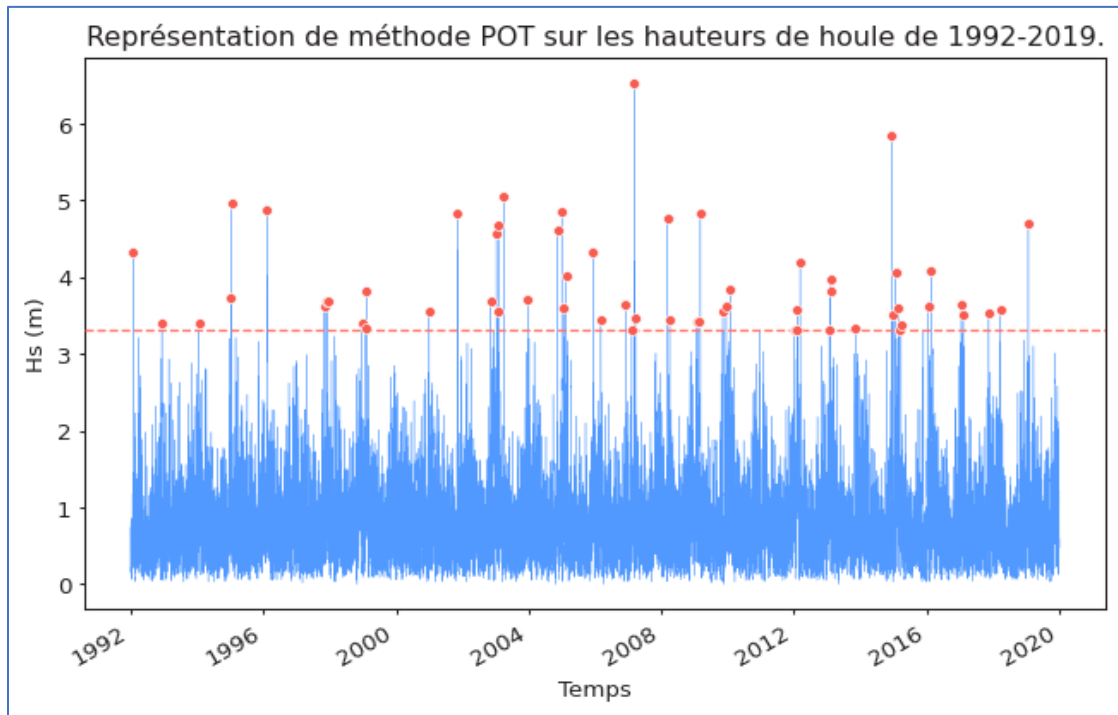


Figure 35 : Représentation de méthode POT sur les hauteurs de houle de la baie d'Alger entre 1992-2019

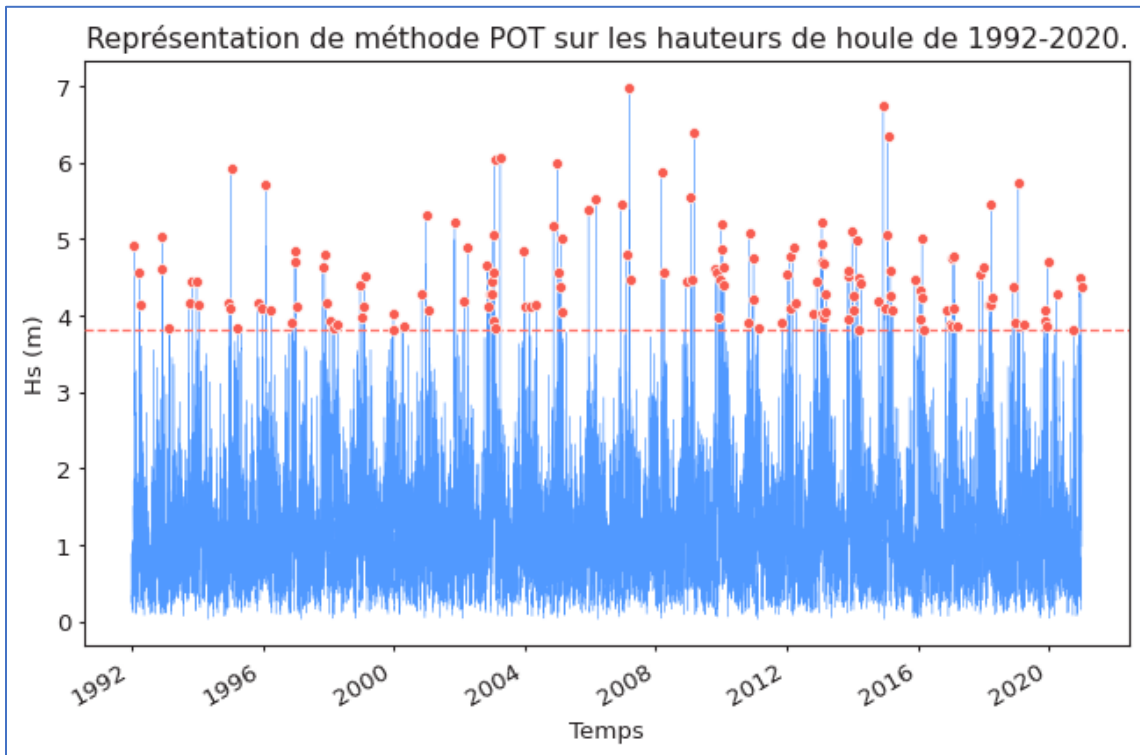


Figure 36 : Représentation de méthode POT sur les hauteurs de houle de la baie de Zemmouri entre 1992-2019

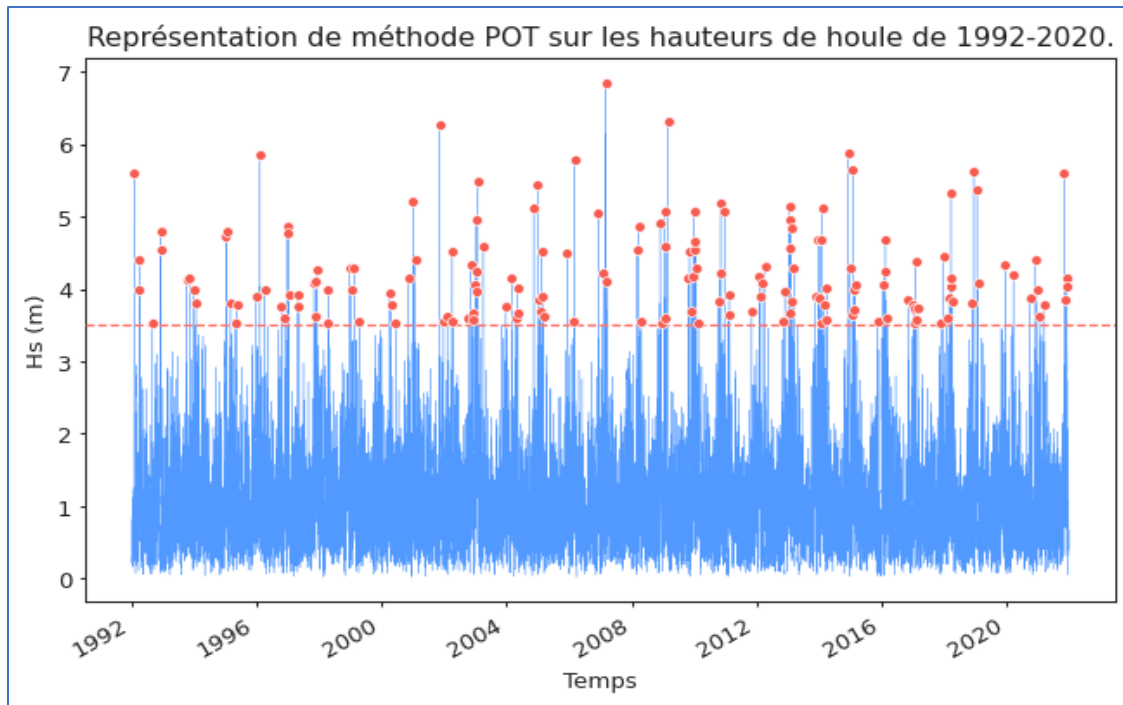


Figure 37 : Représentation de méthode POT sur les hauteurs de houle de la baie de Bousmail entre 1992-2020

3.3.2.2. Résultats de la distribution POT:

Suite à la sélection des pics, On utilise la bibliothèque *pyextreme* avec le langage *Python* pour estimer les hauteurs des vagues ainsi que leurs périodes de retour. Les résultats obtenus sont les suivants :

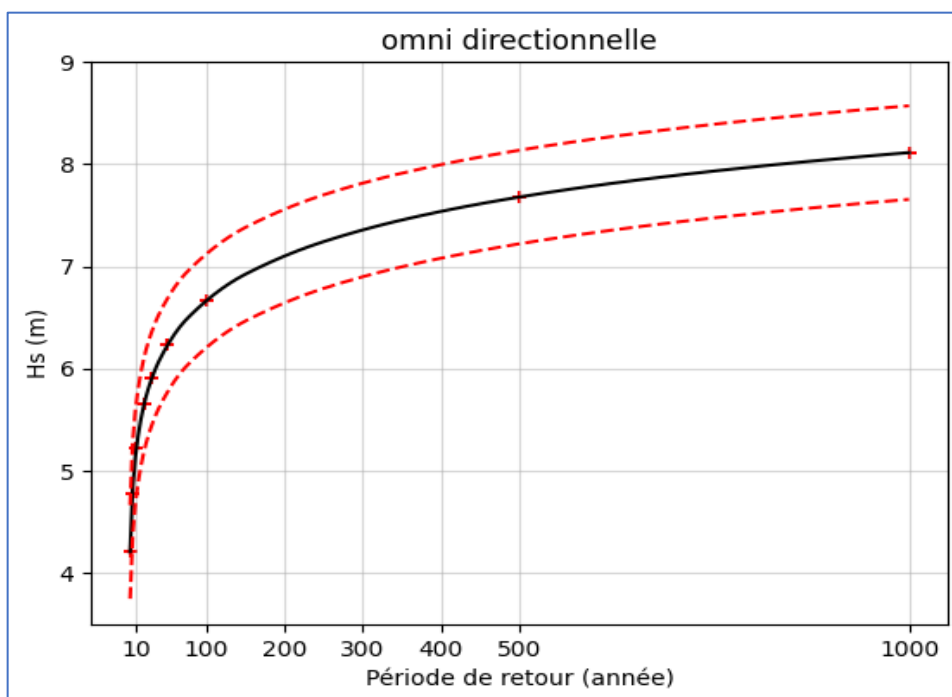


Figure 38 : Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour omnidirectionnel (baie d'Alger)

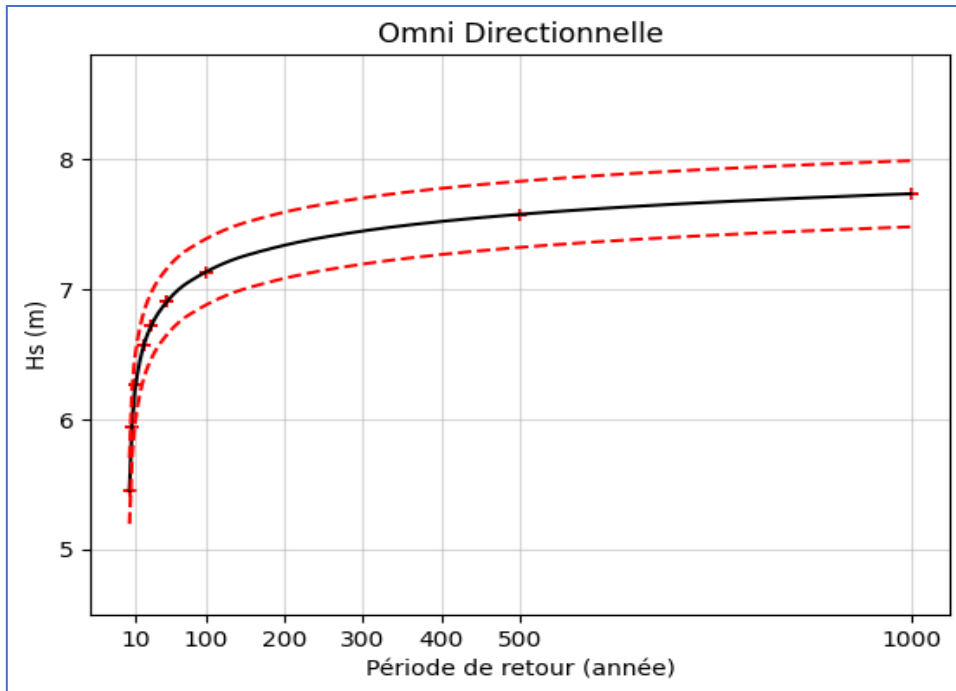


Figure 39 : Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour omnidirectionnel (baie de Zemmouri)

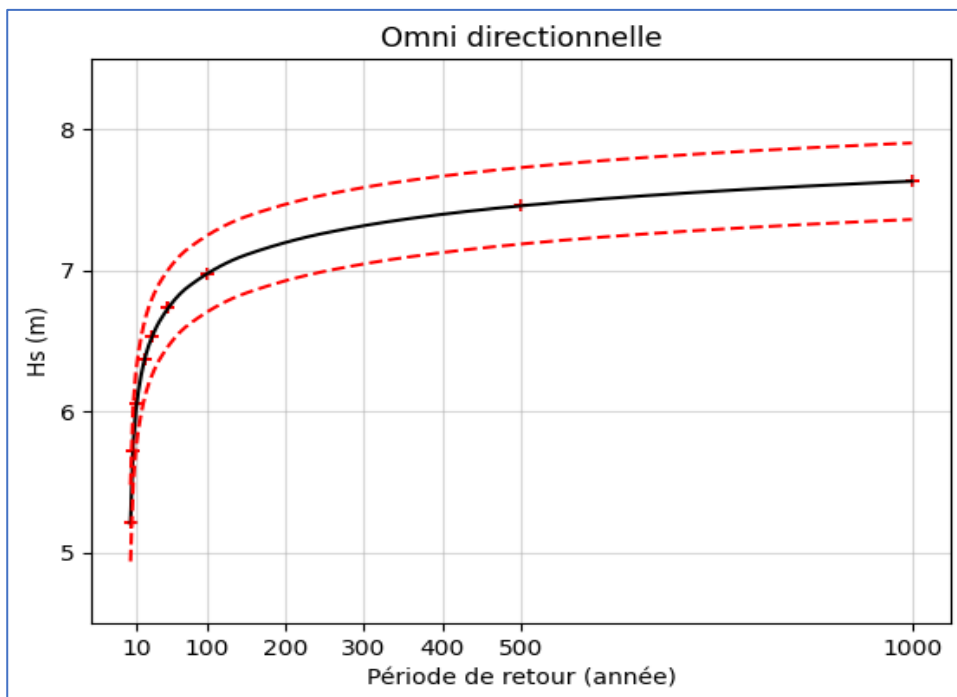


Figure 40 : Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour omnidirectionnel (baie de Bousmail)

Les résultats de cette étude sont présentés dans les figures 38 , 39 et 40 , où :

- Les lignes rouges sont utilisées pour représenter les limites de l'erreur acceptée, fixée à 5% pour les résultats.
- Les croix rouges sur le graphique indiquent les valeurs des hauteurs de vagues pour des périodes de retour spécifiques, notamment 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 500 et 1000 ans.

Une méthodologie identique sera employée pour toutes les autres directions dominantes. Les résultats correspondants à chaque direction des trois baies sont représentés dans les figures suivantes

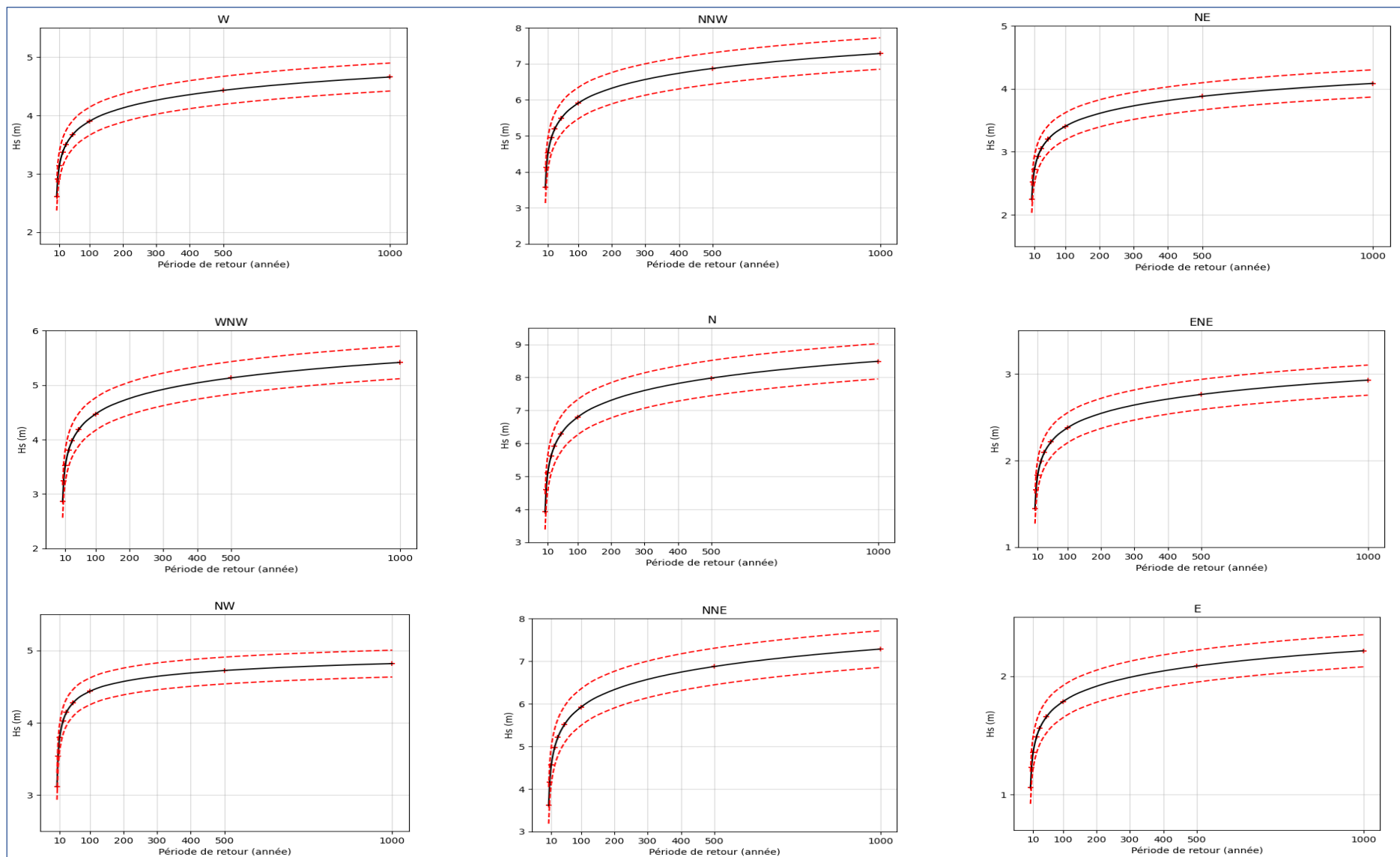


Figure 40 : Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour les directions dominantes (baie d'Alger)

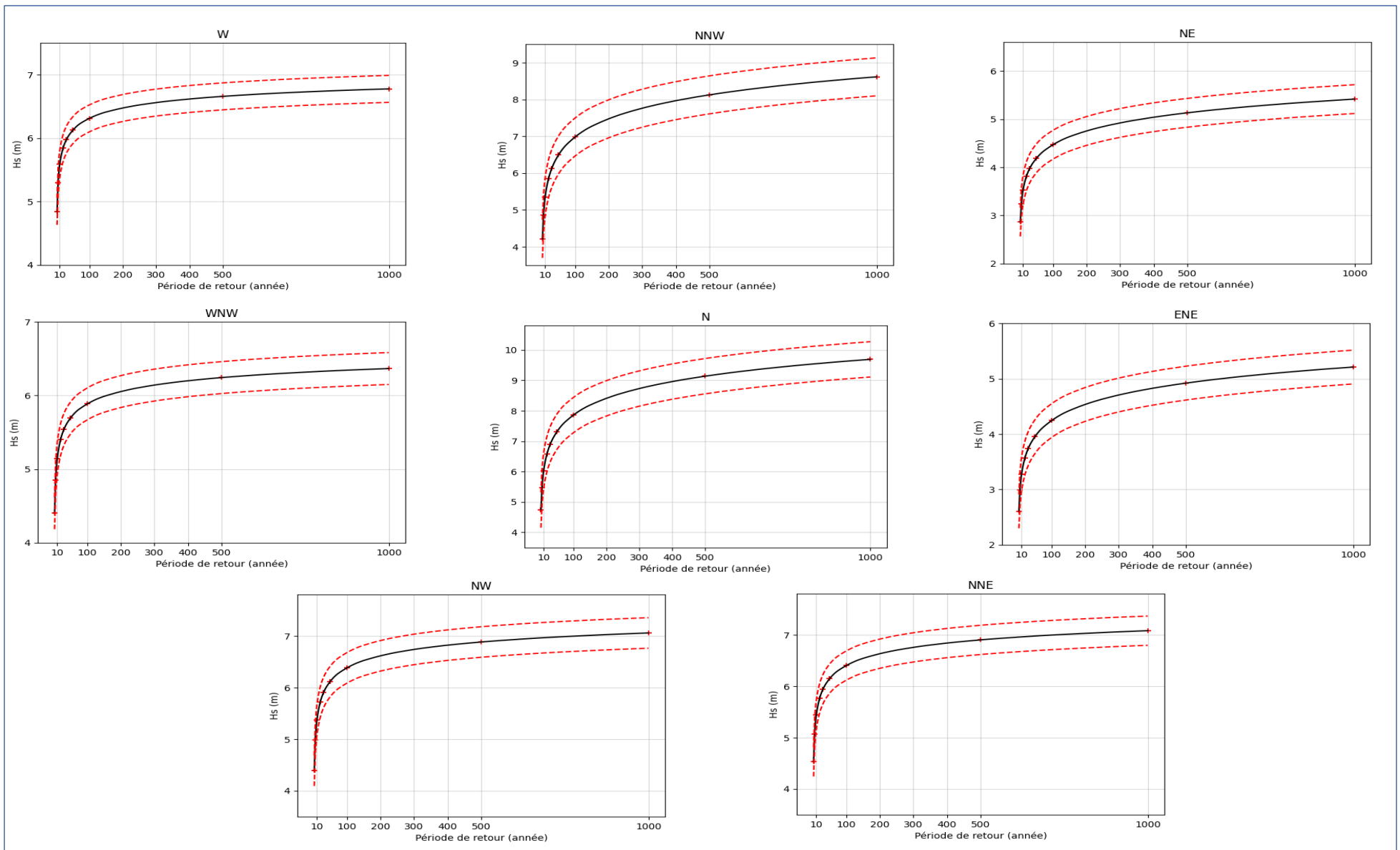


Figure 41 : Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour les directions dominantes (baie de Zemmouri)

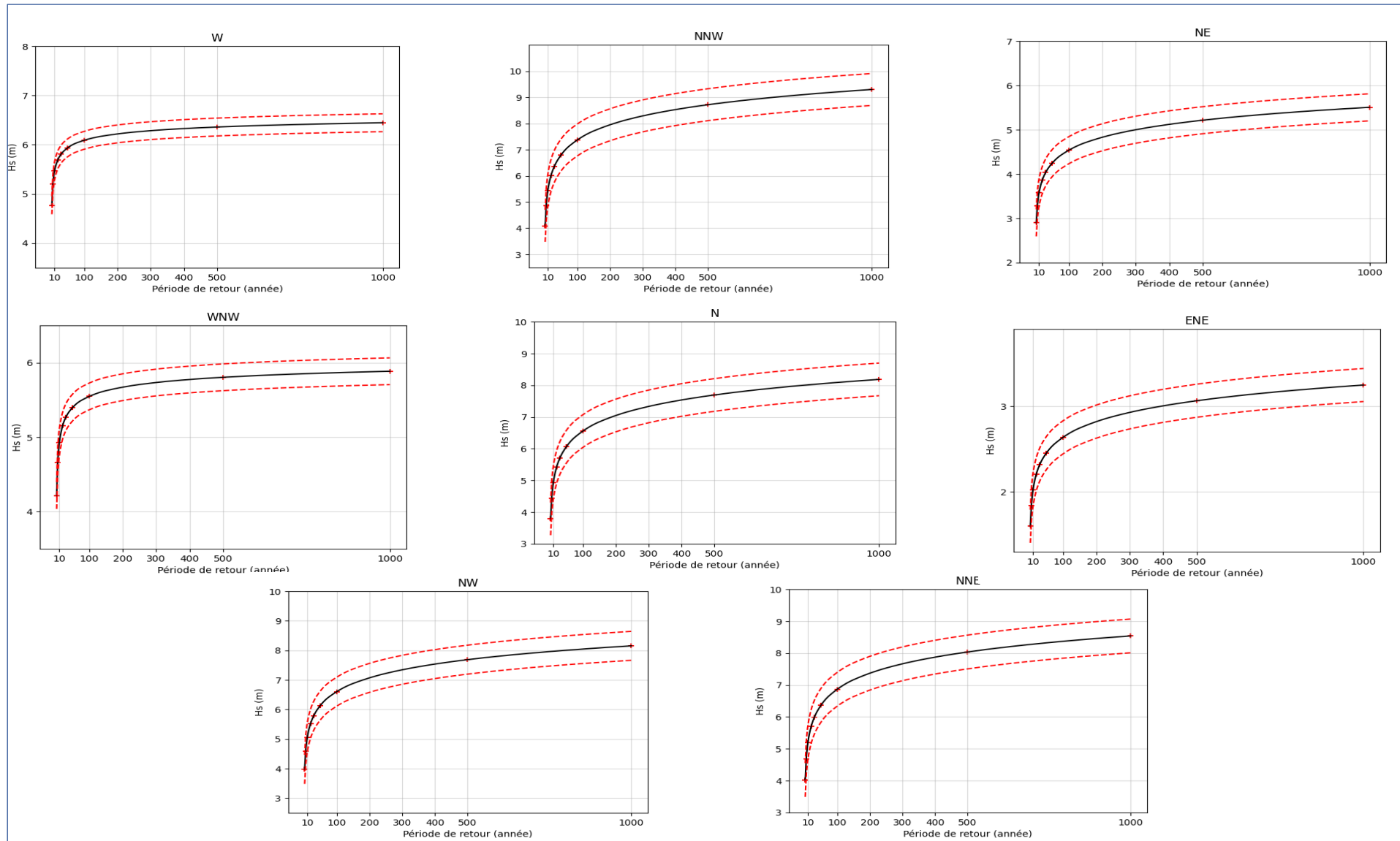


Figure 42 Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour les directions dominantes (baie de Bouismail)

Pour faciliter l'interprétation des résultats obtenus grâce à l'utilisation de la méthode (POT), des tables ont été créées pour résumer l'ensemble des hauteurs extrêmes obtenues en fonction des périodes de retour de ces événements extrêmes dans le futur pour chaque baie

L'analyse des tableaux (13,14,15) représentant les hauteurs de houles par direction prédites par la méthode POT révèle des tendances semblables dans les trois baies étudiées. La direction Est se distingue comme la moins propice aux houles extrêmes dans les baies d'Alger et le Est Nord Est pour les baies de Zemmouri et Bousmail, tandis que le Nord, le Nord-Nord-Ouest et le Nord-Nord-Est se positionnent comme les directions les plus susceptibles dans les trois baies. Des variations locales existent, comme en témoignent les différences entre les baies de Bousmail et de Zemmouri, où le Nord-Ouest et l'Ouest sont également associés à des hauteurs de vagues élevées.

Ces constatations mettent en évidence l'importance de prendre en compte les particularités de chaque baie pour une gestion efficace des risques côtiers associés aux vagues extrême

Tableau 13 Résumé de l'ensemble des résultats obtenu par la méthode POT (baie d'Alger)

POT										
Hauteur de houle par direction (m)										
Périodes de Retour (années)	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	Omni
2	2.60	2.90	3.11	3.56	3.92	3.61	2.24	1.44	1.05	4.21
5	2.91	3.19	3.53	4.11	4.56	4.15	2.51	1.66	1.22	4.79
10	3.13	3.39	3.79	4.52	5.06	4.56	2.72	1.82	1.35	5.23
20	3.36	3.56	4.02	4.94	5.55	4.97	2.92	1.99	1.48	5.67
30	3.50	3.65	4.14	5.18	5.83	5.21	3.04	2.09	1.56	5.93
50	3.67	3.76	4.27	5.49	6.20	5.51	3.19	2.21	1.65	6.25
100	3.9	3.89	4.43	5.90	6.69	5.92	3.40	2.37	1.78	6.69

Tableau 14 Résumé de l'ensemble des résultats obtenu par la méthode POT (baie de Zemmouri)

POT									
Hauteur de houle par direction (m)									
Période sde Retour (année)	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	Omni
2	4.84	4.40	4.39	4.21	4.73	4.53	2.88	2.60	5.44
5	5.29	4.85	4.98	4.86	5.46	5.07	3.24	2.99	5.94
10	5.59	5.15	5.37	5.35	6.02	5.44	3.52	3.28	6.26
20	5.84	5.40	5.72	5.84	6.57	5.76	3.81	3.57	6.56
30	5.97	5.54	5.90	6.13	6.89	5.94	3.98	3.74	6.71
50	6.13	5.70	6.12	6.49	7.30	6.15	4.19	3.95	6.90
100	6.31	5.89	6.38	6.98	7.85	6.40	4.47	4.24	7.13

Tableau 15 Résumé de l'ensemble des résultats obtenu par la méthode POT (baie de Bousmail).

POT									
Hauteur de houle par direction (m)									
Période sde Retour (année)	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	Omni
2	4.76	4.21	3.96	4.09	3.78	4.01	2.89	1.61	5.20
5	5.19	4.65	4.58	4.85	4.43	4.68	3.28	1.89	5.71
10	5.46	4.93	5.05	5.44	4.92	5.18	3.57	2.10	6.05
20	5.69	5.15	5.51	6.02	5.41	5.69	3.86	2.32	6.36
30	5.80	5.27	5.79	6.36	5.70	5.98	4.03	2.44	6.53
50	5.93	5.39	6.13	6.78	6.06	6.36	4.24	2.60	6.73
100	6.09	5.54	6.60	7.36	6.55	6.86	4.53	2.81	6.97

3.3.3. La méthode des Blocks Maximas (BM) :

Le théorème des Blocs Maxima est une méthode statistique qui s'appuie sur la loi approximative du maximum d'un grand nombre d'observations (Delcaillau et al. 2018).

Pour appliquer cette méthode, si l'on dispose de n observations (x_1, \dots, x_n) , on les regroupe en k blocs de longueur l , puis on calcule le maximum (m_i) dans chaque bloc.

Pour estimer la loi de la variable aléatoire m_i , on utilise la loi Généralisée de la Valeur Extrême (GEV), dont les paramètres sont déterminés à partir de l'échantillon de maximums de blocs (m_1, \dots, m_k) . Un équilibre approprié entre la taille des blocs l et le nombre de blocs k est crucial pour obtenir une approximation précise de la loi GEV et de ses paramètres. Dans notre contexte, des blocs de taille annuelle sont utilisés.

La fonction de répartition (Equation III-2 et Equation III-3) de la loi GEV est définie comme suit :

$$F(x; \mu, \sigma, k) = \exp(-(1 + \sigma k(x - \mu))^{-k}) \text{ pour } x \in R \text{ et } k > 0$$

Équation III.2

$$F(x; \mu, \sigma, k) = \exp(-\exp(-\sigma(x - \mu))) \text{ pour } x \in R \text{ et } k=0$$

Équation III.3

Dans ces équations :

- μ représente le paramètre de position.
- σ représente le paramètre d'échelle
- k représente le paramètre de forme. Lorsque $k < 0$, cela correspond à la loi de Weibull, lorsque $k > 0$, cela correspond à la loi de Fréchet, et lorsque $k = 0$, cela correspond à la loi de Gumbel.

Dans notre étude, La distribution de la loi GEV **Gumbel** a été utilisées pour évaluer les hauteurs de houle correspondant à différentes périodes de retour. L'analyse des données a été réalisée en utilisant le langage **Python** avec la bibliothèque **pyextreme**. Les résultats sont présentés sous forme de tableaux et de graphiques.

Les Figures 43,44,45 illustrent la répartition des données en blocs d'une année de longueur. Le maximum de chaque bloc est représenté par un point rouge. Ensuite, la distributions Gumbel est appliquée pour calculer les hauteurs de houle pour chaque période de retour, à la fois pour les vagues omnidirectionnelles et pour les 8 directions potentiellement génératrices de hauteurs de houle importantes sur le long de la zone d'étude

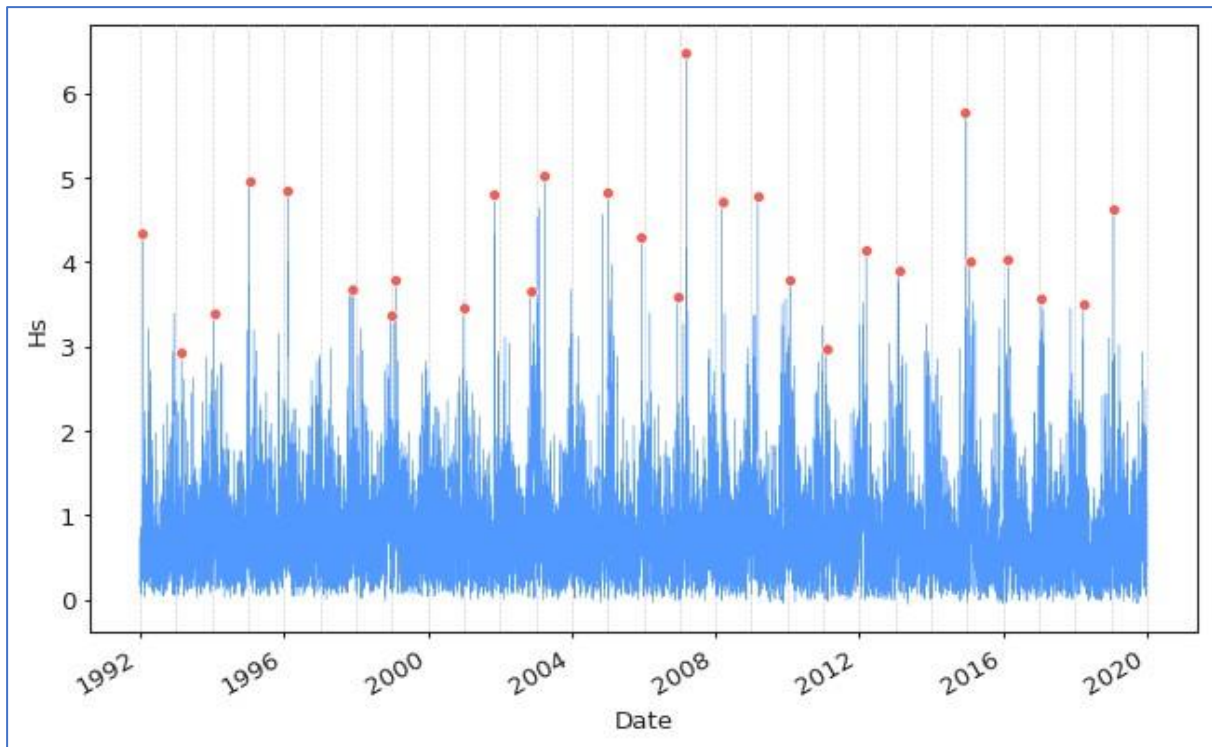


Figure 43: Représentation de la Méthode des Blocs Maximas sur les hauteurs de houles entre 1992–2020 (baie d’Alger)

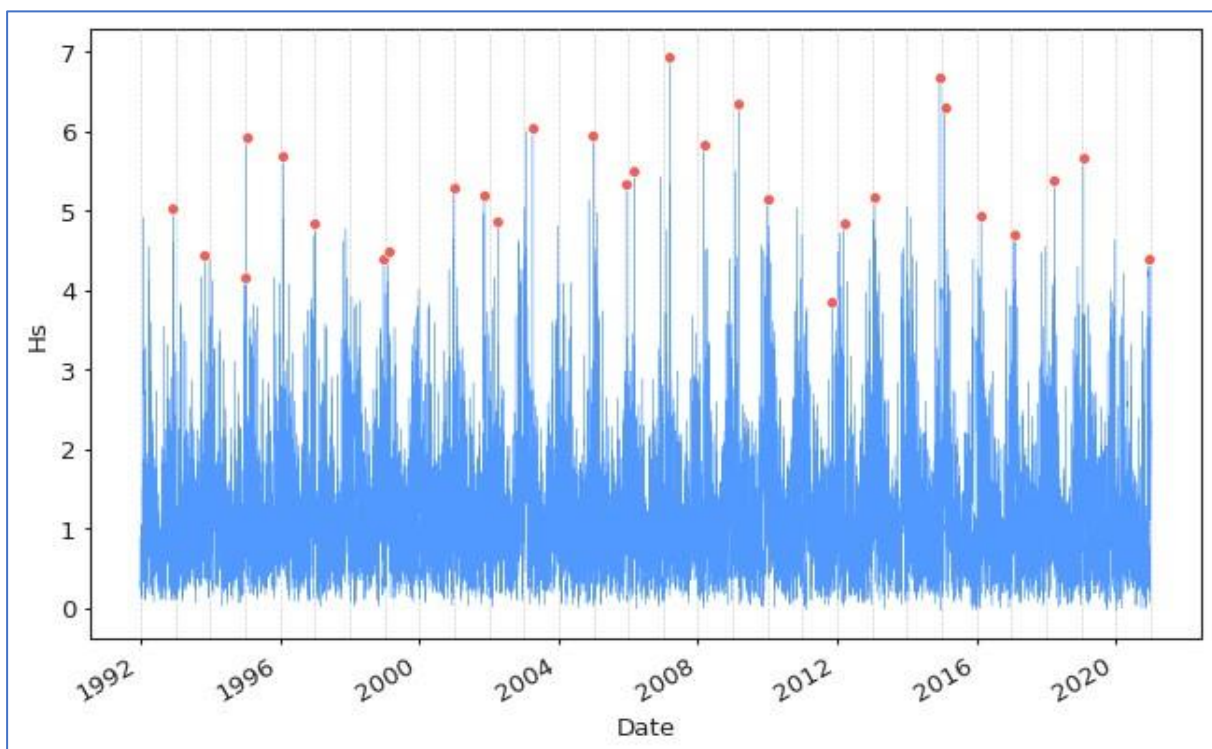


Figure 44 : Représentation de la Méthode des Blocs Maximas sur les hauteurs de houles entre 1992–2020 (baie de Zemmouri)

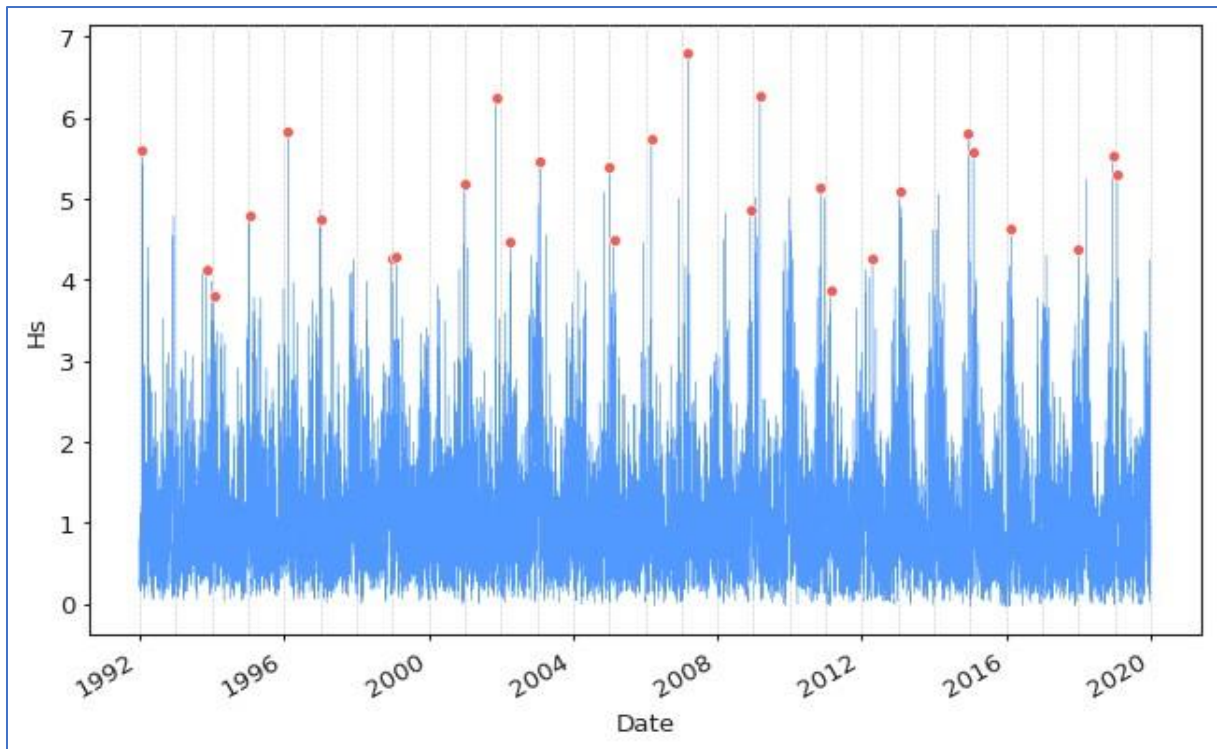


Figure 45: Représentation de la Méthode des Blocs Maximas sur les hauteurs de houles entre 1992–2020 (baie de Bousmail)

3.3.3.2. Résultats de la distribution GEV :

Les résultats de cette étude sont présentés dans les Figure 46, Figure 47 et la Figure 48, où des lignes t rouges représentent les limites de l'erreur acceptée, fixées à 15% pour les résultats. Les croix rouges sur le graphique indiquent les valeurs des hauteurs de vagues pour des périodes de retour spécifiques, comprenant 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 500 et 1000 ans.

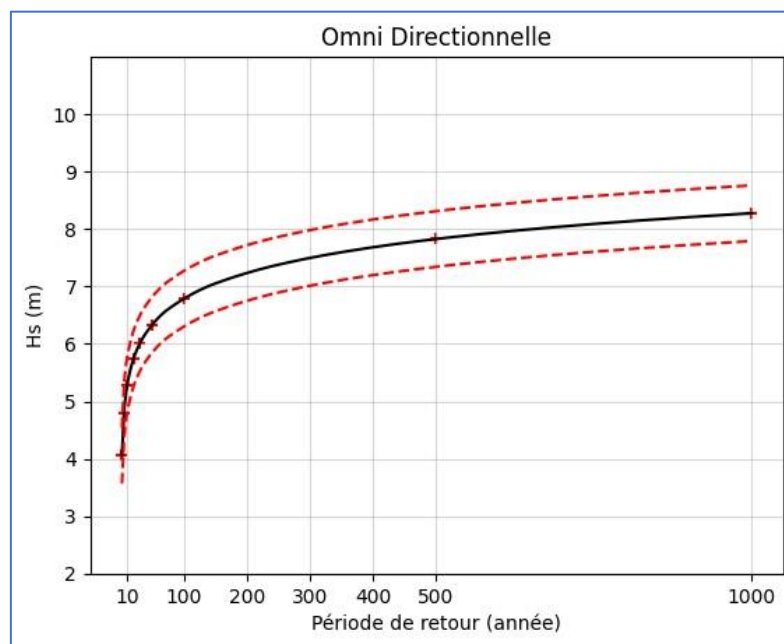


Figure 46: Période de Retour en années pour l'omnidirectionnel (baie d'Alger)

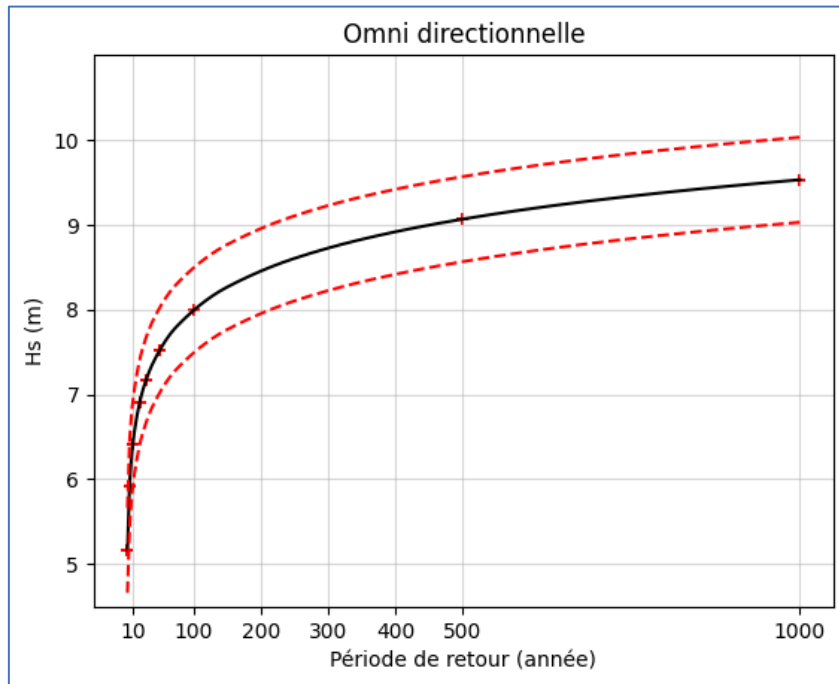


Figure 47: Période de Retour en années pour l'omnidirectionnel (baie de Zeemmouri)

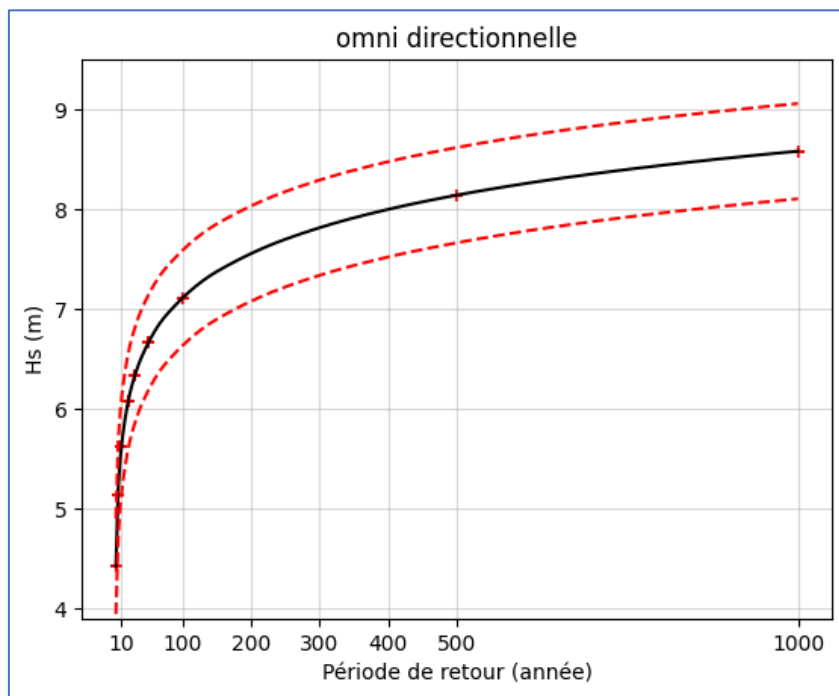


Figure 48: Période de Retour en années pour l'omnidirectionnel (baie de Bousmail)

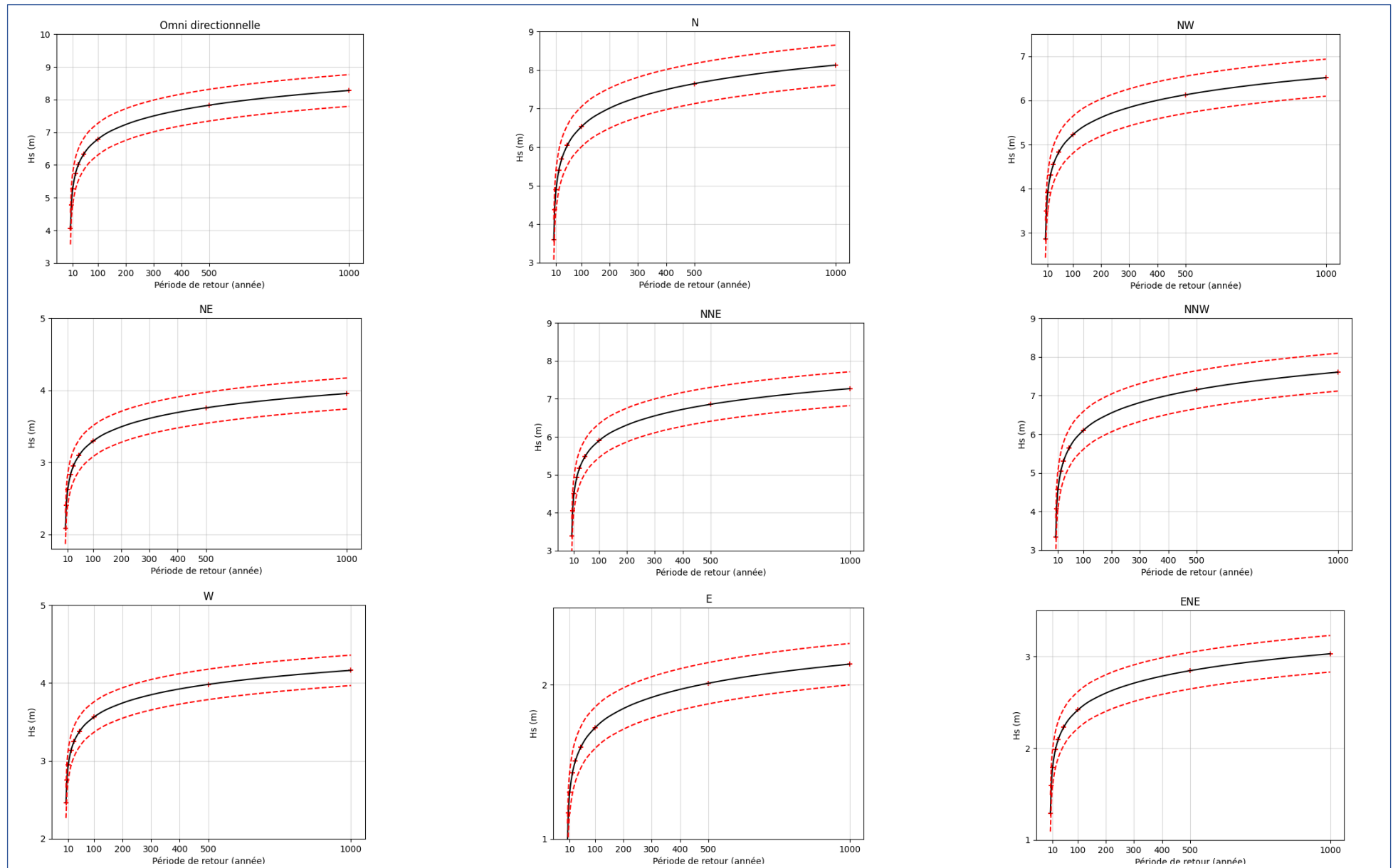


Figure 49 : Estimation des événements extrêmes par la distribution de Gumbel pour les directions dominantes (baie d'Alger)

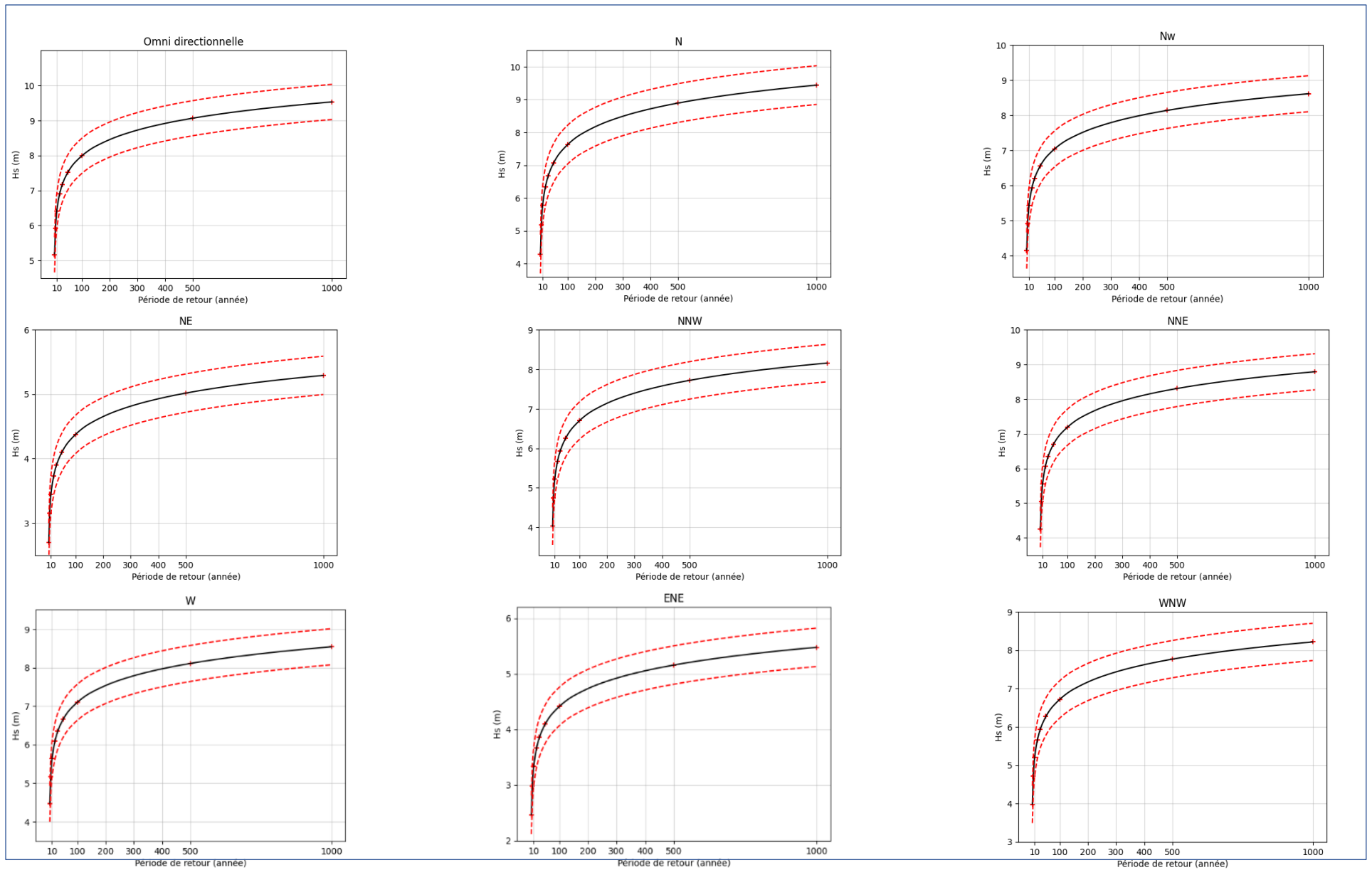


Figure 50: Estimation des événements extrêmes par la distribution de Gumbel pour les directions dominantes (baie de Zemmouri)

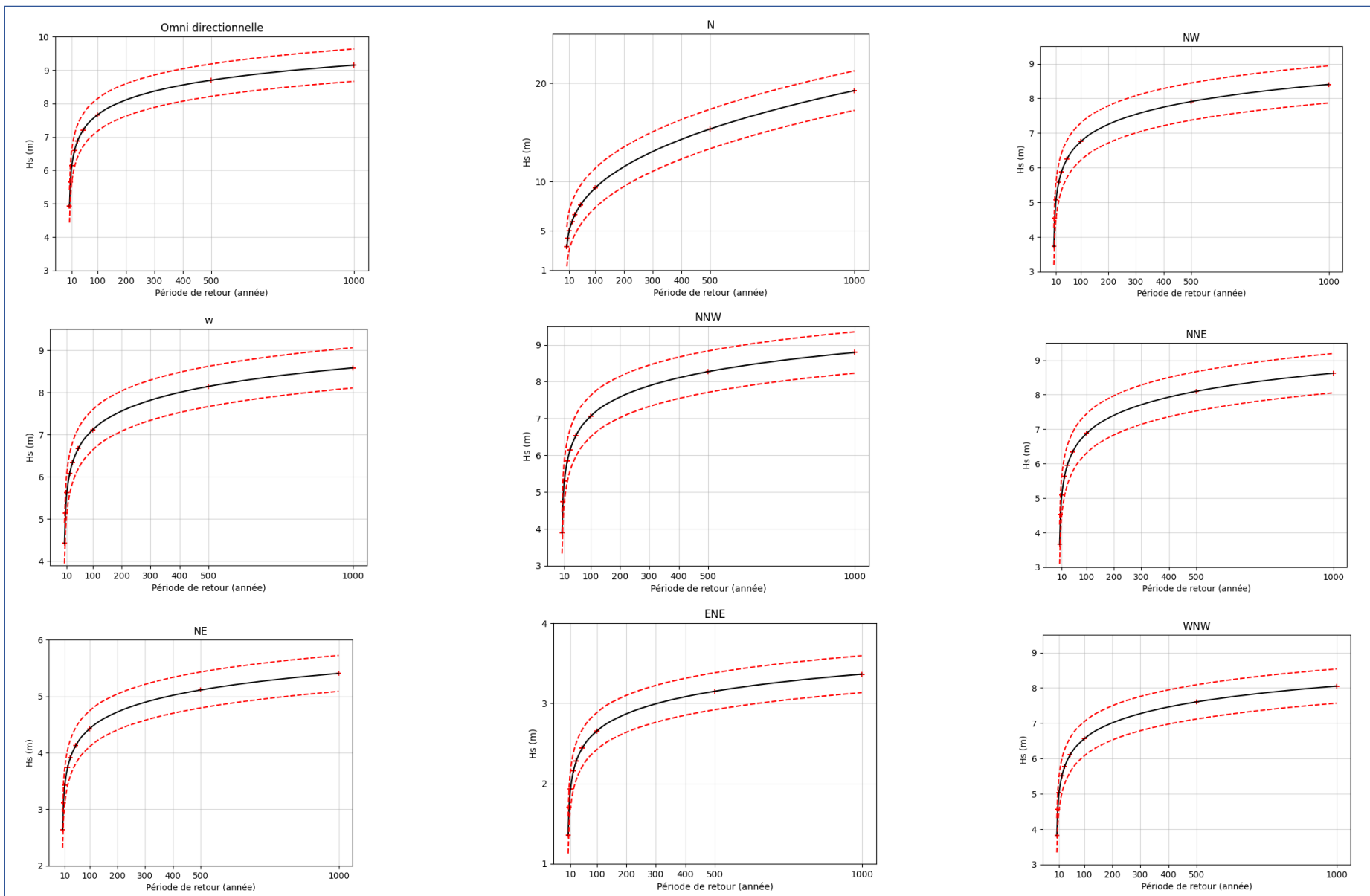


Figure 51 : Estimation des événements extrêmes par la distribution de Gumbel pour les directions dominantes (baie de Bousmail)

Afin de simplifier l'analyse des résultats obtenus à partir de la méthode des Blocks Maximas suivant la distribution de *Gumbel* des tableaux ont été élaborés pour synthétiser toutes les hauteurs extrêmes enregistrées en fonction des périodes de retour de ces événements exceptionnels à venir pour chaque baie.

Les tables (16 , 17 , 18) présentent les résultats obtenus par la méthode des blocs maxima en utilisant la distribution de Gumbel pour estimer les hauteurs des vagues. Ces données fournissent des indications sur la probabilité des événements extrêmes de vagues dans différentes directions en fonction des périodes de retour. Les résultats révèlent que la direction Est-Nord-Est est généralement la moins susceptible de générer des hauteurs de vagues extrêmes, sauf dans le cas spécifique de la baie d'Alger. Par exemple, pour une période de retour de 1000 ans, les hauteurs des vagues dans la direction ENE sont enregistrées à 5,29 mètres pour Zemmouri et 3,36 mètres pour Bousmail, représentant ainsi les valeurs les plus basses parmi toutes les directions pour cette période de retour. Pour la baie de Bousmail le Nord présente des valeurs beaucoup plus élevées pour les périodes de retour supérieures à 100 ans

Tableau 16 Résumé de l'ensemble des résultats obtenu par la méthode BM distribution de gumbel (baie d'Alger).

BM										
Hauteur de houle par direction (m)										
Périodes de Retour (années)	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	Omni
2	2.56	2.58	2.85	3.33	3.60	3.38	2.01	1.29	0.9	4.05
5	2.75	3.04	3.49	4.07	4.38	4.05	2.51	1.59	1.13	4.78
10	2.95	3.35	3.91	4.56	4.90	4.50	2.71	1.79	1.27	5.27
20	3.14	3.64	4.31	5.03	5.40	4.93	2.87	1.98	1.41	5.73
30	3.25	3.81	4.54	5.30	5.68	5.17	2.94	2.09	1.48	6.00
50	3.38	4.02	4.83	5.64	6.04	5.48	3.02	2.23	1.57	6.34
100	3.56	4.31	5.22	6.10	6.53	5.90	3.10	2.42	1.70	6.78

Tableau 17 Résumé de l'ensemble des résultats obtenu par la méthode BM distribution de gumbel (baie de Bousmail).

BM									
Hauteur de houle par direction (m)									
Période sde Retour (année)	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	Omni
2	4.42	3.82	3.68	3.89	3.38	3.66	2.63	1.56	4.91
5	5.13	4.56	4.48	4.73	4.21	4.52	3.11	1.70	5.65
10	5.60	5.04	5.01	5.30	4.98	5.09	3.43	1.93	6.13
20	6.04	5.50	5.53	5.84	5.95	5.63	3.73	2.16	6.60
30	6.30	5.78	5.82	6.15	6.63	5.95	3.91	2.28	6.87
50	6.63	6.10	6.19	6.74	7.63	6.64	4.13	2.44	7.20
100	7.06	6.56	6.68	7.06	9.32	6.87	4.43	2.66	7.66

Tableau 18 : Résumé de l'ensemble des résultats obtenu par la méthode BM distribution de gumbel (baie de Zemmouri).

BM									
Hauteur de houle par direction (m)									
Période sde Retour (année)	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	Omni
2	4.46	3.98	4.14	4.03	4.29	4.24	2.69	2.46	5.16
5	5.17	4.71	4.91	4.74	5.18	5.03	3.14	2.99	5.91
10	5.63	5.19	5.43	5.21	5.78	5.56	3.44	3.33	6.41
20	6.09	5.63	5.92	5.67	6.34	6.06	3.73	3.66	6.90
30	6.34	5.93	6.21	5.93	6.67	6.34	3.89	3.86	7.18
50	6.67	6.26	6.56	6.26	7.07	6.70	4.1	4.09	7.52
100	7.10	6.73	7.04	6.70	7.63	7.18	4.38	4.41	7.99

3.4. Comparaison entre les méthodes POT et Blocs Maximas :

Afin d'obtenir des résultats plus précis et efficaces, nous avons examiné les deux méthodes disponibles (POT et GEV) et comparé leurs performances. Pour cette analyse, nous avons uniquement utilisé l'approche omnidirectionnelle afin de déterminer la méthode à adopter dans le chapitre suivant.

Les graphes suivants illustrent la comparaison entre les deux méthodes.

À partir de la Figure, on constate que les deux méthodes produisent des résultats très similaires, avec une différence de quelques dizaines de centimètres. De plus, on peut voir que la méthode GEV propose des valeurs plus extrêmes que la méthode POT pour l'ensemble des périodes de retour de 1000 ans. Cela s'explique par le nombre limité de données prises en compte par la méthode POT et leur nature

Pour les résultats des deux méthodes, nous obtenons un R^2 de 98% pour les zones de Zmmouri et Bousmail et de 99% pour Alger, ce qui valide nos résultats pour les deux approches.

Pour la suite de notre travail, nous allons continuer avec les résultats de la méthode POT; elle prend en considération plus de points par rapport à la méthode GEV, qui est limitée à un seul point par bloc (année), même si d'autres points extrêmes existent, seuls les maximums sont retenus.

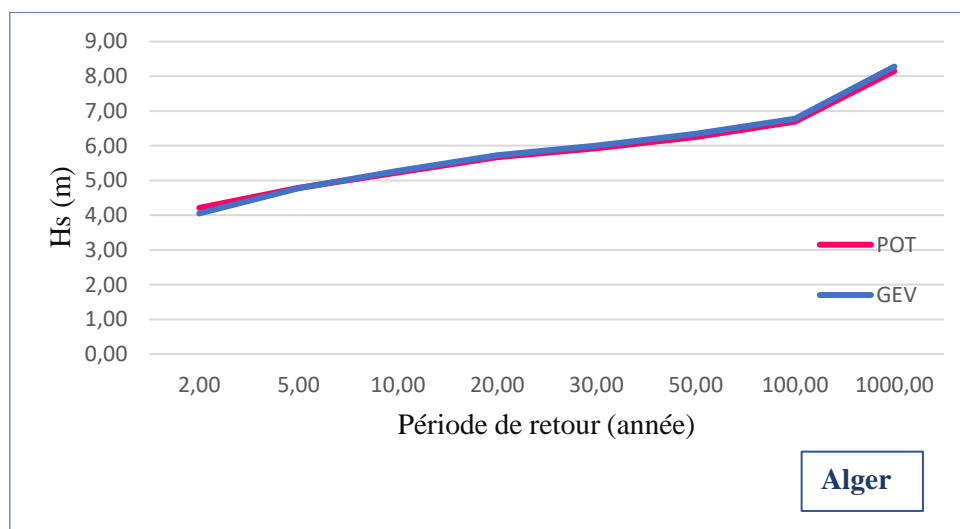


Figure 52: Comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes POT et GEV pour l'omnidirectionnel. (baie d'Alger)

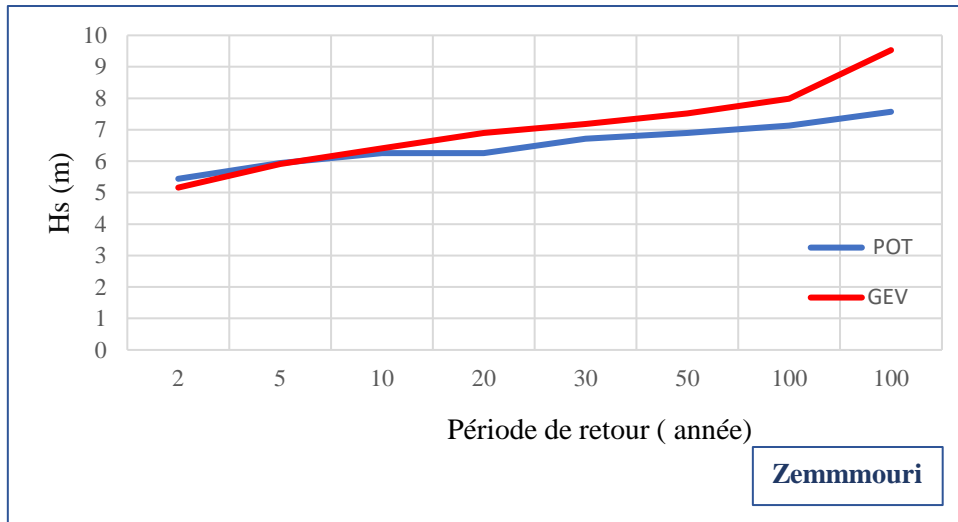


Figure 53 : Comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes POT et GEV pour l'omnidirectionnel. (baie de Zemmmouri)

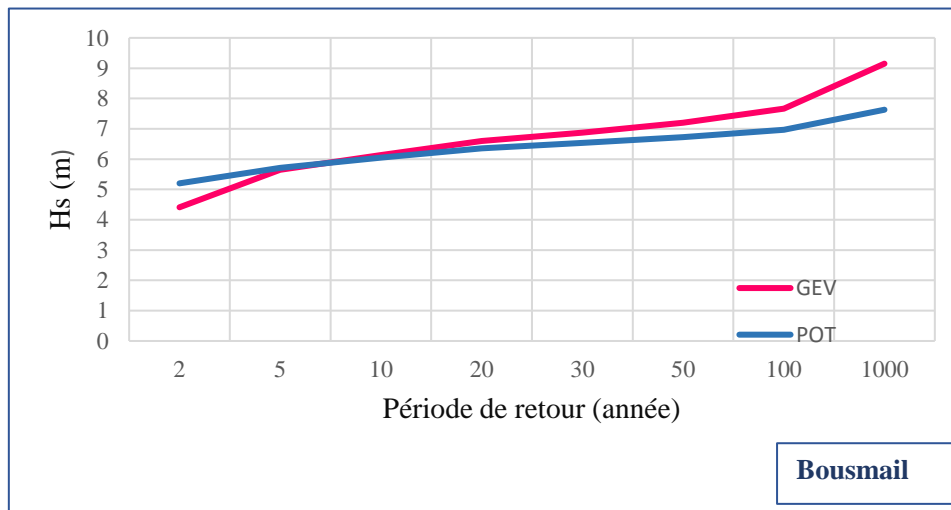


Figure 54 : Comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes POT et GEV pour l'omnidirectionnel.

V. Conclusion :

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

Il serait également pertinent de développer une nouvelle méthode qui intègre à la fois la granularité des données prises en compte par la méthode POT et la capacité de la méthode GEV à capturer des valeurs extrêmes. Cette nouvelle approche permettrait de fournir des estimations encore plus précises et fiables, améliorant ainsi la gestion des risques liés aux phénomènes marins rares

4. **Chapitre IV. Modélisation Numérique de
l'hydrodynamique côtier**

4.2. Introduction :

La modélisation numérique des phénomènes maritimes revêt une importance capitale dans la simulation et la prévision des événements météorologiques extrêmes affectant les ouvrages maritimes. Une gamme variée de logiciels, élaborés par des institutions académiques et des entreprises privées, est désormais disponible (J. Ahn et al., 2019 ; A. Symonds et al., 2017). Ces outils permettent non seulement de prédire avec précision les marées, les courants et les processus côtiers, mais aussi d'évaluer l'impact des infrastructures côtières et des changements environnementaux. En conséquence, la modélisation numérique constitue un atout précieux pour orienter les décisions stratégiques dans la gestion des zones marines, la planification des infrastructures et la préservation des écosystèmes côtiers.

Dans notre étude, On a choisi le *DHI Mike 21* pour réaliser les différentes simulations.

4.3. Présentation du Model :

DHI MIKE 21 est un modèle numérique développé par l'Institut d'Hydraulique Danois (DHI Water & Environnement) pour simuler la propagation des vagues dans les environnements offshore et côtiers. Basé sur la méthode de conservation de la densité spectrale, ce modèle capture avec précision les interactions complexes entre l'énergie des vagues et l'environnement. Il offre des fonctionnalités avancées telles que la réfraction des vagues, le rabattement lié aux variations bathymétriques et la génération/dissipation des vagues (Brahim et Alkama 2023).

Pour utiliser MIKE 21, une maille de simulation (Mesh) doit être générée à l'aide de l'outil de génération de maillage (Mesh Generator) inclus dans la suite logicielle MIKE-Zero. Ce dernier a été utilisé dans cette partie de notre étude

4.3.2. Mesh Generator :

Le Mesh Generator de Mike 21 constitue un outil sophistiqué qui permet de créer des maillages numériques détaillés pour les modèles MIKE Zéro, qu'ils soient flexibles ou fixes. Il est essentiel d'adapter le maillage à ces nouveaux modèles pour garantir la précision des simulations. Cet outil propose deux méthodes d'interpolation pour les éléments triangulaires, le voisinage naturel et l'interpolation linéaire, qui peuvent être utilisées selon les besoins. De plus, il offre la possibilité d'imbrication de plusieurs maillages pour les modèles à maillage fixe (DHI, 2014).

4.3.3. MIKE SW :

Le module SW dans le logiciel MIKE 21 est conçu pour calculer la propagation de la houle vers la côte. Il prend en compte plusieurs phénomènes importants, notamment :

- La génération de la houle par l'action du vent
- Les interactions non linéaires vague-vague
- La dissipation due au frottement sur le fond
- La dissipation due au déferlement
- La réfraction et le shoaling dus à la variation de la profondeur
- Les interactions entre les vagues et les courants,
- Les effets de la variation temporelle de la profondeur.

Pour réaliser ces calculs, le module SW utilise une formule directionnelle quasi-stationnaire dans le domaine spectral et temporel. Le déferlement est basé sur la formule établie par Battejs et al. En 1978. Dans les calculs, le niveau d'eau est considéré comme nul avec des données de

forçage négligeables, et le paramètre de rugosité du fond est maintenu constant à **0,04**. De plus, les données bathymétriques et les conditions de la houle sont également prises en compte pour une modélisation précise de la propagation de la houle.

Equations en eaux profondes :

Le modèle repose sur la résolution des équations tridimensionnelles incompressibles de Reynolds, moyennées selon Navier-Stokes, en utilisant les hypothèses de Boussinesq et de pression hydrostatique. L'équation de continuité locale est formulée comme suit :

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

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

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

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

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

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

$$F u = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad \text{Équation IV.5}$$

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

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

A z = η

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

A z = -d

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

Tableau 19 Signification des symboles:

Symbole	Signification	Symbole	Signification
<i>t</i>	Temps	$h = \eta + d$	La profondeur d'eau totale
<i>x, y et z</i>	Les coordonnées cartésiennes	<i>S</i>	Amplitude de la décharge causée par des sources ponctuelles
<i>A</i>	La viscosité horizontale	(u_s, v_s)	La vitesse à laquelle l'eau est rejetée dans l'eau ambiante
<i>Pa</i>	Pa La pression atmosphérique	$f = 2\Omega \sin\Phi$	Paramètre de Coriolis (Ω est la vitesse angulaire et Φ la latitude géographique)
<i>g</i>	L'accélération de gravité	$(\tau_{sx} \tau_{sy})$	Les composantes x et y des contraintes de vent de surface
ρ_o	La densité de référence	$(\tau_{bx} \tau_{by})$	Les composantes x et y des contraintes de vent de fond
<i>vt</i>	Viscosités turbulentes verticales	$S_{xx} S_{xy}$ $S_{yx} et S_{yy}$	Composantes du tenseur radial
<u><i>d</i></u>	La profondeur	$h = \eta + d$	La profondeur d'eau totale

Équations de conservation de l'action des vagues :

La principale équation décrivant le comportement des vagues est l'équation d'équilibre, formulée soit en coordonnées cartésiennes, soit en coordonnées sphériques

1. Coordonnées cartésiennes :

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\overline{vN}) = \frac{s}{\sigma} \quad \boxed{\text{Équation IV.9}}$$

Tableau 20 : Signification des symboles:

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

- Les quatre vitesses de propagation caractéristiques sont données par :

$$(c_x, c_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}g + \vec{U} \quad \text{Équation IV.10}$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial\sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \nabla_{\vec{x}} d \right] + c_g \vec{k} \frac{\partial \vec{U}}{\partial S} \quad \text{Équation IV.11}$$

$$(c_x, c_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}g + \vec{U} \quad \text{Équation IV.12}$$

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

Tableau 21 : Signification des symboles:

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

4.3.4. MIKE HD :

MIKE HD, module hydrodynamique avancé, résout les équations bidimensionnelles de Saint-Venant sur des maillages structurés ou non structurés. Il prend en compte divers éléments, tels que le frottement au fond, les événements météorologiques (vent et gradient de pression atmosphérique), la force de Coriolis, ainsi que différentes modélisations de la turbulence de l'écoulement et les variations de la géométrie du domaine au fil du temps, y compris les zones couvrantes et découvrantes pendant les variations de marée. De plus, il permet le calcul des courants littoraux en tenant compte des contraintes de radiation dues à la houle dans la zone de déferlement. Ce module offre une précision dans la prédiction des schémas d'écoulement, des vitesses et des distributions de pression de l'eau. Sa flexibilité est renforcée par la prise en charge de divers types de grilles et une interface conviviale, ce qui lui permet une intégration aisée avec d'autres modules pour la modélisation couplée. En résumé, MIKE HD représente un outil complet et puissant pour la modélisation et l'analyse des processus hydrodynamiques dans diverses applications marines et côtières.

Équation pour l'eau peu profonde

Dans un système de coordonnées cartésiennes, l'équation des eaux peu profondes résulte de l'intégration des équations de quantité de mouvement horizontale et de continuité de la profondeur ($h=\eta+d$)

$$\frac{\partial t}{\partial u} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = hS \quad \text{Équation IV.14}$$

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

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

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

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

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

- Les forces de contrainte latérales T_{ij} :

Les forces de contrainte latérales sont formées par une combinaison du frottement visqueux, de l'advection différentielle et du frottement turbulent. Elles sont déterminées à partir d'une viscosité turbulente, en se basant sur la formulation des gradients de vitesse moyenne à la profondeur.

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

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

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

Tableau 22 : Signification des symboles

Symbole	Signification	Symbole	Signification
<i>t</i>	Temps	<i>A</i>	La viscosité horizontale.
<i>Pa</i>	La pression atmosphérique	<i>g</i>	L'accélération de gravité
<i>x, y et z</i>	Les coordonnées cartésiennes	<i>v_t</i>	Viscosités turbulentes verticale
<i>η</i>	L'élévation de la surface	<i>S_{xx}, S_{xy}, S_{yx} et S_{yy}</i>	Composantes du tenseur de rayonnement.
<i>d</i>	La profondeur d'eau	<i>ρ_w</i>	la densité de l'eau
<i>h = η+d</i>	La profondeur d'eau totale	<i>ρ₀</i>	The reference density of water.
<i>u, v et w</i>	La vitesse composante dans les directions x, y et z	<i>S</i>	Amplitude de décharge causée par des sources ponctuelles
<i>(u_s, v_s)</i>	La vitesse à laquelle l'eau est rejetée dans l'eau ambiante.	<i>(r_{bx}, r_{by})</i>	Les composantes x et y des contraintes de cisaillement du vent de fond.
<i>(r_{sx}, r_{sy})</i>	Les composantes x et y des contraintes de cisaillement du vent de surface	<i>T_{ij}</i>	Les contraintes latérales.
<i>u, v</i>	u, v : Les vitesses des courants à la Profondeur moyenne	<i>f = 2Ω sinΦ</i>	Paramètre de Coriolis (Φ:Latitude géographique)
<i>Ω</i>	Vitesse angulaire de révolution		

4.4. Méthodologie de travail :

4.4.2. Génération de la Mesh et création de la bathymétrie :

Pour commencer les simulations, la génération d'une mesh est indispensable. Cette opération est réalisée à l'aide du module 'Mesh Generator', comme expliqué précédemment. La création de la mesh avec ce module nécessite plusieurs étapes importantes :

- Détermination du système de projection : Il est crucial de choisir un système de projection adapté à la zone d'étude. Dans notre cas, nous utilisons le système 'WGS_84_UTM_ZONE_31'.
- Définition des limites terrestres et de la bathymétrie : Les limites terrestres (trait de côte) et la bathymétrie de la zone d'étude doivent être préalablement enregistrées.

Une fois la bathymétrie prête, les utilitaires d'exportation peuvent être utilisés pour sauvegarder les données bathymétriques sous différents formats, notamment dans un fichier .xy. Cela permet de préparer efficacement les données pour les simulations et d'assurer leur compatibilité avec divers outils de modélisation.

4.4.2.2. Données bathymétriques d'entrées pour la mesh :

La bathymétrie utilisée pour ce travail est issue de la combinaison de trois sources : des relevés de terrain, les cartes NAVIONICS et la base de données GEBCO. Cette analyse a permis de créer une carte détaillée de la zone d'étude, illustrant les contours sous-marins, les variations de profondeur et d'autres caractéristiques topographiques essentielles. De plus, des cartes bathymétriques individuelles ont été réalisées pour chacune des trois baies de la zone d'étude, fournissant des informations précises et spécifiques à chaque site.

4.4.2.3. Mesh et Bathymétrie résultante :

Les maillages (meshes) résultants des trois baies de la zone d'étude sont représentés dans les figures suivantes. Le maillage a été serré au niveau des ouvrages portuaires et des ouvrages de protections afin d'avoir des résultats plus précis

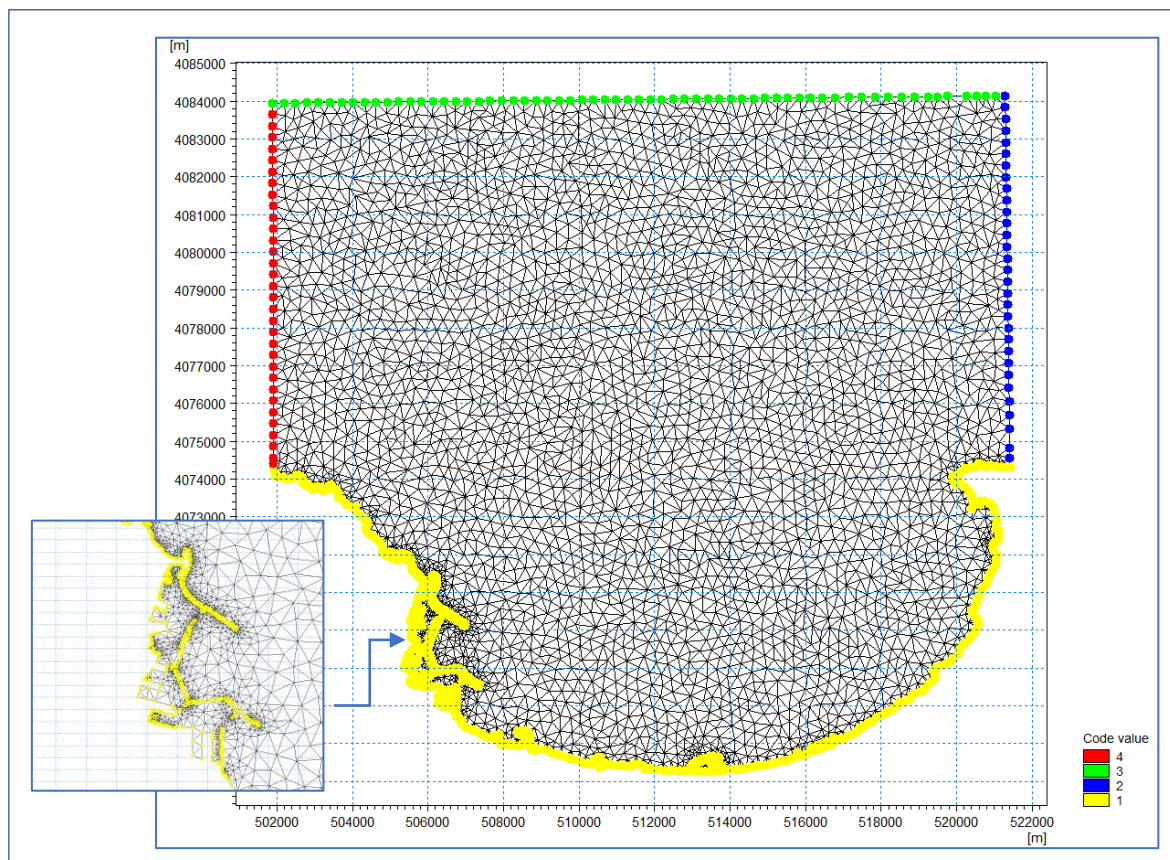


Figure 55 Emprise de maillage de la baie d'Alger

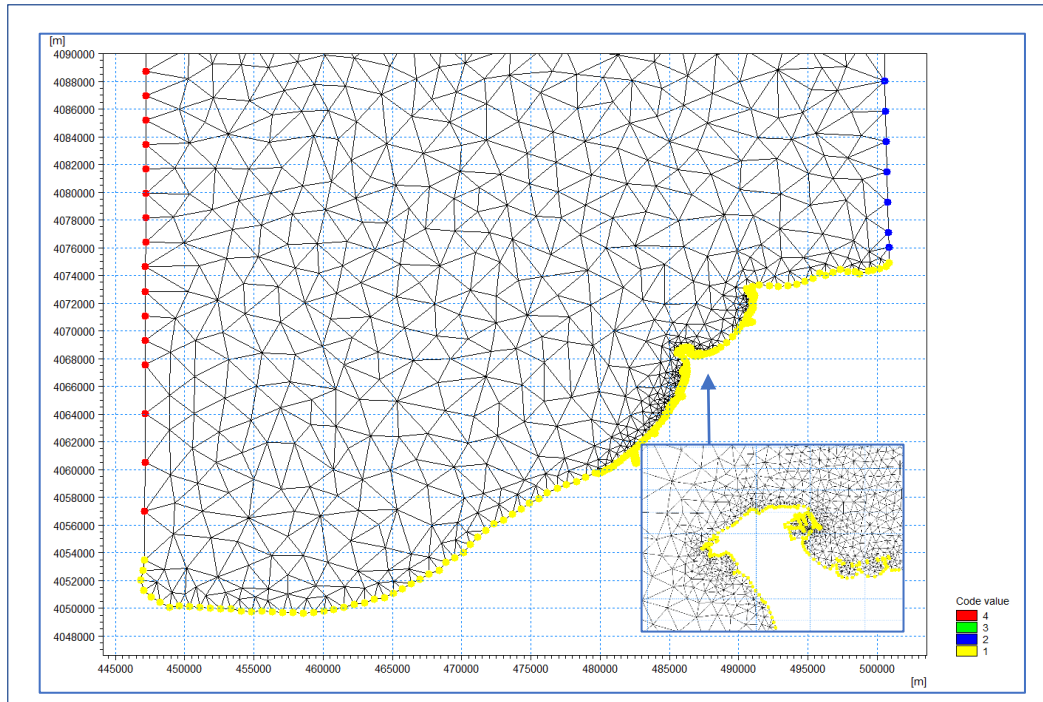


Figure 56 Emprise de maillage de la baie de Bousmail

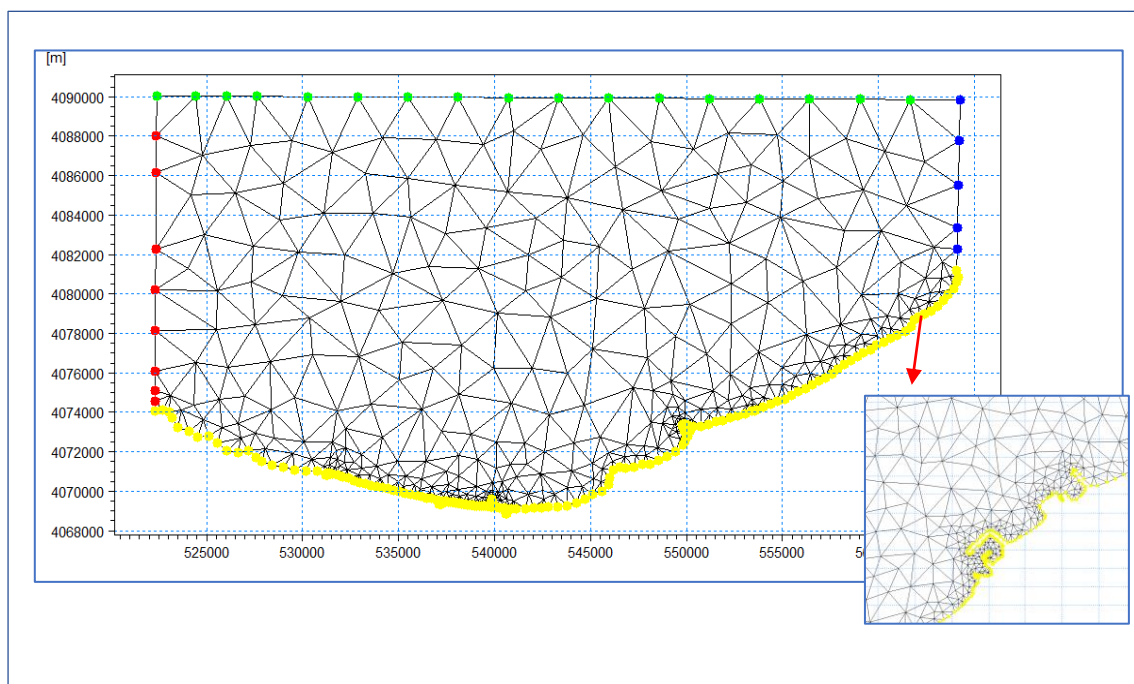


Figure 57 Emprise de maillage de la baie de Zemmouri

4.4.2.3.1. Bathymétrie de la baie d'Alger :

La bathymétrie de la baie d'Alger peut être divisée en trois zones distinctes :

Zones Est et Ouest près des caps : Ces zones se distinguent par des pentes abruptes, attribuées à la géomorphologie des caps, constituée de lithologies plus dures et résistantes telles que des falaises. Les effets hydrodynamiques y sont également marqués, faisant de ces zones des

régions à fort potentiel énergétique. La transition de la côte à l'isobathe de -50 mètres s'effectue sur une courte distance de part et d'autre de la baie.

Zone centrale de la baie d'Alger : Caractérisée par une pente douce, cette zone doit son inclinaison à une lithologie plus friable et meuble, avec des plages sablonneuses alimentées par les apports sédimentaires d'Oued el Harrach et aussi l'implantation de plusieurs ouvrages de protection. L'énergie des vagues y est également moins intense, contribuant à la faible pente observée.

Zone au large de la baie d'Alger : Dans cette partie, le plateau continental se termine directement à la sortie de la baie. Cela se traduit par des isobathes serrées, confirmant les observations régionales sur la morphologie globale de la région centrale algérienne. À l'est de Cap Matifou, les isobathes rapprochées suggèrent des fonds rocheux. Généralement, les isobathes entre -20 et -100 mètres sont régulières et parallèles au rivage, indiquant un fond régulier et une pente douce, ce qui reflète une faible activité des fonds par rapport aux zones côtières

Il est à noter que le plateau continental algérien est l'un des plus étroits du bassin méditerranéen, (A. Yelles Chaouche, A. Hauaoui, et A. Harbi)

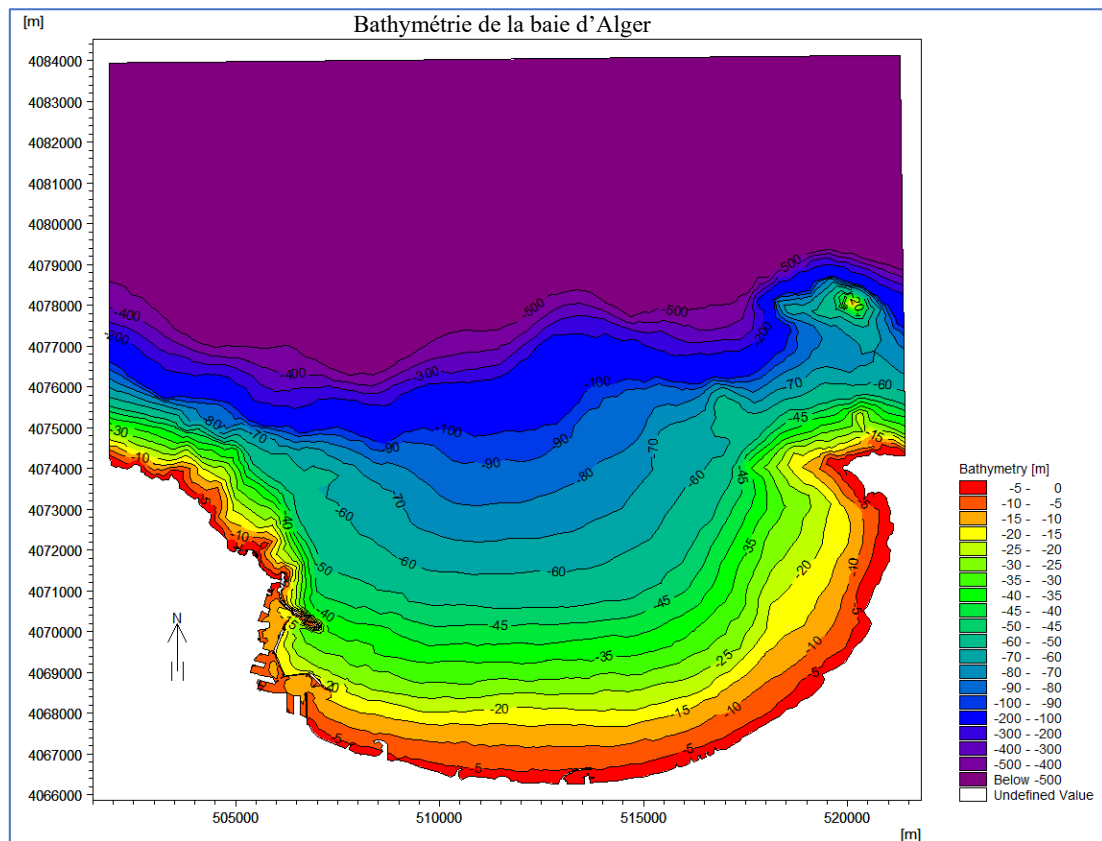


Figure 58: Bathymétrie de la baie d'Alger(change bathy)

4.4.2.3.2. Bathymétrie de la baie de Zemmouri :

L'examen de la carte bathymétrique de la baie de Zemmouri met en lumière deux zones morphologiques distinctes :

Dans la zone côtière, les isobathes révèlent des perturbations générales entre 1 et 10 mètres de profondeur, caractérisées par des rides d'avant-côte discontinues, principalement près du littoral. Cette morphologie témoigne de la dynamique des fonds marins sous l'influence des

vagues et des courants. La topographie de cette zone est complexe, étroitement liée aux variations météorologiques et hydrologiques. Le fond marin y est globalement régulier, avec des isobathes serrées indiquant une pente abrupte. Cependant, à l'ouest de la baie, des irrégularités sont observées, probablement dues aux apports sédimentaires des oueds de Boudouaou et Réghaia, ainsi qu'à la présence d'ouvrages de protection perturbant la dynamique sédimentaire. Ces irrégularités se stabilisent à partir de -5 mètres de profondeur.

Dans la zone au large, les isobathes sont parallèles au rivage et relativement espacées, signalant un fond marin régulier et moins dynamique que dans la zone côtière à l'exception des environs du Cap Djinet où les isobathes sont un peu perturbées.

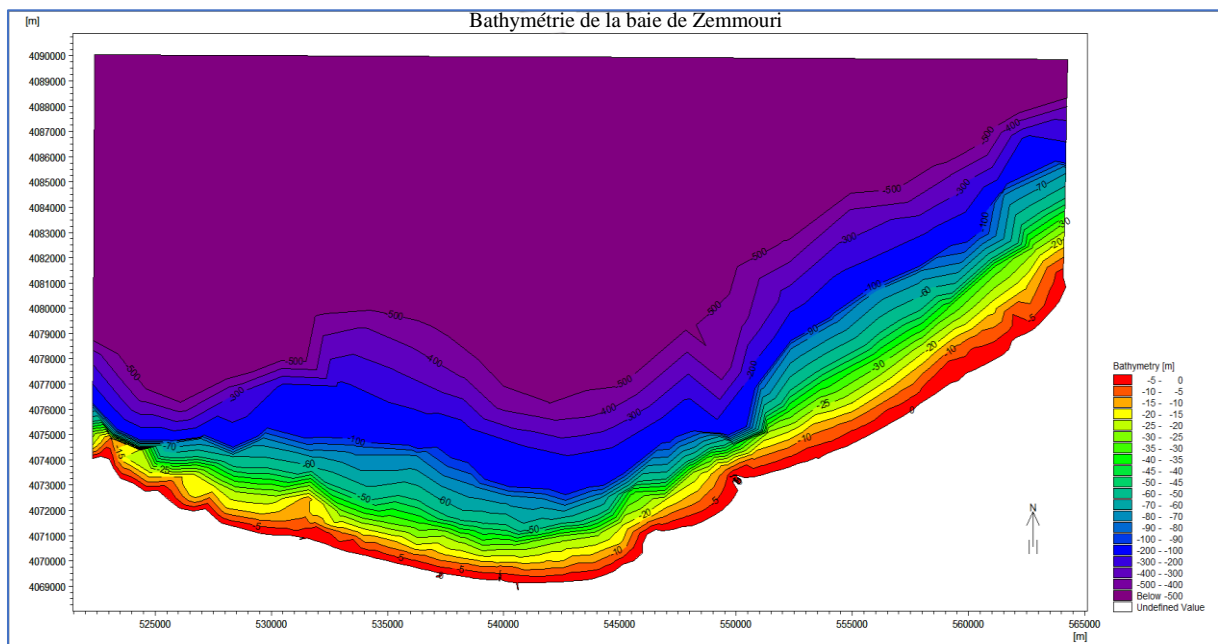


Figure 59 Bathymétrie de la baie de Zemmouri

4.4.2.3.3. Bathymétrie de la baie de Bousmail :

L'analyse de la carte met en évidence deux zones distinctes :

Zone Ouest : Les isobathes sont presque parallèles à la côte et très serrées entre -1 et -30 m, indiquant une pente abrupte due à la morphologie complexe des fonds et aux conditions hydrodynamiques. Au-delà de cette profondeur, les isobathes deviennent parallèles et plus espacées vers le large.

Zone Est : Les isobathes y sont irrégulières et bien espacées, contrastant avec la première zone. La partie ouest de cette zone (Mont Chenoua) présente une morphologie sous-marine légèrement perturbée jusqu'à -20 m.

La zone au large présente des isobathes régulières et parallèles au rivage, de -10 à -50 m, indiquant un fond relativement stable.

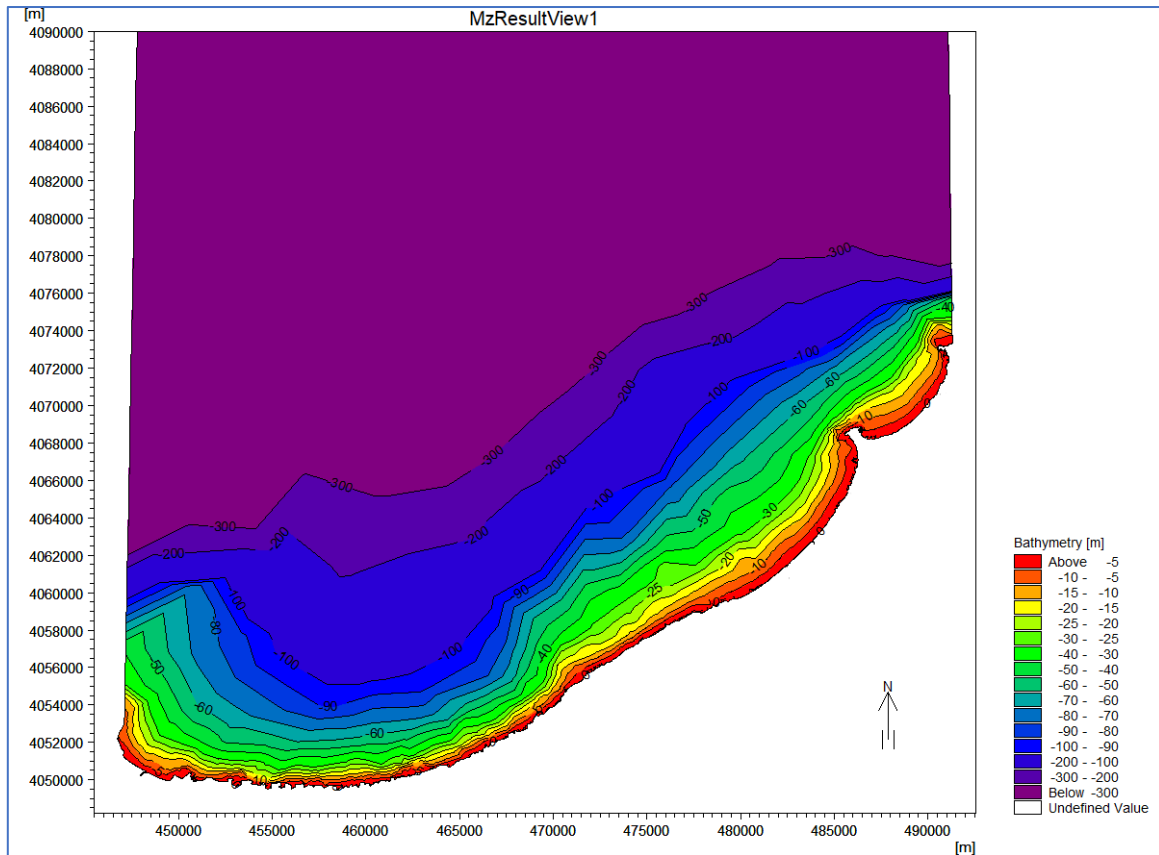


Figure 60 Bathymétrie de la baie de Bousmail

4.4.3. Scénarios de simulation :

Suite à l'identification des directions des houles les plus pénalisantes et au calcul des événements extrêmes dans le chapitre précédent (chapitre III), une méthodologie a été mise en place qui consiste à l'association de la hauteur maximale des houles pour chaque période de retour relative aux trois directions principales associés à ces périodes de retour d'événement (2, 5, 10, 20, 30, 50 et 100 ans). Par ailleurs, l'analyse a pris en compte l'élévation projetée du niveau de la mer, telle que décrite dans le rapport du GIEC de 2019. Les données obtenues concernant les houles pour ces directions sont répertoriées dans les tableaux suivants.

Tableau 23 : Inputs des simulations pour l'ensemble des périodes de retours (Baie d'Alger)

Périodes de retour (années)	Paramètres du vent	Paramètres de la houle			Niveau de la mer (m)
		NNW	N	NNE	
	U10 (m/s)	7.5			
	DirU10 (°)	337.5	360	22.5	
2	Hs (m)	3.56	3.92	3.61	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 m mTotale = 0.34 m
	Tp (s)	7.34	7.80	7.40	
5	Hs (m)	4.11	4.56	4.15	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 m mTotale = 0.34 m
	Tp (s)	8.04	8.58	8.04	
10	Hs (m)	4.52	5.06	4.56	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 m mTotale = 0.34 m
	Tp (s)	8.54	9.16	8.58	
20	Hs (m)	4.94	5.55	4.97	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 m mTotale = 0.34 m
	Tp (s)	9.03	9.71	9.06	
30	Hs (m)	5.18	5.83	5.21	NGA = +0.34 m
	Tp (s)	9.30	10.02	9.34	
50	Hs (m)	5.49	6.20	5.51	NGA = +0.34 m
	Tp (s)	9.65	10.42	9.67	
100	Hs (m)	5.90	6.69	5.92	NGA = +0.34 m
	Tp (s)	10.09	10.93	10.12	

Tableau 24 : Inputs des simulations pour l'ensemble des périodes de retours (Baie de Zemmouri)

Périodes de retour (années)	Paramètres du vent	Paramètres de la houle			Niveau de la mer (m)
		NNW	N	NNE	
	U10 (m/s)	7.5			
	DirU10 (°)	337.5	360	22.5	
2	Hs (m)	4.21	4.73	4.53	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
	Tp (s)	8.16	8.78	8.55	
5	Hs (m)	4.86	5.46	5.07	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
	Tp (s)	8.94	9.62	9.18	
10	Hs (m)	5.35	6.02	5.44	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
	Tp (s)	9.49	10.22	9.59	
20	Hs (m)	5.84	6.57	5.76	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
	Tp (s)	10.03	10.80	9.95	
30	Hs (m)	6.13	6.89	5.94	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
	Tp (s)	10.34	11.13	10.14	
50	Hs (m)	6.49	7.30	6.15	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
	Tp (s)	10.72	11.55	10.63	
100	Hs (m)	6.98	7.85	6.40	NGA = +0.34 m
	Tp (s)	11.22	12.09	10.63	Elévation futur = 0 m Totale = 0.34 m

Tableau 25 : Inputs des simulations pour l'ensemble des périodes de retours (Baie d Boussmail)

Périodes de retour (années)	Paramètres du vent	Paramètres de la houle			Niveau de la mer (m)
		NNW	N	NNE	
		U10 (m/s)	7.5		
	DirU10 (°)	337.5	360	22.5	
2	Hs (m)	4.09	3.78	4.02	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 mTotale = 0.34 m
	Tp (s)	8.01	7.63	7.93	
5	Hs (m)	4.85	4.43	4.68	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 mTotale = 0.34 m
	Tp (s)	8.93	8.48	8.73	
10	Hs (m)	5.44	4.92	5.18	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 mTotale = 0.34 m
	Tp (s)	9.59	9.00	9.30	
20	Hs (m)	6.02	5.41	5.69	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 mTotale = 0.34 m
	Tp (s)	10.22	9.56	9.89	
30	Hs (m)	6.36	5.70	5.98	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 mTotale = 0.34 m
	Tp (s)	10.59	9.89	10.18	
50	Hs (m)	6.78	6.06	6.36	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 mTotale = 0.34 m
	Tp (s)	11.02	10.27	10.59	
100	Hs (m)	&	6.55	6.86	NGA = +0.34 m Elévation futur = 0 mTotale = 0.34 m
	Tp (s)	11.61	10.78	11.10	

Note

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

4.4.4. Résultats :

Pour chaque simulation, il est possible d'extraire les caractéristiques de la houle (période, hauteur, direction) en tout point du maillage. Ces caractéristiques sont également représentées sous forme de cartes, indiquant la direction (vecteurs) ainsi que les contours des iso hauteurs et des iso périodes.

4.4.4.2. Interprétation des Résultats de la baie d'Alger :

- Direction Nord Nord-ouest (337.5°) :

Au large de la zone d'étude, les vagues conservent leur énergie initiale avec des hauteurs significatives pouvant atteindre environ 5,6 mètres pour cette direction Nord-Nord-Ouest et un coefficient de réfraction proche de 1 également. En se rapprochant de la côte, elles subissent les effets de la bathymétrie, probablement un effet de shoaling, et perdent progressivement de l'énergie notamment dans la partie ouest de la baie près du port d'Alger où les hauteurs significatives sont d'environ 2.5m, et d'environ 4,5 à 5 mètres au niveau centrale de la baie d'Alger avec des valeurs minimales autour de 0,4 mètre et un coefficient de réfraction de 0.07 dans les zones abritées

L'hydrodynamique observée est probablement influencé par l'effet cumulé des vagues, l'effet frontal causé par les caps avancés et la bathymétrie complexe de la baie, ainsi que la réfraction des vagues due aux variations bathymétriques

Courantologie : La direction d'incidence des houles joue un rôle crucial dans la création de courants littoraux dans les eaux peu profondes près de la côte. Les houles provenant du nord-nord-ouest génèrent près de la côte un courant de dérive orienté vers l'est, avec des vitesses moyenne de 0,3 m/s.

- Direction Nord (360°) :

Les houles provenant du secteur 360°N arrivent de manière frontale. Cela s'explique en partie par le fait que ces houles subissent peu de réfraction, avec des angles de déviation presque nuls. Cependant, elles sont déformées par les affleurements rocheux des deux caps. De plus, la configuration de la côte, presque perpendiculaire à la direction des houles, contribue à cette frontalité.

Presque toute la côte de la baie d'Alger est exposée à la houle Nord. Ces houles arrivent perpendiculairement à la côte en conservant presque toute leur énergie initiale, avec un coefficient de réfraction proche de 1 au large et des hauteurs significatives atteignant 6,5 m

(période de retour de 100 ans) et 5 m (période de retour de 10 ans). À mesure qu'elles se rapprochent de la côte, le coefficient de réfraction diminue, indiquant une perte d'énergie des houles, avec des hauteurs significatives variant entre 4 et 5,5 m au centre de la baie. Cette diminution est due à l'effet progressif du fond marin (effet de shoaling) et à l'influence de la bathymétrie côtière.

Courantologie : Les houles du secteur Nord engendrent des courants moins puissants que ceux provenant d'autres directions, se dirigeant vers l'Ouest avec une vitesse entre 0,2 m/s et 0,4 m/s. On observe également une circulation tourbillonnaire derrière les ouvrages de protection et les jetées, notamment dans le port d'Alger, principalement en raison de la diffraction des houles à leurs extrémités.

- Direction Nord Nord-Est (22.5°) :

Les houles conservent leur énergie initiale au large de la baie avec des hauteurs significatives pouvant atteindre environ 6 mètres pour cette direction Nord-Nord-Est. En se dirigeant vers la côte, elles commencent à ressentir l'effet de la bathymétrie, et perdent progressivement de l'énergie, atteignant des hauteurs significatives d'environ 5 à 5,5 mètres au niveau de la baie d'Alger et des valeurs minimales autour de 0,4 mètre dans les zones les plus abritées avec un coefficient de réfraction semblable aux autres directions. Les houles arrivent avec des hauteurs significatives moins considérables dans la zone Est de la baie cela est due à la diffraction de la houle par le cap Matifou suivi par la diminution de la bathymétrie. Tandis que la zone ouest reçoit des houles presque frontales avec des hauteurs plus prononcées du a l'absence des obstacles.

Courantologie : Les houles venant de cette direction induisent un courant côtier qui se déplace d'Est en Ouest à une vitesse moyenne variant entre 0,3 m/s et 0,4 m/s dans l'ensemble des périodes de retour étudiées. Ces observations indiquent que la dynamique des courants dans la zone n'est pas sensiblement influencée par les variations de hauteur et de période des vagues en haute mer

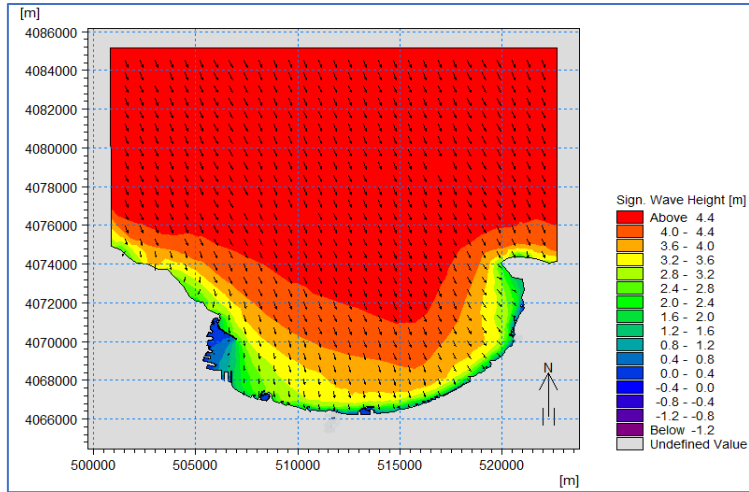


Figure 61 champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Ouest (10ans)

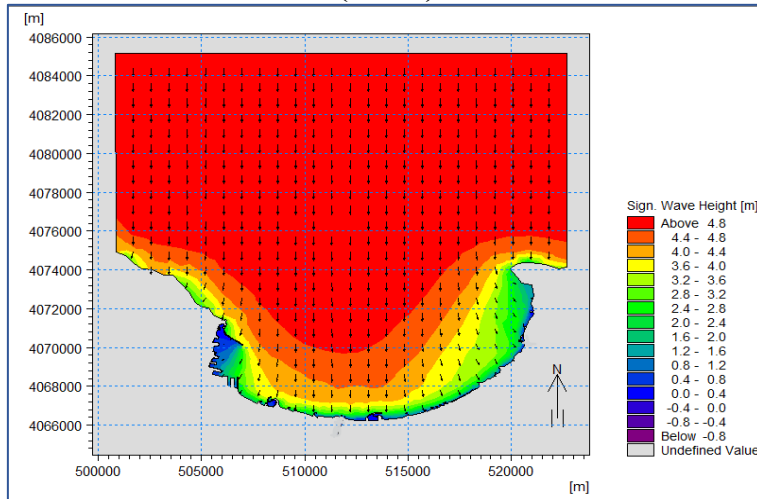


Figure 62: champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord (10ans)

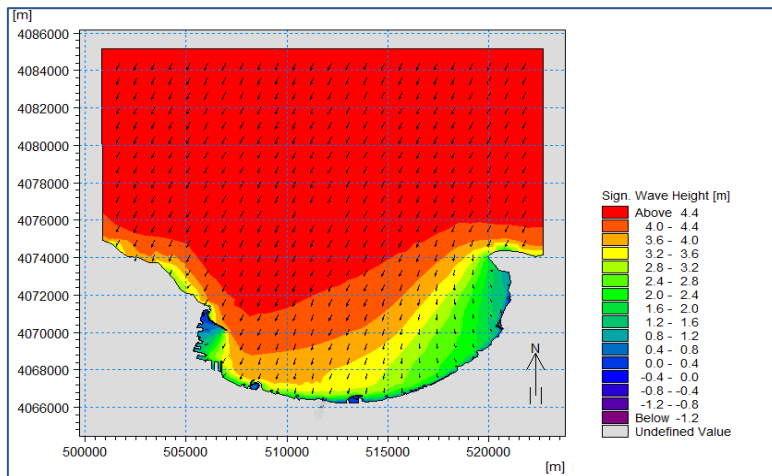


Figure 63: champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Est (10ans)

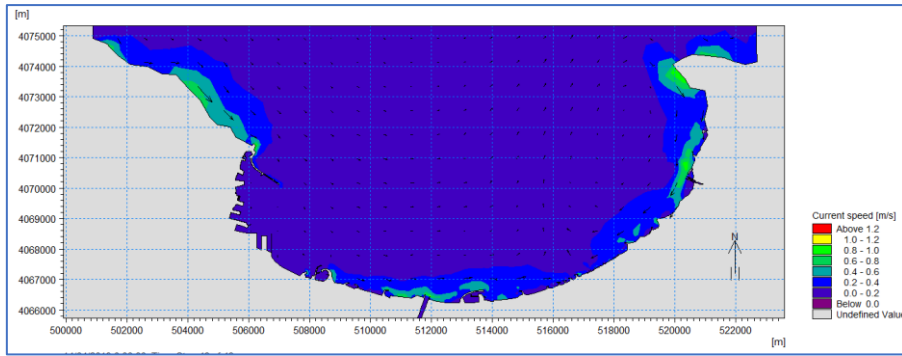


Figure 64 champs des Courants dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Ouest (10ans)

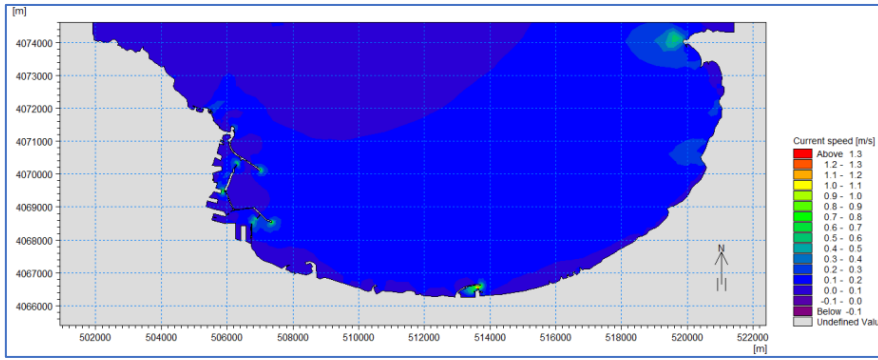


Figure 65: champs des Courants dans la baie d'Alger pour la direction Nord (10ans)

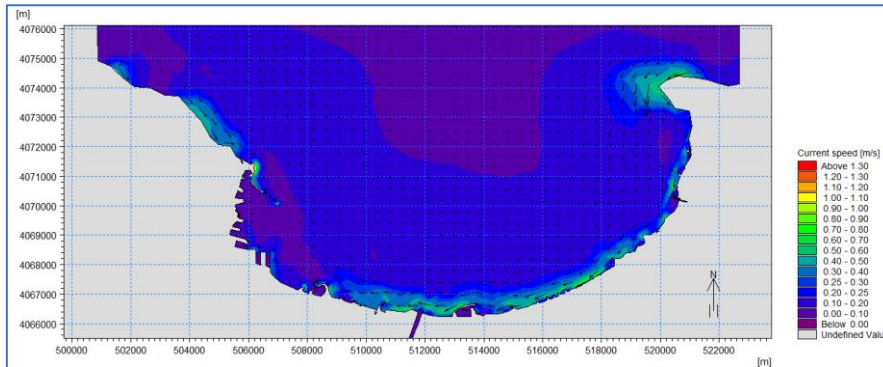


Figure 66: champs des Courants dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Est (10ans)

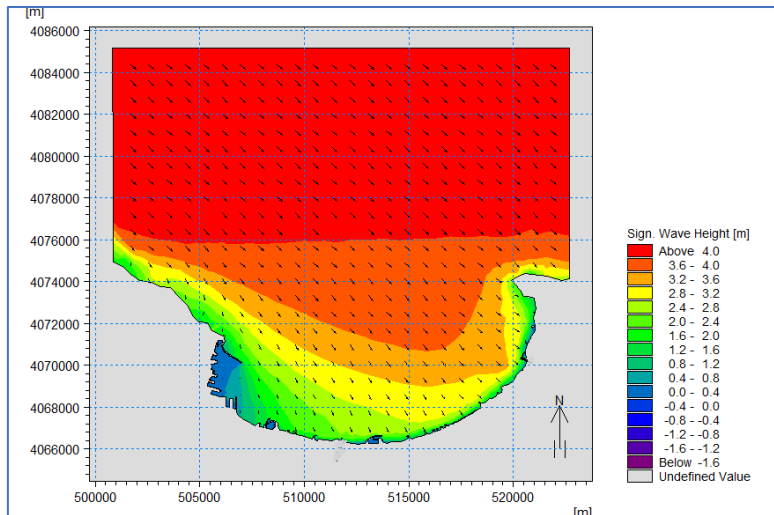


Figure 67 : champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Ouest (30ans)

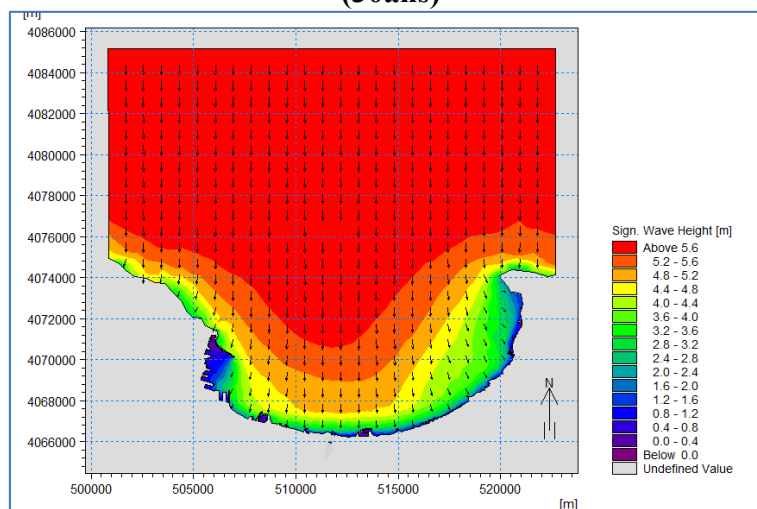


Figure 68 : champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord (30ans)

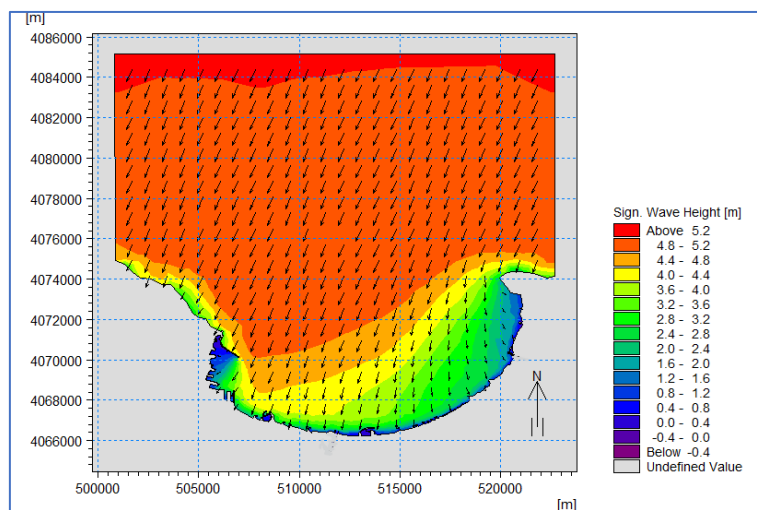


Figure 69: champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord (30ans)

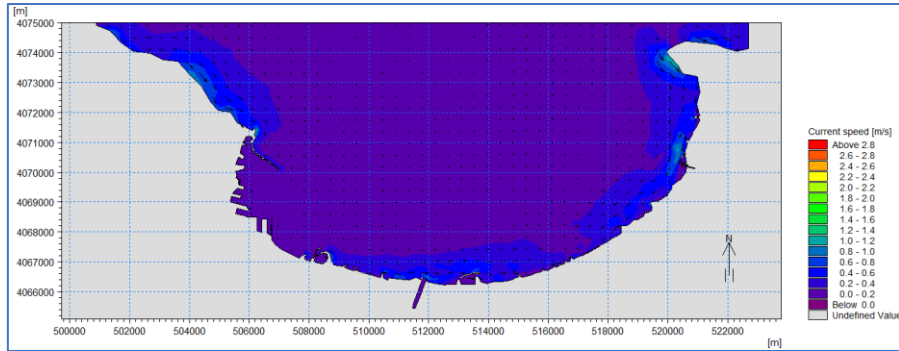


Figure 70 16: champs des Courants dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Ouest (30ans)

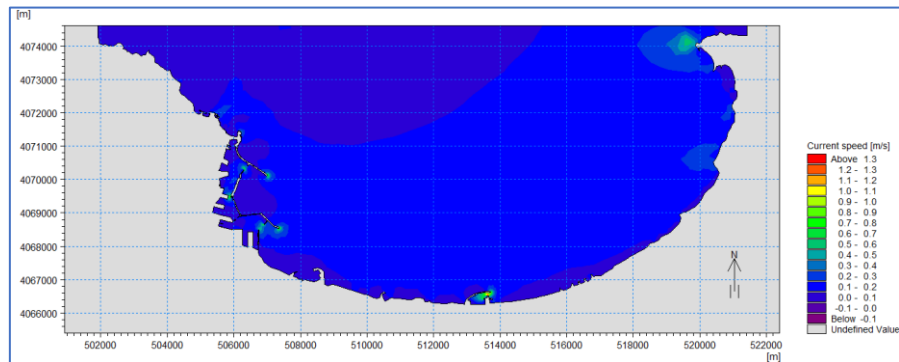


Figure 71: champs des Courants dans la baie d'Alger pour la direction Nord 30ans)

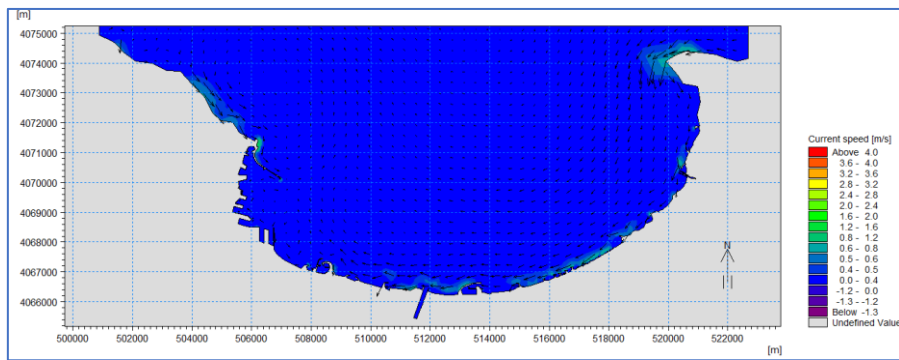


Figure 72: champs des Courants dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Est (30ans)

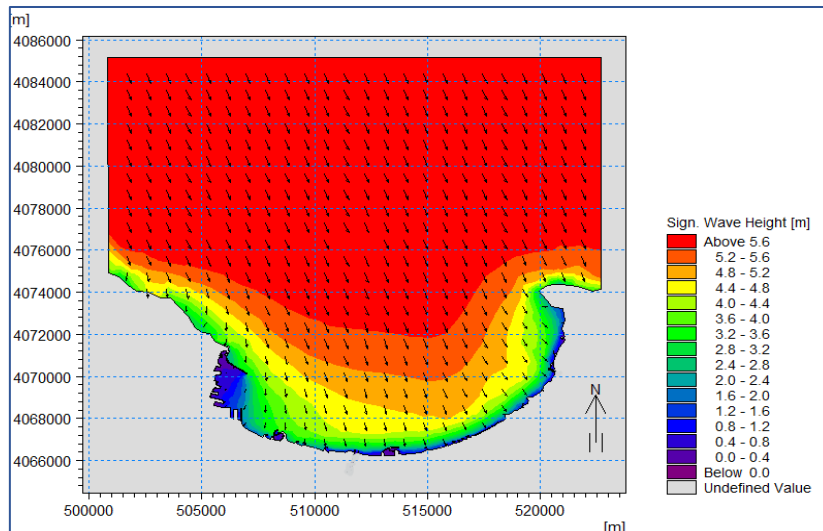


Figure 73: champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Ouest (100ans)

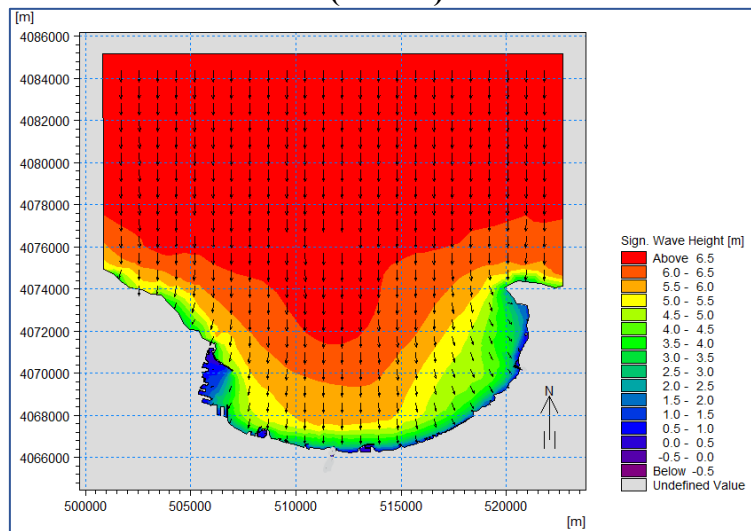


Figure 74: champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord (100ans)

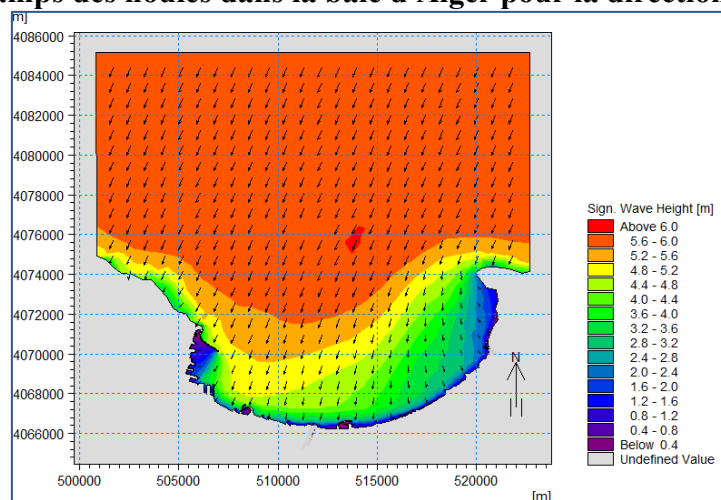


Figure 75 : champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Est (100ans)

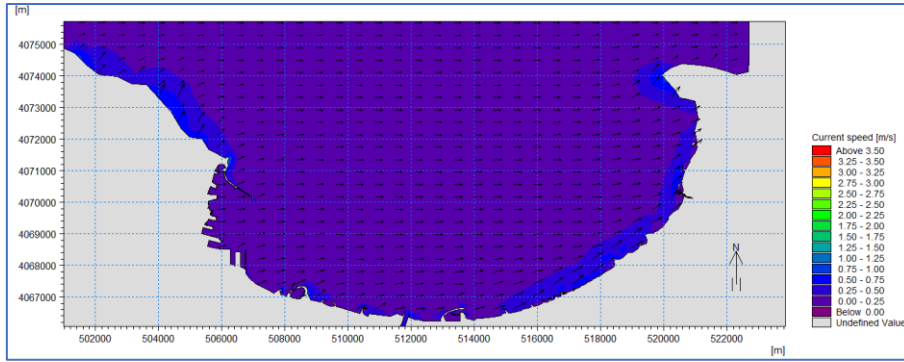


Figure 76: champs des Courants dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Ouest (100ans)

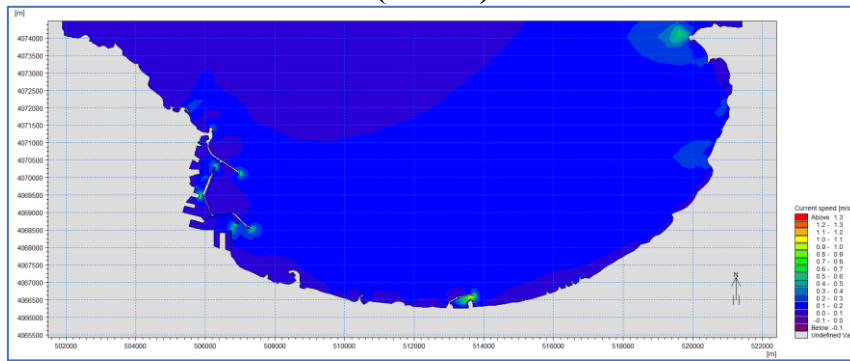


Figure 77 : champs des Courants dans la baie d'Alger pour la direction Nord (100ans)

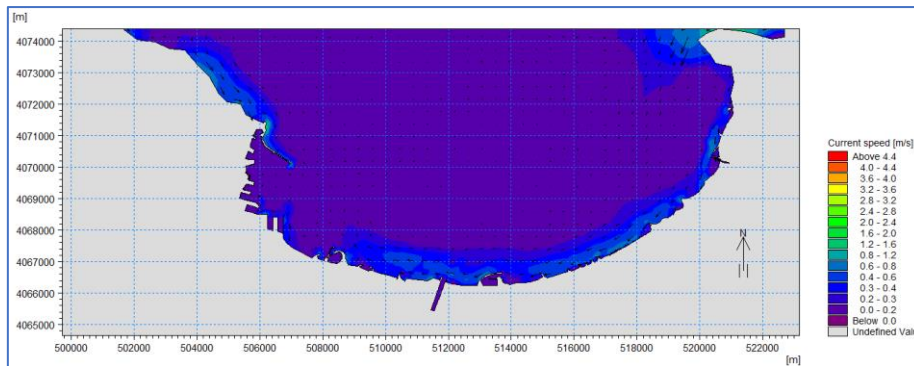


Figure 78 : champs des Courants dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Est (100ans)

4.4.4.3. Interprétation des Résultats de la baie de Zemmouri :

- Propagation des houles de direction Nord Nord-Ouest (337.5°)

Les houles provenant du Nord-Nord-Est conservent leur puissance initiale en haute mer, atteignant des hauteurs significatives remarquables allant jusqu'à environ 6.5 mètres. Cependant, leur énergie se dissipe graduellement lorsqu'elles approchent des côtes, influencées par les conditions du fond marin telles que la réfraction et le shoaling. Ainsi, elles perdent en vigueur, présentant des hauteurs significatives d'environ 5,6 mètres le long de la côte et descendent à environ 2,5 mètres dans les zones protégées.

Ces houles arrivent de manière perpendiculaire au côté est de la baie allant de Zemmouri el Bahri jusqu'à Cap Djinnat avec des hauteurs d'environ 2 mètres et peuvent donc causer l'érosion côtière de cette partie

Courantologie : Les houles du secteur nord-nord-ouest génèrent près de la côte un courant de dérive orienté vers l'est, avec des vitesses faibles ne dépassant pas 0,4 m/s. En revanche, dans la partie Ouest, au niveau des plages de Zemmouri Est, on observe des courants importants avec des vitesses dépassant 0.5 m/s. Ce courant joue un rôle crucial dans la redistribution des sédiments accumulés près du port de Zemmouri, contribuant ainsi à l'alimentation de la plage.

Direction Nord (360°) :

Dans la zone étudiée (baie de Zemmouri), les vagues du Nord conservent leur énergie initiale considérable, atteignant environ 7,5 mètres de hauteur (période de retour de 100 ans). Cela est dû en partie au fait que ces vagues subissent peu de réfraction, avec des angles de déviation presque nuls. Cependant, lorsqu'elles approchent de la côte, elles subissent les effets du fond marin, ce qui les affaiblit progressivement. Ainsi, leur hauteur significative diminue jusqu'à environ 5 mètres le long de la côte et descend jusqu'à environ 2 mètres dans les zones protégées. Le coefficient de réfraction K_r diminue à mesure que les vagues s'approchent de la côte signifiant une perte d'énergie par réfraction

L'état hydrodynamique observé, avec des hauteurs de vagues plus élevées dans certaines zones côtières, peut s'expliquer par divers effets combinés tels que la concentration des vagues due à la forme du fond marin local (shoaling et réfraction) et l'exposition directe aux vagues incidentes (effet frontal). Ces phénomènes peuvent être corrélés avec la bathymétrie locale, qui influence la manière dont les vagues se propagent et se déforment.

Courantologie : Les houles provenant du secteur Nord génèrent des courants moins puissants que ceux des autres directions, se dirigeant vers l'Ouest à une vitesse moyenne de 0,2 m/s. On observe également une circulation tourbillonnaire derrière les ouvrages de protection et les jetées, notamment dans la zone du port de Zemmouri, principalement en raison de la diffraction des houles au niveau de leurs extrémités.

Propagation des houles de direction Nord Nord-Est (22.5°)

Les houles venant du Nord-Nord-Est maintiennent leur intensité initiale en haute mer, atteignant des hauteurs significatives allant de 5,6 mètres pour une période de retour de 10 ans à 7,5 mètres pour une période de retour de 100 ans. Cependant, lorsqu'elles approchent de la côte, elles subissent graduellement l'influence du fond marin, incluant la réfraction et le shoaling. Par conséquent, leur énergie décroît progressivement, ce qui se traduit par des

hauteurs d'environ 5 mètres au niveau de la côte et des hauteurs minimales d'environ 2,5 mètres dans les zones abritées.

Un phénomène de réfraction des houles est observé, caractérisé par un coefficient de réfraction K_r qui décroît à mesure que les houles approchent la côte, indiquant une perte d'énergie due à la réfraction.

Courantologie : Les houles provenant du secteur nord-nord-est génèrent un courant de dérive littorale parallèle à la côte, orienté d'est en ouest. Dans la zone de Zemmouri, des vitesses significatives jusqu'à 0,5m ont été enregistrées. Ces vitesses diminuent en se dirigeant vers l'ouest en raison de l'effet protecteur de l'île Bounattah et du léger changement dans l'orientation de la côte. Ces courants rapides provoquent un transport sédimentaire vers l'ouest, accentuant l'érosion des côtes sableuses exposées.

Ces observations suggèrent que la dynamique des courants dans la zone reste relativement stable, indépendamment des variations de hauteur et de période des vagues en haute mer.

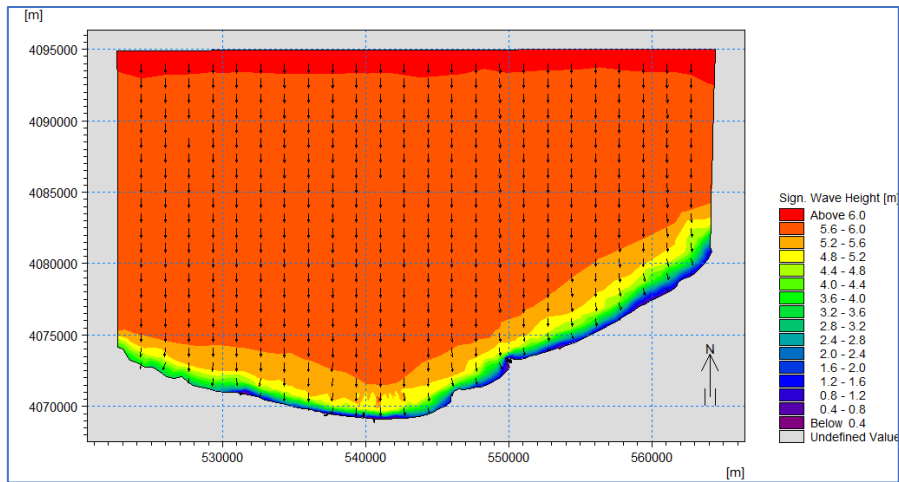


Figure 79: champs des houles dans la baie de Zemmour pour la direction Nord Nord-Ouest (10ans)

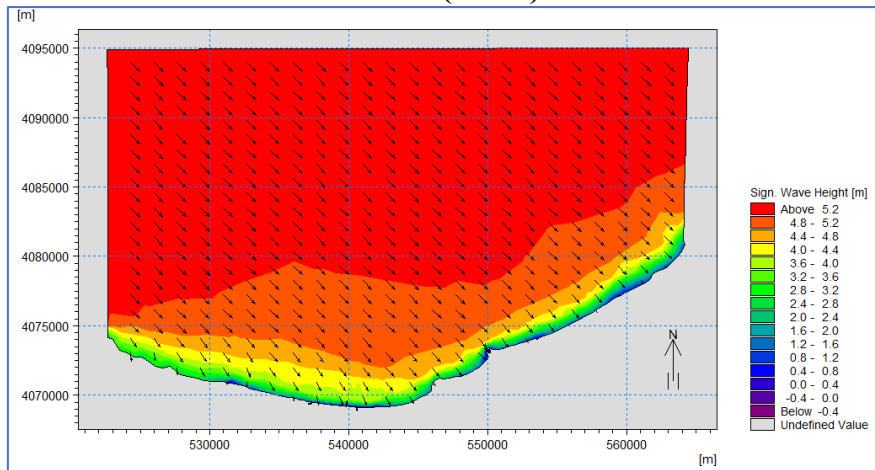


Figure 80: champs des houles dans la baie de Zemmour pour la direction Nord (10ans)

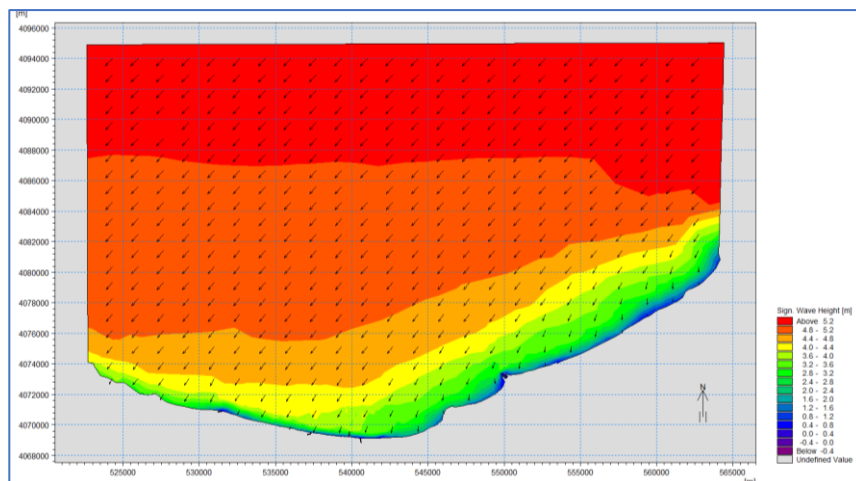


Figure 81: champs des houles dans la baie de Zemmour pour la direction Nord Nord-Est(10ans)

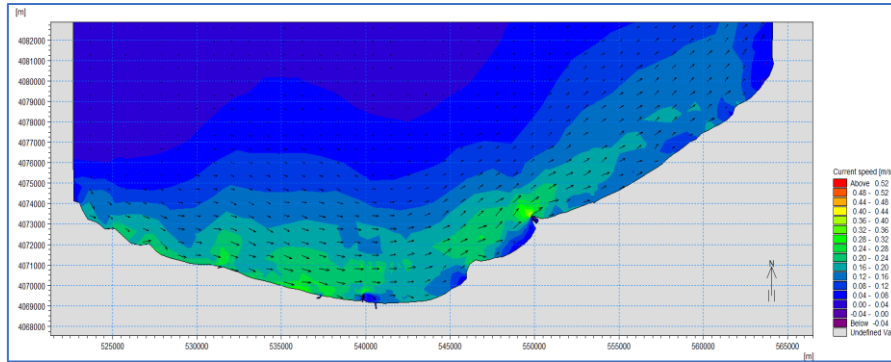


Figure 82: champs des courants de la baie de Zemmouri NNW (10ans)

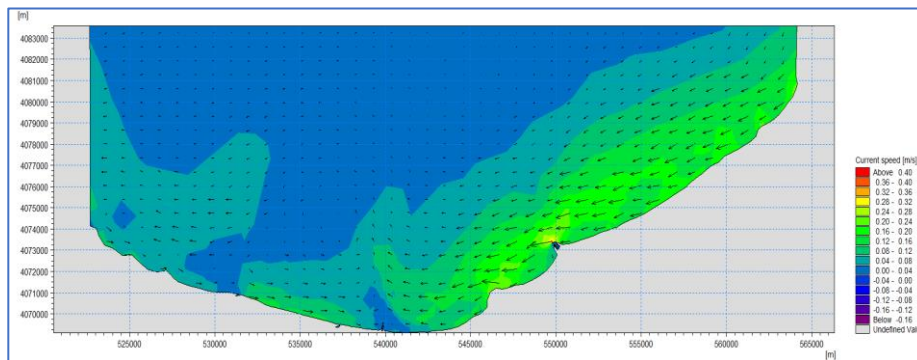


Figure 83: champs des courants de la baie de Zemmouri N(10ans)

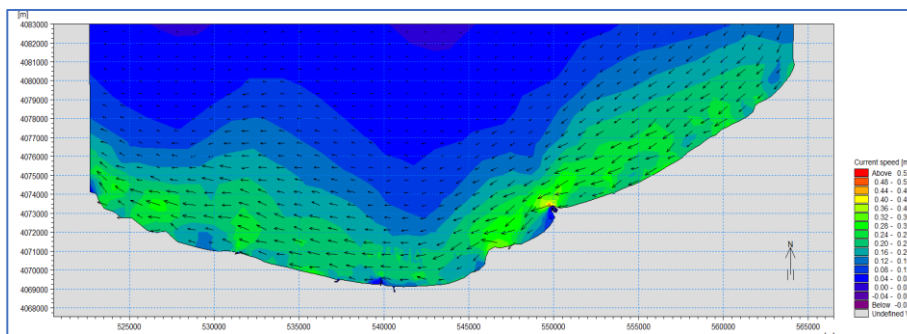


Figure 84: champs des courants de la baie de Zemmouri NNE (10ans)

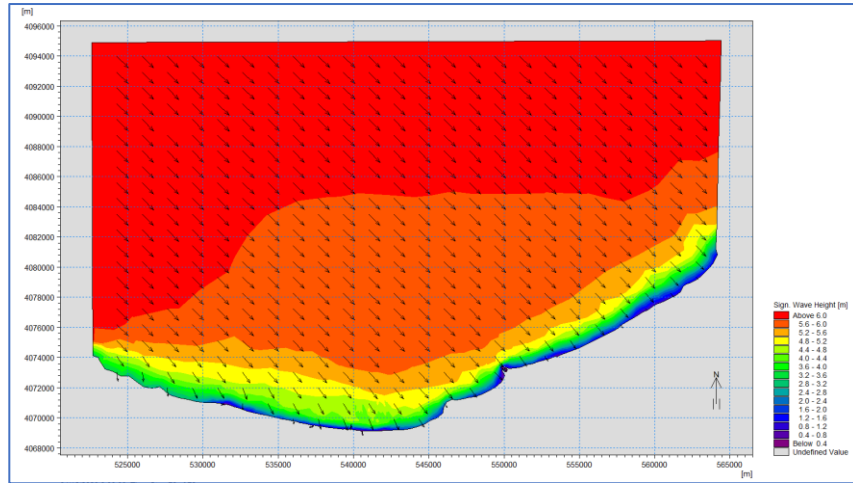


Figure 85: champs des houles dans la baie de Zemmour pour la direction Nord Nord-Ouest (30ans)

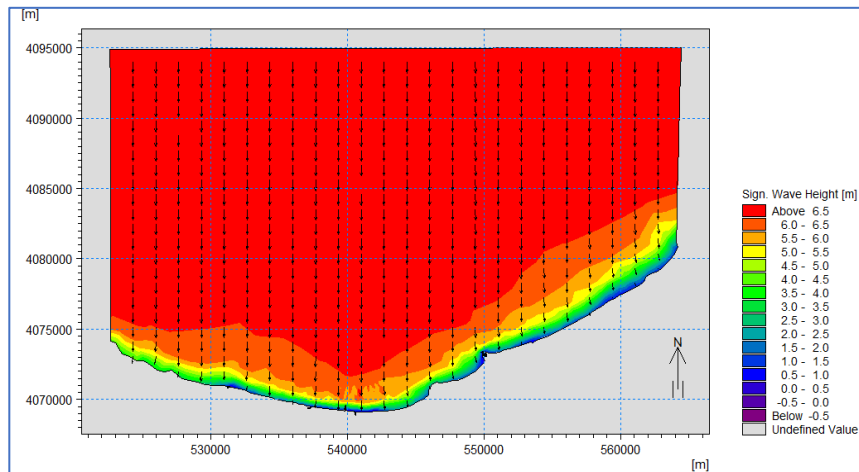


Figure 86: champs des houles dans la baie de Zemmour pour la direction Nord (30ans)

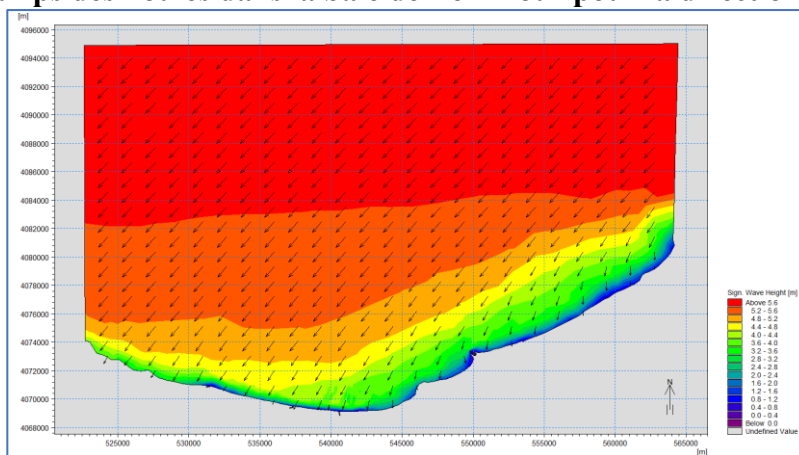


Figure 87: champs des houles dans la baie de Zemmour pour la direction Nord Nord-Est(30ans)

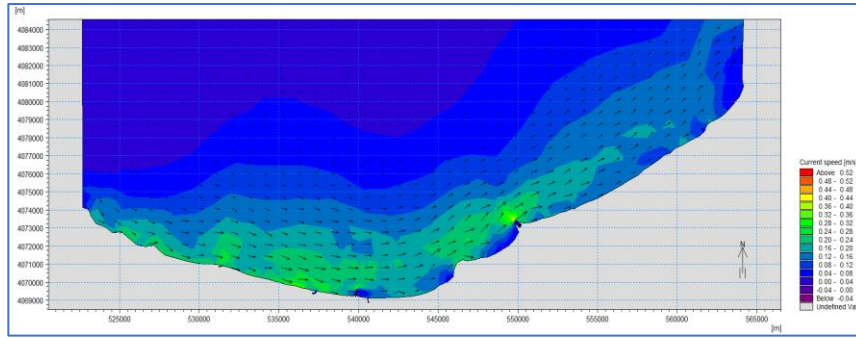


Figure 88: champs des courants de la baie de Zemmouri NNW (30ans)

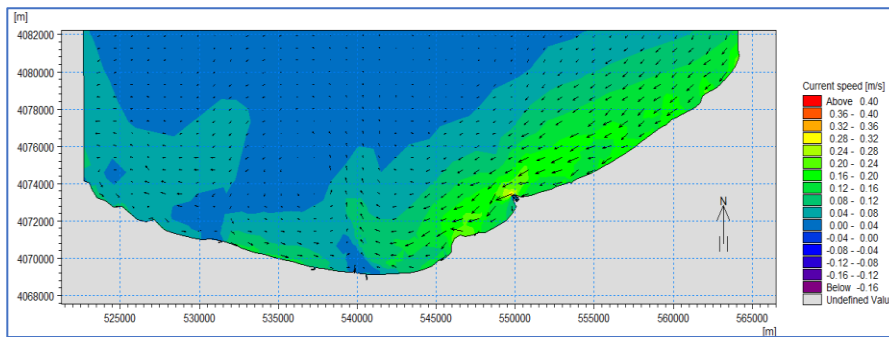


Figure 89: champs des courants de la baie de Zemmouri N (30ans)

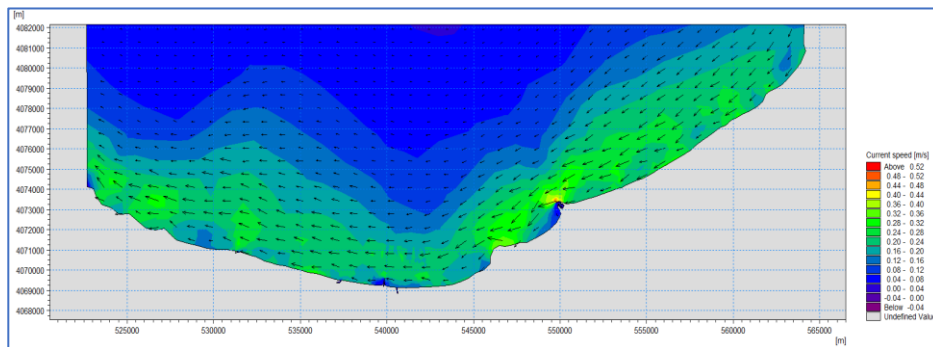


Figure 90 : champs des courants de la baie de Zemmouri NNE (30ans)

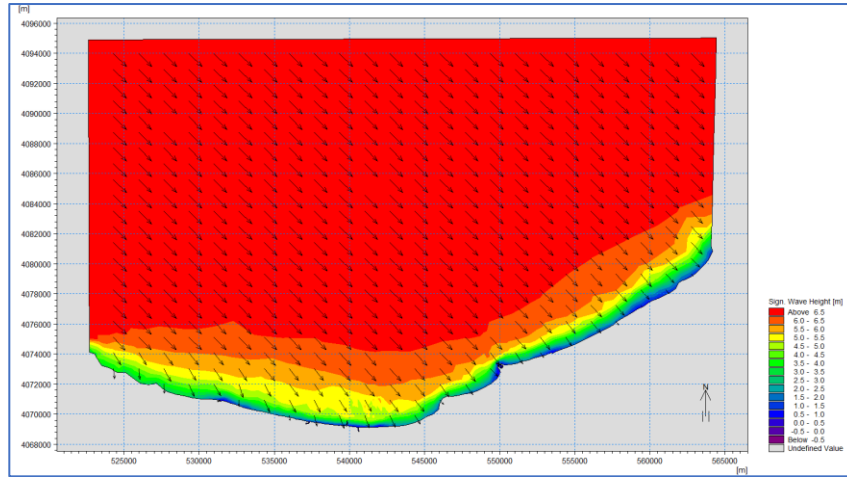


Figure 91: champs des houles dans la baie de Zemmour pour la direction Nord Nord-Est (100ans)

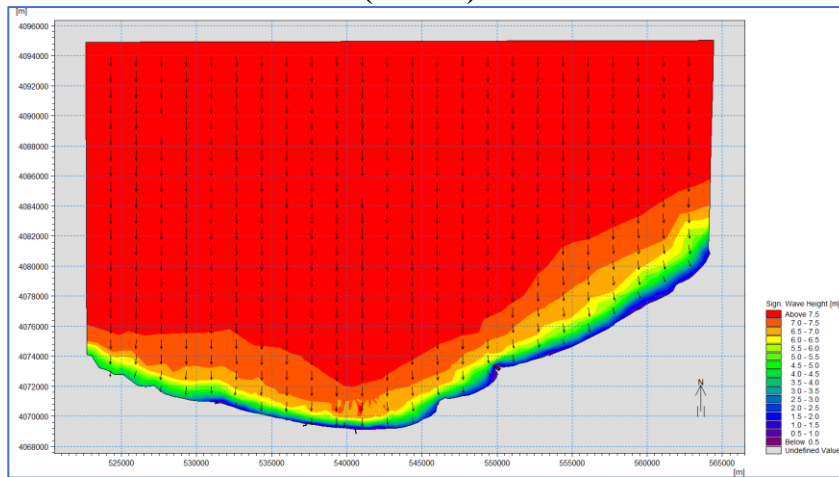


Figure 92: champs des houles dans la baie de Zemmour pour la direction Nord (100ans)

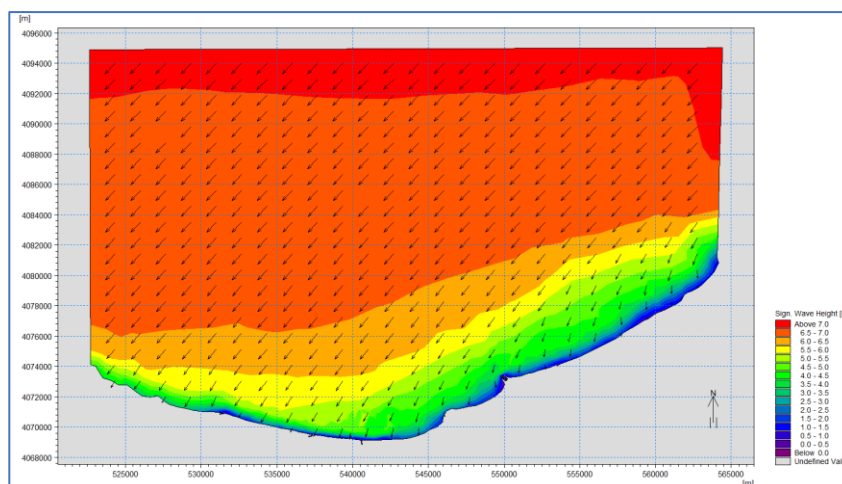


Figure 93: champs des houles dans la baie de Zemmour pour la direction Nord Nord-Est (100ans)

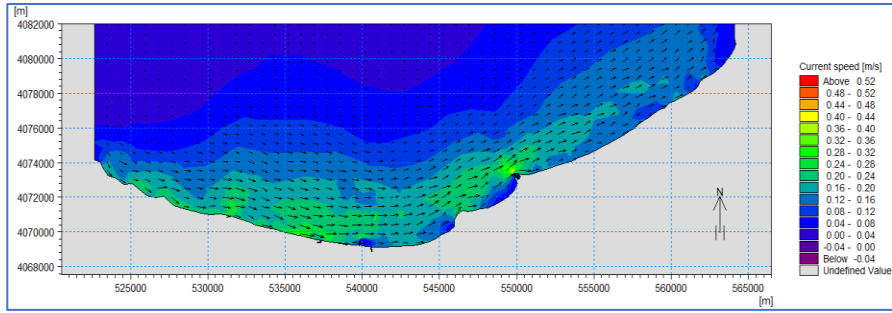


Figure 94 : champs des courants de la baie de Zemmouri NNW (100ans)

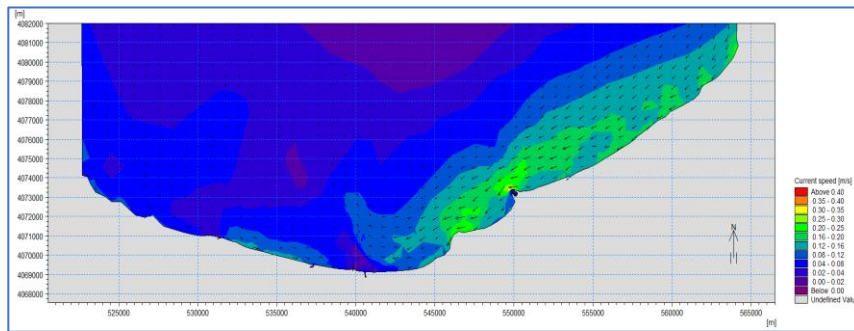


Figure 95: champs des courants de la baie de Zemmouri N (100ans)

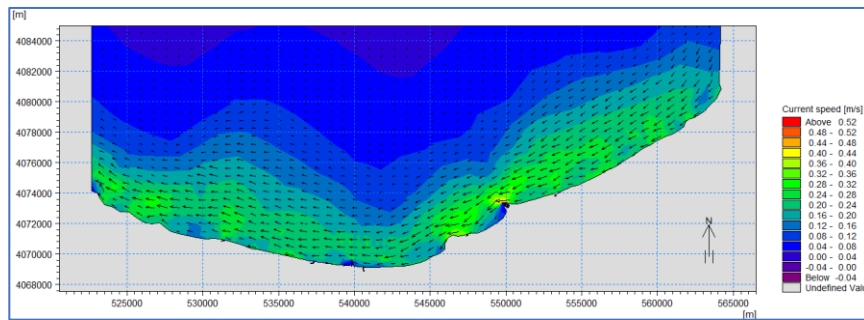


Figure 96 : champs des courants de la baie de Zemmouri NNE (100ans)

4.4.4.4. Interprétation des Résultats de la baie de Bousmail :

- Propagation des houles de direction Nord Nord-Ouest (337.5°)

Les houles provenant du nord-nord-ouest perdent très peu d'énergie, ce qui rend les vagues particulièrement menaçantes à l'est, notamment dans la zone de Zeralda, où des hauteurs de 1,2 m à 2,5 m sont observées. Ces houles, arrivant perpendiculairement à la côte et conservant la quasi-totalité de leur énergie depuis le large, ont un coefficient de réfraction moyen de 0,7 à 5 m de profondeur. Cette caractéristique peut également générer des courants littoraux et entraîner l'érosion côtière.

Courantologie : Les houles provenant du nord-nord-ouest génèrent un courant de dérive littorale orienté vers l'est. Dans la partie centrale, ce courant affiche des vitesses moyennes ne dépassant pas 0,4 m/s. On observe un changement de direction et des vitesses dépassant les 0.8 m/s, à la plage de Moretti, en raison de la dissipation d'énergie causée par la présence des ouvrages de protection.

Direction Nord (360°) :

Les houles venant du Nord arrivent généralement de manière perpendiculaire à la côte, conservant presque toute leur énergie depuis le large avec une hauteur significative de 3,5 m. Lorsqu'elles atteignent la côte, leur hauteur significative varie entre 2 m et 3 m, rendant ainsi la partie centre et Ouest très vulnérable. Près de l'île de Sidi Fredj, les hauteurs enregistrées sont plus faibles, oscillant entre 1 m et 2 m. Le coefficient de réfraction moyen de ces houles, qui varie entre 0,82 et 1 à une profondeur de 5 m, peut générer des courants littoraux et entraîner l'érosion côtière.

Courantologie : Les houles du secteur Nord génèrent des courants moins puissants que ceux des autres directions, se dirigeant vers l'Ouest avec des vitesses comprises entre 0,3 m/s et 0,8 m/s et dépassant les 8m/s dans les périodes de retours longues (100 ans). Ces courants favorisent le déplacement de quantités importantes de sédiments, ce qui peut provoquer l'érosion des zones concernées.

- Propagation des houles de direction Nord Nord-Est (22.5°)

Les houles venant du nord-nord-est conservent leurs caractéristiques initiales en mer, mais leur hauteur diminue progressivement en approchant de la côte, où elles commencent à ressentir l'effet du fond. Les lignes orthogonales de ces houles sont légèrement réfractées. Au voisinage des côtes, notamment selon la morphologie du fond, les hauteurs enregistrées varient entre 0 m et 0,5 m. Le coefficient de réfraction dans la baie est relativement faible, de l'ordre de 0,23, indiquant une forte déformation des houles incidentes en raison de la bathymétrie irrégulière. Ces vagues arrivent perpendiculairement à la côte ouest, dans la zone du mont Chenoua, conservant la quasi-totalité de leur énergie au large.

Courantologie : Un courant dirigé vers l'Ouest, avec des vitesses plus élevées que les autres directions oscillant de 0,20 m/s à 0,8m/s et arrivant jusqu'à 1.2m/s pour la période de retour de 100ans, est engendré par les houles du nord-nord-est. Ce courant se déplace presque parallèlement au rivage

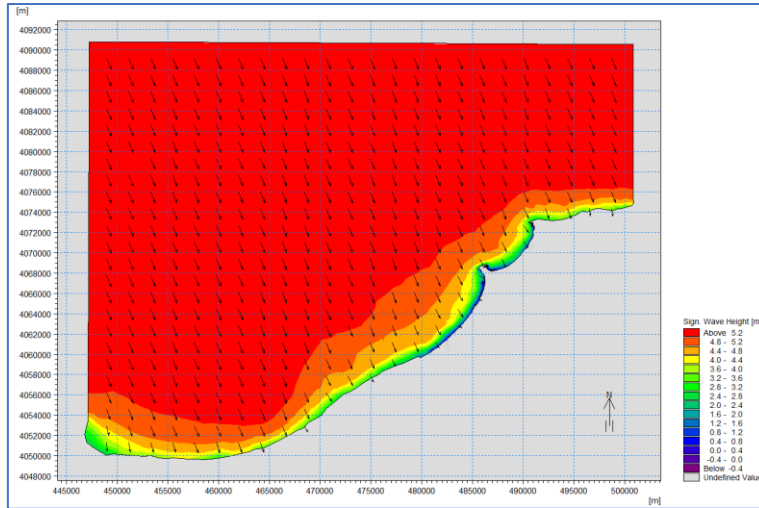


Figure 97: champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord Nord-Ouest (10ans)

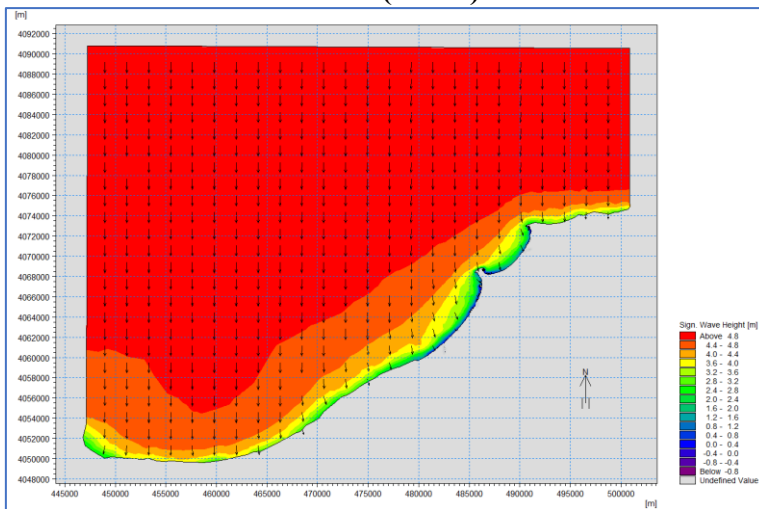


Figure 98: champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord (10ans)

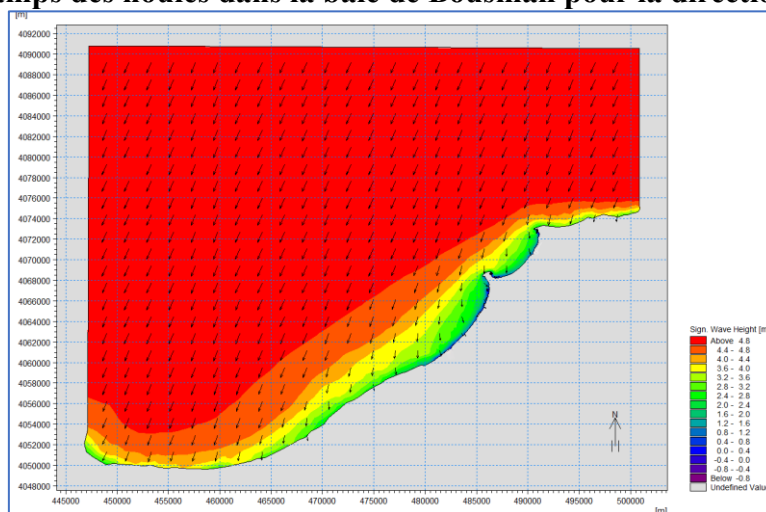


Figure 99: champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord Nord-Est (10ans)

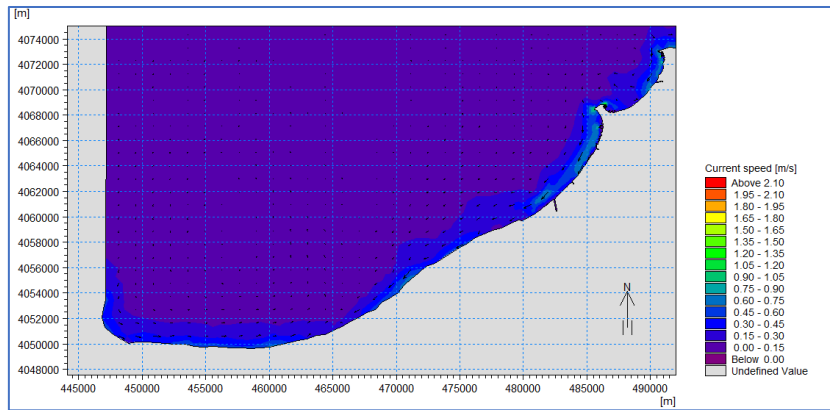


Figure 100 : champs des courants de la baie de Bousmail NNW (10ans)

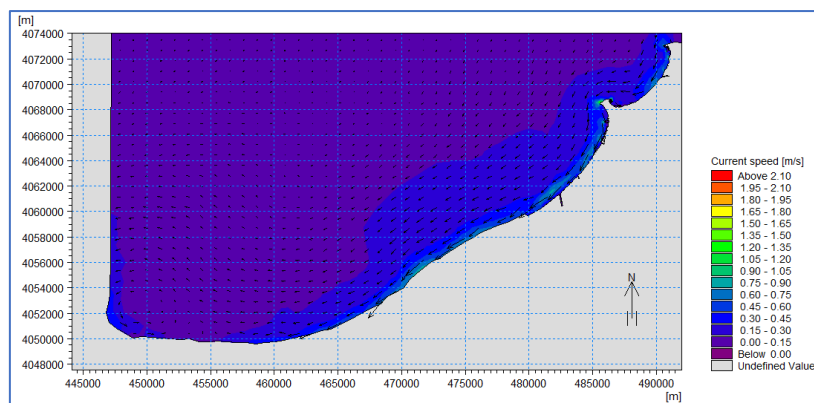


Figure 101: champs des courants de la baie de Bousmail N (10ans)

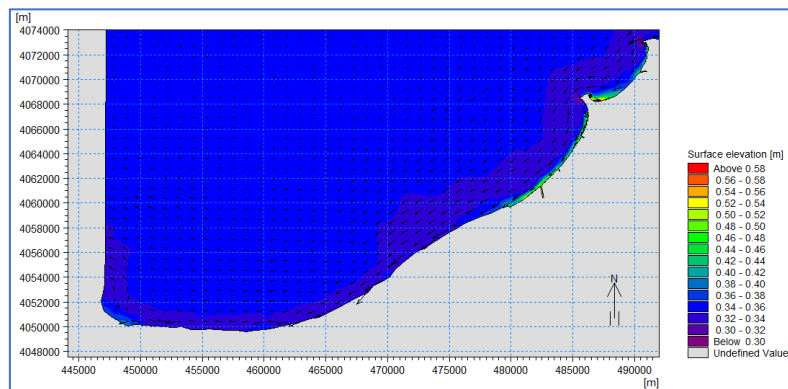


Figure 102 champs des courants de la baie de Bousmail NNE (10ans)

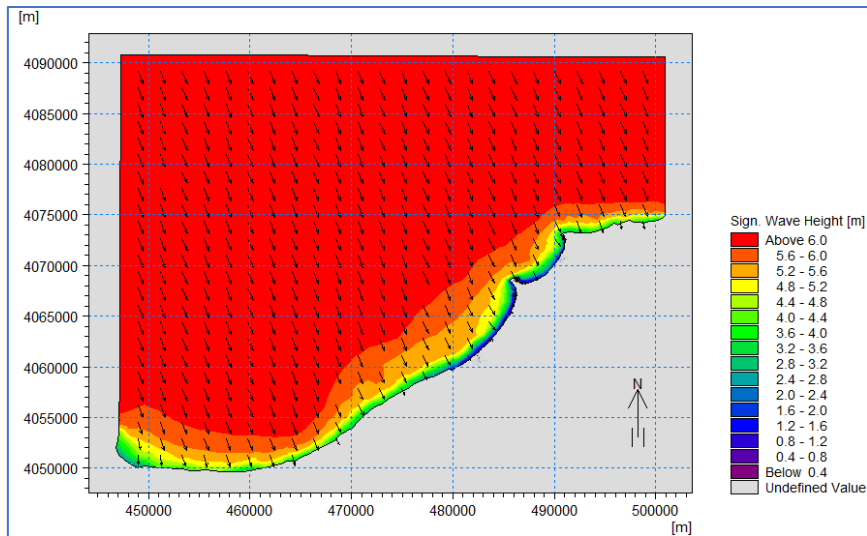


Figure 103 : champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord Nord-Ouest (30ans)

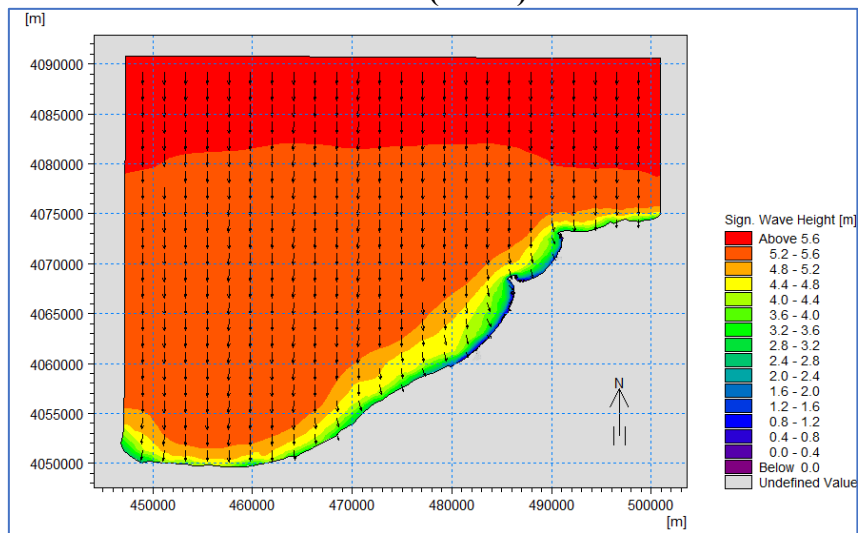


Figure 104: champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord (30ans)

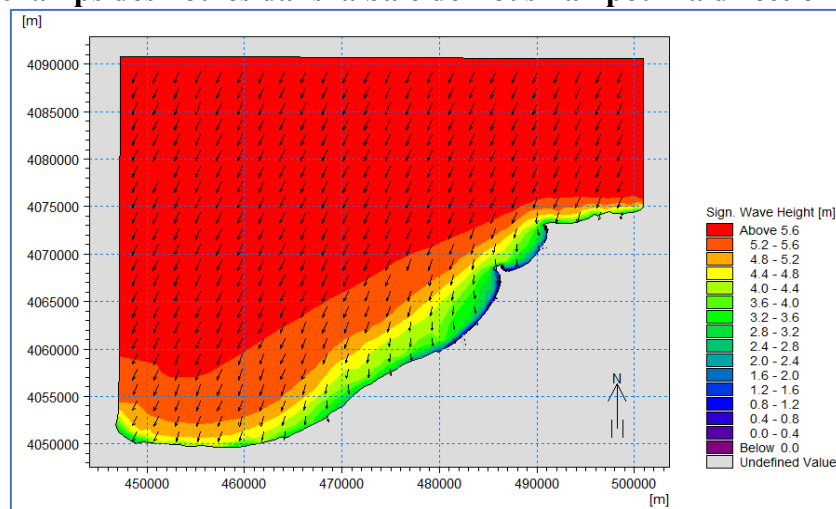


Figure 105 : champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord Nord-Est (30ans)

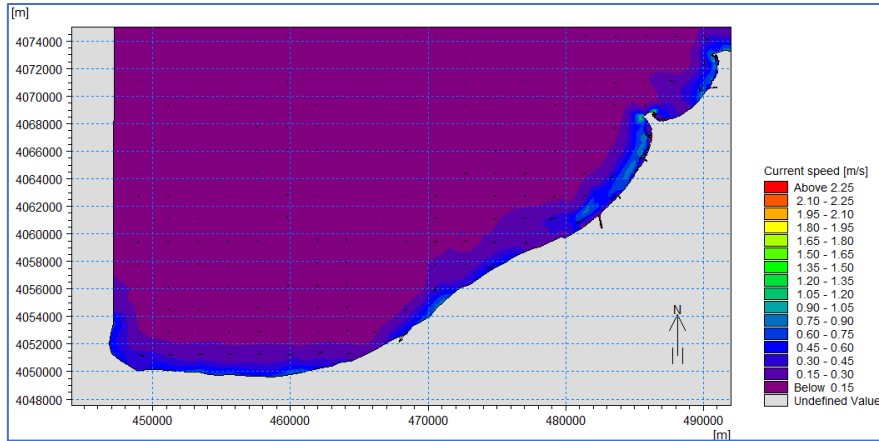


Figure 106: champs des courants de la baie de Bousmail NNW (30ans)

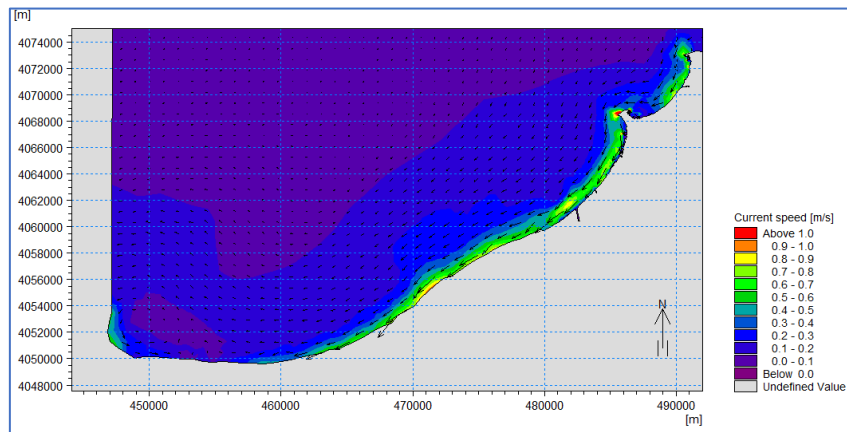


Figure 107 : champs des courants de la baie de Bousmail N (30ans)

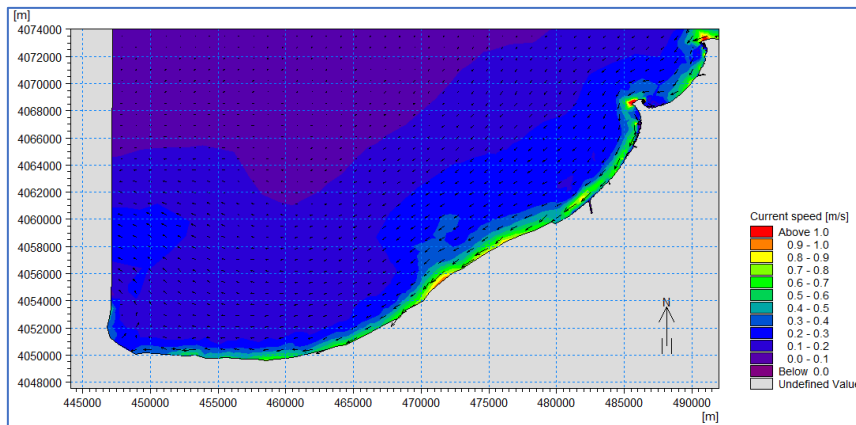


Figure 108: champs des courants de la baie de Bousmail NNE (30ans)

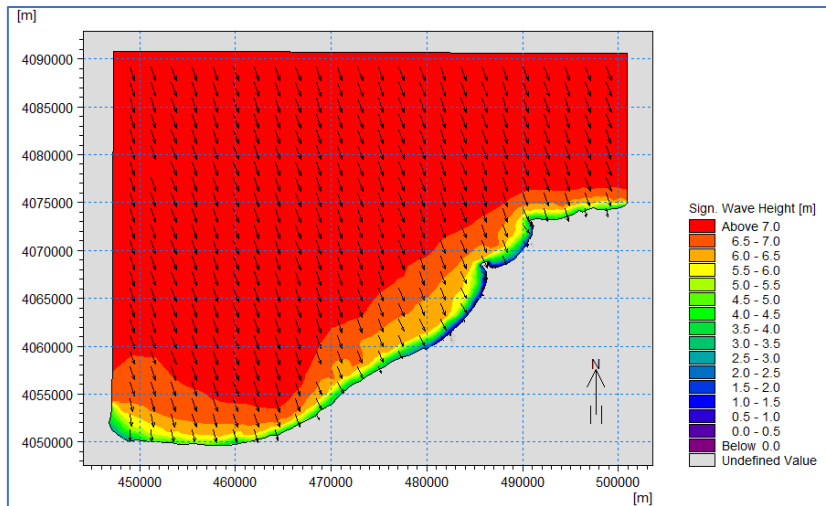


Figure 109: champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord Nord-Ouest (100ans)

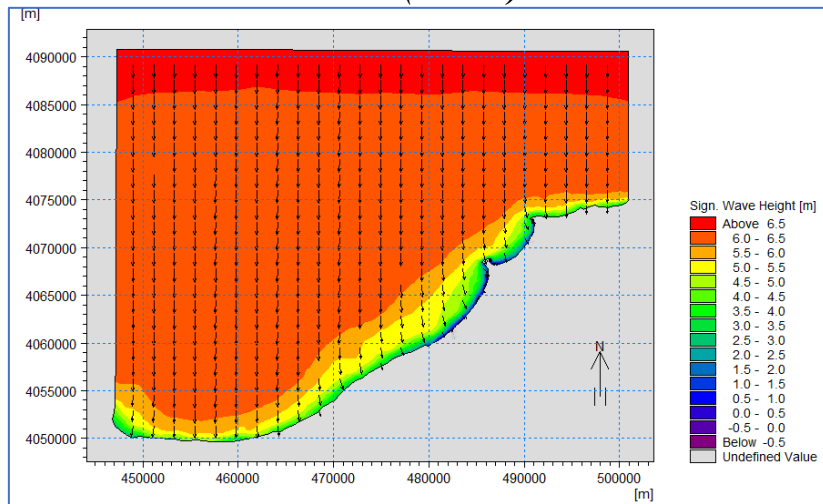


Figure 110: champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord (100ans)

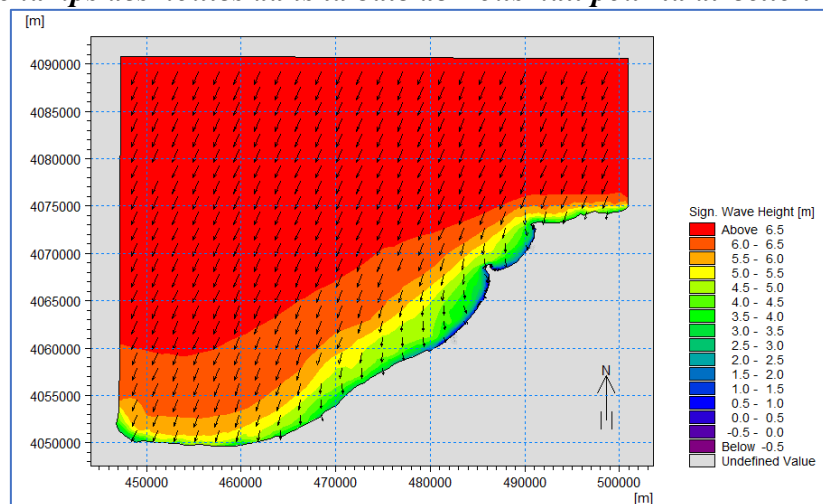


Figure 111 : champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord Nord-Est (100ans)

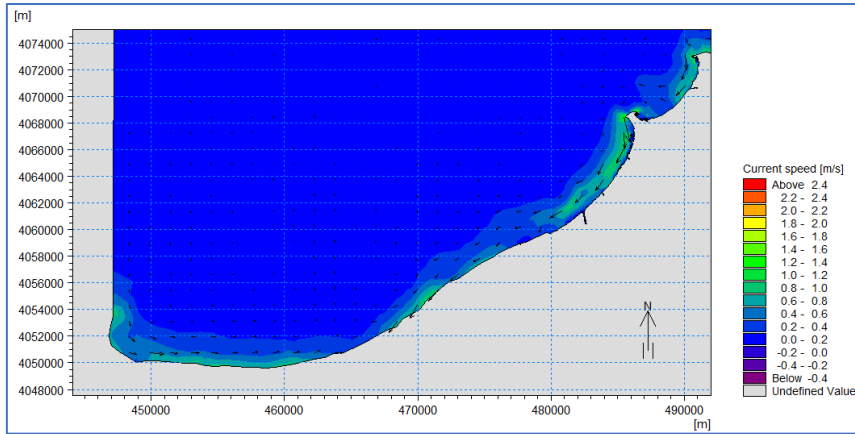


Figure 112: champs des courants de la baie de Bousmail NNW (100ans)

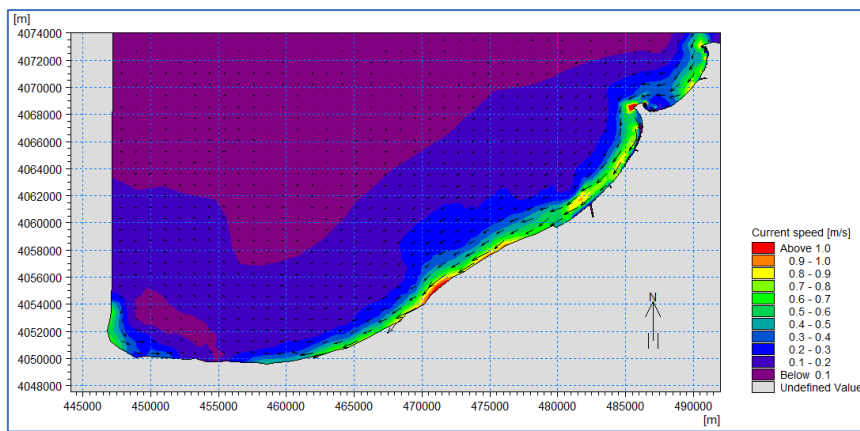


Figure 113: champs des courants de la baie de Bousmail N (100ans)

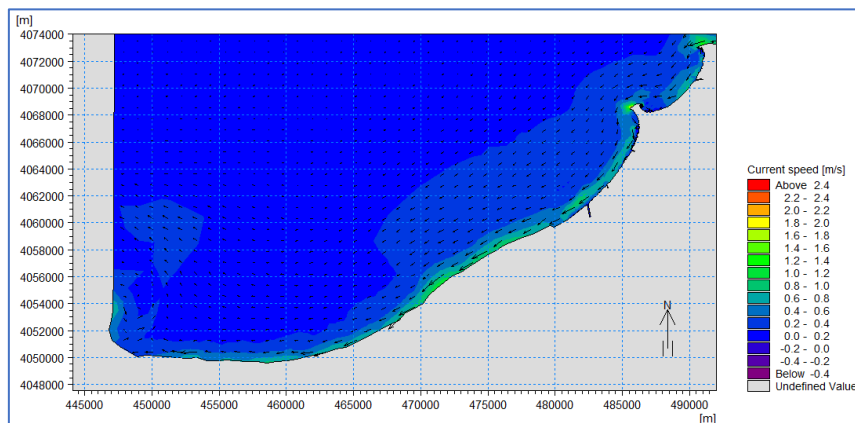


Figure 114 : champs des courants de la baie de Bousmail NNE (100ans)

4.5. Conclusion :

En conclusion, notre modélisation numérique a révélé que les directions de houle les plus défavorables sont le nord-nord-ouest, le nord et le nord-nord-est. Nos observations mettent en évidence l'importance de la morpho-bathymétrie de la zone d'étude dans la réduction des hauteurs de houle qui affectent les structures côtières.

Concernant les courants, nos simulations montrent que les événements extrêmes n'ont pas d'impact significatif sur les vitesses des courants locaux, qui demeurent stables malgré les différents scénarios climatiques simulés. En revanche, la direction des vagues incidentes est cruciale pour la formation des courants, entraînant des flux multidirectionnels et la création de canaux.

Il est également à noter que les variations de la morpho-bathymétrie peuvent accentuer ou atténuer ces effets. Ainsi, les structures côtières et les ouvrages de protection, tels que les jetées et les brise-lames, jouent un rôle clé dans la gestion de l'énergie des vagues et la protection contre l'érosion.

5. Chapitre V. Performance hydraulique

5.2. Introduction :

La performance hydraulique des ouvrages portuaires est intrinsèquement liée à leur capacité à résister aux événements météorologiques extrêmes. Ces phénomènes peuvent exercer des forces considérables sur les structures, influençant leur stabilité et leur intégrité.

Ce chapitre explore les interactions hydrauliques entre la houle et les structures marines, en se concentrant sur le run-up (montée des vagues), le run-down (descente des vagues) et le franchissement des vagues sur les structures portuaires. Ces interactions se manifestent par des réponses hydrauliques, des charges et des réponses structurelles, qui peuvent affecter la stabilité des ouvrages.

Pour mieux comprendre ces interactions, de nombreuses recherches ont été menées, aboutissant au développement de relations empiriques basées sur des considérations physiques, avec des constantes empiriques ajustées à chaque structure spécifique. Ces études sont essentielles pour optimiser la conception et la maintenance des ouvrages portuaires, garantissant ainsi leur performance hydraulique même dans des conditions adverses.

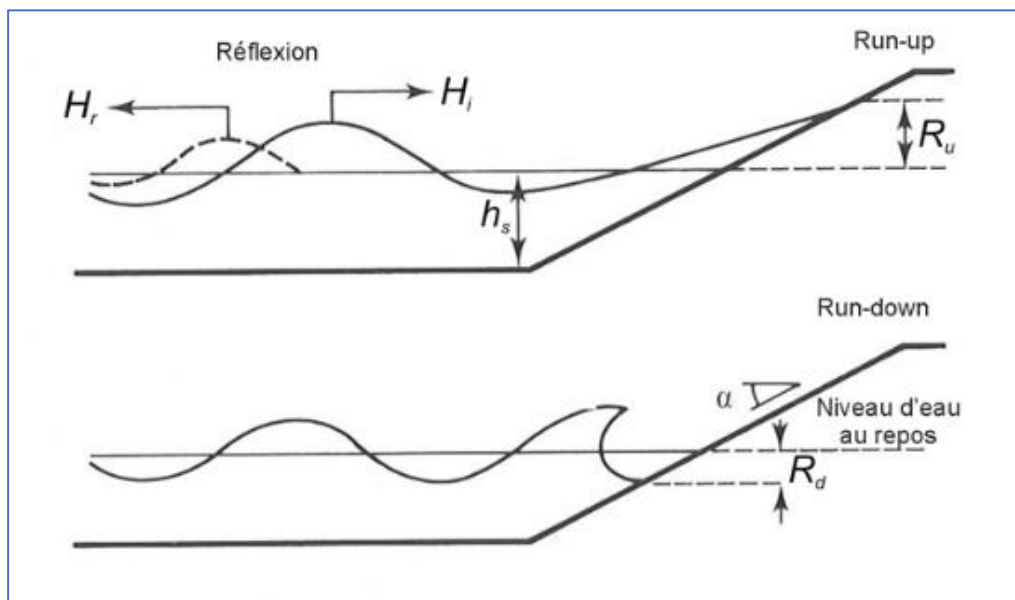


Figure 115 : Interactions hydrauliques entre la houle et les ouvrages (CETMEF, 2009)

L'ensemble des calculs sera appliqué à la partie courante des digues principales des ports utilisant les résultats des événements extrêmes définis dans le chapitre 3. Pour la direction la plus pénalisante au pied de l'ouvrage, les calculs tiendront compte des périodes de retour simulées, comme déterminé dans le chapitre 4.

Tableau 26: Scénarios retenus pour le calcul de la performance hydraulique des digues principales des ports étudiés

Baie	Zone d'étude	Direction pénalisante	Période de retour (année)	H_s (m)	H_{mo} (m)	T_p (s)	T_m (s)
Alger	Marina d'Alger	NNE	10	2.21	1.12	11.4	9.12
			30	2.24	1.13	11.48	9.18
			100	2.30	1.18	11.99	9.59
	Port d'Alger	NNE	10	3.88	1.72	11.43	9.14
			30	4.16	1.82	11.51	9.20
			100	4.28	1.89	12.01	9.60
	Port des Sablettes	NNE	10	2.62	1,25	11.06	8.85
			30	3.86	1,73	11.7	9.36
			100	4.14	1,70	10.11	8.09
	Port de Tamentfoust	NNW	10	3.43	1,54	11.15	8.92
			30	3.79	1,60	10.28	8.23
			100	4.27	1,75	10.26	8.21
	Petit port La Frégate	N	10	1.29	0,67	9.34	7.47
			30	2.17	1,04	10.11	8.09
			100	2.87	1,34	10.98	8.78
Zemmouri	Port de Cap Djinet	NNW	10	3.98	1,59	9.30	7.44
			30	4.31	1,69	9.35	7.48
			100	4.65	1,94	11.17	8.94
	Port de Zeemouri	NNW	10	1.03	0,57	9.43	7.54
			30	1.26	0,67	9.57	7.65
			100	1.35	0,76	11.20	8.96
	Centrale électrique de Cap Djinet	NNW	10	2.42	1,09	9.32	7.46
			30	2.64	1,15	9.16	7.32
			100	3.02	1,40	11.18	8.94
	Port de Jean-Bart	NNE	10	3.42	1,39	9.04	7.23
			30	3.61	1,47	9.22	7.38
			100	3.92	1,57	9.36	7.49
Bousmail	Port d'El Djamila	NNW	10	1.42	0,75	10.12	8.1
			30	1.64	0,97	13.56	10.85
			100	2.07	1,04	10.91	8.73
	Port de sidi fredj	NNE	10	1.51	0,77	9.63	7.7
			30	1.78	0,9	10.2	8.16
			100	1.96	0,97	10.16	8.13
	Port de fouka marine	N	10	2.66	1,28	11.3	9.04
			30	2.93	1,44	12.36	9.89
			100	3.03	1,54	13.57	10.86
	Port de khemisti	N	10	2.08	1,06	11.31	9.05
			30	2.21	1,16	12.37	9.90

			100	2.44	1,31	13.58	10.86
	Port de peche bouharoun	N	10	1.81	0,91	10.12	8.1
			30	2.15	1,14	12.36	9.89
			100	2.16	1,19	13.57	10.86
	Port de pêche de Tipaza	NNE	10	2.23	1,06	10.17	8.14
			30	2.45	1,15	10.30	8.24
			100	2.76	1.29	10.82	8.66

L'équation représente la formule utilisée dans le calcul de la hauteur du spectre de la houle pour les ondes longues au niveau de l'ouvrage H_{m0} , calculée à partir de la formule de Kamphuis (2001).

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

Equation V.I

Tableau 27 Signification des paramètres utilisés dans les calculs des scénarios retenus.

H_{m0}	Hauteur du spectre pour les ondes longues au niveau de l'ouvrage, calculée à partir de la formule de Kamphuis (2001).
$H_{s,b}$	Hauteur significative de la houle au point de déferlement
g	L'accélération de la gravité.
H_s	Hauteur significative de la houle au pied de l'ouvrage.
T_p	Période de la houle
T_{m0}	Période moyenne de la houle calculée selon le spectre de Jonswap. $\frac{T_p}{T_m} = 1.1 \text{ to } 1.25$

5.3. Run-up de la houle :

L'action des vagues sur un talus provoque une oscillation verticale de la surface de l'eau, généralement plus importante que la hauteur de la houle incidente. Les niveaux extrêmes atteints par chaque vague sont appelés respectivement "run-up" (Ru) et "run-down" (Rd). Ces niveaux sont mesurés verticalement par rapport au niveau de l'eau au repos et exprimés en mètres. Pour la conception d'ouvrages côtiers, le niveau de run-up peut déterminer la hauteur de la crête d'un ouvrage, la limite supérieure de la protection, ou d'autres éléments structurels. Il sert également d'indicateur pour le franchissement ou la transmission de la houle. Le niveau de run-down, quant à lui, aide à définir l'étendue inférieure de la carapace.

Lorsque la vague atteint l'ouvrage, elle s'élève verticalement, augmentant ainsi la surface libre par rapport à la houle incidente. Cette houle déferlante entraîne une remontée de l'eau. Le run-up est le niveau maximal que l'eau atteint sur le talus de l'ouvrage. Contrairement à la houle régulière, où il existe une seule valeur maximale de run-up, la houle irrégulière produit une distribution du run-up. Il est donc essentiel que les formules de run-up déterminent un paramètre représentatif de cette distribution. Actuellement, le paramètre de run-up le plus couramment utilisé pour la houle irrégulière est $Ru_{2\%}$ (m) (CETMEF, 2009).

Les diverses formules empiriques pour estimer le run-up de la houle sur les ouvrages côtiers sont détaillées dans le Tableau 28.

Tableau 28: Résumé des formules utilisées dans l'estimation du Run-up de la houle sur l'ouvrage

Formules :	Variables:
<p>Formule de base de calcul de Ru</p> $\frac{Ru_{2\%}}{H_s} = A\xi + B$ <p>Ahrens (1981) $A = 1.6$ et $B = 0$ pour: $\xi_p < 2.5$. $A = -0.2$ et $B = 4.5$ pour: $\xi_p > 2.5$.</p> <p>Allsop et al. (1985) $A = -0.21$ et $B = 3.39$ pour $2.8 \leq \xi_p \leq 6$.</p> <p>Ahrens (1981) et Allsop et al. (1985)</p> <p>Ahrens (1981) $A = 1.6$ et $B = 0$ pour $\xi_p < 2.5$. $A = -0.2$ et $B = 4.5$ pour $\xi_p > 2.5$.</p> <p>Allsop et al. (1985) $A = -0.21$ et $B = 3.39$ pour $2.8 \leq \xi_p \leq 6$.</p> <p>Pour des talus lisses $(\gamma_b = \gamma_f = \gamma_\beta = \gamma_h = 1.)$</p> <p>Pour des talus rugueux</p> $(\gamma_b; \gamma_f; \gamma_\beta; \gamma_h \neq 1)$ <p>Le TAW (2002a) Pour la période énergétique moyenne T_{m-1},</p> $\frac{Ru_{2\%}}{H_{m0}} = A \gamma_f \gamma_b \gamma_\beta \xi_{m-1,0}$ <p>Pour une limite maximale ou supérieure des valeurs de $\xi_{m-1,0}$ les plus élevées</p> $\frac{Ru_{2\%}}{H_{m0}} = \gamma_f \gamma_b (B - C \sqrt{\xi_{m-1,0}})$	<p>Ru2% : Run-up dépassé par 2% des vagues.</p> <p>ξ: Paramètre de déferlement $\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_0}}$</p> <p>s₀: La cambrure nominale de la houle. $s_0 = \frac{H}{b} = \frac{2\pi H}{g T^2}$</p> <p>H (m) : Hauteur de la houle locale.</p> <p>Lo (m) : Longueur d'onde théorique de la houle au large.</p> <p>T (s) : Période de la houle.</p> <p>A et B : Coefficients d'ajustement.</p> <p>ξ_p: Paramètre de déferlement calculé à partir de la période de pic T_p.</p> <p>g: Accélération de la gravité.</p> <p>H_{m0}: La hauteur significative spectrale de la houle.</p> <p>γ_f: Facteur de la rugosité du talus.</p> <p>γ_b: Facteur de l'influence des bermes.</p> <p>γ_β: Facteur de l'obliquité de la houle.</p> <p>γ_h : Facteur de l'eau peu profonde.</p> <p>ξ_{m-1,0} : Paramètre de déferlement calculé à partir de $T_{m-1,0}$.</p> <p>T_{m-1}: Période énergétique de la houle.</p> $\xi_{m-1,0} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H_b}{g T_{m-1,0}^2}}}$ <p>ξ_m: Paramètre de déferlement basé sur le s_{0m}</p>

Pour notre cas d'étude, on va utiliser la méthode de Ahrens (1981) pour le calcul du run-up Ru2% en utilisant le paramètre de déferlement ξ_{m0} , T_{m0} , et la hauteur spectrale de la houle H_{m0} .

Tableau 29: Valeurs des coefficients A, B, C selon (TAW, 2002)

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

Pour notre cas d'étude, on va utiliser la méthode de Ahrens (1981) pour le calcul du run-up Ru2% en utilisant le paramètre de déferlement ξ_{mo} , Tmo, et la hauteur spectrale de la houle Hmo.

Afin d'avoir une vue complète de l'étendue maximale du run-up sur le talus de la digue, on estime le Ru99% ou Ru max, qui représente l'étendue maximale possible du run-up, en utilisant la formule proposée par M. Yuhi (2021) à partir du Ru2% comme suit :

$$Ru_{99\%} = 1.54 \times Ru_{2\%}$$

Equation V.2

5.3.2. Résultats des calculs du Run-up de la houle :

L'étude des valeurs de run-up (Ru2% et Ru99%) pour différentes périodes de retour dans les baies d'Alger, de Zemmouri et de Bousmail révèle des variations significatives entre les différents ports.

Baie d'Alger

Dans cette baie, on observe une gamme de run-up 2% (Ru2%) allant de 1,61 m à 3 m pour les différentes périodes de retour étudiées. Les moyennes de Ru2% varient selon les sites : à la Marina d'Alger, la moyenne est de 2,31 m, tandis qu'au port d'Alger, elle atteint 2,72 m. Les Sablettes affichent une moyenne de 2,5 m, et le port de Tamentfoust montre les valeurs les plus basses avec une moyenne de 1,9 m, suggérant une meilleure protection naturelle ou une configuration géographique plus favorable. Le port de Frégate a une moyenne de 2,73 m. Pour les mêmes conditions, le run-up 99% (Ru99%) varie entre 2,48 m et 4,62 m, illustrant le potentiel d'événements plus extrêmes.

- Baie de Zemmouri

Cette baie présente une gamme de Ru2% allant de 0,94 m à 2,73 m. Le port de Zemmouri montre les valeurs les plus basses avec une moyenne de 1,04 m, ce qui pourrait indiquer une meilleure protection naturelle contre les vagues. En revanche, le port de Jean-Bart présente les valeurs de run-up les plus élevées dans cette zone, avec un Ru99% atteignant 4,22 m pour une période de retour de 100 ans cela peut être la cause d'un franchissement future.

- Baie de Bousmail

Dans cette baie, les valeurs de Ru2% s'échelonnent de 1,23 m à 3,04 m. Le port de pêche de Bouharoun présente les valeurs de run-up les plus élevées, avec un Ru99% atteignant 4,69 m pour une période de retour de 100 ans, tandis que le port de Khemisti montre les valeurs les plus basses dans cette zone.

Plusieurs éléments peuvent expliquer ces différences entre les sites. La rugosité des matériaux, notamment les blocs cubiques rainurés (BCR) utilisés dans la plupart des ouvrages de protection, dissipe l'énergie des vagues et réduit ainsi le run-up. L'implantation des ports, influencée par la topographie sous-marine, joue un rôle crucial dans la propagation des vagues. Une bathymétrie favorable peut atténuer l'énergie des vagues avant qu'elles n'atteignent les ouvrages. L'angle d'incidence des vagues, c'est-à-dire l'orientation des ouvrages par rapport à la direction des vagues, influence également l'amplitude du run-up. Enfin, les conditions locales, comme la bathymétrie générale de la baie, la présence des caps tels que le cap de Djinet et l'exposition aux vents dominants, modulent le comportement des vagues et les valeurs de run-up.

Tableau 30 Résultats des calculs du Run-up de la houle au quel est exposé la section courante des digues principales des ports étudiés

Baie	Zone d'étude	Période de retour (année)	ξ	A	B	Ru2% (m)	Ru99%(m)
Alger	Marina d'Alger	10	0,99	1.6	0	2,70	4,16
		30	0.3	1.6	0	1,61	2,48
		100	0.9	1.6	0	2,62	4,03
	Port d'Alger	10	0.8	1.6	0	3	4,62
		30	0.24	1.6	0	2,20	3,39
		100	0.67	1.6	0	2,96	4,56
	Port des Sablettes	10	0.91	1.6	0	2,70	4,17
		30	0.25	1.6	0	2,13	3,28
		100	0.6	1.6	0	2,66	4,1
	Port de Tamentfoust	10	0.16	1.6	0	1,79	2,77
		30	0.13	1.6	0	1,80	2,78
		100	0.17	1.6	0	2,02	3,11
	Petit port La Frégate	10	1.2	1.6	0	2,59	3,99
		30	1.01	1.6	0	2,66	4,09
		100	1	1.6	0	2,94	4,53
Zemmouri	Port de Cap Djinet	10	0.26	1.6	0	2,00	3,09
		30	0.25	1.6	0	2,09	3,22
		100	0.31	1.6	0	2,44	3,75
	Port de Zeemouri	10	0.23	1.6	0	0,94	1,44
		30	0.22	1.6	0	1,02	1,57
		100	0.25	1.6	0	1,16	1,79
	Centrale électrique de Cap Djinet	10	0.27	1.6	0	1,52	2,34
		30	0.27	1.6	0	1,58	2,45
		100	0.3	1.6	0	1,88	2,9
	Port de Jean-Bart	10	0.7	1.6	0	2,51	3,89
		30	0.72	1.6	0	2,62	4,04
		100	0.73	1.6	0	2,74	4,22
Bousmail	Port d'El Djamila	10	0.30	1.6	0	1,23	1,9
		30	0.4	1.6	0	1,61	2,48

		100	0.39	1.6	0	1,66	2,56
Port de sidi fredj		10	0.89	1.6	0	2,19	3,38
		30	0.88	1.6	0	2,30	3,55
		100	0.85	1.6	0	2,33	3,59
Port de fouka marine		10	0.16	1.6	0	1,54	2,37
		30	0.18	1.6	0	1,72	2,66
		100	0.16	1.6	0	1,8	2,77
Port de khemisti		10	0.14	1.6	0	1,28	1,98
		30	0.14	1.6	0	1,38	2,13
		100	0.15	1.6	0	1,55	2,39
Port de peche bouharoun		10	0.96	1.6	0	2,45	3,77
		30	1.05	1.6	0	2,82	4,34
		100	1.16	1.6	0	3,04	4,69
Port de pêche de Tipaza		10	0.2	1.6	0	1,38	2,13
		30	0.17	1.6	0	1,42	2,19
		100	0.17	1.6	0	1,56	2,41

5.4. Le Run Down :

Le run-down (Rd) est un paramètre clé utilisé pour déterminer l'étendue inférieure de la carapace d'un ouvrage maritime. Il représente le niveau le plus bas qu'une houle peut atteindre sur un talus. Le run-down est considéré comme positif lorsque ce niveau est inférieur à celui de l'eau au repos (CETMEF, 2009).

Les formules correspondant à cette méthode sont récapitulées dans le Tableau 31

Tableau 31 Résumé des Equations de calcul du Run-down de la houle sur l'ouvrage

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

Note

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

5.4.2. Résultats des calculs du Run-Down de la houle :

L'analyse du Run-up au pied des digues des ports des baies d'Alger, Zemmouri et Bousmail révèle une variabilité notable des valeurs selon les sites et les périodes de retour.

Baie d'Alger : La moyenne du Run-down est de 0.24 m, mais avec une grande variabilité entre les ports, allant de 0.10 m à 0.41 m. Le port d'Alger est le plus exposé aux vagues du fait de son orientation

Baie de Zemmouri : La moyenne du Run-down est de 0.15 m, mais avec une diversité des valeurs selon les ports. Le port de Zemmouri présente les valeurs les plus faibles. La diversité des valeurs s'explique par la configuration des côtes et la présence de caps (cap Djinnet) qui influencent la direction de propagation des houles

Baie de Bousmail : La moyenne du Run-down est de 0.14 m, avec une diversité des situations

La variabilité s'explique ici aussi par la morphologie des côtes et l'exposition aux vagues. Le port de Bouharoun est le plus exposé du fait de sa situation en pointe.

Tableau 32 Résultats des calculs du Run-down de la houle au quel est exposé la section courante des digues principales des ports étudiés

Baie	Zone d'étude	Période de retour (année)	ξ	Hm	Tm	Rd2% (m)
Alger	Marina d'Alger	10	0,99	1.12	11.4	0,33
		30	0.3	1.13	11.48	0,10
		100	0.9	1.18	11.99	0,3186
	Port d'Alger	10	0.8	1.72	11.43	0,41
		30	0.24	1.82	11.51	0,13
		100	0.67	1.89	12.01	0,38
	Port des Sablettes	10	0.91	1,25	11.06	0,3
		30	0.25	1,73	11.7	0,13
		100	0.6	1,70	10.11	0,31
	Port de Tamentfoust	10	0.16	1,54	11.15	0,07
		30	0.13	1,60	10.28	0,06
		100	0.17	1,75	10.26	0,09
Petit port La Frégate	10	1.2	0,67	9.34	0,24	
	30	1.01	1,04	10.11	0,32	
	100	1	1,34	10.98	0,40	
Zemmouri	Port de Cap Djinnet	10	0.26	1,59	9.30	0,12
		30	0.25	1,69	9.35	0,13
		100	0.31	1,94	11.17	0,18

	Port de Zeemouri	10	0.23	0,57	9.43	0,04
		30	0.22	0,67	9.57	0,04
		100	0.25	0,76	11.20	0,06
	Centrale électrique de Cap Djinet	10	0.27	1,09	9.32	0,08
		30	0.27	1,15	9.16	0,09
		100	0.3	1,40	11.18	0,13
	Port de Jean-Bart	10	0.7	1,39	9.04	0,29
		30	0.72	1,47	9.22	0,32
		100	0.73	1,57	9.36	0,34
Bousmail	Port d'El Djamila	10	0.30	0,75	10.12	0,07
		30	0.4	0,97	13.56	0,12
		100	0.39	1,04	10.91	0,12
	Port de sidi fredj	10	0.89	0,77	9.63	0,21
		30	0.88	0,9	10.2	0,24
		100	0.85	0,97	10.16	0,25
	Port de fouka marine	10	0.16	1,28	11.3	0,06
		30	0.18	1,44	12.36	0,08
		100	0.16	1,54	13.57	0,07
	Port de khemisti	10	0.14	1,06	11.31	0,04
		30	0.14	1,16	12.37	0,06
		100	0.15	1,31	13.58	0,05
	Port de peche bouharoun	10	0.96	0,91	10.12	0,26
		30	1.05	1,14	12.36	0,36
		100	1.16	1,19	13.57	0,41
	Port de pêche de Tipaza	10	0.2	1,06	10.17	0,06
		30	0.17	1,15	10.30	0,06
		100	0.17	1.29	10.82	0,07

5.5. Conclusion :

L'analyse détaillée des phénomènes de run-up et de run-down pour les différents ports des baies d'Alger, Zemmouri et Bousmail révèle des informations cruciales pour l'évaluation de la résistance et de la stabilité des ouvrages portuaires le long du littoral algérien.

Les résultats obtenus montrent une grande variabilité des valeurs de run-up et de run-down, non seulement entre les différentes baies, mais aussi entre les ports au sein d'une même baie. Cette hétérogénéité souligne l'importance des conditions locales spécifiques à chaque site, telles que la bathymétrie, l'exposition aux vagues dominantes, et la configuration des ouvrages de protection.

En ce qui concerne le run-up, les valeurs observées suggèrent que la plupart des ouvrages sont dimensionnés pour résister à des conditions de vagues modérées à extrêmes. Cependant, certains ports, notamment dans la baie d'Alger et à Bousmail, présentent des valeurs de run-up élevées pour les périodes de retour les plus longues, ce qui pourrait nécessiter une attention particulière en termes de renforcement ou de rehaussement des structures. L'analyse du run-down, quant à elle, suggère que les ports sont protégés.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail a été d'évaluer l'impact des événements météorologiques extrêmes sur les ouvrages maritimes du littoral centre algérien, s'étendant de Cap Djinet à El Hamdania, englobant les baies d'Alger, Zemmouri et Bousmail. Cette étude a permis de fournir une information fiable et accessible sur le comportement hydrodynamique de la zone et la performance des ouvrages portuaires face aux conditions extrêmes.

Dans un premier temps, l'analyse du climat, du vent et des houles a révélé des caractéristiques spécifiques à chaque baie. La hauteur significative moyenne des vagues sur une période de 30 ans varie de 0,81 m pour la baie d'Alger à 1,17 m pour Zemmouri et 1.05m pour Bousmail , avec des directions prédominantes du Nord-Est et du Nord-Nord-Est. Cette analyse a fourni une base solide pour comprendre les conditions environnementales auxquelles sont soumis les ouvrages maritimes.

La caractérisation des ouvrages portuaires a permis d'établir un inventaire détaillé des infrastructures existantes, essentiel pour évaluer leur vulnérabilité face aux événements extrêmes.

L'utilisation des méthodes de prédiction des événements extrêmes POT et GEV a permis de déterminer les hauteurs de houle pour différentes périodes de retour, allant jusqu'à 1000 ans. La comparaison entre ces méthodes a mis en évidence la fiabilité de la méthode POT, qui prend en compte plus de points de données.

La modélisation hydrodynamique réalisée à l'aide du logiciel Mike21 a fourni des informations cruciales sur le comportement des houles et des courants dans la zone d'étude. Les résultats ont montré que les houles les plus pénalisantes proviennent des directions Nord, Nord-Nord-Ouest et Nord-Nord-Est, avec des hauteurs au pied des ouvrages variant de 2,14 m à 3,17 m en moyenne selon les baies. Cette modélisation a également permis de comprendre la circulation des courants engendré par ces houles, avec des vitesses variantes entre 0,3 m/s et 1,2 m/s.

L'analyse de la performance hydraulique des ouvrages, basée sur des formules semi-empiriques du guide de l'enrochement du CETMEF, a démontré que la plupart des digues des ports étudiés présentent une bonne résistance face aux forces hydrauliques extrêmes, avec des valeurs de run-up et run-down ne dépassant généralement pas 3 m.

Perspectives :

Cette étude fournit une base solide pour la gestion et la protection des ouvrages maritimes le long du littoral centre algérien. Les résultats obtenus peuvent servir d'outil d'aide à la décision pour les autorités compétentes dans la planification et l'amélioration des infrastructures côtières.

Des travaux futurs pourraient inclure :

1. Une analyse plus détaillée de l'impact du changement climatique sur les conditions hydrodynamiques à long terme.
2. L'étude de solutions d'adaptation et de renforcement des ouvrages existants face aux scénarios d'événements extrêmes les plus pessimistes.
3. L'élaboration de stratégies de gestion intégrée du littoral, prenant en compte à la fois la protection des infrastructures et la préservation des écosystèmes côtiers.

4. Le développement d'un système de surveillance et d'alerte précoce pour les événements extrêmes, basé sur les modèles hydrodynamiques développés dans cette étude.

Ce travail pourrait être considéré comme un état des lieux et un constat de la vulnérabilité des ouvrages portuaires du littoral centre algérien face aux événements météorologiques extrêmes. Il offre une vision prospective et des perspectives pour optimiser la protection côtière et la gestion des infrastructures maritimes dans un contexte de changement climatique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alderton, P. (2008).** Port Management and Operations. Informa Law from Routledge, London.
- Amara, L., Chalal, Y. (2022).** Machine learning pour l'étude de la performance hydraulique des ouvrages portuaires, cas Marina d'Alger. Mémoire d'ingénieur. Gestion et protection du littoral. dely brahim: ENSSMAL. P. 1
- Antoine, C.-D. (2022, Fevrier 02).** Apprentissage supervisé : définition et exemples d'algorithme. [en ligne]. Disponible sur le web : <https://www.journaldunet.fr/web-tech/guide-de-l-intelligence-artificielle/1501311-apprentissage-supervise/>
- Aoudj, C., Khoudir, M., Guerfi, M., Sallaye, M., Salem Cherif, Y., Abdelalim, D., & BOUKHENNAF, A. (2020).** Évolution spatio-temporelle du trait de côte du littoral centre Algérien: cas de la baie de Zemmouri. 167-176.
- Atroune, M. (2012).** Dynamique sédimentaire et hydrodynamique de la baie d'Alger (Algérie). Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille.
- Battjes. J. A., (1975).** Surf similarity. In Coastal Engineering 1974, 480p. doi:10.1061/9780872621138.029
- Bieman, J. P., al, J. M. (2020).** Prediction of Mean Wave Overtopping Discharge. Water 2020, 12, 1703, 13. doi :10.3390/w12061703
- Bonnfile. R., (2010).** Mouvements de la mer et leurs risques. Techniques de l'ingénieur Les aménagements des voies de transport [en ligne]. T. base documentaire : TIB550DUO. No ref. Article : c4610. Publisher : Editions T.I. Type. Disponible sur le site Web : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/les-amenagements-des-voies-de-transport-42550210/mouvements-de-la-mer-et-leurs-risques-c4610/>
- Bouhmadouche, M. (2014).** geologie de la baie de zemmouri algerie.
- BOUGHERARA, H., 2011.** Caractérisation géologique et géotechnique de la partie occidentale de la baie d'Alger.
- Boujis, J. (2000).** Ouvrages de défense des littoraux. opio, P.P 5-11
- Caminade. D., (1995),** Ouvrages de protection contre la houle. Techniques de l'ingénieur Infrastructures, environnement et transport par voie d'eau. TIB617, no ref. Article : c4631. Publisher : Editions T.I. [en ligne]. Disponible sur le site Web : <https://www.techniques-ingenieur.fr>
- Cetmef, (2009),.** Conception des ouvrages à la mer, in : Guide Enrochement : L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques. Version française du Rock Manual (2e édition). Compiègne ; Pays-Bas ; Londres : Centre d'études techniques maritimes et fluviales (France), P. 22

- Dean, R.G., & Dalrymple, R.A. (2004).** Coastal processes with engineering applications. Cambridge University Press.
- DHI., (2014).** MIKE 21/3 Couple Model FM.
- DHI., (2014).** MIKE 21 Spectral Wave Module.
- DHI., (2014).** MIKE ZERO: Creating 2D Bathymetries. Bathymetry Editor & Mesh Generator.
- Dumas, A. (1928).** annales des ponts et chaussées. Paris: Ecole Nationale ds ponts et chaussées, P. 3
- Etemad-Shahidi, A., Shaeri, S., et al. (2016).** Prediction of wave overtopping at vertical structures. Coastal Engineering. Doi : . Disponible sur le web : www.elsevier.com/locate/coastaleng, P.P. 2-4
- Gosse, J. S., Jentsje Wouter, v. d., et al. (2004).** La base de données internationale sur le déferlement des vagues. 18. doi:10.1142/9789812701916_0347
- Gosse, J. S., Jentsje Wouter, v. d., et al. (2004).** The international database on wave overtopping.
15. doi:10.1142/9789812701916_0347, P.P 3-8
- Komar, P.D. (1998).** Beach processes and sedimentation. Prentice Hall.
- Leclaire, L. (1972).** Étude géologique et sédimentologique de la baie d'Alger. Thèse de doctorat, Université de Paris VI.
- MAUCHE, S., MORHANGE, C., MEGHRAOUI, M. (2009).** Large boulder accumulation on the Algerian coast evidence tsunami events in the western Mediterranean. Marine Geology 262, 1-4, p. 96-104.
- Pilarczyk, K.W. (2003).** Design of low-crested (submerged) structures – an overview. 6th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Colombo, Sri Lanka
- Pilarczyk, K.W. (2003).** Design of low-crested (submerged) structures – an overview. 6th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Colombo, Sri Lanka
- Ports, M.S. (2016).** Ports and Harbours: A Comprehensive Introduction
- Société Générale des Ports d'Algérie (SGPP). (2019).** Fiche technique de Port d'Alger disponible sur <https://www.sgpp.dz/wp-content/uploads/2019/12/Fiche-technique-Alger.pdf>
- Société Générale des Ports d'Algérie (SGPP). (2019).** Fiche technique de Port de Bouharoun disponible sur <https://www.sgpp.dz/wp-content/uploads/2019/12/Fiche->

[technique-BOUHAROUNE.pdf](#)

Société Générale des Ports d'Algérie (SGPP). (2019). Fiche technique de Port de Tamenfoust disponible sur <https://www.sgpp.dz/wp-content/uploads/2019/12/Fiche-technique-Tamentfoust.pdf>

Société Générale des Ports d'Algérie (SGPP). (2019). Fiche technique de Port de Tipaza disponible sur <https://www.sgpp.dz/wp-content/uploads/2019/12/Fiche-technique-Tipaza.pdf>

Société Générale des Ports d'Algérie (SGPP). (2019). Fiche technique de Port de Zemmouri disponible sur <https://www.sgpp.dz/wp-content/uploads/2019/12/Fiche-technique-Zemmouri.pdf>

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

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

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

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

Tamazight, M (2023), modélisation de l'effet de la houle sur la stabilité et franchissement des ouvrages maritimes. Mémoire d'ingénieur. Gestion et protection du Littoral. Dely-Ibrahim : ENSSMAL

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

Thoresen, C.A. (2014). Port Designer's Handbook: Recommendations and Guidelines. Thomas Telford Ltd, London.

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

P. 24

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

Touhami, H., & Khellaf, M. (2017). PROPAGATION MODEL OF TSUNAMI WAVE IN 2D BY COULWAVE (CASE OF ZEMMOURI, BOUMERDES 2003). Le Journal de l'Eau et de l'Environnement LJEE. 17.

UNCTAD (United Nations Conference on Trade and Development). (2020). Review of Maritime Transport 2020. United Nations Publications, New York and Geneva.?

US Army Corps of Engineers. (1984). Coastal Engineering Manual. Part III: Coastal Sediment Processes.

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

Annexes

Annex 1 Business Model Canvas

Le Business Model Canvas (BMC) est un outil essentiel pour comprendre et communiquer de manière structurée la logique fondamentale des entreprises. Il met en évidence les composantes clés du modèle économique, incitant à une réflexion approfondie sur les parties prenantes, les revenus, les coûts, les avantages concurrentiels et les opportunités de croissance. Utilisé dans la planification stratégique et le développement de nouveaux produits et services, le BMC permet une analyse complète et cohérente.

Dans cette section de notre mémoire, nous détaillons le BMC de notre startup, en décrivant toutes ses composantes. Cet outil stratégique de gestion se présente sous la forme d'un cadre visuel comprenant neuf éléments clés, comme illustré à la figure 1.

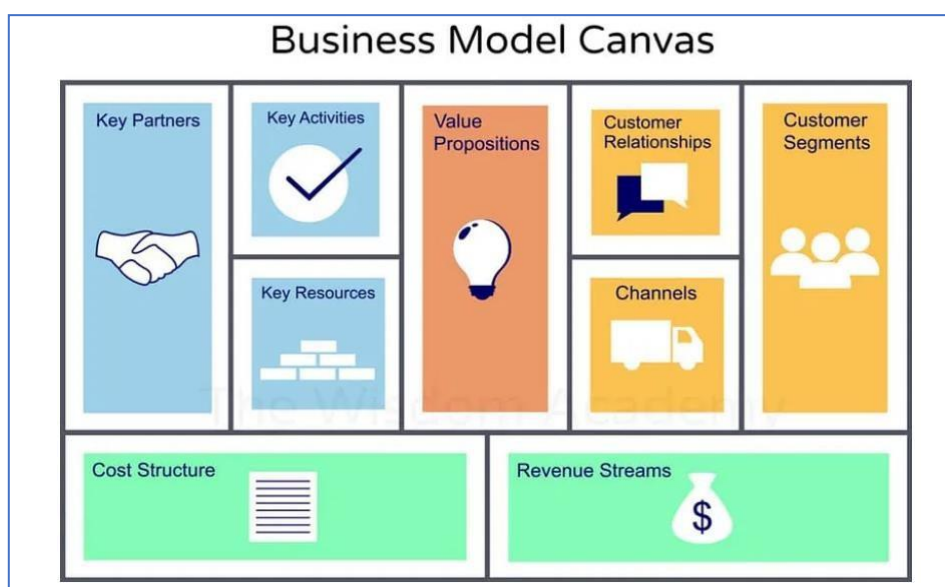


Figure 1: Business Model Canvas (Source: The Wisdom Academy)

Premier axe : Présentation du projet

L'idée du projet :

L'idée du projet est née d'une étude révélant la vulnérabilité croissante des zones côtières aux risques naturels, avec des érosions côtières qui augmentent chaque année et des événements extrêmes comme les tempêtes et les tsunamis devenant plus fréquents en raison des changements climatiques. Cela nous a impacté profondément autant qu'étudiants en gestion et protection du littoral. Pour y remédier, nous proposons la création d'un centre de recherche et d'intervention utilisant les dernières technologies en ingénierie côtière et modélisation des risques naturels. Ce centre utilisera des outils avancés pour collecter et analyser des données océanographiques et géologiques, et développera des solutions innovantes comme des barrières naturelles, la réhabilitation des écosystèmes côtiers, et des systèmes d'alerte précoce. Le lieu d'implantation sera choisi pour sa proximité avec les zones côtières les plus vulnérables et avec des centres académiques et des laboratoires de recherche, facilitant ainsi la collaboration scientifique et l'accès aux ressources nécessaires pour mener à bien les études et les interventions.

Notre bureau d'études spécialisé dans les géorisques marins et côtiers se démarque par une approche novatrice, combinant une expertise pointue en génie côtier et en cartographie, soutenue par l'intelligence artificielle (IA). Cette approche, pionnière sur le marché, offre une perspective inédite, non encore explorée par nos concurrents. Nous visons à fournir à nos clients des solutions sur mesure ainsi que des services de veille technologique, répondant à leurs besoins spécifiques en gestion des risques et en développement côtier.

Nos propositions de valeur s'articulent autour des points suivants :

- La mise à disposition de solutions avancées, intégrant l'IA, pour le génie côtier et la gestion des risques côtiers.
- La capacité à prédire et modéliser avec précision les processus côtiers, permettant une planification anticipée.
- L'offre de solutions rentables et efficaces pour la planification côtière et le développement des infrastructures, assurant une utilisation optimale des ressources.
- L'amélioration de l'évaluation des risques côtiers et des stratégies de réduction des risques, garantissant une approche proactive et adaptative.
- L'optimisation de la recherche de solutions, avec des délais de livraison optimisés, pour une efficacité accrue dans la prise de décision.

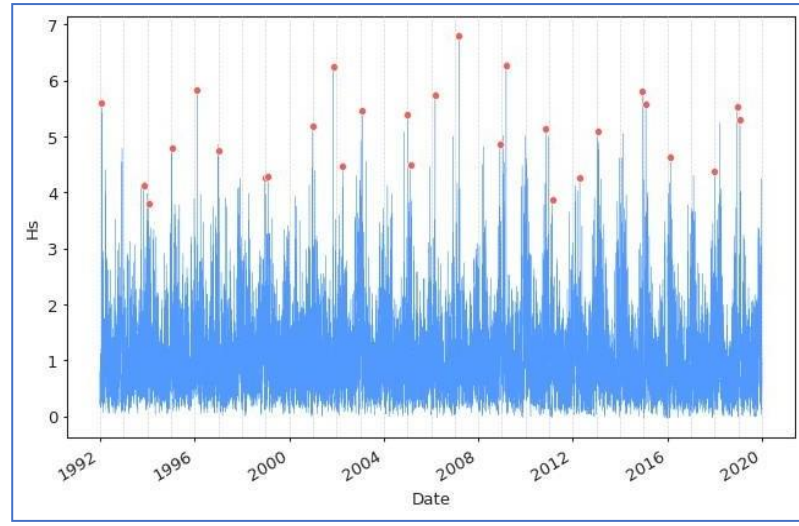
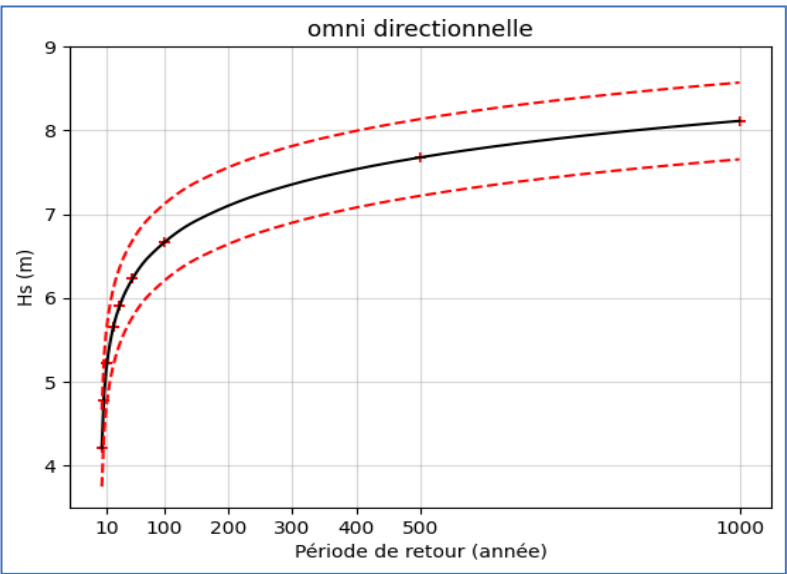
Activités clés :

Notre entreprise se démarque également par ses capacités à :

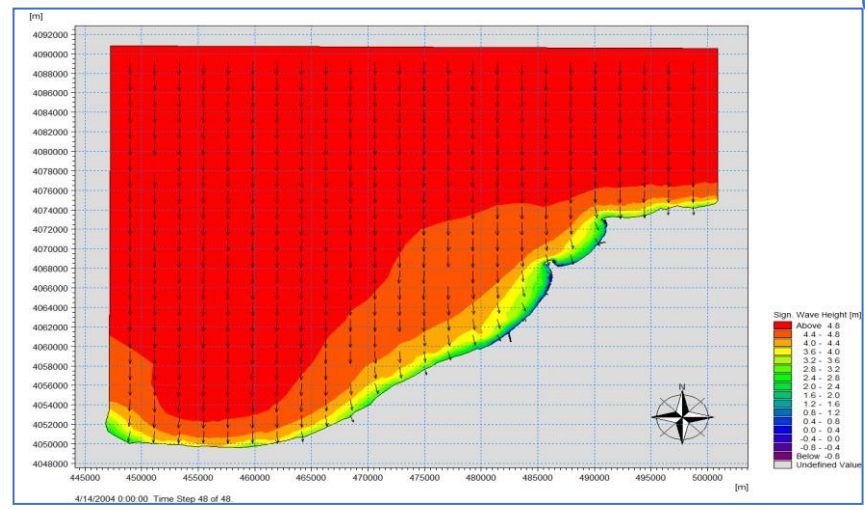
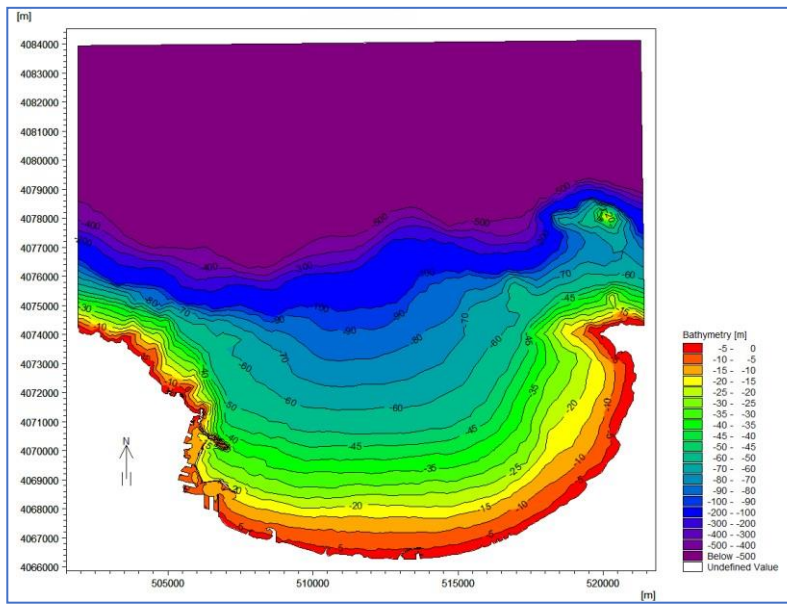
- Développer des modèles prédictifs avancés pour anticiper les problèmes côtiers tels que le franchissement, le run up, le run down des vagues, les submersions marines et les tempêtes marines.
- Identifier et cartographier avec précision les zones côtières à risques élevés, permettant une gestion proactive des risques.
- Prévoir les états de mer extrêmes à venir, pour une meilleure préparation aux événements météorologiques adverses.
- Étudier les possibilités d'inondations dans les zones adjacentes aux oueds, en évaluant les risques potentiels et en proposant des solutions adaptées.
- Traiter efficacement les vastes bases de données disponibles, garantissant une analyse approfondie et précise des données géospatiales.
- Concevoir des cartes personnalisées pour une gamme variée d'applications, répondant aux besoins spécifiques de nos clients.
- Proposer des formations complètes en programmation utilisant le langage Python, ainsi que l'utilisation de logiciels spécialisés en cartographie et en Système d'Informations Géographiques (SIG), ainsi que des logiciels spécifiques au domaine marin, comme le MIKE, tant en présentiel qu'en ligne.
- Fournir des formations gratuites pour les étudiants, afin de promouvoir le développement des compétences dans le domaine du génie côtier et de la gestion des risques marins.

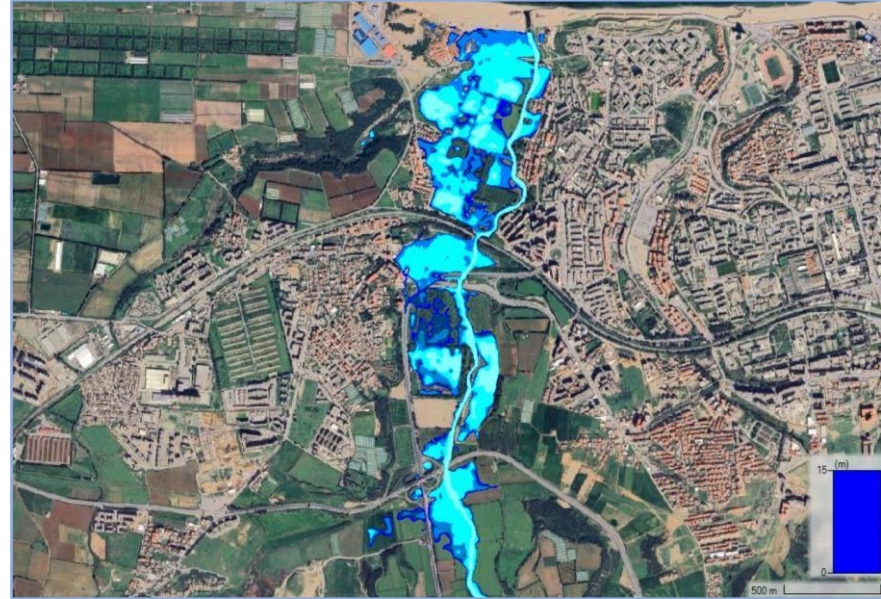
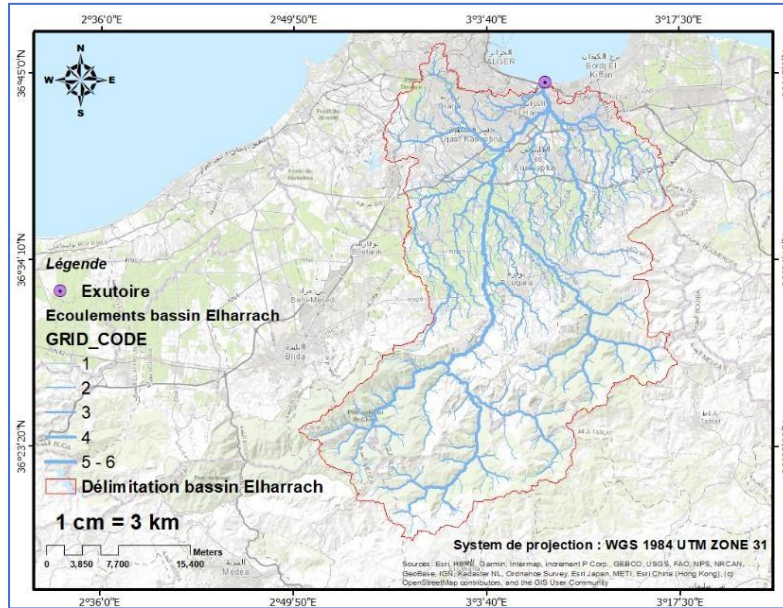
Les figures suivantes illustrent les résultats des applications effectuées sur notre zone d'étude, qui ont abouti aux prototypes suivants.

1



2





1 : : Prédiction des évènements extrêmes en utilisant le langage python

2 : Carte bathymétrique de la baie d'Alger et modélisation de l'hydrodynamisme dans la zone de Zemmouri

3 : Utilisation des outils sig dans la cartographie du bassin versant d'oued el Harrach des zones en risque d'inondation Cas d'Oued Corso

Objectifs du Projet :

Notre objectif est de devenir le principal centre d'excellence en étude des Géorisques marins dans les régions côtières au cours des 10 premières années. Nous visons à développer des solutions innovantes et durables pour la gestion des risques naturels, en collaborant étroitement avec les communautés locales et les autorités.

En tant qu'étudiants, nous commencerons par sous-traiter certaines de nos activités à des experts et des entreprises spécialisées, afin de bénéficier de leur expérience et de leurs compétences. Cela nous permettra de couvrir 40 % des zones côtières vulnérables identifiées dans notre étude préliminaire, en fournissant des analyses détaillées et des stratégies de mitigation des risques.

En atteignant ces objectifs, nous espérons contribuer significativement à la sécurité et à la résilience des populations côtières face aux défis posés par les changements climatiques et les événements naturels extrêmes.






Equipe de travail :

L'équipe du projet est composée des membres suivants :

- Belacel Yasmine : En tant que responsable marketing, l'étudiant 01 est chargé de diriger le projet, de superviser les études de marché et de gérer les stratégies marketing.
- Grebici Mohamed Lamine : En tant que responsable des ressources humaines, l'étudiant 02 est responsable de la gestion des ressources humaines, y compris le recrutement, la formation et le bien-être des employés.
- Kouab Souhila : En tant que responsable des relations extérieures, l'étudiant 03 se concentre sur le développement des partenariats, la gestion des relations avec les parties prenantes et la communication externe.
- Belmokhtar Wissem : En tant que responsable financier, l'étudiant 04 est en charge de la gestion financière du projet, incluant la budgétisation, la planification financière et l'analyse des performances économiques.
- Griche Hocine : En tant que PDG, l'étudiant 05 supervise l'ensemble des opérations, assure la cohésion entre les différentes équipes et dirige le projet vers le succès.

Tous ingénieurs en gestion et protection du littoral, nous avons des connaissances approfondies dans plusieurs domaines complémentaires, ce qui nous permet d'aborder les géorisques littoraux de manière holistique et intégrée. En combinant nos compétences, nous sommes bien équipés pour offrir des solutions complètes et efficaces à nos clients.

Calendrier de réalisation du projet :

			1	2	3	4	5	6
1		Études préalables : choix de l'implantation de l'unité de production, préparation des documents nécessaires	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2		Commande des équipements		✓	✓			
3		Location d'un siège de production	✓					
4		Installation des équipements		✓	✓			
5		Recrutement	✓					

Deuxième axe : Aspects innovants

Domaine d'innovation :

Notre projet d'étude des géorisques marins innove dans plusieurs domaines pour offrir des solutions complètes et efficaces.

Nous allons optimiser nos opérations en utilisant des technologies avancées de collecte et d'analyse de données, comme les drones et les capteurs sous-marins, ce qui augmentera l'efficacité et réduira les coûts.

En combinant l'étude de différents types de géorisques marins (érosion côtière, tsunamis, tempêtes, montée du niveau de la mer), nous proposerons des services améliorés et une approche intégrée pour la gestion des risques. En diversifiant notre offre, nous pourrions servir non seulement les autorités locales et les gouvernements, mais aussi les entreprises privées, les ONG, et les communautés locales, avec des services personnalisés. Nous introduirons des produits innovants comme des systèmes d'alerte précoce pour les tsunamis, des barrières naturelles contre l'érosion, et des logiciels de simulation pour prévoir l'impact des tempêtes.

En adoptant un modèle d'affaires flexible qui inclut la sous-traitance et la collaboration avec des experts, nous créerons un système de valeur permettant une réponse rapide et efficace aux besoins variés de nos clients. Cette approche holistique, englobant tous les aspects du traitement des Géorisques marins, nous distingue des entreprises spécialisées dans un seul type de risque, et nous positionne comme leader dans ce domaine.

Troisième axe : Analyse stratégique du marché

Partenaires clés (marché potentiel)

Les partenaires clés pour un bureau d'étude des Géorisques marins comprennent toutes les entités qui pourraient avoir besoin d'une évaluation et d'une gestion des risques liés aux environnements marins. Cela inclut un large éventail de clients potentiels qui, de manière générale, sont concernés par les impacts des risques marins sur leurs activités

Notre entreprise vise à établir des partenariats avec :

- Des laboratoires de recherche universitaires (ENSSMAL)
- Agences gouvernementales spécialisées dans l'aménagement et la gestion du territoire et organisations environnementales (CNL, ANAAT, INCC, GIEC) : Responsabilité de la protection des zones côtières et marines besoin de données et d'expertise pour la planification de la résilience face aux changements climatiques et aux catastrophes naturelles.
- Entreprises de l'industrie pétrolière et gazière offshore : besoin d'évaluations des risques pour les installations offshore.
- Entreprises de transport maritime : Nécessité de gérer les risques associés aux routes maritimes et aux opérations portuaires.
- Développeurs d'infrastructures côtières : Elles s'intéresseraient à l'achat de nos services pour bénéficier de solutions basées sur l'intelligence artificielle pour la prédiction et la modélisation précise des processus côtiers. Cela les aiderait dans la planification et l'exécution de leurs projets de construction et d'aménagement côtier de manière plus efficace, en réduisant les risques, en optimisant les ressources et en améliorant la durabilité des infrastructures.
- Secteurs de la pêche et de l'aquaculture : Gestion des risques environnementaux et des catastrophes naturelles affectant les zones de pêche et d'aquaculture.

Segment clients (marché cible) :

Le marché cible se concentre sur les segments spécifiques qui ont un besoin immédiat et prioritaire des services offerts par notre bureau d'étude. Il comprend l'identification des caractéristiques démographiques, des besoins, des comportements et des préférences de chaque segment de clientèle.

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

- Les bureaux d'études environnementaux.
- Les directions des travaux publics des wilayas littorales.
- Groupe d'Ingénierie et de Services pour l'Environnement et le Développement (GISMED).
- Laboratoire des Etudes Maritimes (LEM).
- Institut Méditerranéen pour le Développement Environnemental et Côtier (MEDITRAM).
- L'entreprise des travaux maritimes : COSIDER construction, GIRAMA (Groupe d'Ingénierie et de Travaux Maritimes et Routiers d'Algérie).

Relations client :

Les relations clients dans notre bureau d'étude sont essentielles pour assurer le bon déroulement des projets et la satisfaction des clients. Ces relations impliquent une communication claire et continue pour comprendre les besoins des clients.

Notre bureau d'étude réactifs et professionnels pour établir une relation de confiance avec nos clients pour cela on proposera des réunions régulières, des mis à jour sur l'avancement des projets, en plus des collaborations entres les clients. Des programmes de fidélisation et de récompense pour encourager la fidélité des clients et stimuler les recommandations positives.

Intensité de la concurrence :

Les concurrents les plus importants sur le marché algérien, produisent pour la plupart, des études spécialisées des risques côtiers et des évaluations environnementales un peut limité à cause de manque d'expertise approfondie dans le domaine de la géologie marine et la géotechnique marine et aussi certaine filiale internationaux ont la possibilité de perception comme une entreprise étrangère , ce qui pourrait limiter leur accès a certains marchés locaux ou leurs opportunités de partenariats avec des acteurs locaux.

Les principaux concurrents dans ce secteur en Algérie peuvent être classés en deux catégories :

-Bureaux d'études locaux spécialisés dans les Géorisques marins : **GeoMar Algérie** : Spécialisé dans l'analyse des risques côtiers et sous-marins, **MarineTech Algérie** : Focus sur les solutions technologiques pour la gestion des risques marins.

-Filiales des grands groupes internationaux : **CETIM** : Une filiale d'un groupe international avec une forte présence en Algérie, **Sogreah Consultants** : Spécialisé dans les études environnementales marines et côtières.

La stratégie de marketing :

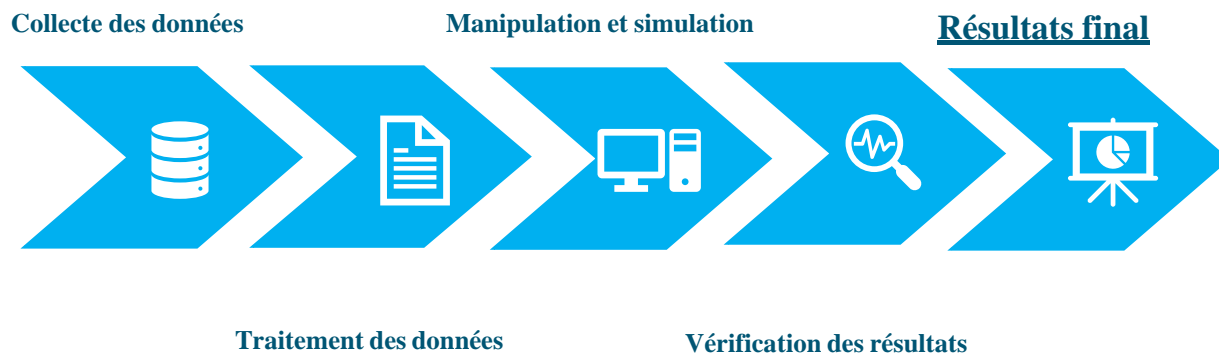
Pour distribuer les services notre bureau d'étude, on utilise différents canaux de distribution en fonction de nos clientèles cibles et nos objectifs commerciaux.

Les moyens de distribution des services proposées incluent :

- Participation à des conférences, des salons professionnelles, pour rencontrer des clients potentiels et présenter des services.
- Utilisation de plateforme en ligne et un site web détaillant les services offerts, les études de cas, les témoignages des clients et les informations de contact.
- Partenariats avec des entreprises locales pour étendre les services.
- Les ventes directes et les consultations avec les différentes entreprises.

Quatrième axe : Plan de production et organisation

Le Processus de production



L'Approvisionnement :

Dans le cadre de notre bureau d'études sur les géorisques marins, nous avons établi une politique d'achat stratégique pour garantir l'efficacité de nos opérations. Nous collaborons directement avec la banque pour sécuriser les meilleures conditions pour l'acquisition de matières premières, matériaux, fournitures et équipements. Nous travaillons en partenariat avec l'incubateur de l'ENSSMAL, qui offre un soutien aux porteurs de projets pour la création et l'expansion de petites entreprises de production de biens et de services. En ce qui concerne la politique de paiement, il est géré via CCP et CIB, ainsi que par mois, offrant une flexibilité financière et des délais de réception optimisés.

La main d'œuvre

Notre projet côtier permettra de créer environ 11 emplois directs et 4 emplois indirects. Les postes directs incluent nous, les 5 ingénieurs en génie côtier, ainsi que 5 autres ingénieurs spécialisés et un technicien qualifié pour travailler sur des équipements de pointe.

En complément, nous aurons besoin de 4 personnels indirects, comprenant divers travailleurs tels qu'une femme de ménage, des agents de soutien, des comptables etc. assurant ainsi un fonctionnement optimal de nos opérations quotidiennes.

Notre équipe directe sera basée principalement dans notre bureau central, tandis que les techniciens travailleront sur le terrain, réalisant des études et des relevés côtiers. Pour les tâches nécessitant une manutention spécifique, nous prévoyons des formations adéquates pour garantir la sécurité et l'efficacité de nos opérations. Cette structure nous permettra d'assurer une expertise de haut niveau tout en optimisant les ressources humaines nécessaires pour le succès du projet.

Cinquième axe : Plan financier

Les Coûts et charges :

Project	Frais (par ans)
Matériel informatique (PC, imprimante, logiciel) + Matériel bureautique (Bureaux, chaises, armoires, tableau) + Fourniture (papiers, ancre, stylos, registres) + Eau et électricité + Internet	2 570 000,00 da
Loyer	480 000,00 da
Dossier administratif	50 000,00 da
Coût du projet (Données géo spatiales, Matériel de collecte de données sur le terrain)	500 000,00 da
Salaires et charges sociales du personnel	5 760 000,00 da
La publicité	24 000,00 da
Réparation et maintenance du matériel	10 000,00 da
Total	9 394 000,00 da

Modes et sources d'obtention de financement :

Pour effectuer notre projet nous avons obtenu un crédit bancaire **10 000 000, DA** avec un aide de la part de l'incubateur de l'école nationale supérieure des sciences de la mer et de l'aménagement de littoral (ENSSMAL), plus un budget personnel de **2 500 000,00 DA** avec un mode de paiement gérée via **CCP** et **CIB**.

Tableau des paiements :

Année	1 an (12 mois)	2 ^{-ème} année	3 ^{-ème} année
Études	3 études	6 études	9 études
Formation	5 formations	10 formations	15 formations
Vente des cartes	30 cartes	60 cartes	90 cartes

Le Chiffre d'affaires :
Coût de production :

Service	Prix	Nombre	Total de la première année
Etude	3 500 000,00 Da	3	10 500 000,00 DA
Formation	30 000,00 Da	5	150 000,00 DA
Carte	3000,00 Da	30	90 000,00 DA

Chiffre d'affaires :

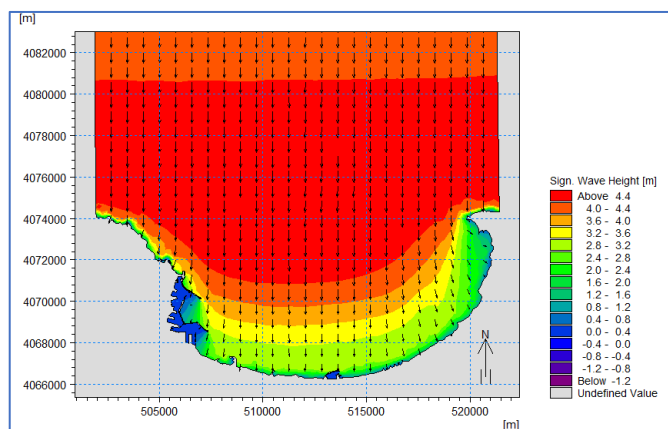
Les études 10 500 000.00 DA + la formation 150 000,00 DA + vente des cartes 90 000,00 DA
= 10 740 000.00 DA (1 année)

BENEFICE DE LA PREMIERE ANNEE:

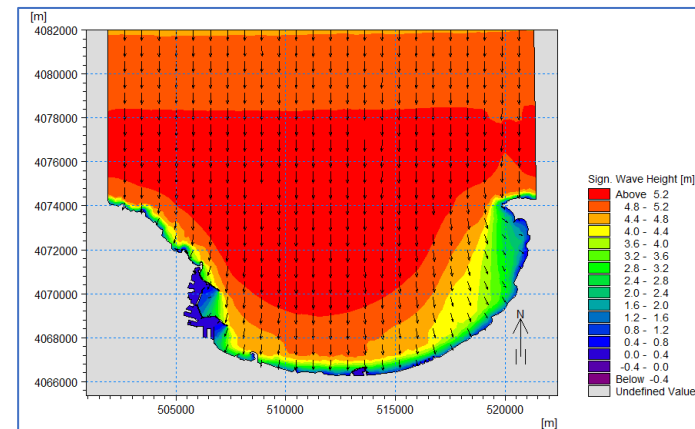
C.A	10 740 000.00 DA
-	
LES CHARGES	9 394 000.00 DA
BENEFICE	1 346 000.00 DA

Partenaires clés	Activités principales	Valeurs ajoutées	Relation clients	Clients
<ul style="list-style-type: none"> -Des laboratoires de recherche universitaires (ENSSMAL) -Des agences gouvernementales spécialisées dans l'aménagement et la gestion du territoire (CNL, ANAAT, INCC, GIEC). -Des sociétés d'ingénierie -Des entreprises de surveillance environnementale -Entreprises de l'industrie pétrolière et gazière offshore. -Entreprises de transport maritime et portuaires. -Développeurs d'infrastructures côtières. -Secteurs de la pêche et de l'aquaculture. 	<ul style="list-style-type: none"> -Des relevés et prélèvements (topographiques, bathymétrie, sédimentologie, -Analyse des phénomènes physiques, hydrauliques, hydrologique Des analyses géologiques et géomorphologiques, -Des évaluations des Géorisques côtiers (submersion, inondation.) -Des cartographies numériques -Traitement des bases de données Environnemental. Dimensionnement des ouvrages de protection et des ouvrages portuaires. -étude d'impact 	<ul style="list-style-type: none"> -Développement des modèles prédictifs avancés pour anticiper les problèmes côtiers tels que le franchissement, le run up, le run down des vagues, les submersions marines et les tempêtes marines. -Identification et cartographie des zones côtières à risques élevés, permettant une gestion proactive des risques. -Prédiction des états de mer extrêmes à venir -Étude des possibilités d'inondations dans les zones adjacentes aux oueds, -Traitement et l'analyse des bases de données géospatiales. -Proposer des formations en programmation (langage Python), ainsi que des logiciels spécialisés en cartographie (SIG) et des logiciels spécifiques au domaine marin (MIKE, surfer teleMac). -Fournir des formations gratuites pour les étudiants 	<ul style="list-style-type: none"> -Des réunions de suivi régulières -des collaborations entre les clients. - Des programmes de fidélisation et de récompense. -Des rapports détaillés sur les résultats de vos études -Une assistance technique continues 	<ul style="list-style-type: none"> -Les bureaux d'études environnementaux. -Les directions des travaux publics des wilayas littorales. -Groupe d'Ingénierie et de Services pour l'Environnement et le Développement (GISMED). Laboratoire des Etudes Maritimes (LEM). - Institut Méditerranéen pour le Développement Environnemental Et Côtier (MEDITRAM). -L'entreprise des travaux maritimes : COSIDER construction, GIRAMA (Groupe d'ingénierie et de Travaux Maritimes et Routiers d'Algérie). -Ministère des travaux publics et des infrastructures de base
	<p style="text-align: center;">Ressources liées</p> <ul style="list-style-type: none"> -Personnel qualifié : En programmation, géographie, géologie, télédétection, modélisation, cartographie et analyses géospatiale -Matériel informatique puissant - accès a des données sur le génie côtier et l'environnement - aide financier par l'incubateur de l'ENSSMAL 		<p style="text-align: center;">Les canaux de distribution</p> <ul style="list-style-type: none"> -Participation à des conférences, des salons professionnelles - Utilisation de plateforme en ligne et un site web - Partenariats avec des entreprises locales pour étendre les services. - Les ventes directes et les consultations avec les différentes entreprises. 	
Coûts 9 394 000, da (1 an)		Revenus 1 346 000.00 DA (1 an)		

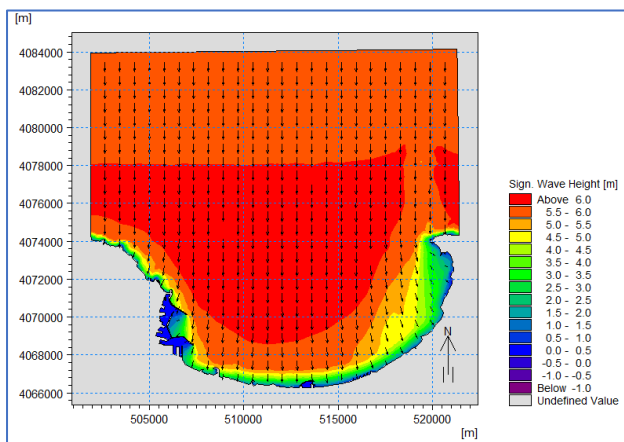
Annex 2 : Résultats de Simulation



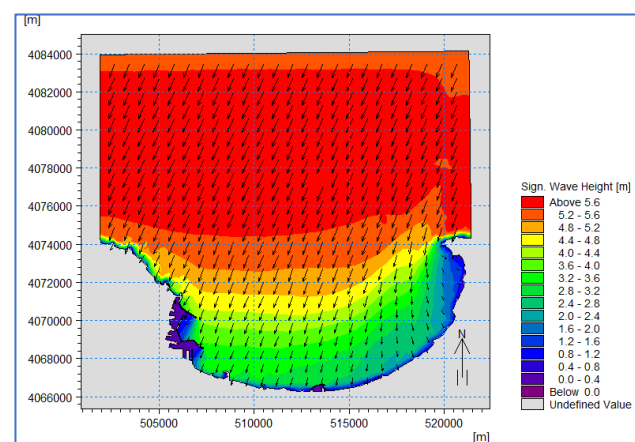
Champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord (2ans)



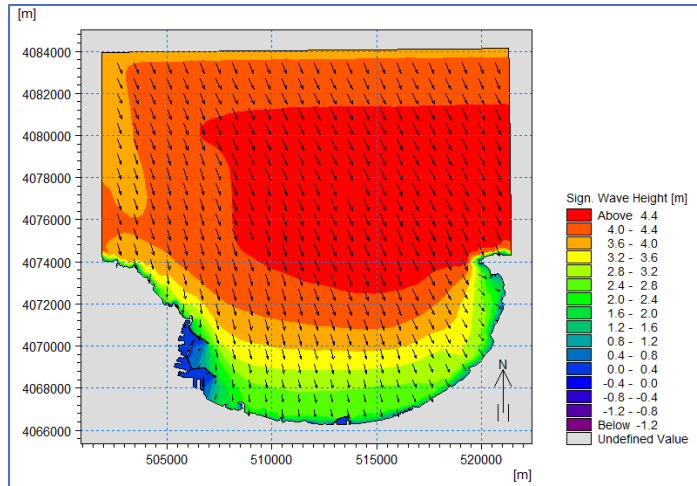
Champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord (5ans)



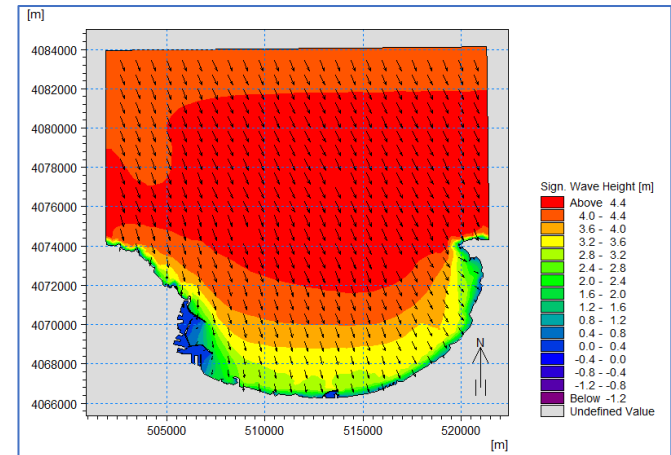
Champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Est (20ans)



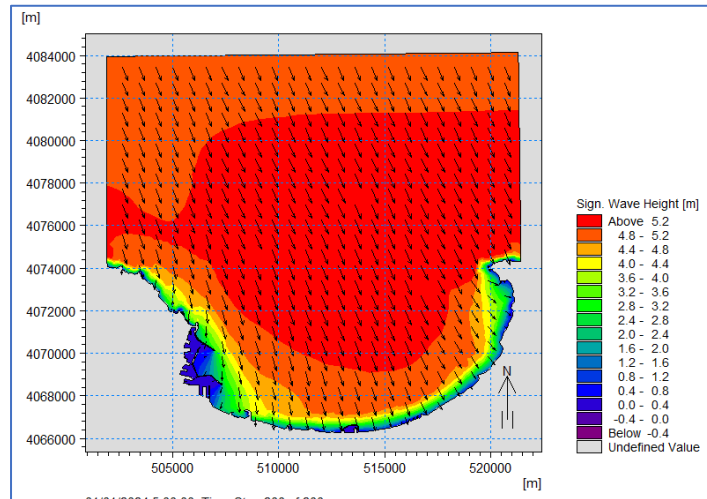
Champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Est (50ans)



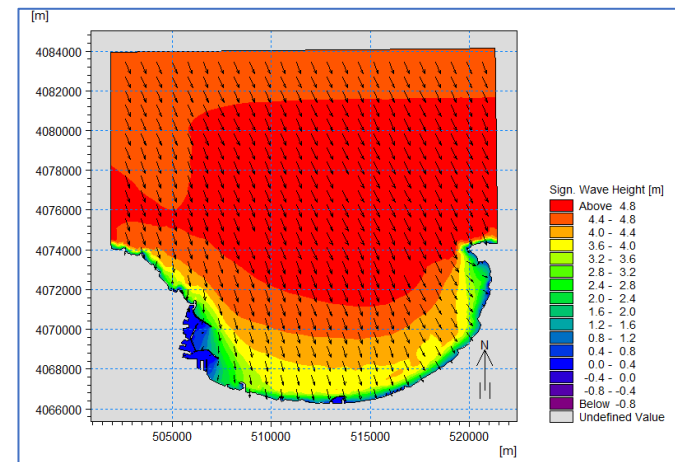
Champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Ouest (2ans)



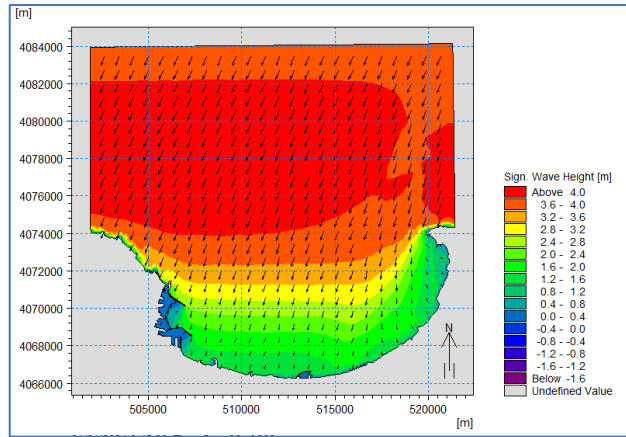
Champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Ouest (5ans)



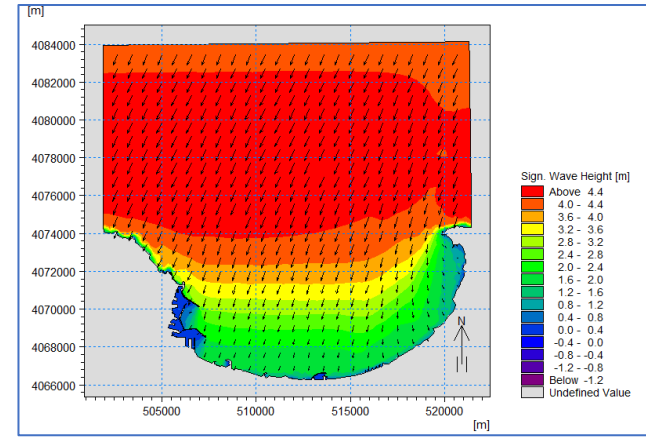
Champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Ouest (20ans)



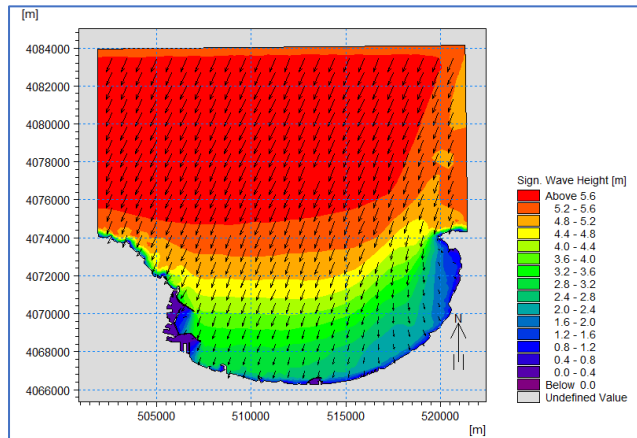
Champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Ouest (50ans)



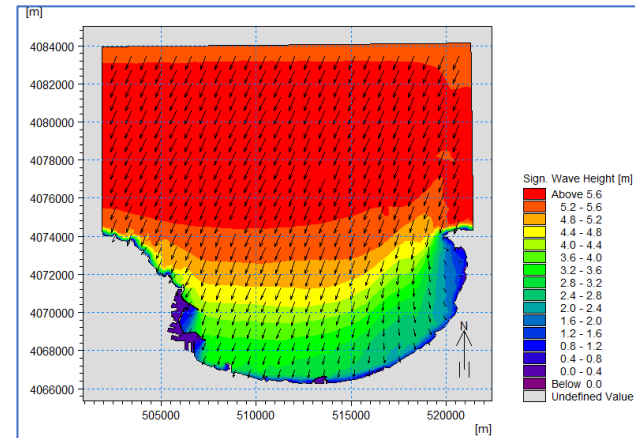
Champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Est (2ans)



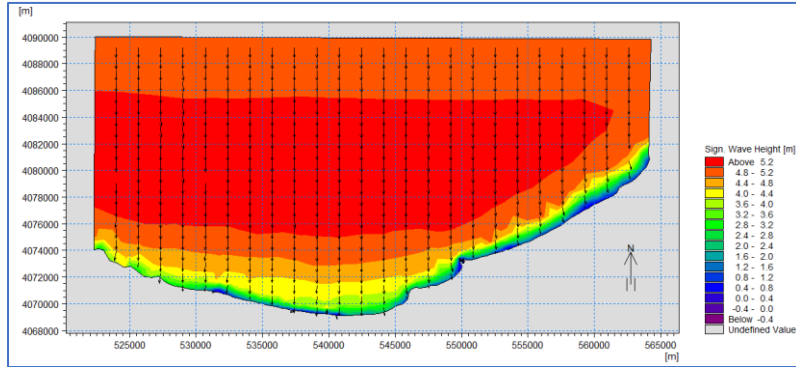
Champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Est (5ans)



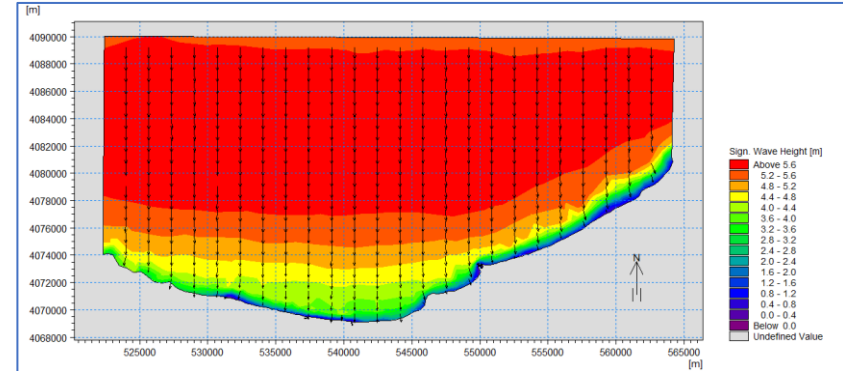
Champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Est (20ans)



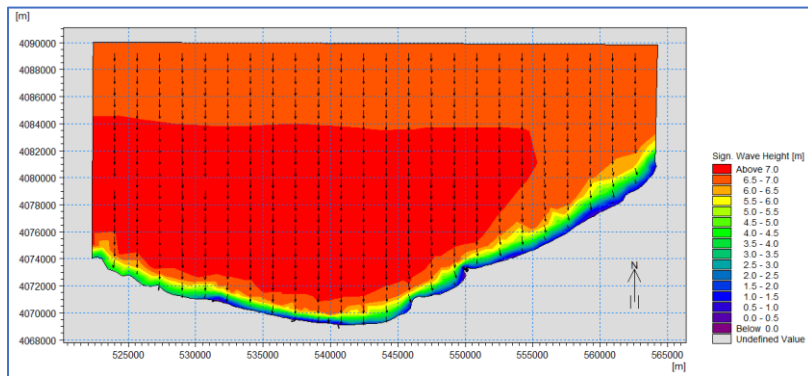
Champs des houles dans la baie d'Alger pour la direction Nord Nord-Est (50ans)



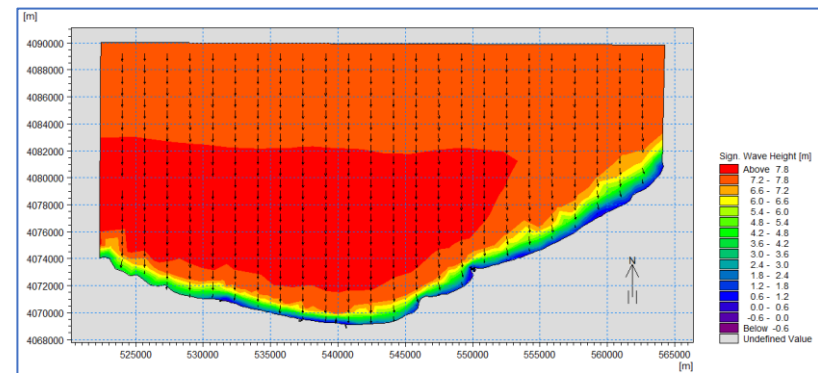
Champs des houles dans la baie de Zemmouri pour la direction Nord (2ans)



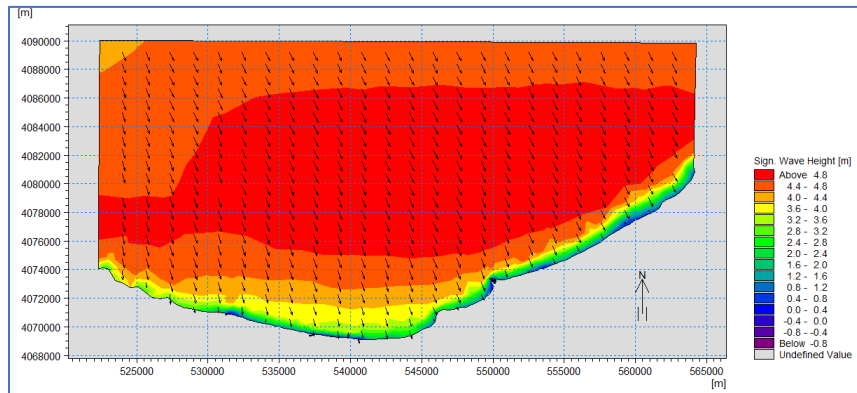
Champs des houles dans la baie de Zemmouri pour la direction Nord (5ans)



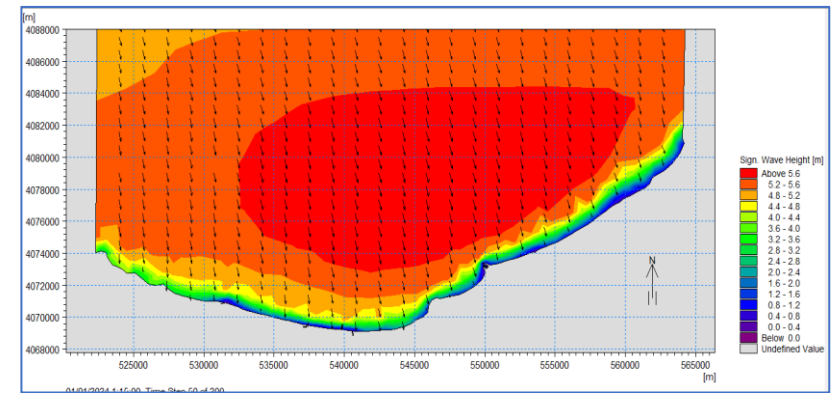
Champs des houles dans la baie de Zemmouri pour la direction Nord (20ans)



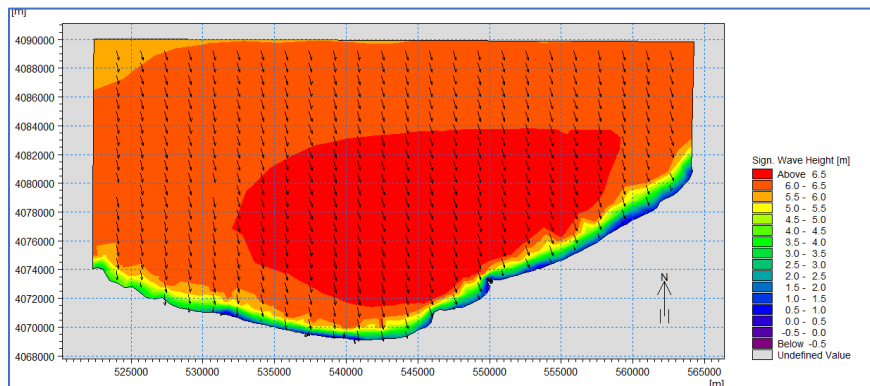
Champs des houles dans la baie de Zemmouri pour la direction Nord (50ans)



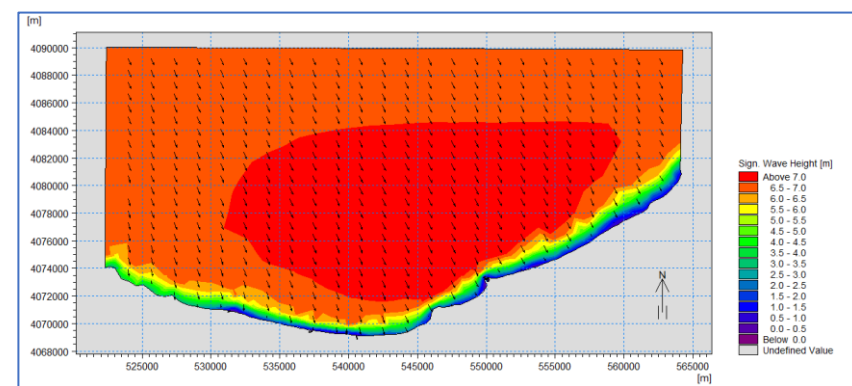
Champs des houles dans la baie de Zemouri pour la direction Nord Nord-Ouest (2ans)



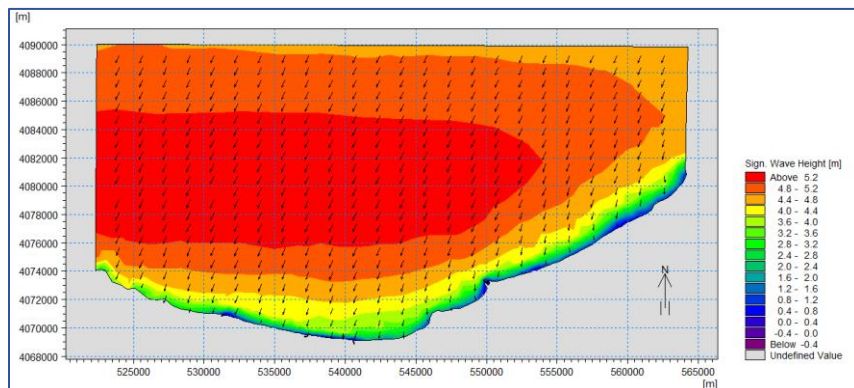
Champs des houles dans la baie de Zemouri pour la direction Nord Nord-Ouest (20ans)



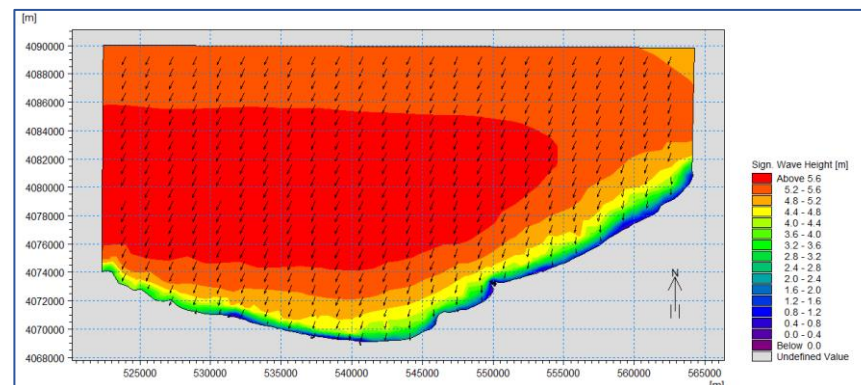
Champs des houles dans la baie de Zemouri pour la direction Nord Nord-Ouest (20ans)



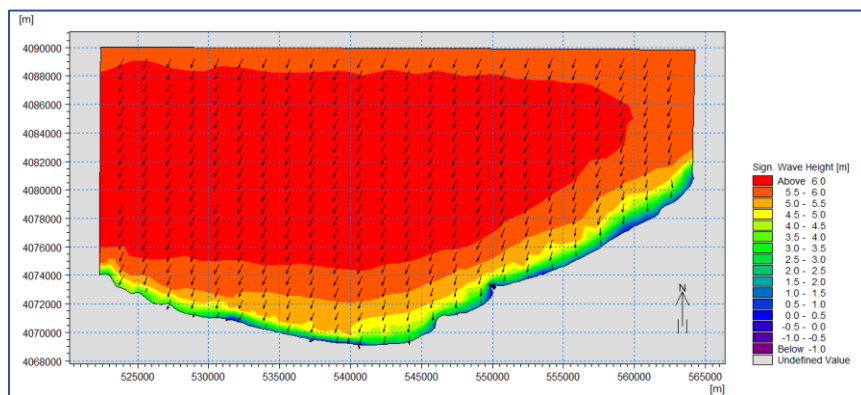
Champs des houles dans la baie de Zemouri pour la direction Nord Nord-Ouest (50ans)



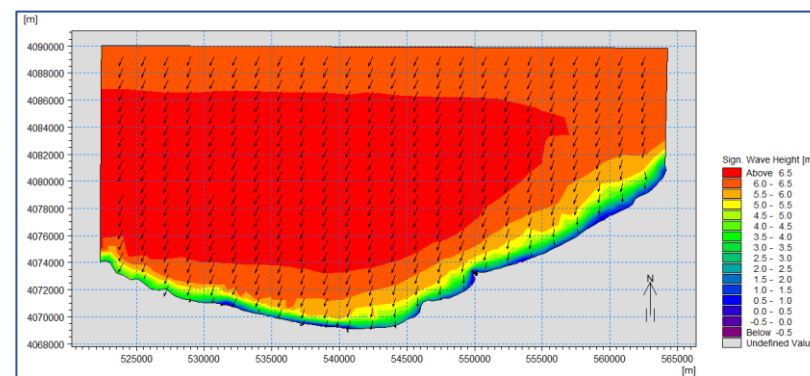
Champs des houles dans la baie de Zemouri pour la direction Nord Nord-Est (2ans)



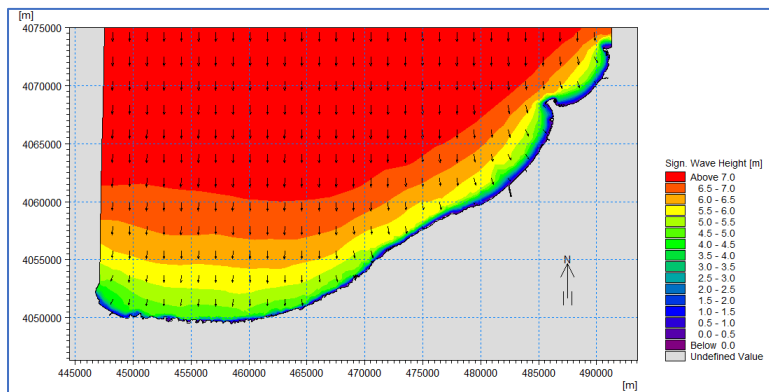
Champs des houles dans la baie de Zemouri pour la direction Nord Nord-Est (5ans)



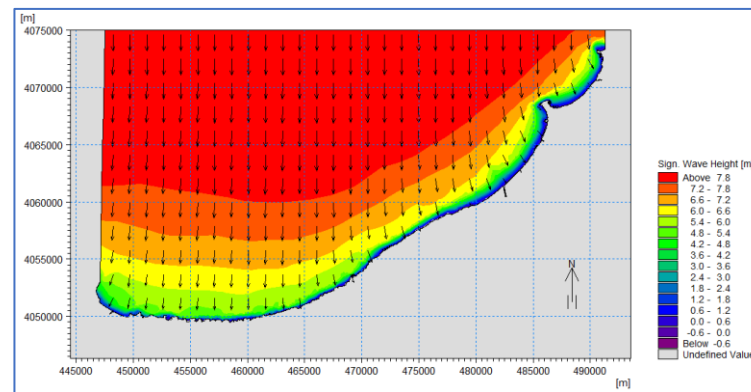
Champs des houles dans la baie de Zemouri pour la direction Nord Nord-Est (20ans)



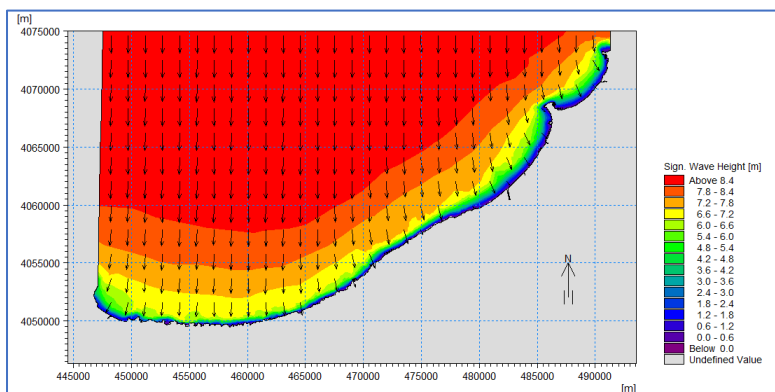
Champs des houles dans la baie de Zemouri pour la direction Nord Nord-Est (50ans)



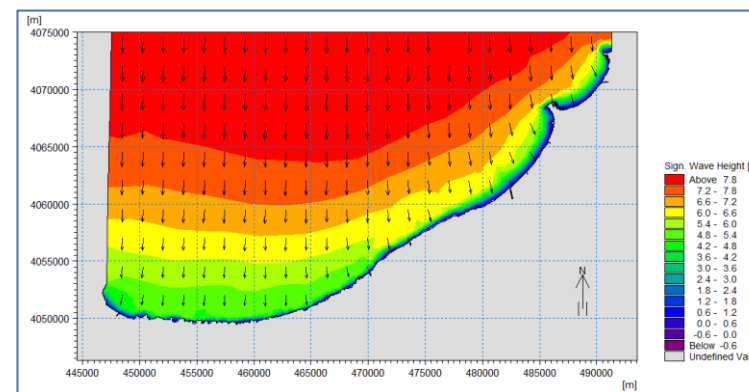
Champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord (2ans)



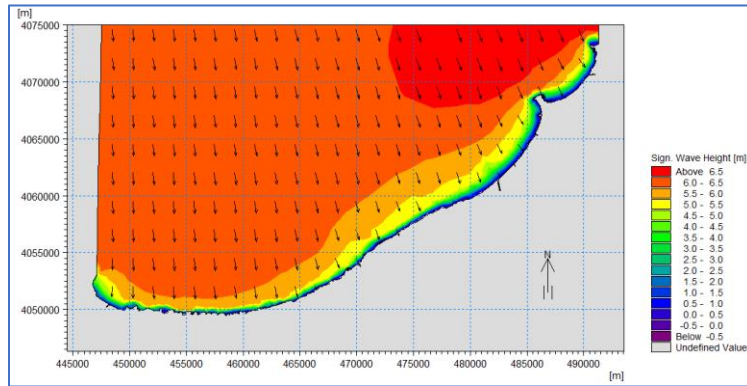
Champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord (5ans)



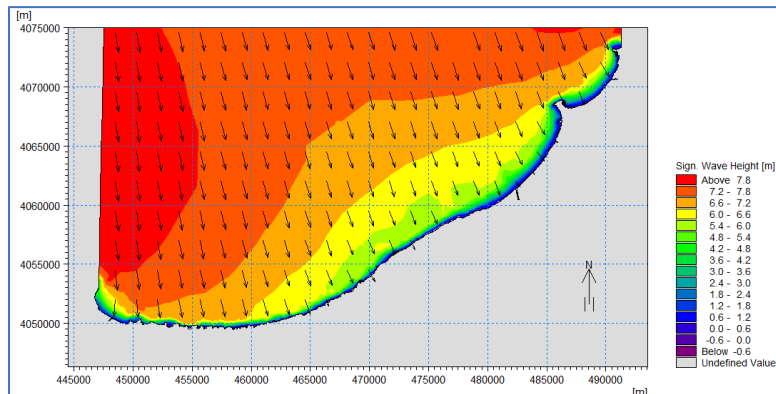
Champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord (20ans)



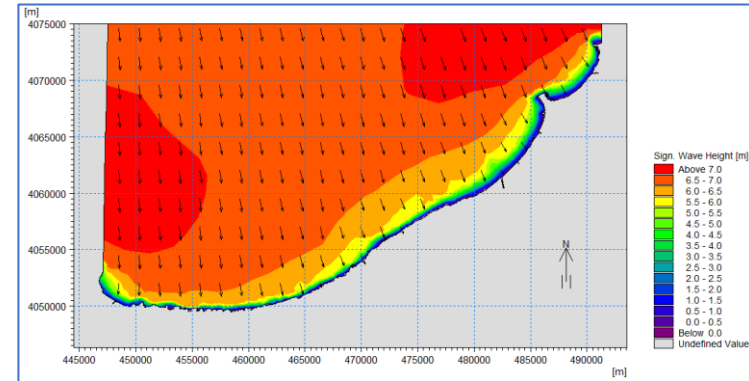
Champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord (50ans)



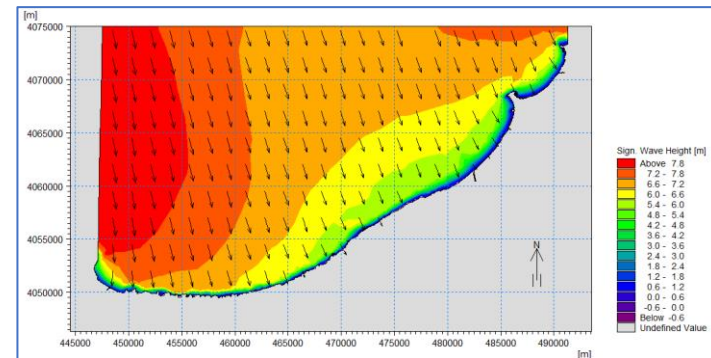
Champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord Nord-Ouest (2ans)



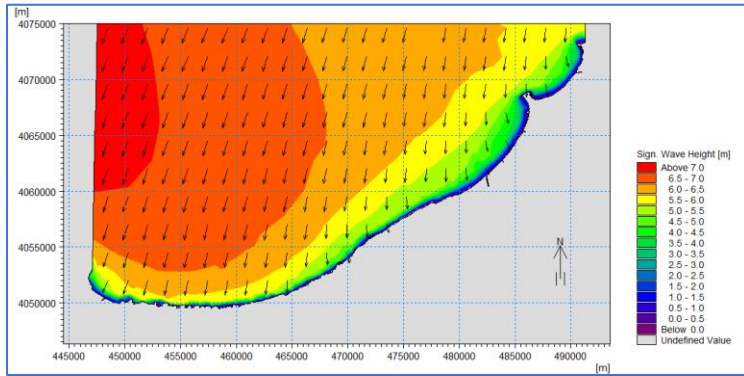
Champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord Nord-Ouest (20ans)



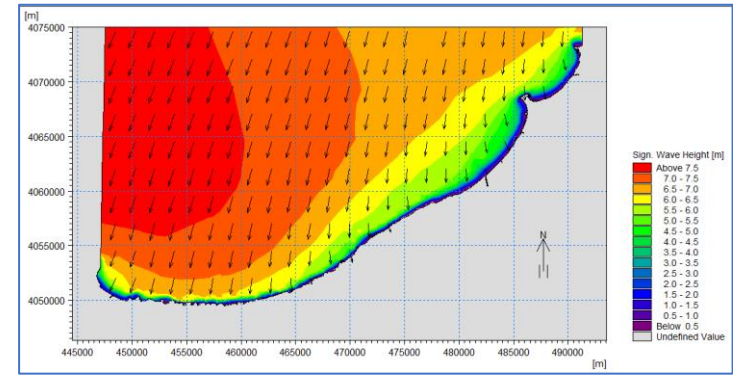
Champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord Nord-Ouest (5ans)



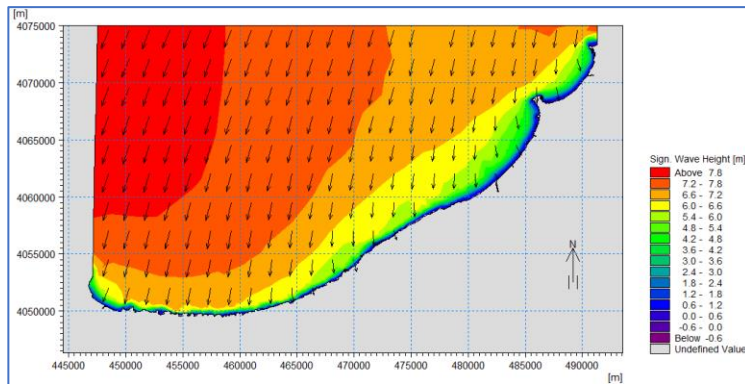
Champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord Nord-Ouest(50ans)



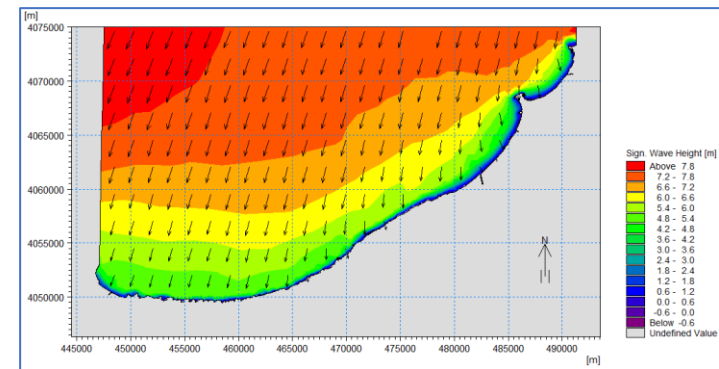
Champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord Nord-Est (2ans)



Champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord Nord-Est (5ans)



Champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord Nord-Est (20ans)



Champs des houles dans la baie de Bousmail pour la direction Nord Nord-Est (50ans)

Résumé

Ce mémoire de fin d'étude porte sur la modélisation des impacts des événements météorologiques extrêmes sur les ouvrages maritimes portuaires et de protection dans la zone englobant la baie d'Alger, baie de Bousmail et baie de Zemmouri. Mon étude a débuté par une analyse détaillée des données océanographiques et climatiques, incluant la propagation de la houle, la direction et la vitesse des vents, ainsi que d'autres paramètres météorologiques pertinents. Ensuite, On a procédé à une caractérisation exhaustive des ouvrages maritimes présents dans la zone d'étude, en évaluant leur structure, localisation et dimension

On a modélisé les événements extrêmes, en utilisant les modèles de valeurs extrêmes généralisées (GEV), ce qui nous a permis de simuler des événements météorologiques sur différentes périodes de retour. On a ensuite réalisé des simulations numériques afin de prédire les impacts potentiels de ces événements sur les ouvrages maritimes. Enfin, On a évalué la performance hydraulique de ces structures en conditions extrêmes, afin de déterminer leur résilience et d'identifier les améliorations possibles.

Mots-clés : événements météorologiques extrêmes, modélisation, ouvrages, simulations numériques, performance hydraulique.

Summary

This final year dissertation focuses on modeling the impacts of extreme weather events on port and protective maritime structures within the Algiers Bay, Bousmail Bay, and Zemmouri Bay areas. We commenced with an extensive analysis of oceanographic and climatic data, encompassing wave propagation, wind direction and speed, and other pertinent meteorological parameters. Following this, we conducted an in-depth characterization of the maritime structures in the study area, evaluating their design, location, and dimensions.

To model extreme weather events, we utilized Generalized Extreme Value (GEV) models, which allowed us to simulate these events over various return periods. We then performed numerical simulations to forecast the potential impacts of these extreme events on the maritime structures. Finally, we assessed the hydraulic performance of these structures under extreme conditions to determine their resilience and identify potential improvements.

Keywords: extreme weather events, modeling, maritime structures, numerical simulations, hydraulic performance.

ملخص

يتناول هذا البحث النهائي نمذجة تأثير الأحداث الجوية القصوى على المنشآت البحرية المينائية والحماية في مناطق خليج الجزائر، خليج بوسماعيل، وخليج زموري. بدأنا بتحليل شامل للبيانات المحيطية والمناخية، بما في ذلك انتشار الأمواج، واتجاه الرياح وسرعتها، وغيرها من المعايير الجوية ذات الصلة. بعد ذلك، أجرينا توصيفاً دقيقاً للمنشآت البحرية في منطقة الدراسة، حيث قمنا بتقييم تصميمها، وموقعها، وأبعادها

، مما أتاح لنا محاكاة هذه الأحداث على (GEV) لنمذجة الأحداث الجوية القصوى، استخدمنا نماذج القيم القصوى المعممة فترات عودة مختلفة. ثم قمنا بإجراء محاكاة رقمية للتنبؤ بالتأثيرات المحتملة لهذه الأحداث القصوى على المنشآت البحرية.

وأخيراً، قمنا بتقييم الأداء الهيدروليكي لهذه المنشآت في ظل الظروف القصوى لتحديد مدى قدرتها على الصمود وتحديد التحسينات الممكنة.

الكلمات المفتاحية: الأحداث الجوية القصوى، النمذجة، المنشآت البحرية، المحاكاة الرقمية، الأداء الهيدروليكي