

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 :

Erosion côtière, submersion marine et changement climatique le long de la baie de zemmouri, prévision des risques et adaptation.

Présenté par :

BERROUK Nidal Samy

Soutenu le 26/ 09 /2023 devant le jury :

Mme.FEZAA.N

Professeur (ENSSMAL)

Présidente

M. MEZOUAR.K

Professeur (ENSSMAL)

Promoteur

Mme. SALEM CHERIF.Y

MAB (ENSSMAL)

Co-Promotrice

M. DAHMANI .A

MCA (ENSSMAL)

Examineur

2022/2023

Remerciements

Tout d'abord, j'exprime ma gratitude envers **Allah** d'avoir béni ma santé, renforcé mon courage et stimulé ma volonté pour mener à bien ce modeste travail. Je remercie **mes parents** pour leur soutien tout au long de mon parcours, qui n'a pas été dépourvu d'obstacles. Sans leur soutien indéfectible, le parcours parcouru, qui se termine par le présent mémoire, n'aurait jamais été possible. J'ai emprunté ces mots à la personne qui, sans lui, ce travail n'aurait pas vu le jour. Je désigne Mon promoteur **M. MEZOUAR K.** Professeur à l'ENSSMAL non seulement pour m'avoir encadré, mais aussi pour avoir cru en moi, m'avoir guidé et fait progresser tout au long de ce travail. Je tiens à le remercier pour sa disponibilité, m'avoir suivi et enrichi mes connaissances. Je ne saurais utiliser les mots justes pour lui exprimer toute ma gratitude, mais j'espère qu'il trouvera dans ces quelques lignes une marque de respect et l'expression de mon admiration.

Je tiens également à remercier ma Co-Promotrice **Mme. SALEM CHRIF Y.** Maître de conférences à l'ENSSMAL pour m'avoir soutenue, aidée et suivie tout au long de l'exécution de ce travail.

Je tiens à adresser mes remerciements à **Mme. MAOUEL D.** pour son précieux soutien dans la réalisation de mon BMC.

Je souhaite adresser mes sincères remerciements à l'ensemble de **la famille ENSSMAL** (les enseignants et personnels de notre école supérieure ENSSMAL et du département d'environnement et aménagement, ainsi que les agents bibliothèque) qui m'ont encadré durant mon cursus.

Au final, j'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce présent mémoire.

Nidal Samy

Dédicace


J'éprouve l'immense plaisir de dédier ce modeste mémoire :

 *À ma très chère mère*

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

 *À mon très cher père*


Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

 *À ma très chère sœur Amira Yasmine*

À tous les moments d'enfance passés avec toi ma sœur, en gage de ma profonde estime pour l'aide que tu m'as apportée. Tu m'as soutenue, réconfortée et encouragée. Puissent nos liens sororaux se consolider et se pérenniser encore plus.

 *À tous mes amis surtout la promo GPL*

Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

 *À vous cher lecteur*

Nidal Samy

Table des matières

Remerciements	II
Dédicace	III
Liste des figures	VIII
Liste des tableaux	XI
Liste des acronymes et abréviations	XII
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités	4
1 La notion du littoral :	5
1.1 Définition d'un système morphodynamique :.....	5
1.2 La morphologie des plages :.....	6
1.3 La classification des plages :	6
2 Hydrodynamique littoral :.....	7
2.1 La zonation hydrodynamique du littoral :	7
2.2 Les agents de la dynamique littorale :	9
3 Changement climatique :	12
3.1 Sixième rapport du GIEC 2023 :	13
4 Élévation du niveau de la mer (ENM) :.....	13
5 L'érosion et la submersion marine :	14
6 Cellules sédimentaires :	15
Chapitre II : Présentation de la zone d'étude (baie de Zemmouri)	16
1 Situation géographique :	17
2 Aspects géologiques et sismiques :.....	18
2.1 Cadre géologique :.....	18
2.2 Cadre sismique :	21
3 Cadre Géomorphologique :.....	22
3.1 La géomorphologie continentale :	22
3.2 La géomorphologie sous-marine :	23
4 Cadre climatique et hydrodynamique :	24
4.1 Les températures :.....	25
4.2 Les précipitations :.....	26
4.3 Les Vents :	27
4.4 Les houles :.....	32
4.5 Les courants :.....	39

4.6	Les marées :	40
5	Cadre hydrologique :	41
5.1	Le réseau hydrographique :	41
5.2	Les barrages :	43
6	Les prélèvements de sable sur la côte de Zemmouri :	43
7	Les ouvrages portuaires :	43
8	Les ouvrages de protection :	44
9	La fréquentation touristique :	44
10	Artificialisation et l'urbanisation anarchique près de cote :	44
	Chapitre III : Evolution spatio-temporelle du trait de côte de la baie de Zemmouri.....	45
1	Introduction.....	46
2	Les logiciels utilisés pour étudier l'évolution du littoral :	46
2.1	Google Earth Pro :	46
2.2	ArcGis10.8 :	46
2.3	L'extension DSAS :	50
3	Les méthodes statistiques de calcul de la mobilité du trait de côte sous l'extension DSAS :	51
3.1	La méthode des points extrêmes (End Point Rate - EPR) :	51
3.2	La méthode de la régression linéaire (Linear Regression Rate - LRR) :	52
3.3	La méthode de mouvement du littoral net (Net Shoreline Movement NSM) :	52
4	La méthodologie suivie :	52
5	Interprétation des résultats :	55
5.1	Évolution du trait de côte entre 1972 et 1999 :	55
5.2	Évolution du trait de côte entre 1999 et 2008 :	58
5.3	Évolution du trait de côte entre 2008 et 2011 :	61
5.4	Évolution du trait de côte entre 2011 et 2017 :	64
5.5	Évolution du trait de côte entre 2017 et 2022 :	66
5.6	Evolution mi- séculaire de la ligne de rivage de la baie de Zemmouri entre 1972 et 2022 :	69
6	Analyse du bilan sédimentaire :	71
7	Evolution prévisionnelle à l'horizon 2044 :	74
8	Conclusion :	76
	Chapitre IV : Analyse des évènements extrêmes.....	78
1	Introduction :	79

2	Théorie des valeurs extrêmes (EVT) :	79
3	Loi GEV (Generalized Extreme Value) et méthode de Block Maxima (BM) :	80
3.1	Méthode des maxima par blocs :	80
3.2	Loi GEV (Generalized Extremes Values) :	80
4	Le critère d'information d'Akaike (AIC) :	87
5	Loi GPD (Generalized Pareto Distribution) et méthode de dépassement de seuil :	87
5.1	Méthode de dépassement de seuil (Peak Over Threshold (POT)) :	87
5.2	Loi de Pareto généralisée (GPD) :	88
6	Comparaison entre les méthodes POT et BM :	93
Chapitre V : Modélisation de la dynamique côtière du littoral de la baie de Zemmouri		95
1	Introduction :	96
2	Description générale du MIKE 21 :	96
3	Description des modèles de simulation du logiciel MIKE 21 :	97
3.1	Modèle numérique MIKE SW (Spectral waves) :	97
3.2	Modèle numérique MIKE HD (Hydrodynamic model) :	99
3.3	Modèle numérique MIKE ST (Sediment transport) :	100
3.4	Modèle couplé MIKE21/3 FM :	101
4	La démarche adoptée :	101
5	Construction du modèle	102
5.1	Emprise du modèle, bathymétrie et pas de maille	102
a.	Emprise et bathymétrie	103
b.	Création 2D Bathymétries sous le maillage	103
6	Résultats et discussions :	103
6.1	Bathymétrie de la Baie de Zemmouri :	103
6.2	Simulation de la propagation de la houle par le module SW:	105
b.	Résultats simulation hydro sédimentaire :	106
6.3	Résultats des simulations HD et interprétations :	110
6.4	Modélisation du transport sédimentaire sous l'effet de houle et de courant	112
7	Conclusion	115
Chapitre VI : Submersion marine		117
1	Introduction :	118
2	La submersion marine :	118
3	Les phénomènes physiques responsables des submersions marines d'origine météorologique :	120

4	Méthodologie :.....	121
4.1	Topographie côtière et utilisation des terres.....	121
4.2	Hausse du niveau de la mer.....	122
4.3	Niveaux d'eau extrêmes.....	122
4.4	Variation du niveau de la mer en fonction de la pression atmosphérique :.....	123
4.5	Hauteur significative au large.....	123
5	Les houles extrêmes à la côte.....	125
6	Scénarios d'inondations.....	127
7	Évaluation des terres à risque d'inondation dû à une remontée accélérée du niveau de la mer	127
7.1	Perte des terres due à la submersion marine.....	128
7.2	Évaluation de l'impact sur la population.....	131
8	Conclusion.....	131
	Chapitre VII: Stratégies d'adaptation.....	133
1	Introduction :.....	134
2	Définition de changement climatique :.....	134
3	L'adaptation aux changements climatiques :.....	134
4	Types de stratégie d'adaptation :.....	134
5	Les stratégies d'adaptation à court et moyen terme :.....	136
5.1	Le procédé Ecoplage® :.....	136
5.2	Le procédé stabiplage® :.....	136
5.3	Le by-passing :.....	138
5.4	Le rechargement des plages :.....	138
5.5	Autres stratégies :.....	138
6	Les stratégies d'adaptation à long terme :.....	138
6.1	Le concept de la gestion intégrée des zones côtières :.....	139
6.2	L'approche de la GIZC :.....	139
6.3	La structure du processus de GIZC :.....	139
6.4	L'élaboration d'un plan GIZC du littoral de la grande baie de Zemmouri :.....	140
7	Conclusion :.....	141
	Conclusion générale.....	143
	Références bibliographiques.....	146
	Annexe.....	154

Liste des figures

Figure 1 : Composition d'un système morphodynamique côtier (Hzami, 2015).....	5
Figure 2 : Morphologie des plages (Pedrerros et al., 2002).....	6
Figure 3 : Représentation schématique des différentes zones hydrodynamiques du littoral (Degryse-Kulkarni, 2003).....	8
Figure 4 : Représentation des paramètres de houle (Arnaud, 2016).....	9
Figure 5 : Les différents types de déferlement (Bay, 2005) (modifié).....	10
Figure 6 : La morphologie 3D du système littoral. Les flèches noires indiquent les différents types de courants induits par le déferlement des vagues à l'approche des côtes (Amrouni, 2020).....	12
Figure 7 : Impacts potentiels des changements climatiques sur la zone côtière (McLaughlin et al., 2002) (Modifiée).....	15
Figure 8 : Situation géographique de la Baie de Zemmouri (Sallaye, 2021).....	17
Figure 9 : Carte et coupe structurale schématique de la chaîne maghrébide montrant la disposition des zones internes et externes (Athmania, 2010).....	18
Figure 10 : Position des nappes de flyschs par rapport aux unités de la chaîne des Maghrébides (Rebouh et al., 2016).....	20
Figure 11 : Séisme du 21 Mai 2003 d'Alger et de Boumerdes (https://www.azurseisme.com/Seisme-de-Boumerdes.html).....	22
Figure 12 : La morphologie du plateau continentale de la grande baie de Zemmouri (Sallaye, 2021).....	24
Figure 13 : Histogramme des températures (max, min et moyenne) mensuelles 1992-2021 (Source : www.waveclimate.com).....	25
Figure 14 : Histogramme des précipitations mensuelles 1992-2021 (Source www.waveclimate.com).....	26
Figure 15 : Diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN appliqué au site d'étude, de la période (janvier 1992 au Décembre 2021).....	27
Figure 16 : Roses annuelles et saisonnières des vents au large de la baie de Zemmouri entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com).....	30
Figure 17 : Roses mensuelles des vents au large de la baie de Zemmouri entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com).....	31
Figure 18 : Grandeurs caractéristiques des vagues (Grasso, 2009).....	32
Figure 19 : Représentation du spectre des hauteurs de houle enregistrées avec les directions.....	33
Figure 20 : Représentation du spectre des périodes de houle enregistrées.....	34
Figure 21 : Représentation du spectre des vitesses du vent enregistrées avec les directions... ..	34
Figure 22 : Roses trimestrielles et annuelles des houles au large de la zone d'étude entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com).....	37
Figure 23 : Roses mensuelles des houles au large de la zone d'étude entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com).....	38
Figure 24 : profile d'un courant de dérive littoral (https://bretagne-environnement.fr/littoral-breton-perpetuel-mouvement-article).....	40
Figure 25 : profile d'un courant de retour (Barlas et Beji, 2017).....	40
Figure 26 : Carte des réseaux hydrographiques dans la grande baie de Zemmouri (Sallaye, 2021).....	41
Figure 27 : L'interfacé d'ArcMap.....	47
Figure 28 : La barre générale d'outils.....	47
Figure 29 : L'interface d'ArcCatalog.....	48
Figure 30 : L'interface d'ArcCatalog à partir d'ArcMap.....	49

Figure 31 : L'interface d'ArcToolBox.	50
Figure 32 : L'extension de DSAS.	50
Figure 33 : Les Cellules sédimentaires de la zone d'étude.	54
Figure 34 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 1972 et 1999.	56
Figure 35 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 1999 et 2008.	59
Figure 36 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 2008 et 2011.	62
Figure 37 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 2011 et 2017.	65
Figure 38 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 2017 et 2022.	67
Figure 39 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 1972 et 2022.	70
Figure 40 : Le bilan sédimentaire de la baie de Zemmouri.	71
Figure 41 : Le bilan surfacique par secteur.	72
Figure 42 : Bilan surfacique du secteur Est de la baie de Zemmouri durant la période 1972 à 2022.	72
Figure 43 : Bilan surfacique du secteur Centre de la baie de Zemmouri durant la période 1972 à 2022.	73
Figure 44 : Bilan surfacique du secteur Ouest de la baie de Zemmouri durant la période 1972 à 2022.	73
Figure 45 : position du trait de côte en 2044 dans zone Zemmouri Ouest – Zemmouri Est.	74
Figure 46 : position du trait de côte en 2044 dans zone d'Ain Taya.	75
Figure 47 : position du trait de côte en 2044 dans zone de Boumerdes.	75
Figure 48 : Le taux d'évolution EPR de la baie de Zemmouri d'ici 2044.	76
Figure 49 : Schéma représentatif des méthodes blocks maxima et POT.	79
Figure 50 : Représentation de méthode des Blocs Maximas sur les hauteurs de houle de 1992 – 2021.	81
Figure 51 : Estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour l'omnidirectionnel.	82
Figure 52 : Estimation des événements extrêmes via la distribution de Weibull pour l'omnidirectionnel.	83
Figure 53 : Estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour chaque direction.	85
Figure 54 : Estimation des événements extrêmes via la distribution de Weibull pour chaque direction.	86
Figure 55 : Moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelle de l'enregistrement.	88
Figure 56 : Représentation de méthode POT sur les hauteurs de houle de 1992 – 2021.	89
Figure 57 : Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour omnidirectionnel.	89
Figure 58 : Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour chaque direction.	92
Figure 59 : Comparaison des résultats obtenu avec les deux méthodes GPD et Gumbel.	93
Figure 60 : Représentation de Corrélation entre la distribution GPD et Gumbel.	94
Figure 61 : Organigramme explicatif de l'approche méthodologique adoptée pour la modélisation intégrée des différents modèles (HD, ST, SW)(Doubi et Ferdi, 2020).	102
Figure 62 : Emprise et maillage du modèle côtier de la Baie de Zemmouri.	104
Figure 63 : Carte bathymétrique de la Baie de Zemmouri.	105
Figure 64 : Champs de houles (MWD=45°) dans la Baie de Zemmouri.	107
Figure 65 : Champs de houles (MWD=360°) dans la Baie de Zemmouri.	108
Figure 66 : Champs de houles (MWD=315°) dans la Baie de Zemmouri.	110
Figure 67 : Champs des courants dans la Baie de Zemmouri pour : MWD= 45°.	111

Figure 68 : Champs des courants dans la Baie de Zemmouri pour : MWD=360°.....	112
Figure 69 : Champs des courants dans la Baie de Zemmouri pour : MWD= 315°.....	112
Figure 70 : Dynamique sédimentaire dans la Baie de Zemmouri pour : MWD= 45°	114
Figure 71 : Dynamique sédimentaire dans la Baie de Zemmouri pour : MWD= 360°	115
Figure 72 : Dynamique sédimentaire dans la Baie de Zemmouri: MWD= 315°.....	115
Figure 73 : Représentations schématiques de submersions générées par franchissement, à gauche sur un cordon dunaire, à droite sur un perré (Cariolet, 2011).....	119
Figure 74 : Représentations schématiques d'une submersion générée par débordement. Le niveau d'eau est supérieur au perré (Cariolet, 2011).	119
Figure 75 : Représentations schématiques d'une submersion générée par l'ouverture d'une brèche et par la rupture totale d'un cordon dunaire (Barrier dislocation) (Cariolet, 2011).	120
Figure 76 : Processus physiques en action lors d'une tempête : agitation et surélévation du plan d'eau (BRGM, 2012).	121
Figure 77 : Le modèle numérique du terrain (MNT) de la grande baie de Zemmouri.	122
Figure 78 : Modélisation de la pression et des géo-potentiels à 500 hPa (modèle GFS).	123
Figure 79 : La distribution des amplitudes de houles en fonction du temps (1992-2022).	124
Figure 80 : La distribution fréquentielle des classes des hauteurs significatives par direction.	124
Figure 81 : Propagation des houles extrêmes Direction NW à la côte.....	125
Figure 82 : Propagation des houles extrêmes de Direction N à la côte.....	126
Figure 83 : Propagation des houles extrêmes Direction NNE à la côte.	126
Figure 84 : Superficies des terres inondées par les différents niveaux d'élévation d'eau.	129
Figure 85 : Les zones inondables avec des niveaux de submersions de 2m, 4m, 5m, et 6m.	130
Figure 86 : Système (gauche) et principe (droite) du drainage Ecoplage® (Ballay et Breton, 2020).....	136
Figure 87 : Système de stabiplage (Cariolet et al., 2008).	137
Figure 88 : La structure du processus de GIZC (https://www.coastalwiki.org).	140

Liste des tableaux

Tableau 1 : Moyennes mensuelles des températures de la période allant de (1992 à 2021) (Source : www.waveclimate.com).	25
Tableau 2 : Moyennes mensuelles des précipitations de la période allant de (1992 à 2021) (Source www.waveclimate.com).	26
Tableau 3 : Distribution des fréquences d'apparitions annuelles et saisonnières des vents au large durant la période (1992-2021).	28
Tableau 4 : Hauteur de houle marquante.	32
Tableau 5 : Période de houle marquante.	33
Tableau 6 : Distribution des fréquences d'apparitions annuelles et saisonnières des houles au large durant la période (1992-2021).	35
Tableau 7 : Estimation des apports solides des Oueds (ANRH, 2004).	42
Tableau 8 : Classification des valeurs de changement du trait de côte à partir du paramètre EPR (Sallaye, 2021).	52
Tableau 9 : Tableau résumant l'ensemble des résultats obtenu par la méthode GEV selon la distribution de Gumbel.	82
Tableau 10 : Tableau résumant l'ensemble des résultats obtenu par la méthode GEV selon la distribution de Weibull.	84
Tableau 11 : Tableau résumant l'ensemble des résultats obtenu par la méthode POT.	90
Tableau 12 : les caractéristiques des houles incidentes (Hauteur, période, direction)(Source www.waveclimate.com).	106
Tableau 13 : Sortants du modèle SW.	107
Tableau 14 : Résultats des hauteurs significatives associées aux périodes de retour (m).	125
Tableau 15 : Hauteurs significatives des houles associées à des périodes de retour au large à la côte.	127
Tableau 16 : Niveaux d'inondations extrêmes de la côte de Zemmouri.	127
Tableau 17 : Résultats des terres à risque d'inondation.	132
Tableau 18 : Les types d'adaptation face aux changements climatiques (Carreno et al., 2008).	135

Liste des acronymes et abréviations

ANBT	Agence Nationale des B arrages et T ransferts
DD	D éveloppement D urable
DHI	Institut D anois d' H ydraulique
DSAS	D igital S horeline A nalyses S ystem
EPR	E nd P oint R ate
GIEC	G roupe I ntergouvernemental d' E valuation du C limat
GIZC	G estion I ntégrée des Z ones C ôtières
HD	H ydrodynamic
HWL	H igh W ater L evel
LRR	L inear R egression R ate
MNT	M odèle N umérique de T errain
NMM	N iveau M oyen de la M er
NSM	N et S horeline M ovement
SIG	S ystem d' I nformation G éographique
ST	S ediment T ransport
SW	S pectral W ave
UTM	U niversal T ransverse M ercator
WGS	W orld G eodesic S ystem
ZC	Z one C ôtière

Introduction générale

La zone littorale se caractérise par son extrême diversité et par la rapidité de son évolution. C'est un environnement dont l'équilibre dépend à la fois de la nature du substratum, de la quantité des apports sédimentaires, des facteurs dynamiques (vents, houles et courants) et des facteurs anthropiques qui se traduisent par l'impact des aménagements côtiers, portuaires, l'urbanisation balnéaire et les différents ouvrages de protection construits (**Mezouar et al., 2009**).

Ce système est intrinsèquement dynamique, il peut localement gagner ou perdre de la matière en raison de l'érosion et de la submersion marine. Les mouvements de ce système sont causés à la fois par de nombreux facteurs naturels et anthropiques, notamment les effets du changement climatique.

Le littoral algérien s'étend sur 1 622 kilomètres. Il représente un écosystème fragile et constamment menacé de dégradation en raison de la concentration de la population, des activités économiques et des infrastructures le long de la bande côtière (**Kacemi, 2013**).

L'instar de plusieurs littoraux du globe, le littoral Algérien connaît, depuis quelques décennies, une croissante anthropisation qui se manifeste par une occupation économique et urbaine importante. Celle-ci se traduit notamment sur les milieux côtiers sensibles par des phénomènes comme l'érosion côtière, le risque de submersion et l'intrusion saline dont certains effets seraient irréversibles (**Aoudj et al., 2017**).

Le changement climatique constitue une menace pour les zones côtières de la région méditerranéenne dans leur ensemble. En effet, le scénario le plus optimiste établi prédit une élévation de 0.25 à 0.55 m d'ici 2100 (**GIEC, 2021**). Diverses recherches, dont celles effectuées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), ont mis en évidence les conséquences préoccupantes des changements climatiques sur les zones côtières. Ces études démontrent que les changements climatiques provoquent une élévation du niveau de la mer, ainsi qu'une augmentation de la fréquence des tempêtes, ce qui a un impact significatif tant sur les aspects naturels que socio-économiques de ces régions côtières.

Aujourd'hui, la problématique de l'érosion côtière et la submersion marine sont l'une des menaces les plus graves pour de nombreux sites côtiers Algériens en particulier le long des littoraux sableux, ces phénomènes sont également responsables du recul général des côtes sableuses du littoral algérien qui constituent, non seulement le siège d'échanges de sédiment, mais aussi un siège d'un panel varié d'activités économiques : pêche, ostréiculture, agriculture littorale, tourisme, activités portuaires et industrielles ...etc., qui sont soulignés la perte de caractéristique naturelle et la mobilité de rivage (**Douibi et Ferdi, 2020**).

Dans cette modeste étude, nous avons décidé de mettre l'accent sur deux risques spécifiques au littoral qui représentent une menace pour les régions côtières algériennes.

- Les submersions marines sont la conséquence de fortes tempêtes et peuvent aussi être influencées par le marnage de la mer ou l'océan (**Hattabi et Kaddour, 2018**).
- L'érosion est un phénomène naturel consiste en un déséquilibre qui se traduit par un retrait de la position du rivage et la perte de matériel rocheux pour une falaise ou sédimentaire (sable, vase) pour une plage (**De la Torre, 2008**).

La lutte contre l'érosion exige une compréhension adéquate des processus fondamentaux qui entrent en jeu, tels que l'hydrodynamisme, la morphologie côtière, les facteurs subaériens, et les facteurs anthropiques. Ceci pour aboutir à des solutions adéquates (**Benderradji et Ferhat, 2011**).

Au Nord-Est d'Alger, sur une distance d'environ cinquante kilomètres, s'étend une bande côtière sablonneuse allant du Cap Matifou au Cap Djinet. Ces dernières années, cette région a été le théâtre d'une intense activité industrielle, comprenant notamment la plus grande centrale électrique qui alimente une grande partie de la région, les activités portuaires au Port de Zemmouri et au second port du Cap Djinet, ainsi que la présence d'infrastructures hôtelières. Cette situation a entraîné une évolution rapide des plages et des dunes côtières de cette zone. Notre étude vise principalement à améliorer notre compréhension des processus interagissant dans la zone littorale de la baie de Zemmouri, afin de déterminer sa sensibilité aux aléas auxquels elle est exposée, tels que l'érosion côtière et la submersion marine. Nous adoptons une approche systématique en exploitant les données disponibles, notamment en géomorphologie, en forces côtières, en hydrodynamique et en climatologie etc.

Il convient de noter que notre objectif principal comprend plusieurs sous-objectifs pour chaque chapitre :

Le **Chapitre I** se focalise sur la synthèse des connaissances requises pour aborder ce sujet. Il présente une revue approfondie des concepts et des outils théoriques essentiels pour comprendre et expliquer le système littoral, système morphodynamique, l'hydrodynamisme ainsi que les effets du changement climatique.

Le **Chapitre II** se concentre sur la description de notre zone d'étude, la baie de Zemmouri. Tout d'abord, nous présenterons la situation géographique de cette zone, puis nous aborderons différents aspects tels que sa géologie, sa sismicité, sa géomorphologie, son climat, son hydrodynamisme, son hydrographie et les facteurs anthropiques qui l'influencent.

Le **Chapitre III** est consacré à l'étude des événements extrêmes et à l'extraction des hauteurs de houles extrêmes par direction en fonction de la période de retour, à l'aide de deux méthodes différentes : POT et BM.

Le **Chapitre IV** se concentre sur l'étude de l'évolution du trait de côte en utilisant une extension DSAS v5 de logiciels ArcGIS 10.4. Cette approche nous permet d'observer le phénomène d'érosion et son impact sur la frange littorale de notre zone d'étude sur une période de 50 ans, allant de 1972 à 2022. De plus, nous effectuons une analyse du bilan sédimentaire et établissons un scénario prévisionnel pour l'horizon 2044.

Le **Chapitre V** est consacré pour l'étude de la modélisation bathymétrique et hydrodynamique des processus hydro sédimentaire à l'aide du logiciel MIKE 21 avec une interprétation des résultats.

Le **Chapitre VI** est consacré pour la cartographie de l'aléa de la submersion marine.

Le **Chapitre VII** concernera les stratégies d'adaptation aux changements climatiques dans notre zone d'étude.

Chapitre I : Généralités

1 La notion du littoral :

Il n'existe pas de définition universelle du littoral ou de l'espace côtier. En effet, selon le domaine d'étude, la considération des activités sur le territoire côtier, voire l'expérience personnelle de l'auteur, il y a de nombreuses approches pour décrire ou concevoir le littoral, ainsi que les diverses limites de cette entité géographique.

Selon (**Belkherroubi et Belguerguid, 2017**) le littoral se définit comme un milieu fragile, et est considéré comme un système complexe où se rencontrent trois interfaces : la lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère reliés par des interactions entre elles. L'influence continentale est manifestée par les paramètres de la structure géologique (la topographie, la lithologie,...), l'influence marine par l'hydrodynamisme (la houle, les vagues, les courants,...) et l'influence atmosphérique par les actions des agents et des processus d'érosion subaériens (les forces éoliennes, la température, la précipitation,...) ainsi que l'action anthropique avec différentes activités de la vie (l'occupation des sols, l'industrie, le tourisme,...).

1.1 Définition d'un système morphodynamique :

Le transport des sédiments de la plage vers le large (phénomène d'érosion) ou de la zone proche littoral en direction du haut de la plage (phénomène d'accrétion), dépend du forçage hydrodynamique venant du large et de la morphologie actuelle de la plage. Ce transport de sédiments influe en retour sur cette morphologie et par une ou plusieurs boucles de rétroaction, positives ou négatives, en corrige la nature (sens du large vers la côte, ou inversement) et l'intensité du flux de sédiments transportés (**Barale, 2019**), on parle d'un système morphodynamique (**figure 1**).

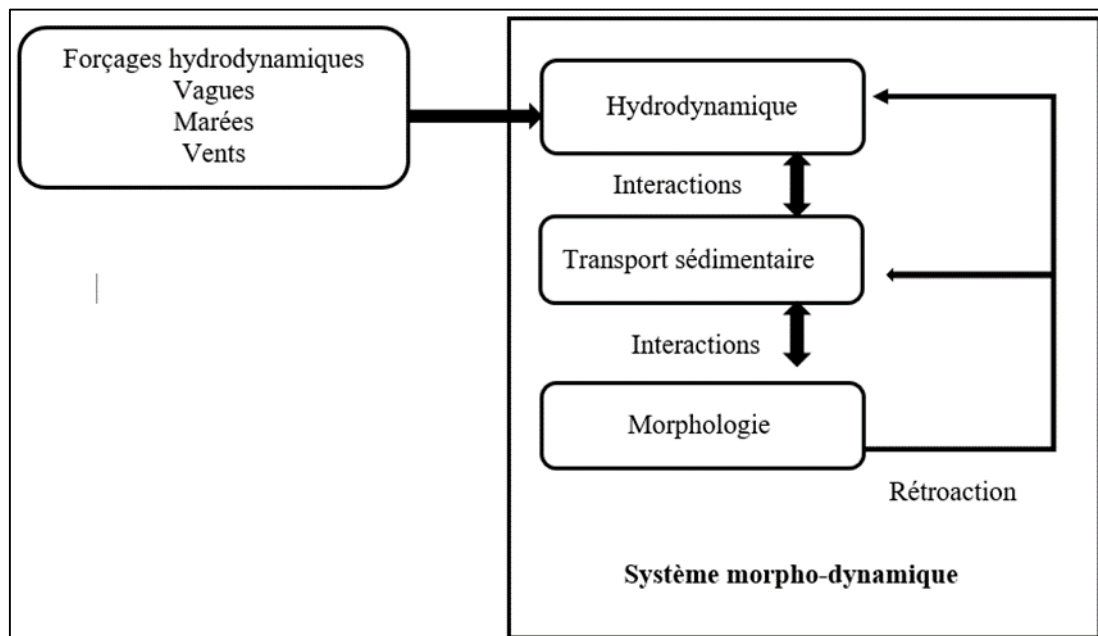


Figure 1 : Composition d'un système morphodynamique côtier (**Hzami, 2015**).

1.2 La morphologie des plages :

La Figure 2 présente une description détaillée des différents compartiments qui se trouvent sur une plage. En se déplaçant de l'océan vers la terre, on peut identifier :

1.2.1 Le haut de la plage :

Leur présence témoigne d'une constante alimentation de la plage en sédiments. Elle résulte principalement des processus marins et secondairement par les apports éoliens et fluviaux (Otmani, 2020).

1.2.2 Le bas de plage :

Occupe la partie qui ne se découvre qu'au moment des marées basses. Le bas de plage est limité du côté externe par l'estran. L'estran est limité du côté interne par des croissants de plage (qui sont de petites accumulations meubles et éphémères). Résultat du mouvement de va-et-vient de l'eau sur l'estran (Otmani, 2020).

1.2.3 L'avant plage :

Ce qu'on appelle la plage sous-marine. Elle occupe l'avant-côte dont les sédiments constituent un stock pour la plage proprement dit (Belkherroubi et Belguerguid, 2017b).

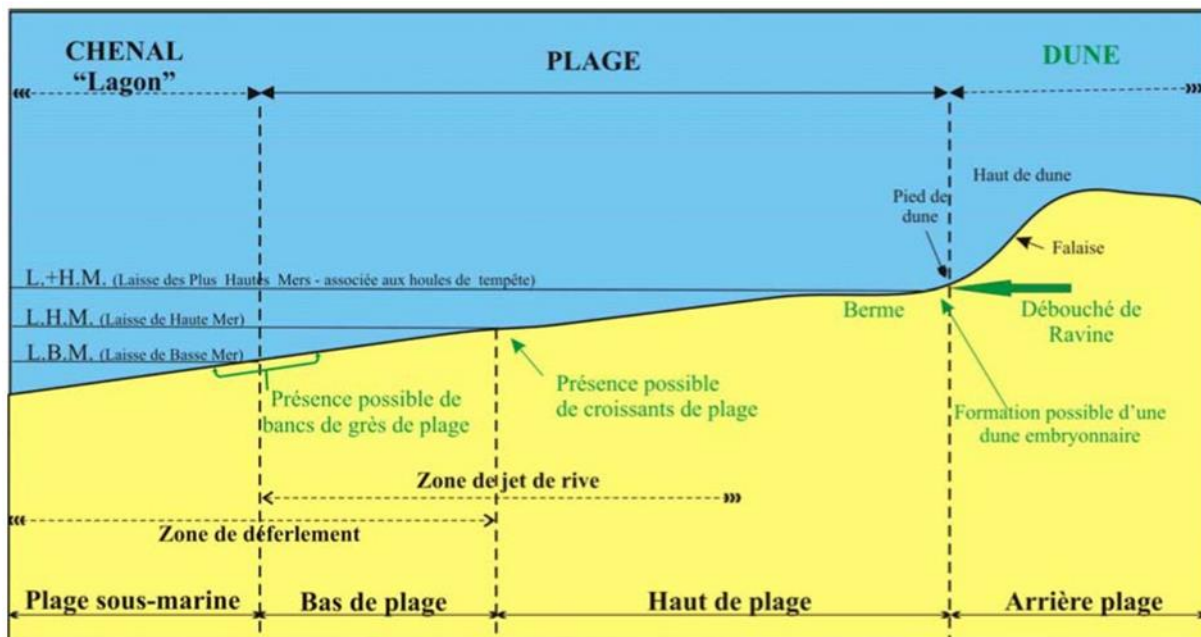


Figure 2 : Morphologie des plages (Pedreros et al., 2002).

1.3 La classification des plages :

Au début des années 1980, les observations réalisées sur plusieurs plages australiennes (Wright et al., 1982 ; Short and Hesp, 1982 ; Wright and Short, 1984) ont conduit à l'élaboration d'un indice environnemental Ω et au premier modèle empirique de classification de la morphologie des plages microtidales à partir de caractères granulométriques (la vitesse

de chute des particules ω_s) et dynamiques (la hauteur des brisants H_b , la période des vagues T) (**Dehouck, 2006**).

$$\Omega = \frac{H_b}{\omega_s T} \quad (1)$$

1.3.1 Plage dissipative ($\Omega > 6$) :

Une plage est dite dissipative lorsque le sable est relativement fin et que cette plage est soumise à des vagues énergétiques et courtes. Ces plages sont larges et caractérisées par une vaste zone de surf où les déferlements glissants (spilling breakers) dissipent leur énergie (**Guza et Inman, 1975**).

1.3.2 Plage réfléchive ($\Omega < 1$) :

Une plage est dite réfléchive lorsque le sédiment est mixte à grossier et qu'elle est exposée aux houles peu énergétiques ($H_b < 1\text{m}$). On y observe des déferlements gonflants (surging breakers) (**Wright et Short, 1984**).

1.3.3 Plage intermédiaire ($1 < \Omega < 6$) :

Les plages intermédiaires sont les plus répandues avec un sédiment hétérogène, à granulométrie variée, et soumises à un régime variable de la houle. Elles sont caractérisées par la présence de barre(s) sédimentaire(s) tridimensionnelle(s) (**Dehouck, 2006**).

2 Hydrodynamique littoral :

L'hydrodynamique littorale est le résultat d'inter actions complexes entre états de mer, courants et niveaux d'eau. La compréhension de ces phénomènes hydrodynamiques est par ailleurs nécessaire à la gestion des zones côtières du fait de leur rôle dans le transport sédimentaire (**Amarouche, 2015**).

2.1 La zonation hydrodynamique du littoral :

La délimitation du littoral et de la plage est réalisée en tenant compte des phénomènes hydrodynamiques associés aux modifications des vagues au cours de leur déplacement :

2.1.1 La zone de swash (swash zone) :

La zone de swash correspond à la partie de la plage exposée au balayage successif de l'eau des vagues. Dans la littérature française, elle est parfois nommée zone de jet de rive ou zone de ressac. Ces termes restent cependant peu utilisés. La lancée d'eau vers la côte correspond au jet de rive ou uprush, le retour de l'eau vers le large est appelé nappe de retrait ou backwash. La zone de swash est située entre la ligne de rivage (shoreline) et la zone de déferlement (surf zone). Chacune de ses limites varie dans le temps et dans l'espace et se déplace sur l'estran en suivant les fluctuations du cycle tidal. La largeur de la zone de swash est donc difficile à percevoir, d'autant plus que sa frontière avec la zone de surf est délicate à identifier (**Degryse-Kulkarni, 2003**).

2.1.2 La zone de levée (shoaling wave zone) :

Elle correspond à la zone où l’amplitude des vagues « gonfle » progressivement et où leur profil se distord (Sénéchal, 2003).

2.1.3 La zone de déferlement (surf zone) :

Les vagues vont « gonfler » en zone de levée jusqu’à ce que leur profil devienne instable. Une fois la limite de stabilité atteinte, elles vont déferler et leur énergie va rapidement être dissipée dans une zone que l’on nomme zone de surf (Sénéchal, 2003).

2.1.4 La zone des brisants (breaker zone) :

Cette zone très dynamique est le lieu de dissipation maximale de l’énergie des vagues incidentes. Le déferlement des vagues se produit lorsque la profondeur d’eau devient trop faible comparée à leur hauteur (Aouiche, 2016).

2.1.5 La zone du large (offshore zone) :

Les vagues demeurent inchangées, indépendamment de la topographie sous-marine.

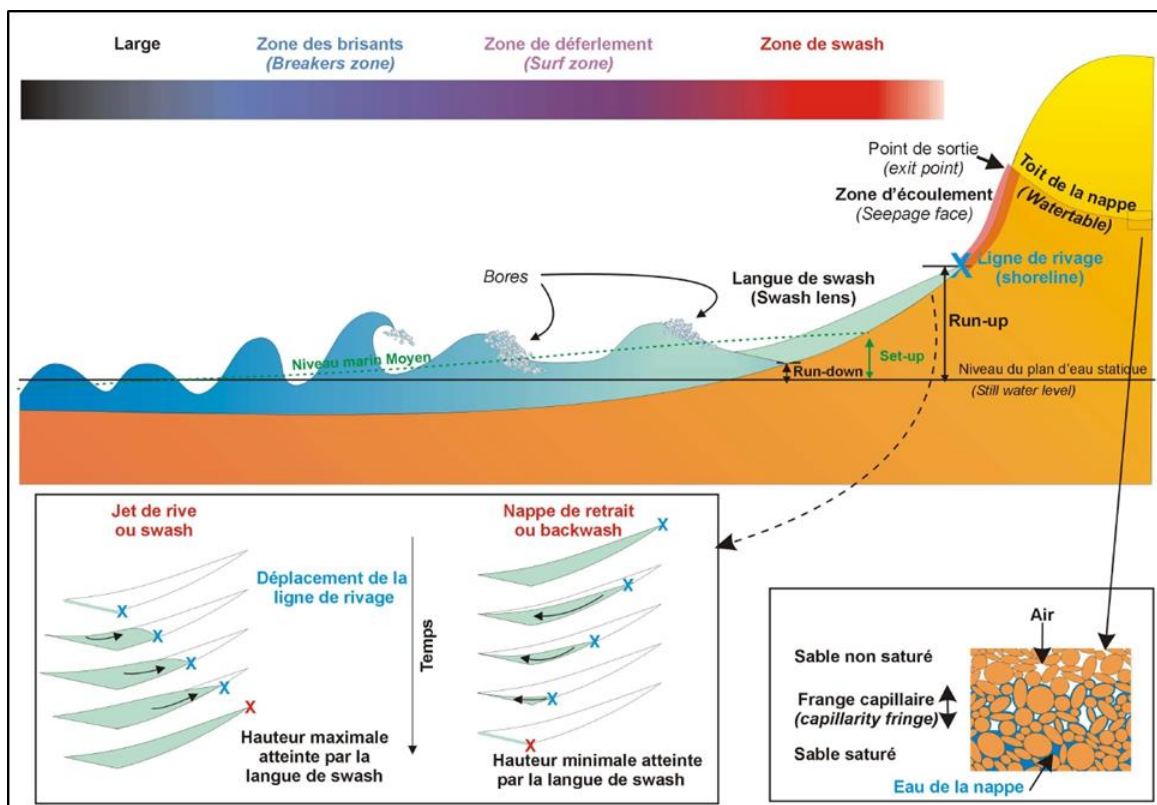


Figure 3 : Représentation schématique des différentes zones hydrodynamiques du littoral (Degryse-Kulkarni, 2003).

2.2 Les agents de la dynamique littorale :

La mer est soumise à des mouvements ondulatoires et à des courants généraux. On distingue trois mouvements ondulatoires principaux, selon la période : la houle, les seiches et la marée (Carlos, 1985)

2.2.1 Les Houles :

La houle est un mouvement ondulatoire que subit la surface de la mer sous l'influence du vent éloigné de la zone d'observation (vent lointain) (Djeouadi et Hantal, 2018).

La houle peut être définie à l'aide de différents paramètres tels que la période T , l'amplitude a ou encore la longueur d'onde λ ($k = 2\pi/\lambda$, le vecteur d'onde) (Figure 4). La profondeur d'eau locale h est un paramètre qui devient important dans le calcul de la vitesse de propagation de la houle à l'approche de la côte. Périodicités spatiales et temporelles sont liées par la relation de dispersion. La longueur d'onde est directement liée à la vitesse de phase C et à la période de la houle par la relation $\lambda = C.T$ (Arnaud, 2016).

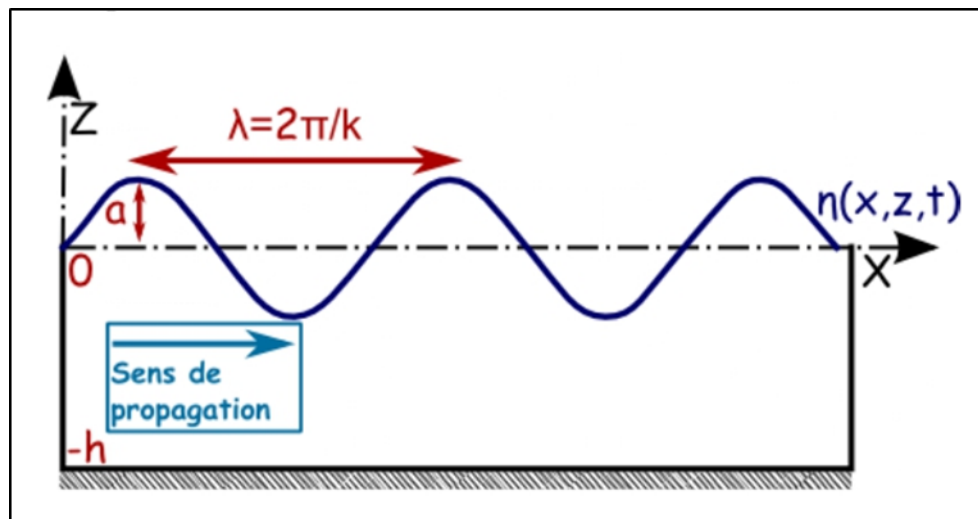


Figure 4 : Représentation des paramètres de houle (Arnaud, 2016).

2.2.2 Les vagues :

Les vagues, ce sont les déplacements à la surface des océans d'ondes périodiques générées par le vent. Les vagues marines ont une grande variété de formes, de dimensions et de vitesses de propagation. Une vague est un mouvement oscillatoire à la surface d'un océan, d'une mer ou d'un lac. Les vagues sont générées par le vent et ont une amplitude crête à crête allant généralement d'une dizaine de centimètres à une dizaine de mètres. Leur comportement peut être modélisé à partir des formes ondulatoires, beaucoup plus simples, utilisées par les mathématiciens, et analysé en termes de période, vitesse et écartement ou longueur d'onde; Pour les grandes vagues océaniques, la vitesse de propagation est proportionnelle à la période, plus les vagues sont espacées, plus elles vite (Ravonienimana, 2006).

2.2.2.1 Dynamique des vagues en zone côtière :

➤ Déferlement :

Il existe traditionnellement deux types de déferlement. Le premier nommé moutonnement dans les eaux profondes est dû à la force du vent qui donne de l'énergie aux vagues et augmente ainsi leur cambrure. Le deuxième est le déferlement bathymétrique qui survient, quant à lui, à la proximité de la côte. Durant la propagation d'une houle du large vers la côte, sa hauteur H augmente et sa longueur d'onde λ diminue (**Sallaye, 2021**).

Généralement, les vagues qui s'approchent d'une plage subissent des changements de forme avant de se rompre. On peut identifier trois types principaux de déferlement :

Le déferlement glissant (« Spilling breaker ») : c'est un mélange d'air et d'eau se développe sur la face avant de la crête (**Duval, 2007**).

Le déferlement plongeant (« Plunging breaker ») : se produit lorsque la crête de la vague se courbe au-dessus de la face avant et tombe à la base de la vague, en emprisonnant une poche d'air et en produisant un bruit sourd et le développement d'un front vertical (**Graillot, 1975**).

Le déferlement gonflant (« Surging breaker ») : se produit lorsque la crête de la vague reste intacte tandis que la base et la face avant de la vague, avec des déferlements mineurs, avancent vers la plage (**Graillot, 1975**) (**Figure 5**).

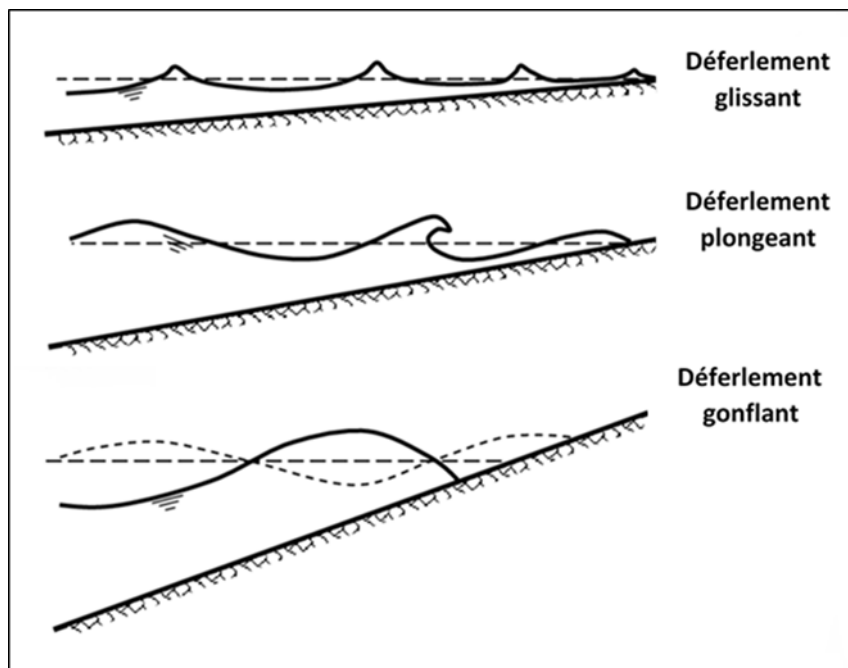


Figure 5 : Les différents types de déferlement (**Bay, 2005**) (**modifié**).

En plus du Shoaling et du déferlement, les changements de profondeur dans les zones côtières donnent lieu à d'autres phénomènes :

➤ La réflexion :

Le phénomène de réflexion intervient lorsque la houle se propage en milieu inhomogène, c'est-à-dire pour une célérité variable. Elle peut être observée en présence de fonds fortement

variables, de courants inhomogènes ou de structures poreuses. La réflexion de la houle par un obstacle peut être totale lorsque l'obstacle rencontré est émergeant et imperméable ou partielle (Arnaud, 2016).

➤ **La réfraction :**

Une houle de période déterminée à une célérité qui dépend de la profondeur d'eau. Ainsi, une ligne de crête rectiligne par profondeur infinie va se déformer en arrivant par profondeur finie, la célérité étant plus grande en un point de profondeur d qu'en un point voisin de profondeur inférieure à d , c'est ce qu'on appelle la réfraction (Leclerc *et al.*, 1976).

➤ **La diffraction :**

la diffraction est la modification du trajet d'une onde lorsqu'elle passe à proximité d'un obstacle (Ravonienimana, 2006).

2.2.2.2 Mécanismes modificateurs de la vague :

➤ **Les courants :**

Les caractéristiques et le mouvement d'une vague peuvent être influencés par les courants. Parmi les effets des courants sur la vague, on trouve les suivants :

- La vague subit une déformation.
- La trajectoire de la vague a été modifiée (La direction dans laquelle les vagues se propagent).
- Modifier la hauteur des vagues.
- La création de bancs de sable et de barres modifie la hauteur et la forme des vagues.

Il y a beaucoup de facteurs qui contrôlent l'effet des courants sur les vagues, tels que l'intensité et la direction des courants, la profondeur de l'eau, la topographie sous-marine, l'interaction de ces facteurs est complexe et peut engendrer une diversité considérable de comportements des vagues lorsque des courants sont présents.

➤ **Frottement sur le fond :**

La houle n'est pas influencée par le fond dans sa propagation vers la côte jusqu'à une profondeur égale à la moitié de sa longueur d'onde ($L/2$). Au-delà de cette limite ($L/2$), le fond impose une contrainte à l'onde de surface. Il se produit une dissipation d'énergie par frottement. Ses caractéristiques physiques sont modifiées (seule la période reste constante), et les crêtes deviennent de plus en plus dissymétriques. Ce phénomène est appelé levée de la vague (shoaling). Les vagues vont déferler avec plus ou moins d'intensité en fonction de la pente locale du fond. Différentes formes de déferlement sont observées : le déferlement plongeant, déversant et à gonflement (Beji, 2019).

2.2.3 La marée :

Les marées sont des oscillations périodiques de la surface de la mer de part et d'autre de sa figure d'équilibre, sous l'influence de petites forces perturbatrices, elles aussi périodiques et dérivées de l'attraction de la Lune et du Soleil (Bertrand, 1923).

Les côtes algériennes connaissent des marées de faible amplitude, avec un marnage moyen d'environ 20 à 30 cm lors de la pleine lune, et de 5 à 15 cm lors de la nouvelle lune.

2.2.4 Les courants :

Les ondes de vagues se propagent depuis le large vers les côtes, générant ainsi une libération d'énergie sous forme de courants (**Figure 6**). On observe trois catégories distinctes de courants littoraux à la suite de ce phénomène :

- Le courant longitudinal ou transit littoral se produit lorsque les vagues déferlent de manière oblique par rapport à la direction de la côte, créant ainsi un courant parallèle à la côte connu sous le nom de courant longitudinal ou courant de dérive littorale. Ce courant joue un rôle essentiel dans le déplacement des sédiments sur de longues distances, s'étendant sur plusieurs dizaines de kilomètres.
- Le courant transversal : se produit lorsque l'excès d'eau apporté par les vagues entre le point de déferlement et le rivage génère un courant de fond, également appelé courant de retour.
- Les courants d'arrachement : sont engendrés par le retour en mer de l'excédent d'eau et d'énergie.

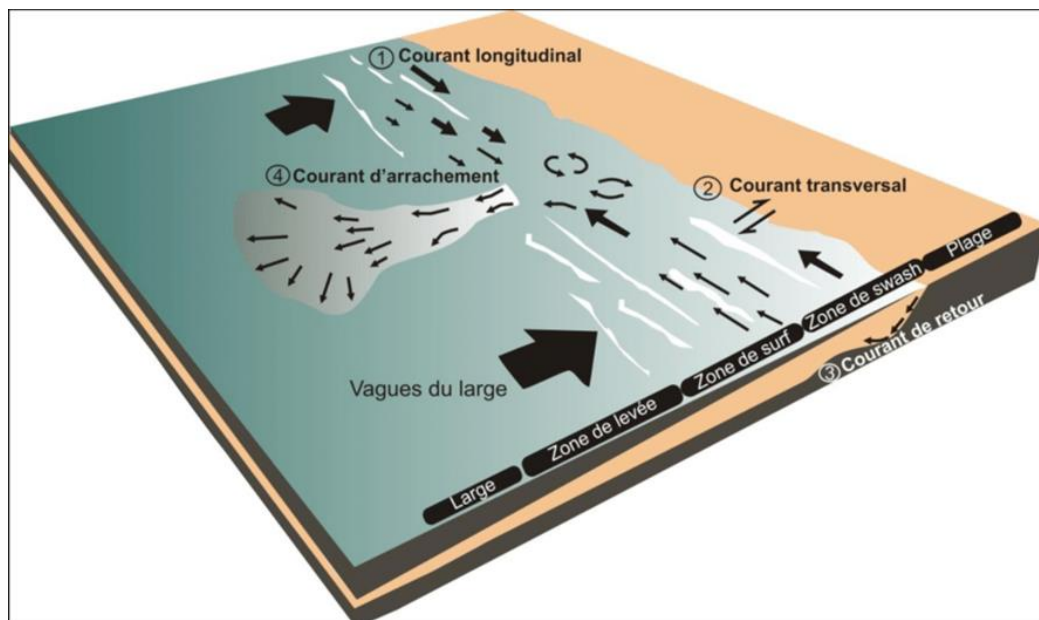


Figure 6 : La morphologie 3D du système littoral. Les flèches noires indiquent les différents types de courants induits par le déferlement des vagues à l'approche des côtes (**Amrouni, 2020**).

3 Changement climatique :

Le changement climatique fait référence à un changement dans l'état ou la variabilité du climat. Le changement climatique est identifié par une variabilité des propriétés du climat qui persiste durant une période prolongée et qui peut être identifiée grâce à des tests statistiques. Le changement climatique peut être causé par des processus internes naturels ou par des forces externes, telles que des éruptions volcaniques ou des actions anthropiques persistantes (**González et Emilia, 2020**).

3.1 Sixième rapport du GIEC 2023 :

Le réchauffement climatique global est en progression. Les activités anthropiques impactent les systèmes climatiques par une augmentation significative des émissions de gaz à effet de serre et surtout l'urbanisation. En effet, 70 % des émissions anthropiques de carbone proviennent des zones urbaines. Durant ces dernières décennies, plusieurs études ont été effectuées sur les effets du changement climatique sur les différents systèmes terrestres (**Hzami, 2021**).

Le 6ème rapport d'évaluation du GIEC confirme que les risques liés au changement climatique (tels que les vagues de chaleur, les précipitations extrêmes, les sécheresses, la fonte de la cryosphère et les modifications dans le comportement de nombreuses espèces) ont augmenté pour une même intensité de réchauffement par rapport au 5ème rapport d'évaluation de 2014, ces risques, qu'ils soient liés au climat ou non, deviendront plus graves et plus fréquents, ce qui compliquera davantage leur gestion.

La température à la surface du globe était de 1,09 [0,95 à 1,20]°C plus élevée en 2011-2020 qu'en 1850-1900, avec des augmentations plus importantes sur les terres (1,59 [1,34 à 1,83]°C) que sur les océans (0,88 [0,68 à 1,01]°C). Au cours des deux premières décennies du XXIe siècle (2001-2020), la température à la surface du globe était supérieure de 0,99 [0,84 à 1,10] °C à celle de la période 1850-1900. La température à la surface du globe a augmenté plus rapidement depuis 1970 qu'au cours de toute autre période de 50 ans au cours des 2000 dernières années au moins (**Lee et al., 2023**).

Les impacts prédominants constatés en Méditerranée vont de l'augmentation de la température de l'air (+1,5 °C par rapport à 1850) à l'acidification croissante des eaux marines, en passant par l'élévation de la température de la mer (+0,29 à +0,44 °C par décennie). En outre, on note une augmentation de la fréquence et de l'intensité des épisodes de sécheresse.

4 Élévation du niveau de la mer (ENM) :

Il est clair que l'influence humaine a réchauffé l'atmosphère, les océans et les terres. Le niveau moyen mondial de la mer a augmenté de 0,20 [0,15 à 0,25] m entre 1901 et 2018. Le taux moyen d'élévation du niveau de la mer était de 1,3 [0,6 à 2,1] mm par an entre 1901 et 1971, de 1,9 [0,8 à 2,9] mm par an entre 1971 et 2006, et de 3,7 [3,2 à 4,2] mm par an entre 2006 et 2018 (degré de confiance élevé). L'influence humaine a très probablement été le principal moteur de ces augmentations depuis au moins 1971 (**Lee et al., 2023**).

L'élévation du niveau de la mer méditerranée (jusqu'à +1 m en moyenne en 2100 dans le pire scénario), elle est irréversible au moins à l'échelle du siècle ou du millénaire et ce quel que soit le scénario d'atténuation envisagé.

Les conséquences du changement climatique et de la hausse du niveau de la mer risquent donc d'être dramatiques pour certaines régions du globe. Ces conséquences doivent, dans la mesure du possible, être prises en compte dans les calculs, bien que l'évolution de la trajectoire des tempêtes qui pourrait affecter considérablement les houles de projet sont difficiles à évaluer. Néanmoins les calculs de dimensionnement notamment concernant les ouvrages de protection pour lutter contre les franchissements doivent dès à présent tenir compte de l'élévation du niveau de la mer en plus des surcote habituellement utilisées (**Jarry, 2009**).

5 L'érosion et la submersion marine :

Dans le contexte de notre étude, nous sommes chargés d'évaluer la vulnérabilité côtière, qui comprend l'analyse des risques potentiels en mer, tels que l'érosion et la submersion marine. Ces deux facteurs sont responsables d'un recul important du trait de côte et font partie des risques côtiers que nous devons prendre en compte pour élaborer notre évaluation.

L'érosion littorale, par contre, est la perte d'une partie de la terre au profit de la mer due, essentiellement à l'effondrement des falaises ou à l'appauvrissement des dunes et plages en sable. Le phénomène d'érosion entraîne une fragilisation du bord de côte et un recul des terres au profit de la mer, cette érosion touche 24% des côtes sableuses dans le monde (**Chaib, 2021**).

Les submersions marines sont des inondations temporaires de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques (forte dépression et vent de mer) et marégraphiques sévères provoquant des ondes de tempête. Elles envahissent en général des terrains situés en dessous du niveau des plus hautes mers, mais aussi parfois au-dessus si des projections d'eaux marines franchissent des ouvrages de protection, les submersions sont dues (**Garry, 1997**):

- à la rupture ou à la destruction d'un cordon dunaire à la suite d'une érosion intensive.
- au débordement ou à la rupture de digues ou d'ouvrages de protection, ou encore à leur franchissement exceptionnel par des « paquets de mer »
- à des vagues de forte amplitude provoquées par des glissements sous-marins (en particulier sur la façade méditerranéenne) (**Garry, 1997**).

Les côtes algériennes subissent les risques de l'érosion et de la submersion marine qui augmente avec l'occupation du sol qui est très importantes dans les villes côtières (**Chaib, 2021**).

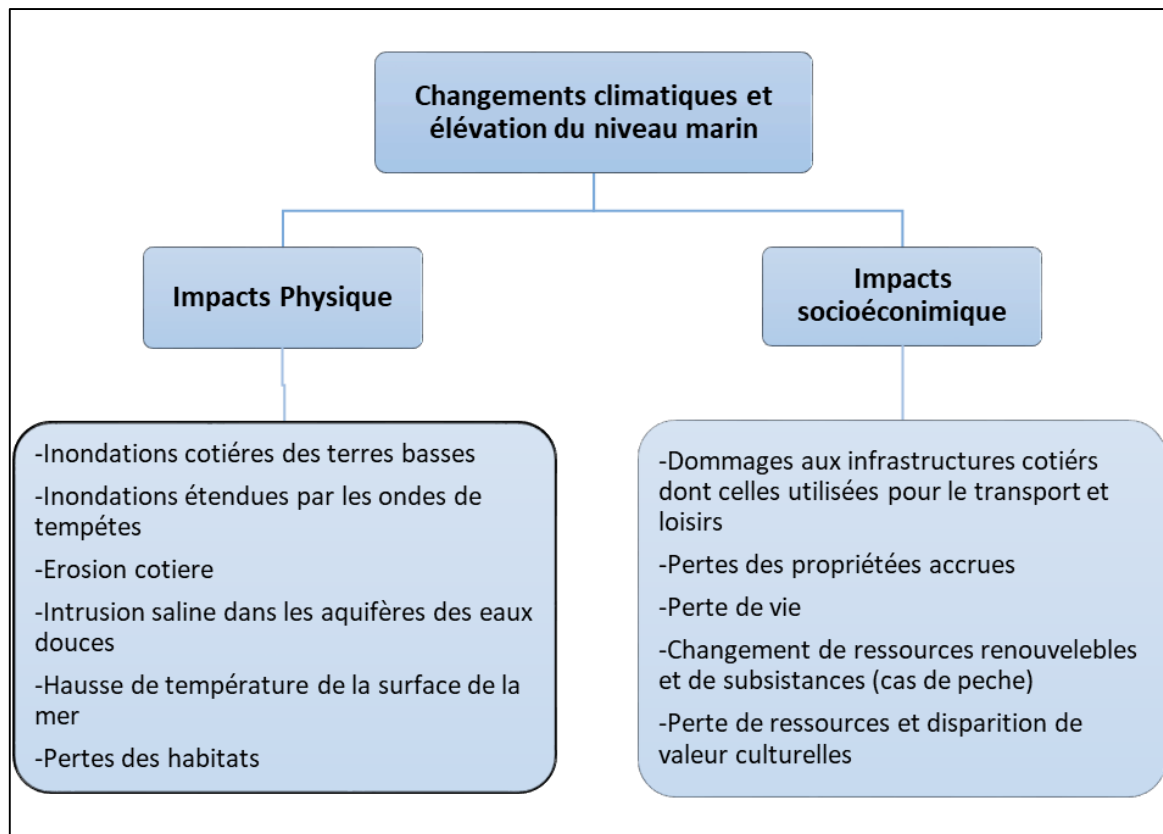


Figure 7 : Impacts potentiels des changements climatiques sur la zone côtière (McLaughlin *et al.*, 2002) (Modifiée).

6 Cellules sédimentaires :

Ce sont des portions de côte à l'intérieur desquelles les circulations sédimentaires, contrôlées par la dérive littorale (courant d'intensité variables en fonction de l'énergie des vagues, capable de déplacer les sédiments le long de la plage) ont un fonctionnement autonome par rapport aux portions voisines : les mesures d'aménagement prises dans une de ces cellules peuvent avoir un impact sur d'autres secteurs de la même cellule mais pas sur les autres cellules (Nachbaur *et al.*, 2015).

Chapitre II :
Présentation de la zone
d'étude (baie de
Zemmouri).

Ce chapitre vise à fournir une vue d'ensemble du fonctionnement du littoral de la baie de Zemmouri. Ainsi, il est essentiel de débiter notre recherche en présentant des informations générales sur la zone d'étude. Cette section est dédiée à la présentation et à la caractérisation de la zone d'étude, en prenant en compte son contexte géographique, topographique, géologique, hydrodynamique, hydrographique et morphodynamique.

1 Situation géographique :

La baie de Zemmouri, autrefois appelée la baie de Courbet, se situe à l'est immédiat de la baie d'Alger. Très largement ouverte vers le Nord, elle s'étale sur une cinquantaine de kilomètres (Benslama, 2001). Elle est délimitée au nord par la Méditerranée occidentale, à l'est par le Cap Djinet (36°52' Nord et 3°45' Est), et à l'ouest par le Cap Matifou (36°49' Nord et 3°15' Est) (Figure 8).

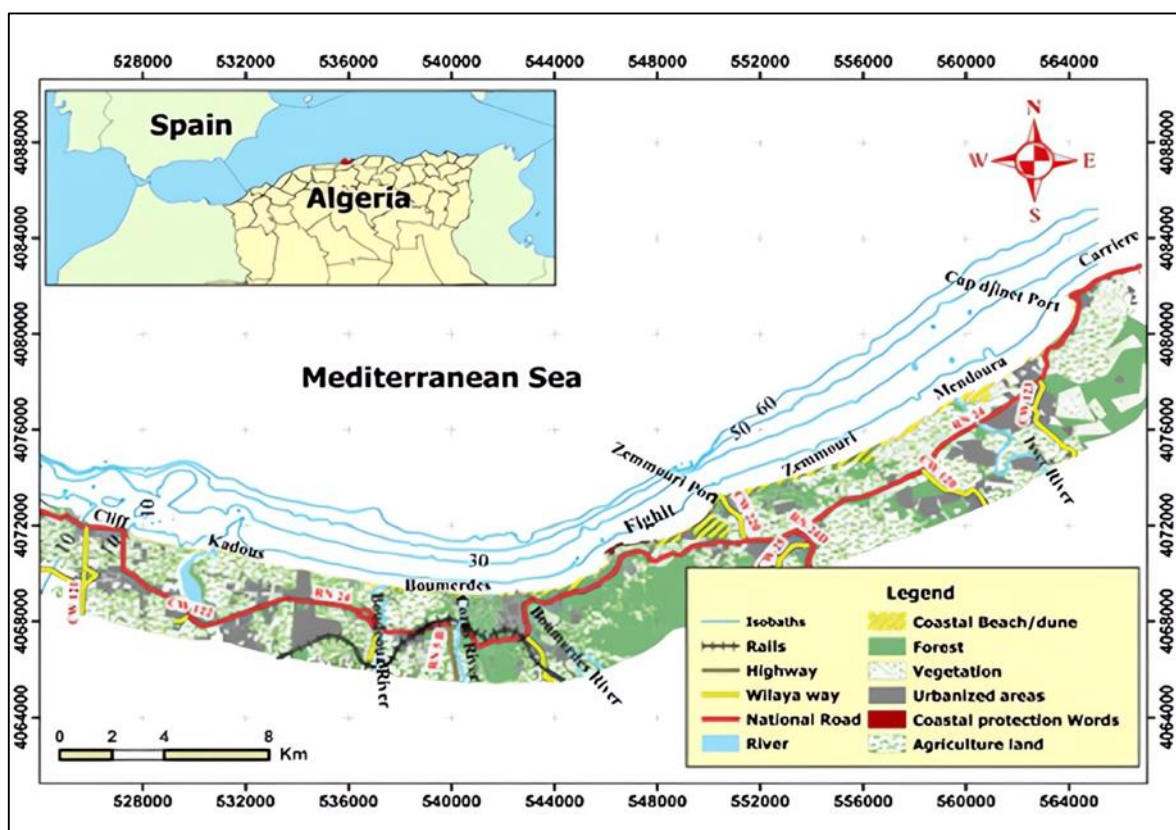


Figure 8 : Situation géographique de la Baie de Zemmouri (Sallaye, 2021).

D'après la division administrative de 1984, on situe la baie de Zemmouri à l'est de la baie d'Alger. Ses limites sont les suivantes :

- Au nord, la mer Méditerranée ;
- À l'ouest, la wilaya d'Alger ;
- Au sud-ouest, la wilaya de Blida ;
- À l'est, la wilaya de Tizi Ouzou ;
- Au sud-est, la wilaya de Bouira.

2 Aspects géologiques et sismiques :

Il est désormais essentiel de posséder une compréhension approfondie de la géologie et de la sismique spécifiques d'un site. Cette connaissance complémentaire est cruciale pour évaluer la zone d'étude. Elle permet de déterminer la vulnérabilité du site aux agressions marines, qui influent sur les quantités et la composition des sédiments rejetés en mer.

2.1 Cadre géologique :

La partie orientale de la côte algéroise est située dans le domaine interne des Maghrebides, qui est une chaîne de montagnes faisant partie de l'Orogénèse Alpine Périméditerranéenne. Cette chaîne s'étend de l'Ouest à l'Est sur 2000 km depuis le détroit de Gibraltar à la Calabre, elle est composée de différentes zones : au nord, on trouve le Tell, qui comprend les Kabyliques, les flyschs et les nappes Telliennes, tandis qu'au sud se trouve le système de l'Atlas intracontinental.

L'accent sera principalement mis dans l'étude sur la marge qui borde la région de la Kabylie.

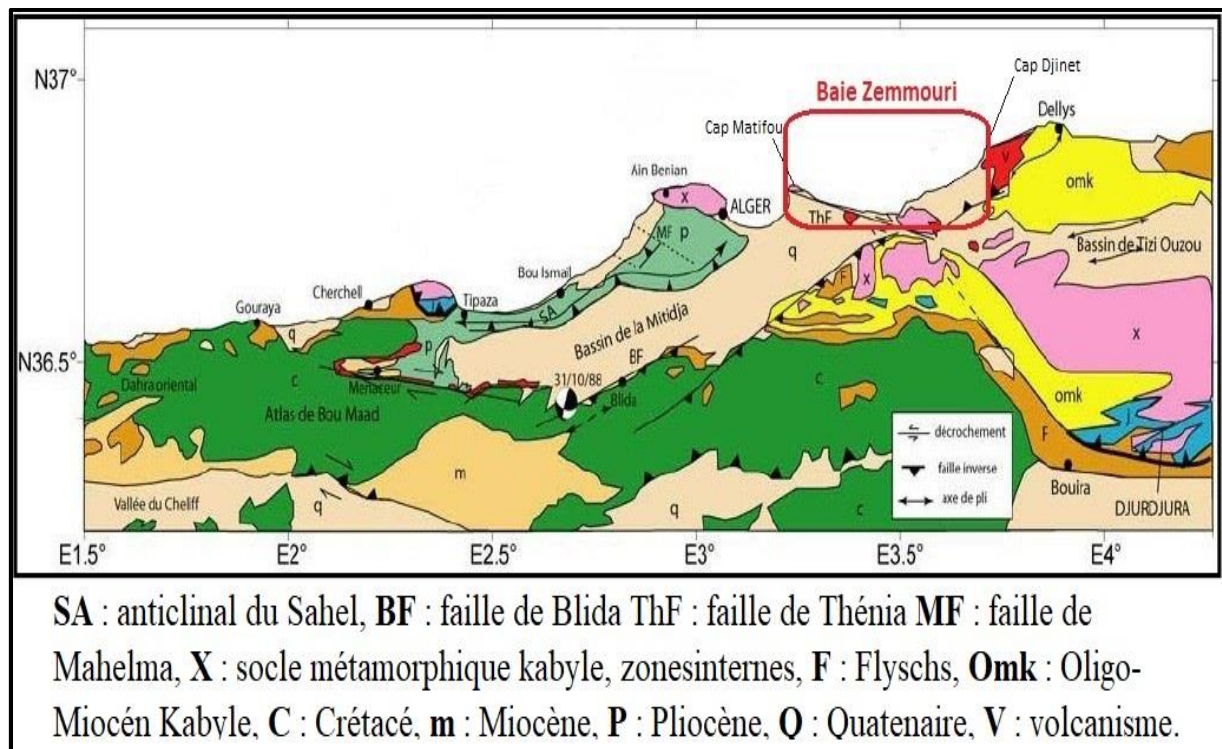


Figure 9 : Carte et coupe structurale schématique de la chaîne maghrévide montrant la disposition des zones internes et externes (Athmania, 2010).

➤ **Cadre géologique régionale :**

Les différentes parties de ce domaine en forme d'anneau très aplati sont généralement divisées en zones internes, qui se trouvent à l'intérieur de l'anneau. Ces zones sont actuellement représentées par divers massifs disséminés le long de la côte méditerranéenne, la zone des flysch, ainsi que par les zones externes situées à la périphérie de l'anneau.

2.1.1 Le domaine interne :

➤ Le socle kabyle :

Il est composé de massifs cristallophylliens métamorphiques (gneiss, marbres, amphibolites, micaschistes et schistes) et d'un ensemble sédimentaire paléozoïque (Ordovicien à Carbonifère) peu métamorphique. Ce socle affleure d'Ouest en Est dans les massifs du Chenoua (à l'Ouest d'Alger), de Grande Kabylie et de Petite Kabylie (entre Jijel et Skikda). Ce dernier, avec 120 km de long et 30 km de large, constitue le plus large affleurement du socle kabyle en Algérie. Ce socle est par endroits recouvert en discordance par des dépôts détritiques (principalement des molasses conglomératiques) d'âge Oligocène supérieur–Miocène inférieur, appelés Oligo-Miocène Kabyle. Les massifs internes des Maghrébides ont donc constitué une zone haute de la fin du Paléozoïque à l'Oligocène supérieur. Le socle kabyle est bordé au Sud par les unités mésozoïques et cénozoïques de la Dorsale Kabyle. (Abdi et Amara, 2017).

➤ La Dorsale Kabyle :

On lui donne parfois le nom de "chaîne calcaire" en raison de la prédominance des formations calcaires du Jurassique inférieur. Ce secteur présente une particularité remarquable : il est extrêmement étroit et ne s'étend jamais sur plus de quelques kilomètres de largeur. La dorsale kabyle est caractérisée par des strates d'âge permo-triasique à Eocène moyen (Lutétien), qui se présentent sous forme d'écailles. Sur le plan lithologique, ces formations comprennent des types de roches différents provenant de différentes périodes géologiques. On y trouve des calcaires issus du Lias et de l'Eocène, des dolomies formées entre le Trias et le Lias inférieur, ainsi que des grès datant du Permo-Trias.

➤ Le domaine des flyschs :

Il est constitué par des nappes de flyschs crétacés-paléogènes qui affleurent dans les zones littorales sur 800 km de long, entre Mostaganem et Bizerte (Tunisie). Il s'agit essentiellement de dépôts de mer profonde mis en place par des courants de turbidités (Figure 10). Ces flyschs se présentent de trois manières : (1) en position interne, superposés aux massifs kabyles, c'est-à-dire rétro-charriés sur les zones internes, et appelés flyschs nordkabyles ; (2) en position relativement externe à la bordure sud de la Dorsale kabyle (flyschs sud-kabyle) et enfin (3) en position très externe, sous forme de masse isolées flottant sur le Tell charriés jusqu'à une centaine de kilomètres au sud (Hadjem, 2010) .

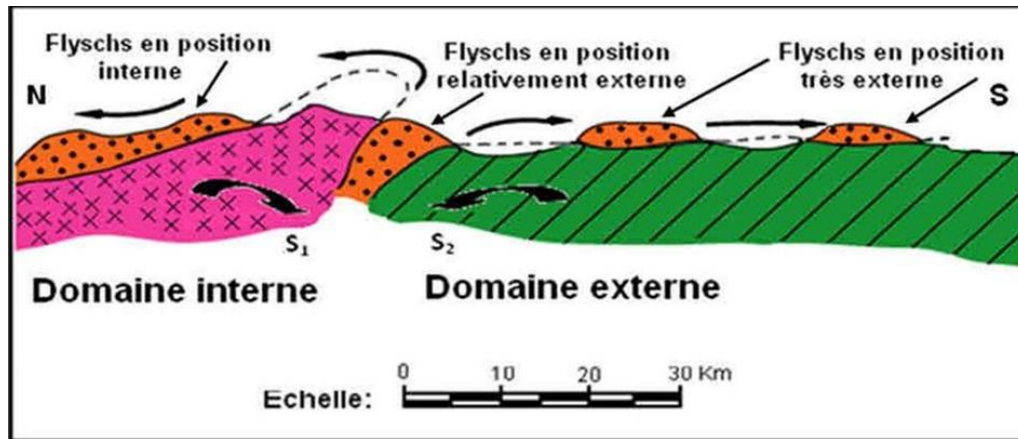


Figure 10 : Position des nappes de flyschs par rapport aux unités de la chaîne des Maghrébides (**Rebouh et al., 2016**).

On distingue deux grands groupes de flyschs créacés-paléogènes liés chacun par leur position primitive et par leur alimentation à l'une des deux marges du sillon qu'ils occupaient (**Bouillin, 1986**) :

- Les Flyschs Mauritaniens (à quartzite et argile (créacé inférieur et supérieur)),
- Les Flysch Massyliens (shisto-quartzite (créacé inférieur)),

Il y a un troisième groupe plus récent de flyschs appelés les flyschs numidiens, qui ont une datation comprise entre l'Oligocène supérieur et le Burdigalien inférieur.

2.1.2 Le domaine externe :

Le domaine externe ou domaine tellien (Duran-Delga, 1969 ; Vila, 1980 ; Bouillin, 1986) constitué par un ensemble de nappes allochtones pelliculaires constituées principalement de marnes d'âge Créacé moyen à Néogène et qui ont été charriées sur une centaine de km vers le Sud. On distingue du Nord au Sud (**Teldja, 2017**) :

- Les nappes ultra-telliennes,
- Les nappes telliennes sensu stricto,
- Les nappes pénis-telliennes.

Les formations géologiques principales sont les suivantes :

2.1.2.1 Le socle primaire :

Le socle rocheux comprend des masses métamorphiques cristallophylliennes telles que le gneiss, les marbres, les amphibolites, les micaschistes et les schistes. Ces formations rocheuses anciennes forment les reliefs de Rocher Noir à Boumerdès et de Cap Matifou à Alger. Les principaux types de roches qui les composent sont les schistes et les micaschistes.

2.1.2.2 Les intrusions magmatiques :

Au Cap de Matifou, on observe la coexistence des andésites quartzitiques du Burdigalien et du socle rhyolithique du Vindobonien, qui sont visibles à Ain Taya.

2.1.2.3 Les formations mio-plio-quaternaire :

➤ Le Miocène :

Les reliefs de cette formation révèlent la présence de granite, de granodiorite et d'andésite, On peut observer certains indices de ces points dans les reliefs de Thénia et du cap Djinet.

➤ Le Pliocène :

En Algérie, le Pliocène est subdivisé selon deux faciès successifs :

- Le Plaisancien :

Il correspond à une série de marnes bleues .en discordance sur les formations miocènes sous-jacentes. Ces marnes n'affleurent pas dans les falaises littorales de la zone d'étude, sauf dans l'Oued Réghaia et a Ain Taya (**Mohamed et Makhlof, 2012**)

- l'Astien :

Observées dans les rives de l'oued Corso et plus à l'Ouest dans les falaises d'Ain Taya, les formations astiennes correspondent à des grès carbonatés très coquilliers et bioclastiques (**Mohamed et Makhlof, 2012**).

➤ Le quaternaire :

Les formations du Quaternaire sont représentées par les dépôts alluvionnaires récents et anciens des lits d'oueds, des terrasses fluviatiles anciennes et ceux des plages qui se localisent le long de la bande littorale. Elles sont constituées par les sables de plage et des dunes littorales, des graviers, des cailloux, des tufs et des limons (**Abdi et Amara, 2017**).

2.2 Cadre sismique :

L'examen de la sismicité de la région de Zemmouri s'étalant entre 1790-2002 indique une activité sismique faible à modérée seuls: 8 événements de magnitude inférieure à 5 sont recensés (**Boughacha et al., 2004**). Par ailleurs, la zone de Boumerdés Alger, fortement secouée par le séisme du 2 mai 2003 (un séisme de magnitude $M_1=6,2$ selon le CRAAG en 2003). N'aurait pas historiquement connu une activité sismique forte. Seule la zone de passage de la faille de Thénia connu une activité macrosismique de faible magnitude (inférieure à 5) sans toutefois avoir une liaison avérée avec la faille (**Mabrouk et Aitouche, 2007**).

Le séisme qui a affecté violemment la région de Boumerdés- Zemmouri le 21 mai 2003 se situe sur la Zone d'affrontement entre les plaques tectoniques africaine et eurasiennne. Les deux plaques sont limitées par une longue zone de jonction sismique qui s'étend des Açores jusqu'à la Turquie en passant par Gibraltar, le Maghreb, l'Italie, la Yougoslavie et la Grèce etc. (**Mabrouk et Aitouche, 2007**).

Le séisme côtier du 21 Mai 2003 de Zemmouri à Boumerdes en ALGERIE, a fortement marqué les esprits. Les habitants des régions avoisinantes ont remarqué que la mer a fait un recul de plusieurs dizaines de mètres, juste après ce séisme qui a causé un soulèvement côtier le long de la zone épiscoptrale, c'était un tsunami (**Touhami et Khellaf, 2017**).

Un tsunami s'est déclenché dans les îles Baléares à la suite de ce séisme, et l'onde principale a été ressentie jusqu'à 400 km de l'épicentre. L'épicentre lui-même se situe en mer, à environ 40 km au large de la côte, entre les villes de Zemmouri et Cap Djinet. Ce tremblement de terre a engendré divers phénomènes géologiques entre Dellys et Bordj El Bahri, tels que

l'effondrement des falaises, des glissements de terrain, la liquéfaction du sol et le recul de la mer.

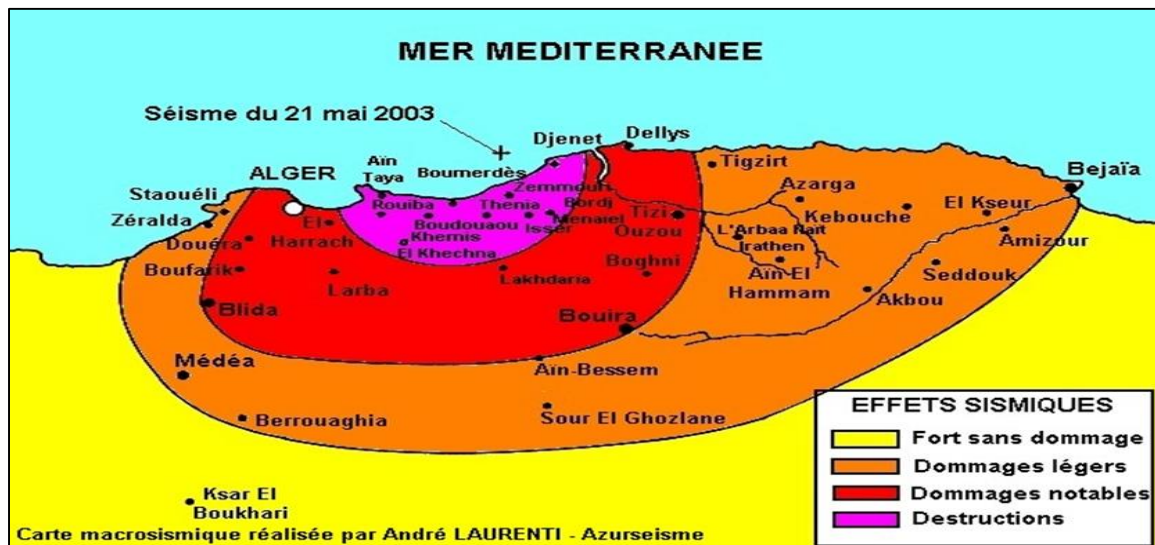


Figure 11 : Séisme du 21 Mai 2003 d'Alger et de Boumerdes (<https://www.azurseisme.com/Seisme-de-Boumerdes.html>).

3 Cadre Géomorphologique :

La géomorphologie côtière étudie comment les formes du littoral évoluent en réponse aux processus hydrodynamiques tels que les vagues, les houles et les courants, ainsi qu'à d'autres processus divers.

La zone de Zémouri présente une grande variété de formes côtières qui résultent de l'interaction entre les processus morphodynamiques et la géologie complexe du site. Ces formes côtières se sont développées et ont évolué depuis le Mio-Plio-Quaternaire, à l'exception du Cap Matifou, où le socle primaire affleure.

3.1 La géomorphologie continentale :

Le littoral de la grande baie de Zemmouri, s'étendant du cap Matifou à l'ouest au cap Djinet à l'est, offre une géomorphologie littorale diversifiée, telle que : falaises, de plages et de dunes.

3.1.1 Les falaises :

On peut distinguer deux catégories de falaises en fonction de leur aspect géologique et géomorphologique : les falaises entaillées dans des roches meubles et les falaises entaillées dans des roches tendres.

➤ Les falaises entaillées dans des roches tendres :

Elles sont formées de marnes bleues et de calcaire du Pliocène inférieur et supérieur. On trouve ces types de falaises le long de la côte est algéroise, d'Ain Taya à Figuiier (Boumerdes). Elles ont des hauteurs moyennes comprises entre 20 et 25 mètres et sont sensibles à la gravité, à l'infiltration d'eau et sont propices aux glissements de terrain.

➤ Les falaises entaillées dans des roches dures :

Elles se situent au niveau du Cap Matifou, Cap Djinet, rocher noir et cap Blanc, ces falaises sont hautes de 20 et 40m, bien que ces falaises donnent l'impression d'être solides, elles subissent des dégradations importantes causées par les changements de température, les pluies hivernales et les vagues de tempêtes qui créent des encoches.

3.1.2 Cordons dunaires :

Les dunes littorales sont formées par l'accumulation de sable transporté par le vent. Elles sont très dynamiques, changeant avec les vents, et sont alignées parallèlement à la côte. Dans notre zone d'étude, nous identifions deux types de cordons dunaires :

- Un cordon dunaire actuel également appelé dunes bordières car ils bordent le haut de la plage, ils se forment le long des côtes basses grâce aux vents et à l'apport de sédiments par la dérive littorale, elles se trouvent au niveau de la plage El Kadous

- Un cordon dunaire ancien en trouve juste après les dunes bordières, ils sont stabilisés par la végétation, on trouve au niveau de Réghaïa et Corso El Bahri.

3.1.3 Les plages :

Elles occupent l'intégralité de la côte de la zone d'étude. Ce sont des zones sableuses formées à partir de matériaux différents de la vase, tels que des sables fins, des graviers ou des blocs. Ces sédiments atteignent les plages de trois manières :

-Par les apports terrigènes par les rivières, les oueds etc.

-Par la dérive littorale

-Par la dégradation des dunes, des microfalaises et des falaises.

Notre zone d'étude présente aussi un vaste système sablonneux de couleur dorée, qui se divise en trois secteurs différents :

-Le premier secteur : de la plage de Surcouf jusqu'à l'est de Réghaïa, avec une longueur de plage de 5 km.

-Le deuxième secteur : de Figuiet jusqu'à Boudouaou EL Bahri en passant par Boumerdès avec une longueur de plage de 15 km.

-Le troisième secteur : de la plage Zemmouri Ouest jusqu'à l'extrémité est de Cap Djinet, avec une longueur de plage de 7 km.

3.2 La géomorphologie sous-marine :

La morphologie du plateau continental est influencée par la tectonique et la structure du continent. Il représente une extension du relief terrestre sous la mer. La baie de Zemmouri est caractérisée par un plateau continental étroit, qui devient particulièrement court près des îles Sanjas, mesurant seulement 1,5 km de large. Au niveau du mont de Thénia, où l'activité tectonique est présente, le plateau se rétrécit avec une largeur maximale de 3 km. En revanche, en face de la zone est d'Isser, la largeur du plateau peut atteindre 175 km.

La morphologie du plateau continental est liée à la tectonique et à la structure continentale. C'est le prolongement du relief terrestre sous la mer. Notre baie de Zemmouri se caractérise par l'étroitesse de son plateau continental, qui devient court au droit des îles Sanjas : 1.5 km (Leclaire, 1972), il se réduit au niveau du mont de Thénia en raison de l'activité tectonique,

atteignant une largeur maximale de 3 km. Cependant, en face de la zone est d'Isser, la largeur du plateau peut atteindre jusqu'à 15 km.

La grande baie de Zemmouri présente les caractéristiques suivantes (**Guidou et Touzi, 2016**):

- Une succession des dunes sous-marines atteignant la zone de cap blanc et le rocher noir : sous l'effet de la houle, les sédiments forment de grands amas dunaires sous-marins qu'on retrouve seulement au niveau de Cap Djinet et Cap blanc.
- Un platier rocheux contournant le patrimoine de cap Matifou pour apparaître sous forme de lambeaux formant ainsi le platier de l'île Agueli et l'île Sanjas (**Figure 12**).
- Le reste du fonds est constitué de sédiments meubles avec parfois une végétation clairsemée.
- Le talus continental est intensément buriné par un réseau de canyons (vallée sous-marine de Zemmouri) qui perturbe la régularité du plateau ainsi que l'évolution du trait de côte.

Les canyons de cap blanc et de Zemmouri sont parfaitement nets, en entaillant le rebord de ce talus.

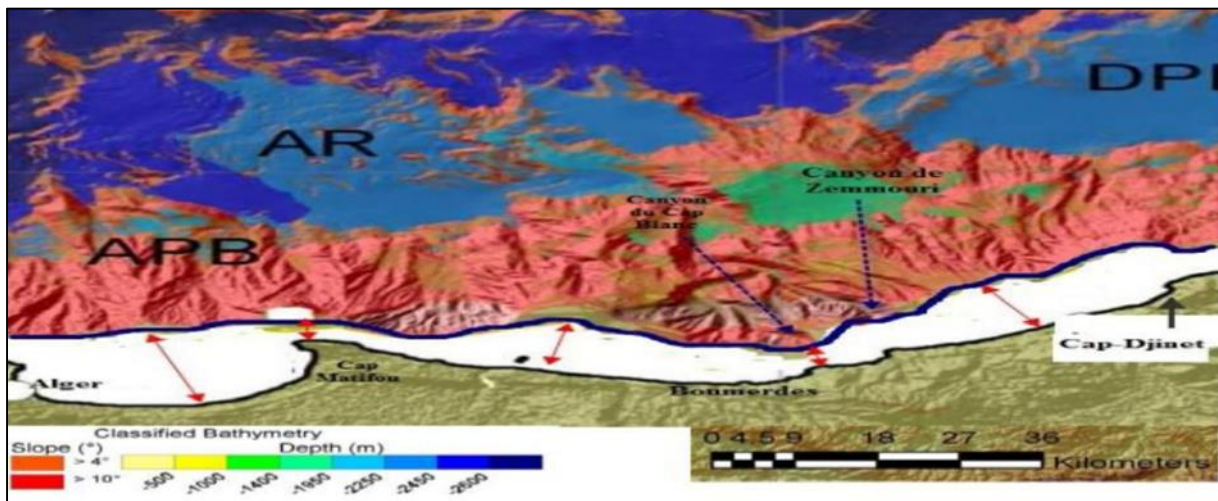


Figure 12 : La morphologie du plateau continental de la grande baie de Zemmouri (**Sallaye, 2021**).

4 Cadre climatique et hydrodynamique :

Pour mieux comprendre les processus hydro-sédimentaires le long des côtes qui sont responsables de toute transformation morfo-sédimentaire, il faut déterminer les différents paramètres climatiques tels que la température et précipitation qui sont les principales grandeurs physiques qui caractérisent un climat donné.

Le climat de la baie de Zemmouri est de type méditerranéen, caractérisé par une saison pluvieuse de huit mois et par une période sèche de quatre mois, il est affecté par le bassin méditerranéen qui caractérise par un climat humide et tempéré avec une pluviométrie comprise entre 800 et 900 ml/an et des températures qui varient entre 8°C et 38°C. La température moyenne est de 25 °C et l'humidité relative est constante et élevée durant toute l'année.

4.1 Les températures :

La température c'est parmi les facteurs les plus importants qui nous utilisent pour l'étude d'une zone côtière donnée, elle sujette à l'influence de la mer qui adoucit le climat. L'étude de la variation des températures s'est effectuée par l'analyse des moyennes mensuelles calculées à partir des enregistrements extraites d'une source des données du site des observations météorologiques www.waveclimate.com. Ces enregistrements couvrent une période de 30 ans allant du janvier 1992 jusqu'au décembre 2021. L'analyse des résultats portés sur le (Tableau 1) et (Figure 13) confirme que la zone d'étude est soumise à l'influence du climat méditerranéen avec une alternance de deux saisons :

- Une saison hivernale relativement froid qui s'étend sur une période de 6 mois de novembre à avril avec une moyenne minimale de 11,7 °C est enregistrée en février.
- Une saison estivale relativement chaude qui s'étend sur une période de 6 mois. avec une moyenne maximale de 26,2 °C est enregistrée en août.

Tableau 1 : Moyennes mensuelles des températures de la période allant de (1992 à 2021) (Source : www.waveclimate.com).

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Août	sept	Oct	Nv	Déc
Moy (°C)	11,7	11,7	14,1	16,5	19,5	23	25,6	26,2	23,7	20,6	15,7	12,7
Max (°C)	17,5	19,1	22,2	23,2	26,2	30,9	32,8	33,8	30,1	27,9	21,8	19,2
Min (°C)	13,6	12,8	16,9	19,8	21,3	24,7	28,7	29,6	25,5	22,4	18	15,4

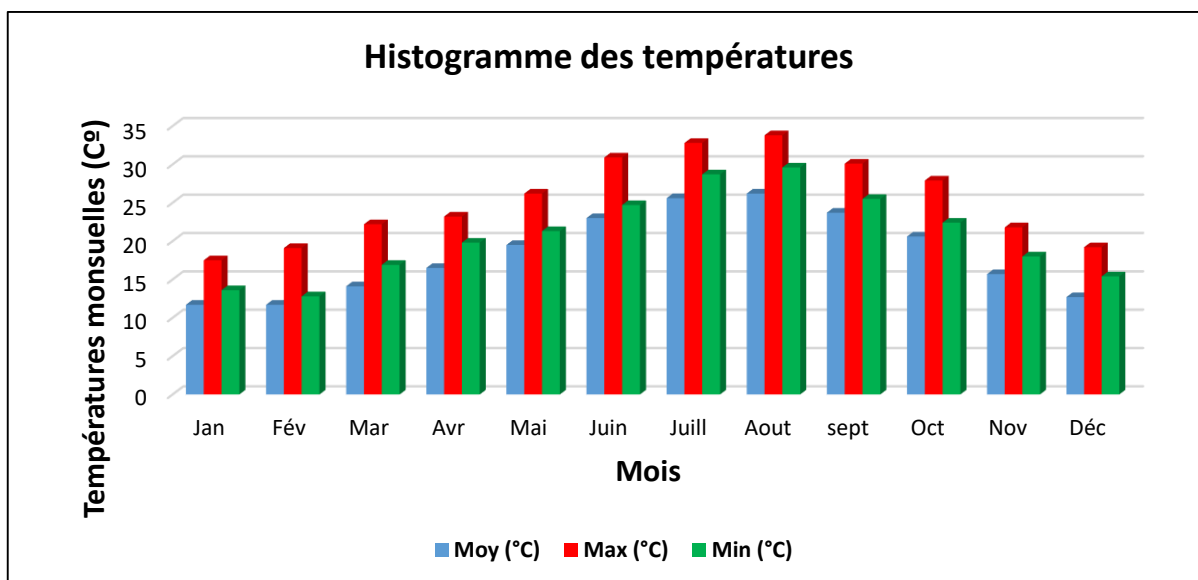


Figure 13 : Histogramme des températures (max, min et moyenne) mensuelles 1992-2021 (Source : www.waveclimate.com).

4.2 Les précipitations :

En se basant sur la même série de données, l'analyse des résultats portés sur le (Tableau 2) et (Figure 14) confirme que la zone d'étude est caractérisée par deux saisons :

- Une saison hivernale humide entre le mois de septembre et le mois de mai, avec une moyenne maximale de 138,8 mm observé au mois de novembre.
- Une saison estivale sèche entre le mois de juin et le mois d'août avec une moyenne minimale de 2,1 mm observé au mois de juillet.

Tableau 2 : Moyennes mensuelles des précipitations de la période allant de (1992 à 2021)
(Source www.waveclimate.com).

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	sept	Oct	Nov	Déc
PPT(mm)	130,2	91,2	65,7	59,4	43	13	2,1	6,2	41,6	68	138,8	136

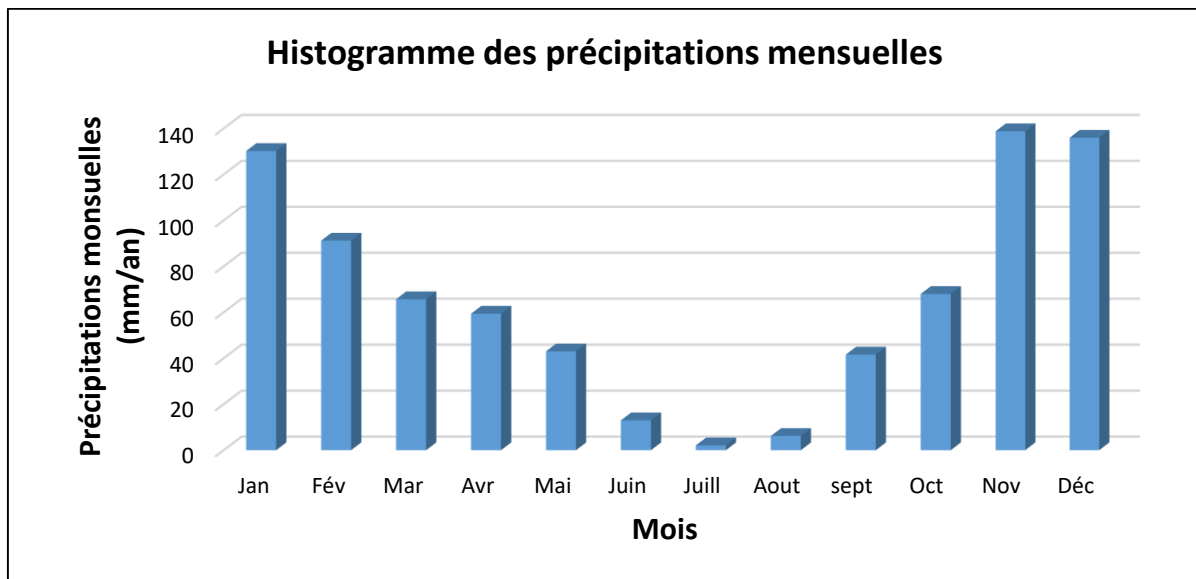


Figure 14 : Histogramme des précipitations mensuelles 1992-2021 (Source www.waveclimate.com).

L'indice de Gaussen :

Le climat est composé de la température, de la pluviosité, de la luminosité, du vent et de l'humidité relative de l'air. Cependant, les diagrammes ombrothermiques et les climatogrammes sont construits à partir de la température et des précipitations.

Pour le but de suivre et comparer mois par mois le rapport entre les précipitations et la température on a établi le diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN afin de déterminer les saisons humides et sèches dans notre zone d'étude (Figure 15), il considère un mois comme étant sec si la quantité moyenne de précipitations mensuelles est égale ou inférieure à deux fois la température moyenne mensuelle, exprimé par l'inégalité " $P \leq 2T$ ". D'après l'analyse du diagramme, il est possible de conclure que notre zone d'étude présente un climat de type méditerranéen. Ce climat se caractérise par deux périodes distinctes : une période sèche qui s'étend de mai à septembre, avec un minimum de précipitations en juillet, et

une période humide qui se situe entre octobre et avril, où les précipitations atteignent leur maximum en novembre. En ce qui concerne les températures, on observe une augmentation à partir du mois de mai (19,5°C), progressivement jusqu'à atteindre son maximum en août (26,2°C). Les températures commencent ensuite à diminuer en septembre (23,7°C) pour atteindre leur minimum en février (11,7°C), qui est le mois le plus froid.

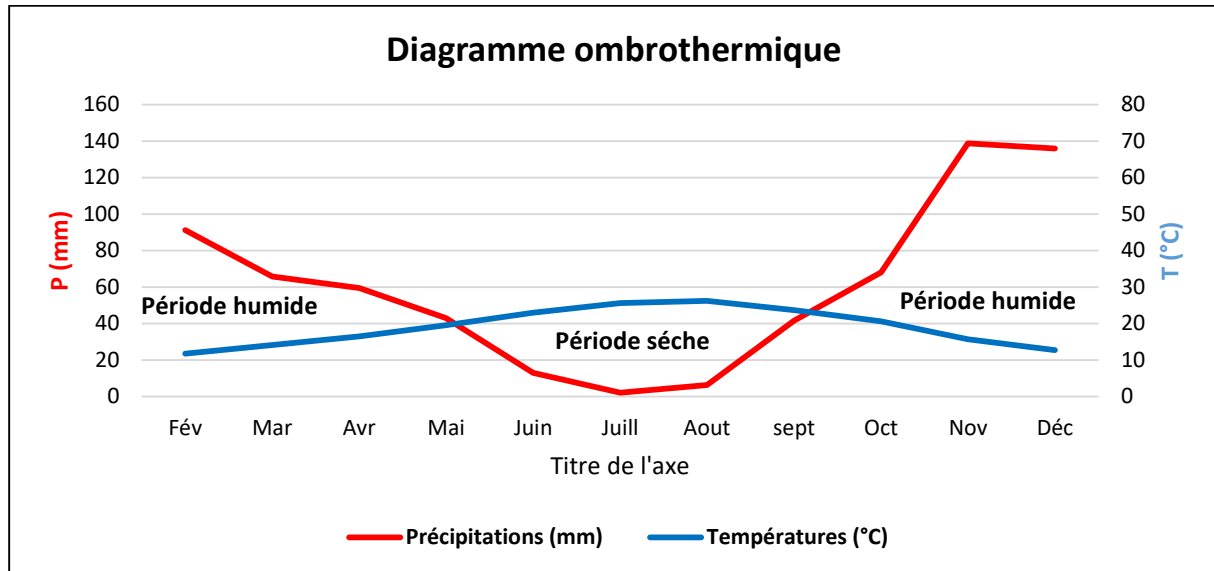


Figure 15 : Diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN appliqué au site d'étude, de la période (janvier 1992 au Décembre 2021).

4.3 Les Vents :

Le vent c'est un paramètre qui joue un rôle très important dans le déplacement de surface des eaux marines et l'évolution de la géomorphologie des côtes, en intervenant sur le transfert sédimentaire. En effet, il est le générateur des agitations marines (houles au large et des courants superficiels), leur impact augmente en même temps que leur vitesse.

Il intervenant dans l'évolution, la mobilité et la reconstitution des dunes et même dans la dégradation des falaises.

Tableau 3 : Distribution des fréquences d'apparitions annuelles et saisonnières des vents au large durant la période (1992-2021).

Mois Direction	Annuel	Hiver	Printemps	Été	Automne
E	10,48	5,15	9,79	17,03	9,83
ENE	12,37	5,40	12,21	21,66	10,07
ESE	5,95	3,75	5,91	8,09	6,01
N	2,76	2,58	2,89	2,97	2,59
NE	7,43	3,65	7,37	11,75	6,86
NNE	3,43	2,76	3,64	4,20	3,09
NNW	2,74	2,86	2,76	2,88	2,47
NW	3,93	4,29	4,19	3,55	3,71
S	4,92	7,45	4,09	2,20	6,02
SE	4,24	3,67	4,40	4,25	4,65
SSE	3,98	4,85	3,80	2,60	4,67
SSW	4,70	6,88	4,30	2,31	5,38
SW	7,23	10,34	7,37	3,50	7,78
W	9,42	13,63	9,65	4,54	9,95
WNW	5,76	6,91	6,44	4,34	5,35
WSW	10,66	15,84	11,19	4,11	11,59

L'analyse du régime des vents au large dans la baie de Zemmouri est effectuée à partir d'une source des données du site des observations météorologiques www.waveclimate.com, au point d'extraction situé au large selon les coordonnées géographiques : 37°N et 3,5°E. Cette dernière résume les statistiques de vents au large sur une période de 30 ans entre 1992-2021 au large de la baie de Zemmouri.

L'analyse statistique des données des vents au large nous a permis de tracer les roses des vents trimestrielles et annuelles (**Figure 16**). Et de déterminer la fréquence d'apparition du vent par direction ; annuelles et saisonnières (**Tableau 3**).

Il ya une forte similitude entre la saison printanière et automnale

- une prédominance des vents de secteur compris entre Ouest à Sud-Ouest et Est à Nord-Est avec une fréquence d'apparition d'environ de 56.08 % des vents prévenantes de ces directions pour la période printanier et de 57.58 % pour la période automnale.

Les vents de secteur compris entre Ouest à Sud-Ouest ont des vitesses de 14.1 à 17.2 m/s qui montre une définition marine "grand frais" selon l'échelle de beaufort et de 7.9 à 11 m/s pour la direction Est à Nord-Est qui montre une définition marine "bonne brise" selon la même échelle.

Il ya une dissemblance entre la saison estivale et la saison hivernale

- Période estivale : nous constatons que les directions de vent les plus dominantes sur notre site d'étude proviennent d'Est et Nord-Est et surtout la direction Est-Nord-Est avec une fréquence d'apparition d'environ de 50.44% des vents prévenantes de ces directions.

Le vent des directions Est et Nord-Est ont des vitesses de 7.9 à 11 m/s qui montre une définition marine "bonne brise" selon l'échelle de beaufort et de 11 à 14.1 m/s pour la direction Est-Nord-Est qui montre une définition marine " Vent frais" selon la même échelle.

- Période hivernale : nous constatons que les directions de vent les plus dominantes sur notre site d'étude proviennent d'Ouest et Sud-Ouest et surtout la direction Ouest-Sud-Ouest avec une fréquence d'apparition d'environ de 39.81% des vents prévenantes de ces directions.

Le vent de la direction Ouest et Ouest-Sud-Ouest ont des vitesses de 14.1 à 17.2 m/s qui montre une définition marine "grand frais" selon l'échelle de beaufort et de 11 à 14.1 m/s pour la direction Est-Nord-Est qui montre une définition marine " Vent frais" selon la même échelle.

- Période annuelle : une prédominance des vents de secteur compris entre Ouest à Sud-Ouest et Est à Nord-Est avec une fréquence d'apparition d'environ de 57.76 % de l'ensemble des vents soufflants au large de la baie de Zemmouri.

Les vents de secteur compris entre Ouest à Sud-Ouest ont des vitesses de 14.1 à 17.2 m/s qui montre une définition marine "grand frais" selon l'échelle de beaufort et de 7.9 à 11 m/s pour la direction Est à Nord-Est qui montre une définition marine "bonne brise" selon la même échelle.

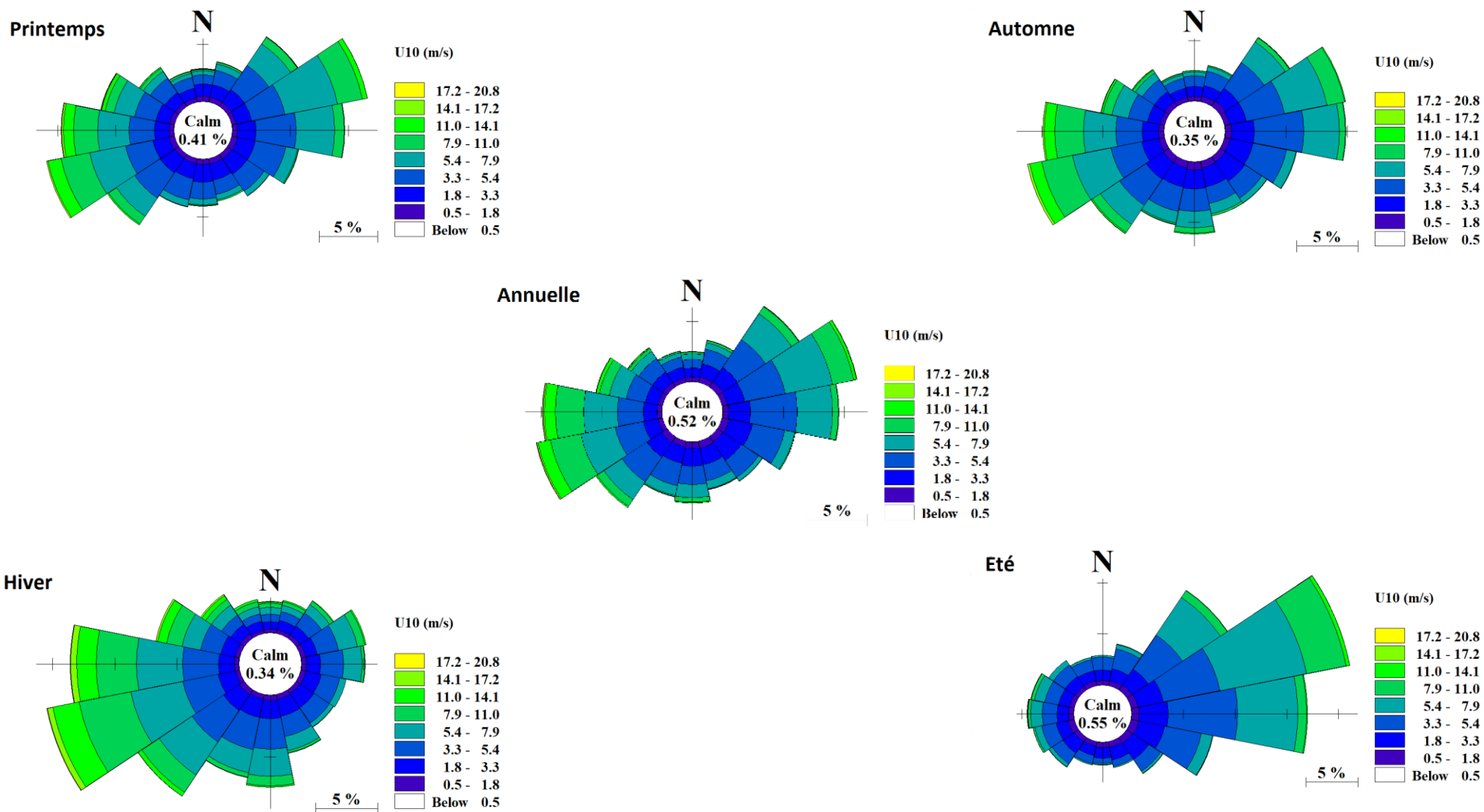


Figure 16 : Roses annuelles et saisonnières des vents au large de la baie de Zemmouri entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com).

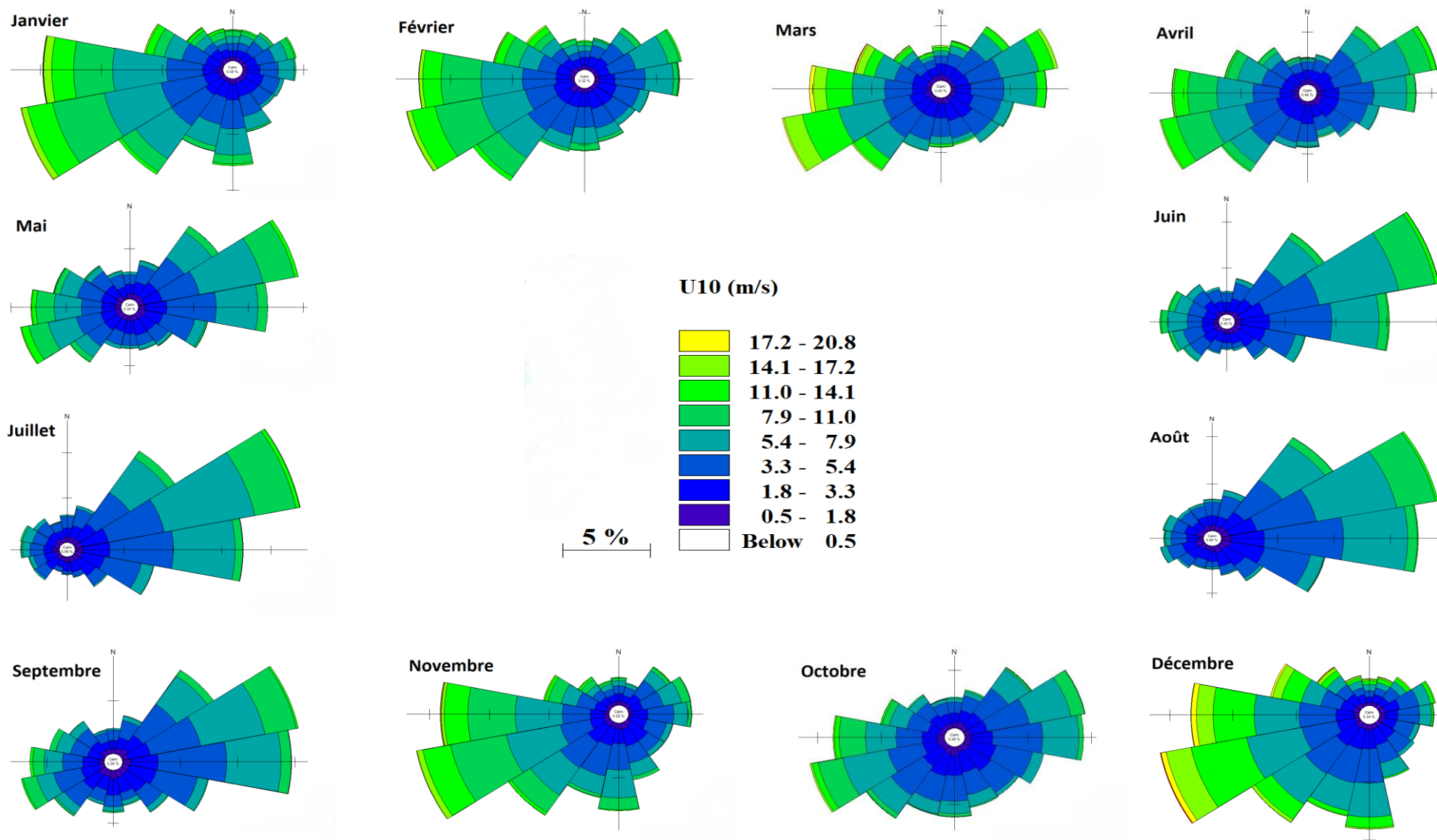


Figure 17 : Roses mensuelles des vents au large de la baie de Zemmouri entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com).

4.4 Les houles :

La surface de la mer présente généralement une suite indéfinie d'ondulations parallèles presque identiques qui se propagent de façon sensiblement uniforme vers le rivage. On appelle houle cet ensemble d'ondulations ou de vagues. (Bonnefille, 1994)

Les frottements du vent à la surface de l'eau génèrent des ondulations caractérisées par leur amplitude, périodicité et longueur d'onde. Ces caractéristiques dépendent de la durée pendant laquelle la surface est soumise à ce forçage, de l'intensité du vent, et de la distance sur laquelle il souffle (également appelée "fetch"). (Petitjean, 2016)

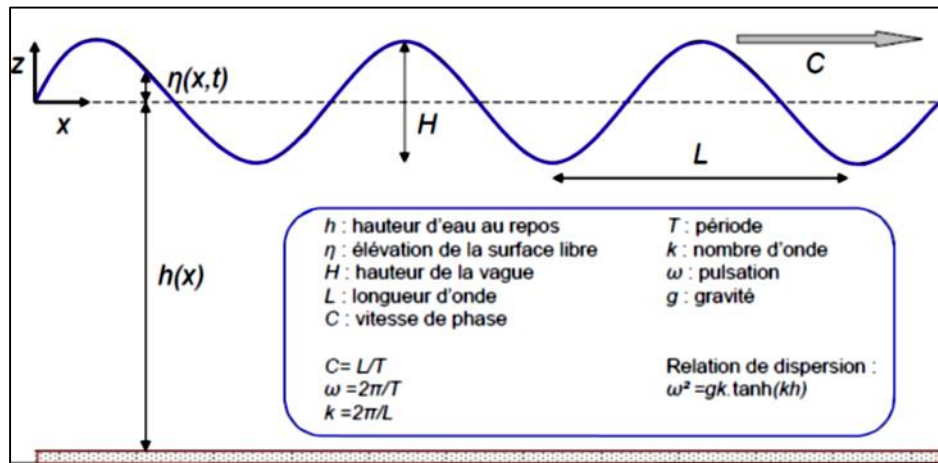


Figure 18 : Grandeurs caractéristiques des vagues (Grasso, 2009).

4.4.1 Hauteur significative :

Sur l'ensemble de cette période de 30 ans, la hauteur significative de la houle (H_s) varie entre 0.03 m et 6.98 m avec une moyenne de 1.17 m.

A partir de la (Figure 19), on distingue que les houles au large de la baie de zemmouri sont dans leurs ensemble inférieur à 4 m, avec quelques épisodes extrêmes dépassant les 6 m.

Aussi, le traitement de ces données nous a permis de définir quelques hauteurs marquantes de la houle représenté dans le (Tableau 4).

Tableau 4 : Hauteur de houle marquante.

Hauteur de houle marquante	Valeur (m)
H_m (hauteur moyenne)	1,17
H_s (moyenne du 1/3 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	2,01
$H_{10\%}$ (moyenne du 1/10 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	2,88
$H_{2\%}$ (moyenne du 2% des valeurs supérieures de l'enregistrement)	3,94
H_{max} (valeur maximale de l'enregistrement)	6,98

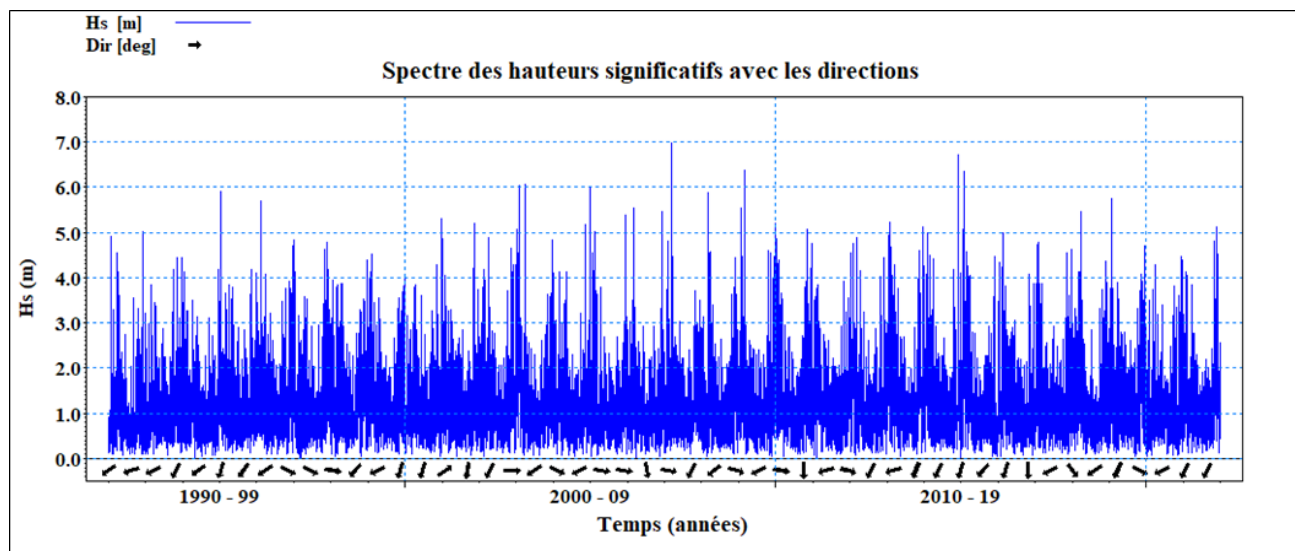


Figure 19 : Représentation du spectre des hauteurs de houle enregistrées avec les directions.

4.4.2 La période pic :

Les périodes enregistrées sont dans une gamme assez large allant de 2.86 à 14.84 s, les périodes sont globalement entre 4s et 10s (la plus grande densité dans la **(Figure 20)**).

Aussi, le traitement de ces données nous a permis de définir quelques périodes marquantes de la houle représentée dans le **(Tableau 5)**.

Tableau 5 : Période de houle marquante.

Période de houle marquante	Valeur (s)
Tm (période moyenne)	6,74
Ts (moyenne du 1/3 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	8,80
T10% (moyenne du 1/10 des valeurs supérieures de l'enregistrement)	10,36
THmax (période correspondant la hauteur maximale de l'enregistrement)	9,48
Tmax (valeur maximale de l'enregistrement)	14,84

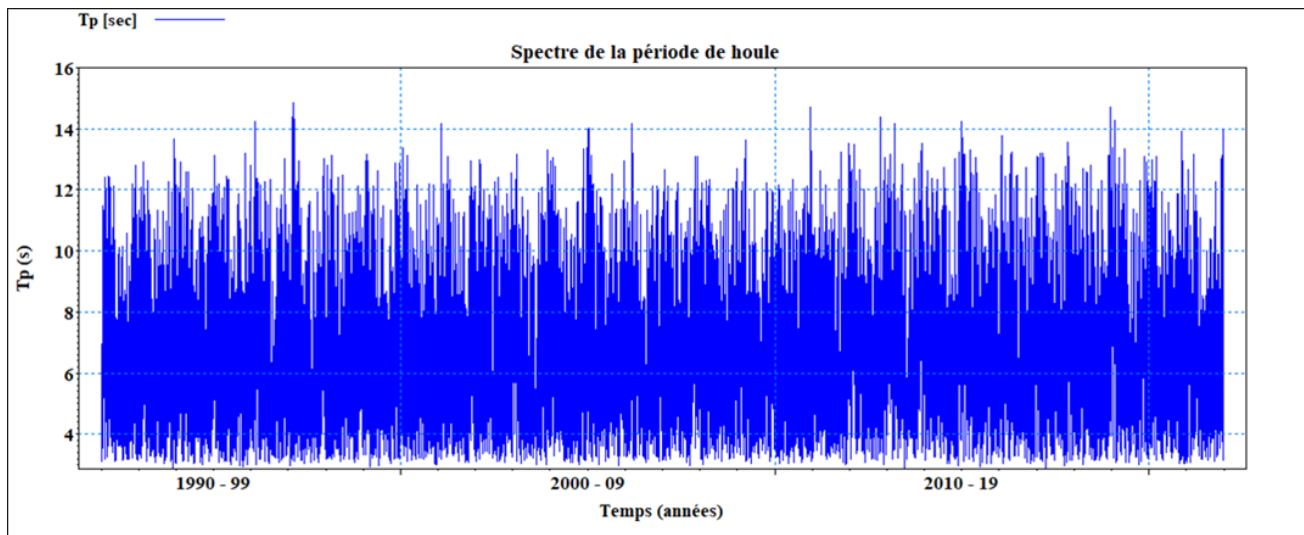


Figure 20 : Représentation du spectre des périodes de houle enregistrées.

4.4.3 Vitesse du vent :

Sur l'ensemble de cette période de 30 ans, la vitesse du vent varie entre 0 m/s et 22.5 m/s avec une moyenne de 5.01 m/s.

A partir de la (**Figure 21**), on distingue que les vitesses du vent dans la baie de zemmouri sont dans leurs ensemble inférieur à 15 m/s, avec quelques épisodes extrêmes dépassant les 20 m/s.

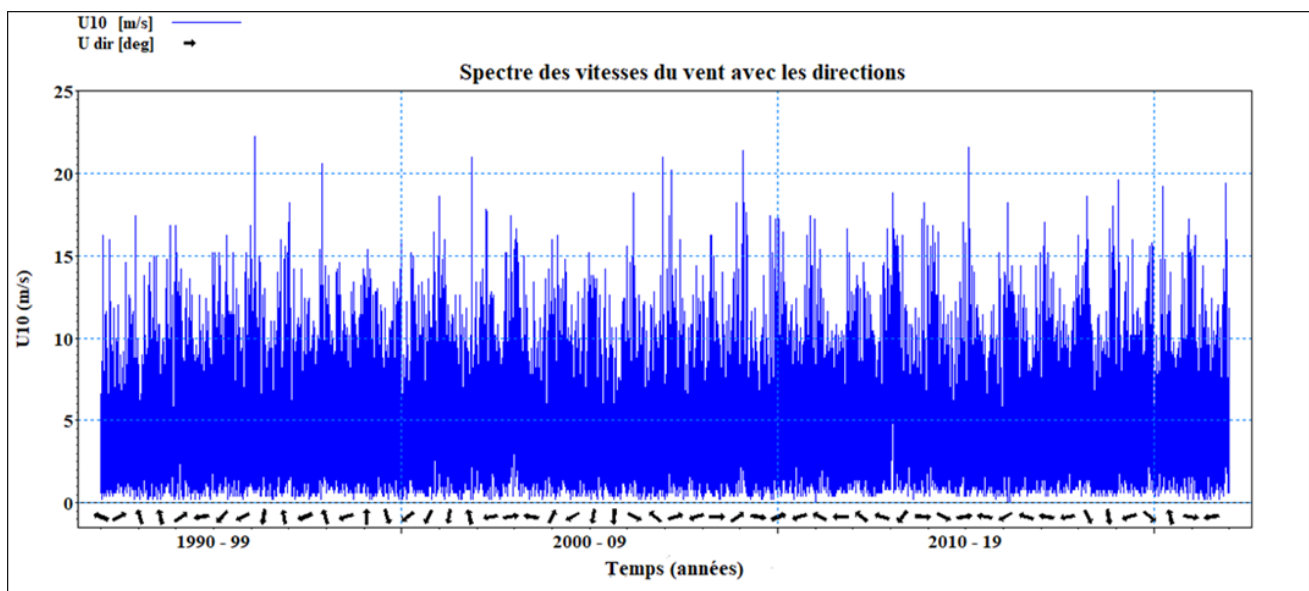


Figure 21 : Représentation du spectre des vitesses du vent enregistrées avec les directions.

Une étude sur le climat de houle dans le même point d'extraction : 37°N et 3,5°E a été faite sur la période 1992-2021 avec des données issues du site des observations météorologiques www.waveclimate.com.

L'analyse statistique des données des houles au large nous a permis de tracer les roses des houles trimestrielles et annuelles (**Figure 22**). Et de déterminer la fréquence d'apparition de la houle par direction à deux échelles ; annuelles et saisonnières (**Tableau 6**).

Tableau 6 : Distribution des fréquences d'apparitions annuelles et saisonnières des houles au large durant la période (1992-2021).

Mois Direction	Annuel	Hiver	Printemps	Été	Automne
E	0,53	0,60	0,62	0,30	0,61
ENE	14,73	5,97	14,23	26,93	11,57
ESE	0,25	0,26	0,29	0,09	0,37
N	8,30	12,45	8,73	3,96	8,13
NE	19,28	9,67	19,24	30,12	17,89
NNE	18,09	19,86	16,88	15,66	20,02
NNW	4,29	6,17	4,57	2,33	4,12
NW	4,65	6,40	4,54	2,90	4,77
S	0,73	1,46	0,27	0,07	1,14
SE	0,32	0,49	0,21	0,09	0,49
SSE	0,46	0,77	0,26	0,07	0,75
SSW	0,55	1,24	0,15	0,07	0,74
SW	0,42	0,95	0,17	0,06	0,49
W	15,84	19,05	17,97	9,94	16,47
WNW	10,96	13,41	11,39	7,26	11,84
WSW	0,63	1,26	0,48	0,15	0,62

Les directions les plus dominantes sont :

- Période estivale : c'est la direction Nord-Est qui domine avec une fréquence d'apparition de 30.12% avec une hauteur significative de 1.25 à 2.50 m qui montre un état de la mer " agitée " selon l'échelle de douglas.
- Période hivernale : elle est également caractérisée par la dominance des secteurs Nord-Nord-Est et Ouest par les fréquences d'apparitions respectivement de 19.86% et 19.05% avec une hauteur significative de 4 à 6 m qui montre un état de la mer " très forte " selon l'échelle de douglas.
- Période printanier : les directions Nord-Nord-Est, Nord-Est et Ouest qui sont plus dominantes avec les fréquences d'apparition respectivement 16.88%, 19.24% et 17.97%

avec une hauteur significative de 2.5 à 4 m qui montre un état de la mer "forte" selon l'échelle de douglas.

- période automnale : cette période est caractérisée par la dominance des secteurs Nord-Nord-Est, Nord-Est et Ouest avec les fréquences d'apparition respectives de 20.02%, 17.89% et 16.47% avec une hauteur significative de 1.25 à 2.50 m qui montre un état de la mer "agitée" pour NNE et NE et de 2.5 à 4 m pour Ouest qui montre un état de la mer "forte" selon l'échelle de douglas.
- Période annuelle : les houles qui proviennent des secteurs Nord-Nord-Est, Nord-Est et Ouest et possèdent annuellement dans la baie de zemmouri des fréquences d'apparition respectives de 18.09%, 19.28% et 15.84% avec une hauteur significative de 2.5 à 4 m qui montre un état de la mer "forte" selon l'échelle de douglas.

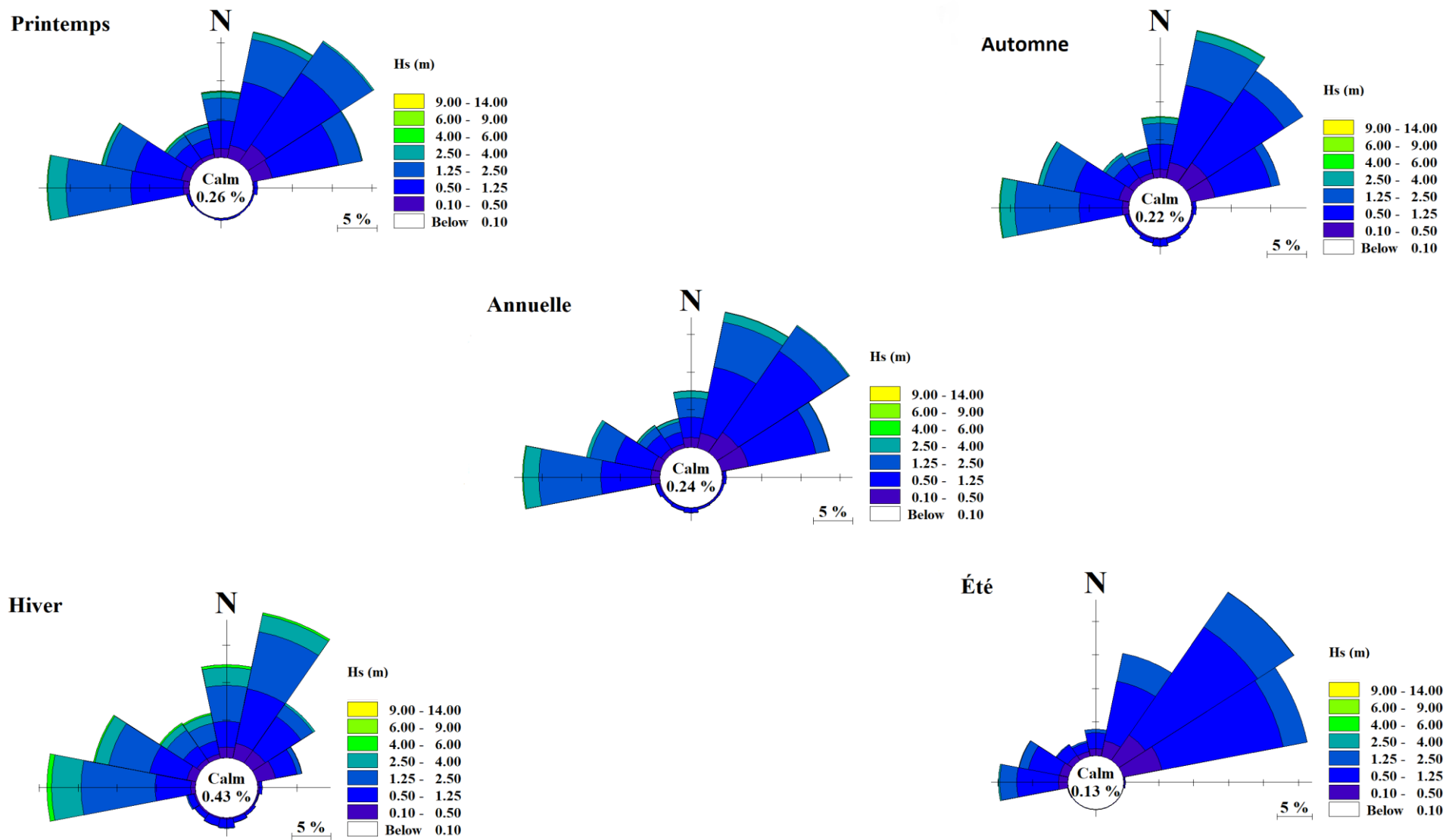


Figure 22: Roses trimestrielles et annuelles des houles au large de la zone d'étude entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com).

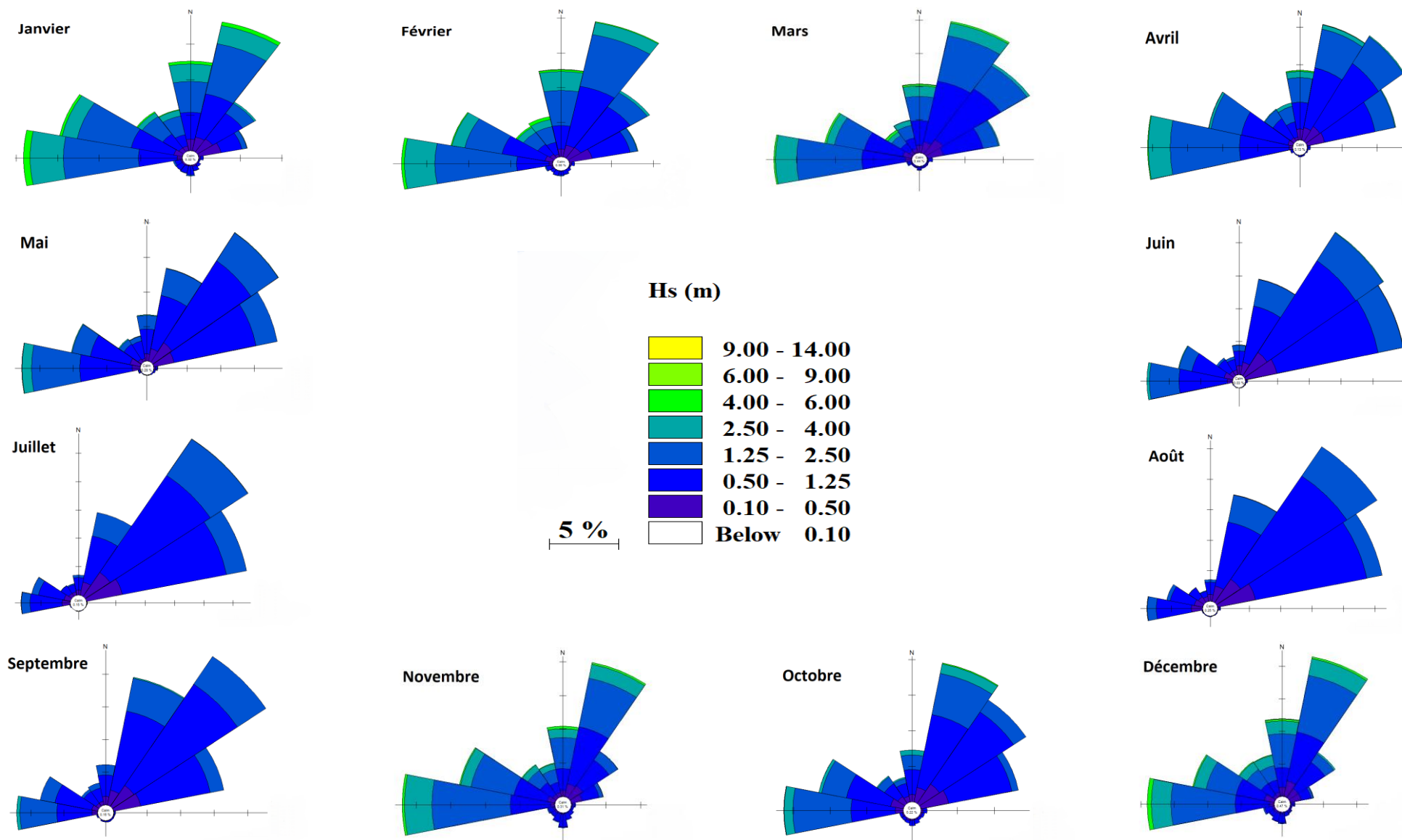


Figure 23 : Roses mensuelles des houles au large de la zone d'étude entre 1992 et 2021. (Source www.waveclimate.com).

4.5 Les courants :

Les courants marins sont des mouvements apériodiques dans lesquels la masse d'eau est animée de mouvements de translation. Ces mouvements peuvent déplacer les particules liquides sur de très grandes distances. Les courants sont caractérisés par leur vitesse, leur direction, leur débit (**Diouf, 1993**).

Les courants marins à proximité d'une côte contrôlent le transport de sédiment et son évolution. or leur estimation par des instruments sur site est difficile et coûteuse (**Larnier et al., 2013**), ils sont à l'origine de l'état dynamique sédimentaire (érosion, transport et accumulation) Par ailleurs, il existe en effet différents types de courants, en fonction de leur source de génération (**Otmani, 2020**) :

4.5.1 Les courants liés aux vents :

Les courants, les houles et les vents évoluent de manière cohérente, ce qui influence la dispersion et la remise en suspension des sédiments transportés.

4.5.2 Les courants liés à la marée :

Les oscillations du niveau des mers et des océans qu'entraîne la marée s'accompagne de mouvements horizontaux de masses d'eau appelés courants de marée. Les courants induits par la marée sont fondamentaux. L'originalité de ces courants qui affectent l'ensemble de la masse d'eau (avec malgré tout une lente décroissance des vitesses vers le fond) réside, d'une part, dans leur puissance (atteignant parfois 12 nœuds, et ayant par conséquent une forte influence sur le relief sous-marin) et, d'autre part, dans leur réversibilité (**Aoudj et Bouaziz, 2014**).

4.5.3 Les courants liés à la houle :

Les courants dus à la houle sont les seuls responsables de la répartition des sédiments infralittoraux, contrairement aux courants généraux et aux courants de marée. Ces courants sont principalement générés par une houle oblique et on peut également mentionner deux types de courants liés à la houle :

4.5.3.1 Les courants de dérive littorale :

On définit le courant de dérive littorale comme étant la résultante au rivage de tous les mouvements d'eau dirigés vers la terre, et qui n'abordent pas la côte en incidence normale; ils sont d'autant plus importants que l'angle d'incidence est plus grand, ils assurent donc le transport latéral et la dispersion des sables et des graviers de la frange littorale (**Djenadi et Douibi, 1993**).

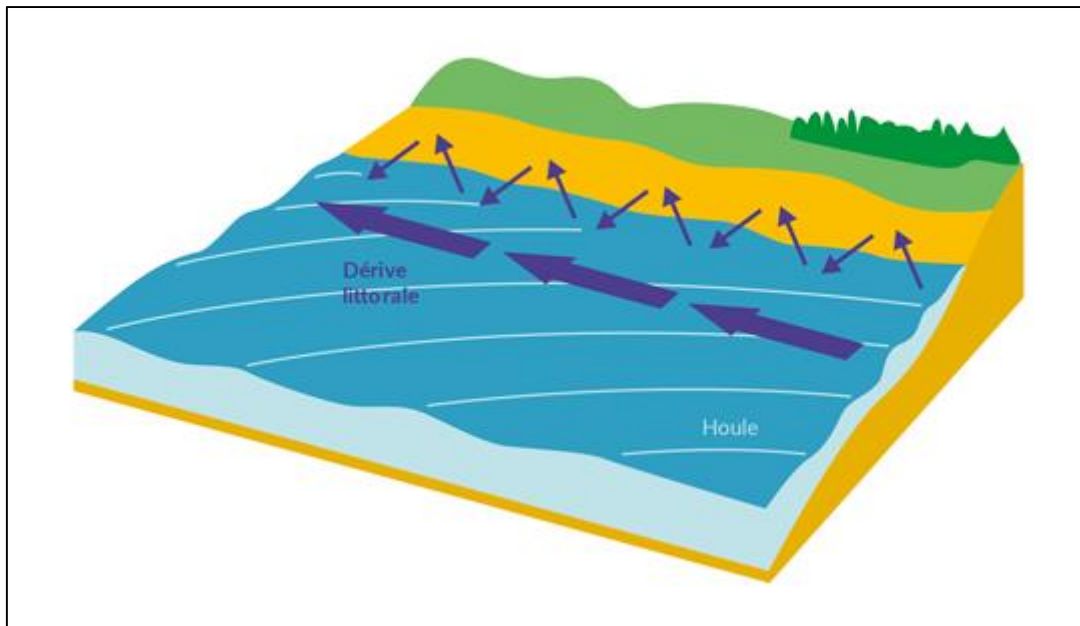


Figure 24 : profil d'un courant de dérive littorale (<https://bretagne-environnement.fr/littoral-breton-perpetuel-mouvement-article>).

4.5.3.2 Les courants de retour :

Il correspond à une zone de flot, de retour à partir du lieu de déferlement de la houle contre la ligne de rivage. Son effet est remarquable surtout par gros temps généralement en hiver (Djenadi et Douibi, 1993).

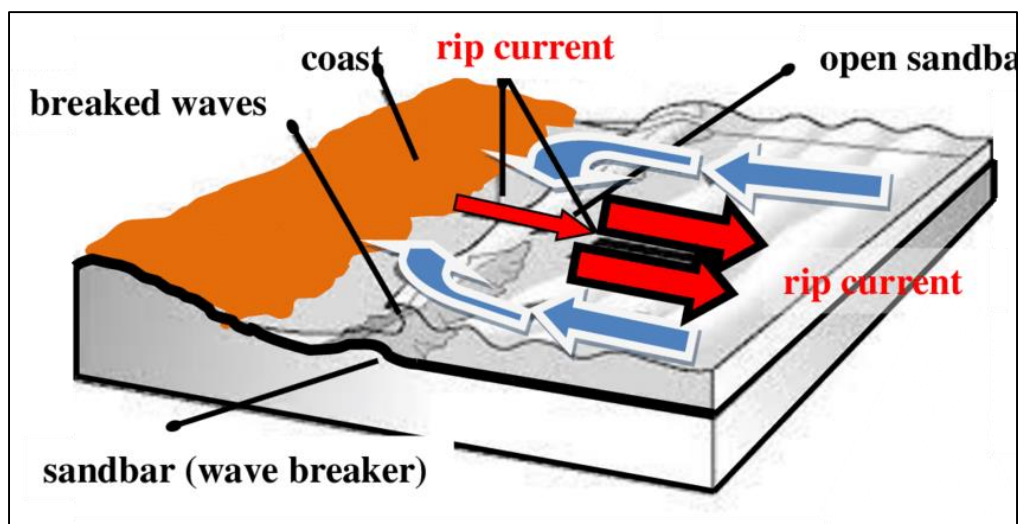


Figure 25 : profil d'un courant de retour (Barlas et Beji, 2017).

4.6 Les marées :

On appelle marée le mouvement périodique qui affecte le niveau général des mers et des océans (Bonnefille, 1994). Les côtes algériennes ce sont des côtes micro-tidales car les marées ont une amplitude relativement faible. On trouve deux types de marées : la marée barométrique, causée par les conditions climatiques telles que les vents et la pression

atmosphérique et la marée astronomique, quant à elle, est due à l'influence des astres tels que la lune et le soleil.

5 Cadre hydrologique :

5.1 Le réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique est essentiel pour l'érosion et le transport des sédiments vers la mer, les cours d'eau jouent un rôle important en apportant des sédiments qui contribuent à l'évolution morpho-dynamique des plages et à leur alimentation en sédiments.

La baie de Zemmouri se distingue par la présence de plusieurs cours d'eau, qui recueillent les eaux des zones environnantes et se jettent directement dans la mer. Parmi ces cours d'eau figurent Ammara, Isser, Merdja, Sef-saf, Boumerdes, Tatareg, Corso, Boudouaou et Réghaia (Figure 26).

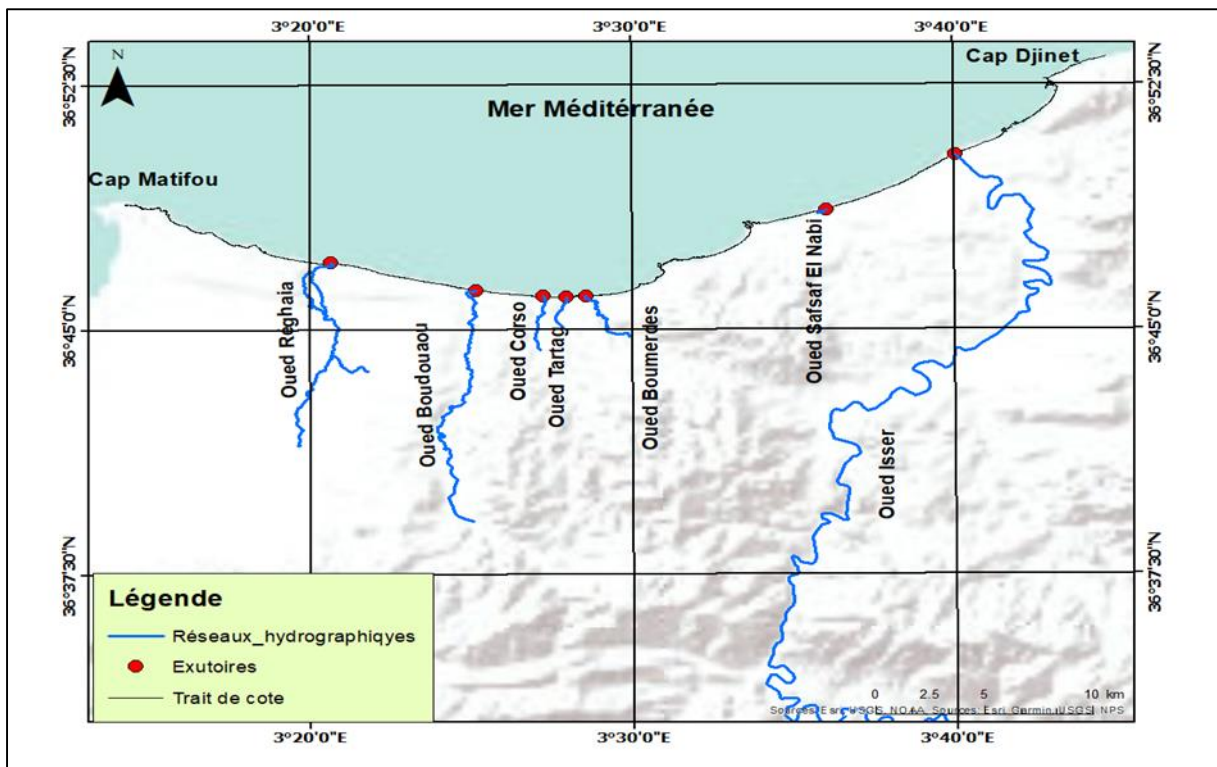


Figure 26 : Carte des réseaux hydrographiques dans la grande baie de Zemmouri (Sallaye, 2021).

➤ Oued Boudouaou :

Le bassin-versant de l'Oued Boudouaou couvre une superficie de 137,5 km² et s'étend du Sud vers le Nord sous forme d'impluvium encaissé, son périmètre est de 63 km (Faouci, 2012), avec une longueur de 22 km et un volume annuel moyen de 0.21 Mm³, le relief accentué de ce bassin est limité, à l'Ouest, par la Mitidja et à l'Est par le bassinversant de l'Oued Isser (Bourouba, 1997).

➤ **Oued Isser :**

C'est le principal vecteur du littoral est algérois, son bassin versant est situé au sud-est à 100 km d'Alger avec une superficie de 4149 km², il présente une forme allongée sur l'axe sud-ouest (Ain Boucif/Beni Slimane) à nord-est vers la mer méditerranée, il prend sa source de la montagne de djebel Serane de Barouaghia (1327 m) et collecte les eaux des oueds (Hammam, Yaggour, Zeroua, Mellah Est et Ouest, Bouhamoude et oued djemaa), il est du type montagneux avec une altitude moyenne de 750 m (**Deffaf et al., 2020**), Il est classé parmi les oueds importants d'Algérie car il a un grand régime Hydro-sédimentaire temporaire de l'ordre de 4.96 mm³/ans et un taux d'abrasion de 1200 m³/ km², la moyenne interannuelle des précipitations est de 511 mm.

➤ **Oued Corso :**

Longeant la vallée de Corso, dont il a pris le nom, l'oued prend naissance de Djebel Bouzegza au prolongement ouest de la dorsale Kabyle et puise son eau du sous bassin versant de Cap-Matifou, dont la superficie est de 92,75 km² (**Rachid, 2017**), son volume moyen annuel est estimé à 0.11 Mm³/ans.

➤ **Oued Réghaia :**

L'oued Réghaia parcourt la partie orientale de la plaine de la Mitidja, il traverse la ride sahélienne au nord, au contact de laquelle s'est formé le marais de Réghaia pour se heurter en aval à un cordon dunaire qui modifie son trajet vers l'est pour enfin se jeter à la mer. Son bassin versant occupe une superficie de 86 km. L'oued principal a une longueur de 20km (**Megdoud, 2012**), son volume moyen annuel est estimé à 0.02 Mm³/ans.

➤ **Oued Boumerdès :**

C'est l'oued qui traverse la plage du rocher noir, il semble plus important des courants qui drainent cette plage, il reçoit un grand nombre d'affluents provenant de bassin versant(**Megdoud, 2012**), son volume moyen annuel est estimé à 0.02 Mm³/ans.

Tableau 7 : Estimation des apports solides des Oueds (**ANRH, 2004**).

Les Oueds	Taux d'abrasion moy (m ³ / km ²)	Volume du transport solide (Mm ³ /ans)
Oued Réghaia	210	0.02
Oued Boudouaou	1380	0.21
Oued Corso	1150	0.11
Oued Boumerdes	550	0.02
Oued Isser	1200	4.96

Selon le **Tableau 7**, le réseau hydrographique de notre zone d'étude comporte deux oueds principaux : Oued Isser et Boudouaou, les barrages construits en amont (barrage de Keddara et barrage Beni Amrane) ont entraîné la fermeture actuelle de ces derniers. Cela a considérablement réduit les apports de sédiments vers le milieu marin, ce qui explique le déficit sédimentaire observé sur le rivage de la zone d'étude.

5.2 Les barrages :

Les barrages sont par définition des ouvrages hydraulique construits en travers d'un cours d'eau pour créer une retenue ou exhausser le niveau en amont, ces types d'ouvrages barrent sur toute la largeur une section d'une vallée et créés ainsi une cuvette artificielle géologiquement étanche (Aziez *et al.*, 2021).

Dans notre zone d'étude en trouve les barrages suivants :

➤ Barrage de Keddara :

Le barrage de Keddara est situé dans la Wilaya de Boumerdes, à 8 kms au sud de Boudouaou et à 35 kms à l'est d'Alger. Il fait partie de l'aménagement Isser-Keddara. Sa retenue est alimentée par les apports des oueds Keddara, El Haad et par la galerie de transfert provenant du barrage Hamiz. il est destiné à satisfaire les besoins en eau potable des agglomérations algéroises et d'une grande partie de la ville de Boumerdes. Le barrage dispose d'une capacité de 142.39 millions de m³ (ANBT, 2023).

➤ Barrage de Hamiz :

Le barrage de Hamiz est situé dans la commune de l'Arbatache, Khmis El Khechna, Wilaya de Boumerdes à 6 kms de Fondouk, 25 kms de la mer et 35 kms de la ville d'Alger. Il se situe dans le bassin versant de l'Oued Lekhal dans la vallée de l'oued Reghaia et couvert une superficie de 220km² environ de terre riche et fertile. Sa capacité est de 15,53 millions de m³ à la cote de la retenue normale. Il est destiné pour créer un réservoir permettant la régularisation des crues du Hamiz et l'irrigation de la Mitidja orientale (ANBT, 2023).

➤ Barrage de Beni Amrane :

Le barrage de Béni Amrane est situé sur l'oued Isser. Le bassin versant a une superficie de 3710 km² pour un apport moyen annuel de l'ordre de 400 hm³. L'aménagement fait partie de l'Isser-Keddara-Boudouaou-Alger. Il est destiné à satisfaire les besoins en eau potable du grand Alger ainsi que des villes se trouvant dans la zone de la Mitidja entre Alger et l'oued Boudouaou. Le barrage a une capacité de de 11,85 millions de m³ à sa cote de retenue normale (ANBT, 2023).

6 Les prélèvements de sable sur la côte de Zemmouri :

Les prélèvements de sable effectués directement sur les plages et les cordons dunaires ont eu sans aucun doute des impacts négatifs qui ont lourdement affecté l'environnement côtier des plages de la côte. Il faut noter également la réduction des débits solides des Oueds (Corso, Isser, Boumerdes,...) durant les dernières décennies vu l'extraction excessive des sables sur les lits de ces oueds (Aoudj *et al.*, 2020b).

7 Les ouvrages portuaires :

L'implantation d'un port sur le littoral crée un barrage pour le transit sédimentaire résultant de la dérive littoral. En conséquence, le trait de côte prograde et l'avant-côte est en accrétion en amont transit alors que l'aval est globalement en érosion (Nicolas *et al.*, 2017).

Notre zone d'étude comprend plusieurs ports, notamment Zemmouri et Cap Djinet.

➤ Le port de Zemmouri :

Il se trouve à une distance de 48 km à l'est d'Alger et à 12 km à l'est du chef-lieu de la wilaya. Il s'agit d'un port capable d'accueillir 183 bateaux de pêche.

➤ Le port de Djinet :

Il se trouve à une distance de 35 km à l'est de la capitale de la wilaya. Il a été construit en 2009, avec une capacité prévue de 115 bateaux de pêche.

8 Les ouvrages de protection :

Le littoral s'est ainsi fortement artificialisé au rythme de la mise en place de structures de protection pour lutter contre l'érosion (**Aoudj et al., 2020b**), deux types d'ouvrages de protection ont été mis en place le long de la côte de Zemmouri. Le premier, construit par SOGREAHA dans les années 1980, est un mur de soutènement en enrochements naturels résistants aux houles, visant à protéger la falaise de Boudouaou El Bahri. Le deuxième type d'ouvrages, réalisé entre 2003 et 2005 par le LEM, comprend une série de brise-lames installés sur la plage de Boumerdès entre mars 2002 et mai 2005. Ces brise-lames ont pour objectif de limiter la dissipation de l'énergie des vagues.

9 La fréquentation touristique :

En Algérie, environ les deux tiers de la population sont concentrées sur le littoral qui ne représente que 4% du territoire. La bande côtière séduit d'emblée par la beauté de ses sites et recèle des atouts indéniables favorables à l'activité touristique. Depuis l'indépendance et contrairement aux autres pays du pourtour méditerranéen, l'Algérie n'a pas accordé au secteur du tourisme un rôle conséquent dans ses différents politiques de développement (**Bouroumi, 2010**).

L'industrie du tourisme est une activité économique à une importance vitale, pour des nombreuses zones côtières. Il engendre, un effet majeur dans la dégradation de l'environnement marin et côtier (**Boutarcha, 2022**).

Les plages de la baie de Zemmouri sont très prisées pendant l'été, attirant les gens qui cherchent à se détendre ou s'amuser. Cependant, cette fréquentation entraîne des perturbations pour les dunes, principalement dues au piétinement et à la circulation des véhicules.

10 Artificialisation et l'urbanisation anarchique près de cote :

Au cours des dernières années, les zones côtières du bassin méditerranéen connaissent un phénomène d'artificialisation intensive. La baie de Zemmouri est exposée à de fortes pressions anthropiques en raison de l'attractivité socio-économique de la capitale algérienne. Ce qui donne lieu à une urbanisation incontrôlée. L'artificialisation dans la zone côtière de Zemmouri a engendré des dysfonctionnements urbains, une dégradation des zones naturelles et une perte des terres agricoles (**Sallaye, 2021**).

L'urbanisation anarchique près de la côte provoque une dégradation du littoral en surexploitant les ressources côtières (sable, eau, etc.), en réduisant la végétation et en dégradant les dunes. De plus, l'écosystème côtier est déséquilibré en raison du surpeuplement de la zone et de l'installation d'usines qui déversent des déchets liquides et solides en mer. L'effet de l'action combinée de l'urbanisation anarchique et de l'érosion de la côte se ressent à travers la perturbation de la dynamique côtière (**Ghodhani, 2017**).

Chapitre III :
Evolution spatio-
temporelle du trait de
côte de la baie de
Zemmouri.

1 Introduction

Les zones côtières ont revêtu un intérêt particulier pour les humains, en tant que lieux de peuplement, d'échanges, de passages, ou générateurs de ressources, La vulnérabilité des zones côtières aux impacts des changements climatiques et aux aléas météo-marins (tempêtes, inondations, etc.) résulte conjointement de dynamiques liées au milieu naturel et à l'élément humain et social qui façonnent le système socio-écologique. (Weissenberger *et al.*, 2016).

Aujourd'hui, la zone littorale est l'un des endroits les plus densément peuplés de la planète, le littoral est un milieu fragile, très convoité, qu'il est important de connaître afin de le gérer au mieux. Éminemment mobile, le littoral est soumis à des processus naturels (courants, vagues, tempêtes, ...) ou anthropiques (impact des ouvrages, opération de rechargement, ...) qui le conduisent à des évolutions rapides, caractérisées notamment par les notions d'aléas de submersion et d'érosion. (Mallet et Michot, 2012).

Le chapitre se concentre sur l'étude de l'évolution du trait de côte de la grande baie de Zemmouri entre 1980 et 2022. L'objectif principal est de fournir un suivi spatio-temporel de cette évolution en utilisant une méthode d'analyse diachronique. En outre, l'étude comprend le calcul du bilan surfacique de la zone d'étude et permet de déterminer le rythme d'évolution, qu'il s'agisse d'érosion ou d'accrétion. Enfin, le chapitre propose également l'établissement d'un scénario tendanciel prévisionnel à l'horizon 2052, afin de mieux comprendre l'impact potentiel des changements futurs sur le trait de côte de la grande baie de Zemmouri.

2 Les logiciels utilisés pour étudier l'évolution du littoral :

Nous avons utilisé Google Earth Pro pour accéder à des cartes datées dans le but de faire la digitalisation des traits de côtes de différentes années de la baie de Zemmouri. En outre, nous avons employé le logiciel ArcGIS pour modéliser les différents traits de côte, associé à l'extension DSAS (Digital Shoreline Analysis System) pour quantifier leur évolution. Cette combinaison d'outils nous a permis d'analyser de manière approfondie l'évolution de la côte (l'érosion et l'accumulation ou sans aucun changement) et ses conséquences sur notre zone d'étude.

2.1 Google Earth Pro :


C'est un logiciel ouvert qui, bien qu'il ne soit pas un "vrai" SIG, permet la visualisation, l'évaluation, la superposition et la création de données géospatiales. Cette ressource conviviale est souvent un intermédiaire utile pour les apprenants qui souhaitent en savoir plus sur les SIG et qui veulent commencer avec des processus et des outils de base. Google Earth Pro peut également être utilisé pour visualiser des images satellite à très haute résolution, télécharger des données géospatiales dans son format de fichier natif interopérable (KML), et aussi pour la localisation (par exemple pour un simple géocodage (<https://uottawa.libguides.com/c.php?g=715386&p=5132223>)).

2.2 ArcGis10.8 :

ArcGIS est un système logiciel SIG à usage général développé par ESRI. Il s'agit d'une technologie de plate-forme logicielle étendue et intégrée permettant de créer des SIG opérationnels. ArcGIS comprend quatre parties logicielles clés : un modèle d'information

géographique pour la modélisation des aspects du monde réel ; des composants pour le stockage et la gestion des informations géographiques dans des fichiers et des bases de données ; un ensemble d'applications prêtes à l'emploi pour la création, l'édition, la manipulation, la cartographie, l'analyse et la diffusion des informations géographiques ; et une collection de services Web qui fournissent du contenu et des capacités (données et fonctions) aux clients logiciels en réseau. Certaines parties du système logiciel ArcGIS peuvent être déployées sur des appareils mobiles, des ordinateurs portables et de bureau et des serveurs. (Maguire, 2008)

2.2.1 Présentation de l'interface : ArcMap

ArcMap  montre, questionne, édite, crée ou analyse des données, sous forme de tables ou de cartes. ArcMap facilite la disposition des cartes lors de la mise en page pour l'impression, l'intégration dans d'autres documents et l'édition de documents électroniques. L'interface du logiciel est présentée ci-dessous :

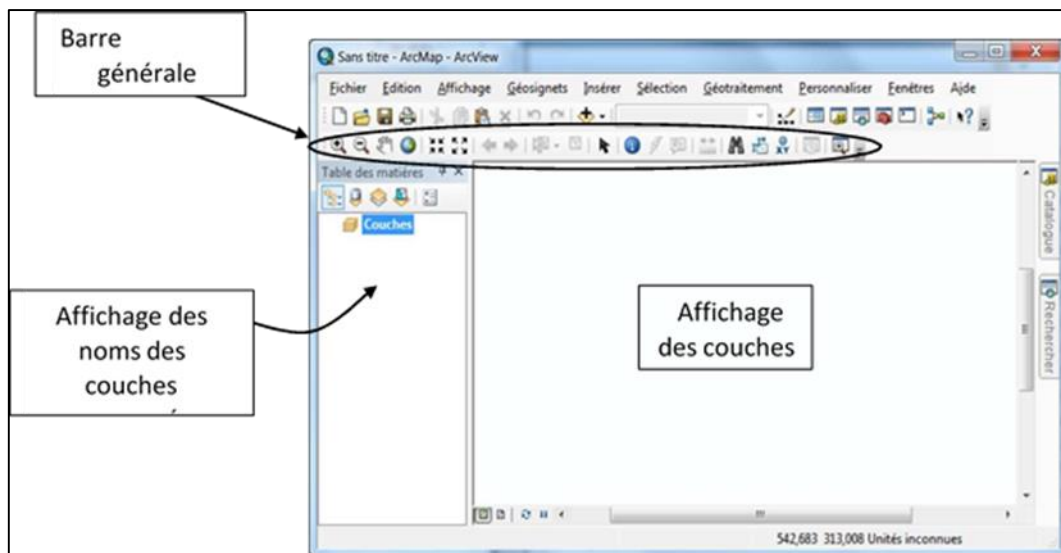


Figure 27 : L'interface d'ArcMap.

La barre générale d'outils se décline comme suit :

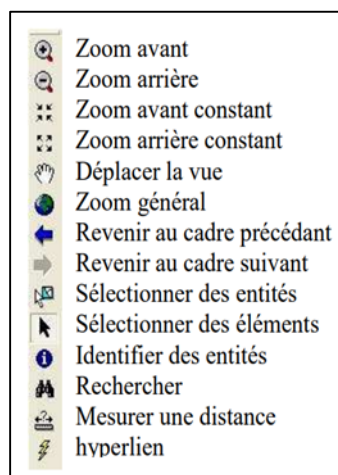



Figure 28 : La barre générale d'outils.

La barre d'outils renferme les outils de navigation sur les données graphiques des couches, ainsi que les outils d'affichage rapide de données sémantiques (attributaires) liées aux entités graphiques. (Guerbi et Abdelkebir, 2017).

2.2.2 Présentation de l'interface : ArcCatalog

ArcCatalog  vous permet de passer en revue, organiser, distribuer et modifier les éléments de propriétés des données géographiques. L'interface permet d'employer des méthodes graphiques ou textuelles pour passer en revue, contrôler ou modifier l'ensemble des données.

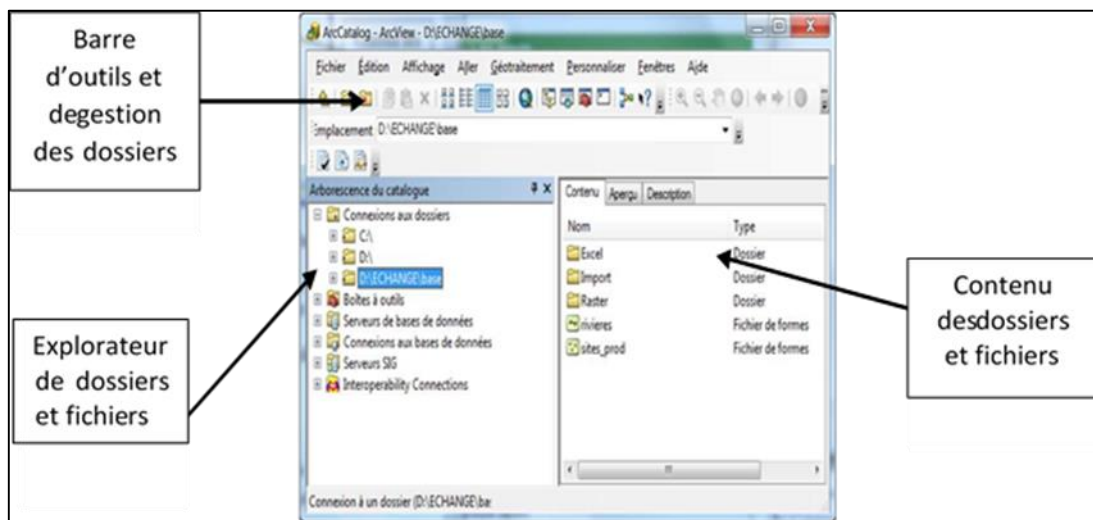


Figure 29 : L'interface d'ArcCatalog.

C'est idéalement dans cette interface que l'on exécutera les actions les plus courantes listées ci-dessous :

- créer des nouvelles données (couches ou shapefiles, géodatabases...) ou supprimer une couche (soit l'ensemble des fichiers correspondants au shapefile),
- attribuer un système de coordonnées lorsqu'il n'est pas reconnu par le logiciel, ou non renseigné,
- avoir un aperçu géographique ou attributaire d'une couche donnée.

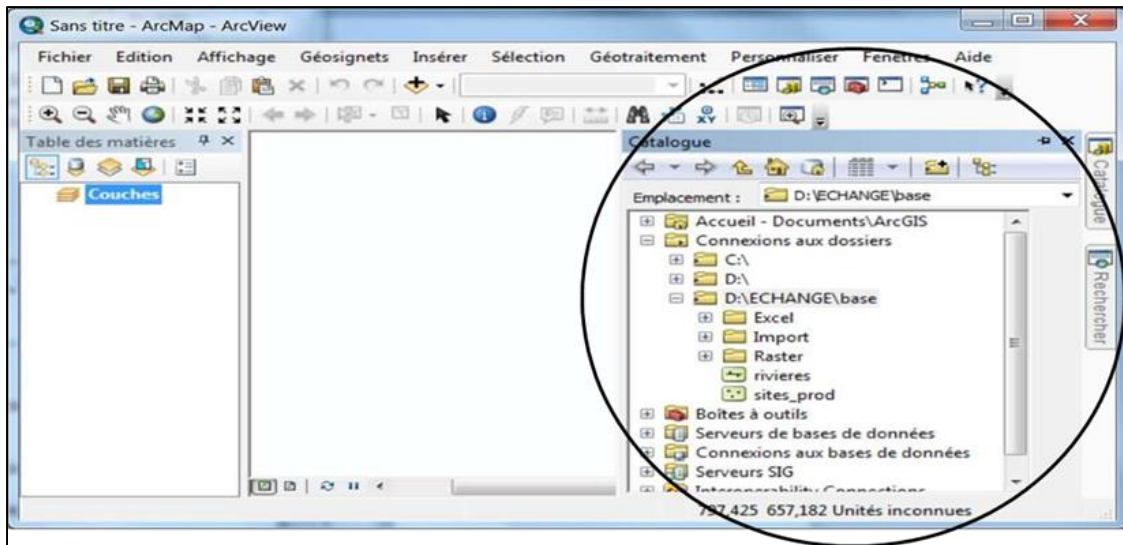











Figure 30 : L'interface d'ArcCatalog à partir d'ArcMap.

Désormais, l'interface ArcCatalog est disponible au travers d'ArcMap, ce qui facilite grandement la gestion des fichiers. Cet onglet se charge soit à partir de l'icône  dans la barre standard de ArcMap, soit à l'aide de l'onglet Catalogue situé à droite de la fenêtre (Guerbi et Abdelkebir, 2017)

➤ Les formats de données visibles dans ArcCatalog :

- Tables attributaires feuilles de calcul Excel pour les versions 9.2 et + et dBase (*.dbf)  : Ce sont les fichiers généralement issus d'un fichier Excel que l'on intègre à l'étude cartographique. Ces données ne sont pas géoréférencées.
- Bases de données : Géodatabase (*.mdb), fichier Access  .
- Fichiers de formes (*.shp) polygones , lignes , points . Ce sont les entités graphiques qui sont géoréférencées. Un fichier de formes est associé à une table (*.dbf) qui peut contenir un nombre indéfini de données par entité.
- Fichiers couches (*.lyr)  : Ce sont les représentations graphiques issues des fichiers de formes.
- Fichiers raster  sont les fichiers images auxquels chaque couleur est rattachée une valeur numérique. (Guerbi et Abdelkebir, 2017).

2.2.3 Présentation de l'interface : ArcToolBox

ArcToolbox  est le module dans ArcGis 10 qui permet d'accéder à toutes les fonctionnalités puissantes de traitement et d'analyse. La boîte à outils fournit un ensemble très riche de fonctions de géotraitement. Il convertit aussi les formats de données pour l'importation ou l'exportation de fichiers, ainsi que les changements de projection.

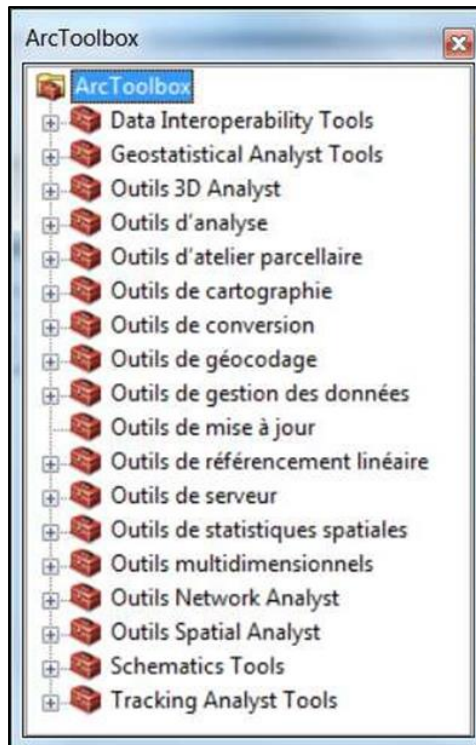


Figure 31 : L'interface d'ArcToolBox.

L'ensemble des outils présents dans chaque boîte à outil n'est pas obligatoirement accessible. Certains nécessitent l'achat d'extensions supplémentaires. Généralement, en cliquant sur un outil, une fenêtre correspondant à l'outil s'ouvre, permettant de paramétrer ce dernier. (Guerbi et Abdelkebir, 2017)

2.3 L'extension DSAS :

Le « Digital Shoreline Analysis System » est une extension du logiciel ArcGIS qui permet de faire des calculs sur les écarts des traits de côte déjà digitalisés à partir des images retenues. Développé depuis les années 1990 par l'US Geological Survey, DSAS fournit une méthode normalisée qu'on peut répéter pour le calcul de l'évolution statistique tout en analysant les changements passés, présents et futurs du littoral. (Thior *et al.*, 2021).



Figure 32 : L'extension de DSAS.

- 1 Définir / Modifier les paramètres : spécifiés les noms de fichiers pour les entrées de référence et de rivage et d'autres paramètres, tels que l'espacement des profils.
- 2 Transects Cast : génère une nouvelle (ou écrase un existant) classe d'entités des profils en fonction des paramètres par défaut spécifiés par l'utilisateur.
- 3 Le menu déroulant : répertorie tous les fichiers de transect reconnus ajoutés au projet ArcMap actif.

- 4 Calculer les statistiques : lance une boîte de dialogue peuplée avec une liste sélectionnable des statistiques de changement de taux à calculer.
- 5 Lancer la fonction d'aide DSAS.
- 6 A propos de DSAS : fournit des informations sur le logiciel, y compris le numéro de version.

3 Les méthodes statistiques de calcul de la mobilité du trait de côte sous l'extension DSAS :

Pour le calcul de la variation du trait de côte, de nombreuses méthodes étaient disponibles dans le DSAS, dans notre cas d'étude en a choisi les 3 méthodes suivantes (EPR, LRR, et NSM) :

3.1 La méthode des points extrêmes (End Point Rate - EPR) :

C'est le rapport entre la distance séparant le trait de côte le plus ancien et le plus récent, et la durée (exprimée en années) s'étant écoulée entre ces deux dates.

Le principal avantage de l'EPR est qu'il est facile à calculer et qu'il ne nécessite qu'un minimum de données côtières (deux lignes de rivage). Le principal inconvénient est que dans les cas où il y a plus de deux lignes de rivage. Les informations relatives à la conduite du littoral, fournies par les plages supplémentaires et les changements dans la taille de la direction de la plage ou les fluctuations cycliques du comportement, sont négligées (**Sebat et Salloum, 2018**).

$$EPR(m/an) = \frac{D_1 - D_2}{t_1 - t_2} \quad (2)$$

Avec :

D1 et D2 : distance séparant le trait de côte plus ancien et le plus récent.

t1 et t2 : les dates des deux positions sur la côte.

En se basant sur le paramètre EPR, il est possible de catégoriser l'évolution du phénomène d'érosion ou d'accrétion en fonction des résultats obtenus par ce paramètre selon le (**Tableau 8**) :

Tableau 8 : Classification des valeurs de changement du trait de côte à partir du paramètre EPR (Sallaye, 2021).

Classification des traits de côte	Taux de changement de trait de côte (m/an)
Erosion très élevée	> -2
Erosion élevée	> -1 à < -2
Erosion modérée	> -1 à < 0
Stable	0
Accrétion modérée	> 0 à $< +1$
Accrétion élevée	$> +1$ à $< +2$
Accrétion très élevée	$> +2$

3.2 La méthode de la régression linéaire (Linear Regression Rate - LRR) :

Elle permet d'utiliser plus de deux traits de côte cette méthode de calcul elle prend en compte la tendance évolutive du trait de côte sur l'ensemble de la période considérée. Une statistique de taux de changement par régression linéaire peut être déterminée en ajustant une ligne de régression des moindres carrés à tous les points du littoral pour un transect particulier. La ligne de régression est placée de telle sorte que la somme des carrés des résidus (déterminée en élevant au carré la distance de décalage de chaque point de données par rapport à la ligne de régression et en additionnant les carrés des résidus) soit minimisée. Le taux de régression linéaire est la pente de la ligne. La méthode de régression linéaire présente les caractéristiques suivantes (Nair et Bharathvaj, 2015):

- Toutes les données sont utilisées, indépendamment des changements de tendance ou de précision,
- La méthode est purement informatique,
- Le calcul est basé sur des concepts statistiques reconnus,
- La méthode est facile à utiliser.

3.3 La méthode de mouvement du littoral net (Net Shoreline Movement NSM) :

Le NSM est décrit comme la distance entre le plus ancien et le plus récent le long du transect considéré (Gopinath *et al.*, 2023),

4 La méthodologie suivie :

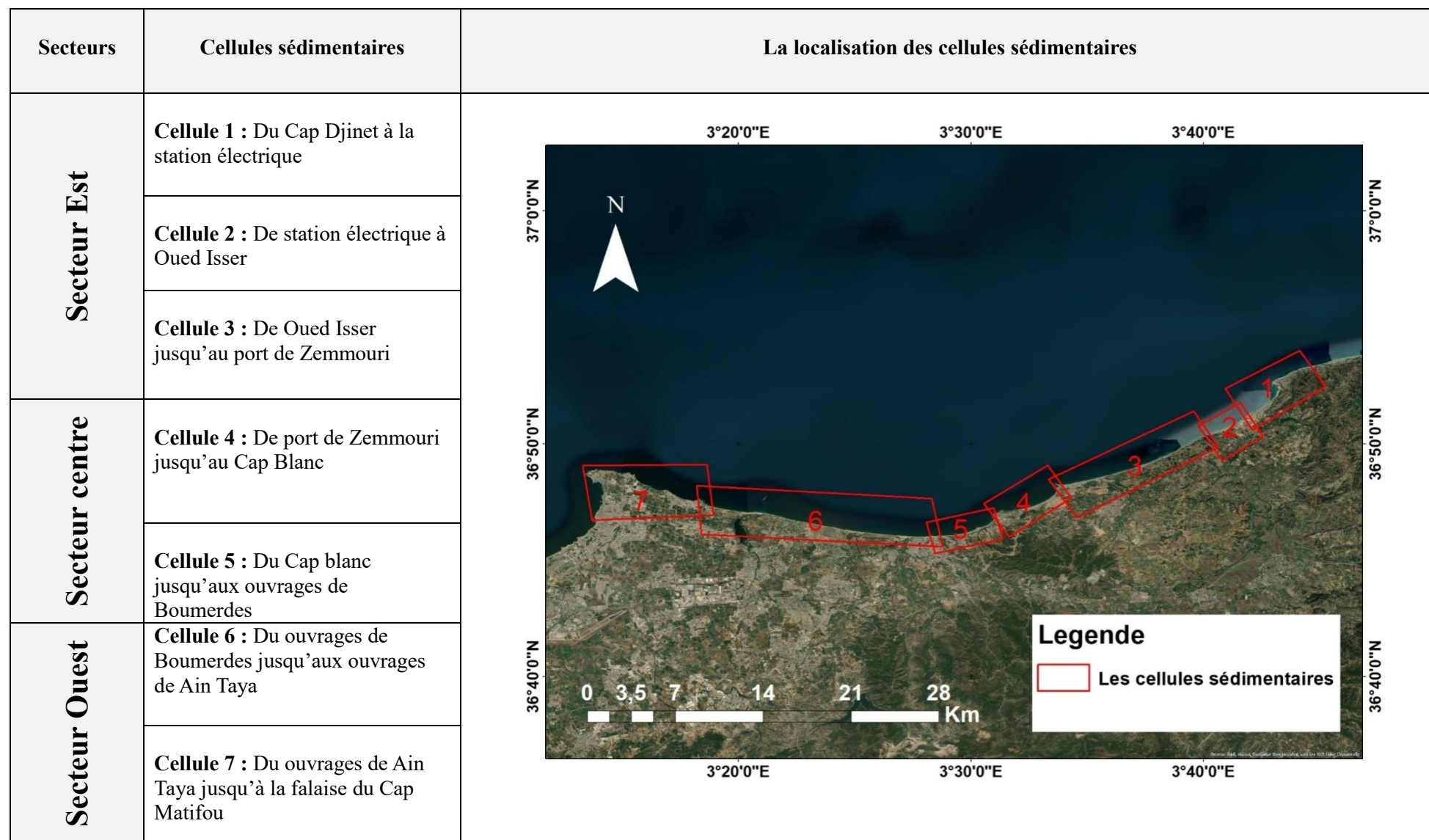
Les différentes étapes de ce travail sont les suivantes : Tout d'abord, les images satellitaires et les photographies aériennes de la baie de Zemmouri datant de 1972 à 2022 ont été géoréférencées à l'aide du logiciel de cartographie Arc Gis 10.8 en utilisant le système de projection WGS84 UTM zone 31N. Ensuite, les traits de côte ont été digitalisés en utilisant la ligne des hautes mers HWL (la limite entre la ligne humide et sèche) comme une référence,

suivis par l'utilisation de l'extension DSAS pour générer la ligne de base et les transects, pour le but de calculer les paramètres statistiques EPR, LRR et NSM.

On a évalué la variation spatio-temporelle de la ligne de rivage sur une distance de 55 km le long de la côte de Zemmouri en utilisant des transects espacés de 20 mètres et d'une longueur de 600m. En tout, 2522 transects ont été générés par DSAS et disposés perpendiculairement à la ligne de base. deux méthodes, à savoir EPR, LRR et NSM, ont été utilisées pour étudier le taux de changement de la ligne de rivage entre 1972 et 2022. Pour assurer une analyse diachronique complète, la zone d'étude a été divisée en trois secteurs : Est, Centre et Ouest. Le premier secteur, allant de Cap Djinet jusqu'au port de Zemmouri, couvre des transects numérotés de 1 à 910. Le deuxième secteur, allant de port de Zemmouri jusqu'au les ouvrages de Boumerdes, englobe des transects de 911 à 1407. Enfin, le troisième secteur, entre ce dernier et la falaise du Cap Matifou, englobe des transects de 1408 à 2522.

Pour mieux étudier l'évolution de trait de côte, et calculer les différents indices (EPR, LRR et NSM), notre zone d'étude a été divisée en sept cellules sédimentaires (**Figure 33**) :

Figure 33 : Les Cellules sédimentaires de la zone d'étude.



5 Interprétation des résultats :

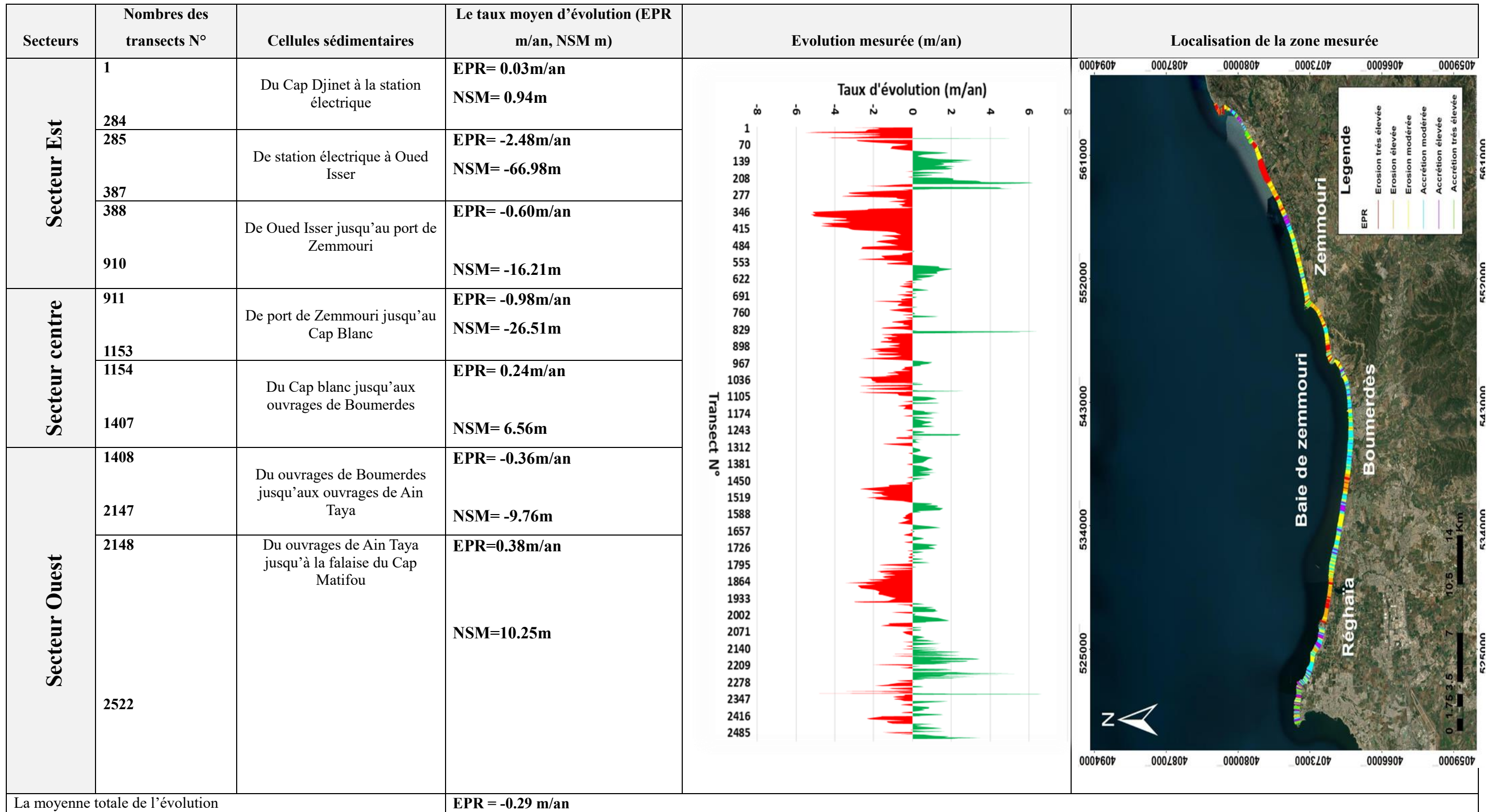
5.1 Évolution du trait de côte entre 1972 et 1999 :





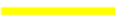



Pendant une période de 27 ans, la ligne de rivage de la baie de Zemmouri subit des changements continus, alternant entre des phases d'accrétion et d'érosion, avec une vitesse de recul moyenne de l'ordre de -0.3 m/an ce qui correspond à une érosion modérée, entraînant des changements significatifs dans toute la baie de Zemmouri.

Les plages de Cap Djinet, Sghirat, Zemmouri et Reghaia, situées aux cellules 2,3, 4 et 6, ont connu une importante réduction de leurs côtes sablonneuses. Le taux moyen d'érosion était de -2,48 m/an, -0,60 m/an, -0,98 m/an et -0,36 m/an respectivement. Le taux maximum d'érosion enregistré était de -5,49 m/an à la plage de Cap Djinet. Cette érosion est le résultat de la combinaison de facteurs naturels et anthropiques.

En revanche, les cellules 1, 5 et 7 (plage de Boumerdes et Boudouaou El Bahri), ont connu un processus d'accumulation de sable. Ces zones ont enregistré un taux moyen de progression de 0,03 m/an, 0,24 m/an et 0,38 m/an respectivement, avec un maximum de 6,25 m/an observé sur la côte Est de Cap Matifou.

Figure 34 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 1972 et 1999.



Légende		EPR	
	Erosion		Erosion très élevée
	Accrétion		Erosion élevée
			Erosion modérée
			Accrétion modérée
			Accrétion élevée
			Accrétion très élevée

5.2 Évolution du trait de côte entre 1999 et 2008 :

Entre 1999 et 2008, on observe une érosion du littoral le long de la baie de Zemmouri, le taux moyen de recul constaté s'élève à environ $-3,57$ m/an, ce qui représente une augmentation par rapport à la période précédente.

Dans le secteur Est (du transect 1 au 910), les endroits présentant les plus forts taux de recul se trouvent près de Oued Isser, avec une vitesse maximale d'environ $-19,9$ m/an, ce qui correspond à une distance de recul de $-182,3$ m. Avant la station électrique, la région connaît une avancée de son littoral (du transect 1 au 284), avec une vitesse maximale de progradation d'environ $6,95$ m/an, soit une distance de $63,49$ m au niveau du transect 88.

La dynamique du rivage, caractérisée par l'érosion et l'accrétion, est influencée par divers facteurs. Parmi eux, on retrouve la présence d'infrastructures maritimes telles que le port de Djinet et les aménagements réalisés le long du littoral, tels que la station électrique. En plus de ces influences anthropiques tels que le pillage de sédiment (l'extraction illégale du sable), les agents naturels jouent également un rôle important en perturbant la dynamique côtière.

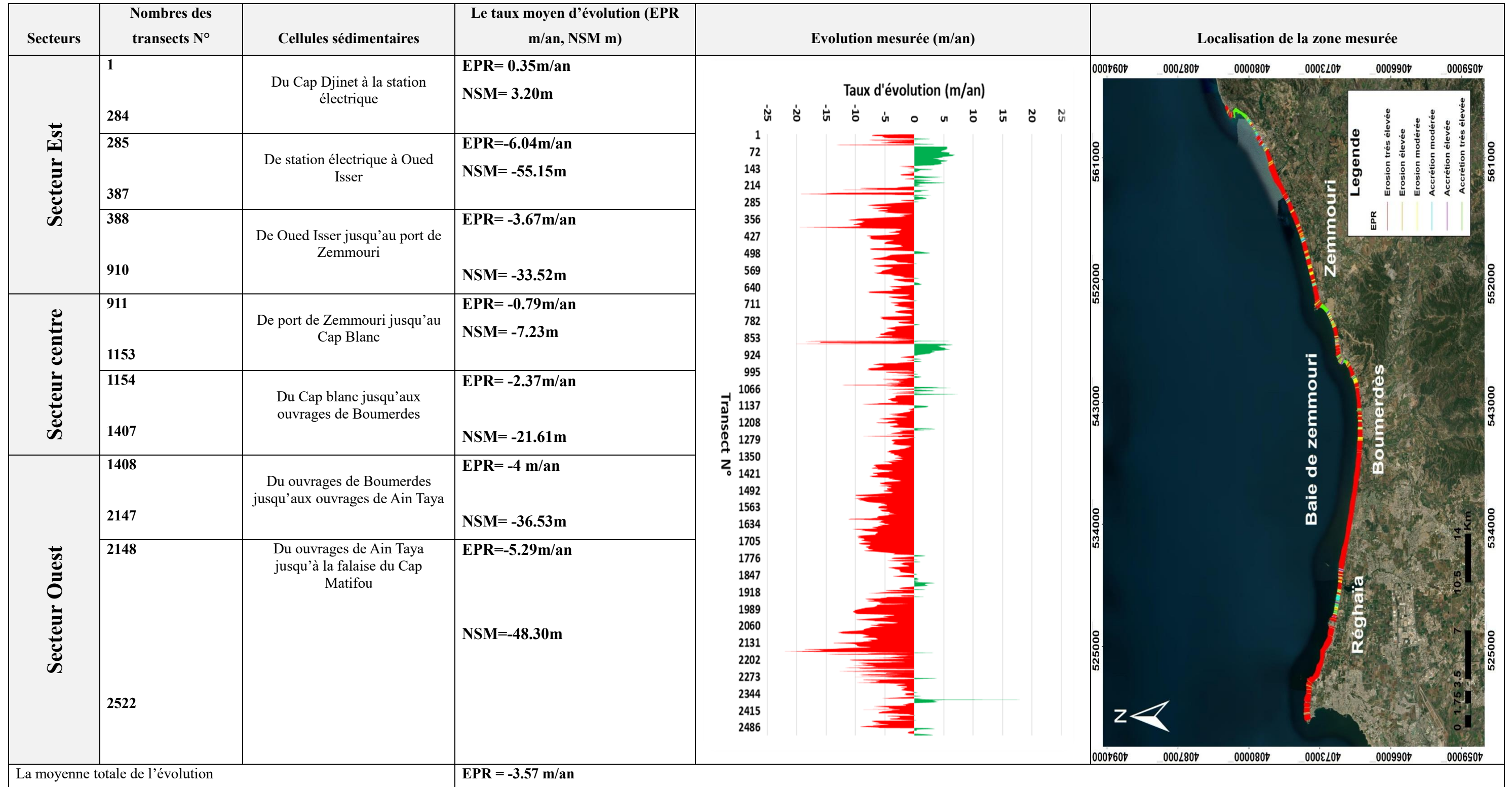
Le tronçon situé entre les transects 911 et 1407, qui constitue la zone centrale, a connu des variations significatives dans son évolution, passant d'une tendance d'érosion à une tendance d'accrétion. Le taux d'évolution moyenne du niveau de la mer (EPR) dans cette région s'est situé entre $-0,79$ et $-2,73$ m/an, ce qui a entraîné des variations de distance allant de $-7,23$ à $-21,61$ m.

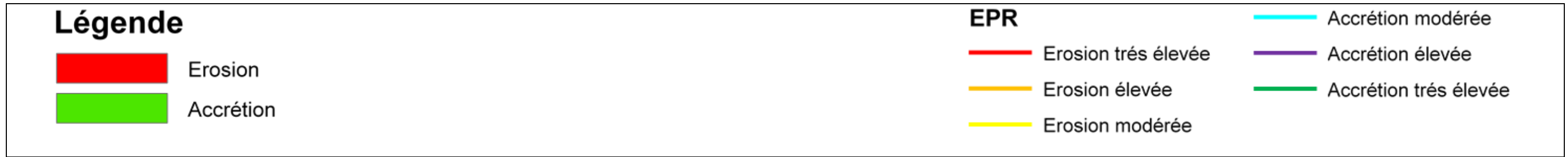
Dans la partie ouest (allant du transect 1408 au transect 2522), on a principalement observé une importante érosion, avec une vitesse moyenne de recul estimée à environ -4 m/an et $-5,29$, respectivement, et une vitesse maximale de recul d'environ $-21,96$ m/an, soit une distance de $-200,48$ m.

Les raisons de cette régression peuvent résulter de facteurs à la fois naturels et humains. Les facteurs naturels responsables de l'érosion du littoral de la baie sont principalement les effets cumulatifs des tempêtes récurrentes et l'augmentation relative du niveau moyen de la mer.

Quant aux causes humaines, elles peuvent être attribuées aux extractions massives et arbitraires nécessaires à l'expansion urbaine en cours dans la région centrale de l'Algérie.

Figure 35 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 1999 et 2008.





5.3 Évolution du trait de côte entre 2008 et 2011 :

Pendant cette période, le rivage de notre zone d'étude a connu une érosion plus ou moins significative, avec une moyenne de recul de -1,33 m/an.

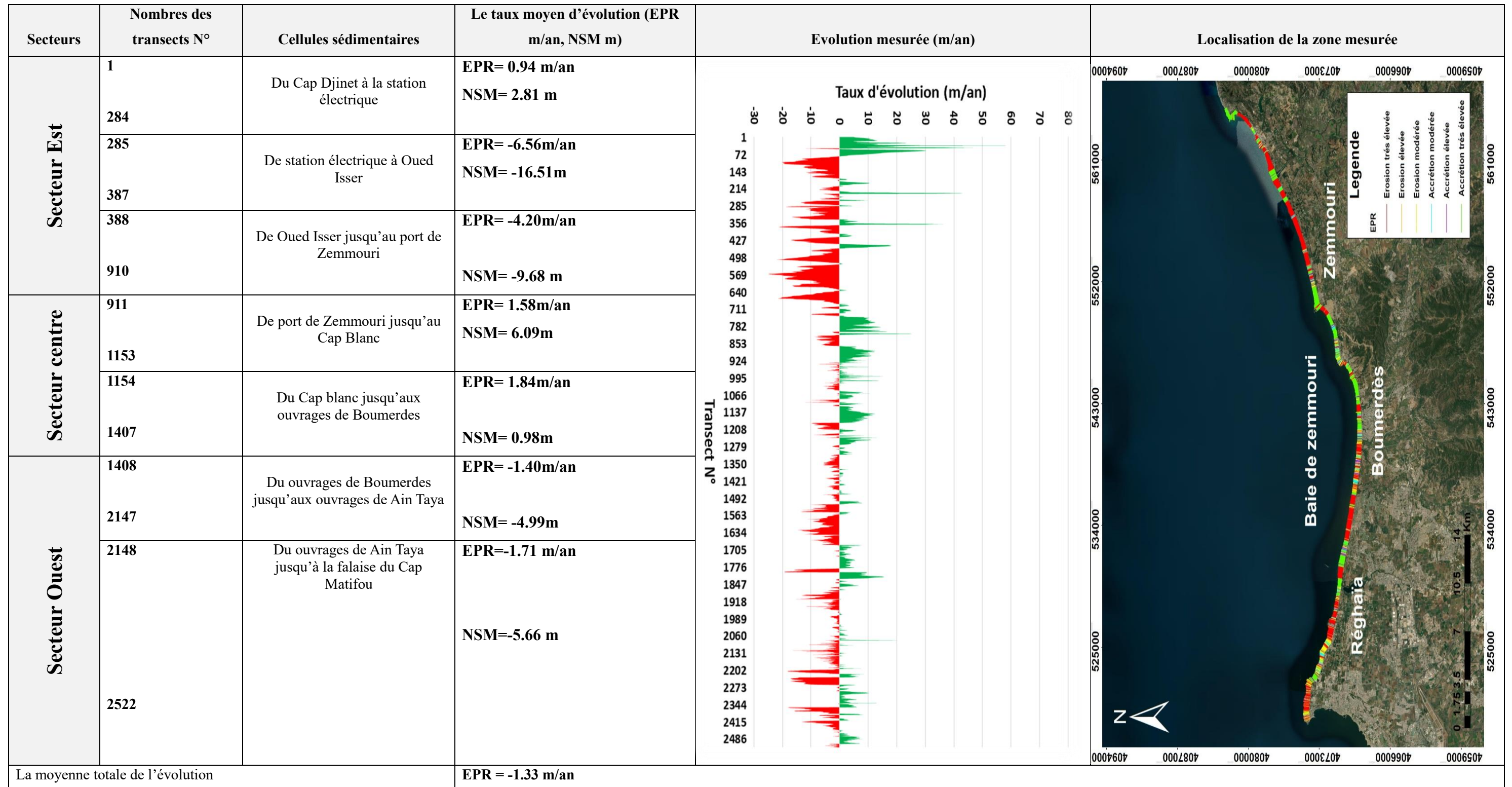
Le secteur Est qui comprend le transect 1 à 910, on a enregistré des accumulations près du port de Cap Djinet et sur la plage de Djinet familiale, le taux moyenne d'accumulation est de 0,94 m/an, ce qui correspond à une distances de 2,81 m, un taux maximal d'accrétion de l'ordre de +65,60 m/an, soit une distance de 196,63 m au niveau du transect 36 est marqué dans la plage de Cap Djinet après l'installation du port du Cap Djinet en 2009. A l'Ouest de la station électrique (transect 285), la région connaît une érosion de son littoral, avec un taux d'EPR respectivement varie entre -6,56 m/an et -4,20 m/an soit des distances entre -16,51 m et -9,68 m.

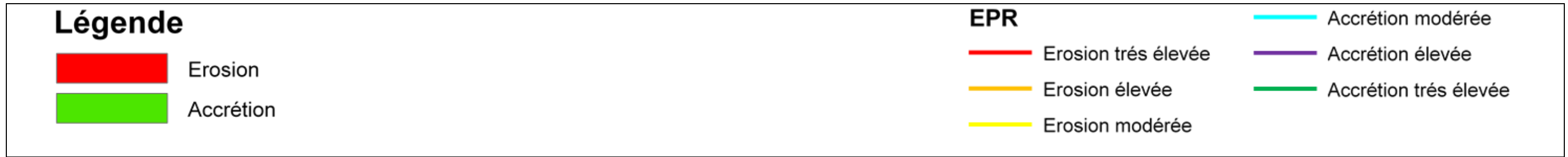
Le secteur central (du transect 911 au 1407), on observe une accumulation, les plages de Figuier et Boumerdes ont connu une importante accrétion, avec un taux estimé de 1,84 à 1,58 m/an soit une avancée de 0,98 à 6,09 m respectivement.

Le secteur Ouest (du transect 1408 à 2522), les plages de ce secteur ont connu une forte érosion avec une vitesse moyenne de -1,40 à -1,71 m/an.

Les plages de notre zone d'étude sont extrêmement vulnérables en raison des forces hydrodynamiques frontales auxquelles elles sont soumises, ce qui entraîne une érosion importante sur la plupart des plages de la baie.

Figure 36 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 2008 et 2011.





5.4 Évolution du trait de côte entre 2011 et 2017 :

Cette période est marquée par une progression de l'accrétion par rapport aux périodes précédents, un taux moyen de changement du rivage sur toute la côte est de l'ordre de + 1m/an.

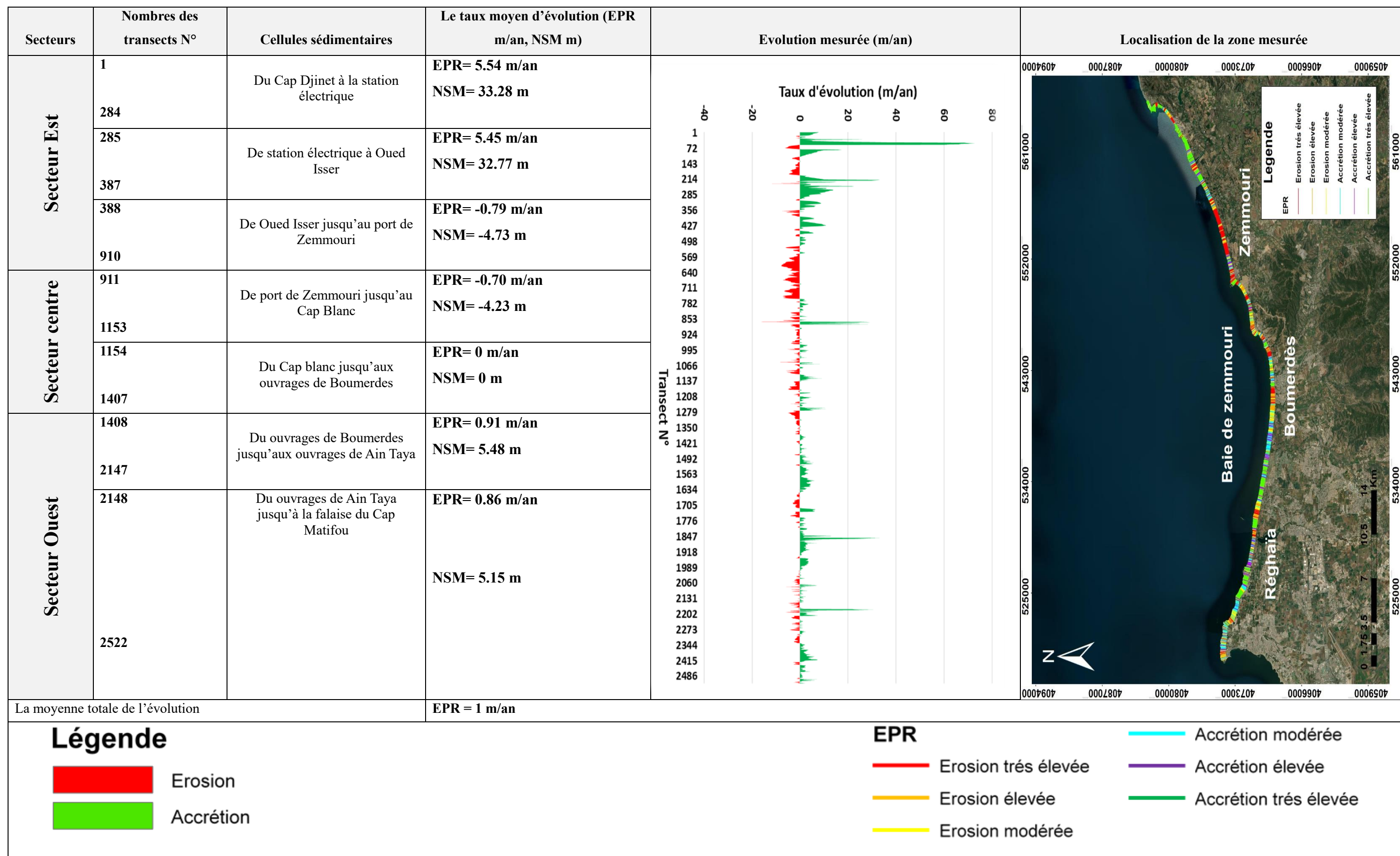
Les résultats obtenus révèlent que dans la partie Est de cette zone côtière, certaines zones connaissent un phénomène d'accrétion avec des taux moyenne d'EPR allant de +5,45 m/an à +5,54 m/an. La plage de Cap Djinet présente même un taux d'accrétion maximal atteignant environ +72,76 m/an.

Concernant la partie centrale (de transect 911 jusqu'au transect 1407), Sur la plage de Figuier, entre les transects 911 et 1153, on observe un recul d'environ de -0,70 mètre par an, ce qui équivaut à une perte totale de -4,23 mètres, par contre après cap blanc on remarque qu'il n'y a aucune variation du rivage $EPR=0$ m/an.

Dans la partie ouest (entre les transects 1408 et 2522), le rivage connaît une fluctuation constante entre le retrait et l'avancée, avec des valeurs d'EPR allant de 0,86 m/an à 0,91 m/an. Cela correspond à des distances de déplacement allant de 5,18 m à 5,48 m.

Entre 2011 et 2017, la plage du Cap Djinet a connu une augmentation de sa taille en raison de la construction du nouveau port. En effet, la mise en place du port a entraîné des changements importants, car cela a perturbé le transport longitudinal des sédiments et modifié la direction des houles dominantes venant du Nord-Est et Nord-Nord-Est., ces changements ont provoqué l'érosion de la partie central (la plage de Figuier).

Figure 37 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 2011 et 2017.



5.5 Évolution du trait de côte entre 2017 et 2022 :

Pendant cette brève période de 5 ans, le littoral de notre zone d'étude a subi une érosion importante. Selon l'analyse statistique des changements de la position du trait de côte, la baie de Zemmouri a connu une érosion avec un recul moyen d'environ -1,56 m/an.

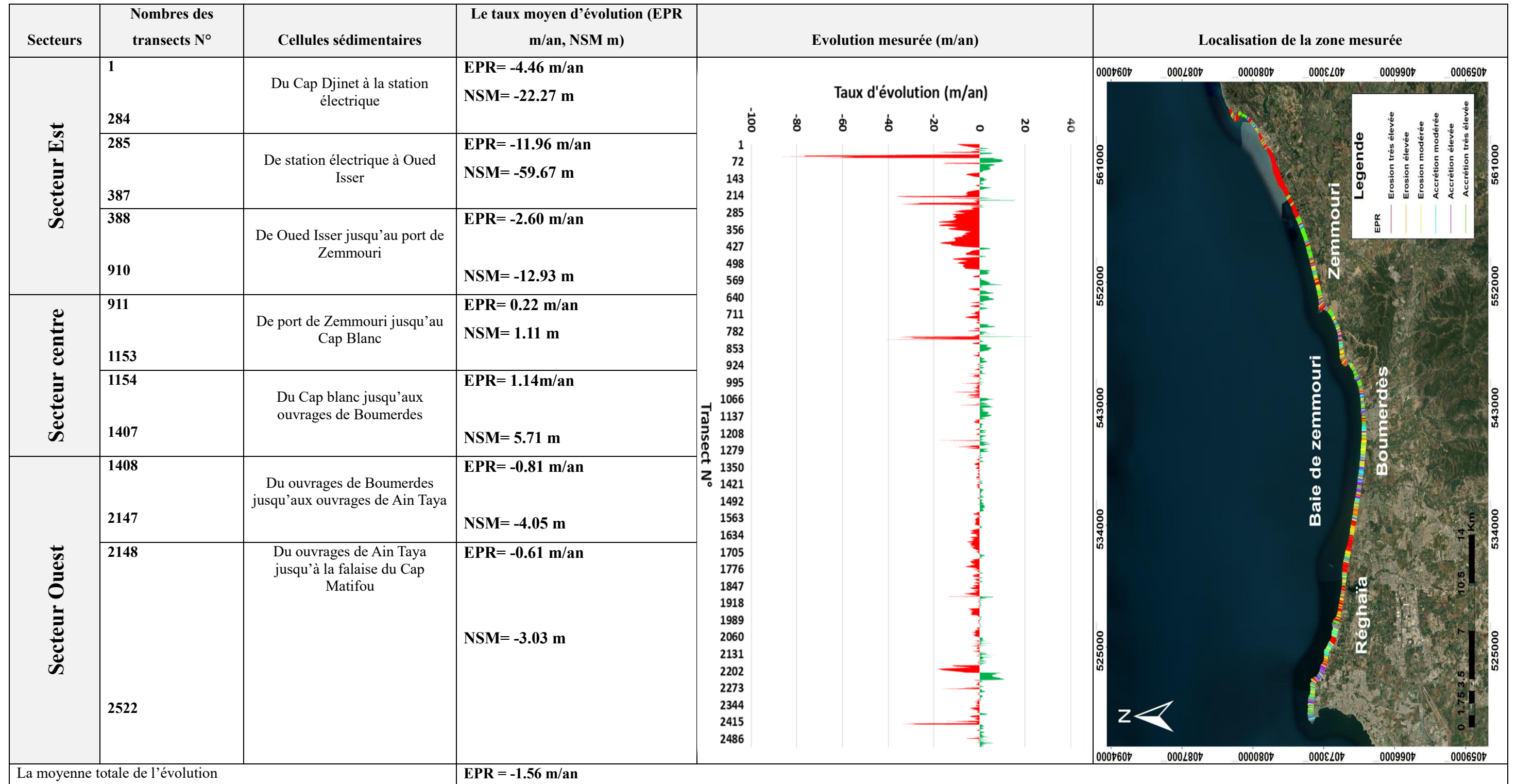
Le secteur Est (du transect 1 à 910) est particulièrement affecté par le phénomène d'érosion, avec des vitesses de recul variant entre -2,60 m/an et -11,96 m/an, ce qui correspond à des distances d'environ -12,93 m et -59,67 m. Le transect 52 présente la vitesse de recul la plus élevée $EPR = -86,63$ m/an.

En ce qui concerne la zone centrale (des transects 911 à 1407), on observe un taux d'avancement d'environ 0,22 m/an et 1,14 m/an, ce qui équivaut respectivement à des distances de 1,11 m et 5,71 m. Dans cette zone, le trait de côte a connu une progression maximale de 6,64 m/an au niveau du transect 1191.

La zone côtière de la partie ouest (Transect 1408 à 2522), plus précisément à Ain Taya (comprenant Les Flots Bleus, Surcouf, Deca Plage, Tarfaia et Elkadous), ainsi qu'à Boudouaou el Bahri, a été soumise à une érosion, avec des vitesses de recul allant de -0,61 m/an à -0,81 m/an. Cela correspond à des distances reculées allant de -3,03 m à -4,05 m respectivement.

Les agents hydrodynamiques sont responsables de ces formes d'érosion. Dans cette région, la concentration d'énergie de la houle engendre des courants de retour et de dérive littorale, ce qui entraîne un transit littoral vers l'Ouest.

Figure 38 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 2017 et 2022.



Légende

-  Erosion
-  Accrétion

EPR

-  Erosion très élevée
-  Erosion élevée
-  Erosion modérée
-  Accrétion modérée
-  Accrétion élevée
-  Accrétion très élevée

5.6 Evolution mi- séculaire de la ligne de rivage de la baie de Zemmouri entre 1972 et 2022 :

Les résultats de l'analyse de l'évolution globale des changements de la position du rivage au cours de ce dernier demi-siècle (de 1972 à 2022) montrent que la position du rivage est variée entre phase de recul et d'autre de pro gradation et d'autre stable sur tous les secteurs (Est, Centre et Ouest) de la zone d'étude.

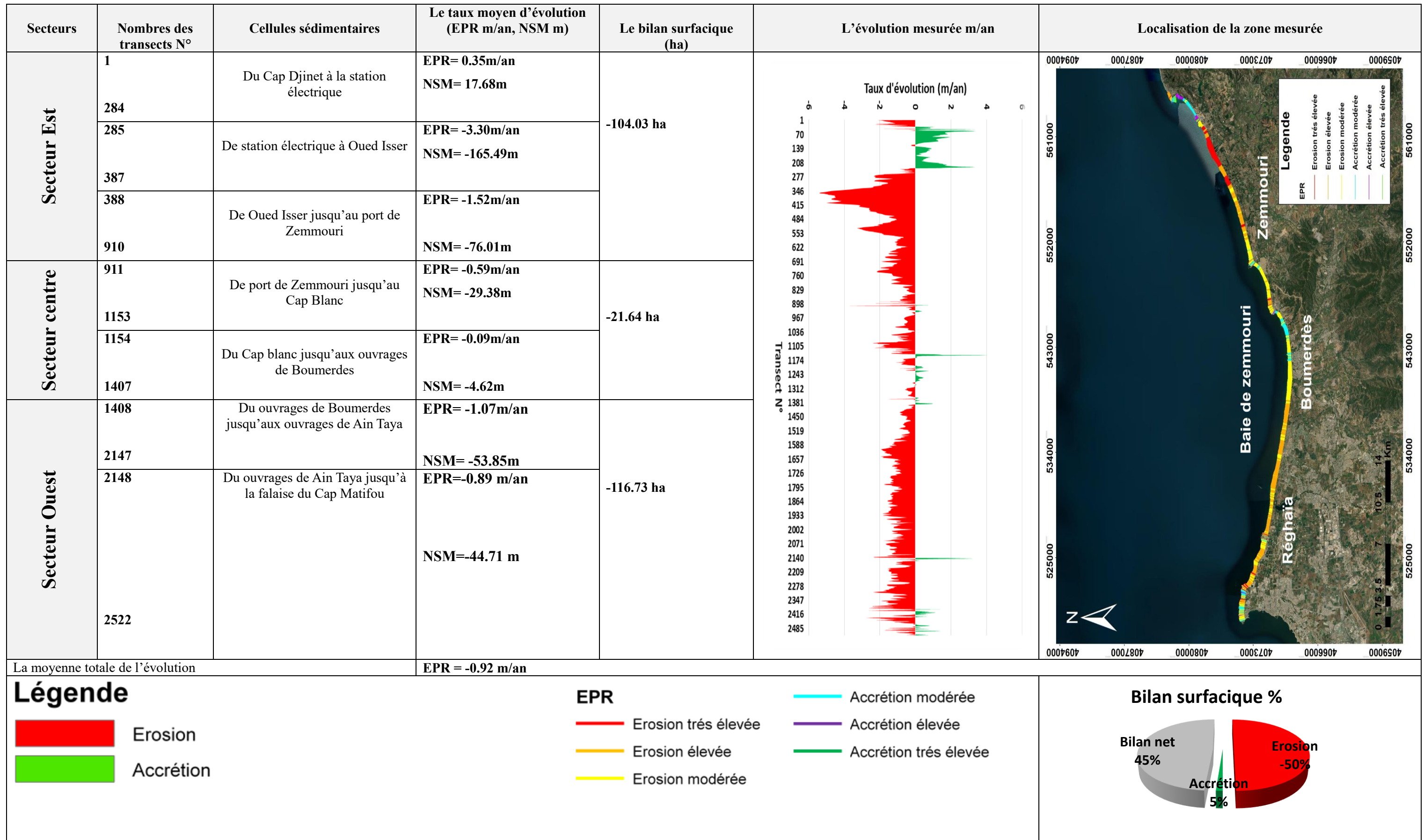
Dans la partie Est de la baie, des accumulations ont été constatées près du port du Cap Djinet et sur la plage de Djinet familiale. Les taux moyens d'accumulation est de +0.35m/an, ce qui indique une évolution positive qui peuvent être dues au flux sédimentaire engendré par les courants de dérive littorale Est-Ouest, ces sédiments sont piégés entre les ouvrages de protection de Djinet et le port du Cap Djinet. Par ailleurs, une érosion est également constatée au niveau des plages de Carrière, Douar Mendil et Mandoura.

Dans la zone Centrale, les taux de l'érosion côtière varient de -0,09 à -0,59 m/ an, ce qui équivaut à une perte de terre allant de -4,62 m à -29,38 m. Les plages situées dans cette partie centrale, allant de la plage Sghirat à la plage de Zemmouri Est, ont subi des niveaux d'érosion plus ou moins importants, avec des taux allant de -0,07 à -2,17 mètres par an.

Dans la zone Ouest, les plages de ce secteur ont connu une forte érosion avec une vitesse moyenne allant de -0,89 à -1.07 m/an.

Pendant les 50 dernières années (de 1972 à 2022), le littoral de la baie a subi une évolution générale montrant que 50% du rivage a subi une érosion soit de 25 km de ligne côtière. En revanche, seulement 5% du rivage a connu un engraissement soit 2,5 km. Les zones stables, situées principalement le long des caps et des falaises rocheuses, représentent 45% du littoral, soit une longueur de 22,5 km de ligne côtière.

Figure 39 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 1972 et 2022.



6 Analyse du bilan sédimentaire :

L'étude précédente a été complétée par des évaluations de surface pour toutes les plages de la baie de Zemmouri sur une période allant de 1972 à 2022. Les bilans de surface ont été obtenus en créant des polygones dans l'Arc Gis. Chaque polygone représente soit une augmentation de surface de plage (bilan positif), soit une diminution de surface de plage (bilan négatif)

La mesure des pertes et gains de sédiments (bilan sédimentaire) le long du littoral de la baie de Zemmouri, ainsi que les modifications du trait de côte, ont été évaluées en utilisant des mesures de surface. Les résultats mettent en évidence une variation notable le long de la côte, avec une perte nettement plus importante de surfaces de plage par rapport aux gains obtenus par l'engraissement. Sur une période de 50 ans, le bilan sédimentaire global présente un déficit significatif, avec une perte de plage estimée à -242.29 hectares (**Figure 40**).

Les plages situées dans les secteurs Est et Ouest affichent des pertes considérables de superficie, de -104,03 ha et -116,73 ha respectivement, ce résultat défavorable s'explique par une combinaison de facteurs naturels, tels que les forces hydrodynamiques (les houles, les courants et les tempêtes), la géomorphologie des plages, et d'interventions humaines, telles que les processus d'urbanisation, la mise en place d'infrastructures touristiques, les activités économiques sur les côtes, ainsi que l'exploitation du sable. En comparaison, le secteur central présente des pertes moins importantes, s'élevant à -21,64 ha seulement, cela est attribuable à la dissipation de l'énergie des vagues et à la présence des ouvrages de protection à Boumerdes. Les épis agissent comme des obstacles pour le transit littoral d'est en ouest ou d'ouest en est, ce qui contribue à cette situation. (**Figure 41**).

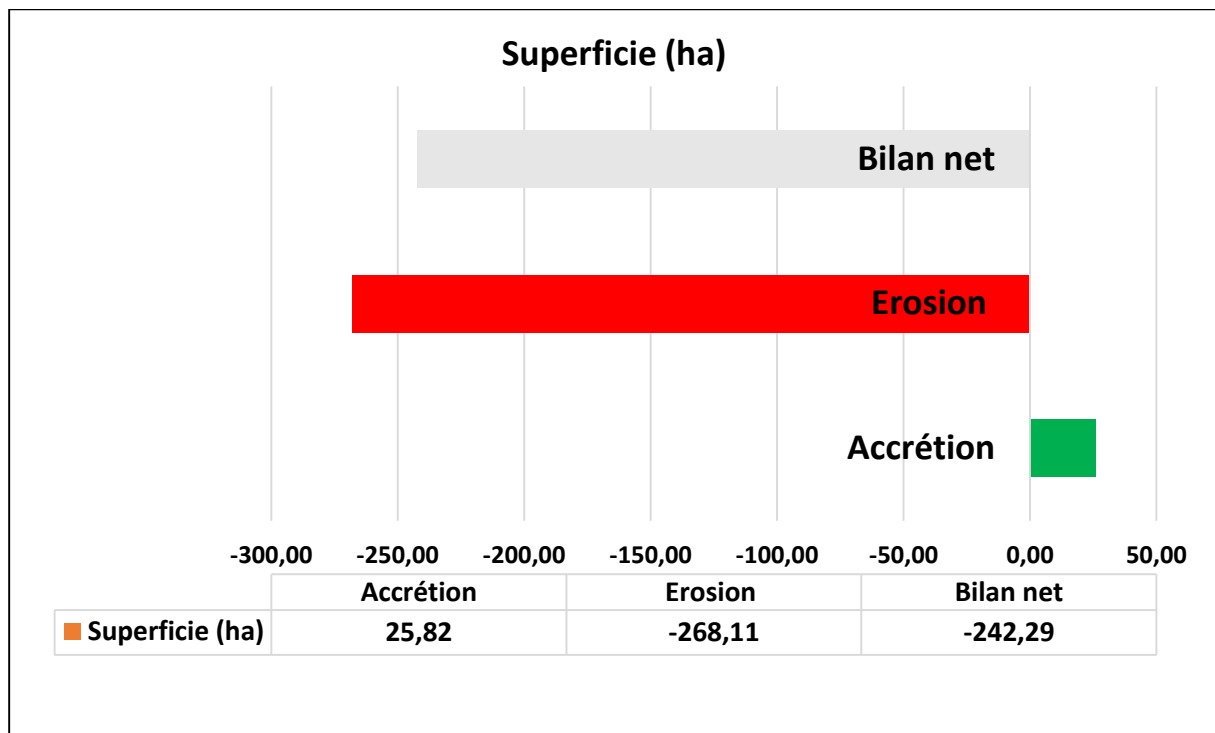


Figure 40 : Le bilan sédimentaire de la baie de Zemmouri.

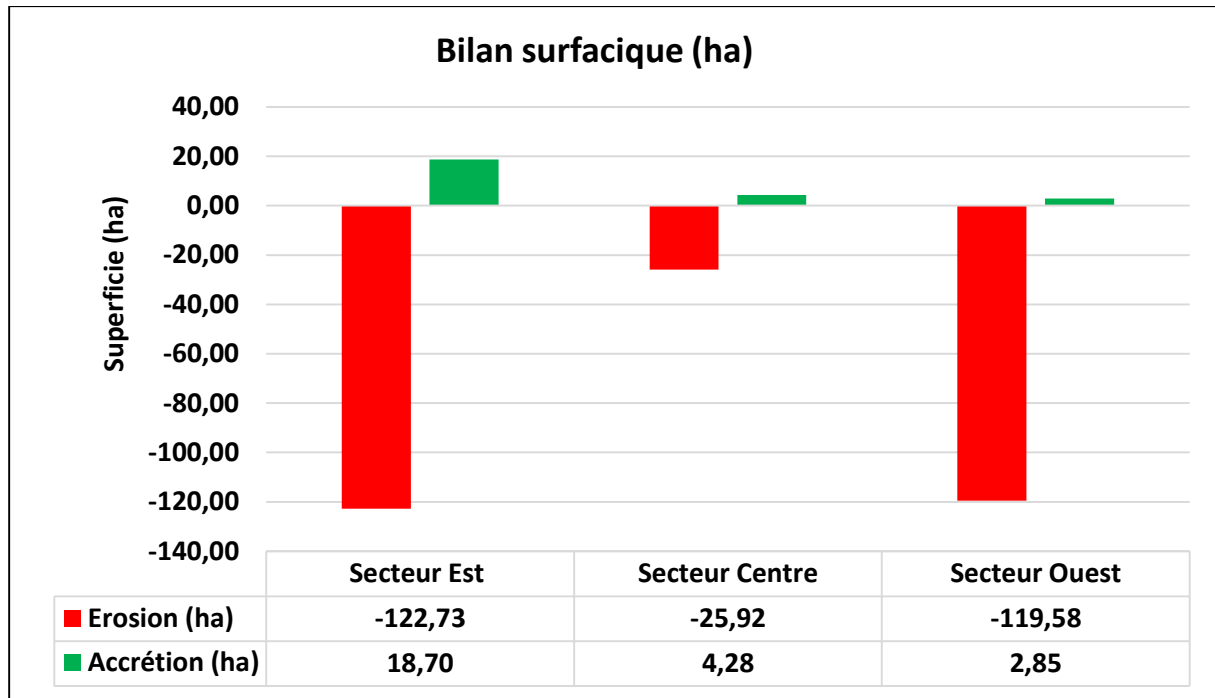


Figure 41 : Le bilan surfacique par secteur.

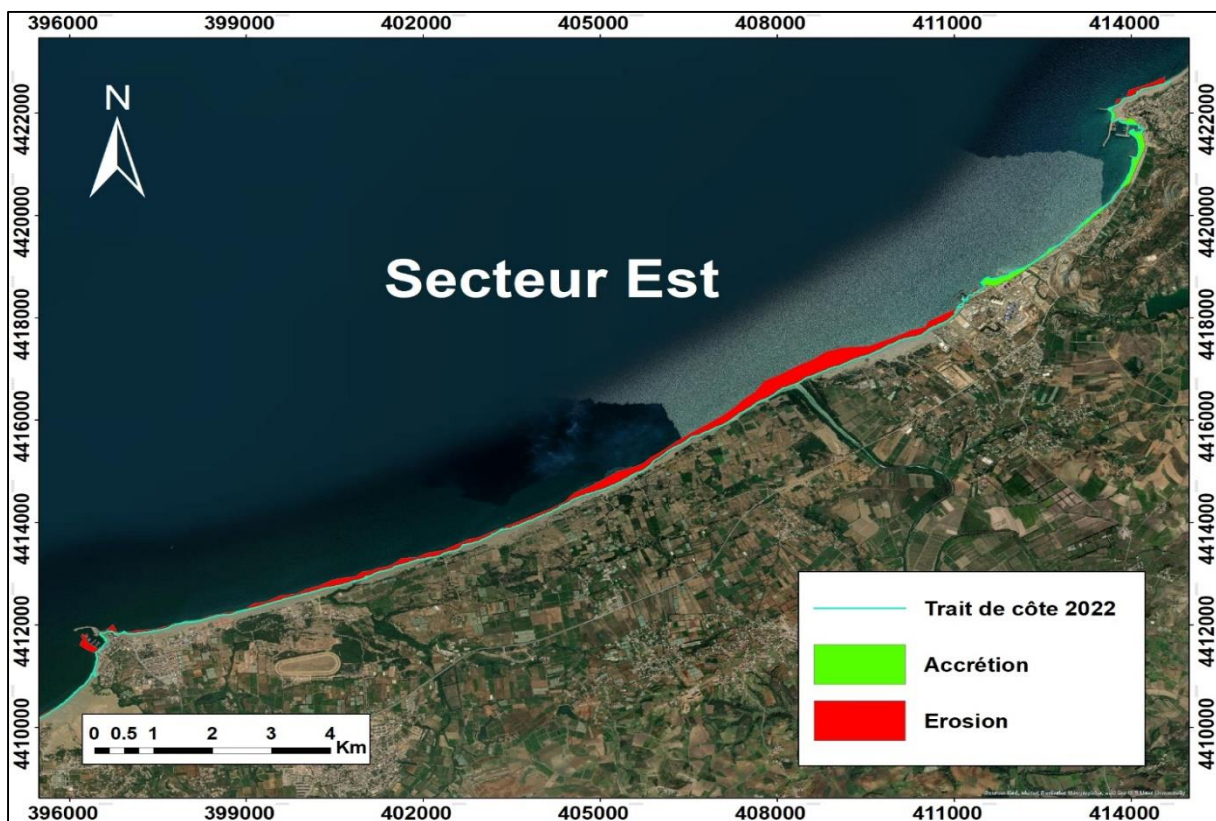


Figure 42 : Bilan surfacique du secteur Est de la baie de Zemmouri durant la période 1972 à 2022.

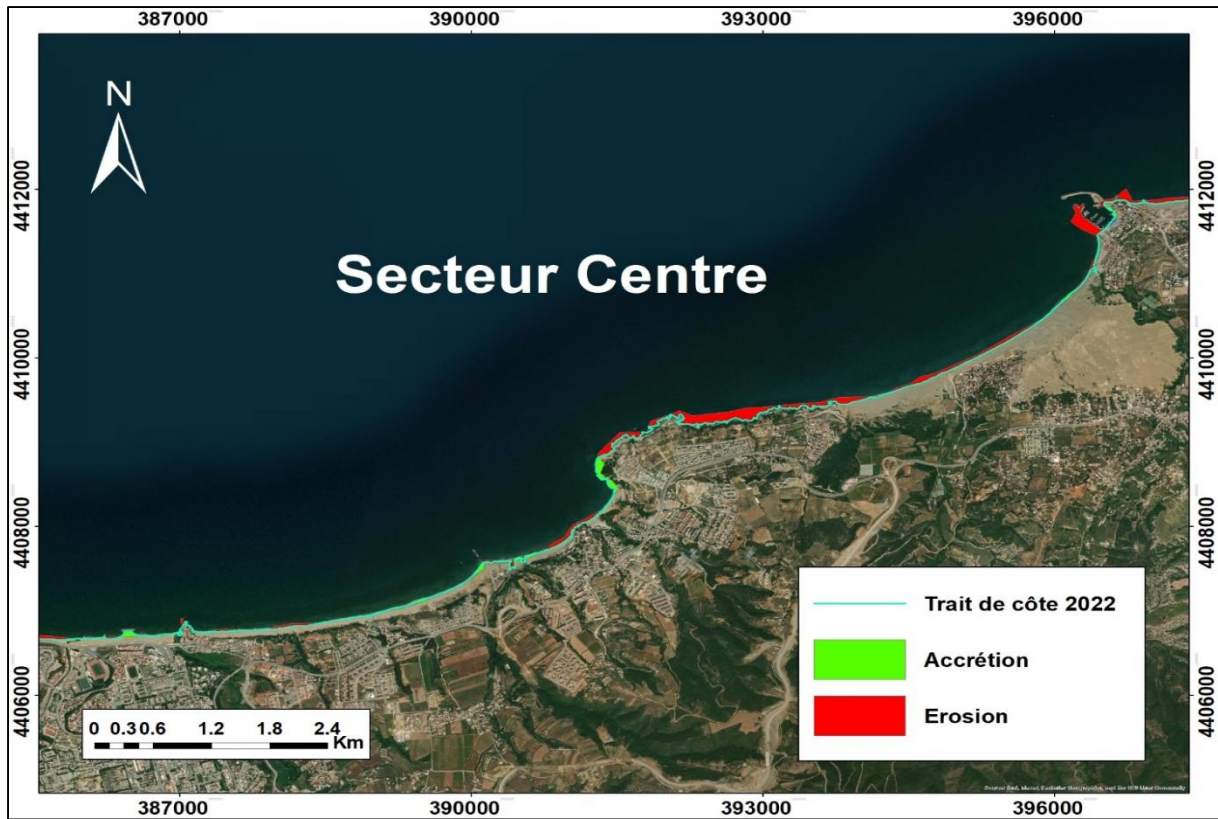


Figure 43 : Bilan surfacique du secteur Centre de la baie de Zemmouri durant la période 1972 à 2022.

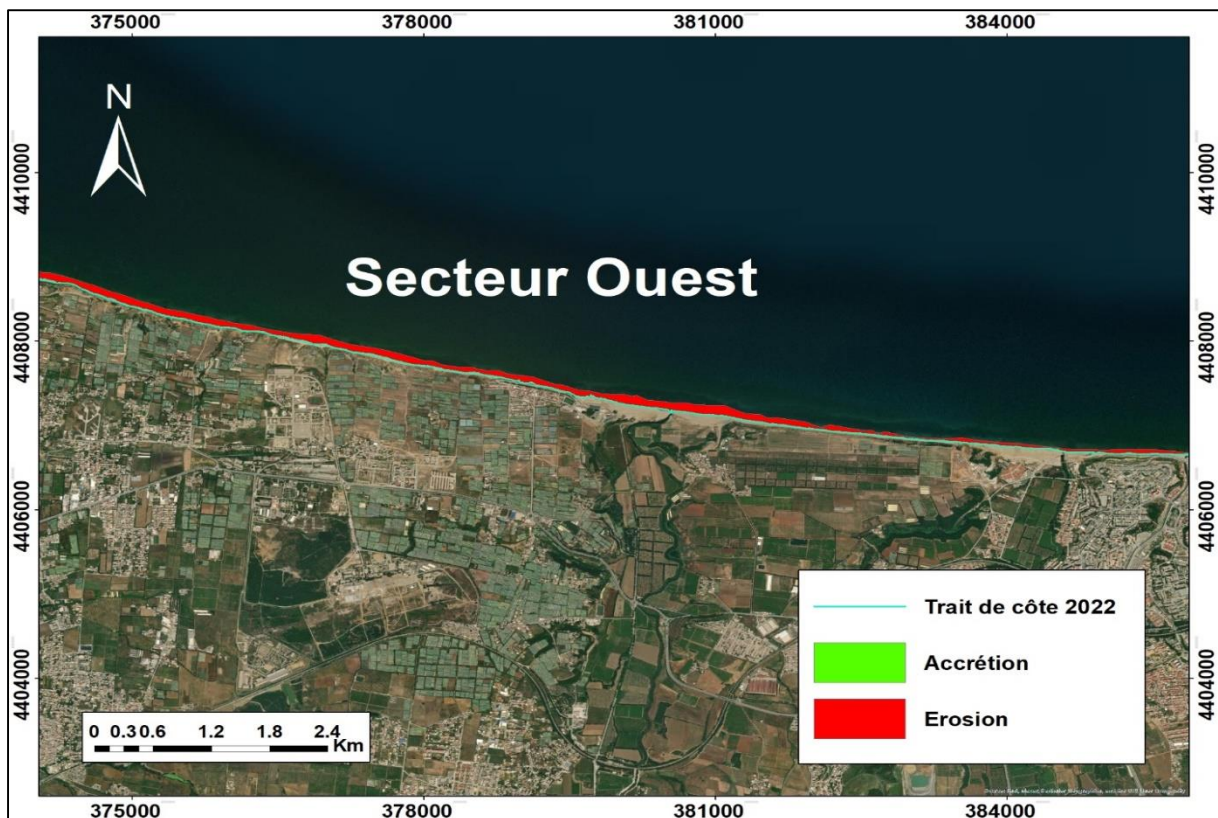


Figure 44 : Bilan surfacique du secteur Ouest de la baie de Zemmouri durant la période 1972 à 2022.

7 Evolution prévisionnelle à l'horizon 2044 :

Après une étude précise de la morpho dynamique littorale de la baie de zemmouri pour une période de 50 ans (1972-2022), on est face maintenant à une étude de moyen terme (2022-2044) donc une provision de 22 ans. Les résultats d'évolution provisionnelle du trait de côte 2022-2044 obtenue par l'utilisation de l'outil (Beta shoreline forecasting) de l'extension DSAS, cet outil permet de faire des prévisions sur l'éventuel position du trait de côte dans 10 ou 20 ans mais il nécessite au minimum 4 positions de traits de côte. Le calcul est réalisé en utilisant le filtre de Kalman en combinant les positions du trait de côte avec les positions dérivées à partir d'un modèle.

On anticipe une augmentation considérable de l'érosion d'ici 2044. Les résultats de l'analyse statistique des changements du trait de côte révèlent une diminution moyenne d'environ -1,20 mètre par an sur la majorité de la ligne côtière.

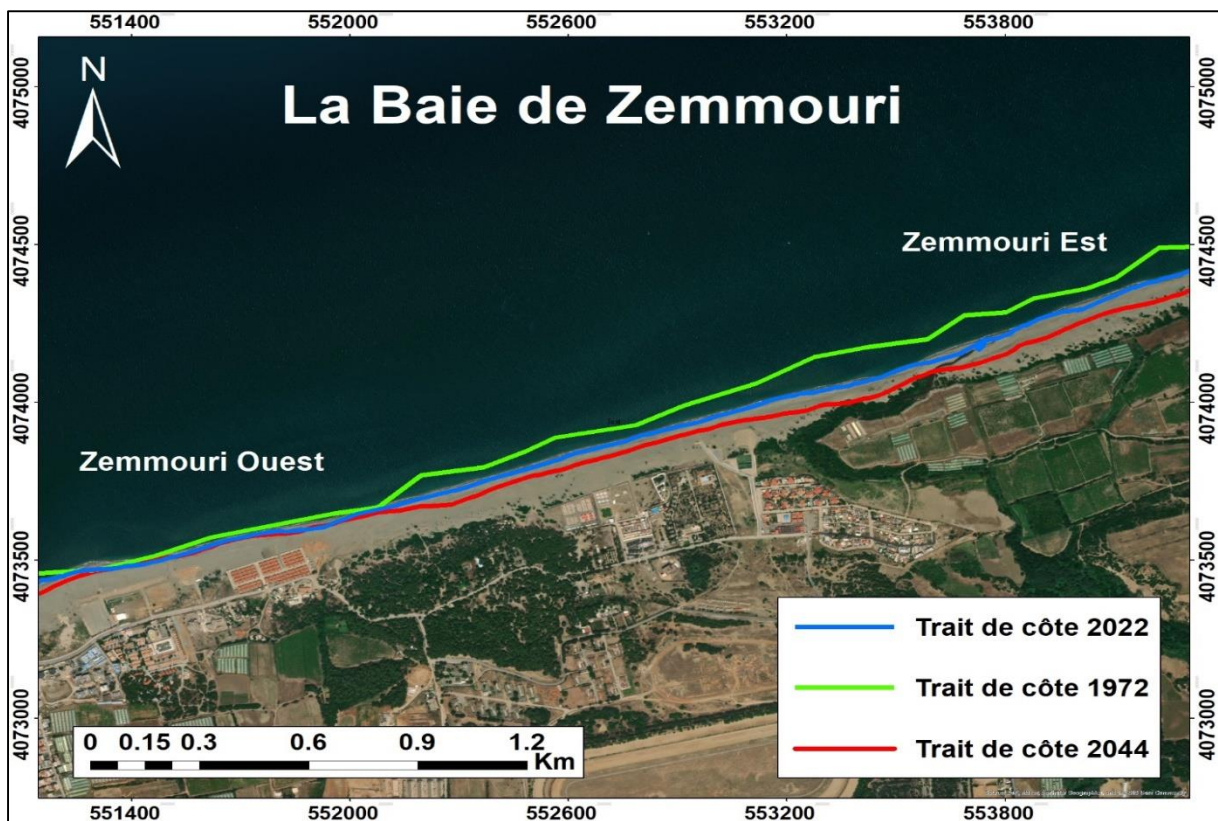


Figure 45 : position du trait de côte en 2044 dans zone Zemmouri Ouest – Zemmouri Est.

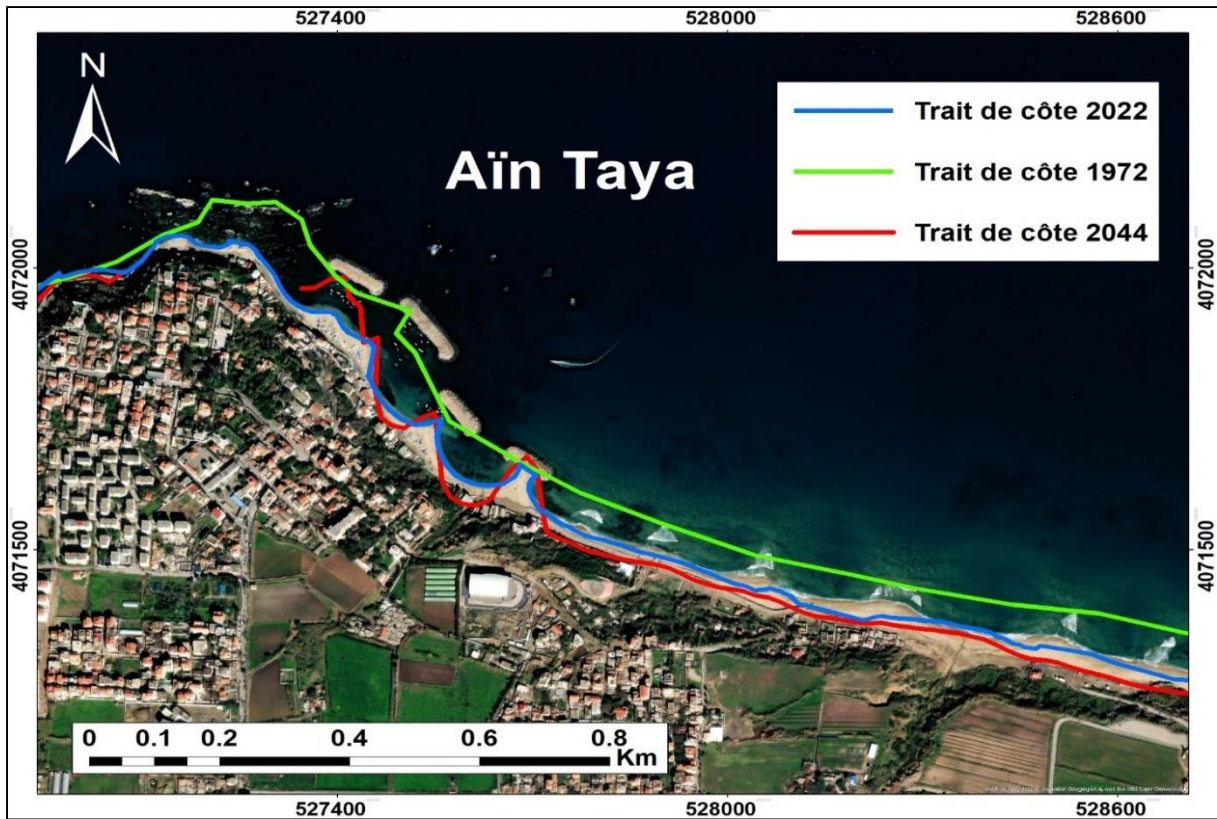


Figure 46 : position du trait de côte en 2044 dans zone d'Ain Taya.

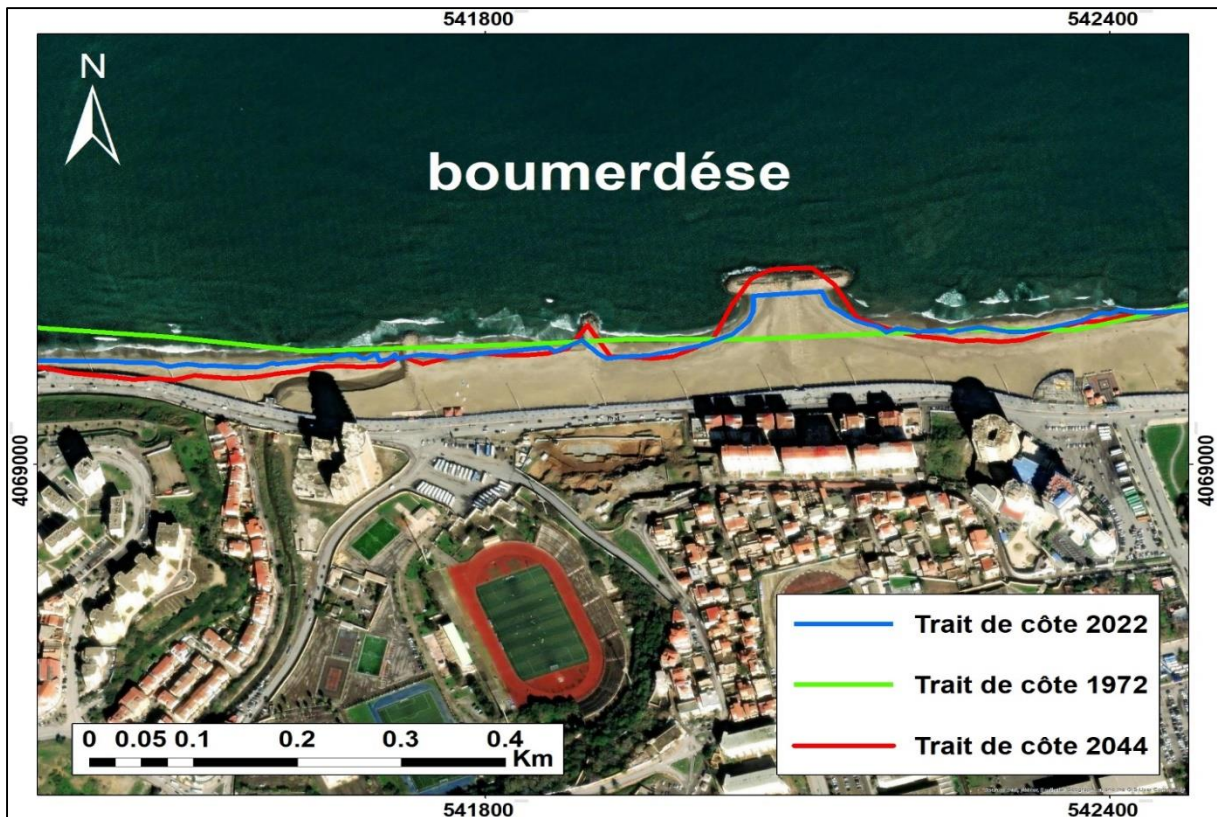


Figure 47 : position du trait de côte en 2044 dans zone de Boumerdes.

➤ **Commentaire :**

D'ici à 2044, une érosion majeure (allant de forte à très forte), s'est produite le long du littoral de notre zone d'étude. Selon l'analyse statistique des variations du trait de côte (**Figure 48**), la baie de Zemmouri a connu une érosion avec une vitesse moyenne de -1,20 m/an.

Les résultats obtenus dans la partie Est de cette zone côtière révèlent la présence des zones en accrétion et d'autre en recul, avec un taux maximum de progradation atteignant 13,86 m/an près du port du Cap Djinet et sur la plage de Djinet familiale cela peut être attribué en partie aux installations portuaires et aux ouvrages de protection (Cap Djinet), même aussi l'énergie des houles et des vagues qui joue un rôle très important dans le transport des sédiments. Cependant, la plage de Douar Mendil présente la plus grande moyenne d'érosion, avec une valeur d'EPR de -5,56 m/an.

Dans la région ouest, on constate un recul significatif beaucoup plus prononcé par rapport à la région centrale. Le taux d'érosion est compris entre -1,29 et -1,86 m/an dans la région ouest, tandis qu'il se situe entre -0,29 et -0,44 m/an dans la région centrale.

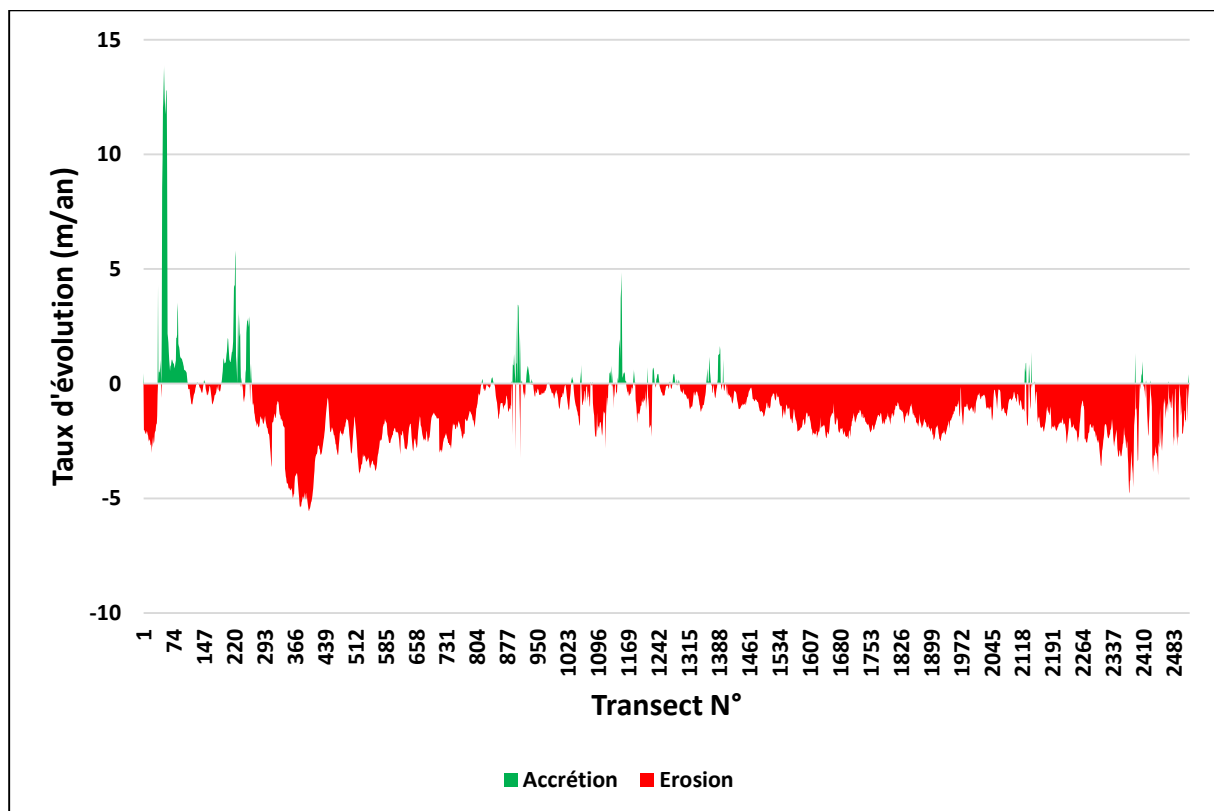


Figure 48 : Le taux d'évolution EPR de la baie de Zemmouri d'ici 2044.

8 Conclusion :

Une analyse spatio-temporelle de l'évolution du rivage de la baie de Zemmouri entre 1972 et 2022 a démontré un processus d'érosion prédominant, notamment dans les parties Est et Ouest. Cette érosion s'est caractérisée par un taux moyen de recul de -1,2 mètre par an le long de la côte de Zemmouri.

Les causes de ce recul peuvent être dues à la fois à des facteurs naturels et anthropiques. Les causes naturelles d'érosion dans les plages de la baie de Zemmouri sont dues principalement

aux effets répétés et cumulés des tempêtes et dans la hausse relative du niveau moyen de la mer. Des enregistrements marégraphiques indiquent un relèvement au niveau de la mer Méditerranée de l'ordre de 1.2 à 1.5 mm par an depuis environ un siècle. Les causes anthropiques peuvent être dues aux extractions massives et arbitraires des quantités requises pour l'essor urbain que connaît la Wilaya d'Alger depuis le début des années 1970. Pour répondre à cette forte demande plusieurs sites d'extraction de sables ont été ouverts le long de la côte de la Wilaya de Boumerdes. Ces extractions ont touché simultanément les lits d'oueds, les plages et le cordon dunaire de Zemmouri qui a été complètement détruit (**Aoudj et al., 2020a**).

Chapitre IV : Analyse des évènements extrêmes.

1 Introduction :

Les événements extrêmes se caractérisent par deux aspects. Premièrement, ils sont rares par essence, au sens où leur probabilité d'occurrence est très faible (en revanche, le fait qu'un événement soit rare n'implique pas qu'il soit extrême). Deuxièmement, ils ont d'énormes impacts, qu'ils soient humains, économiques ou financiers. C'est pour cette dernière raison qu'il est d'un grand intérêt de s'en prémunir, soit en tentant de les éviter, soit en atténuant leur impact. Dans tous les cas, cela suppose de pouvoir les prédire et d'en évaluer l'importance (Albert, 2018).

La détermination des caractéristiques des fortes houles et de leurs périodes de retour, est un enjeu majeur pour les études des risques de submersions marines et d'érosion du rivage (Yao *et al.*, 2022).

Dans ce chapitre on va utiliser des différentes méthodes dans le but de prédire la vague la plus haute qui pourrait se produire sur une période donnée (la période de retour), Les vagues qui sont particulièrement intéressantes sont celles qui ont une période de retour de 100 ans parce que la vague centenaire est fréquemment utilisée par les ingénieurs dans la conception des ouvrages côtiers.

2 Théorie des valeurs extrêmes (EVT) :

La théorie des valeurs extrêmes (EVT) est une branche de la statistique développée pour caractériser la distribution du maximum de l'échantillon ou la distribution des valeurs supérieures à un seuil donné. L'intérêt de cette théorie réside dans le comportement asymptotique des valeurs extrêmes d'un échantillon, l'objectif de l'analyse des valeurs extrêmes est de modéliser le risque d'événements extrêmes et rares en trouvant des estimations fiables de la fréquence de ces événements (Rébillat *et al.*, 2018), on peut utiliser dans plusieurs domaines tel que le génie côtier et environnement etc.

En statistique, il existe deux méthodes principales pour définir les valeurs extrêmes. La première est l'approche des Blocs Maximas. Pour cette approche, la période couverte par l'ensemble de données est divisée en blocs, la valeur la plus extrême de chaque bloc étant utilisée pour les analyses futures (par exemple, les maxima quotidiens ou mensuels). La deuxième méthode est basée sur les dépassements d'un seuil choisi (u), appelée la méthode Peaks Over Threshold (POT) (Stander, 2015)

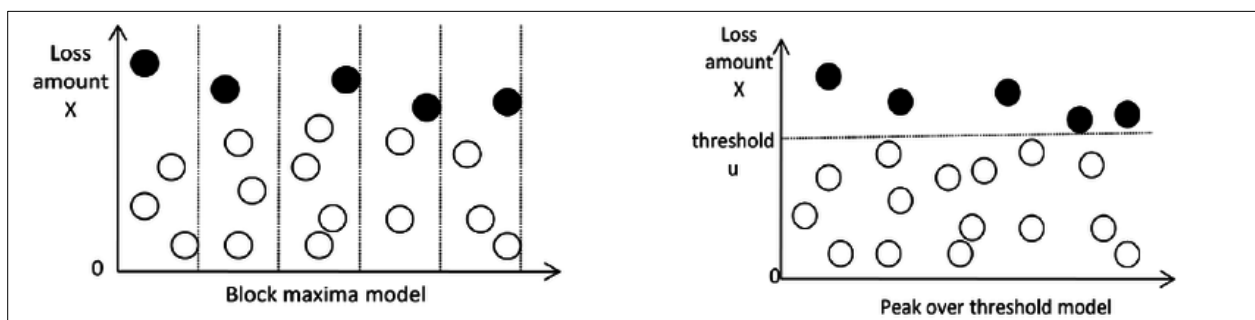


Figure 49 : Schéma représentatif des méthodes blocks maxima et POT.

Dans la méthode des maxima par blocs, des blocs de taille identique sont constitués puis seulement le maximum de chacun d'eux est utilisé pour ajuster une loi GEV. Ce choix des

blocs est généralement arbitraire, et on perd généralement de l'information sur les événements extrêmes qui par nature sont déjà peu observés. Par exemple plusieurs événements extrêmes intéressants peuvent être mis dans un même bloc alors qu'un autre bloc ne contient pas d'événement "extrême" ! En pratique, cela signifie qu'il faut beaucoup de données pour pouvoir mettre en place la méthode des maxima par blocs (typiquement quelques décennies si on fait des blocs annuels), ce qui n'est généralement pas le cas. Une alternative à la méthode des maxima par blocs consiste à conserver toutes les observations qui dépassent un niveau élevé puis à ajuster une loi appropriée à ces dépassements qui représente les événements "extrêmes". Cette méthode est généralement appelée méthode des dépassements de seuil (ou "Peak Over Threshold", POT) (Tiogum *et al.*, 2018).

3 Loi GEV (Generalized Extreme Value) et méthode de Block Maxima (BM) :

3.1 Méthode des maxima par blocs :

Il s'agit d'une technique statistique utilisée pour la modélisation et la prévision d'événements extrêmes, le principe de cette méthode est de découper une série chronologique en blocs de temps égaux (par exemple 1 an) et détermine la valeur maximale de chaque bloc pour ajuster une distribution de probabilité dans le but d'estimer les périodes de retour de ces événements extrêmes dans le futur.

3.2 Loi GEV (Generalized Extremes Values) :

La méthode BM est largement adaptée à l'application de la distribution de la valeur extrême généralisée (GEV). La distribution GEV réunit les distributions de Gumbel, Fréchet et Weibull en une seule famille afin de permettre une gamme continue de formes possibles. Un modèle unique de distribution GEV à trois paramètres possède la fonction de distribution cumulative suivante (Özari *et al.*, 2019) :

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-\frac{1}{\xi}} \right\} \quad \xi \neq 0 \quad (3)$$

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[\exp \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right] \right\} \quad \xi = 0 \quad (4)$$

Où μ est la localisation, σ est l'échelle et ξ est la forme du paramètre.

La distribution GEV englobe trois distributions limites de valeur extrême, en fonction de la valeur du paramètre de la forme :

Si $\xi > 0$, elle convient à la distribution de Fréchet.

Si $\xi < 0$, elle convient à la distribution de Weibull.

Si $\xi = 0$, elle convient à la distribution de Gumbel.

Dans ce chapitre, nous avons choisi deux méthodes de distribution de GEV (Gumbel et Weibull) dans le but d'extraire les périodes de retours.

Après l'analyse des données avec le langage **python** via la bibliothèque **pyextreme**, les résultats obtenus sont présentés sous forme de graphes et de tableaux.

Les valeurs extrêmes maximales sont extraites de séries temporelles en les divisant en blocs de même durée (1an) et en localisant les valeurs maximales l'intérieur de chaque bloc, selon le

théorème de Fisher-Tippett-Gnedenko, ces valeurs maximales suivent asymptotiquement la famille de distribution des valeurs extrêmes généralisées (GEV).

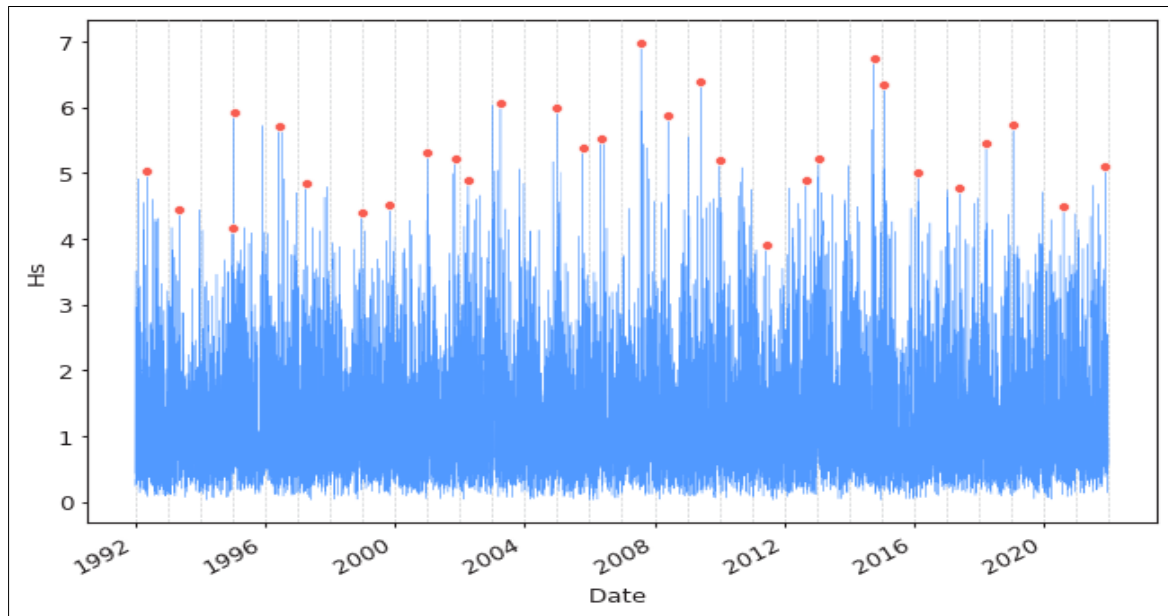


Figure 50 : Représentation de méthode des Blocs Maximas sur les hauteurs de houle de 1992 – 2021.

Après avoir choisi les valeurs maximales pour chaque année, on procède immédiatement au calcul des hauteurs de houles correspondantes pour chaque période de retour.

3.2.1 Résultats GEV avec la distribution de Gumbel :

Les résultats sont figurants dans le graph (**Figure 51**), ce graph représente les valeurs de hauteurs de houles via la distribution de Gumbel pour l’omnidirectionnel en fonctions des périodes de retour de 2 jusqu’à 1000 ans, les traits rouges et vertes sont représentés respectivement les limites supérieure et inférieure de notre intervalle de confiance pour les valeurs extrêmes estimée avec un niveau de confiance de 85% cela signifie que nous sommes prêts à accepter un risque de 15% que la vraie valeur de population ne se trouve pas dans l'intervalle de confiance calculé.

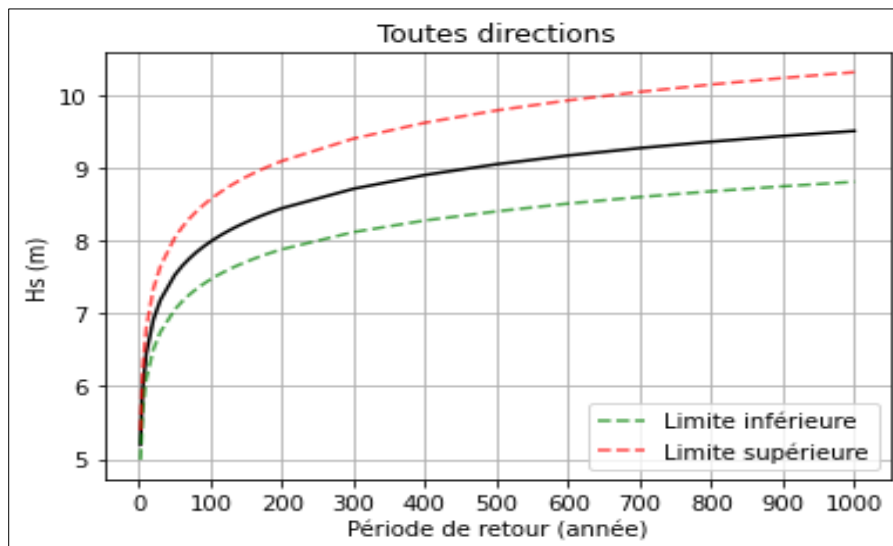


Figure 51 : Estimation des événements extrêmes via la distribution de Gumbel pour l'omnidirectionnel.

Pour faciliter la lecture des résultats obtenus par l'utilisation de la distribution de Gumbel, un tableau récapitulatif des hauteurs extrêmes en fonction de la période de retour de ces événements dans le futur est présenté (**Tableau 9**).

Tableau 9 : Tableau résumant l'ensemble des résultats obtenu par la méthode GEV selon la distribution de Gumbel.

GEV distribution de Gumbel									
Hauteur de vague par direction (mètre)									
Période de retour (année)	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	Omni
2	4,54	4,10	4,18	4,08	4,39	4,27	2,74	2,50	5,20
5	5,25	4,88	4,94	4,70	5,31	5,04	3,18	3,02	5,94
10	5,72	5,39	5,45	5,11	5,92	5,55	3,47	3,36	6,44
20	6,17	5,88	5,93	5,50	6,50	6,04	3,75	3,69	6,91
30	6,43	6,16	6,21	5,73	6,84	6,32	3,91	3,88	7,19
50	6,75	6,52	6,56	6,01	7,26	6,68	4,11	4,12	7,53
100	7,19	6,99	7,03	6,39	7,83	7,15	4,38	4,44	7,99
1000	8,64	8,57	8,59	7,65	9,71	8,72	5,27	5,50	9,51

Le (**Tableau 9**) présente les hauteurs de houles prédites par la distribution de Gumbel pour les périodes de retour allant de 2 à 1000 ans. Il ressort que la direction Nord-Est est la moins susceptible de causer une houle extrême, tandis que les directions les plus susceptibles de provoquer des hauteurs de houle plus élevées sont le Nord, le Nord-Nord-Est et l'Ouest. Par contre l'analyse des hauteurs omnidirectionnelles donne les résultats les plus grands car le modèle simule avec les hauteurs maximales qui puissent exister dans notre série de données la période de retour de 1000 ans.

De plus, nous avons remarqué certaines anomalies concernant la période de retour de 1000 ans où la hauteur estimée de la direction Nord dépasse celle-ci estimée dans le cas omnidirectionnel, car nous avons travaillé avec une base de données de 30 ans qui n'est pas suffisante pour prédire à 1000 ans lors de l'application de cette distribution.

3.2.2 Résultats GEV avec la distribution de Weibull :

Les résultats sont figurants dans le graph (**Figure 52**), ce graph représente les valeurs de hauteurs de houles via la distribution de Weibull pour l'omnidirectionnel en fonctions des périodes de retour de 2 jusqu'à 1000 ans, les traits rouges et vertes sont représentés respectivement les limites supérieure et inférieure de notre intervalle de confiance pour les valeurs extrêmes estimée avec un niveau de confiance de 85% cela signifie que nous sommes prêts à accepter un risque de 15% que la vraie valeur de population ne se trouve pas dans l'intervalle de confiance calculé.

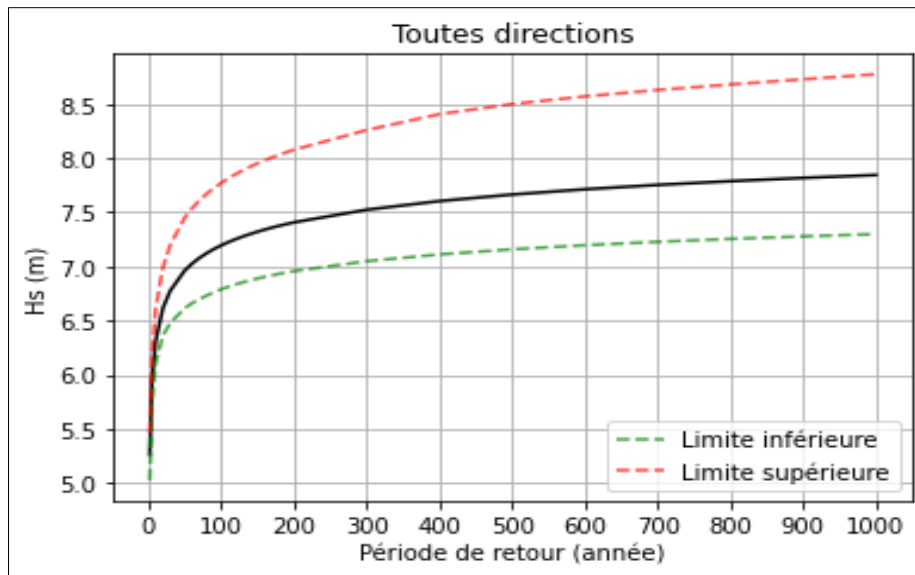


Figure 52 : Estimation des événements extrêmes via la distribution de Weibull pour l'omnidirectionnel.

Afin de mieux lire les résultats obtenus par l'utilisation de la distribution de Weibull, le tableau suivant (**Tableau 10**) résume l'ensemble de hauteurs extrêmes obtenues selon les périodes de retour de ces événements extrêmes dans le futur.

A partir du (**Tableau 10**) qui représente les résultats des hauteurs de houles prédites par la distribution de Weibull pour les périodes de retour 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100 et 1000 ans. On remarque que la direction Nord-Est la moins susceptible d'engendrer une houle extrême, d'autre part, les directions les plus susceptibles d'engendrer des hauteurs de houle plus élevées sont le Nord devant le Nord-Nord-Ouest et le Nord-Ouest.

Par contre l'analyse des hauteurs omnidirectionnelles donne les résultats les plus grands car le modèle simule avec les hauteurs maximales qui puissent exister dans notre série de données à l'exception la période de retour de 1000 ans.

De plus, nous avons remarqué aussi certaines anomalies concernant la période de retour de 1000 ans où la hauteur estimée des directions Nord et Nord-Nord-Ouest dépasse celle-ci estimée dans le cas omnidirectionnel, car nous avons travaillé avec une base de données de 30 ans qui n'est pas suffisante pour prédire à 1000 ans lors de l'application de cette distribution.

Tableau 10 : Tableau résumant l'ensemble des résultats obtenu par la méthode GEV selon la distribution de Weibull.

GEV distribution de Weibull									
Hauteur de vague par direction (mètre)									
Période de retour (année)	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	Omni
2	4,61	4,18	4,21	4,05	4,36	4,33	2,75	2,51	5,26
5	5,21	4,85	4,95	4,81	5,36	5,04	3,22	3,05	5,94
10	5,52	5,20	5,37	5,30	5,98	5,43	3,50	3,40	6,31
20	5,77	5,49	5,74	5,75	6,53	5,76	3,75	3,70	6,61
30	5,90	5,64	5,94	6,00	6,84	5,93	3,88	3,87	6,78
50	6,04	5,82	6,17	6,30	7,20	6,13	4,04	4,08	6,96
100	6,23	6,04	6,46	6,69	7,67	6,38	4,25	4,34	7,19
1000	6,72	6,06	7,29	7,90	9,07	7,09	4,85	5,12	7,84

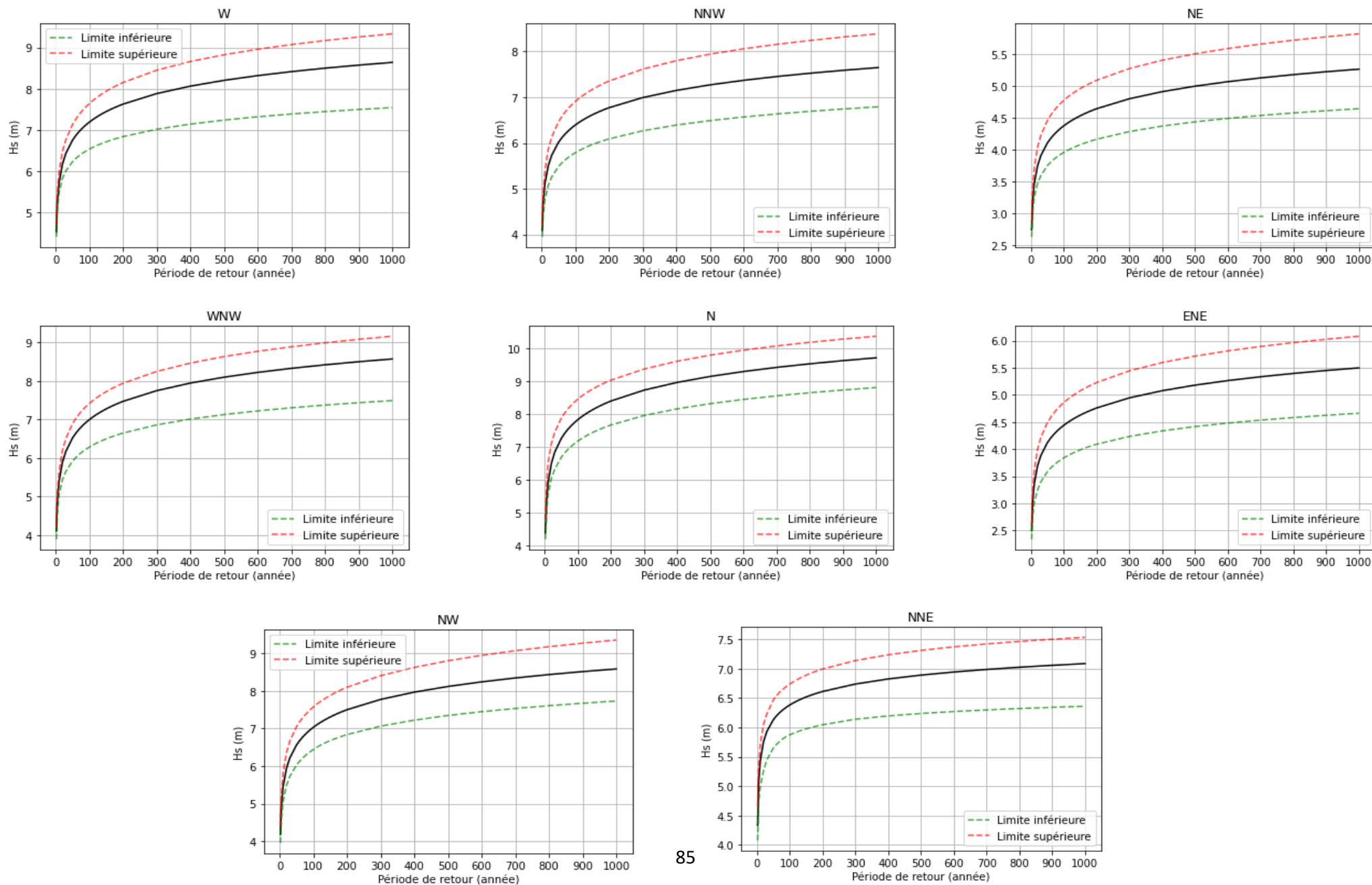


Figure 53 : Estimation des évènements extrêmes via la distribution de Gumbel pour chaque direction.

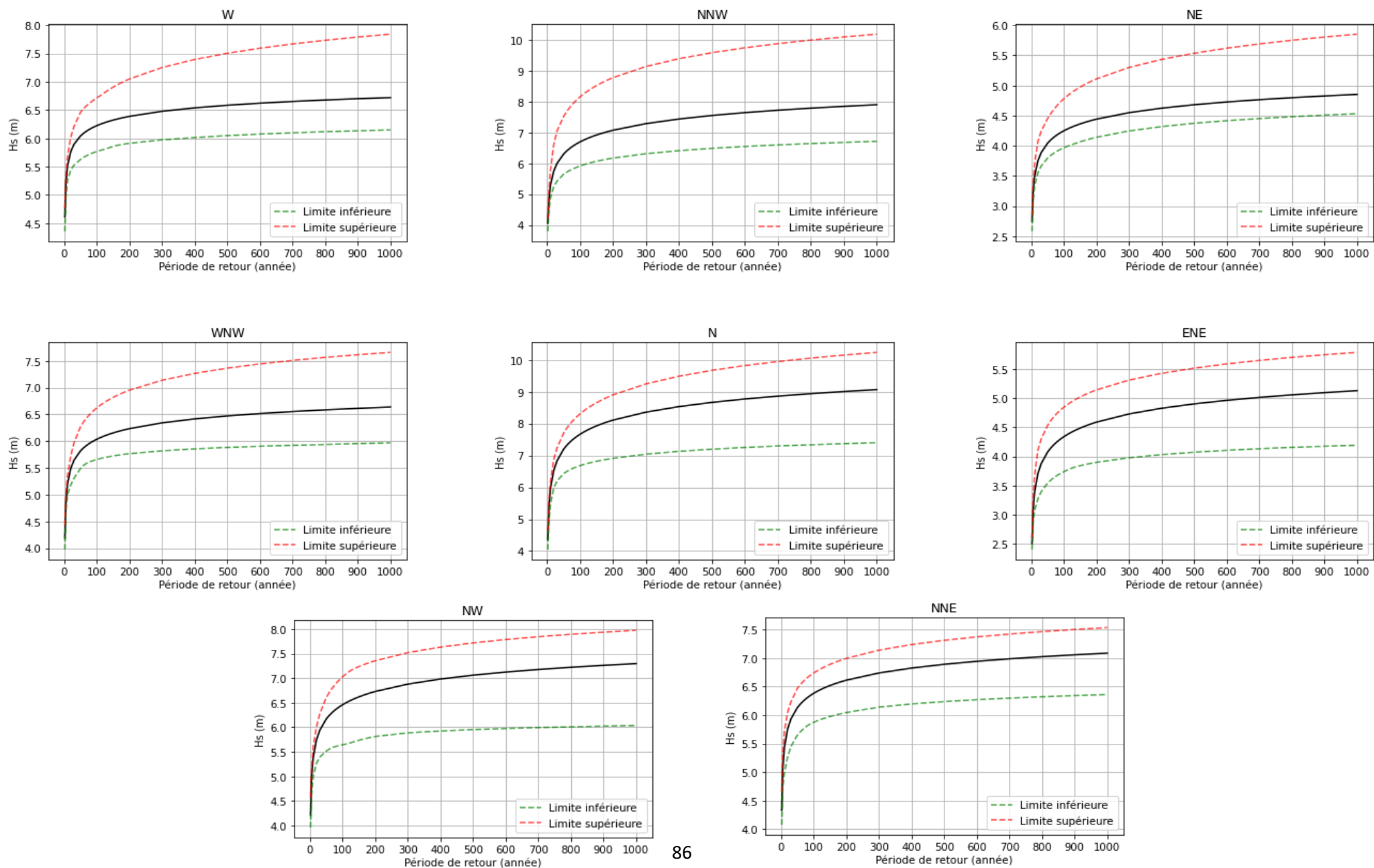


Figure 54 : Estimation des événements extrêmes via la distribution de Weibull pour chaque direction.

4 Le critère d'information d'Akaike (AIC) :

L'AIC a été développé par le statisticien japonais Hirotugu Akaike en 1974, c'est une statistique utile pour l'identification et l'évaluation des modèles statistiques (**Takane et Bozdogan, 1987**), le principe de ce critère est de comparer les différents modèles qui ont été ajustés aux mêmes données selon leur complexité (nombre de paramètres) et sa capacité d'ajuster les données (réduction de l'erreur de prédiction), on pénalise tous les modèles complexes qui ne donnent pas un meilleur ajustement aux données, l'expression générale de l'AIC est la suivante :

$$AIC = 2k - 2 \ln(L) \quad (5)$$

Où k est le nombre de paramètres à estimer du modèle et L est le maximum de la fonction de vraisemblance du modèle, L'AIC a pour but de trouver le modèle qui minimise cette fonction c'est-à-dire il choisit l'AIC le plus faible est considéré comme étant le meilleur modèle pour ajuster les données observées.

Pour déterminer quelle distribution convient le mieux à nos données, qu'il s'agisse de la distribution de Gumbel ou de celle de Weibull, nous avons utilisé le critère d'information d'Akaike (AIC).

En utilisant un script **Python** de la bibliothèque **Scipy** et **Scipy.stats**, nous avons trouvé que l'AIC (Weibull) était égal à 169967,45, ce qui est supérieur à l'AIC (Gumbel), qui est égal à 169121,61. Par conséquent, selon l'AIC, la distribution Gumbel, qui a la valeur la plus faible, est la meilleure pour ajuster nos données.

5 Loi GPD (Generalized Pareto Distribution) et méthode de dépassement de seuil :

5.1 Méthode de dépassement de seuil (Peak Over Threshold (POT)) :

La méthode Peak Over Threshold (méthode POT) est une façon de modéliser les valeurs extrêmes. Le concept principal de la méthode consiste à utiliser un seuil pour séparer les valeurs considérées comme extrêmes du reste des données et à créer un modèle pour les valeurs extrêmes en modélisant la queue de toutes les valeurs qui dépassent ce seuil. Cela se fait en pratique en fixant un seuil u à une valeur définie sur \mathbb{R} qui dépasse la plupart mais pas toutes les valeurs définies dans une série temporelle ou un autre vecteur de valeurs collectées. En outre, on peut montrer que pour un seuil u suffisamment grand, la distribution des valeurs dépassant le seuil se rapproche d'une distribution de Pareto générale avec certains paramètres de forme et d'échelle (**Rydman, 2018**).

5.1.1 La détection du seuil :

Le choix du seuil doit établir un compromis entre biais et variance. Concrètement, le seuil doit être suffisamment grand pour pouvoir utiliser les résultats asymptotiques, mais pas trop élevé pour obtenir des estimations précises. Par contre le choix d'un seuil faible risque de déclarer abusivement des observations extrêmes, introduire un biais dans l'estimation et par conséquent, mal approximer la loi asymptotique. Dans ce sens, plusieurs méthodes de détection du seuil ont été proposées, nous utilisons celle qui est la plus employée à savoir la fonction d'excès en moyenne (mean excess plot ou mean residual life plot (ME-plot)).(**Djouadi et Meradi, 2016**).

Avant d'établir le seuil, nous avons utilisé la bibliothèque **pyextreme** du langage **Python** pour calculer la moyenne résiduelle et suivre ses fluctuations. Ceci nous a permis de sélectionner le seuil optimal en se basant sur la ligne droite qui précède les variations de la moyenne résiduelle.

La valeur de 4,05 m a été choisie comme seuil.

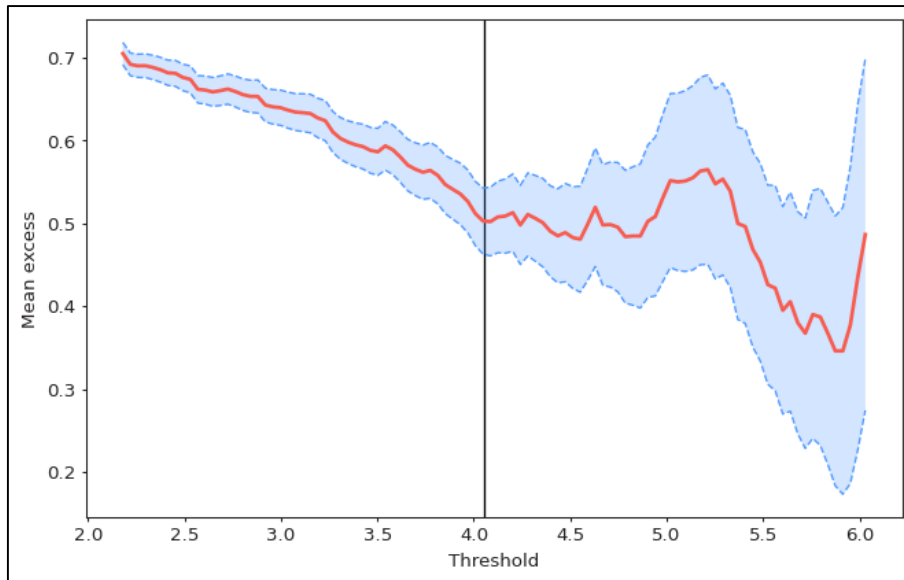


Figure 55 : Moyenne résiduelle de la série des hauteurs omnidirectionnelle de l'enregistrement.

5.2 Loi de Pareto généralisée (GPD) :

La POT se concentre sur les réalisations dépassant un seuil (élevé) donné u . Avec la POT, **(Balkema et Haan, 1974)** et **(Pickands, 1975)** affirment que, pour un u suffisamment grand, elle est bien approximée par la distribution de Pareto généralisée (GPD), comme le montre l'équation (1) **(Özari et al., 2019)** :

$$GPD_{\xi, \mu, \sigma} F(x) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}} & \text{Si } \xi \neq 0 \\ 1 - \exp\left\{-\frac{x - \mu}{\sigma}\right\} & \text{Si } \xi = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Où μ est la localisation, σ est l'échelle et ξ est la forme du paramètre.

Les valeurs extrêmes pris en compte pour le calcul précédent sont présentés sous forme de points rouges dans la figure ci-dessous **(Figure 59)**.

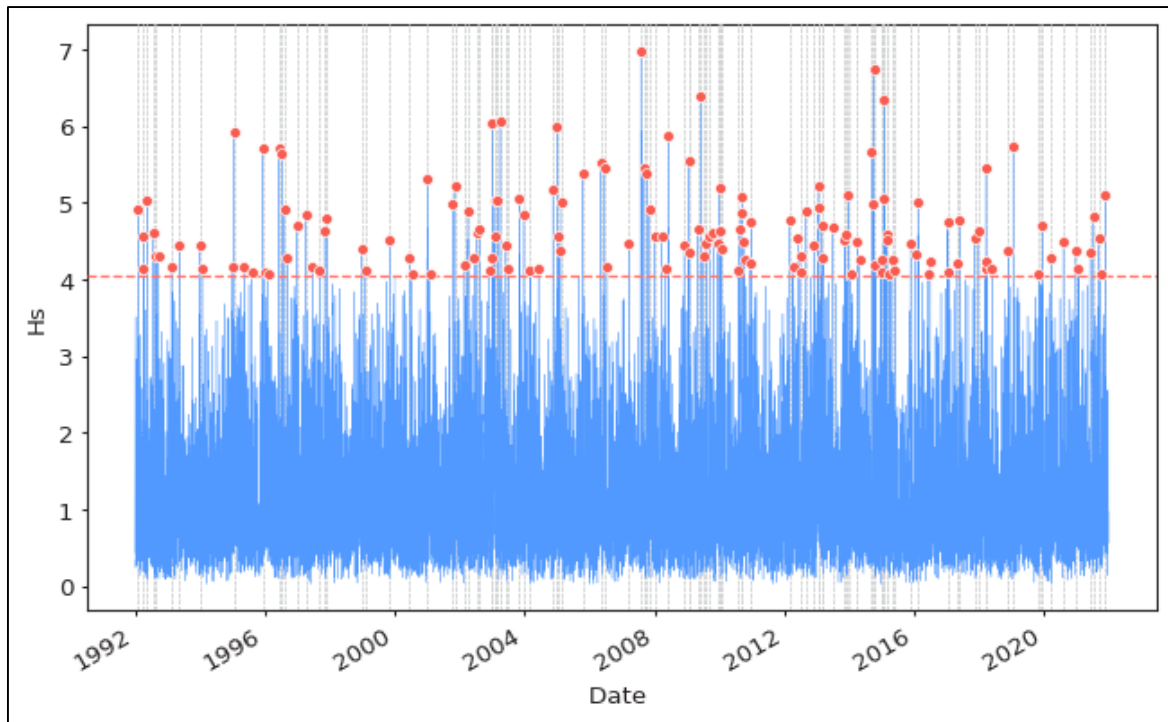


Figure 56 : Représentation de méthode POT sur les hauteurs de houle de 1992 – 2021.

Après avoir achevé l'étape de sélection du seuil, la prochaine étape consiste à utiliser la bibliothèque **pyextreme** en langage **Python** pour calculer les hauteurs de houle avec leurs périodes de retour par la méthode de POT en utilisant la distribution de Pareto généralisée (GPD), Les résultats obtenus sont les suivants :

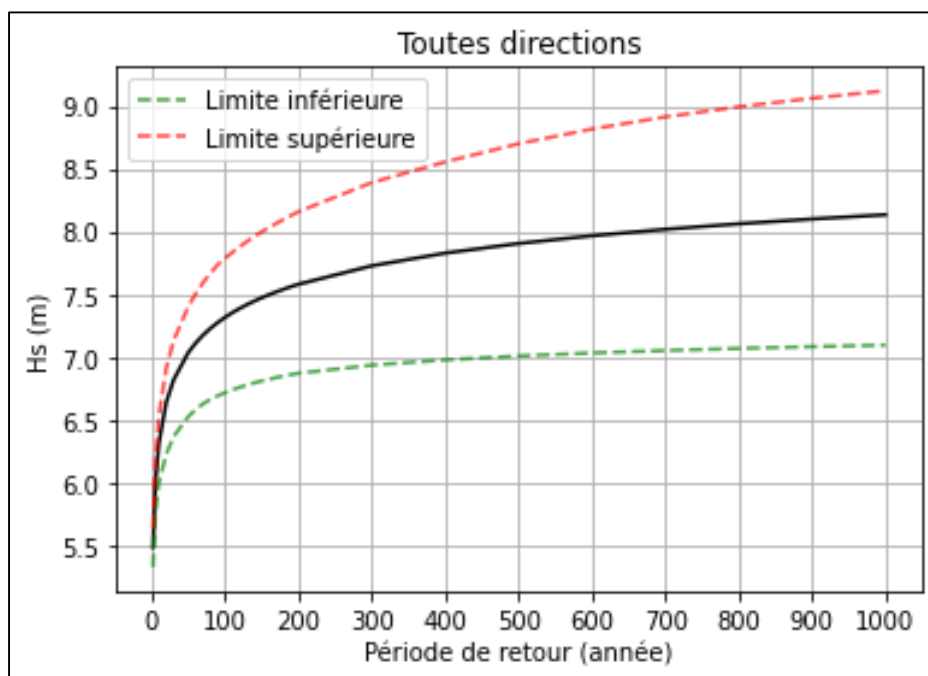


Figure 57 : Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour omnidirectionnel.

Les résultats sont figurants dans le graph (**Figure 57**), ce graph représente les valeurs de hauteurs de houles via la méthode POT pour l'omnidirectionnel en fonctions des périodes de

retour de 2 jusqu'à 1000 ans, les traits rouges et vertes sont représentés respectivement les limites supérieure et inférieure de notre intervalle de confiance pour les valeurs extrêmes estimée avec un niveau de confiance de 85% cela signifie que nous sommes prêts à accepter un risque de 15% que la vraie valeur de population ne se trouve pas dans l'intervalle de confiance calculé.

Pour faciliter la lecture des résultats obtenus par l'utilisation de la méthode POT, un tableau récapitulatif des hauteurs extrêmes en fonction de la période de retour de ces événements dans le futur est présenté dans le (**Tableau 11**).

Tableau 11 : Tableau résumant l'ensemble des résultats obtenu par la méthode POT.

POT									
	Hauteur de vague par direction (mètre)								
Période de retour (année)	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	Omni
2	4,86	4,49	4,48	4,30	4,84	4,67	3,00	2,57	5,48
5	5,29	4,93	5,03	4,91	5,48	5,18	3,32	2,96	5,97
10	5,57	5,19	5,38	5,37	5,95	5,50	3,52	3,32	6,31
20	5,81	5,41	5,69	5,81	6,41	5,76	3,67	3,75	6,64
30	5,94	5,53	5,85	6,07	6,67	5,89	3,75	4,04	6,82
50	6,09	5,65	6,03	6,40	6,99	6,04	3,83	4,46	7,03
100	6,27	5,80	6,25	6,83	7,42	6,21	3,93	5,11	7,32
1000	6,72	6,14	6,80	8,23	8,77	6,60	4,13	8,37	8,13

Le (**Tableau 11**) présente les hauteurs de houles prédites par la méthode de POT pour les périodes de retour allant de 2 à 1000 ans. Il ressort que la direction Nord-Est c'est la moins susceptible de causer une houle extrême, tandis que les directions pénalisantes qui peut provoquer des hauteurs de houle plus élevées sont le Nord, le EST-Nord-Est et le Nord-Nord-Ouest.

Par contre l'analyse des hauteurs omnidirectionnelles donne les résultats les plus grands car le modèle simule avec les hauteurs maximales qui puissent exister dans notre série de données la période de retour de 1000 ans.

De plus, nous avons remarqué certaines anomalies concernant la période de retour de 1000 ans où la hauteur estimée des directions pénalisantes dépasse celle-ci estimée dans le cas omnidirectionnel, car nous avons travaillé avec une base de données de 30 ans qui n'est pas suffisante pour prédire à 1000 ans lors de l'application de cette distribution.

La méthode utilisée pour les huit autres directions est similaire et les résultats pour chacune d'entre elles sont représentés dans la (**Figure 58**).

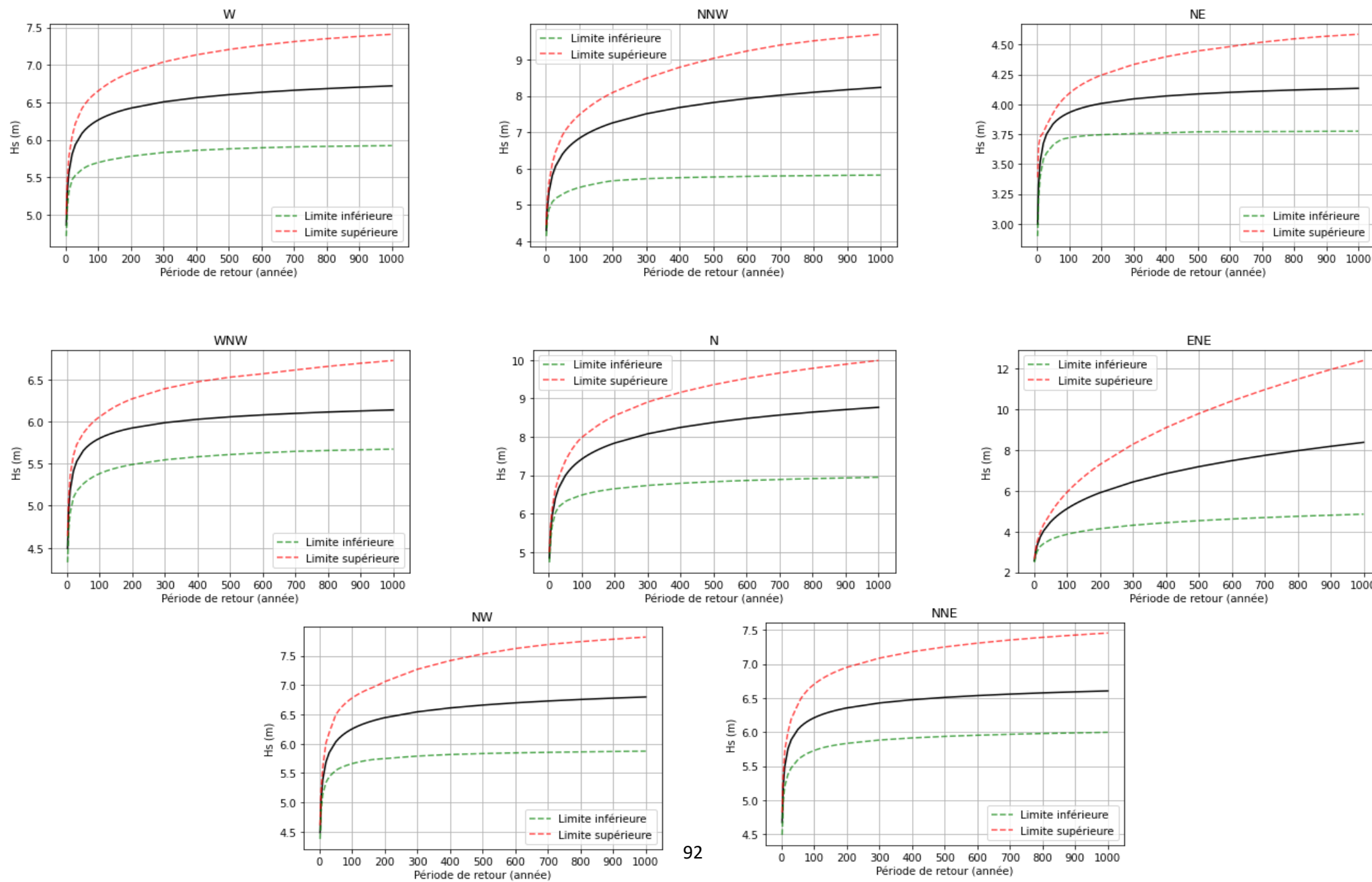


Figure 58 : Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour chaque direction.

6 Comparaison entre les méthodes POT et BM :

Pour comparer les deux méthodes, nous avons choisi la distribution de Pareto généralisée (GPD) pour la méthode POT et la distribution de Gumbel pour la méthode BM, Ainsi pour cette partie, nous allons nous concentrer uniquement sur les résultats de l'omnidirectionnel pour faire cette comparaison.

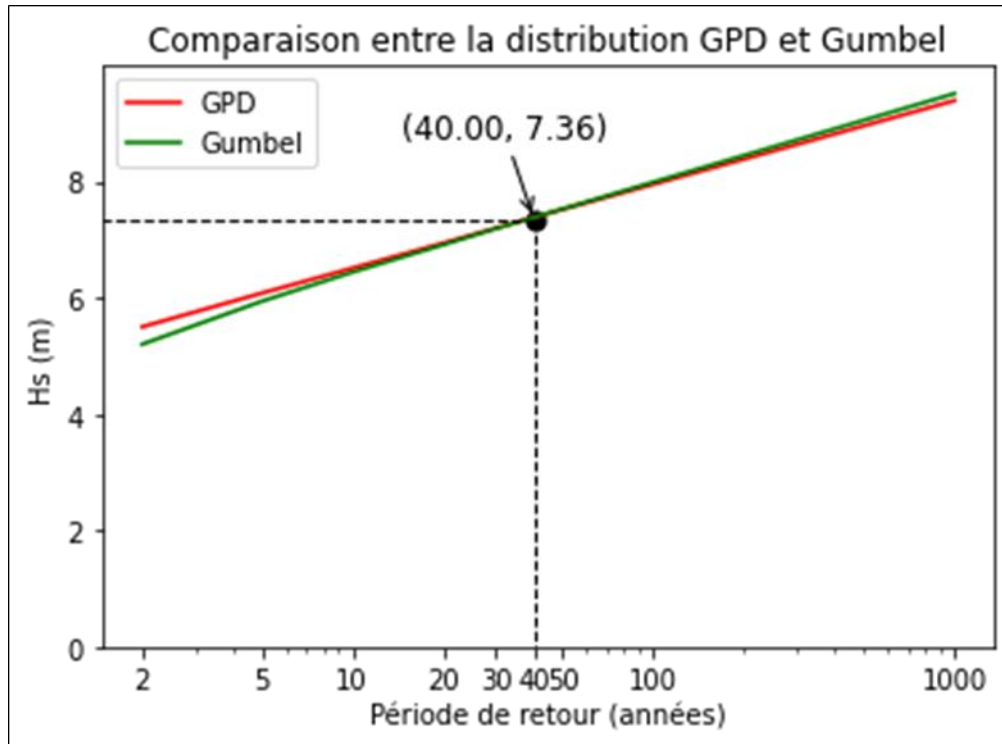


Figure 59 : Comparaison des résultats obtenu avec les deux méthodes GPD et Gumbel.

À partir de la (**Figure 59**) on constate globalement que les deux méthodes semblent fournir des résultats très proches pour l'estimation des hauteurs significatives des houles en fonction de la période de retour, le point d'intersection des deux courbes se situe au niveau d'une période de retour d'environ 40 ans, où la hauteur significative des houles est d'environ 7.36 mètres, on peut donc utiliser ce point pour comparer les résultats des deux méthodes, pour les périodes de retour inférieures à 40 ans la méthode de POT donne des valeurs plus élevées que la méthode BM. Cependant, pour les périodes de retour supérieures à 40 ans, la méthode BM produit des valeurs légèrement supérieures à la méthode Gumbel, la raison de cela est attribuable à la quantité limitée de données utilisées dans la méthode des blocs maxima quand période retour et inférieur à 40 ans, ainsi qu'à leur grandeur relative (le maximum de chaque année).

Nous allons maintenant calculer la corrélation entre les deux méthodes précédentes et nous avons obtenu un coefficient de corrélation de $R=0.99$, ce qui indique mathématiquement une

forte corrélation linéaire positive entre les deux distributions étudiées (GPD et Gumbel) comme le montre la (**Figure 60**). Cela signifie que les valeurs de H_s de ces distributions ont tendance à augmenter ou à diminuer ensemble.

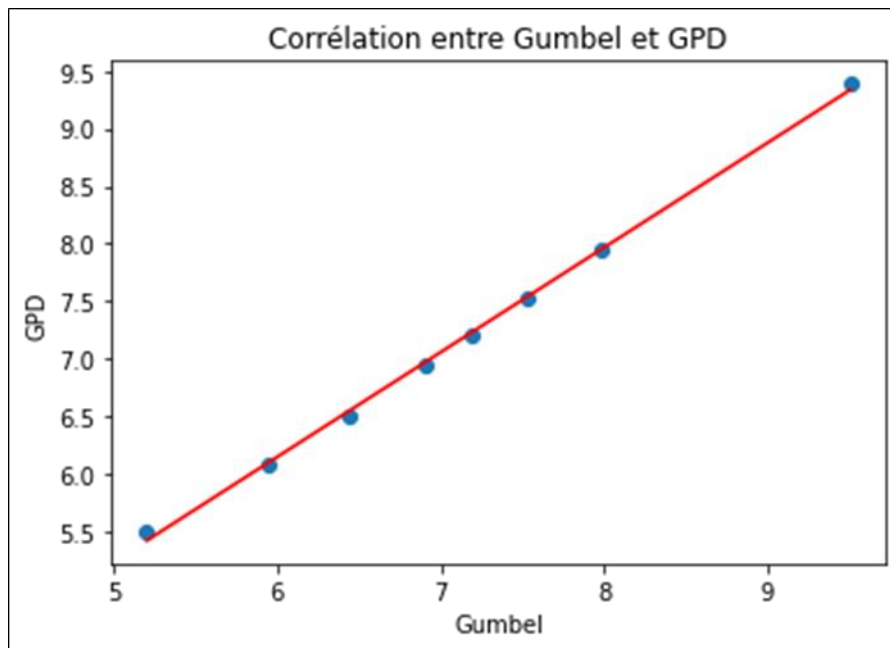


Figure 60 : Représentation de Corrélation entre la distribution GPD et Gumbel.

Chapitre V :
Modélisation de la
dynamique côtière du
littoral de la baie de
Zemmouri

1 Introduction :

Ce chapitre se concentre sur l'analyse d'hydrodynamique et hydro-sédimentaire du littoral. Nous avons utilisé plusieurs données et outils pour étudier différents paramètres, tels que les changements et les modifications de la houle lorsqu'elle se propage du large vers la côte, les courants générés par la houle et le transport de sédiments.

Nous avons réalisé des simulations numériques en utilisant le logiciel DHI Mike 21 pour obtenir les résultats. Pour cela, nous avons suivi les étapes suivantes :

1. Réalisation d'une étude bathymétrique.
2. Modélisation de la réfraction de la houle à l'aide du modèle SW.
3. Modélisation des champs de courants générés par la houle à l'aide du modèle HD.
4. Modélisation du transport sédimentaire sous l'effet de la houle et des courants à l'aide du modèle ST.

2 Description générale du MIKE 21 :

Mike 21 est un modèle de houle spectrale basé sur la conservation de la densité de l'action d'onde qui permet de simuler la propagation des états de mer dans les domaines offshore et côtier. Le modèle inclus les effets de la réfraction et de shoaling liés aux variations bathymétrie, la génération de la houle par action du vent, la dissipation de la houle. La résolution par méthode des volumes finis se base sur le maillage flexible composé d'élément triangulaire dans le plan horizontal. Ces éléments peuvent être affinés dans les zones d'études d'intérêt particulier (DHI, 2014).

L'équation fondamentale qui gouverne MIKE 21 est celle de l'équilibre des actions des vagues et peut être exprimée en coordonnées sphériques ou cartésiennes.

L'expression de l'équation en coordonnées cartésiennes horizontales est la suivante :

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \nabla \cdot (VN) = \frac{S}{\sigma} \quad (7)$$

Où :

- $N(x, y, \sigma, \xi, t)$: la densité d'action ;
- (x, y) : les coordonnées cartésiennes ;
- t : le temps ;
- S : le terme source de l'équilibre énergétique ;
- $v(C_x, C_y, C_\sigma, C_\xi)$: le groupe de la phase des houles en quatre dimensions ;
- ∇ : l'opérateur différentiel en quatre dimensions dans le plan d'espace (x, y, σ, ξ) .

La détermination de la fréquence angulaire relative σ :

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh(kd)} = \omega - (\vec{k} \cdot \vec{u}) \quad (8)$$

\vec{u} : le vecteur de la vitesse du courant ;

\vec{k} ; k : le vecteur et l'amplitude de nombre d'ondes, respectivement ;

ω : la fréquence angulaire absolue ;

d : la profondeur d'eau.

3 Description des modèles de simulation du logiciel MIKE 21 :

3.1 Modèle numérique MIKE SW (Spectral waves) :

C'est un modèle spectral vent-vague de nouvelle génération basé sur des maillages non structurés. Le modèle simule la croissance, la décroissance et la transformation des vagues et de la houle générées par le vent dans les zones côtières et offshore. Il inclut les phénomènes physiques suivants (DHI, 2014):

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

• Équations en eaux peu profondes :

Le modèle repose sur la résolution des équations de Reynolds moyennées de Navier-Stokes incompressibles tridimensionnelles, en supposant la pression hydrostatique et les hypothèses de Boussinesq. L'équation de continuité locale peut être exprimée de la manière suivante :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (9)$$

Les équations d'impulsion horizontale pour les composantes x et y sont formulées de la manière suivante, respectivement :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial \eta p}{\partial y} + \frac{\partial w u}{\partial z} = f v - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_\alpha}{\partial x} - \\ \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial u v}{\partial x} + \frac{\partial w v}{\partial z} = -f u - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_\alpha}{\partial y} - \\ \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \end{aligned} \quad (11)$$

Où :

- t est le temps ;
- x, y et z sont les ordinales cartésiennes ;
- η est la hauteur de la surface ;
- d est la profondeur d'eau ;
- $h = \eta + d$ est la profondeur d'eau totale ;
- u, v, et w sont les composantes de la vitesse du courant dans les directions x, y, et z;
- $f = 2\Omega \sin\theta$ est le paramètre de Coriolis (Ω est la vitesse angulaire de révolution et θ la latitude géographique) ;
- g est l'accélération de gravité ;
- ρ est la densité de l'eau ;
- s_{yx} , s_{xy} , s_{xx} et s_{yy} sont des composantes du tenseur radial ;

- A et v_t sont les viscosités turbulentes horizontale et verticale ;
- P_a est la pression atmosphérique ;
- ρ_0 est la densité de référence de l'eau ;
- S est l'amplitude du débit dû aux sources ponctuelles ;
- (u_s, v_s) est la vitesse à laquelle l'eau est rejetée dans l'eau ambiante.

On utilise une formule simplifiée de la relation gradient-contrainte pour décrire les termes liés à la contrainte horizontale :

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (12)$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (13)$$

Avec : A est la viscosité horizontale.

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

Az = η :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 v_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad (14)$$

Az = -d :

$$u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 v_t} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad (15)$$

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

- **Équations de conservation de l'action des vagues :**

L'équation déterminante est l'équation d'équilibre de l'action des vagues, et peut être formulée soit en coordonnées cartésiennes, soit en coordonnées sphériques.

- **Coordonnées cartésiennes :**

On peut exprimer l'équation de conservation de l'action des vagues en utilisant des coordonnées cartésiennes horizontales comme suit :

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (16)$$

Où :

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

t est le temps,

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

$\vec{v} = (C_x, C_y, C_\sigma, C_\theta)$ est la vitesse de propagation d'une onde de groupe dans l'espace à quatre dimensions \vec{x} , σ et θ et S est le terme source de l'équation du bilan énergétique.

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

Les quatre vitesses de propagation caractéristiques sont données par :

$$(c_x, c_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}_g + \vec{U} \quad (17)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial\sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla_{\vec{x}} d \right] - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial S} \quad (18)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial\sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right] \quad (19)$$

Ici, S est la coordonnée spatiale dans la direction d'onde θ , et m est une coordonnée perpendiculaire à S. $\nabla_{\vec{x}}$ est l'opérateur bidimensionnel différentiel dans l'espace \vec{x} .

3.2 Modèle numérique MIKE HD (Hydrodynamic model) :

Il résout les équations bidimensionnelles classiques de Saint-Venant, sur maillage structuré ou non structuré, en tenant compte du frottement sur le fond, de l'effet des événements météorologiques (vent et gradient de pression atmosphérique), de la force de Coriolis, de différentes modélisations de la turbulence de l'écoulement et de la variation de géométrie du domaine au cours du temps (zones couvrantes et découvrantes au cours des variations de marée). Il permet également de calculer les courants littoraux en prenant en compte les contraintes de radiation dues à la houle dans la zone de déferlement (Amara et Chalal, 2022).

- **Équations en eaux peu profondes :**

La principale équation en eau peu profonde dans le système de coordonnées Cartésien est définie comme suit :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (20)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} \\ & = f\bar{v}h - gh \frac{\partial n}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_w}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} \\ & - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + hu_s S \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} \\ & = f\bar{u}h - gh \frac{\partial n}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_w}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} \\ & - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \quad (22)$$

Où :

- t est le temps ;
- h est la profondeur totale de l'eau, $h = \eta + d$;
- η est la hauteur de la surface ;
- x, y, et z sont les coordonnées cartésiennes ;
- d est la profondeur de l'eau ;

- f est le paramètre de Coriolis, $f = 2\Omega\sin\theta$;
- $u, v,$ et w sont les composantes de la vitesse du courant dans les directions $x, y,$ et z ;
- Ω est la vitesse angulaire de révolution ;
- θ est la latitude géographique ;
- ρ_w est la densité de l'eau ;
- $S_{yx}, S_{xy}, S_{yy},$ et S_{xx} sont les composantes du tenseur de rayonnement ;
- A et ν_t sont les viscosités turbulentes horizontale et verticale ;
- p_a est la pression atmosphérique ;
- ρ_0 est la densité de référence de l'eau ;
- S est l'amplitude de la décharge causée par des sources ponctuelles ;
- (v_s, u_s) sont les vitesses par lesquelles l'eau est rejetée dans l'eau ambiante ;
- (τ_{bx}, τ_{by}) et (τ_{sx}, τ_{sy}) sont les composantes y et x des contraintes de cisaillement du vent du fond et de surface ;
- \bar{u}, \bar{v} sont des vitesses de courant à la profondeur moyenne définies par :

$$h\bar{u} = \int_{-d}^n u dz \quad (23)$$

$$h\bar{v} = \int_{-d}^n v dz \quad (24)$$

T_{ij} sont les contraintes latérales définies par (DHI, 2014):

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} (25), T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} (26) , T_{xy} = A \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) (27)$$

3.3 Modèle numérique MIKE ST (Sediment transport) :

Il permettant de calculer les taux de transport de sédiments non cohésifs (sable) et de calculer le transport de sable en vous basant uniquement sur les informations relatives au courant, ou vous pouvez également prendre en compte les vagues (DHI, 2014).

En plus il peut aider à repérer les zones potentielles d'érosion ou de dépôt à travers une simulation des taux de transport de sable qui nous donne la variation du niveau du lit, mais il est important de souligner que cette approche ne peut pas être utilisée comme une alternative à un modèle morphologique complet.

En utilise ce modèle dans quelques applications du modèle tell que La gestion et la protection du littoral, amélioration de l'accès à un port ou à une marina, la conception des ouvrages de protection côtières, étude de la morphologie de la côte etc.

La principale équation qui permet de mesurer le transport sédimentaire par la méthode STP (Sediment Transport Program) de DHI est :

$$q_{tp} = q_b + q_s \quad (28)$$

Où :

q_{tp} : le transport total des sédiments

q_b : le transport par charriage

q_s : le transport par suspension

3.4 Modèle couplé MIKE21/3 FM :

Le module hydrodynamique et le module d'ondes spectrales sont les éléments de calcul de base du MIKE 21/3 Coupled Model FM. MIKE 21/3 Coupled Model FM permet de simuler l'interaction mutuelle entre les vagues et les courants à l'aide d'un couplage dynamique entre le module hydrodynamique et le module d'ondes spectrales, il comprend également un couplage dynamique entre le module de transport de boue et le module de transport de sable, Ainsi, il est possible d'inclure une rétroaction complète des changements du niveau du lit sur les vagues et les calculs de débit (DHI, 2014).

Le modèle MIKE 21 Flow FM se compose de six modules différents qui sont :

- MIKE 21 FM Hydrodynamics : Ce module a pour fonction de simuler le mouvement de l'eau en utilisant les équations de Navier-Stokes, qui sont des équations fondamentales de la mécanique des fluides.
- MIKE 21 FM Waves : ce module a pour fonction de simuler la propagation des vagues en utilisant des équations linéaires ou non linéaires.
- MIKE 21 FM Sediment Transport : ce module simule le transport des sédiments, tels que le sable ou les galets, par l'eau.
- MIKE 21 FM Ecology : ce module simule les processus écologiques dans l'eau, tels que la croissance des algues et la qualité de l'eau.
- MIKE 21 FM Oil Spill : ce module simule la dispersion et la dérive des nappes d'huile en cas de déversement accidentel.
- MIKE 21 FM Subaqueous Discharge : ce module simule la dispersion et le transport des polluants rejetés dans l'eau, tels que les effluents industriels ou les eaux usées.

Le programme utilise des équations en deux dimensions proposées par Saint-Venant en 1871 :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x} = Q_l \quad (29)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{qr}{h} \right) = -gh \frac{\partial z}{\partial x} - g \frac{\sqrt{q^2 + r^2} q}{c^2 h^2} + C_x + D_x + W_x + T_x + S_x \quad (30)$$

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{qr}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{r^2}{h} \right) = -gh \frac{\partial z}{\partial y} - g \frac{\sqrt{q^2 + r^2} r}{c^2 h^2} + C_y + D_y + W_y + T_y + S_y \quad (31)$$

Où D_x, C_x, T_x, W_x, S_x et D_y, C_y, T_y, W_y, S_y Représentent la variation de la densité, la force de Coriolis, l'effet de la turbulence, l'effet du vent et le flux de quantité de mouvement. Q_l est le volume entrant par unité de temps et par unité de surface.

4 La démarche adoptée :

Les modèles numériques sélectionnés comprennent le modèle SW (Spectral Waves model), le modèle HD (Hydrodynamic model) et le modèle ST (Sand Transport model) du système MIKE 21.

L'illustration de l'organigramme dans la (**Figure 61**) offre une explication claire de l'approche méthodologique utilisée pour simuler l'intégration de ces trois modèles.

La première étape consiste à utiliser le modèle SW pour évaluer le régime de vagues dans la région d'intérêt à grande échelle. Les résultats obtenus, combinés avec les niveaux d'eau aux frontières de la grille de calcul hydrodynamique et les données sur les vents en surface, permettront de calculer les courants résultant de l'interaction entre les vents et les vagues grâce au module HD. Enfin, ces courants, issus du module HD, ainsi que les données de vagues fournies par le module SW, seront utilisés en entrée par le modèle ST de transport de sédiments. Ce dernier permettra de calculer le transport de sédiments à chaque intervalle de temps des simulations hydrodynamiques, ainsi que le transport net de sédiments pendant toute la période de simulation.

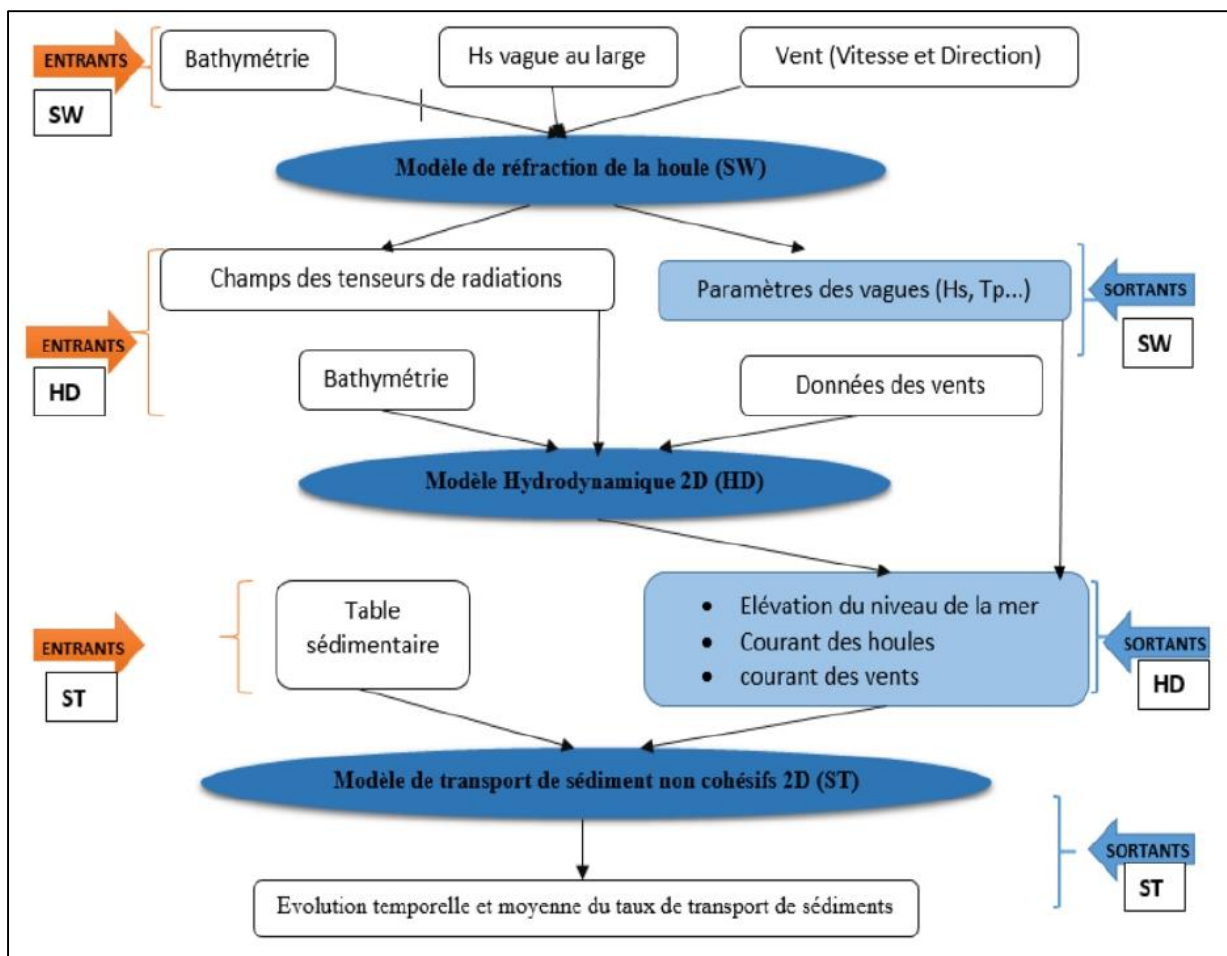


Figure 61 : Organigramme explicatif de l'approche méthodologique adoptée pour la modélisation intégrée des différents modèles (HD, ST, SW) (Doubi et Ferdi, 2020).

5 Construction du modèle

5.1 Emprise du modèle, bathymétrie et pas de maille

Emprise du modèle Mike 21 couvre une zone s'étendant d'environ 54 km de Cap Djinet à l'Est jusqu'à cap Matifou à l'Ouest. L'extension géographique du modèle et la localisation des données bathymétriques sont illustrées sur les cartes (**Figure 62 et 63**).

a. Emprise et bathymétrie

Les changements morphologiques du domaine marin et les migrations longitudinales et/ou transversales des corps sédimentaires ont pu être observés sur la carte bathymétrique.

La bathymétrie a été obtenue par la digitalisation de la carte publiée par NAVIONICS SonarChart™, édition 2021 à l'échelle de 1/250000 avec une résolution qui varie entre 100 et 0,5m du large vers la côte. Cette base de données a été complétée par plusieurs levés au large réalisés par GEBCO, afin d'obtenir une carte globale de la région à partir de la ligne de côte jusqu'au large (plus de 100 m de profondeur).

Pour cela on a utilisé le logiciel ArcGIS 10.4 qui est une suite de logiciels d'information géographique (SIG) développés par la société américaine Esri (Environmental Systems Research Institute). Il est composé de plusieurs modules connectés entre eux (ArcMap, ArcScène, ArcCatalogue, ...).

L'utilisation des données bathymétriques sur Mike21, nécessite la transformation du shapfile d'ArcMap de la bathymétrie en fichiers XYZ, avec l'outil de conversion d'ArcToolBox.

Suite à la génération de la mesh, une interpolation des points de la bathymétrie selon le maillage de la mesh est nécessaire.

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

b. Création 2D Bathymétries sous le maillage

Le module '*Mesh Generator*' nous offre un environnement pour la création, l'édition et la présentation de bathymétries numériques 2D détaillées. '*MeshGenerator*' génère un format souple de maillage (*.MESH).

La création d'une bathymétrie est généralement divisée en les phases suivantes : le choix du système de projection, le traitement des données bathymétriques XYZ, la génération du maillage et l'interpolation des valeurs bathymétriques sur le maillage.

Le maillage est composé d'éléments triangulaires dont la taille a été ajustée suivant les évolutions bathymétriques et la précision souhaitée. Le pas de maille varie de 300m environ dans la zone offshore entre les isobathes -50 à -20 m puis passe à l'ordre de 10m dans la zone côtière comprise entre l'isobathe -20 m et les terres.

La carte bathymétrique du modèle est obtenue par interpolation des sondes bathymétriques et des levés topographiques sur le maillage ainsi définis. La bathymétrie obtenue (**Figure 63**) présente des valeurs comprises entre -500m et 0m par rapport au zéro hydrographique.

6 Résultats et discussions :

6.1 Bathymétrie de la Baie de Zemmouri :

L'analyse de la carte bathymétrique (**Figure 63**) de baie de Zemmouri, fait ressortir deux zones morphologiques bien distinctes sont mises en évidence :

- **La zone côtière** : montre des isobathes généralement perturbées (entre 1 à 10 m) et une morphologie particulière caractérisée par la présence de rides d'avant côte discontinue (séparés par un sillon), bien développée à l'approche de la côte et par des

fosses de lévigation. Ce type de morphologie témoigne d'une mobilité de ces fonds sous l'action des houles et les courants engendrés avec ses houles. Par conséquent, cette zone est caractérisée par une topographie complexe et la nature du fond marin dépend essentiellement des fluctuations hydrométéorologiques.

La zone présente un fond marin assez régulier dont les isobathes sont très rapprochées traduisant une pente abrupte. Cependant la partie Ouest de la Baie de Zemmouri présente deux irrégularité où on constate une variation de la pente qui devienne un peu douce au niveau de Boudouaou Elbahri et aussi aux allant tour de Ain Taya qui est probablement dû aux apports des sédiments terrigènes par l'Oued de Boudouaou et Oued Réghaia respectivement et la présence des ouvrages de protection dans cette zone qui perturbe la dynamique sédimentaire et ce n'est qu'à partir de -5 m que ces isobathes redeviennent régulières.

- **La zone au large** : présence des isobathes parallèles au rivage, elles sont relativement espacées traduisant ainsi un fond régulier. Ces fonds sont moins actifs par rapport à la zone côtière. Cependant, à l'est de Cap Djinet, les isobathes sont serrées, ce qui présente probablement un petit chenal avec une pente moyenne de 1 %.

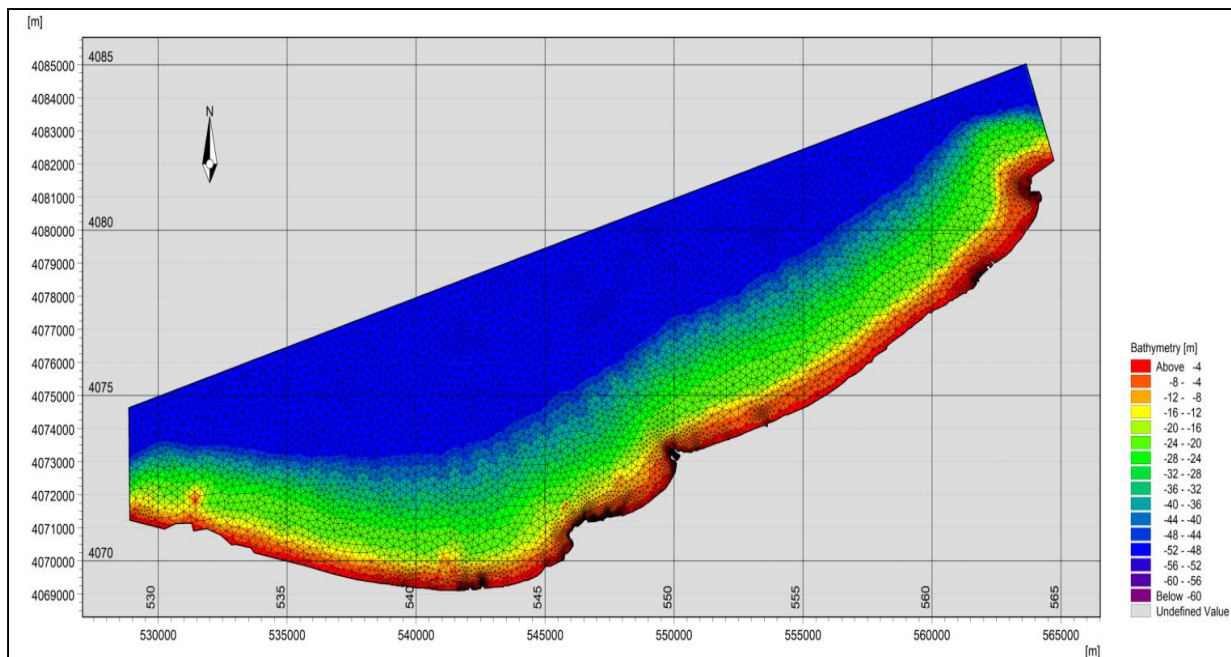


Figure 62 : Emprise et maillage du modèle côtier de la Baie de Zemmouri.

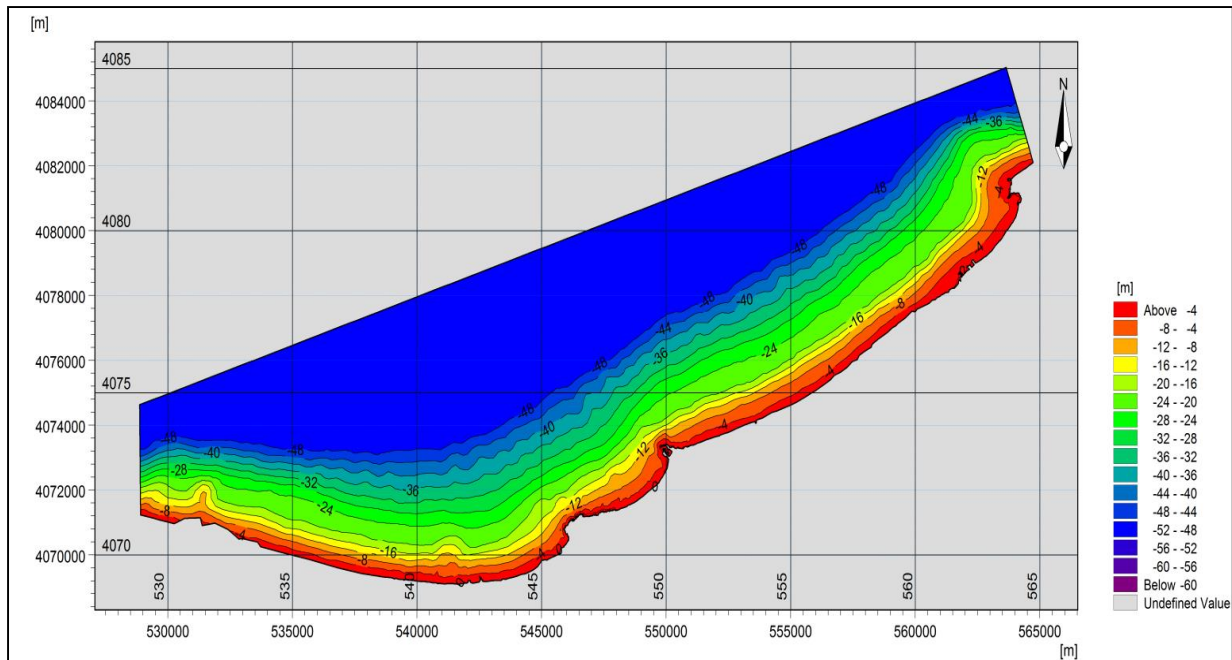


Figure 63 : Carte bathymétrique de la Baie de Zemmouri.

6.2 Simulation de la propagation de la houle par le module SW:

Pour simuler la propagation de la houle du large vers la côte, nous avons choisi la formule directionnelle dans le domaine spectral et la formule quasistationnaire dans le domaine temporel. L'algorithme d'itération Newton-Raphson avec les valeurs par défaut a été utilisé.

a. Données d'entrée et calibration du modèle SW

Le but du calibrage est de régler le modèle afin de reproduire les conditions connues ou mesurées pour une situation particulière.

Les paramètres de calibrage utilisés pour le modèle MIKE 21 SW sont la résolution dans l'espace géographique et spectral, le frottement du fond, et les paramètres de déferlement. Pour valider le modèle hydrodynamique, plusieurs données ont été introduites, la bathymétrie et la donnée d'entrées et les conditions limites

Pour la génération des simulations, nous avons pris les trois directions de la houle les plus dominantes et les plus fréquentes dans les trois baies (nord, nord-est et nord-ouest). Ces données sont extraites à partir du site web www.climatewave.com. L'analyse de ces données a déjà été présentée dans le chapitre 2.

En parallèle, une vitesse de vent pour chaque direction est prise en considération.

Il est important de préciser que dans le présent travail, nous avons pris trois paramètres de la houle pour définir les conditions limites (hauteur significative, période de la houle et la direction) comme suit (**Tableau 12**).

Tableau 12 : les caractéristiques des houles incidentes (Hauteur, période, direction)(Source www.waveclimate.com).

	Hs (Hauteur significative)	Tp (Période)	Dir (Direction)
Baie de Zemmouri	2.56m	8.00s	45°N
	2.64m	8.10s	360°N
	3.25m	8.25s	315°N

b. Résultats simulation hydro sédimentaire :

➤ **Configuration du module SW :**

Afin de simuler la propagation de la houle du large vers la côte, l'équation choisie est la formule directionnelle dans le domaine spectral et la formule quasi-stationnaire dans le domaine temporel. L'algorithme d'itération Newton-Raphson avec les valeurs par défaut a été utilisé.

➤ **Données d'entrée et calibration :**

Plusieurs types de données sont nécessaires pour cette étude. Celles-ci seront insérées en entrée du modèle de MIKE 21 Spectral Waves FM . Les différentes données utilisées sont mentionnées ci-dessous :

- Bathymétrie ;
- Des Directions des houles dominantes ; ici on la direction Nord, Nord Est et Nord Ouest.
- Des données sur le vent on a choisi des valeurs constantes ; une vitesse de 6m/s et une direction 45°.

La procédure de calibration est ensuite exposée. On a choisi le déferlement et le frottement du fond comme paramètres de calibration. Le déferlement est spécifié en utilisant un gamma constant $\gamma = 0.8$. Le frottement du fond marin est spécifié en utilisant la rugosité de Nikuradse (kN en mètre) égale à 0.04, les deux paramètres sont déterminés par défaut.

Pour calibrer le modèle hydrodynamique, deux facteurs ont été pris en compte. Ils sont la viscosité et la rugosité du fond (nombre de Manning). La constante de Smagorinsky varie de 0,24 à 0,9 (DHI, 2014). Le nombre de Manning est de 24 à 35 (mètre un tiers par 212 seconde). L'estimation qu'on l'a choisi pour les deux paramètres, était par défaut 0.8 et 32 respectivement.

Après avoir introduit la bathymétrie et la données d'entrées et définir les conditions limites, la simulation a été lancée. La durée d'un effort de simulation varie dans le temps, selon la complexité des objectifs, des processus impliqués et de leur saisonnalité.

➤ **Résultats**

Les données sortantes sélectionnées qui représentent le climat de houle à la côte sont les suivantes (Tableau 13) :

Tableau 13 : Sortants du modèle SW.

Name	Symbole	unité
Hauteur Significative	Hm0	mètre
Période de pique	Tp	seconde
Direction moyenne	MWD	degrés
Ecart-type	DSD	degrés
Contraintes de radiation	Sxx, Sxy, Sxy	m3/s2

Pour chaque simulation, il est alors possible d’extraire en tout point du maillage les caractéristiques de la houle (période, hauteur, direction). Les caractéristiques de la houle sont également disponibles sous forme de carte présentant la direction (vecteurs) et les contours des isohauteurs ou des isopériodes.

▪ **Modele SW :**

L’étude de la réfraction montre que la baie de Zemmouri est exposée aux houles des secteurs Nord Est, Nord et Nord-Ouest. Cela est justifié par la configuration du trait de côte qui est parallèle au Nord-Ouest et qui reçoit l’énergie de ces trois directions dominantes.

- **Propagation des houles de direction Nord-Est au large (45°)**

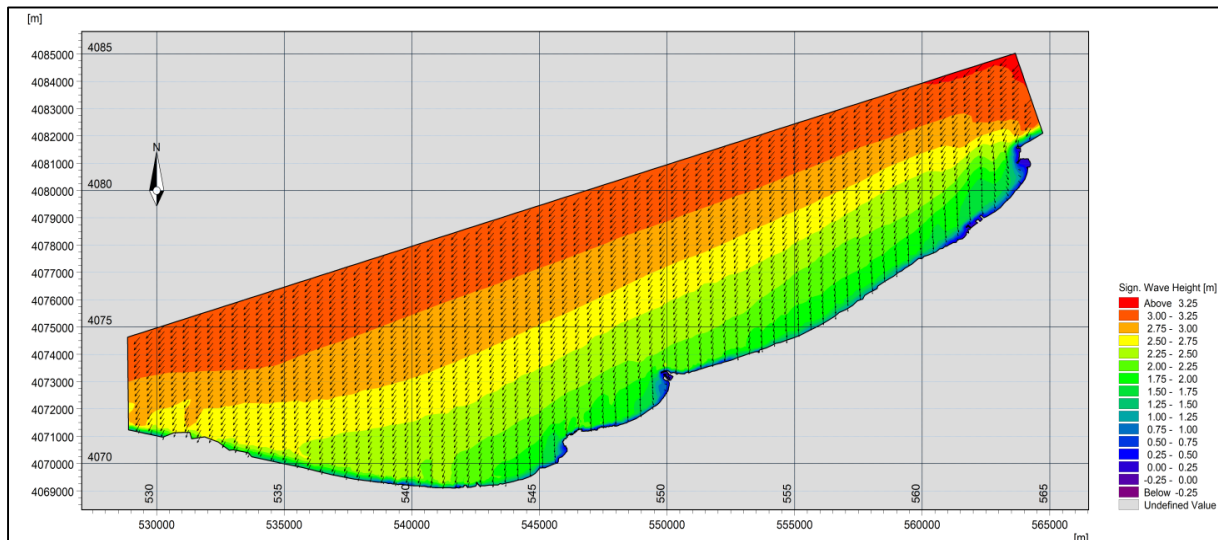


Figure 64 : Champs de houles (MWD=45°) dans la Baie de Zemmouri.

Les houles 45°N (**Figure 64**) sont très fréquentes, elles apparaissent surtout lors de la période printanière, elles arrivent à la côte avec une obliquité de 25 à 40° par rapport à la direction initial du large. Au large, les houles de direction Nord –Est ne subissent aucune modification et gardent leurs caractéristiques initiales (Hs de 4m), les orthogonales sont peu réfractées, mais au fur et à mesure, qu’elles propagent vers la côte et l’effet de fond commence à être ressenti, la hauteur de la houle diminue en rapprochant de la côte pour atteindre des valeurs inférieures variant en fonction de la morphologie des fonds.

Le plan de vague se diffracte dans la partie Ouest au niveau de l'îlot de Réghaia (Hadjrat Bounatah). Dans la partie Est la propagation se fait latéralement par rapport au rivage, la houle semble ne pas conserver son énergie du large, la zone apparaît naturellement abrité par le Cap. Les orthogonales pivotent légèrement à l'approche du rivage vers les directions Nord et Nord-Est de la zone.

La houle atteint la côte avec des hauteurs variables selon la bathymétrie, des valeurs entre 1.25m et 2.5m enregistrées dans la partie Ouest (Ain taya, Reghaia et Boudouaou el Bahri) et dans la zone Est (plage de Zemmouri). Des valeurs faibles de l'ordre de 0.5m -1.5m dans les zones abritées (plage Boumerdes, port de Zemmouri...). À l'approche de la côte jusqu'à -1m de profondeur, une diminution moyenne des hauteurs varie de 0.7 et 0.25 m de hauteur au voisinage de certaines plages (plage du Cap Djinet), cela signifie que la houle perd une partie de son énergie presque troisquarts 3/4 lors de son évolution vers la côte. Cette dissipation d'énergie est accompagnée par un pivotement très faible des orthogonales de direction NNE et NEE.

- **Propagation des houles de direction Nord au large (360°)**

Cette (**Figure 65**) représente les résultats obtenus de l'étude de la réfraction de la houle de 360°N et cela pour une seule période (8.5s).

Au large, ces houles de direction Nord (360°) ne subissent aucune modification, mais au fur et à mesure, lorsque la houle commence à ressentir le fond, la hauteur de la houle diminue considérablement. Au voisinage des profondeurs de 30m, on observe que la hauteur de la houle ne varie, elle est de 3.5m environ, au-delà de cette profondeur on observe une diminution de cette hauteur avec une valeur de 2.2m à -21m de profondeur, marquant qu'il n'y a aucun pivotement des orthogonales.

D'après la carte, au voisinage de la côte on remarque que les houles de secteur 360°N sont frontales, c'est dû d'une part au fait que ces houles se réfractent le moins avec des angles de déviation presque nul, toutefois, elles subissent des déformations au niveau des affleurements rocheux de Réghaia et Ain Taya, et d'autre part c'est liée à la configuration de la côte qui est pratiquement perpendiculaire à la direction des houles.

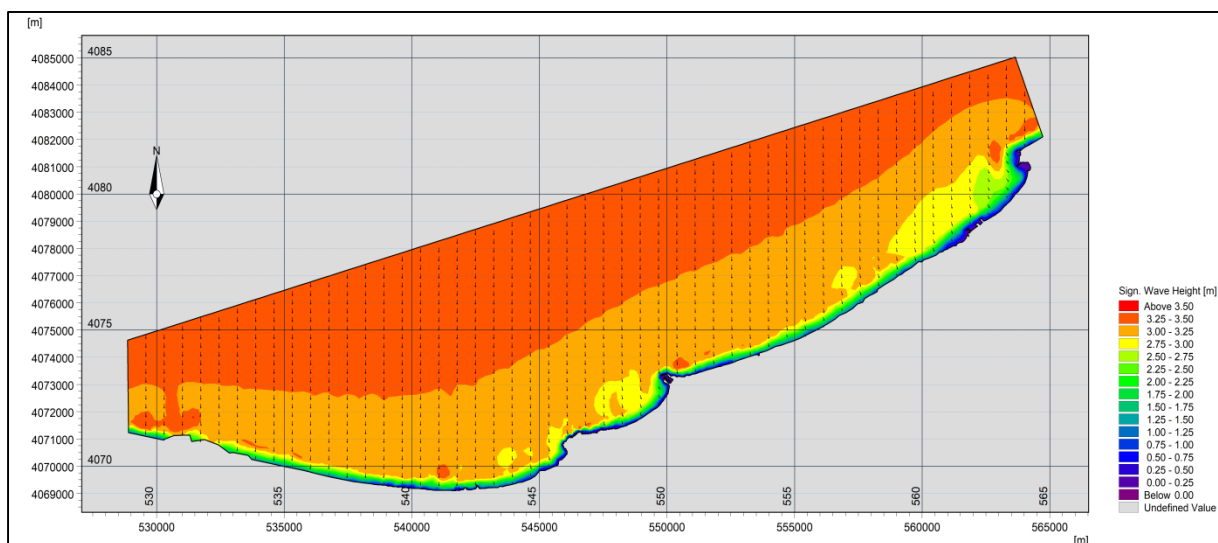


Figure 65 : Champs de houles (MWD=360°) dans la Baie de Zemmouri.

A l'approche de la côte à des profondeurs inférieures à -1m, une diminution remarquable des hauteurs des vagues (H_s varie entre 0.69 m et 0.71 m), avec des coefficients de réfraction relativement faible entre 0.15 à 0.19 et des angles d'incidences de direction moyenne vers le Nord-Est au niveau de la partie Est, et cela signifie que la houle perd une grande partie de son énergie presque 4/5 lors de son évolution vers la côte. Cette dissipation d'énergie est accompagnée par un pivotement des orthogonales vers le Nord Est avec un faible degré. Les valeurs de H_s varient entre 1,6 à 2,4 m au côté Ouest de la baie.

A l'exception de la zone de Cap Djinet, les hauteurs de la houle atteignent les 2.75m juste auprès de la jetée principale, cela est dû généralement au déferlement important des vagues ainsi que la diffraction de la houle sur les jetées du port.

Donc pour la direction 360° , on peut dire que la houle a une propagation quasi frontale et suit presque le même comportement d'évolution avec celle d'une direction 45° , et cela aussi pourrait avoir une influence sur notre zone d'étude.

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

Les houles issues de secteur 315° N (**Figure 66**), sont généralement des houles hivernales. Au large, ces houles de direction Nord-Ouest ne subissent aucune modification, mais au fur et à mesure, lorsque la houle commence à ressentir le fond, la hauteur de la houle diminue considérablement, elles sont réfractées au voisinage de la côte. Les orthogonales de la houle abordent la côte en subissant une rotation entre 3° et 10° . Ces houles engendrent une dérive littorale Ouest-Est le long de toute la côte sauf au niveau de Réghaia Plage qui est abritée par un îlot orienté dans le sens opposé des crêtes de houles. Par conséquent, le climat de houles reste modéré au niveau de cette plage. En effet dans cette localité les houles subissent une diffraction à 1 Km du rivage. Par contre, la propagation semble se faire de façon quasi-frontale. La houle ne perd que très peu de son énergie, les orthogonales ne pivotent que légèrement à l'approche du rivage, ces données font de cette houle la plus menaçante pour la zone d'étude.

Pour la houle de période (10s), nous marquons que les hauteurs significatives sont au-dessus de 4 m au large, en revanche, près des côtes nous avons des hauteurs plus faibles où elles sont comprises entre 0,2-0,8 m à l'Est et entre 1.0-2,0 m à l'Ouest. Au niveau du Cap Matifou, les hauteurs remarquées sont les plus faibles du fait qu'elles sont entre 0.2 et 0.8m et cela signifie que la houle perd une très grande partie de son énergie lors de son trajet vers la côte due généralement à la variation abrupte de la bathymétrie.

Cette dissipation d'énergie est accompagnée par un pivotement léger des orthogonales vers le Nord-Est notamment au niveau du port de Cap Djinet.

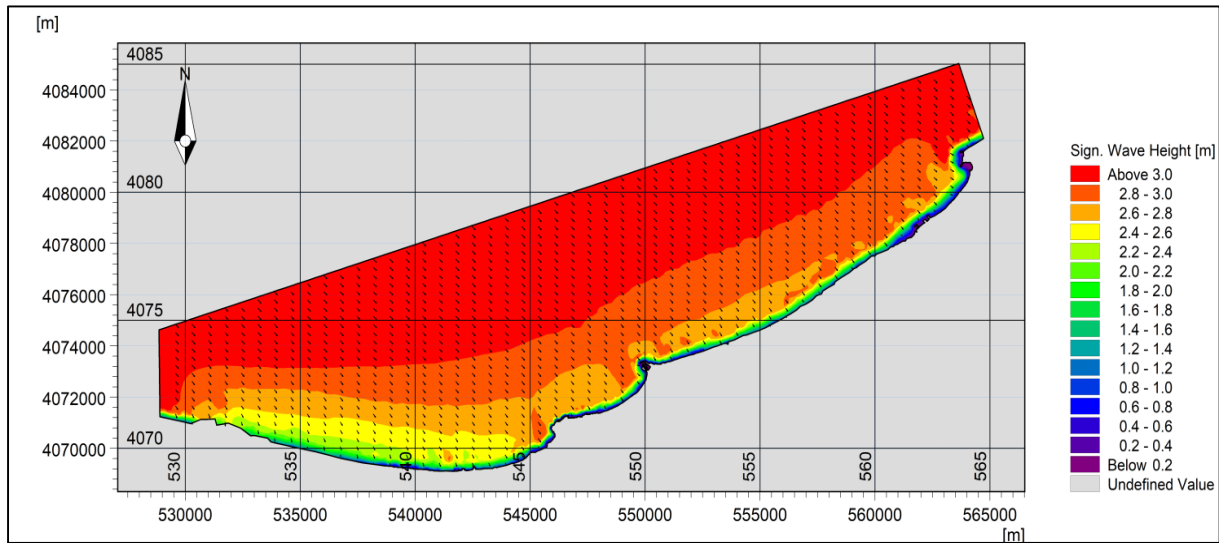


Figure 66 : Champs de houles (MWD=315°) dans la Baie de Zemmouri

6.3 Résultats des simulations HD et interprétations :

Les figures ci-après (**Figure 67 à 69**) représentent les champs de courants induits par les vagues calculées au moyen du modèle numérique MIKE21-HD pour les trois directions de houles sélectionnées.

Le long de la côte Est algéroise, les résultats du modèle montrent clairement que le flux d'énergie long-shore provient du secteur Ouest et s'oriente vers l'Est (**Figure 69**)

Les vagues venant du secteur Nord-Est génèrent un courant de dérive littorale parallèle à la côte et orienté d'Est en Ouest. Des vitesses importantes varient entre 0.5m/s à 1m/s enregistrées dans la zone de Zemmouri. Les vitesses sont plus élevées dans la zone Est de l'embouchure de l'oued Réghaia qui dépassent 0.6m/s. Ces vitesses diminuent en allant vers l'ouest à cause de l'effet d'abri de l'île, Hadjrat Bounattah, et du léger changement dans l'orientation de la côte. Ces fortes vitesses sont à l'origine du transport sédimentaire vers l'Ouest en favorisant l'érosion des cotes sableuses exposées à ses courants.

D'après la (**Figure 67**) on observe que les champs des courants formés par la houle de secteur est (45°N) dans la région de Boumerdes montrent des activités hydrodynamiques dans presque toute la zone. On remarque que le courant se propage d'est en ouest suivant une direction parallèle au trait de côte avec une vitesse majoritaire qui varie entre 0.50 m/s à 1.05 m/s, ce courant est produit principalement par le phénomène de réfraction de la houle.

Plus à l'Ouest, le long de la plage, Deca Plage, les vitesses du courant long-shore augmentent de nouveau puis elles diminuent progressivement en allant vers la localité d'Ain Chorb où note un changement de la direction de la côte et la présence de hauts fonds à l'avant côte.

L'effet de ces hauts fonds engendre localement un courant dans la direction opposée. A l'Est du port de Cap Djinet, on remarque des champs de courants plus importants qui dépassent la vitesse de 1.5m/s orienté vers la direction Ouest, c'est l'origine des accumulations de quantités importantes du sable au niveau de la jetée principale et favorise l'ensablement du

port. Avec des vagues venant de l'autre côté, ici en cours à des vitesses plus élevées, ce qui aura un effet visible sur le transport des sédiments et de l'évolution côtière.

Les houles issues du secteur Nord-Ouest donnent naissance près de la côte à un courant de dérive dirigé vers l'Est. Loin au large, ce courant prend une direction nettement opposée mais avec des vitesses nettement faibles dans la partie Est ou les vitesses des courant de dérive ne dépassent pas 0.5m /s. par contre dans la partie Ouest, au niveau de la plage de Zemmouri, on observe des champs de courant importants avec des vitesses qui dépassent 1m/s. ce courant joue un rôle important dans la redistribution des sédiments accumulés au voisinage du port pour alimenter la partie érodée.

D'après la (**Figure 68**) on observe que les houles de secteur Nord donnent naissance à des courants moins importants par rapport aux autres directions, qui est dirigé vers le secteur Ouest avec une vitesse de 0.2 m/s. On remarque aussi une circulation turbionnaire derrière les ouvrages de protection et les jetées, dû généralement à la diffraction de la houle au niveau des extrémités de ces ouvrages. Au niveau de la zone Est des vitesses relativement faibles d'environ 0.08m/s. on constate des courants avec une vitesse un peu élevée au niveau de la zone centre de Zemmouri 0.5m/s - 1m/s.

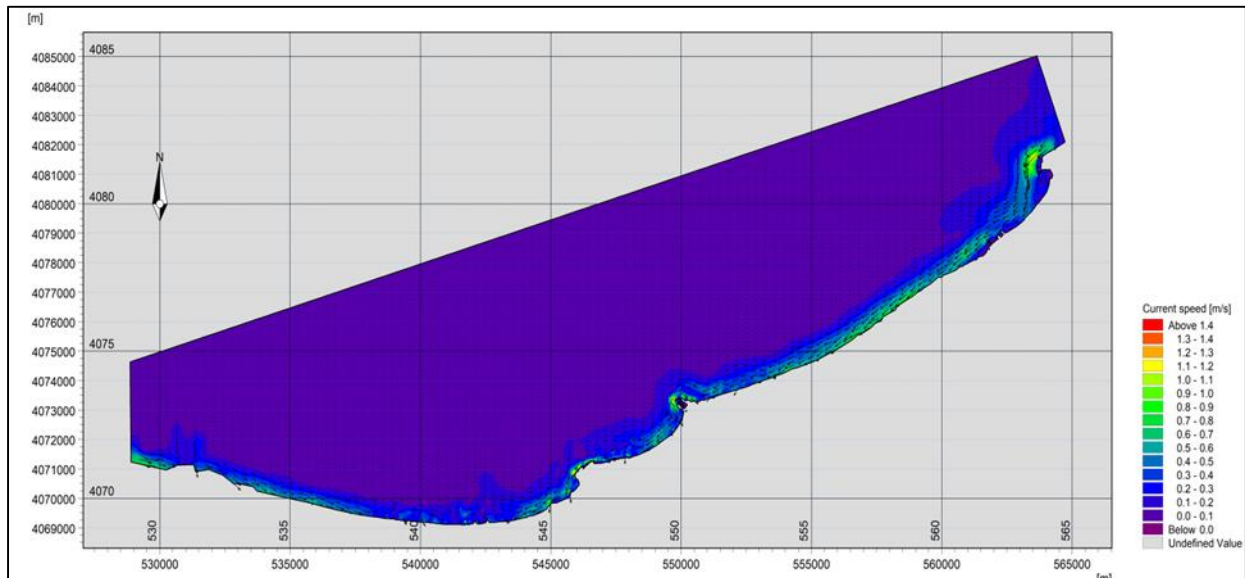


Figure 67 : Champs des courants dans la Baie de Zemmouri pour : MWD= 45°.

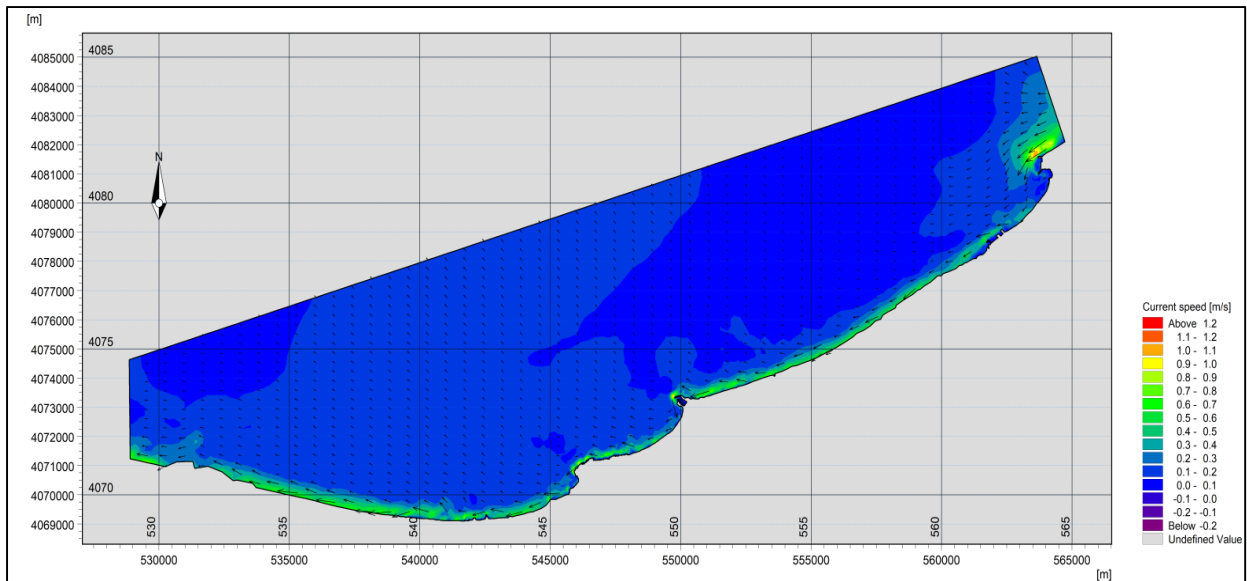


Figure 68 : Champs des courants dans la Baie de Zemmouri pour : MWD=360°.

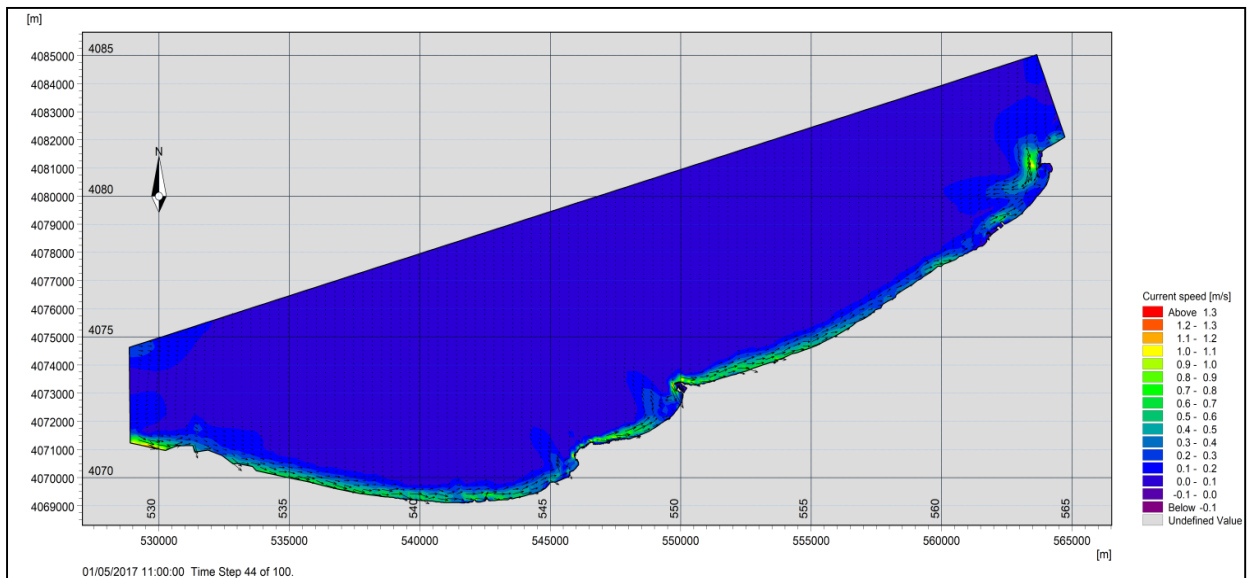


Figure 69 : Champs des courants dans la Baie de Zemmouri pour : MWD= 315°.

6.4 Modélisation du transport sédimentaire sous l'effet de houle et de courant

L'étude de l'évolution de la côte sableuse passe donc par celle des causes sous-jacentes qui affectent l'équilibre des sédiments du littoral en fonction des différentes périodes. Plus précisément, le problème posé est de déterminer le régime de houle et hydro-morphologique, les effets des vagues, des courants sur cette évolution et les causes de l'érosion dans le secteur d'étude. De là, nous comprendrons les règles de l'accrétion et de l'érosion dans la zone d'étude grâce à l'application de modèles mathématiques pour simuler ce processus.

Le modèle numérique nous permet d'illustrer les houles, le courant dû aux vagues et les modes de transport du littoral, ainsi que l'influence des ouvrages de protection et portuaires au cours de la simulation. Le modèle morphodynamique repose sur un couplage des modèles de propagation de la houle et du modèle de circulation et du modèle de transport sédimentaire dans MIKE21.

Les forçages hydrodynamiques ont permis de structurer les formations superficielles du littoral centre algérois. Le transit littoral des sédiments dépend, pour une grande part, des directions et de l'obliquité des houles par rapport au rivage.

6.4.1 Résultats du modèle Mike 21ST :

Les transports des sédiments calculés dans la zone d'étude adoptent des unités de $m^3/s/m$ sous l'effet des vagues, des courants de dérive, de retours et des vents d'Est. L'interprétation de ces transports est basée sur le changement de l'intensité du transport d'une maille à l'autre. Par exemple, une diminution des vecteurs de transport d'une maille à l'autre indique une zone de convergence ou de dépôt potentiel des sédiments à cet endroit alors qu'une augmentation des vecteurs adjacents indique une divergence ou un potentiel d'érosion à cet endroit.

De façon générale dans la baie de Zemmouri, une tendance de dérive littorale de l'Est vers l'Ouest semble persister pour les houles de $45^\circ N$ et Ouest vers Est pour les houles de $315^\circ N$, par contre les houles en provenance de $360^\circ N$ engendrent des transports sédimentaires qui convergent vers les deux directions selon la morphologie de zone au voisinage de la cote.

Les courants modélisés dans la plage Nord semble favoriser un transport sédimentaire vers l'épi Nord pour les trois climats de houle (45 , 360 et $315^\circ N$). En effet les houles en provenance du Nord-Est engendrent un courant littoral Nord-Sud qui entraîne les sables vers le sud qui favorise l'accumulation des sables et la formation d'une plage large et cela confirme l'avancée de la ligne de cote calculée par le modèle DSAS (évolution de trait cote). Lorsque les houles sont de fortes amplitudes ($>1.3m$) ce courant contourne l'épi Nord et par conséquent forme un vortex en aval de l'ouvrage et revient vers celui-ci en entraînant les sables vers le Nord.

Par contre, les houles en provenance de l'ouest génèrent un courant Sud-Nord qui entraîne les sables vers le nord, ce courant contourne l'épi Nord et forme derrière celui-ci un vortex qui revient vers l'ouvrage, en entraînant les sables vers le Sud malgré un régime de houle Ouest. On constate également que le transport le dans cette portion épis et jetée du port est faible avec un taux de $+16 \cdot 10^{-6}$ et $+20 \cdot 10^{-6} m^3/s/m$ soit $+498$ et $+622 m^3/an/m$.

Sur la plage de Cap Djinet, à l'ombre du port, le transport s'effectue vers l'Ouest à cause d'une recirculation des courants engendrés par la houle du secteur Est, avec un taux $+26 \cdot 10^{-6}$ et $+36 \cdot 10^{-6} m^3/s/m$ soit $+808$ et $+1129 m^3/an/m$.

Les résultats du transport sédimentaire sur la zone allant de station électrique de Cap Djinet au Port de Zemmouri sont qualitativement conformes à l'analyse des écoulements menée précédemment et confirment la dérive littorale parallèle à la côte sur cette zone.

L'intensité de la dérive augmente entre l'Est et l'Ouest ce qui aurait tendance à favoriser un déplacement de sable de -1120 et $-1368 m^3/an/m$, mais que dans le même temps les houles de Ouest engendrent un transport en direction Est de $345 m^3/an/m$ moins important que celui engendrée par la houle de direction Est et Nord, au voisinage du port de Zemmouri et des ouvrages de protection un transit sédimentaire dirigé vers le large d'un débit de $1120 m^3/an/m$. Le bilan sédimentaire est donc complexe, et résulte de la contribution de chaque houle. Cette perte de sédiment vers le large favorise l'érosion de cette zone et un recul important du trait de côte qui confirme les résultats du modèle DSAS (un bilan surfacique négatif).

A l'extrémité Ouest de la baie, une divergence des écoulements a été mise en évidence : elle est causée par le déferlement des houles sur le platier rocheux. Cette divergence se retrouve dans le transport vers le Ouest et vers le Nord pour les deux directions de houle Est et Nord autour de la des pointes rocheuses, qui déclenche un transit sédimentaire vers la baie d'Alger et vers le large.

Dans la partie Nord Ain Taya, il est difficile à ce stade de déterminer si le transport résultant est orienté vers le Nord ou l'Ouest, étant donné sa variabilité : fonction de l'incidence des houles et la diffraction de cette dernière avec les ouvrages de protection, des sédiments sont piégés dans cette zone protégée qui favorise l'accumulation et formation d'une plage sableuse.

L'analyse qualitative des écoulements et du transport nous a permis de déterminer le cheminement de la dérive littorale le long de la zone entre Reghaia et le rochet noir, elle s'effectue globalement du Est Vers l'Ouest pour la houle de l'Est avec un débit de $1399 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$. les houles du secteur ouest et Nord, le transport est orienté vers l'Est, provoquant le dépôt de sédiments le long des brise-lames de la région de Boumerdes avec un taux de $622 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$ et $995 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$. un courant de retours est dirigé vers le large qui aurait tendance à favoriser une perte de sable vers le large, et provoque un déficit sédimentaire de cette région. Sur la zone comprise entre le rochet noir et le port de Zemmouri, le bilan sédimentaire est complexe, et résulte de la contribution de chaque houle. Les transits sédimentaires des trois directions sont piégés entre les deux extrémités et alimentent cette zone. Cette modélisation confirme les résultats obtenus avec le modèle DSAS. Bilan surfacique positif pour la plage de Figuiet, et un bilan négatif pour les plages de Reghaia à Boumerdes.

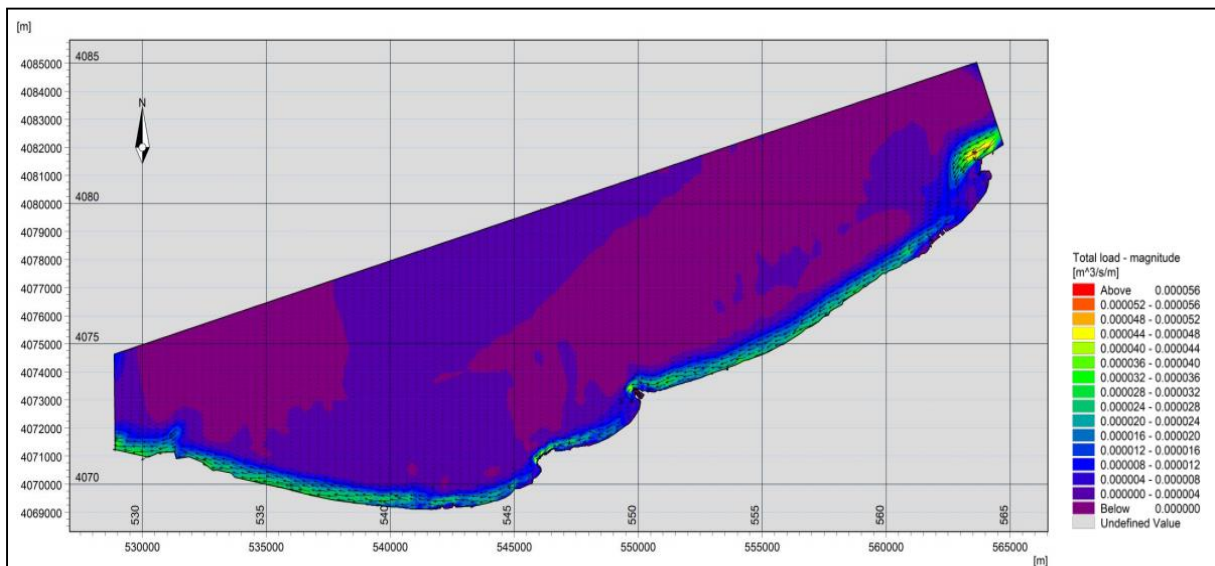


Figure 70 : Dynamique sédimentaire dans la Baie de Zemmouri pour : MWD= 45°.

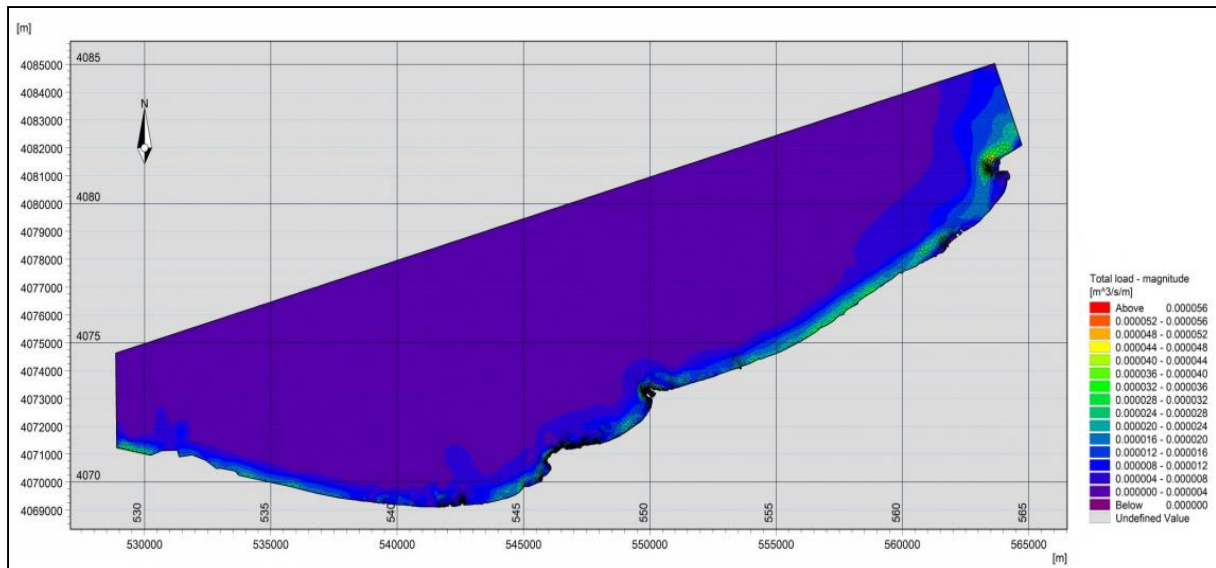


Figure 71 : Dynamique sédimentaire dans la Baie de Zemmouri pour : MWD= 360°.

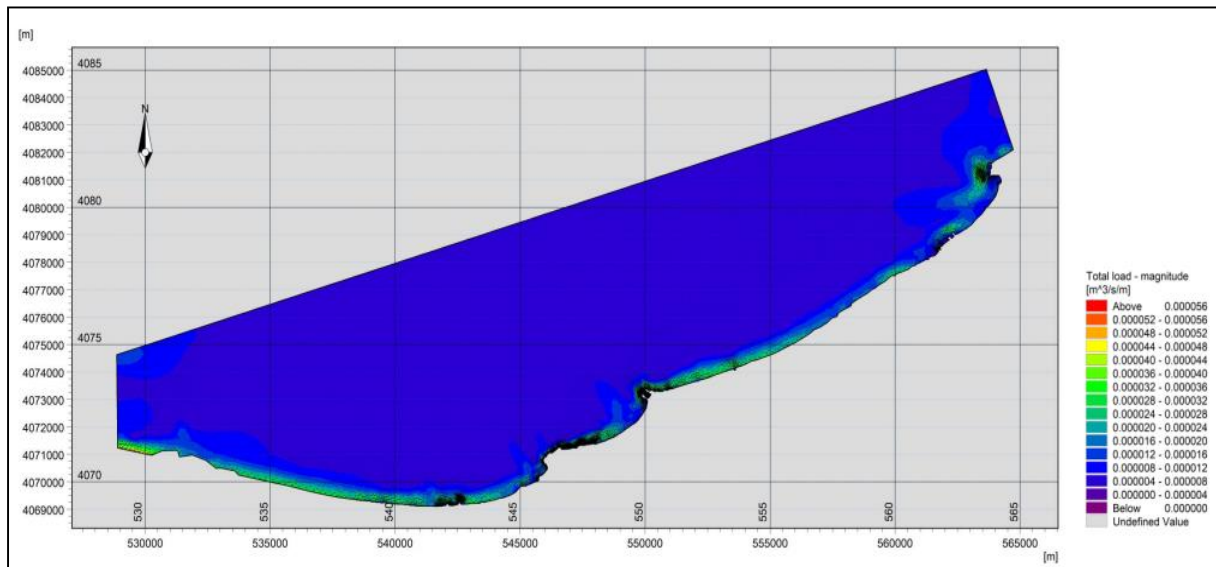


Figure 72 : Dynamique sédimentaire dans la Baie de Zemmouri: MWD= 315°.

7 Conclusion

La modélisation hydro-sédimentaire sous Mike 21 2D est assez significative, dans la mesure où elle fournit une vision plus précise des processus physiques au sein de la zone côtière telle que la dynamique morphologique.

Les résultats obtenus par le modèle Mike 21 montrent clairement que les houles de direction nord-est sont plus fréquentes le long de la côte de Zemmouri, celles-ci provoquent l'érosion d'une bonne partie des plages.

L'étude de la dynamique sédimentaire montre que le transport sédimentaire annuel est dirigé vers l'ouest avec un maximum de transport situé dans la partie ouest du port de Cap Djinet.

Les résultats de la modélisation numérique ont permis de confirmer l'état actuel des plages de la baie de Zemmouri ; à savoir une érosion intense dans les secteurs est et ouest, et celle du secteur centre par l'accrétion.

Chapitre VI :

Submersion marine

1 Introduction :

Actuellement, il est reconnu que le changement climatique et l'augmentation du niveau de la mer auront un impact majeur sur le milieu naturel et la société humaine dans la zone côtière. Plusieurs zones côtières ont subi déjà des problèmes environnementaux tels que l'érosion côtière, la dégradation des dunes, la pollution, et l'intrusion saline. L'élévation plus rapide du niveau de la mer amplifie le degré de pression sur ces zones, provoquant ainsi l'inondation des basses côtes, la destruction des zones humides côtières, l'érosion des plages. Par conséquent, L'Élévation du niveau de la mer est l'un des principaux impacts du changement climatique sur la baie de Zemmouri.

La côte de Zemmouris'étale sur une longue bande sableuse traversée par plusieurs oueds (Oued Isser, Oued Corso, Oued Boudouaou).La faible topographie de la zone fait qu'elle est très vulnérable à l'Élévation du Niveau de la Mer.

En raison de la faible topographie de la région et d'une occupation humaine excessive et parfois désordonnée, cette zone est particulièrement vulnérable à l'augmentation du niveau moyen de la mer Méditerranée, ce qui entraîne des phénomènes accrus de submersions marines et l'érosion des côtes.

2 La submersion marine :

Les submersions marines sont des inondations temporaires de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques (forte dépression et vent de mer) et marégraphiques sévères provoquant des ondes de tempête. Elles envahissent en général des terrains situés en dessous du niveau des plus hautes mers, mais aussi parfois au-dessus si des projections d'eaux marines franchissent des ouvrages de protection (**Levoy et al., 1997**).

Les submersions marines peuvent s'étendre sur une période allant de quelques heures à plusieurs jours, et elles sont généralement classées en trois sont distingués (**Cariolet, 2011**) :

➤ **Submersion marine par franchissement de paquets de mer :**

Ce mode de submersion, nommé wave overtopping en anglais, concerne toutes les inondations provoquées par le franchissement des vagues au-dessus de cordons naturels ou d'ouvrages de protection. Dans ce type de submersion, seule l'élévation du jet de rive est supérieure au sommet du cordon ou à la côte d'arase de l'ouvrage, et peut engendrer l'inondation de la zone basse située en arrière. L'énergie des vagues, le profil topographique de la plage et le cas échéant la forme de l'ouvrage, déterminent la hauteur du runup, donc l'importance du franchissement. En outre, la direction et la force du vent influent sur le jet de rive et les projections d'eau, en favorisant leur franchissement lorsque le vent souffle de la mer vers la terre, et inversement.

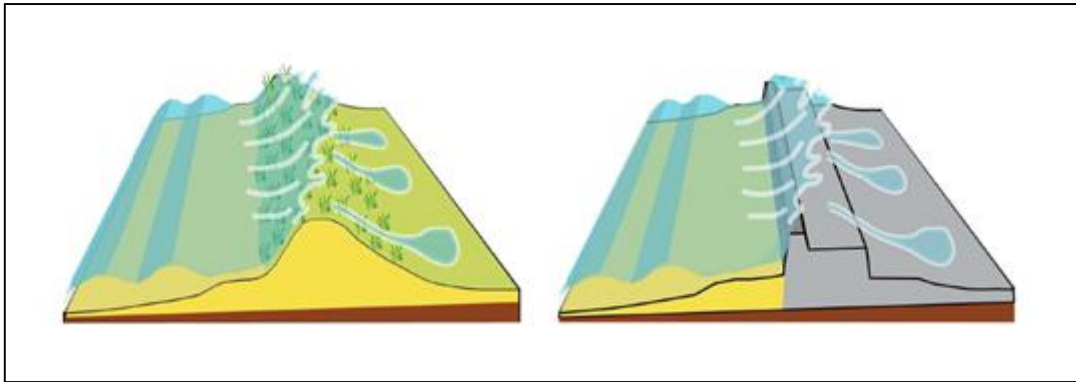


Figure 73 : Représentations schématiques de submersions générées par franchissement, à gauche sur un cordon dunaire, à droite sur un perré (Cariolet, 2011).

➤ **Submersion marine par débordement :**

Les inondations par débordement ont lieu lorsque le niveau d'eau est supérieur à la côte d'arase d'un ouvrage ou au sommet d'un cordon naturel). Souvent, ce type de submersion a lieu dans des zones abritées comme les estuaires ou les ports. Dans ces zones situées à l'abri de l'agitation marine, les côtes d'arase des ouvrages de protection et les altitudes des cordons sont souvent plus basses que sur les littoraux exposés. Cependant, dans ces zones protégées les surcotes peuvent être plus importantes à cause des phénomènes de « concentration » de l'onde de tempête. En outre, les mouvements de seiches dans la plupart des ports peuvent engendrer des élévations du niveau d'eau d'amplitude métrique, en quelques minutes et ainsi contribuer de façon significative aux phénomènes de débordement.

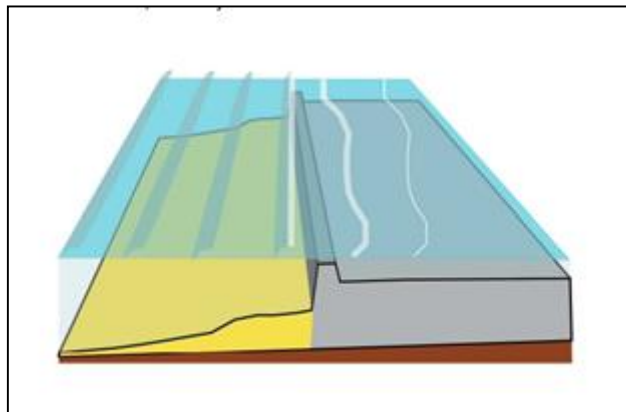


Figure 74 : Représentations schématiques d'une submersion générée par débordement. Le niveau d'eau est supérieur au perré (Cariolet, 2011).

➤ **Submersion par rupture d'un cordon naturel ou d'un ouvrage de protection :**

Les submersions par rupture d'un cordon ou d'un ouvrage sont celles qui engendrent le plus de dégâts et de pertes humaines, car elles sont rapides et peuvent inonder de vastes zones. L'attaque de la mer durant une tempête peut rompre un cordon naturel ou un ouvrage de protection. L'eau peut alors s'engouffrer dans la brèche et envahir très rapidement la zone basse située en arrière. Comme nous l'avons expliqué précédemment, un phénomène de débordement peut également entraîner la destruction complète d'un cordon ou d'un ouvrage. Sur les cordons, ce phénomène a été nommé « barrier overtopping ».

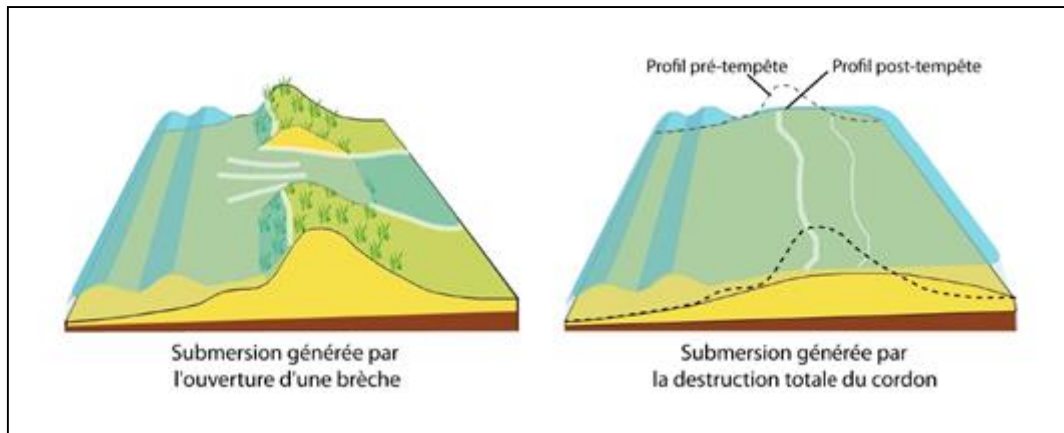


Figure 75 : Représentations schématiques d'une submersion générée par l'ouverture d'une brèche et par la rupture totale d'un cordon dunaire (Barrier dislocation) (Cariolet, 2011).

3 Les phénomènes physiques responsables des submersions marines d'origine météorologique :

Les processus physiques responsables de la submersion marine sont liés principalement à l'action de la pression atmosphérique et du vent sur le plan d'eau :

- **La surcote atmosphérique** : le passage d'un important système dépressionnaire est caractérisé par des variations du niveau marin selon deux mécanismes :
 - La chute de la pression atmosphérique entraîne une surélévation du niveau du plan d'eau. C'est le phénomène de baromètre inverse. Une diminution de 1hPa équivaut à une élévation de 1cm du plan d'eau.
 - Le vent exerce une contrainte à la surface de l'eau en générant une modification du niveau du plan d'eau statique (surcote ou décote) et des courants ;
- **La surcote associée à la houle (setup)** : à l'approche de la cote, les vagues déferlent elles transfèrent leur énergie sur la colonne d'eau provoquant une élévation moyenne du niveau d'eau (setup).
- **La surcote totale** : la part relative de la surcote atmosphérique et de la surcote associée à la houle dans la surcote totale est fortement dépendante de la bathymétrie du domaine considéré.
- **Niveau marin maximal statique et instantané** : Le niveau maximal atteint par la mer est défini en tenant compte du « jet-de-rive » (swash). On appelle run-up, l'altitude maximale atteinte par le jet-de-rive sur la côte.

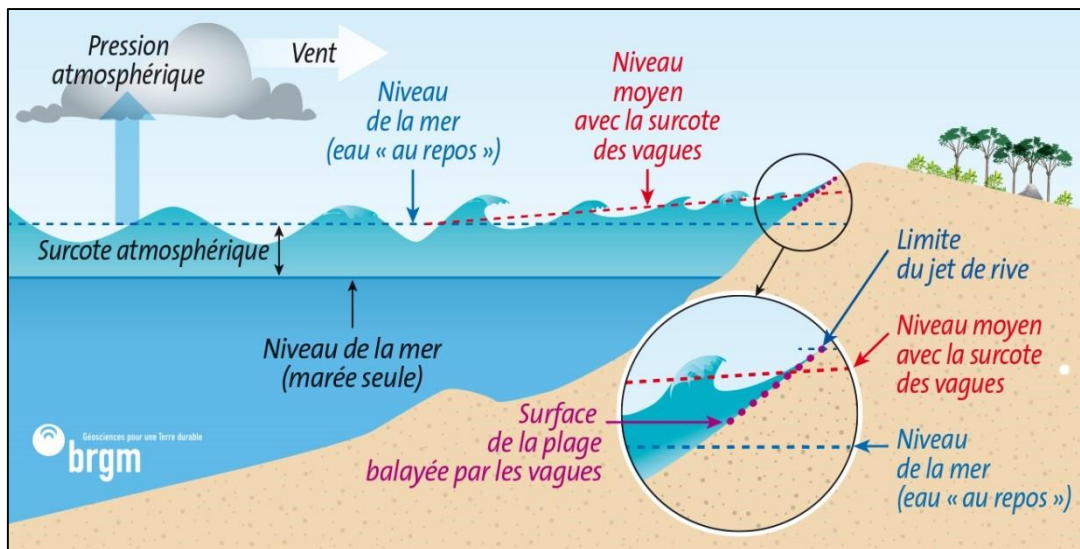


Figure 76 : Processus physiques en action lors d'une tempête : agitation et surélévation du plan d'eau (BRGM, 2012).

4 Méthodologie :

Dans le cadre de cette étude prospective, la caractérisation et la cartographie des terres qui sont à risque de submersion dans la cote de la zone d'étude sont basées sur des scénarios d'élévation du niveau de la mer, modélisée par l'utilisation du logiciel de cartographie « ArcGis 10.4 », ainsi pour prévenir les submersions d'ici deux échéances temporelles considérées à savoir 2021, 2022, 2040 et 2100.

La méthode retenue pour l'estimation de l'aléa submersion est celle utilisée par plusieurs auteurs (FLECHER *et al.*, 1995 ; BELLOMO *et al.*, 1999 ; BENAVENTE *et al.*, 2006 ; SUANEZ *et al.*, 2007 ; KUMAR *et al.*, 2008).

Cette méthode est basée sur :

- Le calcul des niveaux d'eaux extrêmes à la côte d'occurrence centennale, veingtenale, biennale et annuelle en tenant compte du wave set-up, wind set-up et l'élévation du niveau de la mer due à la baisse de la pression atmosphérique.
- En deuxième lieu, ce niveau d'eau d'inondation est superposé à un modèle numérique de terrain (MNT), dont la plus petite maille est de 2 m de côté et une résolution altimétrique de 0.5 m, de la zone d'étude en vue de cartographier la zone submersible.

4.1 Topographie côtière et utilisation des terres

L'élaboration des levés topomorphologiques pour évaluer les impacts des inondations marines est une étape préliminaire. Les données d'élévation ont été obtenues à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) (Figure 77) et une base de données des points de contrôle au sol (GCP) mesuré par un système de positionnement au sol. Cette démarche a été effectuée à l'aide des logiciels de cartographie ERDAS, Arc GIS. La résolution altimétrique du MNT utilisé est de 0.5 m et la résolution horizontale du MNT est de 2 m.

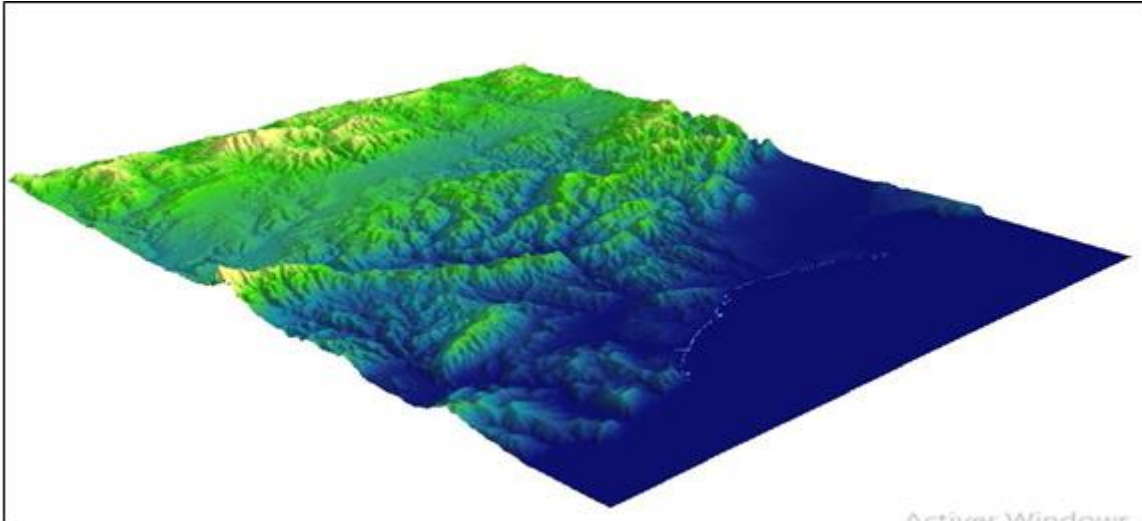


Figure 77 : Le modèle numérique du terrain (MNT) de la grande baie de Zemmouri.

4.2 Hausse du niveau de la mer

Au dernier siècle, la variation du niveau de la mer à l'échelle mondiale a été évaluée par des mesures des marégraphes. Comme les données à long terme n'étaient pas disponibles pour la baie de Zemmouri, les mesures ont été obtenues à l'aide des satellites altimétriques (Topex /Poséidon, depuis 1992) pour estimer le niveau moyen global de la mer sur la Méditerranée, soit environ 2.5 mm/an pour la période 1993 et 2004.

4.3 Niveaux d'eau extrêmes

La première conséquence de l'Élévation du niveau de la mer est le risque d'augmentation des inondations liée aux ondes de tempête dans les côtes basses (Nicholls *et al.*, 1999). En manque des données sur les surcotes et décotes, une méthode empirique a été adoptée pour l'estimation des niveaux d'eau extrêmes à l'aide de la formule (Hoozemans *et al.*, 1993):

$$D_{ft} = MHW + S_t + W_f + P_f \quad (32)$$

Où :

- MHW : Niveau moyen des hautes eaux ;
- S_t : Élévation relative du niveau de la mer ;
- W_f : Hauteur des houles de tempêtes responsables des inondations (centennale) ;
- P_f : Élévation du niveau marin en fonction de la pression atmosphérique.

- **Niveau d'inondation minimum**

Déterminé à partir des valeurs de niveau moyen des hautes eaux, les amplitudes moyennes de la houle, et la plus basse estimation de l'élévation du niveau de la mer.

- **Niveau d'inondation maximum**

Calculé à partir des valeurs de niveau maximum des hautes eaux, des amplitudes des houles de tempêtes, et de la plus forte estimation de l'élévation du niveau de la mer.

4.4 Variation du niveau de la mer en fonction de la pression atmosphérique :

Le réglage barométrique : le niveau de la mer peut varier en fonction des changements de la pression atmosphérique ; ainsi les basses pressions créent une surcote alors que les hautes pressions engendrent une décote. Cette relation peut être approchée à partir de la formule qui suit (Ménard *et al.*, 2003) :

$$Z = 0.01 (1013 - p) \quad (33)$$

p : est la pression atmosphérique en hectopascal.

L'élévation du niveau d'eau est considérée comme étant d'environ 0,10 m pour chaque chute de 10 hPa sous la pression barométrique normale (1013hPa). En Algérie, les pressions oscillent entre 952hPa et 1050hPa, faisant varier le niveau de la mer entre -0.37m et 0.63m (Figure 78).

4.5 Hauteur significative au large

Les données des houles et des vents sont des mesures altimétriques sur une période de 30 ans (1992-2022). Elles ont été obtenues à partir de la base de données « Infoplaza Marin Weather (2022) » disponible sur le site web www.waveclimate. Le traitement statistique de ces données a permis de définir la hauteur de vague centennale associée à la hauteur des houles provoquant les inondations côtières, et a permis aussi de faire une classification des fréquences d'apparition annuelle des classes des hauteurs significatives des houles au large en fonction de la direction (Figure 79).

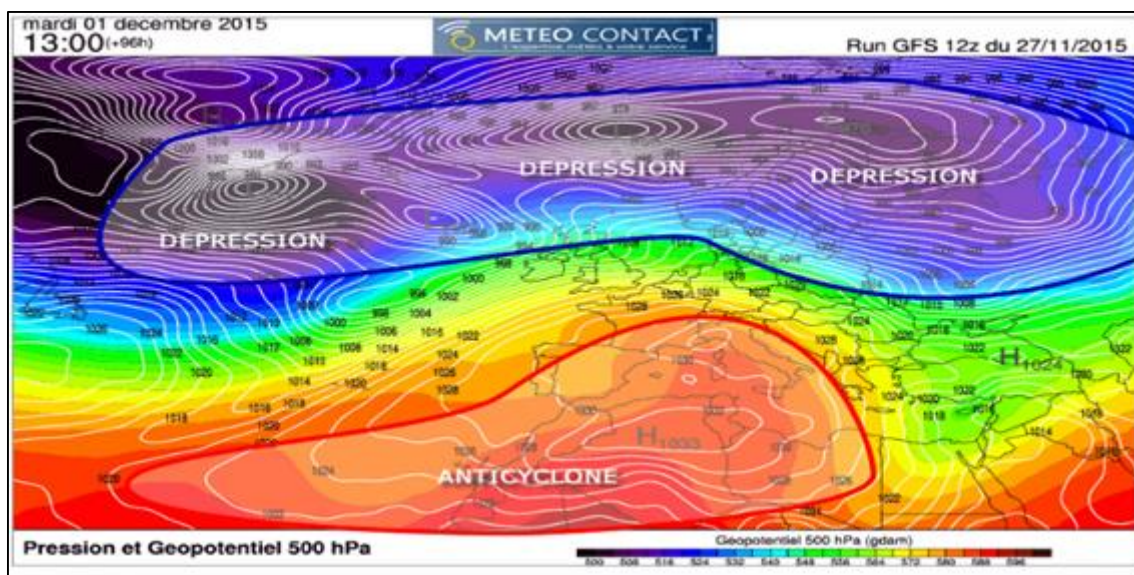


Figure 78 : Modélisation de la pression et des géo-potentiels à 500 hPa (modèle GFS).

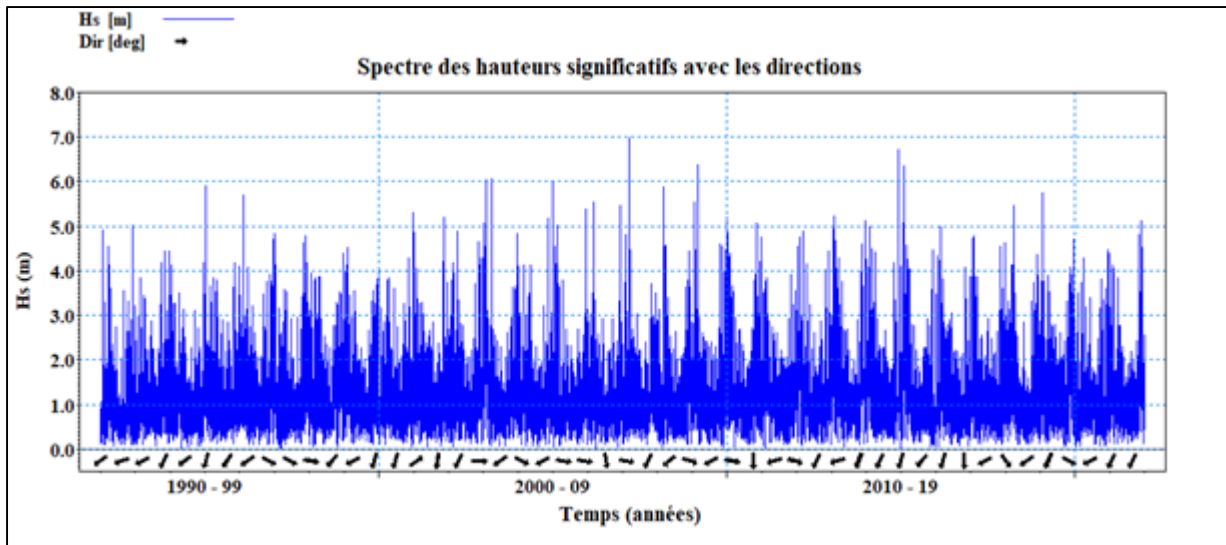


Figure 79 : La distribution des amplitudes de houles en fonction du temps (1992-2022).

Les données obtenues sont analysées et traitées comme suit :

- Les houles de tempête sont très rares et sont définies comme des hauteurs significatives variant entre 3,5 et 7,5m (**Figure 80**) ;
- Des houles prédominantes de hauteurs élevées varient entre 0,25 et 3 m ;
- Les agitations les plus fréquentes viennent des secteurs W et NE.

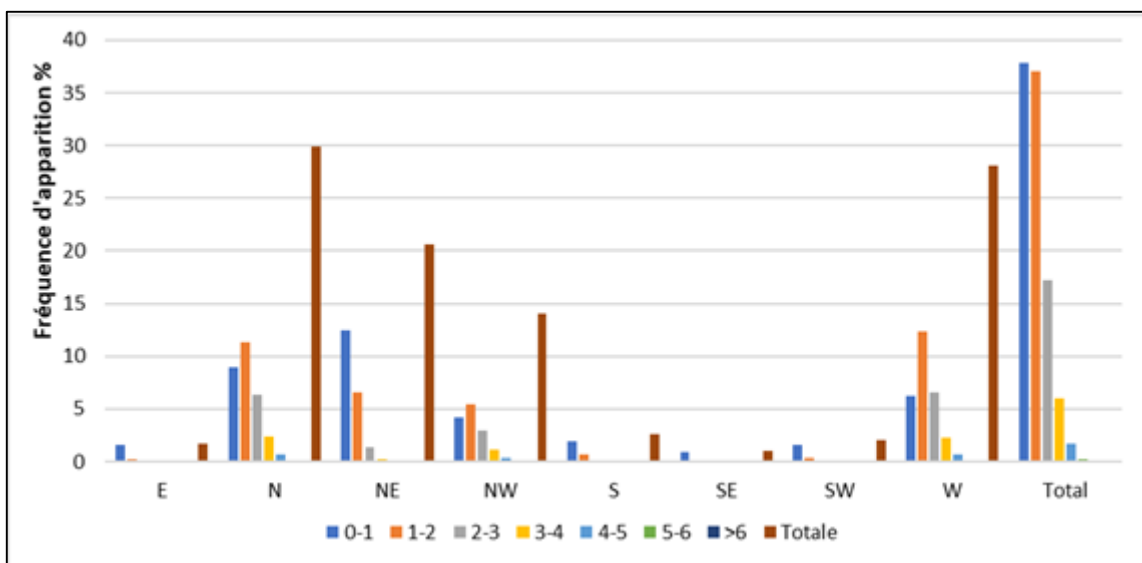


Figure 80 : La distribution fréquentielle des classes des hauteurs significatives par direction.

Tableau 14 : Résultats des hauteurs significatives associées aux périodes de retour (m).

Période de retour (année)	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	Omni
2	4,61	4,18	4,21	4,05	4,36	4,33	2,75	2,51	5,26
5	5,21	4,85	4,95	4,81	5,36	5,04	3,22	3,05	5,94
10	5,52	5,20	5,37	5,30	5,98	5,43	3,50	3,40	6,31
20	5,77	5,49	5,74	5,75	6,53	5,76	3,75	3,70	6,61
30	5,90	5,64	5,94	6,00	6,84	5,93	3,88	3,87	6,78
50	6,04	5,82	6,17	6,30	7,20	6,13	4,04	4,08	6,96
100	6,23	6,04	6,46	6,69	7,67	6,38	4,25	4,34	7,19

D'après le tableau ci-dessus (**Tableau 14**), les fortes agitations marines proviennent des secteurs NNE, N, W et NW avec des amplitudes qui oscillent entre 4.33 m et 7.67 m pour les houles biennale et centennale respectivement.

5 Les houles extrêmes à la côte

En principe, la hauteur et la période des houles extrêmes doivent être déterminées au point de déferlement. Les paramètres de houles extrêmes à la côte sont déterminés avec un modèle SW du Mike 21, ce qui permet de représenter la formation de la houle et son évolution à grande échelle spatiale. Les valeurs utilisées comme données d'entrée pour la modélisation des houles extrêmes à la côte sont celles des secteurs dominants (N, NNE et NW) avec des amplitudes centennales de 7.67m, 6.38 m, 6.46 m successivement.

Les résultats de la simulation de ces trois directions montrent que les houles de direction NW (**Figure 81**) ne subissent aucune modification et gardent leurs caractéristiques initiales du large par contre les houles de directions N et NNE (**Figure 82 et 83**) perdent une partie de son énergie (presque trois quarts $\frac{3}{4}$) lors de son évolution vers la côte.

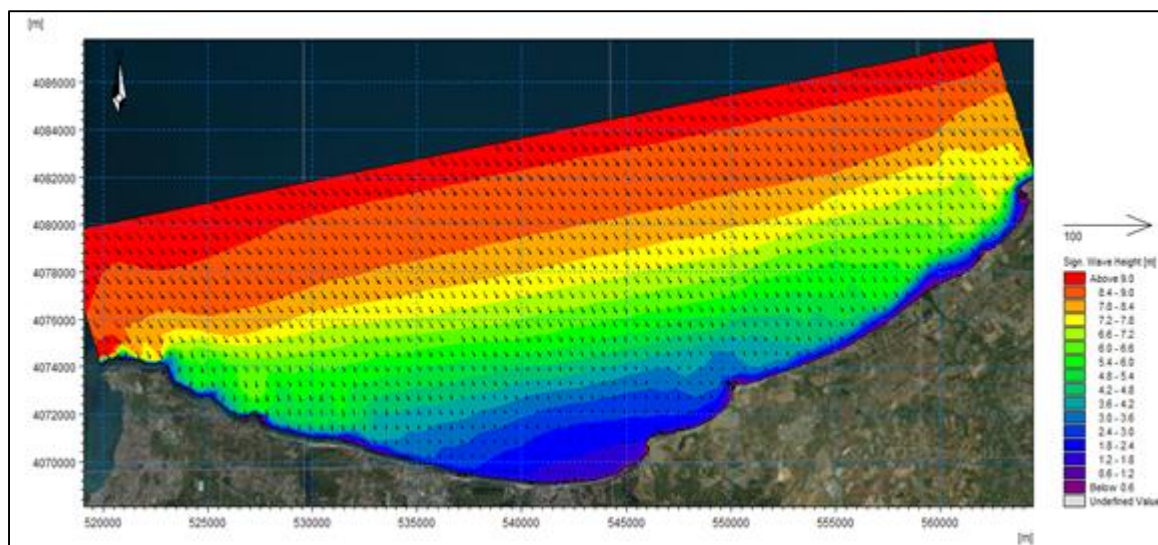


Figure 81 : Propagation des houles extrêmes Direction NW à la côte.

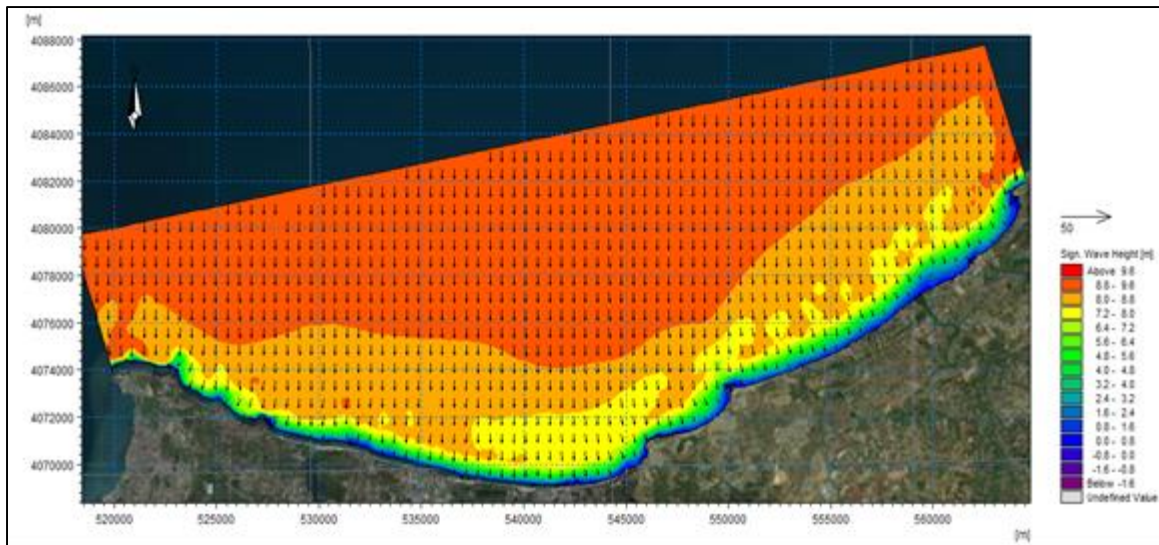


Figure 82 : Propagation des houles extrêmes de Direction N à la côte.

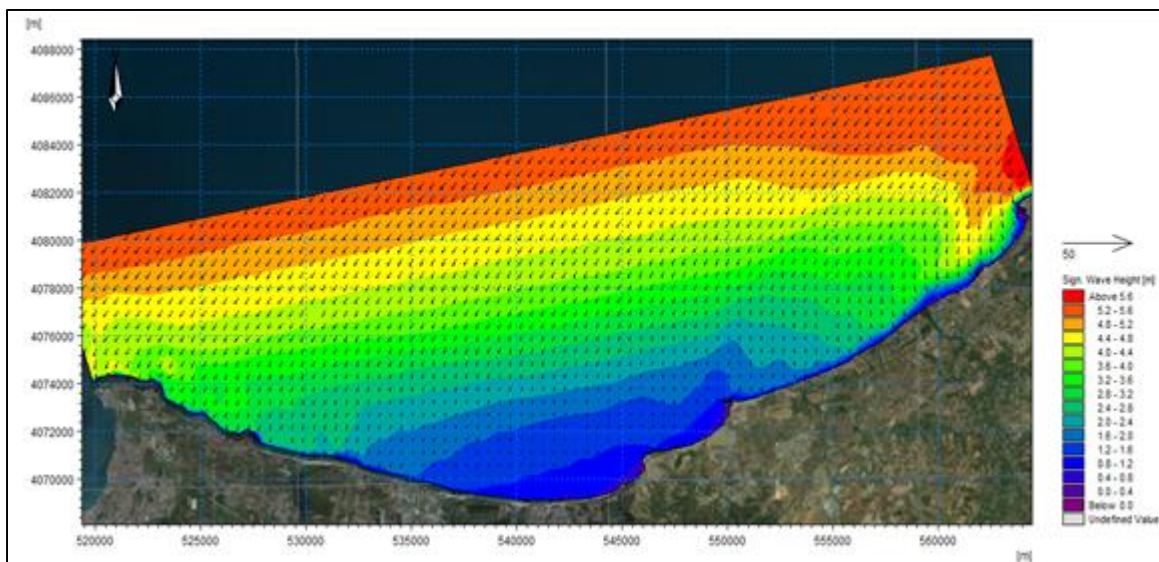


Figure 83 : Propagation des houles extrêmes Direction NNE à la côte.

On a pris les amplitudes maximales des houles provenant de la direction NW comme étant les plus défavorables pour le site d'étude. la plus forte valeur de H_s centennal extrême à la côte est de 5.00 m (**Tableau 15**), cette valeur est obtenue en quelques points situés dans la zone de déferlement de la zone d'étude (**Hemdane *et al.*, 2016**).

Tableau 15 : Hauteurs significatives des houles associées à des périodes de retour au large à la côte.

Période de retour (R)	N	NNE	NW
Houle annuelle (1 an)	0.8 m	0.8m	1 m
Houle biennale (2 ans)	2.5m	1.4m	3 m
Houle Vingtennale (20 ans)	3.7m	2.1m	4 m
Houle centennale (100 ans)	4.6m	3m	5 m

6 Scénarios d'inondations

Selon la méthodologie classique préconisée pour ce document, l'estimation des niveaux d'inondations extrêmes a été élaborée en prenant en compte les données suivantes :

- Niveau moyen des hautes eaux est +0.34 m ;
- Une surcote déterminée due aux effets de la pression atmosphérique est + 0.63 m ;
- Les amplitudes des houles extrêmes centennales à la côte de secteur NW sont 5.00 m ;
- Élévation relative du niveau de la mer est + 2.5 mm ;

Les résultats de la simulation des niveaux d'inondations sont présentés dans le (**Tableau 16**).

Tableau 16 : Niveaux d'inondations extrêmes de la côte de Zemmouri.

Période de retour (R)	MHW	St	Wf	Pf	Dft
1 an	0.34 m	2.5 mm	1 m	0.63 m	1.97 m
2 ans	0.34 m	2.5 mm	3 m	0.63 m	3.97 m
20 ans	0.34 m	2.5 mm	4 m	0.63 m	4.97 m
100 ans	0.34 m	2.5 mm	5 m	0.63 m	5.97 m

7 Évaluation des terres à risque d'inondation dû à une remontée accélérée du niveau de la mer

La submersion marine est un grand risque sur la côte de Zemmouri. Les tempêtes qui touchent périodiquement ce littoral peuvent provoquer de fortes houles et des surcotes marégraphiques. Des simulations d'inondation ont été effectuées pour laquelle un MNT construit à partir d'un levé topographique détaillé de l'avant-plage, de la côte basse et du cordon dunaire. Ces mesures ont été effectuées à l'aide d'un DGPS avec une précision centimétrique. Dans notre cas d'étude, la cartographie des inondations ne repose pas sur une modélisation numérique, mais se base plutôt sur la méthode de superposition topographique dans l'ArcGIS (10.4).

La superposition des quatre niveaux d'inondations (Scénario 2m, scénario 4m, scénario 5m et scénario 6m) pour les trois parties de Zemmouri (Oriental, Occidental et Centrale) sur une image satellitaire montre une étendue importante des zones inondables (**Figure 85**).

La (**Figure 85**) montre les niveaux d'exposition aux inondations catastrophiques dans la région de Zemmouri. Les dégradations de couleurs des communautés indiquent leurs niveaux

d'exposition aux inondations. Le bleu nuit indique un niveau d'exposition maximum (élevé), le bleu ciel indique un niveau d'exposition minimum (faible).

➤ **Submersion à 2 m**

D'après les cartes, on constate que non seulement la partie orientale de la baie (à Oued Isser) est la plus exposée à la crue de 2 m, mais aussi au niveau des embouchures des oueds (oued Boumerdès, oued Corso, oued Boudouaou El Bahri, oued Réghaïa).

En matière de superficie, les masses d'eau marines pénètrent jusqu'à l'arrière-pays, elles peuvent atteindre une superficie d'environ 1032,7 ha, celui-ci s'explique par la faible topographie de la zone et la présence des oueds le long de la côte de Zemmouri.

➤ **Submersion à 4 m**

Pour une hauteur des vagues atteinte 4 m, on constate que la superficie couverte par les eaux de mer est plus élevée en matière de surface et de distance par rapport au scénario de submersion de 2 m. La pénétration de l'eau de mer vers la terre est fortement accélérée par la présence des réseaux hydrographiques, comme : oued Réghaïa, oued Boudouaou El Bahri, oued Corso, oued Boumerdès et oued Isser; où le niveau des eaux de mer arrive à une dizaine de kilomètres vers la terre. La superficie inondée couvre 1699.72 ha, ce qui est dû non pas seulement à la morphologie côtière de basse altitude, mais également au régime climatique des houles du large.

➤ **Submersion à 5 m**

La carte de la submersion marine à 5m montre une forte infiltration des eaux de mer sur la partie terrestre par rapport aux scénarios précédents, celui-ci s'explique non seulement par sa morphologie côtière de basse altitude en regard de la partie centrale (forte pente), mais aussi par la présence des réseaux hydrographiques qui alimentent la côte de Zemmouri. La superficie des zones inondées est d'environ 2000 ha.

➤ **Submersion à 6 m**

Pour un cas des houles extrême à la côte de 6 m, il y a une pénétration spectaculaire de l'eau de mer sur le milieu urbain à des endroits très éloignés de la côte (dix kilomètres) dans plusieurs sens, notamment au niveau des zones d'embouchures (oued Réghaïa, Boudouaou El Bahri, Corso, Isser ...etc.). Néanmoins, des surfaces très importantes sont perdues à ce niveau de submersion : d'environ 2207,71 ha.

Les résultats de l'exposition au risque d'inondation dans la baie de Zemmouri pour les différents scénarios obtenus montrent que la bande côtière a connu une large pénétration de l'eau de mer. Il est évident que les zones topographiquement élevées, comme le cas du Cap blanc, Cap Matifou, Cap Djinet et les ouvrages de protections sont moins touchés alors que les embouchures des oueds (oued Réghaïa, oued Corso, oued Boumerdès et Oued Isser) sont plus touchées par l'élévation du niveau de la mer.

7.1 Perte des terres due à la submersion marine

La superposition des niveaux d'inondation sur la carte d'occupation des sols de la grande baie de Zemmouri permet d'obtenir les superficies des terres inondées selon les différents types d'occupation des sols (zones urbanisées, ports et ouvrages de protection, sites touristiques, plages et côtes rocheuses, forêts et maquis littoraux, espace vert et végétation, terres agricoles, terrain nu et zones humides). Les résultats principaux de la perte de terres due à la submersion marine sont présentés dans la (**Figure 84**) et dans le (**Tableau 17**). Ces résultats montrent que les terrains les plus touchés par le niveau minimum (2 à 4 m) sont essentiellement les terres

agricoles avec une superficie de 575 ha soit de 28.5 % à 36.27 % de la superficie totale inondée. Les superficies des plages et des dunes représentent 293 ha soit 17.24 % de la superficie totale inondée. Les zones urbaines seront moins touchées par ce niveau d'inondation sauf quelques endroits de la ville de Boumerdès qui seront susceptibles d'être submergés. Concernant le niveau maximum d'inondation (5 à 6 m), la superficie des terres submergées sera passée de 1700 à 2000 ha, englobant les zones urbaines côtières (Boudouaou El Bahri, H'raoua et Boumerdès) avec une superficie de 422 ha soit 19 % ; la surface des terres agricoles qui seront inondées est estimée à 800 ha soit 37 %. La superficie des plages et des dunes représente d'environ de 328 ha soit 14 %.



Figure 84 : Superficies des terres inondées par les différents niveaux d'élévation d'eau.

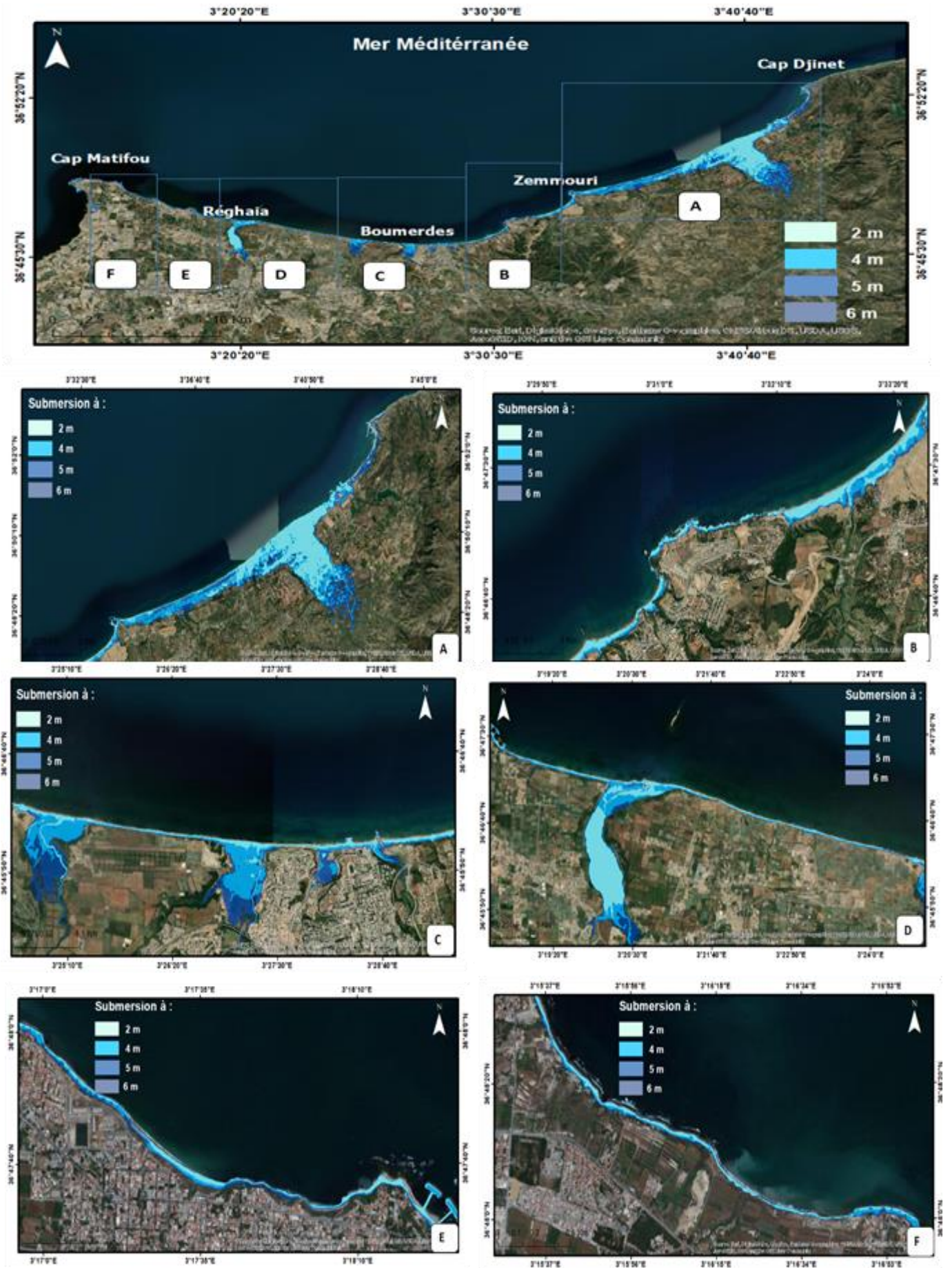


Figure 85 : Les zones inondables avec des niveaux de submersions de 2m, 4m, 5m, et 6m.
130

7.2 Évaluation de l'impact sur la population

Les projections et les calculs menés indiquent que les zones urbaines les plus touchées en 2050 par l'Élévation du niveau de la mer sont situées dans les communes côtières de Boumerdès et Corso. Les zones à faible risque sont situées dans l'arrière-pays où la topographie est plus élevée.

Il se trouve que la mauvaise stratégie d'aménagement est un facteur commun dans toutes les communautés de la région de Zemmouri. Cela augmente le degré d'exposition et la vulnérabilité des personnes au risque d'inondation (**Tableau 17**).

8 Conclusion

La submersion marine est un phénomène très compliqué à modéliser en raison des différents paramètres aléatoires tels que la surcote, l'effet du vent, etc., et des mauvaises observations lors des tempêtes passées.

L'application de la méthode du Houzemans a permis de cartographier les zones inondables dans la baie de Zemmouri.

Les résultats obtenus montrent que les zones les plus vulnérables aux inondations marines sont les zones de basse altitude.

L'analyse du risque d'inondation côtière dans la baie de Zemmouri montre le degré de vulnérabilité d'une côte basse à une inondation en fonction des différentes structures géomorphologiques qui y sont existantes : morphologie du littoral, caractéristiques des crêtes des dunes, pente de la plage.

Tableau 17 : Résultats des terres à risque d'inondation.

Type d'occupation du sol	Niveau d'inondation 2 m (R = 1 an)		Niveau d'inondation 4 m (R = 2 ans)		Niveau d'inondation 5 m (R = 20ans)		Niveau d'inondation 6 m (R = 100 ans)	
	Superficie (ha)	Superficie (%)	Superficie (ha)	Superficie (%)	Superficie (ha)	Superficie (%)	Superficie (ha)	Superficie (%)
	Zones urbanisées	132.55	2.84	289.14	17	364.38	18.22	422.21
Ports et ouvrages de protection	4.98	8	7.62	44	8.58	0.42	9.18	0.41
Complexes touristiques	0.36	4	19.14	1.12	23.45	1.17	25.47	1.15
Plages et côtes rocheuses	228.77	2.15	293.16	17.24	320.45	16.02	328	14.85
Forets et maquis littoral	104.86	10.15	135.56	97	158.07	7.9	177.18	8.02
Espace vert et végétation	75.18	7.28	98.56	9	105.06	3.25	111.68	5.05
Terres agricoles	294.34	28.5	575.02	33.83	706.64	34	800.92	36.27
Terrain nu	67.81	6.57	130.72	7.69	147.02	7.35	160.24	7.25
Zones Humides	123.82	12	150.75	8.86	165.63	8.28	172.81	7.82
Total	1032.7	100	1699.72	100	1999.32	100	2207.71	100

Chapitre VII:

Stratégies d'adaptation

1 Introduction :

En quatre décennies, le changement climatique s'est affirmé comme un objet scientifique et comme une question sociale et politique de premier plan à tous les niveaux décisionnels du global au local. Aucun qualificatif ne semble assez fort pour caractériser l'ampleur du phénomène. Le changement climatique est présenté aujourd'hui comme un problème majeur pour le XXI^{ème} siècle (Marquet, 2014).

2 Définition de changement climatique :

Le changement climatique fait référence à un changement dans l'état ou la variabilité du climat, il est identifié par une variabilité des propriétés du climat qui persiste durant une période prolongée et qui peut être identifiée grâce à des tests statistiques. Le changement climatique peut être causé par des processus internes naturels ou par des forces externes, telles que des éruptions volcaniques ou des actions anthropiques persistantes.

3 L'adaptation aux changements climatiques :

L'expression « adaptation aux changements climatiques » fait référence à toute action qui réduit les impacts négatifs des changements climatiques ou qui permet de tirer profit des nouvelles occasions qui en découlent. Une adaptation réussie ne veut pas dire qu'il n'y aura pas d'impacts négatifs, mais plutôt que les composantes exposées seront moins vulnérables à ces impacts que s'il n'y avait pas eu d'adaptation (Québec, 2012).

Une politique d'adaptation est, par essence, une politique de l'anticipation : anticipation par l'ensemble des acteurs des problèmes à venir ; anticipation de la perception par la société de ces changements (si le climat fluctue de manière erratique d'une année sur l'autre, les tendances lourdes au réchauffement persistent) ; anticipation enfin des mesures à prendre pour résoudre les défis, afin de ne pas les concevoir ni les mettre en œuvre dans la précipitation, sous peine de potentielles erreurs coûteuses pour l'avenir. Ces mesures d'adaptation sont de diverses natures (Galliot, 2013) :

- Physiques, comme la mise à niveau de digues de protection ;
- Institutionnelles, comme les mécanismes de gestion de crise ou l'instauration de réglementations spécifiques ;
- Stratégiques, comme le choix de déplacement ou d'installation de populations ou la mise en place de mesures facilitant la reconstitution en cas de sinistre ;
- Viser l'amélioration de la connaissance par des activités de recherche ;
- Cibler l'information du public et des décideurs, afin de faciliter la responsabilisation et la prise de décision.

4 Types de stratégie d'adaptation :

Sur la scène internationale, il est courant d'identifier trois principales stratégies d'adaptation aux changements climatiques : le Retrait Stratégique, l'Accommodation (atténuation) et la Protection (Tableau 18).

Tableau 18 : Les types d'adaptation face aux changements climatiques (Carreno et al., 2008).

Stratégies	Définition	Avantages	Inconvénients
Protection	Figurer le trait de côte (digues, enrochements) ou agir sur les causes de l'érosion (brises-lames, épis, rechargement en sable).	-Efficacité dans la résolution des problèmes au niveau local -Image sociale très positive	- Coûts importants (VINCHON C. <i>et al.</i> , 2006). - Déplacement du phénomène érosif vers d'autres secteurs (en Languedoc-Roussillon, la présence de 250 ouvrages le long du linéaire côtier a été recensée. Malgré cet arsenal, les problèmes d'érosion continuent toujours à l'heure actuelle). -Perturbation du fonctionnement sédimentologique.
Accommodation	(Ajustement des systèmes naturels et humains à un environnement nouveau ou changeant.) S'adapter au phénomène en édictant des règles de construction (zonage, rehausser les fondations des constructions...), des règles de « mitigation».	-Gain d'espace et préservation de l'état naturel du rivage. -Politique locale -Nécessite peu de coûts. -Indemnités et surcoûts liés aux ouvrages de protection évités.	-Mesures locales non-uniformes. -Mesures ne répondant pas à un impératif de long terme.
Recul stratégique	Déplacer ou retirer les enjeux en arrière	-Meilleure efficacité à court et long terme -Pas d'entretien -Pas d'impact sur le fonctionnement sédimentaire	-Besoin de place à l'arrière des enjeux et nécessité de trouver des terrains d'accueil pour déplacer les infrastructures. -Implique le déplacement ou le retrait des enjeux et des usages. Ne peut s'appliquer que dans les zones à faible enjeu socio-économique et pour des infrastructures ou de l'urbanisation légère. -Mesure la plus difficilement acceptable au niveau social. Coordination et communication importante afin de stabiliser l'impact social.
Non-Action	Prendre la décision de ne pas agir	Respect du fonctionnement naturel	-Application limitée aux espaces naturels à très faibles enjeux -Coût élevé par rapport à l'adaptation à l'élévation du niveau de la mer (EEA, 2007)

5 Les stratégies d'adaptation à court et moyen terme :

5.1 Le procédé Ecoplage® :

La technologie de drainage de plage a donné lieu à un dépôt de brevet du « Beach Management System » au Danemark, pays d'origine du système. Des licences étrangères du brevet, ont été, par la suite, émises pour ce système en France sous le nom « Ecoplage® » et aux Etats-Unis sous le nom « Stabeach ». Le rôle du système est d'augmenter la capacité naturelle d'une plage à retenir les sables apportés par le jet de rive. Un drain souterrain permet d'éviter la saturation en eau du sable, notamment sous le jet de rive, diminuant d'autant sa mobilisation par la nappe de retrait. Ce système de drains, enfouis sous la plage et reliés à une station de pompage permet d'abaisser le toit de la nappe d'eau souterraine d'infiltration. Une zone insaturée se crée par conséquent sous la surface de la plage favorisant la percolation. L'eau apportée par le jet de rive dépose donc à la surface les sédiments qu'elle contient et la puissance de transport de la nappe de retrait est réduite. La quantité d'eau et de sable qui monte sur la plage par l'intermédiaire du jet de rive est alors supérieure à celle qui redescend. Une partie de l'énergie des vagues est absorbée et par conséquent, l'érosion de la plage est diminuée (egis eau, 2009).

Le système consiste à enfouir des drains dans la plage, parallèlement au trait de côte, à une profondeur d'environ 2,50m, (Figure 86). L'eau recueillie est acheminée par gravité vers une station de pompage, pour être réutilisée ou, à défaut, rejetée en mer (Ballay et Breton, 2020).

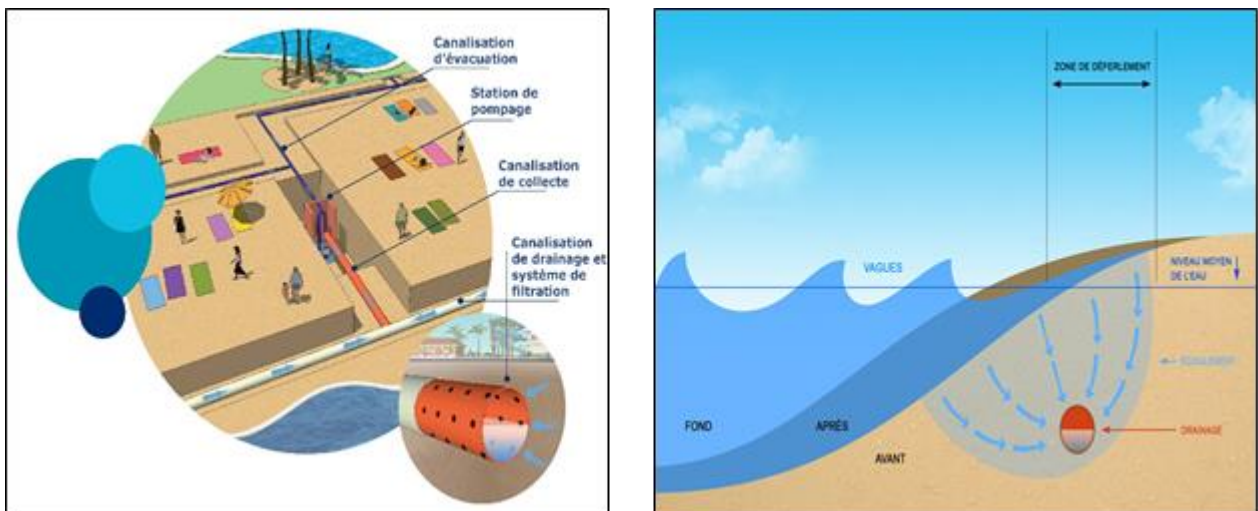


Figure 86 : Système (gauche) et principe (droite) du drainage Ecoplage® (Ballay et Breton, 2020).

5.2 Le procédé stabiplage® :

Le procédé stabiplage® est distribué par la société « Espace pur » créée en 1997, après que le brevet « stabiplage® » ait été déposé. Ce procédé consiste en la pose de structures en géocomposite jouant le rôle d'épis (ouvrages transversaux) ou de digues frontales (ouvrages longitudinaux) afin de lutter contre l'érosion marine et fluviale. La technologie du stabiplage® a été mise au point dans la perspective d'offrir une méthode douce de protection contre l'érosion. A ce titre, les ouvrages sont conçus pour s'intégrer de façon optimale dans

l'écosystème concerné : intégration dans la dynamique naturelle, respect de la biomasse et des usagers (Suanez *et al.*, 2005).

Le stabiplage® est une structure en géocomposite injecté hydrauliquement de granulats. Ce sont ces derniers qui lui donnent et maintiennent sa forme globalement elliptique (forme potatoïde) en coupe et cylindrique sur la longueur. Les matériaux utilisés, testés en laboratoire et éprouvés in-situ, sont résistants aux conditions naturelles extrêmes de pression et de température. La structure bicouche brevetée, un filtre perméable recouvert d'une carapace résistante, permet d'assurer la longévité dans le temps, de la forme de l'ouvrage et de sa résistance aux agents d'érosion : abrasion par le sable, UV, hydrocarbures, déchets divers transportés par les courants, les marées. Le procédé stabiplage® n'implique pas de moyens techniques lourds pour sa mise en œuvre. De même, les besoins de maintenance sont nuls dans des conditions d'utilisation normales. A l'inverse des structures lourdes de type enrochement, il perturbe très peu la dynamique sédimentaire. L'effet domino qui implique les ouvrages transversaux (épis) est considérablement réduit car les structures sont dimensionnées pour capter judicieusement le transit sédimentaire longitudinal, sans pour autant le bloquer de façon définitive. Ainsi, les effets de non alimentation et d'érosion que l'on trouve généralement à l'aval du système sont diminués. L'aspect monolithique et cylindrique du stabiplage® assure une stabilité optimale de la structure. Les effets de sur/sous pression sont diminués ; de même, la résonance de la houle au déferlement sur l'ouvrage est considérablement réduite car la vague est accompagnée et non contrée. Enfin, le caractère perméable et la technique de pose des ouvrages permettent d'écarter les risques d'affouillement. A terme, lorsque la structure a pleinement joué son rôle de captage des sédiments, elle est naturellement recouverte se fondant ainsi dans le paysage. Les usagers peuvent alors facilement franchir ces ouvrages. Lorsqu'ils sont immergés, ils ne présentent pas de risques pour les baigneurs et les jeux nautiques (Suanez *et al.*, 2005).

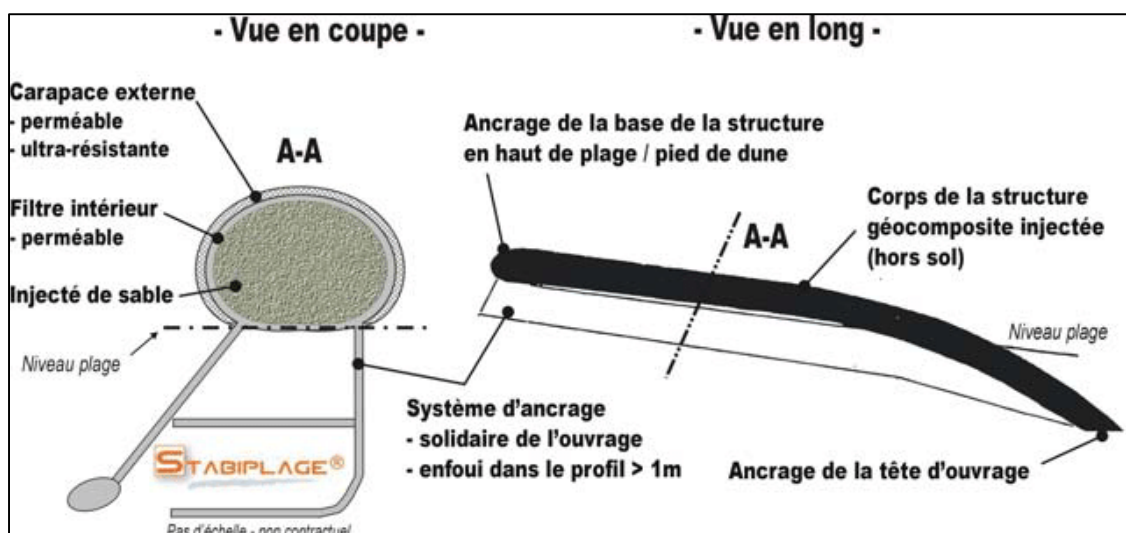


Figure 87 : Système de stabiplage (Cariolet *et al.*, 2008).

5.3 Le by-passing :

Le by-passing sédimentaire c'est une technique douce désigne la mise en place d'un système artificiel pour le déplacement de sable ou de galets le long du littoral, afin de pallier un manque ou une interruption du transit naturel.

Il y a plusieurs options pour déplacer les sédiments d'une zone située en amont du transport littoral vers une zone en aval :

- Le déplacement des sédiments par voie terrestre à l'aide d'un camion.
- Le dragage en mer en utilisant un ponton flottant qui évacue les sédiments en aval. Cela peut être réalisé soit par des installations de dragage à terre, soit par des dragues flottantes.
- L'installation d'un système de transport par tuyauterie et de pompes intégré aux infrastructures portuaires, également appelé "by-pass".

5.4 Le rechargement des plages :

Le rechargement de plage est une technique consistant à apporter des sédiments (d'une granulométrie préférablement supérieure ou égale à celle du site) de manière à remonter le niveau topographique de la plage pour protéger l'arrière-côte et augmenter l'aspect visuel et récréatif d'une plage. Le rechargement peut se faire directement sur l'estran ou dans les « petits fonds », de manière mécanique par transport routier ou par projection à l'aide d'une pompe hydraulique depuis une barge en mer. Le rechargement peut être conforté par la mise en place d'une butée de pied dans les petits fonds. Il sera caractérisé par le volume rechargé, la surface de plage concernée, la périodicité du rechargement s'il est automatisé et/ou la date du dernier rechargement (CETMEF, 2011).

5.5 Autres stratégies :

Il pourrait être envisagé de construire des ouvrages de protection et/ou de renforcer les structures existantes avec des enrochements pour préserver les zones urbaines. À mesure que le niveau de la mer augmente, il serait probablement nécessaire d'ajouter des structures supplémentaires aux infrastructures déjà présentes à Boumerdes et Ain Taya. L'objectif serait que ces murs d'enrochement puissent absorber l'énergie supplémentaire des vagues. La même approche devrait être appliquée aux jetées des ports de Djinet et Zemmouri. Les mesures à prendre pourraient inclure une augmentation progressive de la hauteur des digues jusqu'à ce qu'elles dépassent légèrement le niveau d'inondation maximum.

6 Les stratégies d'adaptation à long terme :

Les littoraux méditerranéens sont des lieux d'importance stratégique qui abritent des écosystèmes riches et variés, tout en étant soumis à de nombreuses pressions. Depuis plus de vingt ans, le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) met en garde sur le fait que ces zones fragiles risquent d'être fortement impactées par le changement climatique. La gestion intégrée des zones côtières (GIZC), reconnue comme l'approche la plus appropriée pour favoriser un développement durable de ces espaces vulnérables, intègre aujourd'hui pleinement cette problématique. Toutefois, la GIZC, par nature participative, est confrontée à un défi de taille : donner aux acteurs les moyens de coplanifier leur territoire en

intégrant dans les réflexions les impacts du changement climatique (**Véronique et Antoine, 2018**).

La baie de Zemmouri a été fortement touchée par la coexistence intense d'activités socioéconomiques telles que le tourisme, l'industrie, l'aquaculture et la pêche, ce qui l'a rendue particulièrement susceptible aux risques naturels tels que l'érosion côtière et la montée du niveau de la mer, amplifiés par les changements climatiques. Par conséquent, il est essentiel de mettre en place des stratégies d'atténuation et d'adaptation à long terme pour rééquilibrer cette situation.

6.1 Le concept de la gestion intégrée des zones côtières :

La notion de gestion intégrée trouve ses origines dans les principes de l'Agenda 21 formulés au sommet de la Terre de Rio de 1992, réunion internationale qui a été un important vecteur et diffuseur du concept de développement durable. La gestion intégrée consiste donc à instaurer sur les littoraux une démarche concertée d'application des principes du développement durable, c'est-à-dire, comme il est défini dans le rapport Brundtland de 1987, un développement permettant de satisfaire les besoins des sociétés du présent sans compromettre les capacités des sociétés futures à satisfaire les leurs (**Gourlay, 2010**).

6.2 L'approche de la GIZC :

La GIZC est un processus dynamique qui vise à garantir l'utilisation durable des zones côtières en prenant en compte simultanément la fragilité des écosystèmes et des paysages côtiers, la diversité des activités et des usages, leurs interrelations, la vocation maritime de certaines d'entre elles, ainsi que leurs répercussions sur le milieu côtier. Parmi ces objectifs:

- Faciliter, grâce à une planification logique des activités, le développement durable des régions côtières en s'assurant que l'environnement et les paysages soient pris en compte en concordance avec le développement économique, social et culturel;
- Protéger les régions côtières pour le bénéfice des générations actuelles et futures;
- Garantir l'usage durable des ressources naturelles, et en particulier de l'eau;
- Garantir la préservation de l'intégrité des écosystèmes, de la géomorphologie et des paysages sur le littoral;
- Prévenir et réduire les effets des dangers naturels et, en particulier, du changement climatique qui peut être provoqué par des activités naturelles ou humaines;
- Mettre en cohérence les initiatives publiques et privées ainsi que toutes les décisions des autorités publiques, au niveau national, régional et local, qui affectent l'usage du littoral (**Announ et Nassiha, 2011**).

6.3 La structure du processus de GIZC :

La GIZC est conduite selon un processus qui, en général, comporte trois grandes étapes: **l'initiation**, qui comprend l'analyse des facteurs qui peuvent sensibiliser le public sur les problèmes du littoral et l'inciter à entreprendre des actions dans les régions côtières; **la planification**, qui fait référence à la formulation de politiques et d'objectifs et à la sélection des stratégies en vue de produire progressivement le mélange souhaité de biens et de services

en zone côtière et la **mise en œuvre** par laquelle le plan devient réalité (Announ et Nassiha, 2011).

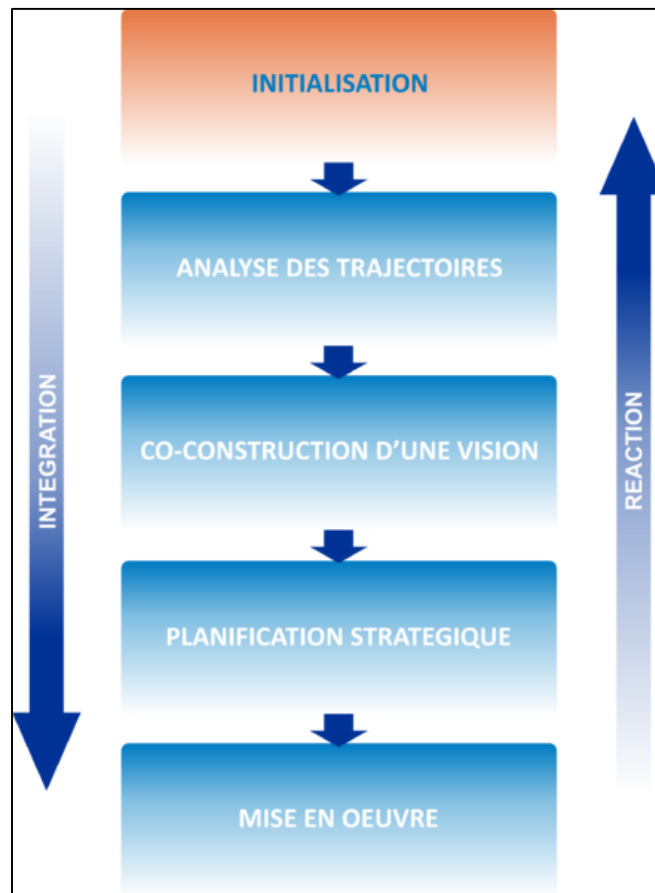


Figure 88 : La structure du processus de GIZC (<https://www.coastalwiki.org>).

6.4 L'élaboration d'un plan GIZC du littoral de la grande baie de Zemmouri :

L'élaboration d'un plan GIZC (Gestion intégrée de la zone côtière) pour le littoral de la grande baie de Zemmouri implique une approche intégrée de la gestion des ressources et de l'aménagement de la zone côtière afin de garantir sa durabilité à long terme. Voici un aperçu général des étapes et des composantes clés de l'élaboration d'un plan GIZC pour cette région spécifique :

➤ **Évaluation de la situation actuelle :**

- L'étude des caractéristiques géologiques, géomorphologiques, climatiques, hydrodynamiques, hydrologiques de la région, ainsi que des événements extrêmes et la modélisation numérique.
- Analyse de l'histoire de l'érosion côtière et de la submersion marine dans la région.
- Évaluation des écosystèmes côtiers et de leur vulnérabilité au changement climatique.

➤ **Identification des parties prenantes :**

- Impliquer les autorités locales, les communautés locales, les scientifiques, les organisations environnementales et d'autres parties prenantes concernées.

➤ **Évaluation des risques et des vulnérabilités :**

- Identifier les zones les plus exposées à l'érosion côtière et à la submersion marine.
- Évaluer les impacts potentiels du changement climatique sur la région.
- **Définition des objectifs et des priorités :**
 - Établir des objectifs clairs pour la gestion intégrée des zones côtières.
 - Hiérarchiser les actions en fonction des priorités identifiées.
- **Planification de l'adaptation :**
 - Élaborer des stratégies spécifiques pour atténuer l'érosion côtière et prévenir la submersion marine, telles que la mise en place de systèmes de digues, etc.
- **Planification de la gestion des ressources naturelles :**
 - Mettre en place des stratégies de gestion durable des ressources marines, telles que la pêche, la gestion des zones humides, etc.
- **Engagement communautaire et sensibilisation :**
 - Impliquer activement les communautés locales dans la planification et la mise en œuvre du plan GIZC.
 - Sensibiliser les résidents locaux aux enjeux liés au changement climatique et à la gestion côtière.
- **Suivi et évaluation :**
 - Mettre en place un système de suivi pour surveiller les progrès réalisés dans la mise en œuvre du plan.
 - Réévaluer régulièrement les risques et les mesures en fonction de l'évolution des conditions climatiques et environnementales.
- **Coordination interinstitutionnelle :**
 - Assurer une coordination étroite entre les différentes agences gouvernementales, les ONG et les acteurs locaux pour une mise en œuvre efficace du plan.
- **Mobilisation des ressources :**
 - Identifier les sources de financement disponibles pour la mise en œuvre du plan, y compris les financements internationaux et les partenariats public-privé.
- **Communication et diffusion de l'information :**
 - Assurer une communication transparente et régulière sur les actions entreprises et les résultats obtenus.

7 Conclusion :

La baie de Zemmouri est confrontée à des défis significatifs liés au changement climatique, tels que l'érosion côtière et la submersion marine, qui exacerbent sa vulnérabilité. Pour faire face à ces menaces grandissantes, des stratégies d'adaptation à court et long terme sont essentielles. L'approche de la Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC) se révèle être une solution prometteuse, car elle prend en compte non seulement les aspects environnementaux, mais aussi les enjeux sociaux et économiques.

La protection et la préservation de la baie de Zemmouri dépendent de l'engagement continu de la communauté locale, des autorités gouvernementales, des organisations environnementales et de tous les acteurs concernés. Ensemble, en adoptant une approche proactive et en mettant

en œuvre des stratégies d'adaptation appropriées, nous pouvons espérer garantir un avenir durable pour cette région précieuse et résiliente face aux défis climatiques qui se posent.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de cette étude était d'analyser les possibles conséquences des changements climatiques et des activités humaines sur la zone côtière de la grande baie de Zemmouri. Les résultats de cette étude ont mis en évidence une vulnérabilité significative, tant sur le plan environnemental que socio-économique, de cette région face à ces influences.

Dans la baie de Zemmouri, l'étude hydrodynamique a mis en évidence que les houles en provenance des secteurs Nord-Est, Ouest et Est-Nord-Est sont les plus dominants sur l'ensemble du littoral de Zemmouri avec des fréquences d'apparition respective de 18.09%, 19.28% et 15.84% avec une hauteur significative de 2.5 à 4 m qui montre un état de la mer "forte" selon l'échelle de Douglas, cette configuration favorise efficacement le déplacement de sédiments à différentes échelles spatiotemporelles.

En ce qui concerne la cartographie de l'évolution du trait de côte dans la baie de Zemmouri, cette tâche a été exécutée en utilisant le logiciel ArcGIS conjointement avec DSAS, également connu sous le nom de « Digital Shoreline Analysis System », version 4.3.

L'analyse temporelle de l'évolution de la dynamique côtière a révélé que ce littoral a subi une forte pression au fil des décennies, principalement due aux activités de développement, en particulier l'urbanisation et le tourisme. Ces activités ont perturbé le fonctionnement hydro-sédimentaire du système côtier, entraînant une sévère érosion des plages à un rythme moyen de recul d'environ -0.9 m/an sur la période de 1972 à 2022. Ces plages étaient pourtant considérées comme un atout économique majeur pour le tourisme balnéaire de la région, et également comme une réserve essentielle pour le réajustement des profils de plage en cas d'érosion. Cette érosion a entraîné une perte de 242 ha de sa surface d'évolution. L'état environnemental actuel de ce littoral est gravement altéré, ce qui laisse présager des défis considérables en termes d'adaptation en cas d'élévation du niveau de la mer, à moins que des mesures concrètes ne soient prises pour le préserver de ce phénomène inévitable.

Une tendance longitudinale a été révélée. Dans lequel, la zone Est marquée par une progradation avec des taux moyens d'accumulation de +0.35m/an, la zone centrale est caractérisée par des taux de recul côtier variant de -0,09 à -0,59 m/ an, ce qui équivaut à une perte de terre allant de -4,62 m à -29,38 m. Dans la zone Ouest, le trait de côte montre une situation de recul avancée avec des taux de recul moyens allant de -0,89 à -1.07 m/an.

Pour l'analyse des événements extrêmes les données de houles ont été extraites de la base de données www.waveclimate.com, la série de données traitée est composée de 87 664 mesures pour chacun des trois paramètres de houle (Hs, Tp, Dp). A l'aide des méthodes de prédiction des événements extrêmes POT et GEV, nous avons calculé les hauteurs de houle associées à des périodes de retour allant jusqu'à 1000 ans. Nous avons observé que la direction Nord-Est présente la plus faible probabilité de générer une houle extrême pour les deux méthodes. En revanche, les directions les plus enclines à provoquer des hauteurs de houle plus élevées sont le Nord, le Nord-Nord-Est et l'ouest pour la distribution Gumbel (GEV), ainsi que le Nord, le Nord-Nord-Ouest et le Nord-Ouest pour la distribution de Weibull (GEV), et enfin le Nord, l'Est-Nord-Est et le Nord-Nord-Ouest pour la méthode POT. Une comparaison des deux méthodes a été réalisée, et les résultats révèlent que la méthode POT nécessite un nombre plus élevé de points que la méthode GEV, mais cette dernière produit des résultats supérieurs d'environ une dizaine de centimètres.

L'analyse des résultats obtenus grâce au modèle des vagues MIKE 21 a révélé que la forme du fond marin du plateau continental de la baie de Zemmouri présente une certaine irrégularité. En outre, ce modèle a souligné que la région étudiée est influencée par les vagues provenant des directions 315°N, 45°N et 360°N, générant ainsi des courants de dérive parallèles à la côte et des courants de retour perpendiculaires à la côte. La répartition des sédiments le long de la

Conclusion générale

côte indique une dérive littorale bidirectionnelle, c'est-à-dire d'Est en Ouest pour les houles provenant de 45°N, et d'Ouest en Est pour celles provenant de 315°N. Il est important de noter que la direction de la dérive littorale varie en fonction du temps et de la zone géographique considérée.

Les risques potentiels de perte de terres, à la fois naturelles et aménagées, dus aux inondations sont susceptibles d'être considérables d'ici à 2100. Les intrusions marines pourraient s'étendre jusqu'à une dizaine de kilomètres à l'intérieur des terres, englobant une superficie de 1032.7 hectares pour un niveau d'inondation minimal (R = 1 an) et 2207.71 hectares pour un niveau d'inondation maximal (R = 100 ans). Ces impacts auront des conséquences significatives sur les aspects essentiels de la vie des populations côtières.

Il est donc envisageable d'éviter, ou du moins de réduire, ces impacts en adoptant une approche dynamique appelée "Gestion intégrée des zones côtières" (GIZC). Cette approche vise à protéger, valoriser et développer la zone côtière dans le cadre du développement durable. Elle consiste à mettre en place des mesures d'adaptation et d'atténuation préventives, respectueuses de l'environnement et financièrement réalisables. Ces mesures devraient faire l'objet d'une réévaluation régulière en raison des changements potentiels susceptibles d'affecter la dynamique côtière et, par conséquent, la vulnérabilité. Cette réévaluation tient également compte des avancées scientifiques dans la compréhension des processus côtiers, des évolutions technologiques, et d'autres facteurs similaires. Étant donné que les effets des changements climatiques sont un enjeu majeur en matière de risque, il est impératif de les intégrer rapidement dans les études futures. Pour ce faire, une prise de conscience collective et une collaboration entre les acteurs socio-économiques sont essentielles pour la réussite de telles stratégies, ainsi que pour la mise en œuvre de mesures de conservation côtière pertinentes.

Perspectives d'avenir :

Cette étude menée sur le littoral de la grande baie de Zemmouri a indéniablement fourni des résultats importants concernant la vulnérabilité et l'adaptation de ce littoral face à l'élévation du niveau de la mer et aux activités humaines. Cependant, il est important de noter que cette étude présente des opportunités d'amélioration. Pour parvenir à des résultats de qualité et concrets qui reflètent fidèlement la réalité, plusieurs éléments sont nécessaires, notamment :

- La disponibilité d'ortho-images avec une résolution centimétrique couvrant la zone d'intérêt.
- L'accès à des données sur le climat deshoules au large et à la cote.
- Des cartes bathymétriques et des relevés topographiques plus précis et plus récents, qui permettraient de créer un Modèle Numérique de Terrain, un outil essentiel pour une meilleure précision dans la modélisation des scénarios d'inondation.
- La collecte de données de terrain pour valider et affiner les modèles.

La promotion du partage des données dans le cadre de la recherche scientifique, favorisant ainsi la collaboration entre les chercheurs.

Ces améliorations contribueront à renforcer la qualité des études futures et à obtenir des résultats plus solides et pertinents pour la prise de décisions en matière de gestion côtière et de planification du littoral.

Références bibliographiques

- 1 **Abdi, M. et Amara, A. (2017).** *Étude géologique de la partie nord-est du gisement d'agrégats de Si-Mustapha (w. Boumerdes, Algérie) ; impact sur l'environnement. Thèse de doctorat. Spécialité : Ressources Minérales et Environnement Tizi Ouzou : Université Mouloud Mammeri. P.109*
- 2 **Albert, C. (2018).** *Estimation des limites d'extrapolation par les lois de valeurs extrêmes. Application à des données environnementales. Thèse de doctorat. Spécialité : Mathématiques Appliquées. France : Université Grenoble Alpes.*
- 3 **Amara, L. et Chalal, Y. (2022).** *MACHINE LEARNING POUR L'ETUDE DE LA PERFORMANCE HYDRAULIQUE DES OUVRAGES PORTUAIRE, CAS MARINA D'ALGER. Mémoire d'ingénieur. Spécialité : Gestion et protection du littoral. Alger : ENSSMAL.*
- 4 **Amarouche, K. (2015).** *Contribution à la recherche des zones à fort potentiel d'énergie houlomotrice à base d'un modèle hydrodynamique. Mémoire d'ingénieur. Spécialité : Gestion et protection du littoral. Alger : ENSSMAL*
- 5 **Amrouni, O. (2020).** *Dynamique sédimentaire des plages sableuses microtidales à barres et du trait de côte à plusieurs échelles spatio-temporelles. Thèse de doctorat. Spécialité : Sédimentologie. Tunis : Université de Tunis El Manar. Faculté des Sciences de Tunis. P.114*
- 6 **ANBT. (2023).** *Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT).*
- 7 **Announ, L. et Nassiha, F. (2011).** *Les données géographiques de référence pour la gestion intégrée de la zone côtière (GIZC) (cas : littoral Algérois). Mémoire de master. Spécialité : Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL*
- 8 **ANRH. (2004).** *Annuaire Hydrogéologique de la nappe alluviale du Haut et Moyen Cheliff. Hydrogeological Yearbook of the alluvial aquifer of the Upper and Middle Cheliff. Unpublished report, Alger:ANRH.*
- 9 **Aoudj, C. et Bouaziz, T. (2014).** *Fonctionnement et dynamique morpho-sédimentaire du littoral Est de Béjaïa. Mémoire d'ingénieur. Spécialité : Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL*
- 10 **Aoudj, C., Khoudir, M., Guerfi, M., Sallaye, M., Salem Cherif, Y., Abdelalim, D. et BOUKHENNAF, A. (2020).** *Évolution spatio-temporelle du trait de côte du littoral centre Algérien : cas de la baie de Zemmouri. Thèse de doctorat. Spécialité : Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL. P.P 167-176.*
- 11 **Aoudj, C., Mezhoud, A., Guerfi, M. et HAMDENE, Y. (2017).** *Analyse des variations spatio-temporelles du littoral sableux : Est Béjaoui (Algérie). Thèse de doctorat. Spécialité : Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL. P.P 7-10.*
- 12 **Aouiche, I. (2016).** *Dynamique morphosédimentaire de la baie d'Agadir : approche multi-méthodes et préconisations pour une gestion intégrée de la zone côtière Thèse de doctorat. Spécialité : Hydrodynamique maritime. France : Aix-Marseille.*
- 13 **Arnaud, G. (2016).** *Houle à la côte Propagation, impacts et ouvrages innovants. Thèse de doctorat. Université de Toulon].*
- 14 **Aziez, K., Issaadi, O., Yahiaoui, K. et Khammar, H. (2021).** *Etude hydro-écologique « planctonique » du barrage Koudiet Medouar (Barrage Timgad). Mémoire de master. Spécialité : Ecologie des milieux naturels. Oum El Bouaghi : Université Larbi Ben M'hidi .*
- 15 **Balkema, A. (1974).** *Residual Life Time at Great Age. The Annals of Probability, Vol. 2, n°5, P.P 792-804.*
- 16 **Ballay, A. et Breton, C. (2020).** *Première combinaison de système de drainage de plage Ecoplage® et de rechargement sableux à Jumeirah, Dubai, UAE. France : Paralia. P. P 551-562.*

- 17 **Barale, J. (2019).** *Etude expérimentale de l'interaction entre deux vagues successives dans la zone littorale proche. Thèse de doctorat. Spécialité : Surfaces Interfaces Continentales Hydrologie. France : Surfaces Interfaces Continentales Hydrologie.*
- 18 **Barlas, B. et Beji, S. (2017).** *RIP CURRENT FATALITIES ON THE BLACK SEA BEACHES OF ISTANBUL AND EFFECTS OF WINDS. Vol. 1, n°35, P.15.*
- 19 **Bay, İ. (2005).** *Measurement and Analysis of Wave Overtopping. Thèse de doctorat. Spécialité : Génie civil. Angleterre : Université de Liverpool. P.338*
- 20 **Beji, Y. (2019).** *Dynamique sédimentaire du littoral de Ghar El Melah: Evolution naturelle et impacts anthropiques. Mémoire de master. Spécialité : Géo-Ressources et Développement Durable. Tunis : Université de Tunis el manar.P.122.*
- 21 **Belkherroubi, Z. et Belguerguid, A. (2017).** *Evaluation du risque d'érosion de la plage Est de Sidi Fredj. Mémoire de master. Spécialité : Gestion et protection du littoral. Alger : ENSSMAL*
- 22 **Benavente J, Del Río L, Gracia FJ, Martínez-del-Pozo JA. (2006).** *Coastal flooding hazard related to storms and coastal evolution in Valdelagrana spit (Cadiz Bay Natural Park, SW Spain), Vol. 26, n°9, P.P 1061-1076*
- 23 **Benderradji, A. et Ferhat, A. S. (2011).** *Erosion du littoral de Cherchell : Causes, conséquence et solution d'aménagement. Mémoire d'ingénieur. Spécialité : Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL.*
- 24 **Benslama, H. épse H. (2001).** *Apports détritiques de l'Oued Isser et rôle du canyon d'Alger dans la dynamique des sédiments du plateau continental de la baie de Zemmouri El-Bahri. Mémoire de magister. Spécialité : Science de la terre et de l'univers. Alger : USTHB.*
- 25 **Bertrand, G. (1923).** *La théorie des marées et les équations intégrales, vol. 40, P. P 151-258.*
- 26 **Bonnefille, R. (1994).** *Mouvements de la mer. Edition : Techniques Ingénieur.*
- 27 **Boughacha, M , Ouyed, M., Ayadi, A. et Benhallou, H. (2004).** *Seismicity and seismic hazard mapping of northern Algeria: Map of Maximum Calculated Intensities (MCI). Journal of Seismology, Vol ,8, P.P 1-10.*
- 28 **Bouillin, J. P. (1986).** *Le « bassin maghrebin »; une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique a l'ouest des Alpes.P.P 547-558.*
- 29 **Bourouba, M. (1997).** *Turbidity variations and their relationships with water flow and rainfall in the watersheds of Oueds Reboa and Boudouaou (Algeria).*
- 30 **Bouroumi, M. T. (2010).** *Cas de la commune de Ain el Turk [université des sciences et de la technologie d'oran]. Thèse de doctorat. Spécialité : Architecture. Oran : USTO.*
- 31 **Boutarcha, F. (2022).** *Le littoral algérien entre protection de l'environnement et les impératives du développement touristique : enjeux et perspectives The Algerian coast between environmental protection and the imperatives of tourist development: challenges and perspectives, Vol: 10 - n°: 03 , P.P 661 – 674.*
- 32 **BRGM, LMT, et Mss-Mat Cachan. (2012).** *Dynamiques concept. CSTB, Une approche mecanique d'évaluation de la vulnerabilite sismique des maçonneries EVSIM, Rapport final.*
- 33 **Cariolet, J.-M. (2011).** *Inondation des côtes basses et risques associés en Bretagne : vers une redéfinition des processus hydrodynamiques liés aux conditions météo-océaniques et des paramètres morpho-sédimentaires. Thèse de doctorat. Spécialité : Sciences de la Mer. Bretagne : Université de Bretagne occidentale.*
- 34 **Cariolet, J.-M., Suanez, S. et CAROL, F. (2008).** *Evaluation de la technique STABIPLAGE – Mise en place sur deux plages du Finistère : les Sables Blancs à Plobannalec-Lesconil-Loctudy et Boutrouilles à Kerlouan, Vol, tome 1.*

- 35 **Carlos, O. (1985).** *ETUDE DE LA HOULE EN THEORIE LINEAIRE -MODELE DE REFRACTION*
- 36 **Carreno, M., Belair, C. et Romani, M. (2008).** *REPENDRE A L'ELEVATION DU NIVEAU DE LA MER EN LANGUEDOC-ROUSSILLON. La Lettre des Lagunes, hors-série, (1).*
- 37 **CETMEF. (2011).** *Préconisations pour le recensement des ouvrages et structures de défense contre les aléas côtiers. Notice méthodologique. [En ligne]. [Consulté le 04/03/2023]. Disponible sur le site web : <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/preconisations-recensement-ouvrages-structures-defense>*
- 38 **Chaib, W. (2021).** *Indice de vulnérabilité et de risque côtier pour l'évaluation du risque d'érosion et de submersion dans le littoral centre Algérien (cas de la baie de Bou Ismail). Thèse de doctorat. Alger :ENSSMAL.*
- 39 **Torre, Y. (2008).** *Livret pédagogique « Gestion de l'érosion du littoral de Mayotte », Rapport final. P.31.*
- 40 **Deffaf, A., Louamri, A. et Terfous, A. (2020).** *ANALYSE DE LA RELATION DEBIT-MATIERE EN SUSPENSION DURANT LES CRUES DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED ISSER.n°52, P.P 19-32.*
- 41 **Degryse-Kulkarni, C. (2003).** *Morphodynamique de la zone de swash. Thèse de doctorat. Spécialité : science de la terre et de l'univers. Basse Normandie : Université de CEAN.*
- 42 **Dehouck, A. (2006).** *Morphodynamique des plages sableuses de la mer d'Iroise (Finistère). Thèse de doctorat. Spécialité : Géographie. Bretagne : Université de Bretagne occidentale.*
- 43 **DHI. DHI Mike 21_Spectral Wave .Module Scientific Documentation. 2014.**
- 44 **Diouf, S. (1993).** *Les courants et la circulation des eaux sur le plateau continental sénégalais. Mémoire de master. Sénégal : centre national de formation des techniciens des pêches maritime.*
- 45 **Djenadi, W. et Douibi, K. (1993).** *Etude de la dynamique sédimentaire dans la région de Tigzirt impact du port de plaisance et de peche sur le littoral probleme d'ensablement de la passe du port. Mémoire de master. Alger : ISMAL.*
- 46 **Djeouadi, R. et Hantal, A. (2018).** *Géomorphodynamique de la zone côtière de la baie de Béjaïa. Mémoire d'ingénieur. Spécialité : Gestion et protection du littoral. Alger : ENSSMAL.*
- 47 **Djouadai, S. et Meradi, W. (2016).** *Estimation de probabilités d'évènements rares et de quantiles extrêmes. Mémoire de master. Spécialité : Statistique et Analyse Décisionnelle. Béjaïa : Abderrahmane Mira de Bejaïa.*
- 48 **Douibi, A. et Fardi, B. (2020).** *Changement climatique et risques côtier dans la métropole algéroise. Mémoire d'ingénieur. Spécialité : Gestion et protection du littoral. Alger : ENSSMAL*
- 49 **Duval, M. (2007).** *Etude du déferlement d'une onde de Stokes et de la dissipation associée par simulation directe. Thèse de doctorat. Spécialité : Dynamique des fluides. France : l'Institut National Polytechnique de Toulouse.*
- 50 **egis eau. (2009).** *Protection et aménagement durable du lido de Sète à Marseillan Dispositif expérimental ECOPLAGE® et ouvrage atténuateur de houle. [En ligne]. [Consulté le 12/05/2023]. Disponible sur le site web : <http://www.littoral-occitanie.fr/Protection-et-amenagement-durable-du-lido-de-Sete-a-Marseillan-Dispositif>*
- 51 **Fauci, Y. (2012).** *Protection de la ville de Boudouaou contre les inondations. Mémoire d'ingénieur. Spécialité : Hydraulique. Alger : Ecole Nationale Supérieure Polytechnique.*

- 52 **Galliot, M. (2013).** *Le plan national d'adaptation au changement climatique, Vol,90, n°1,P.P 55-67.*
- 53 **Garry, F., Gérald; GRASZK, Edmond; TOULEMONT, Marcel; LEVOY, Franck; SCHWACH, Paul; VESSERON, Philippe . (1997).** *Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques. Paris, France; Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement. Direction de l'Aménagement foncier et de l'urbanisme. Paris. Plans de prévention des risques littoraux. (PPR). Guide méthodologique.*
- 54 **Ghodhani, T. (2017).** *Le littoral algerien entre protection de l'environnement imperatives du developement, enjeux et prespectives. Vol,4, n°2,P.P 111-125.*
- 55 **GIEC. (2021).** *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. [En ligne]. [Consulté le 20/04/2023]. Disponible sur le site web : <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>*
- 56 **González, S. C. et Emilia, N. (2020).** *Le glossaire climatique pour les jeunes. Fonds des Nations Unies pour l'Enfance (UNICEF).*
- 57 **Gopinath, G ., Thodi, M. F. C., Surendran, U. P., Prem, P., Parambil, J. N., Alataway, A., Al-Othman, A. A., Dewidar, A. Z. et Mattar, M. A. (2023).** *Long-Term Shoreline and Islands Change Detection with Digital Shoreline Analysis Using RS Data and GIS. Water, Vol,15,n°2, P. 244.*
- 58 **Gourlay, F. (2010).** *La gestion intégrée des zones côtières: Deux paradigmes pour penser le temps et l'espace: le durable et le local. Dans Annales de Bretagne et des pays de l'Ouest ,vol. 117, P. 161-169.*
- 59 **Graillet, A. (1975).** *Ouvrages de protection dans la zone de déferlement de la houle. La Houille Blanche, Vol, 7, n°8, P.P 537-557.*
- 60 **Guerbi, M. A. et Abdelkebir, B. (2017).** *Protection contre les inondations par l'utilisation d'ARC GIS, HEC GEO RAS et HEC RAS. Cas de la ville d'El-Kseur W. Bejaia. Mémoire de master. Spécialité : Hydraulique urbaine. M'sila : Université Mohamed Boudiaf. P.95*
- 61 **Guidou, O. et Touzi, W. I. (2016).** *Mise en place d'une base de donnée sédimentologique dans le domaine côtier de la grande baie de zemmouri (Etablissement de la carte morpho- sédimentaire). Mémoire d'ingénieur. Spécialité : Gestion et protection du littoral. Alger : ENSSMAL.*
- 62 **Guza, R. et Inman, D. (1975).** *Edge waves and beach cusps, Vol,80; n°21. P.P 2997-3012*
- 63 **Hadjem, R. (2010).** *Les Principales Caractéristiques Géologiques, Pétrographiques,minéralogiques Et Géologiques Des Formations Gréseuses Du Flysch Numidien Du Nord-est Algérien : Cas Du Djebel Hadjar Nahal,région De Ain Berda.M .Mémoire de magister. Spécialité : Substances utiles géologie et développement. Annaba : Université Badji Mokhtar.*
- 64 **Hamai.L. (2011).** *ETUDE GRAVIMETRIQUE DE LA MITIDJA CENTRALE. Mémoire de magister. Spécialité : GEOPHYSIQUE. Alger : USTHB.*
- 65 **Hattabi, M. el A. et Kaddour, H. (2018).** *Impact de l'élévation de niveau de la mer et des tempêtes sur l'évolution morpho dynamique de la région Est de la baie d'Alger : simulation numérique des processus hydro-sédimentaires. Mémoire d'ingénieur. Spécialité : Gestion et protection du littoral. Alger : ENSSMAL.*
- 66 **Hemdane Y., Bouhmadouche M, Atroune F. (2016).** *Identification des zones côtières à fort potentiel en énergie marine renouvelable (vagues/houles) à travers l'étude de la morphologie côtière et sousmarine et hydrodynamique Revue des energies renouvelables, Vol,19 ; n°4. P.P 543-552.*

- 67 **Hoozemans F. (1993).** *Sea level rise: A global vulnerability assessment vulnerability assessments for population, coastal wetlands and rice production on a global scale.*
- 68 **Hzami, A. (2015).** *Approche SIG pour l'étude morphodynamique côtière en relation avec les processus hydro-sédimentaires au niveau du Golfe de Hammamet. Mémoire de master. Spécialité : Géologie Appliquée. Tunis : Faculté des sciences de Bizerte.*
- 69 **Hzami, A. (2021).** *Etude morphodynamique du système littoral face aux changements climatiques et à l'élévation du niveau de la mer (Golfe de Tunis, mer Méditerranée). Thèse de doctorat. Spécialité : Géologie Appliquée. Tunis : Université de Tunis El Manar. Faculté des Sciences.*
- 70 **Jarry, N. (2009).** *Etudes expérimentales et numériques de la propagation des vagues au-dessus de bathymétries complexes en milieu côtier. Thèse de doctorat. Spécialité : Sciences de l'univers. France : Université du Sud Toulon Var.*
- 71 **Kacemi, M. (2013).** *Protection et valorisation du littoral en Algérie: législation et instruments: Le cas des communes littorales d'Oran. Études caribéennes, n° 20.*
- 72 **Kumar VS., Babu VR, Babu M, Dhinakaran G, Rajamanickam. (2008).** *Assessment of storm surge disaster potential for the Andaman Islands Journal of Coastal Research. P.P 171-177.*
- 73 **Larnier, S., Almar, R., Cienfuegos, R. et Lejay, A. (2013).** *Détection de courants marins côtiers à partir de séquences vidéo. Dans ESAIM: Proceedings and Surveys, vol. 45.*
- 74 **Leclaire, L. (1972).** *LA SEDIMENTATION HOLOCENE SUR LE VERSANT MERIDIONAL DU BASSIN ALGERO-BALEARES. (PRECONTINENT ALGERIEN. Éditions du Muséum. P.422.*
- 75 **Leclerc, J., Bellessort, B. et Migniot, C. (1976).** *Action de la houle sur les sédiments. [En ligne]. [Consulté le : 09/03/2023]. Disponible sur le site web : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00104/21499/>*
- 76 **Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P. et Ruane, A. C. (2023).** *CLIMATE CHANGE 2023 Synthesis Report Summary for Policymakers. CLIMATE CHANGE 2023 Synthesis Report : Summary for Policymakers. . [En ligne]. [Consulté le : 09/03/2023]. Disponible sur le site web : https://www.researchgate.net/publication/370465535_Climate_Change_2023_Synthes_is_Report_Contribution_of_Working_Groups_I_II_and_III_to_the_Sixth_Assessment_Report_of_the_Intergovernmental_Panel_on_Climate_Change*
- 77 **Levoy, F., Graszka, E., Toulemont, M. et Garry, G. (1997).** *Plans de prévention des risques littoraux (PPR) : Guide méthodologique. France : LA DOCUMENTATION FRANCAISE. PARIS. P. 56.*
- 78 **Mabrouk, D. et Aitouche, M.-A. (2007).** *Le contexte sismotectonique du seisme de Boumerdes (21 Mai 2003), Vol, 43, P.P 39-46.*
- 79 **Maguire, D. J. (2008).** *ArcGIS: General Purpose GIS Software System. Dans S. Shekhar et H. Xiong (dir.) p. 25-31*
- 80 **Mallet, C. et Michot, A. (2012).** *Synthèse de référence des techniques de suivi du trait de côte. avec la collaboration de De la Torre Y, Lafon V, et Robin M, et Prevotiaux B (eds) Rapport d'activité. Rapport publié. France.*
- 81 **Marquet, V. (2014).** *Les voies émergentes de l'adaptation au changement climatique dans la gestion de l'eau en France et au Québec: Mise en visibilité et espaces de définition ; Th7se de doctorat. France : Université de Bordeaux.*
- 82 **Megdoud, N. (2012).** *Variations historiques de la ligne de rivage et érosion côtière entre oued Réghaïa et oued Boumerdès. Thèse de doctorat. Alger :USTHB.*
- 83 **Ménard Y et al. (2003).** *The Jason-1 mission special issue : Jason-1 calibration/validation Marine Geodesy, Vol ,26 . P.P 131-146.*

- 84 **Mzeouar, K., CIORTAN, R. et BOUKHEMACHA, M. A. (2009).** Mesures de protection du littoral roumain. Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, Hammamet, Tunisie, n° 35, P.P 139-142.
- 85 **Mohamed, B. et Makhlouf, B. (2012).** Contribution À L'étude Géologique Et Sédimentologique De La Grande Baie De Zemouri (cap-matifou Cap-djinet. Thèse de doctorat. Spécialité : Science de la terre et de l'univers. Alger : USTHB.
- 86 **Nachbaur, A., Balouin, Y., Nicolae Lerma, A., Douris, L. et Pedreros, R. (2015).** Définition des cellules sédimentaires du littoral martiniquais ,vol ,95.
- 87 **Nair, S. et Bharathvaj, A. (2015).** Shoreline Change Analysis for Northern Part of the Coromandel Coast. Aquatic Procedia, Vol 4
- 88 **Nicholls RJ, Hoozemans FM, Marchand M (1999).** Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: regional and global analyses Global Environmental Change, Vol, 9 , P.P S69-S87
- 89 **Nicolas, A., Olivier, R., Raphaël, C., Nicolas, R. et Cédric, B. (2017).** Impact des ouvrages portuaires sur la morphodynamique du littoral du Languedoc-Roussillon. Thème 1 - SIMILAR. Rapport d'activité. P.42
- 90 **Otmani, H. (2020).** Etude et évaluation de la vulnérabilité des systèmes côtiers dans la région algéroise. Thèse de doctorat. Spécialité : Science de la mer. Alger : ENSSMAL
- 91 **Özari, Ç., Eren, Ö. et Saygin, H. (2019).** A new methodology for the block maxima approach in selecting the optimal block size. Tehnički vjesnik, Vol 26, n°5, P.P 1292-1296.
- 92 **Pedreros, R., Lenôtre, N., Aubié, S. et Rançon, J. (2002).** Etude morphologique des plages à l'arrière des formations récifales de la côte Ouest de la Réunion.
- 93 **Petitjean, L. (2016).** Etude des plages sableuses : Relations entre les vagues, le niveau d'eau, la nappe et la morphologie. Thèse de doctorat. Spécialité : Océanographie Physique - physique de l'environnement. France : Université de Toulon.
- 94 **Pickands, J. (1975).** Statistical Inference Using Extreme Order Statistics. The Annals of Statistics, Vol , 3, n°1, P.P 119-131.
- 95 **Québec. (2012).** Stratégie gouvernementale d'adaptation aux changements climatiques 2013-2020. Bibliothèque et Archives nationales du Québec. Rapport d'activité. Québec .
- 96 **Qu'est-ce que ArcGIS ? | ArcGIS Resource Center. (s. d.). . [En ligne]. [Consulté le : 01/02/2023].** Disponible sur le site web : <https://resources.arcgis.com/fr/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
- 97 **Rachid, R. (2017).** Etude Du Rejet Du Lixiviât Traité Du Centre D'enfouissement Technique De Corso Sur L'oued Corso. Mémoire de master. Spécialité : biologie. Blida : Université Saad Dahleb.
- 98 **Ravonienimanana, F. H. (2006).** Refraction et diffraction de la houle [Université d'Antananarivo].
- 99 **Rébillat, M., M., Hmad, O., Kadri, F. et Mechbal, N. (2018).** Peaks Over Threshold-based detector design for structural health monitoring: Application to aerospace structures. Structural Health Monitoring, Vol , 17 , n° 1, P.P 91-107.
- 100 **Rebouh, N., Bouzaa, H., Khiari, A. et Mazouz, E. H. (2016).** Caractérisation de la fracturation de la région de Constantine – Algérie. Thèse de doctorat. Spécialité : Géologie. UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI
- 101 **IOUM EL BOUAGHI :** Faculté des sciences de la Terre et de l'architecture.
- 102 **Rydman, M.** Application of the peaks-over-threshold method on insurance data. 2018.
- 103 **Sallaye, M. (2021).** Processus mis en jeu dans l'évolution morpho-dynamique de la baie de Zemouri : modélisation hydro-sédimentaire et cinématique du trait de côte. Thèse de doctorat. Spécialité : Science de la mer. Alger : ENSSMAL

- 104 **Sebat, M. et Salloum, J. (2018)**. ESTIMATE THE RATE OF SHORELINE CHANGE USING THE STATISTICAL ANALYSIS TECHNIQUE (EPR). *Business & IT*, Vol, VII, n°1, P.P 59-65.
- 105 **Sénéchal, N. (2003)**. Etude de la propagation des vagues au-dessus d'une bathymétrie complexe en zone de surf. Thèse de doctorat. Spécialité : Océanographie. France : Université Bordeaux I.
- 106 **Stander, C. (2015)**. Analysis of extreme events in the coastal engineering environment. Mémoire de master. Spécialité : Sciences en mathématiques appliquées. Stellenbosch: Stellenbosch University].
- 107 **Suanez, S., Goudédranche, L. et Fleitour, J. B. (2005)**. Expertise scientifique du procédé StabiPlage® mis en place sur la plage des Sables Blancs – commune de Plobannalec – Lesconil (Finistère) Période de suivi : janvier – juin 2005. LETG-Brest UMR 6554 CNRS; Université de Bretagne Occidentale (UBO).
- 108 **Suanez S, Fichaut B, Sparfel L (2007)**. Méthode d'évaluation du risque de submersion des côtes basses appliquée à la plage du Vougot, Guissény (Bretagne) *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, Vol,13, P.P 319-334.
- 109 **Takane, Y. et Bozdogan, H. (1987)**. AKAIKE INFORMATION CRITERION (AIC) - INTRODUCTION. *Psychometrika*, Vol, 52, P.P 315-315.
- 110 **Teldja, Y. (2017)**. Système D'information Géographique Appliqué À La Géologie Et La Géologie De La Feuille À 1/200 000 De Tizi-ouzou (région De La Grande Kabylie). Mémoire de master. Tizi Ouzou : Université Mouloud Mammeri.
- 111 **Thior, M., Sy, A. A., Cisse, I., Dieye, E. H. B., Sane, T., Ba, B. D., Solly, B. et Descroix, L. (2021)**. Approche cartographique de l'évolution du trait de côte dans l'estuaire de la Casamance. *Mappemonde*, Vol 131.
- 112 **Tioguin, M., Delcaillau, M. D., Raillard, M. N., Prevosto, M. M. et Ailliot, M. P. (2018)**. Modélisation d'extrêmes de séries temporelles: une étude empirique.
- 113 **Touhami, H. et Khellaf, M. (2017)**. MODELE DE PROPAGATION D'UNE VAGUE DE TSUNAMI EN 2D PAR COULWAVE (CAS DE ZEMMOURI, BOUMERDES 2003). Mémoire d'ingénieur . Spécialité : Gestion et protection du littoral. Alger : ENSSMAL
- 114 **Véronique, E. et Antoine, L. (2018)**. Zones cotières Dynamiques de territoires. *Plan bleu*, Vol. 43.
- 115 **Weissenberger, S., Noblet, M., Plante, S., Chouinard, O., Guillemot, J., Aubé, M., Meur-Ferec, C., Michel-Guillou, É., Gaye, N., Kane, A., Kane, C., Niang, A. et Seck, A. (2016)**. Changements climatiques, changements du littoral et évolution de la vulnérabilité côtière au fil du temps : comparaison de territoires français, canadien et sénégalais. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Vol 16, n° 3.
- 116 **Wright, L. D. et Short, A. D. (1984)**. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine geology*, Vol,56, n°1-4, P.P 93-118.
- 117 **Yao, K. S., Tano, A. R., Gbegbe, M., Monde, S. et Abe, J. (2022)**. Caractéristiques des hauteurs significatives et des périodes de retour des houles de tempêtes dans le Golfe de Guinée, Vol 35, n°2.

Annexe

Buisness Model Canvas

Table des matière

1	Introduction :.....	1
2	Proposition de valeur :	1
2.1	Expertise Marinisée par l'Intelligence Artificielle :.....	1
2.2	Expertise Technique Avancée dans la Cartographie et la Modélisation Côtière :	1
2.3	Optimisation de la Prévision et Recherche de Solutions Rentables et Durables :.....	1
3	Activités clés :.....	2
3.1	Traitement des Grandes Bases de Données par l'Intelligence Artificielle :	2
3.2	Réalisation de Cartes pour les Divers Problèmes Côtiers :	2
3.3	Étude et Modélisation de la Propagation de la Houle, des Courants et du Transport Hydro-sédimentaire :	2
3.4	Étude de Submersion Marine :	2
3.5	Dispense de Formations Englobant Programmation et Maîtrise des Logiciels SIG : .	2
4	Partenaires clés :	4
4.1	Collaborateurs LEM (Laboratoire d'Étude Maritime) :.....	4
4.2	Collaborateurs INCT (Institut National de Cartographie et de Télédétection) :	4
4.3	Fournisseurs de Données Maritimes :	4
4.4	Les Partenaires Financiers (Banques, Investisseurs) :.....	5
4.5	Universités et Instituts de Recherche :	5
4.6	Agences Gouvernementales :	5
4.7	Blue Start Incubator (BSI) :.....	5
5	Segment clients :.....	5
5.1	Collectivités Locales et Gouvernements :	5
5.2	Entreprises Privées dans le Domaine Maritime :.....	5
5.3	Centres de Recherches Scientifiques et Universités :.....	6
6	Relations Clients :.....	6
6.1	Évaluation des Compétences :.....	6
6.2	Programmes de Formation Personnalisés :.....	6
6.3	Offres de Formation Avancée :	6
6.4	Mises à Jour Continues :.....	6
6.5	Transparence des délais :.....	7
6.6	Suivi après la livraison :	7
7	Canaux de distribution :.....	7

Annexe

7.1	Site Web Professionnel :.....	7
7.2	Participation aux Appels d'Offres :.....	7
7.3	Webinaires et Conférences en Ligne :.....	7
7.4	Articles et Publications Techniques :	7
7.5	Plateformes de Freelance Spécialisées :	8
7.6	Assister aux Conférences et aux Salons Professionnels :.....	8
7.7	Collaboration avec des Agences Gouvernementales :.....	8
7.8	Vente Directe et Consultation avec des Entreprises de Construction et de génie côtier :	8
8	Ressources Clés :	8
8.1	Ressources Matérielles :	8
8.2	Ressources Humaines :.....	8
8.3	Ressources Financières :.....	9
9	Sources de revenus :.....	9
9.1	Ventes Directes des Cartes et le Traitement des Bases de Données :	9
9.2	Ventes des Formations en Programmation et en Logiciel SIG :	9
9.3	Contrats de Réalisation de Différentes Études :	9
9.4	Publication de Rapports et d'Études :	9
10	Structure des coûts :	11
10.1	Coûts fixes :.....	11
10.2	Coûts variables :	11
11	Résumé du Business Model Canvas (BMC) :.....	12
12	Conclusion :.....	14

1 Introduction :

Dans un monde en constante évolution, l'ingénierie maritime exige désormais l'intégration de l'intelligence artificielle, de la modélisation et de la cartographie pour résoudre des défis complexes et prendre des décisions éclairées. Notre start-up, BCES (Blue Coastal Engineering Solutions), se positionne au cœur de cette révolution, en proposant des solutions innovantes pour relever les défis de la gestion côtière et marine. Forts de notre expertise en intelligence artificielle, en cartographie spécialisée et en modélisation précise, nous nous engageons à fournir des analyses de données inégalées et des solutions concrètes pour résoudre une multitude de problématiques côtières.

Notre équipe est composée d'ingénieurs en informatique dévoués, de spécialistes en marketing stratégique, ainsi que de deux ingénieurs spécialisés en gestion et protection du littoral, dont moi-même, collaborant main dans la main pour créer une synergie exceptionnelle. De plus, nous bénéficions du soutien et de l'incubateur Blue (École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral), qui nous aide à concrétiser notre vision et à développer notre entreprise vers de nouveaux horizons.

Dans la suite de ce rapport, je présenterai le modèle économique Canvas de notre entreprise, mettant en évidence nos segments de clients cibles, nos propositions de valeur uniques, nos canaux de distribution stratégiques, ainsi que les sources de revenus et les ressources clés qui font de notre start-up un acteur prometteur dans le domaine de l'ingénierie maritime.

2 Proposition de valeur :

Au cœur de notre start-up, résident des compétences spécialisées en ingénierie maritime, amplifiées par la puissance de l'intelligence artificielle. Nous avons forgé notre identité en combinant une expertise technologique de pointe avec une compréhension profonde des enjeux côtiers. Notre proposition de valeur repose sur trois piliers essentiels qui définissent notre contribution unique à l'industrie maritime.

2.1 Expertise Marinisée par l'Intelligence Artificielle :

Nous combinons notre expertise en ingénierie maritime avec les avantages de l'intelligence artificielle pour offrir des solutions innovantes, précises et efficaces. L'IA nous permet d'analyser d'énormes quantités de données maritimes, d'identifier des modèles et de fournir des recommandations basées sur des analyses prédictives.

2.2 Expertise Technique Avancée dans la Cartographie et la Modélisation Côtière :

La cartographie des zones côtières est bien plus qu'une représentation graphique, c'est une science en constante évolution. Notre expertise technique avancée dans la cartographie et la modélisation côtière nous permet de créer des cartes détaillées et des simulations précises qui servent de base solide pour la prise de décisions stratégiques. Chaque contour de côte, chaque mouvement de houle est capturé avec une précision exceptionnelle, ouvrant la voie à des solutions adaptées et pertinentes.

2.3 Optimisation de la Prévision et Recherche de Solutions Rentables et Durables :

Nous ne nous contentons pas de prédire l'avenir, nous le façonnons de manière proactive. Notre engagement envers la recherche de solutions alliant rentabilité et durabilité est un moteur puissant pour nos clients. Nous utilisons notre expertise pour anticiper les risques

côtiers et développer des solutions qui ne sont pas seulement techniquement solides, mais également économiquement viables et respectueuses de l'environnement. Chaque solution que nous proposons est une opportunité de transformer les défis en avantages compétitif.

3 Activités clés :

Au cœur de notre start-up, battent des activités clés qui façonnent notre expertise et alimentent notre mission de résolution de défis côtiers complexes. Chacune de ces activités est une pièce essentielle du puzzle qui contribue à notre impact significatif dans l'industrie de l'ingénierie maritime.

3.1 Traitement des Grandes Bases de Données par l'Intelligence Artificielle :

Dans un monde noyé sous les données, nous émergeons en tant qu'interprètes habiles. Notre capacité à extraire des informations pertinentes à partir de vastes bases de données marines grâce à l'intelligence artificielle est une compétence distinctive. Chaque mégaoctet de données devient une opportunité pour une analyse approfondie, transformant des montagnes d'informations en solutions éclairantes.

3.2 Réalisation de Cartes pour les Divers Problèmes Côtiers :

La cartographie est bien plus qu'une représentation visuelle - c'est un outil essentiel pour la prise de décisions informées. Notre aptitude à traduire des données complexes en cartes précises est une compétence clé qui guide les entreprises et les autorités côtières dans leurs démarches stratégiques. Chaque carte que nous créons est une fenêtre vers un avenir mieux compris.

3.3 Étude et Modélisation de la Propagation de la Houle, des Courants et du Transport Hydro-sédimentaire :

Dans les mystères des océans, nous plongeons avec des modèles précis. Notre expertise en modélisation marine permet de simuler avec une précision remarquable les mouvements de la houle, des courants et des sédiments. Ces modèles servent de base à des prévisions fiables et à la création de solutions qui évitent les écueils des imprévus.

3.4 Étude de Submersion Marine :

Les défis liés à la submersion marine appellent à une compréhension approfondie des processus naturels et humains. Notre expertise dans ce domaine nous permet d'évaluer les risques, de concevoir des plans d'atténuation et de protéger les zones côtières vulnérables. Chaque étude de submersion est un pas vers une gestion proactive de littoral.

3.5 Dispense de Formations Englobant Programmation et Maîtrise des Logiciels SIG :

L'expertise ne se garde pas pour soi, elle se partage et se multiplie. Notre engagement à former la prochaine génération d'ingénieurs marins est une activité essentielle. Nous cultivons des esprits techniques et créatifs, capables de manier la programmation et les systèmes d'information géographique (SIG) pour façonner l'avenir maritime.

Ces activités, combinées et exécutées avec excellence, sont le moteur qui nous propulse vers l'excellence en ingénierie maritime. Chacune est une pièce de l'ensemble qui définit notre start-up en tant que catalyseur de changement positif dans le domaine marin.

Les illustrations (**Figure 1, 2, 3 et 4**) présentent les résultats obtenus à partir des applications menées dans la Baie de Zemmouri, conduisant ainsi à la création des prototypes suivants :

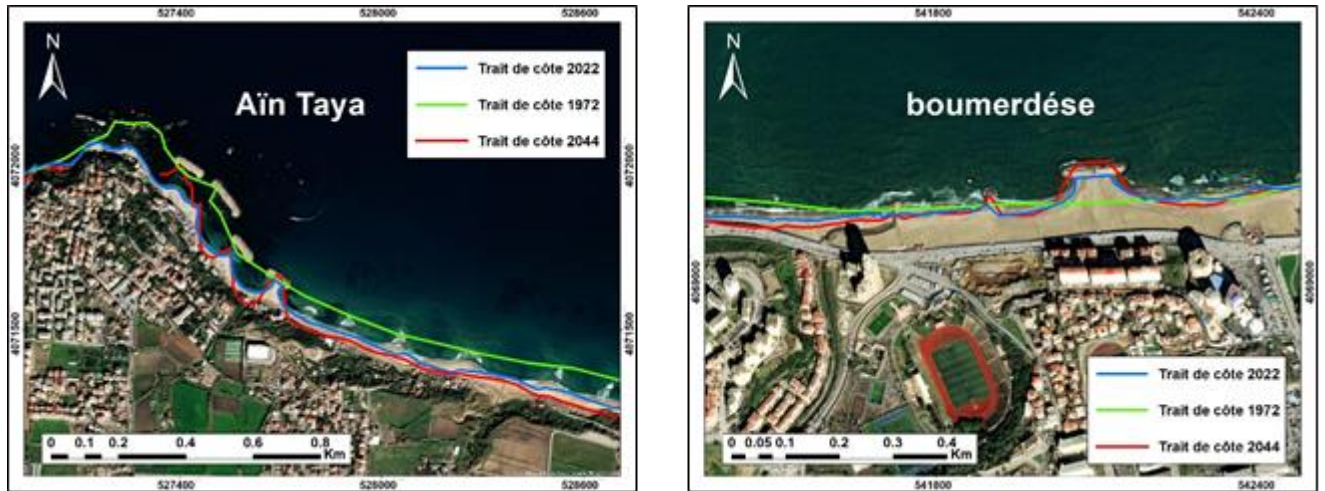


Figure 1 : Cartographie et prédiction du trait de côte en 2044 des zones d'Ain Taya et Boumerdès.

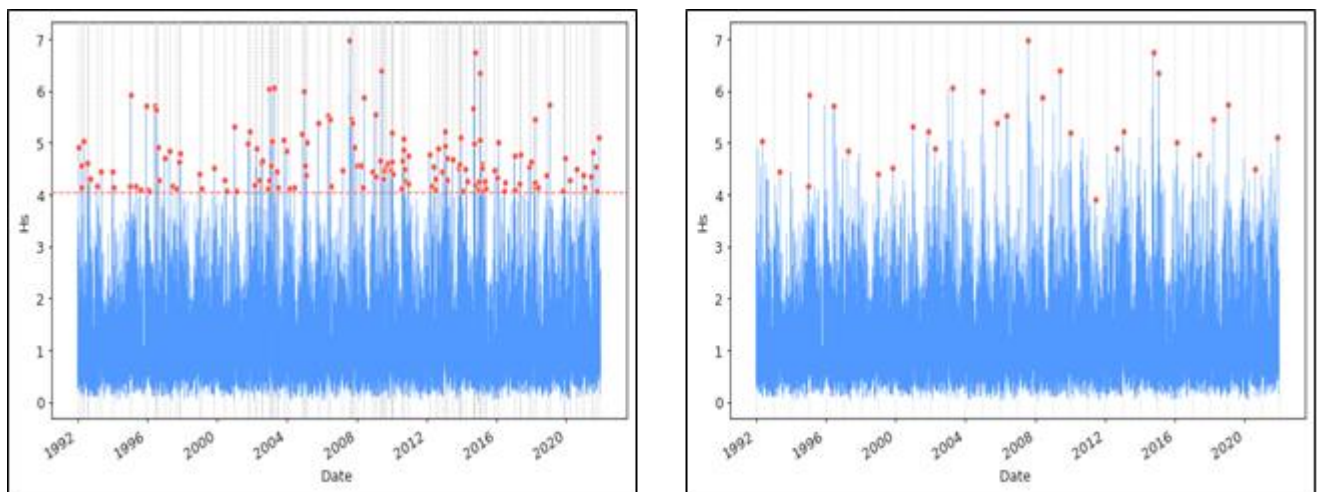


Figure 2 : Prédiction des événements extrêmes en utilisant le langage python.

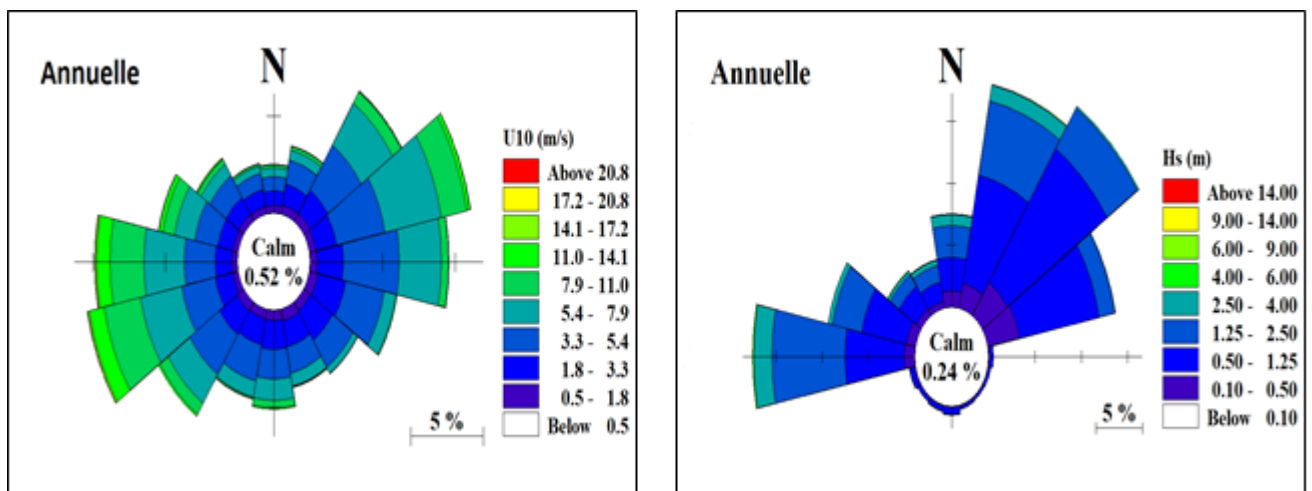


Figure 3 : Roses annuelles des houles et des vents au large

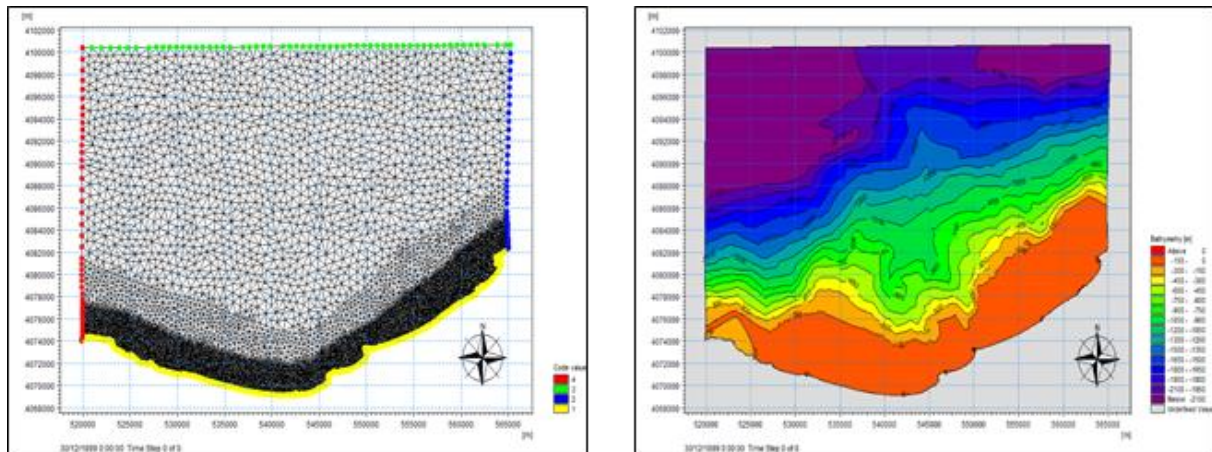


Figure 4 : Carte bathymétrique et maillage du modèle côtier de la baie de Zemmouri.

4 Partenaires clés :

Notre start-up n'est pas une île isolée, mais un maillon puissant au sein d'un réseau de collaboration stratégique. Les partenaires clés qui nous entourent enrichissent notre expertise, élargissent notre portée et renforcent notre impact dans le domaine de l'ingénierie maritime. Chacun de ces partenaires joue un rôle crucial dans notre quête pour résoudre les défis côtiers complexes.

Chaque partenariat clé est une étoile dans notre constellation, contribuant à façonner notre start-up en tant que force collaborative qui transforme les défis maritimes en opportunités prometteuses. Ensemble, nous naviguons vers un avenir marin plus résilient et éclairé.

4.1 Collaborateurs LEM (Laboratoire d'Étude Maritime) :

La mer est un royaume complexe et diversifié, et nos collaborations avec des experts du Laboratoire d'Étude Maritime enrichissent notre compréhension. Les expertises conjointes alimentent nos analyses, affinent nos modèles et ouvrent de nouvelles perspectives sur la résolution des problèmes côtiers.

4.2 Collaborateurs INCT (Institut National de Cartographie et de Télédétection) :

La précision cartographique est une boussole cruciale dans notre quête. Notre partenariat avec l'Institut National de Cartographie et de Télédétection garantit que nos cartes sont non seulement visuellement précises, mais également scientifiquement rigoureuses. Cette collaboration nous permet de créer des représentations maritimes qui sont à la fois détaillées et informatives.

4.3 Fournisseurs de Données Maritimes :

Dans les océans de données, nous sommes tributaires de sources fiables. Nos partenaires fournisseurs de données maritimes nous offrent une boussole numérique, guidant nos modèles et nos analyses. Cette collaboration garantit que chaque décision repose sur des données de qualité, renforçant ainsi notre crédibilité et notre impact.

4.4 Les Partenaires Financiers (Banques, Investisseurs) :

Notre bureau d'étude est pavé de ressources financières. Nos partenaires financiers sont les soutiens qui nous permettent d'investir dans la recherche, le développement technologique et l'expansion de nos opérations. Cette collaboration transforme les idées en réalisations tangibles.

4.5 Universités et Instituts de Recherche :

Établir des liens avec des établissements académiques pour accéder à des recherches en cours, des connaissances spécialisées et des études pertinentes. Ces partenariats peuvent également permettre des collaborations de recherche conjointes.

4.6 Agences Gouvernementales :

La gestion côtière et marine ne peut être menée qu'en étroite collaboration avec les autorités gouvernementales. Nos liens avec les agences gouvernementales garantissent que nos solutions répondent aux normes réglementaires et contribuent à une gestion côtière durable.

4.7 Blue Start Incubator (BSI) :

Le Blue Start Incubator (BSI), rattaché à l'ENSSMAL (École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral), est un acteur essentiel de notre écosystème entrepreneurial. BSI nous fournit un soutien stratégique et opérationnel précieux, nous permettant de développer notre start-up, BCES (Blue Coastal Engineering Solutions). Grâce à ce partenariat, nous avons accès à des ressources et à un réseau de mentors, d'experts et d'autres entrepreneurs, ce qui renforce notre capacité à innover et à croître rapidement.

5 Segment clients :

Au cœur de notre activité, nous nous engageons à répondre aux besoins uniques et variés de plusieurs acteurs clés dans le domaine maritime. Nos segments clients reflètent la diversité de l'industrie, tout en soulignant notre capacité à apporter des solutions sur mesure à chaque partenaire. Chaque segment représente un pilier de notre impact positif dans le monde marin.

5.1 Collectivités Locales et Gouvernements :

Les collectivités locales et les gouvernements sont les gardiens des côtes, chargés de la gestion responsable et durable de ces derniers. Nous sommes fiers de soutenir ces acteurs en fournissant des analyses scientifiques et des solutions techniques. Notre expertise en modélisation marine et en prévision des risques côtiers aide les gouvernements à prendre des décisions éclairées pour la protection des populations et des infrastructures côtières.

5.2 Entreprises Privées dans le Domaine Maritime :

Notre start-up apporte une valeur tangible en leur offrant des solutions qui optimisent leurs opérations maritimes. Des analyses basées sur l'intelligence artificielle et des cartes personnalisées pour la planification stratégique, nous fournissons aux entreprises maritimes les outils nécessaires pour gérer les défis et saisir les opportunités.

5.3 Centres de Recherches Scientifiques et Universités :

Les centres de recherche et les universités constituent un segment clé de nos clients, étant des pionniers dans l'exploration et la compréhension du littoral. En collaborant avec ces institutions académiques, notre start-up offre des solutions technologiques avancées et des analyses approfondies qui enrichissent leur recherche scientifique. Grâce à notre expertise en analyse de données et en modélisation marine, nous renforçons leur capacité à générer des connaissances précieuses, à repousser les limites de la compréhension maritime et à façonner l'avenir de la recherche marine.

Chacun de ces segments clients représente un chapitre essentiel de notre histoire. Notre engagement à répondre aux besoins spécifiques de chaque groupe, combiné à notre expertise technique et scientifique, fait de nous un partenaire précieux dans la résolution des défis maritimes complexes. En collaborant avec ces acteurs diversifiés, nous œuvrons à la création d'un avenir maritime plus sûr, plus intelligent et plus durable.

6 Relations Clients :

Chez notre start-up, les relations avec nos clients ne sont pas seulement des interactions, mais des partenariats basés sur la compréhension mutuelle, la transparence et la valeur ajoutée. Nous considérons chaque client comme un maillon essentiel de notre réseau, et nos relations reflètent notre engagement à fournir des solutions adaptées à leurs besoins et à dépasser leurs attentes. Nos relations avec nos clients transcendent les transactions, et sont ancrées dans la collaboration et le succès partagé.

6.1 Évaluation des Compétences :

Identifiez le niveau de compétence de vos clients en matière de programmation et de logiciels SIG. Cela vous aidera à personnaliser le contenu de la formation pour répondre à leurs besoins, qu'ils soient débutants ou avancés.

6.2 Programmes de Formation Personnalisés :

Concevez des programmes de formation sur mesure en fonction des besoins spécifiques de chaque client. Cela montre que vous êtes dédié à leur réussite et à leur progression professionnelle.

6.3 Offres de Formation Avancée :

Proposez des formations avancées pour les clients qui cherchent à approfondir leurs compétences en programmation et en utilisation des logiciels SIG.

6.4 Mises à Jour Continues :

Compte tenu de l'évolution rapide de la technologie, tenez vos clients informés des nouvelles mises à jour de logiciels SIG et offrez des séances de formation supplémentaires si nécessaire.

6.5 Transparence des délais :

Informez vos clients sur les délais estimés pour la réalisation des cartes. Soyez transparent en cas de changements dans le calendrier et expliquez les raisons.

6.6 Suivi après la livraison :

Continuez à entretenir la relation client même après la livraison des cartes. Demandez des retours d'expérience et assurez-vous que les solutions que vous avez fournies sont efficaces à long terme.

7 Canaux de distribution :

Le monde maritime est vaste, mais nos canaux de distribution sont les voies qui nous rapprochent de nos clients et partenaires, où qu'ils soient. Chaque canal que nous empruntons est une passerelle vers l'innovation et l'impact, permettant à notre expertise de trouver un écho auprès de ceux qui en ont le plus besoin.

7.1 Site Web Professionnel :

Notre site web est bien plus qu'une vitrine - c'est un portail vers nos solutions maritimes. Grâce à des informations détaillées, des études de cas et des exemples de réussite, notre site web professionnel offre une introduction complète à nos services. C'est un premier pas pour les parties intéressées qui souhaitent explorer notre expertise de manière approfondie.

7.2 Participation aux Appels d'Offres :

Les opportunités émergent souvent à travers des appels d'offres. Nous participons activement à ces processus, présentant nos solutions personnalisées et notre expertise technique aux collectivités locales, aux gouvernements et aux entreprises privées. C'est un moyen de démontrer notre engagement envers la résolution de problèmes maritimes complexes.

7.3 Webinaires et Conférences en Ligne :

Dans un monde de plus en plus connecté, les webinaires et les conférences en ligne sont des canaux de diffusion essentiels pour partager notre expertise. Ces plateformes nous permettent de présenter des études de cas, des connaissances techniques et des solutions innovantes à un public mondial, tout en favorisant l'interaction en temps réel.

7.4 Articles et Publications Techniques :

La diffusion de connaissances est une mission centrale pour nous. Nous contribuons régulièrement à des articles et des publications techniques, partageant nos découvertes et nos idées avec la communauté maritime mondiale. Cela renforce notre crédibilité et positionne notre start-up comme une source d'informations fiables.

7.5 Plateformes de Freelance Spécialisées :

La collaboration avec des experts externes enrichit notre perspective. Nous utilisons des plateformes de freelance spécialisées pour engager des talents techniques et créatifs, renforçant ainsi notre capacité à proposer des solutions innovantes et diversifiées.

7.6 Assister aux Conférences et aux Salons Professionnels :

La présence physique compte dans un monde numérique. En assistant à des conférences et à des salons professionnels, nous rencontrons des pairs, des partenaires potentiels et des clients, créant des liens personnels qui renforcent notre réseau et notre réputation.

7.7 Collaboration avec des Agences Gouvernementales :

La collaboration avec des agences gouvernementales va au-delà des appels d'offres. C'est un partenariat stratégique qui nous permet de participer activement à la résolution de problèmes maritimes à l'échelle nationale et internationale.

7.8 Vente Directe et Consultation avec des Entreprises de Construction et de génie côtier :

La construction et le génie côtier sont des domaines où notre expertise trouve une application directe. La vente directe et la consultation personnalisée nous permettent de présenter nos solutions sur mesure à ceux qui construisent et gèrent des infrastructures côtières.

8 Ressources Clés :

Notre start-up repose sur un ensemble essentiel de ressources qui alimentent notre capacité à innover, à résoudre des défis côtiers complexes et à créer un impact significatif. Ces ressources clés forment la fondation solide sur laquelle nous bâtissons notre expertise et notre réputation dans le domaine de génie côtier.

8.1 Ressources Matérielles :

Les outils que nous utilisons façonnent la précision et la portée de notre travail. Nos logiciels, y compris Mike 21, les systèmes d'information géographique (SIG) et Python, sont les instruments de notre analyse, de notre modélisation et de notre prise de décisions éclairées. Les matériels, qu'il s'agisse d'équipements informatiques ou de notre espace de travail, constituent l'infrastructure physique qui soutient notre activité.

8.2 Ressources Humaines :

Notre véritable force réside dans les esprits qui façonnent nos solutions. Nos ingénieurs en informatique sont les architectes numériques qui traduisent les données en connaissances exploitables. Les spécialistes en marketing donnent une voix à notre expertise et établissent des connexions vitales. Notre réseau de partenaires et d'experts externes élargit nos horizons et apporte une diversité d'expertises.

8.3 Ressources Financières :

L'innovation nécessite des ressources pour s'épanouir. Notre capital social nous fournit une base solide, tandis que les investissements injectent les fonds nécessaires pour développer nos solutions et élargir notre portée. Les prêts bancaires et le soutien gouvernemental sont des piliers financiers qui stimulent notre croissance et notre durabilité.

9 Sources de revenus :

Notre start-up ne se contente pas de résoudre des problèmes complexes en génie côtier, elle crée des voies durables vers la croissance et l'innovation. Nos sources de revenus sont autant de ruisseaux qui convergent vers un océan de possibilités. Chaque source de revenus reflète notre engagement à apporter une valeur inégalée à nos clients et à contribuer à l'évolution du domaine du génie côtier.

9.1 Ventes Directes des Cartes et le Traitement des Bases de Données :

Nos cartes ne sont pas de simples représentations, ce sont des solutions concrètes pour les défis côtiers. La vente directe de nos cartes, combinée au traitement sophistiqué des bases de données, offre aux entreprises maritimes et aux autorités côtières des outils puissants pour prendre des décisions éclairées. Chaque vente est une combinaison de technologie et d'expertise qui alimente nos revenus.

9.2 Ventes des Formations en Programmation et en Logiciel SIG :

La connaissance est une ressource précieuse, et nous la partageons à travers nos formations. Nos cours en programmation et en logiciels SIG forment la prochaine génération d'experts en génie côtier, ouvrant des opportunités pour les esprits techniques de transformer les défis en solutions. Chaque inscription est une voie vers la transformation professionnelle et une source de revenus continue.

9.3 Contrats de Réalisation de Différentes Études :

Nos compétences en modélisation et en études côtières sont une boussole pour nos clients. Les contrats pour la réalisation d'études, qu'il s'agisse de la propagation de la houle, des courants, du transport hydro-sédimentaire ou de l'étude de submersion marine, sont des partenariats stratégiques où notre expertise se traduit par des solutions solides. Chaque contrat est une opportunité de résoudre des problèmes complexes et de générer des revenus.

9.4 Publication de Rapports et d'Études :

Nos connaissances sont des piliers de l'innovation en génie côtier. La publication de rapports et d'études offre une vitrine à nos découvertes, renforçant notre réputation en tant que source crédible d'informations côtières. Chaque rapport est une fenêtre ouverte vers la résolution des défis et une source potentielle de revenus.

Le **(Tableau 1)** met en avant nos prévisions de production pour les trois premières années d'activité de notre entreprise. Tandis que les **(Tableaux 2, 3 et 4)** présentent en détail les prix

Annexe

que nous avons fixés pour nos services, après avoir calculé les revenus générés par la réalisation de chaque service.

Tableau 1 : Production envisagée les trois premières années.

Période	Etude	Formation	Vente de cartes	Traitement des bases de données
1 ère année	6 Etudes	5	15	10
2 ème année	8 Etudes	10	30	20
3 ème année	10 Etudes	15	45	30

Tableau 2 : Les revenus envisagés pour la 1ère année.

Services	Prix	Nombre	Total de la 1ère année
Etude	≈300.000 DA	6	1.800.000 DA
Formation	15.000 DA	5	75.000 DA
cartes	2000 DA	15	30.000 DA
Traitement des bases de données	≈4000 DA	10	40.000 DA
Totale	/	/	1.945.000 DA

Tableau 3 : Les revenus envisagés pour la 2ème année.

Services	Prix	Nombre	Total de la 2ème année
Etude	≈300.000 DA	8	2.400.000DA
Formation	15.000 DA	10	150.000 DA
cartes	2000 DA	30	60.000 DA
Traitement des bases de données	≈4000 DA	20	80.000 DA
Totale	/	/	2.690.000 DA

Tableau 4 : Les revenus envisagés pour la 3ème année.

Services	Prix	Nombre	Total de la 2ème année
Etude	≈300.000 DA	10	3.000.000DA
Formation	15.000 DA	15	225.000 DA
cartes	2000 DA	45	90.000 DA
Traitement des bases de données	≈4000 DA	30	120.000 DA
Totale	/	/	3.435.000 DA

10 Structure des coûts :

Chaque entreprise a besoin d'une feuille de route financière pour guider sa croissance et son succès. Dans cette section, nous explorerons les coûts qui sont au cœur de notre activité. Ces coûts reflètent non seulement nos investissements en matériel, en talents et en développement, mais aussi notre engagement à fournir des solutions de qualité supérieure dans le domaine du génie côtier.

La dimension des coûts englobe les dépenses liées à la gestion opérationnelle de notre entreprise. Cette catégorie inclut à la fois les coûts fixes et les coûts variables qui contribuent à notre fonctionnement.

10.1 Coûts fixes :

- Loyer.
- Assurance.
- Salaires et charges sociales du personnel.
- Eau et électricité.
- Internet.

10.2 Coûts variables :

- Réparation et maintenance du matériel bureautique et informatique.
- Publicité.
- Distribution.
- Fourniture.
- Frais d'exploitation et de maintenance de la plateforme.

Le **(Tableau 5)** fournit une ventilation des coûts associés aux ressources essentielles nécessaires à la création et au développement de notre entreprise :

Tableau 5 : Liste des besoins pour la création de l'entreprise.

Besoins	Nombre	Prix
Local (40m ²)	1	1.080.000 DA/an
Matériels Informatiques :		
PC	5	950.000 DA
ImprimanteScanner	1	45.000 DA
Logiciels (Mike 21, Arcgis)	2	0 DA
Matériels Bureautiques :		
Bureaux	5	100.000 DA
Chaises	8	86.000 DA
Armoires	3	60.000 DA
Tableau	1	6000 DA
Fourniture :		
Papiers	6 Rames/an	4500 DA/an
Encre	50 Cartouches/an	15.000 DA/an
Stylos / Marqueurs / Registres	/	12.000 DA/an
Autres :		
Climatiseur	1	70.000 DA
Electricité / Eau	/	≈62.000 DA/an
Abonnement Internet	/	48.000 DA/an
Ingénieur en informatique	1	600.000 DA/an
Spécialiste en marketing	1	600.000 DA/an
Création de plateforme pour vente de services	1	400.000 DA
Site web de l'entreprise	1	300.000 DA
Total		4.438.700 DA

11 Résumé du Business Model Canvas (BMC) :

Le (Tableau 6) condense les neuf éléments clés de notre modèle économique en une page, offrant ainsi un aperçu global de notre concept d'affaires.

Tableau 6 : Model Business Canvas.

Partenariats clés	Activités clés	Proposition de valeur	Relations clients	Clients
<ul style="list-style-type: none"> - Collaborateur LEM (Laboratoire d'étude maritime). - Collaborateur INCT (L'Institut National de Cartographie et de Télédétection). - Fournisseurs de données maritimes. - Les partenaires financiers (les banques, les investisseurs). - Universités et instituts de recherche. - Agences gouvernementales. - Blue Start Incubator (BSI). 	<ul style="list-style-type: none"> - Traitements des grandes bases de données par l'intelligence artificielle. - La réalisation des cartes pour les divers problèmes côtiers. - Etude et modélisation de la propagation de la houle, des courants, du transport hydro-sédimentaire. - Etude de submersion marine. - Dispense des formations englobant à la fois la programmation et la maîtrise des logiciels SIG. 	<ul style="list-style-type: none"> - Expertise en ingénierie marinisée par l'intelligence artificielle. - Expertise technique avancée dans la cartographie et la modélisation côtière. - Optimisation de la prévision et la recherche des solutions à la fois rentables et durables pour la gestion des risques côtiers. 	<ul style="list-style-type: none"> - Consultations personnalisées pour comprendre les besoins des clients. - Transparence des délais et le suivi après la livraison avec les clients. - Évaluation des Compétences des clients et la programmation des formations personnalisées et avancées. - Actualisation fréquente des dernières avancées en matière de technologies d'intelligence artificielle et de cartographie. 	<ul style="list-style-type: none"> - Collectivités locales et gouvernements. - Entreprises privées dans le domaine maritime. - Centres de recherches scientifiques et universités.
	Ressources clés		Canaux de distribution	
	<p>Ressources matérielles :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les logiciels (Mike 21, SIG, Python). - Les matériels (équipements informatiques et bureautiques, local ect) <p>Ressources humaines :</p> <ul style="list-style-type: none"> - ingénieur en informatique. - spécialiste en marketing. - Réseau de partenaires et d'experts externes <p>Ressources financières :</p> <ul style="list-style-type: none"> - capital social - Investissements - les prêts bancaires - le gouvernement 		<ul style="list-style-type: none"> - Site web professionnel. - Participation aux Appels d'Offres. - Webinaires et Conférences en Ligne. - Articles et Publications Techniques - Plateformes de Freelance Spécialisées - Assister aux conférences et aux salons professionnels - Collaboration avec des Agences Gouvernementales - Vente directe et consultation avec des entreprises de construction et d'ingénierie maritime 	
Coûts		Revenus		
Equipements : 1.247.000 matériels informatiques et bureautiques Fond de roulement : 3.191.700 Fourniture, factures, salaires, marketing, loyer, etc.		<ul style="list-style-type: none"> - pour la 1ère année : 1.945.000 DA - pour la 2ème année : 2.690.000 DA - pour la 3ème année : 3.435.000 DA 		

12 Conclusion :

En conclusion, ce Business Model Canvas (BMC) offre une vue holistique et structurée de notre start-up spécialisée en ingénierie maritime. Chacune des neuf composantes explore un aspect crucial de notre entreprise, mettant en évidence notre proposition de valeur distinctive, les segments clients que nous visons, les canaux par lesquels nous atteignons notre audience, les relations que nous cultivons, les ressources essentielles qui soutiennent notre expertise et enfin, les sources de revenus qui nourrissent notre croissance. Ce BMC révèle notre engagement à transformer les données maritimes en connaissances exploitables, à façonner des solutions innovantes et durables pour les défis côtiers complexes. En alignant notre expertise technique avec les besoins du marché, nous sommes résolus à créer un impact positif dans le domaine du génie côtier. Ce modèle nous sert de boussole, guidant notre trajectoire vers un avenir où la science, la technologie et la durabilité convergent pour façonner un environnement marin plus résilient et prometteur.

Résumé :

À partir de l'hypothèse selon laquelle le changement climatique et la montée correspondante du niveau de la mer Méditerranée suscitent actuellement la plus grande préoccupation au sein de la communauté scientifique, de nombreuses recherches ont cherché à apporter leur contribution aux initiatives visant à évaluer la fragilité des zones côtières en Algérie et à étudier les moyens de s'adapter à ces évolutions.

Allant de 1972 jusqu'à 2022, le littoral de la baie de Zemmouri a connu une forte dégradation dont 50 % de ces plages sont perdues par érosion avec un taux de recul moyen de l'ordre de - 0.92 m/an, cela est expliqué par la conjugaison des facteurs naturels (climat des houles) et/ou anthropiques (développement de tourisme balnéaire, industrie, extension du tissu urbain...).

1032.7 ha de la superficie totale présente un risque de submersion avec un niveau d'inondation minimum (2 m) ; et 2207.71 ha pour un niveau de submersion maximum (6 m) Il est impératif d'inclure la prise en compte de l'érosion côtière et de la submersion marine dans les stratégies et les plans d'aménagement côtier.

Mots clés : Changement climatique, élévation du niveau de la mer, érosion côtière, adaptation, baie de Zemmouri, submersion.

Summary :

Starting from the assumption that climate change and the corresponding rise in the Mediterranean Sea level currently raise the greatest concerns within the scientific community, numerous research efforts have sought to contribute to initiatives aimed at assessing the vulnerability of coastal areas in Algeria and studying ways to adapt to these changes.

From 1972 to 2022, the coast of Zemmouri bay experienced a strong degradation of which 50% of these beaches are lost by erosion with an average rate of -1 m / year, this is to explain by the combination of natural (swell climate) and / or anthropogenic factors (development of seaside tourism, industry, extension of the urban fabric, etc.). 1032.7 ha of the total area presents a risk of submersion with a minimum flood level (2 m); and 2207.71 ha for a maximum submersion level (6 m).

It is imperative to incorporate the consideration of coastal erosion and marine submersion into coastal development strategies and plans.

Keywords: Climate change, sea-level rise, coastal erosion, adaptation, Zemmouri Bay, submersion.

المخلص :

بدءً من افتراض أن تغير المناخ وارتفاع منسوب البحر الأبيض المتوسط يثيران حالياً أكبر القلق داخل المجتمع العلمي، سعت العديد من الجهود البحثية إلى المساهمة في المبادرات التي تهدف إلى تقييم ضعف المناطق الساحلية في الجزائر ودراسة وسائل التكيف مع هذه التغيرات.

منذ عام 1972 حتى عام 2022، شهدت ساحل خليج زموري تدهوراً كبيراً، حيث فقدت 50% من شواطئه بفعل التآكل بمعدل انحسار متوسط يبلغ حوالي -0.92 متر سنوياً. يمكن أن يرجع ذلك إلى مزيج من العوامل الطبيعية (مناخ الأمواج) و/أو عوامل بشرية (تطوير السياحة الساحلية، الأنشطة الصناعية، التوسع الحضري، وما إلى ذلك). حوالي 1032.7 هكتاراً من المساحة الإجمالية معرضة لخطر الغمر بمعدل فيضان أدنى يبلغ 2 أمتار، و 2207.71 هكتاراً معرضة لخطر الغمر بمعدل أقصى يبلغ 6 أمتار.

من الضروري أن نضمن اعتبار تآكل السواحل والغمر البحري في استراتيجيات وخطط التنمية الساحلية.