

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



*Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur
d'Etat en Sciences de la Mer*

Option : Gestion et Protection du Littoral

Thème

*L'impact de la submersion marine sur les différents ouvrages de
protection et les littoraux*

Réalisé et soutenu par :

AITYOUCF Melissa

&

MAZOUZ Mountaha

Soutenu le 07/09/2023, devant les jurys :

- | | | |
|-------------------|--------------|-----------------------|
| 1. MEZOUAR.K | président | professeur |
| 2. DAHMANI .A | promoteur | Maitre de conférences |
| 3. SALEM CHERIF.Y | examinatrice | Maitre Assistante |
| 4. ALLOUACHE | examinatrice | Maitre de conférrence |
| 5. | | |

Année universitaire : 2022-2023

Table des matières :

INTRODUCTION GENERALE :	1
CHAPITRE I : GENERALITES	2
1. LE SYSTEME LITTORAL	2
2. HYDRODYNAMIQUE LITTORALE	2
2.1. Les vagues	2
2.2. Onde infra-gravitaire	3
2.3. Les houles :	4
2.3.1. Déferlement de la houle	4
2.3.2. Propagation et dissipation de la houle	5
□ La réfraction de la houle :	5
□ La diffraction de la houle :	5
□ La réflexion de la houle	5
□ Franchissement de la houle	5
2.4. Les courants côtiers	6
3. LES EVENEMENTS EXTREMES	7
3.1. Les tempêtes	7
3.1.1. Tempête en méditerranée	7
3.2. Les tsunamis	7
3.3. Submersion marine	8
□ Les phénomènes responsables des variations du niveau marin :	9
CHAPITRE II : CADRE GENERAL ET PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	12
1. CADRE GEOGRAPHIQUE	12
1.1. Localisation géographique du site d'étude	12
2. CADRE GEOLOGIQUE	13
2.1. Lithologie de la baie d'Alger	13
2.2. La sismicité dans la région d'Alger	13
4. CADRE CLIMATIQUE	15
4.1. Température	15
4.2. Précipitations	16
4.3. Le vent	17
5. CADRE OCEANOGRAPHIQUE	20
5.1. Les houles	20
5.2. Les marées	23
6. CADRE HYDROGRAPHIQUE	23
7. CARACTERISTIQUE ET OUVRAGES DE PROTECTIONS EXISTANTS	24
8. PLAN DE MASSE DE LA ZONE D'ETUDE :	25
8.1. Caractéristiques des ouvrages de protection de la zone d'étude :	25
CHAPITRE III : ANALYSE DES EVENEMENTS EXTREMES	28
2. THEORIE DES VALEURS EXTREMES	28
3. METHODES DES VALEURS EXTREMES	28
3.1. Méthode des blocs maximas	29
3.1.1 Loi GEV (GeneralizedExtreme Value) et méthode des blocs maximas	29

3.1.2	Résultats GEV avec la distribution de Gumbel.....	31
3.1.3	Résultats GEV avec la distribution de Weibull.....	32
3.2.	Method Peaks Over Threshold (POT)	33
4.	COMPARAISON ENTRE LA METHODE BLOC MAXIMUM (GEV) ET POT	38
5.	CONCLUSION.....	39
CHAPITRE IV : MODELISATION NUMERIQUE.....		41
1.	INTRODUCTION.....	41
2.	MODELISATION NUMERIQUE	41
2.1.	Présentation du modèle	42
2.1.1.	MIKE21-SW (Spectral Waves).....	42
2.1.2.	MIKE21-HD (Hydro-dynamic model).....	46
2.1.3.	Modèle FM MIKE21/3 Coupled model	47
3.	CREATION D'UNE BATHYMETRIE SOUS UN MAILLAGE :.....	48
GENERATION DE LA MESH.....		49
3.1.	Mesh et bathymétrie résultante :	49
3.2.	Bathymétrie de la baie d'Alger.....	50
3.3.	Bathymétrie de la zone des Sablettes.....	51
4.	SCENARIO DE SIMULATION :	52
5.	RESULTATS DE SIMULATIONS	53
5.1.	Interprétation des résultats de la simulation numérique.....	62
5.2.	Interprétation des résultats de la simulation numérique du modèle HD.....	63
6.	CONCLUSION.....	64
CHAPITRE V : SUBMERSION MARINE.....		65
1.	INTRODUCTION.....	65
2.	LA SUBMERSION MARINE.....	65
A.	LE FACTEUR RESPONSABLE A LA SUBMERSION	65
B.	LES DIFFERENTS MODES DE SUBMERSIONS MARINES :	68
3.	METHODOLOGIE DU TRAVAIL :	68
3.1.	Les scénarios du niveau d'eau extrême :	69
3.2.	Calcul des niveaux extrêmes :.....	70
4.	SCENARIOS D'INONDATION :	75
5.	RESULTATS DE LA CARTOGRAPHIE DE LA SUBMERSION :	78
6.	FRANCHISSEMENTS DES VAGUES	81
6.1.	Formulations générales	81
6.2.	Modélisation numérique de franchissement	83
6.2.1.	Présentation du CRESS	84
6.2.3.	Résultats de calcul des données d'entrée :	87
6.2.4.	Les résultats obtenus fichier de sorties du Cress.....	87
7.	L'IMPACT DE LA SUBMERSION MARINE SUR LES LITTORAUX ET LES INFRASTRUCTURES : 90	
8.	LES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES LITTORAUX	91
9.	Conclusion :	92

Liste des figures

Figure 1: Représentation des grandeurs caractéristiques des vagues (GRASSO,2009).....	3
Figure 2 : Représentation schématique des différents types d'ondes qui affectent la surface des mers et océans sur Terre (Davis et Fitzgerald, 2004).....	3
Figure 3 : Formation de la houle par le vent au large.(Paris F., 2017).....	4
Figure 4 : La morphologie en 3D du système littoral et des courants côtiers. Les flèches noires indiquent les différents types de courants induits par le déferlement des vagues à	6
Figure 5 : les facteurs responsables d'un tsunami. (Centre d'alerte aux tsunamis).....	8
Figure 6 : Processus physiques en action lors d'une tempête : agitation et surélévation du plan d'eau. (A.STEPANIAN, 2014)	9
Figure 7 : carte de la situation géographique de la zone d'étude « Les Sablettes).....	12
Figure 8 : carte géologique de la Mitidja (Bennie et Partners, 1983).....	13
Figure 9 : Interprétation 3D des principales failles Offshore/onshore de la région d'Alger...	14
Figure 10 : Variations des températures maximales, moyennes et minimales de la cote algéroise (1992-2020) (infoclimat)	16
Figure 11 : Histogramme des taux de précipitations par mois au niveau de la baie d'Alger entre 1992-2020 (infoclimat).....	16
Figure 12 : Roses des vents annuelles et saisonnières enregistrées pour la période 1990 – 2020.(INFOPLASA)	18
Figure 13 : Roses des vents mensuelles enregistrées pour la période 1990-2020.(info-plasa)	19
Figure 14 : Roses des houles mensuelles enregistrées pour la période 1990 – 2020. (infoplasa)	21
Figure 15 : Roses des houles annuelles et saisonnières enregistrées pour la période 1990 – 2020.(infoplasa).....	22
Figure 16 : Vue satellitaire du site d'étude (Google Earth, 2022)	24
Figure 17 : plan de masse de la Grande plage (Étude de l'aménagement modifié de la plage artificielle de sablette, 2018)	25
Figure 18 : Profil en long de la cote de la grande plage (Étude de l'aménagement modifié de la plage artificielle de sablette, 2018).....	27
Figure 19 : Schéma représentatif des méthodes blocks maxima et POT.	29
Figure 20: Représentation de méthode des Blocs Maximas sur les hauteurs de houle de 1992 – 2020	31
Figure 21: Estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour l'omnidirectionnel	32
Figure 22 : Estimation des événements extrêmes via la distribution de Weibull pour l'omnidirectionnel	32
Figure 23: Comparaison des résultats obtenu avec les deux méthode GEV (Gumbel et Weibul).....	33
Figure24 : Moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelle de l'enregistrement.....	35
Figure 25 : Représentation de méthode POT sur les hauteurs de houle de 1990 – 2020.	35
Figure 26 : Représentation de méthode POT sur les hauteurs de houle de 1990 – 2020.	36
Figure 27: Estimation des événements extrêmes via la distribution POT omnidirectionnel (seuil=3)	36

Figure 28: Estimation des événements extrêmes via la distribution POT omnidirectionnel (seuil=3)	37
Figure 29 : comparaison des résultats obtenus avec la méthode POT pour des deux seuils de 3 et 4m.....	38
Figure 30: Comparaison des résultats obtenu avec les deux méthode POT et GEV.	39
Figure 31 : maillage de la mesh à échelle de la baie d'Alger.....	50
Figure 32: maillage de la mesh à échelle des Sabletteset de la Grande plage.....	50
Figure 33: Bathymétrie de la baie d'Alger	51
Figure 34 : Carte bathymétrique de la zone d'étude « Grande Plage ».....	52
Figure 35 : Champs des houles dans la Baie d'Alger et la zone d'étude de direction NNE et WNW pour la période de retour de 5ans.....	54
Figure 36 : Carte de l'élévation de la surface de la mer dans la Baie d'Alger et la zone d'étude de direction NNE et WNW pour la période de retour de 5ans.....	55
Figure 37 : Champs des houles dans la Baie d'Alger et la zone d'étude de direction NNE et WNW pour la période de retour 10ans.....	56
Figure 38 : Carte d'élévation de surface dans la Baie d'Alger et la zone d'étude de direction NNE et WNW pour la période de retour 10ans	57
Figure 39 : Champs des houles dans la Baie d'Alger et la zone d'étude de direction NNE et WNW pour la période de retour 50ans.....	58
Figure 40 : Carte d'élévation de surface dans la Baie d'Alger et la zone d'étude de direction NNE et WNW pour la période de retour 50ans	59
Figure 41 : Champs des houles dans la Baie d'Alger et la zone d'étude de direction NNE et WNW pour la période de retour de 100ans.....	60
Figure 42 : Carte d'élévation de surface dans la Baie d'Alger et la zone d'étude de direction NNE et WNW pour la période de retour 100ans	61
Figure 43: les phénomènes météorologiques responsables de la submersion marine.....	66
Figure 44 : Principaux processus météo-océanographiques engendrant une surcote de tempête.	67
Figure 45 : Distribution hypothétique de la surcote au long d'une côte se trouvant sur la trajectoire d'un ouragan (dans l'hémisphère Nord). La surcote est plus importante sur le côté droit de la trajectoire de l'ouragan car les vents sont dirigés vers la côte, contrairement au côté gauche où les vents sont dirigés vers le large, entraînant une décote (modifié d'après Liu, 2004).....	68
Figure 46 : phénomènes responsables de l'élévation de la surface de la mer (Paris, 2017) ...	70
Figure 47 : vue topographique en 3D sous un fond mnt	76
Figure 48 : Carte d'occupation du sol de la zone de la zone d'étude.....	76
Figure 49 : carte de vulnérabilité à la submersion marine avec un scénario de run-up à 2%	78
Figure 50 : carte de vulnérabilité à la submersion marine avec un scénario de run-up à 0.1%	79
Figure 51 : Interface web du CRESS	85
Figure 52: la fiche de sortie CRESS pour une période de retour de 5ans	87
Figure 53: La fiche de sortie du CRESS pour la période de retour 10ans	88
Figure 54: la fiche de sortie du CRESS pour une période de retour de 50ans	88
Figure 55 : la fiche de sortie du CRESS pour la période de retour 100ans.....	89

Liste de tableaux

Tableau 1: tableau récapitulatif de l'ensemble des résultats obtenu par la méthode GEV selon la distribution de Gumbel et Weibull	33
Tableau 2 : les inputs des simulations pour l'ensemble des périodes de retours.	53
Tableau 3 : valeurs de la surélévation du niveau de la mer pour chaque période de retour direction NNE	71
Tableau 4 : Calcul des paramètres responsable dans l'élévation du niveau marin	74
Tableau 5: valeurs de Run up calculés à 0,1% et a 2% au pied de l'ouvrage et à la plage	76
Tableau 6 : Résultat de Calcul de niveau d'eau extrême au pied de l'ouvrage.....	77
Tableau 7 : Résultat de Calcul de niveau d'eau extrême à l'intérieur de la plage	77
Tableau 8: Le calcul des données d'entrée pour le logiciel CRESS	87
Tableau 9: valeurs des volumes franchissement obtenues	89

Liste des abréviations :

BM	Block-Maximum
DHI	DanishHydraulic Institute
GEV	Valeurs Extrêmes Généralisées (GeneralizedExtreme Values).
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Evaluation du Clima
GPD	Distributions de Pareto Généralisées (Generalized Pareto distributions).
HD	Hydro-dynamique
LEM	Laboratoire des études maritimes
MNT	Modèles Numériques de Terrain
NGA	Niveau Général Algérien
NMM	Niveau Moyen des Mers
POT	Peak-Over-Threshold.
SIG	System d'Information Géographique
SW	Spectral Wave
WGS	Systèmes Géodésique Mondial (World Geodetic System 1984)

Remerciement :

*Au terme de ce travail, nous remercions **ALLAH** tout puissant de nous avoir offert l'opportunité de franchir ce stade du savoir et de nous avoir donné le courage et la persévérance pour réaliser ce travail.*

Nous adressons nos remerciements en particulier à nous-même ; nos parents pour leur soutien tout au long de notre parcours qui n'a pas été un long fleuve tranquille. Sans leur soutien indéfectible, le parcours parcouru, qui se termine par le présent mémoire, n'aurait jamais pu voir le jour.

*Nous remercions particulièrement notre promoteur M. **DAHMANI A.** qui nous a encadré pendant la période de la réalisation de ce travail. Pour sa disponibilité, malgré ses responsabilités administratives, pour ses orientations, son soutien qui nous a permis de mener à bien ce travail.*

Je remercie spécialement Mr Otmani pour ses commentaires constructifs pour son

*On exprime nos remerciements à l'ensemble de la famille **ENSSMAL** (l'ensemble de nos profs, amis et collègues depuis le début de l'aventure **ENSSMAL** en 2018 et envers l'ensemble de nos enseignants qui nous ont formé bien avant) qui nous ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de notre démarche commencer il y a 18 ans.*

*J'adresse aussi mes chaleureux remerciements aux ingénieurs **Hattabi M. Khanfar L. Saadoun N. Lyzidi H. Sehibi A.***

Et à la fin je remercie ma binôme pour sa confiance, son soutien inestimable et surtout pour les agréables moments passés ensemble.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A celle qui m'a transmis la vie, l'amour, le courage, à toi ma chère Maman Nora , aucune dédicace ne serait exprimée l'amour l'estime Le dévouement et le respect que j'ai toujours pour toi, que dieu te procure bonne santé et longue vie.

A mon très chère Père RACHID : votre amour, votre sagesse et votre soutien ont illuminé ma vie. Vous êtes mon modèle, mon confident et ma source d'inspiration.

Cette dédicace est un modeste témoignage de l'amour et de la gratitude que je ressens envers vous. Vous êtes la personne la plus importante dans ma vie, et je suis honorée de de vous avoir comme père. Merci pour tout ce que tu fais et pour tout ce que vous êtes-vous prières et votre bénédiction m'ont été d'un

Grand secours pour mener à bien mes études. A mes deux diamantines DIDA et MIRa

Une dédicace spéciale à mon petit poussin Chihab

A mes Grands-mères , mes tantes spécialement Hindouha , mes ancles

Un spéciale dédicace a Roufaïda , riham Yara , Lilia, toufik, Rami. Obaida, Ayhem

Je didie ce travail aussi à ma belle Rahma ; Misssou ; Abir .

khayra ; Salima, Ferial, hadil , Manar, Asma, Ayoub

Spécialement mes collègues et ma promotion GPL 2018

Mountaha

Dédicace

À mes chers parents, Anissa et Ramdane, Votre sacrifice et votre soutien inconditionnel ont été ma force. Je vous dédie ce mémoire avec tout mon amour, ma seule et unique aspiration dans la vie est de vous rendre fiers.

À ma sœur Céline et mes frères, Adam et Mouloud, Votre présence a été mon réconfort constant. Je suis fière de vous avoir comme famille.

À mes grand-mères, pour leurs encouragements et prières,

À Larbi Rachedi, ma source d'inspiration, mon étoile polaire vers le succès, celui qui m'a toujours tiré vers le haut

À Mountaha Mazouz, ma binôme, votre gentillesse et sérieux ont enrichi notre travail.

A mon ami Saïd, pour son soutien moral.

À mes camarades, Nadir et Hamza et Wassila votre aide précieuse a été inestimable.

À mes copines de chambre, Ferial et Hadil,

Ce mémoire est dédié à vous tous, pour votre amour et votre soutien.

Avec gratitude,

Melissa Aityoucef.

Introduction générale :

Les littoraux sont des environnements sensibles ; fragiles, et complexes où de multiples facteurs évolutifs se manifestent par des agissements, et des forçages hydrodynamiques : les courants, les vagues, les tempêtes, le changement climatique, et les activités humaines entraînant une évolution rapide (érosion ou accrétion) par le développement (barrages, ouvrages de protection du littoral, ...etc.), qui peut être causée par un ou plusieurs aléas (érosion, submersion marine, ...etc.)

Le littoral Algérien est un littoral particulièrement vulnérable en ce qui concerne les risques côtiers, il est soumis à un recul important dans environ 50% des côtes dont plus de 75% sont des plages sableuses (Boutiba, 2006). Dans un contexte de changements climatiques, on assiste actuellement à une hausse du niveau marin relatif de 1 à 2 mm/an depuis un siècle (GIEC, 2001) et de 3,1 mm/an depuis la dernière décennie (PIRAZZOLI, 1989), et son évolution morphologique future va être fortement dépendante de l'élévation du niveau de la mer attendue au cours du XXI^{ème} siècle. C'est également un littoral où les questionnements et initiatives sont nombreux et nécessitent une action coordonnée des acteurs publics, en termes de gestion de la bande littorale et d'exposition au risque d'érosion des plages et de submersion marine.

Le présent mémoire de projet de fin d'études s'intéresse à l'étude d'impact des phénomènes de la submersion marine sur les ouvrages de protection et les littoraux cas d'étude de la région Algéroise (les Sablettes). Nous verrons dans le :

Chapitre I : est consacré à la synthèse des connaissances nécessaires pour traiter ce sujet. Il dresse un état de l'art concernant les concepts et les outils théoriques qui permettent de comprendre et d'expliquer le système côtier, la morpho-dynamique côtière, l'hydrodynamisme, et la submersion marine.

Chapitre II : présentation du site d'étude et description des aspects généraux du milieu ; la topographie, la géologie, la géomorphologie, l'hydrologie et les conditions naturelles y compris les vents, les courants, et les houles et l'ensemble des ouvrages dans la zone.

Chapitre III : porte à l'étude des événements extrêmes via la théorie des valeurs extrêmes.

Chapitre IV : se focalise sur la modélisation de la réfraction de la houle du large vers la côte. Commencent par la détermination du modèle ainsi que la réalisation de la bathymétrie et la détermination des conditions de projet à simuler.

Chapitre V : est consacré pour l'étude et le calcul des scénarios d'inondation et aussi la cartographie de l'aléa de la submersion marine.

Chapitre I : Généralités

1. Le système littoral

Le littoral est un lieu de convergence où se rencontrent le continent, l'océan et l'atmosphère. Ces trois environnements interagissent de manière complexe et sont régis par de multiples processus physiques qui se produisent à l'interface du littoral (BOAK, 2005).

2. Hydrodynamique littorale

L'hydrodynamique littorale est un domaine complexe où de nombreux agents de circulations hydrodynamiques interagissent. Ces interactions se manifestent sous la forme de phénomènes oscillatoires à différentes échelles spatio-temporelles (DIDIER RIHOUEY, 2004). La topographie des fonds marins joue un rôle important dans la transformation des vagues lors de leur propagation, conduisant à une zonation du domaine côtier et de la plage. Cette zonation peut être divisée en plusieurs zones :

- ✓ La zone du large (offshore zone) : les vagues ne subissent aucune déformation liée à la topographie des fonds marins.
- ✓ La zone de levée (*shoaling zone*) : caractérisée par une augmentation de la hauteur des vagues H et une diminution de leur longueur d'onde L .
- ✓ La zone des brisants (surf zone) : où le déferlement des vagues se produit lorsque la profondeur d'eau devient faible devant la hauteur des vagues.
- ✓ La zone de *swash* (*swash zone*) : c'est le lieu où se manifestent les processus de jet de rive et la nappe de retrait.

2.1. Les vagues

La vague est une onde de gravité qui se propage à la surface des océans et caractérisée par des paramètres physiques tels que la hauteur H (m), l'amplitude A (m) ($H = 2A$), la période T (s), la longueur d'onde L (m) et le nombre d'onde K . La vague est créée par un transfert de quantité d'énergie de l'air vers l'eau. Lorsque la vague atteint le rivage, son amplitude varie en fonction du relief sous-marin et de la configuration morphologique du rivage. La houle n'est pas influencée par le fond dans sa propagation vers la côte jusqu'à une profondeur égale à la moitié de sa longueur d'onde ($L/2$). Au-delà de cette limite ($L/2$), le fond impose une contrainte à l'onde de surface. Il se produit une dissipation d'énergie par frottement. Ses caractéristiques physiques sont modifiées (seule la période reste constante), et les crêtes deviennent de plus en plus dissymétriques. Ce phénomène est appelé

levée de la vague (shoaling). Les vagues vont déferler avec plus ou moins d'intensité en fonction de la pente locale du fond. (Beji, 2020)

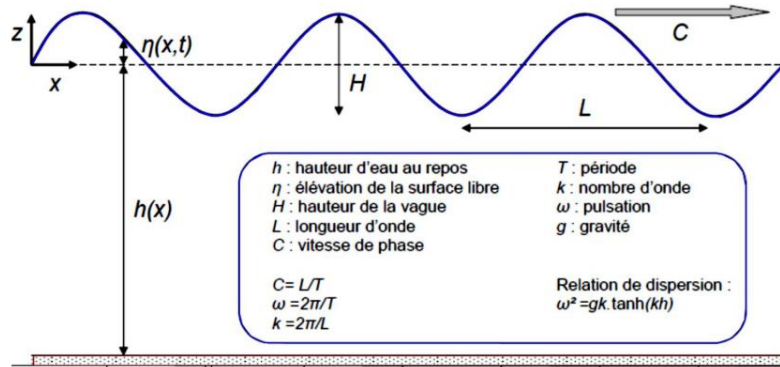


Figure 1: Représentation des grandeurs caractéristiques des vagues (GRASSO,2009).

2.2. Onde infra-gravitaire

Le spectre des vagues à la côte peut contenir des vagues dont la période est supérieure à 20 secondes. Elles sont appelées vagues infra-gravitaires. Du fait de leur faible cambrure, elles ne déferlent pas et peuvent être présentes dans la zone de swash. L'amplitude des vagues infra-gravitaires est de l'ordre du centimètre en domaine profond (Webb, 1991). Elle s'accroît progressivement jusqu'à atteindre plusieurs dizaines de centimètres à proximité de la ligne de rivage (Guza, 1982). L'énergie des vagues infra-gravitaires est dépendante de l'énergie incidente (Tucker, 1950). Typiquement, l'amplitude des vagues infra-gravitaires est comprise entre 20 et 60 % de celle des vagues de courtes périodes mesurées au large.

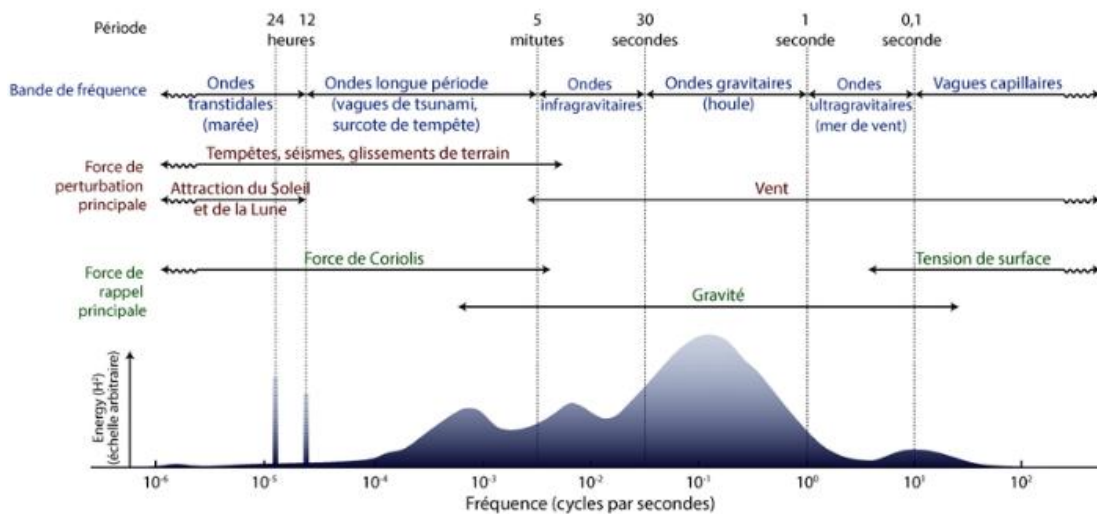


Figure 2 : Représentation schématique des différents types d'ondes qui affectent la surface des mers et océans sur Terre (Davis et Fitzgerald, 2004).

2.3. Les houles :

La houle est un mouvement ondulatoire de la surface de la mer. On distingue la houle créée au large, générée localement par le vent qui règne (mer du vent ou clapots). Les houles jouent un rôle important dans la morphogenèse côtière (érosion, transport et dépôt). La houle se manifeste sous forme d'une série de vagues se propageant le long de l'interface entre l'eau et l'air ((Bonnefill, 1992)).

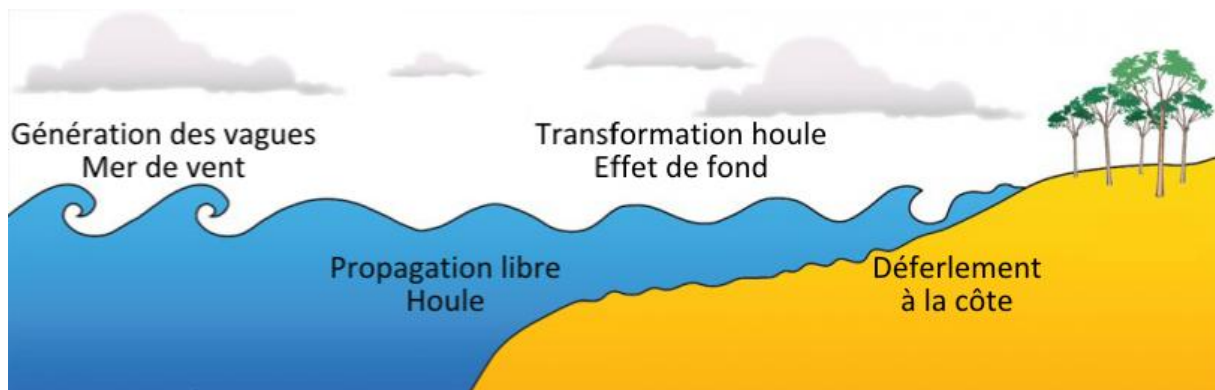


Figure 3 : Formation de la houle par le vent au large.(Paris F., 2017)

2.3.1. Déferlement de la houle

Pour comprendre le phénomène de déferlement des vagues, il est important d'introduire le concept de la cambrure d'une vague, qui est le rapport entre sa hauteur H et sa longueur d'onde L . Lorsque ce rapport atteint $1/7$ ou plus, la cambrure est considérée comme critique, et la vague devient déferlante. L'augmentation de la cambrure est causée par le ralentissement et le levage de la partie inférieure de la vague due à l'interaction avec le fond, alors que le sommet continue à se propager à une vitesse plus rapide. Cela conduit à un dépassement du sommet de la vague par rapport à sa base, suivi d'un effondrement. (Surf report, 2022).

Le déferlement se caractérise par $\xi = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{(H_0/L_0)}}$, Avec $\tan(\alpha)$ la pente de la plage et

(H_0/L_0) la cambrure de la vague au large, en eau profonde.

En se basant sur l'étude de Galvin (1968), différents types de déferlement peuvent être distingués :

- Le déferlement glissant : favorisé par les houles courtes et les pentes faibles et régulières. Les vagues commencent à se briser loin du rivage avec une crête à

l'aspect mousseux qui s'accroît lors de la progression en laissant derrière une couche d'écume. Ces vagues libèrent lentement leur énergie. Ce sont celles avec le déferlement le plus long de manière générale.

- Le déferlement plongeant : favorisé par la présence d'une houle longue et d'une pente douce (de l'ordre de quelques pourcents).
- Le déferlement Gonflant : Par très fortes pentes et longue période. Débute de la même manière que le déferlement plongeant, mais l'affaissement de l'onde se produit par la base de son profil.

2.3.2. Propagation et dissipation de la houle

- La réfraction de la houle :

Le processus de réfraction de la houle apparaît lorsqu'une onde plane se propage dans un milieu inhomogène lentement variable comme c'est souvent le cas près des côtes. En effet, les lignes de crêtes de la houle influencées par la topographie tendent à s'aligner sur les isobathes (lignes de points de même profondeur). La houle oblique par rapport aux isobathes voit sa célérité varier tout le long du front d'onde et on observe alors une "rotation" de l'onde qui s'aligne sur la direction des isobathes, parallèle à la côte (Arnaud, 2016).

- La diffraction de la houle :

Il y a diffraction à partir du moment où le champ de houle ne peut plus être décrit dans l'approximation "onde plane", localement celle-ci peut être due soit à la présence d'obstacles émergents (digue semi-infinie) ou de bathymétries fortement variables. Pour une onde harmonique se propageant par profondeur constante, autour d'un obstacle tel une avancée rocheuse ou un ouvrage de défense tel qu'un brise-lame, l'onde se propage dans l'ombre" de l'obstacle avec un mouvement circulaire et une diminution de l'amplitude des crêtes. (Arnaud, 2016).

- La réflexion de la houle

Le phénomène de réflexion intervient lorsque la houle se propage en milieu inhomogène, c'est-à-dire pour une célérité variable. Elle peut être observée en présence de fonds fortement variables, de courants inhomogènes ou de structures poreuses. La réflexion de la houle par un obstacle peut être totale lorsque l'obstacle rencontré est émergent et imperméable. En cas d'une houle oblique, la réflexion accentuera le courant littoral et de fait le transport sédimentaire local. Tous les ouvrages côtiers réfléchissent une partie de l'énergie de la houle incidente. (Arnaud, 2016).

- Franchissement de la houle

Si les niveaux extrêmes de run-up dépassent le niveau de crête, l'ouvrage va être franchi. Ceci peut se produire pour un nombre relativement faible de vagues pendant la tempête de dimensionnement et un faible taux de franchissement peut souvent être accepté sans que cela n'entraîne de graves conséquences pour l'ouvrage ou pour la zone protégée.

2.4. Les courants côtiers

Le courant est un déplacement horizontal des masses d'eau de mer dû aux effets combinés du vent, de la force de Coriolis, et de différences de température, densité et salinité ; ainsi qu'aux contours des continents, aux reliefs de profondeur et à l'interaction entre courants. Les principaux courants moyens induits par la houle peuvent être divisés de la manière suivante :

- Le courant de retour
- Le courant de dérive ou courant "long-shore"
- Le courant sagittal ou "rip current"

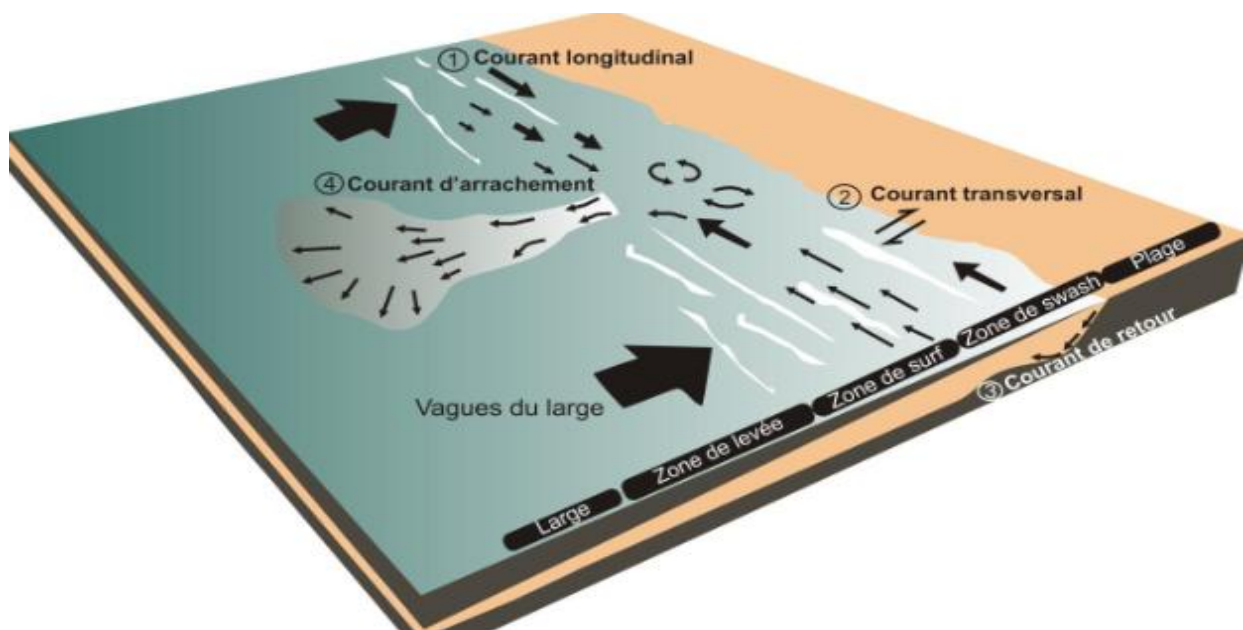


Figure 4 : La morphologie en 3D du système littoral et des courants côtiers. Les flèches noires indiquent les différents types de courants induits par le déferlement des vagues à l'approche des côtes (Short, 1999).

2.5. Les marées

La marée est un mouvement oscillatoire du niveau de la mer engendré par l'attraction de la lune et du soleil sur les particules fluides des océans (Bennallou, 2020). Dans les côtes algériennes, l'amplitude de la marée n'est pas importante, le marnage est de l'ordre de 20 à 34 cm

En Méditerranée, le détroit de Gibraltar empêche l'onde de marée de se propager tout en réduisant considérablement sa force correspondante.

3. Les événements extrêmes

Sont des phénomènes météo-marins de forte intensité affectant les littoraux, mais aussi les territoires continentaux ; Ces événements ont une capacité destructrice (érosion, vents violent, inondation) dont elles vont avoir une influence très remarquable sur la morpho dynamique côtière y compris pour le transport sédimentaire littoral.

3.1. Les tempêtes

La tempête correspond à un événement météorologique violent. Elle est caractérisée par des vents forts, souvent accompagnés de précipitations intenses. Les vents moyens dépassent les 90 km/h, même s'ils ne sont pas systématiquement mêlés à la pluie.

La formation d'un fort gradient de pression atmosphérique génère des vents violents, parfois à l'origine de gros dégâts.

3.1.1. Tempête en méditerranée

Quasiment chaque année et généralement à l'automne lorsque la mer Méditerranée est encore chaude, une dépression prend les caractéristiques d'une tempête tropicale avec des nuages enroulés autour d'un œil, une activité orageuse intense, des vents forts à la surface de l'eau et une température dans les basses couches atmosphériques plus élevée au cœur des nuages qu'à l'extérieur. Ce type de tempête qui peut éventuellement s'intensifier en cyclone s'appelle « médiane » (contraction de « Méditerranéens hurricane »). Le dernier mediceana eu lieu les 7 et 8 novembre 2011 au large des Baléares et a conduit à des vents atteignant plus de 130 km/h en rafales et à des vagues de 6 mètres sur les côtes varoises. Peu fréquent mais violent, ce phénomène peut provoquer des dégâts importants sur les côtes méditerranéennes densément peuplées(Chaboureau, 2011).

3.2. Les tsunamis

Un tsunami est provoqué par un séisme sous-marin, ou côtier se produisant à faible profondeur (moins de 50 km de profondeur) et possédant une magnitude d'au moins 6,5 est susceptible de créer un tsunami. L'amplitude du tsunami généré augmente avec la magnitude du séisme.

Les séismes dont la magnitude dépasse 8,7 comme celui du Japon du 11 mars 2011 et celui de Sumatra du 26 décembre 2004 (Mw 9,2) induisent des tsunamis majeurs qui provoquent des inondations le long des côtes de tout le bassin océanique concerné.

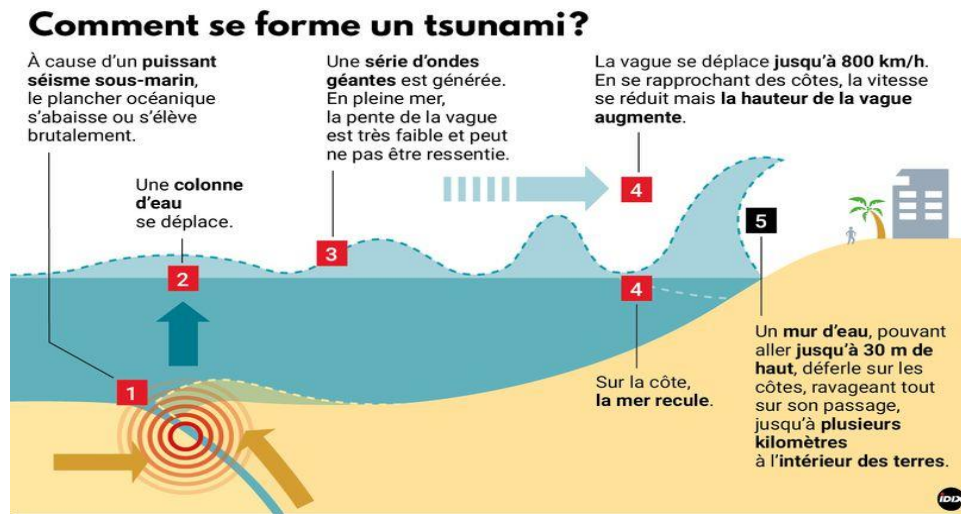


Figure 5 : les facteurs responsables d'un tsunami.(Centre d'alerte aux tsunamis, 2022)

3.3. Submersion marine

Selon (Przykluski & et Hallegatte, 2010) ; La submersion marine est définie comme une inondation temporaire de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques et marégraphiques sévères (MEEDAT, 1997). Les submersions envahissent généralement les terrains situés en dessous du niveau des plus hautes mers mais atteignent aussi parfois des altitudes supérieures si des projections d'eaux marines franchissent des ouvrages de protection et/ou la crête des cordons littoraux. Les submersions marines peuvent durer quelques heures à quelques jours (Belon, 2012).

Les processus physiques mis en jeu lors des phénomènes de tempêtes sont liés principalement à l'action de la pression atmosphérique et du vent sur le plan d'eau :

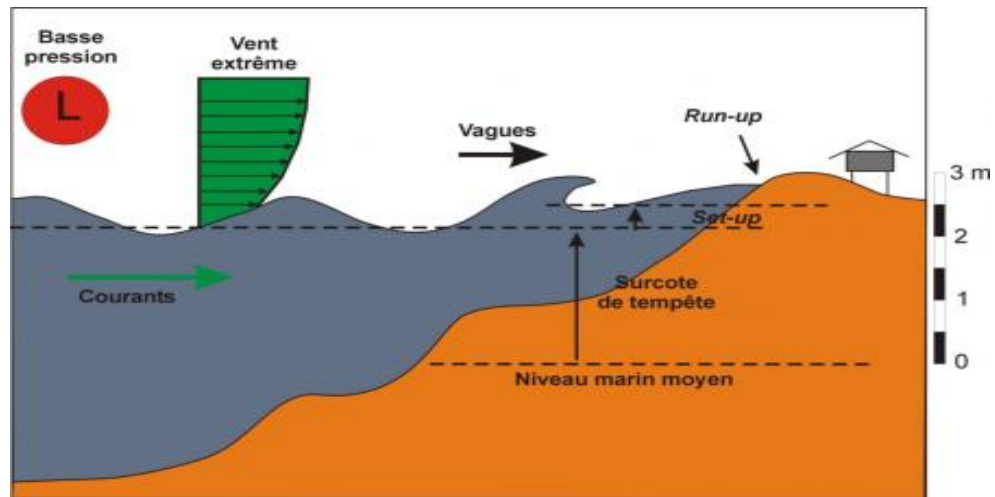


Figure 6 : Processus physiques en action lors d'une tempête : agitation et surélévation du plan d'eau.(A.STEPANIAN, 2014)

- Le vent a un double effet sur le plan d'eau :
 - Il est à l'origine de l'agitation du plan d'eau et de la formation des vagues dont les caractéristiques, hauteur, période, secteur de provenance, sont directement liées à celles du vent et au fetch du bassin maritime ;
 - Il exerce une contrainte à la surface de l'eau en générant une modification du niveau du plan d'eau statique (surcote ou décote) et des courants.

- Les vagues, générées au large par le vent, se propagent vers la côte et déferlent. Elles transfèrent alors leur énergie sur la colonne d'eau, ce qui provoque une surélévation moyenne du niveau de la mer (le « *waveset-up* », ou *set-up*, ou surcote liée aux vagues) pouvant s'élever à plusieurs dizaines de centimètres.

Le phénomène de « surcote atmosphérique » ou « surcote de tempête » est l'addition de l'effet baromètre inverse et de l'élévation du niveau du plan d'eau sous l'effet du vent. Ainsi, lors d'une tempête, le niveau moyen de la mer résulte de l'addition de la surcote atmosphérique et du set-up. Le niveau maximal atteint par la mer est défini en tenant compte du « jet-de-rive » (swash). On appelle run-up, l'altitude maximale atteinte par le jet-de-rive sur la côte.

▪ **Les phénomènes responsables des variations du niveau marin :**

Le niveau d'eau est influencé par un grand nombre de phénomènes qui se résume en :

- La marée astronomique (Plus hautes et plus basses marées astronomiques)
- Les variations saisonnières du niveau de la mer

- Le vent /houle de tempête
- La différence de pression barométrique
- L'élévation du niveau global.(DAHMANI, 2016)

4. Les ouvrages de protection

Les systèmes de protection contre les submersions marines sont sans cesse étudiés et améliorés. Il existe différentes techniques et types d'ouvrages répandus le long de nos côtes **(Bougis, 2016)**

- **Les murs côtiers** : sont des ouvrages verticaux qui servent de rempart contre le niveau de l'eau. Ils peuvent aussi être utiles pour le maintien du trait de côte. Ces ouvrages dits de "haut de plage" sont conçus pour résister aux forces exercées par les lames déferlantes.
- **Les digues** : sont des ouvrages couramment utilisés pour la protection du littoral et l'aménagement de ports. Les digues sont rattachées au rivage par au moins une extrémité, et ses deux talus sont visibles.

Tout d'abord, les digues à talus sont constituées d'un noyau relativement étanche, d'une couche à faible porosité et enfin d'une carapace en enrochement à porosité plus importante (roches naturelles ou en composite de toutes tailles comme les tétrapodes par exemple). Les digues verticales à parement plein proposent une solution pour l'accostage des navires, ce qui est impossible sur les digues à talus à cause de leurs inclinaisons. Une autre catégorie concerne les digues en caisson, parois perforés (type Jarlan).

- **Les brise-lames** :

Sont généralement de même conception que les digues mais ne sont pas rattachés à la terre. Ils sont couramment utilisés comme pièges à sédiments et sont responsables de l'accumulation de sable en aval de l'ouvrage, facilitant la formation des tombolos **(FIGURE 7.c)** qui peuvent aussi être créés par engraissement des plages. En conséquence, les plages se rechargent et s'élargissent. Les brise-lames peuvent aussi être immergés pour des soucis esthétiques et environnementaux.

- **Les épis** : sont des ouvrages transversaux qui ont pour fonction de limiter le transit hydro-sédimentaire. Ils sont dimensionnés (longueur, espacement entre plusieurs épis, orientation) en fonction du lieu d'installation (plages sableuses ou galets, profondeur

d'eau, direction de la houle incidente). En effet, les épis courts agissent essentiellement sur le transport au niveau du jet de rive. Concernant les épis longs, ils agissent également sur le transport sédimentaire associé aux courants littoraux le long de la côte.



Figure7 : Exemple d'ouvrages de protection du littoral : un mur côtier, une digue, un brise-lame, des épis. (Respectueusement

Chapitre II : Cadre général et présentation de la zone d'étude

1. Cadre géographique

1.1. Localisation géographique du site d'étude.

La baie d'Alger se trouve dans la partie centrale de la côte algérienne, entre le cap Matifou (ville de Bordj-el-Bahri) à l'est et la Pointe-Pescade (Rais Hamidou) à l'ouest. Ainsi, la mer Méditerranée au nord. Elle a la forme d'un semi-cercle presque parfait. La surface qui se trouve entre la ligne d'environ 15,27 km qui joint les deux caps et le contour périphérique de 42,46 km est de 180 km². Les coordonnées géographiques de son étendue la situent entre une longitude Est de 03°01'00'' à 03°14'30'', et une latitude Nord de 36°44'30'' à 36°49'15''.

La zone de Sablette :

La zone des Sablettes se situe dans la partie occidentale de la baie d'Alger, elle est orientée sensiblement de l'Ouest Nord-Ouest à l'Est Sud Est. Elle s'étend sur une longueur de 4.5km de l'embouchure de l'Oued el Harrach (commune de Mohammedia) à l'Est jusqu'à la station de dessalement des eaux d'El Hamma à l'Ouest (commune de Sidi M'Hamed).

La ligne de rivage se présente sous forme d'une ligne figée par une protection frontale en enrochements. Des bans sableux sont localement visibles en pied de la protection en basse mer et au gré des saisons.



Figure 7 : carte de la situation géographique de la zone d'étude « Les Sablettes ».

2. Cadre géologique

2.1. Lithologie de la baie d'Alger

Du point de vue géologique, la bande des Sablettes fait partie du Sahel sud d'Alger qui est une zone de subsidence continue. Cette dernière a donné naissance à une sédimentation active dont les éléments proviennent des reliefs de l'Atlas Blidéen. A la fin du Pliocène et du Quaternaire deux réservoirs aquifères se sont individualisés :

- L'Astien formé par des calcaires et des grès d'origine continentale
- Le Quaternaire alluvial constitue essentiellement des galets et graviers

Ces deux réservoirs sont séparés dans toute la plaine par une marne jaune semi-perméable de la formation d'Oued el Harrache, sauf au niveau de la poche de Rouïba où les deux aquifères reposent sur un substratum imperméable, généralement constitué par les marnes grises et bleues du Plaisancien. (LEM,1996)

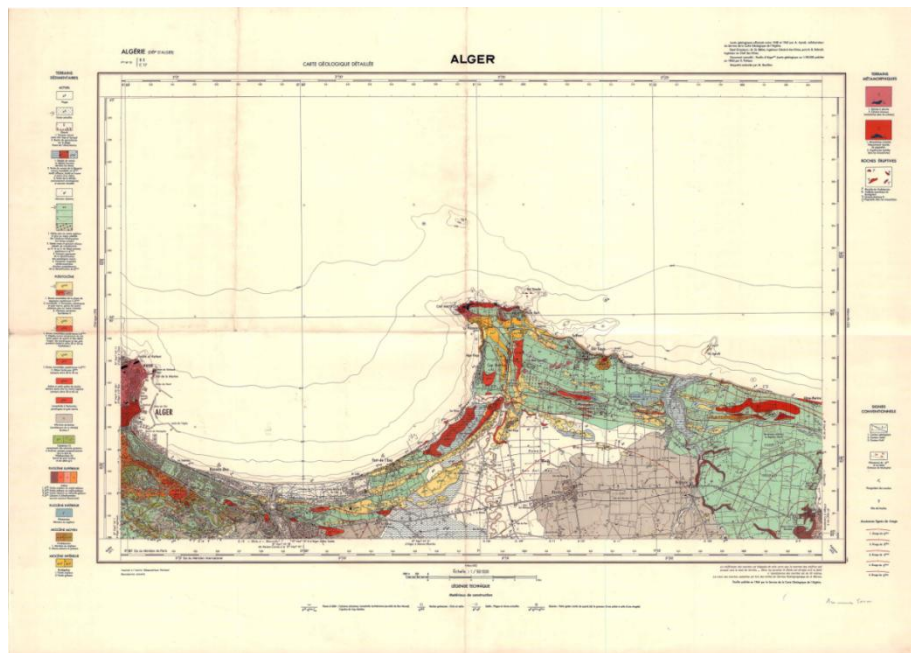


Figure 8 : carte géologique de la Mitidja (Bennie et Partners, 1983)

2.2. La sismicité dans la région d'Alger

La région d'Alger se trouve sur une zone intra -plaque (eurasienne-Afrique), elle peut être soumise à de forts séismes superficiels et locaux, à l'exemple du séisme du 21 mai 2003, de magnitude 6,8 qui rappelle cette sismicité bien réelle dans cette région. Cette sismicité locale

Chapitre II cadre général et présentation de la zone d'étude

est compressive, qu'elle soit à terre ou en bordure du plateau continental, elle est souvent liée aux événements intra plaques (Eurasie- Afrique).

Aujourd'hui les principales failles actives de la zone d'étude sont identifiées, elles sont inverses et souvent peu inclinées et dissimulées, elles engendrent des déformations diffuses en surface d'où il est difficile de les localiser L'essentiel du risque sismique permanent dans cette partie nord résulte particulièrement de 5 failles cartographiées.



Figure 9 : Interprétation 3D des principales failles Offshore/onshore de la région d'Alger
(Extrait de Yelles et al., 2009)

3. Cadre géomorphologique

La côte algéroise a un plateau continental très étroit au niveau des extrémités de la baie, mais il s'élargit au centre d'environ 12,5 km en raison de la présence des cours d'eau tels que l'Oued El Harrache. Il est caractérisé par une pente douce de l'isobathe 0 m à celui des 100 m, dont la distance qui sépare ces deux isobathes est de 6 milles. Source spécifiée non valide..

Les dépôts d'Oued El Harrache à 9 m forment une zone deltaïque suite au dépôt de sédiments importants au niveau des caps, qui sont assez accidentés avec l'apparition de zones rocheuses. La baie d'Alger se divise sur le plan géomorphologique en deux grandes parties :

Partie orientale : caractérisée par la présence d'un relief rocheux, Cap Matifou, pourvu de falaises mortes et vives à l'extrémité Est de la baie. Un cordon littoral dunaire sous forme d'une petite barrière de sable-gréseuse s'allonge parallèlement au rivage entre la rive droite d'Oued El Harrache et Bordj El Bahri.

Partie occidentale (notre site d'étude) : ses côtes sont souvent hautes et escarpées, avec le point le plus élevé d'Alger situé au niveau de Bouzareah à 470 m. Elle est en contact avec la

mer par une falaise de nature métamorphique, à la base de laquelle se situe un banc rocheux plat et érodé ou bien une couche épaisse de matériaux grossiers. Cette partie est suivie par une partie du massif dunaire située à l'ouest d'Oued El Harrache.

4. Cadre climatique

La détermination du caractère du climat est très importante pour mieux apprécier le régime hydrodynamique se déployant dans notre zone. Ce cadre sera basé sur la partie hydro-climatologique, en incluant les vents en provenance continentale et du large, ainsi que les températures et les taux de précipitations.

La zone d'étude connaît un climat méditerranéen avec une saison pluvieuse s'étalant de septembre à mai et un été sec, considéré toutefois comme un climat tempéré dû à l'action modératrice de la mer. L'amplitude diurne au cours d'une année est inférieure à 10°C. En bordure de la côte les gelées et la neige y sont pratiquement inconnues. (LEM ,2018)

4.1. Température

La bande côtière des Sablettes jouit d'un climat méditerranéen tempéré dû à l'action modératrice de la mer. Nous assistons à une saison pluvieuse qui s'étend de septembre à mai et un été sec. Ceci pourrait expliquer qu'en bordure de la côte algéroise, les neiges et les gelées sont méconnues. Ce littoral connaît alors un degré hygrométrique élevé durant toute l'annéeSource spécifiée non valide..

À Alger, la température moyenne du mois le plus froid (janvier) est de 11,2 °C, celle du mois le plus chaud (août) est de 26,6 °C. Voici les températures moyennes.

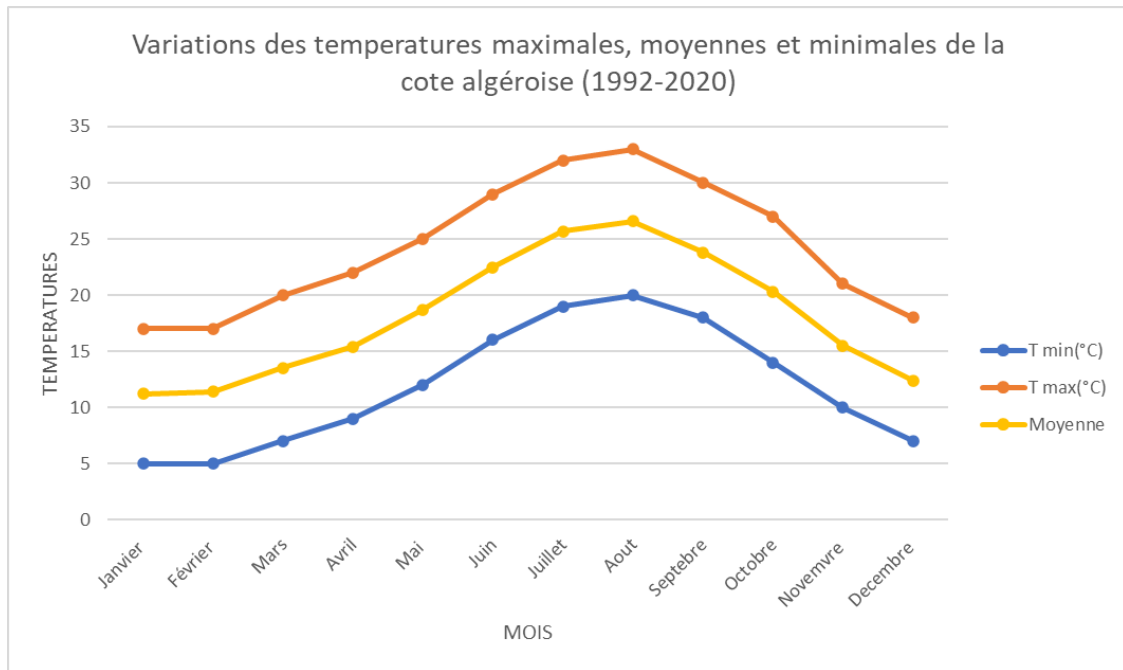


Figure 10 : Variations des températures maximales, moyennes et minimales de la cote algéroise (1992-2020) (info-climat)

4.2. Précipitations

Les précipitations sur la région totalisent 600 millimètres par an, ce qui les situe à un niveau intermédiaire. Elles sont réparties régulièrement à l'échelle annuelle. Durant le mois le moins pluvieux (juillet), elles s'élèvent à 5 mm, tandis que dans les mois les plus pluvieux (novembre et décembre), elles atteignent 90 mm en moyenne (info-climat)

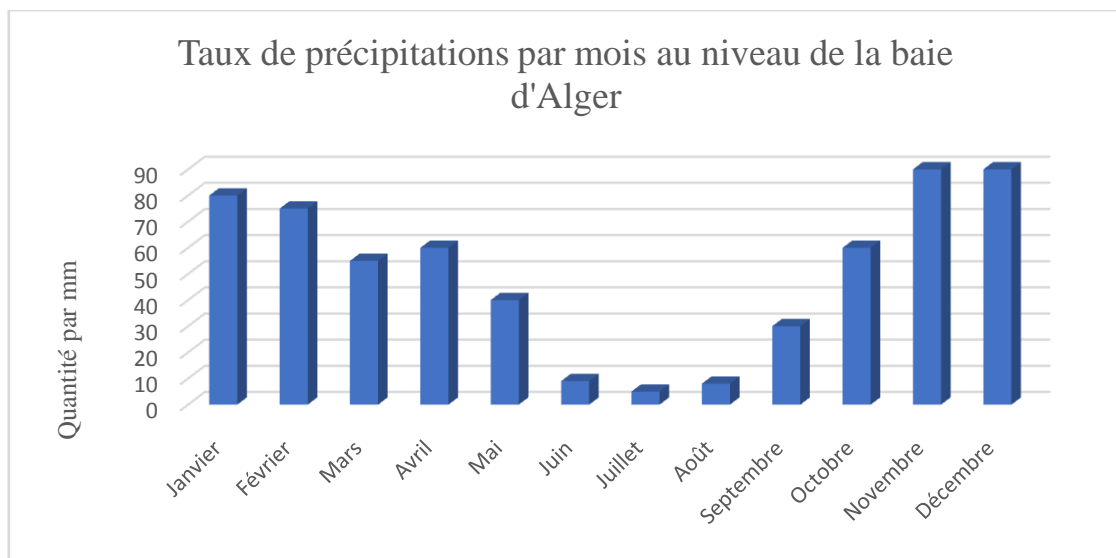


Figure 11 : Histogramme des taux de précipitations par mois au niveau de la baie d'Alger entre 1992-2020 (infoclimat)

4.3. Le vent

Selon Moulin (1978), les vents agissent en tant que générateur principal de vagues et de courants superficiels, influençant directement les transferts sédimentaires dans la partie émergée et par le biais d'agents hydrodynamiques divers dans la partie immergée.

Les observations des vents au large des côtes algériennes sur la période de 1992 à 2020 sont représentées sous forme de roses des vents (voir Figure). D'après la rose des vents annuelle, quatre directions principales se distinguent nettement : Est, Nord-Est, Ouest et Sud-Ouest, représentant près de 60 % de l'ensemble des vents soufflant au large de la baie d'Alger. Les vitesses maximales enregistrées atteignent plus de 18 m/s, provenant principalement des secteurs Ouest et Sud-Ouest.

L'analyse des roses des vents saisonnières révèle que les mêmes directions prédominent tout au long de l'année, à l'exception de la saison estivale où les directions Est et Nord-Est dominent avec 60 % des vitesses enregistrées.

L'examen des roses des vents mensuelles met en évidence deux catégories de vent : des vents calmes durant les mois de la saison estivale, avec des vitesses ne dépassant pas les 5 m/s, et des vents plus forts durant les mois hivernaux, avec des vitesses dépassant les 18 m/s.

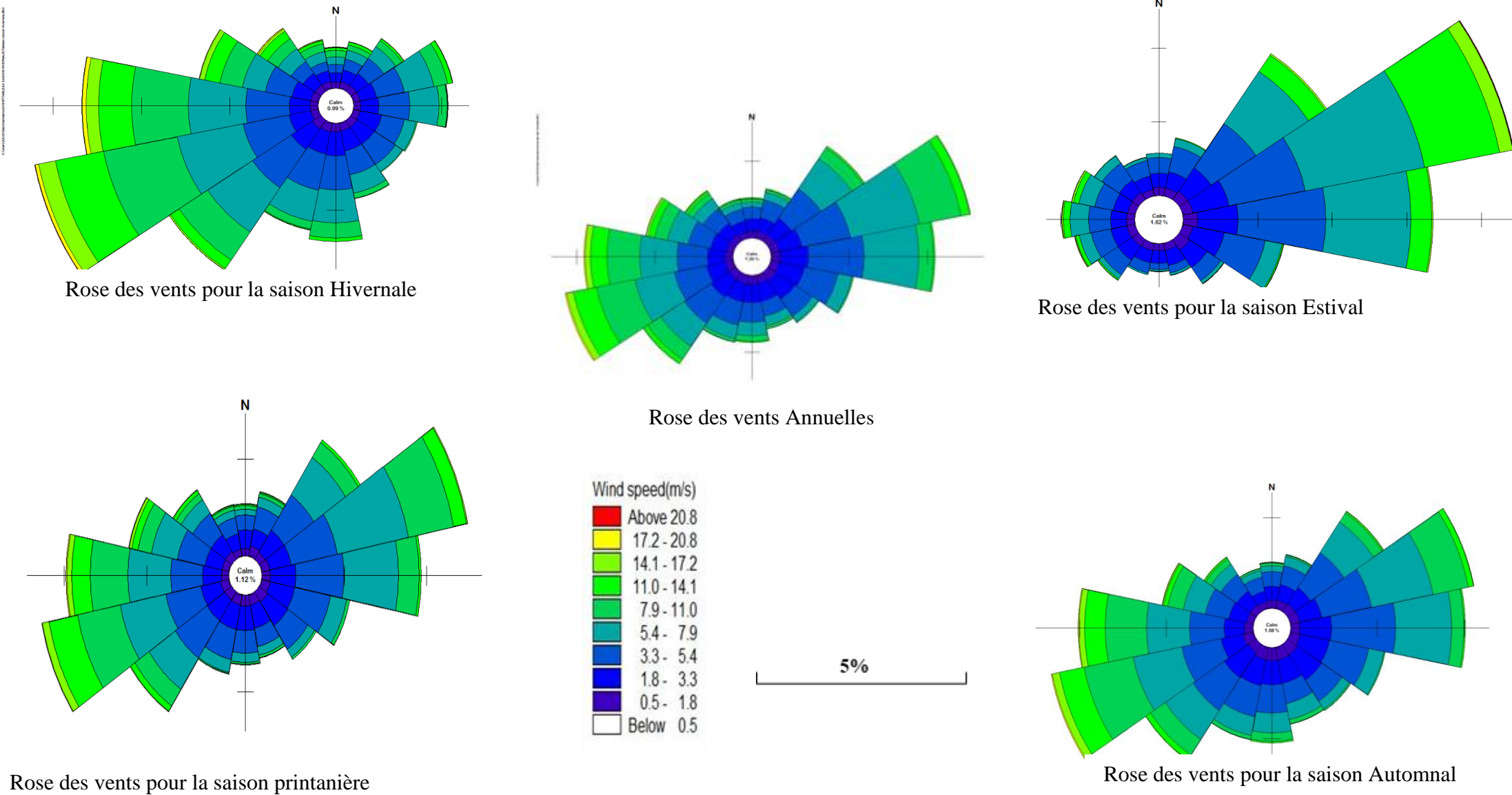


Figure 12 : Roses des vents annuelles et saisonnières enregistrées pour la période 1990 – 2020. (INFOPLASA)

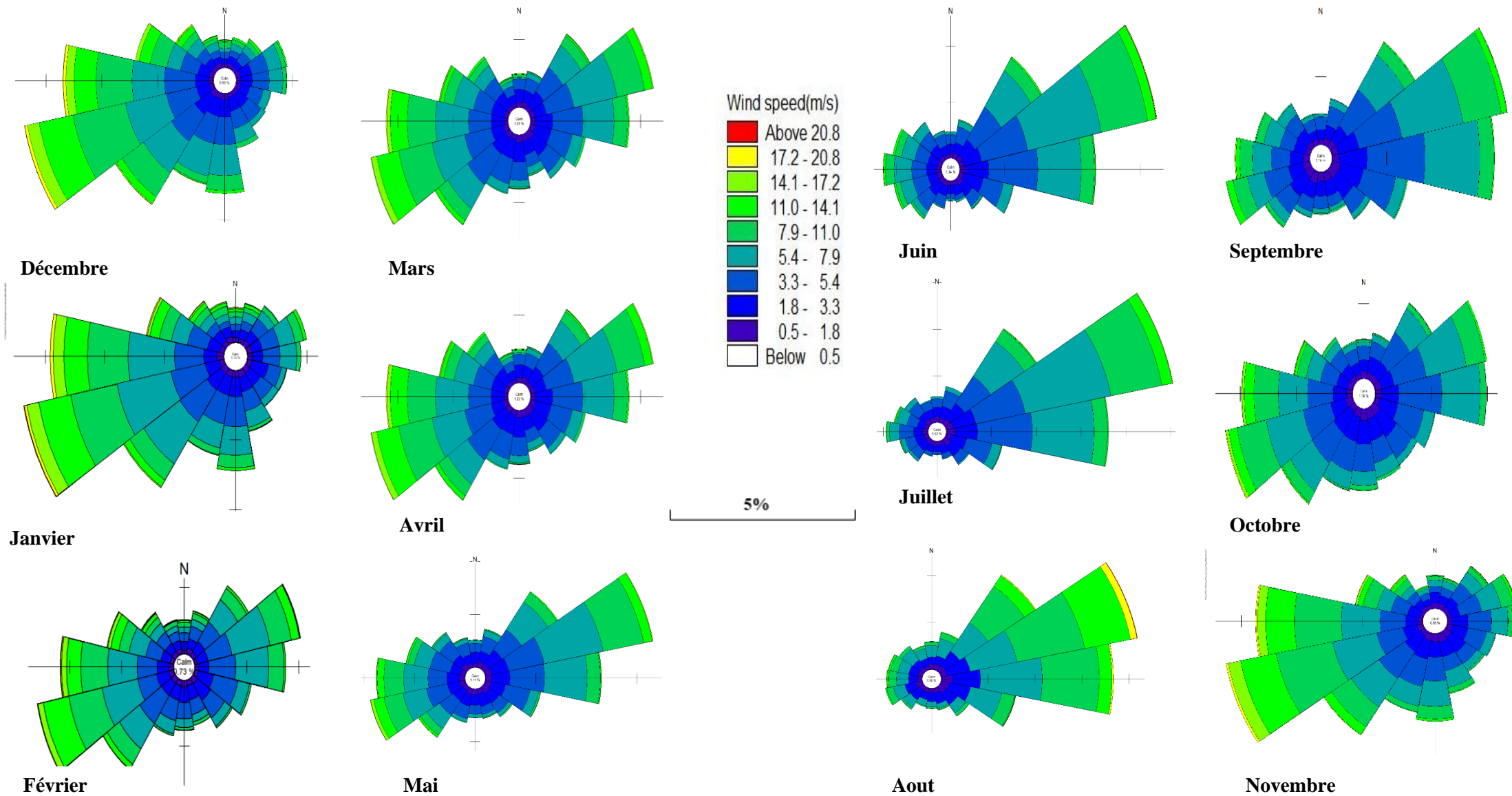


Figure 13 :Roses des vents mensuelles enregistrées pour la période 1990-2020. (INFOPLAZA)

5. Cadre océanographique

Les phénomènes marins sont étroitement dépendants de l'hydrodynamisme ainsi que de l'environnement hydrographique ; le cadre océanographique englobe toutes les données marines contribuant à la compréhension des phénomènes influençant la zone, à savoir :

- Houle, courant
- Marée astronomique
- Variation saisonnière de niveau de la mer
- L'élévation du niveau global

5.1. Les houles

La houle est le facteur le plus important dans la dynamique sédimentaire des petits fonds. La direction de propagation de la houle est liée à celle du vent, tant que la profondeur est supérieure à la longueur d'onde de la houle. De plus, la houle de la baie d'Alger suit le régime du vent qui est saisonnier, tout comme le reste de la marge algérienne. Source spécifiée non valide.

Une analyse statistique des houles a été réalisée à partir de la base de données Infoplasa), développée par (Ardhuin et al. 2011). Ce modèle repose sur une approche multi-échelles combinant plusieurs modèles hauturiers et une série d'emprises côtières.

Une grille globale de résolution de 0.5° (~50 km) a été utilisée pour couvrir les années 1992 à 2020. Le modèle global est forcé avec les vents CFSR de 1990 à 2012 et ECMWF de 2013 à 2018, mais seuls les vents CFSR sont disponibles au téléchargement.

La synthèse de ces données montre une nette répartition saisonnière des directions de houle. En haute mer, les directions correspondent en grande partie à celles des vents, du moins pour les secteurs Ouest et Nord-Est.

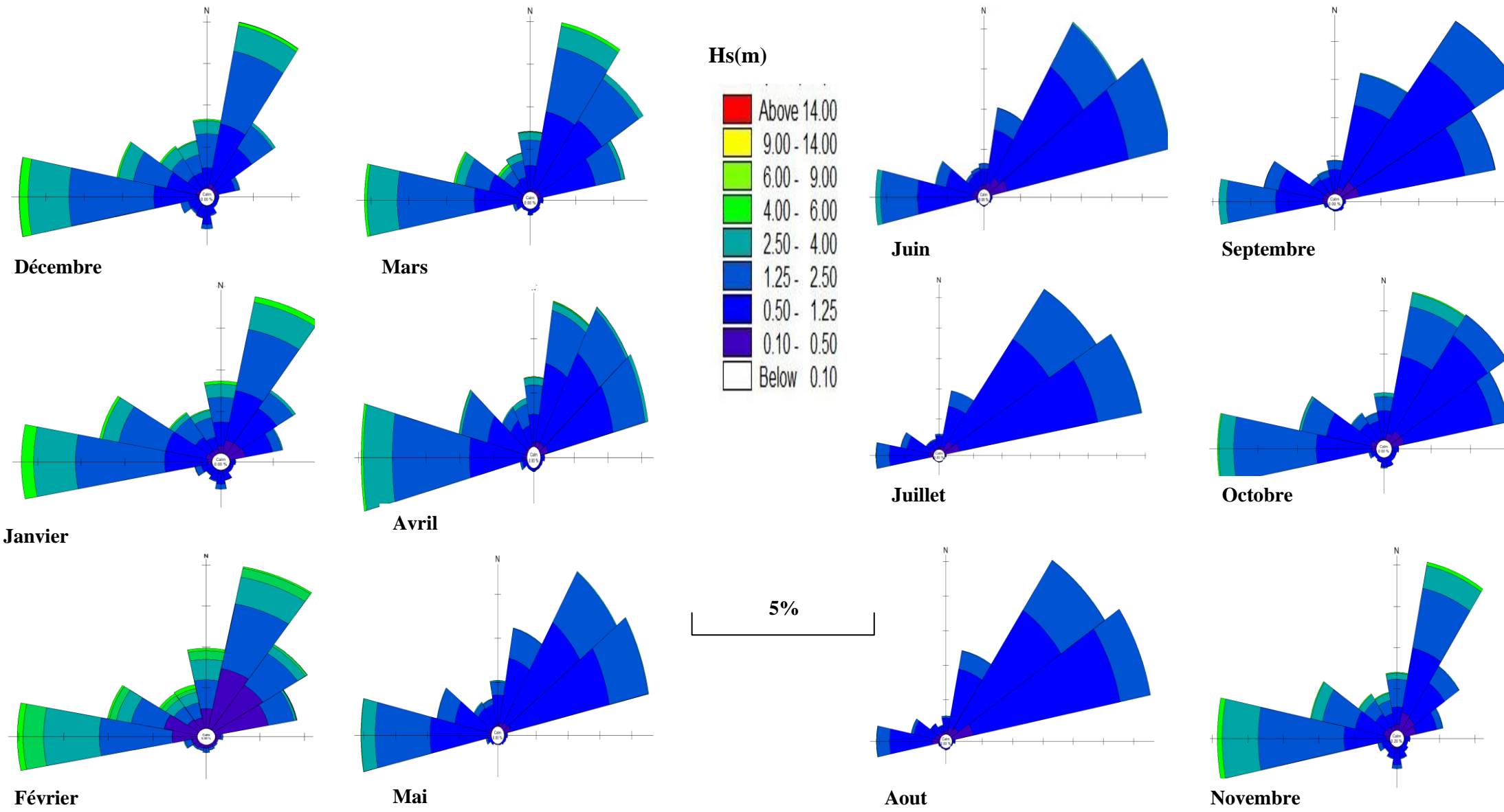
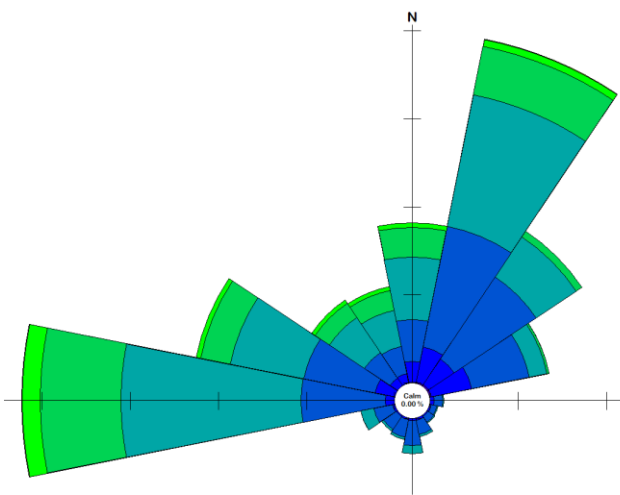
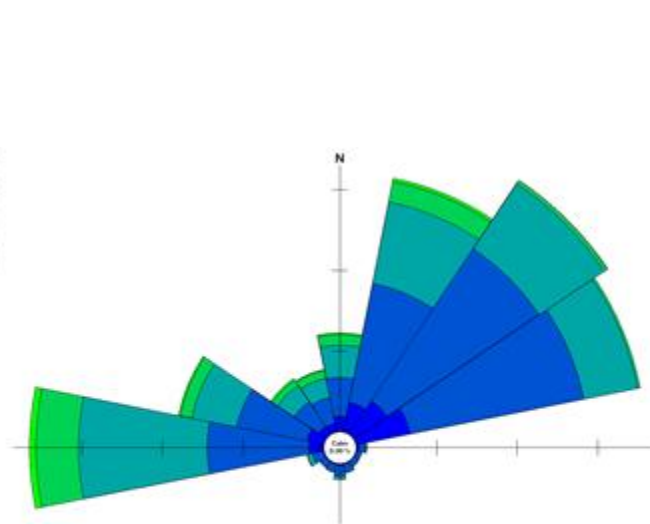


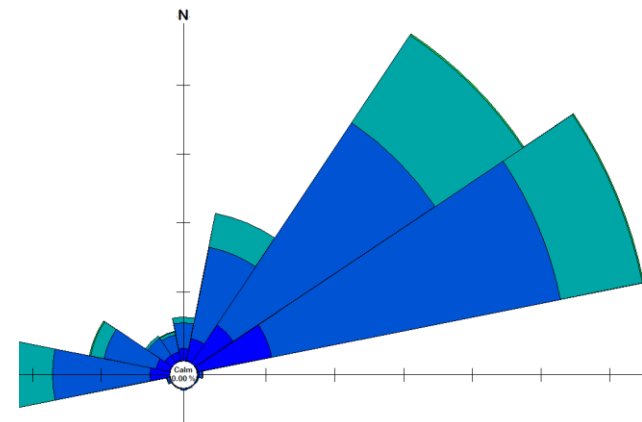
Figure 14 : Roses des houles mensuelles enregistrées pour la période 1990 – 2020. (INFOPLAZA)



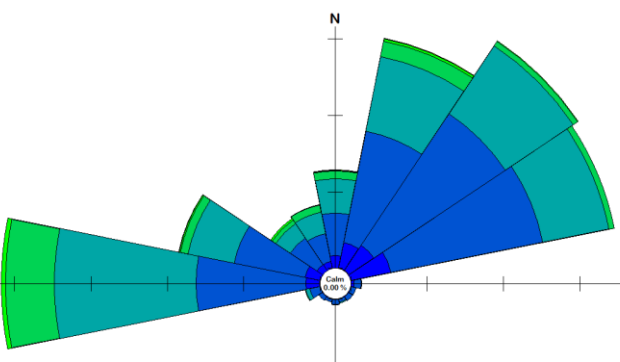
Rose des houles pour la saison Hivernale



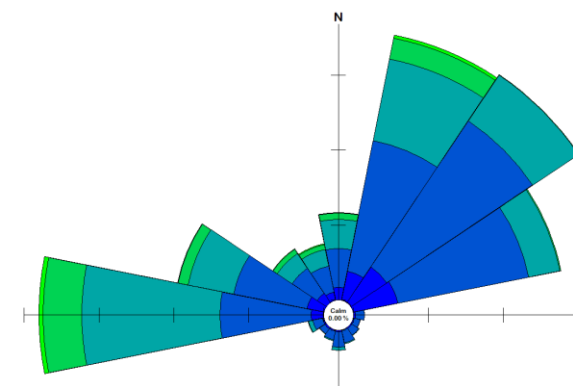
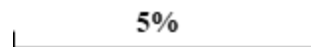
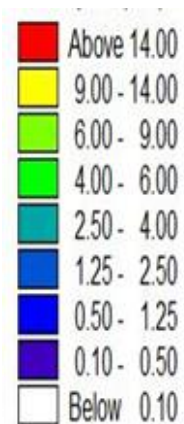
Rose de houles Annuelle



Rose des houles pour la saison Estival



Rose de houles pour la saison printanière



Rose de houles pour la saison Automnal

Figure 15 : Roses des houles annuelles et saisonnières enregistrées pour la période 1990 – 2020. (INFOPLAZA)

Chapitre II cadre général et présentation de la zone d'étude

L'analyse des roses de houles mensuelles (Figure 14) nous a permis de distinguer deux catégories de houles : les houles calmes et les houles agitées. Les mois de mai, juin, juillet, août et septembre sont caractérisés par des houles calmes, avec des hauteurs inférieures à 3.5 m. En revanche, les mois d'octobre, novembre, février et avril présentent des houles plus agitées, alternant entre périodes calmes et agitées. Des pics de hauteur supérieure à 4.5 m ont été enregistrés. Pour les mois de décembre, janvier et mars, les hauteurs de houles dépassent 5 m tout au long de l'année.

L'analyse de la rose de houle annuelle (Figure 15) nous a permis de déterminer trois directions principales plus dominantes (O, NNE et NE) avec une fréquence d'apparition d'environ 90 % des houles prédominantes provenant de ces trois directions, à l'exception de certaines houles extrêmes enregistrées dans d'autres directions.

Les roses de houle saisonnières (Figure 15) montrent une dominance des directions O et NNE ou NE tout au long des quatre saisons de l'année. Durant la saison estivale, on observe des houles très calmes avec des pics de hauteur ne dépassant pas 2.5 m au large. La saison automnale est globalement caractérisée par un climat de houle calme, avec quelques houles de direction O et NNE atteignant des hauteurs d'environ 4 m.

En revanche, les saisons hivernale et printanière sont plus agitées, avec des hauteurs de houles provenant de différentes directions telles que ONO, NO, NNO, N et NNE, et des pics dépassant les 6 m de hauteur. Plus de 80 % des houles incidentes dominantes proviennent des directions O, NNE et NE.

5.2. Les marées

Le long des côtes algériennes, l'amplitude moyenne des marées astronomiques est d'environ 30 cm. Les variations du plan d'eau sont principalement influencées par l'effet des vents (phénomène de seiche) plutôt que par l'attraction luni-solaire. Les variations journalières observées sur les côtes algériennes sont inférieures à dix (10) cm. La différence entre la valeur maximale et la valeur minimale de la marée ne dépasse pas 50 cm. (LEM, 1996)

6. Cadre hydrographique

Le réseau hydrographique de la baie d'Alger se caractérise par la présence d'oueds à régime temporaire et irrégulier, tels que l'oued el Harrache et l'oued el Hamiz. Pendant l'été, les lits de ces oueds sont souvent presque à sec ou se réduisent à de simples filets d'eau. En revanche, pendant la saison hivernale, ils connaissent des crues très violentes. Ces crues surviennent

Chapitre II cadre général et présentation de la zone d'étude

généralement en réponse aux précipitations plus importantes pendant cette période, entraînant un débit soudain et élevé des eaux dans les oueds. Source spécifiée non valide.

Oued el Harrache :

Le régime hydrographique de l'oued el Harrache se caractérise par un long étiage de six mois, suivi de crues rapides pendant l'hiver et le printemps. Ce dernier est formé par la confluence des deux oueds principaux, Oued Akka et Oued Mekka, sur une longueur de 67 km. Il est alimenté par six affluents : Oued Djmaaa, Oued Baba Alin, Oued Terrou, Oued Semmar, Oued Ouchaih, et Oued Kerma.

Oued EL Hamiz :

Oued El Hamiz coule à l'est de la baie, près du Cap Matifou. La superficie de son bassin versant est de 138 km². La présence du barrage El Hamiz en amont réduit considérablement les apports solides en provenance de la mer. L'Oued se jette en mer par une ouverture étroite d'environ dix mètres de large. Source spécifiée non valide..

7. Caractéristique et ouvrages de protections existants

L'aménagement du site des Sablettes a évolué au fil du temps pour développer les activités touristiques, et la promenade s'intègre dans le projet métropolitain d'aménagement de la Baie d'Alger.

La figure 16 présente l'ensemble des aménagements existants

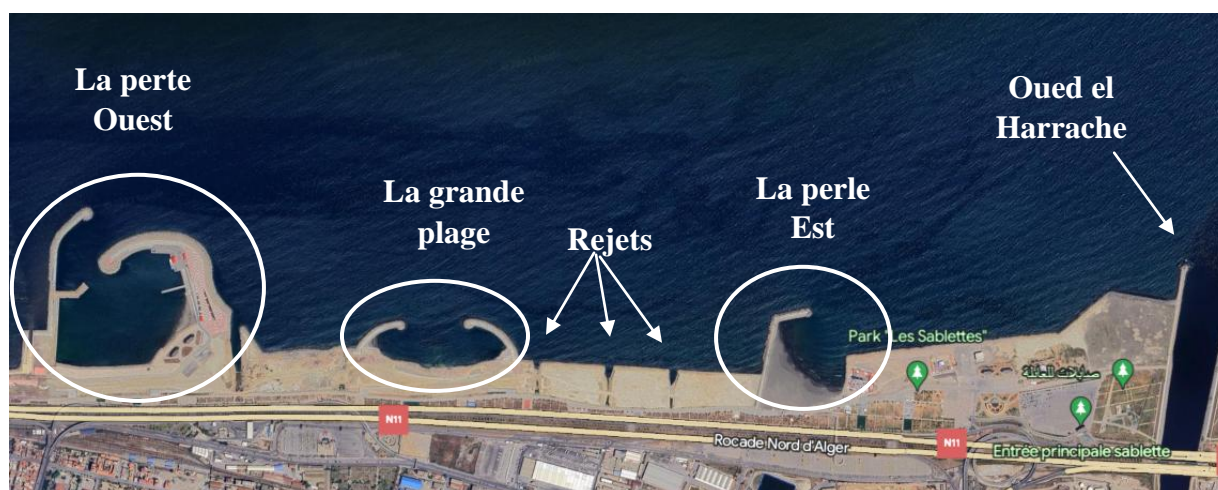


Figure 16 : Vue satellitaire du site d'étude (Google Earth, 2022)

Chapitre II cadre général et présentation de la zone d'étude

Figure 18 : Profil en long de la cote de la grande plage (Étude de l'aménagement modifié de la plage artificielle de sablette, 2018)

Chapitre III : Analyse des évènements extrêmes

Chapitre III : Analyse des évènements extrêmes

1. Introduction

Par définition, les évènements extrêmes sont des événements ayant des valeurs beaucoup plus élevées que les autres valeurs ou plus faibles que celles observées habituellement. Les événements extrêmes peuvent être catastrophiques lorsqu'il s'agit (tremblements de terre, inondations, accidents nucléaires...) (Tilbi.2018).

Selon(Thompson et al.2009), laréussitedelaconceptiond'unouvragededéfensecôtièrefiableetefficaceestlargementliée àlaconnaissancedesconditions extrêmesauxquelslesdéfensesdoiventrésister.Les défenses côtièresontgénéralementconçuespourfourniruncontrôleadéquatdes inondationsoudel'érosiona univeauderécupérationsouhaitéassociéàunepériodede retours spécifique, par ex 100ans.

2. Théorie des valeurs extrêmes

La théorie des valeurs extrêmes (TVE) fournit une base mathématique et probabilisterigoureuse sur laquelle il est possible de construire des modèles statistiques pour prévoir la taille et la fréquence de ces phénomènes dans les queues de distribution. Le comportement extrême des lois appartenant aux différents domaines d'attraction maximal (DAM) est significativement différent. Les lois appartenant aux DAM de *Weibull* sont bornées à droite, celles appartenant aux DAM de *Gumbel* et Fréchet ont un support infini. Mais les premières ont des queues finies alors les secondes ont des queues épaisses et exposent donc à des situations extrêmes beaucoup plus dangereuses.

3. Méthodes des valeurs extrêmes

Il existe essentiellement deux approches dans la modélisation des extrêmes : la méthode des blocs de maxima et celle de dépassement des excès.

L'approche des maxima univariés établit qu'une famille paramétrique généralisée résume le comportement asymptotique de la loi du maximum convenablement normalisé.

Dans la seconde approche, il est établi que seule la distribution généralisée de Pareto qui modélise la loi de la variable excédentaire au sel d'un certain seuil fixé et assez élevé.Source spécifiée non valide.

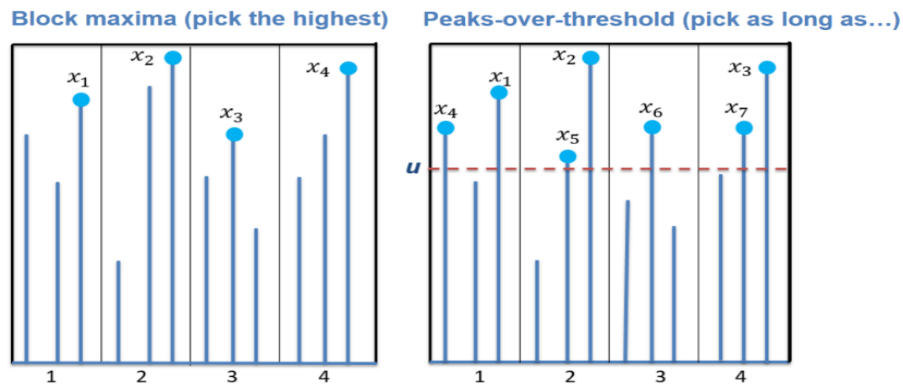


Figure 19 : Schéma représentatif des méthodes blocks maxima et POT.

3.1. Méthode des blocs maximas

3.1.1 Lois GEV (*Generalized Extreme Value*) et méthode des blocs maximas

La théorie de la valeur extrême traite le comportement stochastique des valeurs extrêmes dans un processus. Pour un seul processus donné, le comportement des maximas peut être décrit par les trois distributions de valeurs extrêmes Gumbel, Fréchet et Weibull.

Le théorème de Fisher-Tipet énonce la loi d'approximation de maximum à un grand nombre d'observations. En pratique, on commence quand on a des observations (x_1, \dots, x_n) .

on commence par le regroupement

des données en blocs de longueur l pour calculer le maximum dans chaque cas. Source spécifiée non valide.

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

Pour étudier le comportement extrême des événements, on considère la variable aléatoire $M_n = \max (x_1, x_2, \dots, x_n)$ le maximum d'un échantillon de taille n .

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

La théorie de la valeur extrême traite le comportement stochastique des valeurs extrêmes dans un processus. Pour un seul processus donné, le comportement des maximas peut être décrit par les trois distributions de valeurs extrêmes Gumbel, Fréchet et Weibull.

$X \sim GEV(\mu, \sigma, k)$ avec $\sigma > 0$ si sa fonction de répartition est donnée par :

- Si $k \neq 0$:
$$F(x; \mu; \sigma; k) = \exp\left\{-\exp\left\{-\left[1 + k \frac{x-\mu}{\sigma}\right]^{1/k}\right\}\right\}$$

Définie pour x vérifiant $1 + k \frac{x-\mu}{\sigma} > 0$

- Si $k = 0$:
$$F(x; \mu; \sigma; k) = \exp\left\{-\exp\left\{-\left[1 + k \frac{x-\mu}{\sigma}\right]\right\}\right\}$$

Définie pour tout $x \in \mathbb{R}$

- μ est un paramètre de position et σ paramètre d'échelle : si $X \sim GEV(\mu, \sigma, k)$ alors $X - \mu \sim GEV(0, 1, k)$

- k est un paramètre de forme.

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

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

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

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

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

Le comportement extrême des lois appartenant aux différents domaines d'attraction maximal (DAM) est significativement différent. Les lois appartenant aux DAM de *Weibull* sont bornées à droite, celles appartenant aux DAM de *Gumbel* et Fréchet ont un support infini. Mais les premières ont des queues finies alors les secondes ont des queues épaisses et exposent donc à des situations extrêmes beaucoup plus dangereuses.

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

D'abord le bloc de donnée a été divisé selon une période annuelle (représenté avec les lignes enpoints) pour permettre de prendre le maximum de chaque année séparément comme la montre laFigure si dessus :

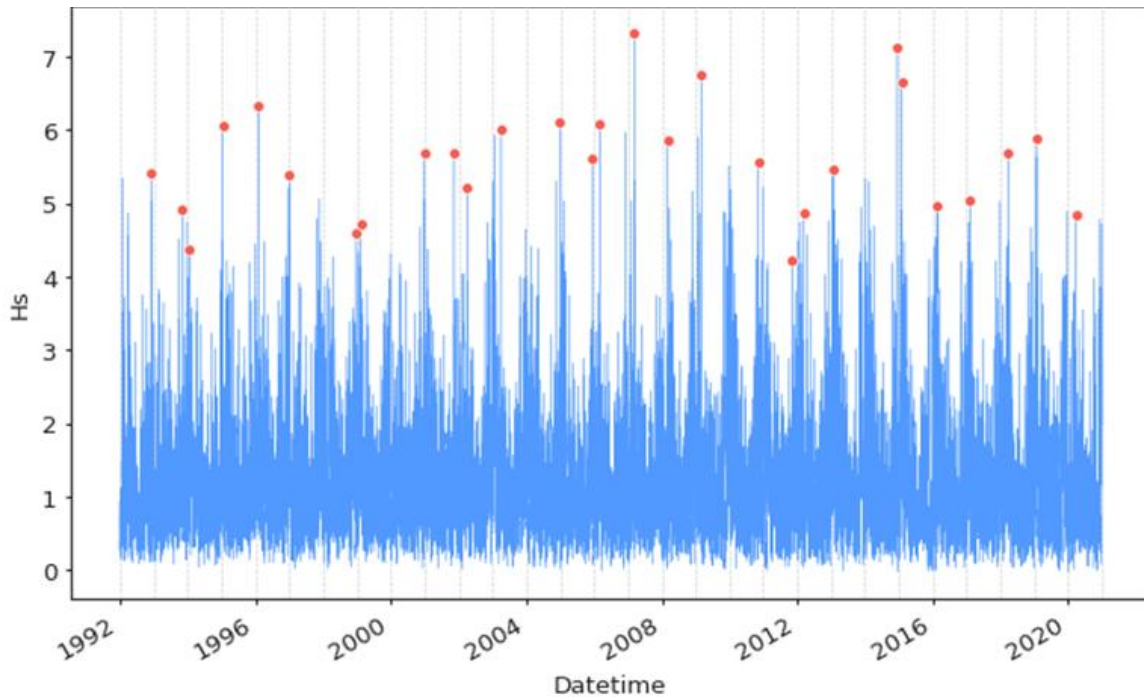


Figure 20: Représentation de méthode des Blocs Maximas sur les hauteurs de houle de 1992 – 2020

Après avoir choisi la valeur maximale pour chaque année, nous procédons directement au calcul de la hauteur de houle correspondant à chaque période de retour.

3.1.2 Résultats GEV avec la distribution de Gumbel

Les résultats figurant dans le graphe (figure 20) sont expliqués par des traits verts qui désignent les limites de l'erreur acceptée pour les résultats, avec une marge d'erreur de 15%. Les croix rouges indiquent les valeurs de hauteurs de houles correspondant aux périodes de retour de 2, 5, 10, 50, 100, 500 et 1000 ans.

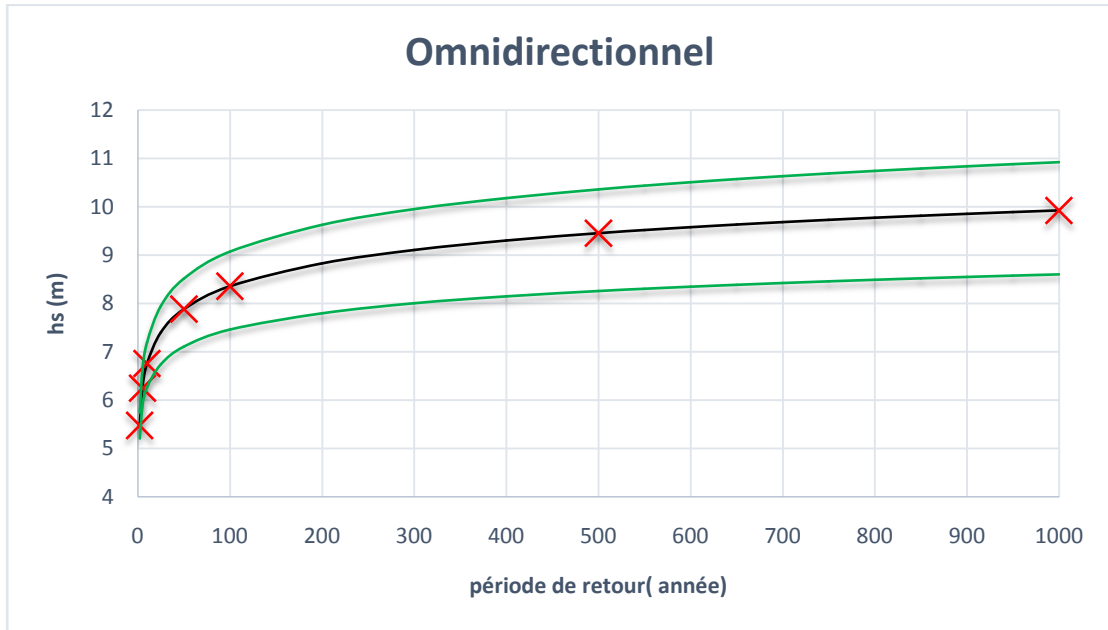


Figure 21: Estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour l'omnidirectionnel.

3.1.3 Résultats GEV avec la distribution de Weibull

Les résultats figurant dans le graphe (figure 22) sont expliqués par des traits verts qui désignent les limites de l'erreur acceptée pour les résultats, avec une marge d'erreur de 15%. Les croix rouges indiquent les valeurs de hauteurs de houles correspondant aux périodes de retour de 2, 5, 10, 50, 100, 500 et 1000 ans.

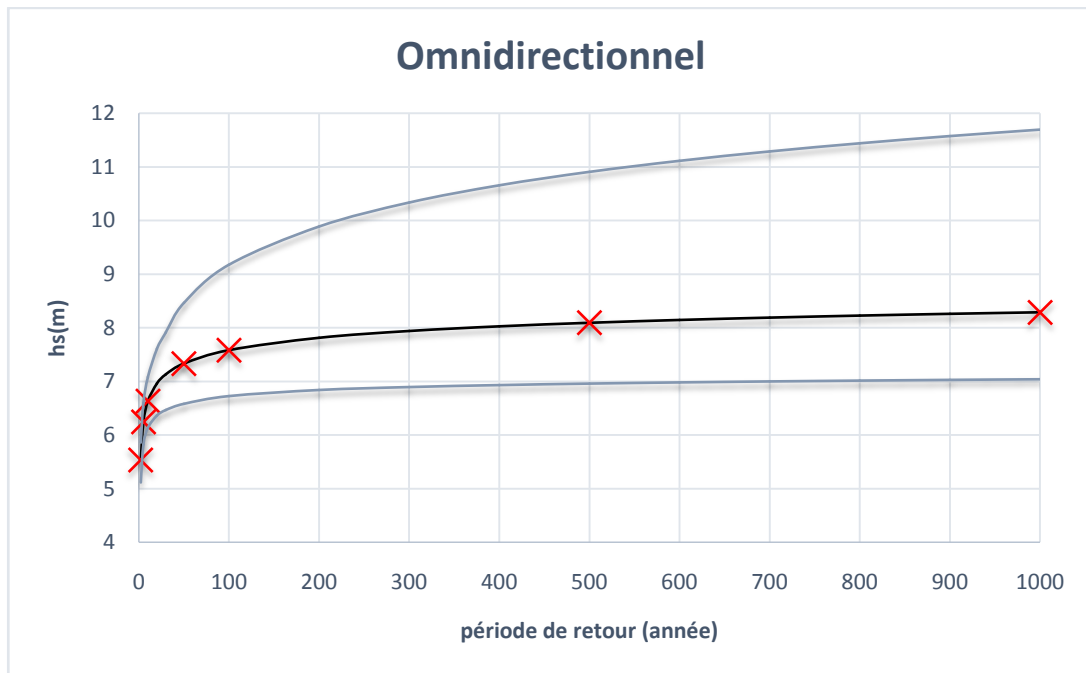


Figure 22 : Estimation des événements extrêmes via la distribution de Weibull pour l'omnidirectionnel.

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

Tableau 1: tableau récapitulatif de l'ensemble des résultats obtenu par la méthode GEV selon la distribution de Gumbel et Weibull

Périodes de retour (année)	2	5	10	50	100	500	1000
Hs(m) selon Gumbel	5.477	6.248	6.759	7.882	8.358	9.455	9.927
Hs(m) selon Weibull	5.536	6.243	6.632	7.333	7.583	8.092	8.228

A partir du Tableau (1) qui représente les hauteurs de houles prédites par la distribution de Gumbel et Weibull

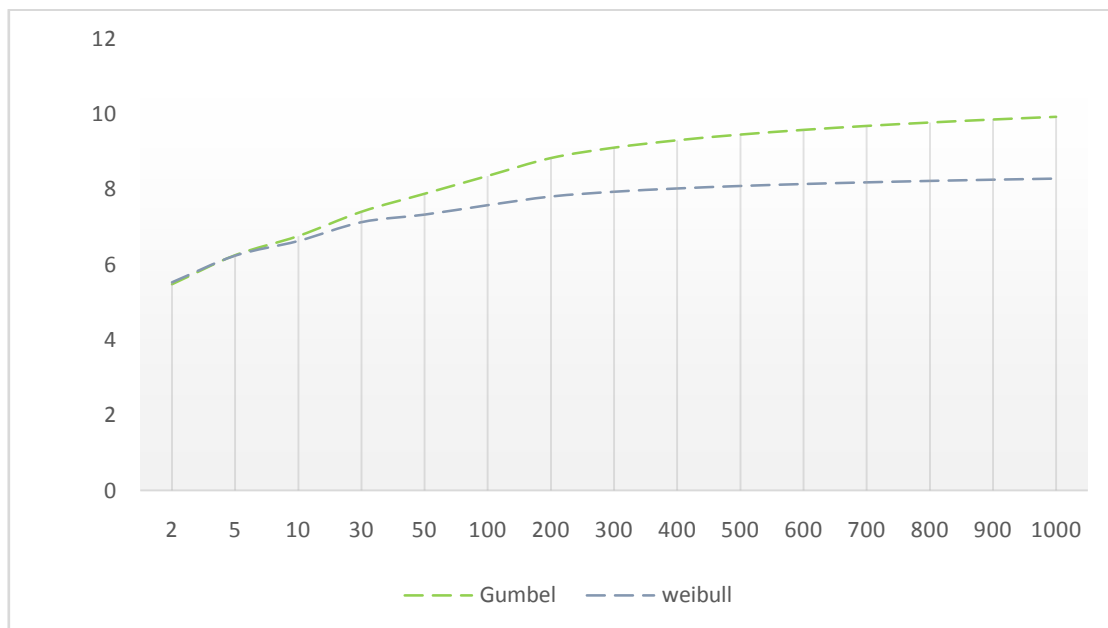


Figure 23: Comparaison des résultats obtenus avec les deux méthodes GEV (Gumbel et Weibull).

3.2. Method Peaks Over Threshold (POT)

La méthode des excès au-delà d'un seuil (ou "Peak Over Threshold", POT) repose sur l'observation du comportement des valeurs observées au-delà d'un seuil donné. En d'autres

Chapitre III : Analyse des évènements extrêmes

termes, elle consiste à étudier toutes les réalisations qui dépassent un certain seuil élevé, plutôt que de simplement se concentrer sur le maximum ou les plus grandes valeurs. L'idée fondamentale de cette approche est de choisir un seuil suffisamment élevé pour étudier les excès au-delà de ce seuil.

Cette méthode a été initialement développée par Pickands [1975] et a été largement étudiée par divers auteurs tels que de Smith [1987], Davison et Smith [1990]. Source spécifiée non valide.

On définit un seuil $u \in \mathbb{R}$, $N_u = \text{card}\{i : i = 1, \dots, n, X_i > u\}$ et $Y_i = X_i - u > 0$

Pour $1 \leq j \leq N_u$ où N_u est le nombre des dépassements du seuil u par les $(X_i)_{1 \leq i \leq n}$ et

Y_1, \dots, Y_{N_u} les excès correspondants. Source spécifiée non valide.

$$F(y) = \Pr(x - u \leq y/x > u) = \frac{F(x + y) - F(u)}{1 - F(u)}; y \geq 0$$

En résumé, la procédure d'analyse des valeurs extrêmes appliquée avec cette méthode comprend les étapes suivantes :

1. Collecte des échantillons POT (Peak Over Threshold) des maxima de tempête à partir de la série chronologique originale en utilisant différents seuils.
2. Estimation des paramètres GPD (Generalized Pareto Distribution) et de leurs incertitudes pour chaque échantillon POT.
3. Choix du seuil optimal en se basant sur la variation des estimations des paramètres de forme avec le seuil.
4. Dans cette étude, les maxima de cluster à une distance de moins de 48 heures d'intervalle sont considérés comme appartenant au même cluster. Cette période de 48 heures correspond à la durée maximale de la tempête dans les données.
5. Avant de définir le seuil, nous avons utilisé la bibliothèque Pyextreme dans l'environnement "Google Colab" pour calculer le résidu moyen et suivre sa variation, afin de pouvoir choisir le seuil optimal. Le seuil doit être situé sur une ligne droite avant la variation de la moyenne résiduelle.
6. La sélection de la valeur du seuil porte sur deux valeurs : 3 mètres et 4 mètres.

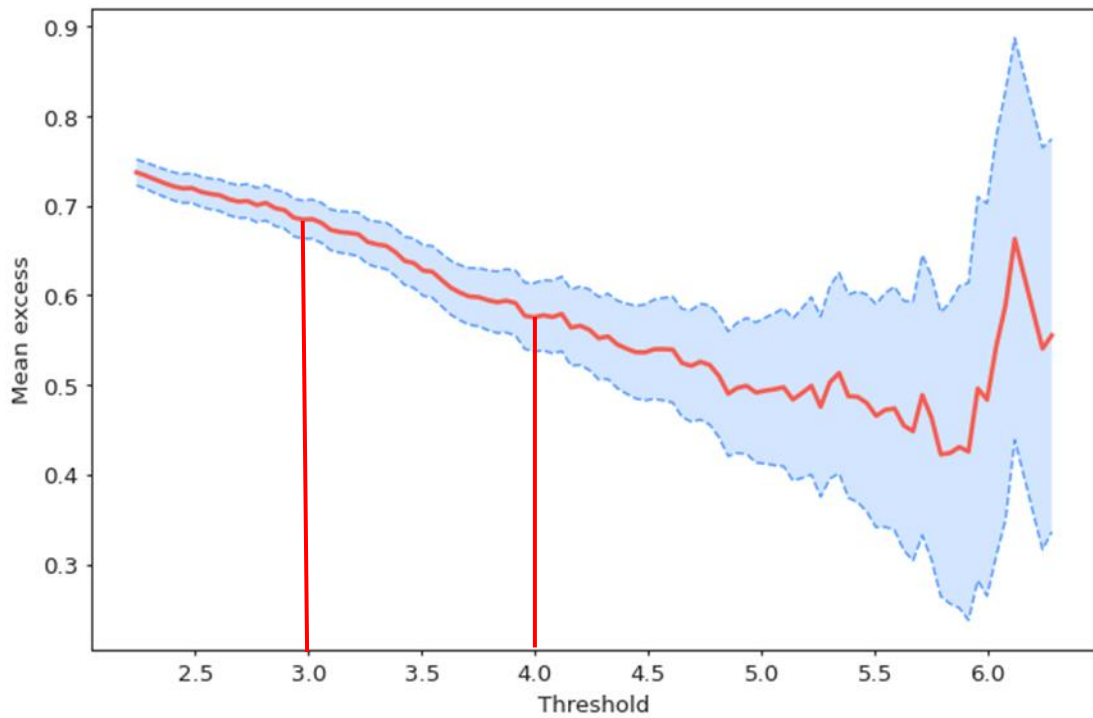


Figure 24 : Moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelle de l'enregistrement.

L'étape de la sélection des pics terminée, on passe au calcul de hauteurs houle avec leurs périodes de retour via la même bibliothèque **Pyextreme** sur le langage **GOOGLE COLAB**.

On obtient les résultats suivants :

Les points sélectionnés pour le calcul sont illustrés dans la figure ci-dessous. (Seuil=3)

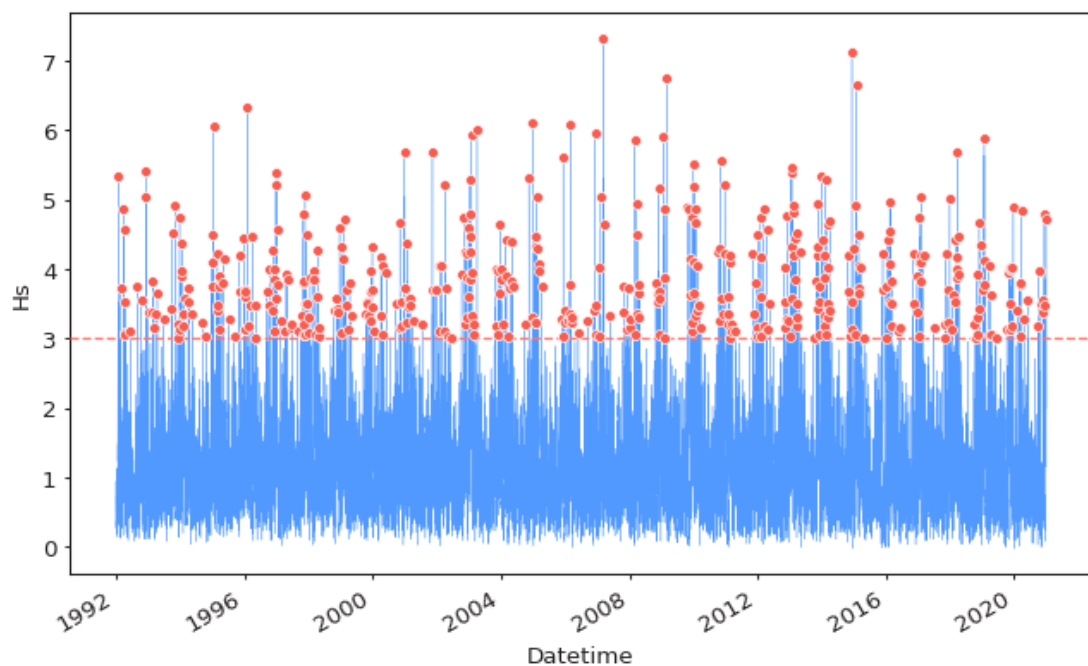


Figure 25 : Représentation de méthode POT sur les hauteurs de houle de 1990 – 2020.

Les points sélectionnés pour le calcul sont illustrés dans la figure ci-dessous. (Seuil=4)

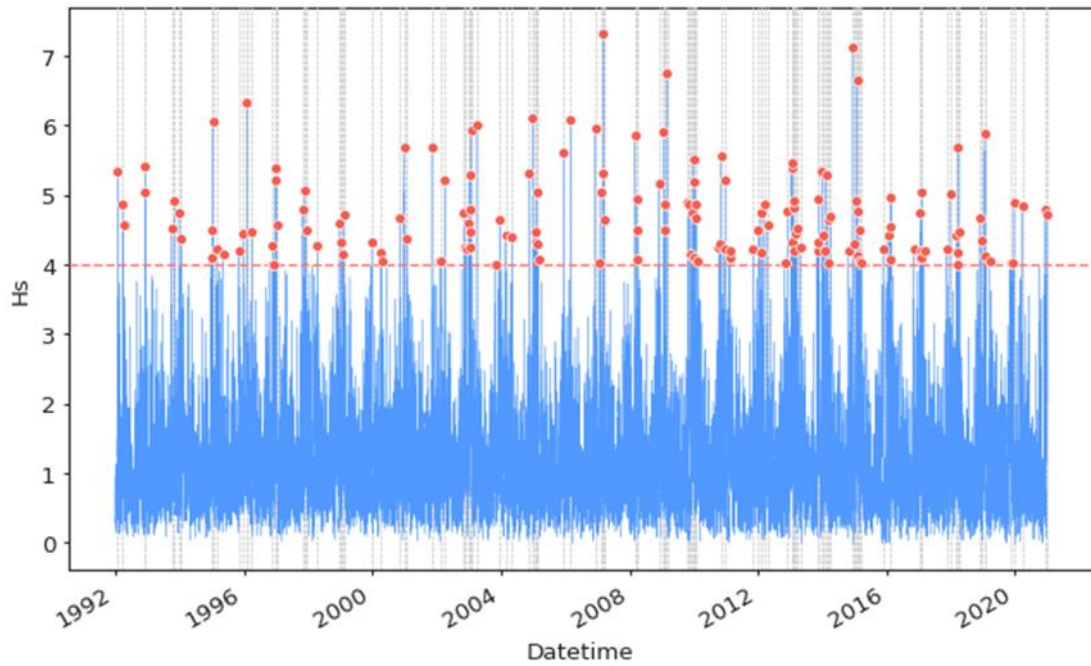


Figure 26 : Représentation de méthode POT sur les hauteurs de houle de 1990 – 2020.

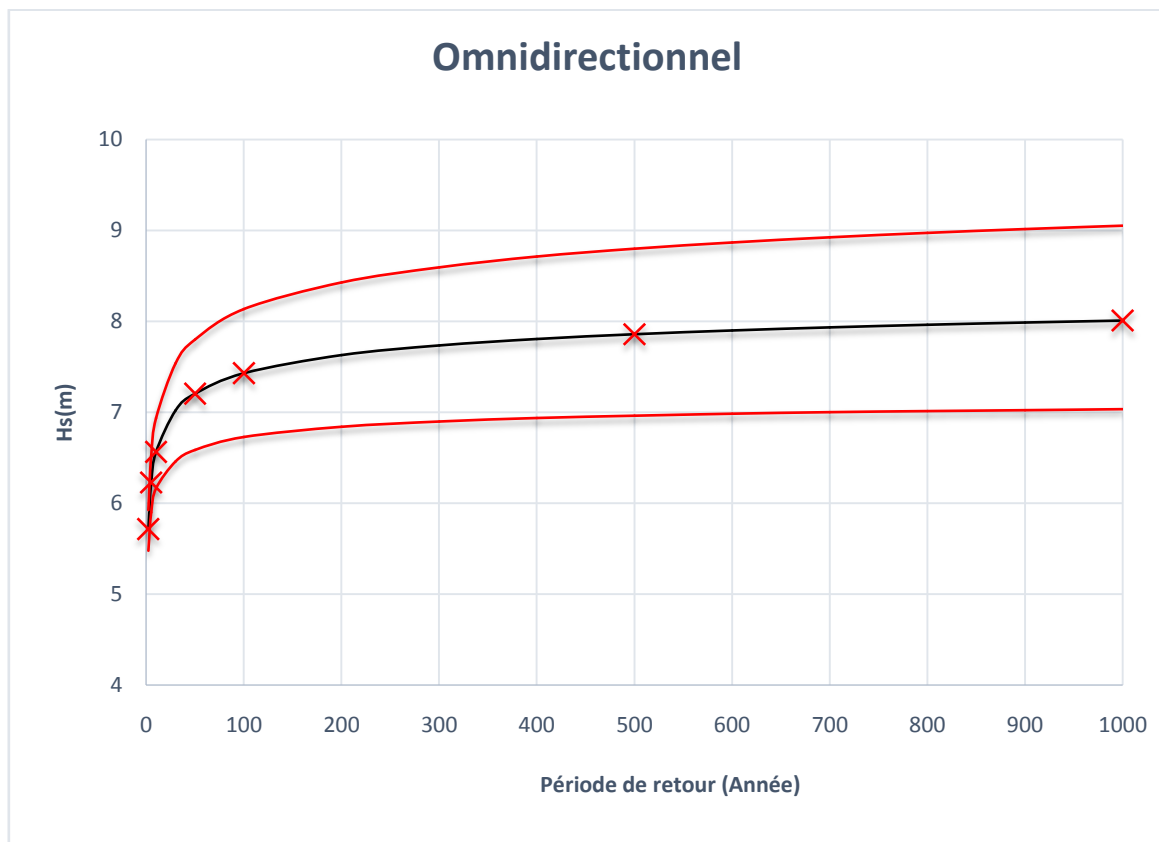


Figure 27: Estimation des évènements extrêmes via la distribution POT omnidirectionnel (seuil=3)

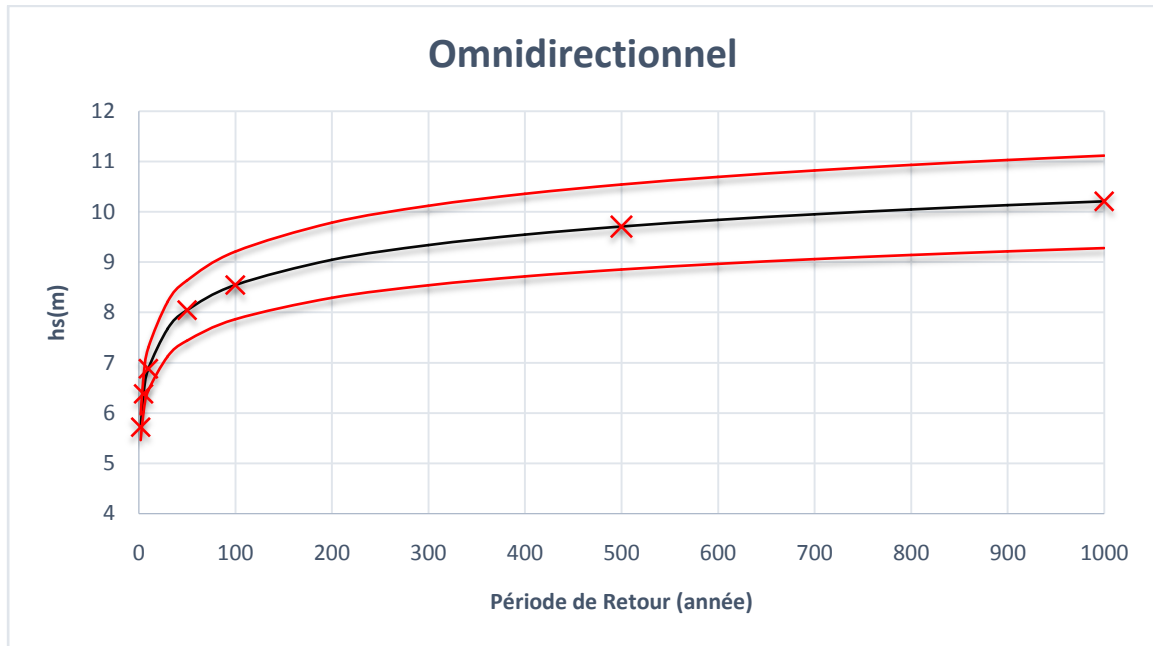


Figure 28: Estimation des événements extrêmes via la distribution POT omnidirectionnel (seuil=3)

Les résultats présentés dans le graphique (Figure28) sont illustrés par des traits rouges qui représentent les limites de l'erreur acceptée, fixée à 15% des résultats. De plus, les croix rouges indiquent les valeurs de hauteurs de houles pour les périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 1000 ans.

Tableau : tableau récapitulatif de l'ensemble des résultats obtenu par la méthode POT selon les deux seuils

Périodes de retour (année)	2	5	10	50	100	500	1000
Hs(m) Seuil=3m	5,925	6.565	6,937	7,205918	7,430	7,859	8,001
Hs(m) Seuil=4m	5,460	6,728	7,302	8,044	8.545	9,708	10,209

D'après la figure ci-dessous, il est observé que les valeurs des hauteurs significatives correspondant aux périodes de retour, selon la méthode du POT, présentent des différences. Les résultats obtenus avec le seuil 4 sont plus élevés que ceux du seuil 3.

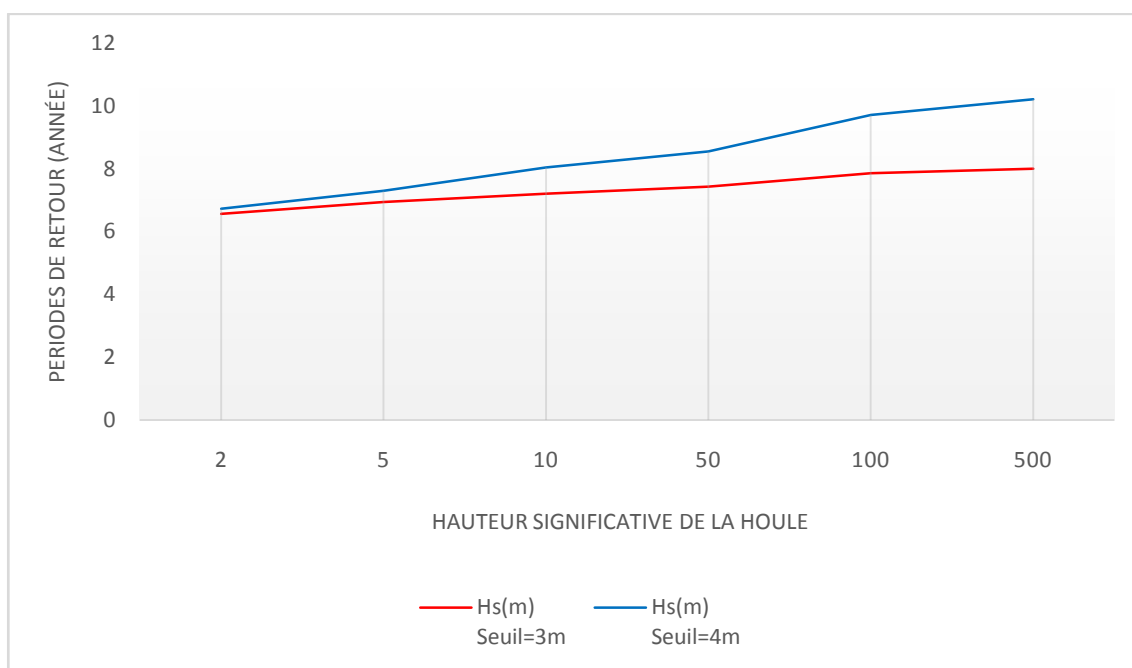


Figure 29 : comparaison des résultats obtenus avec la méthode POT pour des deux seuils de 3 et 4m

4. Comparaison entre la méthode Bloc maximum (GEV) et POT

L'approche basée sur la GEV a été critiquée car l'utilisation d'un seul maximum entraîne une perte d'informations contenues dans les autres grandes valeurs de l'échantillon. Afin de remédier à ce problème, la méthode POT (Peaks-over-Threshold) ou méthode des excès au-delà d'un seuil élevé a été introduite par Pickands. Cette méthode permet de considérer toutes les valeurs excédant un seuil donné, ce qui permet une meilleure prise en compte des valeurs extrêmes dans l'analyse statistique. [Source spécifiée non valide.].

Pour déterminer les résultats les plus précis et les plus efficaces, nous allons effectuer une comparaison entre les deux méthodes : POT (Peaks-over-Threshold) et BM (Block Maxima).

D'après la figure ci-dessus qui représente les résultats des deux méthodes, on constate que les résultats sont presque identiques. Cependant, il est important de noter que la méthode POT fournit généralement des valeurs plus élevées que la méthode BM. Cette différence pourrait être attribuée au fait que la méthode POT prend en compte tous les excès au-delà d'un seuil donné, tandis que la méthode BM se concentre uniquement sur les blocs de données maximaux. Il convient donc de choisir la méthode la mieux adaptée en fonction des objectifs spécifiques de l'analyse et des caractéristiques des données.

Pour les résultats de ces deux méthodes, on obtient $R^2 = 99\%$. Cela nous a permis de vérifier les résultats des deux méthodes.

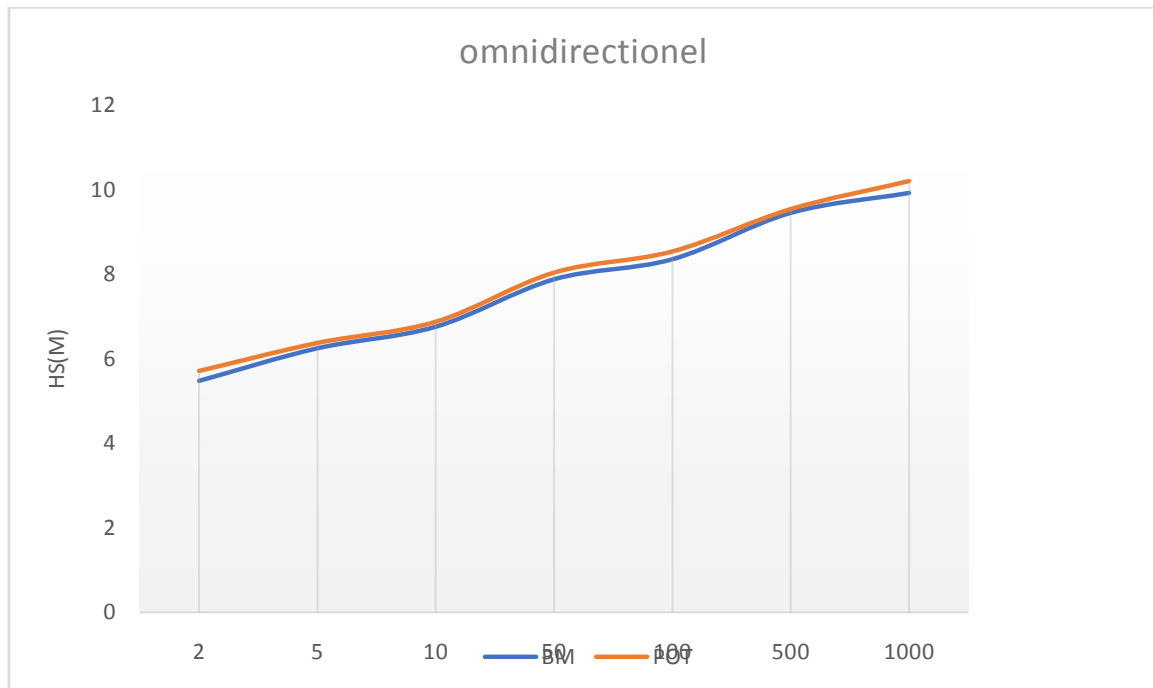


Figure 30: Comparaison des résultats obtenu avec les deux méthode POT et GEV.

5. Conclusion

Suite à l'achèvement de ce chapitre, les conclusions obtenues nous permettent d'établir des scénarios de tempêtes susceptibles d'avoir un impact significatif sur les infrastructures maritimes ainsi que sur l'ensemble du littoral. Pour les hauteurs de houles, nous nous appuyerons sur les résultats issus de la méthode BM distribution de *Gumbul* nous poursuivrons les résultats de la méthode GEV elle ne considère que la valeur maximale de chaque bloc par rapport à la méthode de POT qui considère plus de points. On va poursuivre notre travaille en examinant les valeur du BM distribution de Gumbel parcequ'elle est moins sensible aux valeurs atypiques et aussi fournit des valeurs plus logiques.

Chapitre IV : Modélisation numérique

1. Introduction

Ce chapitre est porté sur l'étude hydrodynamique, nous avons mobilisé un certain nombre de données et d'outil pour faire ressortir des paramètres telles quelles : les changements et les modifications survenus à la houle lors de sa propagation du large vers la cote, courants générés par la houle et la simulation du phénomène de la submersion.

Cette étude s'articule autour de trois parties complémentaires :

- ✓ En premier lieu les données nécessaires pour la simulation ont été récoltées, en plus d'une étude bathymétrique, qui est une étape basique pour parvenir à une modélisation du fonctionnement hydro-sédimentaire.
- ✓ En deuxième lieu une détermination des modules intégrés dans un système de modélisation Mike21 (SW, HD et ST) a été faite, en fonction de nos besoins dans l'objectif d'avoir un aperçu hydro-sédimentaire de la zone.
- ✓ Au final on présente et interprète les résultats issus de la simulation sous le Mike21.

2. Modélisation numérique

En ce qui concerne la modélisation numérique, tout comme pour beaucoup d'aspects de la physique, les développements en météorologie ont précédé ceux en océanographie. Le modèle le plus reconnue dans ce type de modélisation est le MIKE21 développé par l'institut hydraulique Danois.

De nombreux modèles numériques destinés à des applications hydrauliques comportent des équations de continuité et de mouvement ou d'énergie. Les modèles de ce type simulent par exemple le mouvement de l'eau ou l'interaction entre l'eau et les ouvrages hydrauliques (Dahmani A., 2016).

Pour réaliser ce travail il faut d'abord recueillir l'ensemble des données nécessaires à la Simulation, commençant par :

- ✓ Etude bathymétrique
- ✓ Modélisation Mike 21
- ✓ Interprétation des résultats

2.1. Présentation du modèle

MIKE est un système logiciel développé par le DanishHydraulics Institute (DHI) et reposant sur un maillage structuré (grille rectangulaire ou curviligne) ou, pour certains modules, sur un maillage non structuré.

Actuellement, le cadre MIKE Zéro donne accès aux systèmes de modélisation DHI suivants (DHI, 2007) :

- MIKE21 : un système de modélisation 2D pour les estuaires, les zones côtières maritimes (DHI, 2007)
- MIKE21/3 Modèles intégrés (DHI, 2007)
- LITPACK - un système de modélisation des processus littoraux et de la cinétique du littoral (DHI, 2007)

Pour la réalisation de notre travail nous avons utilisé le Modèle Mike 21

MIKE 21 est une suite logicielle professionnelle de modélisation numérique 2D des écoulements à surface libre, développée par DHI Water & Environnement. Il permet la simulation de l'hydraulique et des phénomènes associés dans les rivières, les lacs, les baies, les zones côtières et les océans, c'est un modèle de houle spectrale basé sur la conservation de la densité de l'action d'onde qui permet de simuler la propagation des états de mer dans les domaines offshore et côtier. Le modèle inclus les effets de la réfraction et de shoaling liés aux variations bathymétrie, la génération de la houle par action du vent, la dissipation de la houle. La résolution par méthode des volumes finis se base sur le maillage flexible composé d'élément triangulaire dans le plan horizontal. Ces éléments peuvent être affinés dans les zones d'études d'intérêt particulier (DHI, 2014).

Comprend les calculs suivants (DHI, 2014)

- MIKE21-SW (Spectral Waves Flexible Mesh)
- MIKE21-HD (Hydrodynamic model)

Description des modules:

2.1.1. MIKE21-SW (*Spectral Waves*)

Il s'agit d'un Modèle spectral de vague de 3^{ème} génération similaire au SWAN, avec certaines améliorations. Il simule : la croissance des vagues en présence du vent, l'interaction vague non-linéaire, la dissipation par le déferlement et par la friction sur le fond, la réfraction par le changement de profondeur et l'interaction vague-courant. Les calculs du modèle

MIKE21-SW utilisent une grille de maillage flexible et non imbriqué Source spécifiée non valide.

Conditions nécessaires

- SW utilise la formule directionnelle quasi-stationnaire dans le domaine spectral et temporel pour la propagation de la houle.
- Le déferlement est basé sur la formule de (Battejs, et al 1978).
- Le niveau d'eau est considéré nul avec les données de forçage négligeables.
- Le paramètre de rugosité du fond est constant 0,04.
- Les données bathymétriques, et les conditions de la houle.

Paramètres comptant

Calcule la propagation de la houle vers la côte. Il compte les phénomènes suivants :

- La génération de la houle par action du vent
- Les interactions non linéaires vague-vague et la Dissipation due au frottement sur le fond ; aussi la Dissipation due au déferlement ;
- La Réfraction et le Shoaling due à la variation de la profondeur ;
- Les Interactions vagues-courants et les effets de la variation temporelle de la profondeur.

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

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S$$

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

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

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

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

Où :

t est le temps (s) ;

x, y et z sont les ordinales cartésiennes :

η est l'élévation de la surface (m) :

d est la profondeur d'eau (m):

$h = \eta + d$ est la profondeur d'eau totale :

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

$f = 2\Omega \sin\Phi$ est le paramètre de Coriolis (Ω est la vitesse angulaire et Φ la latitude géographique) :

g est l'accélération de gravité(m/s^2) :

ρ est la densité de l'eau (kg/m^3);

S_{xx} , S_{xy} , S_{yx} et S_{yy} sont des composantes du tenseur radial. ν_t est la viscosité verticale turbulente.

P_a est la pression atmosphérique (bar) :

ρ_0 est la densité de référence de l'eau(kg/m^3).

S est l'amplitude du débit dû aux sources ponctuelles et (u_s, v_s) est la vitesse à laquelle l'eau est rejetée dans l'eau ambiante.

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

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

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

$A\eta = z$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \left(\frac{\partial u}{\partial z}; \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho \nu} (\tau_{sx}; \tau_{sy})$$

$A\eta = -d$

$$u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} - w = 0, \left(\frac{\partial u}{\partial z}; \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho \nu} (\tau_{bx}; \tau_{by})$$

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

Équations de conservation de l'action des vagues :

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

Coordonnées cartésiennes :

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

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla(vN) = \frac{S}{\sigma}$$

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

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

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

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

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

Les vitesses de propagation caractéristiques sont données par les équations suivantes :

$$(c_x, c_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}g + \vec{U}$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla_x d \right] - cg \vec{K} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial S}$$

$$(c_x, c_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}g + \vec{U}$$

S est la coordonnée spatiale dans la direction d'onde θ , m est une coordonnée perpendiculaire à S . ∇_x est l'opérateur bidimensionnel différentiel dans l'espace x, y

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{K} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{K} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right]$$

2.1.2. MIKE21-HD (Hydro-dynamic model)

Le modèle traite le frottement sur le fond, l'effet des événements météorologiques (vents et pression atmosphérique), et la force de Coriolis, etc.... Il assure aussi simulation des courants côtiers dû à l'action de la houle dans la zone de déferlement. Il fournit aussi les conditions hydrodynamiques aux autres modules de ce système tel que le module MIKE 21-ST. Le module HD vous permet de spécifier une variété de conditions aux limites hydrographiques, les conditions initiales, la résistance du lit et le forçage du vent. Il vous permet également d'inclure différents types de sources et de puits ainsi qu'un certain nombre de structures différentes. Les variations de densité peuvent être traitées de différentes manières et les contraintes de rayonnement des simulations d'ondes peuvent être facilement incluses.

Conditions nécessaires

- Les courants sont calculés à partir des contraintes de radiation issues du modèle SW.
- Le niveau de la mer constante (0,34m),
- La viscosité $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$, la résistance $32 \text{ m}^2/\text{s}$.
- Vitesse de vents $3,75 \text{ m/s}$.

Conditions nécessaires

Calcule la variation spatiale des niveaux et des débits d'eau dus à des mécanismes de forçage, tels que les vents, les courants, et les déferlements. Il compte les phénomènes suivants :

- Frottement sur le fond–Frottement de vent à la surface de l'eau,
Gradient de pression barométrique,
- Force de Coriolis,
- Contrainte de radiation.

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

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = hS$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial hvu}{\partial y} &= fvh - gh \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_w}{\partial x} + \\ \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) &+ \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + hu_s S \\ \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} &= fuh - gh \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_w}{\partial y} + \\ \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) &+ \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned}$$

Où :

- t : Temps (s)
- x, y, z : Coordonnées cartésiennes
- η : Hauteur de la surface (m)
- d : Profondeur de l'eau(m)
- h : Profondeur totale de l'eau, h = η + d
- f : Paramètre de Coriolis, f = 2Ωsinθ
- Ω : vitesse angulaire de révolution
- θ : Latitude géographique
- ρw : Densité de l'eau(kg/m³)
- pa : Pression atmosphérique (bar)
- ρ0 : Densité de référence de l'eau (kg/m³)
- u, v, w : Composantes de la vitesse du courant dans les directions x, y, et z
- Sxy, Syx, Sxx, Syy : Composantes du tenseur de rayonnement
- vt, A : Viscosités turbulentes verticale et horizontale, respectivement
- S : Amplitude de la décharge causée par des sources ponctuelles
- (us, vs) : Vitesses par laquelle l'eau est déchargée dans l'eau ambiante
- (τsx, τsy), (τbx, τby) : Composantes x et y des contraintes de cisaillement du vent de surface et du fond, respectivement, La barre supérieure décrit une valeur moyenne.

2.1.3. Model FM MIKE21/3 Coupled model

Le modèle FM MIKE21/3 Couplé comprend différents modules, nous pouvons sélectionner pour être inclus dans la simulation : hydrodynamique, transport du sable, spectre de vague, etc. Le modèle comprend également un couplage dynamique entre le module de transport du sable et le module hydrodynamique et le module spectral de vague. (DHI ,2014)

Le pas de temps discret global est utilisé pour déterminer les fréquences des ordres pouvant être obtenus à partir de différents blocs et pour synchroniser l'assemblage de différents blocs.

Le pas de temps local pour le module spectral d'onde (SW) et le module de transport des sable (ST) peut être défini comme un multiple du pas de temps global et du facteur de pas de temps.

Les interactions entièrement dynamiques suivantes entre le module hydrodynamique et le module spectral de vague sont possibles (DHI, 2014h) :

- Dans le module hydrodynamique, il est possible d'inclure le champ de contrainte et de rayonnement à partir de la simulation de spectre de vague (DHI, 2014h).
- Dans le module spectral de vague, il est possible d'inclure la variation du niveau d'eau à partir de la simulation hydrodynamique (DHI, 2014h).
- Dans le module spectral de vague, il est possible d'inclure la variation de courant à partir de la simulation hydrodynamique (DHI, 2014h).

3. Création d'une bathymétrie sous un maillage :

Les études bathymétriques sont des études primordiales dans l'interprétation de la morphologie sous-marine de notre zone d'étude pour des résultats fiables et précis. Pour cela, nous introduisons les points bathymétriques obtenus sur MIKE21 pour en faire une carte bathymétrique. et pour arriver à un résultat satisfaisant, plusieurs étapes sont nécessaires :

Les données inputs

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

Le levé bathymétrique consiste à déterminer les coordonnées tridimensionnelles des points du fond marin dans le système géodésique WGS84 à l'aide d'un récepteur GPS et d'un échosondeur.

Point de contrôle

Pour la digitalisation des ouvrages de protection de notre zone d'étude on a utilisé le logiciel ArcGIS 10.4.1 qui est une suite de logiciels d'information géographique (SIG) développés par la société américaine Esri (Environmental Systems Research Institute). Il est composé de plusieurs modules connectés entre eux (ArcMap, ArcScène, ArcCatalogue, ...). et plus

précisément on a créé un shape-file "point" en Arc map et puis addfield pour ajouter deux champs X (coordonnée longitude) et Y (coordonnée latitude) Z (profondeur) ; et pour introduire ces données en Mike il faut d'abord les convertir en fichier xyz à l'aide du module arctoolbox.

Génération de la Mesh

La génération d'une Mesh est indispensable. Pour la création des de la bathymétrie. On a utilisé l'outil (MeshGenerator) du logiciel Mike-zéro. Ce dernier nous permis de visualiser et importer des données bathymétrique sous un maillage souple ,à l'aide de l'extension "meshunprésentation détaillée de la bathymétrie numérique 2D est disponible, elle fournit également des utilitaires pour importer des données de la ligne de rivage et des points bathymétriques avec le système des coordonnées WGS84 projection UTM zone 31, la grille est constituée d'éléments triangulaires dimensionnés du large à la côteAutoscale (le maillage réduit sa taille lorsque la côte est atteinte).

Une fois la Mesh est générée, les points de bathymétrie doivent être interpolés en fonction du maillage.

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

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

3.1. Mesh et bathymétrie résultante :

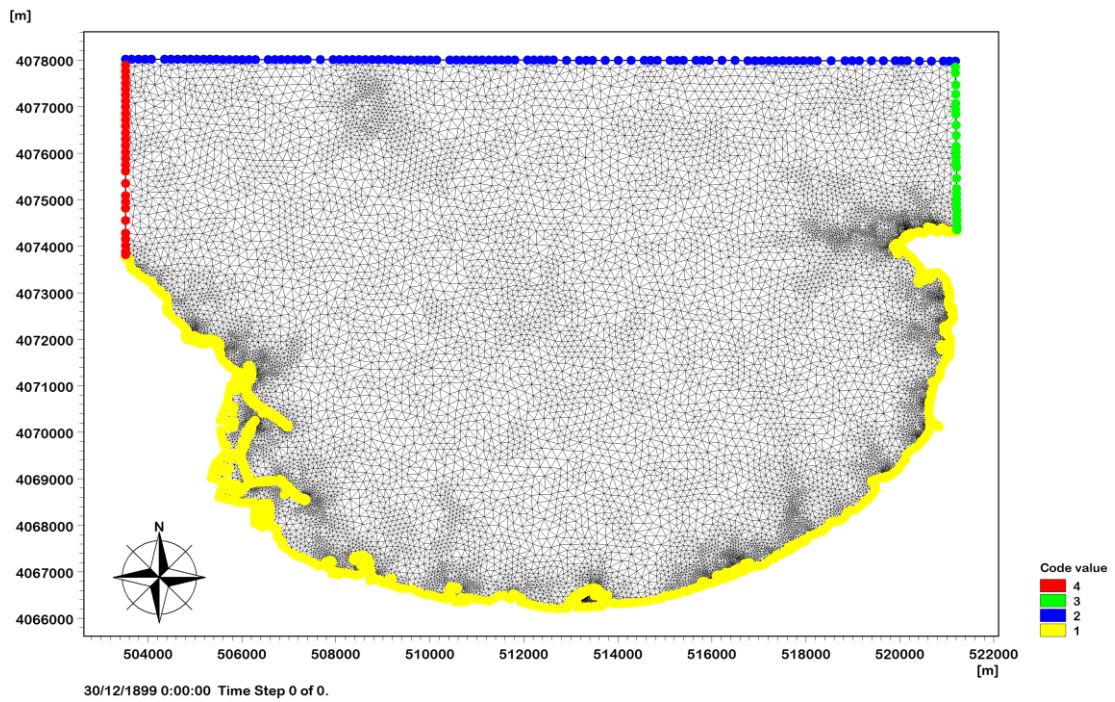


Figure 31 : maillage de la Mesh à échelle de la baie d'Alger.

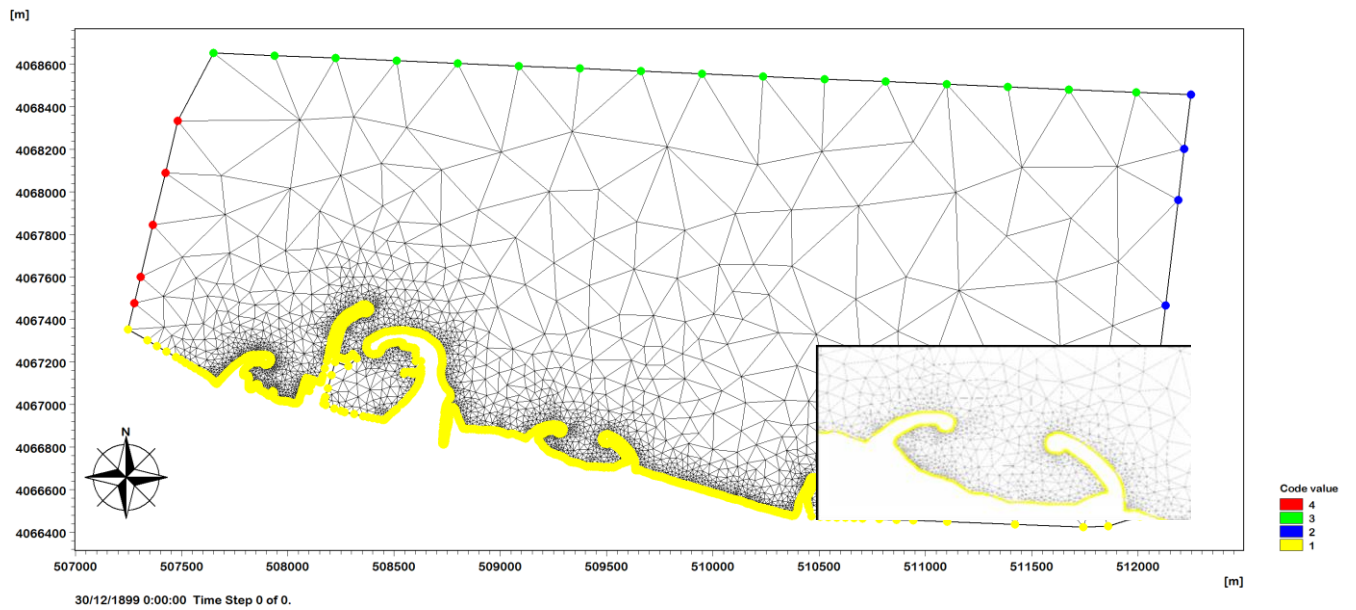


Figure 32: maillage de la Mesh à échelle des Sablettes et de la Grande plage

3.2. Bathymétrie de la baie d'Alger

La bathymétrie de la baie d'Alger présente trois zones distinctes : les zones Est et Ouest près des caps ont une forte pente en raison de la géomorphologie du cap, généralement constitué de falaises formées par une lithologie plus dure et résistante. Ces zones sont également caractérisées par un fort potentiel énergétique dû aux effets hydrodynamiques, avec les

orthogonales de la houle convergent près des caps. Le passage de la côte à l'isobathe de -50 m se fait rapidement des deux côtés de la baie.

En revanche, la zone centrale de la baie d'Alger présente une pente faible, résultant de la lithologie plus friable et meuble, incluant des plages sableuses alimentées par les apports terrigènes des deux oueds de la baie. De plus, les effets de la houle y sont moins énergétiques.

Au large de la baie d'Alger, on observe la fin du plateau continental à la sortie de la baie, caractérisée par des isobathes serrées.

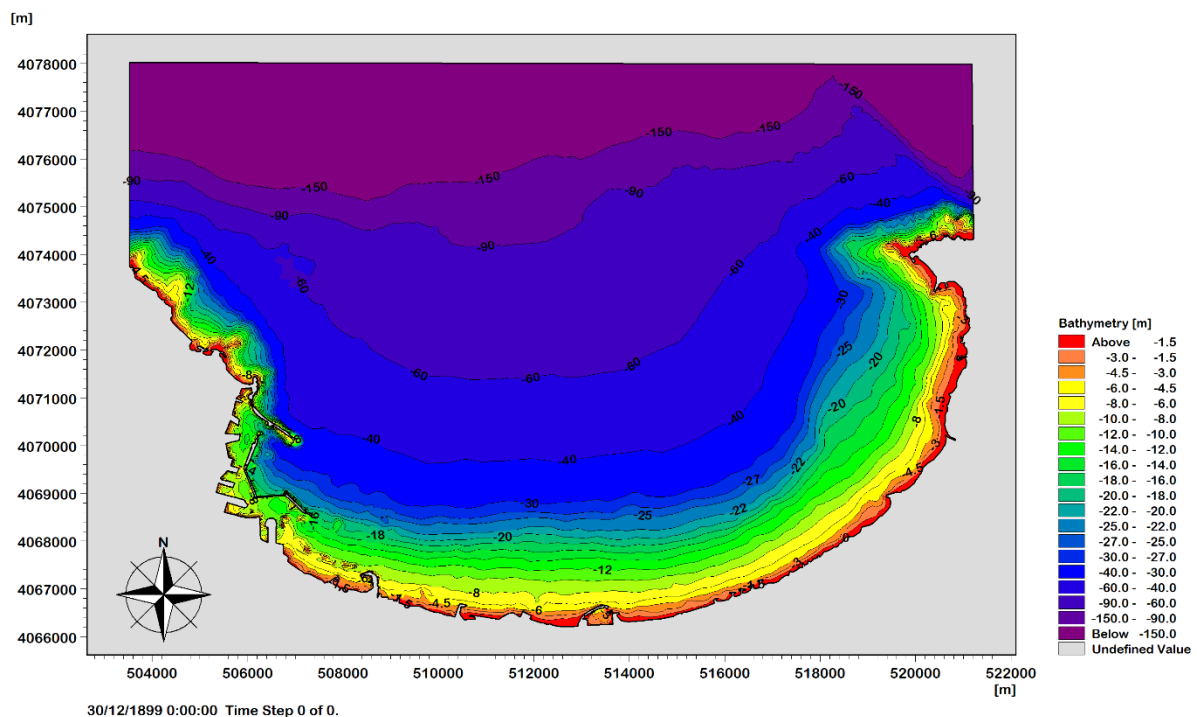


Figure 33: Bathymétrie de la baie d'Alger

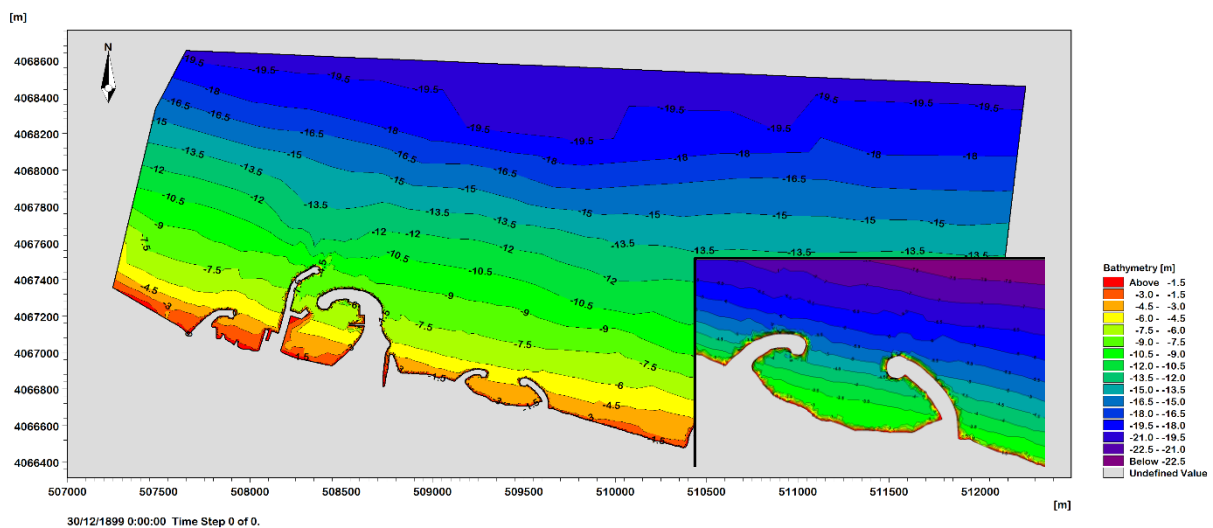
3.3. Bathymétrie de la zone des Sablettes

Cette carte bathymétrique présente une analyse détaillée de la zone côtière Des Sablettesituée à l'ouest de la baie d'Alger, mettant en évidence les caractéristiques bathymétriques ainsi que les ouvrages de protection présents le long du littoral.

La bathymétrie de la zone révèle une topographie sous-marine variée, avec des profondeurs allant de 1,5 à 20 mètres. Les isobathes sont à intervalle régulier et presque parallèle au large de la cote, qui signifie une pente douce et uniforme.

Entre -3m et 0m : L'écartement entre les isobathes est irrégulier et les isobathes sont hétérogènes et ne sont pas parallèles entre eux mais ils sont très serrés avec une forte pente due essentiellement à l'implantation des ouvrages de protection et les fluctuations hydrométéorologiques.

Pour notre zone d'étude « Grande plage », on remarque : à l'intérieur de la plage la profondeur varie entre 0,5 et 5,5m avec une pente douce.



4. Scénario de simulation :

Ce fait par les modèles du logiciel cité au préalable qui vont générer les résultats des cartes pour chaque direction.

Directions pénalisantes

D'après les résultats des roses des houles et des roses des vents que nous avons obtenus dans le deuxième chapitre, nous avons pu déterminer les directions pénalisantes dans notre zone d'étude. En raison de la configuration de la baie d'Alger orientée plein Nord et de la position centrale des Sablettes à l'intérieur de celle-ci, les Sablettes sont naturellement abritées des impacts directs des houles provenant du Nord-Nord-Est et de l'Ouest-Nord-Ouest.

Pour l'extraction des caractéristiques de la houle, nous avons choisi le point situé à 37°N et 3°15'E, avec une profondeur de 2000 m

Une fois les directions pénalisantes déterminées et les événements extrêmes calculés, la méthodologie que nous avons suivie consiste à associer, pour chaque période de retour, les paramètres essentiels des houles à simuler aux deux directions pénalisantes.

Tableau 2 : les inputs des simulations pour l'ensemble des périodes de retours.

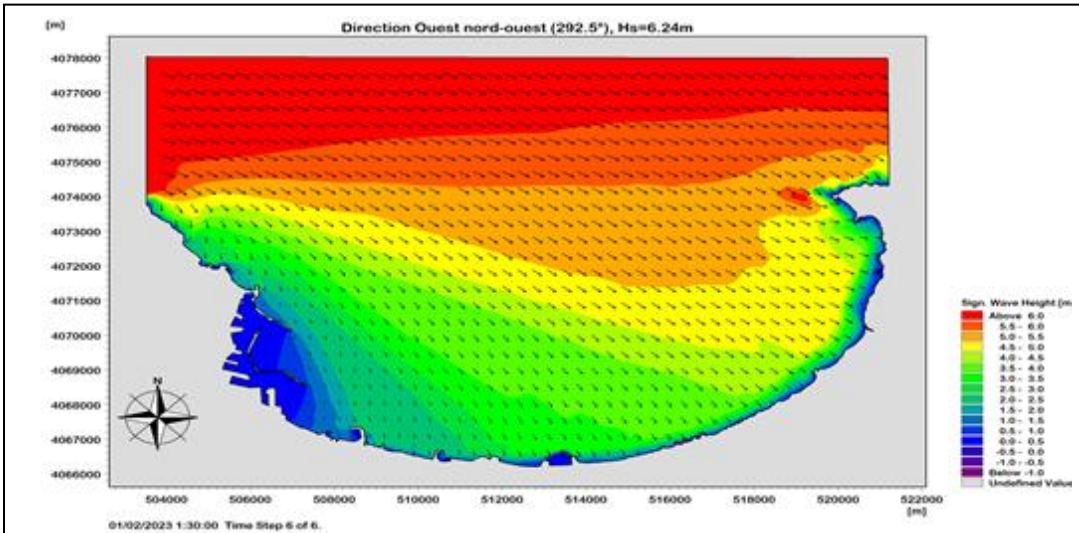
Période de Période de retours (Année)	Paramètre du Vent	Directions pénalisantes			
		Echelle globale		Echelle locale	
		NNE	WNW	NNE	WNW
5	Hs (m)	6,24	6,24	5,26	2,73
	Tp (s)	10,49	10,49	9,85	8,21
	U10 (m/s)	18,81	18,81	16,17	9,34
10	Hs (m)	6,75	6,75	5,84	3,00
	Tp (s)	10,82	10,82	10,23	8,39
	U10 (m/s)	11,56	11,56	17,73	10,07
50	Hs (m)	7,88	7,88	6,97	3,66
	Tp (s)	11,56	11,56	10,97	8,81
	U10 (m/s)	23,24	23,24	20,78	11,85
100	Hs (m)	8,35	8,35	7,47	3,98
	Tp (s)	11,86	11,86	11,29	9,02
	U10 (m/s)	24,51	24,51	22,13	12,71

La vitesse de vent et la période pic ont été calculés à l'aide des équations suivantes : les équations suivantes sont issues de notre base de données après la trace d'une courbe et l'extraction de l'équation de la régression linéaire .

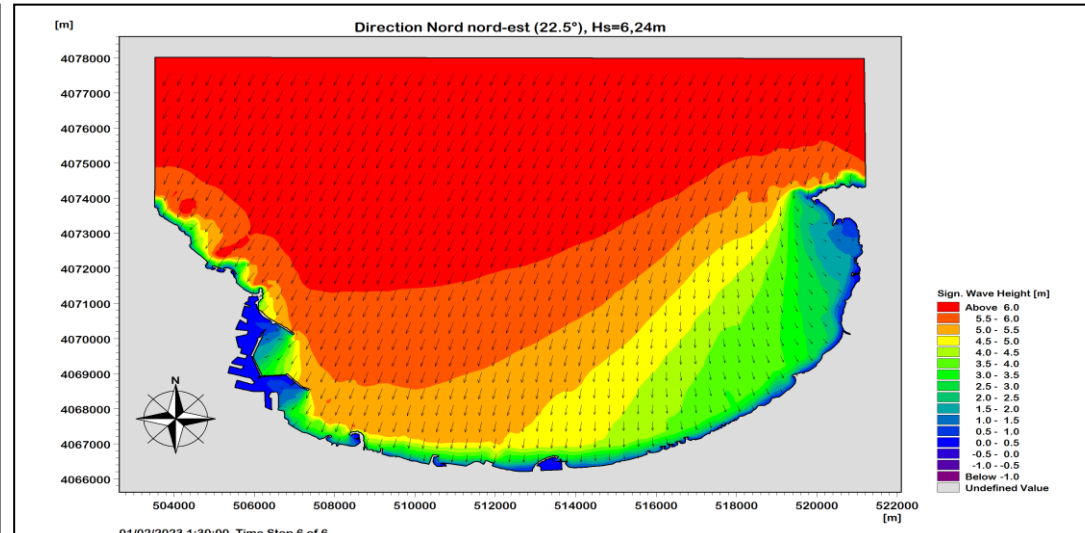
$$U10 = 2.7Hs + 1.97$$

$$Tp = 0.65Hs + 6,44$$

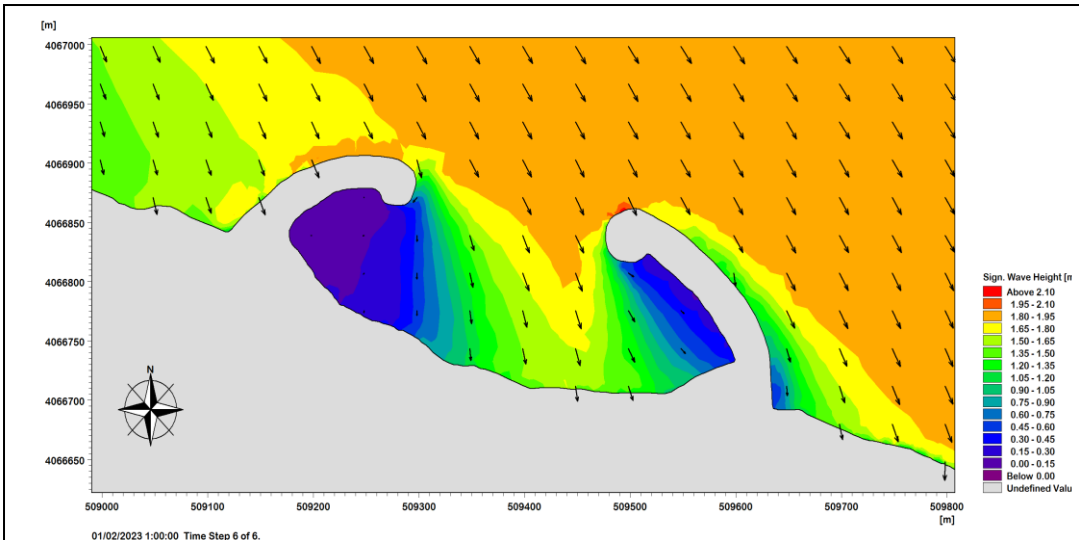
5. Résultats de simulations



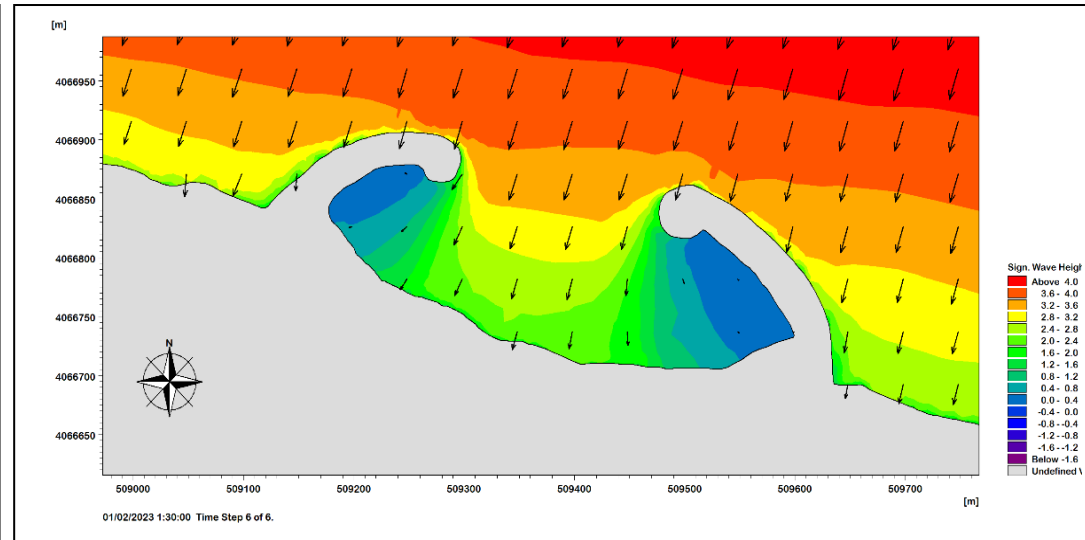
Champs des houles dans la Baie d'Alger de direction WNW (paramètres de houle pour une période de retour de 5ans)



Champs des houles dans la Baie d'Alger de direction NNE (paramètres de houle pour une période de retour de 5ans)

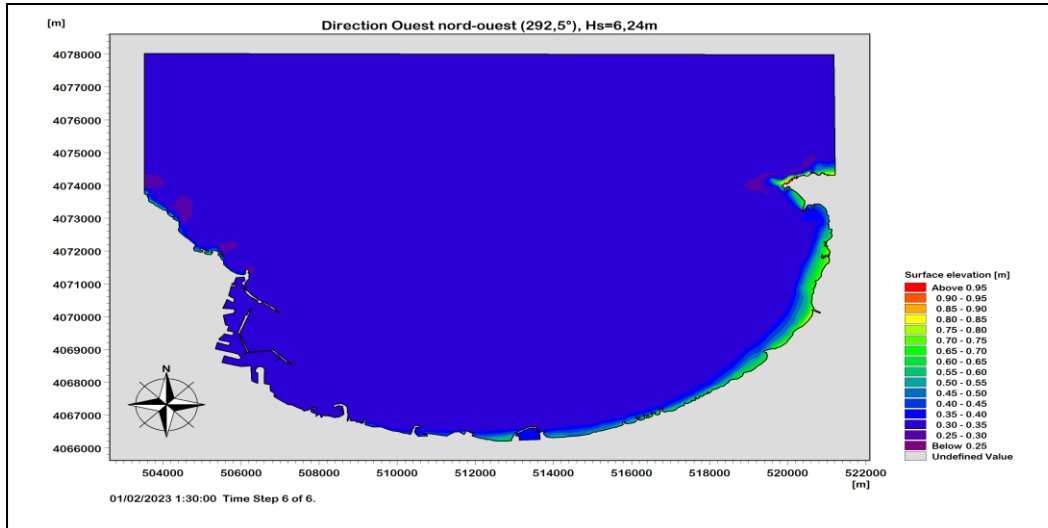


Champs des houles dans la zone d'étude (Grande Plage) direction WNW (paramètres de houle pour une période de retour de 5ans)

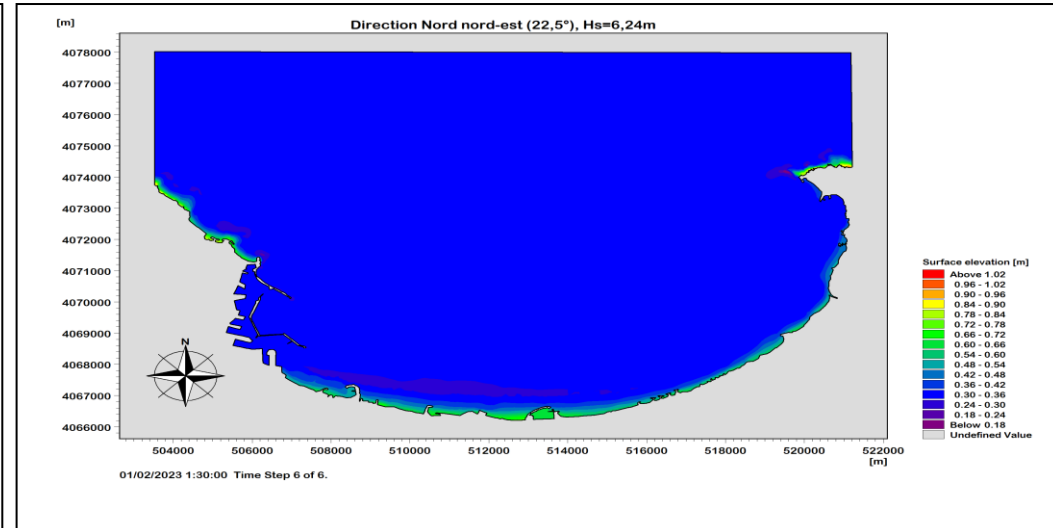


Champs des houles dans la zone d'étude (Grande Plage) de direction NNE (paramètres de houle pour une période de retour de 5ans)

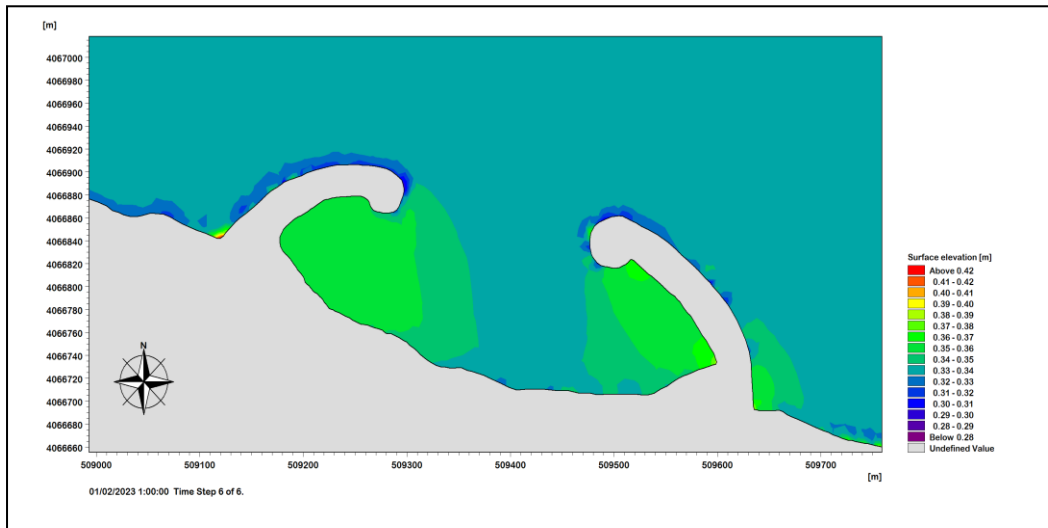
Figure 35 : Champs des houles dans la Baie d'Alger et la zone d'étude de direction NNE et WNW pour la période de retour de 5ans



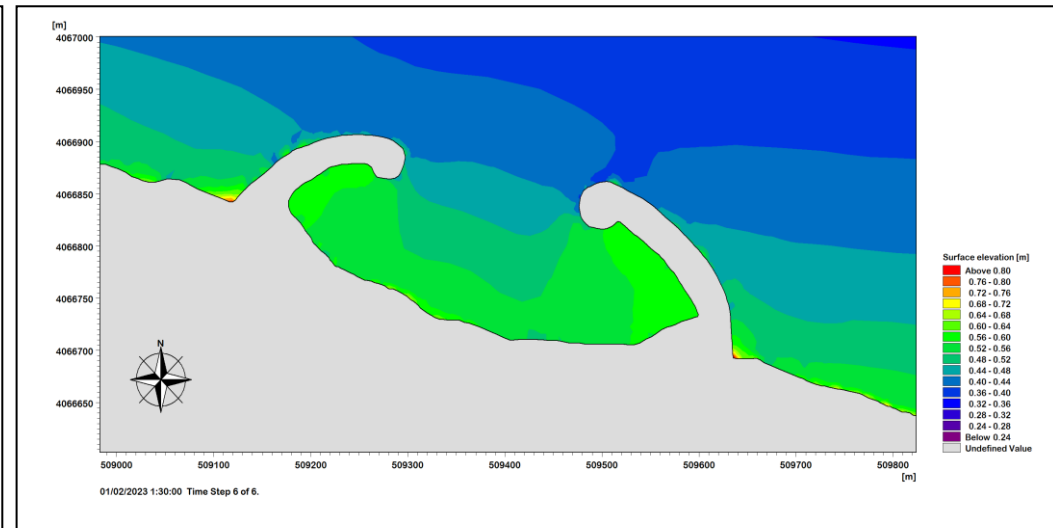
Carte d'élévation de surface de la zone de la Baie d'Alger de direction WNW (paramètres de houle pour une période de retour de 5ans)



Carte d'élévation de surface de la Baie d'Alger de direction NNE (paramètres de houle pour une période de retour de 5ans)

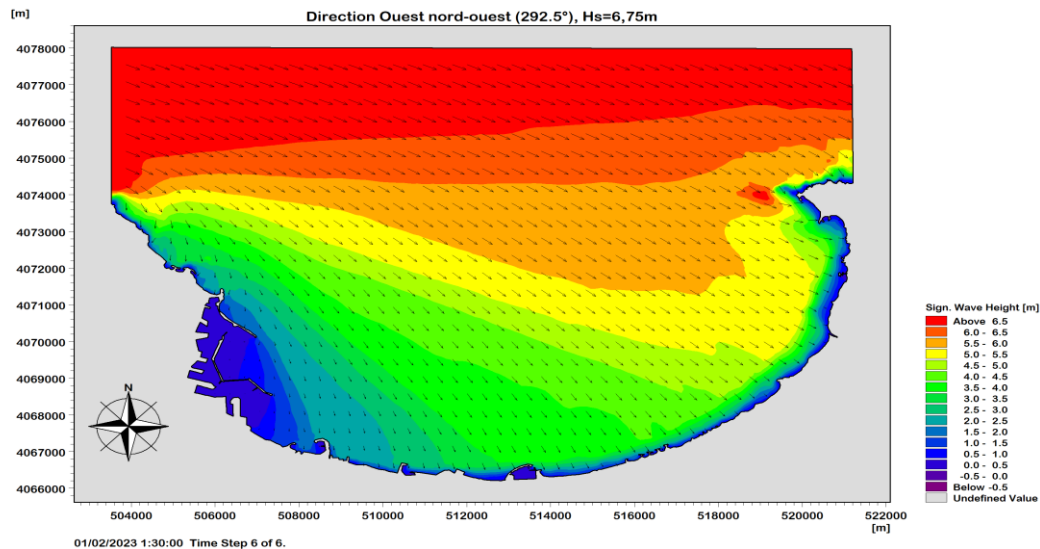


Carte d'élévation de surface de la zone d'étude (Grande Plage) de direction WNW (paramètres de houle pour une période de retour de 5ans)

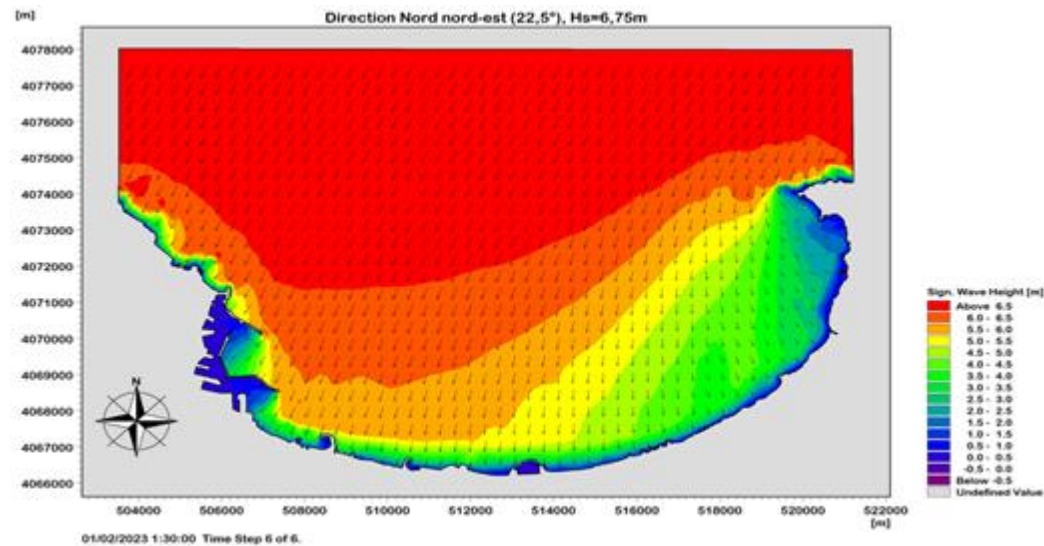


Carte d'élévation de surface de la zone d'étude (Grande Plage) de direction NNE (paramètres de houle pour une période de retour de 5ans)

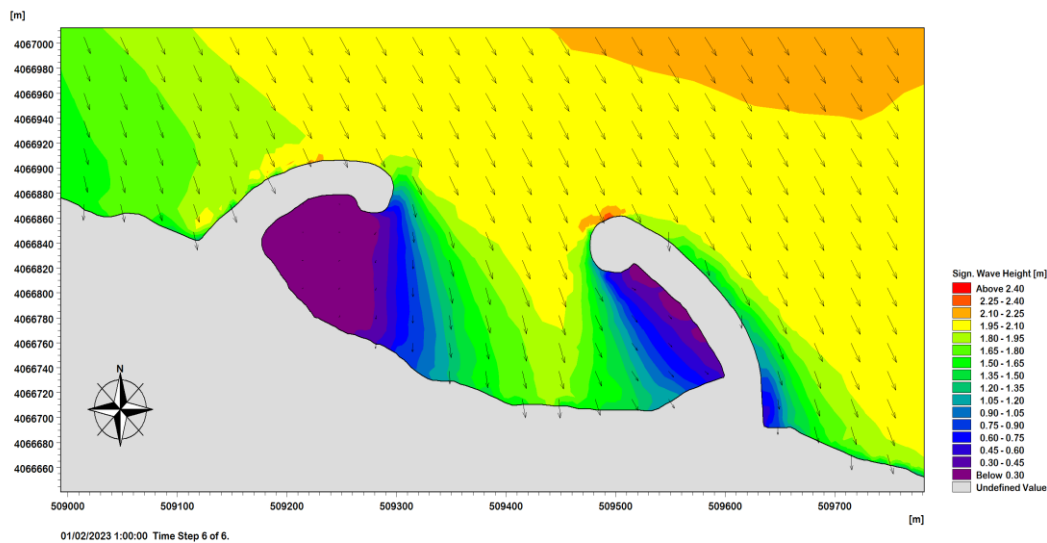
Figure 36 : Carte de l'élévation de la surface de la mer dans la Baie d'Alger et la zone d'étude de direction NNE et WNW pour la période de retour de 5ans



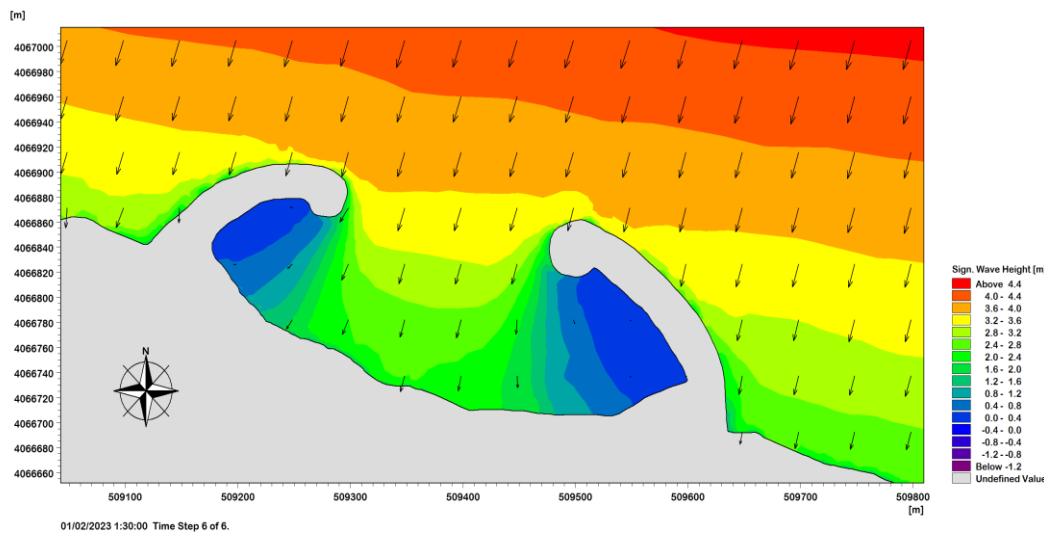
Champs des houles dans la Baie d'Alger de direction WNW (paramètres de houle pour une période de retour de 10ans)



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

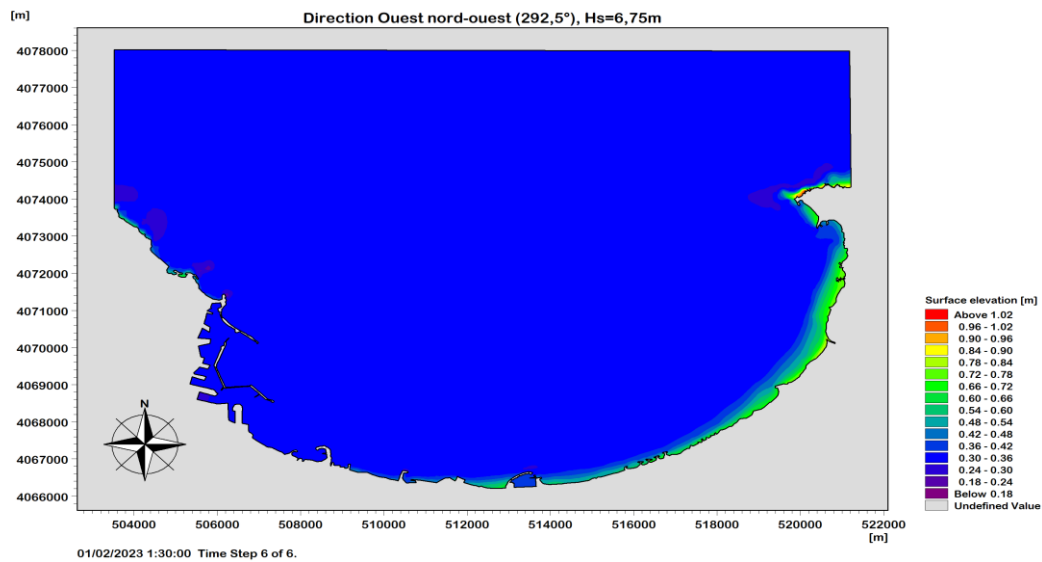


Champs des houles dans la Baie d'Alger de direction WNW (paramètres de houle pour une période de retour de 10ans)

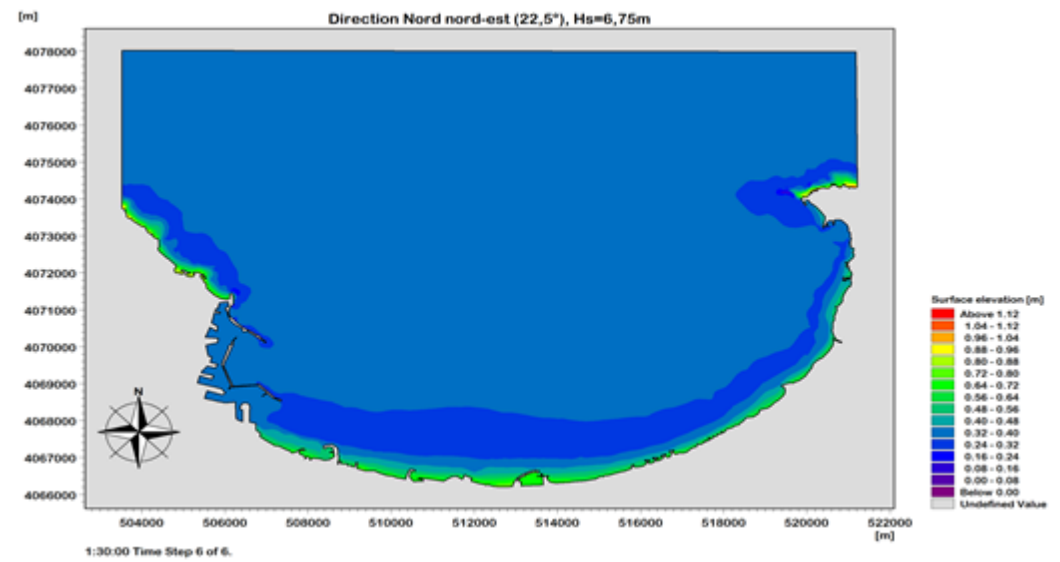


Champs des houles dans la Baie d'Alger de direction NNE (paramètres de houle pour une période de retour de 10ans)

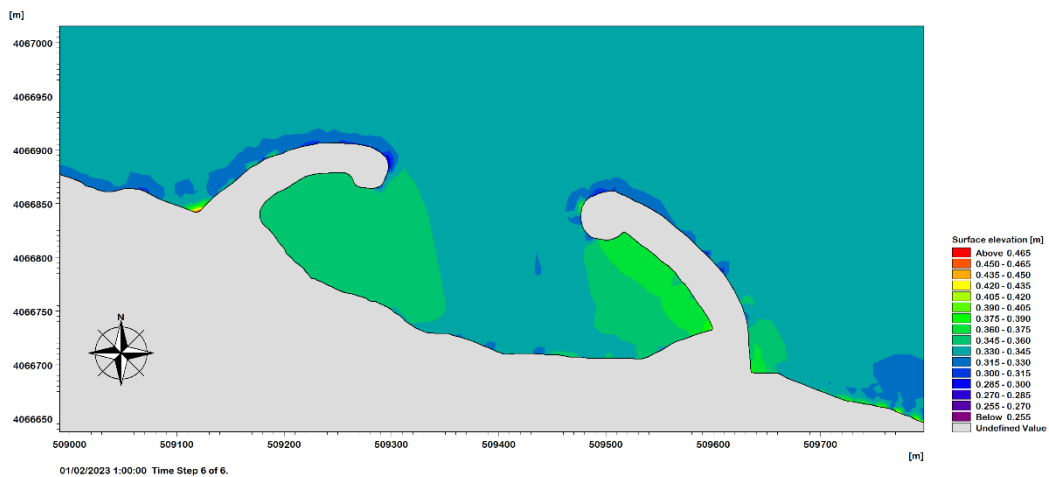
Figure 37 : Champs des houles dans la Baie d'Alger et la zone d'étude de direction NNE et WNW pour la période de retour 10ans



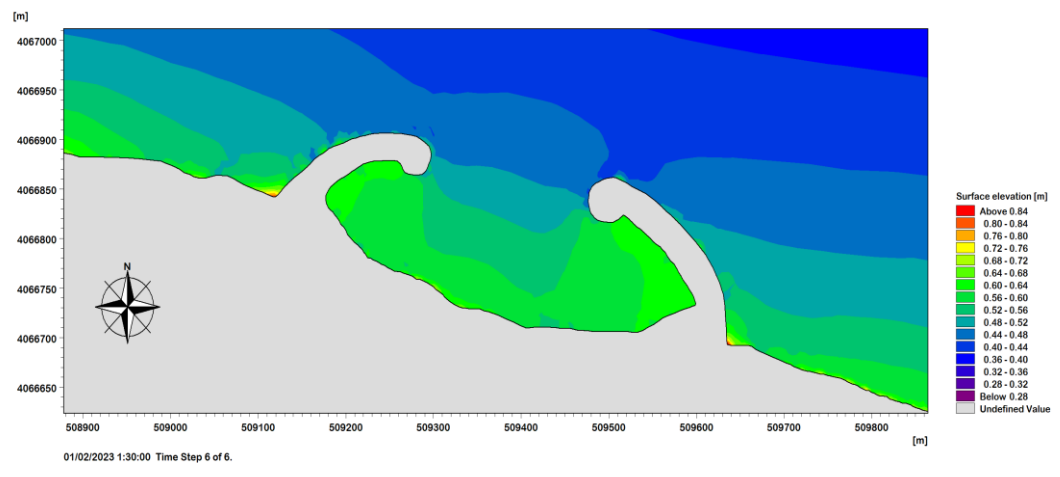
Carte d'élévation de surface de la Baie d'Alger de direction WNW (paramètres de houle pour une période de retour de 10 ans)



Carte d'élévation de surface de la Baie d'Alger de direction NNE (paramètres de houle pour une période de retour de 10ans)

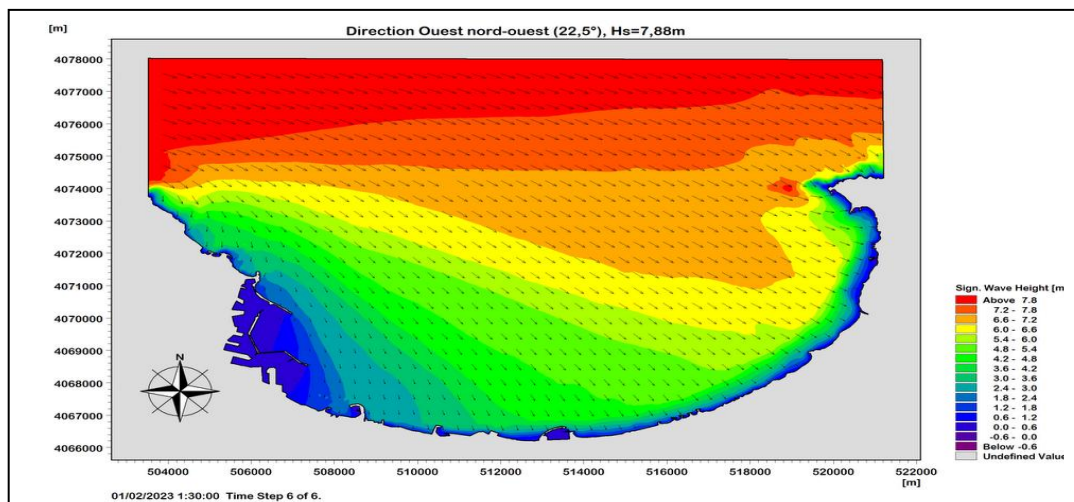


Carte d'élévation de surface au voisinage de la zone d'étude (Grande Plage) de direction WNW (paramètres de houle pour une période de retour de 10ans)

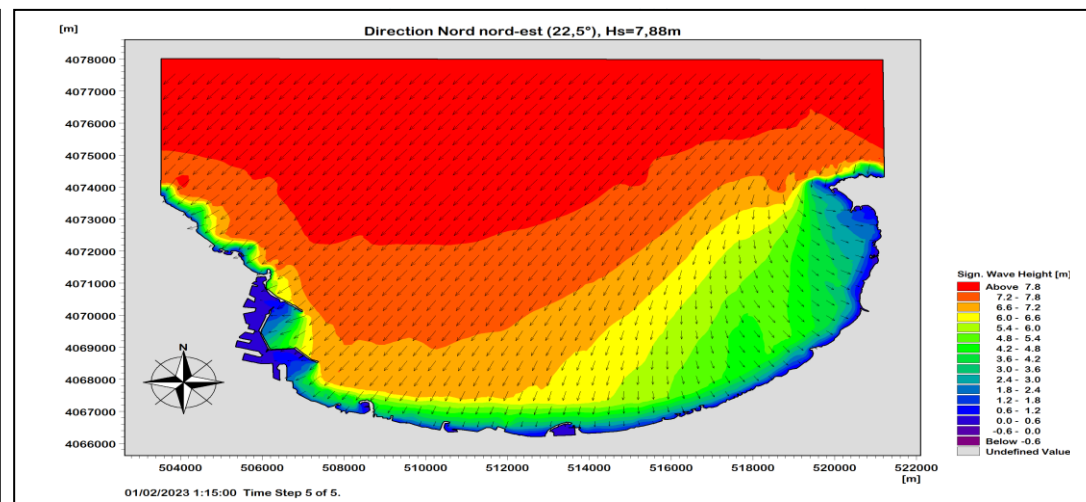


Carte d'élévation de surface au voisinage de la zone d'étude (Grande Plage) de direction NNE (paramètres de houle pour une période de retour de 10ans)

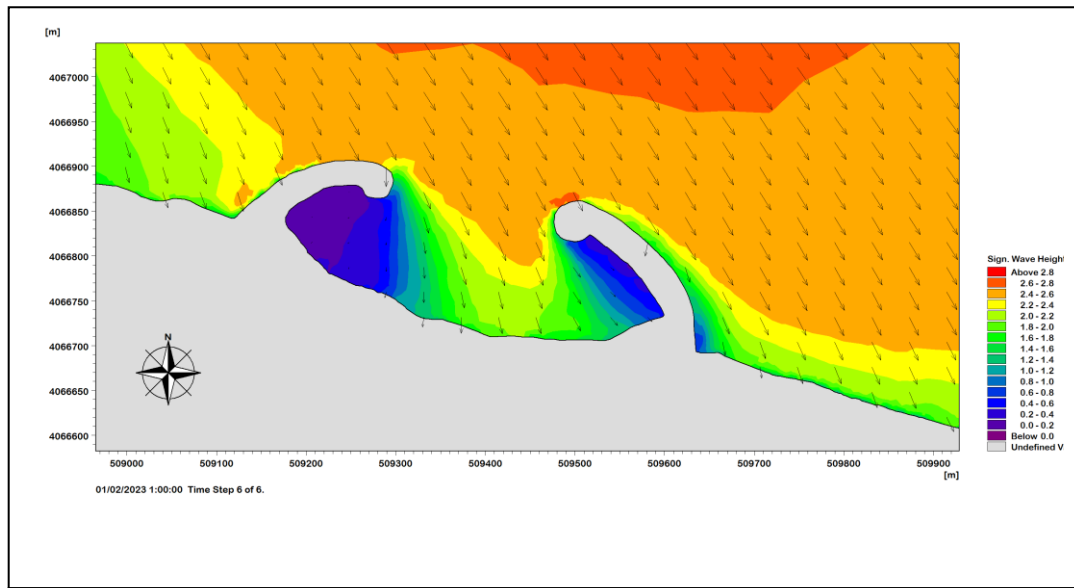
Figure 38 : Carte d'élévation de surface dans la Baie d'Alger et la zone d'étude de direction NNE et WNW pour la période de retour 10ans



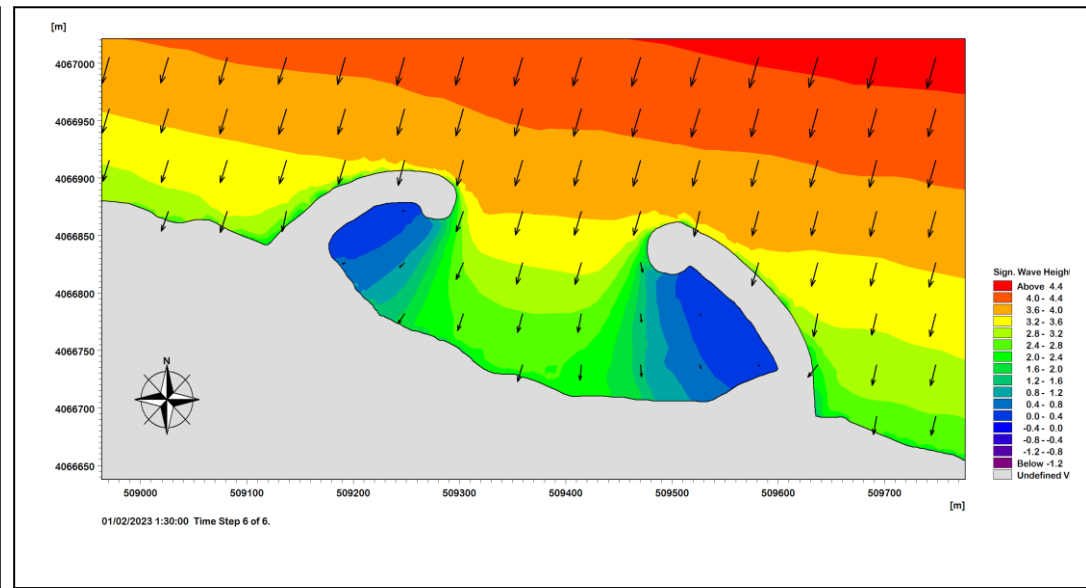
Champs des houles dans la Baie d'Alger de direction WNW (paramètres de houle pour une période de retour de 50ans)



Champs des houles dans la Baie d'Alger de direction WNW (paramètres de houle pour une période de retour de 50ans)

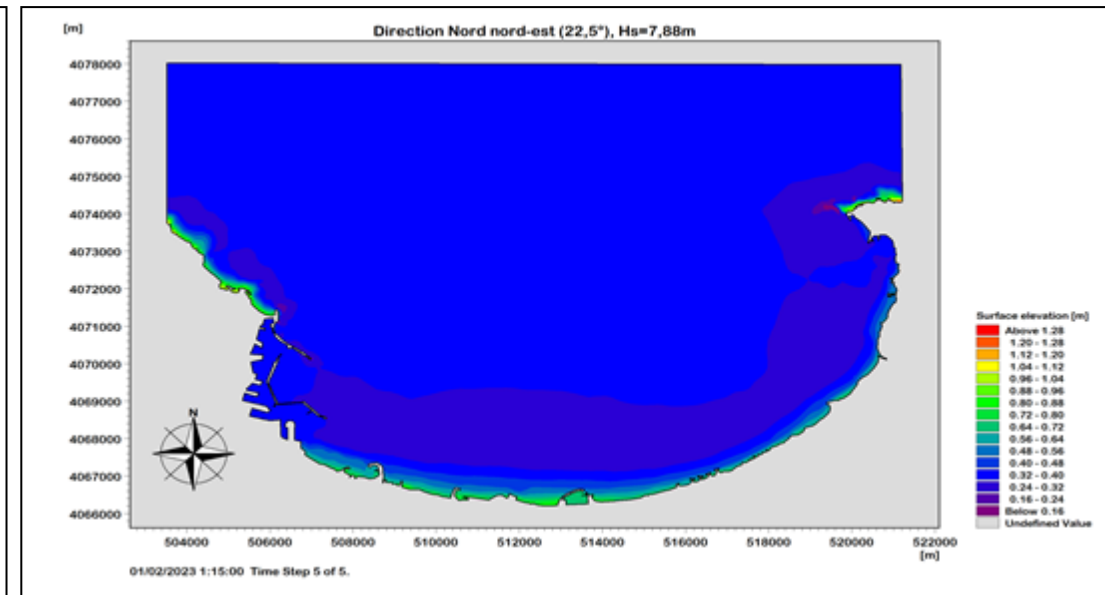
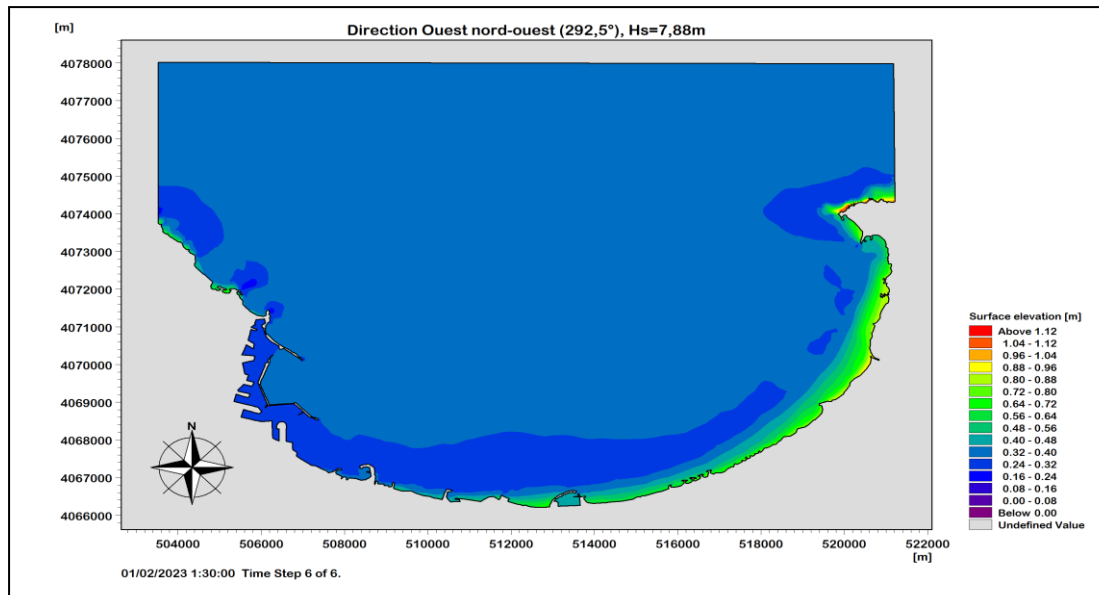


Champs des houles dans la zone d'étude (Grande Plage) de direction NNE (paramètres de houle pour une période de retour de 50ans)



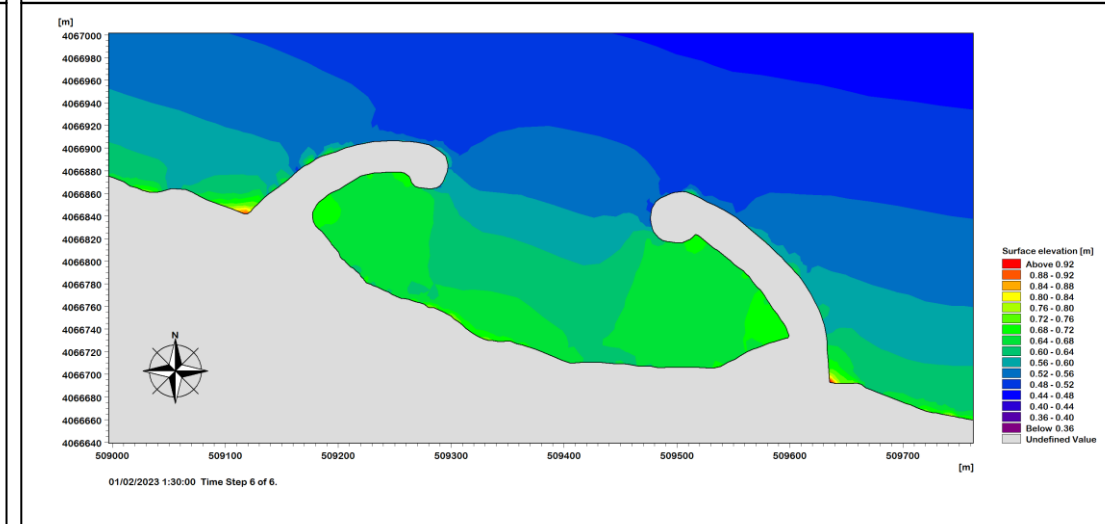
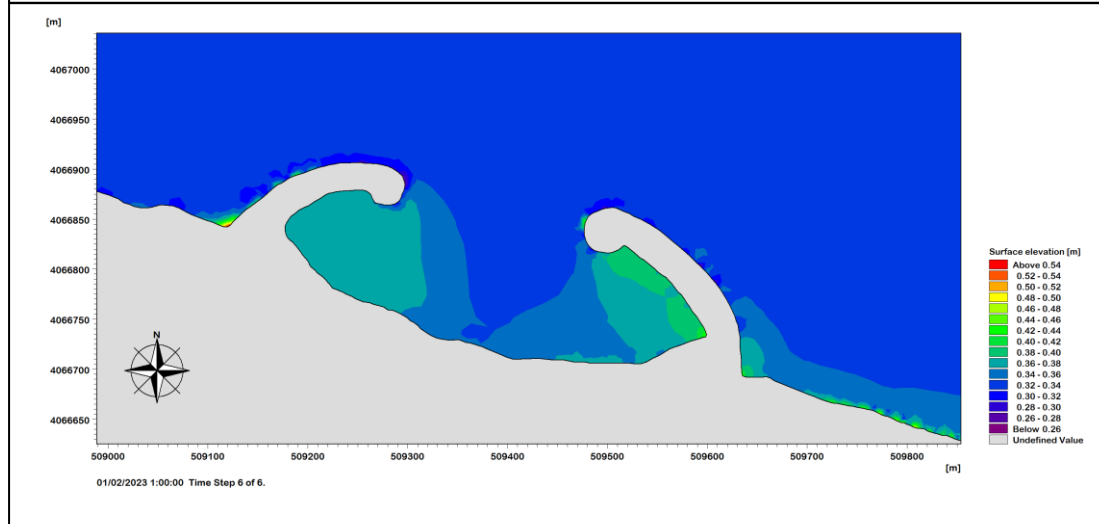
Champs des houles dans la zone d'étude (Grande Plage) de direction WNW (paramètres de houle pour une période de retour de 50ans)

Figure 39 : Champs des houles dans la Baie d'Alger et la zone d'étude de direction NNE et WNW pour la période de retour 50ans



Champs des courants au voisinage de la Baie d'Alger de direction WNW (paramètres de houle pour une période de retour de 50ans)

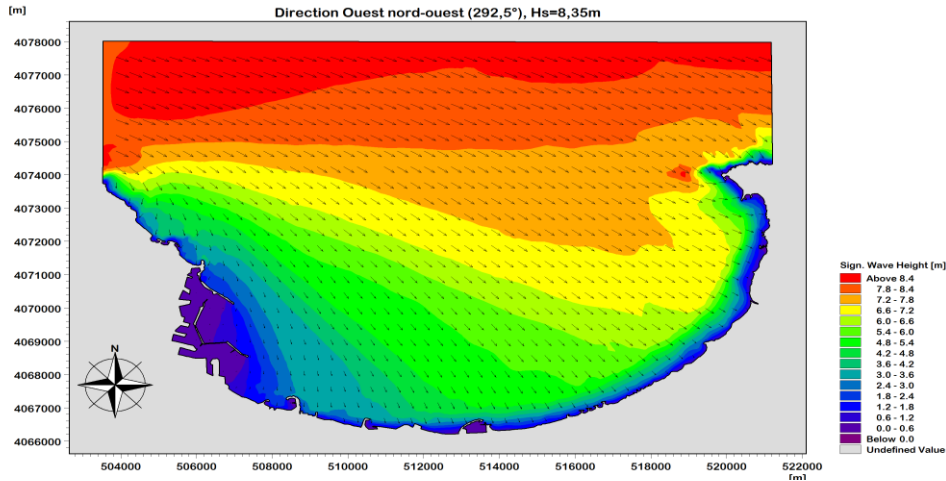
Champs des courants au voisinage de la Baie d'Alger de direction NNE (paramètres de houle pour une période de retour de 50ans)



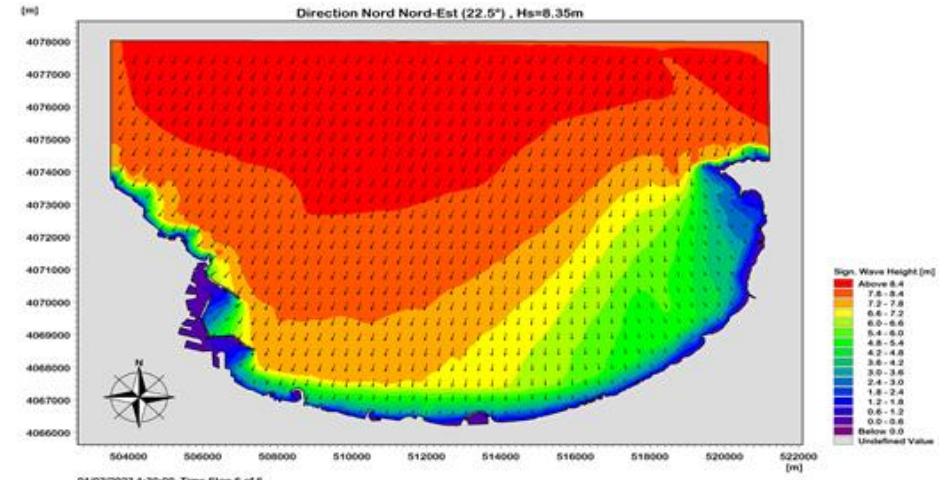
Champs des courants au voisinage de la zone d'étude (Grande Plage) de direction NNE (paramètres de houle pour une période de retour de 50ans)

Champs des courants au voisinage de la zone d'étude (Grande Plage) de direction WNW (paramètres de houle pour une période de retour de 50ans)

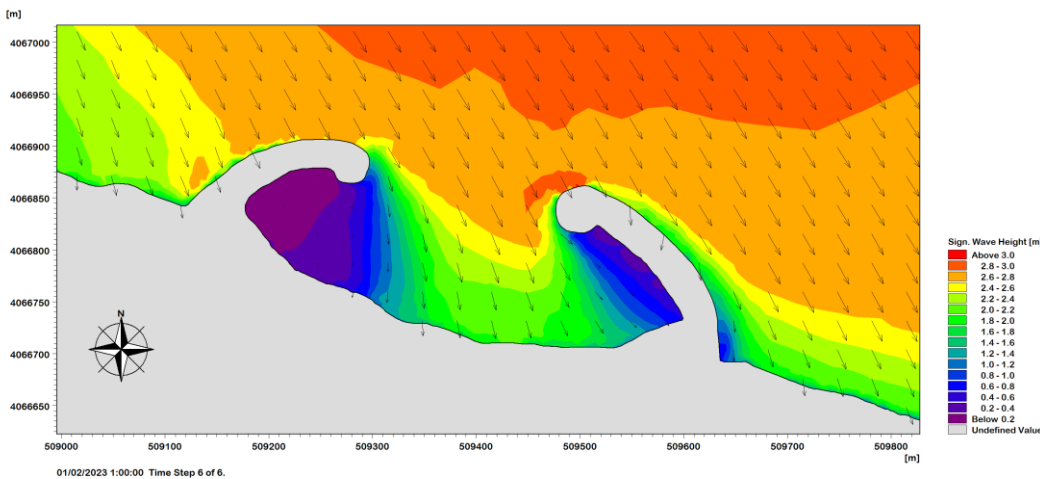
Figure 40 : Carte d'élévation de surface dans la Baie d'Alger et la zone d'étude de direction NNE et WNW pour la période de retour 50ans



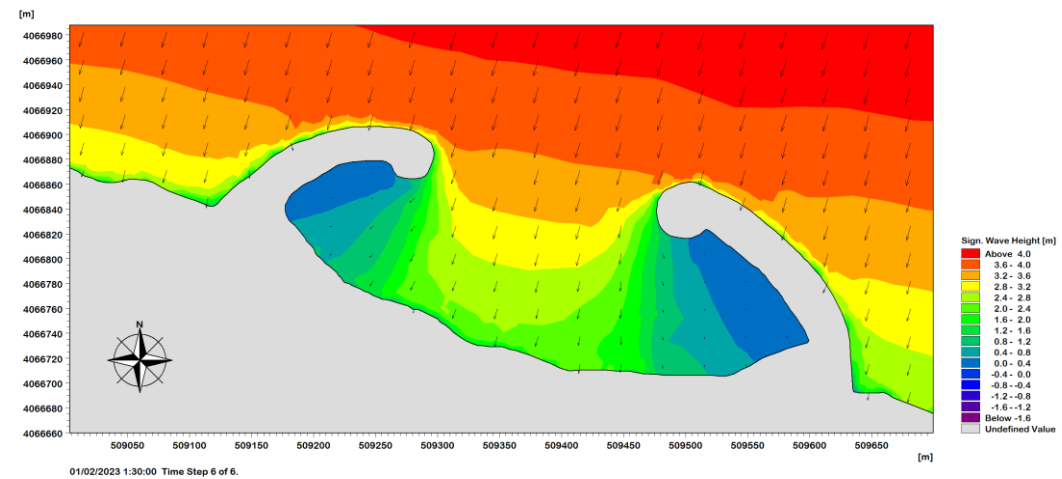
Champs des houles dans la Baie d'Alger de direction WNW (paramètres de houle pour une période de retour de 100ans)



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

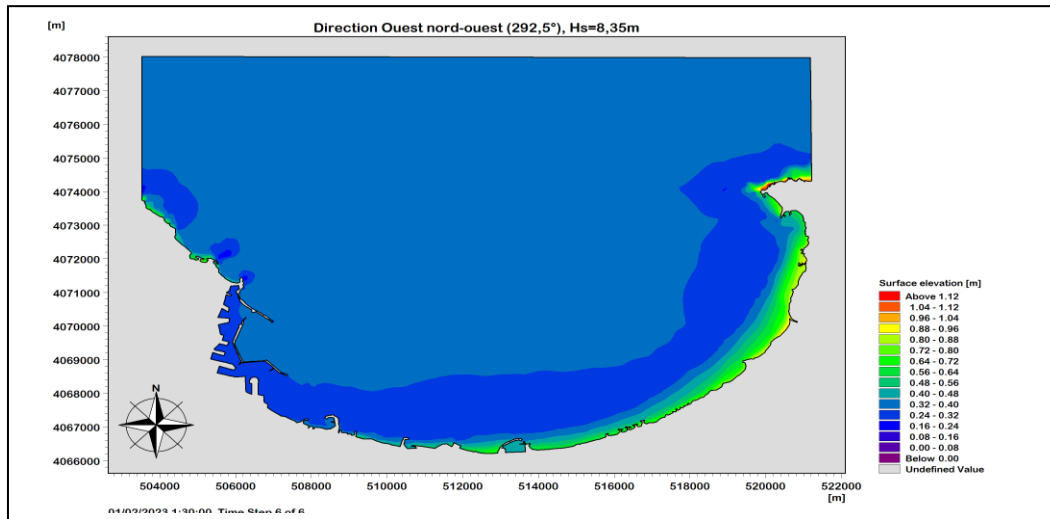


Champs des houles dans la zone d'étude (Grande Plage) de direction WNW (paramètres de houle pour une période de retour de 100ans)

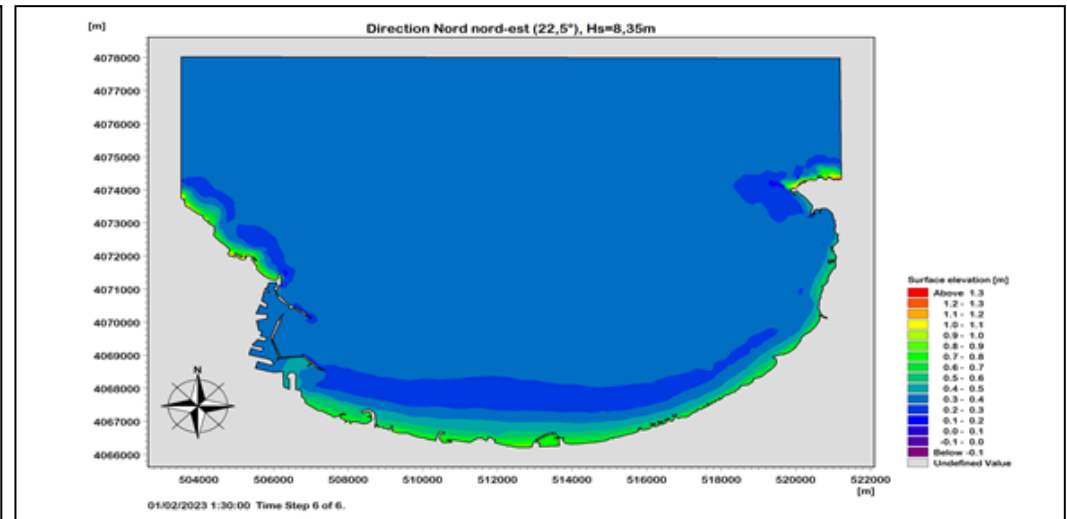


Champs des houles dans la zone d'étude (Grande Plage) de direction NNE (paramètres de houle pour une période de retour de 100ans)

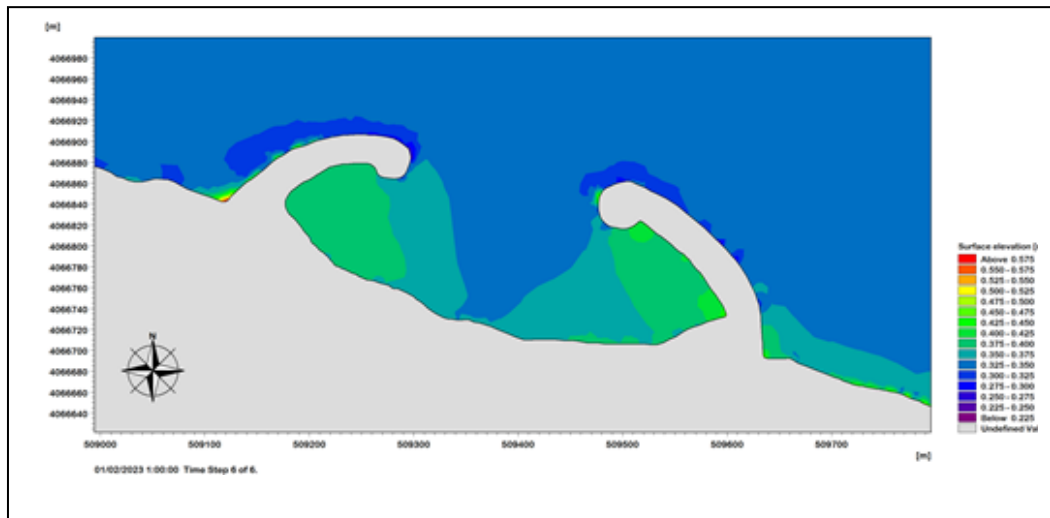
Figure 41 : Champs des houles dans la Baie d'Alger et la zone d'étude de direction NNE et WNW pour la période de retour de 100ans



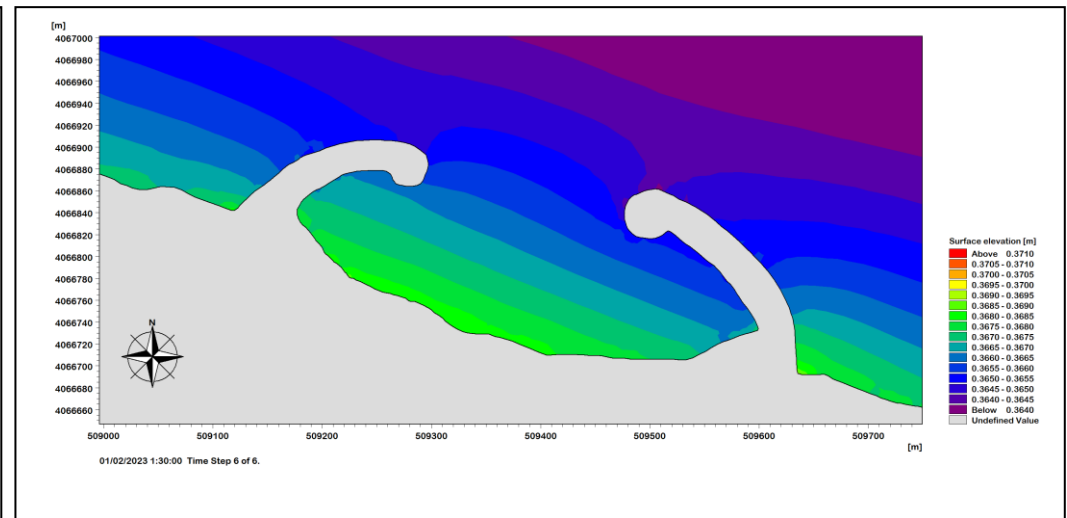
Carte d'élévation de surface de la Baie d'Alger de direction WNW (paramètres de houle pour une période de retour de 100ans)



Carte d'élévation de surface de la Baie d'Alger de direction NNE (paramètres de houle pour une période de retour de 100ans)



Carte d'élévation de surface de la zone d'étude (Grande Plage) de direction WNW (paramètres de houle pour une période de retour de 100ans)



Carte d'élévation de surface de la zone d'étude de direction NNE (paramètres de houle pour une période de retour de 100ans)

Figure 42 : Carte d'élévation de surface dans la Baie d'Alger et la zone d'étude de direction NNE et WNW pour la période de retour 100ans

5.1. Interprétation des résultats de la simulation numérique

Les résultats en termes de hauteurs significatives sont présentés sur les figures ci-dessus et reprennent la nomenclature des conditions de projet (et en se basant sur deux directions)

- **La direction Nord- Nord –Est**

Comme indiqué précédemment, des modélisations ont été effectuées pour le secteur Nord-Nord-Est (22.5°) en considérant les périodes de retour de 5 ans, 10 ans, 50 ans et 100 ans. Les résultats de la modélisation numérique de la propagation des vagues du large vers la côte ont montré que les vagues conservent près de 80 % de leur hauteur au centre de la baie d'Alger. Initialement, il est observé que la houle arrive obliquement par rapport à la côte des Sablettes.

En haute mer, ces houles de direction NNE ne subissent aucune modification et gardent leurs énergies initiales mais leurs caractéristiques changent progressivement à mesure qu'elles se rapprochent de la côte et commencent à ressentir le fond. Dans la partie Est, la hauteur de la houle diminue considérablement, Cette partie (Tammenfoust, Sidi El Hadj) est abritée par le Cap Matifou, la houle change de directions ce qui signifie qu'elle perd son énergie, ceci est causé par la morphologie sous-marine de la baie (réduction de la profondeur). Ainsi, la hauteur de la houle diminue encore pour atteindre la partie centrale (Pins Maritimes, la Sirène I, Sirène II et Verte Rive) est exposée aux houles obliques de ce secteur. Le coefficient de *Shoaling* est compris entre 0.4 et 0.9, en raison de la configuration du trait de côte, qui est parallèle au Nord et reçoit l'énergie de la houle légèrement oblique.

Concernant la zone d'étude, la houle arrive du large avec des hauteurs de (5,00m, 5,50 m, 6,9m et 7,5m) correspondant aux périodes de retour de 5, 10, 50 et 100 ans. On observe que la houle conserve presque la totalité de son énergie initiale en s'approchant de la côte, ce qui indique que la zone n'est pas abritée par le cap Bouzreah. Cependant, il est noté que la hauteur significative des houles varie entre les deux sites, la perle Est recevant une houle plus énergétique que la grande plage.

- **La direction Ouest Nord-Ouest :**

L'interprétation de la carte pour le secteur Ouest-Nord-Ouest (292.5°) :

Les simulations ont été effectuées pour les périodes de retour de 5 ans, 10 ans, 50 ans et 100 ans dans le secteur Ouest-Nord-Ouest (292.5°) de la baie d'Alger. Les résultats de la modélisation numérique de la propagation des vagues du large vers la côte ont permis de constater que, dans un premier temps, la houle arrive obliquement par rapport à la côte des Sablettes et conserve son énergie initiale sans subir de modifications majeures.

Sous l'effet du fond, les vagues subissent de légères modifications tout au long de leur propagation, entraînant des changements de leurs caractéristiques. Dans la partie Est de la baie d'Alger, elle est exposée aux houles quasi-frontales de ce secteur.

Dans le secteur Ouest de la baie, on observe que la houle subit un changement de direction en raison de la réfraction, notamment dans la partie adjacente de la jetée du port. La hauteur de la houle diminue et elle perd de l'énergie en présence du cap Bouzareah.

Pour la partie centrale de la baie, qui fait partie de notre zone d'étude, on constate que la houle provient d'une direction oblique, avec un coefficient de Shoaling compris entre 0.4 et 0.9, ce qui est justifié par la configuration du trait de côte parallèle au Nord.

Les Sablettes reçoivent la houle avec une hauteur de (2m, 2,5m, 3m et 3.5m) correspondant aux périodes de retour de 5, 10, 50 et 100 ans. On observe que la houle perd presque la moitié de son énergie en approchant de la côte, ce qui indique que la zone est abritée par le cap Bouzareah et les jetées du port des houles provenant de ce secteur. Cependant, la hauteur significative des houles varie entre les deux sites, la perle Est recevant une houle plus énergétique que la grande plage. Les houles du secteur Ouest-Nord-Ouest arrivent au pied des ouvrages de la perle Est avec une hauteur entre 2.20 et 2.5 m, ces houles sont obliques et conservent leur énergie initiale, avec un coefficient de Shoaling entre 0.8 et 0.9.

5.2. **Interprétation des résultats de la simulation numérique du modèle HD**

Les résultats de la modélisation numérique de l'élévation de la surface de la mer avec le modèle HD sont présentés par les figures ci-dessous par période de retours et par direction

En ce qui concerne l'élévation de surface on constate que le niveau de la mer au large varie entre (0.36 et 0.42m) On se rapprochant à la cote on constate une augmentation progressive du niveau de la mer de 0.72 jusqu'à 0.78 presque sur toute la cote dans la direction nord nord-est, Tandis que dans la direction Ouest-Nord-Ouest on remarque une élévation considérable varie entre 0.33 et 0.47m de la surface de la mer que du côté est de la baie cela s'explique par l'exposition de cette partie au houle provenant du secteur .

6. Conclusion

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

Les résultats de la simulation numérique de la réfraction de la houle dans notre zone d'étude (les Sablettes) montrent que l'énergie des houles est atténuée du large vers la côte.

Lors des événements extrême et tempête d'après notre étude on a eu la confirmation de la houle dominante qui favorise ces derniers se sont les houles de provenance Nord-Nord-Est (22.5°).

Chapitre V : Submersion marine

1. Introduction

Dans nos jours Il est reconnu que les catastrophes côtières sont directement liées au changement climatique mondial. Ces événements naturels ont un impact négatif sur les zones côtières, qui abritent des populations et des infrastructures. Avec une longueur de plus de 1600 km, la côte algérienne est un atout essentiel pour le développement économique et social de tout le territoire national, notamment dans le domaine du tourisme. Cependant, cette côte est également exposée à certains risques qui peuvent entraver son exploitation et son développement, tels que l'érosion côtière et les inondations. Ces impacts sont susceptibles de s'aggraver avec l'élévation prévue du niveau de la mer.

Au cours des dernières décennies, le changement climatique a contribué à l'élévation du niveau des océans, principalement en raison de la fonte des glaciers et des calottes glaciaires, ainsi que de l'expansion thermique de l'eau océanique due à l'augmentation de la température. Ces facteurs ont des répercussions importantes sur la baie d'Alger, où la submersion marine devient une préoccupation grandissante.

2. La submersion marine

« Le phénomène de submersion marine se définit par une inondation temporaire des terres par la mer dans des conditions météorologiques et marégraphiques intenses » (**Mercier et al., 2013**). Ce phénomène est lié à une élévation temporaire du niveau de la mer qui peut avoir une origine géologique ou météorologique. Dans le premier cas, l'élévation est générée par un tsunami ayant pour origine un tremblement de terre sous-marin, une éruption volcanique ou un glissement de terrain. Dans le second cas, elle est la conséquence d'une surcote liée au passage d'un cyclone tropical ou à une tempête.

a. Le facteur responsable a la submersion

Les submersions marines se produisent en présence de conditions météorologiques et marégraphiques particulières. Elles sont déclenchées par le passage d'une tempête impliquant une chute de la pression atmosphérique, une forte houle augmentant le niveau d'eau à la côte (surcote) ainsi qu'un vent de mer (vent fort venant du large) renforçant l'accumulation de l'eau à la côte.

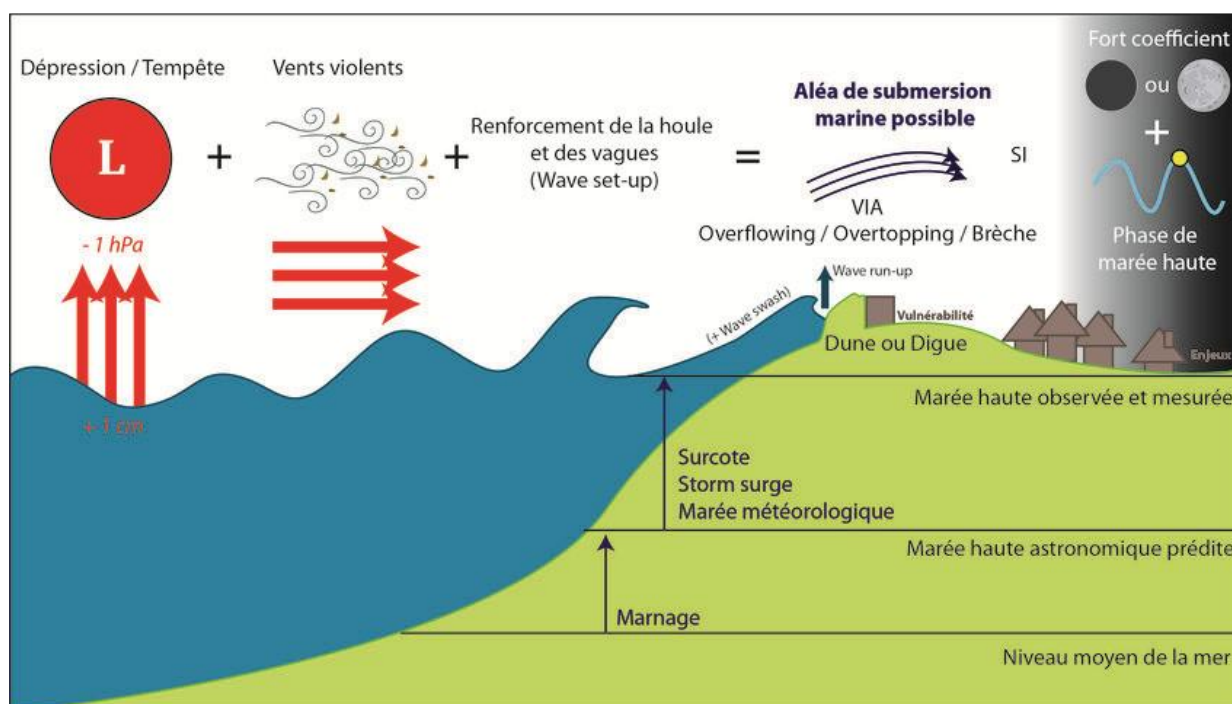


Figure 43: les phénomènes météorologiques responsables de la submersion marine.

Les processus météorologiques et océanographiques générateurs de niveaux d'eau extrêmes à la côte sont :

i. La surcote :

Les surcotes sont définies comme une élévation temporaire et anormale du niveau d'eau et résultent de plusieurs phénomènes (**Figure 43**) : une baisse de la pression atmosphérique ; une accumulation du niveau d'eau à la côte liée aux vents d'afflux et une marée haute (**Switer, 2014**). L'orientation et la topographie de la côte ainsi que la bathymétrie peuvent également favoriser les surcotes. Ainsi, les fonds de baie présentant des petits fonds favorisent la concentration de la houle et l'élévation du plan d'eau (**Paskoff, 2010**).

Lors d'une tempête, le niveau moyen de la mer résulte de l'addition de la surcote atmosphérique et du setup. Le niveau maximal atteint par la mer est défini en tenant compte du « jet-de-rive » (swash). On appelle run-up, l'altitude maximale atteinte par le jet-de-rive sur la côte

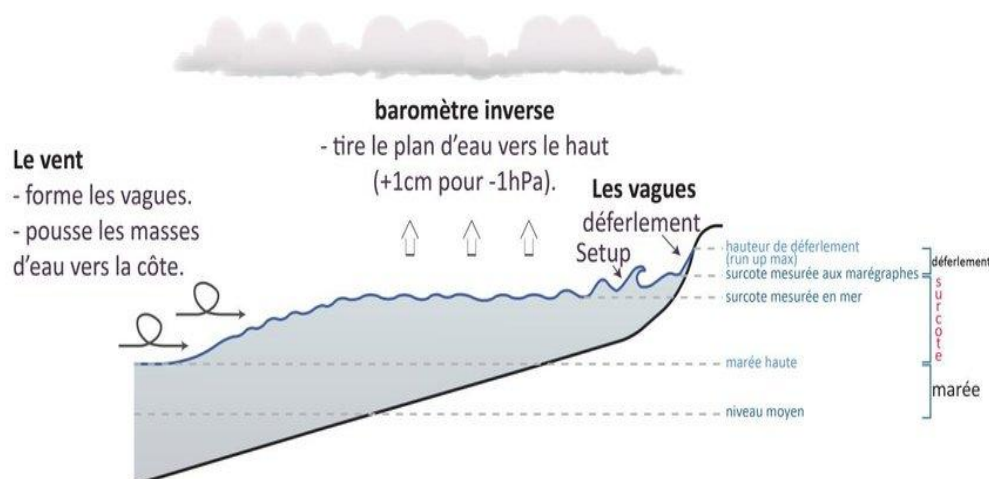


Figure 44 : Principaux processus météo-océanographiques engendrant une surcote de tempête.

ii. L'effet de baromètre inverse :

Une tempête est caractérisée par une anomalie négative de pression (dépression atmosphérique) qui entraîne une diminution du poids de la colonne d'air sur la surface libre de l'océan. Cette réduction de contrainte sur la surface océanique engendre une élévation, du plan d'eau. Ce phénomène est communément qualifié d'effet de baromètre inverse. Pour une chute de 1 hPa de la pression atmosphérique, la surface de l'océan s'élève d'approximativement 1 cm (**Doodson, 1924**).

iii. La contrainte du vent sur le plan d'eau

Une tempête est toujours accompagnée de vents violents (le seuil de définition d'une tempête étant de 90km/h de vent moyen, selon l'échelle de Beaufort). Le vent, lorsqu'il souffle sur la surface de l'eau va générer une contrainte tangentielle, provoquant le déplacement des masses d'eau sous-jacentes dans la direction vers laquelle le vent souffle.

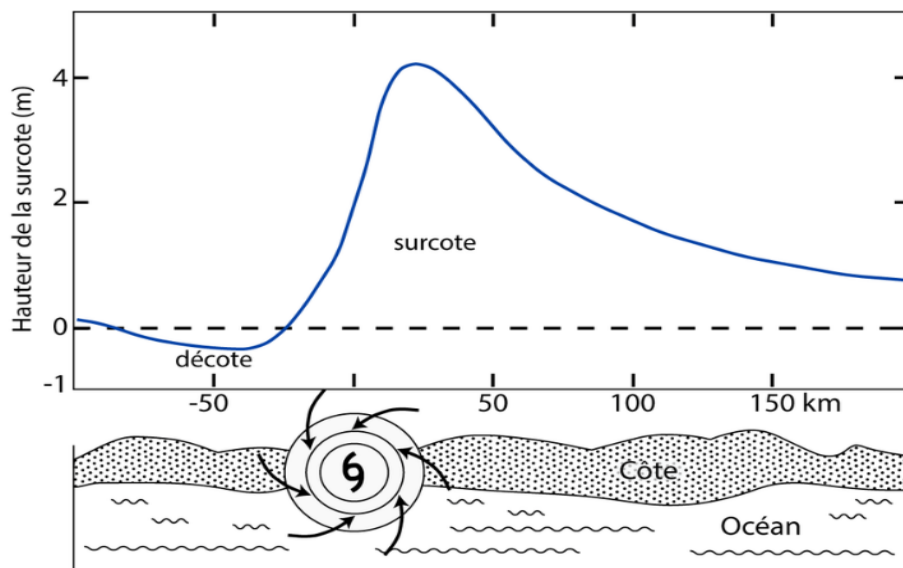


Figure 45 : Distribution hypothétique de la surcote au long d'une côte se trouvant sur la trajectoire d'un ouragan ((modifié d'après Liu,2004).

b. Les différents modes de submersions marines :

- ✓ La submersion par débordement, lorsque le niveau marin est supérieur à la cote de crête des ouvrages ou du terrain naturel ;
- ✓ La submersion par franchissements de paquets de mer liés aux vagues, lorsqu'après déferlement de la houle, les paquets de mer dépassent la cote de crête des ouvrages ou du terrain naturel. Les franchissements des ouvrages par les paquets de mer peuvent s'accompagner sur les plages de galets de projections en arrière plage de volumes très importants de galets, avec un fort impact destructif ;
- ✓ La submersion par rupture du système de protection (défaillance d'un ouvrage de protection ou formation de brèches dans le cordon littoral) suite à l'attaque de la houle, lorsque les terrains situés en arrière sont en dessous du niveau marin. La rupture du système de protection peut avoir plusieurs causes : mauvais entretien des ouvrages de protection, érosion chronique intensive, phénomène de surverse, déséquilibre sédimentaire du cordon littoral, etc.

3. Méthodologie du travail :

Le but de notre travail est d'estimer l'impact de la submersion marine sur la côte et les ouvrages des Sablettes ; Le présent travail vise à cartographier les aléas submergés en fonction de différents scénarios d'élévation du niveau de la mer. En utilisant le logiciel (ArcGis 10.4.1)

Et aussi de prévenir les risques de submersion en prenant en compte deux échéances temporelles, notamment l'année 2100.

L'estimation de l'aléa de submersion marine est un processus complexe qui nécessite souvent une combinaison de différentes méthodes et données pour obtenir des résultats fiables (Mihoubi,2021).

Cette méthode est basée sur :

- ✚ On procède au calcul des niveaux d'eau extrêmes via la récente méthode du France Flock 2021 prenant en considération plusieurs éléments. Tout d'abord, le *waveset-up* qui représente l'élévation du niveau de l'eau causée par les vagues. Ensuite, le *windset-up* qui correspond à l'élévation supplémentaire du niveau de l'eau due à l'action du vent. Enfin, on tient compte de l'élévation générale du niveau de la mer causée par la baisse de la pression atmosphérique. Pour chaque période spécifique, telle que l'occurrence biennal, quinquennale, décennale, cinquantennale, centennale ; on effectue les calculs correspondants pour déterminer les niveaux d'eau extrêmes.
- ✚ Ensuite, le niveau d'eau d'inondation est intégré à un modèle numérique de terrain (MNT) de la zone d'étude. Le MNT présente une résolution de 2 mètres par maille et une précision altimétrique de 0,5 mètre. Cette combinaison permet de créer une cartographie de la zone submersible lors de l'inondation.

3.1. Les scénarios du niveau d'eau extrême :

Les scénarios de niveaux d'eau marine extrêmes sont des prévisions concernant l'augmentation potentielle du niveau des océans en raison du changement climatique. Voici quelques scénarios possibles :

1. **Scénario modéré** : Selon certaines projections, le niveau des océans pourrait augmenter de 30 à 60 centimètres d'ici la fin du siècle. Cela entraînerait déjà des conséquences significatives, notamment une augmentation des inondations côtières, une érosion des côtes et une intrusion d'eau salée dans les nappes phréatiques.
2. **Scénario intermédiaire** : Dans un scénario plus pessimiste, les niveaux de la mer pourraient augmenter de 1 à 2 mètres d'ici 2100. Cette augmentation provoquerait des inondations côtières plus fréquentes et plus étendues, menaçant les régions basses et

les zones densément peuplées près des côtes. Des îles entières pourraient être submergées, et les deltas des grands fleuves seraient particulièrement vulnérables.

3. **Scénario extrême** : Dans le pire des cas, les modèles climatiques prévoient une augmentation du niveau de la mer de plus de 2 mètres d'ici 2100. Cela pourrait résulter de l'accélération de la fonte des calottes glaciaires au Groenland et en Antarctique. Les conséquences seraient catastrophiques, avec des villes côtières importantes submergées, des millions de personnes déplacées et des perturbations économiques majeures à l'échelle mondiale.

3.2. Calcule des niveaux extrêmes :

Le niveau d'eau extrême marin (NEEM) est le niveau maximum que l'on peut s'attendre à atteindre en cas de tempête majeure ou de surface de mer agitée. Il est calculé en utilisant des modèles mathématiques qui prennent en compte plusieurs facteurs, tels que les vagues, les courants, le vent, la marée, la topographie du littoral et la nature du fond marin.

Selon Source spécifiée non valide. L'estimation du niveau extrême d'eau est définie par la somme des : marées astronomiques, surcotes ; le *Run-up* de la houle ; la variation du niveau de la mer due à la pression atmosphérique et la hauteur significatifs des ondes infragravitaires.

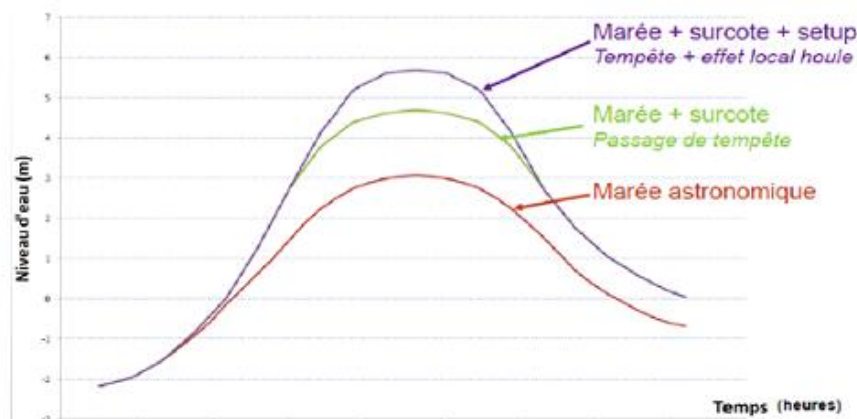


Figure 46 : phénomènes responsables de l'élévation de la surface de la mer (Paris, 2017)

3.2.1. Elévation du niveau de la mer :

Selon une analyse critique des projections du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) et des références bibliographiques récentes, il est envisagé une augmentation mondiale du niveau de la mer de 20 cm d'ici 2030. Et de 100cm d'ici 2100. Cependant, il convient de noter qu'il s'agit d'une estimation élevée et qu'il est difficile de préciser cette élévation précisément pour Alger en l'absence de données marégraphiques disponibles.

Tableau 3 : valeurs de la surélévation du niveau de la mer pour chaque période de retour direction Nord Nord Est

	Surélévation du niveau de la mer(m)	
	Grande plage	
Période de retour (ans) (NNE)	Au pied de l'ouvrage	A l'intérieur de la plage
5 ans	0.42	0.54
10 ans	0.49	0.59
50 ans	0.55	0.65
100 ans	0.57	0.72

3.2.2. Le surcote :

Les fortes surcotes marines, importantes et brutales élévations du niveau de la mer liées aux passages des dépressions et aux forts vents associés, constituent le principal risque de submersion et d'érosion du littoral. Leurs formations présentent un signal régional cohérent dans la zone d'étude ; cette élévation peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres, la surcote sur la baie d'Alger en période de tempête exceptionnelle varie entre 1.5m et 2m. Source spécifiée non valide.

3.2.3. Les marées :

La différence générale entre marée basse et marée haute pour l'ensemble de la zone maritime Algérienne est d'environ 0,30 m d'après (**Mediterranean Pilot 78**)

L'amplitude de la marée est négligeable au niveau des côtes algériennes ; le marnage est de l'ordre de 0.20 à 0.40m en pleine lune et de 0.05 à 0.15m en nouvelle lune. Source spécifiée non valide.

3.2.4. Pression atmosphérique :

La sensibilité du niveau de la mer aux variations de la pression barométrique est appelée l'effet de baromètre inversé. Selon la théorie décrivant cet effet, une montée en pression de 1,102 Pa (1 mbar) provoque un soulèvement ou abaissement du niveau de la mer d'environ 1 cm.

A Alger(dar el Beida) la pression atmosphérique moyenne est surveillée mensuellement; et elle suit un cycle annuel .en Aout la pression atteint un niveau plus bas à 1015 mbar ,tandis qu'on janvier elle atteint 1022mbarSource spécifiée non valide. ;La pression maximale enregistrée entre 1940 et 2000était de 1032mbar tandis que la pression minimale était de 1009 mbar, ces données permettent de conclure que les variations de pression entraînent des fluctuations au niveau de l'eau compris entre 0.08m et+0.15m (DAHMANI, 2016)

3.2.5. Les ondes infra-gravitaires :

En ce qui concerne les ondes infra-gravitaires, elles contribuent significativement à l'érosion côtière durant les tempêtes (Masselink, 1995).Il est en outre important de souligner les liens possibles entre ces différentes ondes. Dans une introduction sur les seiches, (Zerrouki 2021) mentionne, à titre d'exemple, que « les seiches peuvent être engendrées par les Tsunamis, amplifiées par les ondes infra-gravitaires et initiées par les vagues et les houles.

Le marégraphe WLR7 qui est installé dans le port d'Alger, enregistre les données du niveau de la mer avec une fréquence d'échantillonnage de 0.0033 Hz (soit une mesure chaque 5 min), ce qui permet de détecter uniquement les ondes de basses fréquences (seiches, tsunamis, météo-tsunamis et marées). Les données de cet appareil récupérées auprès de l'ONSM d'Alger, concernent les événements d'Août 2001 et de Juillet 2002, qui ont été corrigées et analysées afin de détecter les phénomènes de Seiches et de météo-tsunamis, et de comparer le comportement de ces dernières, entre une période de faible agitation (Août 2001) et une période de forte agitation (Juillet 2002) (DAHMANI, 2016)

Pour calculer la hauteur significative des ondes infra-gravitaires (H_{sIG}), on utilise l'équation suivante :

$$H_{sIG} = \alpha * H_s^2 * T_{m0,-1}$$

Où :

- H_s est la hauteur significative des vagues (hauteur moyenne des vagues les plus hautes dans un échantillon de vagues).
- $T_{m0,-1}$ est la période de l'onde (la durée entre deux crêtes successives) associée à la période de retour (période statistique à laquelle un événement extrême peut se produire, par exemple, le 100-ans).
- Le coefficient α est un facteur proportionnel qui dépend des conditions locales, notamment de la profondeur de l'eau. Il est généralement compris entre 1% et 5% pour les eaux peu profondes. Source spécifiée non valide.

Pour obtenir des valeurs fiables et plus justes, on procède comme suit :

On rassemble des données de hauteur significative des vagues (H_s) et de période de l'onde ($T_{m0,-1}$) sur une période de temps significative et représentative de la zone d'étude. Puis on trace un nuage de points en plaçant chaque paire de valeurs (H_s , $T_{m0,-1}$) sur un graphique. Ensuite, on ajoute une courbe de tendance linéaire au nuage de points. Cette courbe de tendance permet de représenter la relation entre (H_s et $T_{m0,-1}$). Elle peut être obtenue par une méthode de régression linéaire.

En utilisant la courbe de tendance linéaire, on peut calculer la période moyenne des houles associée à chaque période de retour $T_{m0,-1}$.

Enfin, en utilisant l'équation mentionnée ci-dessus ($H_{sIG} = \alpha * H_s^2 * T_{m0,-1}$), on peut déduire la hauteur significative des ondes infra-gravitaires (H_{sIG}) pour chaque période de retour.

Les résultats de calcul des hauteurs des ondes infra-gravitaire sont présentée dans le tableau ci –dessous :

Tableau 4 : Calcul des paramètres responsable dans l'élévation du niveau marin

<i>Période de retours</i>	<i>Hs P.ouvrage</i>	<i>Hs Plage</i>	<i>Tm P.ouvrage</i>	<i>Tm Plage</i>	<i>HS_{IG} P.ouvrage</i>	<i>HS_{IG} Plage</i>
<i>5ans</i>	2.8	2.005	5.8408	4.18243	1.3737561	0.5044041
<i>10ans</i>	3.05	2.1	6.3623	4.3806	1.7755588	0.5795533
<i>50 ans</i>	3.15	2.2	6.5709	4.5892	1.9559926	0.6663518
<i>100ans</i>	3.25	2.3	6.7795	4.7978	2.1482540	0.7614108

3.2.6. Calcul du Run-up:

Le run-up de la houle est défini comme le niveau maximal que l'eau atteint sur letalus d'unouvrage du fait de l'action de la houle. L'estimation de run-up, R_u , peut reposer surdes équations empiriques simples obtenues à partir des résultats d'essais effectués sur des modèles physiques, ou sur des modèles numériques d'interaction houle/ouvrage. Chacune des méthodes de calcul exige que les paramètres soient définis avec précision. Le run-up est défini verticalement par rapport au niveau de l'eau au reposera positif s'il dépasse ce niveau.

Dans le présent travail, nous avons étudié un noyau perméable avec une valeur de perméabilité supérieure à 0.1 ($P > 0.1$). Nous avons calculé le Run-up (R_u) en utilisant l'équation suivante :

$$R_u\% = d * H_s$$

Le paramètre d pour run-up à 0.1% est de 2.58

Et pour le Run-up à 2% est de 1.97

Nous avons opté pour deux scénarios avec des taux de retour de 0.1% et 2%. Le taux de retour (ou période de retour) représente la probabilité qu'un événement extrême donné se produise au cours d'une année spécifique. Les résultats des calculs du Run-up sont présentés dans le tableau ci-dessous

Tableau 05 : valeurs des Run up calculé a deux scenarios 0.1%et2%

Période de retour	Hs P.ouv	run-up 0.1%	run-up 2%	Hs plage	run-up 0.1% plage	run-up 2% plage
5 ans	2.8	7.224	5.516	2.005	5.1729	3.94985
10 ans	3.05	7.869	6.0085	2.1	5.418	4.137
50 ans	3.15	8.127	6.2055	2.2	5.676	4.334
100 ans	3.25	8.385	6.4025	2.3	5.934	4.531

4. Scénarios d'inondation :

À la base d'un model numérique de terrain MNT plusieurs traitements ont été fait, ce qui nous a permis d'établir des cartes pour l'aléa de submersion marine à des différents niveaux extrêmes d'inondation. La méthodologie de calcule suivi nous a permis d'obtenir les résultats suivants :

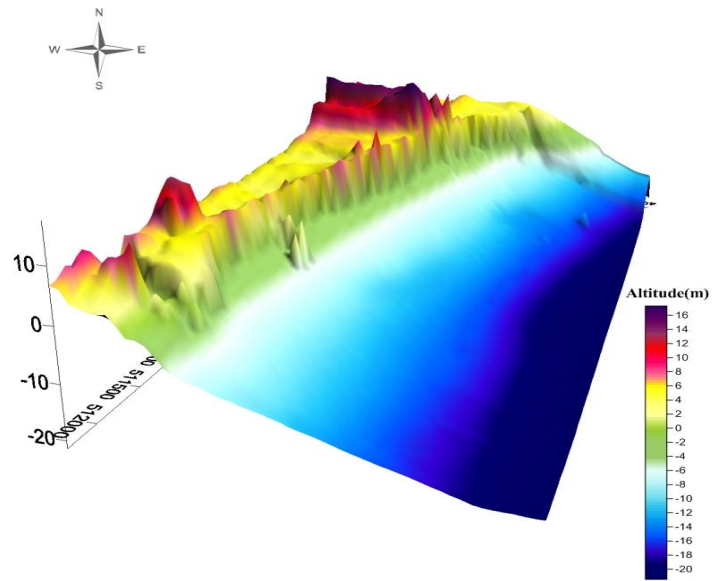


Figure 47 : vue topographique en 3D sous unfond MNT

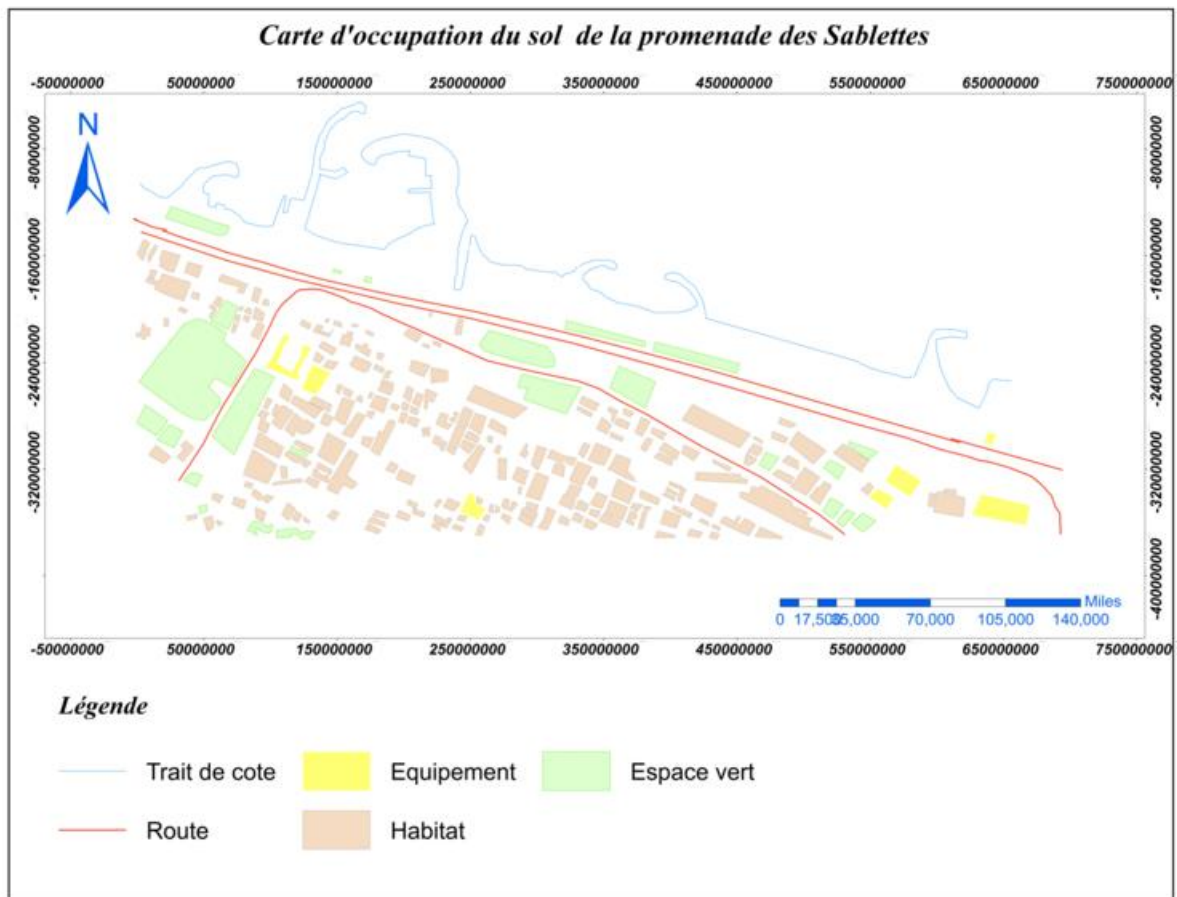


Figure 48 : Carte d'occupation du sol de la zone de la zone d'étude.

Résultats de calcul :

Les résultats de calcul des scénarios d'inondation avec la méthode de « France flock » sont représentés dans le tableau suivant

Tableau 5 : Résultat de Calcul de niveau d'eau extrême au pied de l'ouvrage

période de retours	Hs (m)	Hs Infra-gravitaire (m)	Surélévation (m)	run up 0.1% (m)	run up 2% (m)	Maré (m)	Pression Barométrique	Scénario 0.1%(m)	Scénario 2% (m)
5 ans	2.8	1.69	0.42	7.22	5.51	0.3	0.15	9.79	8.08
10 ans	3.05	1.86	0.49	7.86	6.00	0.3	0.15	10.67	8.81
50 ans	3.15	2.05	0.55	8.12	6.20	0.3	0.15	11.17	9.25
100 ans	3.25	2.14	0.57	8.38	6.40	0.3	0.15	11.55	9.57

Tableau 6 : Résultat de Calcul de niveau d'eau extrême à l'intérieur de la plage

Période de retours	Hs (m)	Hs Infra-gravitaire (m)	Surélévation (m)	Run up 0.01% (m)	Run up 2% (m)	Maré (m)	Pression Barométrique	Scénario 0.1%(m)	Scénario 2% (m)
5 ans	2.005	0.50	0.54	3.94	5.1729	0.3	0.15	6.04	5.43
10 ans	2.1	0.57	0.59	4.13	5.418	0.3	0.15	7.02	5.75
50 ans	2.2	0.66	0.65	4.33	5.676	0.3	0.15	7.43	6.10
100 ans	2.3	0.76	0.72	4.53	5.934	0.3	0.15	7.86	6.50

5. Résultats de la cartographie de la submersion :

La cartographie de la submersion marine pour des événements ayant une houle de période de retour Quinquennale, décennale, cinquantiennale et centennale ont été réalisées pour la zone d'intérêt

Les résultats obtenus sont donnés dans les figures 49,50 pour les différents scénarios :

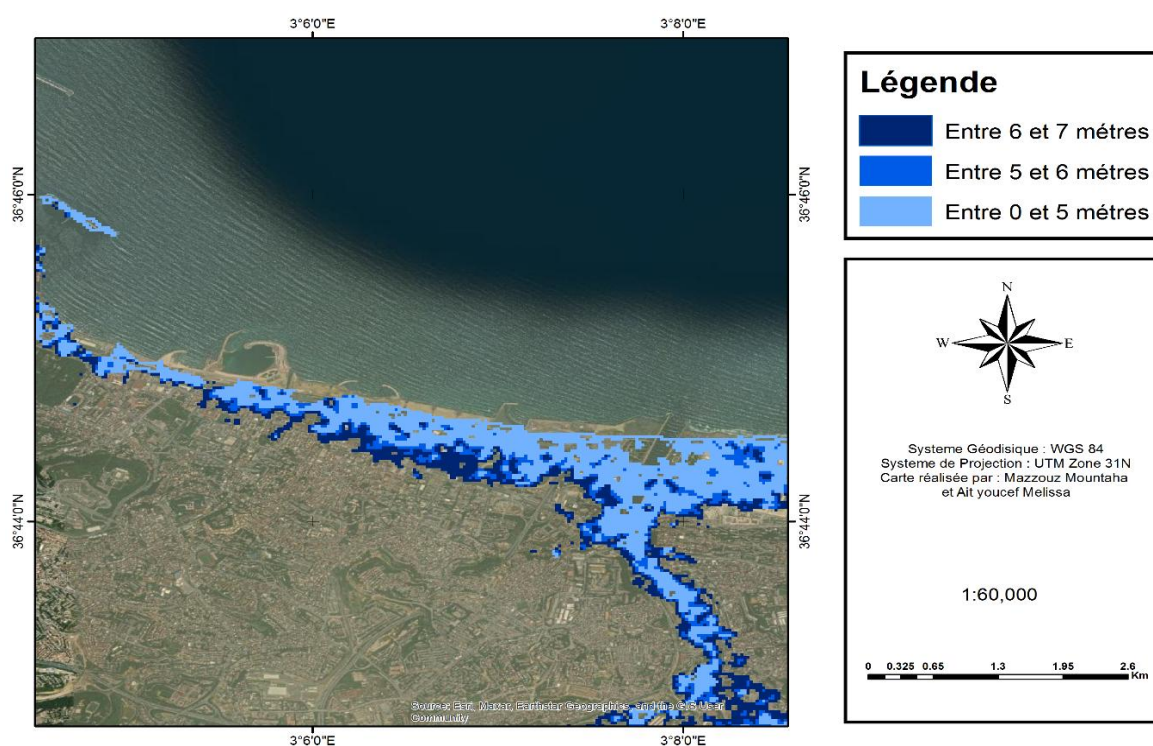


Figure 49 : carte de vulnérabilité à la submersion marine avec un scénario de run-up à 2%

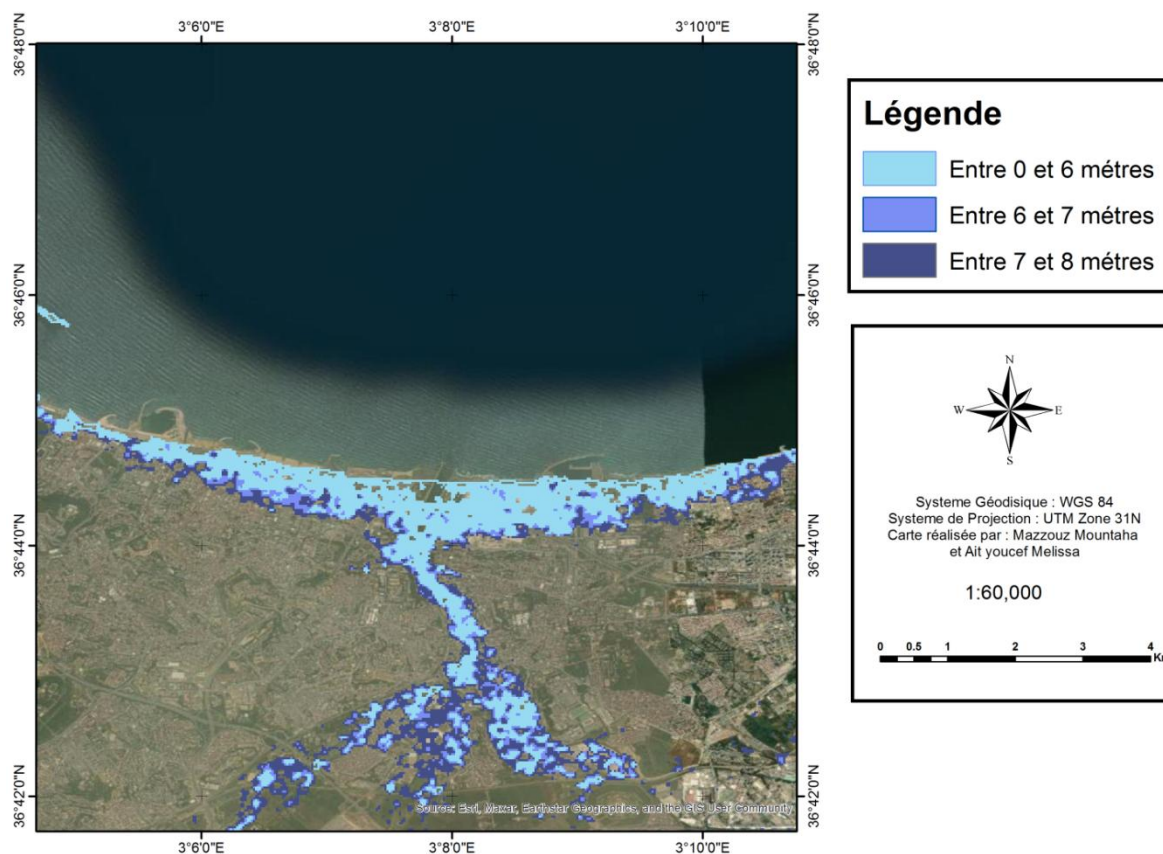


Figure 50 : carte de vulnérabilité à la submersion marine avec un scénario de run up 0.1%

Interprétation des cartes :

L'analyse des cartes de submersion est essentielle pour interpréter les impacts potentiels d'une élévation du niveau de la mer sur une zone côtière donnée, ce qui revêt une grande importance dans le cadre d'un projet de fin d'étude. Voici une interprétation détaillée de ces cartes :

Scénario a 2% :

La carte de submersion révèle clairement que l'élévation projetée du niveau de la mer, dépassant les 5 mètres sur une période quinquennale comme la montre la figure 49, aurait des conséquences dramatiques pour la zone côtière étudiée. Cependant, il est notable que la partie orientale de cette zone serait la plus durement touchée. Cette observation peut être expliquée par plusieurs facteurs clés.

Tout d'abord, la topographie relativement basse de la région joue un rôle crucial. Les zones de faible altitude sont naturellement plus vulnérables aux inondations, car elles offrent peu de

résistance à l'élévation du niveau de la mer. Cela signifie que même une petite élévation du niveau de la mer peut avoir des répercussions majeures dans ces zones.

De plus, la présence de l'embouchure de l'Oued el Harrach aggrave la situation. Les embouchures des rivières et des cours d'eau sont souvent des points d'entrée privilégiés pour les eaux marines lors des inondations. L'eau de mer peut remonter plus facilement le long de ces cours d'eau, pénétrant ainsi plus profondément à l'intérieur des terres.

Un autre élément à prendre en compte est le réseau hydrographique, notamment l'Oued el Harrach. Ces cours d'eau peuvent agir comme des canaux pour l'intrusion des eaux marines vers les terres. Lorsque le niveau de la mer s'élève, il peut emprunter ces voies naturelles et inonder des zones étendues.

Enfin, il est important de noter que la superficie occupée par les eaux marines est considérablement étendue, et cela est le résultat de plusieurs facteurs. La morphologie continentale de la baie présente des zones à faible altitude qui sont plus sensibles aux inondations. De plus, le climat des houles au large peut générer des vagues puissantes qui exacerbent le phénomène de submersion. En somme, cette situation complexe résulte de l'interaction de nombreux éléments géographiques, climatiques et hydrographiques.

Scénario a 0.1% :

La figure 50 présente une situation alarmante où les eaux marines envahissent massivement les terres, notamment dans des conditions extrêmement sévères avec un run-up de 0,1%. Ces conditions donnent lieu à des scénarios de submersion d'une gravité exceptionnelle, avec des hauteurs d'eau pouvant atteindre jusqu'à 8 mètres. Ce qui est frappant, c'est l'intrusion spectaculaire de l'eau de mer profondément à l'intérieur du tissu urbain, à des distances considérables de la côte, parfois sur des dizaines de kilomètres. Cette situation est particulièrement prononcée au niveau des zones d'embouchures, notamment à l'embouchure de l'Oued El Harrache.

Cette dernière entraîne la perte de superficies terrestres significatives. Ces pertes touchent de vastes étendues de terres, ce qui souligne l'ampleur du défi posé par ces inondations pour les zones urbaines et les zones habitées. Il est essentiel de prendre en compte ces données pour

élaborer des mesures de prévention et d'adaptation afin de faire face à cette menace grandissante pour nos communautés et notre environnement.

L'interprétation de ces résultats met en évidence la nécessité pressante de développer des mesures de prévention et d'adaptation. Il est impératif de prendre en compte ces données alarmantes pour protéger nos communautés et notre environnement face à cette menace grandissante. Des stratégies de gestion côtière, des infrastructures résilientes et des plans d'urgence doivent être élaborés pour faire face à ces inondations côtières potentiellement dévastatrices. Ce type d'analyse est essentiel pour éclairer les décisions politiques et les actions concrètes visant à atténuer les effets du changement climatique sur nos zones côtières vulnérables.

6. Franchissements des vagues

Si les niveaux extrêmes de run-up dépassent le niveau de crête, l'ouvrage va être franchi.

Ceci peut se produire pour un nombre relativement faible de vagues pendant la tempête et un faible taux de franchissement peut souvent être accepté sans que cela n'entraîne de graves conséquences pour l'ouvrage ou pour la zone protégée

Lors du dimensionnement de la cote d'arase de la crête, le seuil de débit de franchissement de la houle doit être précisé. Un faible débit de franchissement peut être accepté dans la zone protégée pour certains scénarios d'activité. Ce débit est souvent présenté sous forme d'un débit spécifique par mètre de crête et seconde ($m^3/m/s$). En général, le débit de franchissement moyen q est fonction de différentes grandeurs comme

$$q = f(H_s; T_{op}; \sigma; R_c; h_s; g; \text{la géométrie d'ouvrage})$$

- H_s : Hauteur significative de vague
- T_{op} : Période pic de la houle en eau profonde
- σ : Paramètre de propagation directionnel de la vague
- R_c : Revanche de la crête (franc-bord)
- h_s : Profondeur de l'eau au pied de l'ouvrage
- g : Accélération de la pesanteur.

6.1. Formulations générales

En pratique, la formule de franchissement est représentée par une des expressions suivantes, basées sur des données expérimentales :

$$Q^* = Q_0 \cdot \exp(-b \cdot R^*) \text{ ou } Q^* = Q_0 \cdot \exp(1 - R^*)^b$$

Où : Q^* est un débit franchissant spécifique adimensionnel, R^* est une revanche adimensionnelle, Q_0 décrit le franchissement de la houle pour le cas $R_c = 0$, et le coefficient « b » dépend de paramètres qui se rapportent à l'ouvrage tels que l'angle du talus, la largeur de la berme, etc. Les grandeurs caractéristiques pour l'adimensionalisation sont différentes suivant les auteurs. (DAHMANI, 2016)

6.1.1. Méthode d'Owen (1980) :

Pour calculer le franchissement pour des talus lisses et des talus rugueux (prenant en compte le facteur de correction de rugosité γ_f), la revanche adimensionnelle, R^* , et le débit franchissant spécifique adimensionnel, Q^* , sont choisis par Owen (1980) en utilisant la période moyenne de la houle T_m , et la hauteur significative de la houle H_s , au pied d'ouvrage. R_c est la revanche de l'ouvrage, c'est-à-dire la hauteur de la crête par rapport au niveau de l'eau au repos, q le débit franchissant spécifique moyen (m^3/s par m) et γ les coefficients de réduction en cas de rugosité du talus, présence d'une berme, présence de houle oblique..., S_{om} la cambrure nominale de la houle définie à partir de la période moyenne par :

$$S_{om} = H_s / \lambda_o = 2\pi H_s / (g T_m^2)$$

Où : λ_o : longueur d'onde au large (grande profondeur), ce paramètre ne dépend que des conditions de houle.

$$\left\{ \begin{array}{l} R^* = R_c / (T_m \sqrt{g H_s}) = R_c / H_s \sqrt{S_{om} / (2\pi)} \\ Q = q / (T_m g H_s) \end{array} \right.$$

L'expression proposée par Owen est :

$$Q^* = a \cdot \exp(-b R^* / \gamma)$$

Les paramètres a et b ci-dessus sont fixés de manière empirique en fonction de la géométrie de l'ouvrage. L'équation (Précédente) est valable pour $0,05 < R^* < 0,3$ et $0,035 < S_{om} < 0,055$.

La méthode d'Owen a été développée pour une houle dont la cambrure est typique soit

$0,035 < S_{om} < 0,055$.

Hawkes et al. (1998) ont découvert que la méthode d'Owen n'était pas applicable à la houle océanique. Lorsque la cambrure de la houle est faible (cas $S_{om} > 2,5$), cette méthode tend à surestimer le débit de franchissement.

6.1.2. Méthode du Taw (2002) :

La différence principale entre cette méthode et celle d'Owen réside dans le domaine de validité relative à la cambrure de la houle et à la définition du paramètre de déferlement. La formulation adimensionnelle est aussi différente.

En fonction du paramètre de déferlement, $\xi_{m-1,0}$, le TAW (2002) a proposé deux formules développées par Van der Meer: l'une pour les vagues déferlantes ($\gamma_b \cdot \xi_{m-1,0} \leq 2$) pour lesquelles le franchissement de la houle augmente avec l'accroissement du paramètre de déferlement, et l'autre pour les vagues non-déferlantes ($\gamma_b \cdot \xi_{m-1,0} \geq 2$), pour lesquelles le franchissement maximal est atteint.

Pour la houle déferlante ($\gamma_b \cdot \xi_{m-1,0} \leq 2$) :

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

Avec un maximum (pour la houle non-déferlante ($\gamma_b \cdot \xi_{m-1,0} \geq 2$))

$$q / \sqrt{g} H_{m0}^3 = C \exp\left(-D \frac{Rc}{H_{m0}} \frac{1}{\gamma_f \gamma_\beta}\right)$$

où: $\xi_{m-1,0}$ est le paramètre de déferlement calculé à partir de la hauteur significative spectrale H_{m0}^2 , et la période énergétique moyenne $T_{m-1,03}$ de la houle au pied d'ouvrage:

$\xi_{m-1,0} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_s / \lambda_0}} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{2\pi H_s / (g T_{m-1,02})}}$; ce paramètre associe les conditions de houle (cambrure) à la pente du fond ou du talus de l'ouvrage. Comme pour l'équation d'Owen, des facteurs de correction sont utilisés dans la méthode du TAW afin de prendre en compte diverses situations.

Ainsi, γ_b , γ_f , γ_v et γ_β sont des facteurs de correction pour prendre en compte la présence de la berme, de la rugosité du talus, du mur de couronnement et de l'angle d'incidence de la houle. (DAHMANI, 2016).

6.2. Modélisation numérique de franchissement

Vu l'importance de ce phénomène il existe plusieurs programmes qui calcul les paramètres liés à ce phénomène et chaque programme a ces propres domaines de validité, en outre ils n'utilisent pas les mêmes méthodes pour évaluer le volume et le débit de franchissement pour cela on a choisi un logiciel qui répond le mieux à nos objectifs.

6.2.1. Présentation du CRESS

Le CRESS (Coastal and River Engineering Support System), créé par le Ministère des Travaux

Publics Néerlandais, l'UNESCO-IHE et l'Université Technologique de Delft, est un catalogue de petits programmes disponibles online (www.cress.nl/regel.aspx, voir **figure 48**), dont chacun contient une formule ou un groupe de formules, importantes en ingénierie côtière et fluviale. Les données d'entrée et de sortie sont fortement standardisées, et sont à la fois disponibles sous un format numérique et graphique. Pour un cas de dimensionnement, plusieurs étapes doivent être prises en compte. Le CRESS ne transfère pas automatiquement les données d'une étape à la suivante. Ainsi, l'utilisateur est forcé de mener une réflexion sur la donnée d'entrée à utiliser et sur tous les résultats intermédiaires.

Le CRESS ne prévient pas l'utilisateur sur l'utilisation d'une formule en dehors de son domaine d'application. L'outil doit donc être utilisé avec précaution.

L'aide disponible pour l'utilisation des programmes permet à l'utilisateur de trouver des informations complémentaires sur l'application de la formule, mais aussi des listes de coefficients qui peuvent être entrés (Par exemple les coefficients de Manning).

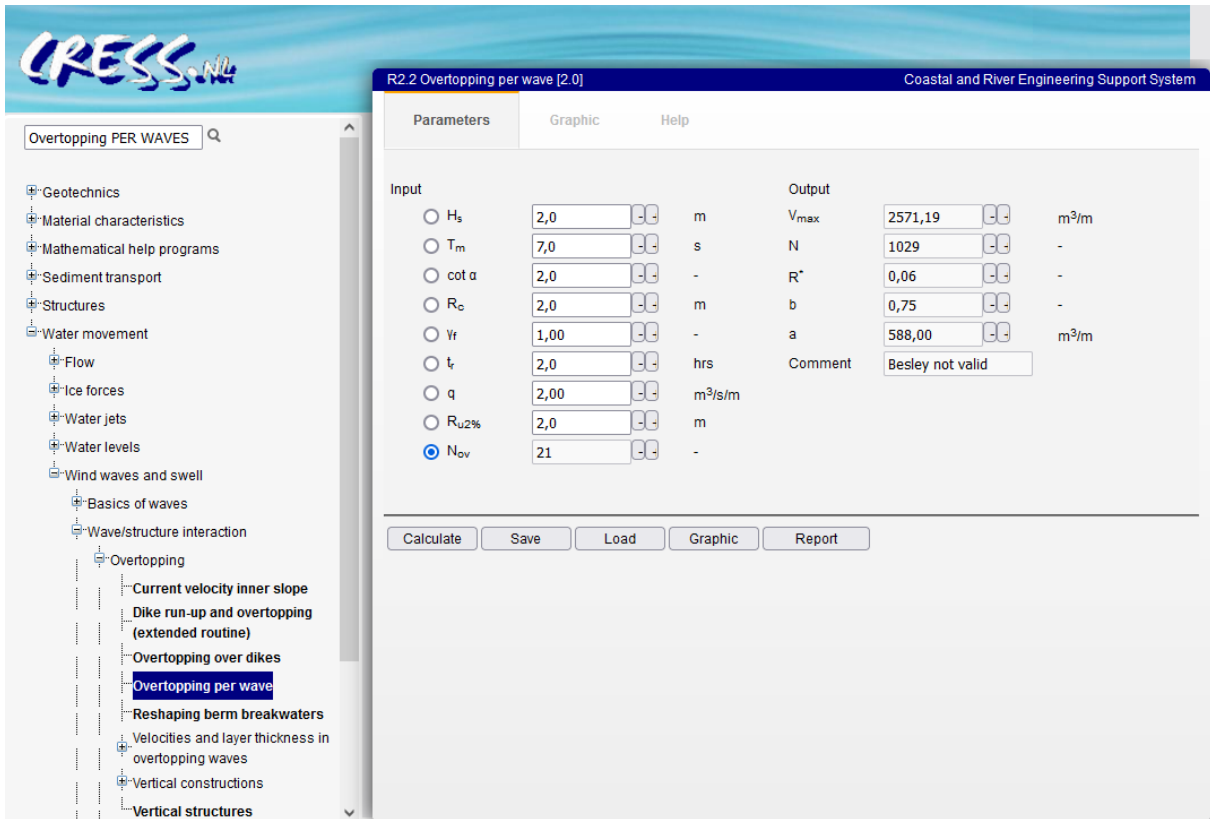


Figure 51 : Interface web du CRESS

Les données d'entrée (inputs) pour la modélisation numérique des franchissements à l'aide du logiciel CRESS sont :

- ✚ **Hs (m)** Hauteur significative de la vague (validité indicative 1 à 10)
- ✚ **Tm (s)** Période moyenne de la houle (Validité indicatif 1 à 20)
- ✚ **Cot α** Angle du talus d'un ouvrage (rad) ou ($^{\circ}$) (Validité indicatif 1 à 20)
- ✚ **Rc (m)** Revanche de crête (Validité indicatif 0.1 à 5)
- ✚ **γ_f** Coefficient de réduction en cas de rugosité du talus (Validité indicatif 0.55 à 1.33)
- ✚ **tr (hrs)** Durée de la tempête ou période du temps d'examen (Validité indicatif 1 à 24)
- ✚ **q (m³/s/m)** Débit spécifique (Validité indicatif 0.001 à 5)
- ✚ **Ru2% (m)** Hauteur du run-up dépassée par seulement 2 % des vagues
- ✚ **Nov** Nombre de vagues franchissantes sur un total de N vagues incidentes dans un période du temps Tr (=Ntm) (Validité indicatif 1 à N).

Les données de sorties (output) :

- ✚ **Vmax (m³/m)** Volume franchissant maximum attendu ;
- ✚ **N** Nombre de vagues incidentes (Validité indicative 1 à 7500)
- ✚ **R*** Revanche adimensionnelle (Validité indicative 0.05 à 0.3)

- ✚ **B** Paramètre de forme
- ✚ **a** (m³/m) Paramètre d'échelle.

6.2.2. Calcul des données d'entrée :

- **T_m** = 2,086H_s
- **q** (m³/s/m)

Dans cette Équation, il est également fait usage de la hauteur significative spectrale de la houle, **H_{m0}** (m), et de la période énergétique moyenne de la houle, **T_{m-1,0}** (s), pour calculer le paramètre de déferlement **ξ_{m-1,0}**.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0,21 \exp\left(\frac{-Rc}{\gamma f \gamma B H_{m0} (0,33 + 0,022 \xi_{m-1,0})}\right)$$

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{(2\pi H)/(gT^2)}}$$

$$\frac{H_s}{H_{m0}} = \exp\left(0,02289 \left(\frac{h}{gT_p^2}\right)^{-0,43642}\right)$$

$$\gamma \beta = 1 - 0,0022|\beta|$$

Pour $0^\circ \leq \beta \leq 80^\circ$

Pour les angles d'incidence $\beta > 80^\circ$, le calcul est effectué avec $\beta = 75^\circ$ (direction Nord Nord Est)

- **Ru%** = d H_s, Pour noyau perméable > 0.1 ; d (u_{2%} = 1.97)
- **Nov**

$$\frac{Nov}{N} = \exp\left(-\left(\sqrt{-\ln 0,02} \frac{Rc}{Ru\%}\right)^2\right)$$

$$\text{Avec : } N = \frac{3600 T_r}{T_m}$$

6.2.3. Résultats de calcul des données d'entrée :

Tableau 7: Le calcul des données d'entrée pour le logiciel CRESS

	<i>5ans</i>	<i>10ans</i>	<i>50ans</i>	<i>100ans</i>
<i>Hs(m)</i>	2.8	3.05	3.15	3.25
<i>Tm(s)</i>	5,84	6,36	6,57	6,77
<i>Cota (°)</i>	1,0179	1,0179	1,0179	1,0179
<i>Rc (m)</i>	3,90	3,90	3,90	3,90
<i>γf</i>	0,55	0,55	0,55	0,55
<i>Tr (hrs)</i>	09	09	09	09
<i>Q</i>	0,00111	0,00237	0,00322	0,00418
<i>Ru2% (m)</i>	8.08	8.81	9.25	9.57
<i>N</i>	5547,94	5094,33	4931,50	4785,81
<i>Nov</i>	43,26	85,91	121,50	150,4

6.2.4. Les résultats obtenus fichier de sorties du Cress

Période de retour 5ans :

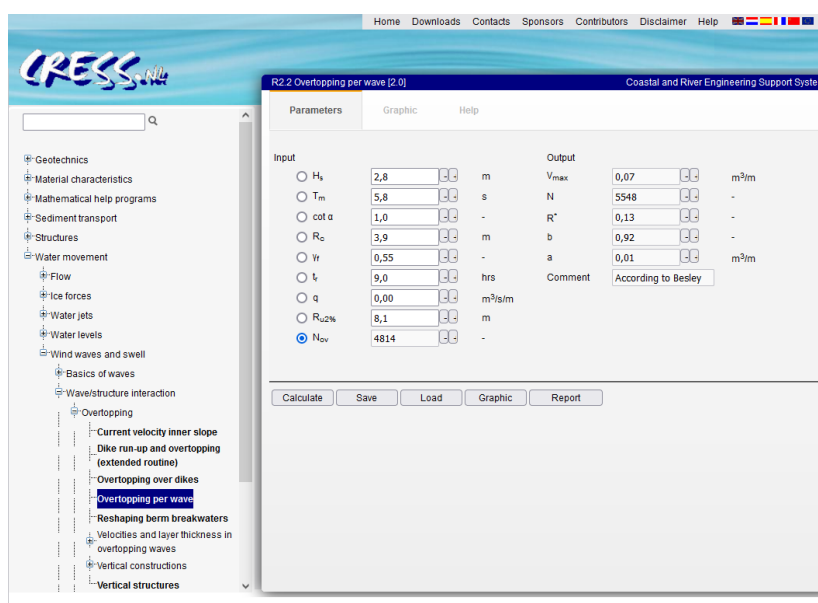


Figure 52: la fiche de sortie CRESS pour une période de retour de 5ans

Période de retour 10ans :

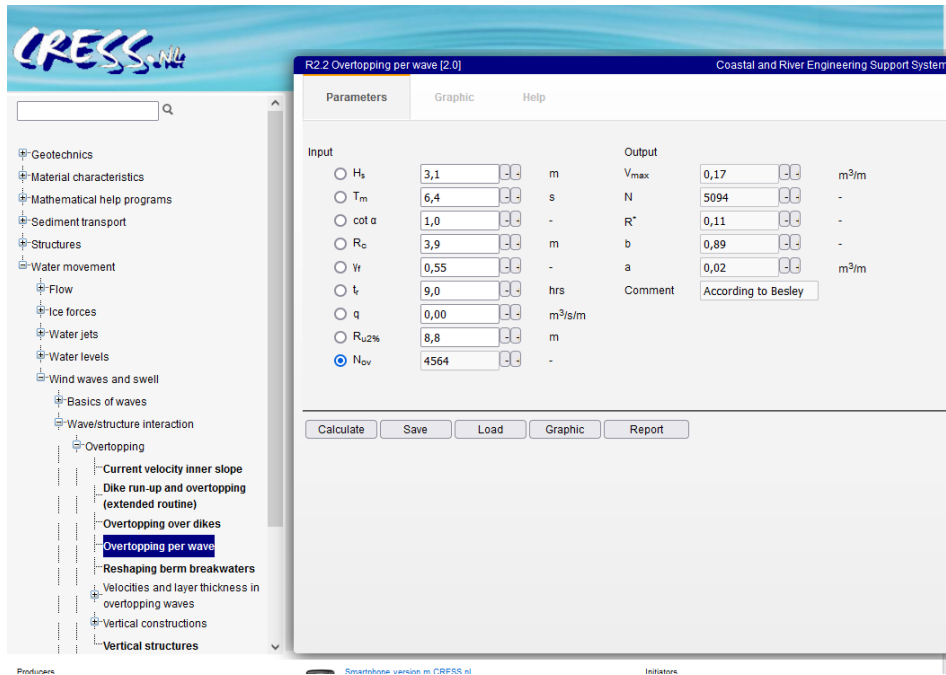


Figure 53: La fiche de sortie du CRESS pour la période de retour 10ans

Période de retour 50ans :

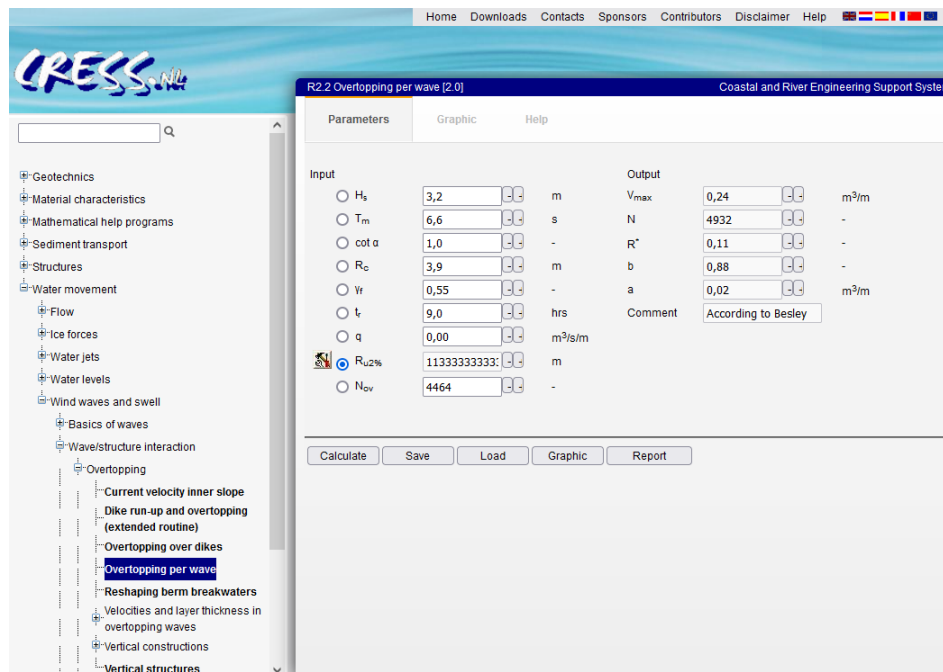


Figure 54: la fiche de sortie du CRESS pour une période de retour de 50ans

Période de retour 100ans :

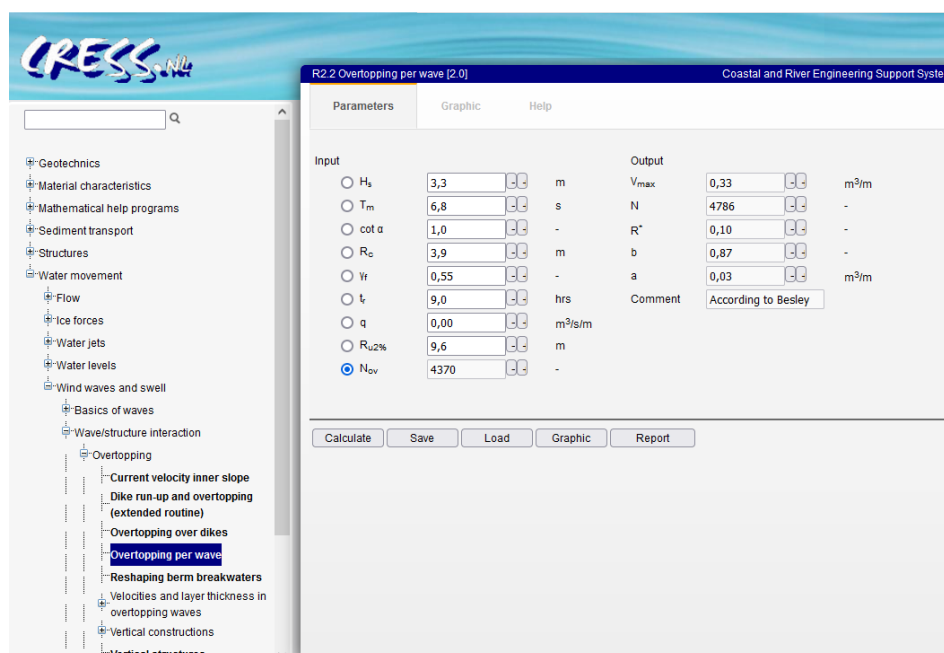


Figure 55 : la fiche de sortie du CRESS pour la période de retour 100ans

Tableau 8: valeurs des volumes de franchissement obtenue

Période de retour (année)	V max (m ³ /m)	Nombre des vagues
5ANS	0,07	5548
10ANS	0,17	5092
50ANS	0,24	4932
100ANS	0,33	4782

Interprétation :

Les résultats du programme CRESS révèlent une augmentation de volume du franchissement Pour de période de retour de 5 à 100ans.

Concernant les différences observées dans les résultats de nombre des vagues incidentes pour les différentes périodes de retours, le paramètre essentiel causant une anomalie est la durée de test. On remarque en effet, une augmentation de nombre des vagues incidentes au fur et à mesure de l'augmentation de la durée de test et le contraire. En définitif, cela illustre une relation inverse entre la côte d'arase et le nombre de vagues incidentes qui diminuent avec l'augmentation de la côte d'arase. Ainsi que de l'importance de la durée de tempête dans les l'importance des dégâts à cause des nombres importants de vagues franchissantes sur l'ouvrage. (Impact sur la réserve de stabilité de l'ouvrage).

Les résultats obtenus (Tableau 9) pour le franchissement, pour les différents scénarios de houle, nous ont permis de constater que d'un point de vue structurelle, les digues principales de la grande plage est assez résistante au franchissement avec des valeurs relativement faibles de < 1 l/s par mètre

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

7. L'impact de la submersion marine sur les littoraux et les infrastructures :

La submersion côtière est un phénomène résultant de l'élévation du niveau de la mer. Ce phénomène a un impact significatif sur les zones côtières notamment sur les ouvrages de protection, affectant les écosystèmes, les communautés humaines et les infrastructures. D'après les résultats de notre étude nous avons conclu les impacts de la submersion sur le littoral :

1. **Érosion côtière** : L'élévation du niveau de la mer aggrave l'érosion côtière en réduisant la capacité des plages, des dunes et des falaises à résister aux vagues et aux tempêtes. Cela peut entraîner la disparition de plages de sable, la perte de terres agricoles et la détérioration des infrastructures côtières.
2. **Inondations fréquentes** : Les zones côtières subissent des inondations plus fréquentes et plus intenses à mesure que le niveau de la mer monte. Les tempêtes peuvent provoquer des inondations soudaines, endommageant les bâtiments, les routes et les réseaux de distribution d'eau et d'énergie.
3. **Perte d'habitats naturels** : Les écosystèmes côtiers tels que les marais salés, les mangroves et les récifs coralliens sont menacés par la submersion. Ces habitats sont essentiels pour de nombreuses espèces marines et terrestres, et leur perte peut entraîner une diminution de la biodiversité.
4. **Déplacement des populations** : Les communautés côtières sont souvent contraintes de se déplacer à l'intérieur des terres en raison de la submersion croissante. Cela peut entraîner des problèmes sociaux, économiques et politiques, y compris la perte de maisons, de terres agricoles et de moyens de subsistance.
5. **Impacts sur l'économie** : Les infrastructures côtières, telles que les ports, les routes, les aéroports et les installations touristiques, sont vulnérables à la submersion. Les

dommages à ces infrastructures peuvent perturber les activités économiques, notamment le commerce maritime et le tourisme.

6. **Sécurité alimentaire** : La submersion peut entraîner la salinisation des sols agricoles et de l'eau douce, ce qui affecte la production alimentaire locale. Les zones agricoles côtières peuvent devenir moins productives, ce qui a des répercussions sur la sécurité alimentaire des populations locales.

8. Les effets du changement climatique sur les littoraux

Le changement climatique, causé par les activités humaines, accentue la dégradation des littoraux. Il est responsable de la hausse du niveau des mers et cause des tempêtes de plus en plus fréquentes et sévères. Le changement climatique accélère également l'érosion.

- **Hausse du niveau des mers :**

L'une des conséquences les plus évidentes du réchauffement climatique est l'élévation du niveau de la mer due à la fonte des glaciers et à l'expansion thermique de l'eau de mer. Cette montée du niveau de la mer aggrave l'érosion côtière, provoque des inondations plus fréquentes et accélère la submersion des terres côtières.

Au cours du XXe siècle, le niveau de la mer s'est élevé de 18 cm (entre 1870 et 2000) à l'échelle mondiale. Cette élévation s'accélère sous l'effet du réchauffement planétaire : on observe une hausse de 6 cm au cours des 20 dernières années.

Entre 1901 et 2010, le niveau moyen des océans a subi une augmentation de 0.19 [0.17 à 0.21] mètres. (Matterre, 2022)

- **En méditerranée :**

La mer Méditerranée étant ouverte sur l'océan Atlantique au niveau du détroit de Gibraltar, est sensible aux variations eustatiques (variations du niveau de la mer).

Des observations réalisées par l'Institut Espagnol d'Océanographie (IEO) montrent que l'augmentation du niveau marin en Méditerranée est du même ordre de grandeur que l'augmentation moyenne des océans. Elle est estimée entre **15 et 20 cm pendant le 20ème siècle**, correspondant à une élévation annuelle d'environ 1.5 mm. De nouvelles observations réalisées depuis les années 2000 relatent une croissance de la Méditerranée d'environ 3 mm/an.

• **Intensification des tempêtes** : Le réchauffement climatique peut conduire à une augmentation de l'intensité et de la fréquence des tempêtes tropicales et des ouragans. Ces événements météorologiques peuvent causer des dégâts majeurs aux zones côtières en provoquant des inondations, des dommages aux structures et une érosion accrue.

• **Perte d'habitats naturels** : Les écosystèmes côtiers tels que les mangroves, les marais salés et les récifs coralliens sont vulnérables aux effets du réchauffement climatique. Les augmentations de température, l'acidification de l'océan et la montée du niveau de la mer menacent ces habitats essentiels, ce qui a un impact sur la biodiversité et les services écosystémiques.

9. Conclusion :

La submersion côtière, due à l'élévation du niveau de la mer causée par le réchauffement climatique, a des effets néfastes sur les zones côtières. Cela engendre l'érosion des plages, des inondations fréquentes, la perte d'habitats naturels, le déplacement des populations, des impacts économiques et des menaces pour le patrimoine culturel. Les mesures d'adaptation incluent la construction de digues, la restauration d'écosystèmes et la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Conclusion générale

Aujourd'hui, les villes côtières font l'objet d'une série d'études d'ingénierie maritime visant à répondre aux besoins socio-économiques des habitants tout en préservant l'environnement. Il est devenu essentiel d'aménager et de protéger les zones littorales pour garantir un équilibre entre les activités humaines et la préservation des écosystèmes côtiers.

Le présent travail mené une étude scientifique approfondie des différents phénomènes côtiers est une étape cruciale. Cette démarche permet de mieux comprendre, anticiper et prédire l'évolution imminente de la région côtière. Cela revêt une importance particulière étant donné les multiples impacts potentiels des infrastructures maritimes implantées dans la zone des Sablettes sur l'équilibre naturel de cet environnement ; Le site d'étude est exposé à des houles provenant des directions Nord- Nord-Est et Ouest-Nord-Ouest. Ces vagues atteignent la ligne côtière avec des hauteurs variant entre 0,5 m et 3 m. Ces vagues induisent la formation de courants de dérive qui se déplacent de manière oblique par rapport à la côte, avec des vitesses oscillantes entre 0,24 m/s et 0,84 m/s.

La topographie sous-marine joue un rôle crucial dans le comportement des vagues. En effet, les caractéristiques des fonds marins influencent la manière dont les houles se propagent. En d'autres termes, la bathymétrie, c'est-à-dire le relief du fond marin, influe sur le mouvement et la transformation des vagues à mesure qu'elles approchent de la côte.

L'étude réalisée a permis de bien identifier la méthodologie à suivre pour le calcul de l'alésa de submersions sur la zone concernée qui est aussi soumise au risque de franchissement par houle cette démarche, appliquée avec succès devrait être étendue sur tout le littoral algérien.

Le calcul des scénarios de la submersion marines à partir des nouvelles méthodes nous a permis de comprendre les facteurs qui régissent le phénomène de la submersion et par la suite étudier son impact sur les littoraux et les infrastructures

Les résultats obtenus vont constituer un outil de prise de décision dans les futurs plans d'intervention et de prévention aux risques côtiers mais aussi dans les futurs plans d'aménagement côtiers et les schémas de développement des communes côtières.

Ce travail a été accompli dans le contexte du projet de fin d'études, offrant ainsi l'opportunité d'approfondir notre compréhension des techniques de modélisation et d'analyse, tout en nous familiarisant avec le terrain pour une meilleure appréhension de la dynamique côtière.

Cependant, cette étude peut encore être améliorée. Des ajustements en termes de résolution et d'actualisation sont nécessaires pour obtenir des résultats satisfaisants et de haute qualité qui répondent pleinement aux exigences de la recherche. Plus précisément :

1. L'utilisation de données bathymétriques plus récentes et précises est indispensable.
2. Une étude de la Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC) devrait être réalisée dans le cadre du projet.
3. Il est primordial de promouvoir le partage d'informations au sein du domaine de la recherche scientifique.
4. Une analyse approfondie des courants devrait également être entreprise.

Références bibliographiques

Référence bibliographique :

Abderrahmani, K.Khedimi, F (2008). Baie d'Alger : Etude de quelques paramètres de gestion du littoral et apport de la télédétection. Mémoire fin d'étude. Dely Brahim. Alger: [Mémoire d'ingénieur en Aménagement du littoral] ENSSMAL, p.p. 14-16.

Ahfir, Y, Meziane , I, (2016). Modélisation numérique de la cinématique du trait de côte et la dynamique sédimentaire des plages sableuses (Oran, Bou-Ismaïl, Alger, Bejaïa, Skikda) Cas d'étude: Sidi Fredj. Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Algérie. ENSSMAL.dely Brahim. p.p.89.

Aid,T.,Menasri,H.(2022).étude de la vulnérabilité de la région de Bou-Ismaïl,recoursa la modélisation pour l'étude de la submersion.mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Algérie. ENSSMAL.dely Brahim.p.p.96.

Amara, L., Chalal, Y., (2022).Machine Learning pour l'étude de la performance hydraulique des ouvrages portuaires, cas Marina. Mémoird'ingénieur.ENSSMAL, Delybrahim (Alger).

Amarouche , K. (2015). Contribution à la recherche des zones à fort potentiel d'énergie houlomotrice à base d'un modèle hydrodynamique. Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL, p.p.111.

Baumann,J.,(2018). Signature sédimentaire des submersions de tempête dans le domaine rétrolittoral : application à la Charente Maritime.Thèse de doctorat, UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE ÉCOLE DOCTORALE Sciences pour l'environnement, Gay-Lussac (ED 523).

Bellomo, Doug, et al. (2006). Coastal flood hazards and the national flood insurance program. Journal of Coastal Research, JSTOR, p.p.21–26.

Benallou, I., (2020). Evaluation des impacts des changements climatiques et des activités anthropiques sur le littoral de la baie de Zemmouri: Vulnérabilité et Adaptation.mémoired'ingénieur.ENSSMAL, Delybrahim.

Bennavette , Javier, et al. (2006). Coastal flooding hazard related to storms and coastal evolution in Valdelagrana spit (Cadiz Bay Natural Park, SW Spain). Continental Shelf Research, vol. 26, no 9. London: Elsevier, 2006, p.p.1061–1076.

BOAK, Elizabeth H., et Ian L. Turner. (2005). Shoreline definition and detection: a review. Journal of coastal research [enligne], vol. 21, no 4 (214), Allen Press, p.p.688–703. [Consulté le 19/7/2020]. Disponible sur le web " <https://meridian.allenpress.com> ".

BOUGIS, Jean. (2003). Les Etats de Mer Naturels?. Institut des Sciences de l'Ingénieur de Toulon et du Var.

Boutiba, M., Guendouz, M, Guettouche. MS (2006). Evolution du littoral jijelien (Est-Algérie) à travers l'analyse sédiment logique des dépôts quaternaires. Bulletin du Service Géologique National, vol. 17, p.p.113–127.

CEREMA, (2018). Etudes hydraulique maritime. N°978-2-37180-261-2. France : CEREMA. p.p.156.

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) ; CUR building infrastructure ; CIRIA, p.p.800-932. ISBN 978-2-11-098518-7.

CETMEF. (2009). 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) ; CUR building infrastructure ; CIRIA.

Chaibai , M.S.E., Hanani, A.Z., (2022). Modélisation hydrodynamique et étude d'agitation (Cas de la Marina Bay D'Alger).mémoire d'ingénieur. ENSSMAL, Delybrahim (Alger).

Dahmani, A., (2016).Utilisation de la modélisation physique et numérique pour l'étude des paramètres hydrodynamiques dans la zone centre Algéroise « Le site des Sablettes ». Mémoire de Magister. Dely Brahim. Alger: ENSSMAL, p.p.78

DHI. (2014). MIKE ZERO: Creating 2D Bathymetries. Bathymetry Editor & Mesh Generator. Scientific Documentation. Disponible sur le web:www.mediafire.com/view/yc3w6h2c2elqnhh/BathymetryGeneration_ScientificDoc.pdf.

DHI. (2014).MIKE 21 Spectral Wave Module. Rapport d'activité. Document non-publié. Document scientifique :DHI. Disponible sur le Web : www.mediafire.com/view/rr6pv2o6bf6k87u/M21SW_Scientific_Doc.pdf.

Djouder, F., Boutiba, M. (2017). Vulnerability assessment of coastal areas to sea level rise from the physical and socioeconomic parameters: case of the Gulf Coast of Bejaia, Algeria. Arabian Journal of Geosciences, vol. 10, no 14, Springer, p.p.299.

FLETCHER, C. H., et al. (1995). Marine flooding on the coast of Kaua'i during Hurricane Iniki: hindcasting inundation components and delineating washover [enligne]. Journal of Coastal Research, JSTOR, p.p.188–204. [Consulté le 20/5/2023]. Disponible sur «<https://www.jstor.org/stable/4298321>».

Floc'h,F,(2021). Morpho-dynamique des plages sableuses et quantification du transport sédimentaire.these de doctorat. Université de Bretagne Occidentale. p.p.55-87.

GIEC, (1990).Intergovernmental Panel on Climate Change. Climatechange: The IPCC scientificassessment.Rapport d'activité. Document non-publié. Mass, Cambridge: GIEC.

GIEC, (2001). Pauvreté. Changements climatiques : Rapport sur Réduire la vulnérabilité des populations pauvres par l'adaptation aux changements climatiques. Berlin Media Company, Allemagne. Disponible sur le web : " <https://www.oecd.org/fr/env/cc/36214804.pdf> ".

GIEC, (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)], p.p.104. Rapport d'activité. Document non-publié. IPCC, Geneva, Switzerland.

Gwendoline.A (2017). Houle à la côte: propagation, impacts et ouvrages innovants.Thèse de doctorat. Toulon .ÉCOLE DOCTORALE 548 - MER &SCIENCES INSTITUT MÉDITERRANÉEN D'OCÉANOLOGIE.

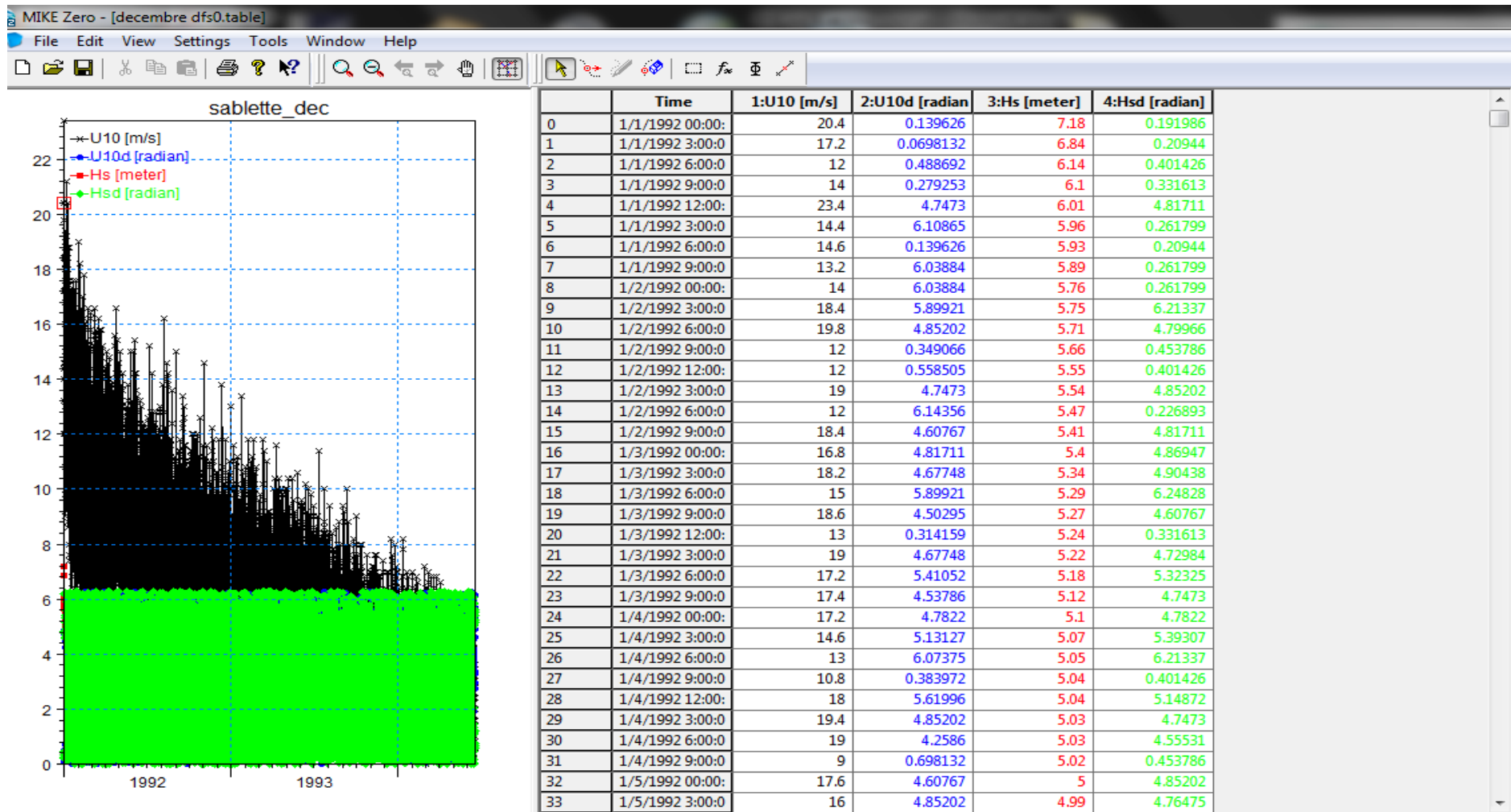
- Haddouche, C. et Baouz, Y. (2019).** Etude de protection de la plage de la Verte Rive (Bordj El Kiffan). Mémoire fin d'étude. Dely Brahim. Alger : [Mémoire d'ingénieur en Aménagement du littoral] ENSSMAL.
- Kulkrani, Ch,(2003).** Morpho-dynamique de la zone de swash .Thèse de doctorat.université de CAEN,basse Normandie.
- Kumar, V. Sathish, et al. (2008).** Assessment of storm surge disaster potential for the Andaman Islands. Journal of Coastal Research, no 24, p.p.171–177.
- LEM.(2020).** Etude d'aménagement de la baie d'Alger « plage bains naturelles de Beb El Oued ; Aménagement d'une promenade au niveau du site les Sablettes ». document non publier .Alger
- LEM. (1996).** Expertise pour l'étude de protection de rivage du site est de la baie d'Alger Rapport d'activité. Document non-publié. Alger : LEM.
- Mechaout, O., Mesbahi, Y., (2016).** Aménagement de la promenade de la baie d'Alger :étude sur model reduit physique du transport sédimentaire dans la promenade des Sablettes « baie d'Alger ». Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL, p.27.
- Mouhoubi,N ,(2022).**Vulnérabilités littoral aux risques cotier dans la abie de Zemmouri.Thèse de doctorat. . Aménagement du littoral. Algérie. ENSSMAL.dely Brahim. p.p.113.
- Passkoff, R. (2001).** L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers : le mythe et la réalité. Paris: Institutocéanographique.
- Pirazzoli, P. A. (1989).** Recent sea level changes in the North Atlantic. Late Quaternary sea-level correlation and applications [enligne], Springer, p.p.153–167. [Consulté le 5/7/2020]. Disponible sur " https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-0873-4_8 ".
- Rabehi, W., Rahal, F. (2011).**Aménagement du port d'El Djamila, avantages et inconvénients et comportement des structures. Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL, p.73.
- Rijn, Leo C. VAN. (1986).** Mathematical modeling of suspended sediment in no uniform flows [enligne]. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 112, no 6, American Society of Civil Engineers, p.p.433–455. [Consulté le 5/4/2023]. Disponible sur: " <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9429%281986%29112%3> ".
- VANRIJN, Leo C. VAN. (1986).** Mathematical modeling of suspended sediment in no uniform flows [enligne]. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 112, no 6, American Society of Civil Engineers, 1986, p.p. 433–455. [Consulté le 18/4/2023]. Disponible sur " <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9429%281986%29112%3> ".

Référence bibliographique

Annexes

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	Datetime	u10	u10d	direction	Hs	Hsd	Tz	Tm	Tp	Hs_sea	Hsd_sea	Tz_sea	Tm_sea	Tp_sea	Hs_swl	Hsd_swl	Tz_swl	Tm_swl	Tp_swl	
2	1992-01-01 00:00:00	1.6	112		0.37	58	5.7	6.16	7.64	0.01	999	999	999	999	0.37	58	5.7	6.16	7.64	
3	1992-01-01 03:00:00	2	102		0.34	58	5.65	6.09	7	0.01	999	999	999	999	0.34	58	5.65	6.09	7	
4	1992-01-01 06:00:00	2.8	72		0.31	58	5.6	6.03	7.05	0.06	42	3.75	3.78	3.62	0.31	59	5.72	6.11	7.05	
5	1992-01-01 09:00:00	1.6	100		0.29	58	5.6	6.01	7.11	0.01	999	999	999	999	0.29	58	5.6	6.01	7.11	
6	1992-01-01 12:00:00	5.2	66		0.27	53	5.38	5.79	7.15	0.27	53	5.37	5.76	7.15	0.02	81	999	11.49	11.51	
7	1992-01-01 15:00:00	6.6	50		0.52	44	3.58	3.78	3.43	0.52	44	3.58	3.78	3.43	0.01	999	999	999	999	
8	1992-01-01 18:00:00	6.2	66		0.86	52	3.85	3.98	3.89	0.85	52	3.85	3.99	3.89	0.17	52	3.89	3.9	3.89	
9	1992-01-01 21:00:00	6	86		0.94	62	4.06	4.25	4.23	0.93	62	4.05	4.25	4.23	0.16	60	4.23	4.24	4.23	
10	1992-01-02 00:00:00	4.4	112		0.86	65	4.26	4.51	4.7	0.55	69	3.66	3.81	3.89	0.67	62	4.89	4.97	4.7	
11	1992-01-02 03:00:00	4	132		0.77	64	4.42	4.68	4.77	0.41	71	3.57	3.68	3.94	0.65	62	4.96	5.06	4.77	
12	1992-01-02 06:00:00	4.2	132		0.67	65	4.53	4.79	4.86	0.42	70	3.84	3.99	4.42	0.53	61	5.21	5.3	4.86	
13	1992-01-02 09:00:00	3.6	164		0.59	64	4.59	4.86	4.94	0.28	74	3.58	3.66	3.71	0.52	61	5.08	5.21	4.94	
14	1992-01-02 12:00:00	0.6	82		0.54	60	4.67	4.94	4.99	0.01	999	999	999	999	0.54	60	4.67	4.94	4.99	
15	1992-01-02 15:00:00	3.2	50		0.49	55	4.65	4.94	5.05	0.18	58	3.5	3.55	3.45	0.46	54	4.97	5.16	5.05	
16	1992-01-02 18:00:00	3.4	84		0.47	52	4.46	4.78	4.63	0.24	56	3.59	3.66	3.82	0.4	51	5	5.2	4.63	
17	1992-01-02 21:00:00	3.8	142		0.44	50	4.41	4.71	4.65	0.33	55	3.92	4.02	4.23	0.3	43	5.33	5.53	5.63	
18	1992-01-03 00:00:00	3	176		0.43	50	4.6	4.86	5.65	0.14	60	3.51	3.55	3.51	0.4	49	4.8	5.01	5.65	
19	1992-01-03 03:00:00	6.4	184		0.46	76	4.23	4.63	5.61	0.46	76	4.23	4.63	5.61	0.01	999	999	999	999	
20	1992-01-03 06:00:00	6.2	198		0.82	181	3.77	3.91	3.56	0.79	180	3.78	3.93	3.91	0.2	188	3.56	3.56	3.56	
21	1992-01-03 09:00:00	5	188		0.7	185	3.91	4.1	3.99	0.7	185	3.91	4.1	3.99	0.02	59	999	7.86	7.78	
22	1992-01-03 12:00:00	3	244		0.54	189	4.12	4.4	4.13	0.16	194	3.29	3.32	3.1	0.52	188	4.24	4.51	4.13	
23	1992-01-03 15:00:00	3	298		0.43	120	4.6	5	6.22	0.16	204	3.41	3.45	3.19	0.39	91	4.94	5.26	6.22	
24	1992-01-03 18:00:00	3	330		0.37	71	5.19	5.58	6.32	0.12	222	3.61	3.65	3.56	0.35	67	5.57	5.81	6.32	
25	1992-01-03 21:00:00	2.2	154		0.35	66	5.45	5.73	6.34	0.01	999	999	999	999	0.35	66	5.45	5.74	6.34	

Annexe A: la base des données utilisé info-plaza



Annexe B : tableau mike pour les roses des vents et Des houles.

```

pip install pyextremes

Looking in indexes: https://pypi.org/simple, https://us-python.pkg.dev/colab-wheels/public/simple/
Collecting pyextremes
  Downloading pyextremes-2.2.7-py3-none-any.whl (57 kB)
-----
57.6/57.6 KB 2.3 MB/s eta 0:00:00
Requirement already satisfied: matplotlib<4.0.0,>=3.3.0 in /usr/local/lib/python3.9/dist-packages (from pyextremes) (3.5.3)
Requirement already satisfied: numpy<2.0.0,>=1.19.0 in /usr/local/lib/python3.9/dist-packages (from pyextremes) (1.22.4)
Requirement already satisfied: scipy<2.0.0,>=1.5.0 in /usr/local/lib/python3.9/dist-packages (from pyextremes) (1.10.1)
Requirement already satisfied: pandas<2.0.0,>=1.0.0 in /usr/local/lib/python3.9/dist-packages (from pyextremes) (1.4.4)
Collecting emcee<4.0.0,>=3.0.3
  Downloading emcee-3.1.4-py2.py3-none-any.whl (46 kB)
-----
46.2/46.2 KB 3.6 MB/s eta 0:00:00
Requirement already satisfied: pillow>=6.2.0 in /usr/local/lib/python3.9/dist-packages (from matplotlib<4.0.0,>=3.3.0->matplotlib) (9.0.1)
Requirement already satisfied: kiwisolver>=1.0.1 in /usr/local/lib/python3.9/dist-packages (from matplotlib<4.0.0,>=3.3.0->matplotlib) (1.4.5)
Requirement already satisfied: pyparsing>=2.2.1 in /usr/local/lib/python3.9/dist-packages (from matplotlib<4.0.0,>=3.3.0->matplotlib) (3.1.2)
Requirement already satisfied: cycler>=0.10 in /usr/local/lib/python3.9/dist-packages (from matplotlib<4.0.0,>=3.3.0->matplotlib) (0.12.1)
Requirement already satisfied: fonttools>=4.22.0 in /usr/local/lib/python3.9/dist-packages (from matplotlib<4.0.0,>=3.3.0->matplotlib) (4.53.0)
Requirement already satisfied: python-dateutil>=2.7 in /usr/local/lib/python3.9/dist-packages (from matplotlib<4.0.0,>=3.3.0->matplotlib) (2.8.2)
Requirement already satisfied: packaging>=20.0 in /usr/local/lib/python3.9/dist-packages (from matplotlib<4.0.0,>=3.3.0->matplotlib) (24.1)
Requirement already satisfied: pytz>=2020.1 in /usr/local/lib/python3.9/dist-packages (from pandas<2.0.0,>=1.0.0->pyextremes) (2023.3)
Requirement already satisfied: six>=1.5 in /usr/local/lib/python3.9/dist-packages (from python-dateutil>=2.7->matplotlib) (1.16.0)
Installing collected packages: emcee, pyextremes
Successfully installed emcee-3.1.4 pyextremes-2.2.7

```

series

Datetime

1992-01-01 00:00:00	0.37
1992-01-01 03:00:00	0.34
1992-01-01 06:00:00	0.31
1992-01-01 09:00:00	0.29
1992-01-01 12:00:00	0.27
...	
2020-12-31 09:00:00	1.35
2020-12-31 12:00:00	1.19
2020-12-31 15:00:00	1.10
2020-12-31 18:00:00	1.05
2020-12-31 21:00:00	0.98

Name: Hs, Length: 84744, dtype: float64

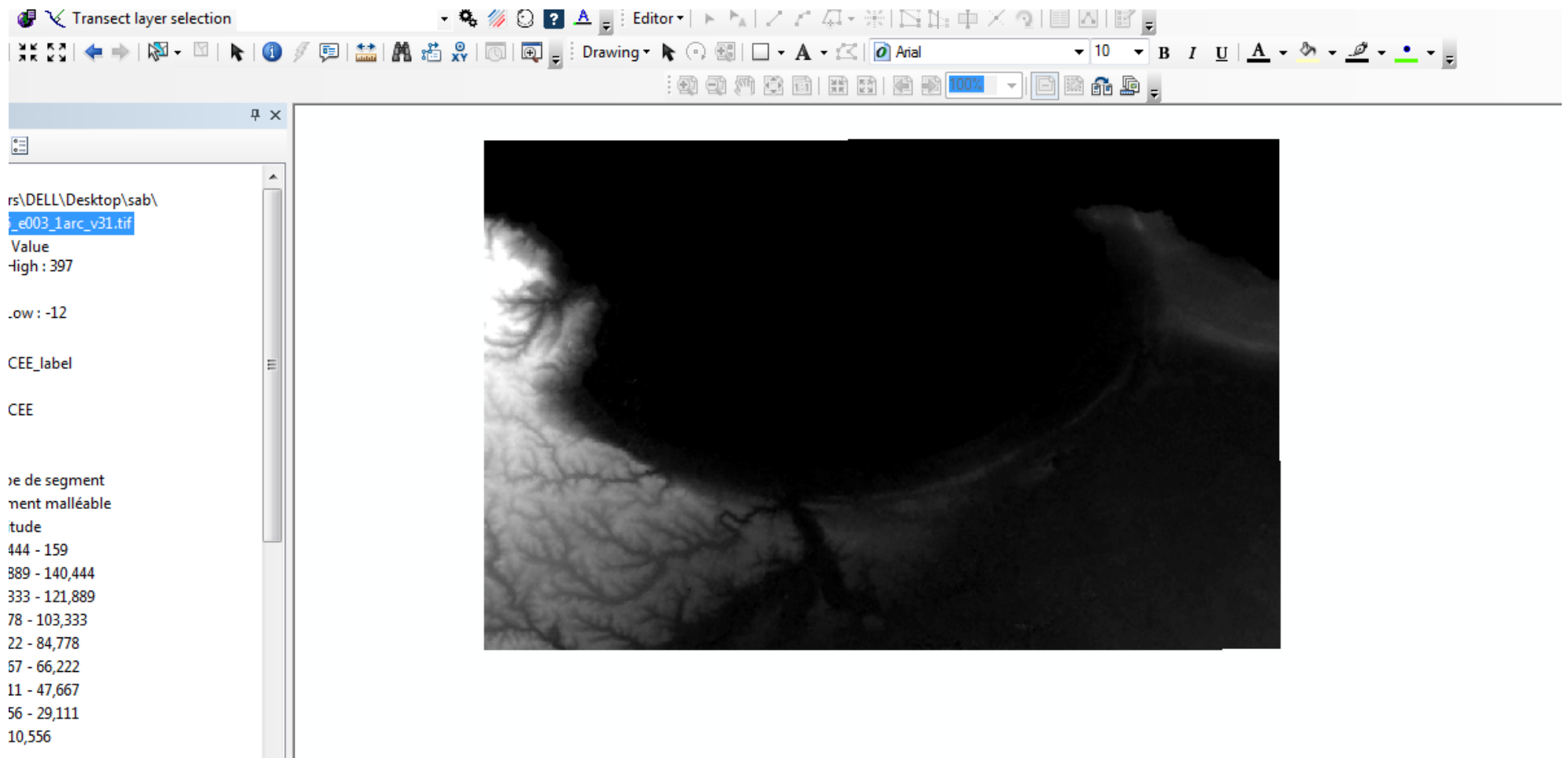
Annexe C : script des evenementsextreme via google Colablanguage Python

```

import pandas as pd
from pyextremes import __version__, get_extremes
from pyextremes.plotting import plot_extremes
#Script de Représentation de la méthode des blocs maximas sur les hauteurs significatives de houle
#By hamza lyzidi et Sadoun Med Nadir
]data = pd.read_csv(
    "/content/time_series_wind.csv",
    index_col=0,
    parse_dates=True,
    squeeze=True,
)
]data = (
    data
    .sort_index(ascending=True)
    .astype(float)
    .dropna()
)
data = data.loc[pd.to_datetime("1992"):pd.to_datetime("2022")]
data = data - (data.index.array - pd.to_datetime("1995")) / pd.to_timedelta("365.2425D") * 2.87e-1
]extremes = get_extremes(
    ts=data,
    method="BM",
    extremes_type="high",
    block_size="365.2425D",
    min_last_block=0.7,
)
]fig, ax = plot_extremes(
    ts=data,
    extremes=extremes,
    extremes_method="BM",
    extremes_type="high",
    block_size="365.2425D",
    figsize=(8, 5),
)
fig.savefig("bm-high-ly.png", dpi=96, bbox_inches="tight")

```

Annexe C



Annexe D : création d'un MNT sous le logiciel ArcGis 10.4.1

Résumé :

La cote sableuse de la bande littorale des sablettes situé dans la partie occidentale de la baie d'Alger ; cette zone est particulièrement vulnérable en ce qui concerne les risques côtiers , il est soumis à un recul important .cette étude s'intéresse au risque de submersion marine sur les infrastructures et les littoraux ;pour bien mener ce travail une etude pluridisciplinaire a été établie ou nous avons faire des analyse des évènement extremes via le langage Python puis des traitement a l'aide du logiciel Mike 21 avec ses différents modeles afin d'obtenir des résultats qui vont facilite l'étude de la submersion ; on a fait aussi la cartographie et l'estimation des aléas submergés ainsi que le calcul du franchissement . Les résultats obtenus vont constituer un outil de prise de décision dans les futurs plans d'intervention et de prévention aux risques côtiers mais aussi dans les futurs plans d'aménagement côtiers et les schémas de développement des communes côtières.

Mots clés : sablettes, submersion, modélisation numérique, événements extrêmes.

Abstract :

The sandy coast of the Sablettes coastal strip located in the western part of the Bay of Algiers; this area is particularly vulnerable to coastal risks, as it is subject to significant erosion. This study focuses on the risk of marine flooding on infrastructure and coastlines. In order to carry out this work, a multidisciplinary study was established, in which we performed analyses of extreme events using the Python language, followed by processing using the Mike 21 software with its various models in order to obtain results that will facilitate the study of flooding. We have also carried out the mapping and estimation of submerged hazards, as well as the calculation of the crossing. The results obtained will constitute a decision-making tool for future coastal risk management and prevention plans, as well as for future coastal planning and development schemes for coastal municipalities.

Keywords: Sablettes, flooding, numerical modeling, extreme events

ملخص

ساحل سابل يتس الرملية يقع في الجزء الغربي من خليج الجزائر ؛ هذه المنطقة معرضة بشكل خاص لمخاطر الساحلية ، حيث أنها عرضة لعمليات تآكل كبيرة. تركز هذه الدراسة على خطر الفيضانات البحرية على البنية التحتية والسواحل. من أجل تنفيذ هذا العمل ، تم إنشاء دراسة متعددة التخصصات ، حيث أجرينا تحديات للأحداث القصوى باستخدام لغة جياتن يلع لوصول لفلتخمل هجذامن عم Mike 21 جم ان رب مادخت سابل عجل اعم اهيلت ، Python . لقد قمنا أيضا بإجراء تخطيط وتقدير للمخاطر المغمورة ، وكذلك حساب العبور. اسة الفيضانات من شأنها تسهيل در سد تصبج النتائج التي تم الحصول عليها أداة مساعدة في اتخاذ القرار لخطط المسد تقبلية لإدارة ومنع مخاطر السواحل ، وكذلك لخطط المسد تقبلية لخطط السواحل وخطط التنمية الساحلية. لبلديات

الكلمات المفتاحية: سابل يتس ، الفيضانات ، النمذجة العددية ، الأحداث القصوى