

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'ÉTAT ET GRADE DU MASTER EN SCIENCES DE LA MER
OPTION : GESTION ET PROTECTION DU LITTORAL

Thème

**Etude de protection du rivage de la route côtière longeant le
rivage maritime de « Stora-Skikda »**

Présenté par :

Mme. Benyoucef Belkiss

Mme. Kharoubi Rayane

Soutenu le 26 / 09 /2023 devant le jury

Mr MEZOUAR K

Professeur

Président

Mr DAHMANI A.

Maître de conférences B (ENSSMAL)

Promoteur

Mme LOUANCHI S

Ingénieur Projet

Co-promotrice

SALEM CHERIF Y

Maitre-assistante B

Examineur

Promotion : 2022/2023

Remerciements

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.

Un merci spécial va à nous famille pour leur amour inconditionnel et leur soutien indéfectible. Sans leur encouragement constant je n'en serai pas arrivée jusqu'à là.

Nous adressons notre gratitude et nos sincères remerciements à notre promoteur, Mr Dahmani, qui s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, malgré ses responsabilités administratives.

Nous tenons également à remercier notre Co-promoteur, Mme Louanchi.S pour nous avoir soutenu, aidé et suivi tout au long de l'exécution de ce travail.

Nos remerciements s'adressent également aux personnes ayant accepté de participer à ce jury :

- Monsieur MEZOUAR K. qui nous a fait l'honneur d'être le président de jury de cette soutenance.

- Madame SALEM CHERIF Y pour avoir accepté d'examiner ce travail. Pour nous avoir fait l'honneur d'être examinatrice et de participer à ce jury de soutenance de ce mémoire.

Sans oublier d'adresser nos plus vifs remerciements à Mr Aoui sans qui nous n'aurions pas pu atteindre nos objectifs.

Nous exprimons également notre remerciement à Mr Bourkache Redouane, pour ses recommandations techniques et ses conseils.

Nous adressons nos remerciements à nos collègues leurs aides et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Sans oublier l'ensemble du personnel du LEM pour le meilleur accueil, et d'avoir facilité la consultation des documents nécessaires pour notre travail.

Remercîment

Enfin nos vifs remerciements, à toutes les personnes qui nous ont aidé de près ou de loin.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

*À ma chère mère Aziza et mon cher père Ahmed,
À mes sœurs et mes frères, avec une pensée spéciale pour Barhoum,
Et à mes amis précieux Kamza, Nadir, Oussama, Feriel, Kadil, Mountaha,
Ce mémoire est le fruit de nombreuses heures de travail, de réflexion et de dévouement, mais il n'aurait pas été possible sans votre soutien constant, votre amour inconditionnel et vos encouragements. Vous avez été mes piliers, ma source d'inspiration et ma motivation tout au long de ce voyage académique.*

Chacun d'entre vous a apporté une lumière unique à ma vie, et je tiens à vous exprimer ma profonde gratitude. Que cette dédicace témoigne de mon amour et de ma reconnaissance éternelle envers vous.

À mes précieuses amies Sonia stresse, Sara damito et Kikis,

Ce mémoire n'aurait pas été le même sans votre soutien inestimable. Votre amitié et vos encouragements ont été une source de réconfort et de motivation tout au long de ce voyage académique. Vos paroles inspirantes, votre compréhension et votre présence ont été des piliers sur lesquels je me suis appuyé(e).

Que cette dédicace exprime ma profonde gratitude pour votre amitié indéfectible et votre soutien constant. Vous êtes des personnes exceptionnelles, et je suis honoré(e) de vous avoir comme amies.

Avec tout mon amour et ma reconnaissance,

Avec tout mon amour,

RAYAN

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Aux meilleurs parents au monde, vous m'avez doté d'une éducation digne, votre amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui. Je vous dédie ce travail en reconnaissance de l'amour que vous m'offrez quotidiennement et votre bonté exceptionnelle.

À mon chère frère Abdou : votre bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

À ma grand-mère, pour son encouragement et prières,

À mes chères Sara, Sonia, Rayane

En témoignage de l'amitié qui nous lie et des souvenirs que nous avons construits ensemble. À travers ce travail, je souhaite vous exprimer mes vœux sincères pour une vie remplie de santé, de bonheur, et de prospérité.

À mes camarades, Kamza et Mountaha, Milissa, Feriel : votre aide précieuse a été inestimable.

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

Belkiss

Table de matières

<i>Remerciements</i>	II
<i>Dédicace</i>	IV
<i>Dédicace</i>	V
Table de matières	VI
Liste des figures :	X
Liste des tableaux	XII
Liste des abréviations	XIII
Introduction générale.....	2
I. Généralités.....	5
I.1. Complexité de littoral	5
I.2. Agents hydrodynamiques	5
I.2.1. La houle.....	5
I.3. Agent aérodynamique.....	6
I.3.1. Le Vent.....	6
I.3.2. Les courant	6
I.4. La réponse morphologique	7
I.4.1. Erosion	7
I.5. Transport sédimentaire	7
I.6. Les évènements extrêmes	8
I.6.1. Tempête.....	8
I.6.2. Tsunami.....	8
I.7. Les composantes du niveau de la mer.....	8
I.7.1. Les marées.....	8
I.7.2. Surcote.....	8
I.8. Les ouvrages de protections	8
I.8.1. Les types des ouvrages de protection du littoral	9

Table de matières

I.8.1.2.	Les ouvrages de protection transversaux	12
II.	Présentation de la zone d'étude.....	15
II.1.	Introduction.....	15
II.2.	Situation géographique	15
II.2.1.	La baie de Stora.....	15
II.3.	Présentation de la zone.....	16
II.4.	Géomorphologie	16
II.4.1.	Caractéristique géomorphologique de la zone	16
II.4.2.	Géologie régionale	16
II.5.	Données climatique et hydrographique.....	16
III.5.1.	Le Climat	16
II.5.2.	La Pluviométrie	17
II.5.3.	Le vent.....	17
II.6.	Réseaux hydrographique.....	21
II.7.	Données hydrodynamiques	22
II.7.1.	La houle.....	22
II.7.2.	L'érosion	26
II.7.3.	Le transport sédimentaire	27
III.8.	Conclusion.....	28
III.	Analyse des évènements extrêmes	30
III.1.	Introduction.....	30
III.2.	Analyse statistique des houles extrêmes au large de la baie de Skikda	30
III.2.1.	Hauteur significative et période significative :	30
III.3.	Analyse des houles extrêmes	31
•	La méthode des maximas annuels	31
•	La méthode du peak-over thrershold (POT).....	31
III.3.1.	La Méthode série des blocks maxima.....	31

Table de matières

III.3.1.1.	La loi de la valeur extrême généralisée.....	32
III.3.2.	La méthode Peaks Over Threshold (POT)	36
III.3.3.	Comparaison entre les méthodes POT et Blocs Maximas (GEV distribution) 40	
III.4.	Conclusion	41
IV.	Modélisation numérique.....	43
IV.1.	Introduction.....	43
IV.2.	Présentation du modèle	43
IV.2.1.	MESH GENERATOR.....	43
IV.2.2.	MIKE SW	44
IV.2.3.	MIKE HD	46
IV.3.	METHODE DE TRAVAIL	46
IV.3.1.	Création de la bathymétrie.....	46
IV.3.1.1.2.	Prétraitement des données.....	47
IV.3.2.	Réfraction de la houle	52
IV.3.2.1.	Principe de calcul de la réfraction de la houle :.....	52
IV.4.	Résultats.....	53
IV.4.1.	Résultats de simulation du model mike21	53
IV.4.1.3.	Résultats de champs des houles pour la direction Nord-Nord-Ouest.....	56
	Période de retour 5ans	58
	Période de retour 50 ans	58
	Période de retour 100 ans	58
IV.5.	Détermination de la houle de projet	58
IV.6.	Conclusion	59
V.	Dimensionnement.....	61
V.1.	Introduction	61
V.2.	La digue a talus	61

Table de matières

V.2.1. Eléments constitutifs	61
V.3. Méthode de travaille.....	63
V.3.1. Formule d’Hudson	63
V.3.2. Hauteur de la houle déterminante	66
V.3.3.1. Enrochement naturel.....	66
V.3.3.2. Enrochement Artificiel	68
V.3.3.2.1. Les blocs cubiques rainurés Antifer.....	69
V.4. Calculs.....	69
V.4.1. Etape de calcule	70
V.5. Conclusion.....	73
Conclusion.....	76

Liste des figures :

Figure 1: Caractéristiques de la houle (technoscience).....	6
Figure 2: Les courants responsables du transport des sédiments, les courants côtiers, les courants de déchirure et les courants de dérive (Bernatchez et Fraser,2008).	7
Figure 3: Protection d'une route côtière avec des enrochements naturels.....	10
Figure 4: Revêtement en enrochement, Hurst Spit, Royaume-Uni.....	10
Figure 5: Après la construction système de protection anti-affouillement.	10
Figure 6: Avant la construction de système de protection anti-affouillement.	10
Figure 7: Protection anti-affouillement d'un mur chasse-mer, Happisburgh, Royaume-Uni (blocs en enrochement naturel posés au pied d'un mur chasse-mer en béton).	11
Figure 8: Brise-lame VALRAS PLAGES DREAL Occitani.	12
Figure 9: Une série d'épis en enrochement classique.....	12
Figure 10: Une carte reliée à partir de Arc GIC (de la zone de Srora –Skikda).....	15
Figure 11: (image satellitaire –Google earth -de la zone de Srora –Skikda).	15
Figure 12: Précipitation de la zone de Skikda des années (1990-1995-2000-2005-2010)	17
Figure 13: Rose de vent annuel (1990-2020).....	18
Figure 14: Roses du vent mensuel pour la période 1992 –2020 (INFO-PALZA)	Erreur !
Signet non défini.	
Figure 15: Roses annuelles et saisonnières de vent pour la période 1992 –2020 (INFO-PALZA).....	20
Figure 16 : Réseau hydrographique de la wilaya de Skikda	21
Figure 17: Le bassin versant SAFSAF (kherfouchi.M, 1984).....	22
Figure 18: Roses des houles mensuelles pour la période 1992 –2020 (INFO-PALZA).....	24
Figure 19: Roses annuelle et saisonnières de la houle pour la période 1992 –2020 (INFO-PALZA).....	25
Figure 20: Représentation de méthode des Blocs Maximas sur les hauteurs de houle de 1992–2020.....	33
Figure 21: Estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour l'omnidirectionnel.	34
Figure 22: Estimation des événements extrêmes via la distribution de pour Weibull l'omnidirectionnel.	35
Figure 23: Moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelle de l'enregistrement.....	36

Liste des figures

Figure 24: Valeurs des hauteurs significatives maximales avec la méthode POT seuil $H_s = 3.5$ m.....	37
Figure 25: Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour omnidirectionnelle seuils $H_s = 4$ m.....	38
Figure 26: Représentation de méthode POT sur les hauteurs de houle de 1992 – 2020 seuils $H_s = 4$ m.....	38
Figure 27: Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour le seuil = 4m.	39
Figure 28: Comparaison des résultats obtenu avec les deux méthodes POT et GEV.....	40
Figure 29: Etapes de réalisation d'un fichier bathymétrie.....	48
Figure 30: Maillage du modèle côtier de Golf de Stora.....	49
Figure 31 : maillage du modèle côtier de Stora.....	49
Figure 32: Carte bathymétrique de la baie de Skikda	50
Figure 33: La bathymétrie fine zone d'étude (Stora-Skikda (2023)).....	50
Figure 34: Champ des houles quinquennales dans la baie de Skikda et la zone d'intérêt.....	53
Figure 35: Champ des houles Cinquantennales dans la baie de Skikda et la zone d'intérêt. .	53
Figure 36: Champ des houles centennales de la baie de Skikda et la zone d'intérêt.....	53
Figure 37: Champ des houles quinquennales dans la baie de Skikda et la zone d'intérêt.....	56
Figure 38: Champ des houles Cinquantennales dans la baie de Skikda et la zone d'intérêt. ..	56
Figure 39: Champ des houles centennales de la baie de Skikda et la zone d'intérêt.....	56
Figure 40: les éléments constrictifs d'une digue à talus	61
Figure 41: protection côtière à l'aide des enrochements naturels sur la route 199 aux Îles-de-la-Madeleine (radio-canada.ca).....	67
Figure 42 : différentes formes des bloc artificielles (CEM.2006).....	68
Figure 43: protection l'aide de bloc artificiel	69

Liste des tableaux

Tableau 1: Valeur des quantiles pour plusieurs périodes de retour.	34
Tableau 2: Valeur des quantiles pour plusieurs périodes de retour Weibull.	35
Tableau 3: Résumant le résultat obtenu par la méthode POT « seuil Hs = 3.5 m ».	37
Tableau 4: Résumant le résultat obtenu par la méthode POT « seuil Hs = 4 m ».	39
Tableau 5: Symboles et signification des paramètres des équations d'eaux profondes.....	45
Tableau 6: Caractéristiques des données utilisées dans l'étude.	47
Tableau 7: Données utilisées pour la simulation du modèle SW.....	51
Tableau 8: données bathymétriques utilisées pour les tables points.....	52
Tableau 9: Présentation des résultats obtenus par la simulation dans le secteur NE 45°	54
Tableau 10: Présentation des résultats obtenue par la simulation dans le secteur NNW 337.5°	57
Tableau 11: Houle de projet suivant la bathymétrie	58
Tableau 12: Les fonctions des différents éléments d'un ouvrage en enrochement.....	62
Tableau 13: caractéristiques des différents types d'enrochements.....	65
Tableau 14: Valeurs de kd selon SPM1977	67
Tableau 15: Valeurs de Kd selon SPM 1984	67
Tableau 16: Kd Des enrochements artificiels en double couches.....	68
Tableau 17: résultats de dimensionnement	73

Liste des abréviations

Liste des abréviations

BM Block-Maximum

BCR Bloc cubique rainuré

GEV Valeurs Extrêmes Généralisées (GeneralizedExtreme Values)

HD Hydro-dynamique

LEM Laboratoire des études maritimes

NNW Nord Nord Ouest

NE Nord Est

POT Peak-Over-Threshold.

SIG System d'Information Géographique

SW Spectral Wave

UTM Universal Transverse Mercator

WGS Systèmes Géodésique Mondial (World Geodetic System 1984)



Introduction Générale

Introduction générale

En géographie physique, le **littoral** est la bande des contacts biophysiques entre l'hydrosphère, l'atmosphère et la lithosphère. En géographie humaine, c'est la bande de l'influence réciproque des activités maritimes et terrestres.

Au sens physique du terme, le littoral est la bande comprise entre le niveau des plus basses mers et celui des plus hautes mers, donc ce que couvre et découvre la mer : il correspondrait dans ce cas à l'estran. Mais c'est une définition beaucoup trop réductrice pour rendre compte du rôle d'interface que joue le littoral entre son avant-pays maritime et son arrière-pays terrestre.

Les zones littorales, qui sont des interfaces dynamiques, sont actuellement soumises, à travers le monde, à d'importantes pressions anthropiques, liées notamment à la croissance urbaine sans précédent qui s'y développe (**Tezuka Akira et Takahashi Nobuo 1998 ; Le Berre et Robert 2017**)

La plupart des côtes basses connaissent actuellement une « crise érosive » (**Paskoff, 1998**) généralisée, à l'échelle du monde, environ 70 % des littoraux sableux seraient en érosion, 20 % en stabilité et 10 % seulement en cours d'engraissement (**Bird, 1987**). Il faut ajouter les côtes à falaise qui, par définition, sont toutes en érosion car elles ne peuvent évoluer que par recul.

L'érosion côtière est un phénomène géologique qui se traduit par une perte graduelle de matériaux entraînant le recul des côtes et l'abaissement des plages. Les vagues, courants marins, précipitations et vents sont ainsi à l'origine de ce processus progressif qui façonne les littoraux.

Ce dernier se traduit par un recul du trait de côte, une réduction des plages; c'est ce qui dégrade le littoral et l'écosystème naturel marin sous plusieurs angles. Face à cet recul, mais aussi face à l'augmentation de la vulnérabilité des milieux, il s'est avéré nécessaire de protéger ces équipements en réalisant des ouvrages de défense du littoral dont le choix dépend de la nature du site et de l'usage que l'on veut faire de ce dernier

Sur notre site d'étude Stora-Skikda, et pour notre projet de fin d'étude intitulé **Etude de protection Du rivage de la route côtière longeant le rivage maritime de « Stora-Skikda »**, le choix de ce site est très important vu la vulnérabilité de ce dernier et l'effet de l'érosion sur le site et sur la route côtière Stora.

Introduction

Pour cela on a basé sur les étapes nécessaires pour avoir des résultats réalisables pour une protection durable de la route de stora qui se résument dans les chapitres suivant :

Chapitre 1 : englobe les définitions et les explications des termes et les agents nécessaires dans notre étude.

Chapitre 2 : présentation de la zone d'étude avec les caractéristiques.

Chapitre 3 : analyse des événements extrêmes de notre zone pendant des périodes précises effectuée à partir du langage python sur l'interface Google colab via la bibliothèque extrêmes

Chapitre 4 : modélisation numérique par utilisation du logiciel Mike 21.

Chapitre 5 : se résume dans le dimensionnement et il englobe l'étude de protection de la route, en donnant des valeurs favorables et réalisables pour notre but d'étude.



Chapitre I : Généralités

I. Généralités

I.1. Complexité de littoral

Le littoral est la zone de contact entre la lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère. Influence continentale au travers des caractéristiques de la structure géologique (disposition et résistance des roches, topographie de l'arrière-pays), l'influence marine par l'action des facteurs hydrodynamiques (niveau moyen de la mer, houle, marée et courants associés) et l'influence atmosphérique, à savoir l'action des agents et des processus d'érosion subaériennes qui participent à la météorisation du littoral et de l'intérieur des terres. (**Ministère de l'écologie, 2010**)

La zone côtière peut s'étendre de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres de part et d'autre de la limite terre-eau. A l'interface entre mer et continent, les littoraux sableux représentent environ 34 % du linéaire côtier mondial (**Hardisty, 1994**). Dans ces environnements, la tendance érosive naturelle est parfois accélérée par des actions anthropiques qui introduisent des déséquilibres dans les processus côtiers en limitant l'accrétion du volume de sable nécessaire au maintien des plages et à la stabilité du trait de côte (**Paskoff, 1998**).

I.2. Agents hydrodynamiques

I.2.1. La houle

I.2.1.1. Caractéristiques de la houle

La surface de la mer présente généralement une suite indéfinie d'ondulations parallèles presque identiques qui se propagent de façon sensiblement uniforme vers le rivage. On appelle houle, cet ensemble d'ondulations ou de vagues (**Bonnefille, 1992**).

La hauteur ou (amplitude) des vagues est définie par la distance entre le sommet ou (sommet) et la surface de la mer et est notée A (exprimée en mètres).

- Une longueur d'onde égale à la distance entre deux pics ou deux vallées successives est notée λ (exprimée en mètres).
- Le rapport hauteur/longueur est égal à la cambrure (unités arbitraires).
- La période notée T mesure le temps écoulé (en secondes) entre le passage de deux pics consécutifs au même point.
- La fréquence est exprimée en $1/T$. C'est le nombre de houles passant par un point fixe par seconde (exprimé en Hertz).

- Sa vitesse ou vélocité de propagation est notée $[c]$ ou λ/T . C'est-à-dire la distance (exprimée en mètres/seconde) que parcourt une crête (ou un creux) en un temps donné (mètre par seconde)

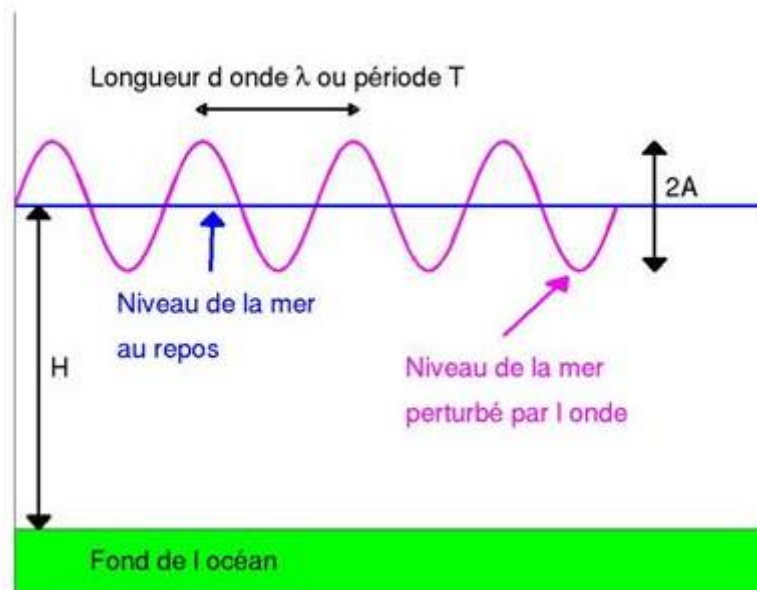


Figure 1:Caractéristiques de la houle (technoscience).

I.3. Agent aérodynamique

I.3.1. Le Vent

Le vent est le mouvement de l'atmosphère, c'est-à-dire la masse de gaz (le mot air convient mieux) présente à la surface de la planète. Les vents les plus forts connus se produisent sur Neptune et Saturne. Indispensable pour tous les phénomènes météorologiques. Comme les courants océaniques, le vent est régi par les lois de la mécanique des fluides. Ces deux circuits liquides ont des interdépendances. (Bougeault, P. and Sadourny, R., 2001)

I.3.2. Les courant

Selon (Castelle, 2004), les courants moyens sont les mouvements des masses dont les variations sont plus lentes que celles associées aux ondes infra gravitaires et aux instabilités de courants. Les principaux courants moyens induits par la houle peuvent être divisée de la manière suivante :

- Le courant de retour
- Le courant de dérive ou courant « long shore »
- Le courant sagittal ou « rip curent »

I.4. La réponse morphologique

I.4.1. Erosion

L'érosion est définie comme un gain d'espace de la mer sur la terre et l'accrétion comme un gain de la terre sur la mer, s'observant sur des périodes suffisamment longues (**EUROSION, 2004**).

I.5. Transport sédimentaire

Les trois courants principaux responsables du transport des sédiments entre la mer et la côte sont : les courants de vague, les courants d'arrachement ou (rip-current) et les courants de dérive. Les courants de vague amènent à la côte des sédiments provenant de la zone intertidale et marine tandis que les courants de d'arrachement transportent les sédiments de la côte vers la mer. Enfin, les courants de dérive se déplacent parallèlement à la côte : ils permettent des échanges le long de la côte entre les zones d'apport et de dépôt des sédiments. (**Bernatchez et Fraser, 2008**).

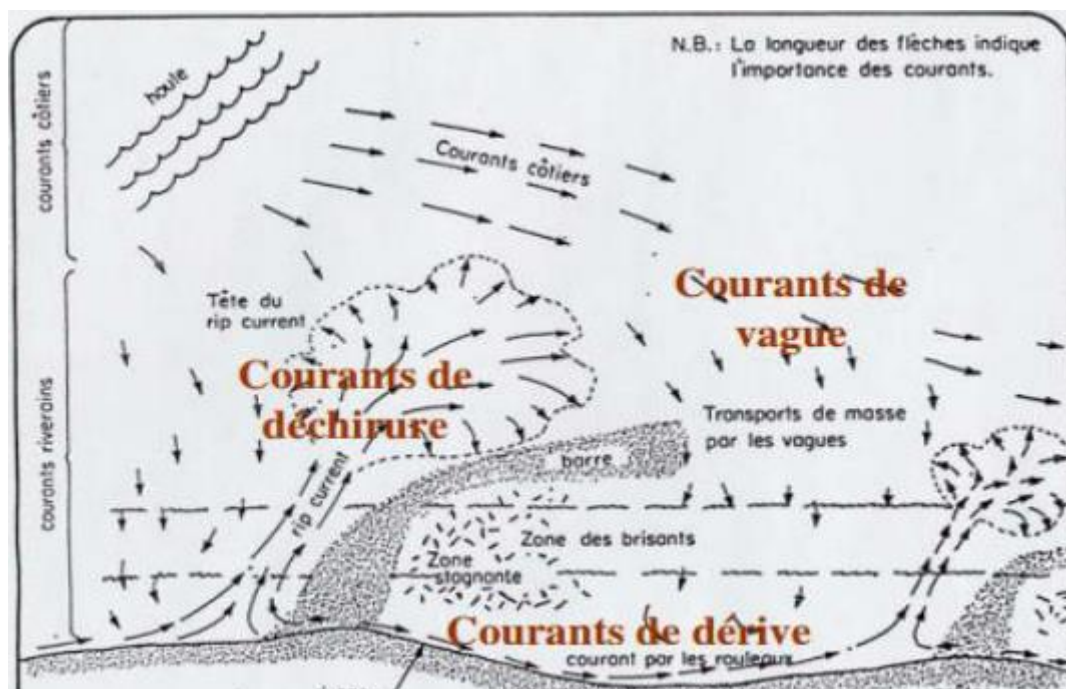


Figure 2: Les courants responsables du transport des sédiments, les courants côtiers, les courants de déchirure et les courants de dérive (**Bernatchez et Fraser, 2008**).

I.6. Les évènements extrêmes

Le niveau de la mer est la hauteur moyenne de la surface de la mer, par rapport à un niveau de référence adéquat

I.6.1. Tempête

La tempête est un phénomène météorologique violent à large échelle en général entre 200 à 1 000 km, Elle peut être accompagnée d'orages donnant des éclairs et du tonnerre ainsi que de la grêle et des tornades. Caractérisé par des tourbillons et des précipitations intenses. **(Deboudt, P. and Battiau-Queney, Y, 1991)**

I.6.2. Tsunami

Le tsunami est une onde provoquée par un rapide mouvement d'un grand volume d'eau (océan ou mer). Ce mouvement est en général dû à un séisme, à une éruption volcanique sous-marine de type explosive ou bien à un glissement de terrain sous-marin de grande ampleur. Un impact météoritique peut aussi en être la cause, de même qu'une explosion atomique sous-marine. Ainsi, contrairement aux vagues, un tsunami n'est pas créé par le vent **(GILLES, L., 2023).**

I.7. Les composantes du niveau de la mer

I.7.1. Les marées

Les marées sont le mouvement ascendant (courant ou marée) et le mouvement descendant ultérieur (marée inverse ou descendante) des mers et des eaux océaniques causés par l'action combinée de l'attraction gravitationnelle de la lune et du soleil. **(Blaizot, D., 2023).**

I.7.2. Surcote

La surcote associée aux vagues est la hauteur moyenne d'un plan d'eau causée par le déferlement des vagues « Waves setup ». Cette élévation peut atteindre des dizaines de centimètres. Lors de la tempête anormale, la surcote dans la baie d'Alger était comprise entre 1,5m et 2m. **(LEM, 2013)**

I.8. Les ouvrages de protections

Les ouvrages de protection sont principalement construits pour protéger les terrains le long de la côte de l'érosion et pour soutenir le sol. On en trouve divers types, notamment des enrochements, des murs de béton ou de bois, etc. Ils procurent un sentiment de sécurité contre

l'assaut des vagues. Toutefois, bien qu'ils soient efficaces pour contrer l'érosion localement, ils engendrent des conséquences néfastes et irréversibles à la plage qui servait de défense naturelle tout en augmentant les risques de submersion. De plus, les ouvrages de protection demandent un entretien régulier et nécessiteront des coûts élevés de réfection à la fin de leur durée de vie utile. (Salmon, C. and Duvat, V.K., 2018).

I.8.1. Les types des ouvrages de protection du littoral

Les ouvrages en enrochement de protection du littoral sont généralement constitués de composants similaires à ceux des digues décrites précédemment.

I.8.1.1. Les ouvrages de protection longitudinaux

Ils sont réalisés en contact direct entre le haut de plage et les infrastructures situées immédiatement au-dessus. La construction d'une défense longitudinale de haut de plage peut s'imposer lorsque les transports longitudinaux sont insuffisants pour éviter que les violentes tempêtes vident la plage ou attaquent le haut de plage. Une défense longitudinale est également nécessaire pour résister à une houle frontale (Chapon, 1978).

Ce type d'ouvrage, bien qu'il assure une protection immédiate des infrastructures côtières, porte atteinte à la plage, par la présence d'une paroi quasi verticale qui augmente la réflexion de la houle.

I.8.1.1.1. Revêtement

Un revêtement est une couverture en enrochement, en béton ou d'un autre matériau qui sert à protéger le talus d'un remblai, d'une côte naturelle ou d'une plage contre l'érosion. Ce type d'ouvrage est placé sur la partie du haut de plage à protéger, pour interposer entre les lames et le sable un placage susceptible de mieux résister à leur action et permettant en général également de raidir les pentes. De tels revêtements peuvent être rigides ou souples (André C.).



Figure 3: Protection d'une route côtière avec des enrochements naturels.



Figure 4: Revêtement en enrochement, Hurst Spit, Royaume-Uni.

I.8.1.1.2. Protection anti-affouillement

Une protection anti-affouillement conçus pour empêcher la propagation et la dégradation des lits des rivières, des ports et des embouchures océaniques, constituée d'une ou plusieurs couche(s) d'enrochement placée(s) devant un mur de haut de plage, une falaise ou une dune de sable. (Pirolley, A., & Bergeron, N., 2020).



Figure 5: Avant la construction de système de protection anti-affouillement.



Figure 6: Après la construction système de protection anti-affouillement.



Figure 7: Protection anti-affouillement d'un mur chasse-mer, Happisburgh, Royaume-Uni (blocs en enrochement naturel posés au pied d'un mur chasse-mer en béton).

I.8.1.1.3. Les ouvrages longitudinaux sur le front de mer

Les fronts de mer, appelés aussi protection de haut de plage, ont pour but essentiel d'assurer le « Blindage » (Fixer) le trait de côte afin de mettre hors d'atteinte de la mer les habitations ou les terrains situés en arrière proche (**Caminade, 1996**).

I.8.1.1.4. Brise-lames

Les brise-lames sont souvent émergents à la surface (au moins pendant la majeure partie du cycle de marée) et disposés approximativement parallèlement à la côte. Ils sont généralement constitués d'enrochements ou gros blocs de béton capables de résister aux attaques de la houle. Leur fonction est de réduire l'action de la houle au large avant qu'elles n'atteignent la terre et d'encourager la déposition de sédiments à l'arrière de l'ouvrage (**Arnaud, G., Rey, V., Touboul, J. and Sous, D., 2019**).



Figure 8: Brise-lame VALRAS PLAGE Dreal Occitani.

I.8.1.2. Les ouvrages de protection transversaux

I.8.1.2.1. EPI

Les épis sont des structures perpendiculaires en enrochement relativement court qui avance dans la mer depuis la plage et dont la fonction principale est d'interrompre le transit littoral de sédiments afin de constituer ou de retenir des plages à un niveau plus élevé. Les deux principales fonctions d'épis sont de préserver la plage naturelle ou de la rechargée à l'amont (**Leclerc, A.M., 2010**)

- Stopper le transport longitudinal pour éviter l'envasement de l'entrée d'un estuaire sous l'influence des marées ou de la passe d'un port.

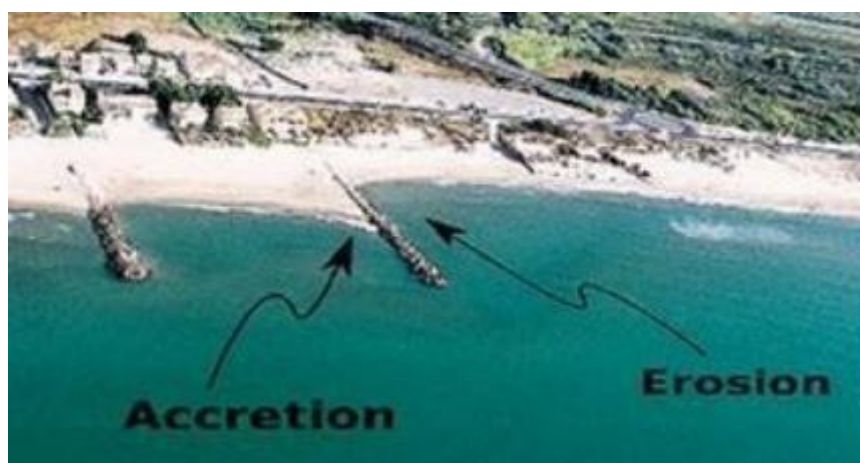


Figure 9: Une série d'épis en enrochement classique.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both ending in rounded, curled ends.

***Chapitre II : Présentation de la
zone d'étude***

II. Présentation de la zone d'étude

II.1. Introduction

Le littoral est une entité géographique qui appelle une politique spécifique d'aménagement, de protection et de mise en valeur ». C'est une zone de contact entre la terre et la mer qui constitue aujourd'hui un espace de plus en plus sollicité, ce qui accentue sa fragilité (Becet, 2002).

Dans ce chapitre, nous analyserons le climat des vents et des vagues au large dans notre zone d'étude « STORA –SKIKDA ». Ce qui est un point très important dans notre étude pour mieux comprendre notre zone.

II.2. Situation géographique



Figure 10: Une carte reliée à partir de Arc GIC (de la zone de Stora –Skikda).

II.2.1. La baie de Stora

Le golf de Skikda Ou de Stora est un golf méditerranéen s'étendant dans la wilaya de Skikda en Algérie entre le cap Bougaroun à l'ouest, et le cap de Fer à l'est.

La baie est limitée par l'îlot des singes à l'Ouest et la plage Beni mhidi à l'Est

II.3. Présentation de la zone

La zone d'étude se trouve 345 km à l'Est d'Alger a vol d'oiseau et à 3km à l'Ouest de la ville de Skikda. Elle est comprise entre 36°54'0'' N et 6°52'0'' (DMS)

La baie s'étend à une longueur de 2100m. Elle est limitée par :

- la mer Méditerranée, au nord ;
- la corniche de stora et montagne de Boulkeroud, au sud ;
- le port mixte, à l'Est ;
- le nouveau port de pêche, à l'ouest.

II.4. Géomorphologie

II.4.1. Caractéristique géomorphologique de la zone

La zone d'étude est composée des plages sous forme d'une bande étroite, ça largeur varie entre 10 et 20 mètre et d'une longueur de 2.1km.

La baie se trouve entre le port mixte et le port de stora, elle comprit 5 plages :

- Château vert
- La plage market
- La plage paradis
- La plage du port

II.4.2. Géologie régionale

Les terrains se sont constitués en majorité pas des formations Holocène, au sud les montagnes sont formées par des roches métamorphiques du socle.

II.5. Données climatique et hydrographique

Les données climatiques et météorologiques sont très importantes dans les travaux maritimes, certainement pour étudier le mouvement de la mer et la propagation de la houle qui sont en relation directe avec la vitesse du vent

III.5.1. Le Climat

Le climat de la zone est méditerranéen humide, avec une précipitation annuelle de 700 à 1100mm/an.

On distingue deux différentes périodes :

- Période hivernale : de température qui varient entre 11 et 16°C
- Période estivale : de température qui varient entre 14 et 28°C

II.5.2. La Pluviométrie

La station météorologique climato globale a enregistré de données de pluviométriques de la période de 1990 à 2020.

On distingue deux périodes d'après les diagrammes :

- Période hivernale : d'octobre à avril avec un maximum en janvier 1990
- Période sèche de juin juillet août
- La période de ces 20 ans montre une différence de précipitation de :
- La plus faible : 20 mm/an
- La plus importante : 250mm/an en janvier 1990

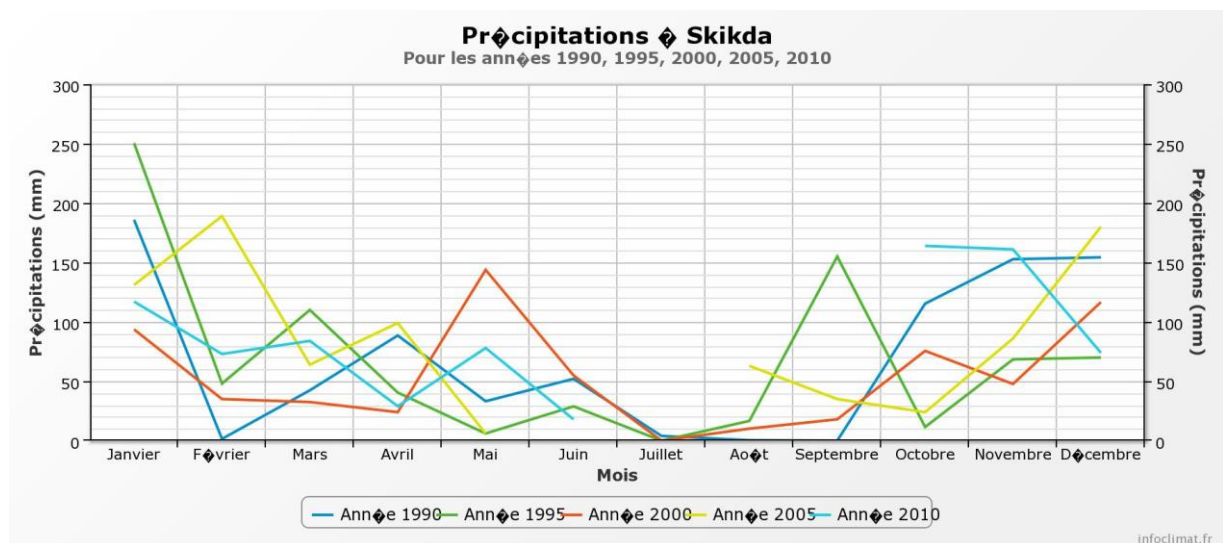


Figure 12: Précipitation de la zone de Skikda des années (1990-1995-2000-2005-2010)

II.5.3. Le vent

Les vents créent des vagues et des courants de surface. Plus le vent est fort, plus les vagues sont grosses et plus les courants sont rapides. Pour une vitesse et une direction de vents donnés, les vagues et les courants se produiront plus souvent à certains trimestres de l'année qu'à d'autres.

La rose montre les vents dominant pendant la période de 20 ans (1990 jusqu'à 2020)

Rose of Mean Speed (m/s) for Wind - Sl...

Period: 1990 - 2020 - Efficiency: 99.20%

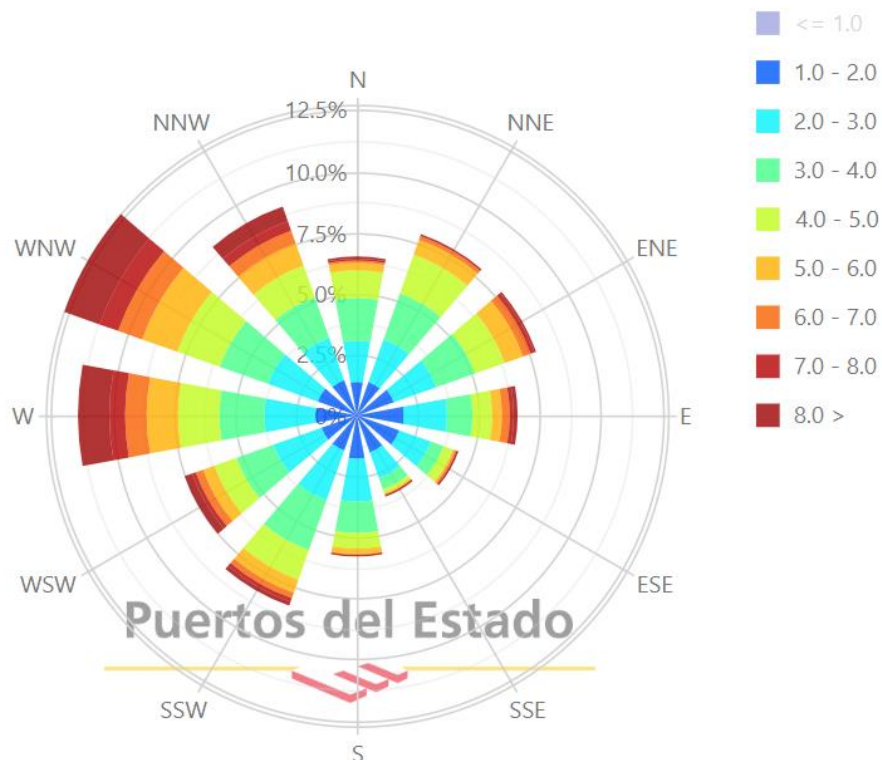


Figure 13: Rose de vent annuel (1990-2020)

On remarque qu'y a une variété dans la vitesse du vent et ça direction, on distingue selon la direction les valeurs supérieure à 8m/s

- WNW:12.5%
- W 10%
- NNW 8%
- SSW 8%

De l'analyse des roses de vent saisonnière et annuelle (**Figure12**), il ressort que trois secteur du vent qui existe dans cette zone :

- Le secteur OUEST à NORD OUEST
- Le secteur NORD à EST

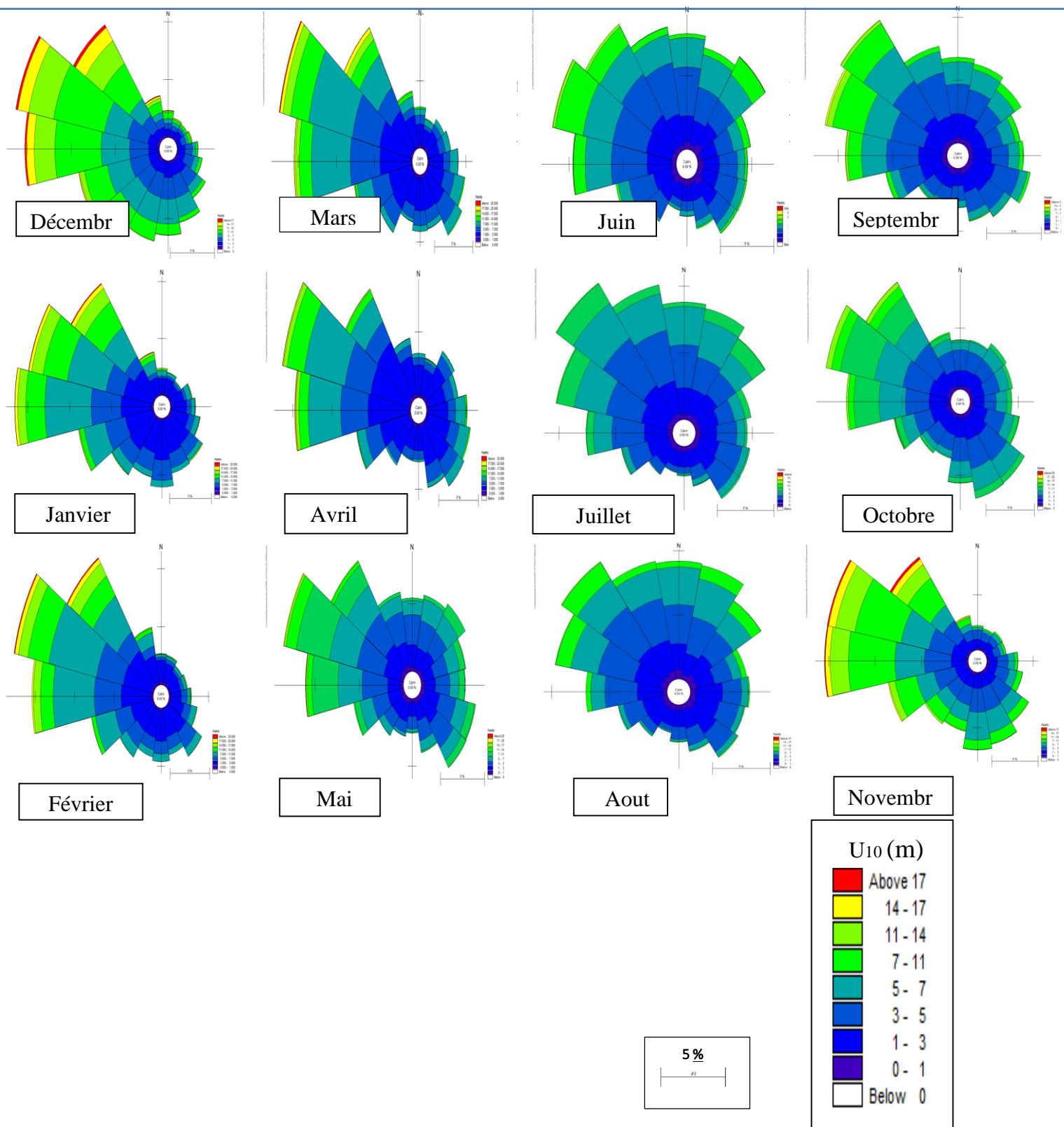


Figure 14: Roses du vent mensuel. Pour la période 1992 –2020 (INFO-PALZA)

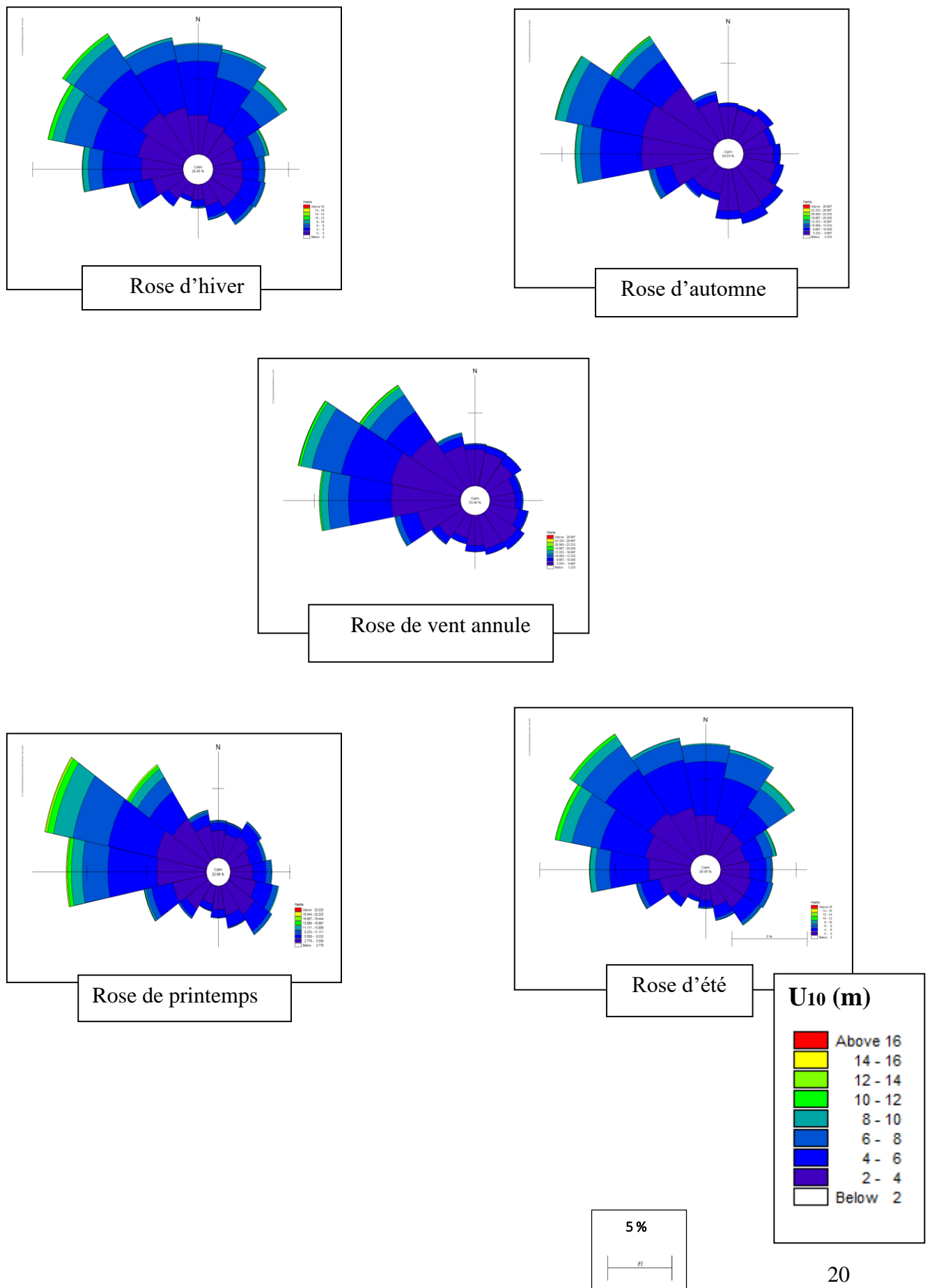


Figure 15: Roses annuelles et saisonnières de vent pour la période 1992 –2020 (INFO-PALZA)

II.6. Réseaux hydrographique

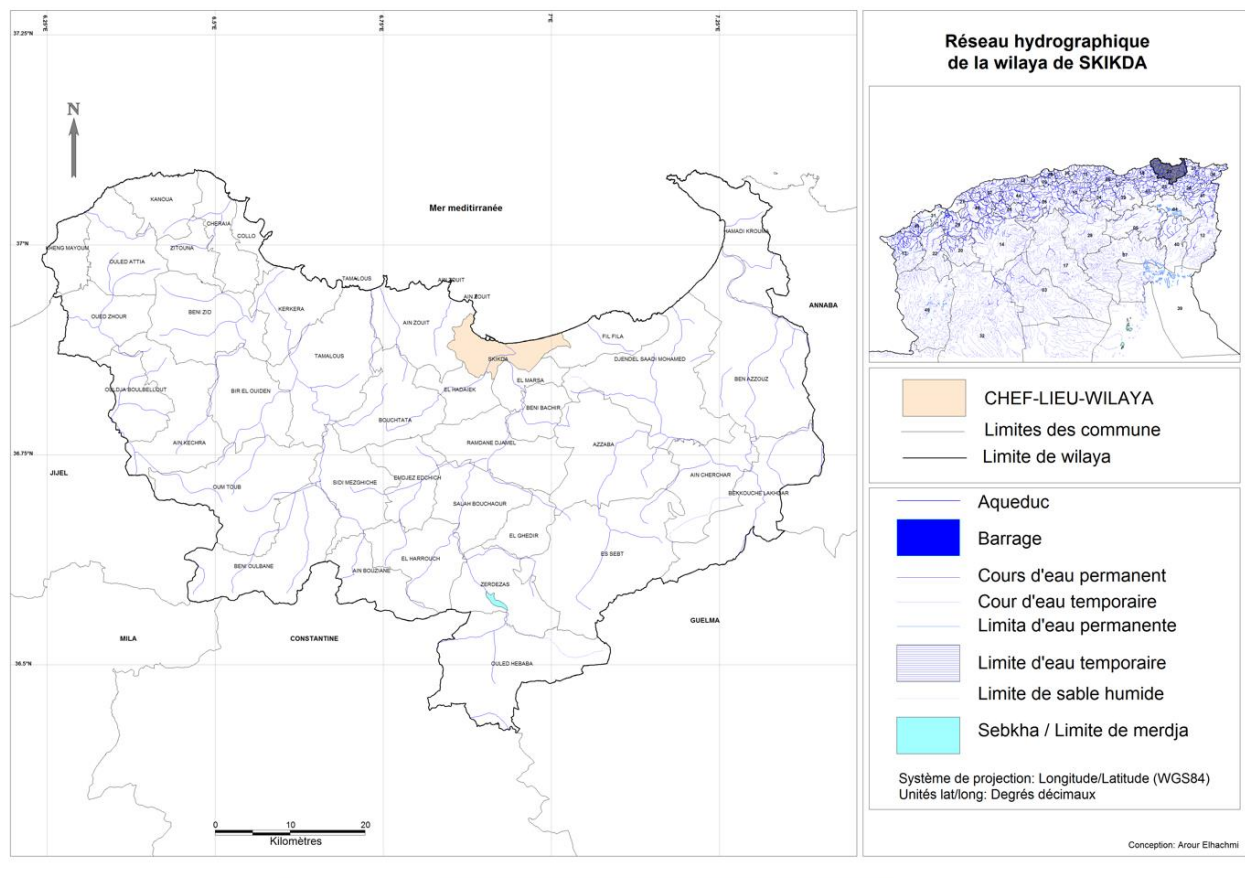


Figure 16 : Réseau hydrographique de la wilaya de Skikda

Oued El Kanara et Oued Saf Saf sont les plus proches de notre zone d'étude. Le premier est un petit ruisseau avec un débit négligeable et le second se situe entre l'ancien port et le nouveau port pétrolier. La distance qui les sépare est d'environ 1 km. L'oued Saf Saf est la principale source d'approvisionnement de la zone en matériaux meubles.

Le bassin versant du Saf-Saf, appartient au bassin côtier constantinois centre et se situe entre le bassin de l'oued Guebli à l'Ouest et celui de l'oued Kebir ouest à l'Est. Il est limité au Sud par Djebel El Hadjar et Djebel Oucheni, à l'Est par Djebel El Alia et Djebel Tengout, à l'Ouest par les massifs de Collo et Djebel Boukha louf, et la mer méditerranéenne au Nord où se déverse le principal cours d'eau de ce bassin à l'Est de la ville de Skikda, drainant une surface de 1158 km². Il se caractérise par sa présence dans la baie de Stora.

La houle peut avoir des impacts importants sur les activités humaines telles que la navigation, la pêche, le surf, la natation et le tourisme côtier. La prévision des vagues est donc souvent importante pour les marins, les surfeurs, les scientifiques et les autorités côtières.

La houle peut se mesurer à partir de l'élévation de la surface, avec : Des bouées houlographes, perches à houle, Radars à houle, à partir de la pression sous l'eau (marégraphes haute fréquence) ou des vitesses dans l'eau (courantomètres).

Les houles des secteurs **Est** et **Nord-Ouest** présentent sensiblement des Fréquences déférentes d'apparition avec une légère prédominance des houles du secteur **Nord-Ouest**.

Le traitement statistique des données d'observation des houles au large, nous a permet de déterminer les fréquences d'apparition des houles par direction et par période selon les rose des houles annuelle (**Figure 18**) et (**Figure19**).

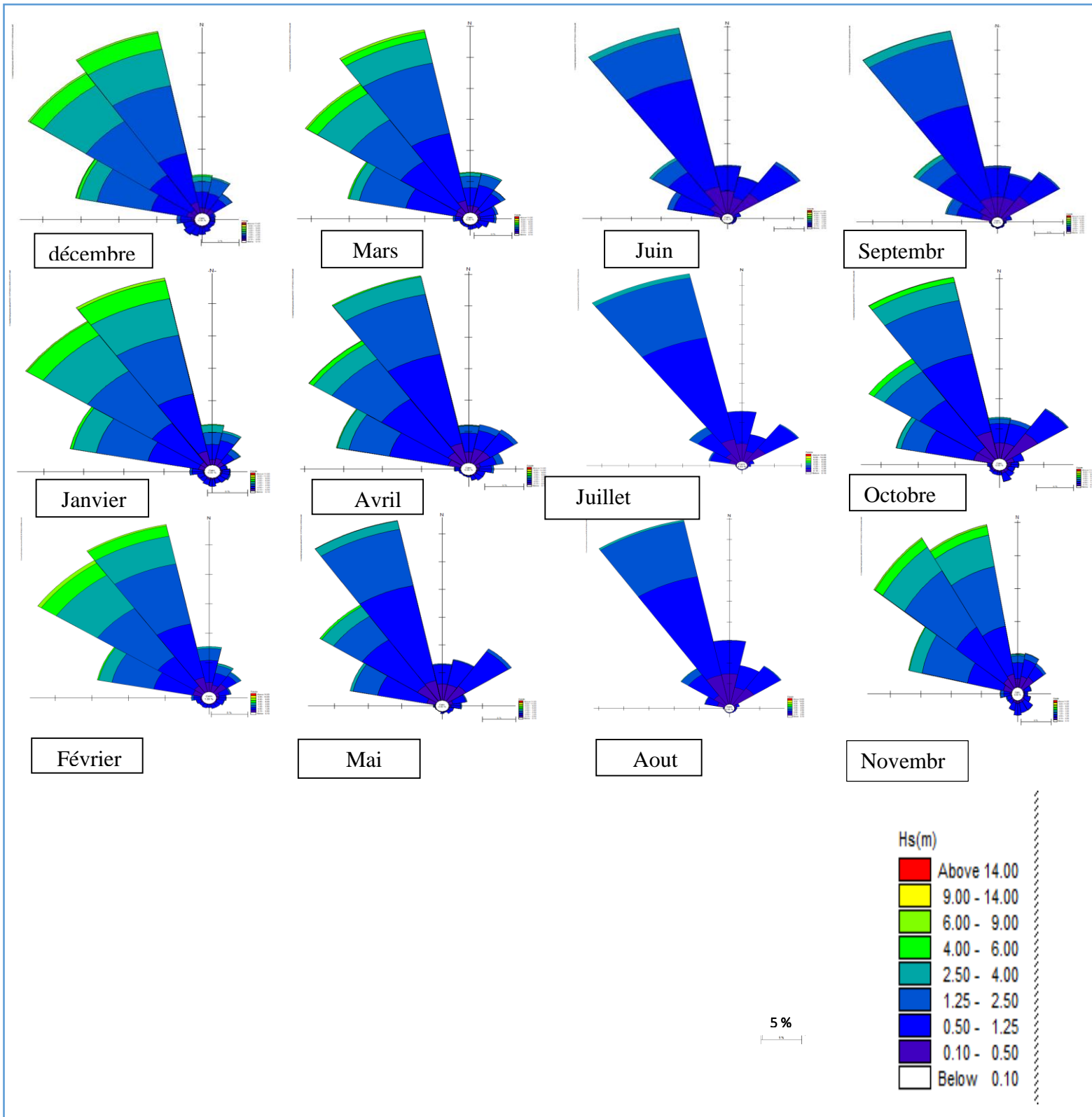
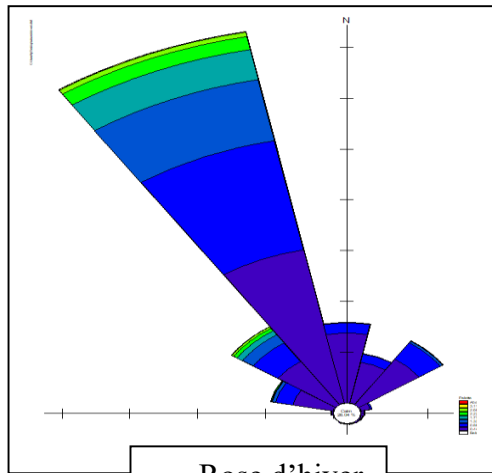
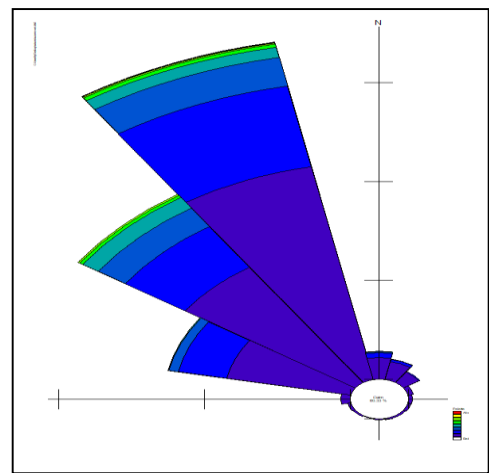


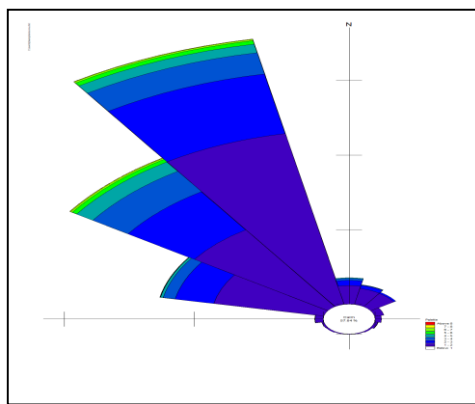
Figure 18: Roses des houles mensuelles pour la période 1992 –2020 (INFO-PALZA)



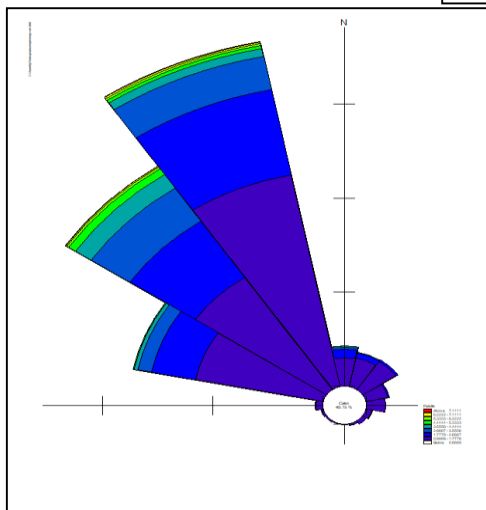
Rose d'hiver



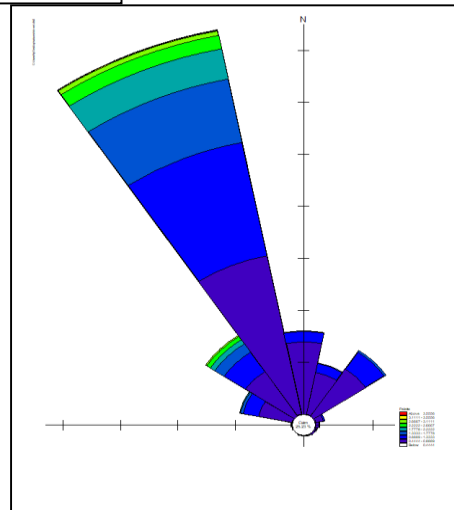
Rose d'automne



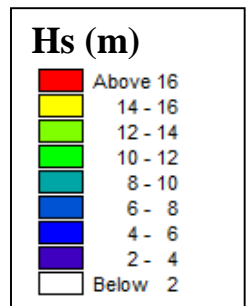
Rose de la houle annule



Rose de printemps



Rose d'été



5%
5%

Figure 19: Roses annuelle et saisonnières de la houle pour la période 1992 –2020 (INFO-PALZA)

Les statistiques des houles dans notre zone d'étude Stora, font apparaître deux régimes stables qui se divisent en deux périodes selon la direction :

- Régime de NORD NORD OUEST dans la période hivernale et estivale
- Régime d'OUEST a NORD NORD OUEST dans les deux saisons printemps et automne

D'après la rose annuelle qui englobe les statistiques saisonniers on distingue que notre zone d'étude se caractérise par une houle de secteur **NORD OUEST**

II.7.2. L'érosion

L'érosion est le processus par lequel les sols, les roches et d'autres matériaux sont détériorés, déplacés et transportés par des forces naturelles telles que l'eau, le vent, la glace et les vagues. L'érosion peut être causée par des phénomènes naturels tels que les précipitations, les inondations, les tempêtes, les glissements de terrain, les tremblements de terre et les éruptions volcaniques, mais peut également être causée par des activités humaines telles que l'exploitation minière, la déforestation, l'agriculture intensive et la construction de barrages (**Furon, R., 1948**).

L'érosion a des impacts négatifs sur l'environnement et les communautés locales, notamment la perte de terres agricoles, la dégradation des écosystèmes, la destruction des habitats des plantes et des animaux, la contamination des rivières et des eaux souterraines, un risque accru d'inondations et de glissements de terrain et une qualité de vie réduite pour les résidents locaux. Les mesures de contrôle de l'érosion comprennent la plantation d'arbres et d'autres cultures pour stabiliser le sol, la construction de barrages et de murs de soutènement pour retenir l'eau, et l'adoption de pratiques agricoles durables pour réduire l'érosion des sols.

II.7.2.1. Facteurs d'érosions

II.7.2.1.1. Facteurs anthropiques

➤ La réduction des apports solides des cours d'eau :

La réduction des apports solides est directement liée à l'implantation d'importants des ouvrages hydrauliques, comme :

- La construction des barrages réduit le volume de mobilisation à moins de 50 millions de m³/an.

- La mise en place des deux ports de part et d'autre de l'embouchure d'oued Saf-Saf qui a diminué les apports sédimentaires. Ceci est dû à l'interception des sédiments issus du bassin versant du Saf-Saf par ces deux ports. Ceci influe directement sur l'alimentation des plages limitrophes qui reçoivent moins de sédiments en apport.
 - **L'urbanisation du littoral sous forme de constructions :**
- Telles que les murs de protection, stations balnéaires, immeubles, promenades en bord de la mer et voies de communication. Ces infrastructures provoquent la réflexion de la houle et constituent un obstacle brutal au déferlement des vagues. L'énergie des vagues n'est plus dissipée le long des plages et le phénomène érosif est accentué.
 - **La construction d'ouvrages portuaires :**
- Ce type de construction est un barrage au transport des sédiments le long de la côte. Il peut entraîner de graves déficits sédimentaires sur les plages situées en aval de l'ouvrage, par rapport au sens de la dérive littorale (le port de pêche et le port mixte).

II.7.2.1.2. Facteurs naturels

➤ Glissement de terrains :

La façade maritime de Stora, a connu ces dernières années des glissements des terrains, due à la surcharge des constructions. Ces glissements ont provoqué la démolition des constructions et une paralysie dans la revalorisation de cet espace.

➤ Tempête :

Les houles, la marée, le vent, les tempêtes associées à des pleines mers de vive-eau ou à des surcotes météorologiques, attaquent les hauts de plage et peuvent emporter le cordon littoral et submerger l'arrière-plage.

II.7.3. Le transport sédimentaire

Le transport des sédiments est le mouvement des particules de sédiments (sable, gravier, argile, etc.) dans l'eau, l'air ou sur terre. Ce processus est affecté par une variété de facteurs, y compris les forces de l'eau et du vent, la pente du terrain, la taille des particules, la densité, la forme, la grossièreté et l'agglomération, et les caractéristiques environnementales (**Barbry, Nathaly, Sylvain Guillou, and Kim Dan Nguyen., 2000**).

II.7.3.1. Les transports sédimentaires par les courants et les houles

Les courants marins, d'origines diverses, ont une influence notable sur les processus sédimentaire. Les houles, par l'énergie qu'elles dissipent à l'approche de la côte et suivant l'obliquité de leur attaque vis à vis du rivage, provoquent soit des transits perpendiculaires, soit des transits parallèles à la plage. Si une alimentation ne vient pas compenser le transit littoral, celui-ci va, par des quantités importantes de matériaux mis en mouvement, entrainer un déficit sédimentaire et une érosion du littoral.

III.8. Conclusion

En résumé, l'analyse du climat des vagues et du vent effectuée pour la baie de Stora-Skikda fournit des informations précieuses aperçues des conditions environnementales de la région.

L'analyse du climat des vagues révèle des hauteurs de vagues dans la baie selon les résultats des roses des houles et qui montre les directions dominante des houles .la direction dominante est du secteur NORD OUEST avec les vents dominants du secteur OUEST NORD OUEST.

L'analyse du climat éolien montre que la vitesse du vent dans La baie du secteur WNW est supérieure à 8m/s. pour cela, comprendre les climats des vents et des vagues est essentiel pour concevoir une protection côtière efficace



***Chapitre III : Analyse des évènements
extrêmes***

III. Analyse des événements extrêmes

III.1. Introduction

Les zones côtières sont des zones exposées à des tempêtes avec des vagues extrêmes associées. Différents paramètres sont d'intérêt, mais dans cette étude, l'accent est mis sur les périodes de retour et leurs vagues extrêmes, qui sont importants dans la conception des structures de défense côtière telles que les digues et les brise-lames.

Ceci est fait afin de fournir une protection suffisante contre les inondations ou l'érosion à un niveau de retour associé à une période de retour particulière, par exemple 100 ans (**Thompson et al., 2009**).

Une conception insuffisante ou excessive peut entraîner des conséquences très risquées et même coûteuses au niveau des vies humaines et au niveau financier.

Pour cela, le fait d'appliquer des analyses statistiques des données de vagues mesurées d'une série temporelle sont donc nécessaires pour ces estimations.

Pour arriver à des résultats stables et pour éviter tous risques, nous avons choisi de travailler, dans ce chapitre avec la théorie des valeurs extrêmes

III.2. Analyse statistique des houles extrêmes au large de la baie de Skikda

III.2.1. Hauteur significative et période significative :

Pour cette représentation il faut d'abord classer les observations dans l'ordre décroissant et calculer la moyenne du tiers supérieur des observations, la notation est respectivement H_s et T_s ou bien $H_{1/3}$ et $T_{1/3}$. (**SPM, 1984**)

$$H_s = \frac{1}{N^{1/3}} \sum_{i=1}^{N^{1/3}} H_i \quad . \quad \text{Equation III-01}$$

III.3. Analyse des houles extrêmes

L'estimation des périodes de retour des événements extrêmes a été effectuée à l'aide du langage **GOOGLE COLAB**, ce dernier met en œuvre une méthode des « pics de tempêtes franchissant un seuil »

Pour cela Il existe plusieurs approches pour calculer la houle extrême, à chaque augmentation de la taille de l'échantillon, la précision augmente pour le dimensionnement des ouvrages. L'approche peut avoir l'aspect suivant :

- Faire plusieurs enregistrements de tempête pendant une année. (Minimum 10 enregistrement)
- Répéter l'opération pendant plusieurs années ; Dans ce le cas étudier on a fait l'opération pendant 30ans (1992/01/01 jusqu'à 2020/12/31) géré avec une cadence horaire (toutes les trois heures)
- Dépouillement des enregistrements et le calcul des hauteurs caractéristique (Hs, Ts, H1/10...etc.). Une fois la base les données des mesures brutes de la houle acquise il est possible de choisir une méthode d'échantillonnage tel que :

• **La méthode des maximas annuels** : Le principe c'est de déterminer le seuil maximal pour chaque année pendant plusieurs années. (Tioguin I, & Delcaillau D., 2018)

• **La méthode du peak-over thrershold (POT)** : POT consiste à fixer un seuil et prendre toute la valeur supérieure à ce seuil. Cette méthode est plus avantagee car elle augmente le nombre de l'échantillon N et donnera un résultat plus précis.

III.3.1. La Méthode série des blocks maxima

Aussi Appelé maxima annuel, cette méthode consiste à prendre pour chaque année le maximum annuel, assure de manière quasiment automatique l'indépendance (Tioguin I, & Delcaillau D., 2018).

D'abord on dispose de n observations (x_1, \dots, x_n), on commence par regrouper les données en k blocs de longueur l et on calcule le maximum sur chaque bloc

On approche ensuite la loi de la variable aléatoire mi 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.

III.3.1.1. La loi de la valeur extrême généralisée

$$F(x; x_0, \alpha, k) = \exp \left[- \left(1 + k \left(\frac{x - x_0}{\alpha} \right)^{\frac{1}{k}} \right) \right] ; (1 + k(x - x_0)/\alpha) > 0 \quad \text{Equation III-02}$$

Cette loi elle suit l'échantillon maxima annuel ; cette loi a 3 paramètres :

- x_0 : le paramètre de position (location en anglais).
- α : le paramètre de dispersion (scale en anglais).
- k : le paramètre de forme (shape en anglais).

On définit trois types de lois GEV (**Kouassi A, et al, 2018**) :

- $k = 0$, loi à queue légère (ou distribution de Gumbel)
- $k < 0$, loi à queue lourde (ou distribution de Fréchet)
- $k > 0$, loi à queue bornée (ou distribution de Weibull).

Dans notre cas deux méthodes de distribution de GEV (Generalized Extreme Value) : Gumbel et Weibull) seront utilisées pour l'estimation des périodes de retour dans le domaine du génie côtier.

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

Tout d'abord, le bloc de données a été divisé en périodes annuelles (représentées par des lignes en pointillés) afin de pouvoir prendre le maximum de chaque année individuellement

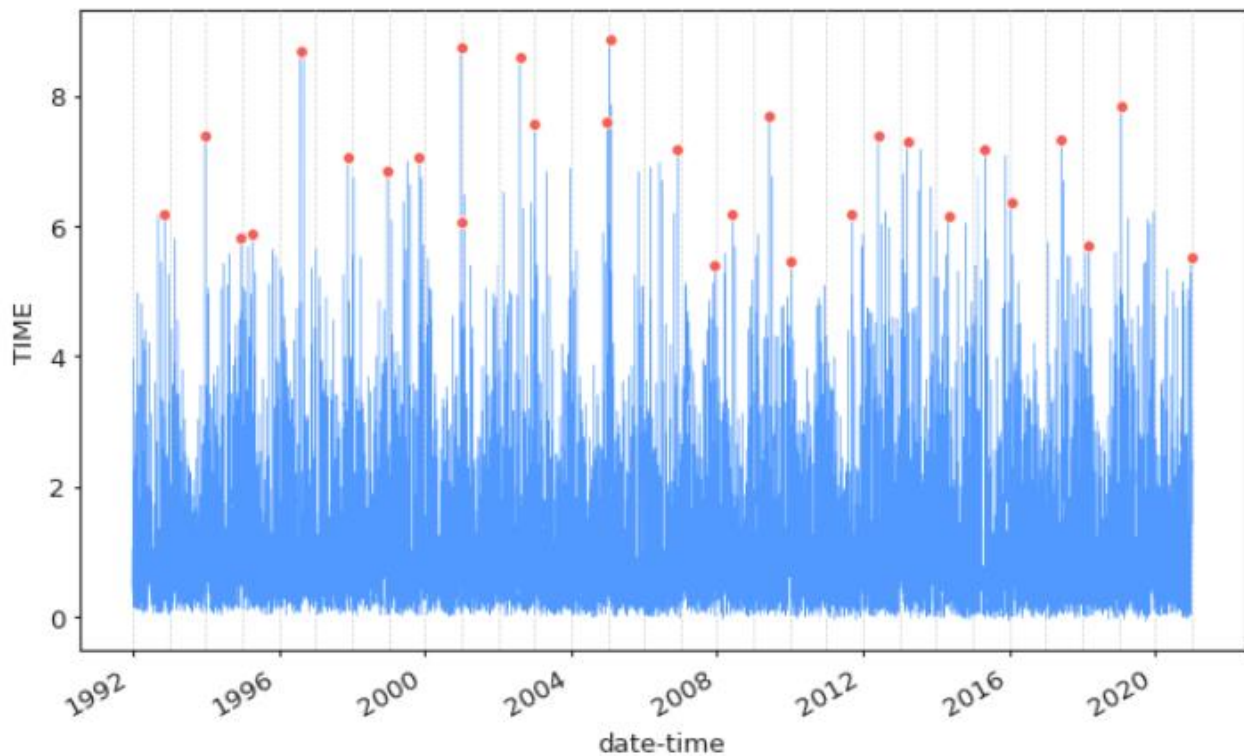


Figure 20: Représentation de méthode des Blocs Maximas sur les hauteurs de houle de 1992– 2020.

Après avoir sélectionné les maximums pour chaque année, nous passons directement au calcul des hauteurs de houle correspondant à chaque période de retour.

III.3.1.2. Résultats GEV avec la distribution de Gumbel

Aussi appelé Fisher Tippett type I (FT I), cette loi fait partie de la loi GEV

Le graphe (**Figure 20**) présente les résultats, avec des traits bleus indiquant les limites de l'erreur acceptée pour une précision de 15%. Les croix rouges représentent les valeurs des hauteurs de houle correspondant aux périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 250, 500 et 1000 ans.

Les résultats obtenus par la méthode GEV selon la distribution de Gumbel :

Tableau 1: Valeur des quantiles pour plusieurs périodes de retour.

Période de retour	Valeur de retour	Plus petites valeurs	Plus grandes valeurs
2	6,99	6,89	7,02
5	8,01	7,85	8,37
10	8,37	8,29	8,39
20	8,63	8,59	8,66
30	8,73	8,70	8,77
50	8,83	8,82	8,87
100	8,92	8,90	8,95
250	9,00	8,95	9,04
500	9,03	8,99	9,09
1000	9,06	9,01	9,12

Le **tableau 1** montre les valeurs des quantiles pour les périodes de retour de 2 ans jusqu'à 1000, et indique la valeur maximale et minimale de chaque période avec sa période de retour

On remarque que la plus grande valeur de retour est 9.06 m avec une houle maximale de 9,12 qui appartient de la période de retour de 1000 ans.

Les résultats du **tableau 1** sont présentés sous forme d'un graphique pour une lecture plus précise (**Figure 21**).

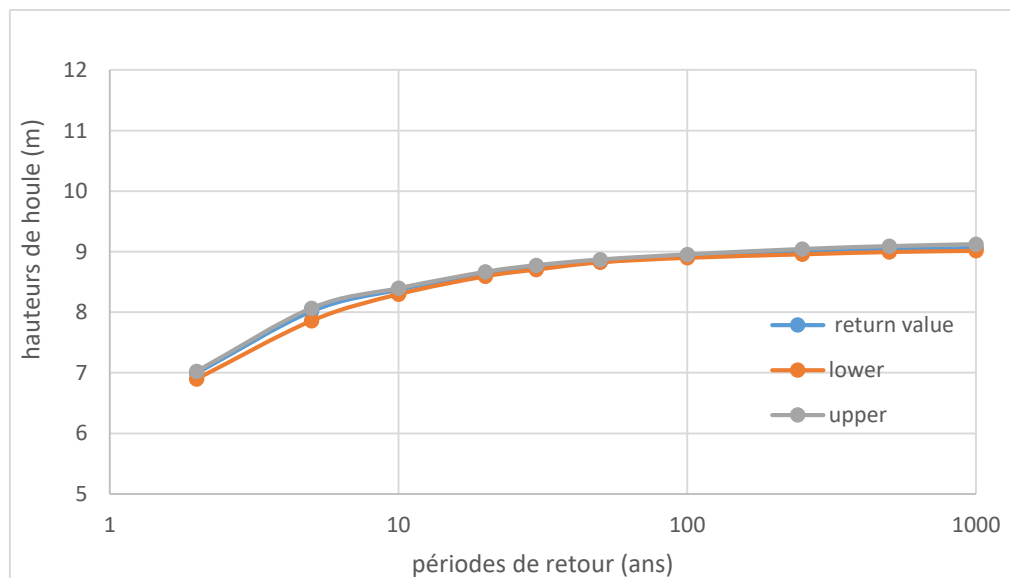


Figure 21: Estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour l'omnidirectionnel.

III.3.1.3. Résultats GEV avec la distribution de Weibull

Tableau 2: Valeur des quantiles pour plusieurs périodes de retour Weibull.

Periode de retour	Valeurs de routeur	Plus petites valeurs	Plus grandes valeurs
2	6,74	6,36	7,31
5	7,75	7,41	8,18
10	8,37	7,87	8,97
20	8,92	8,21	9,13
30	9,21	8,38	9,82
50	9,57	8,59	10,69
100	10,02	8,84	10,89
500	10,99	9,29	11,72
1000	11,37	9,43	11,95

Le **tableau 2** montre les résultats qu'on a obtenue à partir de la méthode Weibull, il présente les périodes de retours de 2 ans a 1000 ans, et chaque période avec la plus grande valeur du H_s et la plus petite .les valeurs sont présenter sur forme de graphe (**Figure 22**)

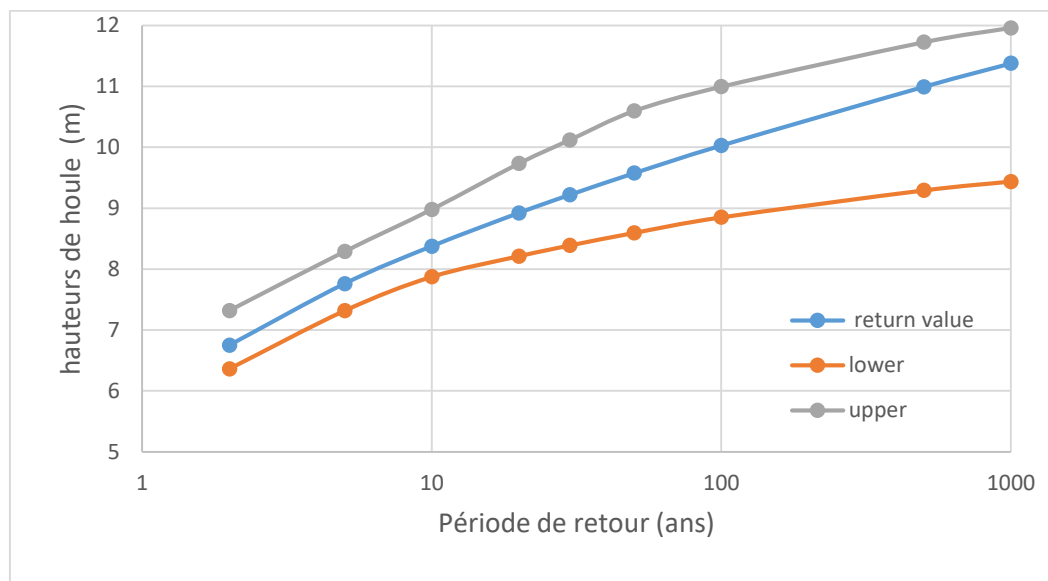


Figure 22: Estimation des événements extrêmes via la distribution de pour Weibull l'omnidirectionnel.

III.3.2. La méthode Peaks Over Threshold (POT)

D'après (Kh. Tilbi., 2018), cette méthode est basée sur l'approximation de la distribution des excès pour la loi de Pareto généralisée. De plus elle présente un avantage par rapport à la méthode des blocs, en ce sens qu'il est plus facile d'avoir un échantillon d'excès que de max.

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

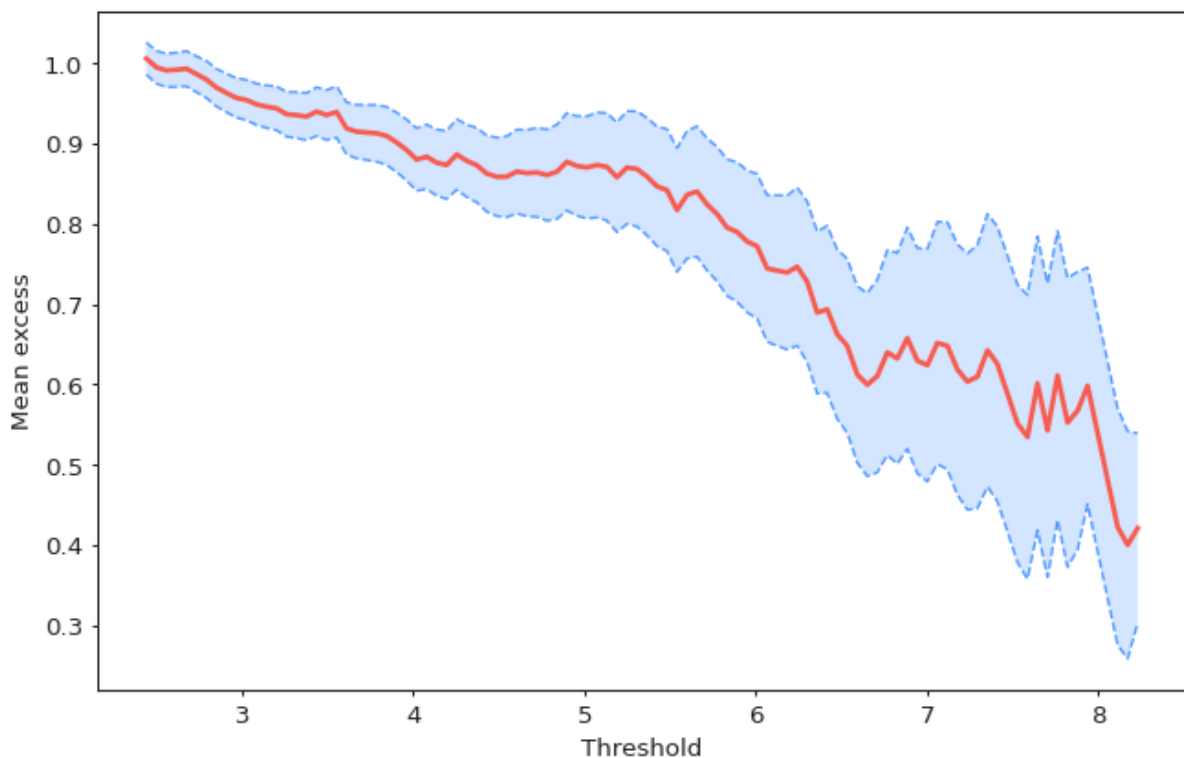


Figure 23: Moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelle de l'enregistrement.

Dans notre cas, on projette de fixer deux seuil omnidirectionnel $H_s = 3.5$ m et $H_s = 4$ m, ce seuil correspond mieux à la distribution des valeurs en fonction des périodes de retour avec une correspondance graphique de la courbe logarithmique, au-delà de ce seuil, les pics des H_s sont considérés comme des valeurs qui caractérisent les événements extrêmes.

III.3.2.1. Méthode POT « seuil Hs = 3.5 m » (1992-2020)

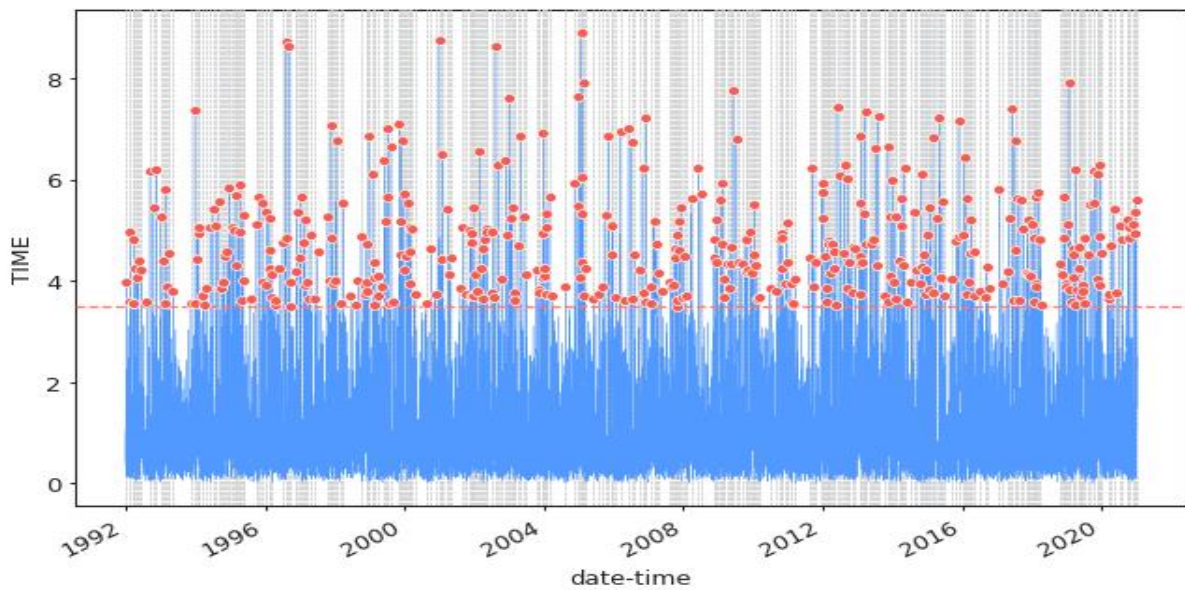


Figure 24: Valeurs des hauteurs significatives maximales avec la méthode POT seuil Hs = 3.5 m.

Tableau 3: Résumant le résultat obtenu par la méthode POT « seuil Hs = 3.5 m ».

Période de retour	Valeur de retour	plus petites valeurs	Plus grandes valeurs
2	7,29	7,26	7,31
5	7,94	7,90	7,96
10	8,36	8,31	8,38
20	8,72	8,66	8,76
30	8,91	8,85	8,95
50	9,13	9,06	9,18
100	9,39	9,31	9,44
500	9,88	9,79	9,95
1000	10,05	9,95	10,12

Le **tableau 3** présent chaque période de retour avec sa valeur de retour de la valeur maximale et minimale de chaque période.

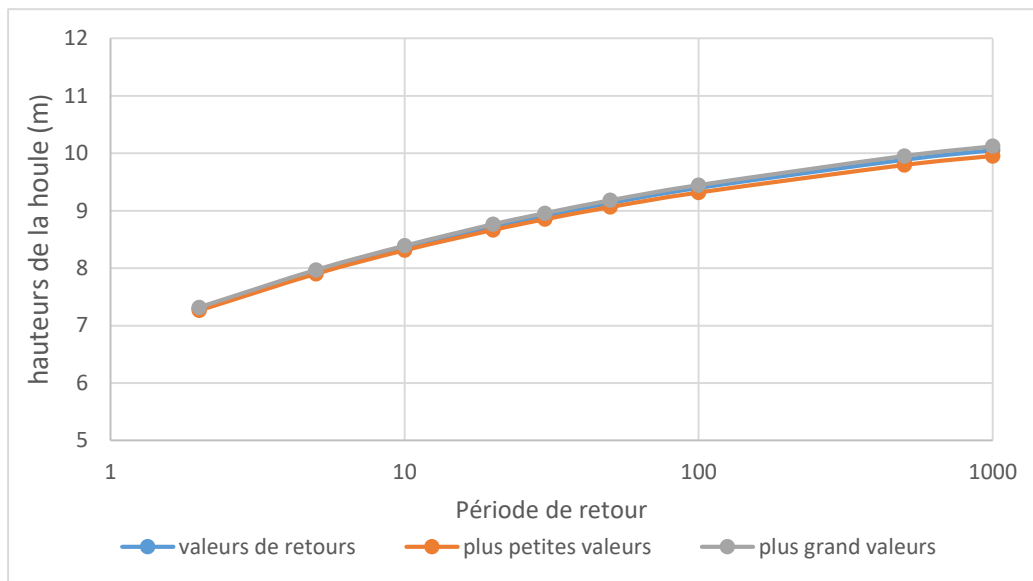


Figure 25: Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour omnidirectionnelle seuils $H_s = 3.5$ m.

III.3.2.2. Méthode POT « seuil $H_s = 4$ m » (1992-2020)

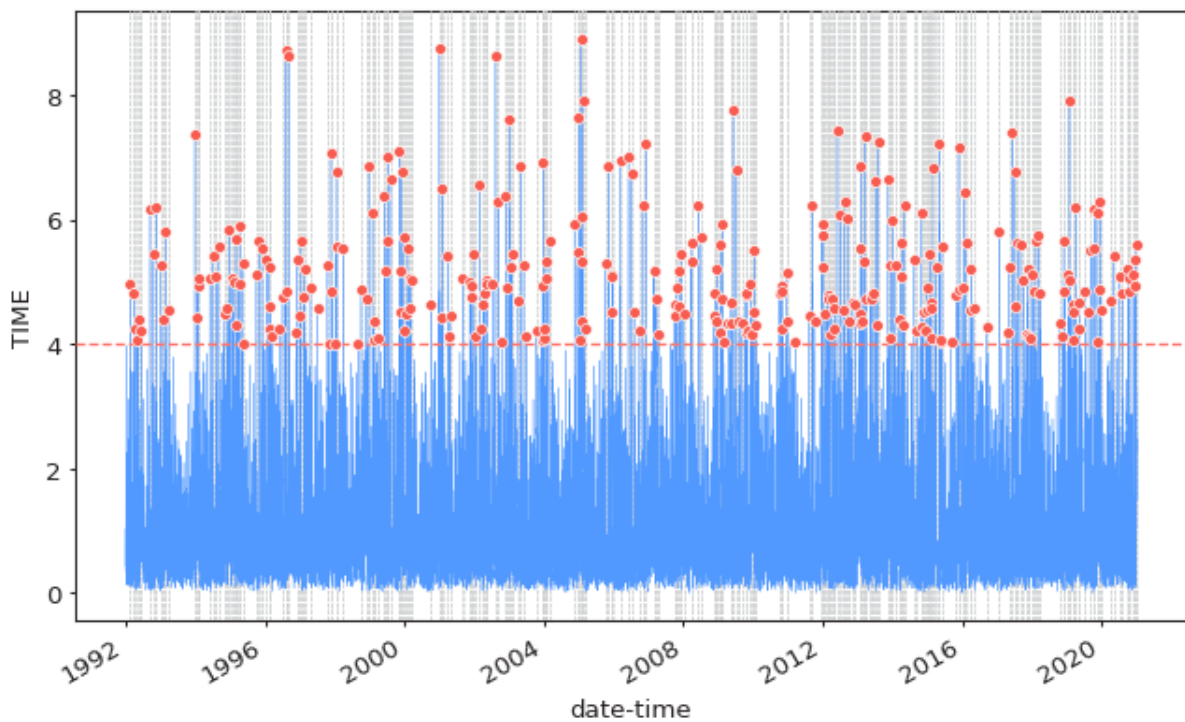


Figure 26: Représentation de méthode POT sur les hauteurs de houle de 1992 – 2020 seuils $H_s = 4$ m.

Après avoir la représentation de méthodes POT sur les hauteurs des houles (1992-2020) avec un seuil de $H_s = 4$ m, on obtient les résultats sous forme de graphe (**Figure 27**) et (**Tableau 4**) qui présente les périodes de retours et ces valeurs maximales et minimales.

Tableau 4: Résumant le résultat obtenu par la méthode POT « seuil $H_s = 4$ m ».

Période de retour	Valeur de retour	Plus petites valeurs	Plus grandes valeurs
2.0	7.30	7.27	7.33
5.0	7.93	7.90	7.96
10.0	8.33	8.29	8.36
20.0	8.67	8.62	8.71
30.0	8.85	8.79	8.89
50.0	9.05	8.99	9.10
100.0	9.29	9.23	9.34
500.0	9.73	9.64	9.80
1000.0	9.88	9.78	9.95

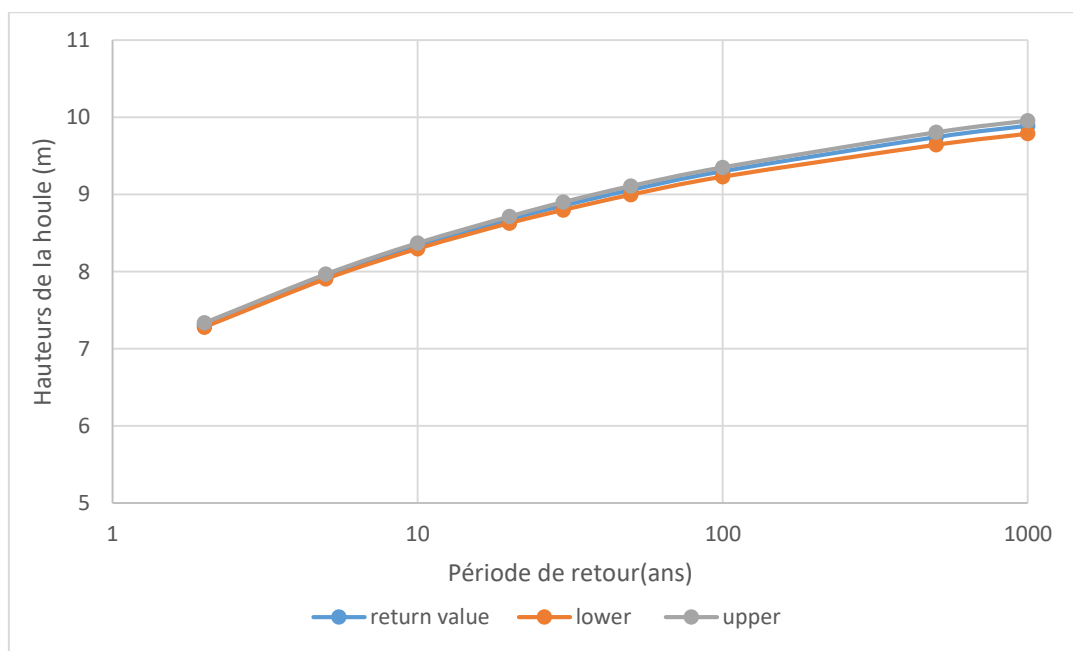


Figure 27: Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour le seuil = 4m.

III.3.3. Comparaison entre les méthodes POT et Blocs Maximas (GEV distribution)

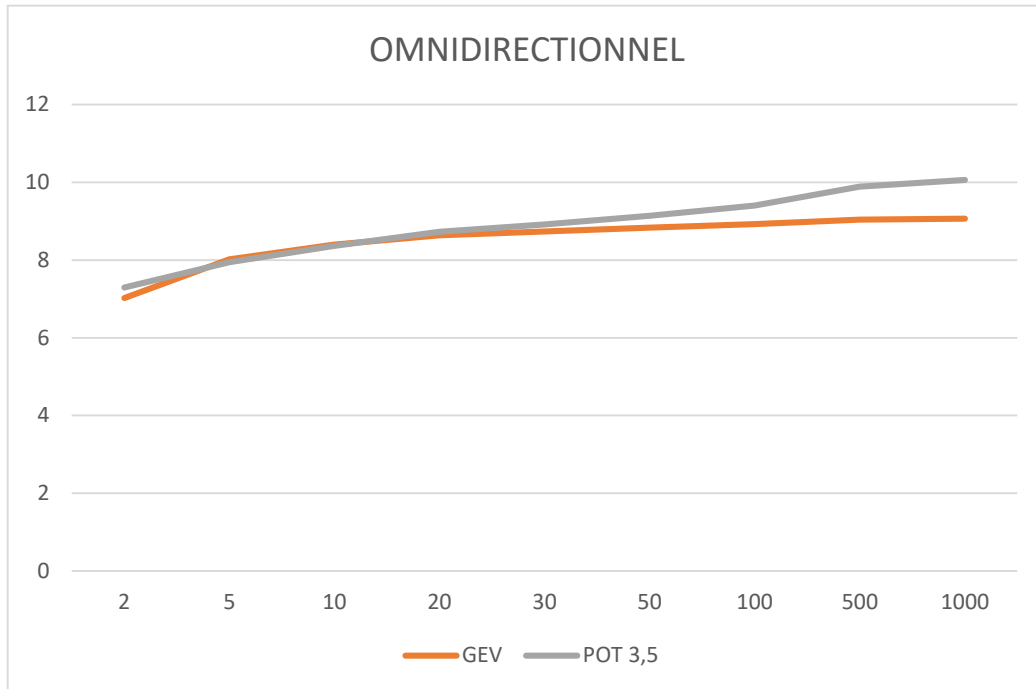


Figure 28: Comparaison des résultats obtenus avec les deux méthodes POT et GEV.

On constate que les deux méthodes ont presque les mêmes résultats à quelques dizaines de cm près. Aussi, on peut voir que la méthode GEV propose des valeurs supérieures à la méthode POT pour l'ensemble des périodes de retour dépassant les 10 ans. Par contre l'inverse c'est produit pour les petites périodes de retour où la méthode POT propose des valeurs supérieures à GEV. Cela s'explique par le peu de données prise en compte avec la méthode blocks maxima et de leur grandeur relative (le maximum de chaque année).

Pour la suite de notre travail, nous allons continuer avec les résultats de la méthode POT « seuil $H_s = 3.5$ m »; elle prend en considération plus de points par rapport à la méthode GEV qui est limitée par un seul point par bloc (année) même d'autres points extrêmes subsistent elle on prend que le maximum.

III.4. Conclusion

L'analyse des événements extrêmes nous a permis de comprendre la probabilité de phénomènes marins rares et créer des modèles qui représentent leurs distributions de probabilité.

Cette connaissance est cruciale pour concevoir des structures de défense côtière fiables et atténuer l'impact de ces événements. Néanmoins, il est impératif d'améliorer les techniques d'estimation et de modélisation pour améliorer notre capacité à mieux prévoir les risques liés aux événements extrêmes.



***CHAPITRE IV : Modélisation
numérique***

IV. Modélisation numérique

IV.1. Introduction

Pour modéliser les processus physiques dans les zones marines, côtières et estuariennes, une gamme d'outils de modélisation numérique des options logicielles existent. Ces modèles ont été développés par des universités, des instituts de recherche, et des entreprises privées. Certains modèles ont été commercialisés, d'autres sont principalement destinés à des fins de recherche universitaire (Symonds et al., 2017). Le modèle DHI Mike 21 a été choisi pour la simulation des vagues dans notre étude.

IV.2. Présentation du modèle

Mike 21 DHI développé par l'institut hydraulique Danois est un modèle de houle spectrale basé sur la conservation de la densité de l'action d'onde qui permet de simuler la propagation des états de mer dans les domaines offshore et côtier. Le modèle inclus les effets de la réfraction et de Shoaling liés aux variations bathymétriques, 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'éléments triangulaire dans le plan horizontal. Ces éléments peuvent être affinés dans les zones d'études et les zones d'intérêt particulier (DHI, 2014). Afin de pouvoir commencer les simulations, la génération d'une mesh est indispensable. Pour la création des mesh, on a utilisé l'outil (Mesh Generator) du logiciel Mike-zéro.

IV.2.1. MESH GENERATOR

Fournit un environnement de travail, conçu pour créer des maillages numériques à utiliser dans les modèles MIKE Zéro à maillage flexible (FM) et fixe, toutefois ce dernier permis l'imbrication de plusieurs maillages au sur la même mesh. Doter de ces modèles de nouvelle génération d'un maillage adapté est primordial pour obtenir des résultats fiables à partir des simulations du Mike. Les méthodes d'interpolation sont valables indépendamment du type de maillage utilisé. Le générateur de maillage offre deux possibilités d'interpolation pour les éléments triangulaires. Les deux méthodes d'interpolation possibles sont : voisin naturel et l'interpolation linéaire (DHI, 2014).

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

- Système de projection adapté à la zone d'étude, dans notre cas c'est le 'WGS_84_UTM_ZONE_32'.

- Le trait de côte et la bathymétrie de la zone préalablement enregistrée dans un fichier Xyz.
- Un maillage de différente taille de maille et nécessaire pour avoir de bons résultats et diminuer les temps de calculs du logiciel

IV.2.2. MIKE SW

MIKE SW est un logiciel de modélisation numérique avancé spécialement conçu pour simuler les propagations des ondes dans les milieux peu profonds. En incorporant divers phénomènes physiques, y compris la réfraction des vagues, le shoaling, la génération de vagues générées par le vent, la dissipation par frottement, déferlement et interaction vague-courant, le logiciel fournit des prédictions précises caractéristiques de la vague. Avec sa grille en maille souple non structurée, MIKE 21 SW offre un calcul et prend en compte les dissipations dues au déferlement des vagues et aux interactions non linéaires. Le modèle nécessite généralement les entrées suivantes :

- **Bathymétrie numérisée** : paramètres de modèle essentiels qui décrivent la portée du modèle, tels que les dimensions de la zone modélisée, l'espacement de la grille sur la grille de calcul, time steps (7s) et la durée de la simulation.
- **Conditions aux limites** : Le modèle nécessite une formulation spectrale comme condition initiale, ainsi que des paramètres de vagues spécifiques (Hauteur significative des vagues H_s), temps de peak (T_p), direction des vagues et propagation directionnelle) qui doivent être fournies pour tous les frontières.

IV.2.2.1. Equations en eaux profondes

La modélisation numérique à l'aide de ce modèle compte sur les équations tridimensionnel les incompressibles de Reynolds moyennées de Navier-Stokes, sous les hypothèses de Boussinesq et de pression hydrostatique. L'équation de continuité locale se présente sous la forme suivante :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad \text{Equation IV- 01}$$

Et les deux équations de moment horizontales pour les composantes x et y peuvent être exprimées comme suit :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial \eta p}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p_a}{\partial x} -$$

$$\frac{g}{\rho_o} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_o h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S$$

Equation IV- 02

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p_a}{\partial y} -$$

$$\frac{g}{\rho_o} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_o h} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S$$

Equation IV- 03

IV.2.2.2.1. Paramètres des équations

Tableau 5: Symboles et signification des paramètres des équations d’eaux profondes.

SYMBOL	SIGNIFICATION	SYMBOL	SIGNIFICATION
T	le temps	Pa	la pression atmosphérique
x,y,z	ordinales cartésiennes	ρ 0	la densité de référence de l'eau
H	l'élévation de la surface	S	l'amplitude du débit dû aux sources ponctuelles
D	la profondeur d'eau	(us, vs)	la vitesse de le rajout de l'eau dans l'ambiante
h=η+d	la profondeur d'eau totale	ρ	la densité
u.v et w	la vitesse composante dans les directions x, y et z	Sxx, Sxy, Syx et Syy	des composantes du tenseur radial.
f=2Ω sinΦ	le paramètre de Coriolis	vt	la viscosité verticale turbulente
G	l'accélération de gravité	A	la viscosité horizontale
τsx, τsy	x et y sont des contraintes de vent de surface	τbx, τby	x et y sont des contraintes de vent de fond

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

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

Equation IV- 04

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad \text{Equation IV- 05}$$

Les conditions des limites de surface u, v et w se présentent comme suit :

$$A z = \eta$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_o v_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad \text{Equation IV- 06}$$

$$A z = -d$$

$$u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_o v_t} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad \text{Equation IV- 07}$$

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

L'équation dominante est l'équation d'équilibre de l'action des vagues intégrée dans des coordonnées cartésiennes ou sphériques.

IV.2.3. MIKE HD

MIKE HD est un modèle hydrodynamique avancé qui permet aux utilisateurs de définir les conditions hydrographiques aux limites, intègrent la résistance du fond marin et le forçage du vent, et accueillir diverses sources, puits et structures.

Le modèle traite le frottement sur le fond, l'effet des événements météorologiques (vents et pression atmosphérique), et la force de Coriolis, etc.... Il nous permet de simuler les 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 (**Labdi, A., et Mandi, K. 2021**).

IV.3. METHODE DE TRAVAIL

IV.3.1. Création de la bathymétrie

IV.3.1.1. Acquisition des données

IV.3.1.1.1. Arc GIS

Arc GIS est un logiciel permettant de traiter des informations géographiques, il s'agit d'un système qui sert à collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser ces informations géographiques. Dans ce chapitre, on va utiliser Arc gis 10.4.1.

Les données bathymétriques utilisées dans ce travail sont obtenues à partir d'une digitalisation des cartes bathymétriques de la base de données de Navionics à l'aide du logiciel Arc Gis (au large) et des enregistrements des hauteurs des houles de la zone fine Stora (**Source: LEM**) L'erreur altimétrique est de l'ordre centimétrique et est de 10 m dans le positionnement (**Source : navionics**).

Tableau 6: Caractéristiques des données utilisées dans l'étude.

Donnée	Système de coordonnées	Source	Année	Résolution (m)	Moyens utilisés
Bathymétrie	WGS 1984 UTM 32	Navionics	2023	$[(-0,5) \sim (-30)] = 0,5$ $[(-30) \sim (-52)] = 1$ Plus $(-52) = 10$	Arc GIS 10.4.1
Trait de cote		Google earth	2023	0.5	Arc GIS 10.4.1

Le **tableau 6** résume les données utilisées dans ce traitement, provenant de différentes sources et présentant des résolutions spatiales variées

IV.3.1.1.2. Prétraitement des données

Le schéma (**Figure 29**), représente les étapes de traitement numérique des données topo-bathymétriques l'aide du logiciel de Systèmes d'Informations Géographiques Arc GIS 10.4.1 :

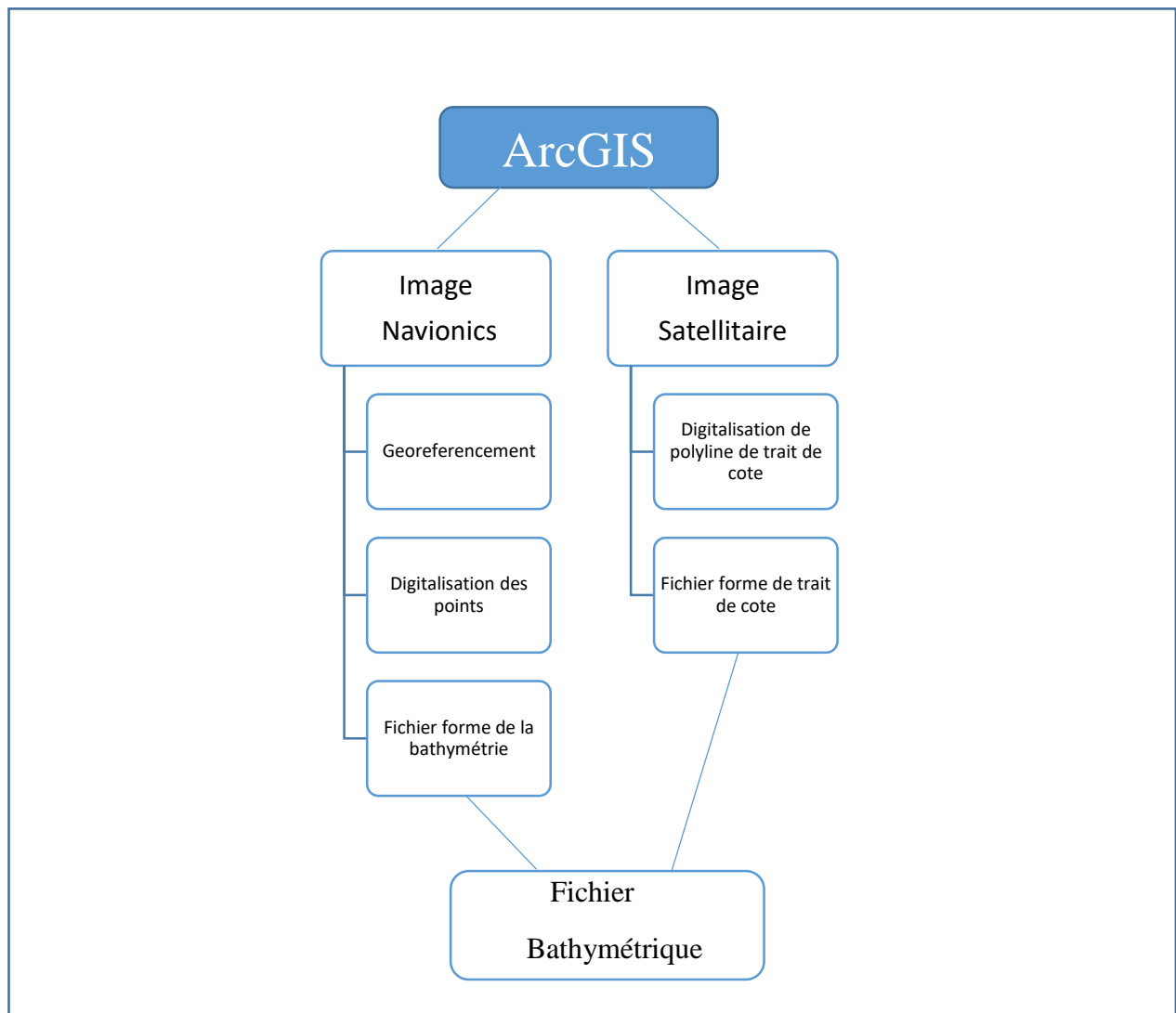


Figure 29:Etapes de réalisation d'un fichier bathymétrie.

Le résultat de ce prétraitement est un fichier forme tridimensionnels (X, Y, Z).

IV.3.1.2. La bathymétrie

La bathymétrie est la mesure et la cartographie des profondeurs en eau. Elle nous permet d'étudier la topographie sous-marine, et visualiser le comportement des houles en surface, car elle a une influence importante dans la détermination de la morphologie sous-marine et sur la propagation des vagues du large vers le littoral.

Les données bathymétriques représentent une information primordiale de la topographie et de la bathymétrie dans la zone d'étude pour la compréhension des phénomènes hydrodynamique

En utilisant des maillages imbriqués (**Figure29**), nous pouvons modéliser avec précision le comportement des vagues ainsi que d'autres phénomènes liés à l'eau dans la zone de Stora et créer une carte bathymétrique (**Figure30**).

IV.3.1.2.1. Création du fichier mesh

A l'aide du module "Mesh Generator", vous pouvez obtenir une démo détaillée de bathymétrie numérique 2D, il fournit également l'utilitaire pour importer des données côtières et des points bathymétriques dans le système de coordonnées WGS84 avec projection UTM zone 32, le maillage est composé d'éléments triangulaires sa taille s'ajuste automatiquement d'une zone à l'autre (le maillage réduit sa taille lorsque la côte est atteinte). Un autre maillage a été réalisé au niveau de la zone d'étude pour réduire la taille de la triangulation afin d'obtenir plus d'informations sur la propagation de la houle

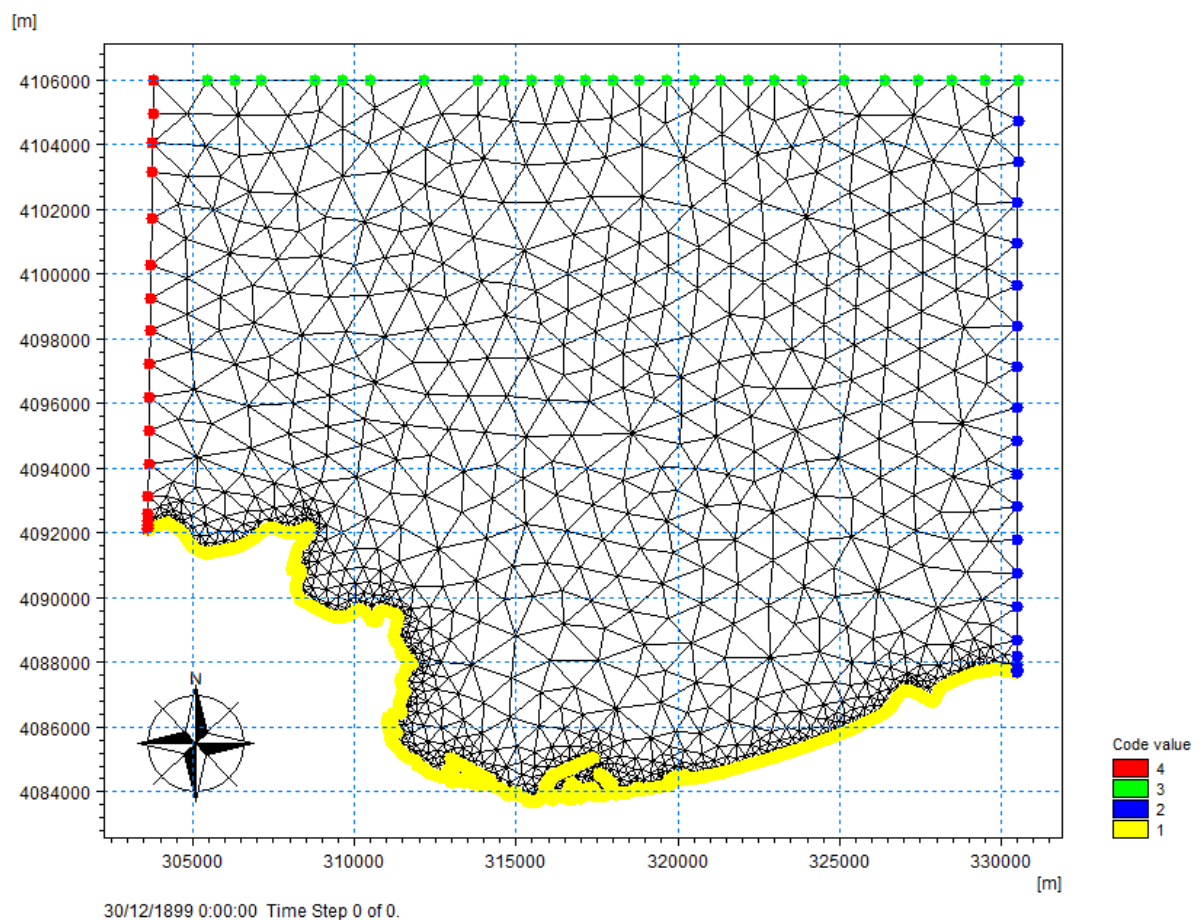


Figure 30: Maillage du modèle côtier de Golf de Stora.

La dernière étape est de créer la bathymétrie qui sera prête à être interpréter et utiliser pour la simulation.

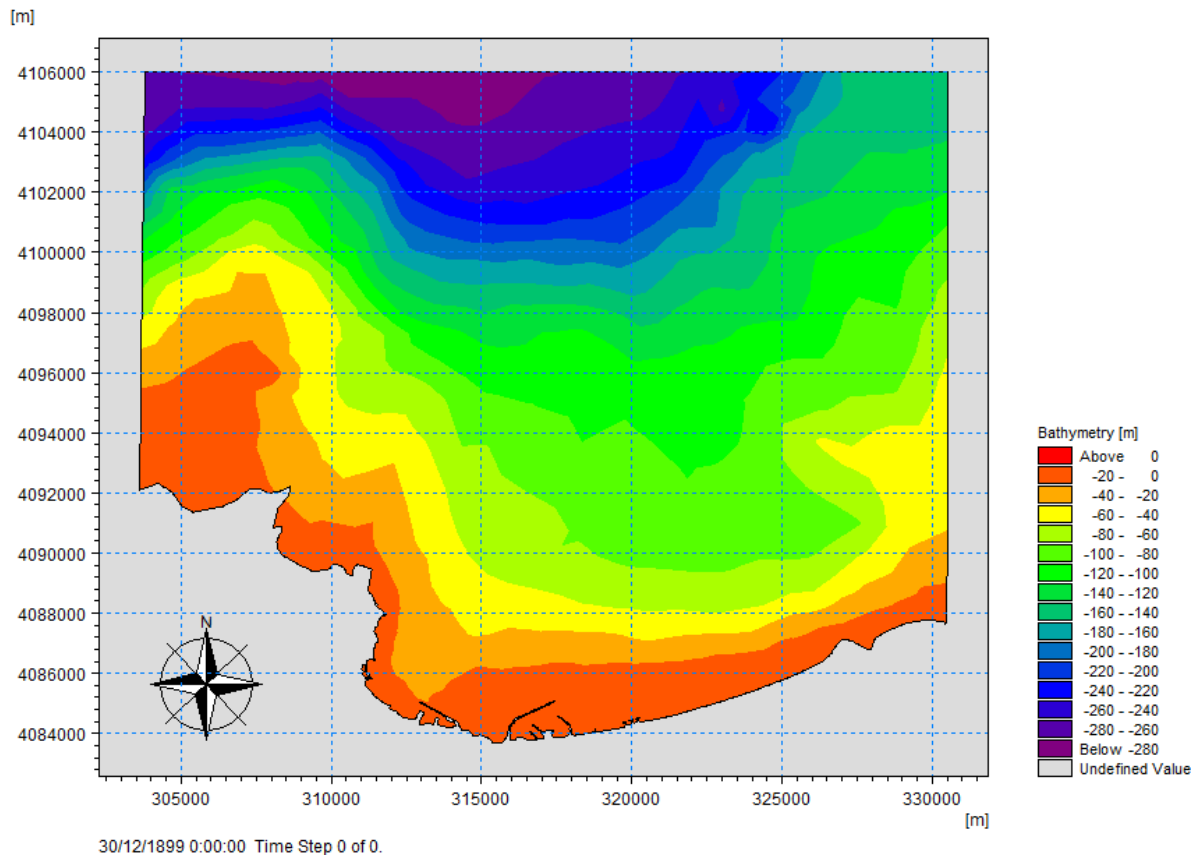


Figure 32: Carte bathymétrique de la baie de Skikda

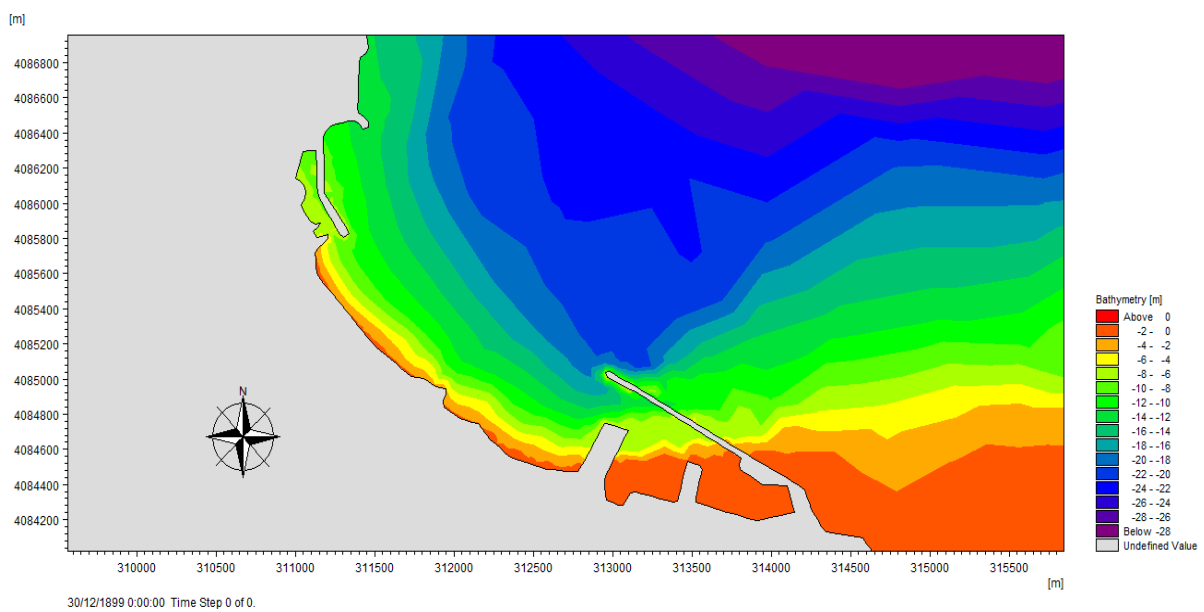


Figure 33: La bathymétrie fine zone d'étude (Stora-Skikda (2023))

IV.3.1.2.2. Interprétation de la bathymétrie

La bathymétrie obtenue pour Stora présente des valeurs comprises entre -1 m et -200 m au large.

L'analyse de la carte bathymétrique met en évidence la configuration des fonds marins, caractérisées par des isobathes orientées parallèlement à la ligne côtière qui sont rapprochés jusqu'à atteindre l'isobathe -16 m. Cependant, au centre de la zone une bathymétrie chaotique et irrégulière se manifeste, due à la présence d'un haut-fond entre les isobathes -14 m et -16 m.

Au-delà d'une profondeur de -16 m, les isobathes tendent à s'élargir graduellement au fur et à mesure que l'on s'éloigne en allant vers les eaux plus profondes.

IV.3.1.3. Définition des directions des houles pénalisantes

Après le traitement statistique des enregistrements des houles au large sur une période de temps précise, on a pu modéliser le régime des houles au large. On observe une similitude de rose des houles annuelles et saisonnières (**Figure18**) et (**Figure19**), mais avec des fréquences d'apparition et des hauteurs significatives différentes qui varient par direction.

Nous constatons que les directions les plus dominantes pour notre zone sont : Nord-Nord-Ouest et Nord-Est.

Tableau 7: Données utilisées pour la simulation du modèle SW.

	NNW (337.5°)			NE (45°)			Élévation moyenne(LEM)
	Hs(m)	Tp(s)	U ₁₀ (m/s)	Hs(m)	Tp(s)	U ₁₀ (m/s)	
Quinquennal	7.93	33.46	28.07	7.93	33.46	28.07	0.34
Cinquantennal	9.05	38.19	32.03	9.05	38.19	32.03	
Centennal	9.29	39.20	32.88	9.29	39.20	32.88	

La vitesse de vent et la période pic ont été calculés à l'aide des équations suivantes :

$$U_{10} = 3.54 H_s$$

$$T_p = 4.22 H_s$$

Les équations sont issues de notre base de données après la trace d'une courbe et extraction de l'équation de la régression linéaire

Tableau 8: données bathymétriques utilisées pour les tables points

Les points	Longitude (m)	Latitude (m)	Profondeur (m)
point 1	311213.680	4085797.600	-3
point 2	312848.290	4084633.240	-5
point 3	312845.030	4084629.370	-5
point 4	312841.880	4084624.970	-5
point 5	311904.650	4085143.360	-10
point 6	312934.830	4084737.870	-4
point 7	312938.450	4084741.360	-3
point 8	312941.900	4084745.060	-3
point 9	312947.410	4084749.910	-3
point 10	312951.610	4084754.530	-3
point 11	312954.370	4084758.750	-4
point 12	311301.260	4085977.370	-10.
point 13	311709.840	4085069.140	-3
point 14	311713.200	4085072.880	-3
point 15	311719.220	4085081.070	-4
point 16	311749.940	4085115.810	-5.
point 17	311753.140	4085119.680	-5
point 18	311904.130	4085220.700	-10
point 19	311898.390	4085213.050	-10
point 20	311895.060	4085209.100	-10

IV.3.2. Réfraction de la houle

IV.3.2.1. Principe de calcul de la réfraction de la houle :

Avec une compréhension de la climatologie offshore, des statistiques de houle offshore peuvent être établies. Cette statistique est ensuite propagée au littoral à l'aide d'une fonction de transfert calculée selon La bathymétrie représente adéquatement la mer au large, à des profondeurs où la houle ne se réfracte pas.

Le coefficient de shaolin est défini de la manière suivante:

$$K_r = \frac{H_s \text{ local}}{H_s \text{ au large}}$$

IV.4. Résultats

IV.4.1. Résultats de simulation du model mike21

IV.4.1.1. Résultats de champs des houles pour la direction Nord-Est

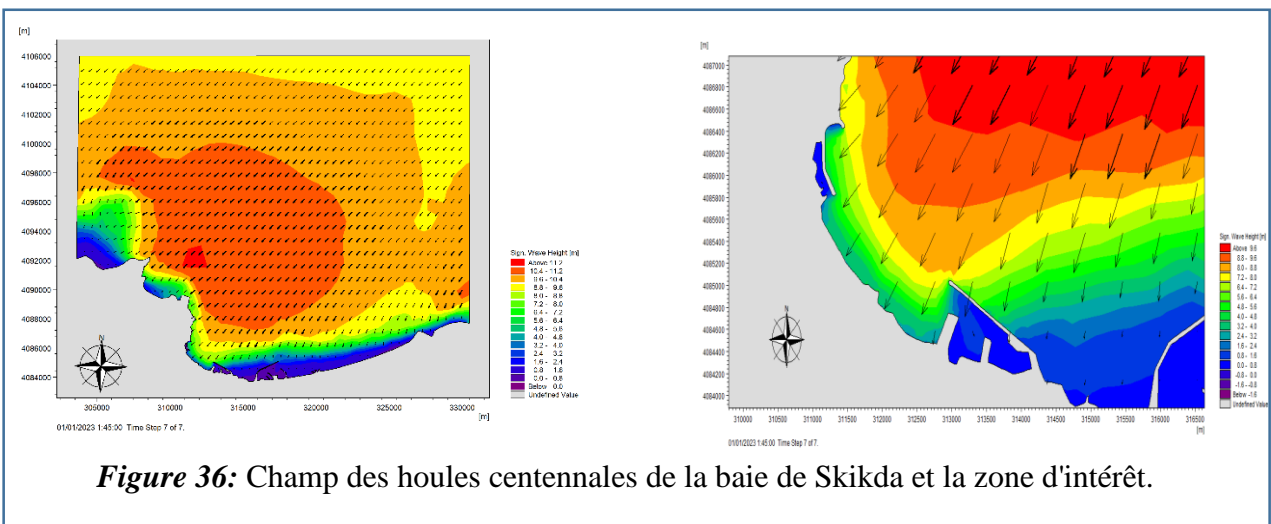
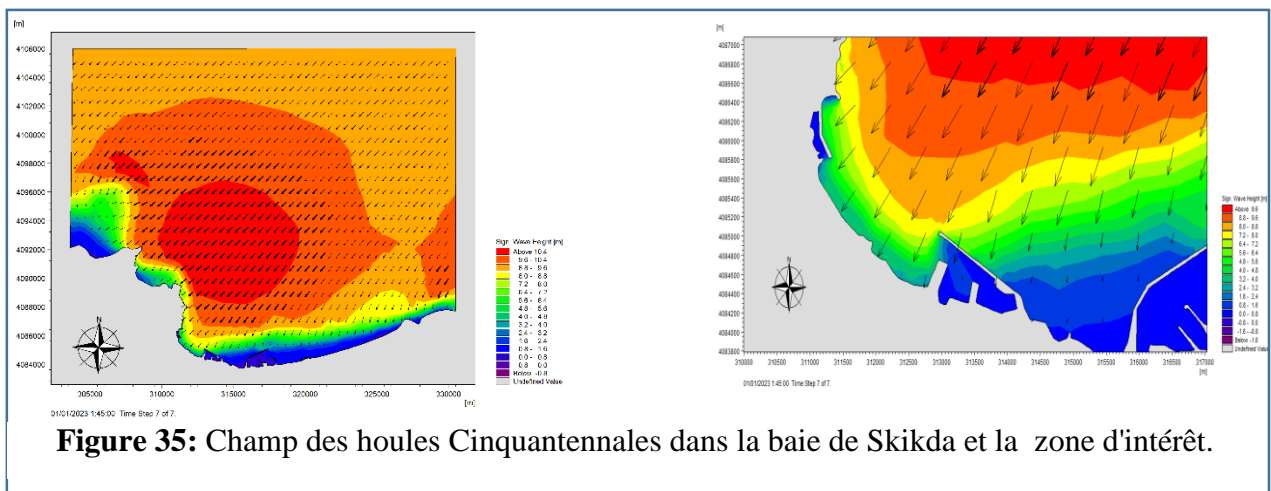
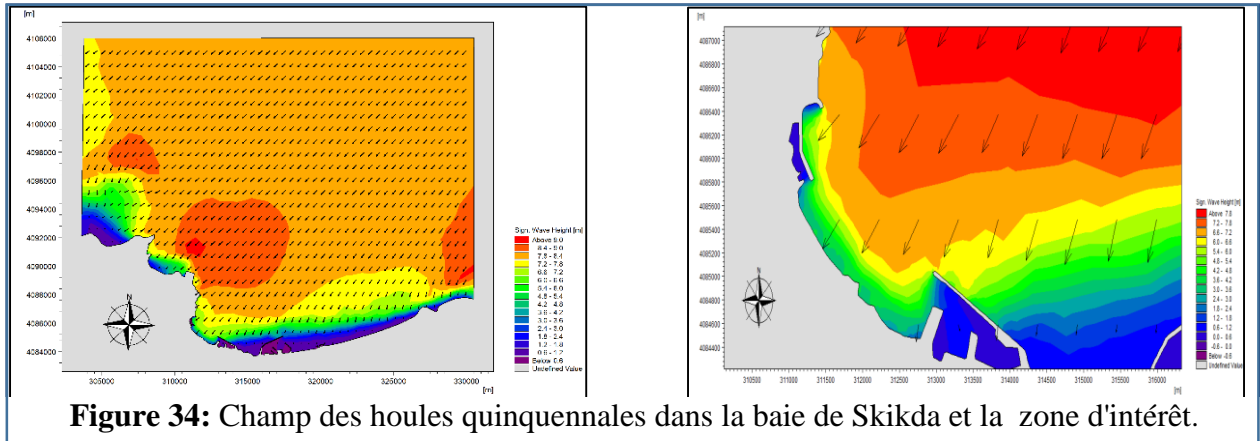


Tableau 9: Présentation des résultats obtenus par la simulation dans le secteur NE 45°

NE 45°															
	5 ANS					50 ANS					100 ANS				
	Hs=7.93 m		Tp=33.46 s			Hs=9.05 m		Tp=38.19 s			Hs=9.29 m		Tp=39.20 s		
point	Hs (m)	Tp (s)	profondeur	direction	Kr	Hs (m)	Tp (s)	profondeur	direction	Kr	Hs (m)	Tp (s)	profondeur	Direction	Kr
1	2.00	18.18	-3	85.13	0,27	2.01	18.18	-3	85.32	0,11	2.01	18.18	-3	85.30	0,11
2	3.06	18.18	-5	4.54	0,42	3.35	18.18	-5	4.43	0,35	3.37	18.18	-5	4.49	0,34
3	3.07	18.18	-5	4.99	0,42	3.34	18.18	-5	4.89	0,35	3.37	18.18	-5	4.95	0,34
4	3.06	18.18	-5	5.40	0,42	3.32	18.18	-5	5.31	0,35	3.34	18.18	-5	5.37	0,34
5	5.00	18.18	-10	40.67	0,68	5.02	18.18	-10	40.98	0,47	5.03	18.18	-10	41.00	0,46
6	2.85	18.18	-4	355.61	0,39	3.33	18.18	-4	355.37	0,33	3.37	18.18	-4	355.46	0,32
7	2.80	18.18	-3	355.41	0,38	3.28	18.18	-3	355.16	0,33	3.31	18.18	-3	355.25	0,32
8	2.75	18.18	-3	355.25	0,37	3.22	18.18	-3	354.99	0,32	3.26	18.18	-3	355.08	0,31
9	2.68	18.18	-3	354.84	0,36	3.15	18.18	-3	354.56	0,31	3.18	18.18	-3	354.67	0,31
10	2.63	18.18	-3	354.77	0,36	3.10	18.18	-3	354.47	0,31	3.14	18.18	-3	354.56	0,30
11	2.60	18.18	-4	355.05	0,35	3.07	18.18	-4	354.72	0,31	3.11	18.18	-4	354.81	0,30
12	4.93	18.18	-10.	52.91	0,67	4.95	18.18	-10.	53.47	0,42	4.96	18.18	-10.	53.50	0,41
13	3.41	18.18	-3	41.01	0,46	3.39	18.18	-3	41.28	0,30	3.42	18.18	-3	41.32	0,29
14	3.42	18.18	-3	40.93	0,46	3.40	18.18	-3	41.20	0,30	3.44	18.18	-3	41.24	0,29
15	3.44	18.18	-4	40.78	0,47	3.43	18.18	-4	41.06	0,30	3.46	18.18	-4	41.09	0,29
16	3.63	18.18	-5.	40.66	0,49	3.61	18.18	-5.	40.93	0,34	3.64	18.18	-5.	40.96	0,33
17	3.65	18.18	-5	40.68	0,50	3.63	18.18	-5	40.96	0,34	3.66	18.18	-5	40.99	0,33
18	5.73	18.18	-10	40.49	0,78	5.73	18.18	-10	40.84	0,49	5.74	18.18	-10	40.86	0,48
19	5.59	18.18	-10	40.56	0,76	5.59	18.18	-10	40.90	0,49	5.60	18.18	-10	40.93	0,48
20	5.52	18.18	-10	40.60	0,75	5.52	18.18	-10	40.94	0,49	5.53	18.18	-10	40.96	0,47

IV.4.1.2. Analyse des résultats de simulation Nord-Est (N 45°)**Période de retour 5 ans**

Nous observons que les houles de direction Nord Est (45°) sont à incidence obliques par rapport à la baie de Skikda avec une hauteur significative (H_s) maximale de 4.51 m à la profondeur de -10 m dans notre zone d'intérêt. Au fur et à mesure, la hauteur de la houle diminue pour atteindre la partie centrale avec des valeurs minimales de $H_s=1.05$ m à la profondeur de -3 m.

Période de retour 50 ans

Pour cette période de retour (Cinquantennale), la dissipation de l'énergie se présente par un pivotement des orthogonales en direction Nord-Est avec un H_s au large de 9.05 m.

Dans notre zone d'intérêt la hauteur atteint son maximum de 5.73 m de hauteur à la profondeur de -10 m et de 2.01 m à la profondeur de -3 m

Période de retour 100 ans

Pour cette période de retour les plus hautes valeurs des hauteurs des vagues atteignent 9.29 m au large, et elles diminuent jusqu'à 2 m à la profondeur de -3m dans notre zone d'étude.

IV.4.1.3. Résultats de champs des houles pour la direction Nord-Nord-Ouest

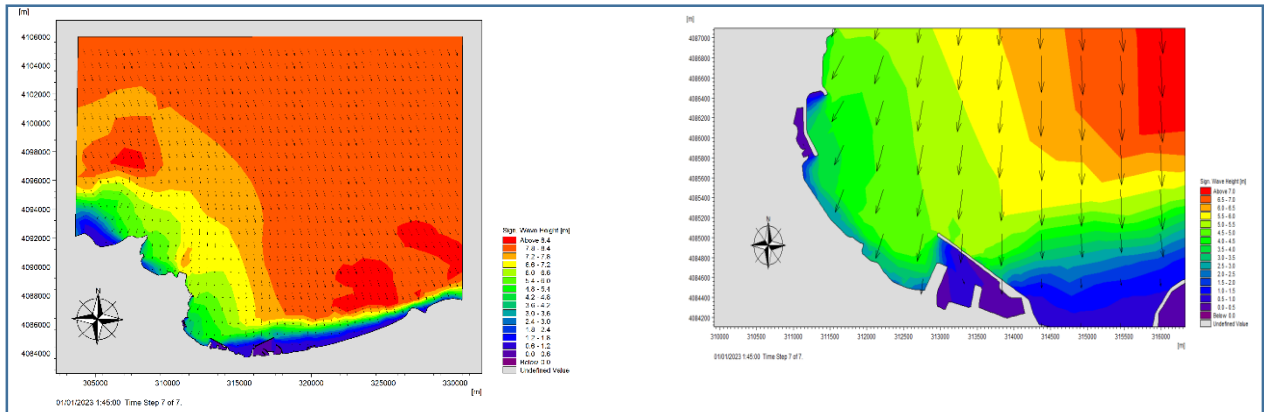


Figure 37: Champ des houles quinquennales dans la baie de Skikda et la zone d'intérêt.

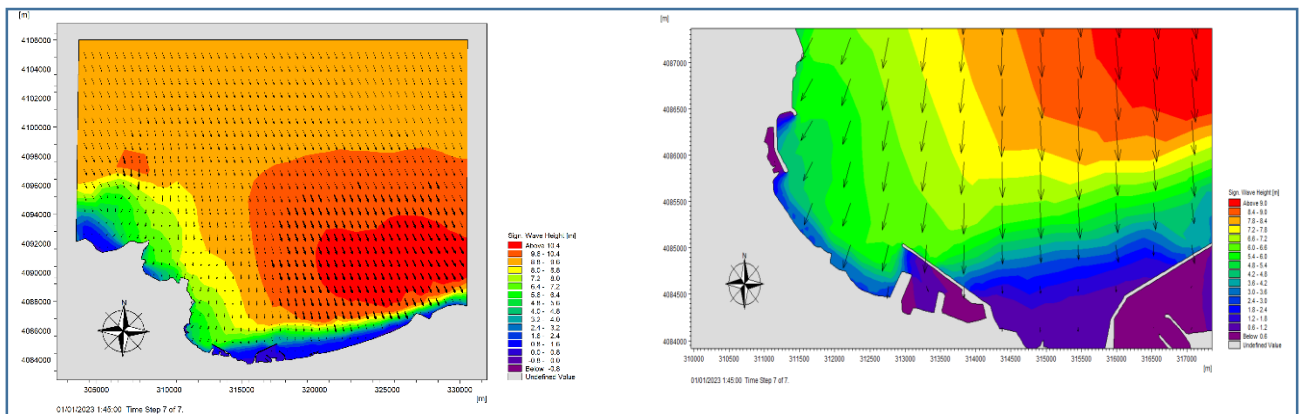


Figure 38: Champ des houles Cinquantennales dans la baie de Skikda et la zone d'intérêt.

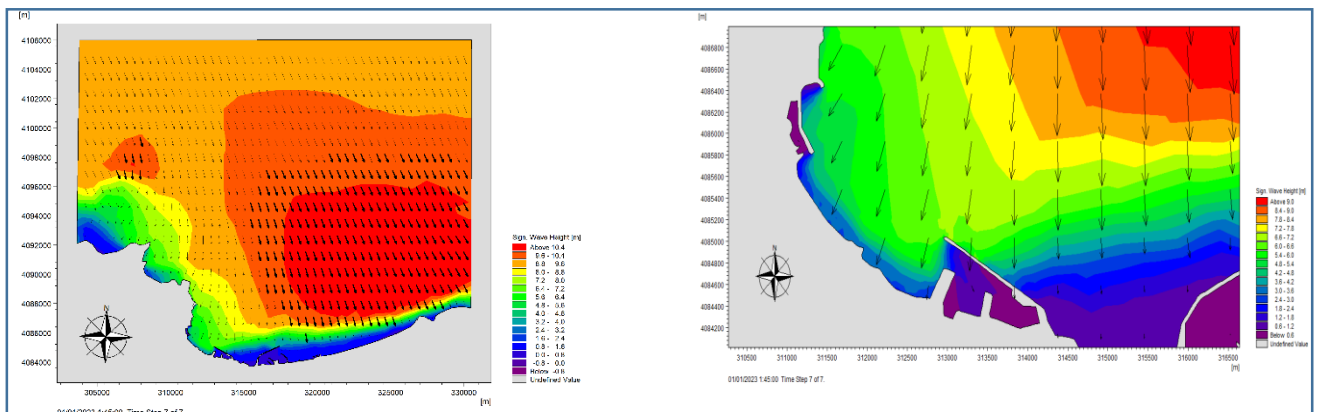


Figure 39: Champ des houles centennales de la baie de Skikda et la zone d'intérêt.

Tableau 10: Présentation des résultats obtenue par la simulation dans le secteur NNW 337.5°

NNW 337.5°															
	5 ANS					50 ANS					100 ANS				
	Hs=7.93		Tp=33.46			Hs=9.05		Tp=39.19			Hs=9.29		Tp=39.20		
point	Hs	Tp	profondeur	direction	Kr	Hs	Tp	profondeur	direction	Kr	Hs	Tp	profondeur	Direction	Kr
1	1.05	18.18	-3	85.04	0,14	1.27	18.18	-3	84.98	0,11	1.29	18.18	-3	84.93	0,11
2	3.19	18.18	-5	359.57	0,43	3.53	18.18	-5	359.72	0,35	3.56	18.18	-5	359.83	0,34
3	3.19	18.18	-5	359.93	0,43	3.51	18.18	-5	0.09	0,35	3.54	18.18	-5	0.20	0,34
4	3.17	18.18	-5	0.28	0,43	3.48	18.18	-5	0.45	0,35	3.50	18.18	-5	0.55	0,34
5	4.32	18.18	-10	26.45	0,59	4.88	18.18	-10	27.20	0,47	4.93	18.18	-10	27.28	0,46
6	3.04	18.18	-4	352.52	0,41	3.53	18.18	-4	352.35	0,33	3.55	18.18	-4	352.42	0,32
7	2.99	18.18	-3	352.44	0,41	3.50	18.18	-3	352.26	0,33	3.52	18.18	-3	352.33	0,32
8	2.95	18.18	-3	352.39	0,40	3.46	18.18	-3	352.20	0,32	3.49	18.18	-3	352.27	0,31
9	2.89	18.18	-3	352.10	0,39	3.41	18.18	-3	351.90	0,31	3.44	18.18	-3	351.97	0,31
10	2.85	18.18	-3	352.06	0,39	3.39	18.18	-3	351.85	0,31	3.42	18.18	-3	351.92	0,30
11	2.82	18.18	-4	352.29	0,38	3.39	18.18	-4	352.08	0,31	3.42	18.18	-4	352.15	0,30
12	3.86	18.18	-10.	42.70	0,53	4.49	18.18	-10.	43.21	0,42	4.54	18.18	-10.	43.28	0,41
13	2.73	18.18	-3	30.08	0,37	2.96	18.18	-3	30.45	0,30	3.01	18.18	-3	30.50	0,29
14	2.74	18.18	-3	29.97	0,37	2.97	18.18	-3	30.35	0,30	3.02	18.18	-3	30.40	0,29
15	2.76	18.18	-4	29.79	0,37	2.99	18.18	-4	30.18	0,30	3.04	18.18	-4	30.22	0,29
16	3.09	18.18	-5.	29.03	0,42	3.26	18.18	-5.	29.49	0,34	3.29	18.18	-5.	29.54	0,33
17	3.15	18.18	-5	28.97	0,43	3.30	18.18	-5	29.44	0,34	3.33	18.18	-5	29.49	0,33
18	4.51	18.18	-10	25.51	0,61	5.31	18.18	-10	26.26	0,49	5.37	18.18	-10	26.35	0,48
19	4.47	18.18	-10	25.73	0,61	5.22	18.18	-10	26.48	0,49	5.28	18.18	-10	26.57	0,48
20	4.45	18.18	-10	25.86	0,61	5.17	18.18	-10	26.60	0,49	5.23	18.18	-10	26.69	0,47

IV.4.1.4. Analyse des résultats de simulation Nord-Nord- Ouest 337.5°

Période de retour 5ans

Nous observons que dans cette période de retour du secteur NNW, les houles sont plus énergétiques qui atteignent des hauteurs plus de 7.93 m de hauteur au large , en allant vers la cote la vague perd une partie de son énergie, en atteignant 1 m de hauteur a la profondeur de - 3 m dans notre zone d'intérêt.

Période de retour 50 ans

Dans cette période de retour la houle se propage du large vers la cote en perdant une partie de son énergie, avec un Hs supérieur à 9.05 m au large. Dans notre zone d'intérêt la houle atteint un Hs de 1.27 m d'hauteur à la profondeur -3m

Période de retour 100 ans

Ce secteur se caractérise par des valeurs de hauteur significatives (Hs) qui atteignent le maximum de 9.5 m au large et d'un minimum de 1.3 m à la cote. Les vagues de ce secteur affect de plus en plus le nord de notre baie.

IV.5. Détermination de la houle de projet

Tableau 11: Houle de projet suivant la bathymétrie

		Profondeur (m)	3	4	5	10
Nord-Est 45°	5 ans	Hs	3.4245	3.44857	3.6536	5.73281
		Kr	0,469753	0,473055	0,50118	0,786394
	50ans	Hs	3.40865	3.43132	3.63849	5.73295
		Kr	0,303663	0,305641	0,348115	0,498455
	100ans	Hs	3.44195	3.46505	3.66829	5.74603
		Ks	0,295818	0,297745	0,339122	0,485578
Nord-Nord-Ouest 337.5°	5 ans	Hs	2.74815	3.04614	3.19145	4.51102
		Kr	0,376975	0,417852	0,437785	0,618796
	50ans	Hs	3.5005	3.53662	3.53403	5.31175
		Kr	0,331238	0,33659	0,352494	0,498455
	100ans	Hs	3.52464	3.55989	3.56041	5.37564
		Ks	0,32268	0,327895	0,343388	0,485578

Pour le but de l'étude de protection le choix de la houle défavorable ce fait dans la période de retour de 50 ans, et la direction de la houle de projet est déterminer selon la plus grande valeur dans cette période de retour

Dans notre cas, et comme est indiqué dans le **tableau 11**, la houle défavorable dans notre étude est donc la direction Nord-Nord-Ouest avec un Hs 3.5m et un coefficient de réfraction de 0.33 dans la profondeur de notre projet 4m.

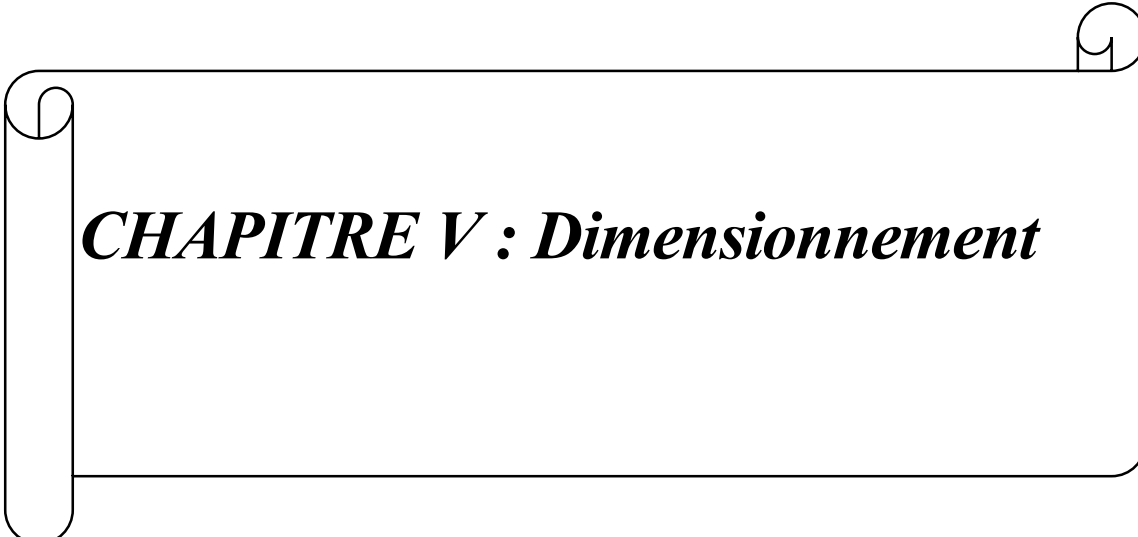
IV.6. Conclusion

En résumé, notre modèle numérique nous permet d'identifier les directions de vagues les plus défavorables (secteur NORD EST et secteur NORD NORD OUEST) :

Nos observations montrent que la géomorphologie sous-marine de la baie de Stora joue un rôle important dans les interactions entre l'hydrodynamique côtière et les structures de protection.

La propagation des ondes frontales qui affectent perpendiculairement notre zone d'études est amplement destructive, par contre une atténuation remarquable des ondes dans les deux bassins des ports rend ces deux derniers plus stables. Avec un une hauteur significatives des vagues au large égale à 7.93 m (5 ans), 9.05 m (50 ans), 9.29 m (100 ans) dans les deux secteurs et qui diminue jusqu'au 1.05 m dans une profondeur de -2.3 m dans le secteur NNW, et Hs = 2 m dans le secteur NE.

Les résultats obtenus à l'aide de la modélisation numérique nous a permis de bien comprendre les mécanismes d'évolution et les processus physiques prévalus dans la zone d'étude. La prise en compte des 03 scénarios des évènements extrêmes (05 ans, 50 ans et 100 ans), nous a généreusement aidés afin de bien dimensionner notre ouvrage de protection en prenant en compte les précautions nécessaires pour une meilleure durabilité de ce dernier.



CHAPITRE V : Dimensionnement

V. Dimensionnement

V.1. Introduction

Les ouvrages de protections côtières sont des barrières qui protègent le littoral contre les agents hydrodynamiques tel que l'action des houles et des tempêtes pour but d'éviter le risque d'érosion et on garde la zone protégée dans un abri contre ces derniers

Dans notre zone d'étude l'érosion est un grand problème qui affecte la zone, ce qui nous a mis dans l'obligation de détourner vers un ouvrage de protection pour sécuriser la zone.

Pour cela on a abordé dans ce chapitre la méthodologie de la protection côtière « protection frontale à base d'enrochement », à l'aide de la formule d'Hudson jusqu'à arriver aux résultats fiables et qui rendent notre ouvrage de protection plus durable.

V.2. La digue à talus

V.2.1. Éléments constitutifs

Un ouvrage de protection est une cohésion des différents éléments dans laquelle chaque élément a une fonction critique associée à la performance de l'ouvrage.

Les éléments constitutifs d'un ouvrage se résument comme suit :

- **Un soubassement** et éventuellement d'un tapis de pied à la partie inférieure de la digue (solide pour minimiser les tassements) ;
- **Une carapace** (qui doit être stable)
- **Une protection de pied** (pour éviter l'affouillement)
- **Une crête** (pour protéger efficacement l'ouvrage)
- **Un noyau** généralement en T.V.C ou autres matériaux.

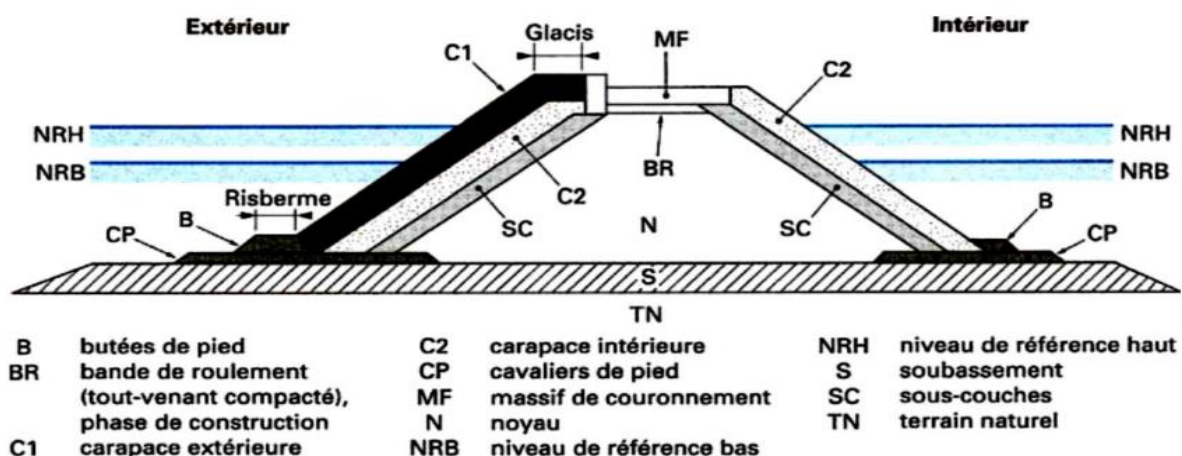


Figure 40: les éléments constitutifs d'une digue à talus

La taille des blocs et des matériaux choisis dans chaque couche se défèrent de plus petit de l'intérieur vers le plus grand à l'extérieur et chaque couche doit respecter la granulométrie nécessaire (Sharp N. et al., 1997).

Tableau 12: Les fonctions des différents éléments d'un ouvrage en enrochement

ELEMENT	FONCTION
PROTECTION ANTI-AFFOUILLEMENT	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lutte contre l'érosion et l'affouillement du pied
NOYAU	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Atténuation de la transmission de la houle ✓ Support de la carapace et des sous-couches ✓ Stabilité géotechnique
BERME	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Atténuation de l'action de la houle, du run-up et des franchissements ✓ Stabilité géotechnique additionnelle
BUTEE DE PIED	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fondation stable pour la carapace
SOUS COUCHE	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Filtre ✓ Lutte contre l'érosion du noyau et du sol de fondation ✓ Drainage en surface de l'ouvrage ✓ Nivellement et assise pour le placement de la carapace Séparation entre la carapace et les matériaux fins et réduction du gradient hydraulique dans le noyau et le sol de fondation
CARAPACE	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lutte contre l'érosion des sous-couches et du noyau par l'action de la houle ✓ Dissipation de l'énergie de la houle
CRETE	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Limitation du franchissement ✓ Accès pour les interventions de maintenance ✓ Fondation pour le couronnement de couronne
MUR DE COURENNEMENT	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Limitation du franchissement ✓ Accès pour les interventions d'entretien ✓ Support des équipements tels que les réseaux
MUSOIR	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Terminaison de l'ouvrage d'une manière stable et signalisation ✓ Diffraction de la houle

V.3. Méthode de travail

V.3.1. Formule d'Hudson

Hudson (1953, 1959) a mis au point sur une équation, qui repose sur des essais sur modèles dans des conditions de houle régulière sur des ouvrages en enrochement non-franchis et à noyau perméable. Elle donne la relation entre le $W50$ (N), la hauteur de la houle en pied d'ouvrage, H (m), et les différents paramètres structurels pertinents (**Dahmani A. ,2021**).

- Dans le cas des d'une protection à base d'enrochement naturelle le choix de type d'enrochement est basé sur le K_d (coefficient de dommage) ce qui diffère selon le choix du H utilisé dans la formule.
- Dans le cas des blocs artificiels, le choix des blocs c'est selon les caractéristiques primordiales des blocs (la durabilité, type de béton, résistibilité, stabilité, le cout), ce qui permet à déterminer le K_d du bloc choisi.

Dans le SPM (CERC, 1984), il a été conseillé d'utiliser $H1/10$ ($= 1.27 H_s$) comme hauteur de la houle de dimensionnement. Cela signifie que l'application de la formule de Hudson selon le SPM (CERC, 1984) induit un poids d'enrochement largement plus élevé qu'en se référant au SPM (CERC, 1977).

➤ POIDS DES BLOCS DE PROTECTION

Le dimensionnement des blocs de la carapace de la protection en enrochements s'effectué par la formule de HUDSON (SPM 1977)

$$W = \frac{1}{K_D} \frac{\gamma_s}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_0} - 1\right)^3} \frac{Hb^3}{\cot g\alpha}$$

Avec :

γ_s = masse volumique des enrochements utilisés

γ_0 = masse volumique de l'eau de mer = 1.026 T/m^3 ;

α = angle du talus avec l'horizontale;

K_d = coefficient adimensionnel dit de HUDSON, fonction de la nature des

Blocs et de la nature de la section;

Hb = houle de dimensionnement;

W = poids des blocs en tonne si γ_s est en T/m³ et Hb en m.

➤ **Épaisseur de la carapace**

Pour le calcul de l'épaisseur E de la carapace, on utilise la formule extraite du « **Shore Manuel Protection, Coastal Engineering Research Center** » C.E.R.C- US Army, suivante :

$$E = n \times K_{\Delta} \times \left(\frac{W}{\gamma_s} \right)^{1/3}$$

Avec :

W = poids unitaire des blocs;

n = nombre de couches ($n = 2$);

K_{Δ} = coefficient de couche

γ_s = poids spécifique des blocs

E = épaisseur de la carapace en m.

➤ **Nombre de bloc**

$$N_s = n K_{\Delta} (1 - p) (\gamma_s / w)^{2/3}$$

Avec

W = poids unitaire des blocs;

n = nombre de couches ($n = 2$);

K_{Δ} = coefficient de couche

γ_s = poids spécifique des blocs de carapace

P = porosité de bloc

➤ **Filtre du support**

$$W_f = \frac{W}{10}$$

Avec W : Masse d'un seul bloc

➤ **Filtre de transition**

$$W_t = \frac{W}{200}$$

Avec W : Masse d'un seul bloc

➤ **Epaisseur de chaque filtre**

$$E = n \times K_{\Delta} \times \left(\frac{W}{\gamma_s} \right)^{1/3}$$

Avec :

W = poids unitaire des blocs;

n = nombre de couches

K_{Δ} = coefficient de couche

γ_s = poids spécifique des blocs

➤ **Poids du noyau**

$$W_n = \frac{W}{4000}$$

Pour les calculs des épaisseurs de chaque couche, il est nécessaire de déterminer la valeur de coefficient de couche K_{Δ} comme est montré dans le tableau suivant

Tableau 13: caractéristiques des différents types d'encrochements

Type De Bloc	N	Placement	K_{Δ}	p(%)
Encrochement Arrondis	2	En vrac	1,02	38
Encrochement Anguleux	2 – 3	En vrac	1	37 - 40
Encrochement Parallélépipédiques	2	Spécial	-	27
Cubes Rainurés	2	En vrac	1,1	37
Cubes Américains	2	En vrac	1,1	47
Tétrapodes	2	En vrac	1,04	50
Quadripodes	2	En vrac	0,95	49
Hexapodes	2	En vrac	1,15	47
Tétrapodes	2	En vrac	1,02	54
Dolos	2	En vrac	0,94	56

V.3.2. Hauteur de la houle déterminante

Pour un ouvrage de défense des côtes, ainsi que pour tout ouvrage en eau peu profonde. La hauteur de la houle déterminante (H) est bien souvent celle qui correspond à la hauteur de la plus grande lame déferlante avant d'atteindre l'ouvrage. Cette hauteur est en fonction notamment de la hauteur de la houle au pied de l'ouvrage, de la pente de la plage et de la masse volumique des enrochements utilisés. La détermination de la hauteur de la plus grande vague déferlante que l'ouvrage pourra rencontrer s'obtient à partir de résultats de modèle (mike21) à une profondeur de 4 m représentant la profondeur moyenne d'implantation. La houle du projet est tirée à partir du tableau des résultats dans le chapitre précédent des points d'extraction relatifs à la houle cinquantennale de direction N-N-W avec $H_s=3.34\text{m}$.

V.3.3. Les enrochements

Pour effectuer une protection d'un rivage maritime avec des enrochements il faut bien choisir les types d'enrochement selon leurs caractéristiques.

Il existe deux types d'enrochements à cet effet :

V.3.3.1. Enrochement naturel

Se trouve sur la forme naturelle, et se trouve dans des carrières avec différentes formes et masses, le poids de ces enrochements généralement varie entre 0 à 9 t, au-delà en va vers les **blocs artificiels** due à la difficulté de trouver ce tonnage en forme naturelle.



Figure 41: protection côtière à l'aide des enrochements naturels sur la route 199 aux Îles-de-la-Madeleine (radio-canada.ca)

Le KD des enrochements naturels est défini selon la forme et le type des enrochements et la formule d'Hudson utilisée.

Tableau 14: Valeurs de kd selon SPM1977

Forme des blocs	emplacement	Kd			
		0-5%		5-10%	10-15%
		houle déferlante	houle non déferlante	houle non déferlante	houle non déferlante
lisse arrondi	aléatoire	2,1	2,4	3	3,6
angulaire rougeaux	aléatoire	3,5	4	4,9	6,6
angulaire rougeaux	spéciale	4,8	5,5	-	-

Tableau 15: Valeurs de Kd selon SPM 1984

Forme des blocs	emplacement	Kd	
		0-5%	
		houle déferlante	houle non déferlante
lisse arrondi	aléatoire	1,2	2,4
angulaire rougeaux	aléatoire	2	4
angulaire rougeaux	spéciale	5,8	7

V.3.3.2. Enrochement Artificiel

Ce sont des structures en béton armé avec des différentes formes et usage selon leurs caractéristiques techniques, le choix du bloc artificiel est basé sur la stabilité et la résistance de bloc contre les forces des courants et des houles.

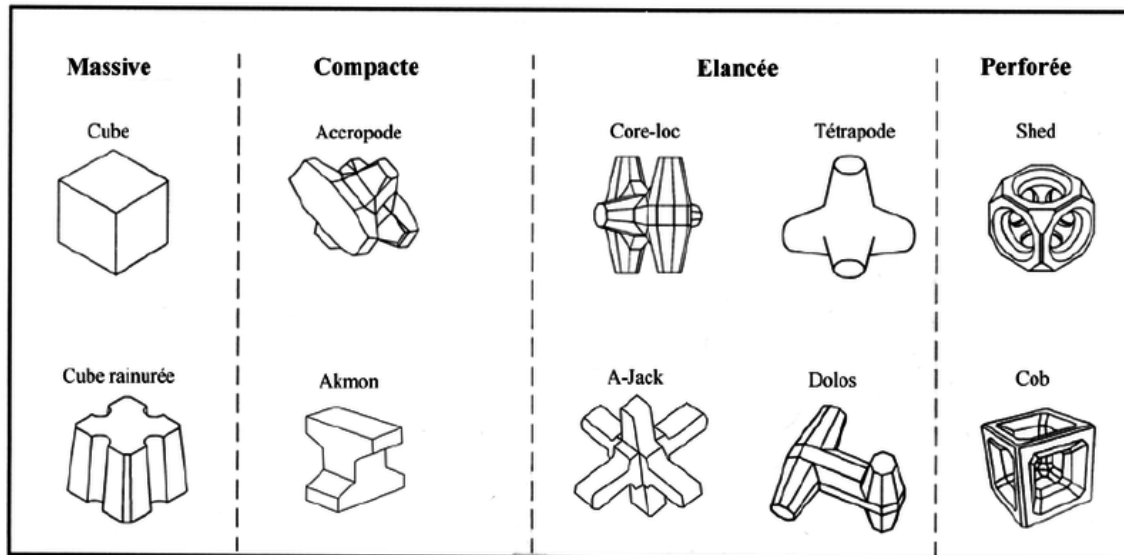


Figure 42 : différentes formes des bloc artificielles (CEM.2006)

La formule dite « d'Hudson » est d'un emploi extrêmement commode, mais ne prend pas en compte l'ensemble des paramètres liés à la stabilité de l'ouvrage tels que la période de la houle ou la porosité et la composition des sous-couches qui sont, en fait, implicitement intégrées dans le coefficient K_d comme présenté dans le **tableau 16**

Tableau 16: K_d Des enrochements artificiels en double couches

Bloc artificiel	pente	Kd	
		houle déferlante	houle non déferlante
cube (double)	3/2-3/1	6,5	7,5
tétrapode	2/1	7	8
teribar	2/1	9	10
stabit	2/1	10	12
akmon	2/1	8	9
Antifer cube	2/1	7	8

V.3.3.2.1. Les blocs cubiques rainurés Antifer

Le bloc cubique rainuré ou bloc de type Antifer est une évolution du simple cube. Il a une rainure sur chacun de ses quatre côtés. Ces rainures améliorent l'imbrication et la stabilité hydraulique tout en réduisant le risque de réorientation face à face.

Le risque de placement indésirable en face à face est toujours possible, mais moins probable dans le cas des cubes de type Antifer que dans le cas des cubes.



Figure 43: protection l'aide de bloc artificiel

V.4. Calculs

Dans cette partie de dimensionnement, les calculs se basent sur les formules d'Hudson (SPM 1977)

Ou on a le $H_b = H_s$.

Le H_s est déterminé dans le chapitre précédent dans la partie de modélisation

Les blocs choisis pour notre étude se sont **des enrochements naturels** et aussi **des blocs cubiques Antifer rainuré**

V.4.1. Etape de calcul

Carapace :

- ✓ le poids des blocs de la carapace W
- ✓ l'épaisseur
- ✓ nombre de bloc

Sous couches :

- ✓ poids W
- ✓ L'épaisseur

Le noyau (TVC) :

- ✓ Poids w

❖ CARAPACE

- Poids des blocs de la carapace

$$w = \frac{1}{kd} \times \frac{2.65}{\left(\frac{2.65}{1.026} - 1\right)^3} \times \frac{3.43^3}{3/2}$$

$$W_{\text{enrochement}} = 5.13 \text{ T}$$

$$W_{\text{BCR}} = 2.56 \text{ T}$$

Avec :

$$\gamma_s = 2.65 \text{ T/M}^3$$

$$\gamma_0 = 1.026 \text{ T/m}^3$$

$$\text{Cot } g \alpha = 3/2$$

$$K_d = 7 \text{ (Antifer cube) et } 3.5 \text{ (enrochement naturel)}$$

$$Hb = Hs = 3.43 \text{ m}$$

Donc pour un enrochement naturel on prend des enrochements de catégorie de [4 à 6 T].

Et pour un BCR un tonnage de bloc de 3T.

- **Epaisseur de la carapace**

$$E = 2 \times K_{\Delta} \times \left(\frac{W}{2.65}\right)^{1/3}$$

$$E_{\text{enrochement}} = 2.47 \text{ m}$$

$$E_{\text{BCR}} = 1.19 \text{ m}$$

Donc on prend E égale à 2.47 m pour les enrochements naturels

Et égale 1.19 m pour le BCR

Avec

W = poids unitaire des blocs 3 T pour le BCR et de 5T pour les enrochements

n = nombre de couches ($n = 2$);

K_{Δ} = coefficient de couche ($K_{\Delta \text{ BCR}} = 1.10$) et ($K_{\Delta \text{ enrochement}} = 1$)

γ_s = poids spécifique des blocs ($\gamma_s = 2.65 \text{ T/m}^3$);

E = épaisseur de la carapace en m.

- **Nombre de bloc**

$$N_s = 2 \times K_{\Delta} \times (1 - 0.37) \times \left(\frac{2.65}{W}\right)^{2/3}$$

$$N_s_{\text{enrochement}} = 0.82$$

$$N_s_{\text{BCR}} = 1.27$$

$N_s = 0.82 / \text{m}^2$ c'est-à-dire 82 enrochements par 100 m^2

$N_s = 1.27 / \text{m}^2$ c'est à dire 127 bloc de BCR par 100 m^2

Avec

W = poids unitaire des blocs 3T (BCR) et 5T pour les enrochements naturels

n = nombre de couches ($n = 2$)

K_{Δ} = coefficient de couche ($K_{\Delta \text{ BCR}} = 1.10$) et ($K_{\Delta \text{ enrochement}} = 1$)

γ_s = poids spécifique des blocs de carapace ($\gamma_s = 2.65 \text{ T/m}^3$)

$P = 37\%$

❖ **SOUS COUCHE**

- ❖ **Sous couche 01 (FILTRE DU SUPPORT)** dans les couches filtre les enrochements utiliser sont des enrochements naturels $K_{\Delta}=1$

- **POIDS DES ENROCHEMENTS**

$$Wf = \frac{W}{10}$$

$$Wf_{\text{Enrochement}} = 0.5T$$

et

$$Wf_{\text{BCR}} = 0.3T$$

Correction du poids : $70\% < Wf < 130\%$

⇒ Pour l'enrochement naturels on a $0.5 \times 0.7 = 0.35$ et $0.5 \times 1.3 = 0.65$

On prend une catégorie [0.4-0.7] T si les blocs de carapace sont des enrochements naturels

⇒ Pour le BCR on a $0.3 \times 0.7 = 0.21T$ et $0.3 \times 1.3 = 0.39T$

On prend une catégorie [0.3-0.5] T si les blocs de carapace sont des BCR

- **Epaisseur de la sous couche 01**

$$Ef = 2 \times K_{\Delta} \times \left(\frac{Wf}{2.65}\right)^{1/3}$$

$$Ef_{\text{Enrochement}} = 2.47 \text{ m}$$

$$Ef_{\text{BCR}} = 2.29 \text{ m}$$

Donc l'épaisseur du filtre du support lors de l'utilisation des enrochements naturelle est de 2.47 m par contre pour le BCR est de 2.29 m

Avec :

W = poids unitaire des enrochements (0.5T) et des BCR (0.3T)

n = nombre de couches ($n = 2$);

K_{Δ} = coefficient de couche enrochement naturelle ($K_{\Delta} = 1$)

Et BCR ($K_{\Delta} = 1.1$)

γ_s = poids spécifique des blocs ($\gamma_s = 2.65 \text{ T/m}^3$);

E_f = épaisseur de la sous couche 01 en m.

❖ **Noyau**

- **Poids du noyau**

$$W_n = \frac{W}{4000}$$

$$W_n = 7.5 \times 10^{-4} \text{ T}$$

Le noyau sera en tout venant de carrières TVC de [0-500kg]

V.5. Conclusion

Le dimensionnement pour but de protection de notre rivage maritime « route côtière STORA-Skikda » est basé principalement sur la détermination de la houle de dimensionnement ce qui a donné le résultat de $H_b = 3.43 \text{ m}$ dans la profondeur de 4m et l'utilisation de la formule d'Hudson (SPM 1977) nous a donné les résultats de dimensionnement de chaque partie de notre ouvrage mentionnés dans le **tableau 17** pour les deux types de blocs choisis.

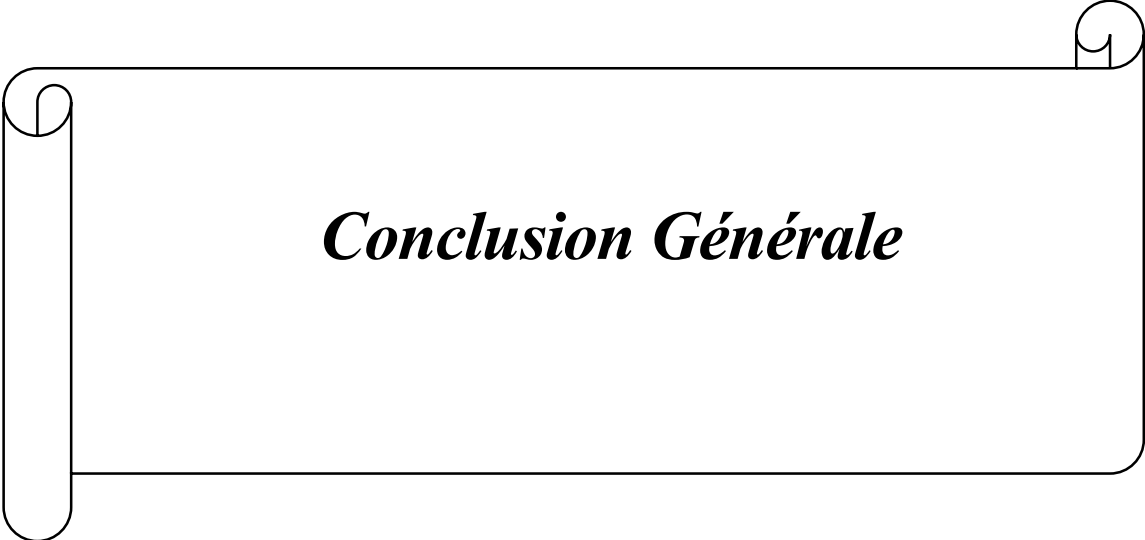
Tableau 17: résultats de dimensionnement

Type De Bloc		La Formule d'Hudson	
		BCR	Enrochement
CARAPACE	le poids W	3 T	[4-6T]
	l'épaisseur E	1,19 m	2.47 m
	le nombre de bloc Ns	127 blocs	82 enrochements
SOUS COUCHE 01	le poids W	0,3 T	0.5 T
	l'épaisseur E_f	2.29 m	2.47 m
NOYAU	le poids W	TVC	TVC

Le tableau montre les résultats de chaque élément de l'ouvrage, on remarque que la différence entre les deux est petite, par contre les avantages de ces deux derniers se différencient :

- Le k_d des enrochements naturels est plus petit que celui de BCR
- Le coût des enrochements naturels est moins cher que du BCR .
- Prenant en considération l'acheminement des blocs des carrières vers notre site, dans notre cas le transport ne va pas causer un problème due à la disponibilité des carrières près du site comme la carrière a enrochements de FIL-FILA - daïra de r.djamel -SKIKDA et la carrière de l'unité el ghadir, et cela va minimiser le coût de notre projet
- Le BCR est plus durable et plus résistant et plus stable contre les agents hydrodynamiques que l'enrochement naturels
- L'emplacement du BCR est plus facile à poser grâce à la forme identique des blocs

Pour ces raisons le choix des blocs de notre étude envisage l'utilisation des enrochements naturels.



Conclusion

La perception des zones côtières, a radicalement changé ces cinquante dernières années. Cet espace était d'abord considéré comme une zone vide, voire répulsive (**Corbin, 1990**), ensuite il était réservé à une certaine élite sociale qui pratiquait les « bains de mer » dans de rares stations balnéaires. Ce n'est qu'avec la généralisation des congés payés que se produisit le « boom balnéaire ». A partir de là, il y a une prise de conscience progressive des richesses de la frange littorale qui supporte une forte pression de la part de ses divers utilisateurs (promoteurs, touristes, pêcheurs, etc.).

L'érosion est un phénomène naturel liée au déséquilibre entre le dépôt de sédiments et leur redistribution par les courants côtiers. Ce phénomène toutefois accéléré par les effets perturbateurs liés à l'emprise humaine sur le rivage.

L'origine de l'érosion dans la zone de Stora est d'une part naturelle tel que les tempêtes, les variations du niveau de la mer, et d'autre part anthropiques essentiellement l'implantation des ouvrages portuaires (port mixte, port de pêche).

L'évolution du trait de côte du littoral de Stora est marquée par un recul.

L'étude des évènements extrêmes a permis de déterminer les valeurs extrêmes de la hauteur des houles dans la zone, ce qui nous a permis de bien connaître les caractéristiques de la zone.

L'analyse bathymétrique révèle un fond marin formé par des isobathes assez serrés parallèles à la côte jusqu'à l'isobathe -10 m, à l'exception de la partie médiane de la zone, où on remarque une bathymétrie irrégulière et chahutée, dû à l'existence d'un haut fond entre les isobathes -4 m et -10 m. Au-delà des -10 m de profondeur, les isobathes ont tendance à s'élargir.

La modélisation à l'aide du Mike 21 est une étape très importante, qui nous a mené à déterminer la houle de dimensionnement dans notre zone et de connaître le secteur dominant.

La modélisation numérique de la réfraction démontre que la houle de secteur Nord-Nord-West est la plus menaçante sur la zone, elle va être prise dans le dimensionnement des ouvrages de protection avec une détermination de la valeur de la houle de dimensionnement qui est de 3.43 m à la profondeur -04 m.

Conclusion Générale

L'étude réalisée a permis de bien identifier la méthodologie à suivre pour le calcul et le dimensionnement de l'ouvrage de protection à l'aide de la formule d'Hudson pour avoir des résultats réalisables au sein de notre projet.

Le transit littoral de la zone, est considéré comme résiduel pour le linéaire de la cote du fait du manque d'alimentation en sédiment. C'est ce qui explique l'érosion observée dans la zone de Stora.

Notre étude est basée sur la protection de la route côtière avec un ouvrage de protection (digue à talus), ce qui nous a menés à l'utilisation des enrochements naturels de catégorie [4-6T].

De ce fait, le choix et les caractéristiques du type des ouvrages de protection, qui sont proposés pour la protection du rivage de Stora procurent une :

- Amélioration des conditions sévères que subissent la zone, les courants et la perturbation hydrodynamique (dégradation des protections actuelles).
- Protéger la route existante.



Références bibliographiques

Références bibliographiques

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.

A. Nicolae Lerma, T. Bulteau, S. Lecacheux, et D. Idier, « Période de retour des évènements de fortes houles le long des côtes françaises (Atlantique et Manche) », in *XIIIèmes JNGCGC, Dunkerque*, Editions Paralia, 2014, p. 139-148. doi: [10.5150/jngcgc.2014.016](https://doi.org/10.5150/jngcgc.2014.016).

Arnaud, G., Rey, V., Touboul, J. and Sous, D., 2019, March. Impact de brise-lames détachés poreux émergents sur l'énergie de la houle à la côte. In *Digues 2019*.

Blaizot, D., 2023. Les variations de la température terrestre et leurs causes cosmiques.

Bougeault, P. and Sadourny, R., 2001. Dynamique de l'atmosphère et de l'océan. Editions Ecole Polytechnique.

CETMEF. (2009). Conception des ouvrages à la mer. In : Guide Enrochement : L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques. Version française du Rock manual (2^e 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 (2^e édition). Compiègne ; Pays-Bas ; Londres: centre d'études techniques maritimes et fluviales (France) ; CUR building infrastructure; CIRIA.

CETMF ; 1998 - Conception et dimensionnement des digues à talus. Centre d'étude technique maritime et fluvial, Boulevard Gambetta.

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

Deboudt, P. and Battiau-Queney, Y., 1991. Les tempêtes: intégration d'un phénomène météorologique dans le paysage littoral de la Côte Nord-Orientale du Cotentin (Basse-Normandie). *Hommes et Terres du Nord*, 4(1), pp.213-217.

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.

Furon, R. (1948). Les problèmes de l'érosion du sol. *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, 28(309), 281-296.

Kherfouchi M ; 1984. « Le bassin du Saf-Saf (Algérie orientale) : Irrigation et Aménagement des ressources en Eau », Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle, Nancy II.

Références bibliographiques

L.A.M ; 2012 – avant-projet sommaire rapport (mission 02, wilaya de Skikda).

Leclerc, A.M., 2010. Ouvrages de protection du littoral: effets sur la morphologie des plages et sur les Communautés benthiques intertidales, région de Saint-Siméon et de Bonaventure, Baie des Chaleurs (Québec, Canada) (Doctoral dissertation, Université du Québec à Rimouski).

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.

Pirolley, A. & Bergeron, N. (2020). Franchissement piscicole dans les ponceaux: ouvrages à simulation de cours d'eau et conceptions ichtyo compatibles.

Salmon, C. and Duvat, V.K., 2018. Enjeux de l'intégration des espaces naturels littoraux dans la gestion des risques liés à la mer. La Houille Blanche, (2), pp.5-12.

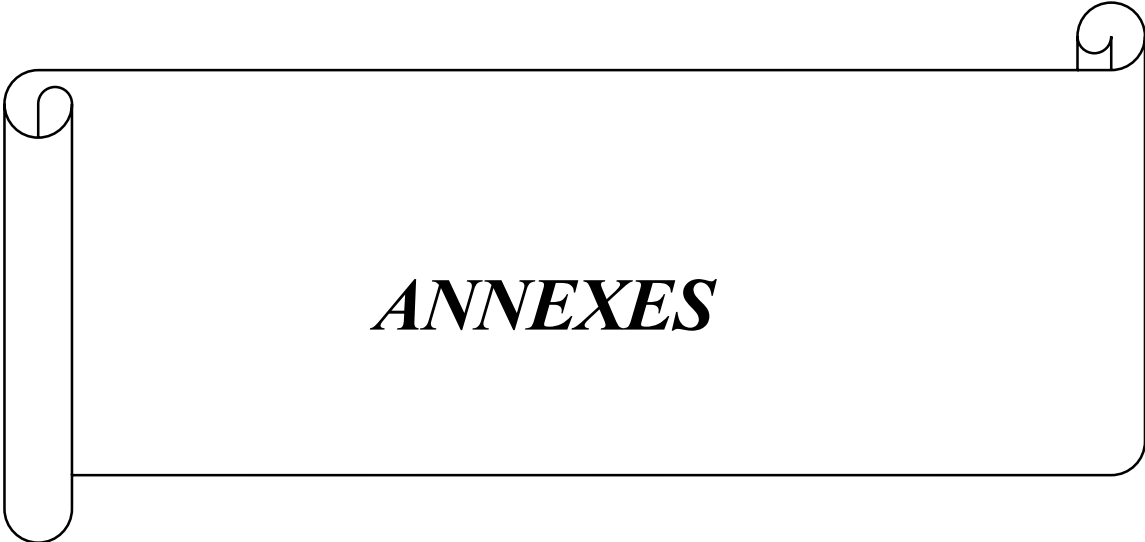
Shore protection manual

Tioguim, I. & Delcaillau, D. (2018). Modélisation d'extrêmes de séries temporelles : une étude empirique. Thèse de Master. Euro-institut d'Actuariat.

Tioguim, I. & Delcaillau, D. (2018). Modélisation d'extrêmes de séries temporelles : une étude empirique. Thèse de Master. Euro-institut d'Actuariat.

« Actualité technologique et scientifique ». <https://www.technoscience.net/?onglet=recherche&q=tsunami> .

« Epis côtiers - TenCate Geosynthetics », *Geosynthetics*.
<https://www.tencategeo.eu/fr/ouvrages/overview/h8Qg/Epis-côtiers>



ANNEXE 01 : Base de données info-plaza et scripts des évènements extrêmes

Month [UTC]	Day [m/s]	Hour [deg]	u10 [m]	u10d [deg]	Hs [s]	Hsd [s]	Tz [s]	Tm [m]	Tp [deg]	Hs_sea [s]	Hsd_sea [s]	Tz_sea [s]	Tm_sea [m]	Tp_sea [deg]	Hs_swl [s]	Hsd_s [s]
1	1	1	0 2.00	332.0	0.44	12.0	4.54	4.96	5.78	0.01	999.0	999.00	999.00	999.00	0.44	12.0
1	1	1	3 2.40	320.0	0.50	8.0	4.58	4.86	5.69	0.04	352.0	3.26	3.27	3.21	0.50	8.0
1	1	1	6 2.00	346.0	0.61	5.0	4.77	5.03	5.54	0.01	999.0	999.00	999.00	999.00	0.61	5.0
1	1	1	9 1.00	294.0	0.67	1.0	4.89	5.14	5.48	0.01	999.0	999.00	999.00	999.00	0.67	1.0
1	1	1	12 1.80	352.0	0.66	359.0	4.89	5.14	5.49	0.01	999.0	999.00	999.00	999.00	0.66	359.0
1	1	1	15 2.20	4.0	0.59	358.0	4.88	5.13	5.56	0.01	999.0	999.00	999.00	999.00	0.59	358.0
1	1	1	18 3.00	22.0	0.55	1.0	4.97	5.31	5.11	0.14	357.0	3.45	3.49	3.49	0.53	1.0
1	1	1	21 2.60	58.0	0.57	13.0	5.32	5.81	7.45	0.07	359.0	3.25	3.26	3.16	0.56	13.0
1	1	2	0 1.40	100.0	0.58	21.0	5.55	5.98	6.75	0.01	999.0	999.00	999.00	999.00	0.58	21.0
1	1	2	3 2.80	116.0	0.55	23.0	5.49	5.85	6.80	0.08	5.0	3.46	3.48	3.49	0.54	23.0
1	1	2	6 2.80	140.0	0.49	23.0	5.39	5.69	6.26	0.08	13.0	3.51	3.53	3.53	0.49	24.0
1	1	2	9 3.40	136.0	0.45	24.0	5.34	5.59	6.33	0.16	18.0	4.06	4.11	3.93	0.42	25.0
1	1	2	12 3.20	104.0	0.43	27.0	5.44	5.72	6.36	0.13	21.0	3.93	3.98	3.95	0.41	28.0
1	1	2	15 4.60	84.0	0.46	30.0	5.60	5.92	6.32	0.34	29.0	5.06	5.25	5.75	0.30	32.0
1	1	2	18 4.60	92.0	0.45	27.0	5.62	6.02	6.33	0.33	34.0	4.97	5.23	5.76	0.31	19.0
1	1	2	21 4.60	114.0	0.45	23.0	5.30	5.86	6.33	0.34	37.0	4.64	5.00	5.76	0.29	3.0
1	1	3	0 3.60	150.0	0.45	23.0	4.96	5.55	6.97	0.26	48.0	3.81	3.91	4.33	0.36	9.0
1	1	3	3 4.60	158.0	0.39	19.0	5.20	5.69	7.08	0.32	37.0	4.72	5.03	5.85	0.22	342.0
1	1	3	6 3.00	158.0	0.75	130.0	3.64	3.80	3.35	0.16	135.0	3.23	3.26	3.05	0.73	130.0
1	1	3	9 3.40	182.0	0.46	120.0	4.13	4.40	4.31	0.28	139.0	3.66	3.72	3.56	0.37	100.0
1	1	3	12 0.20	136.0	0.29	54.0	4.77	5.19	6.63	0.01	999.0	999.00	999.00	999.00	0.29	54.0

```
!pip install pyextremes
```

```
[ ] # Importing necessary Libraries
import numpy as np
import pandas as pd
import logging
from matplotlib import pyplot as plt
from scipy.stats import genextreme as gev, genextreme
from pyextremes import get_extremes
from pyextremes.plotting import plot_extremes
from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')
```

Mounted at /content/drive

```
[ ] import pandas as pd

series = pd.read_csv("/content/drive/MyDrive/PFE/E.csv", index_col=0, parse_dates=True,).squeeze()
series = (series.sort_index(ascending=True).dropna()).loc[pd.to_datetime("1992/01/01"):pd.to_datetime("2021/12/31")]
series = series - (series.index.array - pd.to_datetime("1992")) / pd.to_timedelta("365.24250") * 2.87e-3
```

```
[ ] print(series)
```

```
Date Hour
1992-01-09 21:00:00    0.829930
1992-01-10 00:00:00    1.069929
1992-01-10 03:00:00    1.009928
1992-01-10 06:00:00    0.959927
1992-01-10 09:00:00    0.939926
...
2021-12-29 06:00:00    1.553916
2021-12-29 09:00:00    1.343915
2021-12-29 12:00:00    1.103914
2021-12-29 15:00:00    0.923913
2021-12-29 18:00:00    0.823912
Name: Hs, Length: 17300, dtype: float64
```

```
[ ] from pyextremes import EVA
model = EVA(series)
```

Annexes

```
[ ] summary = model.get_summary(return_period=[2, 5, 10, 20,30, 50, 100, 200,300,400, 500,600,700,800,900, 1000] ,alpha=0.95, n_samples=30,)
```

```
[ ] print(summary)
```

return period	return value	lower ci	upper ci
2.0	4.551223	4.290446	4.791397
5.0	5.141947	4.854993	5.432806
10.0	5.451012	5.167000	5.779525
20.0	5.704163	5.419732	6.163490
30.0	5.834884	5.51058	6.395303
50.0	5.985884	5.703423	6.676148
100.0	6.171532	5.853569	7.040727
200.0	6.339810	5.977672	7.389683
300.0	6.431689	6.044421	7.587664
400.0	6.494333	6.089679	7.725681
500.0	6.541592	6.123689	7.831428
600.0	6.579393	6.150812	7.917024
700.0	6.610812	6.173301	7.988850
800.0	6.637642	6.192467	8.050678
900.0	6.661020	6.209140	8.104922
1000.0	6.681711	6.223873	8.153218

```
[ ] from scipy.interpolate import make_interp_spline
import scipy.stats as stats
# Extract columns to plot
return_period=[2, 5, 10, 20,30, 50, 100, 200,300,400, 500,600,700,800,900, 1000]
```

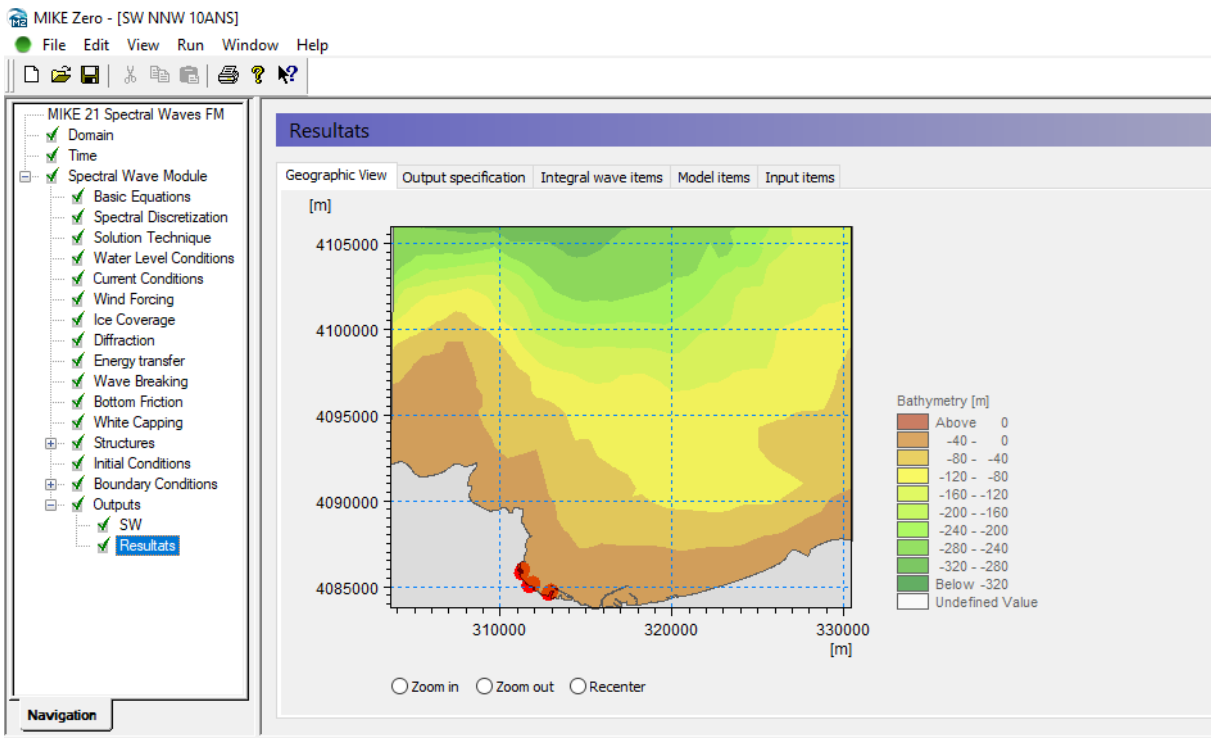
ANNEXE 02 : Création de la bathymétrie via l’Arc GIS

The screenshot shows the ArcMap interface with a bathymetric map of the Golfe de Stora area. The map displays depth contours and various geographical features. A 'Table' window is open, showing a 'New Shapefile' with columns for FID, Shape, Id, X, Y, and Z. The Z column contains depth values ranging from -14 to -50. The map interface includes a toolbar, a 'Table of Contents' panel, and a 'Layers' panel.

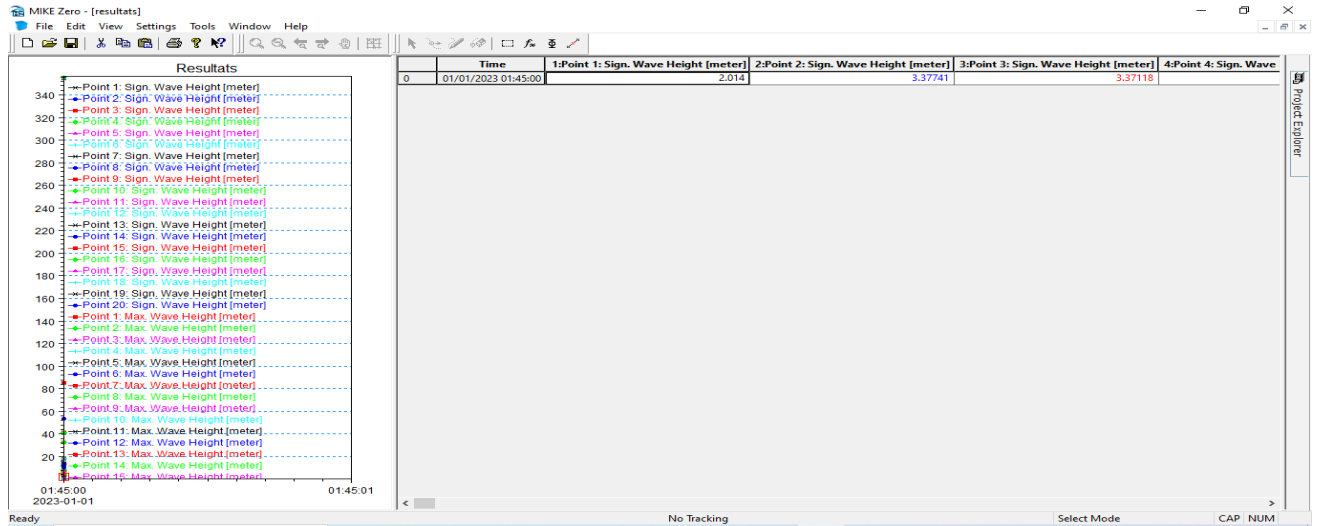
FID	Shape	Id	X	Y	Z
6	Point	0	329892.060995	4088591.7411	-14
4	Point	0	329349.664077	4089226.74237	-31
5	Point	0	329283.518112	4088790.179	-26
7	Point	0	329230.601339	4088155.17773	-8
2	Point	0	329165.778293	4090042.98359	-42
3	Point	0	329098.309408	4089570.70139	-40
0	Point	0	329017.61133	4090974.31878	-50
8	Point	0	329005.705056	4087612.78081	-2

FID	Shape *	Id	X	Y	Z
6	Point	0	329892,060995	4088591,7411	-14
4	Point	0	329349,664077	4089226,74237	-31
5	Point	0	329283,518112	4088790,179	-26
7	Point	0	329230,601339	4088155,17773	-8
2	Point	0	329165,778293	4090042,98359	-42
3	Point	0	329098,309408	4089570,70139	-40
0	Point	0	329017,61133	4090974,31878	-50
8	Point	0	329005,705056	4087612,78081	-2
1	Point	0	328922,361139	4090550,9846	-46
13	Point	0	328608,829262	4088591,7411	-29
14	Point	0	328463,308138	4087282,05098	-2
11	Point	0	328278,099434	4090113,09831	-51
12	Point	0	328066,432344	4089226,74237	-46
10	Point	0	327973,827992	4090562,69088	-62
18	Point	0	327960,598799	4087758,30193	-13
17	Point	0	327828,306868	4088221,32369	-25
19	Point	0	327748,931709	4087096,84228	-2
16	Point	0	327643,098164	4089702,99332	-54
9	Point	0	327550,493812	4090946,53748	-82
20	Point	0	327325,597529	4088525,59513	-33
21	Point	0	327218,441065	4088913,21049	-47
22	Point	0	327011,615144	4087273,2864	-8
15	Point	0	326889,034156	4090390,91137	-77
23	Point	0	326774,812587	4088076,29842	-33
32	Point	0	326663,687365	4086695,17066	-2
24	Point	0	326473,186984	4089139,92555	-65
25	Point	0	326362,061761	4089743,17676	76
26	Point	0	326108,061253	4088473,17422	-54
31	Point	0	326044,561126	4087504,79728	-22
33	Point	0	326012,811063	4086790,42085	-6
28	Point	0	325949,310936	4090028,92733	-85
35	Point	0	325806,43665	4086345,91996	-1
27	Point	0	325711,18546	4089489,17625	-78
34	Point	0	325536,56011	4087139,67155	-20
30	Point	0	325330,184698	4091298,92987	-96
29	Point	0	325266,684571	4090616,3035	-91
36	Point	0	325139,684317	4086647,54557	-6
38	Point	0	325139,684317	4087695,29766	-33
45	Point	0	324774,558586	4086250,66977	-4
39	Point	0	324457,057951	4088647,79957	-67
37	Point	0	324377,682793	4086885,67104	-22
42	Point	0	324282,432602	4090727,42873	-82
41	Point	0	324218,932475	4089997,17727	-82
40	Point	0	324187,182412	4089235,17574	75
43	Point	0	324187,182412	4091171,92962	-89

ANNEXE 03 : carte input au logiciel pour simulation mike 21



Annexes





Résumé

Résumé

Dans ce modeste mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en gestion et protection du littoral, nous avons choisi la protection de la route côtière de « Stora-Skikda » comme thème et traité les principales étapes d'une étude d'aménagement maritime. Pour faire, nous avons commencé par une analyse des événements extrêmes via le langage Google coolab puis des traitements à l'aide du logiciel Mike 21 avec le modèle SW afin d'obtenir des résultats qui vont faciliter l'étude de la réfraction de la houle, Les résultats obtenus vont constituer un outil de prise de décision dans notre étude pour définir les dimensionnements nécessaires pour la construction de l'ouvrage de protection de notre route en question

Mots clés : stora, réfraction, modélisation numérique, événements extrêmes.

ملخص

في هذه الأطروحة المتواضعة لمشروع نهاية الدراسات للحصول على شهادة الهندسة في إدارة وحماية السواحل، اخترنا حماية الطريق الساحلي "ستورا - سكيكدة" كموضوع وعالجنا المراحل الرئيسية لدراسة التنمية البحرية. وللقيام بذلك بدأنا بتحليل الأحداث من أجل الحصول على نتائج من SW بنموذج Mike 21 ثم معالجتها باستخدام برنامج Google Coolab المتوفرة عبر لغة شأنها تسهيل دراسة انكسار الموجة، والنتائج التي تم الحصول عليها ستشكل قراراً. -صنع أداة في دراستنا لتحديد الأبعاد اللازمة لبناء الهيكل الوقائي لطريقنا المعني

الترجمة الحرفية: ستورا ، انكسار , نموذج رقمي , أحداث استثنائية

Abstract

In this humble final project report for the engineering degree in coastal management and protection, we chose the protection of the coastal road "Stora-Skikda" as our topic and discussed the main stages of a maritime planning study.To do this, we started by analyzing extreme events using the Google coolab language, then we processed the data using the Mike 21 software with the SW model to obtain results that will facilitate the study of wave refraction. The results obtained will constitute a decision-making tool in our study to define the necessary dimensions for the construction of the protection facility for our road in question.

Keywords: Stora, refraction, numerical modeling, extreme events

