

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

École Nationale Supérieure des Sciences De La Mer et de L'Aménagement du Littoral



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

Option : Gestion et Protection du Littoral

Thème :

**Evaluation de la vulnérabilité du littoral de la wilaya d'El  
Tarf face aux Géo-risques Côtiers.**

Présenté par :

- Labiod Mouna El Ghalia
- Hadji Meriem

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

Mme. FEZZAA N.	Professeur - ENSSMAL	Présidente
M. SALLAY M.	MCB- U.F.A. Setif	Promoteur
M. MEZOUAR K.	Professeur - ENSSMAL	Co-Promoteur
Mme SALEM CHRIF Y.	Maitre conférence - ENSSMAL	Examinatrice

Année universitaire : 2024/2025

## **Remerciements**

*A l'issue de ce parcours universitaire, nous rendons grâce à Dieu, le Tout-Puissant, qui nous a accordé la chance de poursuivre nos études et d'achever ce mémoire dans de bonnes conditions.*

*La réalisation de ce mémoire n'aurait pas été possible sans le soutien constant, les conseils éclairés, les orientations pertinentes et l'appui scientifique précieux de notre promoteur, **Monsieur SALLAYE.M.**, ainsi que de notre Co-promoteur, **Monsieur MEZOUAR. K.**, que nous remercions vivement.*

*Nos profonds remerciements vont aussi au président de jury **Mme FEZZAA. N** pour avoir accepté de présider le Jury de la soutenance du mémoire de fin d'études et, à **Mme SALEM CHERIF. Y** pour l'honneur qu'elle nous a fait d'examiner ce modeste travail. Nous tenons à adresser nos plus sincères remerciements à **Monsieur BELLOULOU. B.** dont la thèse de doctorat a constitué une source précieuse et inspirante pour nos recherches.*

*Nous saisissons enfin cette occasion pour adresser notre profonde gratitude à l'ensemble des enseignants de **L'ENSSMAL**, ainsi qu'à toutes les personnes qui nous ont soutenus dans l'accomplissement de ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre sincère reconnaissance.*

*Que tous ceux qui ont participé, de près ou de loin, à l'élaboration de ce mémoire trouvent ici l'expression de nos vifs remerciements.*

## Dédicace

*Je dédie ce modeste mémoire à mes chers parents qui ont été toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenue tout au long de ces longues années d'étude.*

*Que dieu les protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.*

*À mon cher frère Mohamed.*

*À ma très chère tante Aicha, qui m'a encouragée durant mon chemin d'étude.*

*À toute ma famille*

*Et à tous mes amis.*

**Mouna**

## Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à*

*Mon très cher père, Ahcen et, à ma très chère maman, Sabah qui ne cessent jamais de me donner avec amour le soutien moral et matériel nécessaire à ma réussite dans mes études.*

*Qu'ils trouvent en moi la source de leur fierté et de leur bonheur éternel.*

*A mes sœurs, Imen et Haoua. A mon petit frère, Amine.*

*A mon cher oncle, Berkani Yakoub.*

*A tous mes amis, en particulier Yahi Ahmed, en qui j'ai trouvé l'appui continu.*

*A ma promotion GPL, 2024/2025*

**Meriem Hadji**

# Table de matière

<b>Introduction générale :</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralité</b>	<b>2</b>
I.1 LE SYSTEME LITTORAL :	3
I.2 CHANGEMENTS CLIMATIQUES :	3
I.2.1 <i>Cinquième rapport du GIEC 2021-2022 :</i>	3
I.3 L'ÉROSION COSTIÈRE :	4
I.3.1 <i>Comment le changement climatique aggrave ce phénomène :</i>	4
I.4 SUBMERSION MARINE :	5
<b>Chapitre II : Généralité sur la zone d'étude</b>	<b>6</b>
II.1 PRESENTATION DE LA WILAYA D'ÉL TARF :	8
II.1.1 <i>Situation géographique :</i>	8
II.1.2 <i>Les richesses naturelles et culturelles de la wilaya :</i>	9
II.2 LA GÉOLOGIE DE LA RÉGION :	10
II.2.1 <i>Litho stratigraphie :</i>	10
II.3 LES CARACTÉRISTIQUES GÉOMORPHOLOGIQUES :	11
II.3.1 <i>Le cordon dunaire :</i>	11
II.3.2 <i>Les lacs et les marécages :</i>	12
II.3.3 <i>Les Oueds :</i>	13
II.4 ÉTUDE CLIMATIQUE :	13
II.4.1 <i>Température :</i>	14
II.4.2 <i>Précipitations :</i>	14
II.4.3 <i>Le vent :</i>	15
II.5 ÉTUDE OcéANOGRAPHIQUE :	18
II.5.1 <i>La houle :</i>	18
II.5.2 <i>La marée :</i>	21
II.5.3 <i>Niveau de la mer :</i>	21
<b>Conclusion :</b>	<b>22</b>
<b>Chapitre III : événements extrêmes</b>	<b>23</b>
III.1 INTRODUCTION :	24
III.2 THÉORIE DES VALEURS EXTREMES :	24
III.2.1 <i>Hauteur significative :</i>	26
III.2.2 <i>La période pic :</i>	26
III.3 METHOD PEAKS OVER THRESHOLD (POT):	27
<b>Conclusion :</b>	<b>32</b>
<b>Chapitre IV : Modélisation hydrodynamique</b>	<b>33</b>
IV.1 INTRODUCTION :	34
IV.2 DESCRIPTION DU MIKE 21 :	34
IV.2.1 <i>Mike 21 Spectral Wave (SW) :</i>	34
IV.2.2 <i>Mike 21 hydrodynamique (HD) :</i>	36
IV.3 MÉTHODE DE TRAVAIL :	38
IV.3.1 <i>Les données bathymétriques :</i>	38
IV.3.2 <i>Génération de la Mesh :</i>	38
IV.3.3 <i>Mesh résultante :</i>	39
IV.3.4 <i>Bathymétrie résultante :</i>	39

IV.4	SCENARIO DE SIMULATION :	40
IV.5	RESULTATS DES SIMULATIONS :	41
IV.5.1	<i>Résultats et discussion des simulations pour la wilaya d'El Tarf :</i>	41
IV.5.1.1	Période de retour de 2 ans :	44
IV.5.1.2	Période de retour de 10 ans :	46
IV.5.1.3	Période de retour de 50 ans :	48
IV.5.1.4	Période de retour de 100 ans :	50
<b>Conclusion :</b>		<b>52</b>
<b>Chapitre V : Evolution Spatio-temporelle du trait de côte.....</b>		<b>53</b>
V.1	INTRODUCTION :	54
V.1.1	<i>Définition du trait de côte :</i>	54
V.2	METHODOLOGIE :	54
V.2.1	<i>Présentation des outils numériques :</i>	56
V.2.1.1	Google earth pro :	56
V.2.1.2	ArcGIS Version 10.8 :	57
V.2.1.3	Le digital shoreline analysis system « DSAS » :	57
V.3	INTERPRETATION DES RESULTATS :	58
V.3.1	<i>Evolution du trait de cote à une échelle pluriannuelle (1985-1995) :</i>	59
V.3.2	<i>Evolution du trait de cote à une échelle pluriannuelle (1995-2015) :</i>	61
V.3.3	<i>Evolution du trait de cote à une échelle pluriannuelle (2015-2024) :</i>	63
V.3.4	<i>Evolution du trait de cote à une échelle pluriannuelle (1985-2024) :</i>	65
<b>Conclusion :</b>		<b>68</b>
<b>Chapitre VI : Submersion marine.....</b>		<b>69</b>
VI.1	INTRODUCTION :	70
VI.2	LA SUBMERSION MARINE :	70
VI.3	METHODOLOGIE DE SIMULATION DE SUBMERSION MARINE :	72
VI.3.1	<i>Niveaux d'eau extrêmes :</i>	73
VI.3.1.1	Evaluation des niveaux d'inondation :	73
VI.3.2	<i>Variation du niveau de la mer en fonction de la pression atmosphérique :</i>	73
VI.3.3	<i>Niveau moyen des hautes eaux :</i>	74
VI.3.4	<i>Les houles extrêmes à la côte :</i>	74
VI.4	RESULTATS D'APPLICATION :	74
VI.4.1	<i>Scénarios d'inondations :</i>	74
VI.4.2	<i>Evaluation des terres à risque de submersion :</i>	74
VI.4.2.1	Submersion à 1 m :	76
VI.4.2.2	Submersion à 2 m :	76
VI.4.2.3	Submersion à 3 m :	77
VI.4.2.4	Submersion à 4 m :	77
VI.4.2.5	Submersion à 5 m :	78
VI.4.2.6	Submersion à 6 m :	78
<b>Conclusion :</b>		<b>79</b>
<b>Conclusion générale.....</b>		<b>80</b>
<b>Références Bibliographique :</b>		<b>81</b>

## Liste des figures :

FIGURE 1 : CARTE DE LA SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE.....	8
FIGURE 2 : TYPOLOGIE DE LA COTE D'EL TARF. ....	12
FIGURE 3 : DIAGRAMME DES TEMPERATURES DE LA WILAYA D'EL TARF. (DATA : 1992 - 2022 CLIMATE-DATA.ORG).....	14
FIGURE 4 : DIAGRAMME DES PRECIPITATIONS DE LA WILAYA D'EL TARF. (DATA : 1992 - 2022 CLIMATE-DATA.ORG).....	15
FIGURE 5 : ROSES MENSUELLES DES VENTS AU LARGE DE LA WILAYA D'EL TARF (1992-2022) (WWW.WAVECLIMATE.COM). ....	16
FIGURE 6 : ROSES TRIMESTRIELLES DES VENTS AU LARGE DE LA WILAYA D'EL TARF (1992-2022) (WWW.WAVECLIMATE.COM). ....	17
FIGURE 7 : ROSES MENSUELLES DES HOULES AU LARGE DE LA WILAYA DE TARF (1992-2022) (WWW.WAVECLIMATE.COM). ....	19
FIGURE 8 : ROSES TRIMESTRIELLES DES HOULES AU LARGE DE LA WILAYA D'EL TARF (1992-2022) (WWW.WAVECLIMATE.COM). ....	20
FIGURE 9 : SCHEMA REPRESENTATIF DES METHODES BLOCKS MAXIMA ET POT. ....	25
FIGURE 10 : REPRESENTATION DU SPECTRE DES HAUTEURS DE HOULE ENREGISTREES (EL TARF). ....	26
FIGURE 11 : REPRESENTATION DU SPECTRE DES PERIODES DE HOULE ENREGISTREES (EL TARF). ....	26
FIGURE 12 : MOYENNE RESIDUELLE DE LA SERIE DES HAUTEURS OMNIDIRECTIONNELLE DE L'ENREGISTREMENT. ....	27
FIGURE 13 : REPRESENTATION DE METHODE POT SUR LES HAUTEURS DE HOULE DE (1992 – 2022).....	28
FIGURE 14 : ESTIMATION DES EVENEMENTS EXTREMES VIA LA METHODE POT POUR OMNIDIRECTIONNEL. ....	28
FIGURE 15 : ESTIMATION DES EVENEMENTS EXTREMES VIA LA METHODE POT POUR CHAQUE DIRECTION.....	30
FIGURE 16 : MAILLAGE DE LA MESH A L'ECHELLE DE LA WILAYA D'EL TARF. ....	39
FIGURE 17 : CARTE BATHYMETRIQUE DE LA WILAYA D'EL TARF. ....	40
FIGURE 18 : CHAMPS DES HOULES DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION NW (2ANS) ....	44
FIGURE 19 : CHAMPS DES HOULES DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION N (2ANS).....	44
FIGURE 20 : CHAMPS DES HOULES DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION NNE (2ANS).....	44
FIGURE 21 : CHAMPS DES COURANTS DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION NW (2ANS).....	45
FIGURE 22 : CHAMPS DES COURANTS DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION N (2ANS) ....	45
FIGURE 23 : CHAMPS DES COURANTS DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION NNE (2ANS) ....	45
FIGURE 24 : CHAMPS DES HOULES DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION NW (10ANS) ....	46
FIGURE 25 : CHAMPS DES HOULES DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION N (10ANS).....	46
FIGURE 26 : CHAMPS DES HOULES DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION NNE (10ANS).....	46
FIGURE 27 : CHAMPS DES COURANTS DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION NW (10ANS) ....	47
FIGURE 28 : CHAMPS DES COURANTS DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION N (10ANS) ....	47
FIGURE 29 : CHAMPS DES COURANTS DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION NNE (10ANS).....	47
FIGURE 30 : CHAMPS DES HOULES DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION NW (50ANS) ....	48
FIGURE 31 : FIGURE 31 : CHAMPS DES HOULES DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION N (50ANS).....	48
FIGURE 32 : CHAMPS DES HOULES DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION NNE (50ANS).....	48
FIGURE 33 : CHAMPS DES COURANTS DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION NW (50ANS).....	49
FIGURE 34 : CHAMPS DES COURANTS DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION N (50ANS) ....	49
FIGURE 35 : CHAMPS DES COURANTS DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION NNE (50ANS).....	49
FIGURE 36 : CHAMPS DES HOULES DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION NW (100ANS) ....	50
FIGURE 37 : CHAMPS DES HOULES DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION N (100ANS) ....	50
FIGURE 38 : CHAMPS DES HOULES DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION NNE (100ANS).....	50
FIGURE 39 : CHAMPS DES COURANTS DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION NW (100ANS).....	51
FIGURE 40 : CHAMPS DES COURANTS DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION N (100ANS) ....	51
FIGURE 41 : CHAMPS DES COURANTS DANS LA WILAYA D'EL TARF POUR LA DIRECTION NNE (100ANS).....	51
FIGURE 42 : CARTE DE TRANSECT ET POSITION DE LA LIGNE DE RIVAGE A DIFFERENTES PERIODE. ....	55

FIGURE 43 : ORGANIGRAMME DE LA METHODOLOGIE (DAMODAR, 2023).	56
FIGURE 44 : EVOLUTION SPATIOTEMPORELLE DU TRAIT DE COTE DE LITTORAL D'EL TRAF DURANT LA PERIODE (1985-1995).	60
FIGURE 45 : EVOLUTION SPATIOTEMPORELLE DU TRAIT DE COTE DE LITTORAL D'EL TRAF DURANT LA PERIODE (1995-2015).	62
FIGURE 46 : EVOLUTION SPATIOTEMPORELLE DU TRAIT DE COTE DE LITTORAL D'EL TRAF DURANT LA PERIODE (2015-2024).	64
FIGURE 47 : EVOLUTION SPATIOTEMPORELLE DU TRAIT DE COTE DE LITTORAL D'EL TRAF DURANT LA PERIODE (1985-2024).	66
FIGURE 48 : PHENOMENE DE VAGUES-SUBMERSION LIE A UNE TEMPETE (SYMADEM; 2023).	70
FIGURE 49 : MODES DE SUBMERSION MARINE (CREDIT DREAL HDF, 2014).	71
FIGURE 50 : PROCESSUS PHYSIQUES EN ACTION LORS D'UNE TEMPETE : AGITATION ET SURELEVATION DU PLAN D'EAU (BRGM, 2012).	72
FIGURE 51 : LE MODELE NUMERIQUE DU TERRAIN DE LA WILAYA D'EL TRAF.	73
FIGURE 52 : LES ZONES INONDABLES AVEC DES NIVEAUX DE SUBMERSION DE 1M, 2M, 3M, 4M, 5M ET 6M.	75
FIGURE 53 : SUPERFICIES DES TERRES INONDEES (EN HECTARES) POUR LES DIFFERENTS NIVEAUX D'INONDATIONS.	75
FIGURE 54 : LES ZONES INONDABLES AVEC UN NIVEAU DE SUBMERSION DE 1 M.	76
FIGURE 55 : LES ZONES INONDABLES AVEC UN NIVEAU DE SUBMERSION DE 2 M.	76
FIGURE 56 : LES ZONES INONDABLES AVEC UN NIVEAU DE SUBMERSION DE 3 M.	77
FIGURE 57 : LES ZONES INONDABLES AVEC UN NIVEAU DE SUBMERSION DE 4 M.	77
FIGURE 58 : LES ZONES INONDABLES AVEC UN NIVEAU DE SUBMERSION DE 5 M.	78
FIGURE 59 : LES ZONES INONDABLES AVEC UN NIVEAU DE SUBMERSION DE 6 M.	78

## Liste des Tableaux :

TABLEAU 2 : MOYENNES ANNUELLES DES DEBITS LIQUIDES ET VOLUMES DES PRINCIPAUX OUEDS TRAVERSENT LA WILAYA D'EL TARF (S.LABAR 2003) .....	13
TABLEAU 3 : TABLEAU RESUMANT L'ENSEMBLE DES RESULTATS OBTENU PAR LA METHODE POT (WILAYA D'EL TARF).....	31
TABLEAU 4 : SIGNIFICATION DES SYMBOLES. ....	36
TABLEAU 5 : DES INPUTS DES SIMULATIONS POUR L'ENSEMBLE DES PERIODES DE RETOURS.....	41
TABLEAU 6 : CLASSIFICATION DES VALEURS DE CHANGEMENT DU TRAIT DE COTE A PARTIR DES PARAMETRES EPR. ....	58
TABLEAU 7 : EVOLUTION SPATIOTEMPORELLE DU TRAIT DE COTE DE LITTORAL D'EL TRAF DURANT LA PERIODE (1985-2024).....	67
TABLEAU 8 : LES RESULTATS DES HOULES EXTREMES A LA COTE. ....	74
TABLEAU 9 : NIVEAUX D'INONDATIONS EXTREMES.....	74

## **Liste des acronymes :**

**POT** : Peak-Over-Threshold.

**GIEC** : Groupe Intergouvernemental d'Evaluation du Climat.

**WGS** : World Geodesic System.

**UTM** : Universal Transverse Mercator.

**DSAS** : Digital Shoreline Analysis System.

**HD** : Hydrodynamique.

**SW** : Spectral Wave.

**Hs** : Hauteur Significative.

**MNT** : Modèle Numérique du Terrain.

**EPR** : End Point Rate.

**NSM** : Net Shoreline Movement.

**SIG** : System d'Information Géographique.

**DHI** : Institut Danois d'Hydraulique.

**LRR** : Linear Regression Rate.

## Introduction générale :

---

Les zones côtières, situées à l'interface entre les milieux terrestre et marin, sont unanimement reconnues comme des espaces d'une grande sensibilité, soumis à des pressions anthropiques considérables. Tant dans les pays en développement que dans les États industrialisés, ces territoires littoraux subissent, depuis plusieurs décennies, une dynamique d'urbanisation et de croissance démographique soutenue. Cette évolution s'accompagne de mutations spatiales majeures, de dégradations environnementales marquées, ainsi que de l'intensification de conflits d'usage entre les différents acteurs du littoral (BELLOULOU, 2024).

L'évaluation de la vulnérabilité du littoral face aux risques côtiers est une préoccupation majeure dans le domaine de la gestion des risques naturels. Les côtes sont des zones particulièrement sensibles aux phénomènes naturels tels que les tempêtes, les marées, l'érosion, les submersions marines et les tsunamis. Comprendre la façon dont ces risques affectent les littoraux et évaluer la vulnérabilité des populations et des infrastructures est essentiel pour une planification et une prise de décision efficaces en matière de gestion des risques côtiers.

Dans le cadre de notre étude portant sur la wilaya d'El Tarf, des phénomènes d'érosion et de submersion ont été observés. L'objectif principal de cette recherche est d'identifier et d'analyser les facteurs majeurs responsables des dégradations du littoral, en vue d'évaluer la vulnérabilité côtière de la wilaya d'El Tarf face aux géo-risques côtiers.

Dans le Chapitre I, présente généralité, ou ont abordé les phénomènes de changement climatique, érosion côtière, submersion et de l'inondation de manière générale.

Le chapitre II, présente la zone d'étude en détaillant ses caractéristiques hydrodynamiques, climatiques et géologiques. Cette approche vise à fournir un cadre de référence nécessaire à la compréhension et à la conceptualisation des analyses qui suivront.

Pour le Chapitre III, nous estimerons des événements extrêmes via la théorie des valeurs extrêmes (POT).

Le Chapitre IV, porte sur la modélisation numérique, qui joue un rôle essentiel dans la prévision des impacts futurs du changement climatique ainsi que des événements extrêmes liés aux houles et aux courants côtiers. Dans le cadre de cette étude, le logiciel MIKE 21 a été utilisé pour simuler et évaluer différents scénarios de périodes de retour et de directions de houle.

Le chapitre V, s'attache à l'analyse de l'évolution historique du trait de côte à l'aide de l'outil DSAS intégré au logiciel ArcGIS. Cette analyse permet d'évaluer les dynamiques de recul ou d'accrétion du littoral et de repérer les zones les plus affectées par l'érosion côtière.

Enfin, le Chapitre VI sera consacré à la cartographie de l'aléa de la submersion marine.

# **Chapitre I : Généralité**

## I.1 Le système littoral :

Le système littoral fait référence à l'ensemble des interactions entre les différents composants naturels (comme les plages, les falaises, les dunes, les estuaires) et artificiels (comme les ports, les digues, les jetées) situés le long de la côte. Ces interactions incluent les processus physiques (comme l'érosion, la sédimentation), biologiques (comme la faune et la flore) et anthropiques (comme les activités humaines et les constructions) **(Paskoff, 1998)**.

La compréhension et la délimitation de la zone littorale revêtent une importance capitale pour de nombreux scientifiques, ingénieurs et gestionnaires. Toutefois, la définition du changement littoral varie selon les disciplines, ce qui complique sa délimitation. Cette difficulté est accentuée par la dynamique constante de la bande côtière, soumise à des interactions complexes entre l'hydrosphère, la lithosphère et l'atmosphère. C'est dans ce contexte qu'a émergé la notion de « système côtier », visant à mieux cerner la zone littorale et les interactions qui s'y déroulent **(Salem cherif, 2023)**.

## I.2 Changements climatiques :

En raison du réchauffement planétaire, le comportement des masses d'air de l'atmosphère est modifié ce qui provoque le changement climatique. Les modifications des régimes climatiques entraînent une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques extrêmes, ainsi qu'une élévation du niveau de la mer **(GIEC, 2021)**. Cette élévation aurait principalement pour effet d'accélérer les changements littoraux qui se produisent actuellement. Les conséquences les plus attendues incluent une augmentation des submersions temporaires ou permanentes dans les espaces côtiers bas, ainsi qu'une accélération du phénomène d'érosion affectant les plages et les falaises... **(Khouakhi, Snoussi, Niazi, et Raji, 2012)**.

Les activités humaines génèrent des émissions qui augmentent les concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone, méthane, et l'oxyde d'azote. Ces augmentations renforcent l'effet de serre, ce qui provoque en moyenne un réchauffement supplémentaire de la surface de la terre **(Houghton, Jenkins, et Ephraums, 1990)**.

### I.2.1 Cinquième rapport du GIEC 2021-2022 :

À l'issue de six cycles d'évaluation du climat, le sixième rapport du GIEC, intitulé Changement climatique 2021-2022, apporte des preuves incontestables de l'impact de l'activité humaine sur le réchauffement de l'atmosphère, des océans et des terres émergées. De nombreux bouleversements du système climatique sont sans précédent depuis des millénaires, voire des millions d'années : hausse des températures atmosphériques et océaniques, réduction drastique de la couverture neigeuse et de la banquise, élévation accélérée du niveau marin, et augmentation des concentrations de gaz à effet de serre. Il est désormais indiscutable que l'activité humaine constitue la principale cause du réchauffement constaté depuis le milieu du VI siècle. Le rapport souligne que les émissions passées et futures de gaz à effet de serre conditionneront l'ampleur des changements climatiques à venir.

Chacune des trois dernières décennies s'est avérée plus chaude que toutes les précédentes depuis 1850. Fruit de la collaboration de centaines de scientifiques à travers le monde, ce rapport synthétise l'état actuel des connaissances sur le changement climatique. Ses conclusions, particulièrement préoccupantes, appellent à des mesures urgentes et ambitieuses de la part des décideurs et de l'ensemble de la société afin d'en limiter les effets dévastateurs (GIEC, 2021).

### I.3 L'érosion côtière :

L'érosion côtière désigne l'ensemble des processus naturels ou anthropiques qui contribuent à l'altération, au recul ou à la disparition progressive du trait de côte. Elle résulte principalement de l'action des agents marins (vagues, courants, marées) mais peut être amplifiée par les activités humaines (aménagements, extraction de matériaux, urbanisation littorale) (Benali, 2014).

Plusieurs éléments peuvent entraîner cette érosion sans être compensés par l'apport de l'engraissement local : des facteurs planétaires comme la légère élévation du niveau des océans et les phénomènes de rééquilibrage isostatique, ainsi que des facteurs locaux tels que la perturbation de l'équilibre entre l'érosion et la disponibilité de sédiments : conditions hydrodynamiques, courants marins, altération mécanique due à la pression exercée par les mouvements de l'eau (impact des vagues et de la houle) notamment lors des marées importantes et des tempêtes intenses, sources d'eau douce, ruissellement lié à l'érosion des sols favorisée par diverses activités humaines telles que l'urbanisation et l'imperméabilisation des sols, circulation de véhicules, piétinement excessif par les randonneurs, réduction des apports de sables provenant de la construction de barrages dans les bassins versants des cours d'eau ou de leur extraction, installation d'infrastructures de protection perturbant le transport des sédiments, déforestation et nettoyage excessif de la végétation qui contribue à la stabilité des sols.

#### I.3.1 Comment le changement climatique aggrave ce phénomène :

L'érosion des côtes s'aggrave avec le changement climatique qui accentue la montée des eaux et modifie le régime des tempêtes. En cause :

- La **dilatation de l'océan**. Comme la température de la mer s'élève, les molécules d'eau prennent plus de place, la mer se dilate et son niveau s'élève.
- La **fonte des glaces** continentales, glaciers et calottes glaciaires : les apports en eau douce de ces fontes font monter le niveau de la mer.

La mer monte de plus en plus vite. En 30 ans, le rythme a presque doublé. Son niveau s'est élevé de 20 cm depuis 1900. Cette hausse favorise la propagation des vagues de forte énergie sur le littoral.

#### À quoi s'attendre d'ici 2050 et au-delà ?

D'après le GIEC, le niveau de la mer continuera d'augmenter pendant des siècles. Cette montée du niveau marin n'est pas homogène sur l'ensemble du globe. Les estimations moyennes actuelles sont de l'ordre de :

- 30 à 60 cm environ d'ici 2100 selon une hypothèse optimiste.
- 60 à 110 cm dans un scénario pessimiste d'ici 2100.

Notre capacité à contenir le réchauffement climatique en réduisant nos émissions de gaz à effet de serre influencera ces niveaux **Centre de ressources pour l'adaptation au changement climatique (2024)**.

#### **I.4 Submersion marine :**

La submersion marine est définie comme une inondation temporaire de la zone côtière par les eaux marines. Elle résulte d'une élévation temporaire du niveau de la mer, pouvant être causée soit par des phénomènes météorologiques tels que les dépressions atmosphériques (cyclones, tempêtes), soit par des phénomènes géologiques (tremblements de terre, éruptions volcaniques...) (**Breilh, 2014**).

Sur les espaces côtier, Les tempêtes engendrent deux principaux phénomènes (**Nielsen2009, Sallenger, 2000**) : (1) une augmentation anormale du niveau moyen de l'eau causée par l'effet combiné de la pression atmosphérique minimal et de vents forts soufflant vers la cote, ce que l'on appelle une onde de tempête, (2) En plus, les vagues qui se brisant sur les côtes exposées entraînent une élévation du niveau moyen de l'eau au-dessus de celui des eaux calmes de la mer « **Wave set-up** », et un « **Swash** » : c'est l'eau qui atteint sur le rivage après le déferlement d'une vague entrante ( **Brice et al., 2011**).

## **Chapitre II : Généralité sur la zone d'étude**

## II.1 Présentation de la wilaya d'El Tarf :

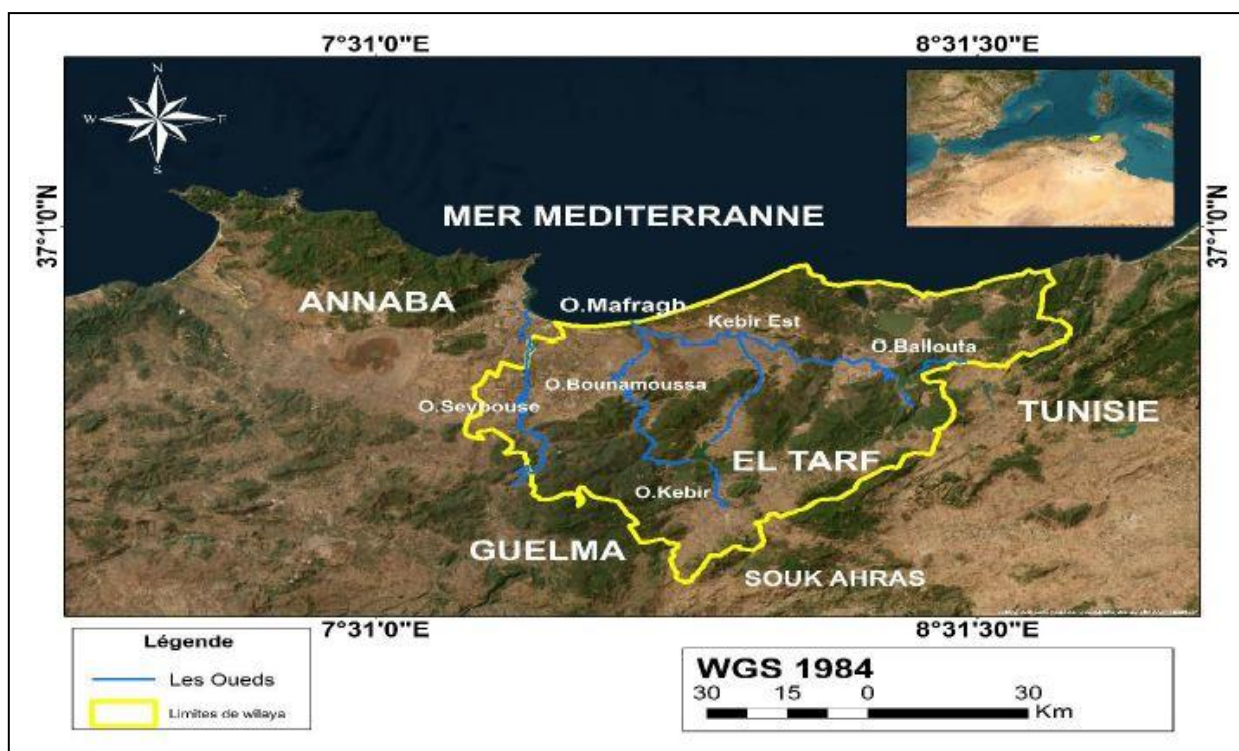
### II.1.1 Situation géographique :

La wilaya d'El Tarf, située à l'extrême Nord-Est de l'Algérie à la frontière avec la Tunisie. Sa superficie totale est de 2912,65 km<sup>2</sup>. El Kala est une ville portuaire de cette wilaya abrite le parc national d'El Kala et le lac Mellah. El Tarf est la capitale. Sa population était d'environ 495 685 habitants fin 2021.

Elle est composée de 7 daïras (El Tarf, El Kala, Ben M'hidi, Besbes, Dréan, Bouhadjar et Boutheldja) et de 24 communes.

Au Nord, elle est limitée par la mer méditerranée, au Sud et au Sud-Ouest par les wilayas de Souk-Ahras et de Guelma, à l'Est par la frontière algéro-tunisienne et à l'Ouest par la wilaya d'Annaba (**Figure 1**). Son territoire se distingue par une diversité de reliefs, tous rattachés à la chaîne tellienne. Parmi eux, on retrouve les reliefs de Guelma au sud-ouest, ainsi que ceux de Boucheouf, Bou Hadjar et les monts de la Medjerda au sud.

Cette wilaya est localisée entre la latitude 36° 46'02''N et la longitude 8°18'50'' E. Elle s'étend approximativement jusqu'à la latitude 37° 1'00''N et la longitude 8° 31'30''E.



**Figure 1** : Carte de la situation géographique de la zone d'étude.

Le littoral de la wilaya d'El Tarf s'étend sur environ **90 km**, comprenant à la fois une **zone maritime** et un **plateau continental** délimité par l'isobathe des **-110 mètres**, pouvant atteindre une largeur de **21 km au large (BELLOULOU, 2015)**, Cette façade maritime située à environ **77 km à l'est de la ville d'Annaba**, elle est délimitée à l'ouest par le **cap Rosa** (8°14' Est, 36°56' Nord) et à l'est par le **cap Roux** (8°36' Est, 36°56' Nord) (**Mezouar Khoudir, 2022**). Le littoral comprend 05 communes qui sont réparties entre deux daïras : la daïra d'El Kala qui comprend les communes côtières d'El Kala et Souarekh, ainsi la daïra de Ben M'hidi, regroupant les communes littorales de Ben M'hidi, Echatt et Berrihane. Ces communes couvrent une superficie totale de 806 km<sup>2</sup>, soit 28% du territoire de la wilaya ce qui indique un fort potentiel côtier. La wilaya compte une vingtaine de plages officielles. Certaines d'entre elles, ont une réputation reconnue, à l'instar de Cap Rosa, la Messida, la vieille Calle et, surtout celle d'El-Hannaya. Les plus longues du littoral à partir de l'ouest, sont celles d'Echatt, puis viennent celles d'El Batah à l'embouchure de la Mafragh, de Draouch près de Sebbaâ, celle de Hennaya avant de pénétrer complètement dans la région d'El Kala, ensuite la plage du Cap Rosa ou celle de la vieille Calle avant d'arriver enfin à El Kala où se trouvent la plage dite de l'usine ou d'El Mordjane et la grande plage (**BAHROUN, 2006**).

### II.1.2 Les richesses naturelles et culturelles de la wilaya :

El Tarf est connue pour sa richesse naturelle et culturelle. Bordée par la mer Méditerranée, elle offre une diversité de paysages époustouflants.

#### ➤ Attrait Naturels :

- **Parc National d'El Kala** : Réserve de biosphère classée par l'UNESCO, ce parc abrite une faune et une flore variée, ainsi que des lacs tels que le lac Oubeïra et le lac Tonga.
- **Côtes Méditerranéennes** : Plages magnifiques et préservées comme Cap Rosa et plage de Berrihane, idéales pour la baignade et les sports nautiques.
- **Montagne de l'Edough** : Parfaite pour la randonnée et les activités de plein air, offrant des panoramas spectaculaires.

#### ➤ Patrimoine Culturel :

- **Sites Archéologiques** : Vestiges romains et phéniciens dispersés dans la région.
- **Culture Locale** : Artisanat traditionnel, notamment la poterie et le tissage, et festivals locaux célébrant la musique et la danse.

#### ➤ Activités Touristiques :

- **Randonnées et Trekking** : Dans le parc national et les montagnes.
- **Observation des Oiseaux** : Dans les zones humides du parc d'El Kala.
- **Sports Nautiques** : Plongée sous-marine, pêche et voile le long des côtes.

La wilaya d'El Tarf est une destination idéale pour les amoureux de la nature et de l'aventure. Avec ses paysages variés, son riche patrimoine culturel et ses nombreuses activités, elle offre

une expérience unique aux visiteurs. Promouvoir cette région contribuera à dynamiser l'économie locale et à préserver ses trésors naturels et culturels.

## **II.2 La géologie de la région :**

La bande littorale d'El Tarf chevauche au domaine géologique de l'Atlas tellien oriental, C'est une région montagneuse formée par des mouvements tectoniques entre la plaque africaine et la plaque eurasiennne marquée par des failles et plis. Elle est caractérisée par des formations sédimentaires mésozoïques et cénozoïques, des dépôts quaternaires récents, et une dynamique côtière influencée par l'érosion marine.

### **II.2.1 Litho stratigraphie :**

La stratigraphie de la région montre deux ensembles de terrains distincts par leurs âges (**BAHROUN, 2006**) :

-Un premier ensemble est composé d'affleurements en bordure comprenant des formations allant du Crétacé supérieur jusqu'au Tertiaire.

-Le second ensemble constitué de formations dunaires et alluvionnaires datant du Quaternaire.

#### **→ Crétacé supérieure :**

Flotter à l'Est du bassin versant de Mafragh au niveau de Boussouagui en territoire Tunisien, Constitué par des marnes, marno-calcaire et un faciès schisteux légèrement argileux avec des intercalations de calcaire et qui occupe la totalité des monts de la Cheffia et Cap Rosa.

#### **→ Le Tertiaire :**

Il est défini par des formations gréseux-argileuses du Numidien couvrant tous les secteurs de montagne allant d'Ain Berda à El-Kala, on distingue :

#### **→ Eocène inférieur :**

Il affleure en une série transgressive de calcaire massif à faciès épineurien dans les monts de la Cheffia.

#### **→ Eocène supérieur :**

Il est caractérisé par des formations argileuses du numidien d'une épaisseur variant de 100 m à 150 m, limitant les alluvions des Oueds avec des intercalations de bancs gréseux. Sont des argiles de couleur rouges ou grises qui reposent sur des argiles vertes à brunâtres d'où le nom des flyschs type Numidien.

#### **→ Oligocène :**

Ce sont des formations d'argiles surmontées par des grés Numidiens, comprend parfois des intercalations de petits bancs de grés quartzeux, qui se définissent à ces grés d'âge Aquitaniens les reliefs des collines sur le flanc Sud de la plaine d'El Tarf et limitent les alluvions des oueds.

**→ Le Quaternaire :**

Les dépôts Quaternaires sont des dunes côtières constituées de sables éoliens et alluviaux qui sont le résultat des phénomènes successifs d'érosion d'altération et de transport. Ces dépôts formés par des limons, de sables et cailloux sur les rives des oueds.

**• Aperçu structurale :**

Elle est caractérisée par un enfoncement progressif des grés numidiens sous l'effet tectonique de la deuxième phase alpine survenue au Miocène cette phase à entrainer un remplissage de la plaine par des matériaux détritiques d'âge Plio-Quaternaire.

La continuité résulte d'un processus d'effondrement qui conduit à la formation de deux fosses celle de Ben Ahmed d'orientation Nord-Sud et celle de Ben M'hidi orientée Ouest-Est durant le Pliocène.

La région d'étude est traversée par un réseau de failles de direction Sud-Est, Nord-Ouest notamment dans les zones d'El Kala et Cap Rosa.

On note un affleurement diapérique du Trias à Djebel Bouhadjar, ainsi que des contacts anormaux, des chevauchements et charriages. Et la deuxième phase alpine et à l'extension de l'installation des nappes (SIAIS, 2021).

**II.3 Les caractéristiques Géomorphologiques :****II.3.1 Le cordon dunaire :**

Le cordon dunaire qui borde le littoral de la wilaya d'El Tarf représente un enjeu majeur qu'il est impossible de négliger, s'étend sur une vaste superficie et constitue une barrière naturelle importante estimée à 22511 hectares. Ce cordon se situe dans les communes de Berrihane, Ben M'hidi, Echatt, et El Kala. L'altitude des dunes y est variable : elle oscille entre 10 et 15 mètres à l'ouest, atteint 60 à 80 mètres dans la zone centrale, et s'élève jusqu'à 90 à 120 mètres à l'est. Cette configuration traduit une forte accumulation sableuse, matérialisée par des dunes imposantes, généralement fixées par une couverture végétale (BELLOULOU, 2015).

En effet, les cordons dunaires de cette wilaya comptent parmi les plus étendus et les plus remarquables de toute la côte algérienne.

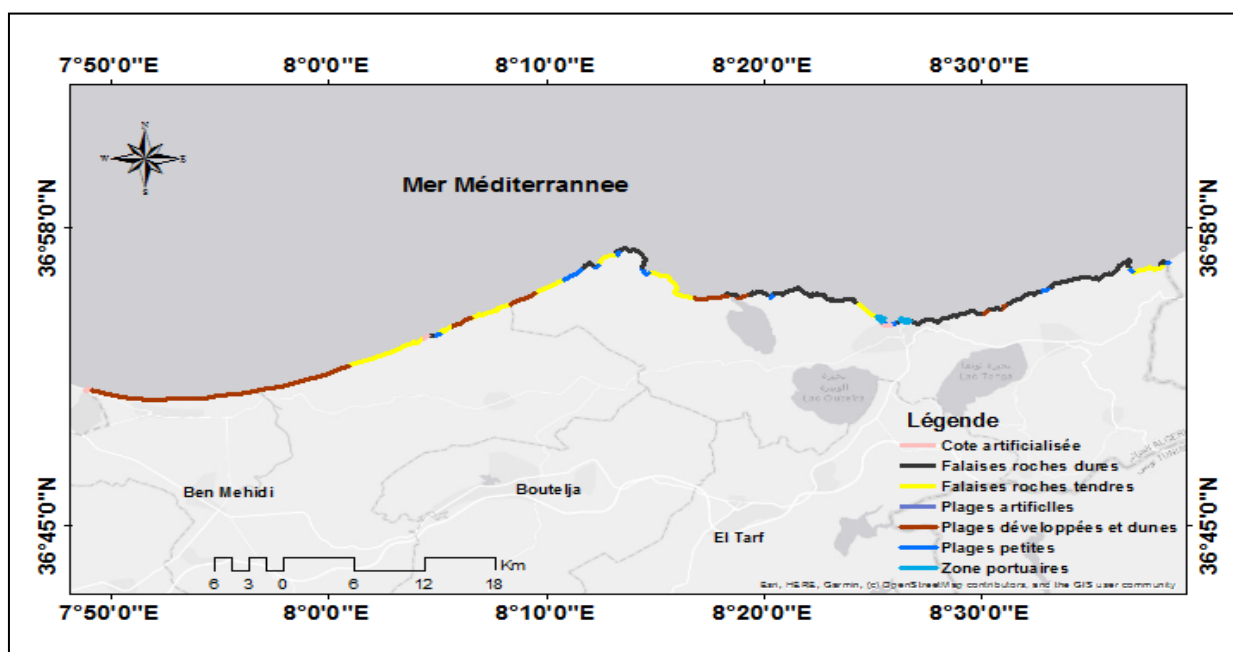


Figure 2 : Typologie de la côte d'El Tarf.

### II.3.2 Les lacs et les marécages :

**Lac Oubeira** : Situé entre les lacs Mellah et Tonga, ce lac permanent d'eau douce, de forme subcirculaire, s'étend sur 2 200 hectares. De type endoréique, il fonctionne comme un réservoir naturel permettant d'atténuer les crues parfois importantes de l'oued El Kébir, tout en servant de zone de dépôt pour les sédiments issus du bassin versant.

**Lac Tonga** : Ce lac d'eau douce permanent couvre une superficie de 2 600 hectares. Il joue un rôle essentiel dans la régulation des crues hivernales en retenant les sédiments et les matériaux transportés par les eaux en amont, tout en contribuant à la stabilisation des dunes littorales.

**Lac Mellah** : Il s'agit d'une lagune connectée à la mer par un chenal artificiel d'environ 900 mètres de long. Le lac s'étend sur 4 kilomètres de longueur et 2,5 kilomètres de largeur, avec une profondeur maximale atteignant 6 mètres et une profondeur moyenne de 2,5 mètres.

**Lac des Oiseaux** : est un lac d'eau douce d'une petite superficie située au Sud-Ouest d'El Kala.

**Marais de la Mekhada** : Cette zone humide palustre est située entre les dunes littorales au nord et les massifs argileux et boisés de la région de Cheffia au sud. Elle occupe les zones les plus basses de la cuvette formée par les dépôts alluvionnaires et colluvionnaires de la plaine de la Mafragh. Le marais est alimenté principalement par les oueds Bou Namoussa et El Kébir. Ses eaux sont généralement douces, mais deviennent saumâtres à l'embouchure en raison du contact avec la mer Méditerranée (BELLOULOU, 2015).

**II.3.3 Les Oueds :**

Les principaux systèmes hydrographiques drainent la région d'étude sont (**BELLOULOU, 2015**) :

- Le premier système hydrographique est représenté par **l'oued Seybousse**, qui traverse la partie occidentale de la wilaya, depuis Drean au nord jusqu'à Chihani au sud. (**Figure 1**).
- Le second, et le plus important de la wilaya, est le système de **l'oued Mefragh**. Il recueille la majorité des cours d'eau de la région, issus des reliefs montagneux du sud, avec un écoulement s'étendant d'ouest en est (**Figure 1**). Ce réseau comprend plusieurs cours d'eau principaux, notamment :
  - Oued Bou Namoussa : est située à l'ouest, constitue le principal cours d'eau de la wilaya, drainant le plus vaste bassin versant de la région. Il reçoit les apports de l'oued El Kebir, lequel est lui-même renforcé par plusieurs affluents notables, tels que les oueds M'Kouk et Bou Hadjar.
  - Oued El Kebir à l'est : orienté principalement d'est en ouest, draine la majeure partie des cours d'eau issus des régions sud-est et est de la wilaya.
  - Oued Cheffia : qui prend le nom d'oued Bou Latane en aval de la zone montagneuse, notamment aux abords de Bouteldja. Bien qu'il soit de taille plus modeste que l'oued Bou Namoussa, il joue un rôle significatif dans l'écoulement des eaux.

**Tableau 1 :** Moyennes annuelles des débits liquides et volumes des principaux oueds traversent la wilaya d'El Tarf (**S.Labar 2003**).

	Superficie du Bassin versant (Km <sup>2</sup> )	Débit moyen (m <sup>3</sup> /s)	Volume annuel (Km)
Oued Bou Namoussa	1158	4,45	194
Oued El Kebir Est	1685	6,71	220
Oued Seybousse	5488	3,6	250

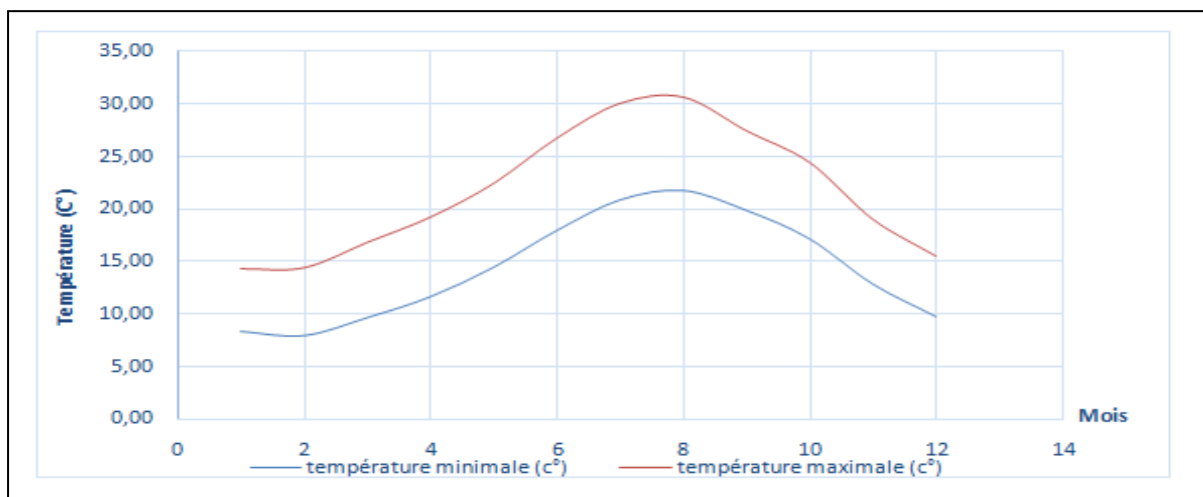
**II.4 Etude climatique :**

Les éléments du climat qui jouent un rôle écologique sont nombreux. Les principaux sont : la température, la pluviométrie et l'humidité, l'éclairement et la photopériode. D'autres, comme le vent, ont une moindre importance, mais ils peuvent dans certains cas avoir un rôle non négligeable (**Dajoz, 2003**).

El Tarf, située en bordure côtière, est parmi les zones les plus pluvieuses du Nord-est algérien, avec un climat méditerranéen humide marqué par deux saisons de six mois chacune (**KHERIFI W. KHERICI-BOUSNOUBRA H, 2017**). Nous avons analysé es principales variables climatiques (précipitation, température, les vents) sur une période de 1992 à 2022.

### II.4.1 Température :

Les températures enregistrées sur la plaine littorale algérienne se caractériser par un régime thermique de type méditerranéen dont le rythme saisonnier est simple (Benyettou et Boukilkha, 2017).



**Figure 3 :** Diagramme des températures de la wilaya d'El Tarf. (Data : 1992 - 2022 climate-data.org)

Selon la classification de Köppen et Geiger, cet emplacement est classé comme Csa, ce qui signifie un climat tempéré chaud avec un été sec. La température moyenne annuelle à El Tarf est de 18,0 °C, Le mois le plus chaud de l'année est août, avec une température moyenne de 26,2 °C. En revanche, le mois le plus froid est février, avec une température moyenne de 11,1°C.

### II.4.2 Précipitations :

La wilaya d'El Tarf caractérisé par un climat tempéré chaud. Les précipitations sont plus abondantes en hiver qu'en été. Les précipitations annuelles moyennes atteignent 834 mm. Le mois de juillet est le mois le plus sec, avec une moyenne de seulement 3 mm de précipitations. Les précipitations record sont enregistrées en janvier, avec une moyenne de 117 mm.

La variation des précipitations entre le mois le plus sec et le mois le plus humide est de 114mm.

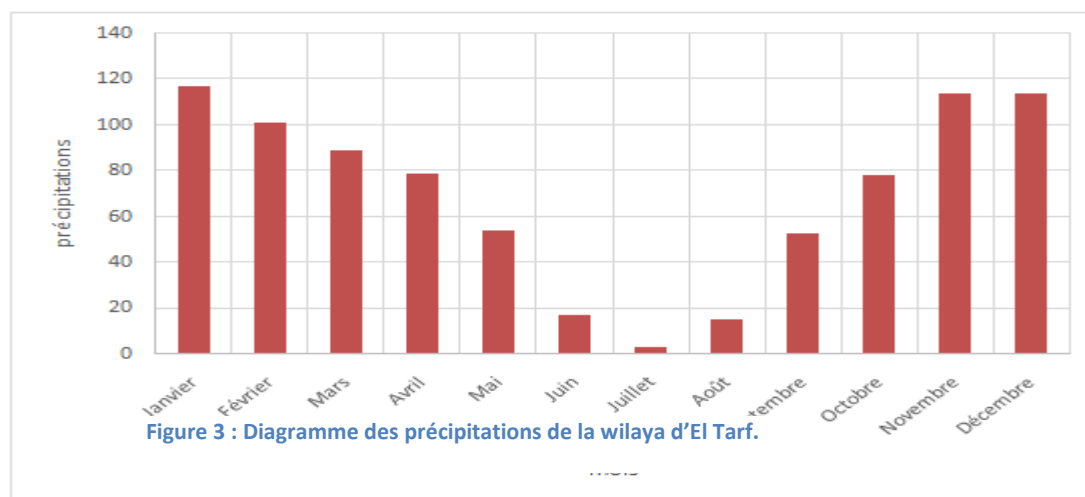


Figure 3 : Diagramme des précipitations de la wilaya d'El Tarf.

**Figure 4 : Diagramme des précipitations de la wilaya d'El Tarf. (Data : 1992 - 2022 climate-data.org)**

### II.4.3 Le vent :

L'étude statique des données de vent au large a permis d'élaborer les roses des vents à l'échelle mensuelle, saisonnière et annuelle (Figures 5, et 6), ainsi que déterminer la fréquence d'apparition du vent selon les directions et les vitesses sur ces deux périodes ([www.waveclimate.com](http://www.waveclimate.com), 1992-2022).

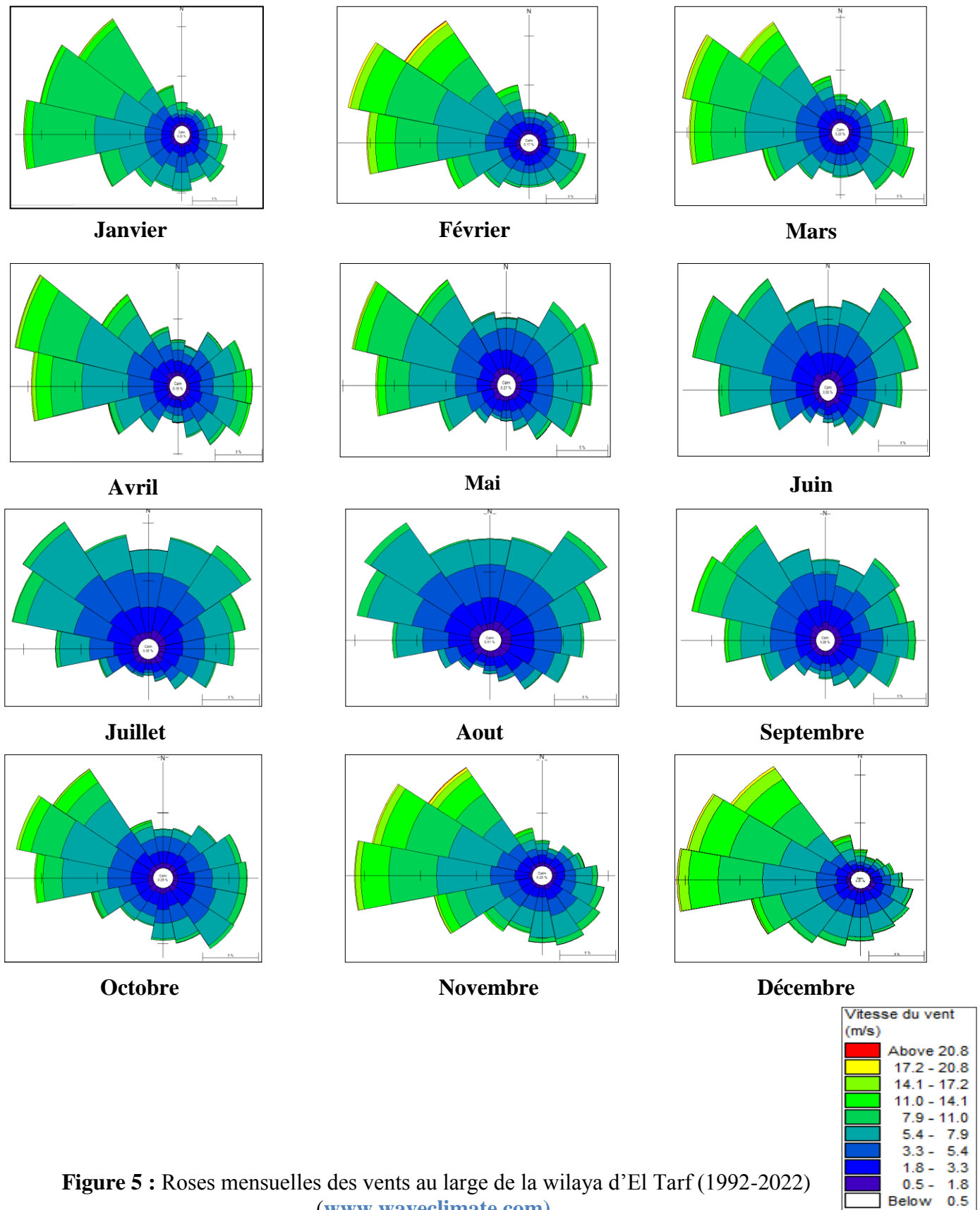
Les directions de vent annuel les plus dominantes sont ONO (14.2%), l'Ouest (11.8%), Ainsi que les Directions NE, ENE, l'Est et ESE avec une fréquence d'apparition environ 7%. Et des vitesses fréquentes environ 5.4 à 18 m/s.

En Hiver, la rose des vents hivernale montre une prédominance des vents provenant des secteurs Ouest environ 15.88%, Nord-Ouest 13.44% et O-S-O environ 8.33%. Les vitesses des vents sont comprises entre 17.2 et 20.8m/s.

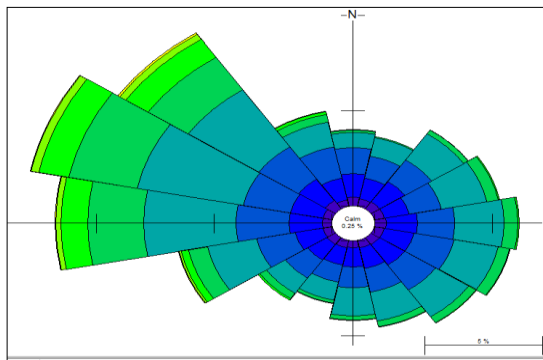
Eté, les deux directions Nord-Ouest et Nord-Est sont les plus dominantes des vents avec des fréquences respectives de 11.5% et 10%. Tandis que Les autres directions de vent sont présentes avec une prédominance plus ou moins remarquable.

Au Printemps, les vents les plus fréquents soufflent de l'Ouest-N-O (11.5%) avec une vitesse de 17.2 m/s, de l'Est environ 7%.

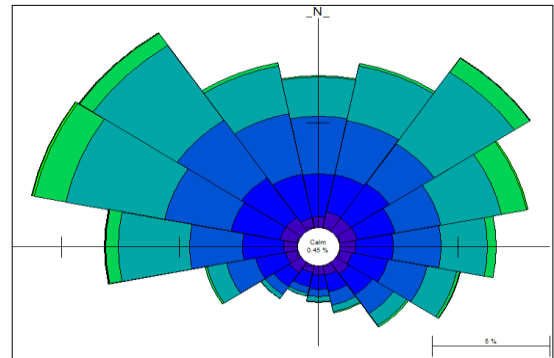
Automne, on remarque une prédominance des vents de directions ONO et l'Est avec une fréquence respective de 13.08% et 7%. Et une vitesse compris entre 14.1 et 17.2 m/s.



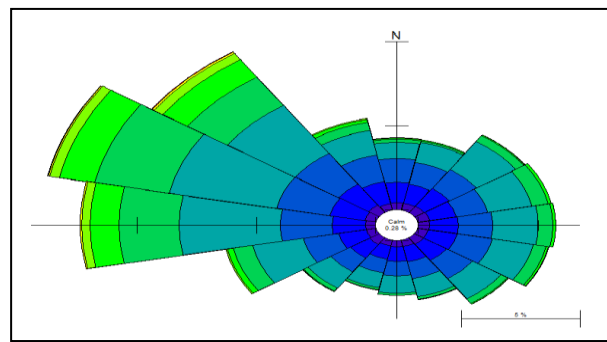
**Figure 5 :** Roses mensuelles des vents au large de la wilaya d'El Tarf (1992-2022) ([www.waveclimate.com](http://www.waveclimate.com)).



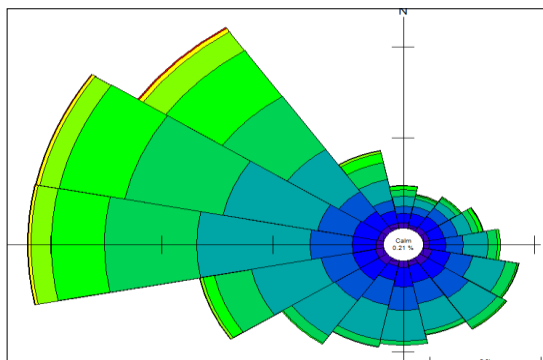
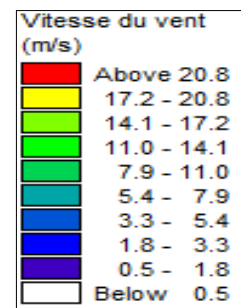
Automne



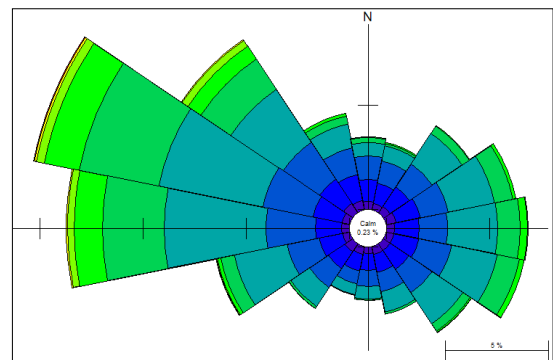
Été



Annuelle



Hiver



Printemps

Figure 6 : Roses trimestrielles des vents au large de la wilaya d'El Tarf (1992-2022) ([www.waveclimate.com](http://www.waveclimate.com)).

## II.5 Etude Océanographique :

### II.5.1 La houle :

L'étude statistique des données du site [www.waveclimate.com](http://www.waveclimate.com) a permis de représenter les roses des houles mensuelles, trimestrielles et annuelles au large des côtes d'El Tarf sur la période 1992-2022 (Figures 7, et 8). Cette analyse met en évidence la prédominance des houles provenant de divers secteurs au large.

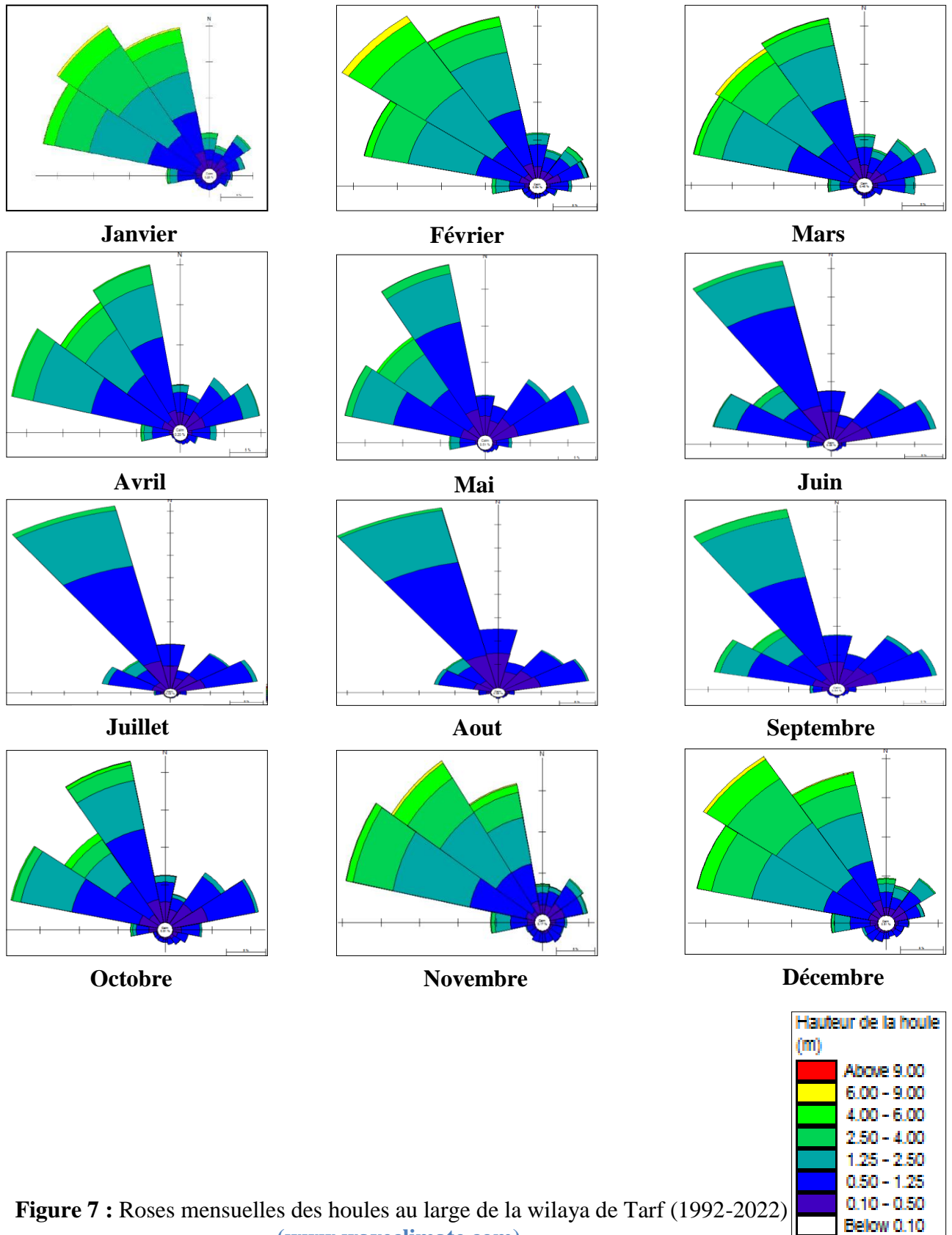
Les résultats de la distribution des fréquences d'apparitions annuelles des houles au large durant la période 1992 à 2022, montrent que les agitations qui touchent le site proviennent des secteurs Nord-Nord-Ouest, Ouest-Nord-Ouest et Nord-Ouest avec des fréquences d'apparition respectives 26%, 18.23% et 17.64%.

Durant la période hivernale, le maximum de fréquence provient des houles du secteur ONO, NO et NNO avec des taux respectifs de 24.7%, 21% et 20%, on marque que la zone est calme à 0.44% du temps. Les houles en été atteignent une hauteur comprise entre 6 et 9 mètres.

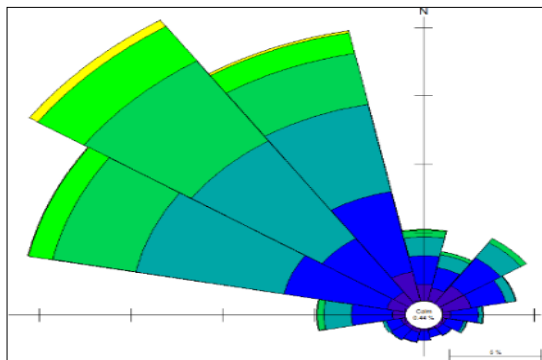
En Eté, les houles des secteurs NNO, ENE et ONO sont les plus dominantes avec des fréquences d'apparition respectives de 38.9%, 12.5% et 11.42%. Les houles atteignent un maximum de hauteur environ 2.5mètres.

En Automne, on observe trois directions majoritairement dominantes avec des taux 23.43%, 20% et 16.87%, il s'agit des houles du secteur NNO, ONO et NO. Les autres directions de vent sont présentes avec une prédominance moins remarquable.

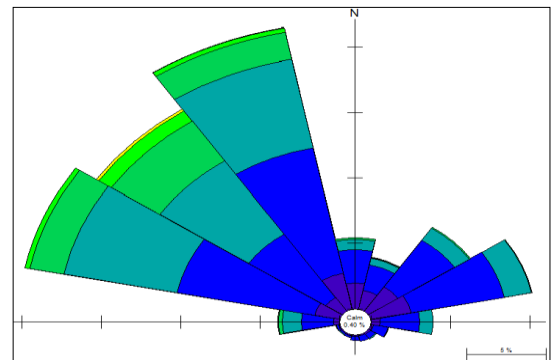
Au printemps, la dominance des secteurs de houles suit la même tendance que pour l'automne, à l'exception des houles du secteur ENE avec une fréquence de 9.12%



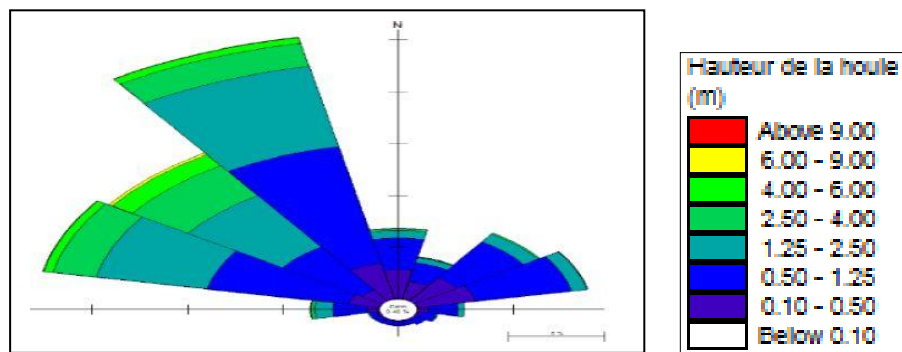
**Figure 7 :** Roses mensuelles des houles au large de la wilaya de Tarf (1992-2022) ([www.waveclimate.com](http://www.waveclimate.com)).



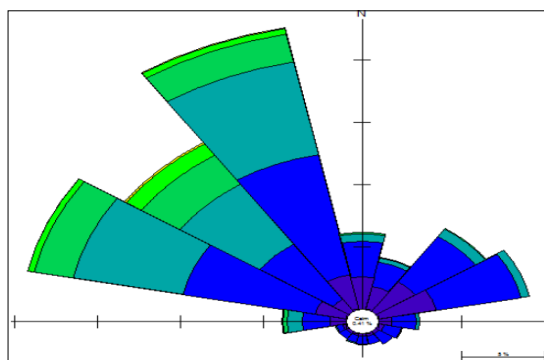
Hiver



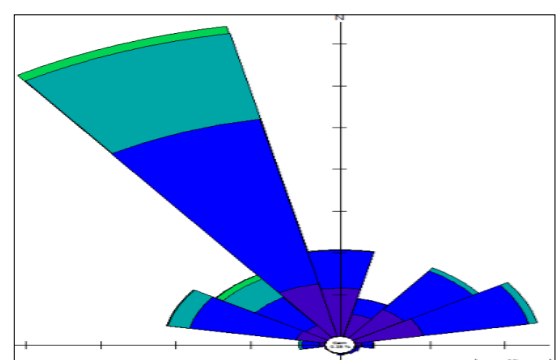
Printemps



Annuelle



Automne



Eté

Figure 8 : Roses trimestrielles des houles au large de la wilaya d'El Tarf (1992-2022) ([www.waveclimate.com](http://www.waveclimate.com)).

### II.5.2 La marée :

La marée est un phénomène naturel, périodique et prévisible, qui se manifeste par des variations du niveau de la mer. En Méditerranée, notamment le long du littoral algérien, l'amplitude des marées est relativement faible, en raison de la prédominance de la marée astronomique, elle-même de faible intensité. Malgré cette faiblesse, la marée joue un rôle significatif dans l'identification des zones côtières exposées aux risques de submersion marine.

Selon les mesures effectuées par le Service Hydrographique de la Marine Nationale (SHMN), l'amplitude moyenne de la marée le long des côtes algériennes est d'environ  $\pm 0,34$  m par rapport au niveau de référence NGA (Niveau Général des Auteurs). Dans la zone d'étude, la hauteur maximale de la marée atteint  $+0,5$  m NGA, tandis que le niveau le plus bas enregistré est de  $-0,34$  m NGA, soit une variation d'environ 84 cm (SHOM, 2022).

Ce régime de marée, qualifié de micro-tidal, rend le littoral algérien particulièrement vulnérable face à une éventuelle élévation du niveau marin, augmentant ainsi le risque d'inondation et de submersion côtière (Mezouar Khoudir, 2022).

### II.5.3 Niveau de la mer :

Les variations du niveau de la mer revêtent une importance cruciale et nécessitent une surveillance constante afin de permettre une réaction rapide en cas de menace. Toutefois, en matière de suivi du niveau marin, l'Algérie enregistre un retard significatif par rapport aux pays de la rive nord de la Méditerranée, tels que la France, l'Espagne ou l'Italie. Il devient donc indispensable d'équiper les ports algériens de dispositifs adaptés, notamment de marégraphes, pour assurer un suivi fiable et continu. À ce jour, l'altimétrie satellitaire constitue un outil précieux pour l'observation du niveau de la mer, bien qu'elle repose sur des séries de données longues, nécessitant des observations sur plusieurs décennies, voire plus d'un siècle, pour garantir des résultats robustes et exploitables (Mezouar Khoudir, 2022).

Le niveau de la mer dans la région d'El Tarf, située sur le littoral nord-est de l'Algérie, est influencé par un régime micro-tidal, caractérisé par des variations de faible amplitude.

D'après le rapport de synthèse publié en mars 2023 par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), le niveau moyen des mers pourrait s'élever jusqu'à 1,1 mètre d'ici 2100 dans le scénario d'émissions de gaz à effet de serre le plus élevé). Cette élévation est principalement due à la dilatation thermique des océans et à la fonte accélérée des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique.

**Conclusion :**

Ce chapitre comprend la présentation de notre zone d'étude ainsi que les notions géomorphologiques et géologiques. Il présente une étude détaillée du régime climatique mettant en évidence les principaux facteurs qui influencent l'évolution du littoral tels que la variation des houles et des vents, afin de mieux comprendre les risques côtiers et planifier des mesures de protection adaptées.

D'après l'analyse du climat, on constate que les directions les plus fréquentes de la wilaya d'El Tarf sont : Ouest-Nord-Ouest, Nord-Ouest et l'Ouest pour le vent et Nord-Nord-Ouest, et Nord-Ouest pour les houles.

## **Chapitre III : évènements extrêmes**

### III.1 Introduction :

La simulation d'événements extrêmes consiste à anticiper et à modéliser des phénomènes extrêmes tels que les tempêtes, les montées des eaux ou les tsunamis afin de mieux prévenir les risques et protéger les infrastructures côtières. Ces simulations sont essentielles pour la planification urbaine et la gestion des crises en cas de catastrophes naturelles.

En général, ces simulations sont conçues pour prédire de manière fiable les risques d'inondation ou d'érosion jusqu'à un niveau de récurrence spécifique, comme celui de 100 ans. Ainsi, l'évaluation de ces niveaux de récurrence et de leur incertitude revêt une importance cruciale, surtout dans le domaine de la conception des infrastructures de protection côtière.

L'utilisation d'une méthodologie statistique, notamment la théorie des valeurs extrêmes, est donc essentielle pour réaliser ces estimations avec succès.

### III.2 Théorie des valeurs extrêmes :

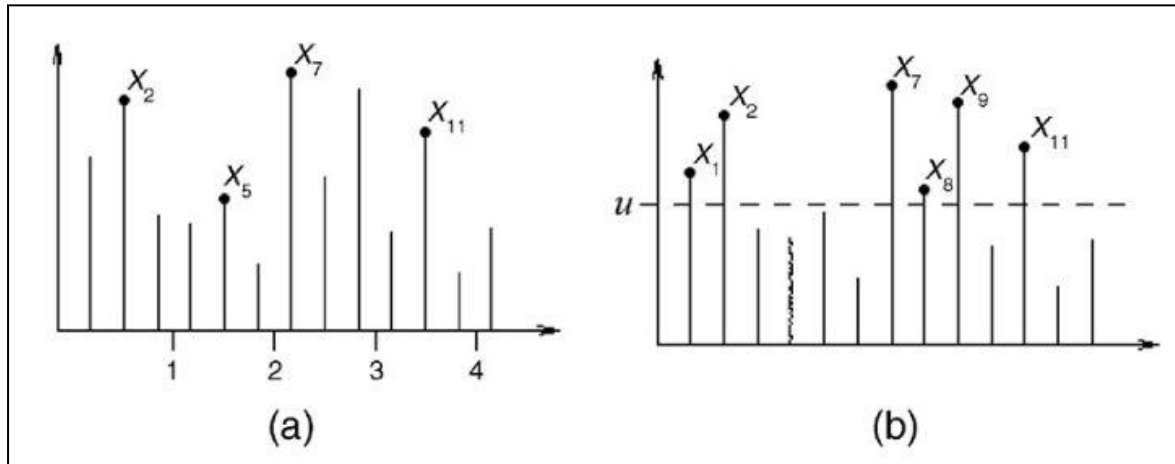
La théorie des valeurs extrêmes, aussi connue sous le nom de théorie de l'extrême valeur ou EVT (Extrême Value Theory en anglais), est une branche des statistiques et de la théorie des probabilités qui se concentre sur l'analyse des extrêmes d'une distribution de probabilité. Cette théorie se focalise sur la modélisation et la prédiction des événements rares, tels que les catastrophes naturelles, les crises financières, ou les pics de pollution. Elle est particulièrement utile pour évaluer et gérer les risques associés à ces événements qui se produisent en dehors de la plage de valeurs habituelles (**Faster Capital, 2014**).

D'un point de vue mathématique, EVT fournit un ensemble d'outils et de techniques pour modéliser le comportement d'événements extrêmes. Elle repose sur l'hypothèse que les observations extrêmes suivent une distribution généralisée des valeurs extrêmes (GEV), qui décrit la distribution de probabilité des valeurs maximales ou minimales dans un échantillon. EVT nous permet d'estimer le comportement de la queue d'une distribution au-delà de ce que les méthodes statistiques traditionnelles peuvent capturer (**Faster Capital, 2014**).

Pour mieux comprendre la théorie des valeurs extrêmes, explorons quelques concepts clés :

**1-Méthode Block Maxima :** Cette approche consiste à diviser les données en blocs qui ne se chevauchent pas et à sélectionner la valeur maximale de chaque bloc. En supposant que ces maximas suivent une distribution GEV, nous pouvons estimer des paramètres tels que l'emplacement, l'échelle et la forme pour quantifier le risque extrême (**Faster Capital, 2014**). (Figure 9, (b)).

**2-Méthode du pic sur le seuil :** contrairement à la méthode des maximas de bloc, cette technique se concentre sur les observations dépassant une certaine valeur seuil. Ces dépassements sont supposés suivre une distribution de Pareto généralisée (GPD), nous permettant d'estimer les paramètres liés au comportement de la queue (**Faster Capital, 2014**). (Figure 9, (a)).



**Figure 9** : Schéma représentatif des méthodes blocks maxima et POT.

(Bhattacharyya malais, 2008).

**4-Niveau de retour** : le niveau de retour représente l'ampleur d'un événement extrême qui devrait être dépassée au cours d'une période de temps données. Il s'agit d'une mesure utile pour la gestion des risques, car elle fournit une estimation des pertes potentielles associées aux événements extrêmes. Par exemple, dans le domaine de l'assurance, les niveaux de rendement aident à déterminer le montant de la couverture nécessaire pour se protéger contre les événements catastrophiques (Faster Capital, 2014).

L'inconvénient de l'approche des Blocs Maximas est qu'elle ne considère qu'un seul maximum dans chaque bloc. Cela crée le risque de perdre des données significatives. Par exemple, si deux grandes valeurs apparaissent dans un bloc, seule la plus grande des deux est prise en compte. La méthode POT, quant à elle, élimine ce risque en prenant en considération toutes les valeurs supérieures au seuil choisi (Cornel Stander, 2015).

Dans cette étude la méthode utilisée est : la méthode POT.

### III.2.1 Hauteur significative :

D'après l'analyse de la figure 10 on constate que l'ensemble des enregistrements durant la période étalant du 1992 jusqu'à 2022 indique que la hauteur significative de la houle (Hs) varie entre de 0.04 m et 8.52 m avec une moyenne de 1.75 m.

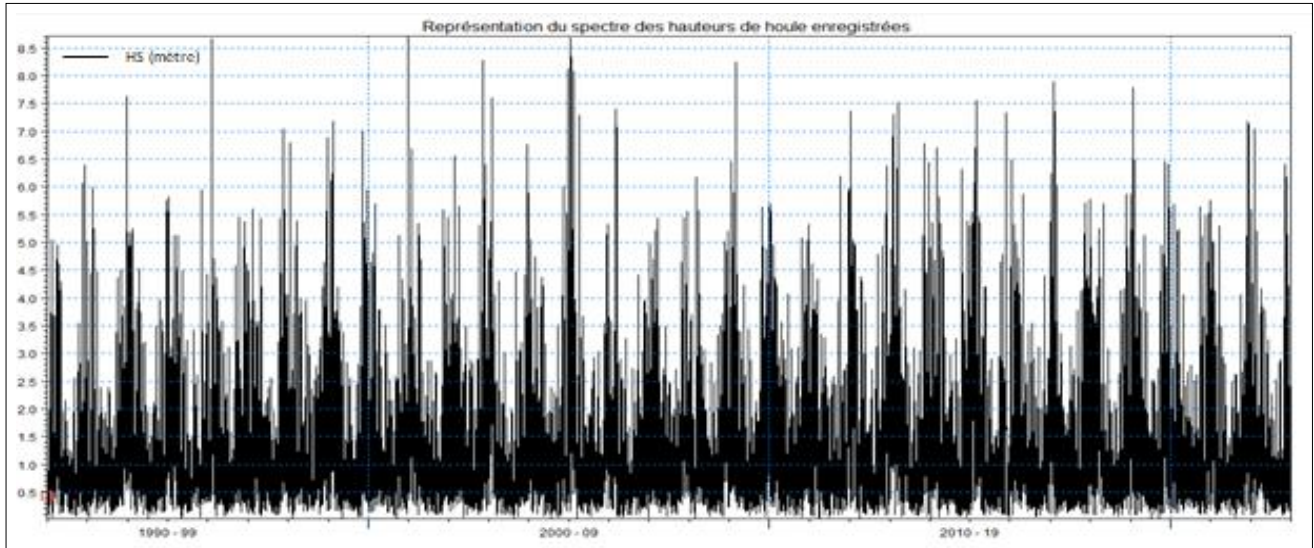


Figure 10 : Représentation du spectre des hauteurs de houle enregistrées (El Tarf).

### III.2.2 La période pic :

Les périodes enregistrées sont dans une gamme assez large allant de 1.5s à 14s, les périodes sont globalement entre 3s et 9s.

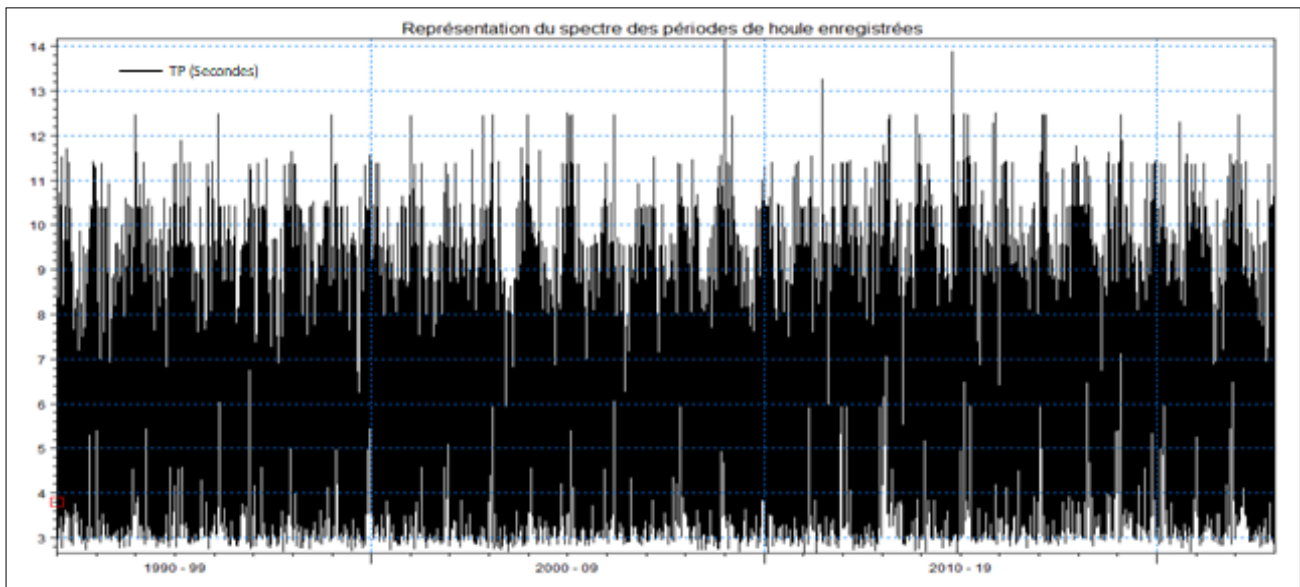


Figure 11 : Représentation du spectre des périodes de houle enregistrées (El Tarf).

### III.3 Method Peaks over Threshold (POT):

La méthode Peak Over Threshold (méthode POT) est une façon de modéliser des valeurs extrêmes. Le concept principal de la méthode est d'utiliser un seuil pour isoler les valeurs considérées comme extrêmes du reste des données et de créer un modèle pour les valeurs extrêmes en modélisant la queue de toutes les valeurs qui dépassent ce seuil (**Abdoulaye Diamoutene, 2018**).

Cela se fait en pratique en définissant un seuil  $u$  comme étant une valeur définie sur  $R$  qui dépasse la plupart, mais pas la totalité, des valeurs définies dans certaines séries chronologiques ou dans un autre vecteur de valeurs collectées. De plus, il peut être montré que pour un seuil  $u$  suffisamment grand, la distribution des valeurs dépassant le seuil se rapproche d'une distribution générale de Pareto avec certains paramètres de forme et d'échelle (**Franke, Härdle et Hafner, 2008**).

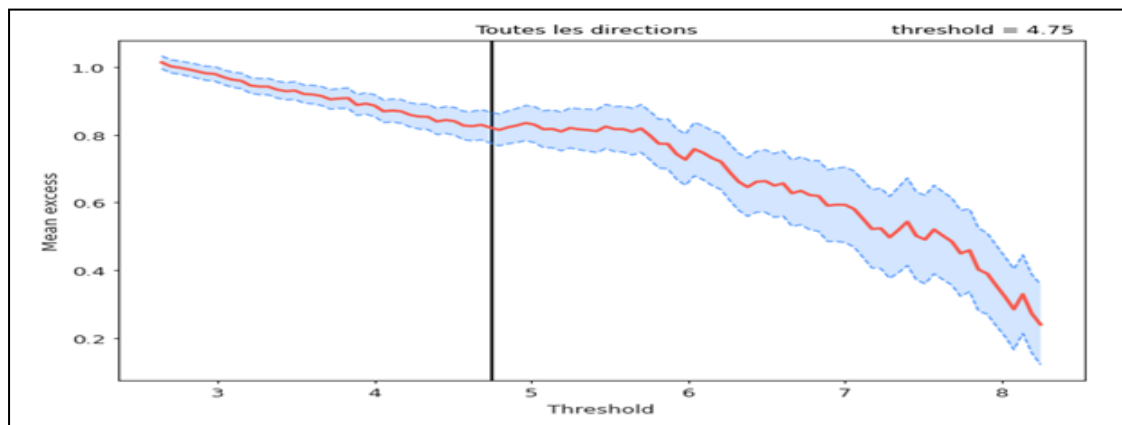
D'après (**Tilbi. K. et al., 2018**), cette méthode est basée sur l'approximation de la distribution des excès pour la loi de Pareto généralisée. De plus elle présente un avantage par rapport à la méthode des blocs, en ce sens qu'il est plus facile d'avoir un échantillon d'excès que de max. Dans la pratique, on remplace  $u$  par  $X_{(n-k+1, n)}$  qui représente la  $K$  plus grande observation de l'échantillon. Pour réaliser cette méthode, on va suivre les étapes suivantes :

- Soit  $X_1, \dots, X_n$  un échantillon, à partir d'un certain seuil  $u$ , on note  $N_u$  le nombre d'observation qui dépassent ce seuil.
- Soit  $Y_1, \dots, Y_{N_u}$  un échantillon des excès au-dessus du seuil  $u$  de distribution conditionnelle.

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

Avant de définir le seuil, nous avons calculé la moyenne résiduelle en utilisant Python et la bibliothèque Pyextreme. Cela nous a permis d'analyser ses variations afin de sélectionner le seuil optimal. Ce dernier doit se situer sur la portion linéaire avant que la moyenne résiduelle ne commence à fluctuer.

Le choix du seuil, c'est porté sur la valeur 4.75 m pour la wilaya d'El Tarf. (Figure 12).



**Figure 12 :** Moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelle de l'enregistrement.

Ensemble des points retenus pour le calcul sont représentés dans la figure suivante.

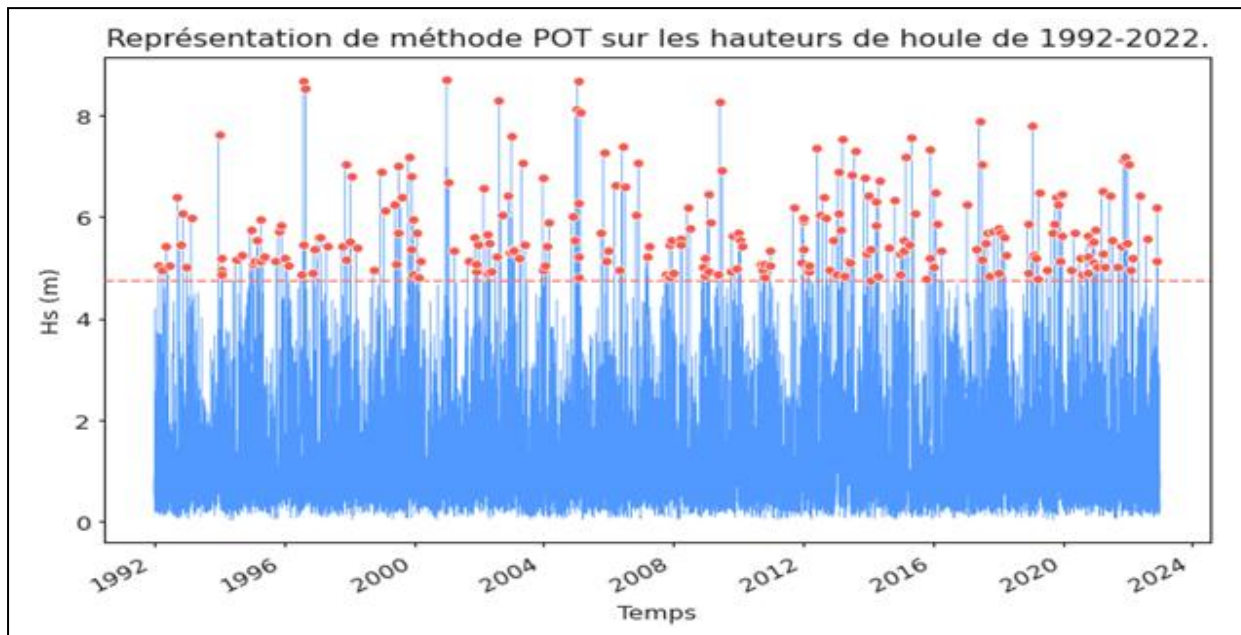


Figure 13 : Représentation de méthode POT sur les hauteurs de houle de (1992 – 2022).

L'étape de la sélection des pics terminée, on passe au calcul de hauteurs houle avec leurs périodes de retour via la même bibliothèque **pyextreme** sur le langage **python**. Les résultats sont les suivants :

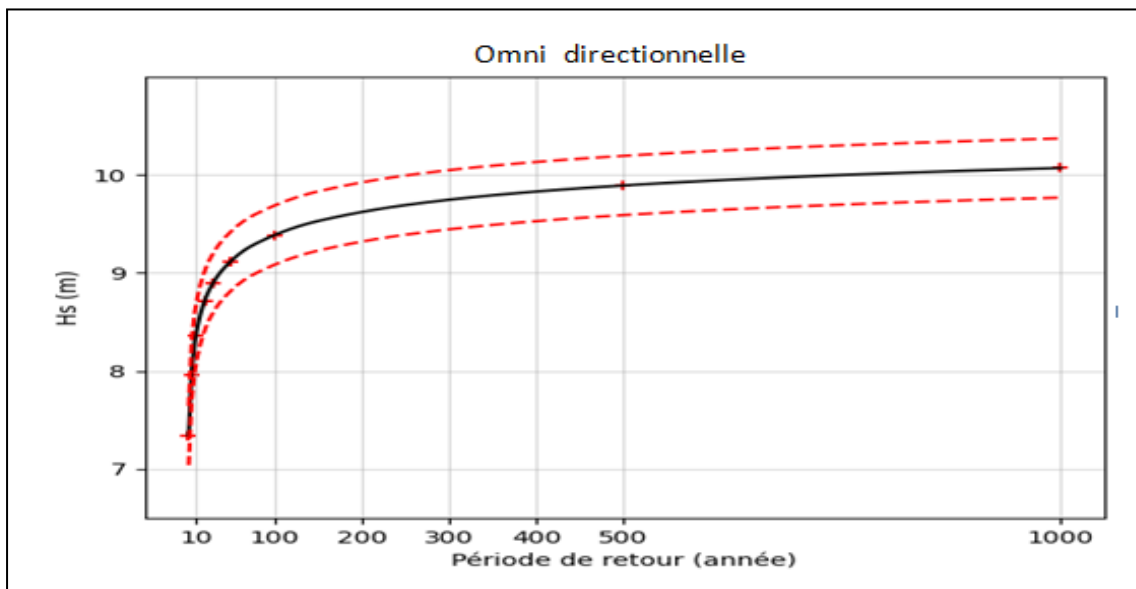


Figure 14 : Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour omnidirectionnel.

Les résultats présentés dans le graphe (Figure 14) sont illustrés par des traits rouges représentant les limites de l'erreur acceptée, avec une marge de 5 %. Les croix rouges indiquent les valeurs des hauteurs de houle correspondant aux périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100 et 1000 ans.

La même méthodologie sera appliquée pour les autres directions. Les résultats pour chaque direction sont présentés dans la figure 15 :

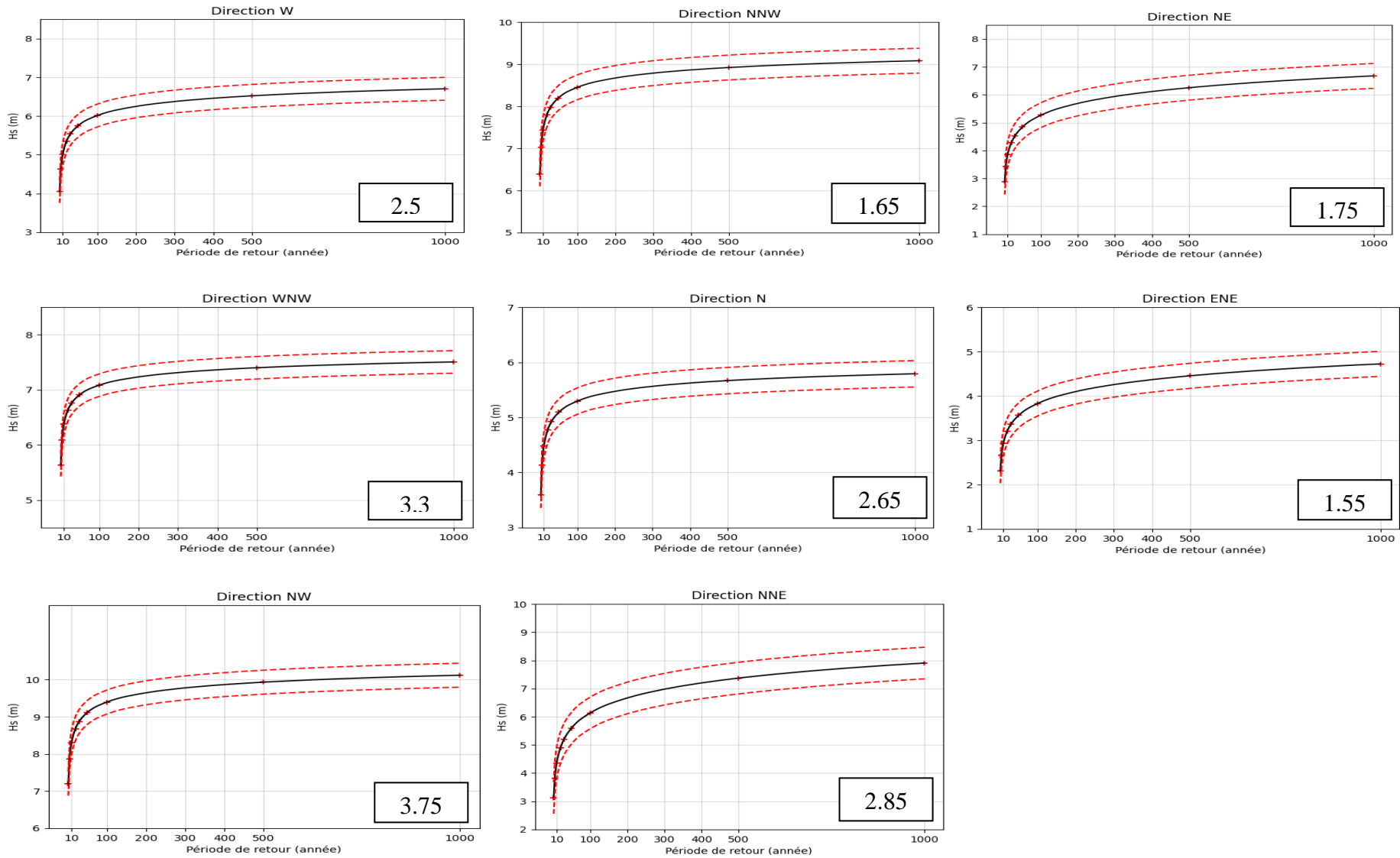


Figure 15 : Estimation des évènements extrêmes via la méthode POT pour chaque direction.

Afin de mieux lire les résultats obtenus par la méthode POT représenter dans le tableau 2, le tableau suivant résume l'ensemble de hauteurs extrêmes obtenues selon les périodes de retour de ces évènements extrêmes dans le futur.

**Tableau 2 :** Tableau résumant l'ensemble des résultats obtenu par la méthode POT (wilaya d'El Tarf).

POT											
Hauteur de vague par direction par (mètre)											
Période de retour (années)	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	WNW	E	OMNI
<b>2</b>	4.0500	5.6313	7.1989	6.3931	3.5946	3.1159	2.8714	2.3109	5.6313	1.8748	7.3391
<b>5</b>	4.6276	6.0917	7.8612	7.0292	4.1334	3.8221	3.4325	2.6665	6.0917	2.1429	7.9521
<b>10</b>	5.0108	6.3830	8.2937	7.4379	4.4744	4.3564	3.8569	2.9355	6.3830	2.3457	8.3541
<b>20</b>	5.3531	6.6328	8.6750	7.7930	4.7670	4.8906	4.2814	3.2045	6.6328	2.5485	8.7097
<b>30</b>	5.5361	6.7622	8.8767	7.9787	4.9185	5.2031	4.5296	3.3619	6.7622	2.6671	8.8756
<b>50</b>	5.7502	6.9095	9.1106	8.1921	5.0911	5.5969	4.8424	3.5601	6.9095	2.8165	9.1164
<b>100</b>	6.0136	7.0845	9.3950	8.4484	5.2962	6.1311	5.2668	3.8291	7.0845	3.0193	9.892986
<b>1000</b>	6.7030	7.5060	10.1194	9.0824	5.7905	7.9059	6.6767	4.7227	7.5060	3.6929	10.0751

A partir de Tableau 2, qui représente les hauteurs de houles prédites par la méthode POT. On remarque la direction la moins susceptible d'engendrer une houle extrême est l'Est, autre part, la direction la plus susceptible d'engendrer **la plus grande houle** est le **Nord, Nord-Nord-Est et le Nord-Ouest**.

Reste que l'analyse des hauteurs omnidirectionnelles donne les résultats les plus grands car le modèle a travaillé avec les hauteurs maximales qui puissent exister dans la série de données.

### **Conclusion :**

L'analyse des données par la méthode des événements extrêmes a permis de confirmer que les hauteurs de houles augmentent avec la période de retour, et que certaines directions, notamment le nord-nord-ouest et le nord-nord-Est, sont particulièrement propices à générer des houles de grande ampleur. Ces phénomènes exceptionnels constituent un risque significatif pour les zones côtières, soulignant l'importance d'une modélisation hydrodynamique rigoureuse pour évaluer la vulnérabilité des littoraux et orienter la gestion du risque, que ce soit par la conception d'infrastructures adaptées ou par la mise en place de stratégies de prévention et de protection. Toutefois, cette étude met également en évidence la nécessité de poursuivre les efforts pour affiner les méthodes d'estimation et de modélisation, afin de renforcer la fiabilité de l'évaluation des risques associés à ces événements extrêmes dans les environnements sensibles.

# **Chapitre IV : Modélisation hydrodynamique**

**IV.1 Introduction :**

La modélisation numérique marine joue un rôle essentiel dans la simulation et l'évaluation des phénomènes maritimes, à partir des divers logiciels tels que Mike21, Delft 3D...exct. Grâce à cette modélisation, il devient possible de prévoir les courants, les marrées ainsi que les phénomènes côtiers. Le principe repose sur la discrétisation et la résolution par ordinateur des équations mathématiques régissant les processus physiques. Cette discrétisation s'applique à la fois dans le temps et dans l'espace, tandis que le forçage hydrodynamique est intégré aux limites du modèle. (Huang et al., 2010).

Dans notre étude, nous avons opté pour le modèle Mike 21 pour réaliser des simulations numériques afin d'étudier la propagation de la houle SW et L'hydrodynamique HD.

**IV.2 Description du Mike 21 :**

Le Model MIKE 21, développé par DHI Water & Environnement (institute hydraulique), est une suite logicielle professionnelle de la modélisation numérique 2D de l'hydraulique et des phénomènes associés dans divers environnements aquatiques tels que les rivières, les lacs, les baies, les zones côtières et les océans. Ce modèle est un ensemble modulaire de moteurs de simulation, conçus pour répondre à plusieurs besoins applicatifs. Ces moteurs facilitent la modélisation de divers phénomènes, comme les flux de marée, les vagues de tempête, le transport de sédiments, le transport de sable, les perturbations portuaires et les états maritimes dans les domaines offshore et onshore (DHI, 2014).

**IV.2.1 Mike 21 Spectral Wave (SW) :**

Le modèle spectral de propagation de la houle (SW), permet la simulation de la croissance et décroissance des vagues sous l'effet du vent dans les zones en eaux profondes et peu profondes. Cette simulation permet de reproduire les phénomènes de dissipation par le déferlement et la friction sur le fond, réfraction des vagues, les interactions entre les vagues et courant, et l'interaction non-linéaires entre les vagues (DHI, 2014).

❖ **Les équations en eaux peu profondes :**

Le modèle repose sur la résolution des équations de Reynolds moyennées de Navier-Stocks incompressibles tridimensionnelles, en tenant compte des hypothèses de Boussinesq et de pression hydrostatique.

L'équation de continuité locale s'écrit comme :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \tag{Équation 2}$$

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial \eta p}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x}$$

$$\frac{g}{\rho_0} + \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + Fu + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + uS \tag{Équation 3}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial \eta p}{\partial y} + \frac{\partial w u}{\partial z} = f v - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x}$$

$$\frac{g}{\rho_0} + \int_z \frac{\eta}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F u + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u s S \quad \text{Équation 4}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial u v}{\partial x} + \frac{\partial w v}{\partial z} = f u - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y}$$

$$\frac{g}{\rho_0} + \int_z \frac{\eta}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + F v + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v s S \quad \text{Équation 5}$$

Les termes de contrainte horizontale sont présentés à l'aide d'une relation « gradient-contrainte », qui sont simplifiées dans les équations suivantes (6 et 7) :

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

$$F v = \frac{\partial}{\partial x} \left( A \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad \text{Équation 7}$$

Où le terme A est la viscosité tourbillonnaire horizontale.

Les conditions aux limites de surface et de fond pour  $u$ ,  $v$  et  $w$  sont mentionnées dans les équations 8 et 9 :

A  $Z=\eta$  :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 \nu_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad \text{Équation 8}$$

A  $Z=-d$  :

$$u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 \nu_t} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad \text{Équation 9}$$

$(\tau_{sx}, \tau_{sy})$  et  $(\tau_{bx}, \tau_{by})$  signifie les composantes x et y des contraintes de vent de surface et de fond.

#### ❖ Les équations de conservation de l'action des vagues :

L'équation d'équilibre est la formule fondamentale qui illustre l'action des vagues, elle est exprimée en termes de coordonnées cartésiennes.

#### ✓ Coordonnées cartésiennes :

L'équation de conservation de l'action des vagues s'exprime sous la forme suivante, dans un système de coordonnées cartésiennes horizontales.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (vN) = \frac{S}{\sigma} h \quad \text{Équation 10}$$

**Tableau 3 :** Signification des symboles.

Symbole	Signification
$N(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$	Densité d'action des vagues.
$T$	Temps.
$\vec{x}=(x,y)$	Les coordonnées cartésiennes.
$\sigma$	Pulsation.
$S$	Source pour l'équation de l'équilibre énergétique.
$v(\vec{c}_x, \vec{c}_y, \vec{c}_\sigma, \vec{c}_\theta)$	La vitesse de propagation d'un groupe de vagues (dans l'espace de phase à quatre dimensions).
$\nabla$	L'opérateur différentiel à quatre dimensions dans l'espace $\vec{x}, y, \sigma, \theta$ .

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

$$(C_x, C_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = Cg + U \quad \text{Équation 11}$$

$$C_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[ \frac{\partial d}{\partial t} + U \cdot \nabla_x d \right] - CgK \cdot \frac{\partial U}{\partial s} \quad \text{Équation 12}$$

$$(C_x, C_y) = \frac{dx}{dt} = Cg + U \quad \text{Équation 13}$$

$$C_\theta = \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{K} \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + K \cdot \frac{\partial U}{\partial m} \right] \quad \text{Équation 14}$$

Avec :

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

#### IV.2.2 Mike 21 hydrodynamique (HD) :

Le modèle hydrodynamique (HD) de Mike 21 utilisé pour la simulation des écoulements en milieux aquatiques bidimensionnels, ce modèle résout les équations de conservation de la masse, la salinité et la température ainsi que la quantité de mouvement en réponse à multiples force, tenant en compte le frottement du fond, la force de Coriolis, et l'impact des conditions météorologiques. Il offre la possibilité de modéliser les courants côtiers et les interactions hydrodynamiques avec les vagues et la sédimentation, ainsi qu'il permet l'intégration des diverses structures et sources. (DHI, 2014).

**L'équation en eau peu profonde :**

En combinant l'équation de continuité et l'équation de la quantité de mouvement horizontale, pour la profondeur de l'eau en eaux peu profondes ( $h=\eta+d$ ) dans le système de coordonnées cartésiennes, nous arrivons à l'équation suivantes :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = \mathbf{hS} \quad \text{Équation 15}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} &= fvh - gh \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} \\ - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_x}{\partial x} + \frac{\tau s_x}{\rho_0} - \frac{\tau b_x}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) &+ \frac{\partial}{\partial x} (\mathbf{hT}_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x} (\mathbf{hT}_{xy}) + \mathbf{husS} \end{aligned} \quad \text{Équation 16}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} &= fuh - gh \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} \\ - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_y}{\partial y} + \frac{\tau s_y}{\rho_0} - \frac{\tau b_y}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) &+ \frac{\partial}{\partial x} (\mathbf{hT}_{xy}) + \frac{\partial}{\partial x} (\mathbf{hT}_{yy}) + \mathbf{hvsS} \end{aligned} \quad \text{Équation 17}$$

Les vitesses des courants à la profondeur moyenne sont définies par les équations suivantes:

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

$$h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} \mathbf{v} dz \quad \text{Équation 19}$$

Les contraintes latérales  $T_{ij}$  composées de frottement visqueux, l'advection différentielle et du frottement turbulent. Leur calcul s'appuie sur une viscosité turbulente, en appliquant la formulation basée sur les gradients de vitesse moyenne en fonction de la profondeur.

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial u}{\partial x'} \quad \text{Équation 20}$$

$$T_{xy} = A \left( \frac{\partial u}{\partial y'} + \frac{\partial v}{\partial x'} \right) \quad \text{Équation 21}$$

$$T_{yy} = 2A \frac{\partial v}{\partial y} \quad \text{Équation 22}$$

Avec :

Symbole	Signification	Symbole	Signification
<b>t</b>	Temps	<b>x,y,z</b>	Cordonnées cartésiennes
<b>A</b>	Viscosité horizontale	<b><math>\nu t</math></b>	Viscosité turbulente verticale
<b>Pa</b>	Pression atmosphérique	<b>u,v,w</b>	Vitesse composante dans les directions x,y,z
<b>g</b>	Accélération de gravité	<b>u, v</b>	Vitesses des courants la profondeur moyenne
<b>d</b>	Profondeur d'eau	<b>(<math>u_s, \nu_s</math>)</b>	Vitesse à laquelle l'eau est rejetée dans l'eau ambiante
<b><math>\rho_0</math></b>	Densité de référence de l'eau	<b><math>f=2 \Omega \sin \phi</math></b>	Paramètre de Coriolis
<b><math>\rho_w</math></b>	Densité de l'eau	<b>(<math>\tau_{sx}, \tau_{sy}</math>)</b>	Composantes x et y des contraintes de cisaillements du vent de surface
<b><math>\eta</math></b>	Elévation de surface	<b>(<math>\tau_{bx}, \tau_{by}</math>)</b>	Composantes x et y des contraintes de cisaillements du vent de fond
<b><math>\Omega</math></b>	Vitesse angulaire	<b>S</b>	Amplitude de la décharge causée par des sources ponctuelles
<b><math>h=\eta+d</math></b>	Profondeur d'eau totale	<b><math>S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}</math> et <math>S_{yy}</math></b>	Composantes du tenseur de rayonnement

### IV.3 Méthode de travail :

#### IV.3.1 Les données bathymétriques :

La carte bathymétrique utilisée est le résultat de la digitalisation de la carte marine obtenue par **Navionics Sonar Chart** édité sous le logiciel ArcGis (SIG) 10.4, qui est un système d'information géographique composé de plusieurs modules tels qu'ArcMap, ArcCatalogue..., en utilisant le système de projection WGS1984 UTM zone 32N.

Il est nécessaire de connaître les coordonnées tridimensionnelles (X, Y, Z) qui sont utilisés dans L'exploitation des données bathymétriques sur Mike21 afin de réaliser l'interpolation des valeurs sur le maillage. Les résultats obtenus après cette interpolation sont utilisés pour générer des cartes bathymétriques en 2D ou 3D. Ces étapes constituent un document de base pour la reconnaissance des reliefs et la morphologie sous-marine.

**Sonar Chart** : est une carte bathymétrique qui montre les détails des contours des fonds des mers, créés à partir de données de sondes acoustiques.

#### IV.3.2 Génération de la Mesh :

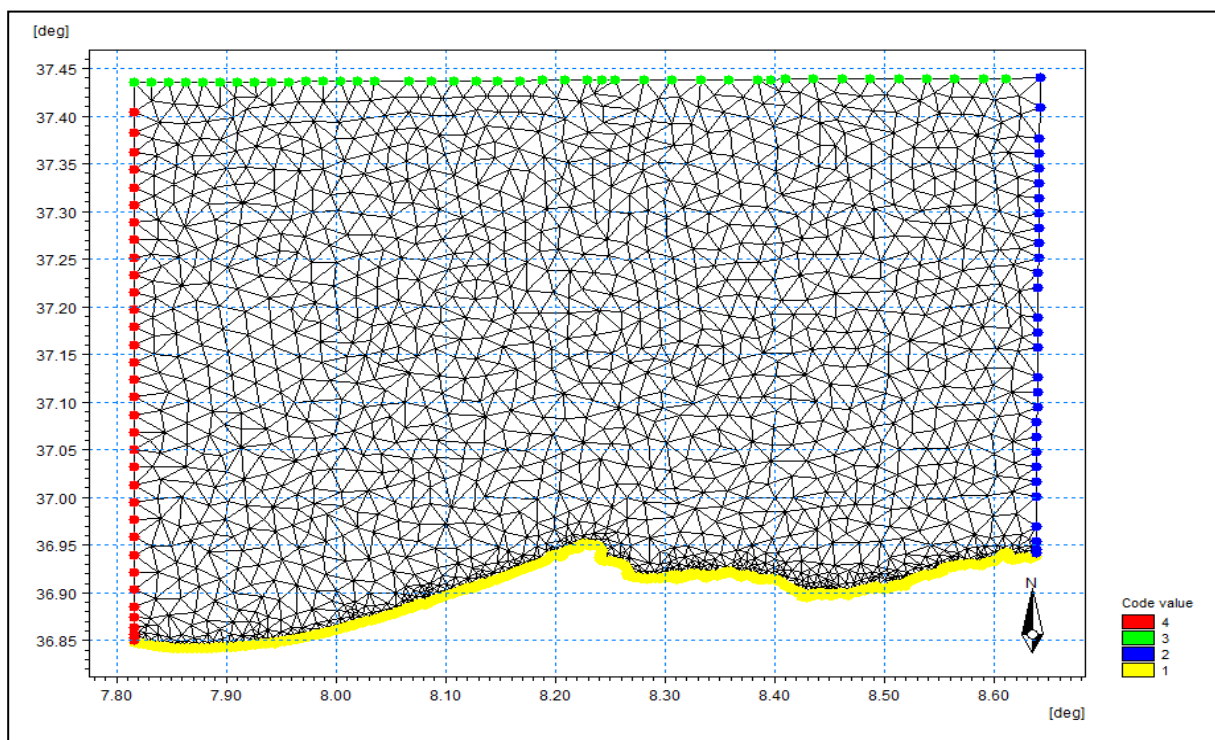
La réalisation des simulations requiert la création d'une Mesh. Pour cela, l'outil « **Mesh Generator** » du logiciel a été utilisé, et qui permet la possibilité de visualisation des données bathymétrique détaillées. Cette création suppose plusieurs étapes :

- ❖ La définition du système de projection adapté à notre zone d'étude correspond au «WGS 84 UTM zone 32N».
- ❖ L'intégration du trait de côte ainsi que la bathymétrie de la zone d'étude, enregistrées sous un fichier «XYZ».

Après avoir vérifié que les arcs du trait de côte sont correctement fermés, on procède au traitement des données bathymétriques XYZ qui sont ensuite importées dans le fichier de maillage. La génération de la Mesh suivie par une interpolation du voisin le plus proche.

#### IV.3.3 Mesh résultante :

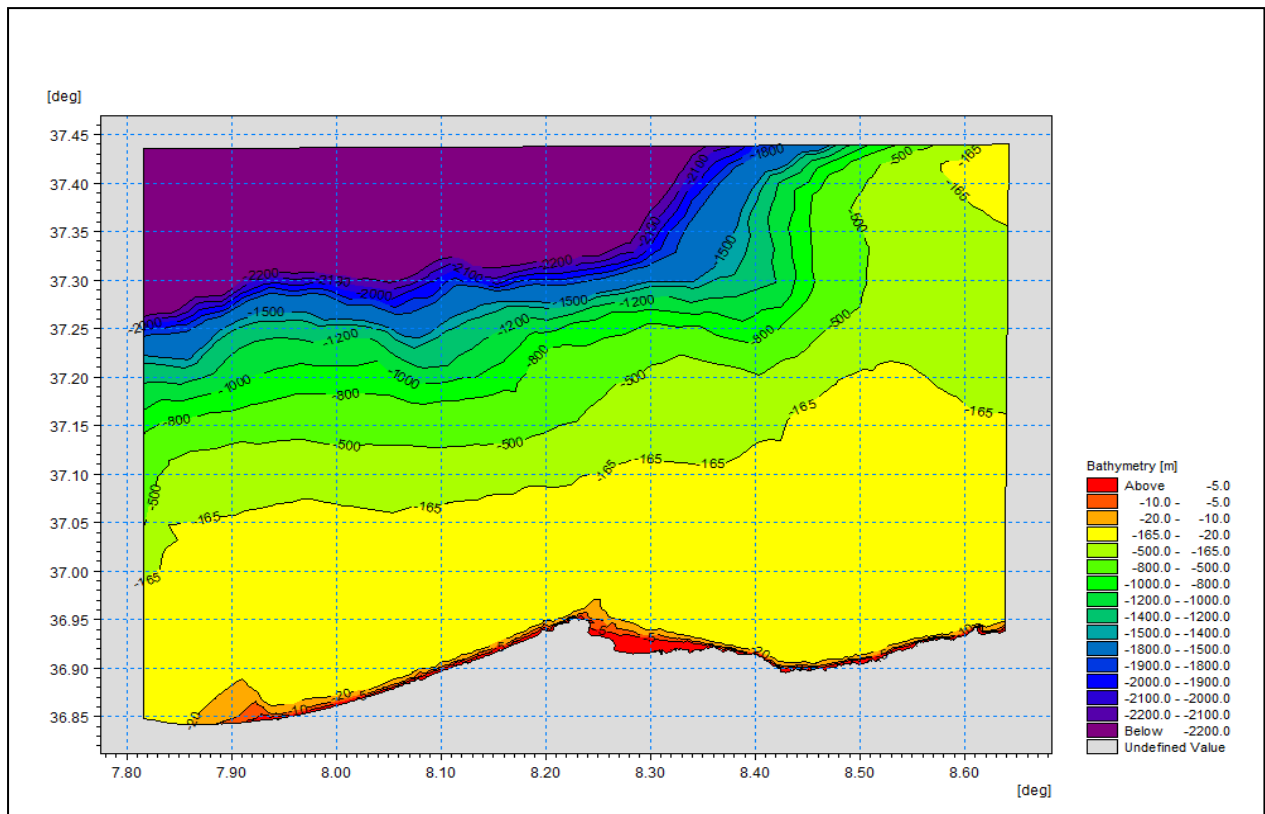
Un maillage imbriqué permet d'obtenir des résultats de haute résolution dans les zones d'intérêt. La Mesh est composée de 2881 nœuds et de 4803 éléments triangulaires. La figure 16 indique que le code value représente les frontières de la carte tel que le code 1 correspond à la frontière terrestre, le code 2 à la frontière Est, le code 3 à la frontière Nord, et le code 4 à la frontière Ouest.



**Figure 16 :** Maillage de la Mesh à l'échelle de la wilaya d'El Tarf.

#### IV.3.4 Bathymétrie résultante :

Une fois l'interpolation du maillage effectuée, la bathymétrie peut être extraite et utilisée dans l'environnement de travail.



**Figure 17 :** Carte bathymétrique de la wilaya d'El Tarf.

La carte bathymétrique indique des isobathes globalement irréguliers cela due à la morphologie complexe des fonds. La géomorphologie sous-marine de la wilaya d'El Tarf est dominée par une plate-forme étroite proche du rivage, aux profondeurs variant de 0 à 20 mètres généralement régulière. Au-delà de la plate-forme continentale, la profondeur augmente rapidement ce qui témoigne de la présence d'un talus continental (abrupte), avec des pentes raides.

#### **Mike21/3: Coupled Model FM :**

Mike 21/3 Coupled Model FM est un modèle développé par DHI, permet de simuler des différents processus hydrodynamiques en milieux marins et côtiers. Ce modèle intègre les versions bidimensionnelles « Mike21 » et tridimensionnelles « Mike 3 ». Ses principaux modules sont les spectres de vagues SW et l'hydrodynamique HD (DHI, 2017).

#### **IV.4 Scénario de simulation :**

Pour effectuer les simulations de la propagation de la houle SW et l'hydrodynamique HD, nous avons réalisé des scénarios de houles extrêmes dont les périodes de retours sont : 2, 10, 50, 100 ans associer les directions les plus pénalisantes (N, NNE, NW).

Pour construire les scénarios, nous avons adopté la méthode des événements extrêmes, en particulier la méthode POT (Peaks Over Threshold) dans le chapitre III.

Les résultats obtenus associent les hauteurs de houle extrêmes correspondant à différentes périodes de retour avec l'élévation du niveau de la mer.

**Tableau 4 :** Des inputs des simulations pour l'ensemble des périodes de retours.

Période	2 ans		
Paramètre de houle	Hs	Tp	U10 direction (°)
<b>Direction</b>			
N	3.60	7.40	359.8
NW	7.20	11.44	315
NNE	3.12	6.73	22.66
Période	10 ans		
Paramètre de houle	Hs	Tp	U10 direction (°)
<b>Direction</b>			
N	4.47	8.48	359.8
NW	8.29	12.51	315
NNE	4.36	8.34	22.66
Période	50 ans		
Paramètre de houle	Hs	Tp	U10 direction (°)
<b>Direction</b>			
N	5.09	9.20	359.8
NW	9.11	13.27	315
NNE	5.60	9.77	22.66
Période	100 ans		
Paramètre de houle	Hs	Tp	U10 direction (°)
<b>Direction</b>			
N	5.30	9.44	359.8
NW	9.40	13.54	315
NNE	6.13	10.34	22.66

## IV.5 Résultats des simulations :

### IV.5.1 Résultats et discussion des simulations pour la wilaya d'El Tarf :

- **Propagation des houles de direction Nord (360°) :** D'après les figures présentées (19, 25, 31, 37), on observe les phénomènes suivants :
  - Au large, les houles provenant du secteur Nord (360°) conservent leur énergie initiale, avec des hauteurs significatives atteignant environ 5.2 m, 5.4 m, 5.8 m, 6 m pour les périodes de retours 2 ans, 10 ans, 50 ans, 100 ans respectivement. Ces houles, en eau profonde, ne subissent pratiquement aucune modification de direction ni d'amplitude.
  - À l'approche du littoral, lorsque la houle commence à ressentir l'effet du fond (profondeurs décroissantes), des processus de réfraction, et dissipation se

manifestent progressivement. Cela se traduit par une perte d'énergie et une diminution de la hauteur de la houle :

- ✓ À 30 m de profondeur : la hauteur reste relativement stable, autour de 2.81 m, 2.93 m, 3 m, 3.2 m pour les périodes de retours de 2 ans, 10 ans, 50 ans et 100 ans respectivement.
- ✓ À 21 m de profondeur : la hauteur diminue à environ 1.94 m, 1.97 m, 2.01 m, 2.15 m pour les périodes de retours de 2 ans, 10 ans, 50 ans et 100 ans respectivement.

Il est à noter qu'aucun pivotement significatif des orthogonales de houle (lignes perpendiculaires à la direction de propagation) n'est observé. Cela confirme que la réfraction est faible, avec des angles de déviation quasi nuls.

À proximité de la côte, les houles de direction  $360^{\circ}\text{N}$  arrivent de façon quasi frontale sur le rivage. Ceci s'explique d'une part par la faible déviation des houles, et d'autre part par l'influence locale de la morphologie côtière. Toutefois, ces houles subissent des déformations importantes à l'approche de certaines zones rocheuses, notamment : Plage de Cap Rosa (El Kala) et plage La Marsa (commune de La Marsa). Dans ces secteurs, l'interaction avec le relief sous-marin irrégulier (rochers, promontoires, fonds hétérogènes) amplifie les phénomènes de réflexion, modifiant localement la hauteur et la direction des vagues.

▪ **Propagation des houles de direction Nord-Nord-Est ( $22.5^{\circ}$ ) :**

D'après les figures présentées (20, 26, 32, 38), les observations suivantes peuvent être établies :

Au large de la wilaya d'El Tarf, les houles conservent leur énergie initiale, avec des hauteurs significatives pouvant atteindre environ 5.5 m, 5.7 m, 5.8 m, 6 m pour les périodes de retours 2 ans, 10 ans, 50 ans, 100 ans respectivement. Ces houles, en eau profonde, se propagent sans altération notable de leur amplitude.

À l'approche du littoral, lorsque la houle se dirige vers la côte d'El Tarf, elle subit d'importantes déformations dues à l'influence du relief bathymétrique peu profond et complexe de cette zone. Les phénomènes de réfraction, et dissipation entraînent alors une perte progressive d'énergie.

Les hauteurs significatives diminuent progressivement jusqu'à environ 0.8 mètre, notamment à proximité du port d'El Kala et des zones rocheuses adjacentes.

Par ailleurs, on observe une augmentation locale des hauteurs de houle, atteignant environ 0,8 mètre dans les secteurs dominés par les falaises de la wilaya d'El Tarf, principalement localisées autour de Cap Rosa, La Marsa et Cap de Garde. Dans ces zones, l'interaction entre la houle et le relief côtier accentue localement l'élévation de la houle, sous l'effet de la réflexion ou de la concentration des vagues.

Des valeurs faibles de hauteurs significatives qui varient entre 0.9 mètre et 1.76 mètre sont enregistrées dans les cotes sableuses (plage de Messida, plage de La Carrissa, plage La Montagné et plage de L'usine).

- **Propagation des houles de direction Nord-Ouest (315°) :**

D'après les figures analysées (18, 24, 30, 36), les constats suivants peuvent être établis :

Au large, les vagues présentent des hauteurs significatives très élevées, pouvant atteindre environ 7mètres dans cette direction. Ces vagues, en eau profonde, conservent une énergie importante avant d'approcher le littoral.

En s'approchant de la côte, la propagation des vagues est fortement modifiée par l'influence de la bathymétrie locale et des effets de réfraction. Ces interactions entraînent une dissipation progressive de l'énergie des vagues. Ainsi, les hauteurs significatives diminuent pour atteindre des valeurs 1.64 m, 1.97m, 2.01m, 2.22m pour les périodes de retours 2 ans, 10ans, 50ans, 100ans respectivement. Au niveau du littoral de la wilaya d'El Tarf, tandis que dans les zones les plus abritées, ces hauteurs chutent jusqu'à environ 0.4 mètre.

L'état hydrodynamique observé, marqué par des hauteurs de houle plus importantes dans certaines zones côtières, s'explique par plusieurs phénomènes conjoints. La focalisation des vagues, liées à la configuration de la bathymétrie, et l'exposition directe à la houle incidente (arrivée frontale des vagues) favorisent localement une concentration de l'énergie des vagues.

Ces processus sont étroitement liés à la morphologie sous-marine de la zone, qui gouverne la propagation, la déformation et la dissipation des vagues. De plus, la configuration de la côte contribue à canaliser et concentrer l'énergie de la houle dans certaines zones précises, sous l'effet combiné de la réfraction et de la focalisation bathymétrique.

- ✓ Des valeurs faibles de hauteurs significatives qui varient autour de 0.9 m, 1.07m, 1.52m, 1.76m pour les périodes de retours de 2 ans, 10ans, 50ans et 100 ans respectivement. Sont enregistrées dans les cotes sableuses (plage de Laouinet, plage de Chetaibi, plage d'El Ayouné et plage de Cap Rosa).

IV.5.1.1 Période de retour de 2 ans :

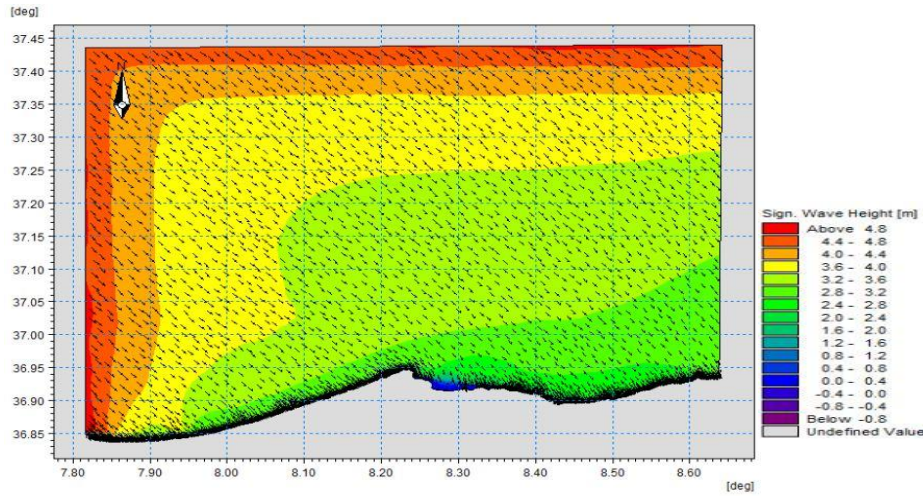


Figure 19 : champs des houles dans la wilaya d'El Tarf pour la direction NW (2ans)

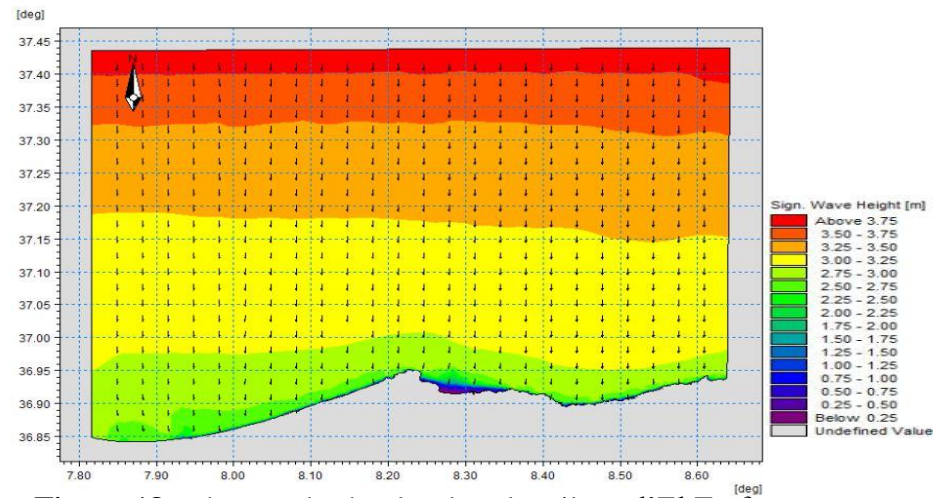


Figure 18 : champs des houles dans la wilaya d'El Tarf pour la direction N (2ans)

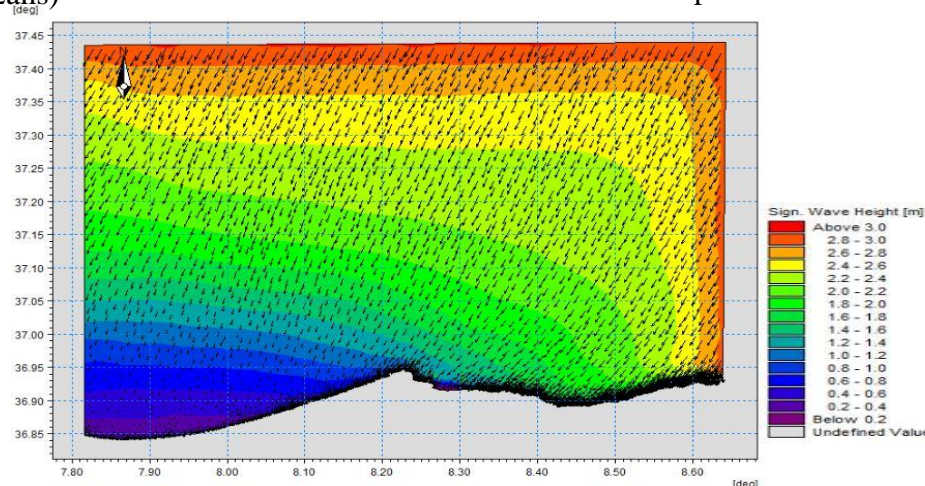


Figure 20 : champs des houles dans la wilaya d'El Tarf pour la direction NNE (2ans)

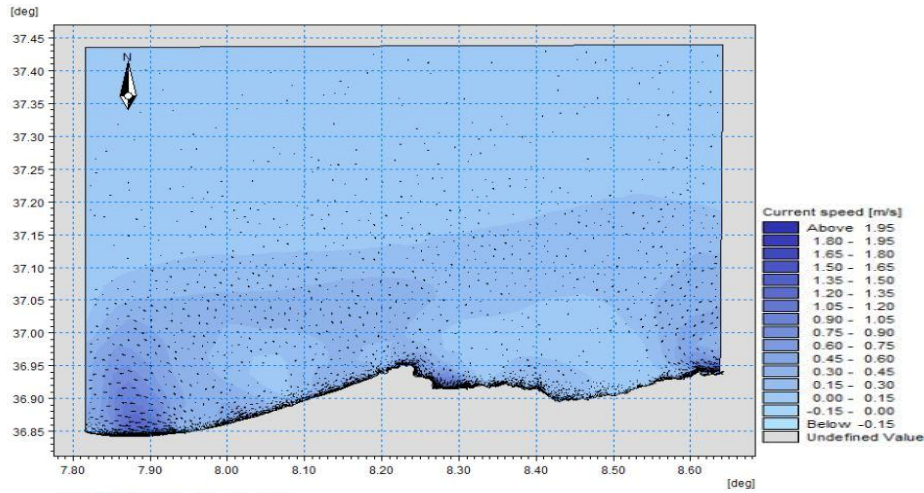


Figure 23 : champs des courants dans la wilaya d'El Tarf pour la direction NW (2ans)

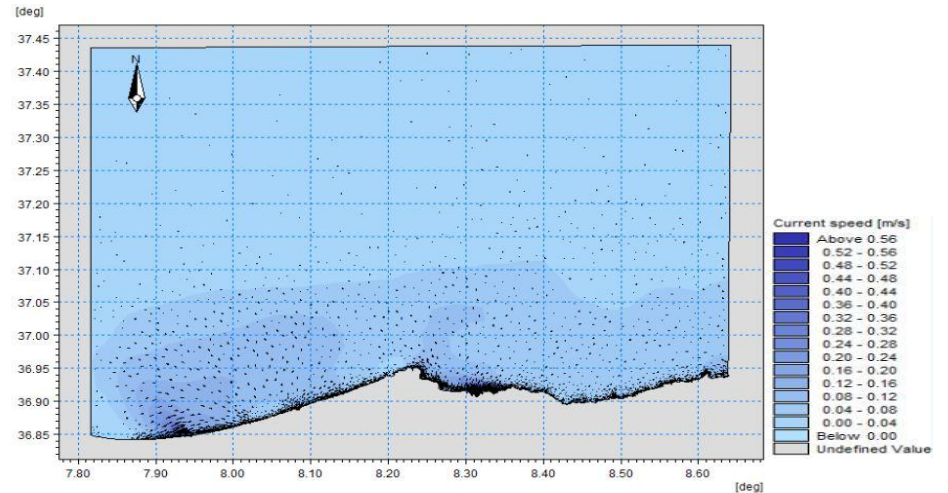


Figure 22 : champs des courants dans la wilaya d'El Tarf pour la direction N (2ans)

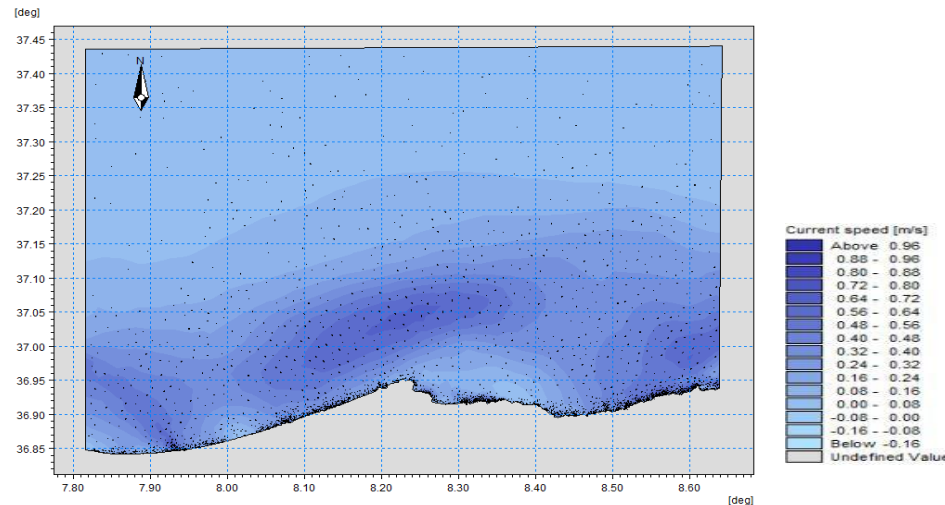


Figure 21 : champs des courants dans la wilaya d'El Tarf pour la direction NNE (2ans)

IV.5.1.2 Période de retour de 10 ans :

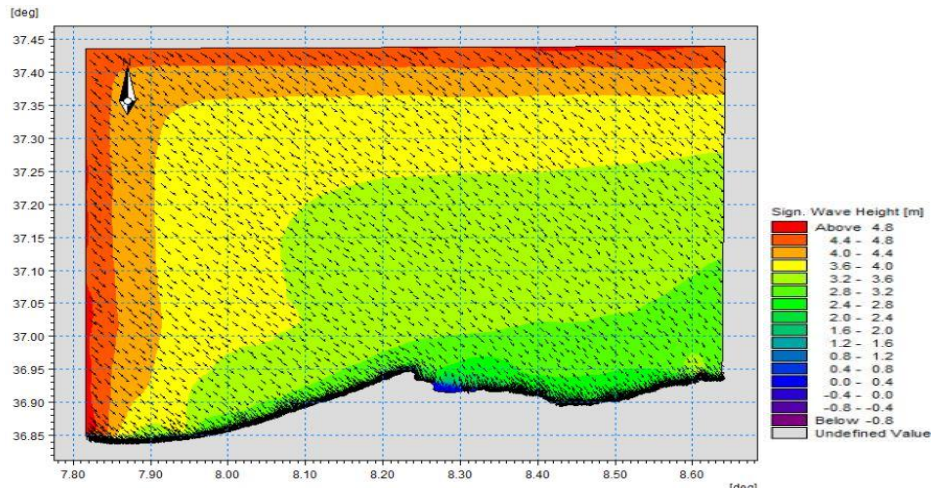


Figure 24 : champs des houles dans la wilaya d'El Tarf pour la direction NW (10ans)

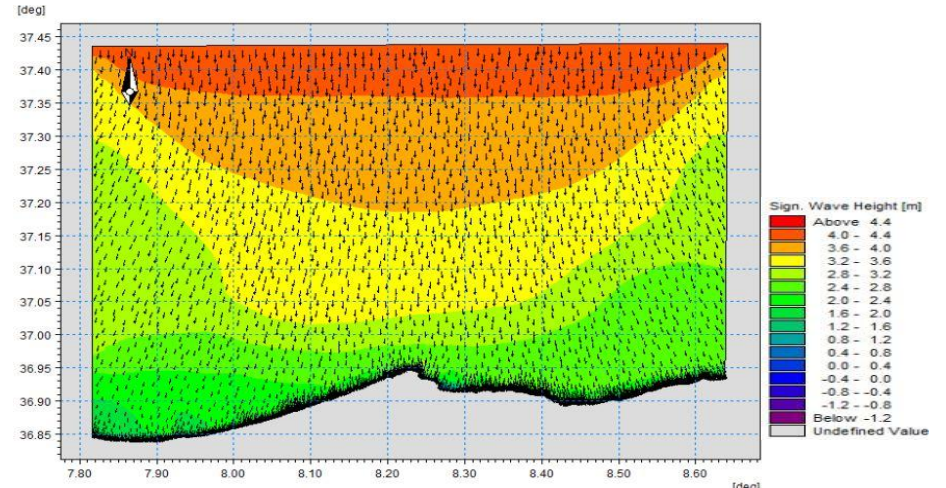


Figure 25 : champs des houles dans la wilaya d'El Tarf pour la direction N (10ans)

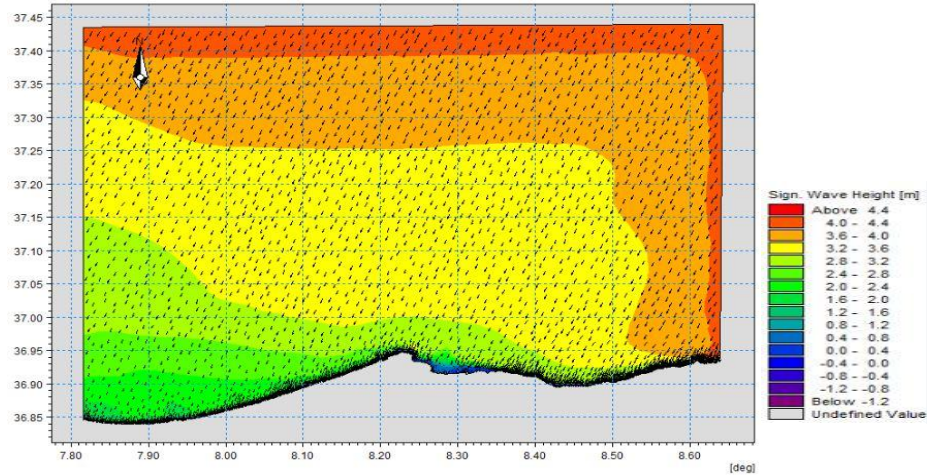


Figure 26 : champs des houles dans la wilaya d'El Tarf pour la direction NNE (10ans)

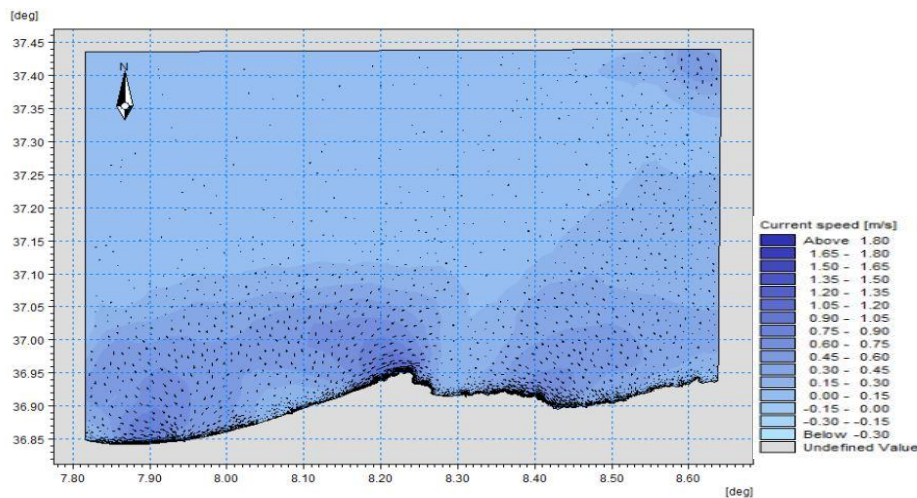


Figure 27 : champs des courants dans la wilaya d’El Tarf pour la direction NW (10ans)

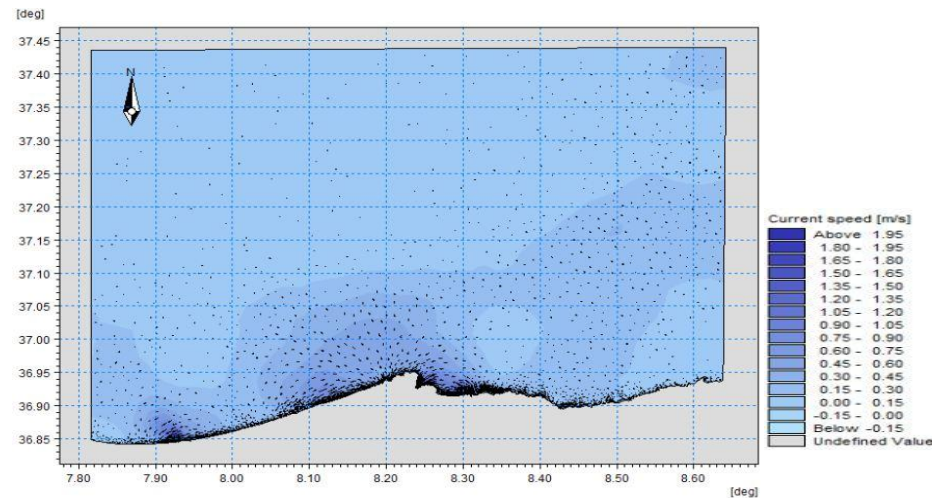


Figure 28 : champs des courants dans la wilaya d’El Tarf pour la direction N (10ans)

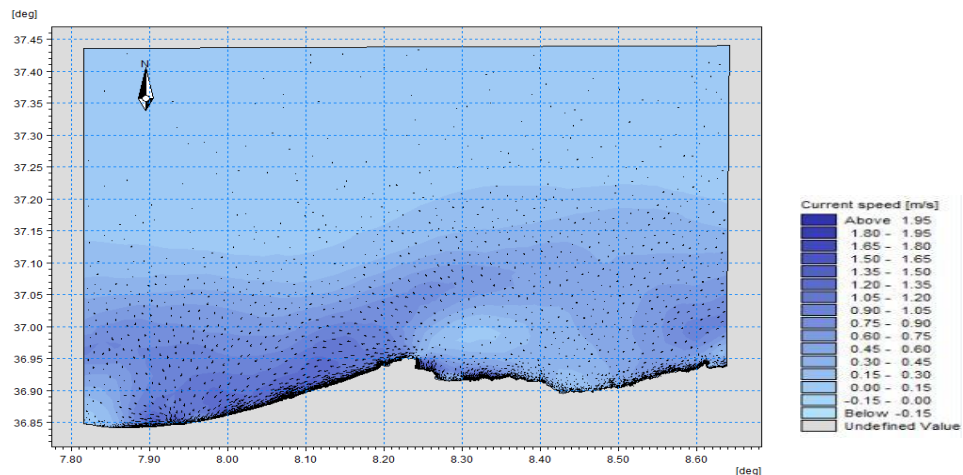


Figure 29 : champs des courants dans la wilaya d’El Tarf pour la direction NNE (10ans)

IV.5.1.3 Période de retour de 50 ans :

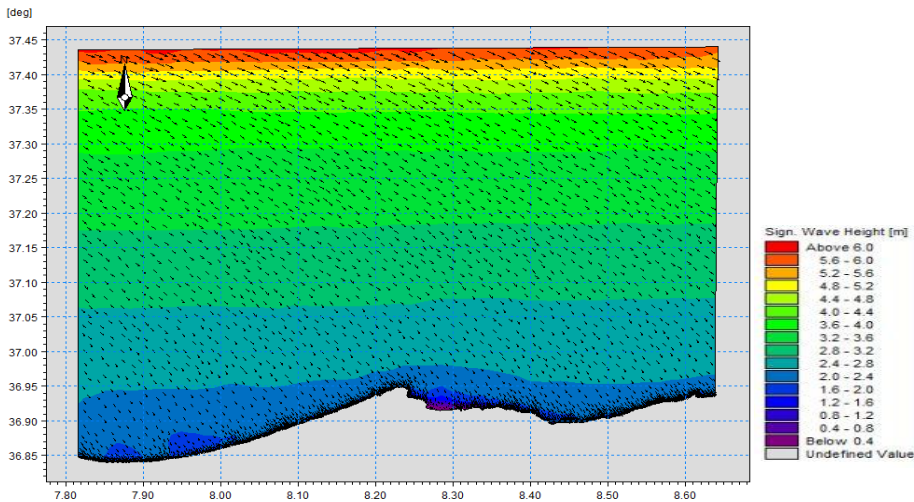


Figure 32 : champs des houles dans la wilaya d'El Tarf pour la direction NW (50ans)

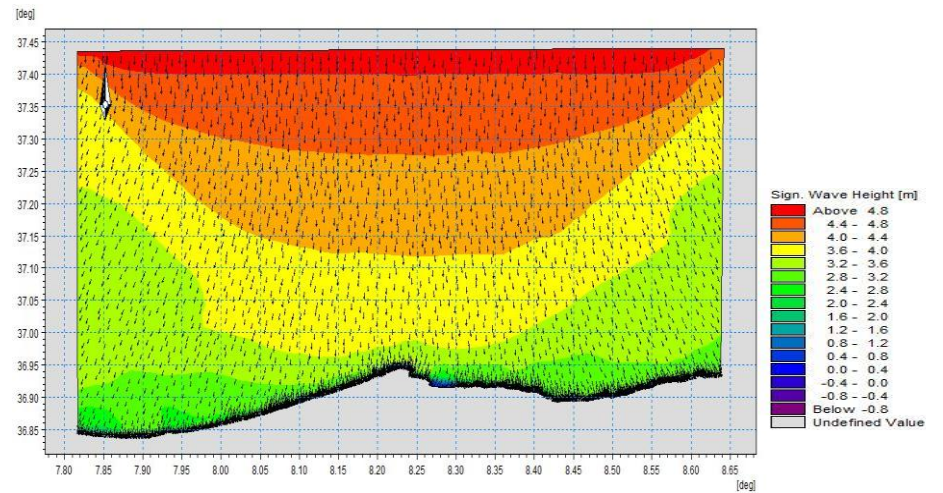


Figure 31 : champs des houles dans la wilaya d'El Tarf pour la direction N (50ans)

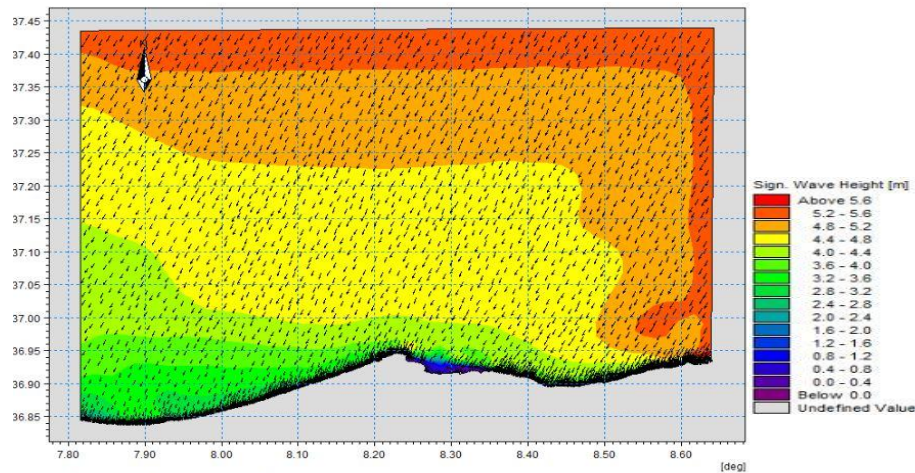
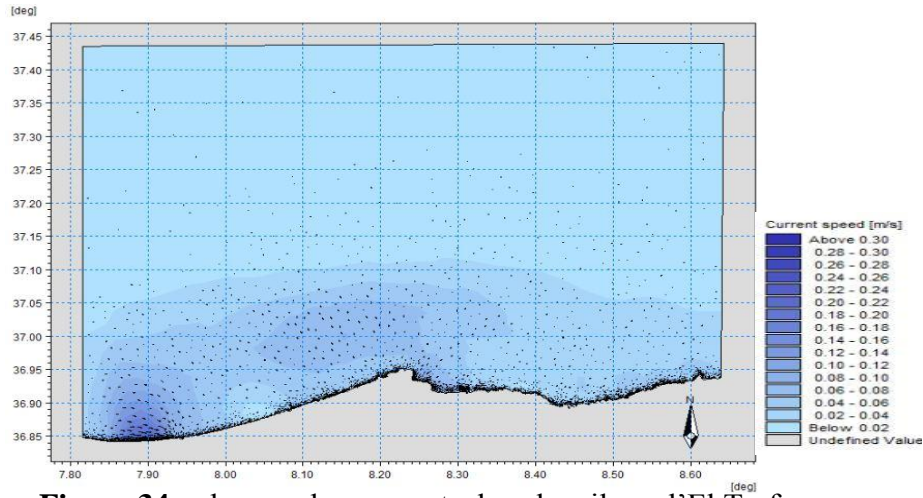
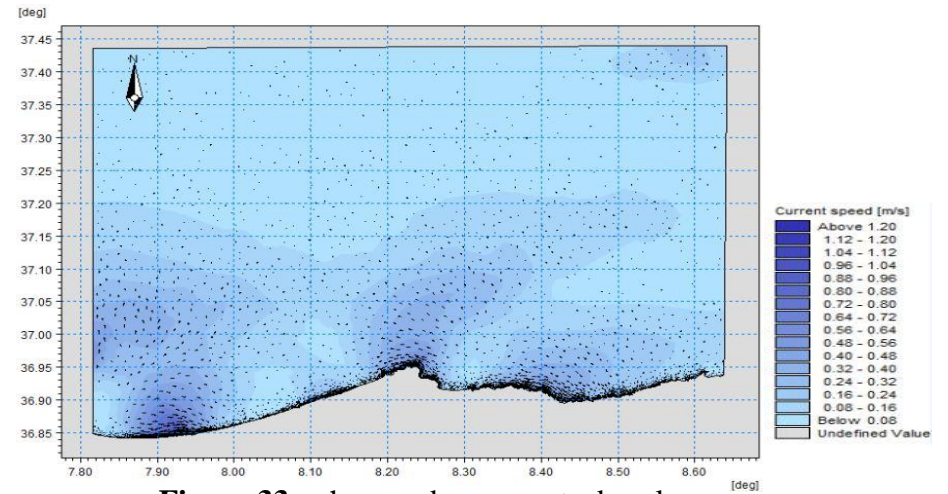


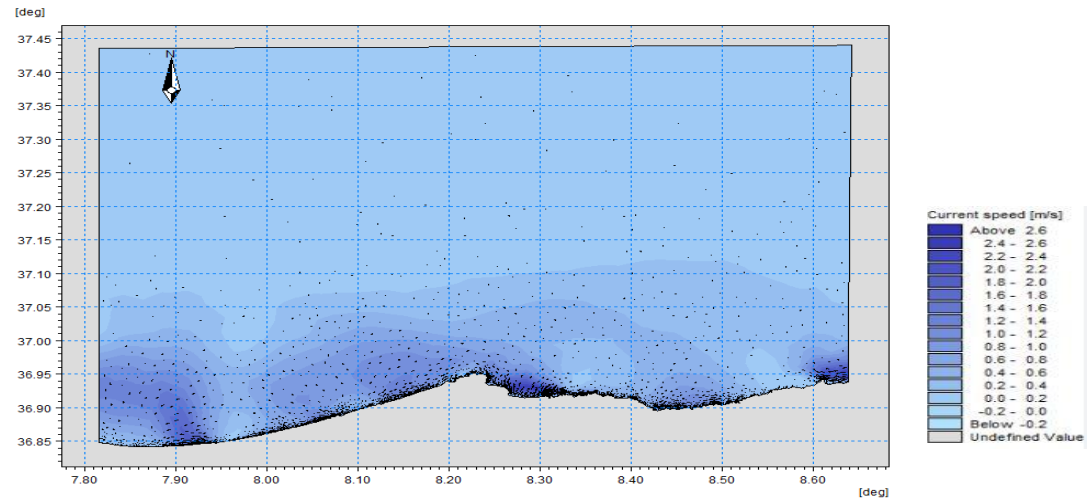
Figure 30 : champs des houles dans la wilaya d'El Tarf pour la direction NNE (50ans)



**Figure 34 :** champs des courants dans la wilaya d'El Tarf pour la direction NW (50ans)



**Figure 33 :** champs des courants dans la wilaya d'El Tarf pour la direction N (50ans)



**Figure 35 :** champs des courants dans la wilaya d'El Tarf pour la direction NNE (50ans)

IV.5.1.4 Période de retour de 100 ans :

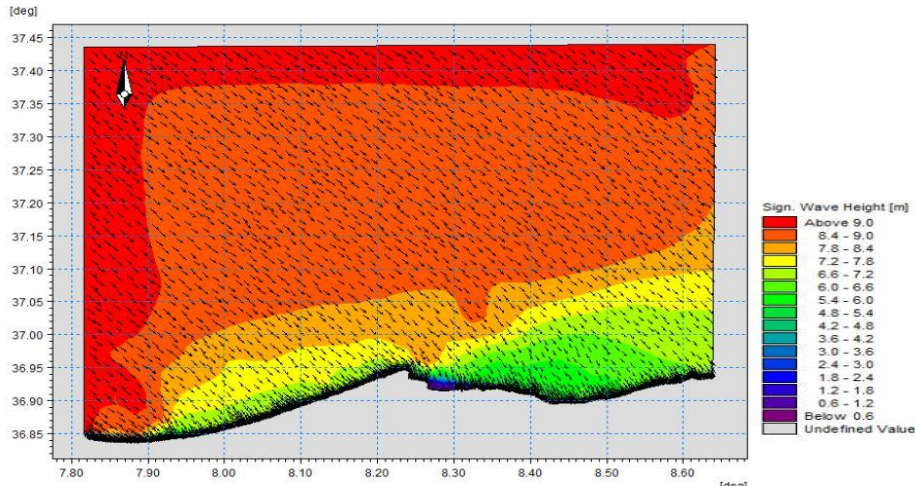


Figure 36 : champs des houles dans la wilaya d'El Tarf pour la direction NW (100ans)

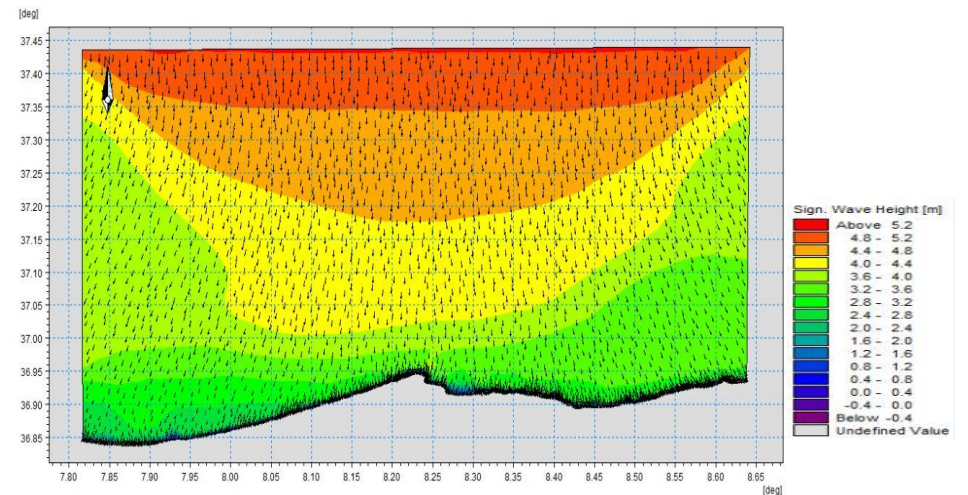


Figure 37 : champs des houles dans la wilaya d'El Tarf pour la direction N (100ans)

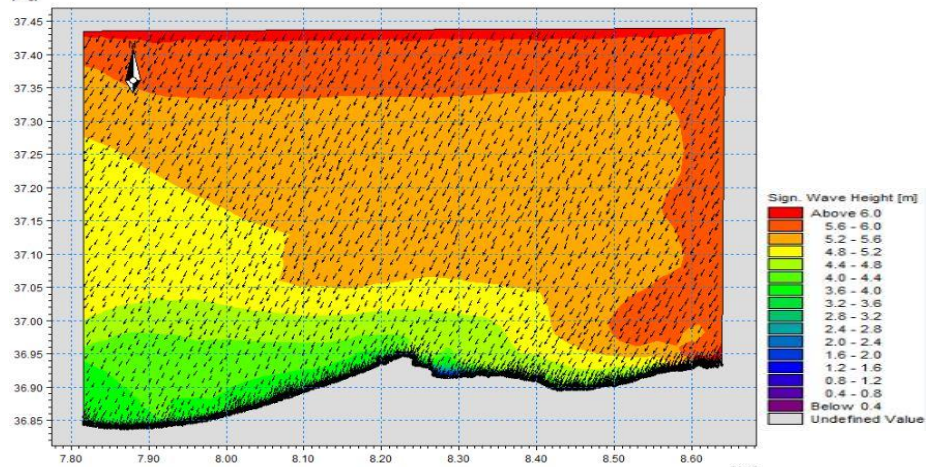
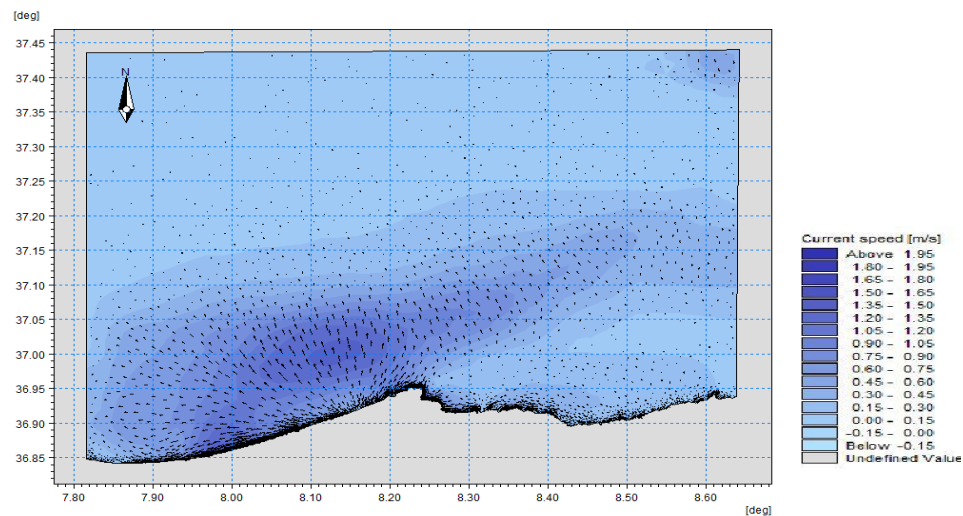
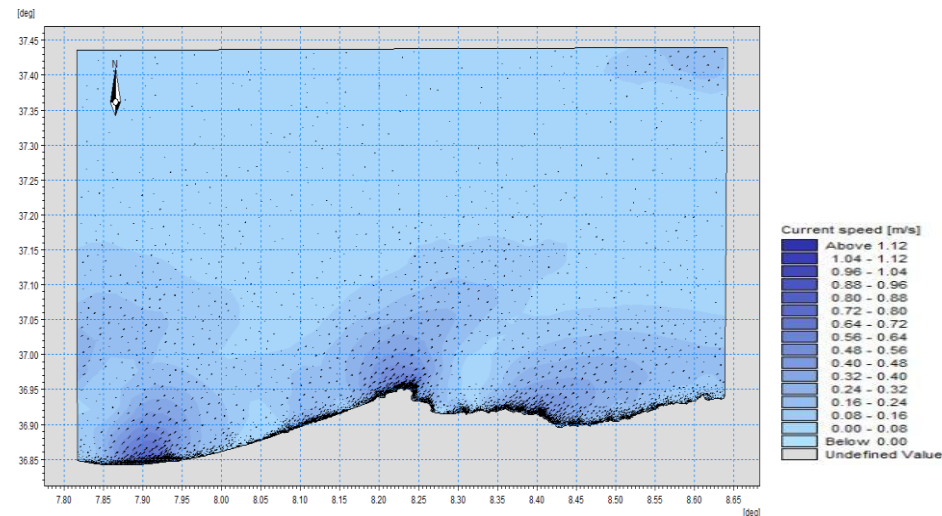


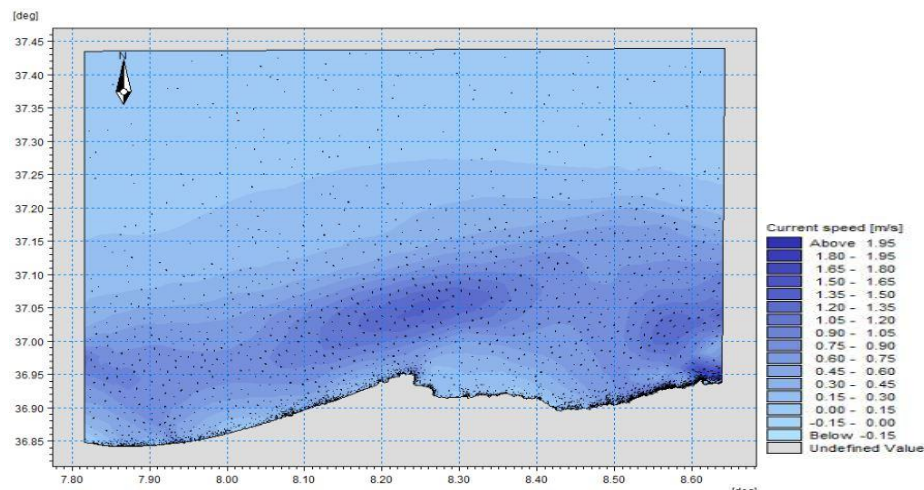
Figure 38 : champs des houles dans la wilaya d'El Tarf pour la direction NNE (100ans)



**Figure 39 :** champs des courants dans la wilaya d'El Tarf pour la direction NW (100ans)



**Figure 40 :** champs des courants dans la wilaya d'El Tarf pour la direction N (100ans)



**Figure 41 :** champs des courants dans la wilaya d'El Tarf pour la direction NNE (100ans)

L'objectif est d'analyser l'influence des courants marins simulés numériquement sur l'évolution du trait de côte, afin d'identifier les zones soumises à des phénomènes d'érosion ou d'accrétion.

- **Modélisation des champs des courants côtiers engendrée par les houles MDW= (360°) :**

Les figures (22, 28, 34, 35) illustrent la répartition des champs de courant selon la vitesse générée par la houle provenant du nord (360°N). À l'approche de la côte, la vitesse du courant varie entre 0.24 m/s, 0.45 m/s, 0.65 m/s et 1.06 m/s pour des périodes de retour de 2, 10, 50 et 100 ans, respectivement, le long du littoral d'El Tarf. La houle de secteur nord engendre des courants moins intenses que ceux générés par d'autres directions. On observe également la formation de courants tourbillonnaires derrière les ouvrages de protection, résultant de la diffraction des houles au niveau des extrémités du port.

- **Modélisation des champs des courants côtiers engendrée par les houles MDW= (315°) :**

D'après les figures (21, 27, 33, 39), les houles provenant du secteur nord-ouest génèrent des vitesses moyennes de courant de 0.30 m/s, 0.45 m/s, 0.50 m/s et 0.65 m/s pour des périodes de retour de 2, 10, 50 et 100 ans respectivement. On observe également des champs de courants significatifs, avec des vitesses dépassant 1 m/s au niveau des plages de Laouinet, Chetaïbi, El Ayouné et Cap Rosa. Ces courants jouent un rôle essentiel dans la redistribution des sédiments accumulés à proximité du port, contribuant ainsi à l'alimentation des zones côtières soumises à l'érosion.

- **Modélisation champs des courants côtiers engendrée par les houles MDW= (22.5°) :**

D'après les figures (23, 29, 35, 41), les houles en provenance du secteur nord-ouest génèrent des vitesses moyennes de courant de 0.24 m/s, 0.30 m/s, 1 m/s et 1.05 m/s pour des périodes de retour de 2, 10, 50 et 100 ans respectivement. On observe également des champs de courant plus intenses, atteignant voire dépassant 1.5 m/s. Ces vitesses élevées sont principalement enregistrées au niveau du port d'El Kala, en raison de l'accumulation importante de sédiments au pied de la jetée principale.

## **Conclusion :**

La modélisation numérique réalisée avec Mike 21 a souligné l'importance d'approfondir l'analyse hydrodynamique pour confirmer la transformation de la houle à l'origine de la dérive littorale. L'intégration de mesures in situ et d'un calibrage précis des modèles est indispensable. Cette approche a permis d'identifier les directions de houle les plus critiques Nord, Nord-Nord-Est, Nord-Ouest, fournissant ainsi des éléments clés pour concevoir des stratégies d'intervention efficaces face aux déséquilibres côtiers.

# **Chapitre V : Evolution Spatio-temporelle du trait de côte**

## V.1 Introduction :

### V.1.1 Définition du trait de côte :

Dans la littérature consacrée à la reconnaissance des côtes, les termes "littoral" et "trait de côte" sont souvent considérés comme synonymes (**Shalowitz, 1964**). Cependant, certains chercheurs estiment qu'il est important de distinguer ces deux notions. Ainsi, Lam et Qiu (1992) considèrent le rivage comme une frontière dynamique entre la terre et la mer, formant une ligne continue, souvent irrégulière, avec de nombreuses petites baies et des promontoires (**Sallaye, 2017**).

La cartographie du littoral permet de visualiser la limite entre la mer et la terre à un instant donné (**Moore, 2000**). Le trait de côte étant une entité dynamique, sa localisation peut varier selon les définitions et les critères utilisés.

Effectuer régulièrement des mesures de position sur plusieurs points de la côte peut s'avérer à la fois long et coûteux. C'est pourquoi il est préférable d'opter pour des méthodes plus rapides et économiques, telles que la photographie aérienne ou la télédétection.

L'indicateur de trait de côte le plus couramment utilisé repose sur la position de la marée, notamment la position moyenne entre la marée haute et la marée basse (Bonnot-Courtois et Levasseur, 2002). Toutefois, déterminer le trait de côte en fonction de la marée présente certains inconvénients : il est nécessaire d'utiliser des valeurs précises et de réaliser les mesures simultanément sur l'ensemble des points du littoral (**Sallaye, 2017**).

Le littoral, situé à l'interface entre la terre et la mer, est un espace à la fois fragile et très convoité. Sa bonne connaissance est essentielle pour en assurer une gestion durable. En raison de sa forte mobilité, le littoral subit des transformations rapides, influencées aussi bien par des processus naturels que par les activités humaines. Ces changements se traduisent notamment par des phénomènes d'érosion, de submersion ou d'aléas divers. Dans ce contexte, l'observation et l'analyse des indicateurs d'évolution côtière s'avèrent indispensables, rendant nécessaire la surveillance régulière du trait de côte (**OTMANI, 2015**).

Ce chapitre vise principalement à explorer, d'une part, les fondements de la théorie de l'érosion côtière et, d'autre part, à analyser l'évolution du trait de côte.

Dans ce chapitre l'objectif spécifique est de fournir un suivie spatio-temporelle de l'évolution de trait de côte du littoral d'El Tarf entre 1985 et 2024. Réalisé selon une méthode d'analyse diachronique.

## V.2 Méthodologie :

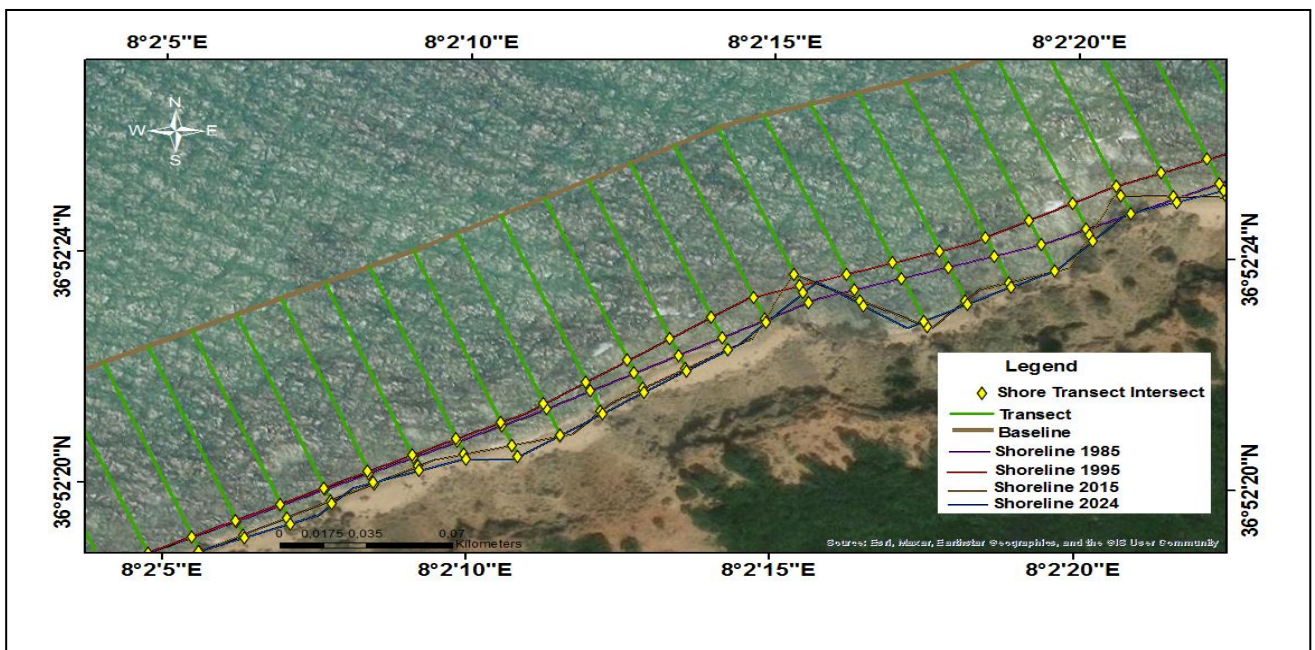
Pour numériser les traits de côte des différentes années sur le littoral d'El Tarf, nous avons utilisé **Google Earth Pro** afin d'accéder aux cartes historiques disponibles. Ensuite, le logiciel **ArcGIS** a été mobilisé pour la digitalisation des traits de côte, en lien avec

l'extension **DSAS** (Digital Shoreline Analysis System), un outil permettant de quantifier leur évolution dans le temps.

Cette combinaison d'outils nous a permis d'analyser de manière approfondie les dynamiques côtières, en identifiant les zones d'érosion, d'accumulation ou de stabilité, ainsi que leurs impacts sur la zone d'étude.

Les principales étapes de la méthodologie sont les suivantes :

- Extraire les traits de cotes via l'indice de l'eau NDWI (Normalized difference water) à l'aide du logiciel ArcGIS 10.8.
- La variation spatio-temporelle de la ligne de rivage a été évaluée à l'aide de transects espacés de 20 mètres, répartis sur les 500 km de côte. Au total, **3941 transects** perpendiculaires à la ligne de base ont été générés via DSAS.
- Enfin, les paramètres statistiques ont été calculés à partir de ces données : vitesses d'érosion (EPR), taux de variation linéaire (LRR) et distances entre la ligne de rivage la plus ancienne (1985) et la plus récente (2024), selon l'indicateur NSM.



**Figure 42** : Carte de transect et position de la ligne de rivage à différentes période.

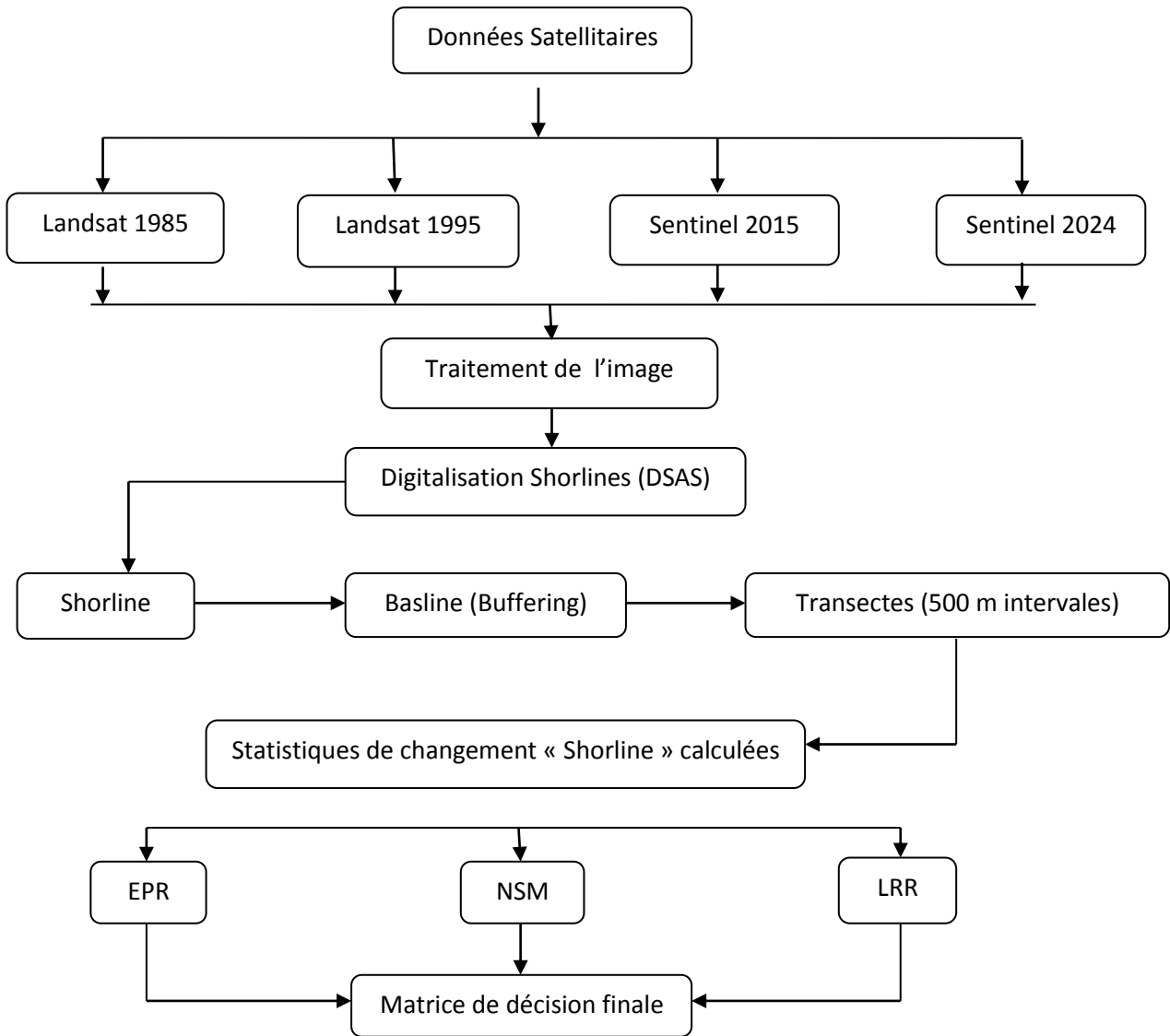


Figure 43 : Organigramme de la méthodologie (Damodar, 2023).

## V.2.1 Présentation des outils numériques :

### V.2.1.1 Google earth pro :

**Google Earth Pro** est un logiciel gratuit, bien qu’il ne soit pas un système d’information géographique (SIG) à part entière, il offre de nombreuses fonctionnalités telles que la visualisation, l’évaluation, la superposition et la création de données géo spatiales. Facile d’utilisation, il constitue un outil d’apprentissage intermédiaire pertinent pour les débutants souhaitant se familiariser avec les principes de base des SIG. Par ailleurs, Google Earth Pro permet d’accéder à des images satellites en très haute résolution, de télécharger des données géo spatiales au format KML (format interopérable natif), ainsi que de localiser des emplacements à des fins de géocodage simple.

### V.2.1.2 ArcGIS Version 10.8 :

Est un logiciel de système d'information géographique développé par « Environmental Systems Research Institute ». ArcGIS peut être utilisé principalement comme un outil de cartographie, il facilite la collecte, l'organisation, la gestion, l'analyse et la diffusion des données géographiques ainsi que le partage d'informations géographiques.

#### ❖ Fonctionnalités et usages d'ArcGIS :

- Créer et gérer des bases de données géographiques.
  - Permet de créer une grande variété de cartes d'utilisation des sols pour les évaluateurs et les urbanismes.
  - Résoudre des problèmes avec l'analyse spatiale.
  - Modéliser des phénomènes géographiques.
  - Etudier l'impact des projets de construction sur un bassin versant.
  - Prendre des décisions éclairées basées sur la localisation.
  - Rassembler les informations géographiques.
- ❖ Plusieurs sièges d'applications telles qu'Arc Catalogue, Arc Map et Arc Toolbox font partie du logiciel Arc Gis 10.8.
- ✚ **Arc Catalogue** : est l'application dédiée à la gestion des fonds de données spatiales, à la conception de bases de données et d'enregistrer et de visualiser les métadonnées et les couches géographiques. Il offre la possibilité de recherche, documenter des données géographiques et de créer des géodatabases sophistiquées pour stocker ces données.
  - ✚ **ArcMap** : est un exploreur qui permet la possibilité de créer des cartes en intégrant des données issues de nombreux formats différents, tels que les fichiers de formes, les couvertures, les tables, les dessins assistés par ordinateur (CAO), les images et les grilles ainsi que les réseaux triangulés irréguliers (TIN).
  - ✚ **Arc Toolbox** : C'est une boîte d'outil utilisé pour la conservation de données, les transferts de format ainsi que le géo-traitement (**Booth et Mitchell, 2001**).

### V.2.1.3 Le digital shoreline analysis system « DSAS » :

Le système d'analyse numérique du trait de côte (DSAS) est une application logicielle gratuite qui fonctionne avec le système d'information géographique d'Esri (ArcGIS). DSAS calcule les statistiques de taux de variation pour une série chronologique de données vectorielles du trait de côte (**Emily A. Himmelstoss et al, 2018**) :

L'analyse a été réalisée à l'aide du **logiciel DSAS**, qui repose sur l'établissement d'une **ligne de base** et le calcul de plusieurs indicateurs clés d'évolution côtière. Parmi les principales composantes figurent le **déplacement net de littoral (NSM)** le **taux de régression linéaire (LRR)**, ainsi que le **taux d'évolution finale (EPR)**, obtenus à travers différentes méthodes et modèles.

L'évaluation de la position du littoral à différentes périodes temporelles s'appuie sur plusieurs mesures statistiques générées par DSAS, telles que :

- Le taux de régression linéaire (LRR),
- Le taux final (EPR),
- Le déplacement net du littoral (NSM),

Il est essentiel de réaliser une numérisation précise et rigoureuse, car la qualité des résultats dépend largement de l'exactitude des lignes de rivage digitalisées.

Malgré certaines limites, **DSAS** reste un outil efficace pour l'analyse systématique de l'évolution de la position du littoral et des formes côtières, notamment dans le cas des falaises (**Damodar, 2023**).

### V.3 Interprétation des résultats :

Pour mieux comprendre l'évolution du trait de côte au cours de cette période, 7 classes illustrant les niveaux de progression ou de recul de la zone étudiée (Tableau 5) ont été cartographiées à l'aide du logiciel ArcGIS.

**Tableau 5 :** Classification des valeurs de changement du trait de côte à partir des paramètres EPR.

	Taux de changement de trait de côte (m/ans)	Classification des traits de côte
1	>-2	Erosion très élevée
2	-1 a -2	Erosion élevée
3	-1 a 0	Erosion modérée
4	0	Stable
5	0 a +1	Accrétion modérée
6	+1 a +2	Accrétion élevée
7	>+2	Accrétion très élevée

**V.3.1 Evolution du trait de côte à une échelle pluriannuelle (1985-1995) :**

L'analyse de l'évolution du littoral d'El Tarf entre 1985 et 1995 se caractérise par une grande variabilité (**Figure 44**). Les résultats indiquent que cette zone côtière subit une dynamique d'accrétion rapide que l'érosion, entraînant ainsi des changements notables tout au long de la cote d'El Tarf se traduisant comme suit :

Dans le secteur ouest (plage Sabi, Echatt, Draouche et la plage d'El henaya), on a observé des changements sur le rivage avec des taux différents.

Ce secteur marque un taux moyen d'EPR qui est égale à + 0.22 m/an, avec un recul net compris entre 1.25 m et 4.30 m sur la période de 1985 à 1995. Le taux maximal d'érosion, atteignant -3.95 m/an est observé à proximité de la plage d'El henaya. En revanche, un avancement maximal d'accrétion + 4.98 m/an.

Dans le secteur centre entre la plage de cap rosa et la plage de Lousine, on a enregistré un taux moyen de changement de rivage de +0.53 m/an avec un taux moyen net d'évolution compris entre 4.03 m et 7.14 m. Toutefois, un taux maximal d'érosion (-5.17 m/an) a été remarqué au niveau de la plage lousine, et un taux maximal d'accrétion de + 13.94 m/an est observé dans la plage ouest de cap rosa.

Dans la zone Est (plage d'El Kebir, N'ouares et la plage de Messida) on a enregistré un taux moyen de 0.87 m/an. Le recul de rivage a atteint + 6.55m et un avancement de + 11.68m.

De plus, L'érosion maximale dans cette zone est enregistrée au niveau de la plage El kebir - 19.09 m/an, et un taux maximal d'EPR de 26.76 m/an des accumulations sédimentaires qui localise dans la plage N'ouares.

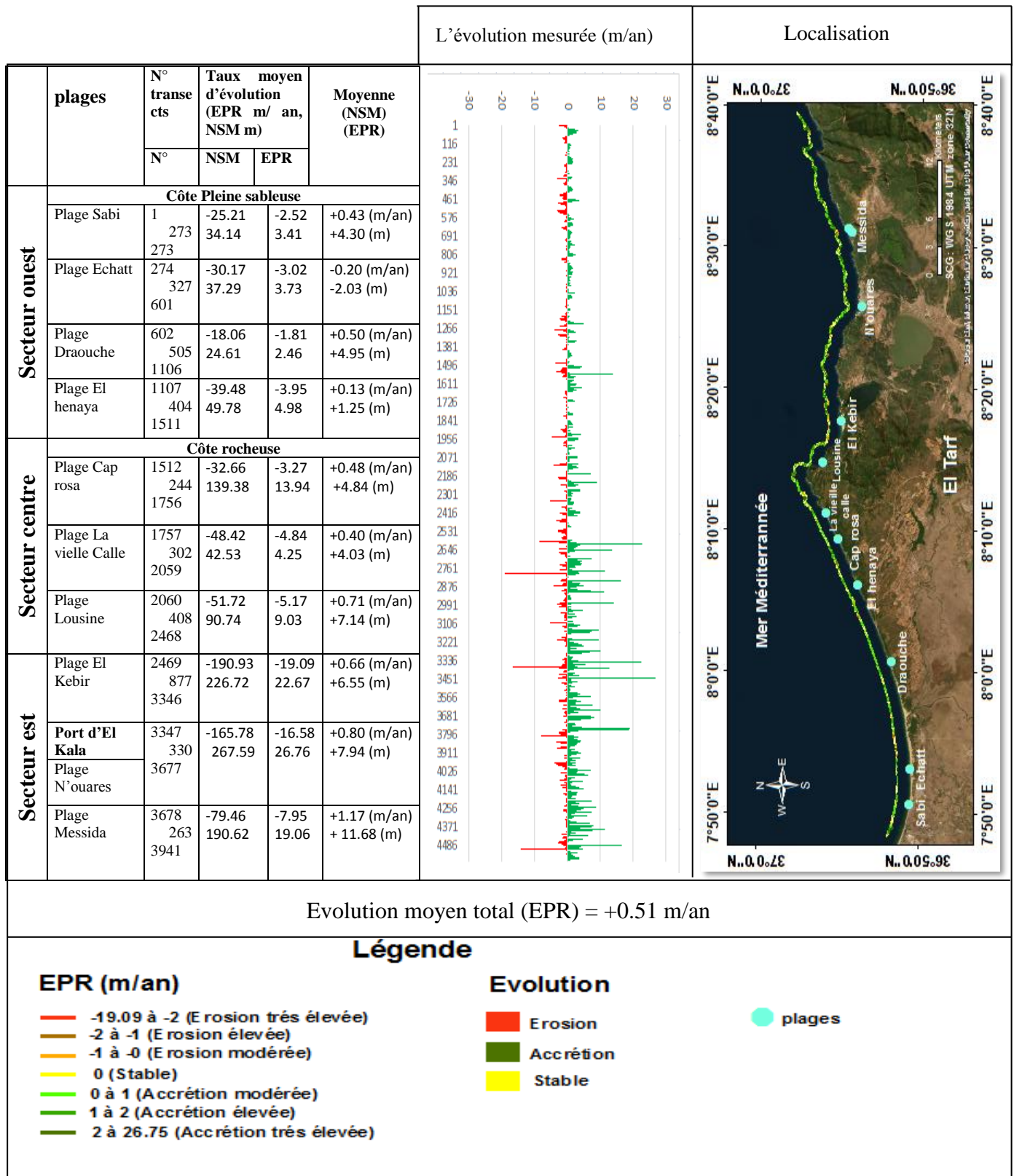


Figure 44 : Evolution Spatiotemporelle du trait de côte de littoral d'El Traf durant la période (1985-1995).

**V.3.2 Evolution du trait de côte à une échelle pluriannuelle (1995-2015) :**

Cette période est marquée par une prédominance de l'érosion par rapport à la période de 1995-2015 (**Figure 45**).

Le tableau montre des taux d'évolution (EPR) généralement négatifs, traduisant un recul du trait de côte, avec des intensités variables selon les secteurs et les plages. Un taux moyen de changement du rivage sur toute la côte est de l'ordre de  $-0.87$  m/an. Dans la partie Est de cette portion côtière les résultats obtenus montrent des zones en érosion avec des taux de l'EPR de  $-1.11$  m/an.

La cote de secteur centre est délimitée par la plage Cap Rosa a plage Lousine enregistré une érosion modérée avec une valeur d'EPR de  $-0.76$  m/an.

Le secteur Ouest marque un important recule avec une moyenne d'EPR égale  $-0.76$  m/an.

La période 1995–2015 est marquée par :

- Une érosion très forte sur plusieurs plages, notamment à La vieille Calle, Lousine, Messida avec des taux supérieurs a  $-10$  m/an.
- Quelques cas d'accrétion locale, comme à Plage N'ouares ( $+13,62$  m/an), qui constituent des exceptions notables à cause de l'installation de port d'El kala.
- La tendance générale est un recul du trait de côte, surtout sur les zones rocheuses de la façade centrale et orientale.

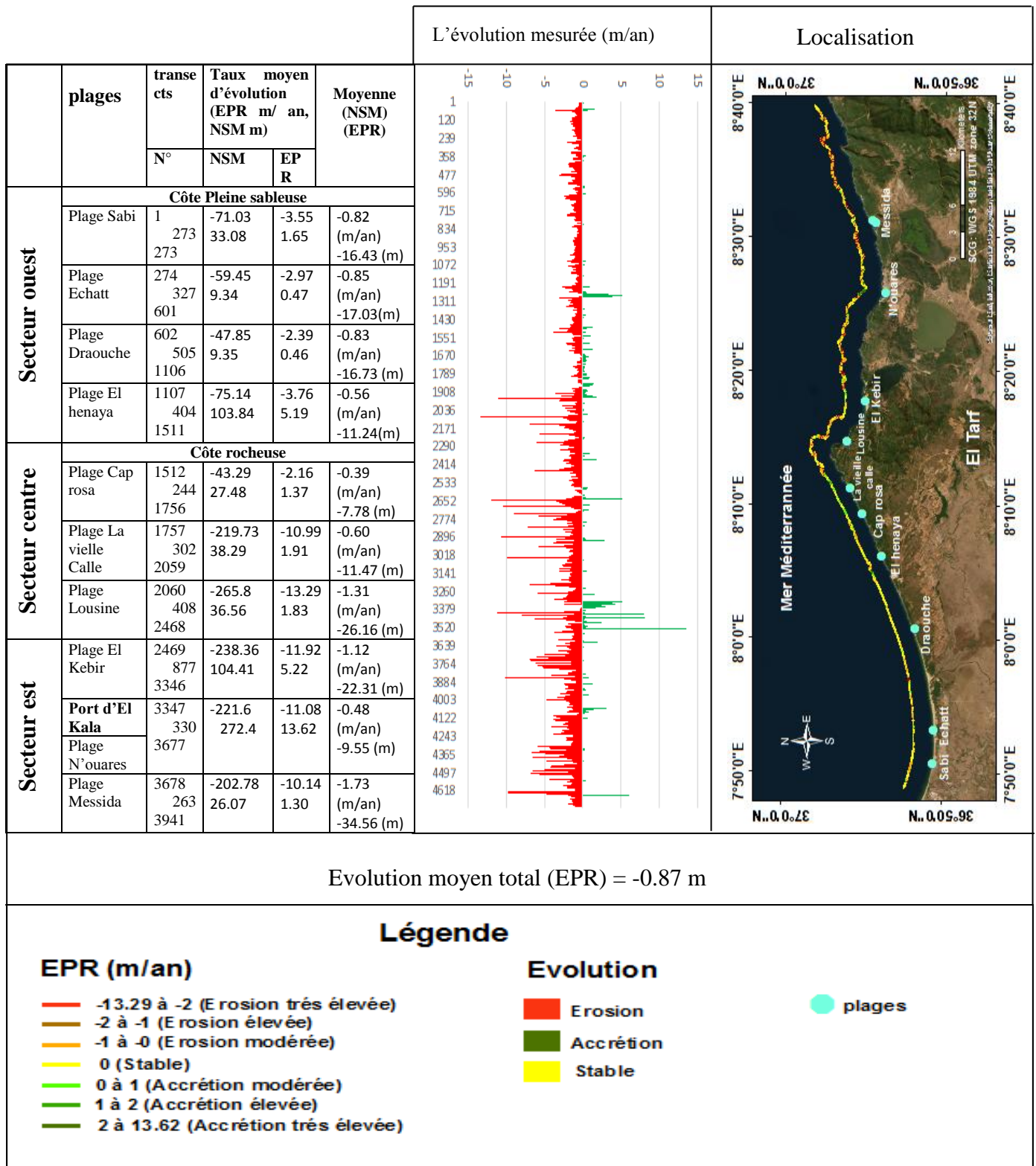


Figure 45 : Evolution Spatiotemporelle du trait de côte de littoral d'El Traf durant la période (1995-2015).

**V.3.3 Evolution du trait de côte à une échelle pluriannuelle (2015-2024) :**

Durant cette période notre zone d'étude a connue une position de recul le long du littoral avec une vitesse moyenne de l'ordre de -0.12 m/an (**Figure 46**).

Dans la partie ouest, les résultats obtenus montrent des zones en accrétion avec des taux d'EPR varient entre + 3.10 m/an et + 6.14 m/an. Un pic d'accrétion, atteignant + 17.01 m/an, a été observé sur la plage d'El henaya (accrétion très élevée) ainsi entre la plage d'Echatt et la plage de Draouche.

L'érosion forte est enregistrée sur la plage Lousine avec une valeur de -14.94 dans la partie centrale. Par ailleurs, dans la partie Est on a observé une forte d'érosion sur les plages (El kebir, N'ouares, Messida) avec des valeurs maximales d'EPR entre -20.94 m/an et -31.43 m/an. Ainsi qu'une grande valeur d'accrétion a été enregistrée au niveau de la plage El kebir (25.78 m/an).

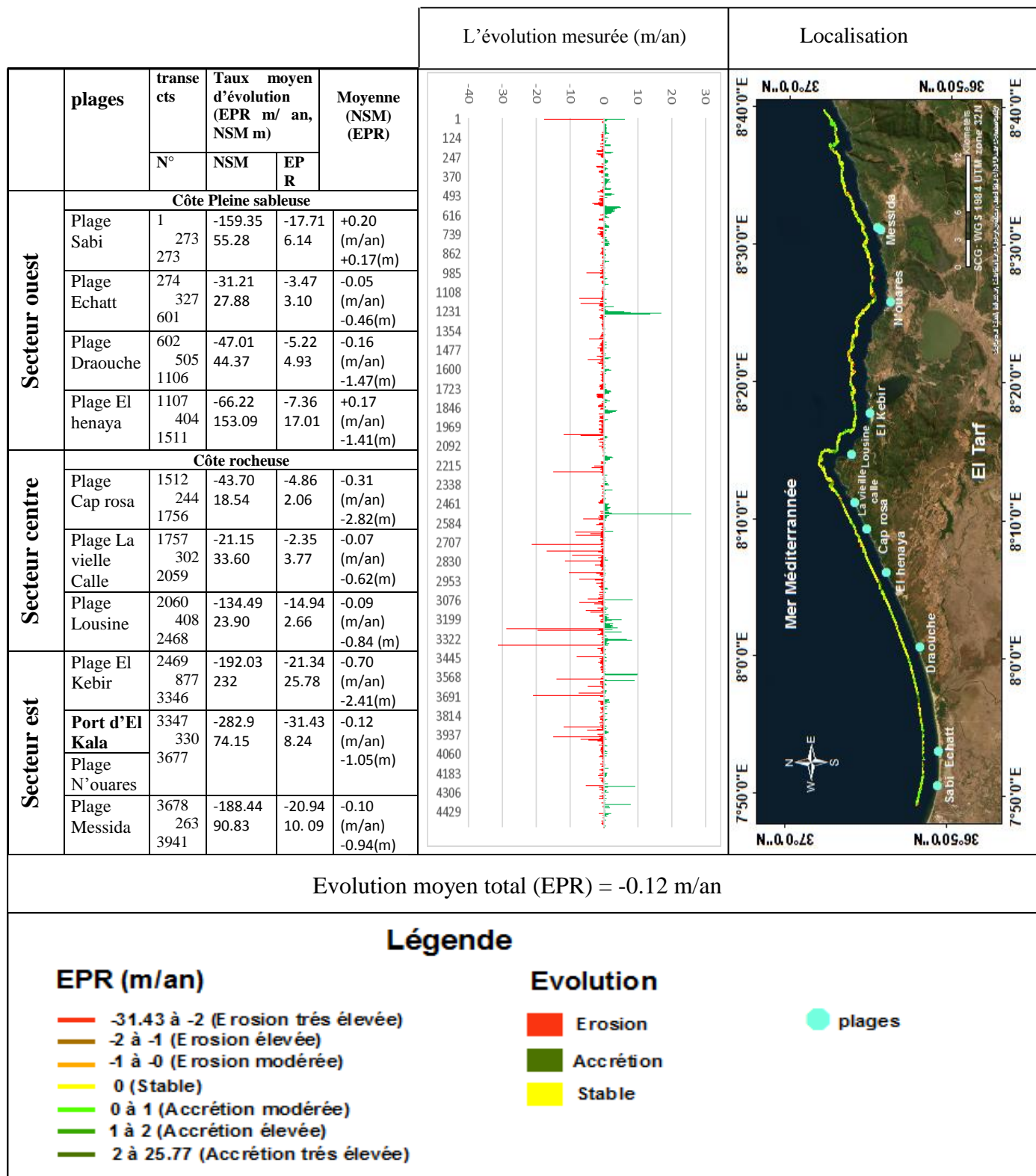


Figure 46 : Evolution Spatiotemporelle du trait de côte de littoral d'El Traf durant la période (2015-2024).

**V.3.4 Evolution du trait de côte à une échelle pluriannuelle (1985-2024) :**

La moyenne du LRR (-0.50 m) et celle de l'EPR (-0.35 m/an) traduisent une tendance générale au recul du trait de côte durant cette période. Ces résultats indiquent une érosion significative du littoral.

L'évolution de la côte d'El Tarf entre 1985 et 2024 présente une forte variabilité (**Figure 47**). Les données recueillies indiquent que cette portion du littoral a été davantage marquée par des phénomènes d'accrétion que par des processus d'érosion, entraînant des modifications notables sur l'ensemble de littorale de Tarf.

Dans la zone Est (entre la plage d'El Kebir et la plage de Messida), des changements significatifs du rivage ont été observés, avec des taux d'évolution variables :

- Un taux moyen d'érosion estimé à -0.40 m/an (EPR).
- Le taux d'érosion maximal, atteignant -6.41 m/an, a été enregistré à la plage El Kebir.
- Le taux maximal d'accrétion, de +6.40 m/an, est noté à l'extrémité est de la plage de N'ouares.

Dans la zone centrale, située entre la plage de Cap Rosa a plage de Lousine :

- Un taux moyen de recul du rivage de -0.28 m/an.
- Le taux d'érosion maximal, atteignant -6.85 m/an, a été enregistré à la plage Lousine.
- Le taux maximal d'accrétion, de +3.21 m/an, est noté à la plage de Cap rosa.

Dans la zone Ouest, entre la plage de Sabi à El henaya, le littoral a connu une variation notable du rivage, avec un taux de recul moyen de -0.36 m/an. L'érosion maximale dans la partie Ouest est enregistrée au niveau de la plage Sabi avec un taux d'EPR de -3.22 m/an, les accumulations en sédiments maximales sont localisées au niveau du centre de la plage d'EL henaya avec un taux d'EPR de + 3.14m/an.

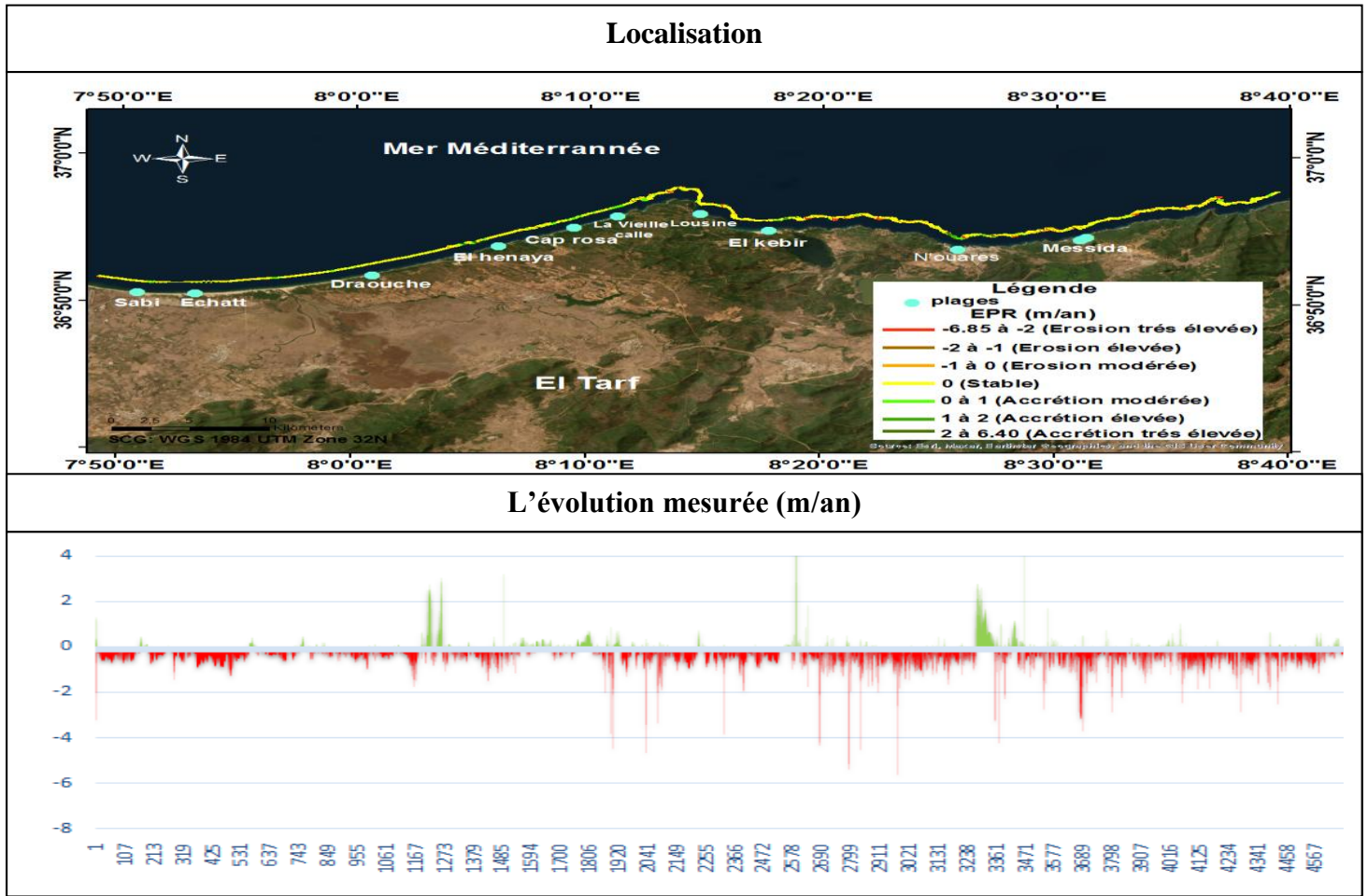


Figure 47 : Evolution Spatiotemporelle du trait de côte de littoral d'El Traf durant la période (1985-2024).

Tableau 6 : Evolution Spatiotemporelle du trait de côte de littoral d'El Traf durant la période (1985-2024).

	Plage Sabi	Plage Echatt	Plage Draouche	Plage El henaya	Plage Cap rosa	Plage La vielle Calle	Plage Lousine	Plage El Kebir	Plage N'ouares	Plage Messida
<b>Nombre de transects</b>	273	327	505	404	244	302	408	877	330	263
<b>Longueur (m)</b>	5460	6540	10100	8080	4880	6040	8160	1754	6600	2360
<b>Taux moyenne de changement du trait de côte (m/an)</b>										
<b>EPR</b>	-0.38	-0.50	-0.24	-0.32	-0.14	-0.20	-0.51	-0.46	-0.17	-0.58
<b>LRR</b>	-0.49	-0.57	-0.37	-0.28	-0.19	-0.27	-0.67	-0.60	-0.80	-0.79
<b>Taux max de changement du trait de côte (m/an)</b>										
<b>EPR</b>	1.98	0.037	0.46	3.14	3.21	0.86	0.72	5.65	6.40	1.70
<b>LRR</b>	1.58	-0.01	0.33	3.25	2.61	1.08	0.36	3.30	4.95	0.79
<b>Taux minimum de changement du trait de côte (m/an)</b>										
<b>EPR</b>	-3.22	-1.52	-1.01	-1.86	-1.17	-5.64	-6.85	-6.41	-6.41	-3.70
<b>LRR</b>	-2.42	-1.37	-1.21	-2.02	-1.36	-6.75	-8.19	-6.49	-5.06	-3.91
<b>Nombre de transects en accrétion</b>										
<b>EPR</b>	27	21	30	66	60	109	19	83	113	17
<b>LRR</b>	27	21	30	66	60	109	19	83	113	17
<b>Nombre de transects en érosion</b>										
<b>EPR</b>	1	10	1	14	1	14	45	50	16	32
<b>LRR</b>	1	10	1	14	1	14	45	50	16	32
<b>% de transects en accrétion</b>										
<b>EPR</b>	9.89	6.42	5.94	16.33	24.59	36.09	4.65	9.46	34.24	14.40
<b>LRR</b>	9.89	6.42	5.94	16.33	24.59	36.09	4.65	9.46	34.24	14.40
<b>% de transects en érosion</b>										
<b>EPR</b>	0.36	3.05	0.19	3.46	0.40	4.63	11.02	5.70	4.84	27.11
<b>LRR</b>	0.36	3.05	0.19	3.46	0.40	4.63	11.02	5.70	4.84	27.11

**Conclusion :**

L'évolution du trait de côte indique des dynamiques complexes qui régissent les milieux littoraux, ou les interactions entre facteurs naturels (érosion, sédimentation...) et activité humaine tel que l'aménagement côtier, influencent profondément la morphologie des rivages. L'analyse de ces transformations permet de mieux comprendre les enjeux environnementaux et socio-économiques, ainsi de proposer des stratégies d'aménagement et de gestion durables.

La détermination de l'évolution spatio-temporelle du trait de côte à l'échelle locale repose sur l'exploitation des photographies aériennes et des images satellitaires. Ces données ont été référencées selon le système de projection UTM WGS 1984, Zone 32N. Les traits de côte obtenus ont été introduites dans une base de données géographiques afin d'être analysés.

On constate que le littoral d'El Tarf est vulnérable, avec quelques zones relativement stables et une prédominance des zones instables.

## **Chapitre VI : Submersion marine.**

### VI.1 Introduction :

Les submersions marines constituent un risque important, appelé à croître selon l'élévation anticipée du niveau de la mer (GIEC, 2014), la dynamique démographique des zones côtières (Lutz et Samir, 2010) et la concentration croissante des enjeux dans ces régions (Meur-Ferec et al., 2008 ; Nicholls et Cazenave, 2010).

Ce chapitre a pour but d'évaluer les zones potentiellement exposées au risque de submersion marine dans la région étudiée. En s'appuyant sur un modèle numérique de terrain à haute résolution, combiné à des données de houles extrêmes correspondant à des périodes de retours de 2, 5, 10, 50 et 100 ans, il a été possible de cartographier avec précision les zones à risque d'inondation marine. Les cartes produites permettent d'identifier les secteurs les plus vulnérables à la submersion, constituant ainsi un outil essentiel pour orienter les actions de prévention, de gestion du risque et d'aménagement du territoire.

### VI.2 La submersion marine :

La submersion marine désigne une inondation temporaire des zones côtières par la mer, généralement provoquée par des conditions météorologiques et marégraphiques extrêmes. Ce phénomène soudain résulte souvent de la combinaison de plusieurs facteurs tels que des dépressions atmosphériques, de forts vents, une houle intense, des précipitations abondantes et de forts coefficients de marée, entraînant une élévation anormale du niveau marin, appelée surcote (Préfecture du Nord, 2014).

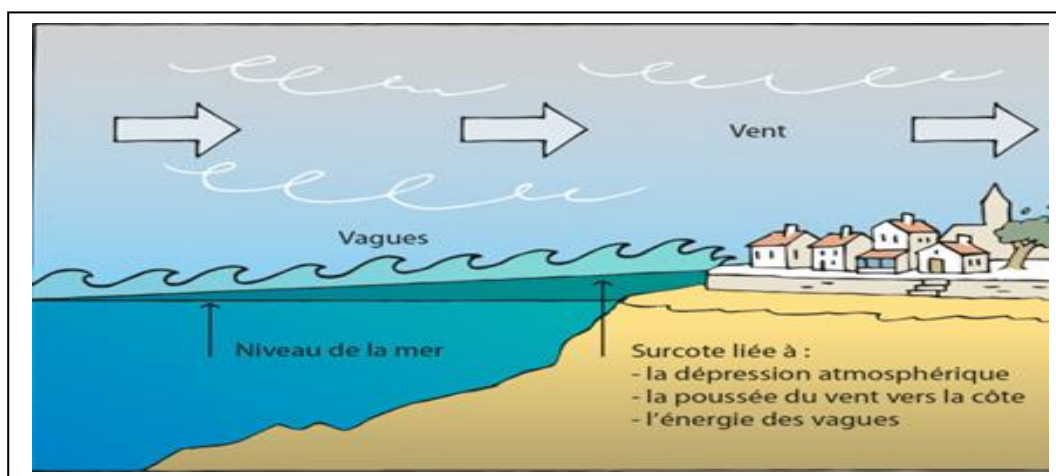
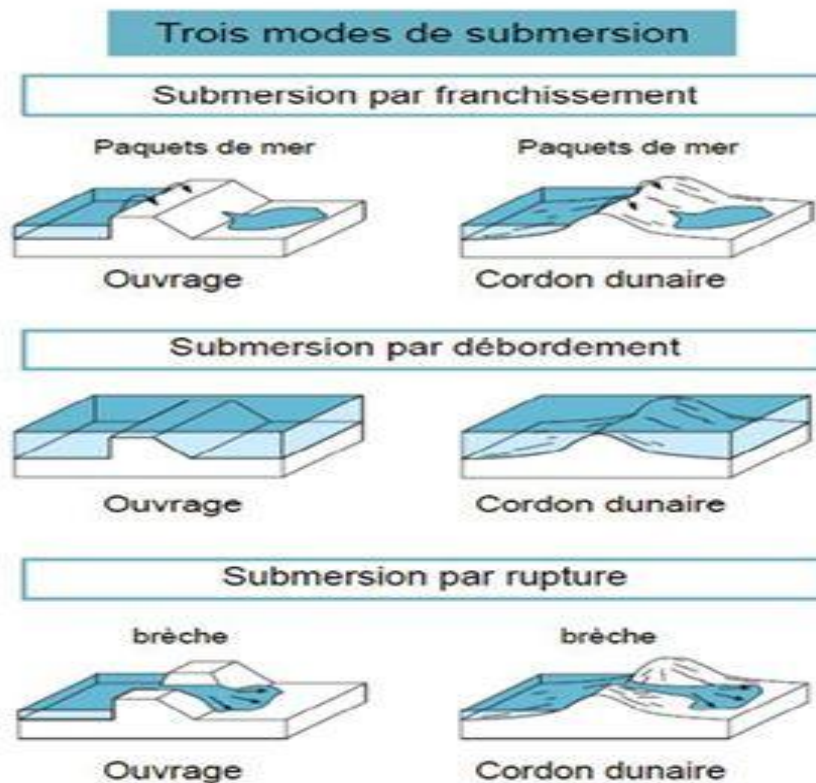


Figure 48 : Phénomène de vagues-submersion lié à une tempête (SYMADEM; 2023).

On distingue trois principaux types de submersion marine :

- **La submersion par débordement** : elle se produit lorsque le niveau de la mer dépasse la cote de crête des ouvrages de protection ou du relief naturel.
- **La submersion par franchissement** : elle survient lorsque des paquets de mer, générés par le déferlement de la houle, passent au-dessus des ouvrages ou des terrains littoraux.
- **La submersion par rupture** : elle intervient lorsque les systèmes de protection cèdent, exposant des terrains situés en contrebas du niveau marin. Cette rupture peut

résulter de plusieurs facteurs : attaque de la houle libérant une forte énergie, mauvais entretien des ouvrages, érosion chronique, sur verse, ou encore déséquilibre sédimentaire affaiblissant les cordons naturels (**Bahous Houaria, 2020**).



**Figure 49** : Modes de submersion marine (Crédit DREAL HDF, 2014).

Les processus physiques liés aux tempêtes marines mobilisent plusieurs processus physiques, principalement dus à l'action combinée de la pression atmosphérique et du vent sur le plan d'eau (**BENALLOU, I., SELLAYE, 2020**) :

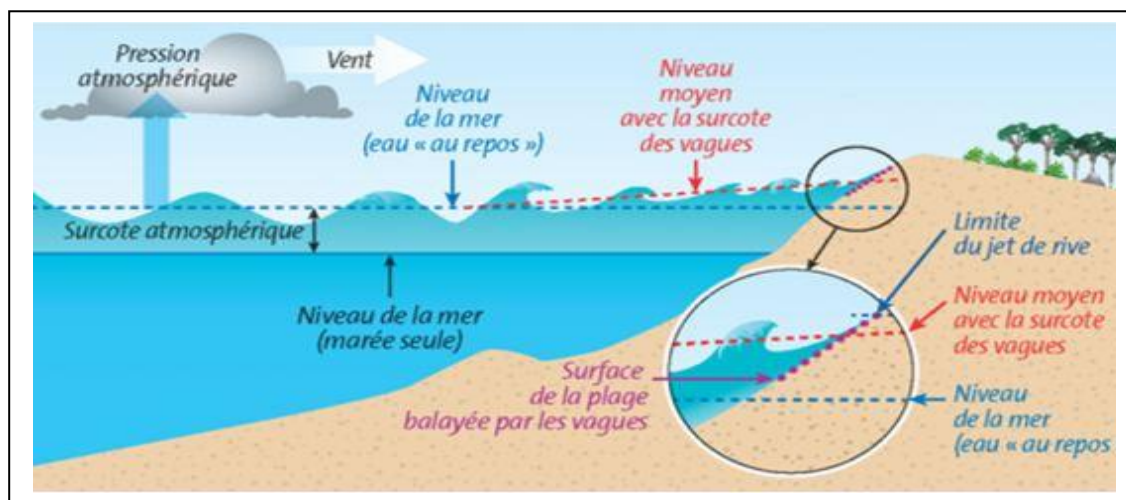
- La baisse de la pression atmosphérique : provoque une élévation du niveau marin, connue sous le nom de (baromètre inverse).
- Le vent : exerce une double influence : Il génère l'agitation du plan d'eau et la formation de vagues, dont la hauteur, la période et la direction dépendent directement des caractéristiques du vent ainsi que du (fetch) (distance sur laquelle le vent souffle sans rencontrer d'obstacle) du bassin maritime.

Il agit en surface en modifiant le niveau statique de la mer (entraînant une « surcote » ou une « décote ») et en générant des courants.

- La houle : formée au large par le vent, se propage vers le littoral où elle déferle. Ce déferlement transfère de l'énergie à la colonne d'eau, entraînant une élévation supplémentaire du niveau moyen de la mer appelée « wave set-up » (ou simplement « set-up »), pouvant atteindre plusieurs dizaines de centimètres selon les conditions.

- La marée : bien que peu marquée en Méditerranée (avec un marnage maximal d'environ 0,5 m), vient s'ajouter à la surcote en période de tempête, accentuant le risque d'inondation des zones côtières.
- On parle de « surcote atmosphérique » ou « surcote de tempête » : pour désigner la combinaison de la surélévation due au baromètre inverse et de celle induite par l'action du vent sur le niveau marin.
- Le niveau moyen de la mer : en période de tempête résulte ainsi de la somme de la surcote atmosphérique et du setup.

Enfin, le niveau maximal atteint par la mer prend en compte le phénomène de « jet-de-rive » (swash), c'est-à-dire l'eau projetée par les vagues sur le rivage. La hauteur maximale atteinte par ce jet est appelée « run-up ».



**Figure 50** : Processus physiques en action lors d'une tempête : agitation et surélévation du plan d'eau (BRGM, 2012).

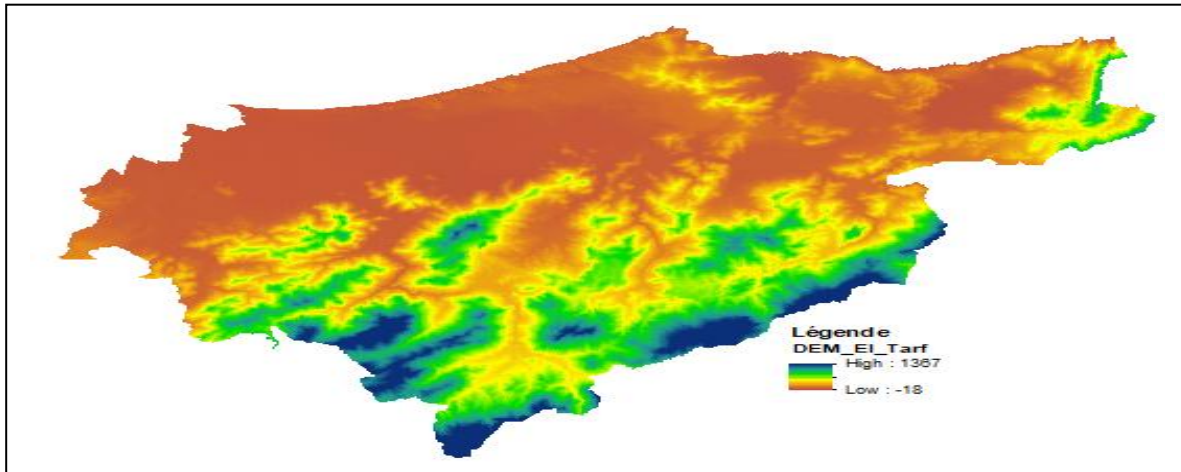
### VI.3 Méthodologie de simulation de submersion marine :

Dans le cadre de cette étude prospective, la détermination et la cartographie des terres qui sont exposées au risque de submersion dans la cote de la région étudiée sont basées sur des différents scénarios d'élévation du niveau de la mer. Ces scénarios ont été modélisés à l'aide du logiciel de cartographie ArcGIS 10.8.

La méthode choisie pour déterminer et cartographier l'aléa de submersion marine sur le littoral de la wilaya d'El Tarf est celle utilisée par plusieurs auteurs (Benavente et al. 2006 ; Kumar et al. 2008 ; Suanez et al. 2007).

Cette méthode repose sur le calcul des niveaux d'eaux extrêmes le long de la cote pour des périodes de retour (2, 10, 50, et 100ans), en prenant en compte wave set-up, ainsi que l'élévation du niveau de la mer induite par la baisse de la pression atmosphérique. Ces niveaux d'eau extrêmes sont ensuite superposés à un modèle numérique d'élévation du terrain « MNT » de la zone d'étude, dans le but de cartographier les zones potentielles submersibles.

- **Modèle numérique du terrain « MNT »** : est une représentation numérique tridimensionnelle de la surface terrestre, sans plusieurs éléments en surface tels que la végétation, les constructions. Il décrit l'altitude du terrain en chaque point à partir d'une grille de valeurs exprimées en mètres. La résolution est de 30 mètre par pixel.



**Figure 51** : Le Modèle Numérique du terrain de la wilaya d'El Tarf.

### VI.3.1 Niveaux d'eau extrêmes :

L'élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale entrainera une augmentation de l'intensité des inondations, ce qui accentuera le risque d'inondation (Hoozemans et al., 1993; Hoozemans and Hulsbergen, 1995; Bijlsma et al., 1996) (Nicholls, Hoozemans, Marchand, 1999).

L'accélération du taux de l'élévation du niveau de la mer augmente non seulement le risque d'impacts plus intenses (érosion côtière, perte d'habitats), mais pourrait également provoquer une disparition complète des plages sableuses et des marécages (SBAI, et LASGAA, 2012).

#### VI.3.1.1 Evaluation des niveaux d'inondation :

L'approche empirique utilisée pour déterminer les niveaux d'inondation dans notre zone d'étude est basée sur la formule de (HOOZEMANS et al, 1993) (SBAI, et LASGAA, 2012) :

$$Dft = MHW + St + Wf + Pf \quad \text{Équation 23}$$

Où :

- **MHW** : Niveau moyen des hautes eaux ;
- **St** : Élévation relative du niveau de la mer ;
- **Wf** : Hauteur des houles de tempêtes responsables des inondations ;
- **Pf** : Élévation du niveau marin en fonction de la pression atmosphérique ;

### VI.3.2 Variation du niveau de la mer en fonction de la pression atmosphérique :

Le réglage barométrique : les variations de la pression atmosphérique influencent le niveau de la mer ; et les basses pressions entraînent une surcote (élévation) tandis que les hautes pressions provoquent une décote (diminution) (Ménard et al. 2003).

$$Z = 0.01 (1013 - p)$$

Équation 24

- **p** : La pression atmosphérique en hectopascal.

Cette formule indique qu'une diminution de la pression atmosphérique d'un hectopascal entraîne une élévation du niveau de la mer d'environ un centimètre. En Algérie, les pressions oscillent variant généralement entre 980 hPa et 1055 hPa, ce qui provoque des variations du niveau marin comprises entre -0.42 et 0.33 mètre.

### VI.3.3 Niveau moyen des hautes eaux :

L'amplitude des marées le long de la cote de la wilaya d'El Tarf est de 50 cm.

### VI.3.4 Les houles extrêmes à la côte :

Selon les résultats de l'étude sur les houles extrêmes au large, on a pris une moyenne des amplitudes des houles provenant de la direction N, NW et NNE comme étant les plus défavorables pour la zone d'étude.

**Tableau 7** : les résultats des houles extrêmes à la cote.

Période de retour	N	NW	NNE
2 ans	1.02	1.12	1.07
10 ans	1.93	2.22	1.98
50 ans	2.32	2.48	2.46
100 ans	3.04	4.72	3.62

## VI.4 Résultats d'application :

### VI.4.1 Scénarios d'inondations :

A partir d'un modèle numérique de terrain « MNT » plusieurs traitements ont été effectuées, ce qui nous a permis de réaliser des cartes représentant l'aléa de submersion marine pour différents niveaux d'eau extrêmes.

**Tableau 8** : Niveaux d'inondations extrêmes.

Période de retour	MHW	ST	WF	PF	DFT
2 ans	0.5	0.12	1.12	0.33	2.07 m (1 à 2m)
10 ans	0.5	0.12	2.22	0.33	3.17 m (3m)
50 ans	0.5	0.25	2.48	0.33	3.56 m (4m)
100 ans	0.5	0.78	4.72	0.33	6.33 m (6m)

### VI.4.2 Evaluation des terres à risque de submersion :

Dans le cas de notre étude, la cartographie ne repose pas sur une modélisation numérique, mais sur une approche de superposition topographique à l'aide du logiciel ArcGis 10.8. Cette méthode consiste à superposer différents niveaux d'eaux extrêmes (Scénarios de 1m, 2m, 3m, 4m, 5m et 6m) sur le modèle topographique. L'image satellitaire indique une large étendue des zones submersibles.

La carte illustre les différents niveaux d'exposition au risque de submersion le long du littoral de la wilaya d'El Tarf, avec une dégradation de couleurs représentant l'intensité de cette exposition.

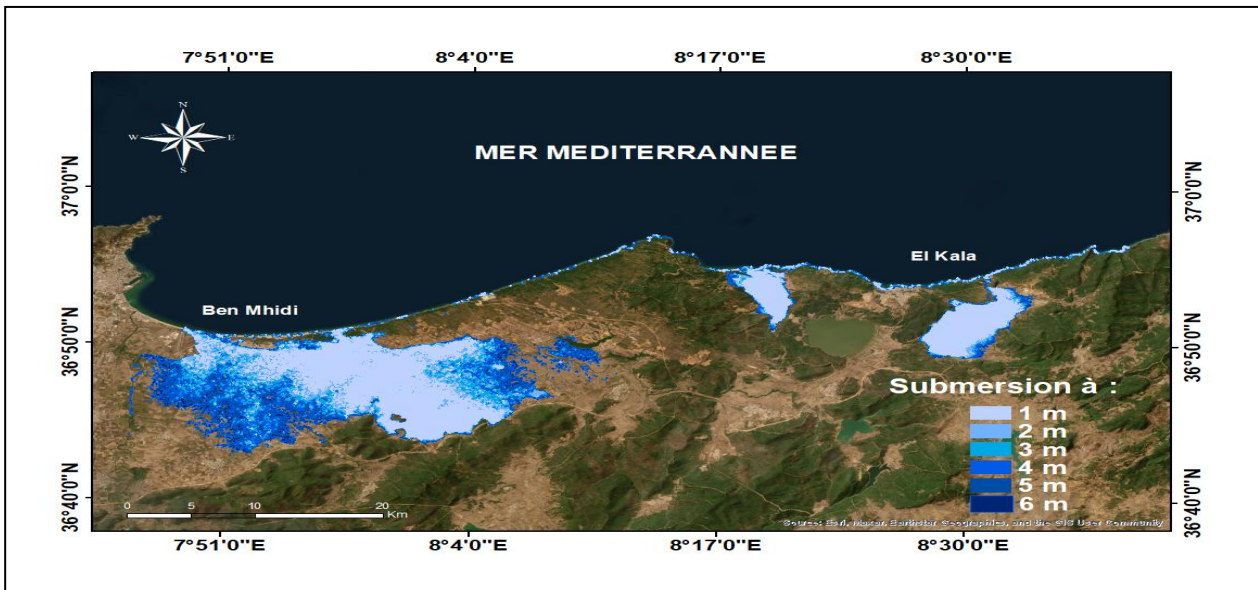


Figure 52 : Les zones inondables avec des niveaux de submersion de 1m, 2m, 3m, 4m, 5m et 6m.

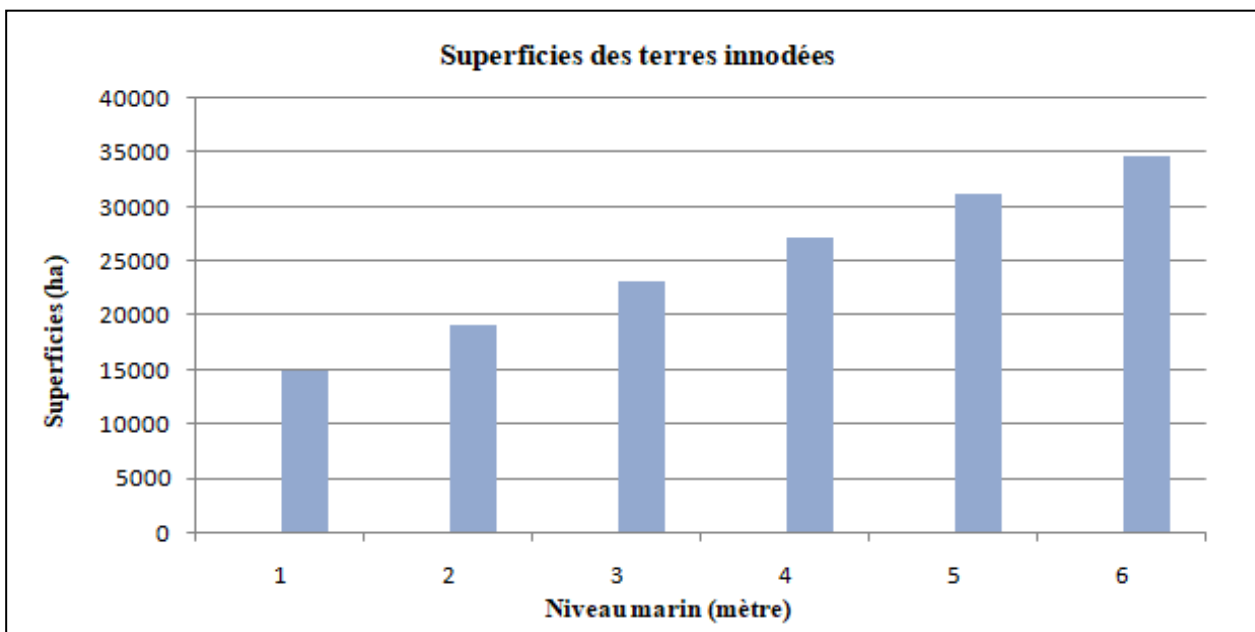
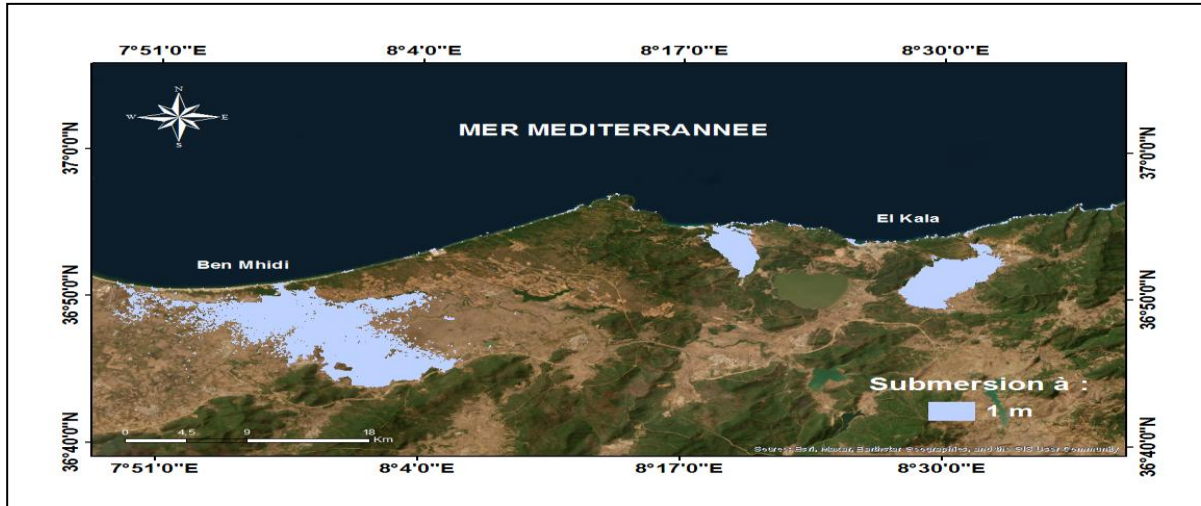


Figure 53 : Superficies des terres innodées (en hectares) pour les différents niveaux d'inondations.

**VI.4.2.1 Submersion à 1 m :**

D'après la figure 54, on remarque que la partie ouest du littoral d'El Tarf, notamment au niveau des embouchures des oueds (Oued Mafragh, Oued Bou Alallah et Oued Bounamoussa), est la plus affectée par un niveau d'inondation de 1 mètre. On observe également des zones inondées au niveau des lacs situés dans la partie est, notamment le lac Melah et le lac Tonga. Au total, ces inondations couvrent une superficie d'environ 14 987 hectares.

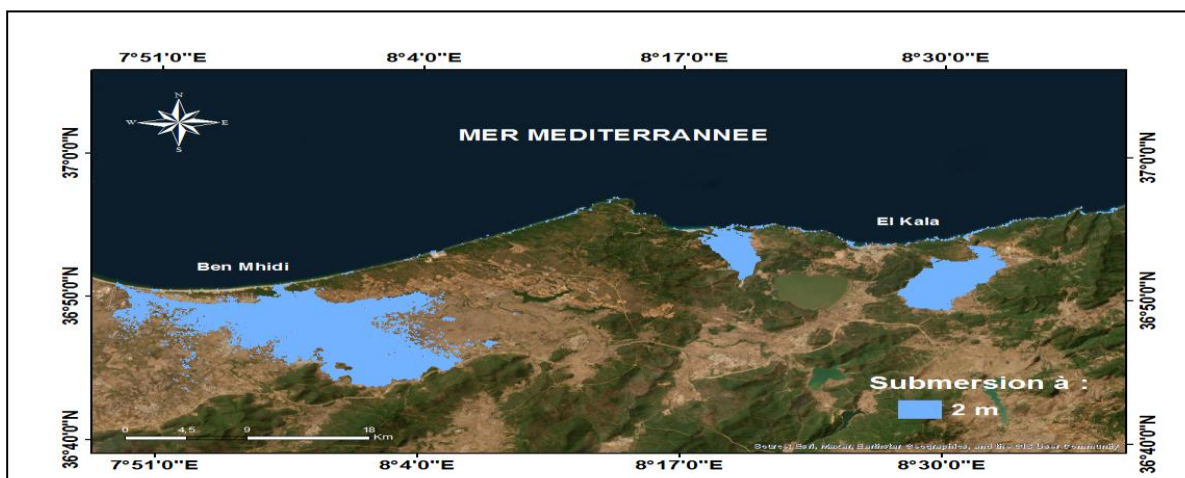


**Figure 54 :** Les zones inondables avec un niveau de submersion de 1 m.

**VI.4.2.2 Submersion à 2 m :**

Pour une hauteur de vagues atteignant 2 mètres, l'avancée des zones inondées se poursuit vers l'intérieur des terres, affectant une superficie d'environ 19 096 hectares. Cela s'explique par la faible élévation topographique de la zone ainsi que par la présence de réseaux hydrographiques le long du littoral (Figure 55).

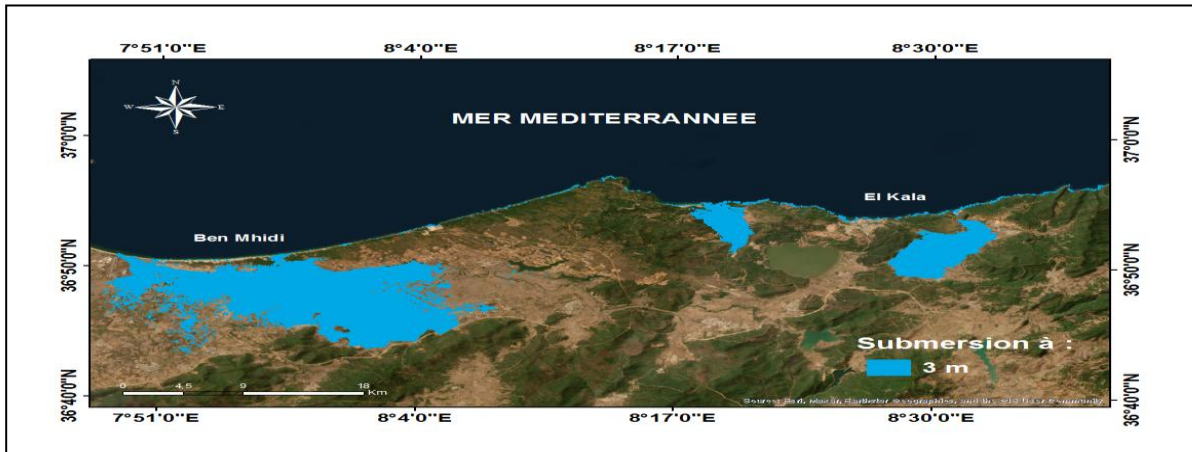
On constate que les oueds, notamment oued Mafragh, Bounamoussa et Bou Alallah, sont les plus affectés dans la partie ouest de la wilaya. Tandis que, dans la partie est, ce sont principalement les lacs Melah et Tonga qui sont touchés.



**Figure 55 :** Les zones inondables avec un niveau de submersion de 2 m.

**VI.4.2.3 Submersion à 3 m :**

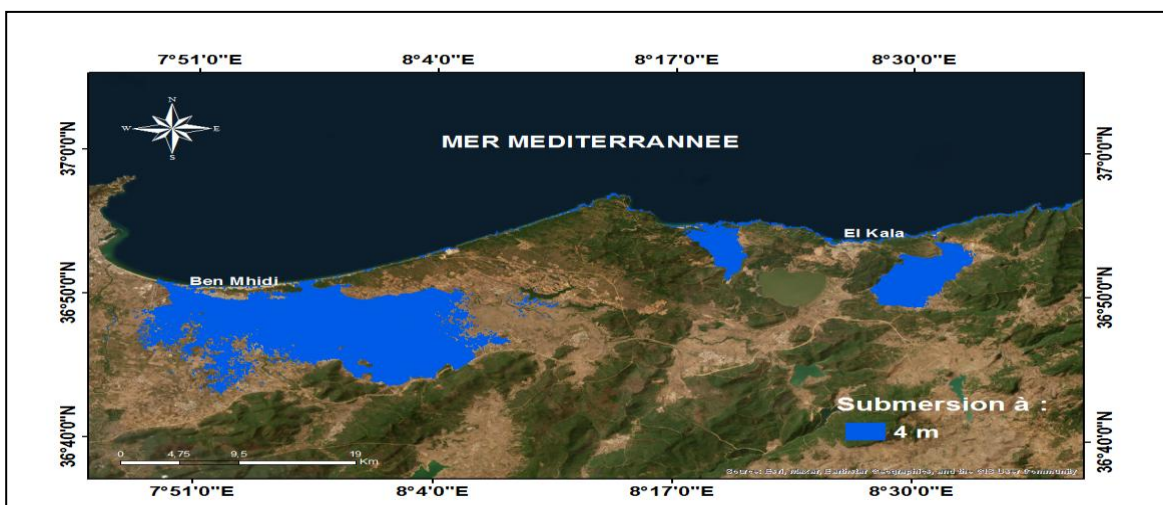
Pour une élévation de 3 mètres, on observe une augmentation de l'étendue des eaux marines recouvrant le littoral, aussi bien en superficie qu'en distance par rapport à la ligne côtière, en comparaison avec une submersion de 2 mètres (Figure 56). Cette progression des eaux vers l'intérieur des terres est accentuée par la présence de cours d'eau, qui facilitent leur infiltration, notamment l'Oued Mafragh, l'Oued Bounamoussa, l'Oued Bou Alallah, ainsi que les lacs Melah et Tonga. La surface recouverte par les eaux marines atteint alors 23 125 hectares.



**Figure 56 :** Les zones inondables avec un niveau de submersion de 3 m.

**VI.4.2.4 Submersion à 4 m :**

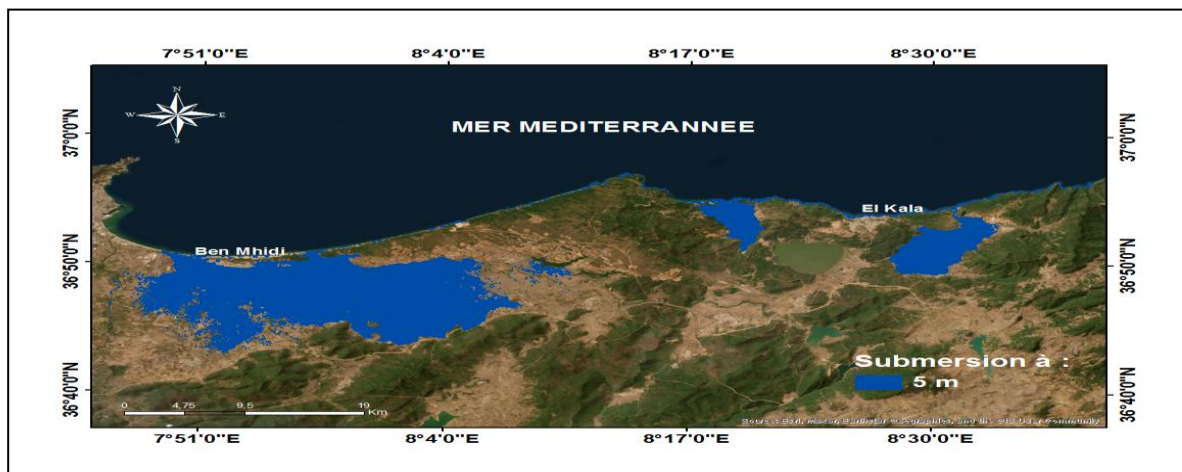
Pour une élévation de 4 mètres, on observe une infiltration importante des eaux marines vers l'intérieur des terres, en comparaison avec le scénario précédent. Cette pénétration accrue est favorisée par la présence de réseaux hydrographiques, notamment dans la partie ouest (Oued Bounamoussa, Oued Bou Alallah, Oued Kebir) ainsi que dans la partie est (lac Melah, lac Tonga). La superficie inondée atteint environ 27 246 hectares, ce qui s'explique par la morphologie côtière de la région et par le régime climatique des houles au large (Figure 57).



**Figure 57 :** Les zones inondables avec un niveau de submersion de 4 m.

#### VI.4.2.5 Submersion à 5 m :

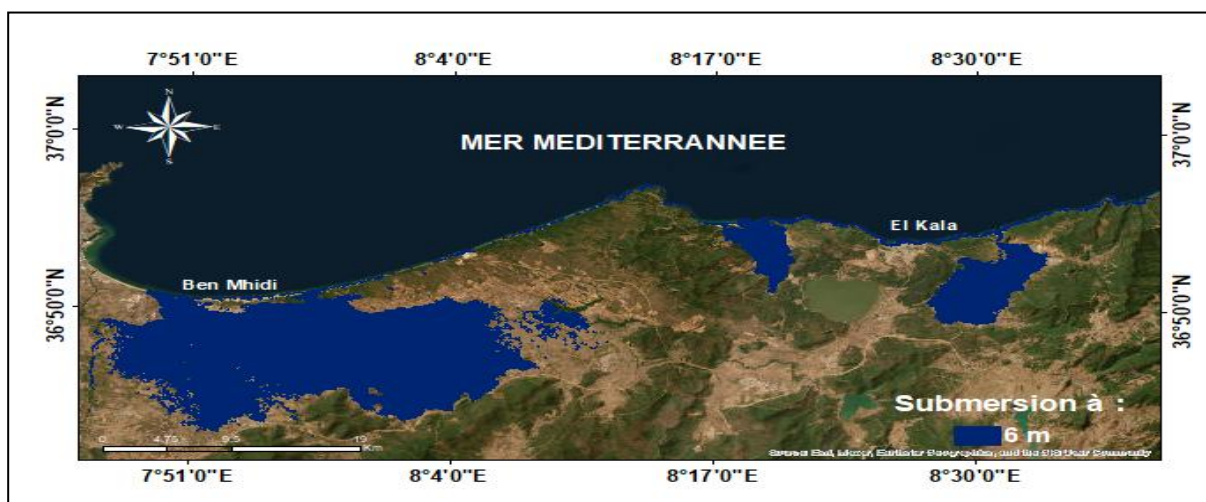
Dans un scénario extrême impliquant une élévation du niveau marin de 5 mètres, les résultats révèlent des inondations majeures au niveau des oueds (Oued Mafragh, Oued Bounamoussa, Oued Kebir, Oued Seybouse). Cette tendance s'explique par les caractéristiques morphologiques de la région, les conditions climatiques, ainsi que la présence de réseaux hydrographiques facilitant la pénétration des eaux. La surface inondée atteint un total de 31 180 hectares dans la zone d'étude (Figure 58).



**Figure 58 :** Les zones inondables avec un niveau de submersion de 5 m.

#### VI.4.2.6 Submersion à 6 m :

D'après la figure 59, on constate que la partie est du littoral d'El Tarf est la plus vulnérable à une élévation marine atteignant 6 mètres, avec une forte exposition des zones humides et des terres basses environnantes, notamment autour des lacs Melah et Tonga. Des impacts notables sont également observés au niveau des embouchures des oueds dans la partie ouest du littoral notamment (Oued Mafragh, Oued Bounamoussa, Oued Seybouse), Au total, cette inondation s'étend sur une superficie estimée à 34 787 hectares.



**Figure 59:** Les zones inondables avec un niveau de submersion de 6 m.

**Conclusion :**

L'étude menée a permis de définir avec précision une méthodologie appropriée pour évaluer rigoureusement l'aléa de submersion marine sur le littoral de la wilaya d'El Tarf, en s'appuyant sur l'approche développée par Hoozemans et al. (1993). La cartographie des zones inondables révèle que 14 987 hectares de la superficie de la wilaya présentent un risque de submersion pour un niveau d'inondation de 1 mètre, tandis que ce chiffre atteint 31 180 hectares pour un niveau de submersion de 5 mètres.

Les résultats indiquent que les zones situées à basse altitude sont les plus exposées au risque de submersion marine, alors que les secteurs protégés par des formations rocheuses ou des falaises apparaissent comme les moins vulnérables.

## Conclusion générale

---

La wilaya d'El Tarf située à l'extrême nord-est de l'Algérie, possède un littoral riche en formations géomorphologiques diversifiées. Toutefois, cette zone côtière fait face à d'importants défis liés aux géo-risques côtiers. L'analyse approfondie, structurée en six chapitres, a permis de mettre en évidence les facteurs hydrodynamiques, climatiques et géologiques qui conditionnent l'évolution du trait de côte et accentuent la vulnérabilité de cette région aux phénomènes d'érosion et de submersion marine.

Une analyse générale des phénomènes côtiers a permis de constater que le littoral de la wilaya d'El Tarf est fortement exposé aux géo-risques côtiers. Pour appuyer cette évaluation, une base de données météorologiques couvrant la période de 1992 à 2022 a été exploitée,

L'analyse climatique a révélé que les vents dominants au large de la zone d'étude proviennent principalement du Ouest, Ouest-Nord-Ouest, Nord-Ouest, tandis que les houles les plus fréquentes sont orientées vers le Nord-Nord-Ouest, Nord-Ouest.

L'analyse des événements extrêmes à travers la théorie des valeurs extrêmes a mis en évidence que le littoral d'El Tarf est particulièrement vulnérable à quatre directions critiques, à savoir le Nord, le Nord-Nord-Est et le Nord-Ouest, qui représentent les principales sources de menace pour cette zone côtière.

Les observations effectuées lors du suivi de la dynamique du trait de côte dans la wilaya de Tarf ont été corroborées par une modélisation numérique réalisée à l'aide de la suite logicielle MIKE-21. Cette modélisation a permis de simuler la propagation des vagues en considérant trois directions principales de houle, parmi lesquelles la direction nord s'est révélée la plus défavorable, conformément aux résultats des analyses statistiques menées. Les hauteurs prédites au large varient entre 5.2 mètre à 6 mètre.

L'analyse diachronique de la cinématique du trait de côte du littoral d'El Tarf sur la période 1985-2024 révèle une dynamique fortement perturbée. Au cours de cette période, la zone côtière a connu une alternance entre des phases d'érosion et d'accrétion avec une taux d'EPR qui est de  $-3.5$  m/ans, notamment dans la partie est, s'étendant de Cap Rosa jusqu'à la frontière tunisienne. En revanche, la partie ouest, allant de Cap Rosa vers Annaba, a été marquée principalement par des phénomènes d'érosion continue.

La cartographie du phénomène de submersion marine a permis d'estimer l'étendue des terres vulnérables selon différents niveaux d'élévation. Ainsi, environ 14 987 hectares sont exposés à un risque de submersion pour une élévation minimale de 1 mètre, 19 096 hectares à une élévation de 2 mètres, et jusqu'à 34 787 hectares pour une élévation maximale de 6 mètres.

Cette étude a permis d'établir un état des lieux du littoral de la wilaya d'El Tarf, ce qui a conduit à l'initiation d'un projet de création d'une base de données spécifique à cette région. Ce travail a également ouvert des perspectives pour de futures recherches, notamment en ce

qui concerne l'évaluation de la vulnérabilité face à d'autres géo-risques susceptibles d'affecter le littoral de la wilaya d'El Tarf.

## **Références Bibliographique :**

**Abdoulaye, D. (2018).** Contribution de la Théorie des Valeurs Extrêmes à la gestion et à la santé des systèmes. Thèse de doctorat. Mathématiques Appliquées. Toulouse. L'Institut National Polytechnique de Toulouse Cotutelle internationale : Université Ouaga 1, Professeur Joseph Ki-Zerbo. P.7

**Anselme B, Durand P, Thomas Y-F, Nicolae-Lerma A. (2011).** Storm extreme levels and coastal flood hazards: A parametric approach on the French Coast of Languedoc (district of leucate). Vol. 343, n°10, P. 678.

**Auverlot, D. (2015).** La tragédie du réchauffement climatique : du cinquième rapport GIEC à la conférence Paris-Climat 2015. Responsabilité et Environnement, n°77, P.P. 14-20.

**Bahroun, S. (2006).** Impact des eaux usées urbaines et industrielles sur les eaux naturelles dans la région d'El Tarf. Mémoire de magistère. Hydrogéologie. Annaba : Université Badji Mokhtar. P.P. 22-24.

**Benali, A. (2014).** Dynamique du trait de côte et vulnérabilité des littoraux sableux : cas du littoral de la région de Tipaza (Algérie). Thèse de Doctorat. Géographie physique-Géomorphologie littoral. Alger : Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB).

**Bendjedid, H. (2021).** Eco éthologie du Canard souchet *Spatula clypeata* hivernant dans le Lac des Oiseaux et le marais de la Mékhada (wilaya d'El Tarf) Algérie. Thèse de doctorat. Biologie animal. Annaba : Université Badji Mokhtar.

**Benyettou, M. (2017).** Variations et tendances des températures et des précipitations journalières en Algérie. Mémoire de Master. Hydraulique. Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen. P.89.

**Bilal, B. (2024).** La télédétection et les systèmes d'information géographiques pour l'aide à la caractérisation des sources anthropiques : interactions paramétriques et conception des bases de données marines. Thèse de doctorat. Environnement marin et littoral. Alger : école supérieur de science de la mer et aménagement du littoral.

**Booth, B., & Mitchell, A. (2001).** Getting Started with ArcGIS: GIS by ESRI. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute. Redlands, Californie : ESRI Press, P. 109.

**Breilh, Jean-François. (2014).** Les surcotes et les submersions marines dans la partie centrale du Golfe de Gascogne : les enseignements de la tempête Xynthia. Thèse de doctorat. Sciences de la Terre. France : Université de la Rochelle. P. 11.

**Centre de ressources pour l'adaptation au changement climatique (2024).** Érosion du littoral : à quoi s'attendre et comment s'adapter ? Adaptation au changement climatique. [En ligne] [Consulter le 11 mai 2025].

disponible sur le Web :<https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/dossiers-thematiques/impacts/erosion-du-littoral-bureau-detudes>

**CESER, (2015).** Submersion marine et érosion côtière Connaître, prévenir et gérer les risques naturels littoraux sur la façade atlantique. Rapport d'activité. Document non publié. Nantes : Association des CESER de l'Atlantique.

**Climate Data, (2022).** Données climatiques mondiales 1992–2022. [En ligne]. [Consulté le 20/04/2025].

Disponible sur le web : <https://en.climate-data.org/info/sources/>

**DHI., (2017).** Mike 21/3 Coupled Model FM – User Guide. Horsholm, Danemark.

**DHI., (2014).** Mike 21 Flow Model FM.

**DHI., (2014).** Mike 21 Spectral Wave Module.

**Emily,A. (2018).** Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 5.0 User Guide. Rapport d'activité. Document non publié. Eston : U.S. Geological Survey (USGS).

**Enseignement universitaire. (s.d).** Chapitre 2 : Les facteurs du milieu. Support de cours universitaire. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université de Chlef (Algérie).

**Faster Capital. (2014).** Méthode Block Maxima. [En ligne]. [Consulté le 5/03/2025].

Disponible sur le web : <https://fastercapital.com/fr/mots-cle/m%C3%A9thode-block-maxima.html>.

**FRANÇOIS, LONGIN. (1995).** La théorie des valeurs extrêmes : présentation et premières applications en finance. Vol.136, n°1, P. 82.

**Franke, J. (2008).** Statistics of Financial Markets: An Introduction. Berlin, Allemagne : 2<sup>e</sup> édition. P.P. 245–267.

**Préfecture du Nord. (2014).** Les risques de submersion marine. [En ligne]. [Consulté le 20/05/2025].

**GIEC. (2014)** : Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au Cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Rapport d'activité. Document non publié. Genève, Suisse : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

**GIEC. (2023).** Changement climatique 2023 Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au Sixième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Rapport d'activité. Document non publié. Genève, Suisse : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

**Hachad H., Depoux A. (2021).** Impacts sanitaires du changement climatique : données récentes, éléments de réflexion. Vol. 2, n°6, P.2.

**Huang, X., Zhu, J., Liu,Z., & Li, M. ( 2010).** Marine Modeling and simulations. Journal of Marine Science. Vol. 24, n°2, P.P. 115-128.

**J.T.Houghton, G.J.Jenkins et J.J.Ephraums. (1990).** Climate change: The IPCC Scientific Assessment. Cambridge. Cambridge University Press, P. 13.

**Kherifi, W. (2017).** Étude hydrogéologique et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe phréatique de la plaine d'El-Tarf (Nord-est algérien). Vol. 11, n°2, P.P. 145–162.

**Khouakhi A., Snoussi M., Niazi S., Raji O. (2012).** Le Système d'Information Géographique (SIG) : un outil pour l'évaluation des terres à risque d'inondation côtière liée aux changements climatiques. Cas du littoral de Mohammedia. Géologie & Géographie physique, n°23, P. 1.

**Labar & Soufiane. (2003)** Contribution à l'identification des aires inondables et qualité physico-chimique des eaux stagnantes temporaires dans la vallée de la Mafragh (Extrême Nord Est Algérien), Mémoire de magistère. Université d'Annaba. P. 111.

**Mezouar, K. (2022).** Rapport sur l'évaluation de la situation initiale de l'indicateur commun 15 d'IMAP "Localisation et étendue des habitats potentiellement affectés par les altérations hydrographiques" pour les zones côtières et marines méditerranéennes de l'Algérie dans le cadre du projet EcAp MED III. Rapport d'activité. Document non publié. Alger : PAP/RAC.

**Miloud, S. (2021).** Processus mis en jeu dans l'évolution morpho-dynamique de la baie de Zemmouri : modélisation hydro-sédimentaire et cinématique du trait de côte. Thèse de doctorat. Gestion et protection du littoral. Alger : école supérieur de science de la mer et aménagement du littoral.

**Nielsen, P. (2009).** Coastal and estuarine processes. Singapore. World Scientific Publishing. P. 346.

**Paskoff, Roland (1998).** Les Littoraux : Impact Des Aménagements Sur Leur évolution. Paris : Masson.

**Otmani, H. (2015).** Étude et évaluation de l'érosion côtière du littoral Est-Algérois : Effectuer un suivi du trait de côte par un D-GPS. Séminaire national des sciences de la mer.

**Rishi, K. C., & Panda, D. (2023).** Analysis of Shoreline Changes along Western Section of East Midnapore Coastal Tract of West Bengal, India: An Application of Digital Shoreline Analysis System (DSAS). Vol 46, n° (1 et 2), P.P. 6-10.

**Sais, G. (2021).** Protection et préservation des ressources en eaux souterraines à l'extrême Nord-Est Algérien (El-Taref). Mémoire de master. Hydrogéologie. Tizi-Ouzou : Université Mouloud Mammeri.

**Salem Cherif, Y. (2023).** Dynamique et évolution morpho sédimentaire des plages sableuses : de l'étude des processus à la modélisation. Application sur trois sites du littoral algérois. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral, Alger.

**Sallenger, A.H. (2000).** Strom impact scale for barrier islands. Vol. 16, n°3, P.P.890-895.

## Références Bibliographique

**Sheik, M., & Chandrasekar, N. (2011).** A shoreline change analysis along the coast between Kanyakumari and Tuticorin.vol.14, n°2, P.P.282.293.

**Tabet, Aoul. (2008).** Lutte antiérosive - Risques d'inondation urbaine : cas d'une agglomération à l'aval de versants argileux terrassés dans l'Ouest algérien. Marseille, France : l'IRD.

**Tilbi, K. (2018).** Distribution des valeurs extrêmes généralisées Application en hydrologie. Thèse doctorat. Hydraulique. Jijel : Université Jijel. P.157.

## Résumer

Cette étude s'inscrit dans une démarche d'analyse des dynamiques côtières et de l'évaluation de la vulnérabilité du littoral face aux géo risques, en prenant pour cas d'étude la wilaya d'El Tarf. Elle vise à caractériser l'état initial des interfaces côtières, à étudier la mobilité du trait de côte, ainsi qu'à analyser les effets des phénomènes extrêmes liés au changement climatique et aux aléas géo-environnementaux. L'étude mobilise des outils de modélisation numérique avancés et une approche intégrée prenant en compte les dimensions hydrodynamiques, climatiques et géologiques, dans le but de contribuer à une meilleure compréhension des enjeux de gestion durable du littoral.

**Mots clés :** Changement climatique, L'érosion costière, élévation du niveau de la mer, submersion, inondation.

## Abstract

This study is part of an approach to analyzing coastal dynamics and assessing coastal vulnerability to geohazards, using the wilaya of El Tarf as a case study. It aims to characterize the initial state of coastal interfaces, study coastline mobility, and analyze the effects of extreme phenomena linked to climate change and geo-environmental hazards. The study uses advanced numerical modeling tools and an integrated approach that takes into account hydrodynamic, climatic, and geological dimensions, with the aim of contributing to a better understanding of the challenges of sustainable coastal management.

**Keywords:** Climate change, coastal erosion, sea level rise, submersion, flooding.

## ملخص

تتناول هذه الدراسة جزءاً من نهج لتحليل ديناميكيات السواحل وتقييم مدى تعرض الساحل للمخاطر الجيولوجية، مع أخذ ولاية الطارف كدراسة حالة. ويهدف إلى تحديد الحالة الأولية للواجهات الساحلية، ودراسة حركة الساحل، وكذلك تحليل آثار الظواهر المتطرفة المرتبطة بتغير المناخ والمخاطر الجيولوجية البيئية. وتستخدم الدراسة أدوات النمذجة الرقمية فهم أفضل. المتقدمة ونهجاً متكاملاً يأخذ في الاعتبار الأبعاد الهيدروديناميكية والمناخية والجيولوجية، بهدف المساهمة في لتحديات الإدارة الساحلية المستدامة

**الكلمات المفتاحية:** تغير المناخ، تآكل السواحل، ارتفاع مستوى سطح البحر، الغمر، الفيضانات.