

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

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



Mémoire de Fin d'Études

En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'état en Sciences de la Mer

Option : Gestion et Protection du Littoral

Thème :

**Evaluation des impacts des changements climatiques
et des activités anthropiques sur le littoral de la baie de
Zemmouri : Vulnérabilité et adaptation**

Présenté par :

BENALLOU Imen

Setenu le 23 / 11 /2020 devant le jury :

Mme. SOUKANE MOKHBI D.	MCB (ENSSMAL)	Présidente
M. MEZOUAR K.	MCA (ENSSMAL)	Promoteur
M. SALLAYE M.	CS (ANCC)	Co-promoteur
Mme. MAHDID S.	MAA (ENSSMAL)	Examinatrice
M. DAHMANI A.	MAB (ENSSMAL)	Examinateur

2019/2020

Remerciements

J'exprime ma profonde gratitude à mon promoteur Monsieur « MEZOUAR Khoudir » pour m'avoir guidé, son entière disponibilité, ses critiques constructives, ses conseils et son appui scientifique inestimable. Mes vifs remerciements vont aussi à mon Co-promoteur Monsieur « SALLANE Miloud » pour sa patience, très grande disponibilité, son soutien constant et ses encouragements le long de ce mémoire. J'adresse aussi mes chaleureux remerciements aux membres de jury

Mme SOUKANE MOKHBI D. d'accepter de présider les membres de jury.

Mme MAFFRID S. d'accepter d'examiner ce modeste travail.

M. DAMANI A. d'accepter d'examiner ce travail.

Je voulais remercier également :

- *Ma collègue BELLABAD Fahima pour son aide et son soutien morale.*
- *Tous mes enseignants qui m'ont transmis leur savoir durant mon cursus universitaire au sein de l'ENSSMAL et au personnel de la bibliothèque et l'administration de L' ENSSMAL.*

Enfin je profite de ces lignes pour témoigner toute ma gratitude à toutes personnes qui ont attribuées à l'aboutissement de ce travail de fin d'étude.

Dédicace

A mes chers parents que Dieu les protège

A mes frères Zakaria et Tedj Eddine

A mes anges Nardjess et Nour

A toute ma famille

A tous mes amis surtout la promo GPL

*A la mémoire de mes chers grands parents que Dieu offre à
leurs âmes le Paradis.*

Je dédie ce modeste travail

Inen

Table des matières

Remerciements.....	II
Dédicace.....	III
Liste des figures	VIII
Liste des tableaux.....	X
Liste des acronymes et abréviations.....	XI
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités	4
1. Le system littoral	5
1.1. La morpho dynamique côtière :	5
1.2. Hydrodynamique littorale :	6
1.3. Profil général d'une côte sableuse :	7
2. Les agents de la dynamique littorale :	8
2.1. La houle	8
2.2. La marée :	10
2.3. Les courants :	11
3. Emprise humaine et modification du trait de côte :	11
3.1. La littoralisation de la bande côtière :	11
3.2. La construction des barrages en amont des Oueds :	11
3.3. La dégradation du couvert végétale :	11
3.4. La fréquentation humaine :	11
4. Changement climatique :	12
4.1. Cinquième rapport du GIEC 2013 :	12
5. Les variations de niveau de la mer :	13
6. Submersion marine :	13
Chapitre II : Etat de connaissance du littoral de la baie de Zemmouri	15
1. Situation géographique :	16
2. Cadre géomorphologique :	17
2.1 Continentale	17
2.2 Littoral et sous-marine	17
2.2.1 Le secteur Ouest	17
2.2.2 Secteur centre	17
2.2.3 Le secteur Est	18
3. Le cadre géologique et sédimentologie :	19
3.1. Le socle primaire.....	19

3.2.	Les roches magmatiques	19
3.3.	Les faciès mio-plio-quadernaire.	20
3.4.	L'activité sismique.....	21
4.	Cadre hydrographique	21
5.	Cadre climatologique.....	23
5.1.	Température :	23
5.2.	Précipitations :	25
5.4.	Le vent	26
6.	Conditions hydro-sédimentaires	30
6.1.	La houle :	30
6.2.	Le courant :	33
6.2.1.	Les courants généraux	33
6.2.2.	Les courants côtiers	33
6.3.	Marée :	33
7.	Le niveau marin	33
8.	Facteurs anthropiques	34
8.1.	La construction des barrages :.....	34
8.2.	L'extraction abusive du sable :	34
8.3.	Aménagement portuaire et maritime :	34
8.4.	L'urbanisation anarchique près de cote :	34
8.5.	La fréquentation touristique :.....	35
	Conclusion	35
Chapitre III : Modélisation de la dynamique côtière du littoral de la baie de Zemmouri		
	36
	Introduction.....	37
1.	Description des codes de calcul.....	37
1.1.	Des données bathymétriques :.....	37
1.2.	Des données relatives aux conditions météorologiques :.....	38
1.3.	Des données de niveau d'eau et le marnage :	38
2.	Mise en place du model	38
2.1.	Description des modules :.....	38
3.	La démarche adoptée :	40
4.	Création 2D Bathymétries sous le maillage	40
5.	Interprétation des résultats	41
5.1.	Etude bathymétrique :.....	41

5.2. Présentation et interprétation des résultats de module SW	42
5.3. Présentation et interprétation des résultats de module HD	47
5.4. Présentation et interprétation des résultats de ST	51
Conclusion	55
Chapitre V : Evolution spatio-temporelle du trait de côte de la baie de Zemmouri.....	56
Introduction.....	57
1. Méthodologie :.....	57
2. Calcul des taux d'érosion / accrétion :	59
3. Interprétation des résultats :.....	60
3.1. La cinématique du trait de côte :.....	60
Evolution du rivage entre 1972 et 1985	60
Evolution du rivage entre 1985 et 1994	63
Evolution du rivage entre 1994 et 2003	65
Evolution du rivage entre 2003 et 2010	67
Evolution du rivage entre 2010 et 2017	69
Evolution du rivage entre 2017 et 2020.....	71
Evolution mi- séculaire de la ligne de rivage de la baie de Zemmouri entre 1972 et 2020	73
3.2. Analyse du bilan sédimentaire :	75
4. Evolution prévisionnelle à l'horizon 2050	76
Conclusion :	78
Chapitre VI : Evaluation de la vulnérabilité du littoral de la baie de Zemmouri.....	79
Introduction.....	80
1. Méthodologie :.....	80
1.1. L'indice côtier de vulnérabilité physique (ICV_{phys}) :.....	81
1.2. Résultats et discussion :	83
1.3. L'indice côtier de vulnérabilité socio-économique ($ICV_{socio-eco}$) :.....	87
1.4. Résultats et discussion	89
1.5. Evaluation de la vulnérabilité physique et socio-économique du littoral de la grande baie de Zemmouri :	93
Conclusion	94
Chapitre VII : Submersion marine.....	95
Introduction.....	96
La submersion marine.....	96
Rappels théoriques sur les phénomènes physiques responsables des submersions marines d'origine météorologique.....	97

1. Méthodologie :.....	98
1.1. Scénarios de niveaux d'eau extrêmes :	99
1.2. Les zones à risque d'inondation :.....	105
2. Interprétation des résultats	107
Conclusion	111
Chapitre VIII : Stratégies d'adaptation	113
Introduction.....	114
1. L'adaptation aux changements climatiques :.....	114
1.1. Types de stratégie d'adaptation :	114
Conclusion	119
Conclusion générale	120
Références bibliographiques	123
Annexes.....	II

Liste des figures

Figure 1 : Composants d'un système morpho dynamique côtier (COWELL et THOM 1994, Modifiée).	5
Figure 2 : Processus hydrodynamiques induits par les vagues incidentes (BENALLOU Imen, 2020).	6
Figure 3 : Profil général d'une côte sableuse (Faye, 2010).	8
Figure 4: Types d'ondes de surface, montrant la relation entre les fréquences, la cause de leur génération et la quantité d'énergie de chaque type (DENAMIEL, 2006).	9
Figure 5 : Représentation des grandeurs caractéristiques des vagues (GRASSO, 2009 in NADIR, 2016).	9
Figure 6 : Carte de la distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer (1993-2006) en Méditerranée d'après Topex/Poseidon et Jason-1	13
Figure 7 : Impacts potentiels des changements climatiques sur la zone côtière (MCLAUGHLIN et al., 2001, Modifiée).	14
Figure 8 : Carte de la situation géographique de la grande baie de Zemmouri (Google earth pro 2020).	16
Figure 9 : La morphologie du plateau continentale de la grande baie de Zemmouri.	18
Figure 10 : Carte morpho-géologique du bassin de la Mitidja et ses environs (DOMZIG 2006).	20
Figure 11 : Carte d'isostistes du séisme de Boumerdès, 21/5/2003 (lignes en pointillés rouges) et contexte géologique et tectonique de la région (AYADI et al., 2003 in DOMZIG, 2006). ..	21
Figure 12 : Carte des réseaux hydrographiques dans la grande baie de Zemmouri (2020).	23
Figure 13 : Histogramme des températures (max, min et moyenne) mensuelles 2010 – 2020 (Source : « https://rp5.ru/Temps_%C3%A0_Boumerd%C3%A8s »).	24
Figure 14 : Histogramme des précipitations mensuelles de la station de Dar El Beida entre 2008 et 2019.	25
Figure 15 : Le diagramme ombro-thermique.	26
Figure 16 : Histogramme de distribution des fréquences d'apparition du vent par direction. .	27
Figure 17 : Rose du vent au large de la grande baie de Zemmouri (2020).	29
Figure 18 : Histogramme des fréquences d'apparition des houles annuelle et saisonnière.	30
Figure 19 : Les roses de houles au large de la grande baie de Zemmouri (2020).	32
Figure 20 : Approche méthodologique adoptée pour la modélisation intègre du transport sédimentaire non cohésif.	40
Figure 21 : Emprise du model.	41
Figure 22 : Carte bathymétrique de la grande baie de Zemmouri 2020.	41
Figure 23 : Le champ de vague de direction Nord (MWD = 360°N)	44
Figure 24 : Le champ de vague de direction Nord-Est (MWD =45°N)	45
Figure 25 : Le champ de vague de direction Nord-ouest (MWD = 315°N)	46
Figure 26 : Le champ du courant engendré par les houles de direction Nord.	48
Figure 27 : Le champ du courant engendré par les houles de direction Nord-Est.	49
Figure 28 : Le champ du courant engendré par les hpile de direction Nord-Ouest.	50
Figure 29 : Le transport sédimentaire engendré par les houles de direction Nord.	52
Figure 30 : Le transport sédimentaire engendré par les houles de direction Nord-Est.	53
Figure 31 : Le transport sédimentaire engendré par les houles de direction Nord-Ouest.	54

Figure 32 : Étapes de la méthodologie de suivi du trait de côte.....	58
Figure 33 : Le bilan sédimentaire de la baie de Zemmouri.....	75
Figure 34 : Le bilan surfacique par secteur.	76
Figure 35 : Le taux d'évolution EPR de la baie de Zemmouri d'ici 2050.	78
Figure 36 : Les six variables de l'indice de vulnérabilité physique (CVIphysique).	85
Figure 37 : CVIphysique de la grande baie de Zemmouri.	86
Figure 38 : Pourcentage du littoral de la baie de Zemmouri pour chaque degré de vulnérabilité physique suit à l'élévation du niveau de la mer.	86
Figure 39 : Les six variables de l'indice de vulnérabilité socioéconomique (CVIeco).	91
Figure 40 : L'indice de vulnérabilité socioéconomique de la grande baie de Zemmouri (CVIeco).	92
Figure 41 : Pourcentage du littoral de la baie de Zemmouri pour chaque degré de vulnérabilité socio-économique suit à l'élévation du niveau de la mer.	92
Figure 42 : Carte de superposition de CVIphysique et socio-économique du littoral de la grande baie de Zemmouri.....	93
Figure 43 : Typologie des submersions marines (franchissement, débordement, rupture d'ouvrage).(BRGM et Cachan, 2012).	97
Figure 44 : Processus physiques en action lors d'une tempête : agitation et surélévation du plan d'eau. (BRGM, 2012).....	98
Figure 45 : Histogramme de la distribution fréquentielle des classes des hauteurs significatives par direction.....	100
Figure 46 : La distribution des amplitudes de houles en fonction du temps (1992-2020).	100
Figure 47 : Corrélation entre Hs et la fréquence d'apparition des houles de direction N au large de la grande baie de Zemmouri.	102
Figure 48 : Corrélation entre Hs et la fréquence d'apparition des houles de direction NW au large de la grande baie de Zemmouri.	102
Figure 49 : Corrélation entre Hs et la fréquence d'apparition des houles de direction NE au large de la grande baie de Zemmouri.	103
Figure 50 : Corrélation entre Hs et la fréquence d'apparition des houles de direction W au large de la grande baie de Zemmouri.	103
Figure 51 : Le plan de vague de la direction NW associé à la période de retour 2ans.....	103
Figure 52 : Le plan de vague de la direction NW associé à la période de retour 20ans.....	104
Figure 53 : Le plan de vague de la direction NW associé à la période de retour 100ans.....	104
Figure 54 : Le modèle numérique du terrain (MNT) de la grande baie de Zemmouri	106
Figure 55 : Carte d'occupation du sol de la grande baie de Zemmouri.	106
Figure 56 : Les cartes de submersion marine.	110
Figure 57 : Superficies des terres inondées par les différents niveaux d'élévation.	111
Figure 58 : Système de stabiplage.....	117
Figure 59 : Système d'ECOPLAGE de Carl Linderoth (http://www.atlanpole.fr)(a) et la mise en place du procédé d'ECOPLAGE dans la baie d'Agay (b) http://www.ville-saintraphael.fr	116

Liste des tableaux

Tableau 1 : Description des caps de la grande baie de Zemmouri.	18
Tableau 2 : Les caractéristiques des Oueds de la baie de Zemmouri.	22
Tableau 3 : Distribution des températures moyennes mensuelles pour la période entre 2010-2020.	24
Tableau 4 : La distribution des moyennes mensuelles des précipitations au niveau de la station de Dar El Beida (2008-2019).	25
Tableau 5 : L'indice pluviométrique de l'Emberger.	26
Tableau 6 : Distribution des fréquences d'apparition annuelle et saisonnière du vent au niveau de la station de Dar El Beida par direction entre 2010 à 2020.	27
Tableau 7 : La distribution fréquentielle de Hs selon les directions de la station de Dar El Beida entre 2010 et 2020.	30
Tableau 8 : Description des modules de Mike 21.	39
Tableau 9 : Hauteur des houles annuelles retenues par secteur de provenance au large.	42
Tableau 10 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 1972 et 1985.	62
Tableau 11 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 1985 et 1994.	64
Tableau 12 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 1994 et 2003.	66
Tableau 13 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 2003 et 2010.	68
Tableau 14 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 2010 et 2017.	70
Tableau 15 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 2017 et 2020.	72
Tableau 16 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 1972 et 2020.	74
Tableau 17 : Classification des variables de la vulnérabilité côtière physique.	82
Tableau 18 : Présentation des variables retenues pour le calcul du CVI socio-économique. ...	88
Tableau 19 : Les différentes classes de la vulnérabilité côtière socio-économique.	89
Tableau 20 : Résultats des hauteurs significatives associées aux périodes de retour (m).	101
Tableau 21 : Niveaux d'inondations extrêmes.	107
Tableau 22 : Résultats des terres à risque d'inondations.	112

Liste des acronymes et abréviations

ANCC	Agence National des Changements Climatiques
CCC	Climate Change Comunittee
CS	Chef de Service
CVI	Costal Vulnerability Index
DD	Développement Durable
DSAS	Digital Shoreline Analyses System
EPR	End Point Rate
GIEC	Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GIZC	Gestion Intégrée des Zones Côtières
HD	Hydrodynamic
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Changes
LRR	Linear Regression Rate
NSM	Net Shoreline Movement
SIG	System d'Information Géographique
ST	Sediment Transport
SW	Spectral Wave
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS	World Geodesic System
ZC	Zone Côtière

Introduction générale

Introduction générale

Le littoral est un système complexe, vulnérable, et dynamique, il est soumis à plusieurs forçages, hydrodynamique par les courants, vagues, tempêtes, changements climatiques..., et les activités anthropiques par les aménagements (les barrages, les ouvrages de protection côtier,...) qui le conduisent à une évolution rapide (érosion ou accrétion), ce qui peut être engendré par une ou plusieurs aléas (érosion, submersion marine ...).

Les côtes évoluent par érosion et sédimentation. Ces phénomènes s'expliquent d'abord par le jeu des vagues et des marées ainsi que par celui des courants qu'elles engendrent. Les espaces littoraux subissent aussi des transformations en raison de l'intervention d'agents morphogéniques qui ne leur sont pas propres, comme le vent, les eaux de ruissellement et d'infiltration, le gel, mais dont l'efficacité peut se manifester, voire être accrue, au contact de la terre et de la mer. A cette interface se manifestent également des processus physiques et physicochimiques dont la portée ne doit pas être négligée, tout comme celle des actions biologiques de destruction et de construction. Finalement, il ne faut pas oublier que l'Homme, en s'appuyant sur des moyens techniques de plus en plus performants, est devenu, volontairement mais aussi involontairement, un agent essentiel de l'évolution de beaucoup de rivages marins (**PASKOFF,1998**).

Pour sa part, le littoral Algérien est soumis à un recul important dans environ 50% des côtes dont plus de 75% sont des plages sableuses (**BOUTIBA,2006**). Dans un contexte de changements climatiques, on assiste actuellement à une hausse du niveau marin relatif (**GIEC, 2001**) de 1 à 2 mm/an depuis un siècle (**PIRAZZOLI, 1989, WOODWORTH et al., 1999, MORNER, 2004**) et de 3,1 mm/an depuis la dernière décennie (**GIEC, 2007**) dont les conséquences sont l'accélération de l'érosion des plages et l'augmentation de la fréquence de submersion côtière.

Actuellement, l'érosion côtière est une grave menace pour de nombreux sites côtiers Algériens en particulier le long de littoral de la baie de Zemmouri, ce dernier constitue, non seulement le siège d'échanges de sédiments qui se produisent latéralement et transversalement sous l'action des houles, courants, vents ..., mais aussi un territoire attractif qui a connu un fort potentiel touristique avec un fort étalement urbain qui sont soulignés la perte de caractéristique naturelle et la mobilité de rivage.

A travers ce modeste travail on va dresser un bilan général détaillé sur la vulnérabilité du littoral de la grande baie de Zemmouri vis-à-vis aux changements climatiques ainsi aux activités anthropiques et aussi comment peut-on s'adapter à une hausse de niveau marin.

Pour cela on adaptera une démarche simplifiée et concrète. Elle s'articule autour de ces six chapitres :

Dans le **Chapitre I** on a abordé le concept du système littoral, ses composantes et sa dynamique en signalant la vulnérabilité de cette portion côtière face aux aléas naturels et aux actions anthropiques.

Introduction générale

Dans le **Chapitre II** on a décrit les aspects généraux du milieu ; la topographie, la géologie, la géomorphologie, l'hydrologie et les conditions naturelles y compris les vents, les courants, et les houles qui conditionnent directement la dynamique sédimentaire tout le long de la côte.

Chapitre III est consacré à la présentation des résultats des études bathymétrique et hydrodynamique d'une part, et étude du transport sédimentaire et la modélisation de transit littoral d'une autre part dans une approche de modélisation numérique à l'aide des logiciels Arc Gis et Mike21.

Chapitre IV porte à l'étude des variations historiques de la position de la ligne de rivage, dans le but de parvenir à l'identification et la description des taux nets d'évolution le long de cette côte, en plus l'établissement d'un scénario prévisionnel à l'horizon 2050.

Chapitre VI est réservé au calcul de l'indice de vulnérabilité côtière CVI.

Chapitre VII est consacré pour la cartographie de l'aléa de la submersion marine.

Chapitre VIII concernera les stratégies d'adaptation aux changements climatiques du littorale de la zone d'étude.

Chapitre I : Généralités

1. Le system littoral

La côte est le lieu de rencontre entre le continent, l’océan et l’atmosphère. Ces trois environnements, contrôlés par de multiples processus physiques, interagissent au niveau du littoral (**CARTER, 1988 ; BOAK et TURNER, 2005**). Les processus évoluent à différentes échelles spatio-temporelles jusqu’aux étroites interactions qui existent entre le fluide et le sédiment (**VAN Rijn, 1986**).

Les littoraux sableux sont des systèmes dynamiques qui peuvent être « stables », subir une érosion, ou bien avoir tendance à s’engraisser selon les forçages naturels et anthropiques (**PASKOFF, 1998 ; PASKOFF, 2005 ; PASKOFF et CLUS-AUBY, 2007**) auxquels ils sont soumis.

Dans ces environnements, la tendance érosive naturelle est accélérée par des actions anthropiques qui ont introduit un déséquilibre dans les processus côtiers en limitant le volume de sable nécessaire au maintien des plages et à la stabilité du trait de côte (**PASKOFF 1998**).

1.1. La morpho dynamique côtière :

Un système morpho dynamique est constitué d’un objet géomorphologique qui réagit aux variations d’une composante dynamique par un ajustement morphologique. Cette réponse est une tentative de mise à l’équilibre de la morphologie par rapport aux nouvelles conditions de forçages. Dans le cas des systèmes littoraux, la topographie des fonds côtiers est en constant ajustement avec la dynamique du milieu fluide. Cet ajustement morphologique est le résultat d’un gradient de transport sédimentaire (figure 1).

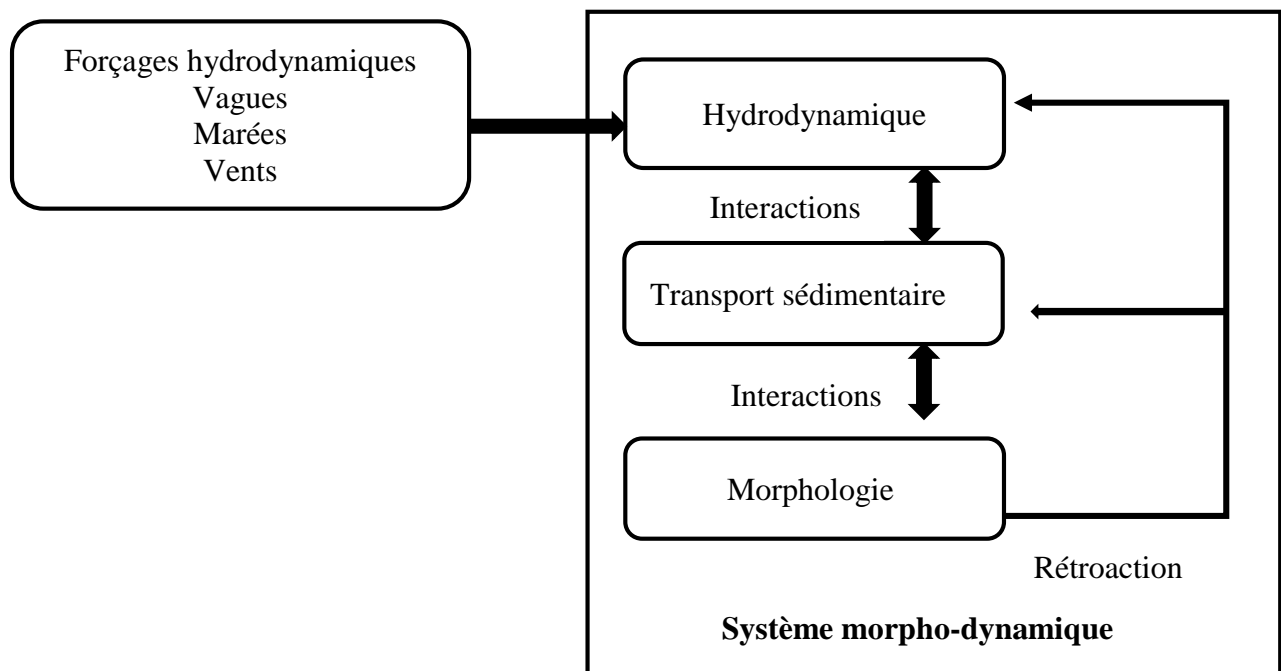


Figure 1 : Composants d’un système morpho dynamique côtier (**COWELL et THOM 1994, Modifiée**).

Une modification des forçages génère une modification de la dynamique des fluides, du transport sédimentaire et l'interaction de ces processus avec la morphologie initiale est à l'origine de la construction d'une nouvelle morphologie. Des phénomènes de rétroactions sur la dynamique des fluides et le transport peuvent être soit positifs ou négatifs (**COWELL et THOM**). Un processus d'autocontrôle renforce la tendance d'évolution du système en augmentant le déséquilibre. Alors qu'un processus d'autorégulation inverse la tendance et amène le système vers l'équilibre.

1.2. Hydrodynamique littorale :

Les zones littorales sont des environnements dynamiques où se produisent de nombreuses interactions entre des différents agents de circulations hydrodynamiques. La majorité de ces agents sont des phénomènes oscillatoires qui se manifestent à différentes échelles spatio-temporelles (**DIDIER RIHOUEY, 2004**). Une zonation du domaine côtier et de la plage s'effectue en fonction des processus hydrodynamiques liés aux transformations des vagues lors de leur propagation :

- La zone du large (offshore zone) : Les vagues ne subissent aucune déformation liée à la topographie des fonds.
- La zone de levée (*shoaling wave zone*) : Siège d'interactions non-linéaires entre les vagues incidentes et le fond, est caractérisé par une augmentation de la hauteur des vagues H et une diminution de leur longueur d'onde L .
- La zone des brisants (*wavebreaking zone*) : Où le déferlement des vagues se produit lorsque la profondeur d'eau devient faible devant la hauteur des vagues.
- Zone de swash (*swash zone*) : c'est le lieu où se manifestent les processus de jet de rive et la nappe de retrait.

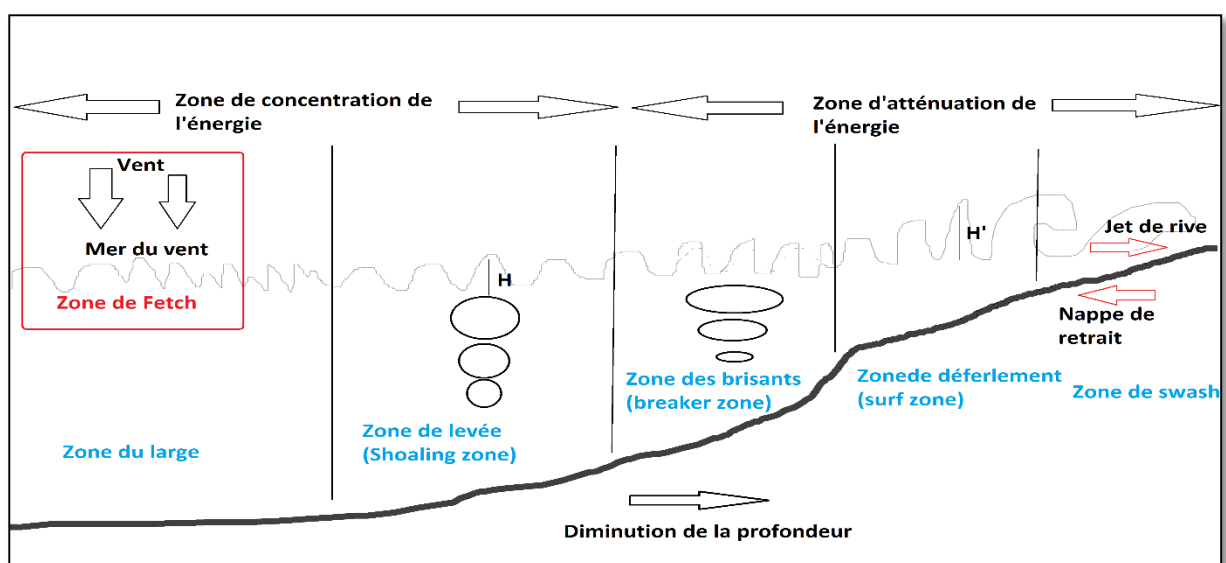


Figure 2 : Processus hydrodynamiques induits par les vagues incidentes (**BENALLOU Imen, 2020**).

1.3. Profil général d'une côte sableuse :

Les plages sont des accumulations littorales de sédiments meubles, qui vont des sables fins (de 0.063 à 0.2 mm) aux blocs (supérieurs à 20 cm), susceptibles d'être mobilisés par le passage régulier des eaux marines ; on parle de grève lorsqu'elles sont constituées de galets.

Les matériaux des plages proviennent des sédiments continentaux apportés par les fleuves, ils sont remaniés par l'action des houles et des dérives littorales qui peuvent les transporter vers le large. Ainsi, il se forme une plage dès lors que le volume de sédiments disponibles est supérieur au volume transporté. Les plages ont un profil transversal en pente douce, à allure faiblement concave. Leur pente varie en fonction du calibre des sédiments qui les constituent et des caractéristiques des vagues qui y déferlent. Le profil est abrupt quand les sédiments sont grossiers (**FAYE, 2010 in NADIR, 2016**).

Dans le détail, on distingue, vers l'amont, l'arrière-plage (Backshore) partie de la plage qui est sujette à l'action des vagues uniquement durant les tempêtes. En absence de tempête le sable peut être remobilisé par les facteurs éoliens.

Vers la mer, la plage subaérienne (l'estran, espace intertidale ou foreshore) soumise à l'action des vagues pendant les conditions non-tempêtuelles. Subdivisée en trois parties (Figure 3):

- Haut de plage : sous forme de bourrelets, qui sont dus à l'accumulation des matériaux par les mers les plus hautes ;
- Moyenne plage : marquée par une ligne de réflexion à partir de laquelle la pente diminue brusquement.
- Bas de plage : submergé à chaque marée. Sa partie avale montre parfois une alternance de bancs surbaissés et de gouttières ou bâches.

- Et enfin, l'avant-plage (nearshore) constamment immergée et accidentée de barres et de rides, qui sont parallèles et parfois obliques au trait de côte et se forment quand la pente est douce et les sédiments abondants, et de sillons pré-littoraux.

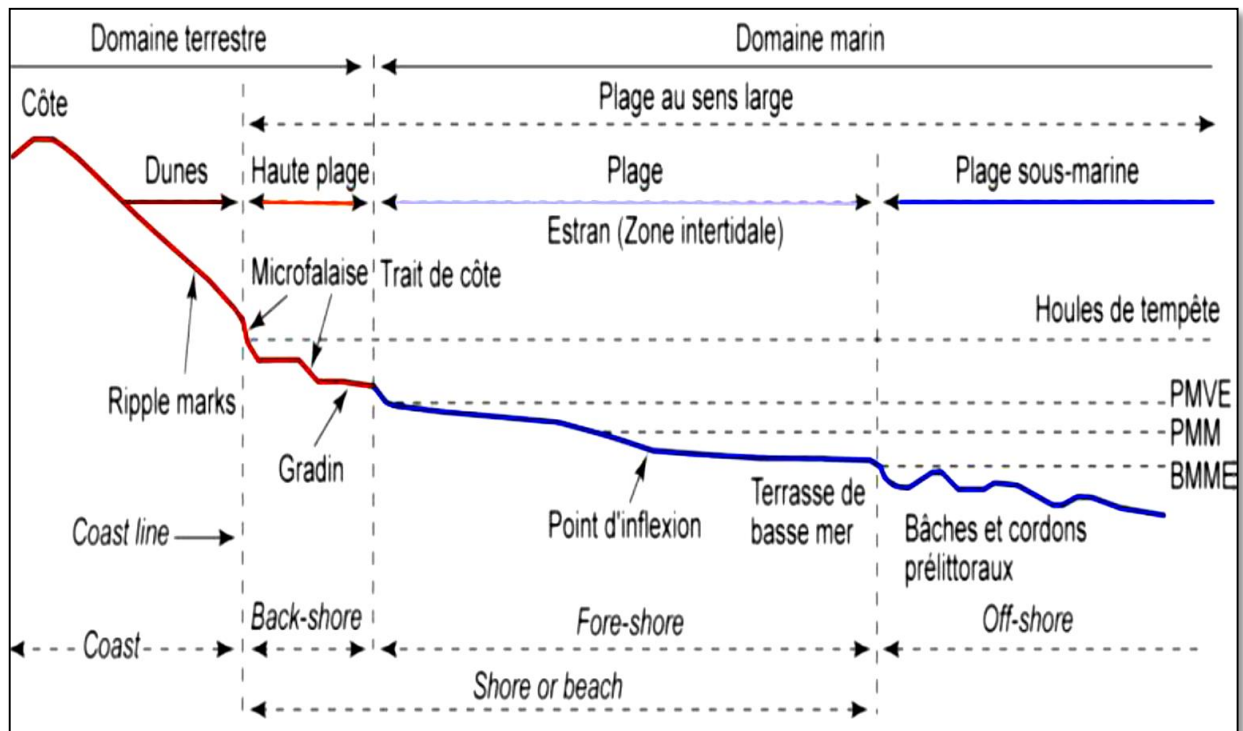


Figure 3 : Profil général d'une côte sableuse (Faye, 2010).

2. Les agents de la dynamique littorale :

Le système littoral étant un ensemble complexe d'éléments en interaction a une dynamique spécifique. Cette dynamique est le résultat d'un large spectre de forçage à l'échelle géologique (tectonique et eustatique) et à l'échelle temporaire, en parlant des forces hydrodynamiques.

Il existe plusieurs forces naturelles qui se traduisent dans le milieu marin sous forme de déplacement de masse d'eau comme les courants ou sous forme de déplacement ondulatoire, le cas de la houle.

2.1. La houle

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

Connaitre et prévoir les caractéristiques des vagues lors de leur propagation vers la côte est un besoin important pour les activités marines, et en particulier la protection côtière, afin de dimensionner un ouvrage tel qu'une digue. Différentes théories de houle ont été établies grâce à des fonctions mathématiques pour expliquer et calculer les houles régulières. Il est important de préciser que la surface de la mer est beaucoup plus complexe et aléatoire du fait de son caractère non linéaire. Cependant, différents modèles mathématiques de la houle ont été établis dès le XIX siècle par AIRY (1845), et MICHE (1944) (SAFARI, M. IMAM. 2006).

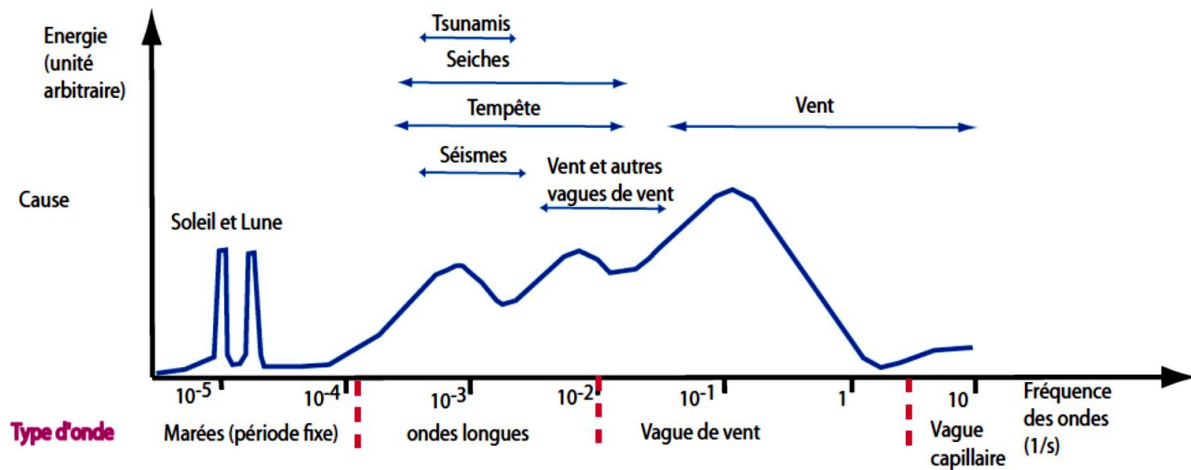


Figure 4: Types d'ondes de surface, montrant la relation entre les fréquences, la cause de leur génération et la quantité d'énergie de chaque type (DENAMIEL, 2006).

2.1.1. Grandeurs physique et caractéristiques de la houle :

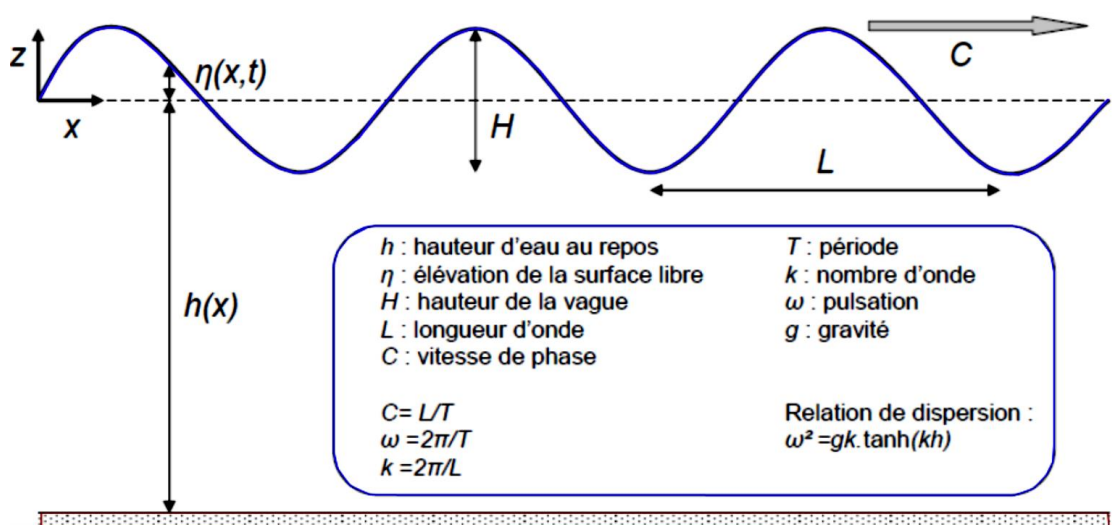


Figure 5 : Représentation des grandeurs caractéristiques des vagues (GRASSO, 2009 in NADIR, 2016).

2.1.2. Mécanismes générateurs de la houle :

- **Le vent :**

Le processus selon lequel les vagues sont créées par le vent est le suivant :

- ✓ Il faut un minimum de vent (environ 1 m/s) pour qu'un champ de vagues apparaisse ;
- ✓ De petites vagues se forment alors, au fur et à mesure que le vent s'intensifie ; ce sont des ondes de haute fréquence, avec une courte longueur d'onde et une faible amplitude ;
- ✓ Après un temps suffisant, le spectre des vagues est pleinement développé, et ne varie plus beaucoup. Sa fréquence dominante est celle du vent et il faut attendre d'autant plus longtemps pour atteindre cet état quasi-stationnaire que le vent est plus fort.

Les vagues grandissent selon le fetch, la vitesse et la durée du vent. Elles continuent de grandir tant que sa célérité d'onde ne dépasse pas celle du vent. Dans le cas contraire, elle déferle au large en « mouton » (WRIGHT.J et al, 1999).

2.1.3. Mécanismes modificateurs de la houle :

- **Les courants :**

Parmi leurs effets, les courants ont la capacité de réfracter les vagues. Ainsi, les variations de courant modifient la vitesse de phase des vagues et induisent une réfraction. La direction de propagation est alors modifiée et n'est plus perpendiculaire aux crêtes mais s'oriente parallèlement au courant. La forme des vagues est aussi modifiée. Les courants peuvent aussi bloquer les vagues lorsque leur direction de propagation est opposée à la direction des courants, et quand l'intensité du courant est supérieure à leur vitesse de groupe. Les vagues sont alors stoppées (NADIR, 2016).

- **Frottement sur le fond :**

L'effet de la friction au fond est plus complexe car il dépend de la nature du fond, généralement variable et dont la topographie à l'échelle de quelques mètres est façonnée par l'action des vagues. Le frottement au fond affecte les vagues seulement lorsqu'elles sont en eau suffisamment peu profonde (dès que la vitesse n'est pas nulle au fond). Cela implique que le frottement agit de façon préférentielle sur les basses fréquences du spectre d'énergie (BRIERE, 2005).

2.2. La marée :

La marée est un mouvement oscillatoire du niveau de la mer engendré par l'attraction de la lune et du soleil sur les particules fluides des océans (BOUGIS, 2003).

Ce mouvement pourrait être comparé à la houle car, dans les deux cas, les molécules d'eau décrivent des trajectoires fermées dans un plan vertical. Mais, à la différence de la houle, la longueur d'onde de la marée est toujours bien supérieure à la profondeur des océans. Il en résulte que le mouvement dû à ce phénomène intéresse toute la hauteur d'eau (BRIERE, 2005).

Dans les côtes algériennes, l'amplitude de la marée n'est pas importante, le marnage est de l'ordre de 20 à 30 cm en pleine lune et de 5 à 15 cm en nouvelle (AMAROUCHE, 2015).

2.3. Les courants :

Un courant par définition est une masse d'eau qui se déplace sur de très longues distances, à la surface ou en profondeur, suivant une direction donnée.

Les courants sont responsables de l'état dynamique des sédiments (érosion, transport et sédimentation) (OTMANI, 2014).

2.3.1. Type des courants :

- **Courant de dérive littorale :**

Lorsque la houle arrive à la côte avec une certaine obliquité elle donne naissance à un courant parallèle au rivage, le plus souvent désigné sous le nom de dérive littorale, situé entre les lignes de déferlement et le trait de côte. Ce courant joue un rôle très important dans l'évolution des rivages, en particulier quand il s'agit de plages.

La vitesse de la dérive littorale n'est pas facile à calculer. Il existe cependant des formules qui permettent de faire des estimations citant celle de **CARTIER Adrien (2011)**.

- **Courant de retour :**

L'apport d'eau à la cote, du au déferlement qui transforme les vagues d'oscillation en vagues de translation, doit logiquement être compensé par un retour d'eau vers le large, produisant un courant qui se manifeste près du fond dans l'espace infralittoral et auquel on donne parfois le nom de récurent ou encore courant d'arrachement. Il est perpendiculaire à la cote lorsqu'il nait de la rencontre de deux dérives littorales de sens opposé. Mais ils sont le plus souvent obliques (**SENECHAL 2003**).

3. Emprise humaine et modification du trait de côte :

Le littoral est depuis toujours le lieu privilégié d'installation de ports, de villes et d'activités industrielles et économique. Ces pressions humaines causent de profondes perturbations du rivage et des écosystèmes littoraux. Ces perturbations agissent conjointement et placent les plages dans une situation précaire. A titre d'exemple, on peut citer :

3.1. La littoralisation de la bande côtière :

Cette action accélère le phénomène de l'érosion côtière tout en augmentant le déficit sédimentaire.

3.2. La construction des barrages en amont des Oueds :

Elle va réduire considérablement les quantités de sédiments charriés.

3.3. La dégradation du couvert végétale :

Elle favorise le départ de sédiment des dunes vers l'arrière-pays par des agents aériens tel que le vent.

3.4. La fréquentation humaine :

Elle concerne sur-fréquentation des cordons dunaires qui détruit la végétation ou empêche son développement et expose le sable à l'action du vent, aussi l'extraction des matériaux modifie les échanges sédimentaires.

4. Changement climatique :

Le changement climatique correspond à un changement du «temps moyen» observé dans une région donnée. Le temps moyen comprend tous les éléments associés au temps, à savoir la température, les caractéristiques des vents et les précipitations. Le terme de changement climatique, tel qu'utilisé par le GIEC, désigne tout changement du climat dans le temps, qu'il soit dû à la variabilité naturelle ou provoqué par les activités humaines. Pour la commission des changements climatiques « CCC », il désigne un changement attribué directement ou indirectement aux activités humaines, qui modifient la composition de l'atmosphère mondiale, ajouté à la variabilité climatique naturelle observée sur des périodes de temps comparables.

Les tendances au réchauffement et au refroidissement font partie des cycles normaux du climat, et les conditions climatiques varient au cours d'une même année, d'une année à une autre et au cours des décennies, des siècles et des millénaires. Les données du passé révèlent que le climat a connu de nombreuses variations, fluctuant régulièrement entre des périodes chaudes et froides. De nombreuses études (**FOLLAND et al., 1990**) démontrent que le climat mondial s'est réchauffé au cours des 150 dernières années. La hausse de température n'a pas été constante ; des cycles de réchauffement et de refroidissement se sont succédé à des intervalles de plusieurs décennies. Néanmoins, la tendance à long terme est au réchauffement planétaire (**GIEC, 2001; 2007**).

4.1. Cinquième rapport du GIEC 2013 :

Après 4 évaluations du climat par le GIEC, Le rapport «Changements climatiques 2013 – Les éléments scientifiques» présente des conclusions claires et solides, issues d'une évaluation mondiale des éléments scientifiques du changement climatique, dont l'une, et non des moindres, est que la science montre à présent avec 95 % de certitude que depuis le milieu du XXe siècle, l'activité humaine est la cause principale du réchauffement observé. Ce rapport confirme que le réchauffement du système climatique est sans équivoque et que nombre des changements observés sont sans précédent depuis des décennies, voire des millénaires : réchauffement de l'atmosphère et des océans, diminution de la couverture neigeuse et recul des glaces, élévation du niveau des mers et augmentation des concentrations de gaz à effet de serre. Chacune des trois dernières décennies a été plus chaude à la surface de la Terre que la précédente, et plus chaude que toutes les décennies antérieures depuis 1850. Ces résultats, et bien d'autres, confirment et précisent notre façon de comprendre le système climatique et le rôle des émissions de gaz à effet de serre ; aussi les décideurs comme le grand public doivent-ils accorder d'urgence à ce rapport toute l'attention requise.

5. Les variations de niveau de la mer :

Les observations géologiques et archéologiques indiquent qu'au cours des derniers millénaires, le niveau de la mer a peu varié (pas plus de 0.1 mm par an globalement), les enregistrements marégraphiques disponibles depuis près d'un siècle témoignent d'une hausse significative au cours des dernières décennies en concordance avec le réchauffement climatique (TOUZI, GUIDOU, 2016). Sur l'ensemble de la planète, le niveau moyen de la mer s'est élevé de 1,8 mm/an entre 1961 et 2003, et d'environ 3,1 mm/an depuis 1992. D'après IPCC Fourth Assessment Report, 2007, Le littoral de la baie de Zemmouri ne semble pas échappé à ce phénomène surtout que les données altimétriques de Topex /Poseidon estiment une vitesse d'élévation du niveau marin de la région étudiée à 2.5 mm/an, depuis 1990. La remontée du niveau de la mer, accélérée durant la dernière décennie, est un agent déterminant du recul de la ligne de rivage.

Ce lent grignotage des terres, émergées, par la mer pourrait expliquer l'ampleur de l'érosion notée de façon synchrone le long du littoral de la grande baie de Zemmouri, durant la période 1997-2003. Ce phénomène serait compensé par un stock de sédiment insuffisant

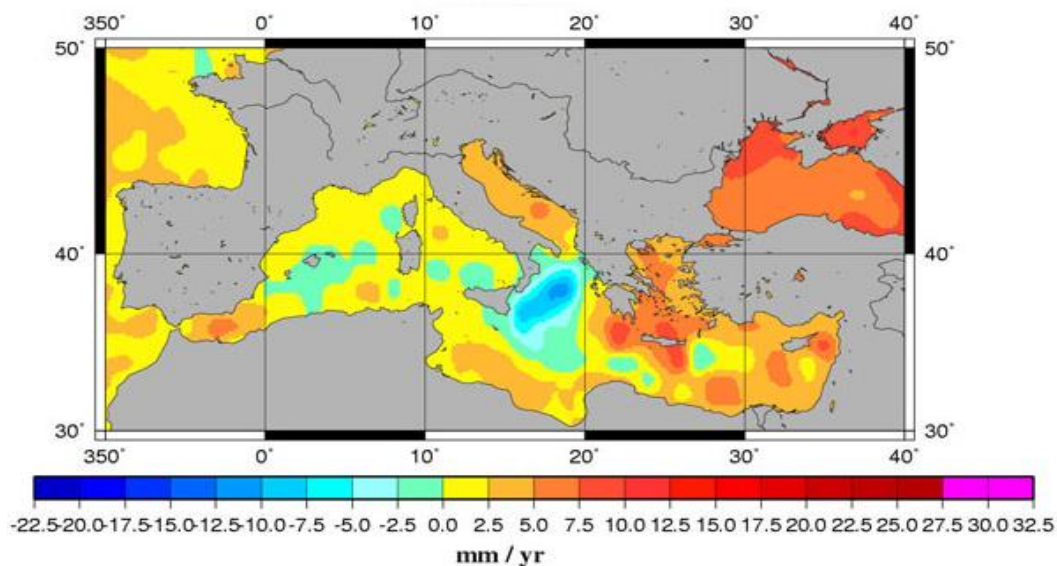


Figure 6 : Carte de la distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer (1993-2006) en Méditerranée d'après Topex/Poseidon et Jason-1.
Source www.legos.obs-mip.fr

6. Submersion marine :

La submersion marine est définie comme une inondation temporaire de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques et marégraphiques sévères (MATE, 1997), généralement né de la conjonction de phénomènes extrêmes (dépression atmosphérique, vent, houle, pluie) et de forts coefficients de marée provoquant une surcote importante du plan d'eau. D'après NIELSEN (2009) et SHALLENGER (2000), les tempêtes peuvent causer deux types de phénomènes sur les

espaces côtiers du globe. Les tempêtes entraînent une élévation du niveau moyen de l'eau car elles combinent les effets d'une faible pression atmosphérique et ceux de forts vents. Ensuite, les effets d'une forte houle s'ajoutent au phénomène : les vagues cassant sur les côtes, plus particulièrement sur les plages plates, vont s'étendre sur plusieurs mètres et générer des effets appelés "wave set up" et "swash" (ANSELME et al., 2011), ce qui a pour conséquence d'amplifier le phénomène et sur tout d'augmenter la taille de la zone atteinte.

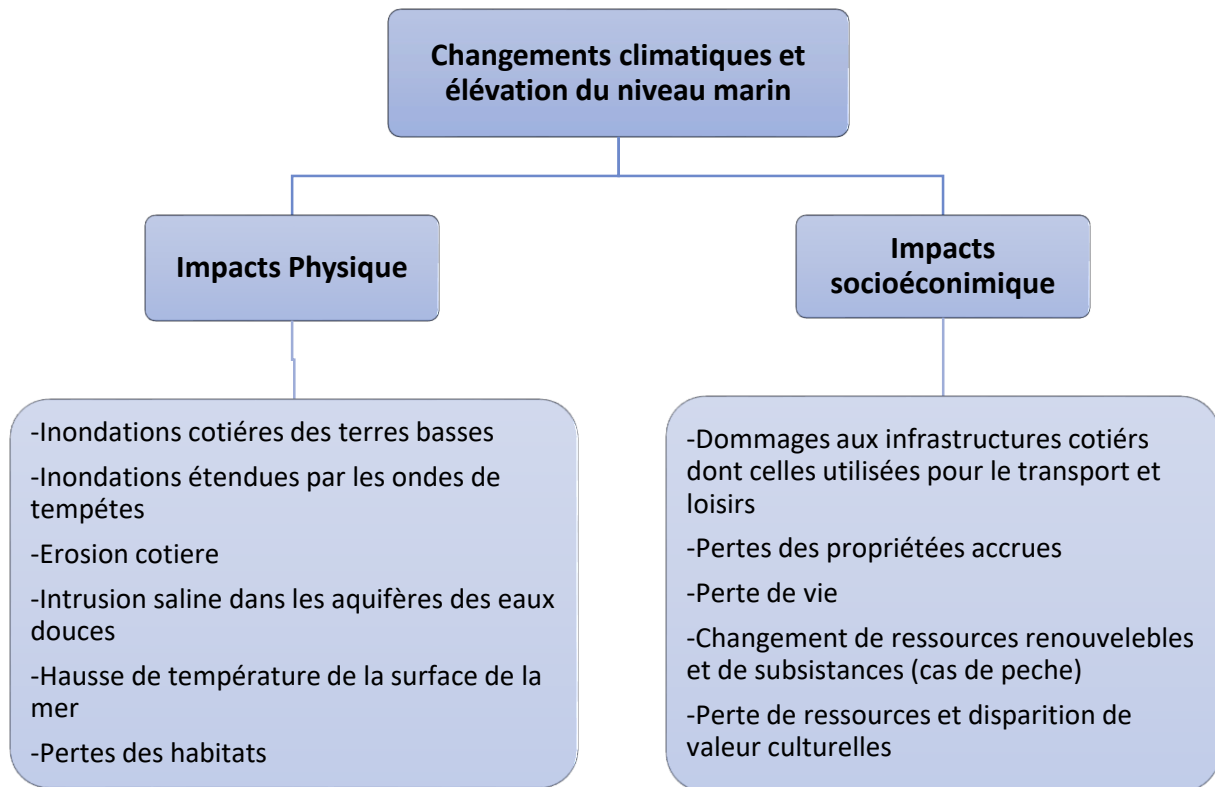


Figure 7 : Impacts potentiels des changements climatiques sur la zone côtière (MCLAUGHLIN et al., 2001, Modifiée).

**Chapitre II : Etat de
connaissance du littoral de la
baie de Zemmouri**

1. Situation géographique :

La grande Baie de Zemmouri se situe au sud du bassin occidental Méditerranéen, prolongeant du centre des côtes Algériennes jusqu'à l'Est de la baie d'Alger, elle est très ouverte vers le Nord sous une forme de creux et étalée sur une cinquantaine de kilomètre (53.7 km) du linéaire côtier , elle est délimitée par le Cap de Djinet ($36^{\circ}52' N$ et $3^{\circ}45' E$) à l'Est et par le Cap Matifou à l'Ouest ($36^{\circ}49'N$ et $3^{\circ}15'E$) (Figure 8).

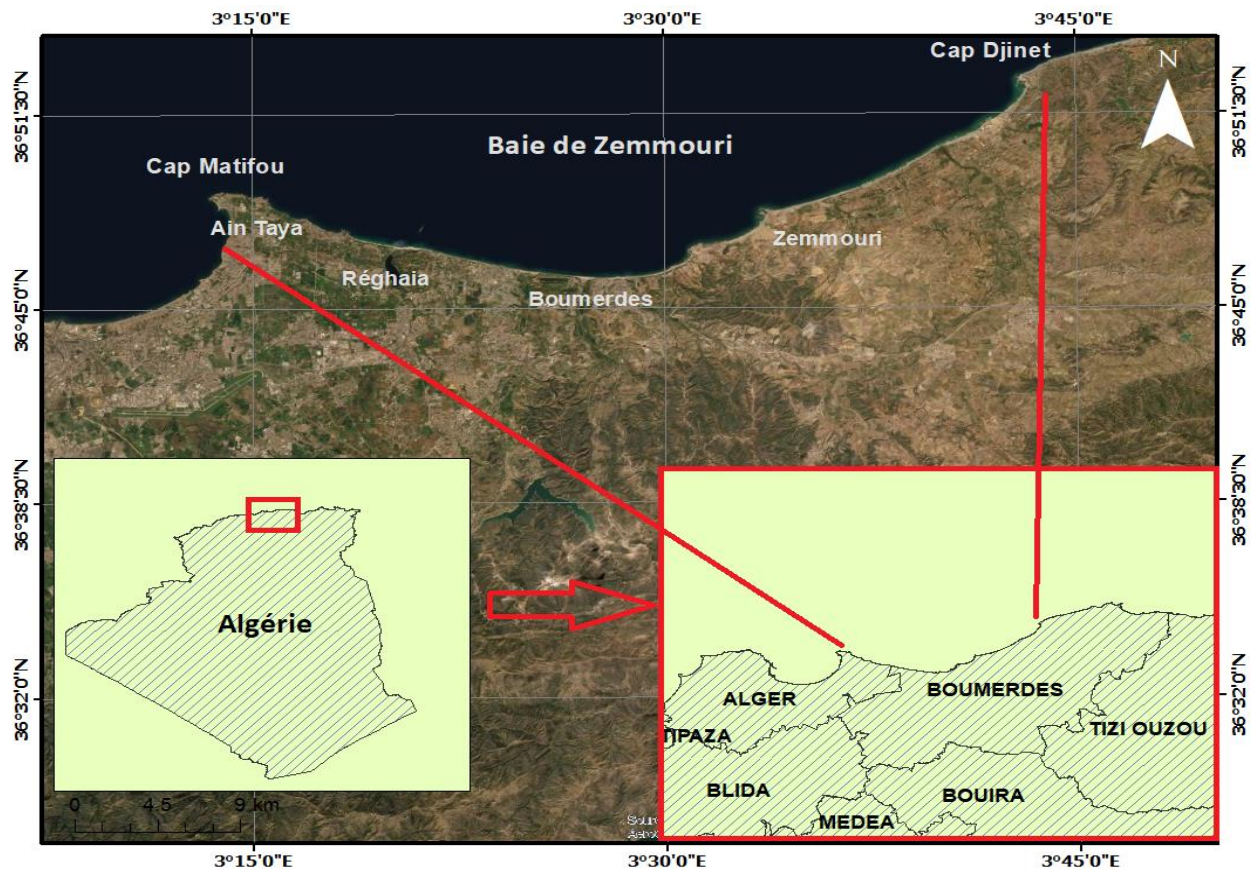


Figure 8 : Carte de la situation géographique de la grande baie de Zemmouri (Google earth pro 2020).

Selon le découpage administratif de 1984, la baie de Zemmouri se localise à l'Est de la baie d'Alger, elle est limitée au :

- Nord par la mer Méditerranée ;
- L'Ouest, par la wilaya d'Alger ;
- Sud-Ouest, par la wilaya de Blida
- L'Est, par la wilaya de Tizi Ouzou ;
- Sud-Est, par la wilaya de Bouira

2. Cadre géomorphologique :

La grande baie de Zemmouri possède une grande variété de formes littorales. Le produit d'interactions entre les processus morpho-dynamique et la nature géologique de la zone donnent naissance à plusieurs systèmes morphologiques.

2.1 Continentale

La willaya de Boumerdès située dans le Tell septentrional, se caractérise par une géomorphologie présentant des paysages variés, correspondant à une alternance des trois grands ensembles (FERRANI, 1998).

- La plaine littorale au Nord ;
- Les derniers contre forts de l'Atlas Mitidjien au Centre et au Sud ;
- Les avants monts de la basse Kabylie à l'Est.

2.2 Littoral et sous-marine

Les espaces côtiers ont changé d'aspect et de forme. Cet éternel modelage, orchestré par la circulation des eaux marines et le climat, est mis en œuvre par les agents hydrodynamique tel que le vent et la houle qui interviennent efficacement dans les deux interfaces marines et continentale. Le littoral de la baie de Zemmouri s'étend de Cap Matifou jusqu'à la limite Est de Cap Djinet, caractérisé par une mer à faible marnage, et un paysage marqué par l'alternance des systèmes morphologiques issus de la géologie du site et des agents hydrodynamiques citant :

- les côtes rocheuses ;
- les côtes meubles (plages).

La zone d'étude a été segmentée de l'Ouest à l'Est en 3 secteurs :

2.2.1 Le secteur Ouest

Délimité par un pic rocheux connu sous le nom de Cap Matifou (46 m) au relief remarquable avec des falaises de 12 à 15 mètres jusqu'à l'oued Boudouaou. On observe une zone de dépôt de sédiments meubles formant des belles plages de sable fins à citer : plage d'ElMarsa, plage d'Ain Beida, plage d'Ain Taya, plage du sable d'or et la plage de Boudouaou El Bahri. Au large des îles : île de Sandjas et l'île Agueli.

2.2.2 Secteur centre

S'étend de l'Oued Boudouaou à l'embouchure de l'oued Isser. Il se caractérise par une côte au profil presque concave découpé de calanques rocheuses et plage de sable fin : « plage de corso, plage de Boumerdes, plage d'El Karma (Figuiers), plage de Zemmouri El Bahri Est et Ouest ». La plupart de ces plages sont situées aux embouchures des Oueds, où ils ont subi une accumulation

sableuse très forte qui a engendré la formation dunaire qui s’explique par le triage des sédiments sélectif par les vents venant du large de la haute plage en raison de l’absence de la végétation.

Les dunes occupent une bande comprise entre Cap blanc et Cap Djinet ; elles sont de faible hauteur et n’apparaissent pas consolidées, mais simplement fixées par la végétation.

2.2.3 Le secteur Est

S’étend de l’embouchure de l’Oued Isser jusqu’à Cap Djinet, cette bande se caractérise par un profil convexe marqué par une plage de sable plus au moins fin « plage de Cap Djinet ».

Cependant, ces plages sont parfois délimitées par des becs rocheux qui plongeant à pic dans la mer offrant des points panoramiques « Cap Matifou, Rocher Noir, Figuiers, Cap blanc, Cap Djinet ».

Tableau 1: Description des caps de la grande baie de Zemmouri.

Description	
Cap Matifou	Ce bloc rocheux, situé à l’Ouest de cette région côtière, ferme à l’Est la courbe majestueuse de la baie d’Alger qui offre des points de vue panoramiques.
Cap blanc	L’ensemble de ce site est situé à l’Est d’El Karma est d’un grand intérêt touristique qui demeure attrayant, pour l’ensemble de la région grâce à son isolement de l’urbanisation anarchique, et ses nombreuses curiosités naturelles « petites grottes, petites plages au fond des rochers et criques rocheuses constituant des ilots dans la mer ».
Cap Djinet	Bloc rocheux situé à l’Est de l’embouchure d’Oued Isser, offrant des vues lointaines sur le littoral de la Wilaya d’ Alger, avec des vues panoramiques plus complètes sur le paysage verdoyant du foret de Bouberek.

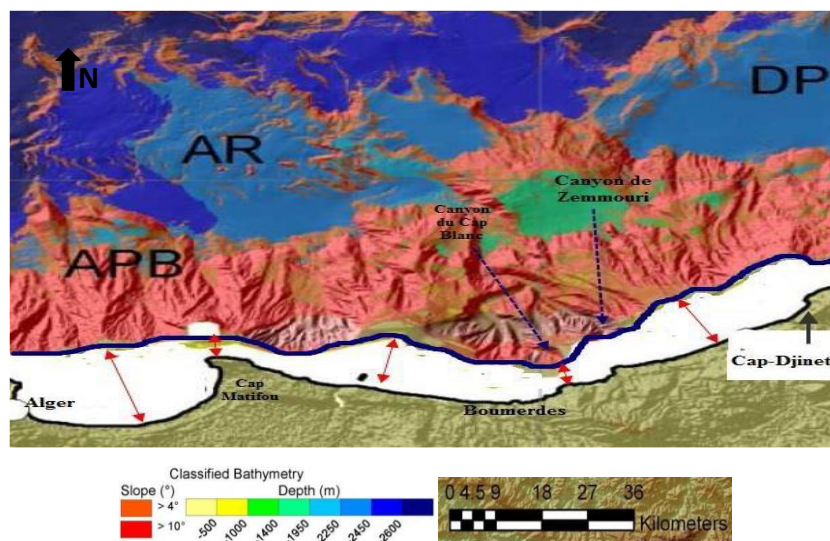


Figure 9 : La morphologie du plateau continentale de la grande baie de Zemmouri. (Strzeczynski et al.in J.Deverchere Mission MARADJA, 2009).

La carte morphologique de la grande baie de Zemmouri montre un plateau continental assez étroit avec une moyenne de 4 km de large. D'ouest en est, le plateau continental est relativement étendu au niveau de la baie d'Alger (8 Km), puis se rétrécit devant les îles Sandja-Aguelli pour reprendre de nouveau au droit de oued Réghaia, tout juste à partir de «l'îlot Bounettah». Il se rétrécit au niveau du mont de Thénia où la tectonique est active, sa largeur ne dépasse pas les 3 km, par ailleurs, en face de la zone basse d'Isser, la largeur du plateau peut atteindre un maximum de 15 km (figure 12).

La grande baie de Zemmouri présente :

- ❖ 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.
- ❖ 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.

Ces deux ravins sous-marins, considérés comme étant le plus bel exemple et le plus important sur le plateau continental algérien (BOUHAMADOUCHE, 2012).

3. Le cadre géologique et sédimentologie :

Le littoral de Zemmouri s'intègre dans le domaine Nord-Atlasique, dans le tell septentrional.

Les principaux ensembles géologiques qui constituent la zone :

- Le socle primaire (terrain cristalloyllien).
- Les roches magmatiques.
- Les terrains Mio-Plio- Quaternaire.

3.1. Le socle primaire

Il est formé de terrains métamorphiques, c'est un socle qui constitue les massifs anciens et formant les pointements de Rocher noir à Boumerdes et de cap Matifou à Alger. Les principaux faciès qui les composent sont des schistes satinés et des schistes à quartz granuleux et aussi des micaschistes.

3.2. Les roches magmatiques

Se rencontrent au Cap de Matifou, elles englobent les andésites quartzitiques du Burdigalien et le socle rhyolithique du Vindobonien qui affleurent au niveau de Ain Taya.

3.3. Les faciès mio-plio-quadernaire.

✓ **Le Miocène :**

Cette formation est constituée de granite, granodiorite et l’andésite dont quelques pointements sont visibles dans les reliefs de Thénia et du cap Djinet.

✓ **Le Pliocène**

En Algérie, le Pliocène est subdivisé selon deux faciès successifs : le Plaisancien (Oued Réghaia et Ain Taya) et l’Astien (l’Oued Corso et sur les falaises d’Ain Taya) (BOUHAMADOUCHE, 1993).

✓ **Le quadernaire**

Il recouvre la majeure partie de la zone d’étude, il constitue les dépôts de la plaine alluviale de l’oued Isser, ainsi qu’une grande partie des versants de deux rives, mais dans la partie nord, on trouve que les dépôts marins anciens. Les dépôts de quadernaires sont représentés par des sédiments marins alluviaux et éoliens, des sables grossiers, des grés caillouteux.

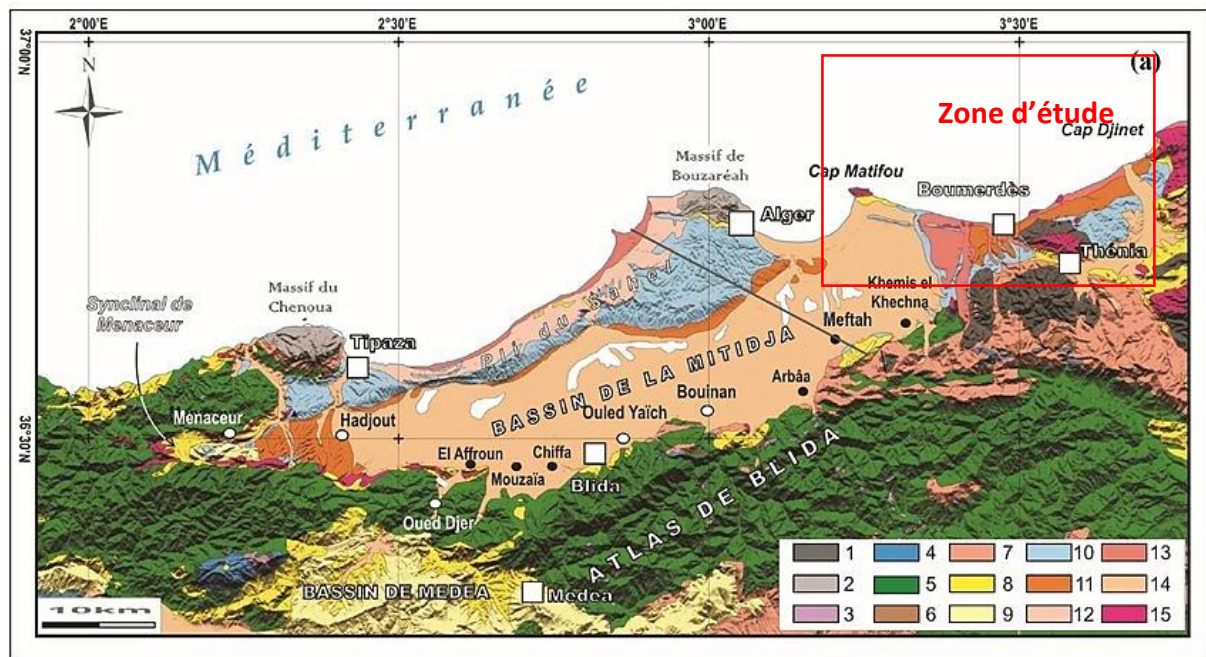


Figure 10 : Carte morpho-géologique du bassin de la Mitidja et ses environs (DOMZIG 2006).

- | | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------------|------------------|--------------------------|
| 1 : Terrains métamorphiques ; | 2 : Socle primaire ; | 3 : Trias ; | 4 : Jurassique ; | 5 : Crétacé ; | 6 : Eocène ; |
| 7 : Oligocène ; | 8 : Miocène anté-nappes ; | 10 : Pliocène ; | 11 : Villafranchien ; | 12 : Calabrien ; | 13 : Quaternaire marin ; |
| 14 : Quaternaire continental ; | 15 : Magmatisme indifférencié | | | | |

3.4.L'activité sismique

La zone d'étude a subi un séisme d'intensité X et de magnitude Mw 6.8 selon (USGS, CRAAG, Ayadi et al., 2003, Yelles et al., 2004, Bounif et al., 2004, Meghraoui et al., 2004) qui eut lieu le 21 Mai 2003 à 18h44 GMT aux alentours de Boumerdès, fit 2266 morts (2278 selon le CRAAG), plus de 10000 blessés, 150000 sans-abri, et endommagea plus de 1000 bâtiments, selon USGS. Les villes de Zemmouri et de Boumerdès furent celles qui subirent le plus de dégâts, mais d'autres villes, comme Thénia ou Dellys, dans un rayon de 50 km autour de Boumerdès, subirent également des dégâts importants (Figure).

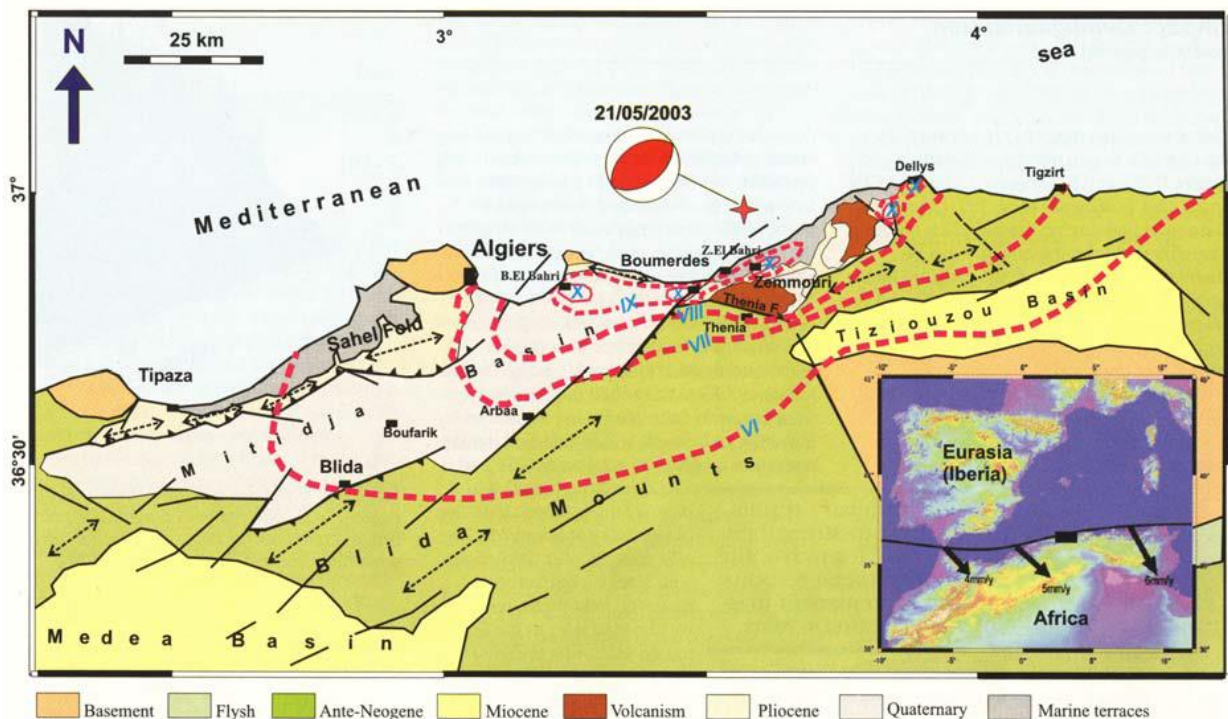


Figure 11 : Carte d'isoséistes du séisme de Boumerdès, 21/5/2003 (lignes en pointillés rouges) et contexte géologique et tectonique de la région (AYADI et al., 2003 in DOMZIG, 2006).

4. Cadre hydrographique

Le réseau hydrographique joue un rôle important dans l'érosion sédimentaire et le transport des sédiments vers la mer, en effet, l'apport sédimentaire charrié par les oueds intervient efficacement dans l'évolution morpho-dynamique des plages, il contribue ainsi dans leurs alimentations en sédiments. Pour cela nous nous sommes intéressés particulièrement aux apports des grands Oueds qui irriguent notre zone d'étude, dont les caractéristiques sont rapportées dans le Tableau 2 (NADIR, 2016), (OUZIDAD Amina et MERROUCHE Fatiha, 2019).

Les réseaux hydrographiques qui alimentent la région de l'Est à l'Ouest sont :

Tableau 2 : Les caractéristiques des Oueds de la baie de Zemmouri.

Nom de l'Oued	Description
Oued Isser	Il est le plus important oued de la région, son bassin couvre une superficie de 4145km ² . Il s'écoule du Sud vers le Nord (de Béni Amrane à Sidi Ali Messaoud), il est dévié vers l'Est en direction de Sidi Mustapha. Il est classé parmi les cinq principaux fleuves d'Alger à cause de sa dynamique érosive et complexe, ce qui entraîne un transport de charge solides considérable. Il est caractérisé par un grand transport solide de l'ordre de 4.96 Mm ³ /ans et un taux d'abrasion de 1200 m ³ /km ² (OUZIDAD Amina et MERROUCHE Fatiha, 2019).
Oued Boumerdes	C'est l'Oued qui traverse la plage de Rocher Noir, il semble le plus important de houle qui drainent cette plage. Il reçoit de grands affluents provenant de bassin versant. Il est caractérisé par un transport solide de l'ordre de 0.02 Mm ³ /ans et un taux d'abrasion de 550 m ³ /km ² (OUZIDAD Amina et MERROUCHE Fatiha, 2019).
Oued Corso	L'aire de drainage de ce bassin couvre 100km ² , son écoulement moyen annuel est évalué à 27Mm ³ , ainsi son écoulement annuel dans le méditerrané est évalué à 20Mm ³ . Il semble à transporter un volume de sédiment de l'ordre de 0.11 Mm ³ /ans et caractérisé par un taux d'abrasion de 1150 m ³ /km ² (NADIR M., 2016).
Oued Boudouaou	Oued Boudouaou draine la partie orientale de l'Atlas blidéen, son bassin versant couvre une surface de 93 Km ² , il parcourt une longueur de 22 Km. L'Oued Boudouaou prend naissance à partir d'oued Keddara et oued El Haddad, il se termine vers la mer par une basse vallée entaillée dans les marnes bleues. L'écoulement annuel moyen de l'oued Boudouaou est évalué à 27Mm ³ , de même son écoulement annuel moyen dans le méditerrané est estimé approximativement à 37Mm ³ . Il possède un taux d'abrasion de 1380 m ³ /km ² et un volume du transport solide de l'ordre de 0.21 Mm ³ /ans.
Oued Réghaia	Il parcourt la partie orientale de la plaine de la Metidja, 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. Il possède un taux d'abrasion de 210 m ³ /km ² et un transport solide de l'ordre de 0.02 Mm ³ /ans. Son bassin versant occupe une superficie de 86 Km et l'Oued principale à une longueur de 20 Km.

D'après le tableau 2, la zone d'étude présente deux oueds considérés comme importants (Oued Isser et Boudouaou) suite à leurs grands débits charriés vers la mer ouverte ce qui assure une alimentation des plages à proximité. Actuellement ces derniers sont fermés à cause de barrages construits en amont (barrage de Keddara en amont de Oued Boudouaou El Bahri opérationnel depuis 1987 et barrage Beni Amrane en amont de Oued Isser en 1988), réduisant ainsi considérablement les 2 apports sédimentaires majeurs vers le milieu marin ce qui explique le déficit sédimentaire au niveau du rivage de la zone d'étude.

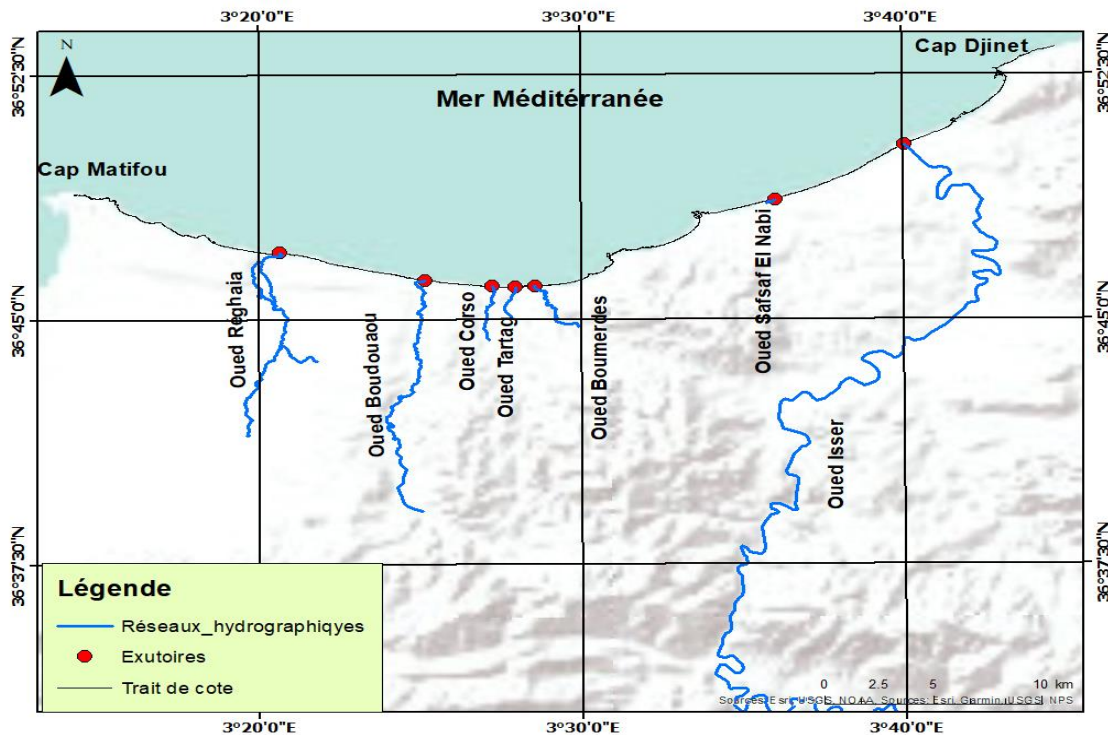


Figure 12 : Carte des réseaux hydrographiques dans la grande baie de Zemmouri (2020).

5. Cadre climatologique

Le secteur Est algérois est caractérisé par un étage bioclimatique subhumide avec un hiver doux et relativement pluvieux. Le climat de cette région est de type méditerranéen caractérisé par une saison humide de huit mois et une période sèche de quatre mois correspondant à la saison estivale. Cette étude présente l'analyse des deux paramètres les plus importants à savoir : les températures et les précipitations. Cette évaluation s'est effectuée à la base des données disponibles au niveau de la station de Dar El Beida allant de 2010 à 2020.

5.1. Température :

L'étude de la variation des températures est basée sur le traitement des résultats d'analyse des températures mensuelles calculées à partir des enregistrements effectués régulièrement au niveau de la station de Dar El Beida couvrant une période de 10 ans allant de 28/05/2010 à 03/06/2020, les résultats portés sur le tableau 3 et figure 14 montrent deux périodes distinctes :

- Une période hivernale relativement froide qui s'étale sur une période de 6 mois allant de mois de Novembre au mois d'avril avec un minimum moyen de -0.7 C° est enregistré au mois de Février.
- Une période estivale relativement chaude qui s'étale sur une période de 6 mois. Notant que des pics de température qui peuvent atteindre 42.2 C° sont enregistrées au mois de Juin.

Tableau 3 : Distribution des températures moyennes mensuelles pour la période entre 2010-2020

Station de Dar El Beida	Maximas moyens mensuels(C°)	Minimas moyens mensuels(C°)	Moyennes mensuelles(C°)
Janvier	23.8	-0.3	10.9
Février	26.3	-0.7	11.2
Mars	33.2	0.1	13.6
Avril	31.2	4.4	16
Mai	39.2	4.6	18.9
Juin	42.2	8.5	22.8
Juillet	40.8	14.2	26.2
Aout	41.5	15.2	26.6
Septembre	40	11.5	23.9
Octobre	38	5	20.3
Novembre	32.3	3.2	15.3
Décembre	26.9	-0.5	12
Moyenne annuelle	34.6	5.4	18.1

(Source : «https://rp5.ru/Temps_%C3%A0_Boumerd%C3%A8s »)

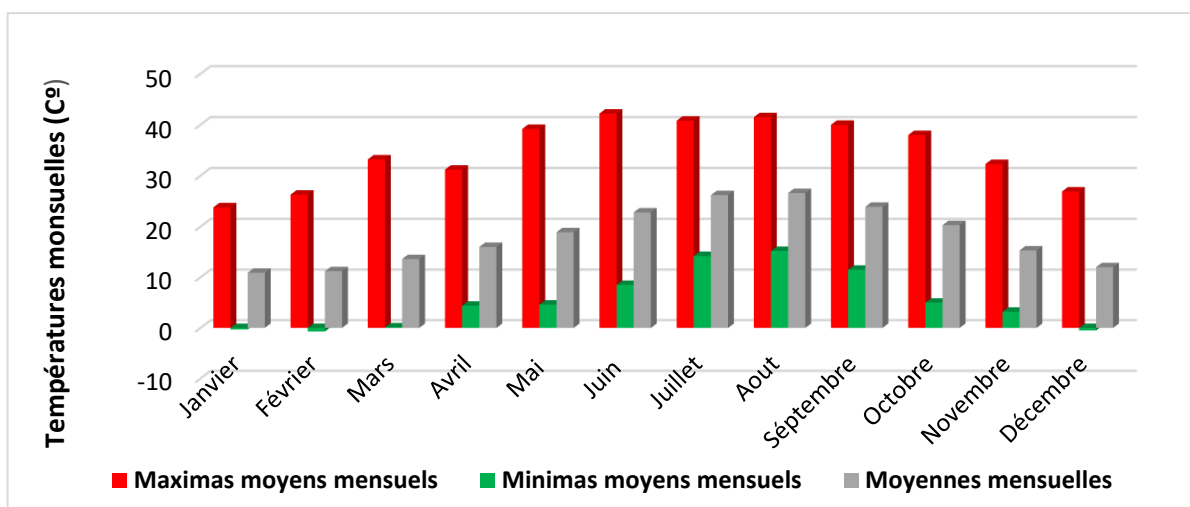


Figure 13 : Histogramme des températures (max, min et moyenne) mensuelles 2010 – 2020

(Source : «https://rp5.ru/Temps_%C3%A0_Boumerd%C3%A8s »).

5.2. Précipitations :

Les traitements statistiques des données acquises au niveau de la station de Dar El Beida (tableau)couvrant une période de 10 ans allant de 2008 à 2019 nous a permis de tracer l'histogramme des moyennes mensuelles des précipitations dans notre zone d'étude (

Figure 14), ces traitements montrent que la région se caractérise par deux périodes distinctes :

- Période hivernale pluvieux dont les pluies se concentrent entre le mois d'Septembre et le mois d'Mai, elle atteint son maximum en mois de Novembre avec 99.93mm.
- Période estivale sèche s'étale du mois Juin jusqu'au Aout avec son minimum enregistré au mois d'Aout avec 0.85mm.

Tableau 4 : La distribution des moyennes mensuelles des précipitations au niveau de la station de Dar El Beida (2008-2019).

Les mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Moyenne mensuelle (mm)	60.6	54.6	62.5	65.4	40.5	9.7	1.4	0.8	46.8	50.7	99.9	60.3

(Source : «https://rp5.ru/Temp%C3%A0_Boumerd%C3%A8s »)

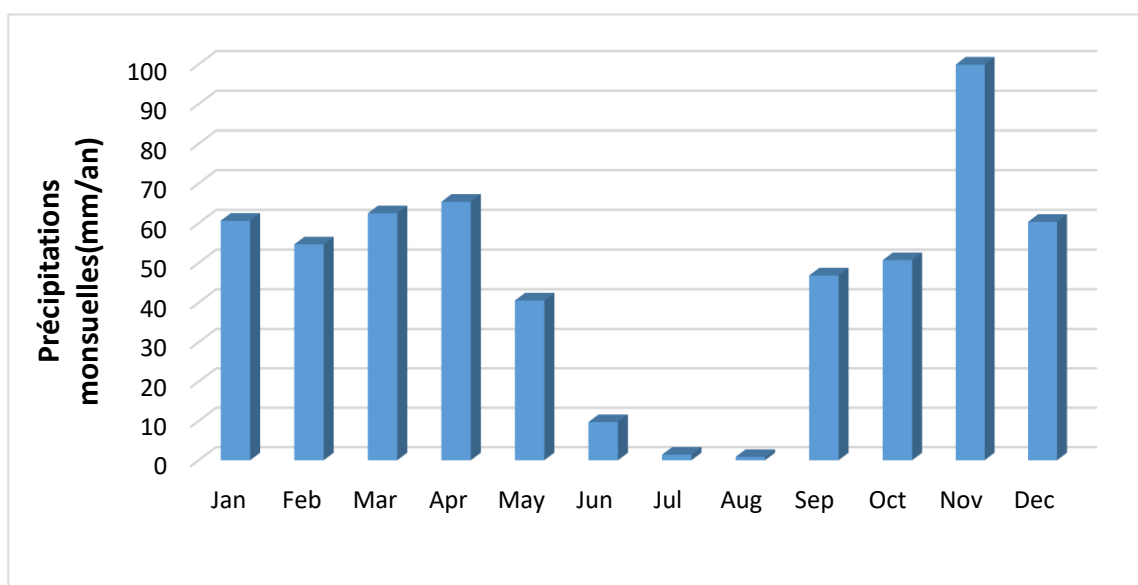


Figure 14 : Histogramme des précipitations mensuelles de la station de Dar El Beida entre 2008 et 2019.

Le climat représente le facteur qui influe le plus sur le volume d'eau, une exploitation complète des données climatiques doit être réalisée pour définir le climat exact de notre zone d'étude, cela impose l'utilisation de quelques indices climatiques. Parmi eux on a :

5.3. L'indice d'Emberger

Il est particulièrement adapté aux régions méditerranéennes dans lesquelles il permet de distinguer différents étages climatiques.

Il est défini par la formule suivante (Modifiée par Stewart) :

$$Q = \frac{2000P}{M^2 - m^2}$$

- Q : quotient pluviométrique modifié d'Emberger
- M : moyenne des maxima (températures maximales journalières) du mois le plus chaud, en C°
- m : moyenne des minima (températures minimales journalières) du mois le plus froid, en C°
- P : pluviométrie annuel, en millimètres

Tableau 5 : L'indice pluviométrique de l'Emberger

Station	P (mm)	M(C°)	m(C°)	Q	Etage climatique
Dar El Beida	46.15	42.2	-0.7	52	Subhumide à hiver froid

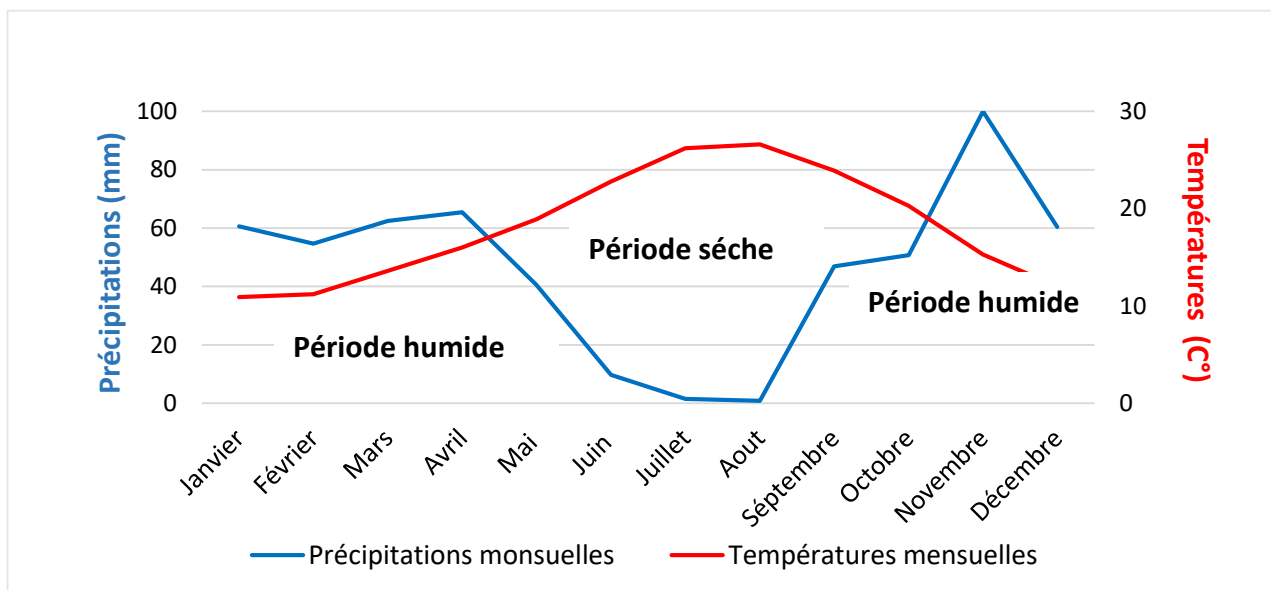


Figure 15 : Le diagramme ombro-thermique.

L'analyse du diagramme permet de visualiser une période pluvieuse humide qui est de 6 mois, elle s'étale de Novembre à la fin d'Avril et une période sèche qui caractérise les mois les plus secs (Mai, Juin, Juillet, Aout et Septembre).

5.4. Le vent

La zone côtière est soumise à des forçages répétitifs par des agents hydrodynamiques (la houle, le courant, la marée et le vent). Ces agents jouent un rôle très important dans la dynamique sédimentaire du littoral, construction, destruction des littoraux (recule ou avancé).

C'est le générateur de houle et de certain courant de surface, leur impact évalué proportionnellement avec leurs vitesses, il joue un rôle important dans l'évolution de la géomorphologie des côtes.

Il peut aussi mobiliser des quantités considérables du sable des plages et édifier les dunes qui caractérisent certaines côtes.

Dans ce présent travail on a utilisé la base des données du site des observations météorologiques « https://rp5.ru/Temps_%C3%A0_Boumerd%C3%A8s » couvrant une période de 10 ans allant de 2010 jusqu'à 2020 au niveau de la station de Dar El Beida. Les données sont présentées dans le tableau 6 et la figure 17 suivants :

Tableau 6 : Distribution des fréquences d'apparition annuelle et saisonnière du vent au niveau de la station de Dar El Beida par direction entre 2010 à 2020

Direction	Annuelle	Hiver	Printemps	Eté	Automne
E	20.51%	10.30%	19.27%	33.44%	18.99%
N	5.97%	5.71%	6.19%	6.50%	5.47%
NE	14.75%	7.23%	14.57%	24.26%	12.77%
NW	8.09%	9.03%	8.85%	7.13%	7.37%
S	9.82%	14.26%	8.29%	4.98%	11.85%
SE	8.32%	7.07%	8.83%	8.45%	8.92%
SW	14.03%	20.09%	14.62%	6.34%	15.20%
W	18.47%	26.31%	19.38%	8.91%	19.43%

Source « https://rp5.ru/Temps_%C3%A0_Boumerd%C3%A8s »

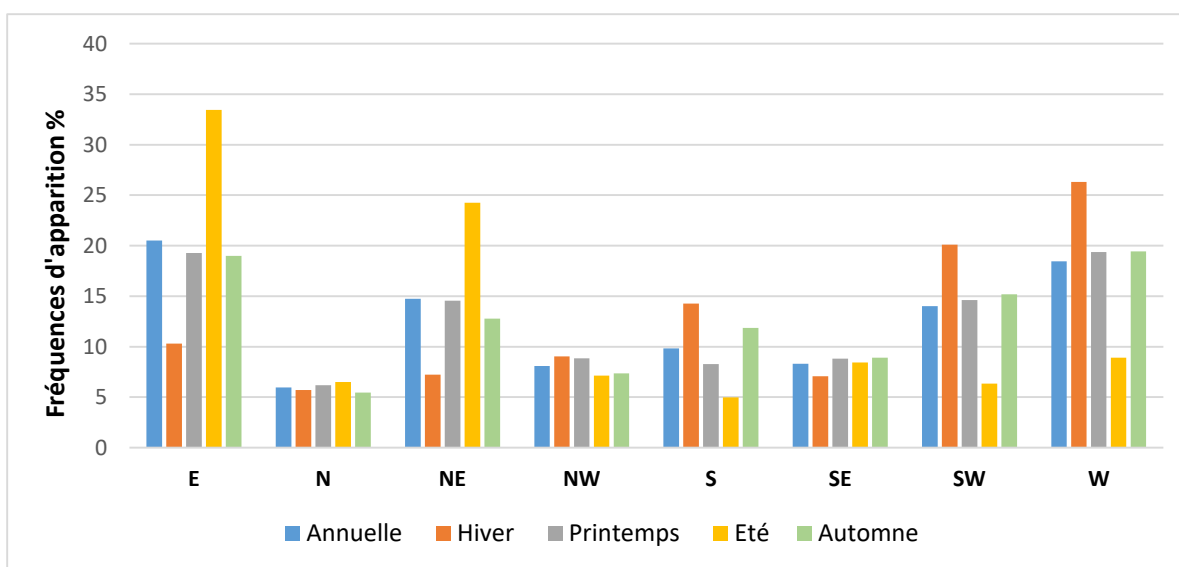


Figure 16 : Histogramme de distribution des fréquences d'apparition du vent par direction.

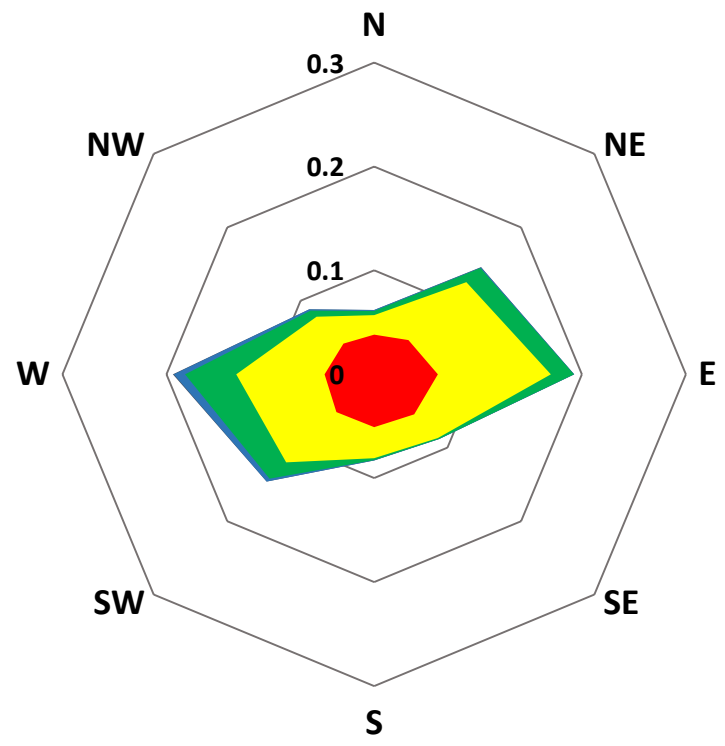
Ces résultats nous a permis de déterminer la fréquence d'apparition du vent par direction et par classe de vitesse à deux échelles ; annuelle et saisonnières et de tracer les roses annuelle et saisonnières des vents. (Figure 17).

L'analyse statique de ces données de vent montre que :

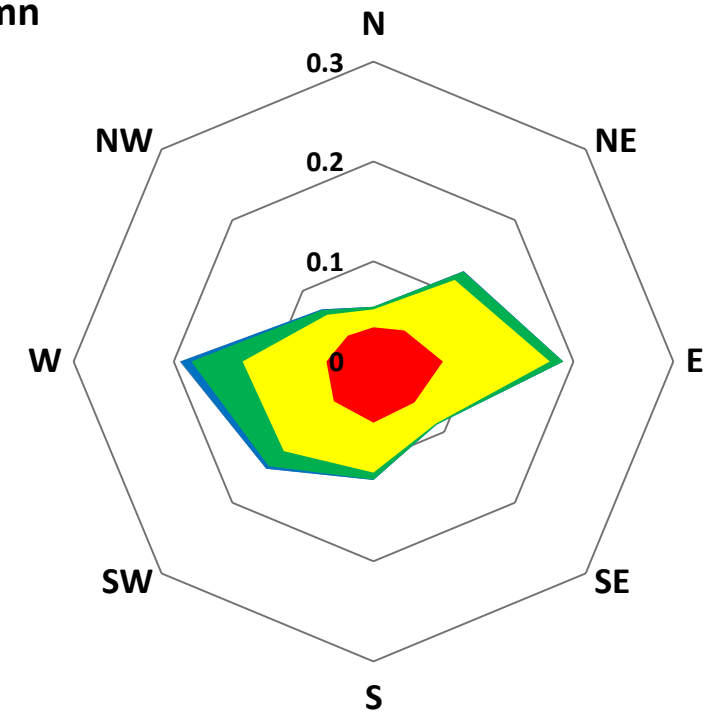
Les directions les plus dominantes sont :

- Période printanier et automnale : Une prédominance des vents de secteur compris entre Ouest à Sud-Ouest et Est à Nord-Est avec des fréquences d'apparition respectives de 18.99% et 19.38%. les vents de cette direction ont des vitesses supérieures à 16 m/s.
- Période hivernale : les vents qui proviennent de secteur Ouest possèdent une grande fréquence qui est de 26.31% avec une vitesse comprise entre 12 et 16 m/s. Les autres directions sont moins fréquentes avec des fréquences relativement faibles.
- Période estivale : les vents les plus dominants sont ceux des deux directions Nord-Est et surtout la direction Est avec des fréquences d'apparition respectives de 24.26% et 33.44%. les directions du vent Nord-Ouest et Nord existent mais avec une prédominance moins remarquable.
- Fréquence annuelle : nous constatons que les directions de vent les plus dominantes sur notre site d'étude proviennent d'Est, Ouest et de Nord-Est avec des fréquences d'apparition respectivement estimées par 20.51%,18.46%et 14.75%.

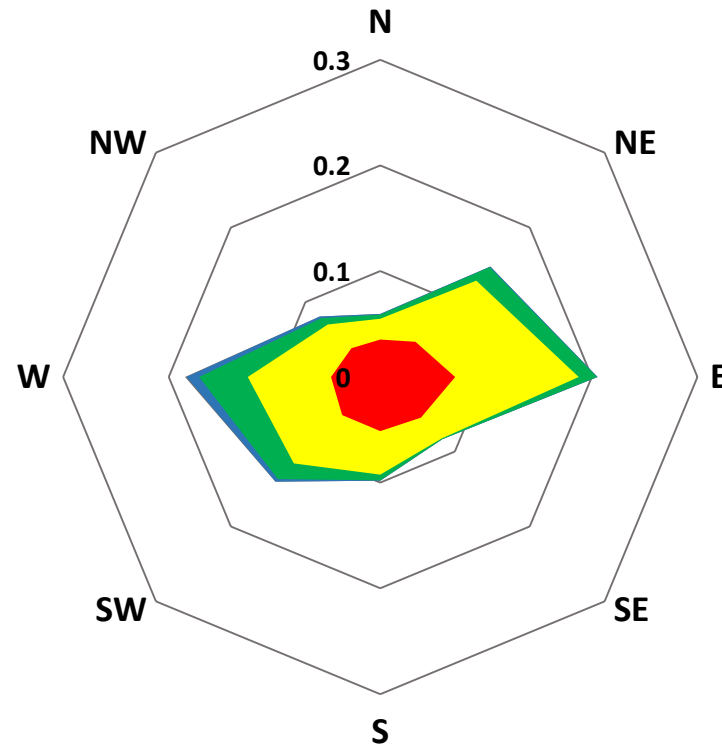
Printemp



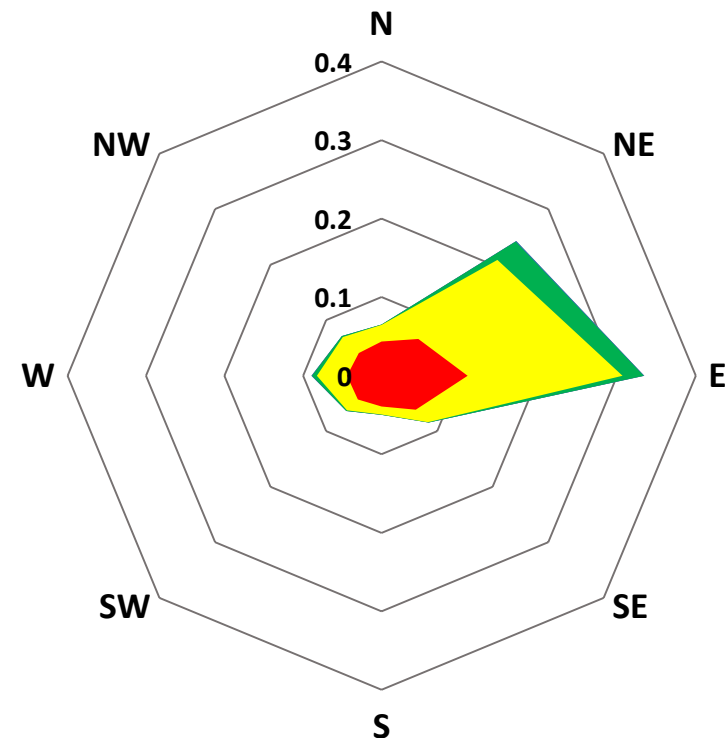
Automn



Annuelle



Eté



Hiver

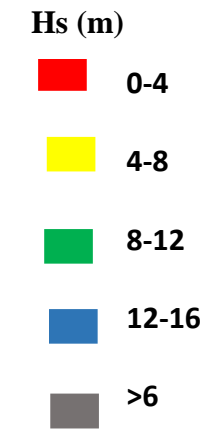
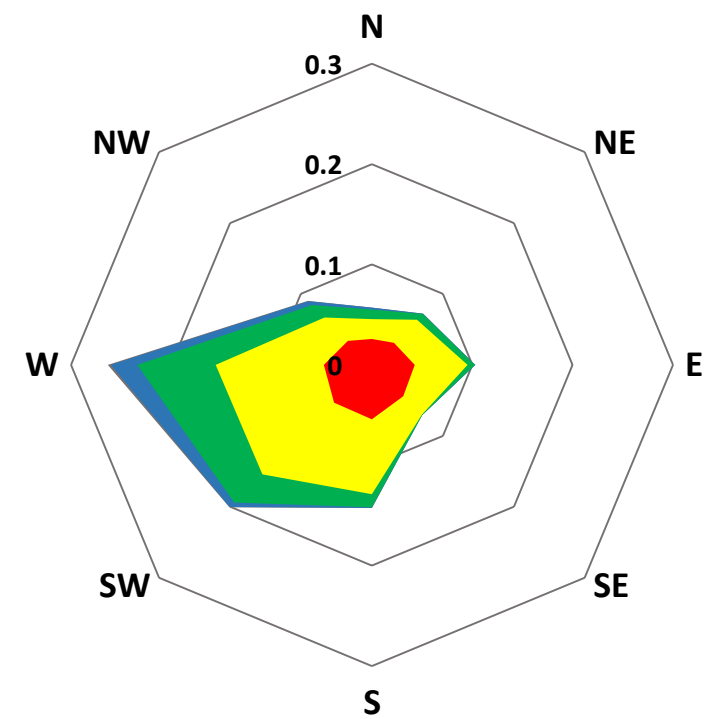


Figure 17 : Rose du vent au large de la grande baie de Zemmouri (2020).

6. Conditions hydro-sédimentaires

6.1. La houle :

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

Les données utilisées sont extraites à partir du site « era5 » couvrant une période de 27 ans allant du 1992 à 2019 de la station de Dar El Beida.

L'analyse statistique des directions de houles au large nous a permis de tracer les roses annuelles et trimestrielles des houles.

Tableau 7 : La distribution fréquentielle de Hs selon les directions de la station de Dar El Beida entre 1992 et 2019.

Directions	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Annuelle	2.53%	21.29%	39.28%	10.13%	1.30%	0.64%	0.91%	23.92%
Hiver	1.75%	29.87%	20.63%	14.02%	2.6%	0.99%	2.02%	28.13%
Printemps	2.55%	21.36%	37.50%	10.28%	0.47%	0.52%	0.37%	26.95%
Été	3.69%	11.75%	62.96%	6.01%	0.16%	0.14%	0.16%	15.13%
Automne	2.12%	22.36%	35.66%	10.28%	2%	0.92%	1.09%	25.56%

Source « Era5 »

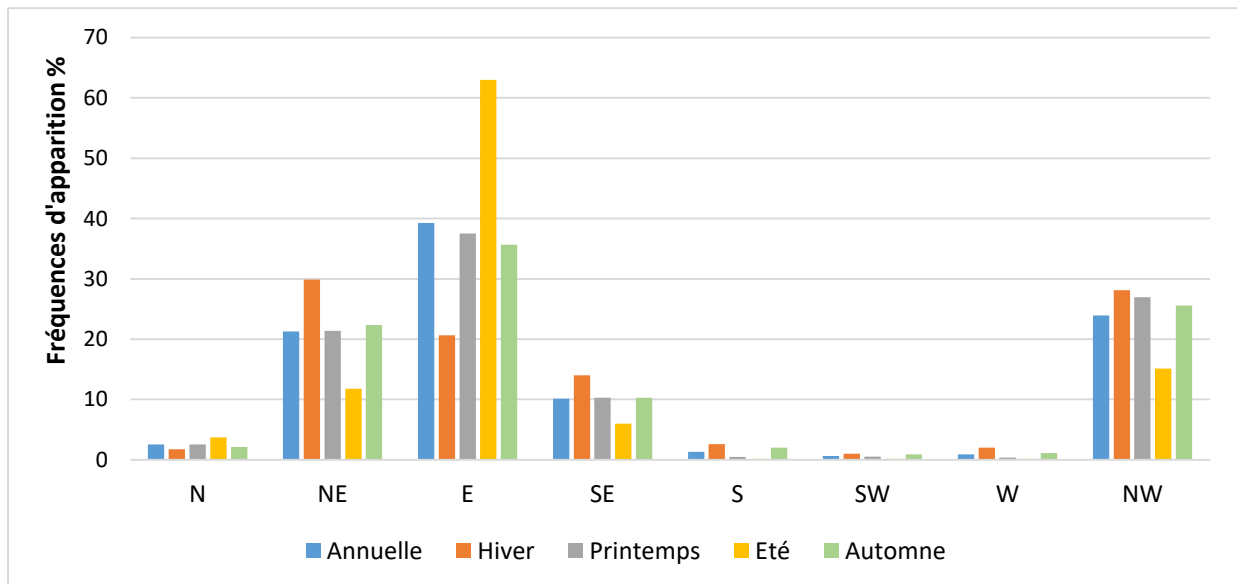


Figure 18 : Histogramme des fréquences d'apparition des houles annuelle et saisonnière.

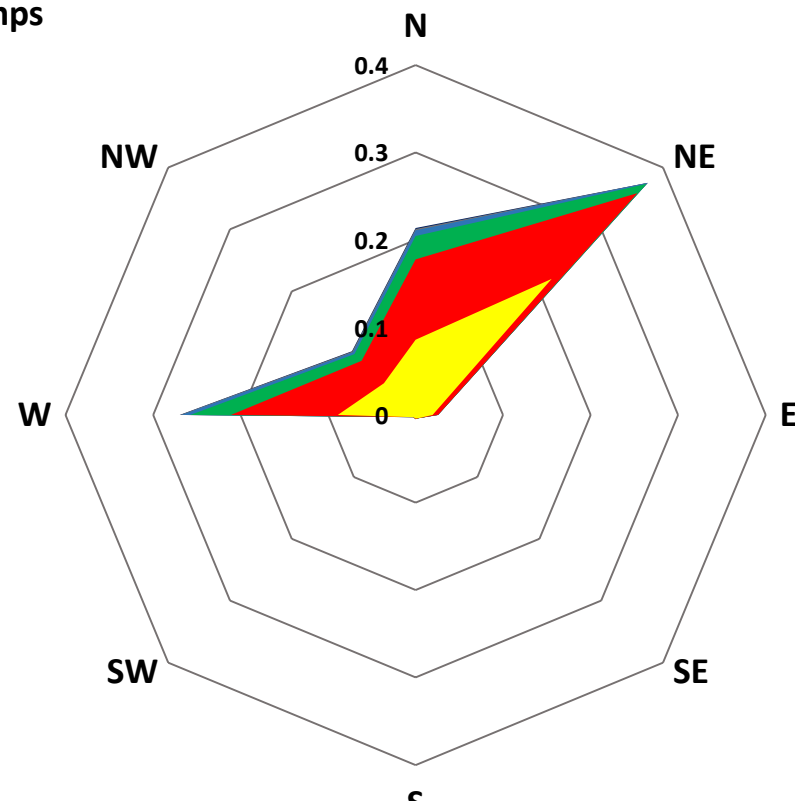
Au large des côtes de la zone d'étude, la rose annuelle des houles (Figure 19), montre que les agitations qui touchent le site proviennent principalement des secteurs Ouest et Nord-Est avec des fréquences d'apparition respectives 23.92% et 39.28%.

Par ailleurs, l'interprétation des roses trimestrielles fait ressortir les constatations suivantes :

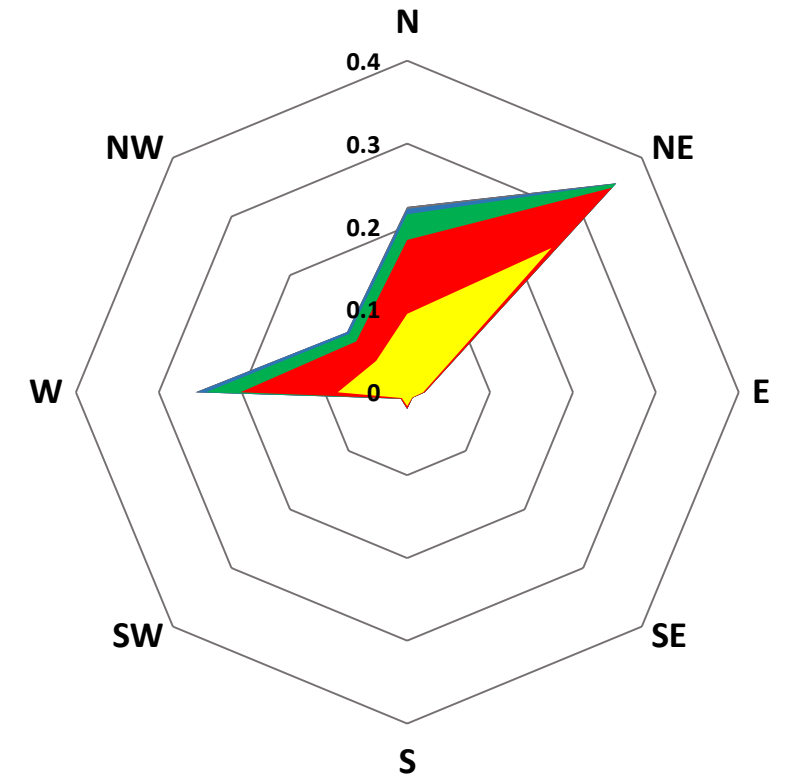
Les houles les plus dominantes sont issues des secteurs :

- Nord-Est avec 39.28% de fréquence annuelle qui domine principalement en été (62.96%) avec une hauteur significative ne s'excède pas 2m.
- Ouest avec 23.92% de fréquence annuelle qui domine en hiver (28.13%), au printemps (26.95%) et aussi en automne (25.56%) avec une hauteur significative oscille entre 3 et 5m pour les trois trimestres.
- Nord avec 21.29% de fréquence annuelle qui domine en hiver (29.87%) avec une amplitude qui peut atteindre 5 m.

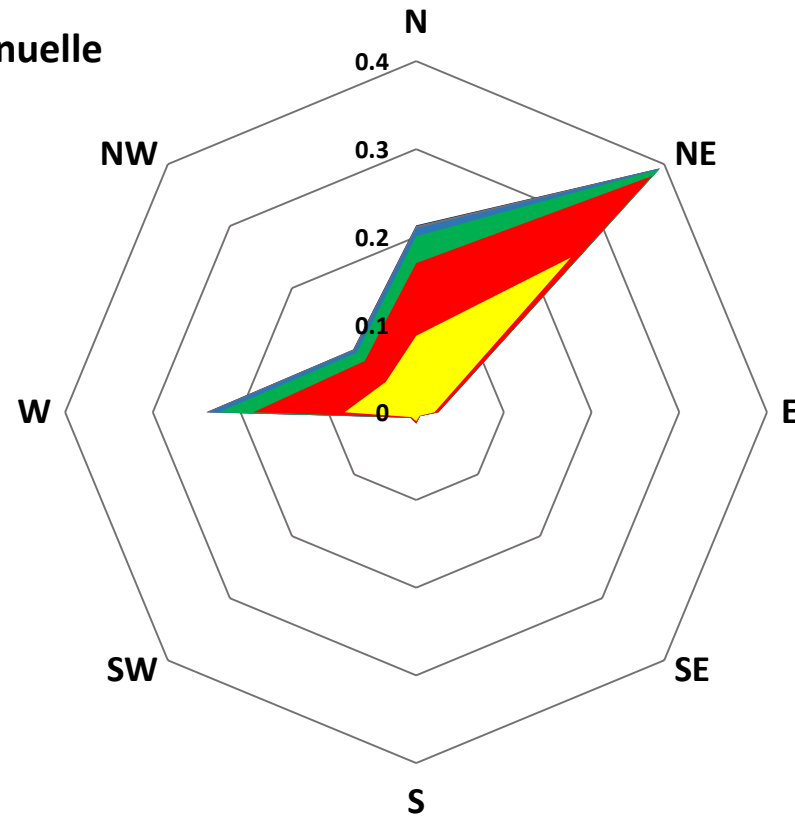
Printemps



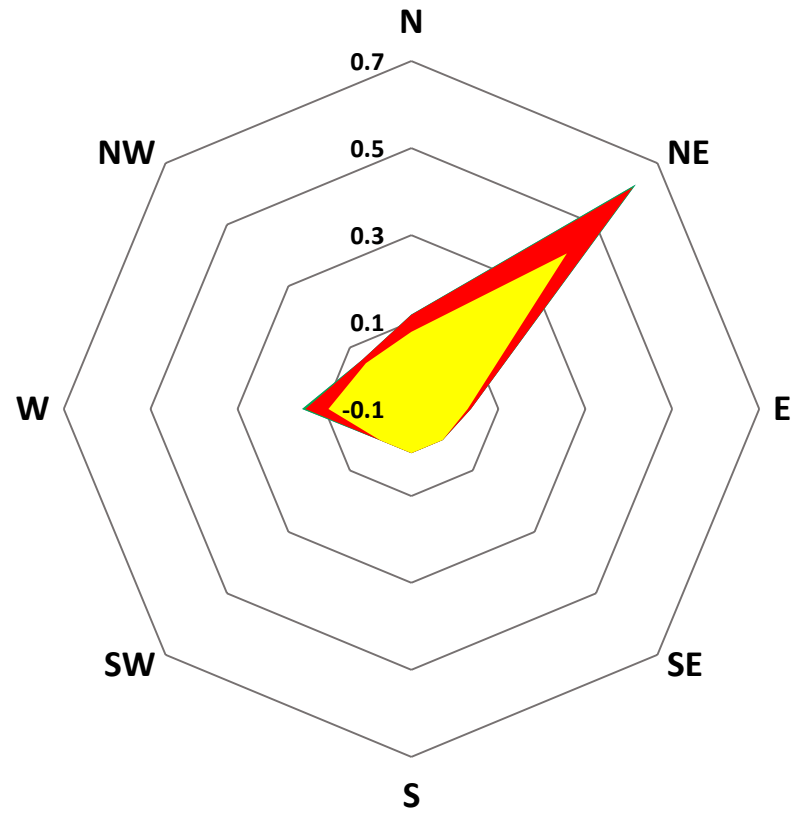
Automn



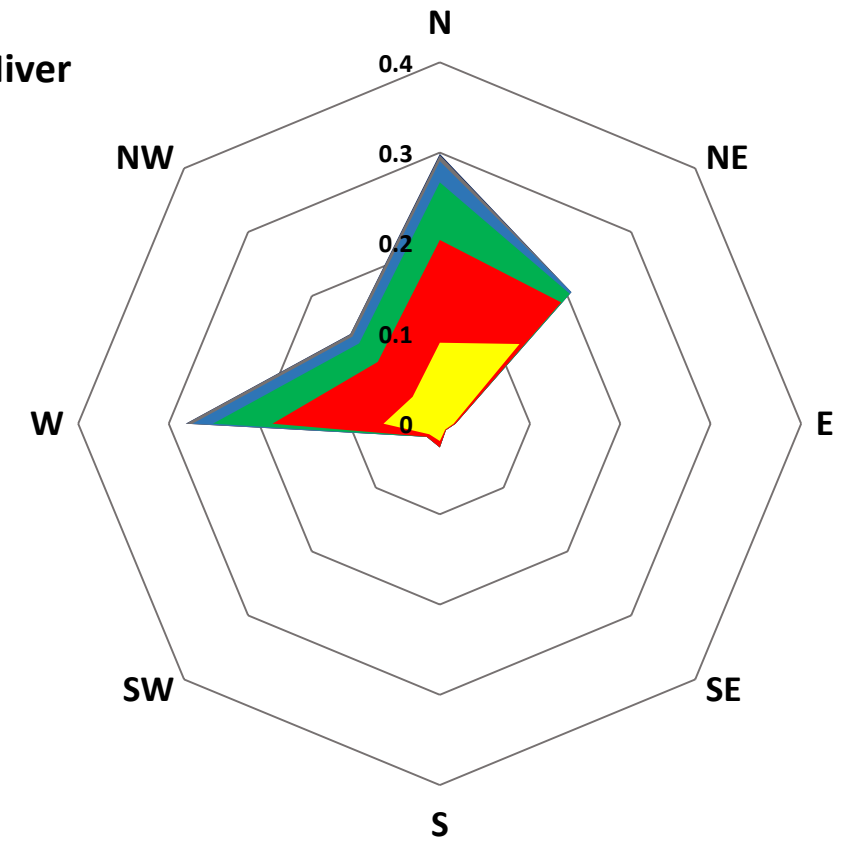
Annuelle



Eté



Hiver



Hs(m)

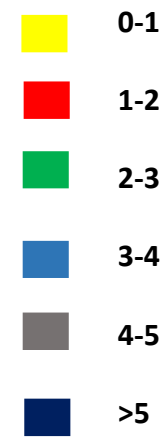


Figure 19 : Les roses de houles au large de la grande baie de Zemmouri (2020).

6.2. Le courant :

Un courant par définition est une masse d'eau qui se déplace sur de très longues distances, à la surface ou en profondeur, suivant une direction donnée.

Les courants sont responsables de l'état dynamique des sédiments (érosion, transport et sédimentation)(OTMANI, 2014).

6.2.1. Les courants généraux

Les vitesses du courant général des eaux atlantiques venant de Gibraltar vers l'Est restent généralement dans un ordre de grandeur de 0.5 à 1m /s au large des côtes algériennes sous l'effet de la force de Coriolis, en prenant le nom « courant Algérien » (BENZOHRA, 1993).

6.2.2. Les courants côtiers

- **Courant de dérive littorale**

Lorsque la houle arrive à la côte avec une certaine obliquité elle donne naissance à un courant parallèle au rivage, le plus souvent désigné sous le nom de dérive littorale, situé entre les lignes de déferlement et le trait de côte. Ce courant joue un rôle très important dans l'évolution des rivages, en particulier quand il s'agit de plages.

Les houles de secteur Nord-Ouest engendrent une dérive Ouest Est alors que les houles du Nord Est provoquent une dérive littorale Nord- Est.

- **Courant de retour**

Ce sont des courants temporaires qui se dirigent de la côte vers le large se manifestent lors le déferlement de littoral, leur vitesse dépend de l'énergie de la houle et de la pente de plage, il peut transporter des quantités importantes des sédiments vers le large. Ces courants sont nait par les houles frontale de direction Nord et NNE le long de côte de la baie de Zemmouri.

6.3. Marée :

La marée est un mouvement oscillatoire du niveau de la mer engendré par l'attraction de la lune et du soleil sur les particules fluides des océans (BOUGIS, 2003).

Dans les côtes algériennes et d'une façon générale, l'amplitude de la marée n'est pas importante, le marnage est de l'ordre de 20 à 30 cm en pleine lune et de 5 à 15 cm en nouvelle (AMAROUCHE, 2015).

7. Le niveau marin

En matière de surveillance des fluctuations de niveau marin, l'Algérie est à la traîne comparée aux pays situés sur l'autre rive du bassin méditerranéen. Dans le contexte actuel marqué par beaucoup d'incertitudes liées surtout aux changements climatiques, la dotation des ports algériens en systèmes de marégraphes semble de plus urgente.

Toutefois, l'altimétrie satellitaire offre une aide précieuse malgré qu'une évaluation fondée de l'évolution du niveau des eaux marines nécessite des relevés effectués sur de longues périodes de

temps dépassant un siècle. Pour la région de la Méditerranée occidentale, l'altimétrie satellitaire Topex/Poseidon et Jason 1 a enregistré une élévation du niveau de la mer Méditerranée de l'ordre de 2.5 mm/an entre 1993 et 2006. L'exactitude de cette valeur peut être mise en doute du fait notamment qu'elle tient compte du forçage anthropique du climat et néglige les mouvements tectoniques et les subsidences (DJOUDEK et BOUTIBA, 2017).

8. Facteurs anthropiques

L'intervention de l'homme sur l'environnement naturel peut aggraver des impacts sur l'équilibre du littoral dans notre région d'étude.

Ces interventions anthropiques spectaculaires laissent des marques réelles sur le recul du trait de côte. Parmi ces actions, on peut citer :

8.1. La construction des barrages :

L'apport sédimentaire des fleuves est l'un des principales sources d'alimentation pour les plages en sable, mais par la construction des barrages, le volume de sédiments terrigène atteignant la cote se réduit car leur action se représente un piège des sédiments. La zone d'étude possède trois barrages qui réduisent des quantités considérables des sédiments (barrage de Keddara en 1987 en amont d'Oued Boudouaou El Bahri, barrage El Hamiz en amont d'Oued Réghaia et barrage de Beni Amrane en amont d'Oued Isser en 1988).

8.2. L'extraction abusive du sable :

L'extraction de sable des plages et de gravier fluviaux pour des intérêts de construction est une action courante ce qui entraîne de réduire considérablement la quantité des sédiments fluviaux et le sable sur la cote qui permet donc de recul de trait de côte.

8.3. Aménagement portuaire et maritime :

Les structures portuaires jouent un rôle de barrière littorale pour la dérive littorale des sédiments risquent de perturber le transit des matériaux et de modifier l'évolution du rivage.

Des accumulations de sable se forment contre les jetées qui arrêtent le courant tandis que les secteurs situés au-delà de ces obstacles démaigrissent et reculent car privés d'apport sédimentaires. L'aménagement du linéaire côtier de la zone d'étude a été commencé très tôt par la construction des ports (Djinet en 2009), les ouvrages de haut de plage et bas de plage à Boumerdes (Rocher noir) et aussi les ouvrages d'Ain Taya.

8.4. L'urbanisation anarchique près de cote :

La construction près de la cote laisse une marque sur le recul de la cote qui entraîne une surexploitation des réserves côtier (sable, eau, ...), et il constitue un obstacle réfléchissant pour les houles, permet aussi de diminuer le couvert végétale et la dégradation des dunes, le surpeuplement de la zone et l'implantation des usine provoque par les rejets liquides et solides en mer la déséquilibre l'écosystème côtière.

8.5. La fréquentation touristique :

Les plages de la baie de Zemmouri constituent un véritable site d'attraction des gens, en saison estivale, pour se reposer ou se divertir. Ces pressions provoquent des perturbations pour les dunes, relevées essentiellement par le piétinement et le carrossage.

Conclusion

- La grande baie de Zemmouri est délimitée par Cap Djinet à l'Est et par Cap Matifou à l'Ouest.
- Le plateau continental est entaillé par les canyons d'Alger (Cap Blanc, Zemmouri El Bahri).
- Elle s'étend sur environ 53 km de longueur d'où la majorité de leur partie se représente par des plages sableuses qui se caractérise par la présence des dunes au niveau de Safsaf Nabi, et Zemmouri. La zone est alimentée par plusieurs Oueds le plus important est Oued Isser. Tandis que les falaises ne représentent que 5% de son linéaire côtier.
- Elle est caractérisée par un faciès sédimentaire qui est essentiellement constitué par des terrains sédimentaire (conglomérat, marne et argile) qui date de Moi-Plio-Quaternaire
- Du point de vue climatique, la zone possède un climat Méditerranéen qui se caractérise par une saison hivernale froide et pluvieuse, et une saison estivale sèche et chaude.
- Elle est soumise à des vents annuels provenant généralement d'Est, Ouest et de Nord-Est avec des fréquences d'apparition respectivement estimées par 20.51%,18.46%et 14.75%.
- des houles de secteur Nord, Nord-Est et Nord-Ouest.
- La dégradation des plages de la zone d'étude est due non seulement par les agents hydrodynamiques mais aussi accélérée par des interventions humaines le long de la baie de Zemmouri.

**Chapitre III : Modélisation
de la dynamique côtière du
littoral de la baie de
Zemmouri**

Introduction

Les interactions entre les différents facteurs hydrodynamiques vent, houle et courant engendrent une mobilisation des quantités considérables de sable de la cote vers le large ce qui contribue efficacement dans l'évolution des rivages.

Les estimations du transport sédimentaire doivent reposer sur des études analytiques de l'évolution du trait de côte prenant en compte le régime des houles et des courants dans le secteur d'étude à long terme et comme étant une donnée de base pour cette étude hydrosédimentaire, une carte bathymétrique demeure indispensable.

L'objectif principal de ce chapitre est de reconstituer le climat hydro-sédimentaire qui domine la zone d'étude dans une échelle de temps précise, en appliquant un modèle numérique calibré par les données acquises au niveau des stations de mesure, afin de donner quelques éléments de réponse à la problématique posée qui est la détermination de l'état de vulnérabilité de la zone d'étude. Cette étude s'articule autour de trois parties complémentaires :

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

1. Description des codes de calcul

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**).

Il s'agit de recueillir l'ensemble des données disponibles nécessaires à la Simulation, ces données sont :

1.1. Des données bathymétriques :

La cartographie de la bathymétrie de la zone d'étude est une phase très importante, elle permet de visualiser l'état d'évolution de la morphologie des fonds marins en suite estimer le déficit sédimentaire de la zone.

Cette d'étude a été réalisée suivant ces étapes :

- La digitalisation de la bathymétrie à l'aide des données du site web « https://webapp.navionics.com/?lang=fr#boating@6&key=wi%7CvE%7Bm_G », traitées sous le logiciel de cartographie Arc Gis 10.4 sous le system de projection WGS84 UTM zone 31N, ces données peuvent atteindre une profondeur de -2000m avec une équidistance de 0.5 m allant de 0m jusqu'à -20m (zone côtière).
- Le résultat de cette opération aboutit à la connaissance des coordonnées tridimensionnelles (X, Y et Z) des sondes bathymétrique digitalisés qui seront par la suit utilisés dans l'étape suivante.
- Une interpolation de ces données spatiales a été lancée sous le logiciel Mike 21 pour obtenir à la fin des informations continues et suffisantes en chaque nœud de la mesh générée.
- Les résultats obtenus après interpolation sont exploités dans l'élaboration des cartes bathymétriques en 2D ou en 3D et mettre en évidence les reliefs et la morphologie sous-marine en utilisant le logiciel Mike 21.

1.2. Des données relatives aux conditions météorologiques :

Les données de la houle au large qui ont été utilisés, sont des données du site web «era5», les données (Hs – Tp – Directions) sont enregistrées chaque trois heures dont les directions de houle dominantes étaient de secteur Nord, Nord-Est et Nord-Ouest à des hauteurs significatives dominantes oscillant entre 2.5 et 3.25m.

Un traitement statistique de ces données a permis de déterminer les fréquences d'apparition de houle par direction et par période. (Chapitre I).

1.3. Des données de niveau d'eau et le marnage :

Le marnage n'a pas été pris en considération lors de la configuration des différents modules de simulation intégrés dans le système du Mike 21, du fait que le niveau des marées est insignifiant, vu que la zone d'étude est caractérisée par une côte micro tidale. (PLANTON, et al., 2012), les valeurs de la surcote entretenues, sont prises comme une constante qui est égale à 0.34m (BOUGIS, 2003).

2. Mise en place du model

L'approche de la modélisation entretenue dans notre cas d'étude fait appel à un système de modélisation intégrée comprenant trois modèles numériques : un modèle hydrodynamique, un modèle de vagues et un modèle de transport de sédiments non-cohésif (sables) sous l'effet combiné des vagues et des courants.

2.1.Description des modules :

Tableau 8 : Description des modules de Mike 21.

Les modèles		Description
SW	Paramètres comptant	<p>calcule la propagation de la houle vers la côte.</p> <p>Il compte les phénomènes suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 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.
	Conditions	<ul style="list-style-type: none"> • SW utilise la formule directionnelle quasi-stationnaire dans le domaine spectral et temporel pour la propagation de la houle. • Le déferlement est basé sur la formule de (Battejs, et al 1978). • Le niveau d'eau est considéré nul avec les données de forçage négligeables. • le paramètre de rugosité du fond est constant 0,04. • Les données bathymétriques, et les conditions de la houle.
HD	Paramètres comptant	<p>calcule la variation spatiale des niveaux et des débits d'eau dus à des mécanismes de forçage, tels que les vents, les courants, et les déferlements.</p> <p>Il compte les phénomènes suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Frottement sur le fond–Frottement de vent à la surface de l'eau, • gradient de pression barométrique, • force de Coriolis, • contrainte de radiation.
	Conditions	<ul style="list-style-type: none"> • Les courants sont calculés à partir des contraintes de radiation issues du modèle SW. • Le niveau de la mer constante (0,34m), • La viscosité 0,5m^{1/3}/S, la résistance 32 m^{1/3}/S. • Vitesse de vents 3,75m/s
ST	Paramètres comptant	<ul style="list-style-type: none"> • Calcul le taux de transport de sédiment non cohésifs sous l'action des vagues et des courants le long de la côte. • La bathymétrie.
	Conditions	Il prend en compte le paramètre granulométrique : D50, Q84, Q16.
Mike21/3 FM	Paramètres comptant	<p>C'est un modèle couplé comprend différents modules tels que HD, ST, et SW, etc.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Calcule le transport sédimentaire sur le fond et en suspension sous l'action combinée des courants et de la houle
	Conditions	<ul style="list-style-type: none"> • Toutes les conditions des 3 modèles SW, HD et ST

3. La démarche adoptée :

Dans un premier temps, il s'agit de déterminer à l'aide du modèle SW le climat de houles dans la région d'intérêt (sur une grande échelle). Les sortants de ce module ainsi que les niveaux d'eau aux frontières ouvertes de la grille de calculs hydrodynamiques et les vents en surface permettront de calculer les courants causés par l'effet combiné des vents et des houles au moyen du module HD. Finalement, les courants générés par le module HD et les données de houles générées par le module SW seront pris en entrée par le modèle de transport de sédiment ST qui calcul alors le transport de sédiments à chaque pas temporel des simulations hydrodynamiques ainsi que le transport net de sédiments durant la période de simulation.

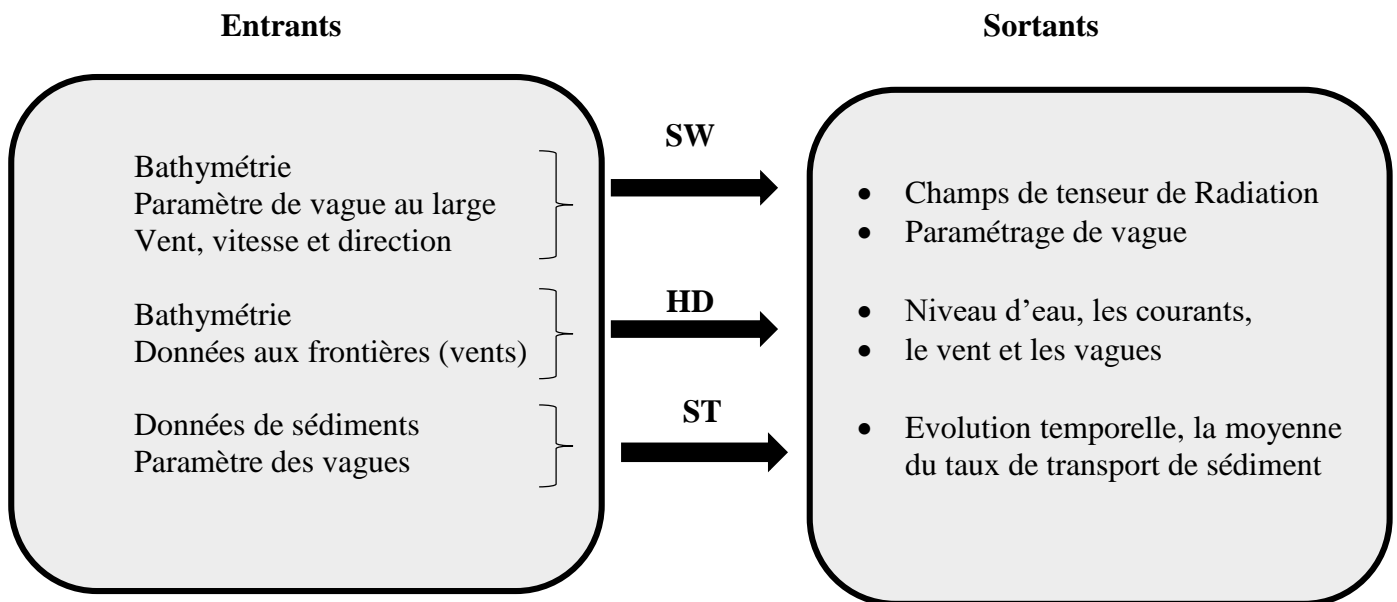


Figure 20 : Approche méthodologique adoptée pour la modélisation intégrée du transport sédimentaire non cohésif.

4. Création 2D Bathymétries sous le maillage

La plateforme Mike Zero nous offre la possibilité d'importation et visualisation des données bathymétriques sous un maillage souple bien déterminé (.Mesh) à l'aide du module "MeshGenerator" qui est à son tour offre un environnement pour la création, l'édition et la présentation de la bathymétrie numériques 2D détaillées sous le system de projection WGS84 UTM Zone31N.

Aussi bien, cette plateforme nous facilite le processus d'élaboration manuelle des données et leur présentation, des cartes graphiques des images satellitaires peuvent être importées et superposées aux données bathymétriques pour une meilleure présentation à condition qu'elles soient géo référencées à l'aide de l'extension « Image Rectifier ». Plusieurs méthodes ont été destinées pour l'interpolation des valeurs de la bathymétrie (Krigging, Natural Neighbourhood...etc.).

Chapitre III Modélisation de la dynamique côtière du littoral de la baie de Zemmouri

Dès que la bathymétrie est prête, on peut utiliser les utilitaires d'exportation de données bathymétriques de sortie sous différents formats.

Le maillage est composé d'éléments triangulaires dont la taille a été ajustée suivant les évolutions bathymétriques et la précision souhaitée. On a basé sur un maillage très affiné de 10m près de la côte entre les isobathes 0 et -20 m ou se manifeste les différents processus hydrosédimentaire et par contre dans la zone offshore (au-delà de la profondeur de fermeture) ou le milieu est presque inactif, on a utilisé un maillage large avec une maille de 100 m.

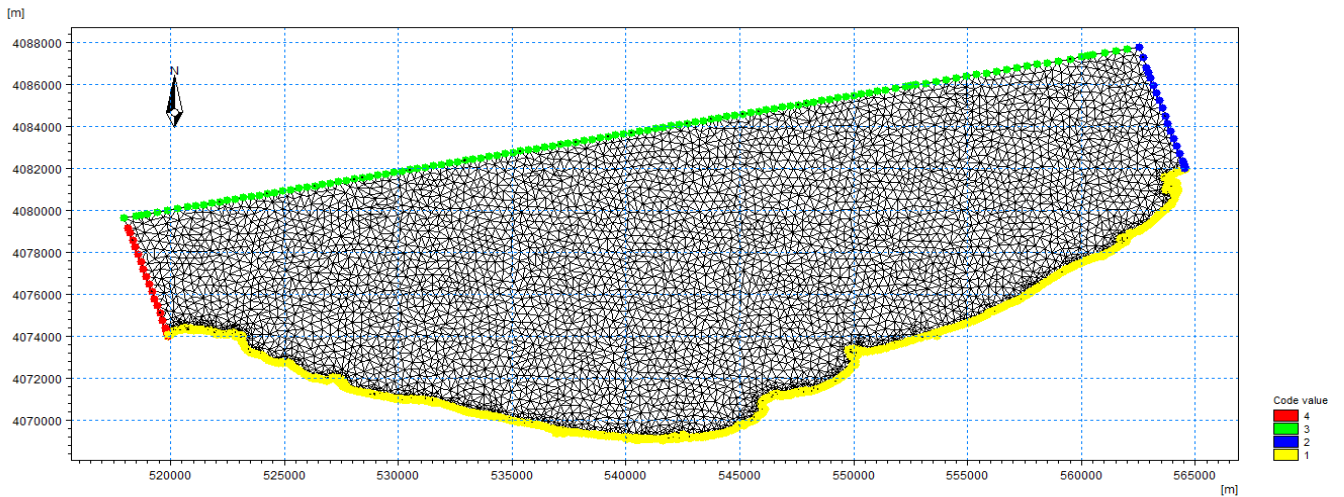


Figure 21 : Emprise du modèle.

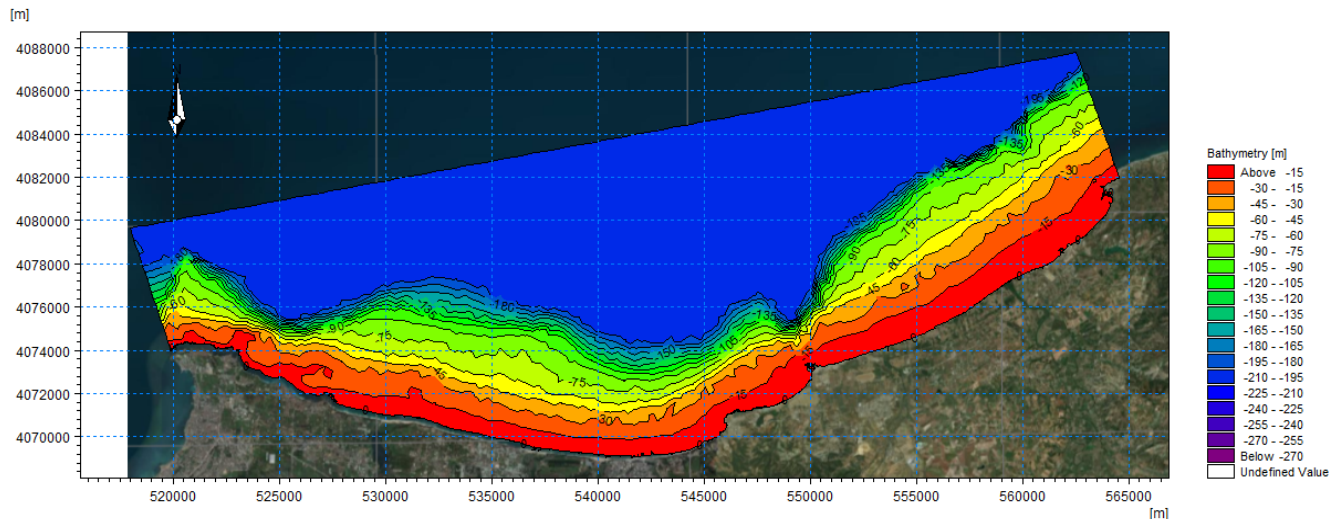


Figure 22 : Carte bathymétrique de la grande baie de Zemmouri 2020.

5. Interprétation des résultats

5.1. Etude bathymétrique :

D'après la carte bathymétrique de la grande baie de Zemmouri on peut distinguer deux zones morphologiques bien différentes sont mises en évidence :

Zone près de la cote : Entre 0 et environ -10 m on remarque que le fond est un peu accidenté avec des isobathes rapprochés caractérisé par la présence des rides d'avant cote bien développés réparti

Chapitre III Modélisation de la dynamique côtière du littoral de la baie de Zemmouri

d'une manière discontinu le long de la baie et aussi des fosses de lévigation. Cette morphologie sous-marine particulière témoigne d'une dynamique des particules sédimentaires du fond sous l'action des houles et des courants.

Cette zone est caractérisée par des isobathes rapprochées traduisant une pente abrupte. Cependant les régions près des embouchures possèdent un fond plus ou moins régulier avec des isobathes espacées les unes aux autres traduisant une pente douce, cela peut être expliqué par les apports terrigènes des Oueds (Oued Boudouaou et Oued Réghaia...) et aussi à la présence des ouvrages de protection (Ain Taya et Boumerdes) qui perturbe le transport sédimentaire.

Au large : cette zone est caractérisée par un fond régulier et donc des isobathes sont espacées et parallèles au rivage de la baie de Zemmouri traduisant une pente douce à l'exception des environs du Cap Djinet où les isobathes sont un peu perturbées.

➤ **Les données d'entrées et calibration du model SW :**

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 a la direction Nord, Nord Est et Nord Ouest.
- Des données sur le vent on a choisi des valeurs constantes ; une vitesse de 12.4 m/s et une direction à 45°.

Tableau 9 : Hauteur des houles annuelles retenues par secteur de provenance au large.

	Directions de la houle au large		
	N45°	N360°	N315°
Amplitude (m)	2.56	2.64	3.25
Période (s)	8	8.1	8.25

(Source <https://era5/>)

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.

5.2. Présentation et interprétation des résultats de module SW

Le climat des houles a été simulé afin de réaliser un plan de vague en se basant sur trois directions principales :

- Les houles de direction 45°N (figure 25) sont très fréquentes lors de la saison hivernale. La figure 25 montre que les orthogonales sont peu réfractées. Au large, les houles de cette direction ne subissent aucune modification et gardent leur énergie ($H_{s0} = 2.56 \text{ m}$), 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 pour atteindre des valeurs faibles entre 0.1 m et 1 m dans le secteur Est de la baie soit des coefficients de shoaling entre 0.03 et 0.39 et 0.1 m à 2 m au niveau du secteur Ouest avec des coefficients de réfraction variant entre 0.03 et 0.8 donc ces houles peuvent générer des courants littoraux et entraîner l'érosion côtière.

Des valeurs très faibles de hauteurs significatives moins de 0.5m sont enregistrées au niveau des zones abritées (Ports, Boumerdes et Ain Taya).

- D'après la figure 24, le plan de houle de direction Nord (360°) est frontal et ne subit aucune modification ($H_{s0} = 2.64 \text{ m}$) au large. Lorsque les houles commencent à ressentir l'effet du fond, la hauteur diminue considérablement pour atteindre des valeurs entre 0.3 m et 1 m avec des coefficients de shoaling relativement faible entre 0.11 à 0.37 le long de la zone d'étude, et cela signifie que la houle ne perd qu'une partie de son énergie lors de son évolution vers la côte. A l'exception de la zone de Cap Djinet, les hauteurs de la houle atteignent les 1.7 m juste au pré 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.
 - Les houles issues de secteur 315°N (figure 26), sont généralement des houles hivernales. Au large, ces houles ne subissent aucune modification ($H_s = 3.25 \text{ m}$), mais au fur et à mesure, lorsque elles commencent à ressentir le fond, la hauteur significative diminue considérablement et atteindre 0.2 à 1.5 m avec des coefficients de shoaling faibles comprises entre 0.06 et 0.46. 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.

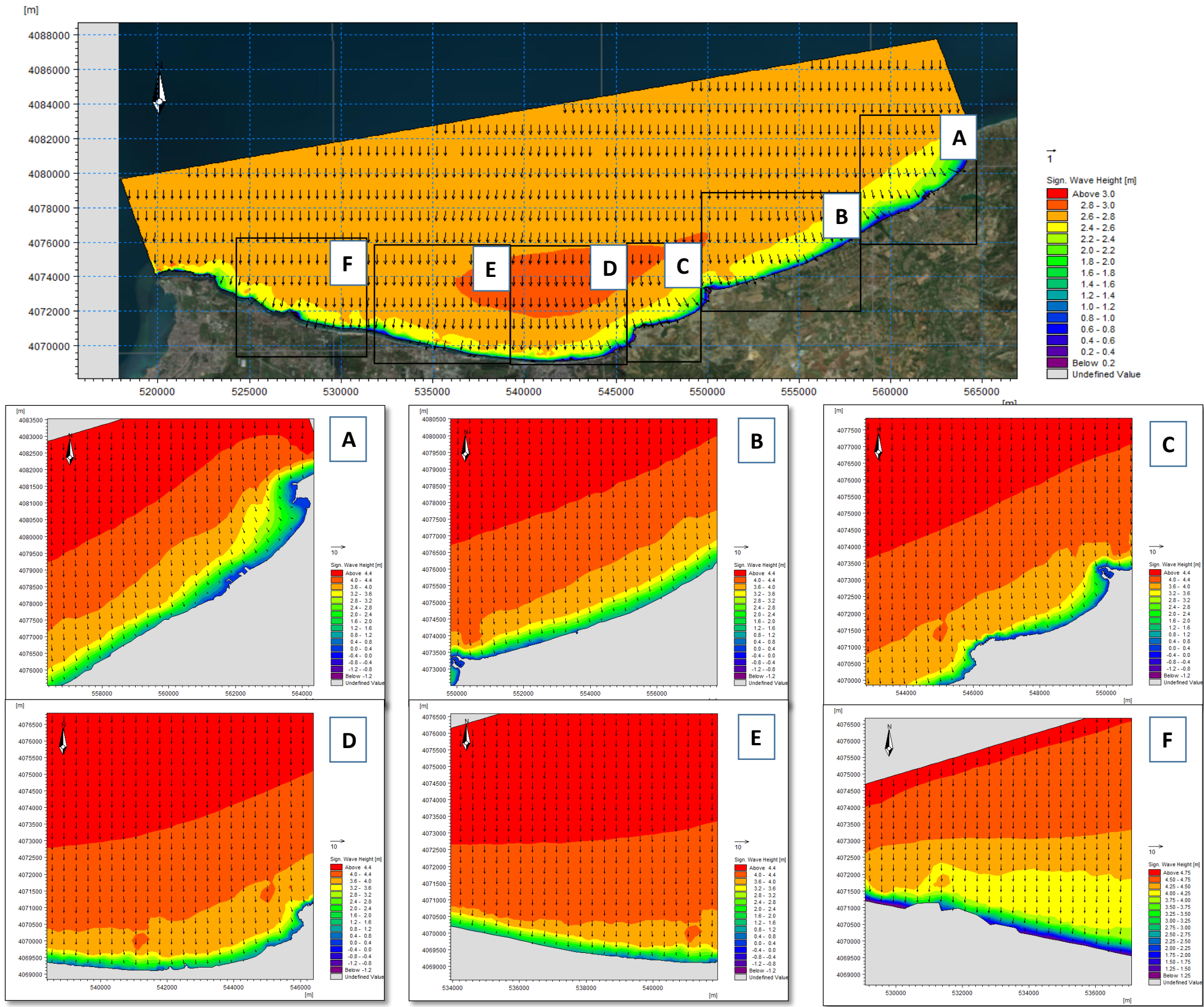


Figure 23 : Le champ de vague de direction Nord (MWD = 360°N)

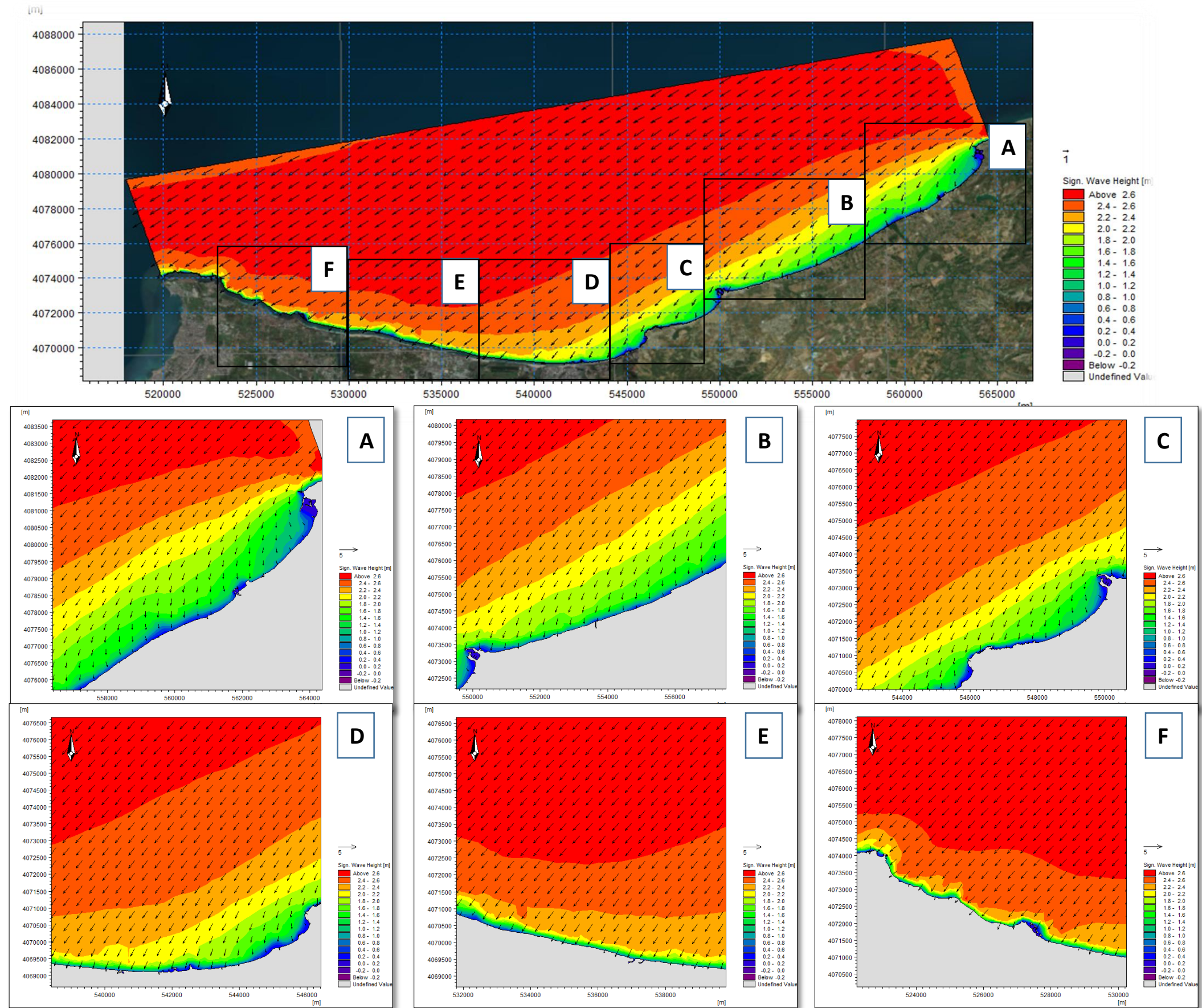


Figure 24 : Le champ de vague de direction Nord-Est (MWD =45°N)

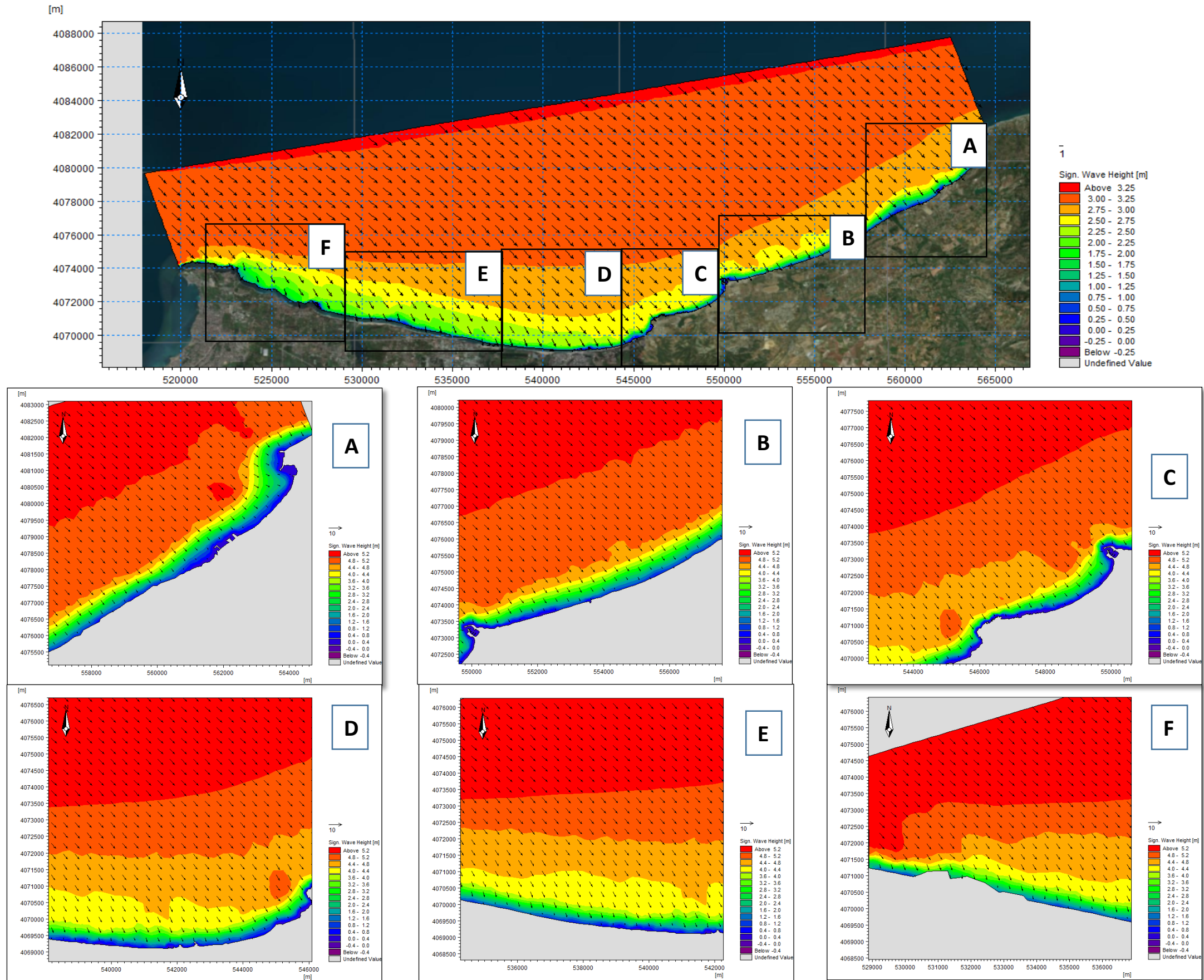


Figure 25 : Le champ de vague de direction Nord-ouest (MWD = 315°N).

➤ Calibration du module hydrodynamique HD

Pour calibrer le module 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 SI. L'estimation qu'on l'a choisi pour les deux paramètres, était par défaut 0.8 et 32 SI respectivement.

5.3. Présentation et interprétation des résultats de module HD

D'après les figures (27, 28 et 29), le flux d'énergie long-shore provient essentiellement du secteur Est et s'oriente vers l'Ouest le long de la côte.

- Les houles venant du secteur Nord-Est (45°N) génèrent un courant de dérive littorale parallèle à la côte et orienté d'Est en Ouest dont les vitesses varient entre 0.08 et 1.3 m/s le long de la côte à l'exception de la zone de cap Djinet qui enregistre des vitesses importantes de l'ordre de 1.8 m/s. Ces vitesses diminuent en allant vers l'Ouest à cause de l'existence des obstacles. Ces fortes vitesses sont à l'origine du transport sédimentaire vers l'Ouest en favorisant l'érosion des côtes sableuses exposées à ses courants.
- D'après la figure 27, les champs des courants engendrés par la houle de secteur Nord (360°N) montrent des activités hydrodynamiques dans presque toute la zone. On remarque que le champ du courant se propage non seulement d'Est en Ouest suivant une direction parallèle au trait de côte avec des vitesses variant majoritairement entre 0.2 m/s à 1.05 m/s mais aussi d'Ouest vers l'Est avec des vitesses moyennes de l'ordre de 0.6 m/s, ce courant est produit principalement par le phénomène de réfraction de la houle. Cependant à l'Est du port de Cap Djinet, on remarque des champs de courants plus importants qui dépassent la vitesse de 1.5 m/s orienté vers la direction Ouest, c'est l'origine des accumulations de quantités importantes de sable au niveau de la jetée principale et favorise l'ensablement du port avec des vagues venant de l'autre côté. La tendance érosive est accentuée par des courants de retours globalement au niveau de « Zemmouri et Boumerdes » leurs vitesses oscillent entre 0.5 m/s et 0.75 m/s.
- Les houles issues du secteur Nord-Ouest donnent naissance près de la côte à un courant de dérive dirigé vers l'Est. Au large, ce courant prend une direction nettement opposée mais avec des vitesses nettement faibles ne dépassent pas 0.5 m/s dans la partie Est. En revanche dans la partie Ouest, au niveau de la plage de Zemmouri, on observe des champs de courant importants avec des vitesses qui dépassent 1 m/s. Ce courant joue un rôle important dans la redistribution des sédiments accumulés au voisinage du port pour alimenter la partie érodée.

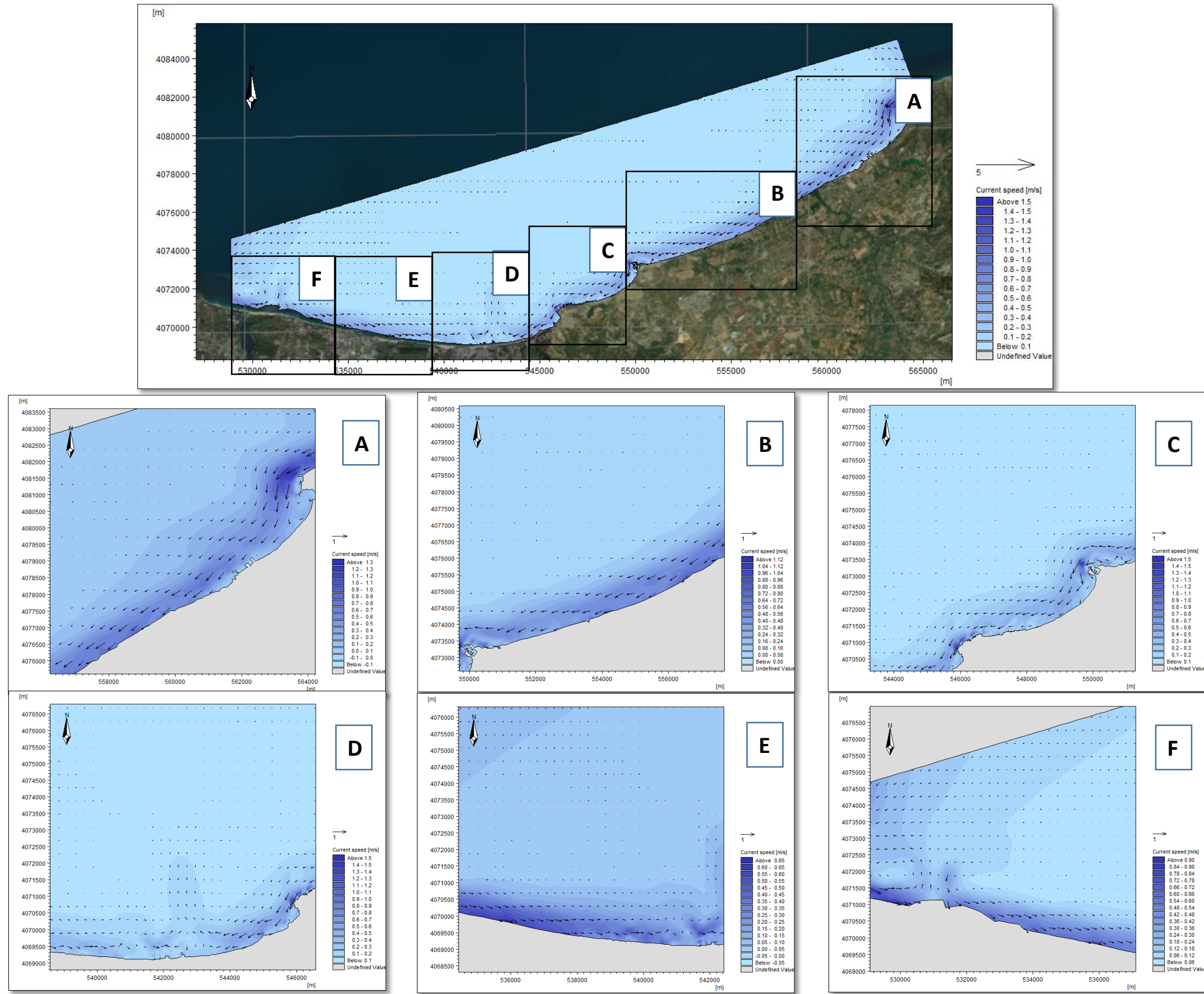


Figure 26 : Le champ du courant engendré par les houles de direction Nord.

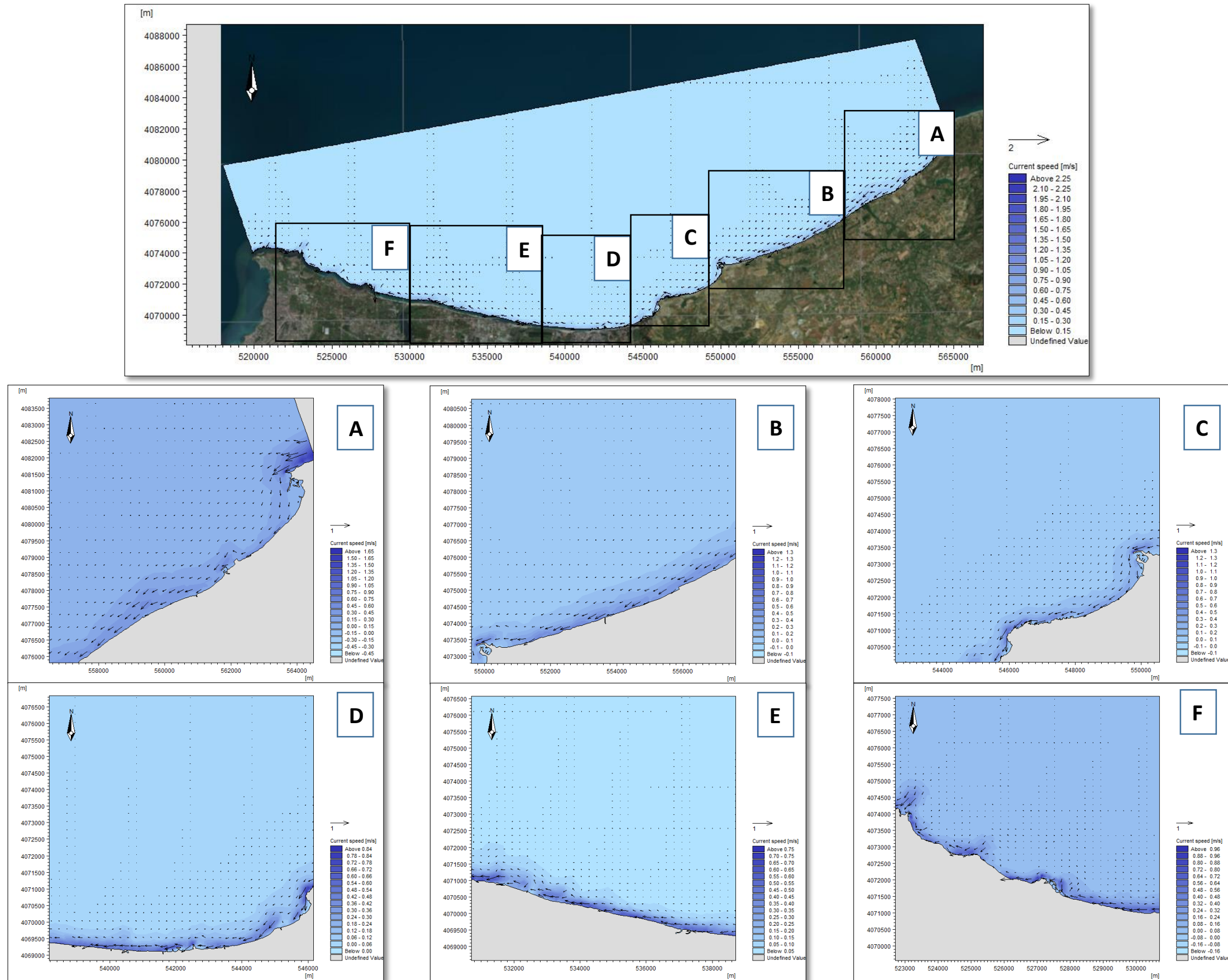


Figure 27 : Le champ du courant engendré par les houles de direction Nord-Est.

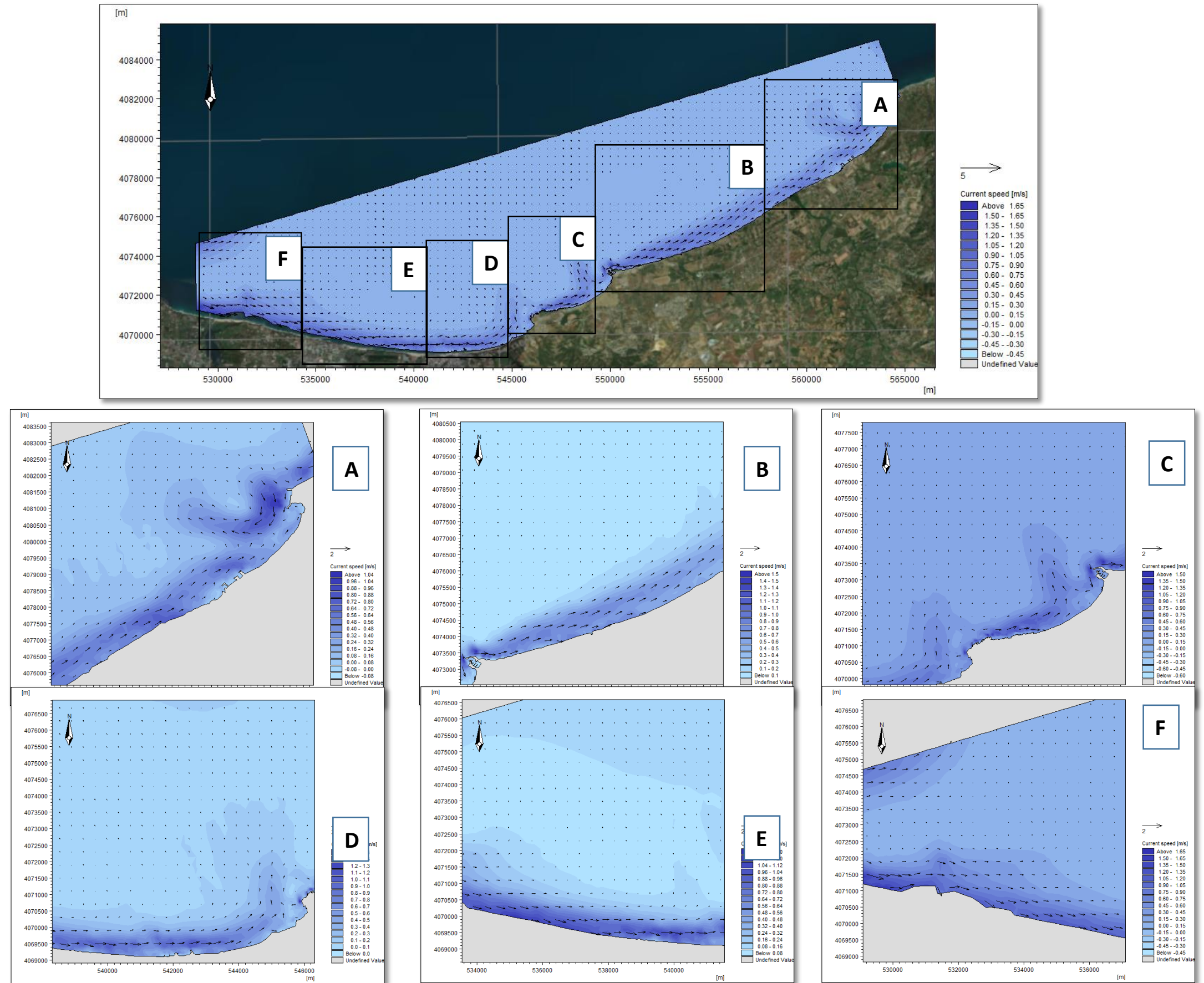


Figure 28 : Le champ du courant engendré par les hpiles de direction Nord-Ouest.

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

Finalement, les courants générés par le module HD et les champs de vague sortant du module SW seront pris en entrée par le module de transport de sédiment ST qui calcul alors le transport de sédiments à chaque pas temporel des simulations. Les paramètres granulométriques considérés sur l'ensemble du module sont : le diamètre médian $D_{50}=0.2$ mm et une porosité de 0.4.

5.4. Présentation et interprétation des résultats de ST

D'une 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° N et Ouest vers Est pour les houles de 315° N, cependant les houles en provenance de 360° N engendrent des transports sédimentaires qui convergent vers les deux directions selon la morphologie de zone au voisinage de la cote. Les houles de direction NE engendrent des courants dirigés vers l'Ouest semble à transporté une quantité de sédiments de 7568.64 m³/an/m vers les plages Ouest de la baie et favorisant l'accumulation des secteurs adjacents, Ce transport est illustré par des vecteurs qui ont un potentiel à se diminué d'une maille à une autre (de 378.65 m³/an/m) le long de la portion côtière entre le port de Cap Djinet et Zemmouri. En allant vers le secteur Ouest (Boumerdes, Boudouaou El Bahri et Réghaia) le champ de courant engendré par les houles de cette direction contourne les ouvrages de protection et par conséquent forme un vortex en aval de ces derniers et revient vers celui-ci en entraînant un déplacement des grandes quantités de sables vers le Nord dont le débit et de l'ordre de 3027 m³/an/m, les vecteurs du transport sédimentaire indiquent une divergence voire une érosion très forte, du fait que ces vecteurs augmentent d'intensité d'une maille à une autre, à 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 Nord-Est et Nord autour de la des pointes rocheuses, qui déclenche un transit sédimentaire vers la baie d'Alger et vers le large. Par contre, les houles en provenance de NW génèrent un courant qui contourne les ouvrages et forme derrière celui-ci un vortex qui revient vers l'ouvrage, en entraînant les sables vers le Sud et en favorisant l'engraissement des plages. Le champ des courant près du port de Cap Djinet semble de transporté les sédiments vers le Nord avec un taux de 3784.32 m³/an/m. Tandis que la direction Nord favorise une dérive qui convergent vers les deux directions en créant un courant de retour vers le large au niveau de Boumerdes, ce dernier va transporter des quantités considérables du sédiment et déclenche l'érosion avec des taux de sable de 7884 m³/an/m.

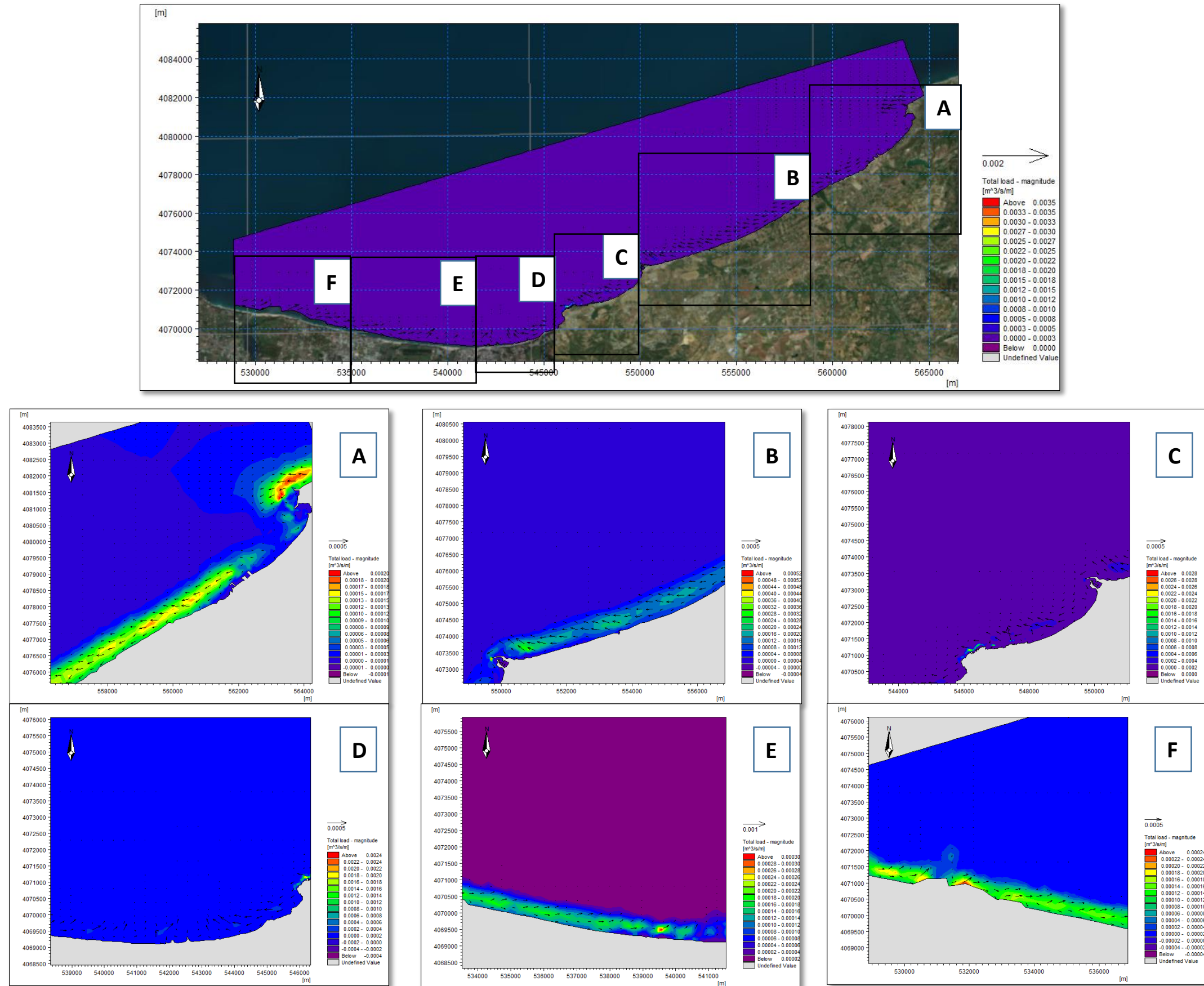


Figure 29 : Le transport sédimentaire engendré par les houles de direction Nord.

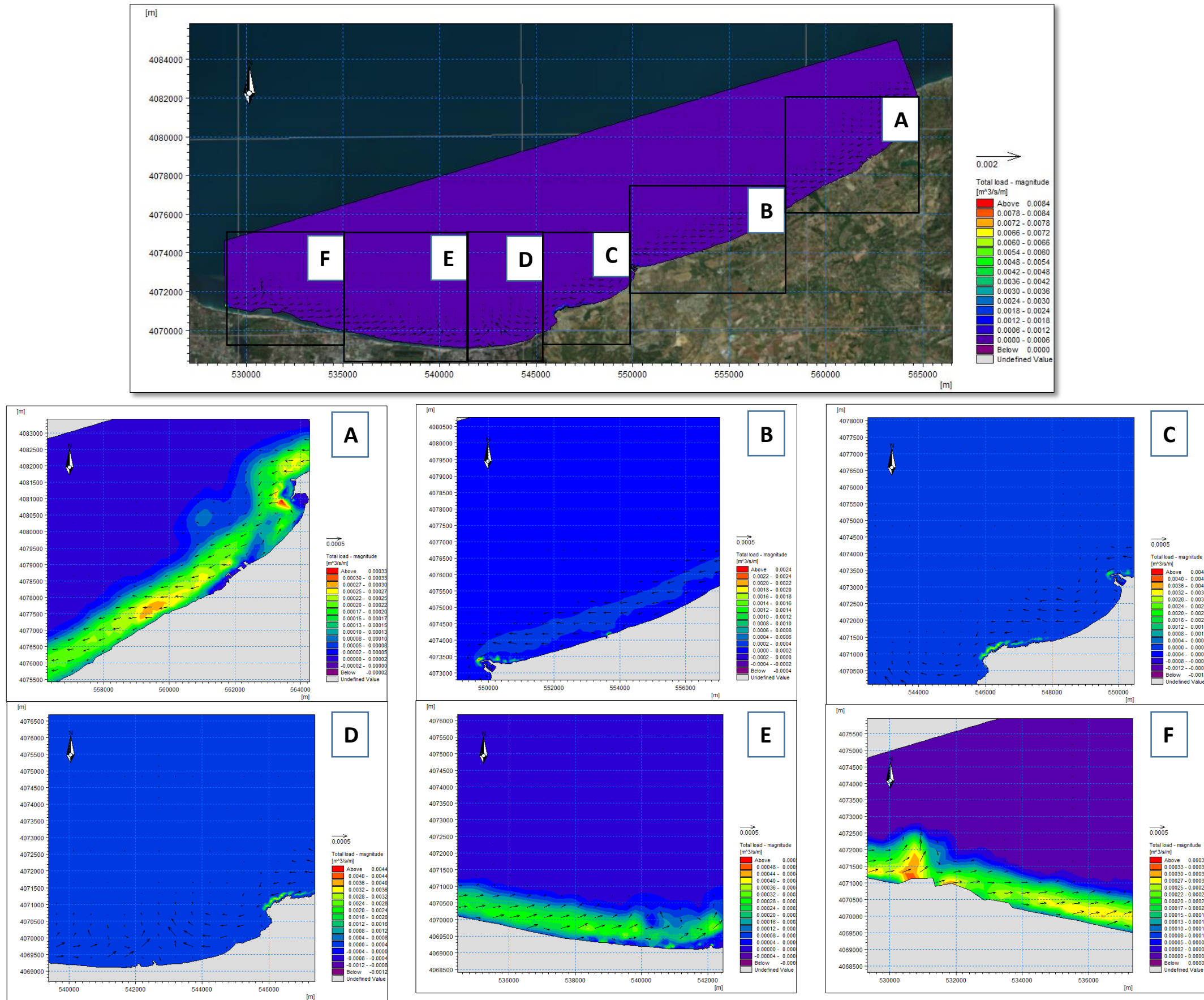


Figure 30 : Le transport sédimentaire engendré par les houles de direction Nord-Est.

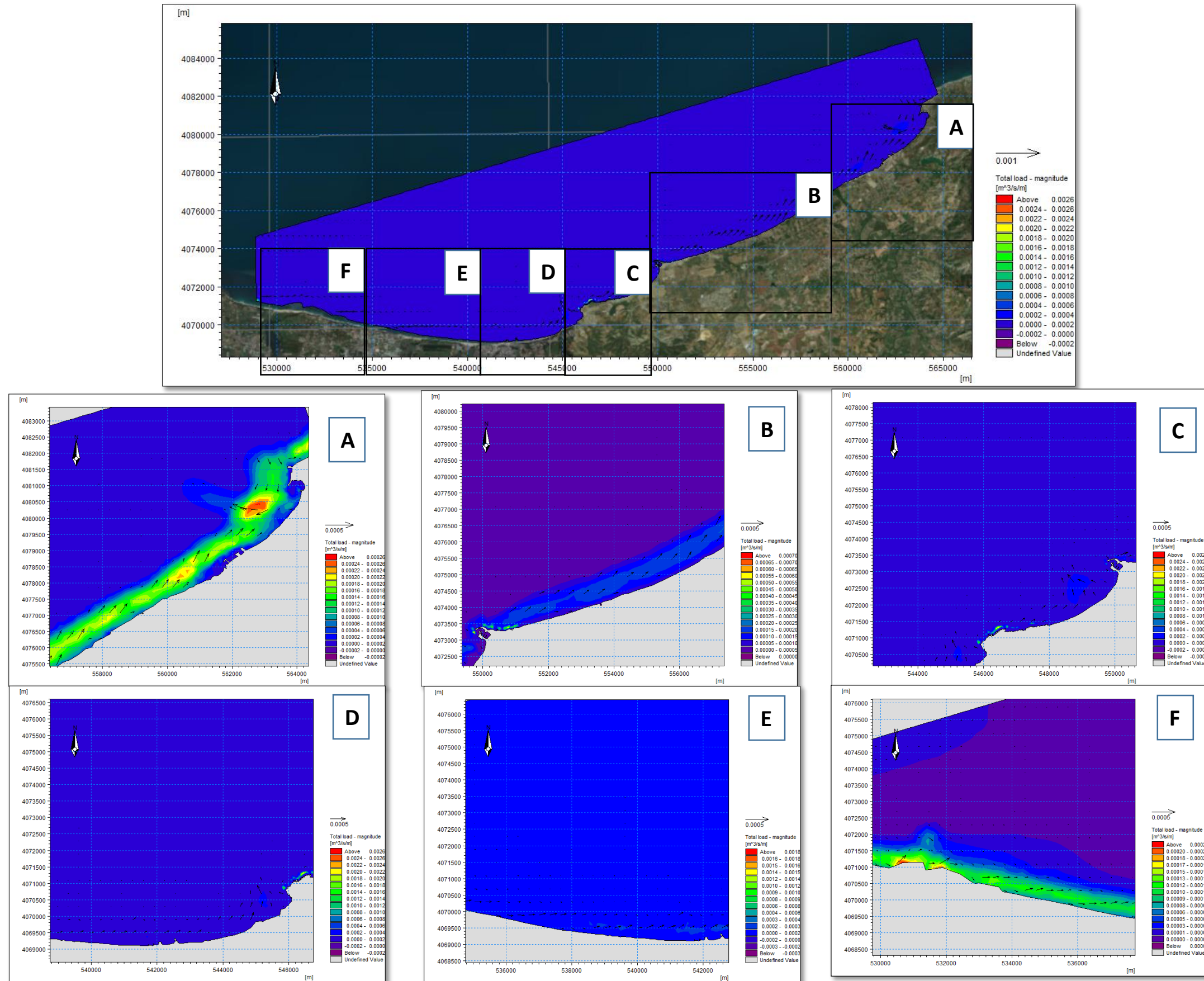


Figure 31 : Le transport sédimentaire engendré par les houles de direction Nord-Ouest.

Conclusion

La modélisation des champs de courants et des transports sédimentaires par les modules de calcul du Mike 21 nous a permis d'élucider le fonctionnement sédimentaire qui règne la zone d'étude.

L'aspect hydrodynamique doit être étudié d'une manière plus approfondie afin d'être sûr de la théorie de transformation de la houle pouvant engendrer une dérive littorale et cela par des méthodes de calibrage des modèles numériques et des mesure du courant in-situ.

Cependant, l'étude de propagation des houles du large vers la côte de provenance multiples (N45°, N315° et N360°) nous a permis de mettre en évidence les paramètres responsables de la génération de courants littoraux qui transportent des taux importants de sables dans le sens est-ouest. En effet la simulation du transport sédimentaire nous a permis d'avoir une estimation des débits sédimentaires, de la direction du transit, ainsi que pour la détermination des zones à potentiel d'érosion ou d'accrétion.

Ces résultats concordent avec les constatations précédemment promu, ce qui leurs donne de la crédibilité, ces résultats peuvent nous aider à faire sortir une interprétation finale qui reflète le mieux les phénomènes présents et même de choisir une stratégie d'intervention adéquate pour remédier ce déséquilibre naturel.

**Chapitre V : Evolution
spatio-temporelle du trait de
côte de la baie de Zemmouri**

Introduction

Au cours des dernières années, le débat sur les changements climatiques, leurs causes et leurs effets a gagné en intensité (**Christy 2001 ; Nature 2002 ; Matthews 2003**). Il est nourri notamment par le fait que certaines des conséquences attendues, à l'exemple de l'élévation du niveau de la mer, pourraient être pesantes et déterminantes pour les zones côtières, très peuplées, et leurs gestion futur (**Granja et Carvalho 2000 ; Vilibic et al. 2000 ; Jenen et al.2001 ; Rivis et al. 2002 ; in DJOUDER et BOUTIBA, 2017**).

Cette élévation des plans d'eau marins et directement liée entre autres, à l'érosion des rivages qui constitue déjà l'un des problèmes mondiaux les plus épineux (**Cipriani et al. 2004 ; Cazes-Duvat 2005 ; Cai et al. 2009**) qui menacent gravement la pérennité des espaces côtiers de la planète. L'évolution globale des littoraux de la planète a été caractérisée dans l'étude menée par **Bird (1985)**. Cette étude a démontré la tendance majoritairement régressive des cotes basses sableuses mondiales avec 70% des rivages sableux qui démaigrissent contre 10% seulement qui avancent. En Algérie, c'est le cas du littoral de la baie de Zemmouri qui connaît actuellement un important recul de son trait de côte.

L'étude des changements passés d'un littoral peut se faire par différentes méthodes d'analyse. L'interprétation de photographies aériennes, l'analyse de cartes (historiques, topographiques et hydrographiques), l'étude des images satellitaires, des relevés sur le terrain et des enquêtes auprès des gens du milieu constituent autant de sources d'information pour étudier le trait de côte (**GRENIER et DUBOIS, 1990**).

L'objectif principal de ce chapitre est résumé en 3 points essentiels qui sont :

- Un suivi spatio-temporel de l'évolution du trait de côte de la grande baie de Zemmouri selon la méthode d'analyse diachronique entre 1972 et 2020.
- Calcul du bilan surfacique de la zone d'étude et voir le rythme d'évolution (érosion ou d'accrétion).
- L'établissement d'un scénario tendanciel prévisionnel à l'horizon 2050.

1. Méthodologie :

Dans le cadre de cette étude, des images satellitaires et des photographies aériennes des années allant de 1972 à 2020 ont été utilisées, leur traitement est fait à l'aide de logiciel de cartographie Arc Gis 10.4 sous le système de projection WGS84 UTM zone 31N.

Ce travail s'est déroulé suivant ces étapes :

- On a commencé tout d'abord par le géoréférencement des images satellitaires.
- La digitalisation des traits de côte de la baie de Zemmouri entre 1972 et 2020.
- La génération de la ligne de base et les transects.

- Lancement des calculs des paramètres statistiques des vitesses d'érosion (EPR), des taux d'évolution(LRR) et aussi les distances entre la ligne de rivage la plus ancienne(1972) et la plus récente (2020) (NSM) à partir des traits de côtes.

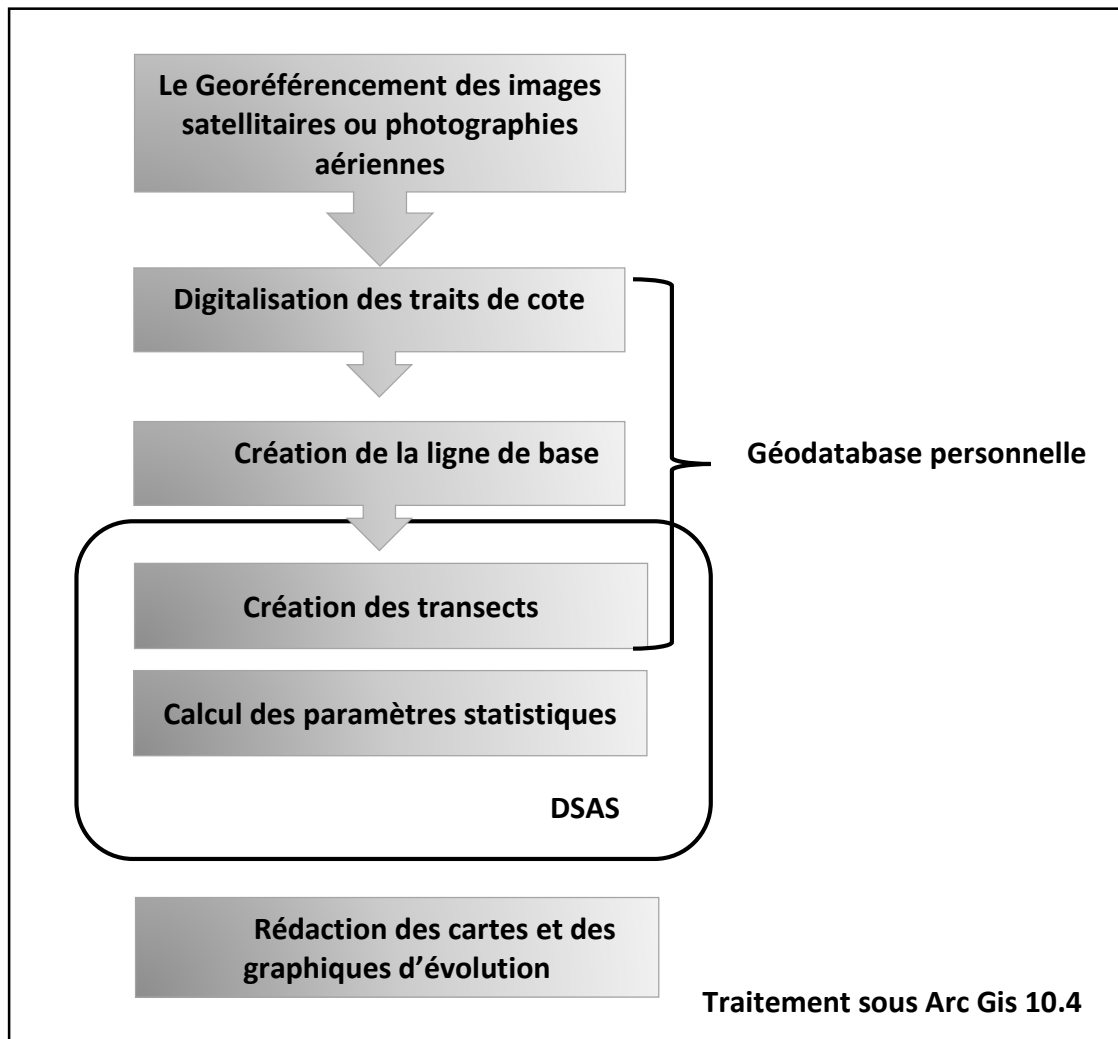


Figure 32 : Étapes de la méthodologie de suivi du trait de côte.

(OTMANI et al., 2019, Modifiée par BENALLOU, 2020).

➤ Aperçus général sur le logiciel ArcGIS Desktop10.4 et l'extension DSAS :

Arc Gis est un logiciel qui offre de nombreuses potentialités pour la manipulation, la gestion, l'analyse et l'édition des données spatiales. Différentes couches d'informations spatiales peuvent être manipulées offrant la possibilité d'analyser une ou plusieurs couches sous le contrôle des autres. Le seul lien entre ces différentes couches est le lien spatial, c'est-à dire, l'appartenance au même espace géographique et ayant le même système de coordonnées. Le logiciel Arc GIS 10.4 comprend trois applications principales : ArcCatalog, ArcMap, et ArcToolbox.

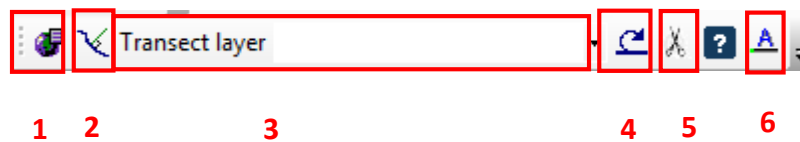
- **ArcCatalog** : Est un explorateur de données tabulaires et cartographiques offrant des outils de gestion et d'organisation analogues à ceux offerts par les systèmes d'exploitation

comme WINDOWS ou DOS (copier, renommer, effacer, créer des icônes, etc.). Il permet aussi de visualiser les données tabulaires et des couches géographiques ainsi que leur exploration.

- **ArcMap** : Est l'application fondamentale du logiciel Arc GIS. Elle contient une boîte à outils, organisés sous forme de modules indépendants (extensions), permettant de gérer, manipuler, analyser et éditer les différentes couches d'informations de la base de données.
- **ArcToolbox** : Est une boîte à outils permettant d'effectuer des conversions et de transferts de format et aussi de projection (ASBAI, 2013 in NADIR M., 2016).

2. Calcul des taux d'érosion / accrétion :

Le DSAS (Digital Shoreline Analysis System) : c'est une extension qui permet le calcul statistique des vitesses d'érosion et accrétion (EPR) et des taux d'évolution (LRR) et même les distances (NSM) à la base des traits de côtes digitalisés à partir des images satellitaires au cours de plusieurs années.



- 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.

Cet outil a pour avantage de donner une évolution graphique et statistique du trait de côte. Il fournit une méthode normalisée qui peut être répétée pour le calcul de l'évolution statistique tout en analysant le changement passé, présent et futur du littoral.

L'utilisation de l'extension DSAS nécessite au préalable la préparation des traits de côte au format vecteur au sein d'une géo-data base personnelle dans ArcCatalog et la numérisation d'une ligne

de base imaginaire à partir de laquelle DSAS crée des transects qui viendront couper les différents traits de côtes.

- EPR End Point Rate : Est le rapport de la distance entre le trait de côte le plus ancien et le plus récent sur le temps (nombre d'années) écoulé entre les deux dates.
- LRR Linear Regression Rate : qui traduit également le taux d'évolution annuelle de la ligne de référence le long de chaque transect, est intéressant si l'on analyse la cinématique littorale pour plus de deux dates, car la méthode de calcul tient compte de la tendance évolutive du trait de côte sur toute la période considérée.
- NSM Net Shoreline Mouvement : le mouvement du littoral net indique une distance et non un taux. Le NSM est associé aux dates de seulement de deux rivages.

En sortie, l'extension DSAS fournit 2 fichiers l'un contient les caractéristiques des points d'intersection « Transects intersect » et l'autre contient les statistiques d'évolution « Transects rate » (EPR, NSM et LRR).

Pour cette étude on a utilisé un espacement de 20m entre les transects de 600 m de longueur pour obtenir 2508 transects le long de la baie de Zemmouri (environ 53 km de linéaire côtier).

3. Interprétation des résultats :

L'analyse des données a permis de définir la cinématique du trait de côte de l'ensemble de la grande Baie avec une marge d'erreur estimée par +/- 6 m liée principalement à la résolution des images satellitaires utilisé dans ce traitement et aussi le traitement lui-même.

3.1. La cinématique du trait de côte :

Donc pour bien comprendre la dynamique de ces différents rivages selon l'échelle spatio-temporelle, on a projeté les résultats statistiques des indicateurs EPR, NSM et LPR, afin d'élaborer des cartes d'évolution représentatives de cette tendance selon les périodes suivantes :

❖ Evolution du rivage entre 1972 et 1985

Au cours de cette période, le trait de côte affiche une position recul-avancée tout au long de la zone d'étude entre Cap Djinet et Cap Matifou avec une vitesse de recul moyenne de l'ordre de -0.3 m/an (érosion modérée) (figure).

Le rivage du secteur Est (transect 10 à 438) marque un important recul avec des taux d'EPR qui varient respectivement entre -9.2 m/an et -0.01 m/an soit des distances entre -122.6 m et -0.2 m avec un maximum de recul enregistré au niveau du transect 43 de l'ordre de -13.68 m/an. Cependant la région après Oued Isser (du transect 439 à 947) enregistre une avancée remarquable de son trait de côte avec des taux d'EPR respectivement 0.01 m/an et 1.7 m/an soit des distances de 0.2 m et 22.4 m et un maximum de progradation de l'ordre de 5.49 m/an.

L'érosion de ce secteur peut être expliquée non seulement par l'extraction du sable à des fins de construction mais aussi par le climat des houles que subit la région.

Le rivage du secteur centre (du transect 948 à 1410) enregistre une accrétion modérée avec des valeurs d'EPR oscillent respectivement entre 1.4 m/an et 1.5 m/an soit des distances 18.5 m et 20.5 m. cette avancée du trait de côte est peut être expliquée non seulement par l'existence des infrastructures au niveau de ce secteur (port de Zemmouri) mais aussi par la dissipation de l'énergie de la houle suit à la configuration morphologique de la baie.

Les plages de secteur Ouest (du transects 1411 à 2508) ont connu une accrétion modérée de l'ordre 10 m soit un taux d'EPR moyen de 0.75 m/an. Cela est expliqué non seulement par les apports d'Oued Réghaia qui sont par la suite redistribués par les courants de dérive Est-Ouest le long de la cote mais aussi par les ouvrages de protection de « Ain Taya » qui vont bloquer le transit littoral en favorisant l'accumulation du sédiment.

Tableau 10 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 1972 et 1985.

Secteurs	Nombres des transects N°	Cellules sédimentaires	Le taux moyen d'évolution (EPR m/an, NSM m)	Evolution mesurée (m/an)	Localisation de la zone mesurée	
Secteur Est	10	Du Cap Djinet à la station électrique	-9.2			
	263		-122.6			
	264		-1.2			
	Secteur centre	264	De station électrique à Oued Isser			-16.5
		437				-1.63
		438				-22
Secteur Ouest	437	De Oued Isser jusqu'au port de Zemmouri	-0.02			
	438		-0.2			
	947	De port de Zemmouri jusqu'au Cap Blanc	-0.01			
	948		-0.2			
	948		1.7			
Secteur centre	948	De port de Zemmouri jusqu'au Cap Blanc	22.4			
	1157		1.4			
	1158	18.5				
	1410	Du Cap blanc jusqu'aux ouvrages de Boumerdes	2			
1411	20					
Secteur Ouest	1411	Du ouvrages de Boumerdes jusqu'aux ouvrages de Ain Taya	3.1			
	2283		41.5			
	2284	Du ouvrages de Ain Taya jusqu'à la falaise du Cap Matifou	1.5			
	2508		20.5			
	2508		1.6			
La moyenne totale de l'évolution			EPR = -0.3 m/an			

Légende

- Trait de cote 1972
- Trait de cote 1985
- Baseline
- Erosion
- Accrétion

EPR

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

❖ Evolution du rivage entre 1985 et 1994

Durant cette période notre zone d'étude a subi une érosion plus ou moins importante le long de son rivage avec une vitesse de recul moyenne de -0.8 m/an.

Le secteur Est (transect 3 à 947) marque une forte érosion avec un taux d'EPR respectivement varie entre -11.6 m/an et -5.2 m/an soit des distances entre -100.3 m et -44.7 m. Cependant les régions près de Oued Amara et avant Oued Isser enregistre une forte avancée du trait de côte de l'ordre de plus de 14 m avec un maximum au niveau du transect 310. Cette avancée est expliquée par la présence des digues du port qui favorisent l'accumulation en aval.

Le secteur centre (transect 948 à 1410) est marqué par une phase d'érosion et autre d'accrétion. L'érosion est enregistré au niveau du port de Zemmouri avec un taux d'EPR -5.1 m/an soit une distance de -44.3, tandis que la plage de Boumerdes a connu un fort taux d'accrétion estimé par 5.1 m/an soit une distance de 44.5 m.

Le secteur Ouest (du transect 1411 à 2508), les plages de ce secteur ont connu une forte érosion avec une vitesse moyenne de -2.2 m/an. A l'exception d'une petite portion du rivage de la région de Réghaia qui enregistre une accrétion de l'ordre de plus de 5m.

Les forçages hydrodynamique frontales que subit notre zone d'étude avec des houles ont une amplitude de l'ordre de 4.17 m (Figure X) leur rendre très vulnérable ce qui traduit par une érosion importante sur la majorité des plages de la baie avec un taux maximal de recul.

Tableau 11 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 1985 et 1994.

Secteurs	Nombres des transects N°	Cellules sédimentaires	Le taux moyen d'évolution (EPR m/an, NSM m)	Evolution mesurée (m/an)	La localisation de la zone mesurée		
Secteur Est	3	Du Cap Djinet à la station électrique	-11.6				
	263		-100.3				
	264	De station électrique à Oued Isser	-2.3				
	437		-19.7				
	438	De Oued Isser jusqu'au port de Zemmouri	-1.77				
	438		-15.4				
947	-5.8						
Secteur centre	948	De port de Zemmouri jusqu'au Cap Blanc	-50.2				
	948		-5.6				
	1157	Du Cap blanc jusqu'aux ouvrages de Boumerdes	-5.2				
	1158		-44.7				
Secteur Ouest	1410	De port de Zemmouri jusqu'au Cap Blanc	-5.1				
	1410		-44.3				
	1411	Du Cap blanc jusqu'aux ouvrages de Boumerdes	5.1				
	2283		44.5				
	2284	Du ouvrages de Boumerdes jusqu'aux ouvrages de Ain Taya	4				
	2284		34				
2508	-1						
La moyenne totale de l'évolution			EPR = -0.8 m/an				
<p>Légende</p> <p>— Trait de cote 1985 ■ Erosion</p> <p>— Trait de cote 1994 ■ Accrétion</p> <p>— Baseline</p> <p>EPR</p> <p>— Erosion très élevée — Accrétion modérée</p> <p>— Erosion élevée — Accrétion élevée</p> <p>— Erosion modérée — Accrétion très élevée</p> <p>— Stable</p>							

❖ Evolution du rivage entre 1994 et 2003

La comparaison des traits de côte de 1994 et de 2003 témoigne d'une érosion du littoral intervenue entre ces deux dates le long de la baie de Zemmouri. Le taux moyen de recul est de l'ordre de -3.13 m/an, il est plus important que la période précédente.

Au niveau du secteur Est (du transects 5 à 948) les forts taux de recul sont localisés au voisinage de Oued Isser avec une vitesse maximale de l'ordre de -15.5 m/an soit une distance(NSM) de -129.5 m. La région avant le port de Djinet marque une avancée de son rivage (Transect 5 à 269) avec une vitesse de pro gradation maximale de l'ordre de 17.5 m/an soit une distance de 164.86 m au niveau du transect 43.

Cette tendance érosion/accrétion est expliquée par la présence infrastructures maritime (port de Djinet) et les aménagements au bord de la mer (station électrique) en s'ajoutant les agents naturels qui sont à leurs tours susceptibles de perturber la dynamique du rivage.

Le secteur centre (du transects 949 à 1410) a connu une fluctuation remarquable de son rythme d'évolution entre érosion/accrétion avec un taux d'EPR de -0.96 et -2.7 m/an soit des distances varient entre -9.07 m et -25.47 m. L'accrétion de ce secteur est due à la présence du port de Zemmouri qui contribue au piégeage du sédiment en amont en déclenchant l'érosion à l'aval.

Le secteur Ouest (du transects 1411 à 2508) a connu majoritairement une forte érosion telle que la vitesse de recul est estimée respectivement de -2.8 m/an et -2.03 m/an.

Les causes de ce recul peuvent être dues à la fois à des facteurs naturels et anthropiques. Les causes naturelles d'érosion du rivage de la baie sont dues principalement aux effets répétés et cumulés des tempêtes avec des amplitudes des houles varie entre 4.17 m et 6.06 m (D'après le traitement des données des houles au large de la grande baie de Zemmouri) et la hausse relative du niveau moyen de la mer. Les causes anthropiques peuvent être dues aux extractions massives et arbitraires des quantités requises pour l'essor urbain que connaît la zone centre de l'Algérie.

Tableau 12 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 1994 et 2003.

Secteurs	Nombres des transects N°	Cellules sédimentaires	Le taux moyen d'évolution (EPR m/an, NSM m)	Evolution mesurée (m/an)	La localisation de la zone mesurée
Secteur Est	05	Du Cap Djinet à la station électrique	12.2		
			114.6		
	263		1.6		
	264	De station électrique à Oued Isser	14.7		
			0.7		
	437		6.5		
438	De Oued Isser jusqu'au port de Zemmouri	-7.2			
		-67.5			
		-68.1			
947		0.4			
Secteur centre	948	De port de Zemmouri jusqu'au Cap Blanc	3.4		
			-0.1		
	1157		-0.5		
	1158	Du Cap blanc jusqu'aux ouvrages de Boumerdes	2.2		
	21				
1410		2.1			
Secteur Ouest	1411	Du ouvrages de Boumerdes jusqu'aux ouvrages de Ain Taya	19.7		
			-2.7		
	2283		-25.5		
	2284	Du ouvrages de Ain Taya jusqu'à la falaise du Cap Matifou	-2.6		
			-24.3		
			-3.13		
		-29.5			
2508		-3			
		-28			
		-7.33			
		-69			

La moyenne totale de l'évolution EPR = -3.1 m/an

Légende

- Trait de cote 1994
- Trait de cote 2003
- Baseline
- Erosion
- Accrétion

EPR

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

❖ Evolution du rivage entre 2003 et 2010

Durant cette période l'évolution de la ligne du rivage de la baie de Zemmouri affiche une position de recul/avancée le long de la baie avec un EPR moyen de +0.19 m/an (accrétion modérée).

Le rivage du secteur Est (du transect 10 à 948) marque un recul avec des taux d'EPR qui varient respectivement de -1 m/an et -0.3 m/an soit des distances de -3.92 m et -0.25 m, cependant les transects du secteur Ouest (du transect 1411 à 2508) ont enregistré une avancée du trait de côte avec des taux d'EPR de 0.75 m/an à 0.11 m/an.

Les plages du secteur centre (du transect 949 à 1410) sont en état de pro gradation/érosion avec des vitesses de recule de l'ordre de -0.48 m/an et 0.52 m/an soit des vitesses oscillent entre -3.54 m et 3.81 m surtout au niveau de Boumerdes.

Les plages de la zone durant cette période de 7ans sont nettement affectées par la conjugaison des facteurs naturels (forçages hydrodynamiques) et anthropiques (les infrastructures et l'extraction du sable marin). Ces facteurs agissent d'une manière directe sur les processus hydrosédimentaire et donc sur l'équilibre du system littoral.

Tableau 13 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 2003 et 2010.

Secteurs	Nombres des transects N°	Cellules sédimentaires	Le taux moyen d'évolution (EPR m/an, NSM m)	Evolution mesurée m/an	Localisation de la zone mesurée
Secteur Est	05	Du Cap Djinet à la station électrique	-1		
	263		-3.92		
	264	De station électrique à Oued Isser	+1.53		
	437		+77.8		
	438	De Oued Isser jusqu'au port de Zemmouri	+1.5		
	947		+41.3		
948	+2.52				
Secteur centre	948	De port de Zemmouri jusqu'au Cap Blanc	+13.1		
	1157		+2.36		
	1158	Du Cap blanc jusqu'aux ouvrages de Boumerdes	+15.3		
	1410		-0.3		
Secteur Ouest	1411	Du ouvrages de Boumerdes jusqu'aux ouvrages de Ain Taya	-0.25		
	2283		-0.48		
	2284	Du ouvrages de Ain Taya jusqu'à la falaise du Cap Matifou	-3.54		
	2508		-3.24		
	2671		-23.92		

La moyenne totale de l'évolution **EPR = +0.19 m/an**

Légende

- Trait de cote 2003
- Trait de cote 2010
- Baseline
- Erosion
- Accrétion

EPR

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

❖ Evolution du rivage entre 2010 et 2017

Cette période allant de 2010 à 2017 est caractérisée par une forte augmentation du phénomène d'érosion par rapport aux périodes précédentes (1972/1985, 1985/1994, 1994/2003, 2003 /2010). Les résultats de l'analyse statistique des changements du trait de côte affichent un recul moyen d'EPR de -3.16 m/an sur la totalité du rivage de la grande baie de Zemmouri.

Dans le secteur Est (transect 10 à 948) de cette portion côtière, les résultats obtenus affichent des zones en accrétion avec des taux de pro gradation maximale de 50.82 m/an soit une distance de 352.25 m au niveau du transect 61. L'engraissement par les sédiments a continué Jusqu'à la plage de Mendoura avec un taux de pro gradation moyen (EPR) de 4.53 m/an soit une distance de 31.37 m.

Par rapport au secteur centre (transect 949 à 1410) l'érosion maximale (érosion élevée à très élevée) est enregistrée au niveau du transect 1125, avec une vitesse d'EPR de -21.02 m/an soit une distance de -145.7 m. Tandis qu'une petite portion du littoral de ce secteur marque une avancée du rivage de 92.28 m soit une vitesse de 13.31 m/an au niveau du transect 1165.

Le secteur Ouest (Transect 1411 à 2508) et plus exactement au niveau des plages de Boudouaou El Bahri Ouest, Sidi Khider, Réghaia plage, El Kadous, Déca plage Surcuf et Tamaris le trait de côte a connu une érosion avec des vitesses de recul fluctuent respectivement entre -1.14 m/an et -1.92 m/an soit des distances de -7.87m et -13.5 m.

D'après les résultats de traitement des houles au large de notre zone d'étude on constate que l'effet cumulé des tempêtes ayant une amplitude oscille entre 5.17 m et 6.7 m est l'un des principale cause de l'érosion du littoral de la baie de Zemmouri durant cette période de 7 ans. Cette tendance érosive est accélérée par des interventions anthropiques (développement du tourisme balnéaire, construction anarchique et l'installation des ouvrages de protection...).

Tableau 14 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 2010 et 2017.

Secteurs	Nombres des transects N°	Cellules sédimentaires	Le taux moyen d'évolution (EPR m/an, NSM m)	Evolution mesurée (m/an)	La localisation de la zone mesurée	
Secteur Est	06	Du Cap Djinet à la station électrique	-1			
	263		-6.8			
	264		De station électrique à Oued Isser			-1.5
	437	4.4				
	438	30.3				
	Secteur centre	947	De Oued Isser jusqu'au port de Zemmouri			-2
948		-13.5				
1157		De port de Zemmouri jusqu'au Cap Blanc	-2.1			
1158			-14.6			
1410			-0.04			
Secteur Ouest	1411	Du Cap blanc jusqu'aux ouvrages de Boumerdes	-0.3			
	2283		9.5			
	2284	Du Cap blanc jusqu'aux ouvrages de Boumerdes	65.5			
	2508		9.6			
	2508		67			
La moyenne totale de l'évolution			EPR = -3.2 m/an			

Légende

- Trait de cote 2010
- Trait de cote 2017
- Baseline
- Erosion
- Accrétion

EPR

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

❖ Evolution du rivage entre 2017 et 2020

Cette courte période de 3 ans affiche une érosion élevée du rivage de notre zone d'étude. D'après l'analyse statistique des résultats des changements de la position du trait de côte, la baie de Zemmouri a connu une érosion de son rivage avec une vitesse de recul de l'ordre de -1.9 m/an.

Le secteur Est (du transects 10 à 948), c'est le secteur le plus touché par le phénomène d'érosion, il affiche des vitesses de recul oscillent respectivement entre -13.18 m/an et -16.19 m/an soit des distances de l'ordre de -37.42 m et -45.96 m. Le transect 56 enregistre une vitesse de recule maximale.

Concernant le secteur centre (du transects 949 à 1410), le taux de recul est de l'ordre de 1.79 m/an et 5.34 m/an soit des distances respectivement de 5.07 m et 15.17 m. Ce secteur a connu une avancée de son trait de côte avec un maximum de pro gradation de 30.15 m/an au niveau du transect 1125.

Au niveau du secteur Ouest (du transects 1411 à 2508), le rivage est marqué par une stabilité entre phase de recule et avancée tel que les valeurs d'EPR oscille entre 4.14 m/an et 0.04 m/an soit une distance de 11.76 m et 0.11 m.

Les enregistrements des houles au large au niveau de la stations de Dar El Beida ont permis de détecter un nombre important de tempêtes qui ont fortement influencé l'évolution de la zone. Et d'après les résultats de la modélisation numérique de la houle ou on a constaté des fortes concentrations des énergies de la houle au voisinage de la cote qui engendre des courants de dérive littorale de ces zones.

Tableau 15 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 2017 et 2020.

Secteurs	Nombres des transects N°	Cellules sédimentaires	Le taux moyen d'évolution (EPR m/an, NSM m)	Evolution mesurée (m/an)	La localisation de la zone mesurée
Secteur Est	06	Du Cap Djinet à la station électrique	-13.2		
	263		4		
	264	De station électrique à Oued Isser	-10		
	437		-17.5		
	438		-49.7		
	Secteur centre	947	De Oued Isser jusqu'au port de Zemmouri		
948		-48.5			
948		De port de Zemmouri jusqu'au Cap Blanc	1.8		
1157			5.1		
1158		Du Cap blanc jusqu'aux ouvrages de Boumerdes	0.8		
1410	2.4				
1411	-2				
Secteur Ouest	2283	Du ouvrages de Boumerdes jusqu'aux ouvrages de Ain Taya	-5.5		
	2284		-3.6		
	2508	Du ouvrages de Ain Taya jusqu'à la falaise du Cap Matifou	-10.3		
	1411		5.3		
	2283		15.2		
	2508		4.1		
La moyenne totale de l'évolution			EPR = -2 m/an		

Légende

- Trait de cote 2017
- Trai de cote 2020
- Baseline
- Erosion
- Accrétion

- EPR**
- Eosion très élevée
 - Erosion élevée
 - Erosion modérée
 - Accrétion modérée
 - Accrétion élevée
 - Accrétion très élevée

❖ Evolution mi- séculaire de la ligne de rivage de la baie de Zemmouri entre 1972 et 2020

Les changements de la ligne de rivage de la baie de zemmouri sur une période mi séculaire (1972-2020) sont étudiés à partir des résultats des deux paramètres : Net shoreline movement (NSM) et End point rate (EPR), ces résultats montrent une position du rivage qui varie entre phase de recul et d'autre en pro gradation selon les secteurs, les secteurs stables sont observés majoritairement au niveau des falaises rocheuses (Falaise du Cap Matifou et Cap Blanc). Le recul le plus marqué durant cette période est enregistré dans la partie Est de la baie qui atteint -7.16 m/an soit une distance de -57 m au niveau du transect 389. Dans la partie centrale de la baie, le recul du rivage a atteint -2.32 m/an alors que les secteurs en accrétion marquent des taux nets d'évolution d'ordre de 1.84 m/an au niveau du transect 1158.

L'avancée la plus marquée du rivage est observée sur la partie Est de la baie notamment la plage Carrière 2 et Dar El Mendil, le taux d'accrétion a atteint 5.04 m/an.

La tendance générale de l'ensemble du littoral de la baie, révèle que durant les 48 ans (1972 à 2020), 50% du rivage a connu une érosion soit 26.5 km de linière côtier, contre 6% en engraissement équivalent à une distance 3.18 km. Les secteurs stables représentent 46 % soit une distance de 24.38 km de linéaire côtier, situés au niveau des caps et les falaises rocheuses.

Tableau 16 : Evolution du trait de côte de la baie de Zemmouri entre 1972 et 2020.

Secteurs	Nombres des transects N°	Cellules sédimentaires	Le taux moyen d'évolution (EPR m/an, NSM m)	Le bilan surfacique (ha)	L'évolution mesurée m/an	Localisation de la zone mesurée
Secteur Est	10	Du Cap Djinet à la station électrique	-3.4	-120.87 ha		
	263		-163.4			
	264	-0.6				
	437	-29.2				
	438	-0.1				
Secteur centre	947	De station électrique à Oued Isser	-6	-6.71 ha		
	948		-126			
	1157	De Oued Isser jusqu'au port de Zemmouri	-3			
	1158		-125			
Secteur Ouest	1410	De port de Zemmouri jusqu'au Cap Blanc	0.1	-106.38 ha		
	1411		5.5			
	2283	Du Cap blanc jusqu'aux ouvrages de Boumerdes	+0.03			
	2284		-1.3			
	2508	Du Cap blanc jusqu'aux ouvrages de Boumerdes	+1.7			
2509	+80.					

La moyenne totale de l'évolution **EPR = -1 m/an**

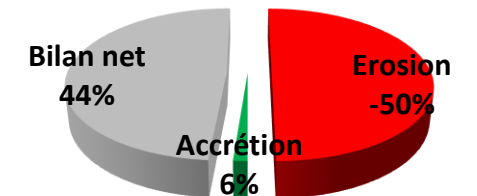
Légende

- Trait de cote 1972
- Trait de cote 2020
- Erosion
- Accrétion

EPR

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

Bilan surfacique %



3.2. Analyse du bilan sédimentaire :

Pour quantifier les pertes et les gains en sédiments le long de la baie, les déplacements du trait de côte ont été exprimés en termes de surfaces.

Les résultats montrent une variabilité spatio-temporelle le long du littoral de la baie de Zemmouri. Les surfaces des plages perdues dominent celles gagnées par accrétion, et le budget sédimentaire global sur les 48 ans est négatif. Les plages du secteur Est allant du Cap Djinet jusqu’au port de Zemmouri ont enregistré 120.87 ha des surfaces perdues, ce bilan négatif est expliqué par une conjugaison des agents naturels (forçages hydrodynamiques) et des actions anthropiques (infrastructures...), Cependant le secteur centre allant de port de Zemmouri jusqu’aux ouvrages de Boumerdes marque une perpétuelle évolution entre un gain de surface estimé par 10.55 ha et une perte de 17.26 ha de son surface d’évolution, cela est dû à la dissipation de l’énergie de la houle et aux ouvrages de protection de Boumerdes (les épis jouent un rôle d’obstacle pour le transit littorale E/O ou O/E).

Le secteur Ouest enregistre un bilan négatif avec une perte de plus de 106.38 ha de ses plages. Cette étude a révélé que durant cette période 58 % des transects correspondant à 4.65 km sont en érosion, la zone en accrétion représente 42 % soit 3.4 km du linéaire côtier.

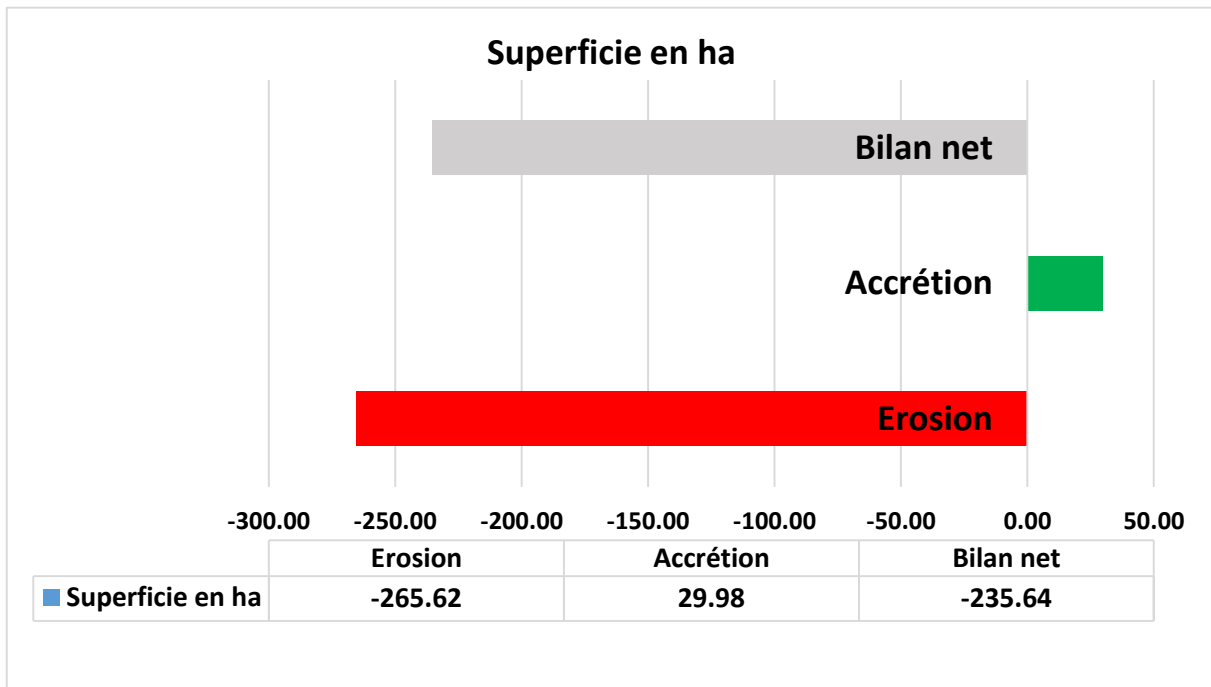


Figure 33 : Le bilan sédimentaire de la baie de Zemmouri.

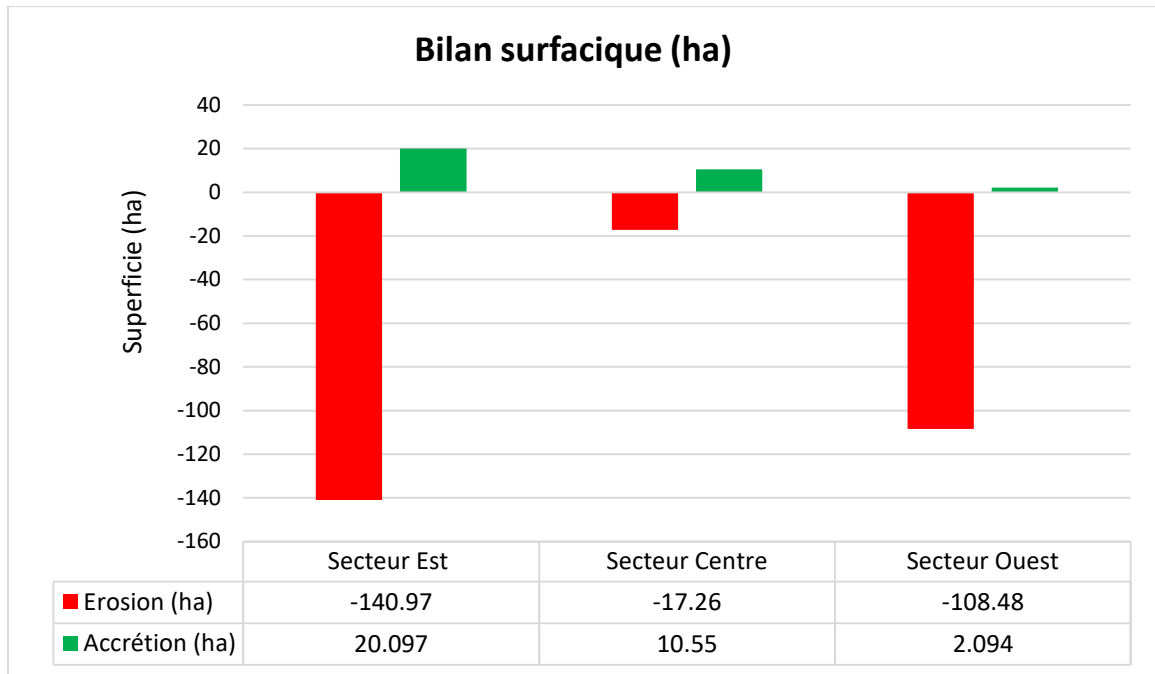


Figure 34 : Le bilan surfacique par secteur.

4. Evolution prévisionnelle à l'horizon 2050

Pour cette étude, comme sur la cote sableuse, aucune hypothèse spécifique de modification des agents dynamiques (houle, vent, tempête, hydrologie...) n'a été considérée afin d'estimer les conséquences du réchauffement climatique, compte-tenu des incertitudes des modèles globaux et régionaux et l'absence de doctrine nationale sur cette thématique. Cependant, le fait d'utiliser l'évolution des différents traits de cote sur plusieurs décennies, permet de manière intrinsèque de prendre en compte les éventuelles variations de ces agents.

L'outil DSAS d'Arc Gis a été utilisé pour réaliser un calcul statistique des taux d'évolution entre les traits de côte de 1972 et 2020 par des transects de 600m de longueur espacés tous les 20 m.

✓ **Modèle EPR pour la prédiction du trait de côte**

La position future du trait de côte peut être prédite à partir des modèles mathématiques non-linéaires basés sur la fonction temps, taux d'érosion et d'accumulation ou l'élévation du niveau de la mer. Parmi ces derniers, les modèles du taux du point extrême (EPR) et celui de la régression linéaire (LR) restent les plus utilisés.

Dans le cas de cette étude la position future du trait de côte pour l'horizon 2050 a été calculée à l'aide de l'équation qui suit tenant compte le taux de changement du trait de côte (EPR), l'intervalle de temps entre la position du trait de côte observé et prédit et l'interception du modèle lui-même.

$$P_{ftr} = T_{EPR} \times t + K_{EPR}$$

- P_{ftr} : Postions futures du trait de côte

- t : L'intervalle de temps
- K_{EPR} : Pour l'interception du modèle
- T_{EPR} : Taux de changement du trait de côte (EPR)
- avec: $T_{EPR} = \frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1}$
- P_2, P_1 : positions la plus ancienne et la plus récente du trait de côte
- t_2, t_1 : dates
- et : $K_{EPR} = P_1 - (T_{EPR} \times t_1) = P_2 - (T_{EPR} \times t_2)$

A l'horizon de 2050, une forte augmentation du phénomène d'érosion. Les résultats de l'analyse statistique des changements du trait de côte affichent un recul moyen d'EPR d'environ -0.89 m/an sur la quasi-totalité de la ligne du rivage. Dans la partie Est de cette portion côtière les résultats obtenus affichent des zones en accrétion avec des taux de progradation de 0.5 m/an (figure 35).

L'érosion moyenne maximale (érosion forte à très forte) est enregistrée sur les plages de Boudouaou el Bahri jusque la plage de Zemmouri Est, avec des valeurs maximales d'EPR de -3.8 m/an et - 2.7 m/an respectivement.

Les causes de ce recul peuvent être dues à la fois à des facteurs naturels et anthropiques. Les causes naturelles d'érosion dans le secteur Est et Ouest de la baie sont dues principalement aux effets répétés et cumulés des tempêtes et dans la hausse relative du niveau moyen de la mer. Les causes anthropiques peuvent être dues aux extractions massives et arbitraires des quantités requises pour l'essor urbain dans le futur proche.

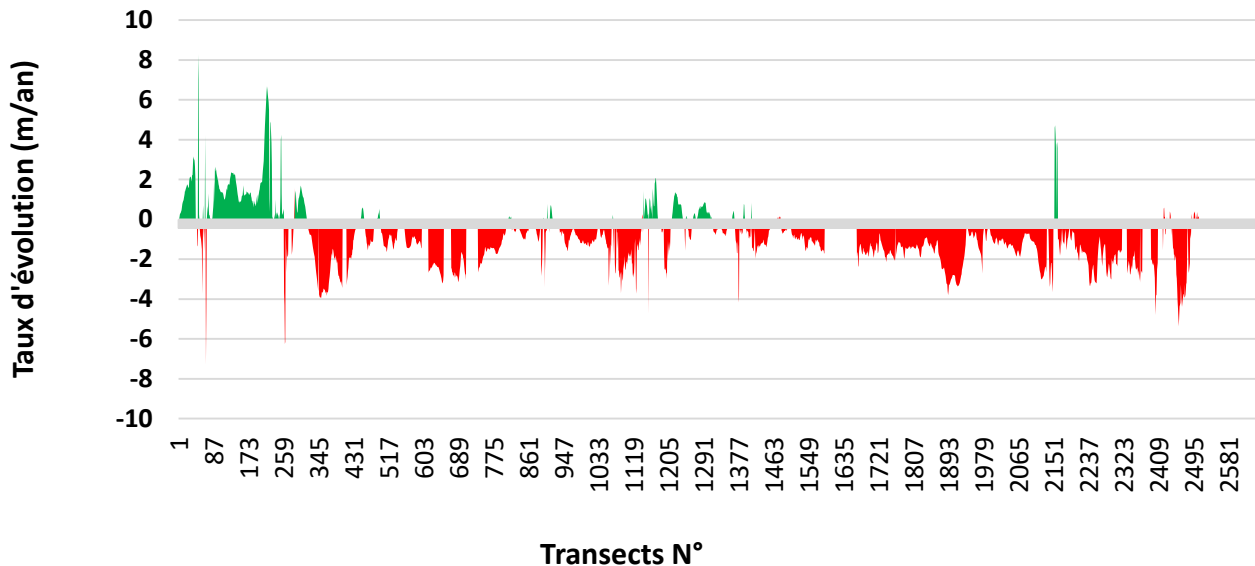


Figure 35 : Le taux d'évolution EPR de la baie de Zemmouri d'ici 2050.

Conclusion :

D'après l'analyse diachronique des changements de position des traits de côte de la grande baie de Zemmouri allant de 1972 à 2020 on peut dire que :

Le littoral de la zone est en état d'érosion durant cette période de 48 ans avec une perte 265.92 ha qui est un volume très important et un pourcentage de 50% de la totalité de la surface d'évolution, ce recul de trait de côte est intense sur le secteur Est et Ouest particulièrement près de Oued Isser et la région de Boudouaou El Bahri-Réghaia. Le rivage de la région de Boumerdes enregistre une accrétion suite à la mise en place des deux épis en T en 2011 qui sont à leur tour destinés à la protection de la côte ainsi qu'aux urbanisations proches du rivage contre les attaques frontales des vagues de tempêtes et l'érosion. Par rapport au secteur ouest qui a subi des travaux d'aménagement a perdu une grande partie de sa surface d'évolution sur la période d'étude. La forte anthropisation du rivage et la construction des habitations le long du linéaire côtier de la zone à partir de 1980 a déclenché voire accéléré le phénomène d'érosion.

**Chapitre VI : Evaluation de
la vulnérabilité du littoral de
la baie de Zemmouri**

Introduction

La bande côtière constitue un territoire très spécifique en matière de risques (PASKOFF, 2001 ; MEUR-FEREC et MOREL, 2004 ; ROBIN, 2002). Alors que la dynamique actuelle lui confère une mobilité intrinsèque, l'évolution des installations humaines obéissent à une logique inverse avec la fixation du trait de côte. Cette dynamique convergente est à l'origine des risques côtiers.(PASKOFF, 2001).

La conjugaison des forts aléas littoraux et d'enjeux naturels et socio-économiques concentrés sur un espace réduit crée une grande vulnérabilité sur la frange côtière, ce qui impose un besoin croissant de gestion plus globale, prenant en compte les milieux, leurs ressources et les activités qui s'y développent.

Face aux risques naturels notamment l'élévation du niveau de la mer, la zone côtière est fragile et vulnérable, si la remontée du niveau de la mer s'accélère, les impacts sur la zone d'étude seraient importants, dans la prospective d'une hausse accélérée du niveau de la mer, il s'avère donc important d'élaborer pour la baie de Zemmouri une cartographie des zones les plus vulnérables à l'élévation du niveau de la mer, afin de faciliter le suivi des modifications physiques et les impacts attendus sur cette zone.

Ce chapitre fait l'objet d'une étude synthétique, pour l'évaluation de l'état de la vulnérabilité de la zone d'étude, par rapport aux facteurs physiques et socio-économiques. Cette évaluation tient compte de l'avis des experts et implique plusieurs acteurs, qui ont intégré des données quantitatives et qualitatives pour le calcul de l'indice de vulnérabilité côtière (CVI).

1. Méthodologie :

Le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC) définit la vulnérabilité climatique comme « le degré par lequel un système risque de subir ou d'être affecté négativement par les effets néfastes des changements climatiques, y compris la variabilité climatique et les phénomènes extrêmes. La vulnérabilité dépend du caractère, de l'ampleur, et du rythme des changements climatiques auxquels un système est exposé, ainsi que de sa sensibilité, et de sa capacité d'adaptation ». L'analyse des conséquences suit a une remontée du niveau marin a montré que les dégâts seraient considérables sur les plans physiques et socioéconomiques.

Pour mener à bien cette étude nous avons utilisé le logiciel de cartographie ArcGis qui nous a permis de cartographier la vulnérabilité des différents territoires de la zone d'étude, cela va permettre aux décideurs de prendre les décisions adéquates en vue d'une gestion rationnelle et durable de la zone côtière.

1.1. L'indice côtier de vulnérabilité physique (ICV_{phys}) :

La vulnérabilité physique signifie que la zone côtière est susceptible de subir des perturbations d'ordre physique telles que l'inondation, l'érosion, la migration des plages suite à une élévation du niveau de la mer (**LATRECHE, Mostefa**).

Le long de tout littoral, présente un ensemble des bandes ou des segments, chaque segment côtier ou chaque rivage aura une responsabilité à répondre défavorablement à un risque, c'est le degré de vulnérabilité, il est défini par l'indice côtier de vulnérabilité -ICV- (**GORNITZ et al. 1994**).

Cet indice est critiquable dans la mesure où tous les paramètres pèsent le même poids dans l'équation empirique, alors que les forçages jouent différemment sur les différents types de côtes (falaises, côtes basses exposées aux houles, plages de baies...). De plus, cette approche mélange les forçages (marée, houle, montée de la mer) avec leurs conséquences géomorphologiques (taux de recul du rivage).

✓ Les variables de l'indice de la vulnérabilité physique

Six variables ont été sélectionnées en raison de leur utilisation dans la mesure des risques pour le littoral, et sont classées selon une échelle de 1 à 5, et suivant un ordre de vulnérabilité croissant d'après (**GORNITZ et al. 1994**); la valeur 1 correspond à un risque très faible, et 5 au plus élevé. Les six variables sont les suivantes :

- La géomorphologie
- La pente côtière
- Le niveau de la mer
- Le marnage
- Taux d'évolution
- L'amplitude moyenne de la houle

Tableau 17 : Classification des variables de la vulnérabilité côtière physique. (MCLAUGHLIN S., MCKENNA J.).

Variables	Classes de l'indice côtier de vulnérabilité physique (ICV _{Physique})				
	Très Bas	Bas	Modéré	Elevé	Très Elevé
	1	2	3	4	5
Géomorphologie.	Falaise et côte rocheuse	Falaise moyenne et baie	Falaise basse, dépôt glaciaire, plaine alluviale	Plage à galets, estuaire, lagune	Flèche, plage sableuse, marais, dépôt vaseux, delta, récifs à coraux et mangroves.
Pente côtière (%).	>12	12 – 9	9 – 6	6 – 3	<3
Remontée relative du niveau de la mer (mm/an).	<1,8	1,8 – 2,5	2,5 – 3,0	3,0 – 3,4	>3,4
Recul/Avancée du trait de côte (m/an).	> (+2,0)	(+1,0)- (+2,0)	(-1,0) – (+1,0)	(-2,0) – (-1,0)	< (-2,0)
Amplitude moyenne de la marée.	>6,0	4,0 – 6,0	2,0 – 4,0	1,0 – 2,0	<1,0
Amplitude moyenne de la houle (m).	<0,55	0,55 – 0,8	0,85 – 1,05	1,05 – 1,25	>1,25

Après la détermination des valeurs de l'ICV, on procède à la création de catégories par l'utilisation des quartiles statistique (0-25%. 25-50%, 50-75% et 75-100%) et par l'inspection visuelle des données, ces catégories se caractérisent respectivement à une faible vulnérabilité, modérée, élevée, et très élevée. Chaque valeur calculée tombe dans le quartile pertinent, alors chaque région côtière se caractérise en conséquence.

1.1.1. Calcul d'indice de vulnérabilité physique

L'ICV est calculé d'après la formule de (GORNITZ et al. 1994). C'est la racine carrée du produit des différents paramètres ou variables divisée par le nombre de variables utilisées (Equation.) :

$$CVI = \sqrt{\frac{a*b*c*d*e*f}{6}}$$

- a- Caractéristiques géomorphologiques,
- b- Pente de la zone côtière (cote « basse » ou « haute »),
- c- Montée historique locale du niveau moyen de la mer,
- d- Taux du recul du rivage, indicateur de l'érosion littorale,
- e- Amplitude moyenne de la marée,
- f- Hauteur moyenne de houle près des côtes.

1.2. Résultats et discussion :

- **La variable géomorphologie**

La géomorphologie est la science qui concerne l'étude de l'origine et du développement des formes de relief et des paysages ainsi que l'histoire de la surface terrestre, tandis que la géomorphologie côtière traite des formes de relief le long du littoral (**HEREHER**).

Le secteur d'étude possède une variété des formes des reliefs due essentiellement à l'alternance des agents hydrodynamiques et la nature du terrain. Ces données sont acquises à partir cartes anciennes et aussi des investigations sur le terrain.

D'après la carte de vulnérabilité selon la variable géomorphologie on remarque que les deux caps (Cap Blanc et Cap Matifou) présentent une vulnérabilité très basse suite à leur nature rocheuse et dure, par contre la partie Est et Ouest du littoral présentent un degré de vulnérabilité oscille entre élevée (4) et très élevée (5) respectivement (majoritairement des plages sableuses). Le reste de la zone présente des degrés de vulnérabilité modérée et basse (les cotes artificialisées et les ports).

- **La variable pente côtière :**

Elle permet une évaluation non seulement du risque relatif à la rapidité potentielle du recul du trait de côte mais également du risque d'inondation, car les régions côtières à pente faible devraient régresser plus rapidement que les zones à déclivité plus raide (**PILKEY et DAVIS, 1987**).

Les travaux faites sur le littoral de la grande baie de Zemmouri montrent que la quasi-totalité du littoral présente généralement une pente faible dont la vulnérabilité est élevée à très élevée (figure 36). Alors que les plus fortes inclinaisons sont notées au niveau des Caps avec un degré de vulnérabilité bas à très bas (Cap Blanc et Cap Matifou).

- **La variable taux érosion/accrétion :**

Ce paramètre est un des plus utilisés pour les prédictions de risque à moyen terme. Tout comme la géomorphologie côtière, il résulte à la fois de l'influence de la géologie, du vent des vagues, des

marées (XHARDE, 2007), cette variation constitue donc un autre bon indicateur de la résistance des cotés à l'érosion et de leurs évolutions à plus ou moins long terme.

La cartographie de la vulnérabilité physique selon le recul de trait côte a été faite à partir des résultats obtenus par le calcul DSAS dans le chapitre précédent. Ces résultats montrent que la zone enregistre un degré de vulnérabilité très élevée au niveau de Oued Isser suite non seulement à l'extraction abusive de sable à des fins de construction mais aussi à la construction du barrage en amont de l'Oued ce qui provoque une pénurie sédimentaire. Les deux extrémités et le secteur centre de la grande baie de Zemmouri présentent respectivement un degré de vulnérabilité bas à très bas. Le reste du littoral présente des facteurs de risque relatif aux retraits, restent modérés à élevés.

- **La variable taux d'élévation du niveau de la mer :**

Comme le littoral algérien y compris celui de la baie de Zemmouri est soumis à la même vitesse d'élévation du niveau du bassin occidental de la méditerranée qui est de l'ordre de 2.5 mm/an, la vulnérabilité par rapport à cette variable est basse.

- **La variable marnage :**

Selon la base de données de GORNITZ et al. (1994), la marée est de type microtidal, elle rend ce littoral à risque très élevé.

La marée de type microtidale estimée par 35 cm rend le littoral de la grande baie de Zemmouri très vulnérable et fragile avec un degré de vulnérabilité d'ordre 5.

- **La variable amplitude moyenne des houles :**

Les segments du littoral avec des valeurs d'indice élevées auront des reliefs bas, un substrat facilement érodable, un recul du trait de côte important, et seront exposés à des énergies élevées de vagues (GORNITZ et al. 1994).

Les zones de Djinet, Zemmouri et Cap Matifou présentent un degré de risque faible(2), cependant la zone après Oued Isser et Boumerdes sont les segments les plus vulnérables en raison de leur exposition à des fortes houles de provenance multiples. Tandis que le reste de la baie est caractérisé par un degré de vulnérabilité modéré.

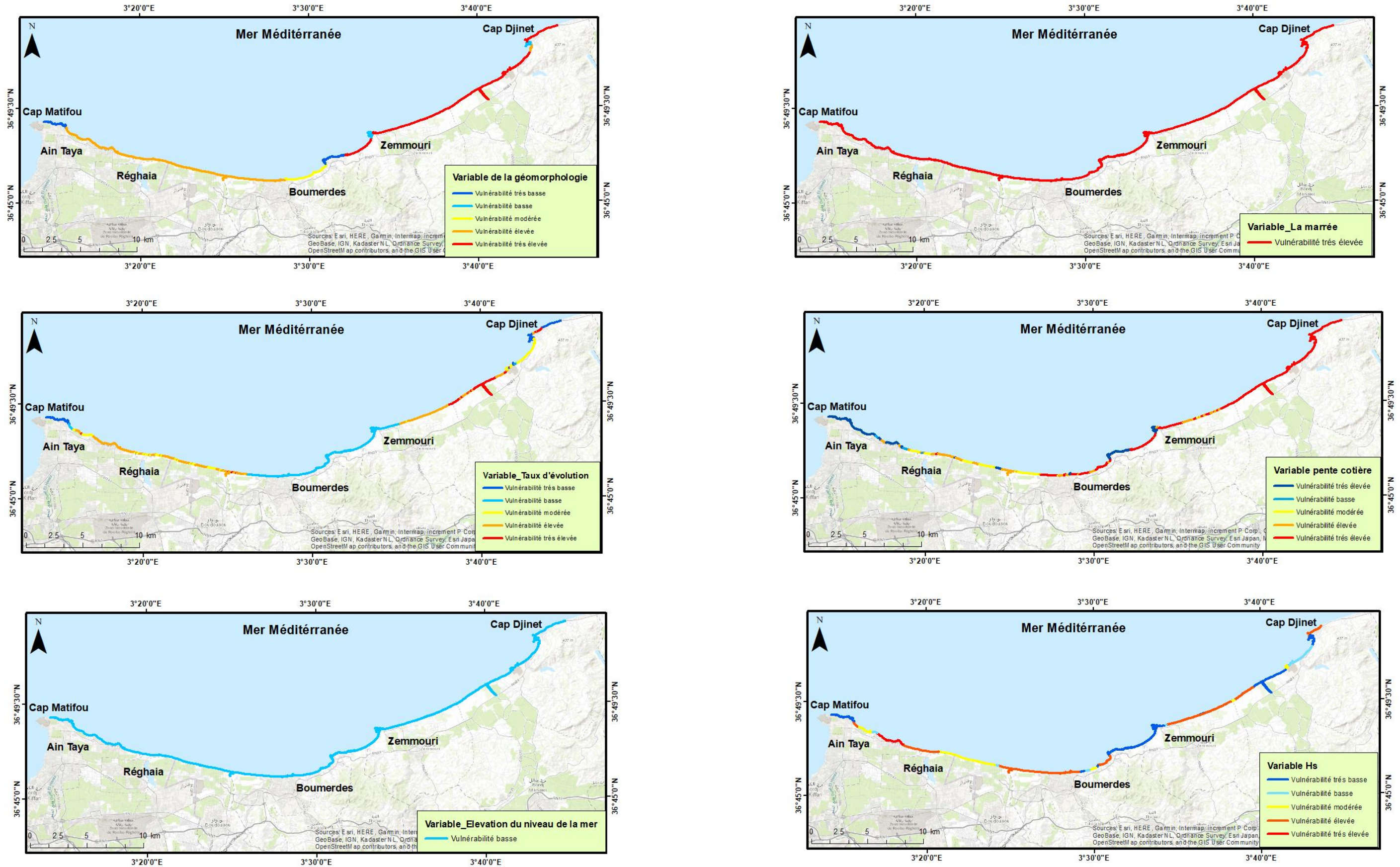


Figure 36 : Les six variables de l'indice de vulnérabilité physique (CVI_{physique}).

Le CVI physique calculé a été classé selon des intervalles et représenté graphiquement, cette représentation renseigne sur l'intensité et l'étendue de la vulnérabilité côtière de la zone, d'après le graphe (Figure 38), 43.7% soit 23.16 km du linéaire côtier est caractérisé par une vulnérabilité élevée.

La carte (Figure 37) montre que les secteurs extrême Est et Ouest sont ceux qui sont caractérisés par un degré de vulnérabilité élevée, sur un linéaire côtier de 23.16 km. En effet une vulnérabilité modérée est marquée sur 22.16 km, tandis que les côtes rocheuses et les ports enregistrent un risque faible (1).

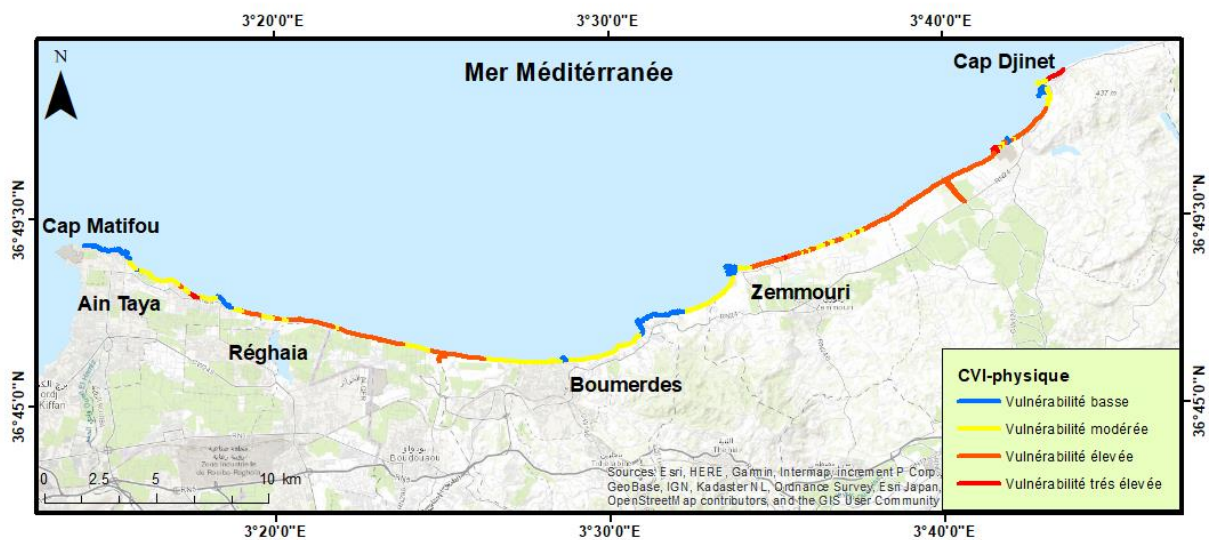


Figure 37 : CVI physique de la grande baie de Zemmouri.

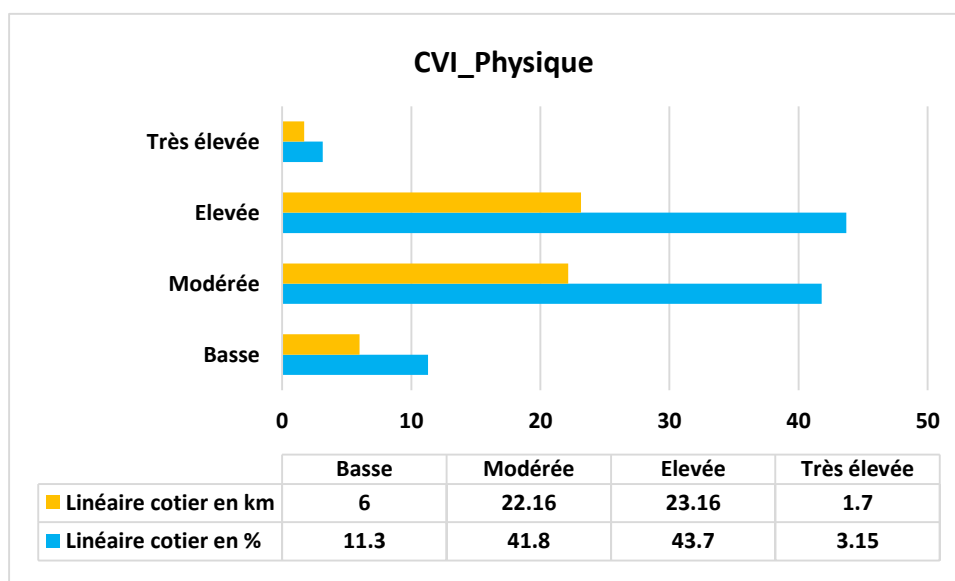


Figure 38 : Pourcentage du littoral de la baie de Zemmouri pour chaque degré de vulnérabilité physique suit à l'élévation du niveau de la mer.

1.3. L'indice côtier de vulnérabilité socio-économique (ICV_{socio-eco}) :

La vulnérabilité socio-économique est définie comme : "la sensibilité différentielle, dans un sens général, parmi des groupes sociaux et des lieux risquant de supporter des pertes dues aux risques" (DOW, 1992, in NIAZI, 2007).

Elle peut être évaluée à différentes échelles d'analyse qui vont de la commune jusqu'à la dimension régionale. Elle peut être appréciée en intégrant des variables relatives aux infrastructures, biens, activités, patrimoines, aires protégées, ou encore des éléments qui relèvent de la gestion (ROBIN et al., 2008).

Les cotations et les degrés de vulnérabilité sont indexés respectivement de 1 à 5 autrement dit du plus faible au plus fort.

Les variables de cet indice selon MCLAUGHLIN et al., 2002 sont utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité socio-économique du littoral de la grande baie de Zemmouri portant sur plusieurs indicateurs socio-économiques de la zone côtière, selon ces auteurs, le choix de des variables est conditionné par la possibilité d'obtention des données et leur importance pour le système côtier.

✓ Les variables de l'indice de vulnérabilité socio-économique

Les variables socioéconomiques sélectionnées selon MCLAUGHLIN et al, (2010), sont les suivantes (NIAZI, 2007):

- La population
- Le patrimoine culturel
- Les routes
- Les voies ferrées
- L'occupation du sol
- Les désignations de conservation

Tableau 18 : Présentation des variables retenues pour le calcul du CVI socio-économique.

Variables	Très faible	Faible	Modéré	Fort	Très fort
	1	2	3	4	5
Population	Absente	Village	Petite ville	Ville	Grande ville
Réseaux routiers	Absent	-	Route	-	Autoroute
Réseaux ferrés	Absent	-	-	-	Présent
Occupation du sol	Les plans d'eau Espace vert roches nues	Prairie naturel	Forêt	Activité agricole	Zone urbanistique, d'infrastructure et industriel
Patrimoine culturel	Présent	-	-	-	Absent
Statut de protection	Absent	-	International	-	National

1.3.1. Calcul d'indice de vulnérabilité socio-économique

Les variables totales et leurs classements sont donnés dans le tableau 18. Une fois que les six variables sont déterminés, les valeurs obtenues sont additionnées ensemble. Le score obtenu est ensuite divisé par 30 et finalement multiplié par 100.

$$CVIeco = \left(\frac{(a+b+c+d+e+f)}{30} \right) * 100$$

a : Population

b : Patrimoine culturel

c : Réseau routier

d : Voies ferrées

e : Occupation du sol

f : Désignation de conservation

Les CVI calculés sont classés dans des intervalles égaux, afin de leurs donner des niveaux de vulnérabilité.

Tableau 19 : Les différentes classes de la vulnérabilité côtière socio-économique.

CVI	Score	Intensité
20 - 30	2	Basse
31 - 50	3	Modérée
51 - 70	4	Elevée
71 - 80	5	Très élevée

1.4. Résultats et discussion

- **Variable de population**

D'après **MCLAUGHLIN et al. (2002)**, la variable de la population caractérise les habitats et les agglomérations. Il a été classé sur une base de 1 à 5, avec l'hypothèse que le plus grand nombre de personnes qui serait affecté par l'érosion et/ou l'inondation, présente une vulnérabilité élevée. Cette hypothèse suscite des critiques, étant donné que certaines villes ou agglomérations littorales présentent des défenses côtières et que les effectifs de la population à risque et les habitats peuvent changer au cours des années. Dans le cas du littoral de la grande baie de Zemmouri, nous avons utilisé la classification de **MCLAUGHLIN et al. (2002)**.

La zone d'étude est caractérisée par le développement urbanistique, économique et démographique le long de son littoral qui s'étend sur environ 53 km du linéaire côtier. D'après la cartographie de la vulnérabilité selon la variable agglomération on remarque que la zone enregistre un degré de vulnérabilité élevée sur la quasi-totalité du littoral.

- **Variable de patrimoine culturel**

Cette variable inclut les monuments historiques et les sites archéologiques ; ces derniers ne sont pas importants en terme économique mais le sont considérablement en termes sociaux et culturels. Ils font partie des ressources culturelles et sont irremplaçables. **HOPLEY, 1992** a noté que bien que l'érosion côtière dans quelques régions soit inévitable en raison de la hausse du niveau de la mer, la protection est nécessaire pour certains sites "à cause de la valeur d'investissement, celle historique de l'héritage culturel, ou à cause du manque d'alternatives". Cela fait ressortir l'importance de la vulnérabilité du patrimoine culturel dans la zone côtière. Bien qu'un site puisse être mieux conservé qu'un autre, cela ne veut pas dire qu'il est plus important. Vu la difficulté de donner une valeur à une ressource de l'héritage culturel, les sites sont alors classés soit dans la plus haute catégorie (5), ou bien pour une région sans site archéologique (1). La zone d'étude ne présente aucun héritage culturel, dans ce fait la partie côtière de la baie de Zemmouri est considéré comme étant faiblement vulnérable avec un degré de 1 par rapport à cette variable.

- **Variable des réseaux routiers**

Le degré de vulnérabilité cette variable est divisé entre premier degré dans le cas d'absence de route est cinquième degré dans le cas de présence de route selon le tableau X

Dans notre zone d'étude et d'après la carte représentative de la vulnérabilité selon la variable réseaux routiers, on remarque que les 3 pointements (Cap Djinet, Cap Blanc et Cap Matifou), le port de Zemmouri et la région de Boudouaou El Bahri présentent une vulnérabilité très élevée(5), tandis que les régions des embochures (Oued Isser, Oued Safsaf, Oued Corso, Oued Réghaia...etc.) possèdent un degré de risque faible (1).

- **Variable des voies ferrées**

La zone d'étude présente une vulnérabilité basse à très basse respectivement au niveau des ports et les deux caps (Cap Matifou et Cap Blanc), et une vulnérabilité élevée à très élevée respectivement au niveau de la partie Est et Ouest. Le rest du littoral(partie centre :commune de Boumerdes) présente un degré de vulnérabilité modéré (3).

- **Variable occupation du sol**

La protection d'une région jugée vulnérable sera prise en considération seulement si la région est suffisamment « importante » en termes économique, culturel ou environnemental, pour justifier sa protection. Par conséquent le type d'occupation du sol est significatif dans la détermination de la vulnérabilité. La « valeur » de la terre peut être définie selon différents critères, soit en terme monétaire, ou bien en termes esthétiques ou encore en valeur de conservation foncière. Mais étant donné la difficulté d'acquérir ces données, McLaughlin et al., 2002 suggèrent que le classement économique soit basé sur une estimation subjective de l'utilisation des terres qui peuvent être plus ou moins précieuses (ou utiles) que d'autres.

L'analyse globale a relevé que la zone d'étude possède une vulnérabilité de 5eme degré majoritairement dans les endroits où les infrastructures lourdes sont installées (le port de Zemmouri et du Cap Djinet et les ouvrages de Boumerdes et de Ain Taya), le reste de littoral est distribuer entre vulnérabilité élevée, basse à très basse.

- **Variable de désignation de conservation**

La désignation identifie une région d'importance internationale ou nationale, où les efforts de conservation et de développement durable sont déployés. Il s'agit des aires délimitées, protégées et gérées en fonction d'objectifs de conservation. La classification de ces aires désignées est représentée sur le tableau. Dans la zone d'étude 2 régions sont nettement plus vulnérables (lac Réghaia qui est un site Ramsar d'importance international) que le reste du littoral de la baie qui est à son tour présente une vulnérabilité très basse (1).

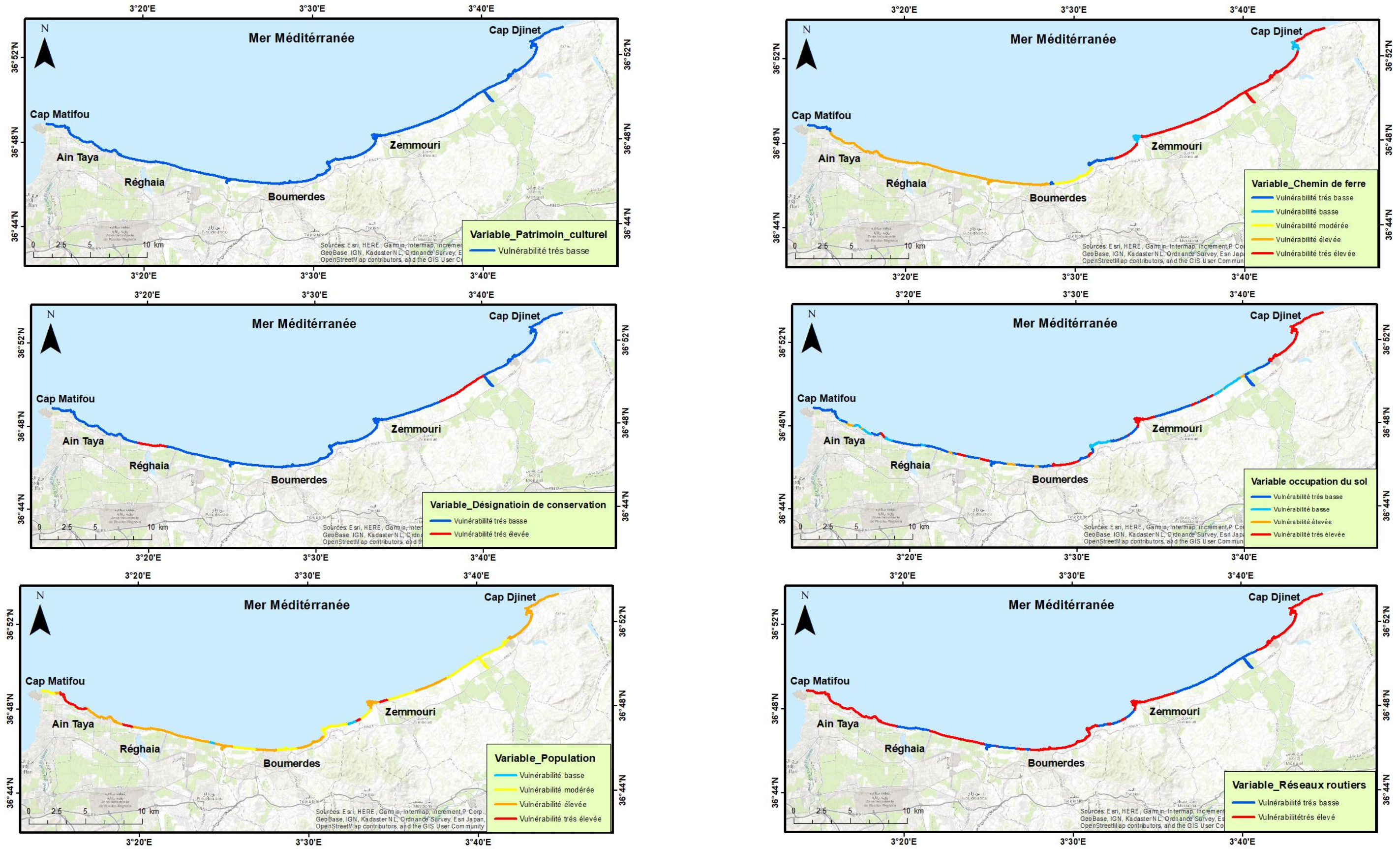


Figure 39 : Les six variables de l'indice de vulnérabilité socioéconomique (CVIeco).

Les résultats de cette étude montrent que sur cette frange littorale qui s'étale sur environ 53 km de linéaire côtier, 57.5% soit 35.8 km enregistre un degré de vulnérabilité élevée. La carte de synthèse de l'état de vulnérabilité de la zone d'étude relève que cette intensité caractérise principalement la zone de Djinet, Zemmouri, Boumerdes et Réghaia, cela peut être justifié par l'invasion rapide du tissu urbain et le développement économique qui s'exerce sur ces segments du littoral. Cependant 30% soit 15.5 km de linéaire côtier présente un risque modérée. Le reste du littoral présente un risque faible à très élevé avec un pourcentage de 1.63%.

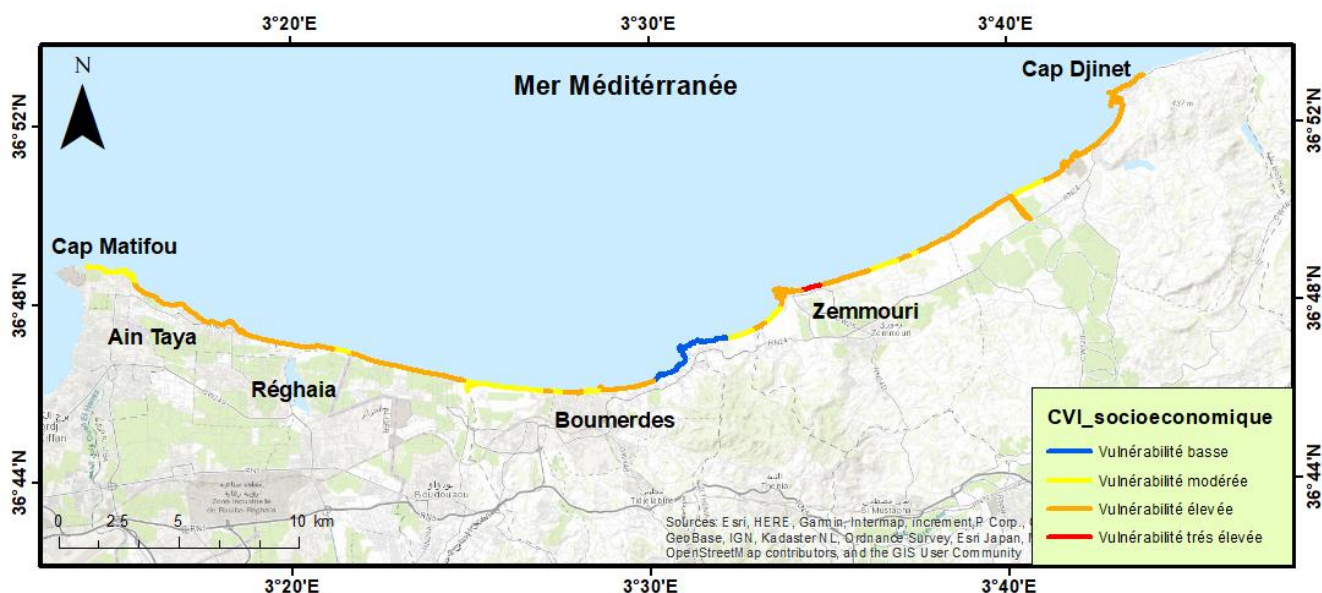


Figure 40 : L'indice de vulnérabilité socioéconomique de la grande baie de Zemmouri (CVIeco).

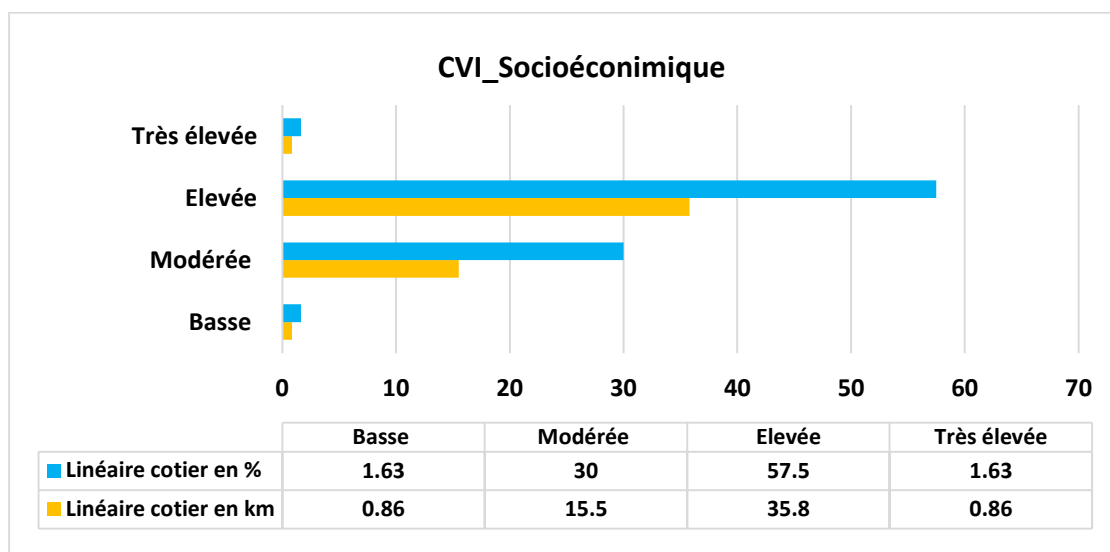


Figure 41 : Pourcentage du littoral de la baie de Zemmouri pour chaque degré de vulnérabilité socio-économique suit à l'élévation du niveau de la mer.

1.5. Evaluation de la vulnérabilité physique et socio-économique du littoral de la grande baie de Zemmouri :

La grande baie de Zemmouri qui s'étale sur environ 53 km de linéaire côtier est soumise à la fois à des perturbations d'ordre physique et socioéconomique qui la rendent fortement vulnérable face à une élévation du niveau marin suite à un bouleversement climatique. Afin de donner des résultats finaux sur l'évaluation d'état de la zone d'étude, selon les deux volets ; une superposition des deux cartes a été faite.

D'après la Figure 42, on constate que cette portion côtière possède sur la quasi-totalité de son littoral un risque de vulnérabilité élevé (4) à l'exception de quelques segments où le risque est faible (2) à modéré (3).

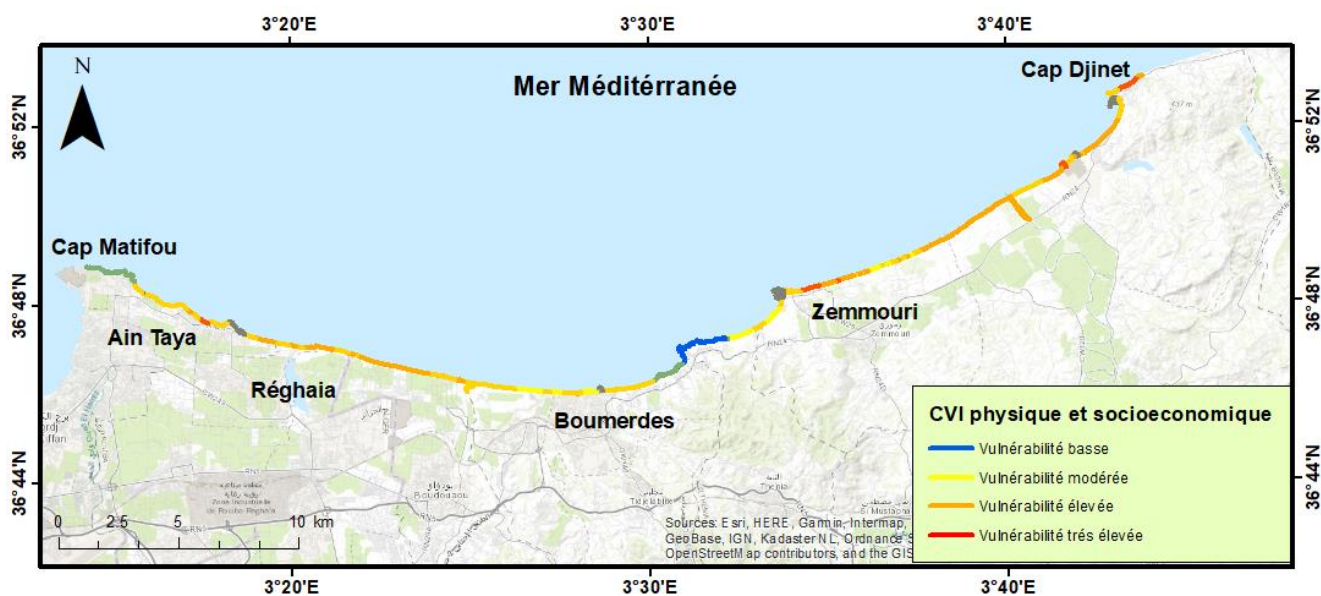


Figure 42 : Carte de superposition de CVI physique et socio-économique du littoral de la grande baie de Zemmouri.

Conclusion

La présente étude atteste de l'utilité de la télédétection, des SIG et des observations in-situ comme outils de prévention contre les risques côtiers. La zone d'étude est soumise à des perturbations non seulement physiques mais aussi socioéconomiques qui doivent être pris en considération, afin de donner un élément de réponse concret qui fait l'objet de l'évaluation de l'état de vulnérabilité de cette portion côtière.

La détermination de l'indice côtier de vulnérabilité physique selon **GORNITZ et al (1994)** a montré une vulnérabilité élevée à l'élévation du niveau de la mer au niveau des extrémités Est et Ouest où la zone est topographiquement basse environ 43.7% soit 23.16 km de linéaire côtier et faible à modérée au niveau du secteur centre (Boumerdes et Boudouaou El Bahri). Quant à l'indice de vulnérabilité socio-économique, il a été calculé pour l'ensemble du littoral de la baie de Zemmouri sur la base de composantes essentielles des régions côtières suivant la méthode de **MCLAUGHLIN et al (2002)** ; il a montré une forte vulnérabilité sur la quasi-totalité du rivage environ 57.5% soit 35.8 km de linéaire côtier. Ces résultats font appeler à une réflexion objective et une refonte globale et approfondie des modes actuels d'aménagements de cette frange côtière. A cet effet la connaissance de la vulnérabilité selon les deux volets physique et socioéconomique va aider les décideurs locaux et les planificateurs à concevoir des stratégies pour anticiper les effets de la montée du niveau de la mer sur les différentes composantes de la zone.

Chapitre VII : Submersion marine

Introduction

Aujourd'hui, il est largement admis que les catastrophes côtières sont assignables au changement climatique planétaire. Ces catastrophes naturelles auront un impact négatif sur la zone côtière dans la mesure où elle abrite des établissements humains et des infrastructures. Longue d'un peu plus de 1600 km, la côte algérienne constitue un atout indéniable pour le développement économique et social de tout le territoire national algérien, en particulier le développement du tourisme. Cette côte présente également certains risques pour son exploitation et son développement, y compris les problèmes liés à l'érosion et les inondations côtières. Ces impacts peuvent augmenter avec l'élévation attendue du niveau marin (**Jimenez et Sánchez-Arcilla, 1997**). L'élévation effective et attendue du niveau de la mer Méditerranée représente l'un des enjeux majeurs pour l'Algérie durant les années à venir.

La faible topographie de la zone d'étude accentuée par une occupation humaine excessive et parfois anarchique l'ont rendu vulnérable face à ce nouvel épisode de hausse du niveau moyen de la mer Méditerranée et l'amplification de phénomènes de submersions marines et donc l'érosion de cette frange côtière.

➤ La submersion marine

MATE (1997) a défini la submersion marine comme suit : « La submersion marine est définie comme une inondation temporaire de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques et marégraphiques sévères », généralement né de la conjonction de phénomènes extrêmes (dépression atmosphérique, vent, houle, pluie) et de forts coefficients de marée provoquant une surcote importante du plan d'eau.

Les submersion envahissent généralement les terrains situés en dessous du niveau des plus hautes mers mais atteignent aussi parfois des altitudes supérieures si des projections d'eaux marines franchissent des ouvrages de protection et/ou la crête des cordons littoraux.

Elles peuvent se produire lorsqu'il y a :

- ✓ Rupture d'un cordon sédimentaire (plage, dunes, cordon de galets) suite à une forte érosion ;
- ✓ Débordement ou rupture de digues et d'ouvrages de protection ;
- ✓ Franchissement exceptionnels de ces ouvrages par des « paquets de mer ».

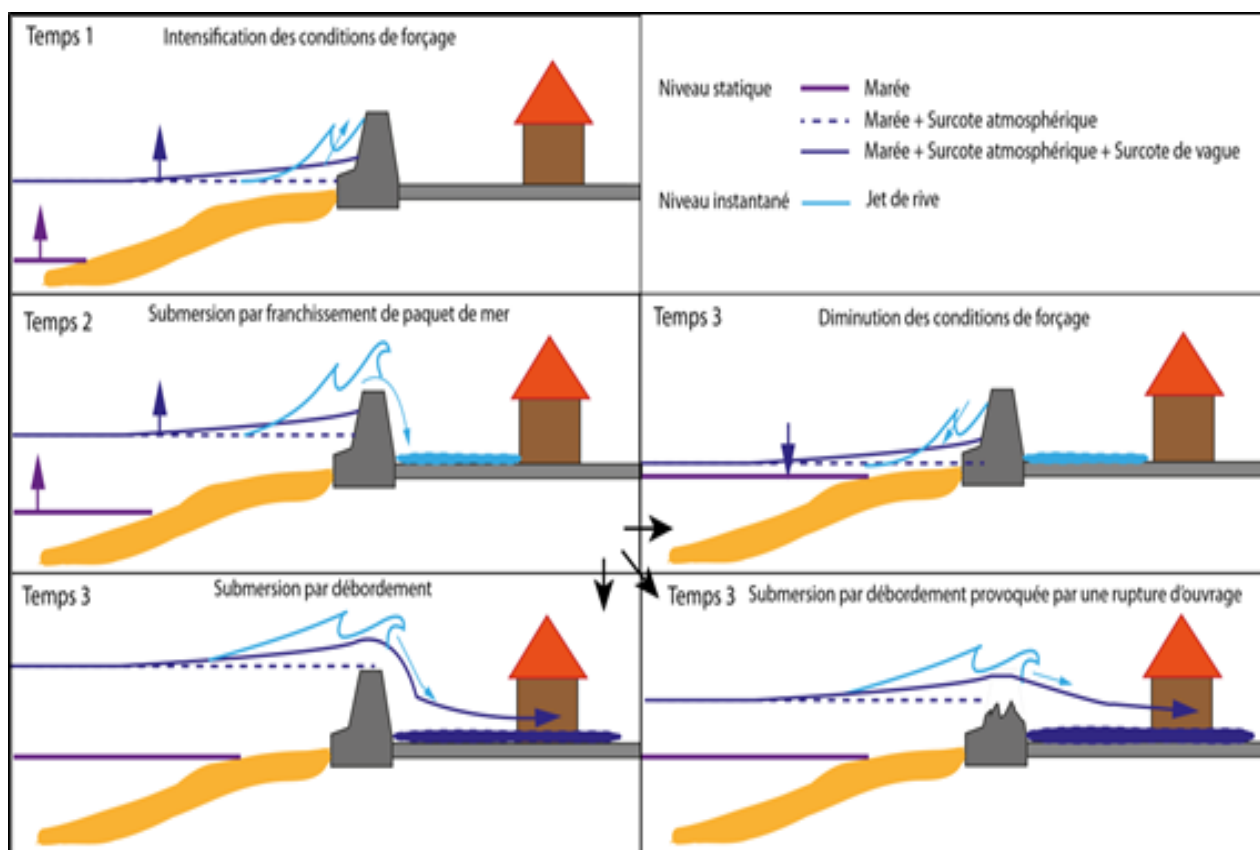


Figure 43 : Typologie des submersions marines (franchissement, débordement, rupture d'ouvrage).(BRGM et Cachan, 2012).

➤ **Rappels théoriques sur les phénomènes physiques responsables des submersions marines d'origine météorologique**

Les processus physiques responsables de la submersion marine (Figure 45) 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 atteint par le jet-de-rive sur la côte.

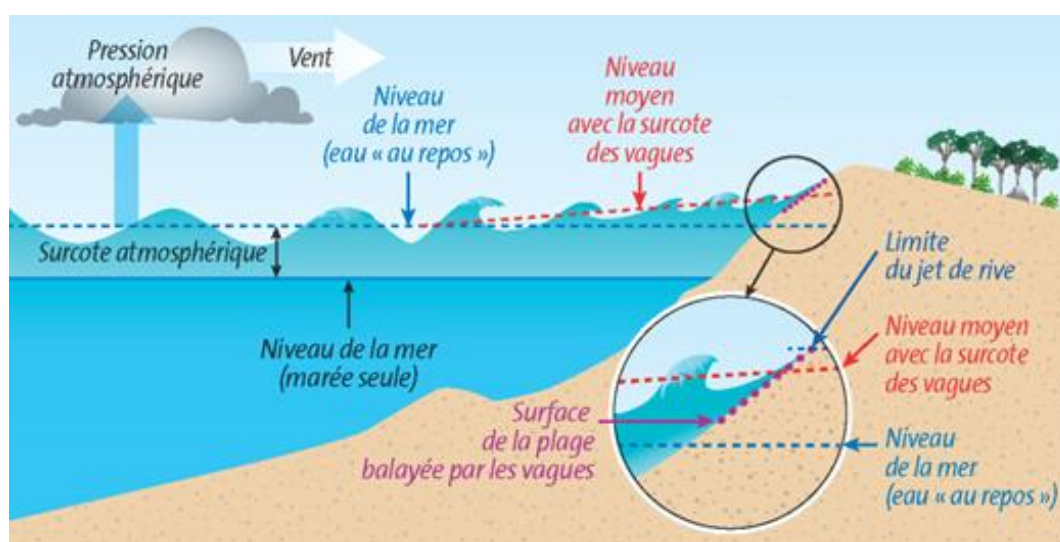


Figure 44 : Processus physiques en action lors d'une tempête : agitation et surélévation du plan d'eau. (BRGM, 2012).

1. 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 quatre 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 (Figure 45).
- ✓ 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.

1.1. Scénarios de niveaux d'eau extrêmes :

En l'absence des données concernant les surcotes et décotes, enregistrements marégraphiques et de tempêtes au large de la côte de la zone d'étude, les niveaux d'inondation ont été calculés à partir l'équation de **HOOZMANS et al., 1993**:

$$D_{ft} = MHW + S_t + W_f + P_f$$

où:

MHW : Niveau moyen des hautes eaux ;

S_t : Elévation relative du niveau de la mer ;

W_f: Hauteur des houles de tempêtes responsables des inondations ;

P_f: Elévation du niveau marin en fonction de la pression atmosphérique.

✓ Hauteur significative au large

Les données utilisées pour cette étude est celle extraites du site web des observations météorologique « <https://era5.ru/> » au niveau de la station de mesure de Dar El Beida couvrant une période de 27 ans allant de 1992 à 2019.

Le traitement des données des houles au large de la zone d'étude nous a permis de faire une classification des fréquences d'apparition annuelles des classes des hauteurs significative par direction afin d'identifier la direction et l'amplitude des houles responsables des inondations côtières (Chapitre I).

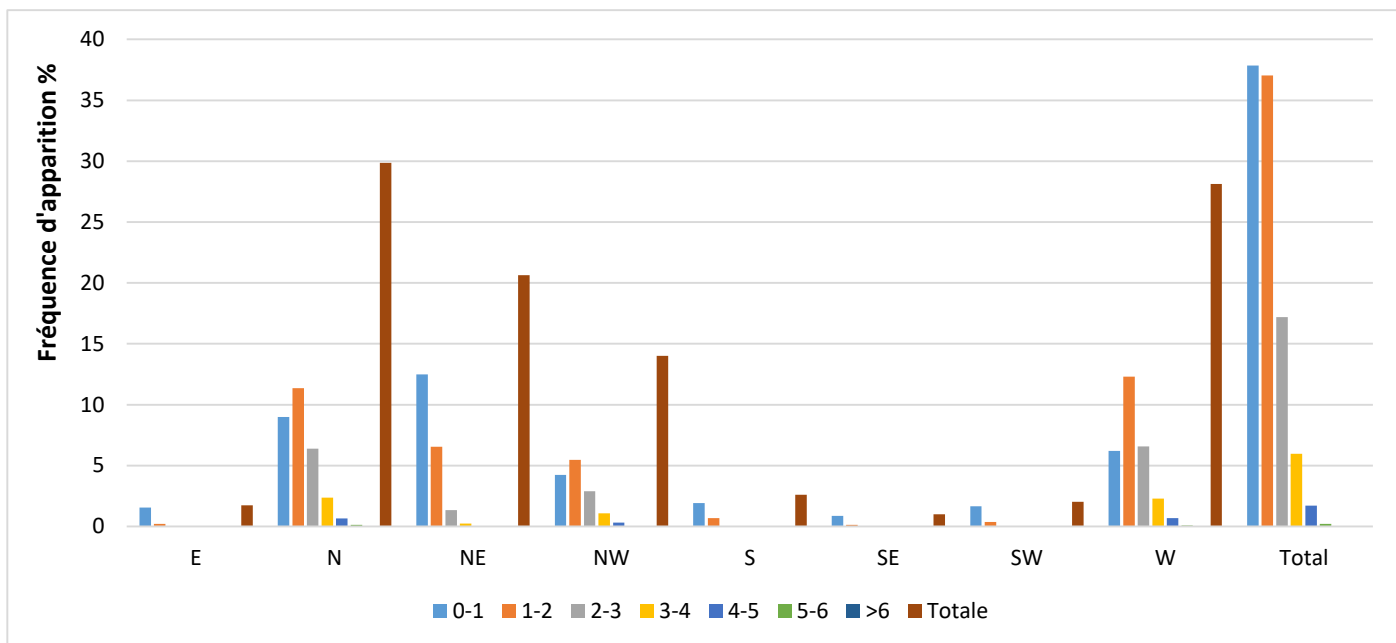


Figure 45 : Histogramme de la distribution fréquentielle des classes des hauteurs significatives par direction.

✓ **Etude des houles extrêmes au large :**

La définition de la distribution de probabilité d'événements de grande ampleur et extrêmes est utile dans le calcul des niveaux d'inondation. La détermination du climat d'agitation à long terme a pour but d'associer une hauteur de la houle à une période de retour donnée (habituellement 30 à 100 ans). (CIRIA, et al. 2009).

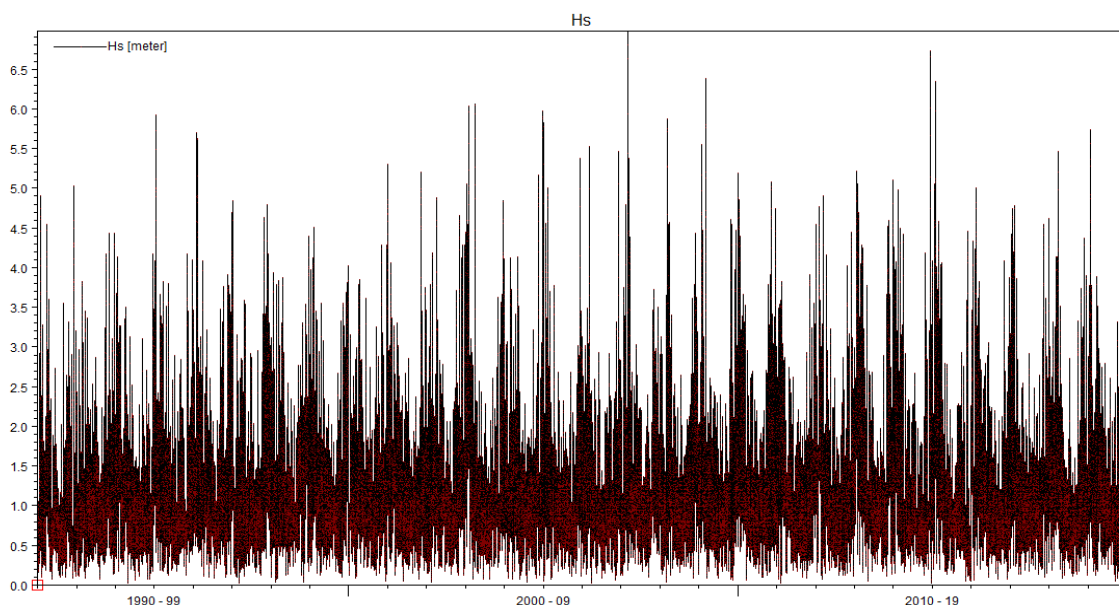


Figure 46 : La distribution des amplitudes de houles en fonction du temps (1992-2020).

Par définition, la houle de période de retour R est la houle dont l'amplitude $H(R)$ est atteinte et dépassée en moyenne pendant une durée cumulée de 24 h au cours d'une durée totale égale à R années. Sa probabilité d'occurrence s'exprime par :

$$P = \frac{24}{365 * 24 * R} = \frac{1}{365 * R}$$

R : Nombre d'année ($R = 1$: Houle annale, $R = 2$: Houle biennale, $R = 5$: houle quinquennale, $R = 10$: Houle décennale, $R = 20$: Houle vingtennale, $R = 50$: Houle cinquennale, $R = 100$: Houle centennale, ...).

Si on considère que l'état de la mer change 3 fois par 24 heures l'équation de la probabilité d'occurrence devient :

$$P = \frac{24}{3 * 365 * 24 * R} = \frac{1}{3 * 365 * R}$$

Une fois la période de retour fixée, la hauteur correspondante peut être déterminée par extrapolation de la courbe hauteur-probabilité dont on suppose qu'elle évolue selon la loi de LARRAS qui suppose que les valeurs des creux extrêmes peuvent être approchées par l'équation :

$$H = B - A \log P$$

Où

- A : Pente
- B : Intersection de la droite de régression avec l'axe y .
- H : Hauteur de la houle R -annale (m).
- P : Probabilité d'occurrence de la houle R -annuelle.

La démarche adoptée consiste à déterminer la pente A et l'intersection B à partir de la droite de régression tracée en fonction des Hauteurs significatives (H_s) de l'enregistrement disponible et des fréquences cumulées correspondantes ($-\log(F)$).

Ces deux valeurs (A et B) seront appliquées dans la loi de LARRAS pour déterminer les H extrêmes (R -annuelles) en fonction des probabilités d'occurrence (R -annuelles) correspondante.

Tableau 20 : Résultats des hauteurs significatives associées aux périodes de retour (m).

Période de retour (R)	N	NE	NW	E	W
Houle annuelle (1 an)	5.45	3.35	5.67	2	4.73
Houle biennale (2 ans)	6.023	3.68	6.2	2.17	5.18
Houle Quinquennale (5 ans)	6.78	4.13	6.9	2.4	5.77
Houle Décennale (10 ans)	7.33	4.45	7.42	2.57	6.21
Houle veingtenale (20 ans)	7.9	4.78	7.94	2.74	6.66
Houle Cinquantennale (50 ans)	8.66	5.22	8.65	2.97	7.26
Houle Centennale (100 ans)	9.22	5.54	9.16	3.14	7.7

D’après le tableau ci-dessus, les fortes agitations marines proviennent des secteurs N, W et NW avec des amplitudes qui oscillent entre 5.18 m et 9.22 m pour les houles biennale et centennale respectivement.

Les houles les plus faibles proviennent d’Est avec une amplitude minimale biennale de 2.17 m.

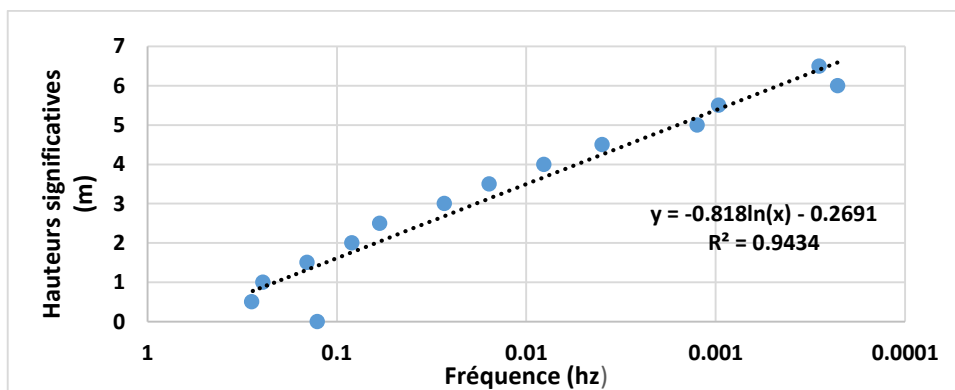


Figure 47 : Corrélation entre Hs et la fréquence d’apparition des houles de direction N au large de la grande baie de Zemmouri.

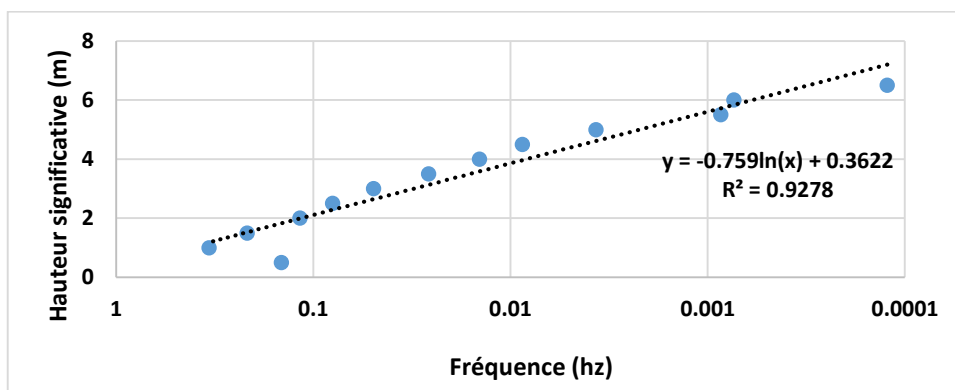


Figure 48 : Corrélation entre Hs et la fréquence d’apparition des houles de direction NW au large de la grande baie de Zemmouri.

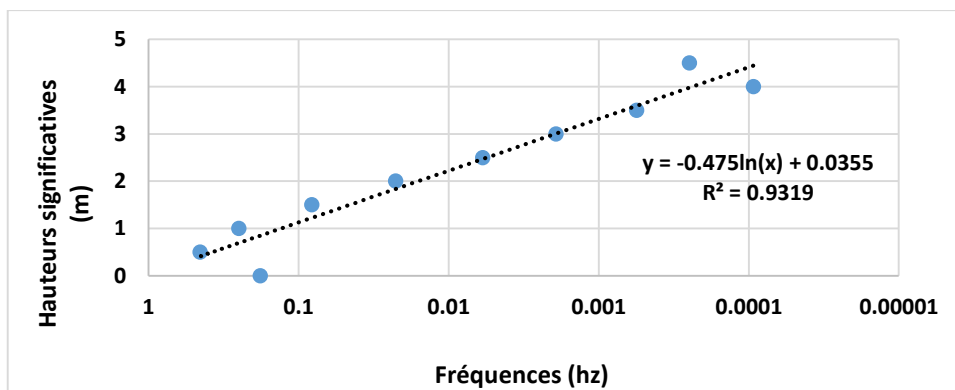


Figure 49 : Corrélation entre Hs et la fréquence d’apparition des houles de direction NE au large de la grande baie de Zemmouri.

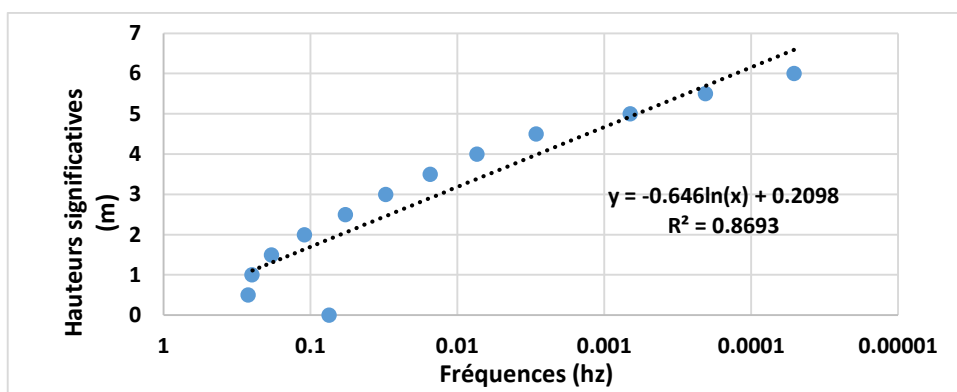


Figure 50 : Corrélation entre Hs et la fréquence d’apparition des houles de direction W au large de la grande baie de Zemmouri.

✓ **Les houles extrêmes à la cote :**

D’après les résultats de l’étude des houles extrêmes au large, on a pris la moyenne des amplitudes des houles provenant de la direction NW comme étant les plus défavorables pour le site d’étude. Les résultats de simulation de ces houles sont présentés dans les figures et le tableau suivant :

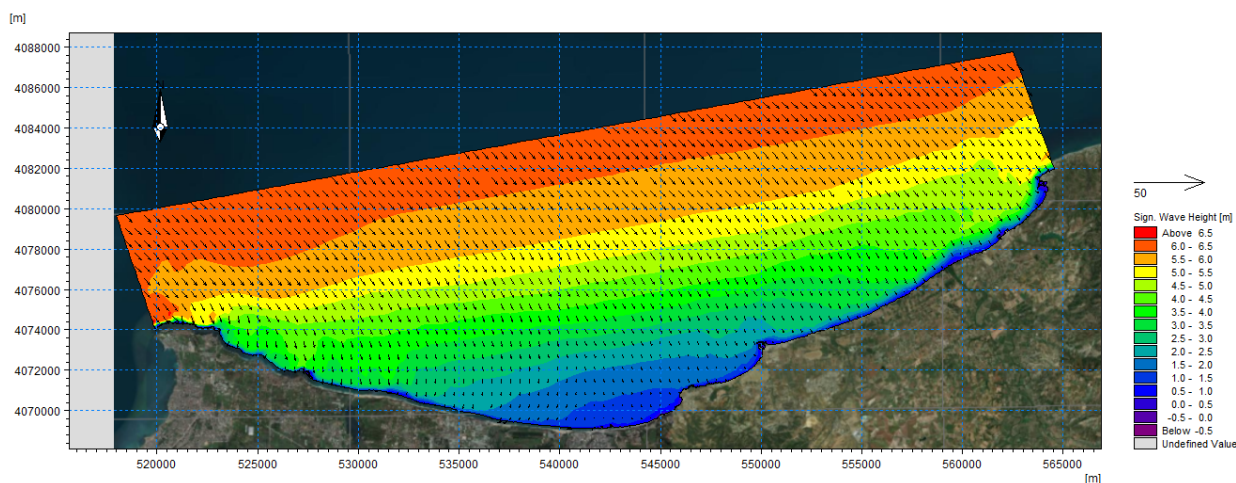


Figure 51 : Le plan de vague de la direction NW associé à la période de retour 2ans

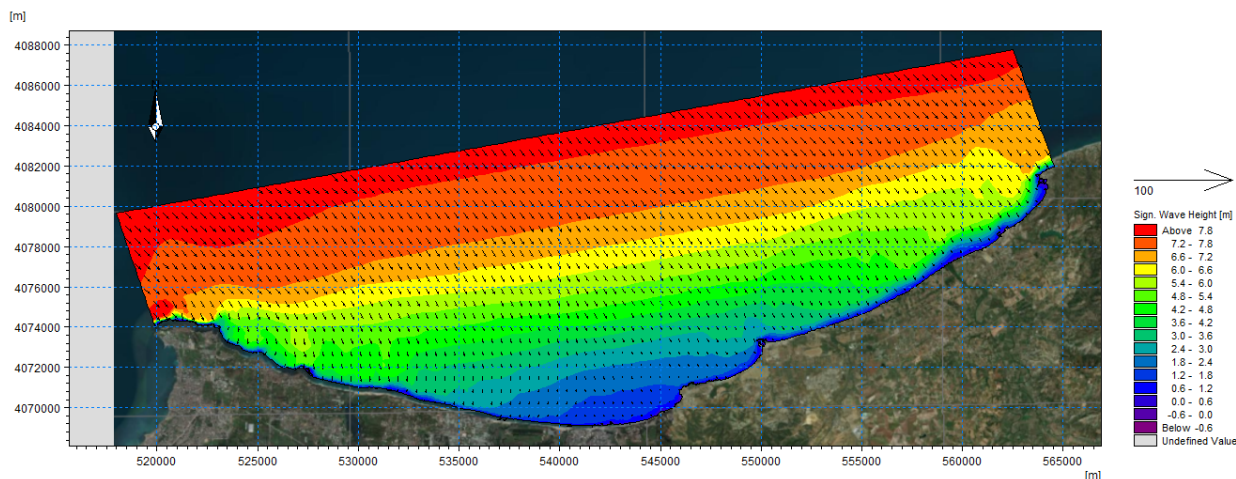


Figure 52 : Le plan de vague de la direction NW associé à la période de retour 20ans

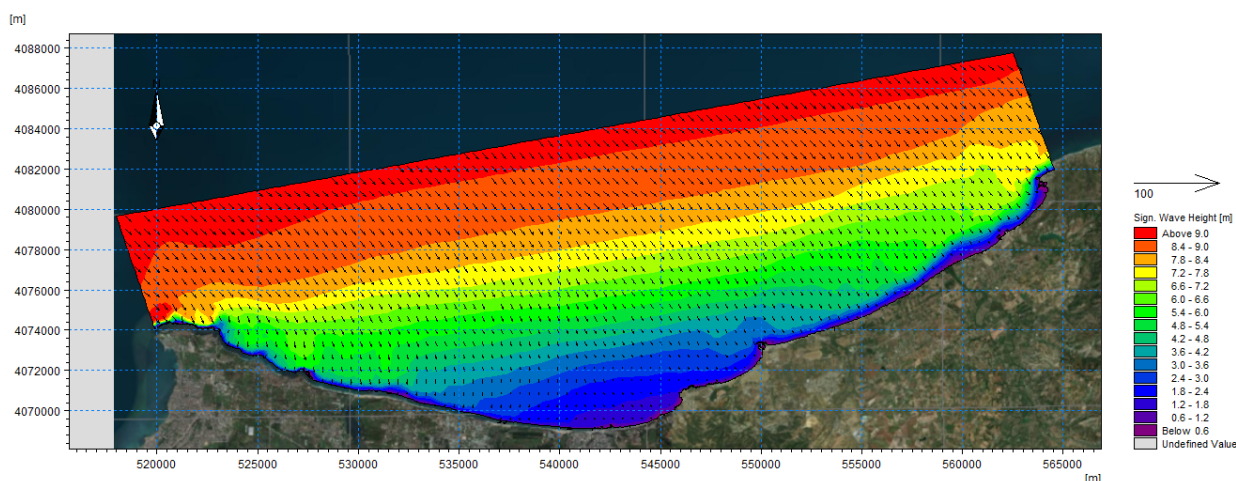


Figure 53 : Le plan de vague de la direction NW associé à la période de retour 100ans

Direction	Nord-Ouest
Période de retour (R)	
1 an	1 m
2 ans	3 m
20 ans	4 m
100 ans	5 m

✓ **Variation du niveau de la mer en fonction de la pression atmosphérique (effet barométrique inverse) :**

Le niveau de la mer peut changer en fonction des variations de la pression atmosphériques. Ainsi, les basses pressions engendrent une surcote. Contrairement, les hautes pressions provoquent une décote. Ce phénomène est appelé effet barométrique inverse. La variation du niveau de la mer liée à la pression atmosphérique peut être approchée à partir de la formule qui suit :

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

Où :

p : est la pression atmosphérique en hectopascal,

1013 hPa : étant la pression correspondant au niveau de repos de la mer.

Cette formule montre qu'une baisse de pression d'un hectopascal fait monter le niveau marin d'environ un centimètre. En Algérie, les pressions oscillent entre 950hPa et 1050hPa, faisant varier le niveau de la mer entre -0.37m et 0.63m.

1.2. Les zones à risque d'inondation :

Quel que soit son taux, l'élévation du niveau de la mer ferait monter le niveau d'attaque des vagues, car un niveau marin plus haut fournirait une plus haute base pour les mouvements puissants des tempêtes (**WASA Group. 1998 in NIAZI, 2007**). Ceci se traduirait par l'inondation des terres basses et des changements dans la morphologie côtière. Les répercussions potentielles d'un tel phénomène dépendent non seulement du taux de cette hausse, de la fréquence et de l'intensité des houles de tempêtes, mais aussi de la sensibilité de la côte à la submersion, qui à son tour dépend de la morphologie et de la topographie de la zone côtière.

Le développement du tissu urbain dans la zone côtière de la grande baie de Zemmouri est caractérisé par une occupation longitudinale préférentielle. Cette occupation anarchique et intense va rendre le milieu très vulnérable aux aléas météorologiques qui sont à son tour accélérée par la faible topographie de la zone. Pour estimer les superficies des terres qui seront inondées par les niveaux extrêmes de l'élévation de niveau de la mer, les cotes de ces niveaux ont été confrontées au model numérique du terrain (MNT). Aussi et dans le but d'identifier les facteurs de risque sur les unités constructives de la zone d'étude, ces mêmes niveaux d'inondations ont été superposés a une carte d'occupation du sol.

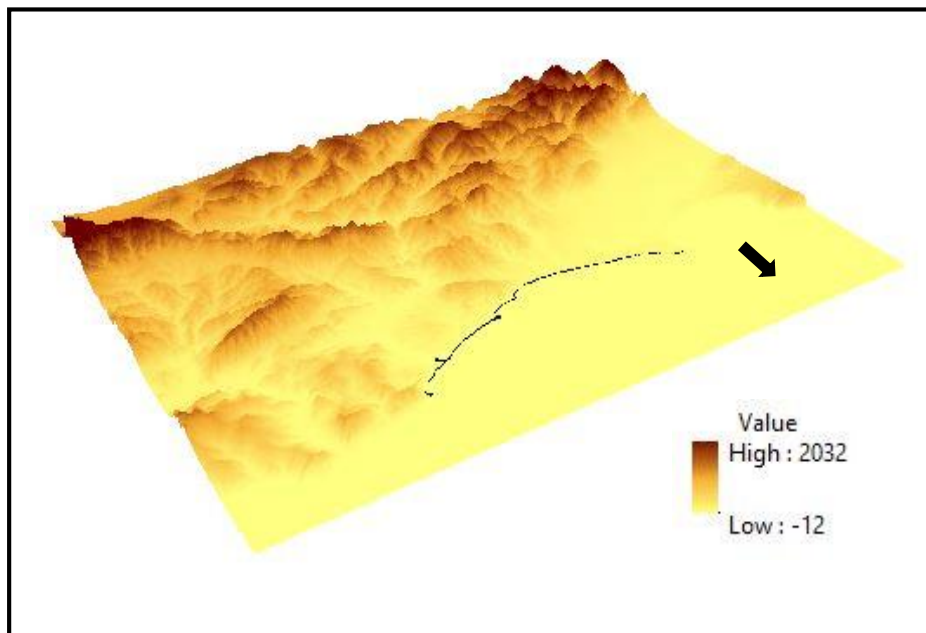


Figure 54 : Le modèle numérique du terrain (MNT) de la grande baie de Zemmouri

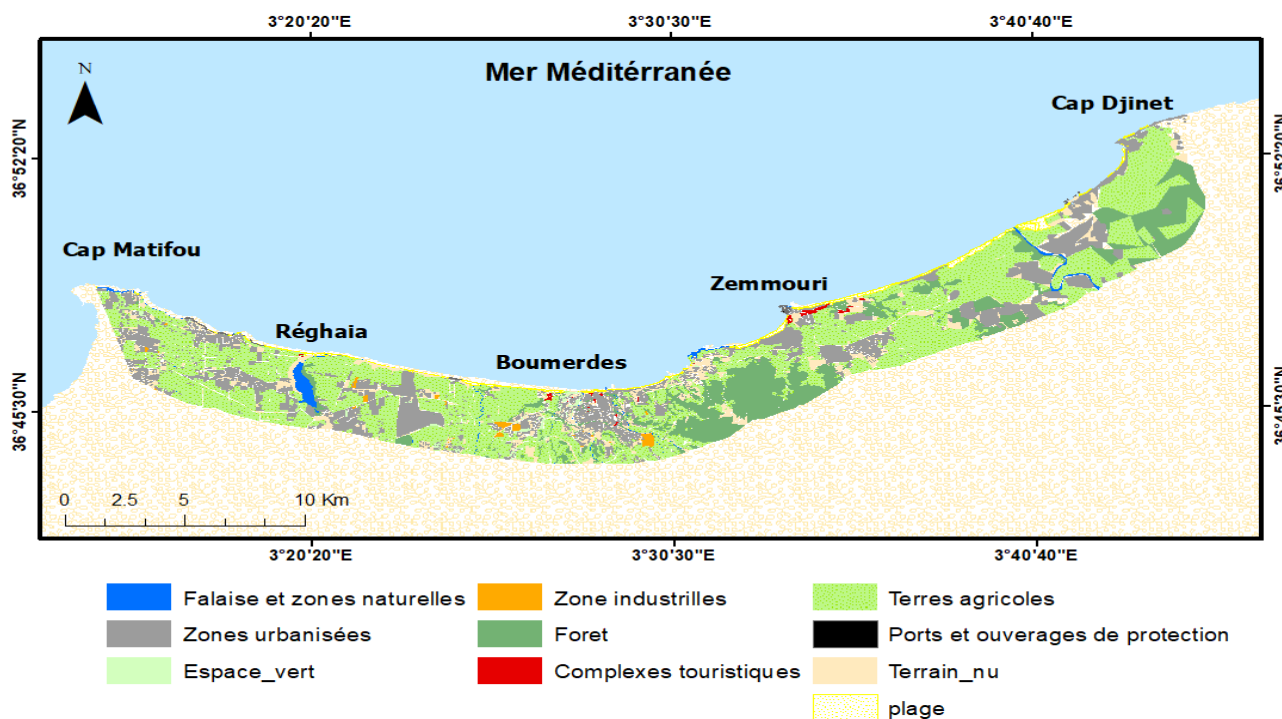


Figure 55 : Carte d'occupation du sol de la grande baie de Zemmouri.

2. Interprétation des résultats

Pour cette portion côtière, où la majorité des plages connaissent depuis 48 ans allant de 1972 à 2020 (cela a déjà été signalé auparavant dans le chapitre III) une importante érosion, les facteurs des risques d'inondation (une topographie basse, un climat de vagues de forte énergie, une hausse des niveaux moyens de la mer et une augmentation de la fréquence de tempêtes violentes) favoriseraient l'extension des zones submergées.

2.1. Scénarios d'inondations

À la base d'un modèle numérique du terrain MNT plusieurs traitements ont été faites, ce qui nous a permis d'établir des cartes pour l'aléa de submersion marine à des différents niveaux extrêmes d'inondation.

Tableau 21 : Niveaux d'inondations extrêmes.

Période de retour (R)	MHW	St	Wf	Pf	Dft
1 an	34 cm	2.5 mm	1 m	0.63 m	1.97 m= 2 m
2 ans	34 cm	2.5 mm	3 m	0.63 m	3.97 m= 4 m
20 ans	34 cm	2.5 mm	4 m	0.63 m	4.97 m= 5 m
100 ans	34 cm	2.5 mm	5 m	0.63 m	5.97 m= 6 m

➤ Submersion à 2 m

D'après les cartes on remarque non seulement que la partie Est de la baie (au niveau de Oued Isser) est la plus affectée par le niveau d'inondation de 2 m mais aussi au niveau des embouchures des Oueds (Oued Réghaia, Oued Boudouaou, Oued Corso et oued Boumerdes).

En terme de surface les eaux marines pénètrent vers l'arrière-pays peut occuper une surface environ 1032.7 ha, cette pénétration peut être expliquée par la faible topographie de la zone et la présence des Oueds le long du littoral de la région

➤ Submersion à 4 m

Pour une élévation de 4m (Figure 55), on remarque que la surface occupée par les eaux de la mer est plus importante en termes de superficie et de distance par rapport au trait de côte, on la comparant avec la submersion de 2 m. L'intrusion des eaux marines vers la terre est accentuée par les réseaux hydrographiques notamment Oued Réghaia, Oued Boudouaou, Oued Boumerdes et

Oued Isser à l'Est, où au niveau de ce dernier les eaux de la mer entrent à une dizaine de km vers la terre. Les eaux marines occupent une superficie de 1699.72 ha qui est dû non seulement à la morphologie continentale à faible altitude de la Baie mais aussi au climat des houles au large et les réseaux hydrographiques.

➤ **Submersion à 5 m**

La figure 55 montre un fort envahissement des eaux marines sur la terre au niveau des deux côtés de la baie en comparant avec les scénarios précédentes, cela peut être expliqué non seulement par la faible topographie de ces secteurs en comparant avec le secteur centre (pente raide) mais aussi par l'existence des réseaux hydrographiques qui irriguent la zone d'étude de part et d'autre. La superficie des terres immergées est d'environ 1999.32 ha.

➤ **Submersion à 6 m**

Pour un cas extrême d'une élévation de 6 m de niveau marin. On constate une intrusion spectaculaire de l'eau de mer sur le tissu urbain à des distances très loin de la cote (dizaine de Kilomètres) dans des directions très variées notamment au niveau des zones d'embouchures (Oued Isser, Réghaia ,Corso, Boudouaou El Bahri...etc.). Cependant, des superficies importantes sont perdus à ce niveau d'inondation environ 2207.71 ha.

2.2. Perte des terres due à la submersion marine

L'application des niveaux de submersion sur la carte d'occupation du sol de la grande baie de Zemmouri met en évidence une étendue importante des zones inondables.

Les principaux résultats de la perte de terres due à l'inondation marine sont consignés dans le tableau 22 et présentés dans les figures 56. Les inondations potentielles les plus importantes toucheraient les terres basses de la côte de la baie de Zemmouri entre Zemmouri El Bahri et Cap Djinet où les systèmes naturels de défense contre la mer, cordons dunaires, ont été détruits.

Les terres agricoles sont fortement touchées par les intrusions des eaux marines à différents niveaux d'élévation telle que 28.5 % à 36.27 % de ses surfaces sont perdus. Cependant 14% à 22 % des plages de la zone sont perdues à ces niveaux d'élévations.

L'envahissement des eaux marines à différents directions en arrière-pays peut atteindre une dizaine de kilomètres en menaçant les habitats, les établissements, les équipements culturels et de loisirs, les hébergements touristiques,...etc.

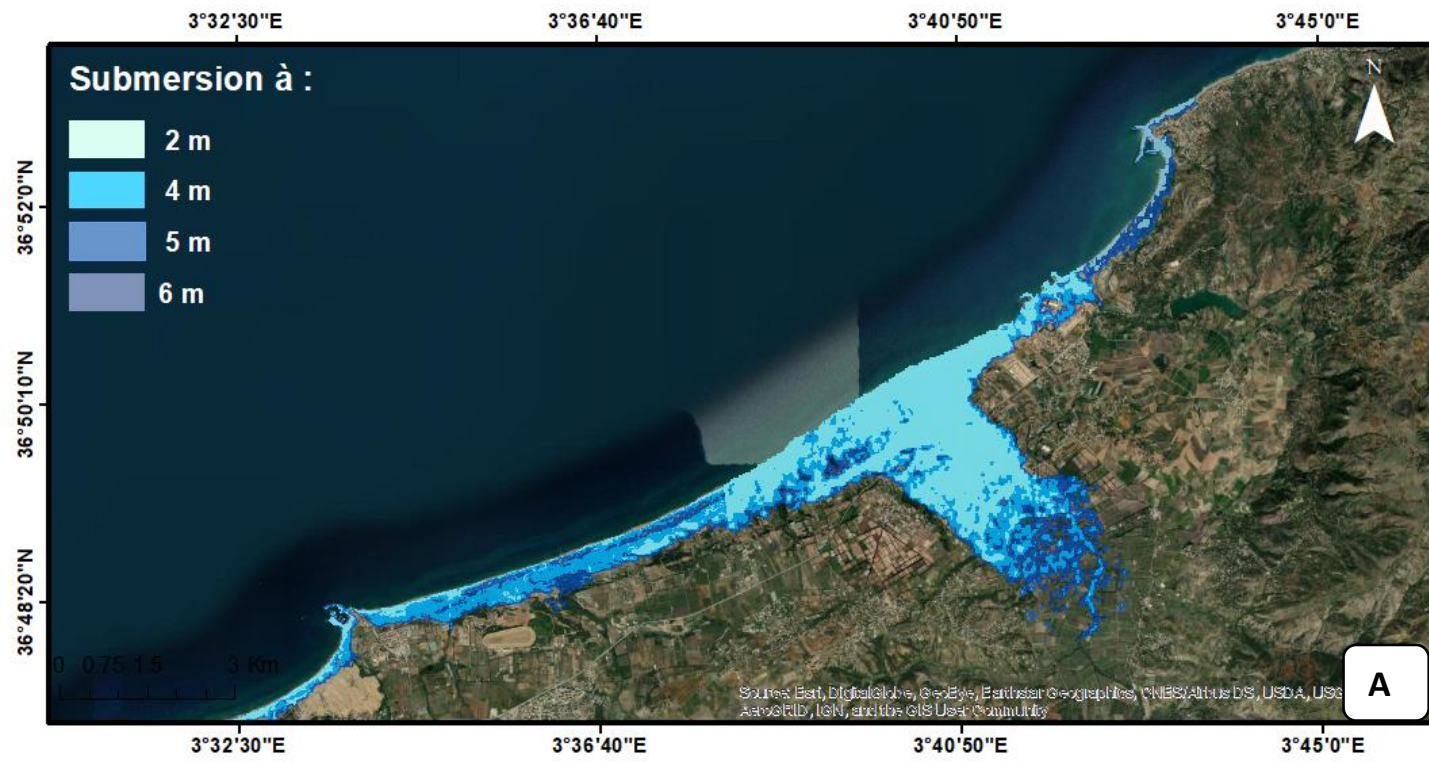
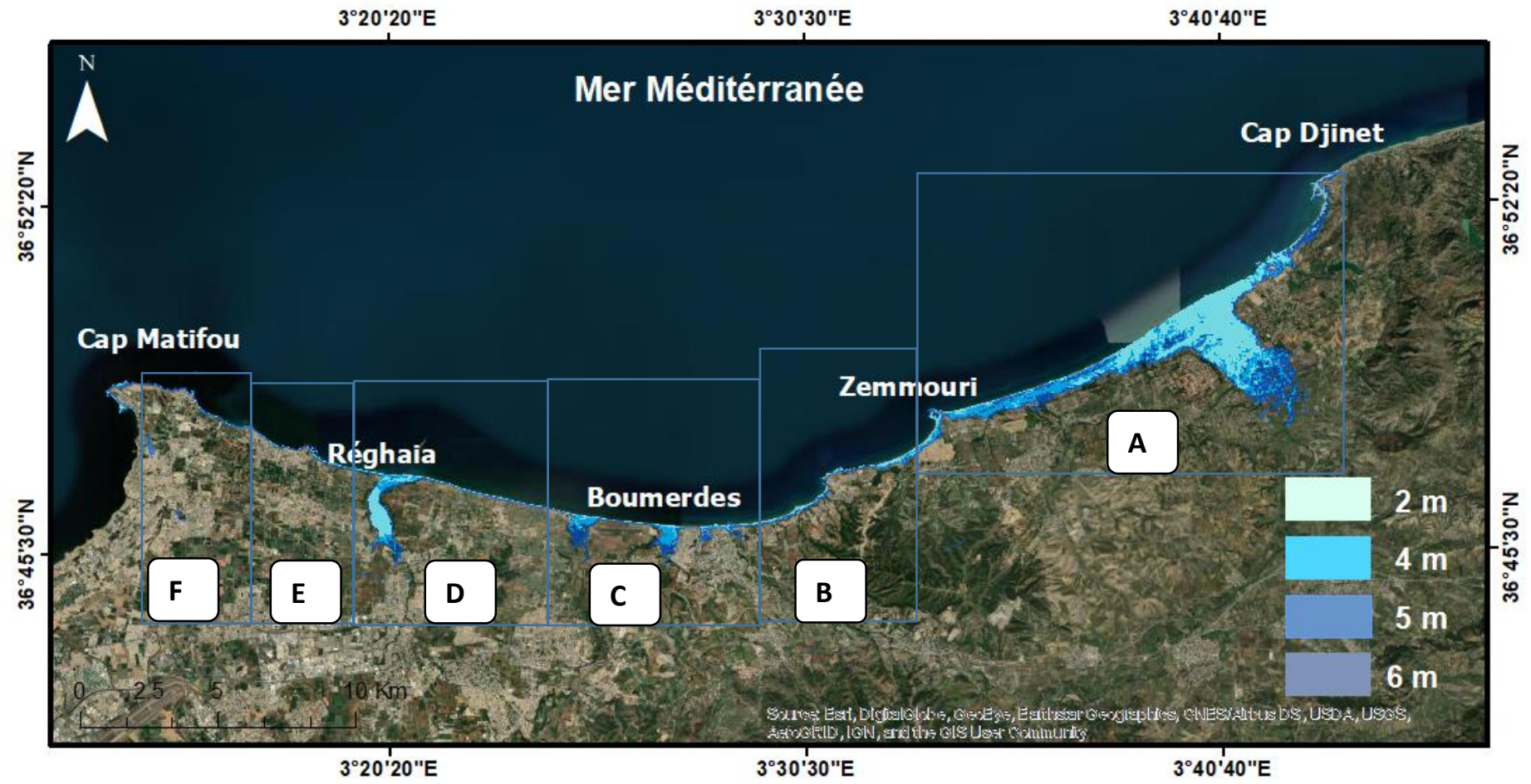




Figure 56 : Les cartes de submersion marine.

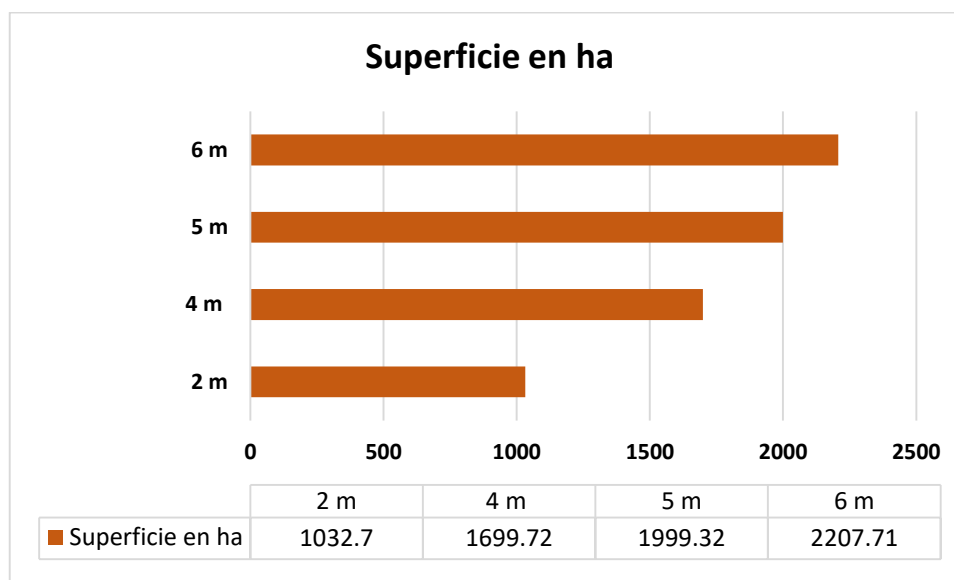


Figure 57 : Superficies des terres inondées par les différents niveaux d'élévation.

Conclusion

Les résultats obtenus soulignent que l'élévation du niveau marin conjuguée à une fréquence accrue des houles de tempêtes provoquerait des inondations considérables. La cartographie des zones inondables révèle que 1032.7 ha de sa superficie présenteraient un risque de submersion avec un niveau d'inondation 2 m ; et 2207.71 ha pour un niveau de submersion 6 m. La côte Est et Ouest sont les plus vulnérables aux inondations, en raison de la faible topographie. Quel que soit le niveau d'inondation, les conséquences seraient lourdes pour les aménagements et les infrastructures en front de mer : 12.84 % de la superficie des zones urbaines (Boumerdes, Réghaia et Zemmouri) risquent d'être endommagés lors des submersions marines avec un niveau d'eau 2 m, et 19.12 % en cas d'un niveau d'inondation maximum 6 m. Le risque pour les zones agricoles est plus élevé entre 28.5 % à 36.27 % de la superficie totale seraient touchées, respectivement, pour des niveaux d'inondation minimum 2 m et 6 m.

Tableau 22 : 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	19.12
Ports et ouvrages de protection	4.98	8	7.62	44	8.58	0.42	9.18	0.41
Complexes touristiques	0.36	04	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	7.90	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	1032.70	100	1699.72	100	1999.32		2207.71	100

Chapitre VIII : Stratégies d'adaptation

Introduction

L'influence de l'augmentation des concentrations de gaz à Effet de serre (GES) sur le climat et l'inévitabilité de cette influence font l'objet d'un large consensus au sein de la Communauté scientifique et des instances politiques internationales. Cette influence se fait d'ailleurs déjà sentir et pourrait s'intensifier : les températures sont à la hausse presque partout, les glaciers reculent, le couvert de neige diminue, le niveau de la mer augmente et les aires de répartition (habitats) de certaines espèces végétales et animales commencent à changer.

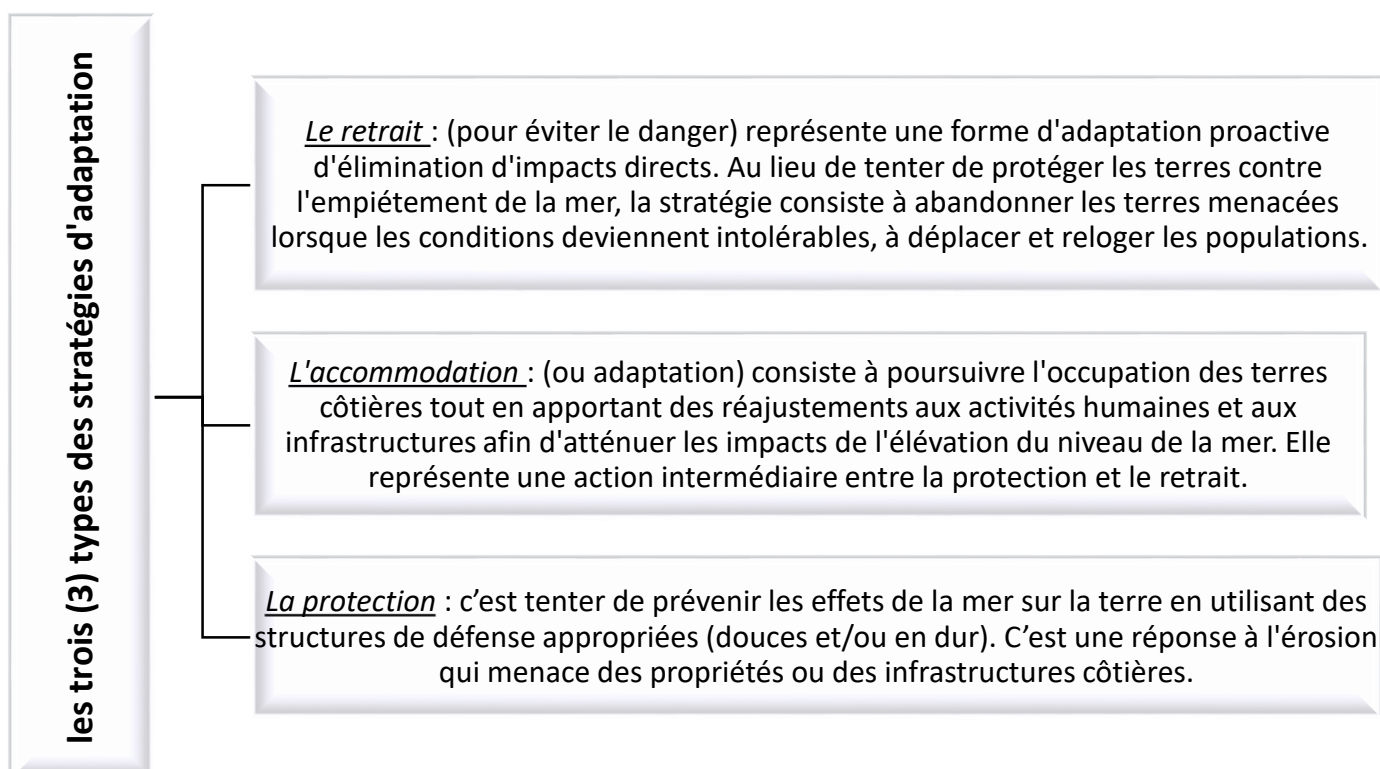
1. L'adaptation aux changements climatiques :

L'adaptation aux changements climatiques est un processus par lequel les communautés et les écosystèmes s'ajustent aux changements et effets associés, afin de limiter les conséquences négatives et de profiter des bénéfiques potentiels. Pour les milieux humains, l'adaptation permet de se préparer aux nouvelles conditions climatiques. Dans les milieux naturels, les populations végétales et animales s'adapteront également, mais de façon réactive, et subiront davantage d'impacts négatifs à court terme des changements climatiques. L'adaptation concerne tous les niveaux décisionnels (individuel, local, régional, national, international) et exige une approche globale et très intégrée car les enjeux touchent plusieurs secteurs et vont souvent au-delà des limites administratives.

1.1.Types de stratégie d'adaptation :

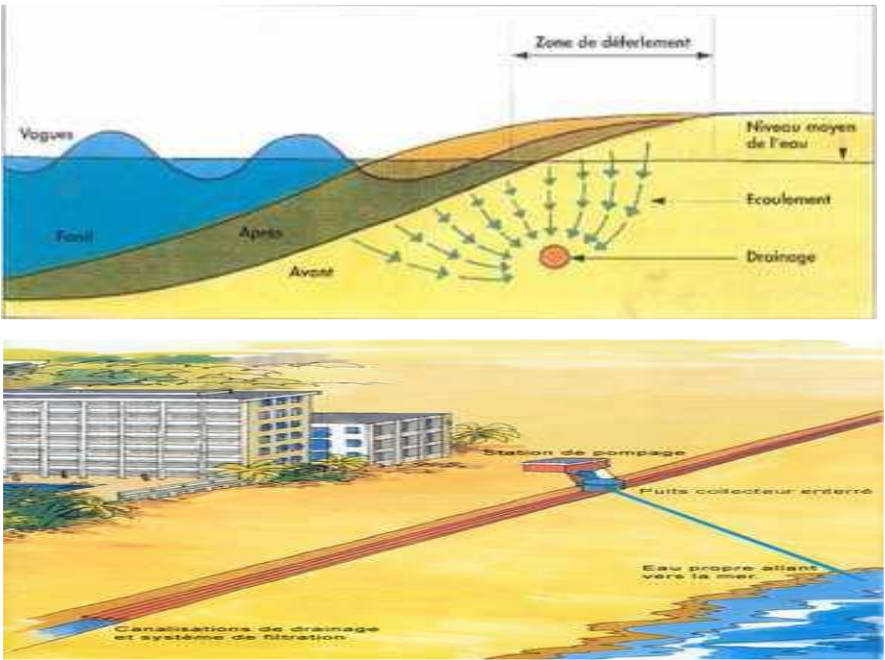
L'adaptation est définie comme un ensemble d'activités visant à « réduire la vulnérabilité des systèmes naturels et humains aux impacts du changement climatique et aux risques liés au climat, en maintenant ou en accroissant la capacité d'adaptation et la résilience ». (OCDE, CAD, 2011).

Trois catégories classiquement (Retrait, Accommodation et Protection) envisagées dans la plupart des études de vulnérabilité (GIEC, 1990).



D'après ce qu'on a obtenu comme résultats, le littoral de la grande baie de Zemmouri a connu fort recul de son rivage et il a subi des intrusions marine spectaculaire à des niveaux d'inondation maximal suite à une élévation du niveau marin, des stratégies d'adaptation et de protection sont présentées, tout en proposant des mesures d'accompagnement.

Les options proposées dans cette étude sont d'ordre technique, institutionnel et législatif. L'adaptation côtière peut en fait être considérée comme un processus continu qui interagit avec les pratiques existantes, et qui est conditionné par les critères politiques et les objectifs de développement côtier. Pour cela les mesures de réponse proposées seront envisagées pour le littoral de la baie de Zemmouri, au court, moyen et du long terme. Toutefois il faut noter que les stratégies d'adaptation doivent être souples car la vulnérabilité, la compréhension des processus, la technologie et les dynamiques côtières risquent toutes de changer avec le temps et les besoins d'adaptation devraient donc être réexaminés régulièrement.

Stratégies à court et moyen terme	Stratégies à long terme
<p>➤ Ecoplage</p> <p>consiste à drainer la plage dans la zone du jet de rive pour diminuer le transport de sédiment par la nappe de retrait. Ce procédé d'origine danoise, a été installé en France, en avril 1999, sur le littoral atlantique, aux Sables-d'Olonne, ensuite à Villers-sur-mer (Calvados), dans la baie d'Agay et à Saint-Raphaël. Comme le montre la figure 58, il consiste à enterrer sous la plage un système de drains parallèles au trait de côte à un niveau défini en fonction des conditions hydrodynamiques spécifiques du site. Ces drains sont reliés à un collecteur lui-même couplé à une station de pompage. L'eau chargée en grains de sable apportée par la vague s'écoule par percolation tandis que le sable est retenu sur la plage. Une fois infiltrée l'eau de mer est ensuite aspirée par la pompe. Le sable se dépose et la plage est asséchée. Une canalisation de refoulement restitue à la mer l'eau libérée du sédiment, ou peut être réutilisée (piscine, pisciculture...) et l'engraissement de la plage est alors favorisé. Ce procédé permet de combattre et de maîtriser l'érosion des plages d'un littoral sans impact négatif sur l'environnement. Il a l'avantage d'être invisible et totalement silencieux, de ne provoquer aucun impact sur la faune ou la flore, et de ne modifier ni les courants ni le transit sédimentaire parallèle au rivage. Bien qu'elle ne nécessite que peu d'entretien, cette technique est onéreuse. En absence de marée, par exemple en Méditerranée, l'efficacité du dispositif est accrue car la zone de déferlement des vagues est toujours la même.</p>  <p>Figure 59 : Système d'ECOPLAGE de Carl Linderoth (http://www.atlanpole.fr)(a) et la mise en place du procédé d'ECOPLAGE dans la baie d'Agay (b) http://www.ville-saintraphael.fr</p>	<p>La zone côtière est considérée comme un espace commun où se manifeste l'interaction terre mer à travers des systèmes écologiques et systèmes de ressources complexes (biotiques, abiotiques) et interagissant avec les communautés humaines et les activités socioéconomiques. La bande côtière de la zone d'étude a connu un fort chevauchement des activités socioéconomiques (tourisme balnéaire, les industries, l'aquaculture et la pêche...etc.) qui la rendent très vulnérable aux risques naturels tel que l'érosion et la submersion marine suite à un bouleversement climatique, donc l'intégration des stratégies d'atténuation et d'adaptation de ce déséquilibre à long terme est primordiale.</p> <p>Gestion intégrée des zones côtières un processus dynamique de gestion et d'utilisation durables des zones côtières, prenant en compte la fragilité des écosystèmes et des paysages, la diversité des activités/usages, leurs interactions, la vocation maritime de certains d'entre eux, ainsi que leurs impacts sur la mer et sur la partie terrestre. Parmi ces objectifs :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Faciliter, par une planification rationnelle des activités, le DD -ZC (conciliant la protection des ZC et développement) ; • Préserver ZC / bénéfice des générations présentes et futures ; • Garantir l'utilisation durable des ressources naturelles ; • Garantir la préservation de l'intégrité des écosystèmes côtiers ; • Prévenir et/ou réduire les effets des aléas naturels-CC ; • Assurer la cohérence entre les initiatives publiques et privées et entre toutes les décisions des autorités publiques, aux niveaux national, régional et local. <p>➤ L'élaboration d'un plan GIZC du littoral de la grande baie de Zemmouri</p> <p>les stratégies de réponse aux changements climatiques ne pourront être efficaces que dans le cadre plus global d'une gestion intégrée des zones côtières (GIZC) qui représente un outil incontournable pour le développement durable des littoraux algériens en général et celui de la baie de Zemmouri en particulier. L'élaboration et la mise en œuvre des stratégies d'adaptation dans le cadre d'un plan de GIZC, nécessitent une bonne connaissance du fonctionnement organique du système côtier en question. Celle-ci est conditionnée par la disponibilité des données. La connaissance des conditions physiques, météorologiques et même les acteurs est très importante pour une gestion durable, valorisation et protection de la zone d'étude prenant en compte les trois piliers du développement durable (environnement, économie et la société).</p> <p>➤ Le renforcement juridique : le littoral de la baie de Zemmouri est fortement dégradé, c'est en majeure partie à cause de l'absence d'une réglementation sur l'occupation de son espace et l'utilisation de ses ressources ; Il est donc urgent que la loi 'Littoral' et les textes de loi relatifs à l'extraction de sable soit rigoureusement appliqués. Vu les projections des risques, La loi du littoral devrait interdire la construction ou l'aménagement de structures en béton ou autres infrastructures – même des routes - dans</p>

- **Stabiplage** : C'est une autre technique qui consiste à mettre en œuvre des ouvrages en géocomposite qui, une fois implantés, captent le sable naturellement transporté par les houles, les courants, et les marées, pour reconstituer la plage, et l'aider à retrouver un équilibre hydrosédimentaire (figure 57). Ces ouvrages dits « freineurs de transit littoral », sont eux posés perpendiculairement au trait de côte. Un volume important de matériel sédimentaire est bloqué en amont de la dérive. Mais une fois que les compartiments sont remplis, les courants vont reprendre la partie excédentaire de ce volume sédimentaire pour l'exporter alors vers l'aval de la dérive. Les propriétés de souplesse et de perméabilité de la réalisation permettent de ne pas "faire barrage" au sable comme le ferait une digue, mais plutôt de gérer les flux de sédiments. L'étude préalable systématiquement menée par Espace Pur (en France) permet de fabriquer un Stabiplage sur mesure pour chaque problème posé. Cette technique est très appliquée longitudinalement au pied des dunes. Elle a été utilisée dans plusieurs sites pour la protection des littoraux à Guilvinec, la dune de Tumiac et la plage dans le Morbihan en France, au Sud du Vietnam et sur le littoral d'Aghir à Djerba en Tunisie.

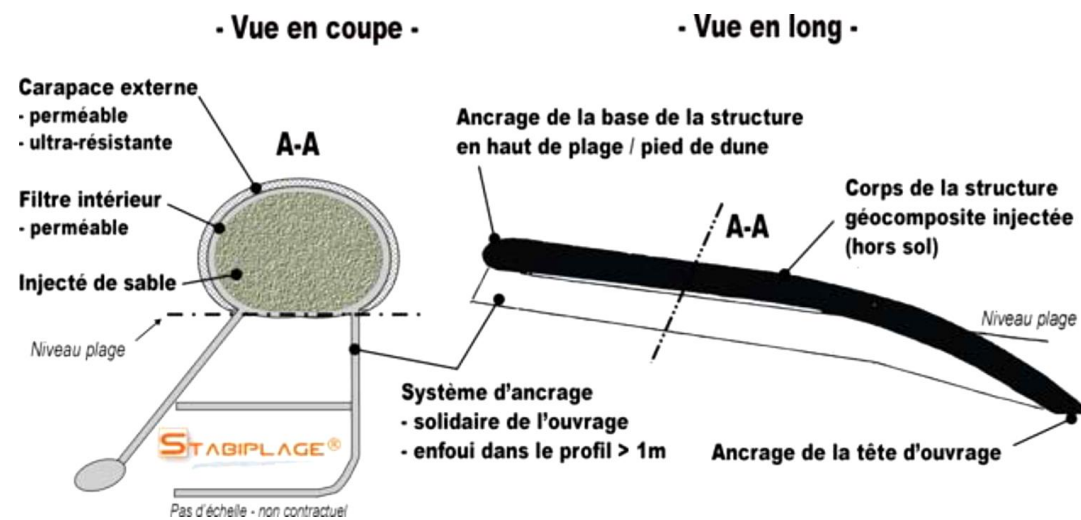


Figure 58 : Système de stabiplage

➤ **By passing** :

C'est une technique douce qui consiste à utiliser les sédiments d'un endroit qui a un excès de sable à un autre qui a connu une érosion à travers un matériel spécifique. Les ouvrages de Boumerdes favorisent la formation du bassin de dissipation en aval du brise lame ou les sédiments s'accumulent en favorisant la formation des plages à tombolo, donc par cette technique on peut rhabiller les zones érodées.

les zones connues comme "dynamic beach zone" et tout près des oueds afin de minimiser les conséquences de l'élévation du niveau de la mer.

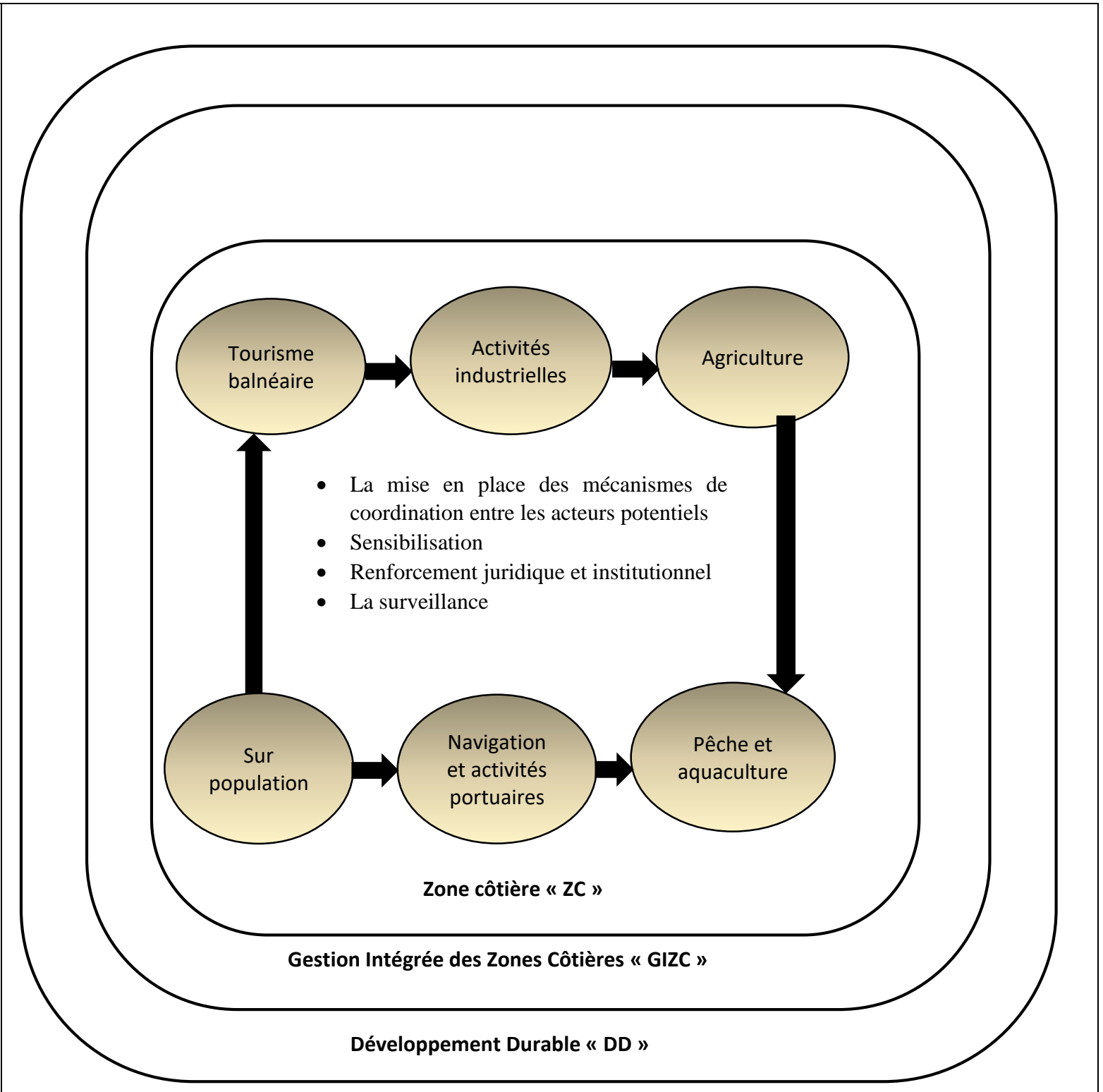
- **Le renforcement institutionnel** : Sur le plan Institutionnel, il est important de renforcer et/ou mettre en place des mécanismes de coordination entre les différents acteurs opérant dans la zone côtière, et entre le pouvoir central et les collectivités locales. Ceci permettrait d'impliquer tous les représentants des différents secteurs dès la phase de réflexion sur le choix des options d'adaptation. La sensibilisation et l'implication des communautés côtières tout au long du processus d'adaptation est un gage pour la réussite des options retenues. En effet, en considérant plusieurs options, à diverses échelles, dans le cadre de travaux ou de discussions auxquels participeraient les intervenants, permettrait d'obtenir des résultats fructueux. En outre le choix d'une voie plutôt que de l'autre doit s'inscrire dans une réflexion à long terme qui doit aboutir à une gestion durable et raisonnée du littoral. Cette réflexion devrait prendre en compte les actions passées et à venir et leurs conséquences sur le milieu naturel et l'économie. L'adoption de simples mesures préventives peut permettre, dans certains cas, d'assurer une protection efficace contre les risques côtiers, sans aménagements particuliers importants. Ces mesures devraient être mises en œuvre à temps (NIAZI 2007).
- Parmi les stratégies d'adaptation possibles pour toute zone vulnérables à l'élévation du niveau de la mer, telles qu'elles sont recensées et examinées dans la littérature, figurent la reconnaissance et la surveillance des dangers d'où la nécessité de créer un outil de connaissance et de suivi : l'observatoire du littoral.

Cette structure serait organisée autour d'une :

- **Commission scientifique** : chargée de centraliser les données produites par les différents réseaux nationaux de surveillance des pollutions littorales, de réaliser ses propres analyses en complément et d'assurer une veille sanitaire.
- **Commission d'information** : chargée de synthétiser les données scientifiques pour les rendre accessibles et compréhensibles à un large public par le biais d'indices explicites. Elle doit également renseigner sur les risques sanitaires et la toxicité des différents polluants.
- **Commission juridique** : chargée de faire appliquer la législation en vigueur et avoir un rôle de conseil auprès des élus et des industries pour dégager des solutions environnementales adaptées

- les terres agricoles qui seraient perdues et probablement abandonnées, seraient celles qui souffriraient d'une forte salinisation des eaux et des sols ainsi que celles qui montreraient un drainage difficile.
- Une reconversion des agriculteurs vers l'aquaculture marine pourrait être envisagée avec un développement des cages off-Shore, au cas où les capacités trophiques du milieu puissent supporter d'autres élevages. Mais cette option nécessite d'une part, l'établissement d'un plan d'aménagement intégré de la baie, et d'autre part une forte composante de sensibilisation et de formation (MATEE, 2007 in NIAZI, 2007).
- le rechargement artificiel en sable pour réhabiliter les plages érodées. Vu la présence de d'un tissu urbain préférentiellement à proximité de la mer, ni la réhabilitation ni la fixation des dunes par la végétation n'est plus possible pour protéger et accroître la résilience naturelle. La seule alternative pour éviter la disparition des plages au cours du prochain siècle, serait leur alimentation artificielle. Pour cette opération il faut que le calibre des sédiments d'emprunt doit être légèrement supérieur à celle des sédiments autochtones, dans le but d'assurer un bon rechargement des plages et de maintenir une largeur suffisante de celles-ci. De telles initiatives permettraient d'assurer alors leur stabilité, d'atténuer, par conséquent, l'intensité des impacts d'une élévation accélérée du niveau de mer et les effets conjugués à ceux des houles de tempêtes épisodiques particulièrement le secteur Est qui a connu une forte érosion au bout de 48 ans (Résultats du chapitre III).
- la construction de murs de protection et/ou le renforcement par des enrochements pour protéger les zones urbanisées. L'ajout de structures pour les ouvrages déjà présents à Boumerdes et Ain Taya serait probablement nécessaire à mesure que s'élève le niveau de la mer. De telle sorte que ces murs d'enrochement puissent absorber l'énergie supplémentaire des vagues. Il en serait de même pour les jetées des ports (Djinet et Zemmouri) ; les mesures à apporter consisteraient entre autres à surélever progressivement la crête des digues jusqu'à une valeur légèrement supérieure au niveau d'inondation maximum.

Quelques soient les solutions techniques choisies, elles nécessitent impérativement un mécanisme de suivi-évaluation, afin d'adapter progressivement les réactions du littoral à des solutions mieux appropriées.



Conclusion

La vulnérabilité est donc une donnée complexe, résultant d'éléments naturels ainsi que des éléments humains. Face aux évolutions inéluctables que subit la zone côtière et qui sont précipitées par les changements climatiques, l'amélioration de la résilience des communautés côtières doit être le but de toutes les politiques d'adaptation.

L'enjeu de la défense contre la mer sera de plus en plus important dans les prochaines décennies avec l'élévation prévisible du niveau marin, liée à un réchauffement climatique planétaire désormais incontesté. Les mesures peuvent avoir différentes formes telles que protection des littoraux, ajustement des côtes, retrait et abandon des zones menacées.

Ces diverses interventions ne seront pas toujours faciles, ni même possibles parfois. D'où tout l'intérêt à accorder à la question de l'élévation du niveau de la mer dans les prochaines décisions en matière d'aménagement des milieux côtiers.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude, dont l'objectif était d'évaluer les impacts potentiels des CC et les actions anthropiques sur le littoral de la grande baie de Zemmouri, a révélé une forte vulnérabilité environnementale et socioéconomique de cette frange côtière face à ces impacts.

L'analyse diachronique de la cinématique du trait de côte, a montré que ce littoral a été fortement sollicité depuis plusieurs décennies, par les activités de développement, notamment urbain et touristique; Celles-ci ont interféré avec la dynamique hydrosédimentaire du système côtier et causé une forte érosion des plages avec un taux de recul moyen de l'ordre de -1 m/an allant de 1972 à 2020, considérées pourtant comme un capital économique de première importance pour le tourisme balnéaire de la région, et comme une réserve tampon indispensable au réajustement des profils de plage en cas d'érosion, avec une perte de 265 ha de sa surface d'évolution. L'état environnemental actuel, fortement dégradé de ce littoral, présage de difficultés majeures à s'adapter en cas d'élévation du niveau de la mer, si aucune mesure n'est entreprise pour le protéger de ce phénomène pourtant inéluctable.

L'analyse des impacts physiques et socioéconomiques, a fait ressortir que la quasi-totalité de ce littoral est caractérisé par un risque de vulnérabilité élevé (4) aux phénomènes d'inondation, en raison de la faible topographie de la zone. Les risques d'érosion côtière engendrés par l'élévation accélérée du niveau marin, pourraient causer des dégâts pour les plages déjà en recul comme celle de « Boumerdes » ou se manifeste un fort courant d'arrachement, qui transporte des quantités considérables du sable vers le Nord de $7852.36 \text{ m}^3/\text{an}/\text{m}$. Les risques de pertes de terres, naturelles et aménagées, par inondation seraient considérables en 2100, dont ces intrusions marines peuvent atteindre une dizaine de kilomètres en arrière-pays en immergeant une superficie de 1032.7 ha et 2259.71 ha pour un niveau minimal (R = 1 ans) et maximal (R= 100 ans) d'inondation respectivement. Ces impacts affecteront les éléments fondamentaux de la vie des populations côtière.

Il est donc possible d'éviter, ou du moins de réduire ces impacts, en contextualisant l'approche dynamique « GIZC » qui vise à protéger, valoriser et développer la zone côtière dans le cadre de DD, en mettant en œuvre des mesures d'adaptation et d'atténuation anticipatives, écologiquement acceptables et financièrement réalisables. Ces options devraient être réévaluées régulièrement en raison : des changements qui risquent d'affecter la dynamique côtière et par suite la vulnérabilité, de la compréhension scientifique des processus, de l'évolution de la technologie, etc.

Comme étant un enjeu majeur en matière de risque, les effets des changements climatiques doivent rapidement prises en comptes dans les études avenir, à cet effet une prise de conscience,

Conclusion générale

générale et concertée entre les acteurs socio-économiques, permettra la réussite de telles stratégies, ainsi que la mise en place de mesures pertinentes de conservation de la côte.

Perspectives d'avenir :

Cette étude sur le littoral de la grande baie de Zemmouri a certes fourni des résultats importants sur la vulnérabilité/adaptation de ce littoral face à l'élévation du niveau de la mer et aux actions anthropiques, elle n'en demeure pas moins perfectible mais nécessite des études plus approfondies dans le but d'améliorer la qualité des résultats donc l'aboutissement des résultats satisfaisantes et concrètes qui reflètent exactement à la réalité nécessite la disponibilité :

- Des ortho images avec une résolution centimétrique de la zone d'intérêt.
- Données sur le climat des houles au large et à la cote.
- Des cartes bathymétriques et des levées topographiques plus précises et plus récentes qui permettent d'élaborer un Modèle Numérique de Terrain, outil indispensable pour une meilleure précision des scénarios d'inondation.
- Des vérités terrain.
- Encouragement du partage des données dans le cadre de la recherche scientifique.

Références bibliographiques

AIRY. (1845). George Biddell. Tides and waves. B. Fellowes.

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

ANSELME, BRICE, [et al.] (2011). Storm extreme levels and coastal flood hazards. A parametric approach on the French coast of Languedoc (district of Leucate). Comptes Rendus Géosciences. Rapport d'activité. Document non publié. 343, 10, 677-690 p. **ANSELME.**

BARON-Yelles N. et al., (2002). Le littoral, regards, pratiques et savoirs [en ligne]. Consulté le 19/8/2020], Edit. Rue d'Ulm, 95–115 p. Disponible sur le web : "https://www.persee.fr/doc/ingeo_0020-0093_2002_num_66_4_2841_t1_0382_00"

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

BENAVENTE, Javier, et al. (2006). Coastal flooding hazard related to storms and coastal evolution in Valdelagrana spit (Cadiz Bay Natural Park, SW Spain). Continental Shelf Research, vol. 26, n° 9. London: Elsevier, 2006, 1061–1076 p.

BENZOHRRA, M. (1993). Les structures hydrodynamiques le long des côtes algériennes. Workshop sur la circulation des eaux et pollution des côtes méditerranéennes du Maghreb, INOC : Izmir. 33–46 p.

Bird E.C.F. (1985). Coastline changes. A global review. John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore, 219 p.

BOAK, Elizabeth H., et Ian L. Turner. (2005). Shoreline definition and detection: a review. Journal of coastal research [en ligne], vol. 21, n° 4 (214), Allen Press, 688–703p. [Consulté le 19/7/2020]. Disponible sur le web "<https://meridian.allenpress.com> ".

BONNEFILLE, René. (1992) Cours d'hydraulique maritime. Paris : Masson, 208 p.

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

BOUHAMADOUCHE, M. (2012). Contribution à l'étude géologique et sédimentologique de la grande baie de Zemmouri (Cap-Matifou Cap-Djinet. Thèse de doctorat. Géologie marine. Alger : USTHB, 180 p.

BOUTIBA, M., GUENDOOUZ, M, GUETTOUCHE. MS (2006). Evolution du littoral jijilien (Est-Algérie) à travers l'analyse sédimentologique des dépôts quaternaires. Bulletin du Service Géologique National, vol. 17, 113–127 p.

BRACENE, R. (2002). Géodynamique du Nord de l'Algérie : Impact sur l'exploration Pétrolière. Paris : Université de Cergy-Pontoise, 197 p.

BRGM, LMT, et Mss-Mat Cachan. (2012). Dynamiques concept. CSTB, Une approche mécanique d'évaluation de la vulnérabilité sismique des maçonneries EVSIM, Rapport final.

BRIERE, C. (2005). Etude de l'hydrodynamique d'une zone côtière anthropisée : l'embouchure de l'Adour et les plages adjacentes d'Anglet [en ligne]. Pau, 2005. [Consulté le 11/9/2020]. Disponible sur le Web "<http://www.theses.fr/2005PAUU3007>"

CARTER, RICHARD WILLIAM Gale. (2003). Coastal environments: an introduction to the physical, ecological, and cultural systems of coastlines [en ligne]. London : Elsevier. [Consulté le 28/8/2020]. Disponible sur "<https://www.sciencedirect.com/book/9780080502144/coastal-environments> "

CIRIA, CUR. CETMEF. (2009). Guide Enrochement. L'utilisation des enrochements pour les ouvrages hydrauliques. Version française du Rock Manual. CETMEF, Compiègne.

COWELL, PETER J., BRUNO G. THOM. (1994). Morphodynamics of coastal evolution [en ligne]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Disponible sur le web : "<http://services.cambridge.org/us/academic/subjects/earth-and-environmental-s> "

DENAMIEL, C. (2006). Modélisation hydrodynamique 3D en zone pré-littorale : Caractérisation des effets des houles de tempête sur la circulation océanique [en ligne]. Thèse. Montpellier 2. Disponible sur le web : "http://www.gm.univ-montp2.fr/IMG/pdf/DEA_denamiel.pdf "

DHI (2014). Mike 21/3 Coupled Model FM. [En ligne]. [Consulté le 13.03.2017]. Disponible sur le web : "http://www.mediafire.com/view/4extjtmhec4v69v/MIKE_213_Coupled_Model_FM.pdf"

DJOUDER, F., BOUTIBA, M. (2017). Vulnerability assessment of coastal areas to sea level rise from the physical and socioeconomic parameters: case of the Gulf Coast of Bejaia, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 10, n° 14, Springer, 299 p.

DOMZIG, Anne. (2006). Déformation active et récente, et structuration tectono-sédimentaire de la marge sous-marine algérienne. Thèse de Doctorat, Université de Bretagne occidentale. Brest.

DOW, Kirstin. (1992). Exploring differences in our common future (s): the meaning of vulnerability to global environmental change (en ligne). *Geoforum*, vol. 23, n° 3, Elsevier, 417–436p. Disponible sur " "

DURAND-DELGA, M. (1980). Le cadre structural de la Méditerranée occidentale. *Géologie des chaînes alpines issues de la Tethys*, ed. Du BRGM, 67–85 p.

FAYE, Ibrahima. (2010). Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest) : Approches régionale et locale par photo-interprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes [en ligne]. Disponible sur le web : "<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00472200/PDF/DYNAMIQUE-DU-TRAIT-DE-CO> "

FLETCHER, C. H., et al. (1995). Marine flooding on the coast of Kaua'i during Hurricane Iniki: hindcasting inundation components and delineating washover [en ligne]. *Journal of Coastal Research*, JSTOR, 188–204 p. [Consulté le 4/9/2020]. Disponible sur "<https://www.jstor.org/stable/4298321> "

FOLLAND, C. Ka, et al. (1990). Observed climate variations and change. *Climate change: the IPCC scientific assessment*, vol. 195, Citeseer, 238 p. Disponible sur le web: "<https://www.ipcc.ch/site/assets/upload>".

GIEC, (1990). Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate change: the IPCC scientific assessment*. Document non-publié. Mass, Cambridge: GIEC.

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

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

- GIEC, Bilan. (2001).** Des changements climatiques : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Rapport du Groupe de travail I du GIEC. Document non publié. GIEC
- GORNITZ, Vivien M., et al. (1994).** All use subject to JSTOR Terms and Conditions Development Assessment Database : Rise the of a Coastal Risk to Vulnerability in the U. S. Southeast. Coastal and Estuarine Research Federation, n° 12, 327-38p.
- GRASSO, Florent. (2009).** Modélisation physique de la dynamique hydro-sédimentaire des plages [en ligne]. [Consulté le 21/5/2020]. Disponible sur le web " <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00432041/document>"
- GUIDOU.O.TOUZI, W. (2016).** Mise en place d'une Base de données sédimentologique dans le domaine côtier de centre de l'Algérie (Etablissement de la carte morpho sédimentaire). Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL.1 36 P.
- HEREHER, Mohamed E. (2015).** Coastal vulnerability assessment for Egypt's Mediterranean coast. Geomatics, Natural Hazards and Risk, vol. 6, n° 4, Taylor & Francis, 342-55 p, doi:10.1080/19475705.2013.845115.
- HOOZMANS, F. M. J., et al. (1993).** Sea level rise: A global vulnerability assessment vulnerability assessments for population, coastal wetlands and rice production on a global scale. H1588, Deltares (WL).
- HOPLEY, David. (1992).** Global change and the coastline: assessment and mitigation planning ». Journal of Southeast Asian Earth Sciences, vol. 7, n° 1, Elsevier, 5–15 p.
- JIMENEZ, Jose A., et AGUSTIN SANCHEZ-Arcilla. (1997).** Physical impacts of climatic change on deltaic coastal systems (II): driving terms ». Climatic Change, vol. 35, n° 1, Springer, 95–118p.
- KUMAR, V. Sathish, et al. (2008).** Assessment of storm surge disaster potential for the Andaman Islands. Journal of Coastal Research, n° 24, 171–177 p.
- LARRAS, Jean. (1979).** Physique de la houle et des lames. Paris : Eyrolles, 282 p.
- LATRECHE Mostefa, Lamine. (2013).** Contribution à l'étude de la vulnérabilité de la zone côtière Algéroise à l'aide d'un système d'information géographique (SIG). Thèse doctorat. Alger : Ecole National Polytechnique.
- MATE, (1997).** Journal of materials science [en ligne]. Vol 32, n°2. 279-554 p. [Consulté le 23/7/2020]. Disponible sur le web : " <https://www.springer.com/journal/10853> »
- MCLAUGHLIN S., MCKENNA J., COOPER J. A. G. (2002)** « Socio-economic data in coastal vulnerability indices: constraints and opportunities ». Journal of Coastal Research, vol. 36, 487-97 p.
- MCLAUGHLIN, Suzanne, [et al.] (2002).** Socio-economic data in coastal vulnerability indices: constraints and opportunities [en ligne]. Journal of Coastal Research, n° 36, Coastal Education and Research Foundation, 487–497 p. Disponible sur : " <https://meridian.allenpress.com/jcr/article/doi/10.2112/1551-5036-36.sp1.48> ".
- MEUR-Férec, CATHERINE, VALERIE Morel. (2004).** L'érosion sur la frange côtière : un exemple de gestion des risques (en ligne). Natures Sciences Sociétés, vol. 12, n° 3, EDP Sciences, 263–273 p. Disponible sur " <https://www.cairn.info/revue-natures-sciences-societes-2004-3-page-263.htm>".

- MICHE, M. (1944).** Mouvements ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante [en ligne]. *Annales de Ponts et Chaussées*, 1944, pp (1) 26-78, (2) 270-292, (3) 369-406, École nationale des ponts et chaussées. Disponible sur "<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A6fceef55-d71b-4e3e-a94f>".
- MORNER, Nils-Axel. (2004).** Estimating future sea level changes from past records [en ligne]. *Global and Planetary Change*, vol. 40, n° 1-2. London: Elsevier, 49–54 p. Consulté le 23/7/2020]. Disponible sur "https://www.researchgate.net/publication/222551635_Estimating_future_sea_l".
- NADIR M. (2016).** Modélisation numérique de la morpho dynamique d'une côte sableuse soumise à l'effet des vagues et des houles cas : Plage Est de SIDI Fredj. Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL.149 p.
- NIAZI, Saida. (2007).** Evaluation des impacts des changements climatiques et de l'élévation du niveau de la mer sur le littoral de Tétouan (Méditerranée occidentale du Maroc) : Vulnérabilité et Adaptation. Thèse doctorat. Rabat: Université Mohammed V-Agdal, Faculté des Sciences, p.
- OTMANI, H. (2014).** Impacts des infrastructures maritimes sur le littoral : cas de Cap Djinet. Thèse de Magister. Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL, 151 p.
- PASKOFF, Roland, et CHRISTINE Clus-Auby. (2007).** L'érosion des plages : les causes, les remèdes. Paris : Institut océanographique.184 p.
- PASKOFF, Roland. (1998).** Conséquences possibles sur les milieux littoraux de l'élévation du niveau de la mer prévue pour les prochaines décennies. *Annales de Géographie, JSTOR*, 233–248 p.
- PASKOFF, Roland. (2001).** L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers : le mythe et la réalité. Paris: Institut océanographique.
- PASKOFF, Roland. (2010).** Les littoraux : impact des aménagements sur leur évolution. Paris : Armand Colin, 260 p.
- PILKEY, Orrin H., et THOMAS W. Davis. (1987).** An analysis of coastal recession models: North Carolina coast. *Special Publications of SEPM*.
- PIRAZZOLI, P. A. (1989).** Recent sea level changes in the North Atlantic. Late Quaternary sea-level correlation and applications [en ligne], Springer, 153–167 p. [Consulté le 5/7/2020]. Disponible sur "https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-0873-4_8".
- PLANTON, P. (2012).** Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes méditerranéennes : Rapport d'activité. Document non publié. Paris : Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et des logements.
- RERRANI, A. (1998).** Contribution à l'élaboration des données de base de la baie de Zemmouri et l'étude du site de Palme-Beach (Bai de Bou Ismail).Mémoire d'ingénieur. Alger : ISMAL. 127 p.
- RIHOUEY, Didier. (2004).** Analyse statistique de l'évolution morphodynamique des plages sableuses : Application aux sites d'étude du Programme National d'Environnement Côtier et aux plages d'Anglet. Pau.

RIJN, Leo C. VAN. (1986). Mathematical modeling of suspended sediment in no uniform flows [en ligne]. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 112, n° 6, American Society of Civil Engineers, 1986, p. 433–455. [Consulté le 5/4/2020]. Disponible sur "<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9429%281986%29112%3>".

ROBIN, M. (2002). Télédétection et modélisation du trait de côte et de sa cinématique. Disponible sur le web : "<https://www.memoireonline.com/04/11/4515/Analyse-de-la-cinematique-du-trait>".

ROBIN, Marc, et al. (2008). Geomorphological response of the Noirmoutier Island to sea-level rise and anthropic impact. EMECS 8-International Conference.

SAFARI, M. IMAM. (2006). Analyse de la performance... [Consulté le 21 octobre 2020]. Disponible sur "Google Scholar. <https://scholar.google.fr/scholar?hl=fr&as>".

SENECHAL, Nadia. (2003). Etude de la propagation des vagues au-dessus d'une bathymétrie complexe en zone de surf. Bordeaux 1.

SUANEZ, Serge, et al. (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, n° 4, Groupe français de géomorphologie, 319–334p.

Wright et Short. (1984). Andrew D. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine geology*, 1984, vol. 56, no 1-4, p. 93-118.

WOODWORTH, P. L., et al. (1999). A review of the trends observed in British Isles mean sea level data measured by tide gauges [en ligne]. *Geophysical Journal International*, vol. 136, n° 3, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK , 651–670 p. Disponible sur "<https://academic.oup.com/gji/article/136/3/651/651853>".

XHARDE, Régis. (2007). Évaluation du potentiel des techniques aéroportées vidéographique et LiDAR appliquées à l'étude des risques naturels en milieu côtier. Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique.

Annexes

Annexes

Annexe 1 : Synthèse des résultats statistiques de l'évolution diachronique du rivage de la grande Baie de Zemmouri entre 1972 et 2020.

Secteurs	Secteur Est			Secteur centre		Secteur Ouest	
Cellules sédimentaires	Du Falaise du Cap Matifou jusqu'à les ouvrages de Ain Taya	Des ouvrages de Ain Taya jusqu'aux ouvrages de Boumerdes	Des ouvrages de Boumerdes jusqu'à Cap Blanc	Du Cap Blanc jusqu'au port de Zemmouri	Du port de Zemmouri jusqu'à Oued Isser	Du Oued Isser jusqu'à la station électrique	De la station électrique jusqu'à Cap Djinet
Nombre de transects N°	224	872	252	209	509	173	253
Longueur (km)	4.5	17.5	5	4.2	10.2	3.5	5
Taux moyen du changement du trait de cote							
EPR (m/an)	-1	-1	0.03	-0.6	-1.38	-3.2	0.14
LRR (m/an)	-1.3	-1	-0.4	-0.2	-0.78	-1.2	-1.2
NSM (m)	-50	-55	-18.6	-17.6	-33.25	-52.6	-48.4
Taux min et max du changement du trait de cote							
EPR (m/an)	-3	-2.7	-1	-2.3	-3.7	-7.2	-3.4
	1.7	2	2	1.7	1.4	-0.12	5.04
LRR (m/an)	-3	-5	-2.3	-1.7 n	-2.48	-2	-3
	1.6	5.06	3.2	1.6	1.69	-0.7	0.12
NSM (m)	-143.5	-345.3	-130.4	-112	-129	-116.3	-101
	79.2	243	68	88.6	83.80	-23.3	16
Nombre et pourcentage % des transects en érosion et en accrétion(EPR)							
Erosion	188 transects	865 transects	107 transects	174 transects	491 transects	173 transects	89 transects
	8%	35%	4.2%	7%	20%	7%	4%
Accrétion	36 transects	5 transects	145 transects	35 transects	18 transects	0 transects	164 transects
	1.5%	0.2%	6%	2%	1%	0%	6.5%

Résumé

Partant du postulat que le changement climatique et l'élévation conséquente du niveau de la mer Méditerranée sont maintenant les phénomènes les plus inquiétantes pour la communauté scientifique, de cet effet plusieurs études ont tenté de contribuer aux efforts menés pour l'évaluation de la vulnérabilité et de l'adaptation des zones côtières algériennes face à ces changements.

Allant de 1972 jusqu'à 2020, 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 -1 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 2259.71 ha pour un niveau de submersion maximum (6 m).

Les cartes de vulnérabilité élaborées révèlent une vulnérabilité à l'élévation du niveau de la mer modérée à élevée. Par conséquent, des mesures d'adaptation s'imposent dès à présent. Les options proposées combinent des techniques dures et douces, ainsi que des mesures d'accompagnement pour le moyen et long terme.

Mots clés : Changement climatique, élévation du niveau de la mer, vulnérabilité, adaptation, baie de Zemmouri, submersion.

Summary

Starting from the postulate that climate change and the consequent Mediterranean Sea level rise are now the most worrying phenomena for the scientific community, several studies have therefore attempted to contribute to the efforts made for the assessment of vulnerability and the adaptation of Algerian coastal areas to these changes.

From 1972 to 2020, 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 2259.71 ha for a maximum submersion level (6 m).

The developed vulnerability maps reveal a moderate vulnerability to high. Therefore, adaptation measures are needed now. The options offered combine hard and soft techniques, as well as accompanying measures for the medium and long term.

Keywords: Climate change, sea level rise, vulnerability, adaptation, Zemmouri Bay, submersion.

ملخص

انطلاقاً من الافتراض بأن تغير المناخ وما يترتب عليه من ارتفاع في مستوى البحر الأبيض المتوسط هما الآن أكثر الظواهر إثارة للقلق بالنسبة للمجتمع العلمي، لذلك حاولت العديد من الدراسات المساهمة في الجهود المبذولة لتقييم الضعف وتكيف المناطق الساحلية الجزائرية مع هذه التغيرات

من عام 1972 إلى عام 2020، شهد ساحل خليج زموري تدهوراً قوياً تم فقدان 50٪ من هذه الشواطئ بسبب التعرية بمتوسط معدل تراجع قدره 1- م / سنة، وهذا للتوضيح من خلال الجمع بين العوامل الطبيعية (المناخ المنتفخ) و / أو العوامل البشرية (تطوير السياحة الساحلية، والصناعة، وتوسيع النسيج الحضري، وما إلى ذلك).

1032.7 هكتار من المساحة الإجمالية تمثل خطر الغمر مع مستوى أدنى للفيضان (2 م)؛ و 2259.71 هكتار لأقصى مستوى غمر (6 م).

تكشف خرائط الضعف المطورة عن قابلية التأثر بارتفاع متوسط إلى مرتفع في مستوى سطح البحر. لذلك، هناك حاجة إلى تدابير التكيف الآن. تجمع الخيارات المعروضة بين التقنيات الصلبة والناعمة، بالإضافة إلى التدابير المصاحبة على المدى المتوسط والطويل.

الكلمات المفتاحية: تغير المناخ، ارتفاع مستوى سطح البحر، الضعف، التكيف، خليج زموري، الغمر.