

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الديمقراطية الشعبية الجزائرية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

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



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état
en sciences de la mer et de l'aménagement du littoral

Option : Gestion et Protection du Littoral

THEME

**Impact des événements extrêmes sur le transport sédimentaire
longitudinal**

Cas d'étude : la région Algéroise

Présenté par :

- **BENZERFA Sidahmed**
- **BOURKACHE Redouane**

Soutenu le : 07/07/2022

Devant le jury :

Mr MEZOUAR K.	Professeur	ENSSMAL	Président
Mr DAHMANI A.	Maitre-assistant A	ENSSMAL	Promoteur
Mme ABDEDDAIM H.	Maitre-conférence B	ENSSMAL	Examinatrice
Mme SALEM CHERIF Y.	Doctorante	ENSSMAL	Examinatrice

Promotion : 2021/2022

Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier notre Dieu, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail

En préambule à ce mémoire, nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide qui et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Nous tenons à remercier sincèrement Monsieur **DAHMANI AEA.**, notre promoteur de mémoire, qui s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer.

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

- Monsieur **MEZOUAR K.** qui nous a fait l'honneur d'être le président de jury de cette soutenance.
- Madame **ABDEDDAIM H.** pour avoir accepté d'examiner ce travail
- Nous tenons à remercier madame **SALEM CHERIF Y.** Pour nous avoir fait l'honneur d'être examinatrice et de participer à ce jury de thèse

Par ailleurs, la réalisation d'une partie de ce mémoire a nécessité de connaître les caractéristiques des plages de notre zone d'étude. Nous tenons à remercier Monsieur **ATTALI I.** qui nous a aidé précieusement à obtenir les données nécessaires pour l'étude ainsi que l'équipe du CNL pour leur agréable et sympathique réception.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches, à nos familles et à nos amis, nous tenons surtout à exprimer notre reconnaissance envers nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience au cours de ces longues années d'études, qu'ils savent que nos réussites sont un remerciement pour eux.

Dédicaces

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

À vous mes frères (Walid, Khaled) et sœurs (Myriam et Ryma), qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études.

Redouane

A mes parents qui, (Azaiz Fatima, Benzerfa Abdelkader) sans leur éducation, je n'aurais pas atteint le niveau auquel je suis aujourd'hui, et je n'aurais pas accomplis les ambitions qui étaient hors de ma portée. Ils ont partagé avec moi chaque pas que j'ai pris dans ma vie, et je ne pourrais jamais leur rendre la pareille même si j'aurais consacré tout mon temps. Merci beaucoup, je vous souhaite une santé et un bien-être continus, et que Dieu ne me prive de vous et de votre amour.

Sidahmed

Résumé :

Le secteur d'étude se situe dans la baie de Bou Ismail, il se localise dans le côté Est et Ouest de l'embouchure du fameux oued Mazafran. Le but principal de cette étude est de contribuer à la compréhension de l'impact des événements extrêmes sur le transport sédimentaire longitudinal qui s'effectue aux deux plages de Zéralda et Douaouda. Afin d'atteindre cet objectif, notre démarche commence avec une étude granulo-sédimentaire, les résultats de cette étude ont montré la présence d'une répartition d'un sédiment moyen au niveau de notre site d'étude en biais des résultats de la médiane (D50). Les valeurs de l'indice de classement et du coefficient d'asymétrie indiquent la présence d'un sédiment très bien classé avec un classement maximum vers les particules grossières. Cela montre que les courants existants sont irréguliers et forts. Par la suite, l'étude repose sur une approche d'ajustement statistique. Cette approche est basée sur un traitement statistique pour la détermination des houles extrêmes au large de la baie à l'aide d'Hyfran-Plus, ces valeurs extrêmes sont utilisées dans la modélisation numérique de la propagation de la houle, des courants et du transport sédimentaire (SW, HD, ST). Les résultats montrent l'atténuation de l'énergie des houles du large vers la côte. Les houles les plus énergétiques du Nord-Est et Nord génèrent des courants de dérive littorale avec un transport sédimentaire important, ces derniers sont amplifiés d'une manière importante par les houles extrêmes (Annuelles, décennales et centennales). Ensuite, la prédiction des flux sédimentaires qui constitue l'une des tâches les plus colossales accomplies dans ce travail. Les résultats des flux sédimentaires obtenus par les différentes formules empiriques (CERC, Van Rijn 2006, Kraus et al., 1982, Bayram et al., 2007, Mil-Homens et al., 2013) ont conduit à une étude comparative entre ces différentes formules ainsi que l'influence des événements extrêmes sur les différents paramètres (hauteurs des vagues au point de déferlement, la profondeur de déferlement, vitesse moyenne du courant). Les périodes de retour extrêmes ont un impact très important sur le transport sédimentaire longitudinal selon les prédictions des flux sédimentaires. Enfin, une étude diachronique sur la dynamique du trait de côte au niveau de la zone d'étude a été faite pour confirmer les résultats obtenus par la modélisation numérique et la quantification du transit sédimentaire, cette étude a montré la présence du phénomène d'érosion au niveau des deux plages.

Mots clés : Baie de Bou Ismail, plages, événements extrêmes, transport sédimentaire, simulation, quantification, trait de côte.

Abstract

The study area is located in the bay of Bou Ismail, it is located in the east and west side of the mouth of the famous wadi Mazafran. The main goal of this study is to contribute to the understanding of the impact of extreme events on the longitudinal sediment transport that takes place at the two beaches of Zéralda and Douaouda. In order to achieve this objective, our approach begins with a granulo-sedimentary study, the results of this study showed the presence of a distribution of an average sediment at the level of our study site in bias of the results of the median (D50). The values of the classification index and skewness coefficient indicate the presence of a highly classified sediment with a maximum classification towards coarse particles. This shows that the existing currents are irregular and strong. Subsequently, the study relies on a statistical fitting approach. This approach is based on a statistical treatment for the determination of extreme swells off the bay using Hyfran-Plus, these extreme values are used in the numerical modeling of wave propagation, currents and sediment transport (SW, HD, ST). The results show the attenuation of swell energy from the open ocean to the coast. The most energetic swells from the North-East and North generate littoral drift currents with an important sediment transport, these are amplified in a significant way by extreme swells (annual, decadal and centennial). Secondly, the prediction of sedimentary fluxes which is one of the most colossal tasks accomplished in this work. The results of the sediment fluxes obtained by the different empirical formulas (CERC, Van Rijn 2006, Kraus et al., 1982, Bayram et al., 2007, Mil-Homens et al., 2013) led to a comparative study between these different formulas as well as the influence of the extreme events on the different parameters (wave heights at the point of breaking, the depth of breaking, the average speed of the current). The extreme return periods have a very important impact on the longitudinal sediment transport according to the predictions of sediment flows. Finally, a diachronic study on the dynamics of the coastline in the study area was made to confirm the results obtained by numerical modeling and quantification of sediment transit, this study showed the presence of erosion phenomenon at the level of the two beaches.

Keywords : Bou Ismail Bay, beaches, extreme events, sediment transport, simulation, quantification, coastline.

Table de matières

Introduction générale

Introduction.....	2
-------------------	---

Chapitre I : Etat de l'art

I	Introduction.....	4
I.1	Processus Morphodynamiques côtiers.....	4
I.2	Processus hydrodynamiques.....	5
I.2.1	Le vent	5
I.2.2	La houle	6
I.2.3	Les vagues.....	6
I.2.4	Les courants	7
I.2.5	Les marées	8
I.3	Description du phénomène de déferlement	8
I.3.1	Systèmes de courants liés au déferlement.....	9
I.3.2	Analyse du déferlement	10
I.3.3	Les étapes de déferlement.....	10
I.3.4	Le déferlement sur les plages réfléchives et les plages dissipatives.....	11
I.4	Transport sédimentaire	13
I.4.1	Les différents modes de transport	13
I.5	Transport sédimentaire sous l'action de la houle déferlante et les courants engendrés	14
I.5.1	Transport sédimentaire sous l'action de la houle.....	14
I.5.2	Transport sédimentaire sous l'action des courants engendrés	14
I.6	La pression anthropique.....	15
I.7	Les évènements extrêmes	15
I.7.1	Les tempêtes.....	16

Chapitre II : présentation de la zone d'étude

II	Introduction.....	20
II.1	Cadre géographique.....	20
II.1.1	Baie de Bou Ismail	20
II.1.2	Description du site d'étude.....	21
II.2	Géomorphologie de la Baie	25

II.3	Description sédimentologique de la Baie de Bou Ismail.....	26
II.4	Cadre climatologique et hydrographique de la zone	28
II.4.1	Température et Précipitations :	28
II.4.2	Réseau hydrographique :.....	29
II.5	Données océanographiques	30
II.5.1	Le vent :.....	30
II.5.2	Les courants.....	32
II.5.3	La houle.....	33
II.6	La pression anthropique dans la baie de Bou Ismail	35
II.6.1	Structures côtières	35
II.6.2	Les Ouvrages longitudinaux.....	36
II.6.3	Les ouvrages transversaux (épis)	37
II.6.4	Les ports	37
 Chapitre III : Etude granulo-sédimentaire		
III	Introduction.....	40
III.1	Travaux sur terrain.....	40
III.1.1	Déroulement de la sortie	40
III.1.2	Matériel utilisé.....	41
III.1.3	Prélèvement et positionnement des points de prélèvement.....	42
III.2	Travaux au laboratoire.....	43
III.2.1	Analyse granulométrique par tamisage dans laboratoire :	44
III.2.2	Paramètres granulométriques	46
III.3	Les résultats et discussions :.....	49
III.3.1	L'analyse des courbes granulométriques	49
III.3.2	Calcul des Indices granulométriques.....	53
III.4	Cartographie de la répartition des sédiment analysés	56
III.4.1	Cartographie de la fraction péltique :.....	56
III.4.2	Cartographie de la fraction grossière :	58
 Chapitre IV : Prévisions des houles au large et modélisation hydro-sédimentaire		
IV	Introduction.....	62
IV.1	Analyse statistique des houles extrêmes au large de la baie de Bou Ismail :	62
IV.2	Analyse des houles extrêmes :.....	62
IV.3	Traitement des hauteurs significatives maximales au large de la baie de Bou Ismail	

IV.3.1	La Méthode série des maxima annuel (SMA) :.....	63
IV.3.2	La méthode POT (Peaks Over Threshold)	68
IV.4	Modélisation numérique	70
IV.5	Approche Méthodologique	74
IV.5.1	Acquisition des données bathymétriques	74
IV.5.2	Principe de simulation du MIK21-DHI.....	75
IV.5.3	Interprétation des résultats de simulation pour chaque période de retour en fonction des directions	81
Chapitre V : Quantification du transit sédimentaire longitudinal		
V	Introduction.....	98
V.1	Agents du transport sédimentaire :	98
V.2	Conditions du déferlement.....	98
V.3	Quantification du transport sédimentaire longitudinal	101
V.3.1	Formules empiriques pour le calcul des flux sédimentaires longitudinaux dans la zone de déferlement	102
V.4	Résultat et discussion.....	105
Chapitre VI : Evolution du trait de cote		
VI	Introduction.....	117
VI.1	Logiciels utilisés	117
VI.2	Méthodologie.....	118
VI.2.1	Les opérations de pré calculs	118
VI.2.2	Digitalisation	119
VI.2.3	Génération des transects.....	119
VI.2.4	Calculs statistiques	120
VI.3	Résultats et discussions	120
VI.4	Evolution du trait de cote.....	124
VI.5	Analyse du bilan sédimentaire.....	127

Conclusion générale

Bibliographie

Liste des figures

Figure I. 1: Schématisation d'un processus morphodynamique (Stéphian A., 2002).....	4
Figure I. 2 : Relation spatio-temporelle des systèmes morphodynamiques côtiers (Ardhuin, et al., 2016).....	5
Figure I. 3: formation d'une dépression et vent associé à partir d'un conflit entre masses d'air chaud et froid générant de trains de houle (Lacombe, et al., 1965).....	5
Figure I. 4 : formation de la houle.....	6
Figure I. 5 : Représentation des paramètres caractéristiques des vagues (Berni C., 2011).....	6
Figure I. 6 : Schéma de la dérive littorale par le courant de dérive (EID-Med, 2010).....	8
Figure I. 7 : Etapes du processus de déferlement (D.R. Basco., 1985).....	11
Figure I. 8 : propagation de la houle à la cote, A : cas d'une plage réfléchive, B : cas d'une plage dissipative (Kulkarni, 2003)	12
Figure I. 9: les modes de transport sédimentaire (Vah M., 2019).....	14
Figure I. 10: Schéma de transport par jet de rive et par courant littoral (Bougis j., 1993).....	15
Figure I. 11: Processus physiques en action lors d'une tempête (Frissant N., 2011).....	17
.....	
Figure II. 1: Situation géographique de la baie de Bou Ismail (SASplanet. 2022).....	20
Figure II. 2 : Localisation de la zone d'étude (SasPlanet, 2021)	21
Figure II. 3: Situation géographiques des plages de la zone d'étude (Sasplanet.2021).....	22
Figure II. 4 : Situation géographique de la plage Khelloufi (GoogleEarth Pro, 2021).....	23
Figure II. 5 : Illustration de la plage Khelloufi (12/06/2022)	23
Figure II. 6: situation géographique de la plage de la zone d'étude (SasPlanet, 2021).....	24
Figure II. 8: Illustration de la plage Colonel Abbes (12/06/2022).....	25
Figure II. 7: situation géographique de la plage Colonel Abbes (GoogleEarth Pro, 2021)	25
Figure II. 9 : Carte sédimentologique de la baie de Bou Ismail (LEM, 2009).....	26
Figure II. 10: Histogramme de température moyenne annuelle 2021 (Infoclimat.fr, 2022)	28
Figure II. 11: Diagramme ombrothermique d'évolution au cours de l'année 2021 (températures moyennes en °C et précipitations mensuelles en mm) dans la région de Bou Ismail (infoclimat.fr, 2022).....	29
Figure II. 12 : Réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Mazafran (ANRH, 2005)	30
Figure II. 13: vitesses moyennes des vents saisonnières au large de la baie de Bou Ismail	30
Figure II. 14 : roses des vents annuels et saisonniers (Infoplaza ,2020).....	31
Figure II. 15 : roses des houles annuelles et saisonnières (Infoplaza ,2020).....	34
Figure II. 16 : Images satellitaires entre 1985 et 2022 (GoogleEarth Pro)	35
Figure II. 17 : Enrochement naturel pour la protection de la station de dessalement d'eau de mer de Fouka à Bou Ismail (SASplanet, 2022).....	36
Figure II. 18: Formation des plages à tombolo dans la partie Ouest de l'oued Mazafran (SASplanet, 2022).....	37
Figure II. 19: Batterie d'épis à front de mer au centre de Bou Ismail (SASPlanet, 2022).....	37
Figure II. 20: le Port suivi par des brise-lames pour éviter l'érosion (GoogleEarth, 2022)	38
.....	

Figure III. 1 : Positionnement des points de prélèvement des plages dans la partie terrestre et marine de la zone d'étude.....	43
Figure III. 2 : Courbes cumulatives des 8 échantillons des sédiments terrestres de la plage Khelloufi	50
Figure III. 3 : Courbes cumulatives des 8 échantillons des sédiments marins de la plage Khelloufi ..	50
Figure III. 4 : Courbe cumulatives des 8 échantillons de sédiments terrestres de la plage Colonel Abbas.....	52
Figure III. 5 : Courbes cumulatives des 8 échantillons de sédiments marins de la plage Colonel Abbas	52
Figure III. 6 : Courbe granulométrique l'une stations avec Matlab.....	54
Figure III. 7 : Carte de la répartition des pélites au niveau de la plage Khelloufi	56
Figure III. 8 : Carte de la répartition des pélites au niveau de la plage Colonel Abbas.....	57
Figure III. 9 : Carte de la répartition des grains moyens au niveau de la plage Khelloufi	58
Figure III. 10 : Carte de la répartition des grains moyens au niveau de la plage Colonel Abbas.....	59
.....	
Figure IV. 1 : hauteurs significatives maximales annuelles (Waveclimate, 2020).....	63
Figure IV. 2 : représentation graphique de la loi GEV	65
Figure IV. 3 : représentation graphique de la loi Gumbel.....	66
Figure IV. 4 : représentation graphique de la loi Log-normal	67
Figure IV. 5 : valeurs des hauteurs significatives maximales avec la méthode POT.....	68
Figure IV. 6 : ajustement par la loi de GPD de toute les directions (NE, N, NO, O)	69
Figure IV. 7 : Interface de Mike Zero	71
Figure IV. 8 : création des points bathymétriques sur Arc Gis	75
Figure IV. 9 : maillage du modèle côtier de la baie de Bou Ismail.....	77
Figure IV. 10 : maillage du modèle côtier des deux plages de la zone d'étude	77
Figure IV. 11 : Bathymétrie de la zone d'étude	78
Figure IV. 12 : simulation des modèles direction NE45° pour une période de retour annuelle.....	82
Figure IV. 13 : simulation des modèles direction N 360° pour une période de retour annuelle	83
Figure IV. 14 : simulation des modèles direction NW 315° pour une période de retour annuelle	84
Figure IV. 15 : simulation des modèles direction W 270° pour une période de retour annuelle	85
Figure IV. 16 : simulation des modèles direction NE 45° pour une période de retour décennale	87
Figure IV. 17 : simulation des modèles direction N 360° pour une période de retour décennale.....	88
Figure IV. 18 : simulation des modèles direction NW 315° pour une période de retour décennale ...	89
Figure IV. 19 : simulation des modèles direction W 270° pour une période de retour décennale.....	90
Figure IV. 20 : simulation des modèles direction NE 45° pour une période de retour centennale	92
Figure IV. 21 : simulation des modèles direction N 360° pour une période de retour centennale.....	93
Figure IV. 22 : simulation des modèles direction NW 315° pour une période de retour centennale...	94
Figure IV. 23 : simulation des modèles direction W 270° pour une période de retour centennale.....	95
.....	
Figure V. 1 : histogramme des résultats de calcul du transport sédimentaire longitudinal (m ³ /an) de la plage Khelloufi avec la formule de CERC, Van Rijn (2006)	105
Figure V. 2 : histogramme des résultats de calcul du transport sédimentaire longitudinal (m ³ /an) de la plage Khelloufi avec la formule de Kraus et al., (1982)	106
Figure V. 3 : histogramme des résultats de calcul du transport sédimentaire longitudinal (m ³ /an) de la plage Khelloufi avec la formule de Bayram et al., (2007)	107

Figure V. 4 : histogramme des résultats de calcul du transport sédimentaire longitudinal (m^3/an) de la plage Khelloufi avec la formule de Mil-Homens et al., (2013)	108
Figure V. 5 : histogramme des résultats de calcul du transport sédimentaire longitudinal (m^3/an) de la plage Colonel Abbas avec la formule de CERC, Van Rijn (2006)	110
Figure V. 6 : histogramme des résultats de calcul du transport sédimentaire longitudinale (m^3/an) de la plage Colonel Abbas avec la formule de Kraus et al., (1982)	111
Figure V. 7 : histogramme des résultats de calcul du transport sédimentaire longitudinal (m^3/an) de la plage Colonel Abbas avec la formule de Bayram et al., (2007)	112
Figure V. 8 : histogramme des résultats de calcul du transport sédimentaire longitudinal (m^3/an) de la plage Colonel Abbas avec la formule de Mil-Homens et al., (2013)	113
.....	
Figure VI. 1 : digitalisation des traits de cote selon différentes périodes entre 1999 et 2022.....	119
Figure VI. 2 : position des transects au niveau de la ligne de cote entre 1999 et 2022.....	120
Figure VI. 3 : Mouvement net des rivages (NSM) de la zone d'étude entre 1999 et 2022.....	121
Figure VI. 4 : Evolution du trait de côte entre 1999 et 2022.....	122
Figure VI. 5 : Corrélation entre les taux d'évolution EPR et LRR dans de la zone d'étude.....	123
Figure VI. 6 : Corrélation entre les taux d'évolution EPR et WLR dans de la zone d'étude.....	124
Figure VI. 7 : Evolution du trait de côte entre 1999 et 2009.....	125
Figure VI. 8 : Evolution du trait de côte entre 2009 et 2013.....	126
Figure VI. 9 : Evolution du trait de côte entre 2013 et 2017.....	126
Figure VI. 10 : images satellitaires entre 2013 et 2017.....	127
Figure VI. 11 : bilan sédimentaire de la zone d'étude entre 1999 et 2022.....	128
Figure VI. 12 : Analyse de taux d'évolution en surface de la zone d'étude entre 1999 et 2022.....	128

Liste des photos

Photo III. 1 : Illustration d'une laisse de mer dans la zone d'étude	41
Photo III. 2 : GPS 72H GARMIN.....	42
Photo III. 3 : Courantomètre (ENSSMAL).....	42
Photo III. 4 : matériel utilisé pendant la sortie (sachets, carnet.....)	42
Photo III. 5 : échantillons avant le séchage.....	45
Photo III. 6 : étuve Memmert UN110.....	45
Photo III. 7 : machine à tamiser.....	45
Photo III. 8 : ordinateur et balance de précision.....	45

Liste des tableaux

Tableau II. 1: Caractéristiques des plages de la baie de Bou Ismail (CNL Tipaza,2022).....	27
Tableau II. 2: évolution au cours de l'année 2021 (Températures moyennes mensuelles et précipitations totales mensuelles).....	28
Tableau II. 3: Les coordonnées d'enregistrement.....	30
Tableau II. 4: Pourcentage d'apparition des vents au large par direction (annuel et saisonnier) (Infoplaza,2020).....	32
Tableau II. 5: Fréquences d'apparition annuelles et saisonnières des houles au large par direction (Infoplaza,2020).....	33
.....	
Tableau III. 1 : Classification de la moyenne granulométrique Mz	48
Tableau III. 2 : Classification de l'indice d'asymétrie Sk	48
Tableau III. 3 : classification de l'indice de dispersion So.....	49
Tableau III. 4 : Résultats du coefficient de courbure et d'uniformité de la plage Khelloufi.....	51
Tableau III. 5 : résultats du coefficient de courbure et d'uniformité de plage Colonel Abbes.....	53
Tableau III. 6 : résultats des indices granulométriques avec classement au niveau de la plage Khelloufi.....	54
Tableau III. 7 : résultats des indices granulométriques avec classement au niveau de la plage Khelloufi.....	55
.....	
Tableau IV. 1 : valeurs des paramètres de la loi GEV	64
Tableau IV. 2 : valeurs des quantiles pour les périodes de retour GEV	64
Tableau IV. 3 : valeurs des paramètres de la loi Gumbel	65
Tableau IV. 4 : valeurs des quantiles pour les périodes de retour Gumbel.....	66
Tableau IV. 5 : valeur des paramètres de la loi Log-normal.....	66
Tableau IV. 6 : valeurs des quantiles pour les périodes de retour Log-normal	67
Tableau IV. 7 : résultat des paramètres d'étalement des différentes lois.....	68
Tableau IV. 8 : hauteurs significatives extrêmes en fonction des périodes de retour	69
Tableau IV. 9 : hauteurs significatives extrêmes en fonction des périodes de retour.....	70
Tableau IV. 10 : Données utilisées pour la simulation du modèle SW et HD.....	79
Tableau IV. 11 : sortants du modèle SW	80
Tableau IV. 12 : sortants du modèle HD	80
Tableau IV. 13 : Sortants du modèle ST.....	80
.....	
Tableau V. 1 : calculs de la pente des plages de la zone d'étude pour une houle extrême annuelle (Hs= 4.75).....	101
Tableau V. 2 : calculs de la pente des plages de la zone d'étude pour une houle extrême décennale (Hs= 6.07).....	101
Tableau V. 3 : calculs de la pente des plages de la zone d'étude pour une houle extrême centennale (Hs= 7.03).....	101
Tableau V. 4 : représentation des formules empiriques de la quantification du transit sédimentaire longitudinal.....	104

Tableau V. 5 : Transport sédimentaire longitudinal calculé par la formule de CERC, Van Rijn (2006) dans la plage Khelloufi en m ³ /an	105
Tableau V. 6 : transport sédimentaire longitudinal calculé par la formule de Kraus et al., (1982) dans la plage Khelloufi en m ³ /an	106
Tableau V. 7 : transport sédimentaire longitudinal calculé par la formule de Bayram et al., (2007) dans la plage Khelloufi en m ³ /an.....	107
Tableau V. 8 : transport sédimentaire longitudinal calculé par la formule de Mil-Homens et al., (2013) dans la plage Khelloufi en m ³ /an	108
Tableau V. 9 : transport sédimentaire longitudinal calculé par la formule de CERC, Van Rijn (2006) dans la plage Colonel Abbès en m ³ /an	110
Tableau V. 10 : transport sédimentaire longitudinal calculé par la formule de Kraus et al., (1982) dans la plage Colonel Abbès en m ³ /an	111
Tableau V. 11 : transport sédimentaire longitudinal calculé par la formule de Bayram et al., (2007) dans la plage Colonel Abbès en m ³ /an	112
Tableau V. 12 : transport sédimentaire longitudinal calculé par la formule de Mil-Homens et al., (2013) dans la plage Colonel Abbès en m ³ /an.....	113
.....	
Tableau VI. 1 : Classification des valeurs changement du trait de côte à partir du paramètre EPR (Nassar K et al., 2018).	118

Liste des symboles

D50 : diamètre (moyen) des particules (m)
g : accélération de la pesanteur
L : longueur d'onde (m)
T : période de houle (s)
U : courant horizontal
U_b : valeur maximum de la vitesse orbitale de houle, près du fond (m /s)
N_z : nombre de vagues
H_s : Hauteur significative (m)
C_c : coefficient de courbure
C_u : coefficient d'uniformité
T(°C) : température en
EPR: End Point Rate (m/an)
LRR : Méthode de la Régression linéaire
NSM : Mouvement net des rivages (m)
WLR : taux de régression linéaire pondérée (m)
P : précipitations en (mm/an)
D25 : diamètre du grain à l'ordonnée 25%, c'est le premier quartile
D50 : diamètre du grain à l'ordonnée 50%, c'est la médiane
D75 : diamètre du grain à l'ordonnée 75%, c'est le second quartile
D5 : diamètre du grain à l'ordonnée 5%
D16 : diamètre du grain à l'ordonnée 16%
D30 : diamètre du grain à l'ordonnée 30%
D60 : diamètre du grain à l'ordonnée 60%
D84 : diamètre du grain à l'ordonnée 84%
D95 : diamètre du grain à l'ordonnée 95%
SK : Le coefficient d'asymétrie
So : indice de dispersion
Mz : La moyenne granulométrique
Q_t : sédiments transportés parallèlement à la cote en (m³/s)
H_b : hauteur de la houle significative au point de déferlement
θ_b : angle d'incidence de la houle au point de déferlement en degré (°)
K : coefficient empirique dimensionnel
P : porosité ρ_s : densité des sédiments Kg /m³
γ : coefficient de rupture basé sur 5 % de rupture
tanβ : pente de plage
M : la masse (g)
: viscosité cinématique de l'eau
d* : diamètre sédimentologique
F_b : le flux d'énergie des vagues
W_s : la vitesse de chute (m/s)
V[→] : vitesse moyenne du courant de dérive au milieu du déferlement (m/s)
A : est un paramètre de forme
ε : Un facteur non dimensionnel signifiant la vague effective énergie
C_f : un facteur de frottement
T_m : période moyenne de vague
S_n : le nombre d'unités rocheuses déplacées en raison d'une action de vague
Nod : le nombre de particules déplacées d'une distance l_d sous l'action de 1000 vagues **d** : La profondeur de l'eau

Abréviations

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

CNL : Commissariat National du Littoral

LEM : Laboratoire des Etudes Maritimes

ONM : Office National de Météorologie

LCHF : Laboratoire Central d'Hydraulique de France

GEBCO : Carte Bathymétrique Générale des Océans (*General Bathymetric Chart of the Ocean*)

CETMEF : Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales

GPS : Système de Positionnement Global (*Global Positioning System*)

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

ASAL : Agence Spatiale Algérienne

CERC : Centre de Recherche en Génie Côtier (*Coastal Engineering Research Center*)

GEV : Valeurs Extrêmes Généralisées (*Generalized Extreme Values*)

GPD : Distributions de Pareto Généralisées (*Generalized Pareto Distributions*)

WGS : Système Géodésique Mondial (*World Geodetic System 1984*)

UTM : Transverse Universelle de Mercator (*Universal Transverse Mercator*)

POT : Pic au-dessus du Seuil (*Peaks Over Threshold*)

K,R, 82 : Equation de Kraus et al, 1982

C, (VR,06) : Equation de CERC, modifié par (Van Rijn, 1993,2006)

Br, 07 : Equation de Bayram et al, (2007)

K, (MH, 13) : Equation de Kamphius modifié par (Mil-Homens et al, 2013)

K, m,98 : Equation de Komar (1998)

DSAS : Digital Shoreline Analysis System

SMA : Série des Maximales Annuels

SPM : Manuel de Protection du Rivage (*Shore Protection Manual*)

INTRODUCTION GENERALE

Le climat méditerranéen n'est pas exempt de phénomènes météorologiques violents. Les tempêtes générant les surcotes et les fortes houles, bien que peu fréquentes, sont susceptibles de modifier fortement les conditions littorales durant les tempêtes vingtennales et centennales. Les conditions météo-océanographiques régionales sont déterminantes dans l'apparition des surcotes et des fortes houles, qui constituent, du fait, un danger plus important que l'élévation moyenne du plan d'eau (**Sabatier F., 2003**).

Ces évènements paroxysmaux, redoutés par les populations côtières en raison de leur capacité destructrice (érosion, vents violents, inondations), sont classés parmi les risques naturels les plus courants et font chaque année des milliers de victimes dans le monde, si bien que les régions les plus menacées mettent en place des mesures de surveillance météorologique, de recherche et de prévision de ces phénomènes extrêmes (**Andre et al., 2002**).

Le but de cette étude est de quantifier les transports côtiers de sédiments selon les périodes de retour extrêmes, qui implique le mouvement des sédiments longitudinaux et transversaux à la cote. Une érosion ou une accrétion excessive peut mettre en danger l'intégrité structurale ou l'utilité fonctionnelle d'une plage ou d'autres structures côtières.

Dans un premier chapitre, l'accent est mis sur l'état des connaissances concernant les processus morphodynamiques côtiers, les processus hydrodynamiques, les mécanismes du transport sédimentaire et les notions sur les évènements extrêmes et leurs impacts sur le littoral.

Les caractéristiques géomorphologiques, océanographiques de notre zone d'étude sont présentées dans le deuxième chapitre.

Le troisième chapitre repose sur les expérimentations et analyses contribuées pour cette étude par des analyses granulométriques des sédiments et leur répartition spatiale sur la zone d'étude.

Dans le quatrième chapitre, des traitements statistiques par différentes lois qui servent à déterminer les houles extrêmes dans la zone d'étude pour ensuite les utiliser dans la modélisation hydro-sédimentaire et leur influence sur la cote.

Cette étude présente les informations nécessaires pour comprendre l'impact des évènements extrêmes sur le transport sédimentaire longitudinal sur la cote de notre zone d'étude. Le cinquième chapitre a mis l'accent sur la quantification des transferts sédimentaires longitudinaux par différentes formules en fonction des périodes extrêmes.

Enfin, l'analyse diachronique du trait de côte de la zone d'étude par l'utilisation du DSAS a été laissée dans le dernier chapitre afin de déterminer les phénomènes d'érosion et d'accrétion dans le site d'étude et ainsi confirmer les résultats obtenus dans les chapitres précédents.

Cette étude s'efforce donc à répondre à la problématique suivante :

- ✓ Les évènements extrêmes ont-ils un impact sur le transport sédimentaire longitudinal ?
Et comment ?

CHAPITRE I

Etat de l'art

I Introduction

La zone côtière est définie comme la zone de transition entre la terre et la mer. Cette zone peut s'étendre de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres de part et d'autre de la limite terre-eau. Cette situation géographique lui confère des caractéristiques naturelles et socio-économiques qui favorisent la concentration humaine et les activités d'installation (Urbanisation, ports et infrastructures côtières, ouvrages de protection...etc.), mais cela la rend vulnérable aux pressions de ces derniers et surtout aux pressions physiques tel que les forçages hydrodynamiques (Vagues, marées, vent, courants...).

I.1 Processus Morphodynamiques côtiers

A l'échelle des processus, le comportement d'un système côtier résulte des mouvements à l'interface eau/sédiments. Schématiquement, les conditions hydrodynamiques (vagues, courants, marée) induisent un transport sédimentaire responsable de l'évolution morphologique de la plage (**Devriend et al., 1993**).

La modification des forçages (comme les événements extrêmes) induit une modification de l'hydrodynamique, qui elle-même induit un transport sédimentaire responsable de l'évolution morphologique des zones côtières (**Stéphian A., 2002**).

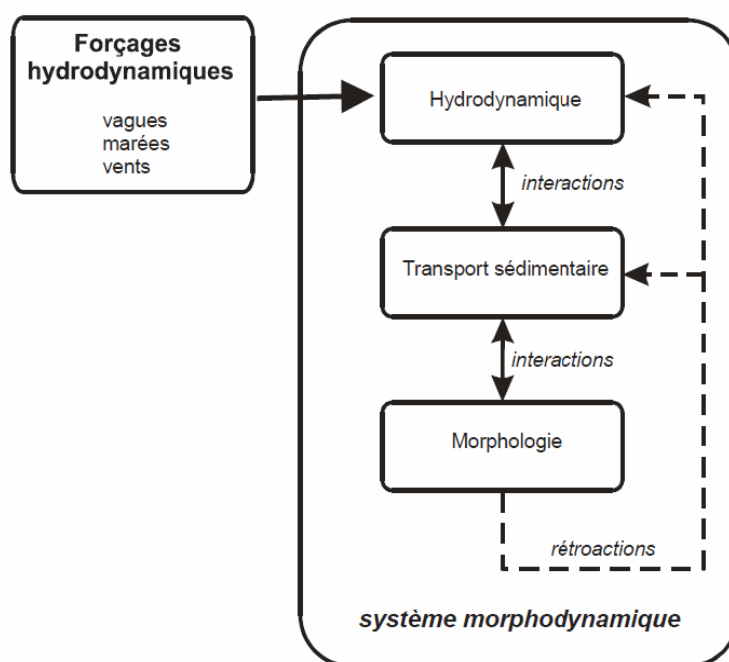


Figure I. 1: Schématisation d'un processus morphodynamique (**Stéphian A., 2002**).

En fonction de l'échelle de temps, le comportement morphodynamique d'un système côtier peut être très variable et chaque échelle de temps correspond à une échelle spatiale, cette relation est représentée dans la figure I.2 (**Ardhuin, et al., 2016**).

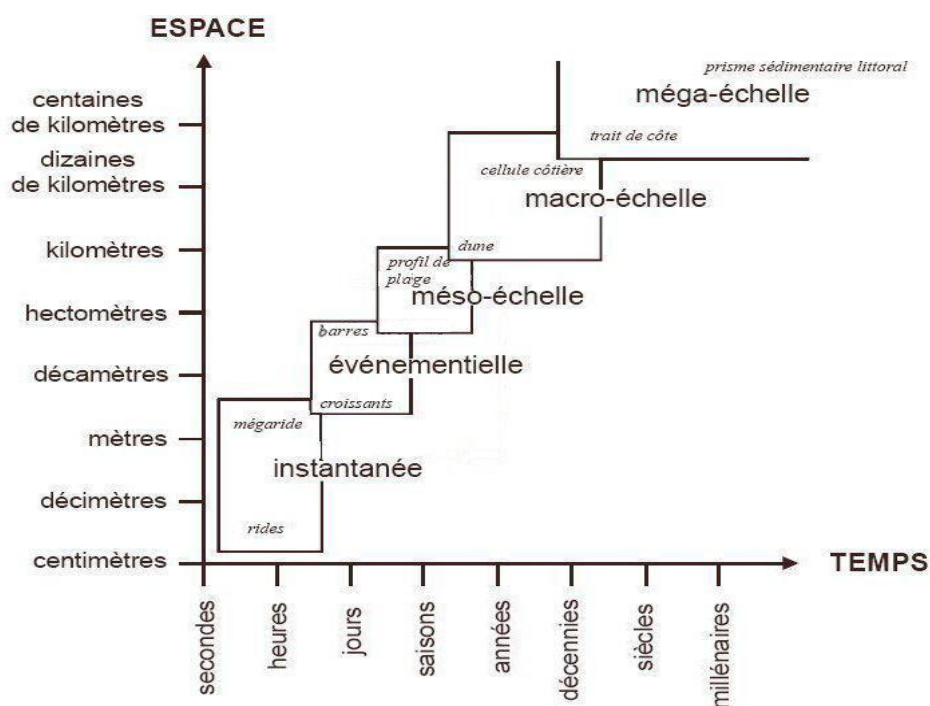


Figure I. 2 : Relation spatio-temporelle des systèmes morphodynamiques côtiers (Ardhuin, et al., 2016).

I.2 Processus hydrodynamiques

I.2.1 Le vent

Le vent est produit par des fluctuations de pression dans l'atmosphère. Les variations de pression créent des contraintes de cisaillement sur la surface de l'eau ce qui conduit en premier lieu aux petites rides (ou ondulations). Ces perturbations produisent ainsi des irrégularités sur la surface et fournissent alors une surface additionnelle sur laquelle le vent réagit. Les ondes vont alors s'accroître en longueur d'onde et en amplitude tant qu'un transfert de quantité de mouvement du vent vers la mer a lieu, jusqu'à ce que la vitesse de phase (célérité ou vitesse de propagation) d'onde devienne égale à la vitesse de vent (Lacombe, et al., 1965).

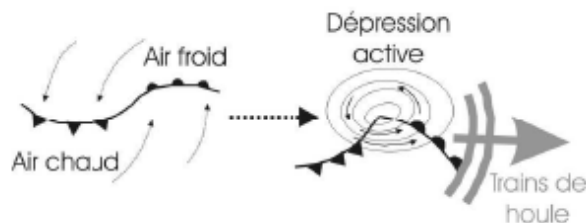


Figure I. 3: formation d'une dépression et vent associé à partir d'un conflit entre masses d'air chaud et froid générant de trains de houle (Lacombe, et al., 1965).

I.2.2 La houle

La houle est un mouvement ondulatoire de la surface de la mer qui est formé par un champ de vent éloigné de la zone d'observation (vent lointain). Elles sont considérées comme un cas particulier de vagues non déferlantes (Mezouar Kh., 2020).

La houle est définie par (Guicher A., 1979) comme un système de vagues plus ou moins réguliers, dans lequel la hauteur est relativement faible par rapport à la longueur d'onde et qui se propage dans la mer hors de la présence du vent qui en est la cause initiale. Car la formation de la houle commence hors de la zone sur laquelle le vent souffle qu'on appelle zone de Fetch.

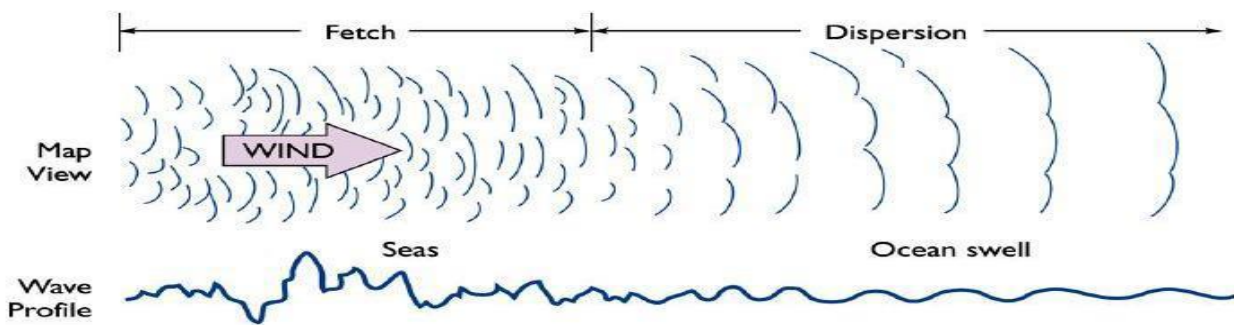


Figure I. 4 : formation de la houle.

I.2.3 Les vagues

Les vagues sont des ondes de gravité qui se propagent généralement au niveau de la surface de la terre, elles sont caractérisées par les principaux paramètres qui sont :

- . La célérité c
- . La hauteur H
- . La période T
- . Longueur d'onde L
- . L'Amplitude $A = H/2$

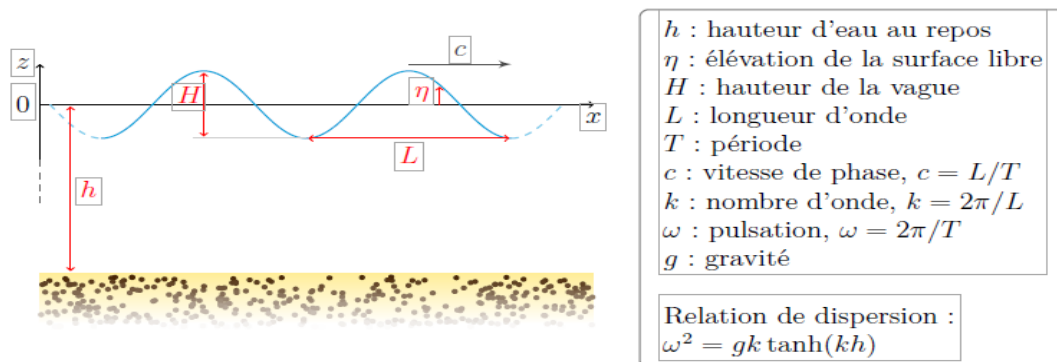


Figure I. 5 : Représentation des paramètres caractéristiques des vagues (Berni C., 2011).

➤ **Le déferlement des vagues**

Le déferlement des vagues est la déformation rapide du profil de l'onde, associé à la production de turbulence. Le déferlement de la houle se produit principalement pour deux raisons différentes : soit la cambrure ($s = H/L$) de la houle devient trop importante, soit c'est sa hauteur relative (H/h) qui devient excessive. En eau peu profonde, le déferlement induit par la profondeur est généralement le facteur dominant tandis que la limite de la cambrure est à prendre en compte essentiellement dans le processus de formation de la houle (CETMEF, 2007).

➤ **Réfraction des vagues :**

Le phénomène de réfraction bathymétrique se produit lorsque la houle pénètre dans un milieu peu profond. Il est dû au fait que la célérité de la houle est une fonction croissante de la profondeur du domaine. Ce phénomène, analogue à la propagation des ondes dans un milieu d'indice variable, a deux conséquences principales, le shoaling puis le déferlement et l'orientation des lignes de crêtes suivant la bathymétrie (Cialone M.A., 1982).

➤ **Diffraction des vagues :**

C'est le phénomène par lequel une onde, en rencontrant un obstacle, génère à l'aval de celui-ci une onde circulaire de même période mais d'énergie décroissante (SMNLR, 2005).

I.2.4 Les courants

Les courants sont des déplacements des masses d'eau, caractérisés par une vitesse, une direction et un débit précis.

I.2.4.1 Les types de courants :

- **Les courants généraux :** Le courant atlantique pénétrant par le détroit de Gibraltar forme des tourbillons anticycloniques de 100km de diamètre, se déplaçant vers l'Est à une vitesse moins de 7 nœuds (Milot L., 1985).
- **Longshore current (courant de dérive littoral) :** C'est un courant qui a lieu quand les houles arrivent avec un certain angle d'obliquité à la côte, il est nommé également courant de dérive. Il joue un rôle important dans la redistribution des sédiments le long du littoral, il peut transporter de grandes quantités de charges solides sur plusieurs dizaines voire plusieurs centaines de kilomètres. Son intensité est maximale derrière le point de déferlement, il peut être généré également à cause d'un changement latéral dans les hauteurs des houles incidentes (Castelle B., 2004).

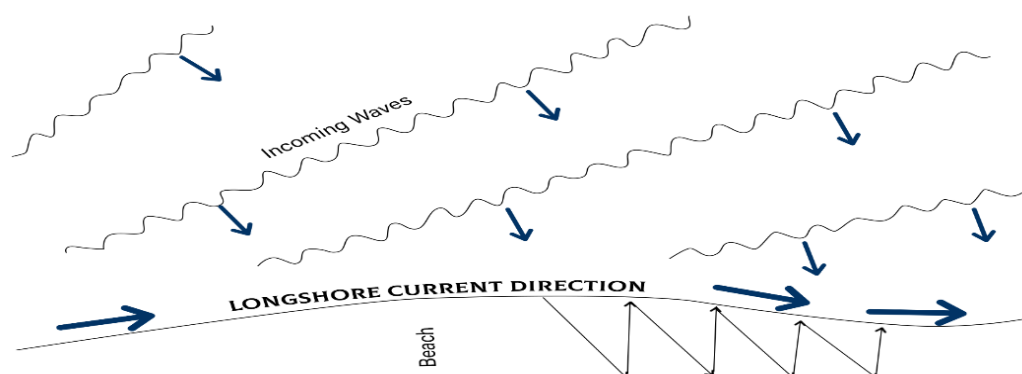


Figure I. 6 : Schéma de la dérive littorale par le courant de dérive (EID-Med, 2010).

- **Rip current (courant sagittal) :** Le courant sagittal est un courant violent, intense et étroit dirigé vers le large, qui est observé sur de nombreuses plages. Il transporte de grandes quantités de sédiments (Castelle B. et Bonneton P., 2006).
- **Courant de retour :** au contact de la cote, le courant existant au lieu du déferlement engendre des courants de retour, leurs vitesses dépendent de l'énergie de la houle et de la pente de la plage. Ces courants sont les responsables de la dissipation d'une partie des sédiments côtiers vers le large (Mezouar Kh., 2004).

I.2.5 Les marées

La marée est une variation oscillatoire du niveau de la mer due à l'action gravitationnelle (attraction newtonienne) des astres, notamment la lune et le soleil. Ces fluctuations de niveau vont générer des courants de marée que l'on qualifiera de « gravitationnels » (Jaud M., 2011).

I.3 Description du phénomène de déferlement

Lorsque la houle aborde une pente formée par le rivage ou un ouvrage, il vient un moment où les conditions de profondeur nécessaires à sa propagation ne sont plus remplies. L'énergie de l'onde est alors libérée, plus ou moins brutalement. Le profil de la vague est modifié, elle s'aplatit et les vitesses horizontales de l'eau augmentent considérablement ; il se produit des projections d'eau mêlée d'air et des sortes de chocs : *c'est le déferlement* (Graillet A., 1975).

Le déferlement est un phénomène au cours duquel l'onde est partiellement ou totalement détruite, il est caractérisé par un haut niveau de turbulence et une grande dissipation d'énergie. Du point de vue hydrodynamique, le phénomène se produit lorsque (Graillet A., 1975) :

- La vitesse des particules sur la crête de l'onde dépasse la célérité ;
- La condition de pression "nulle" à la surface ne peut plus être satisfaite ;
- L'accélération des particules à la crête est plus grande que l'accélération de la pesanteur
- La surface libre devient verticale

I.3.1 Systèmes de courants liés au déferlement

En déferlant, la houle subit une transition très rapide suivant une dynamique extrêmement complexe. Ce phénomène peut être défini comme une transformation du mouvement irrotationnel des particules d'eau en un mouvement rotationnel.

Dans la zone de déferlement, une "barre" d'eau se déplace vers les profondeurs décroissantes (**D.R. Basco 1985., J.C. Ingle., 1966**). La compensation de la quantité de mouvement se traduit alors par des courants de retour vers le large.

Il existe deux types de courants de retour vers le large : Le premier, qui se manifeste sporadiquement dans une étroite bande perpendiculaire à la ligne de côte dans l'espace bidimensionnel horizontal, est connu sous le nom de courant sagittal ("rip-current"). Le second qui apparaît, tout au long de la côte, dans l'espace bidimensionnel vertical, est connu sous le nom de courant de compensation ("undertow-current"). Il est responsable de l'érosion des côtes et de la formation des barres sableuses parallèlement au trait de côte.

Dans le cas où la houle déferle obliquement au trait de côte, elle génère un courant littoral parallèle à la côte ("longshore-current"). Ce courant présente une importance particulière dans la mesure où il transporte des sables, le long de la côte, sur des distances considérables (**P.D. Komar., 1983**).

Le processus qui gouverne l'écoulement dans la zone de déferlement est un phénomène encore non quantifiable dans la mesure où le problème de la mécanique des fluides correspondant n'a pas actuellement reçu de solution (**D.R. Basco., 1985**). Cet écoulement n'est pas assez bien connu pour permettre d'identifier convenablement ses caractéristiques. Il n'existe donc pas aujourd'hui de modèles théoriques permettant de déterminer le champ de vitesses sur toute la colonne d'eau pendant le déferlement. Un tel modèle permettrait d'avoir une détermination théorique des efforts de la houle, de ses flux d'énergie moyenne et de la dissipation d'énergie qui sont des informations indispensables pour estimer ensuite les variations des hauteurs moyennes de la surface libre ("wave set-up" et "wave setdown").

Le processus du déferlement en s'orientant vers les trois axes suivants :

- 1) identification des types de déferlement et des formes successives de la houle déferlante (**D.A. Patrick et R.L. Wiegel., 1954., A.T. Ippen. et G. Kulin., 1955**).
- 2) détermination de la hauteur maximale de la houle déferlante et de la profondeur du point de déferlement en fonction des caractéristiques de la houle et de la plage (**H.W. Iversen. 1953., A.T. Ippen et G. Kulin. 1955**).
- 3) connaissance de la distance horizontale traversée par la houle pendant son déferlement (**C.J. Galvin. 1969**).

I.3.2 Analyse du déferlement

D'après (**D.R. Basco. 1985**), les déferlements glissants et plongeants sont deux extrêmes d'une gamme de déferlements naturels.

Les déferlements à effondrement arrivent en dernier lieu sur la plage. Ils sont similaires aux déferlements plongeants à l'exception du fait que le jet commence à un niveau très en dessous de la crête (**C.J. Galvin. 1976**).

Partant de cette approche, (**R.L. Miller. 1976**) a conclu que l'allure du mouvement d'eau, ainsi que celle des systèmes tourbillonnaires dans les deux déferlements plongeants et glissant sont similaires, mais avec des échelles très différentes.

I.3.3 Les étapes de déferlement

(**D.R. Basco. 1985**) a résumé l'évolution d'un processus de déferlement par les étapes suivantes :

- 1) La houle commence à déferler.
- 2) Le jet plonge au-dessus du creux qui se déplace en sens inverse.
- 3) Le jet plongeant heurte la surface libre, c'est l'éclaboussement.
- 4) Le jet plongeant pénètre dans l'eau, sous le creux. L'écoulement de l'eau qui revient en sens inverse détourne le jet submergé, à la fois vers l'aval et vers l'amont, par rapport à la direction de la houle. C'est le début du mouvement rotationnel (tourbillon).
- 5) L'eau piégée est comprimée par le mur d'eau verte, situé sous la crête, qui se déplace horizontalement avec formations de bulles d'air à l'intérieur de la masse d'eau.
- 6) La masse d'eau de l'éclaboussement, retombe en formant à la surface un rouleau comparable à celui d'un ressaut hydraulique.
- 7) Le tourbillon issu du jet plongeant se déplace horizontalement en créant une onde de perturbation secondaire, et fait augmenter la dimension ainsi que l'intensité du rouleau de surface.
- 8) La base du rouleau de surface glisse en descendant dans le creux de la vague qui revient en sens inverse pour arriver à une position d'équilibre. Le rouleau de surface se développe.
- 9) Le tourbillon issu du jet plongeant se déplace vers l'amont tandis que l'onde secondaire continue de se propager.
- 10) Le déferlement touche à sa fin quand le rouleau de surface atteint une position d'équilibre et quand le transfert horizontal du tourbillon issu du jet plongeant cesse de générer l'onde secondaire. C'est là que commence la zone après le déferlement.

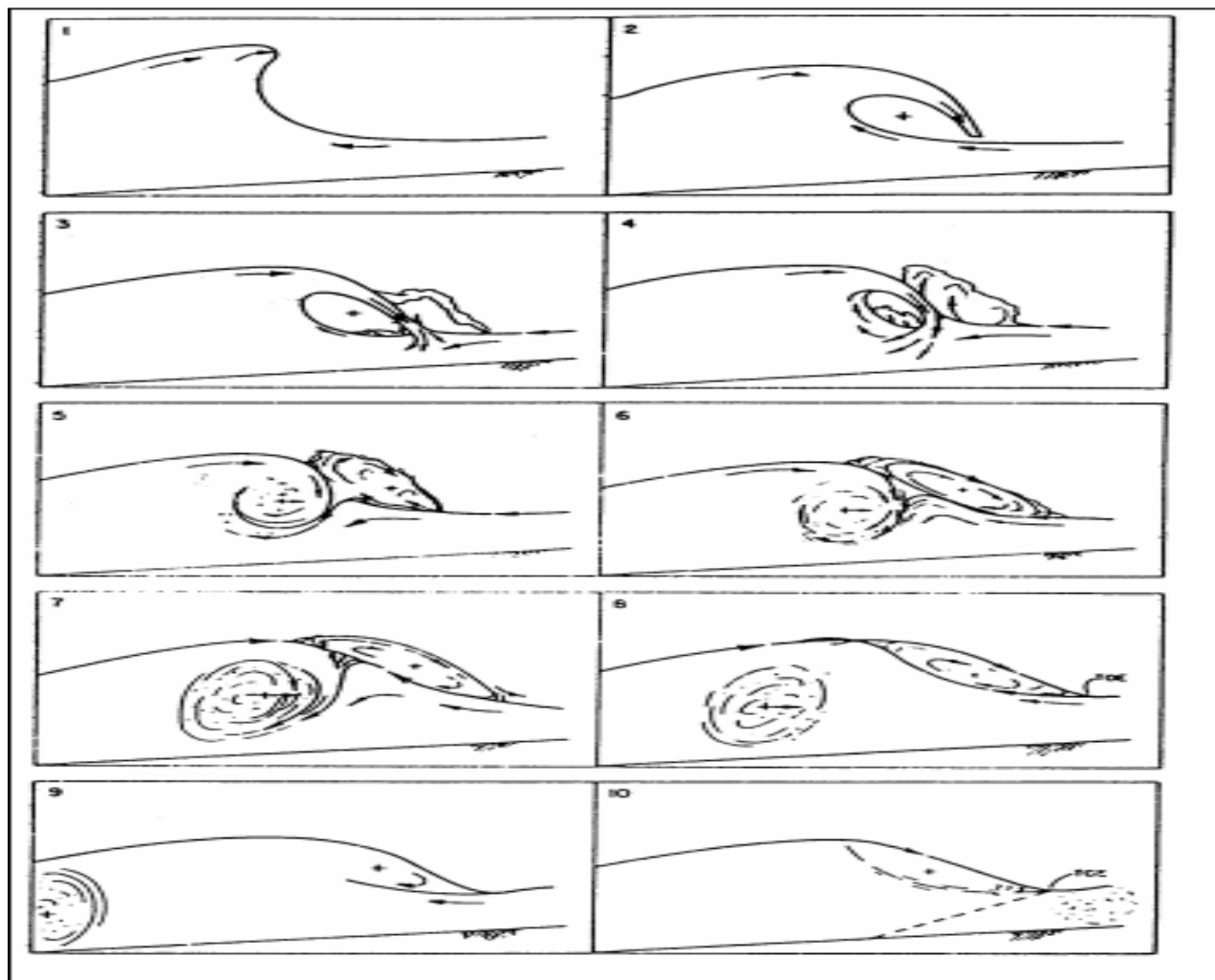


Figure I. 7 : Etapes du processus de déferlement (D.R. Basco., 1985)

I.3.4 Le déferlement sur les plages réfléchives et les plages dissipatives

- Type réfléchif :

Les plages réfléchives telles que définies par **Guza et Inman (1975)** sont généralement présentes dans des conditions de vagues de moins d'un mètre. Dans ce cas, l'énergie des vagues incidentes est en grande partie réfléchiée par la plage du fait de ses caractéristiques intrinsèques. Les plages composées de sédiments mixtes à grossiers, sont le plus souvent réfléchives quelles que soient les conditions de houle. Elles sont pentues, relativement étroites et ne présentent pas de barre, ni de zone de surf. Une marche (step) est toujours présente à proximité du niveau statique de marée basse ou de pleine mer (**Short, 1999**).

- **Type dissipatif**

Contrairement aux plages réfléchives, les plages dissipatives sont larges et présentent une vaste zone de surf où les brisants de type déversant (spilling breakers) dissipent leur énergie (**Guza et Inman, 1975 ; Wright et Short, 1984**). Les conditions énergétiques sont fortes avec des vagues parfois supérieures à 2,5 m. La pente de ces types de plages est faible. Elles ne comportent pas de marche et peuvent présenter des barres intertidales (**Masselink et Short, 1993**). La zone subtidale contient généralement plusieurs barres. Les variations morphologiques longitudinales sont quasiment inexistantes. Les vagues sont de type déversant (spilling breakers) à plongeant (plunging breakers). Du fait de la forte dissipation d'énergie dans la zone de surf, la houle incidente gravitaire est pratiquement complètement dissipée en arrivant dans la zone de swash.

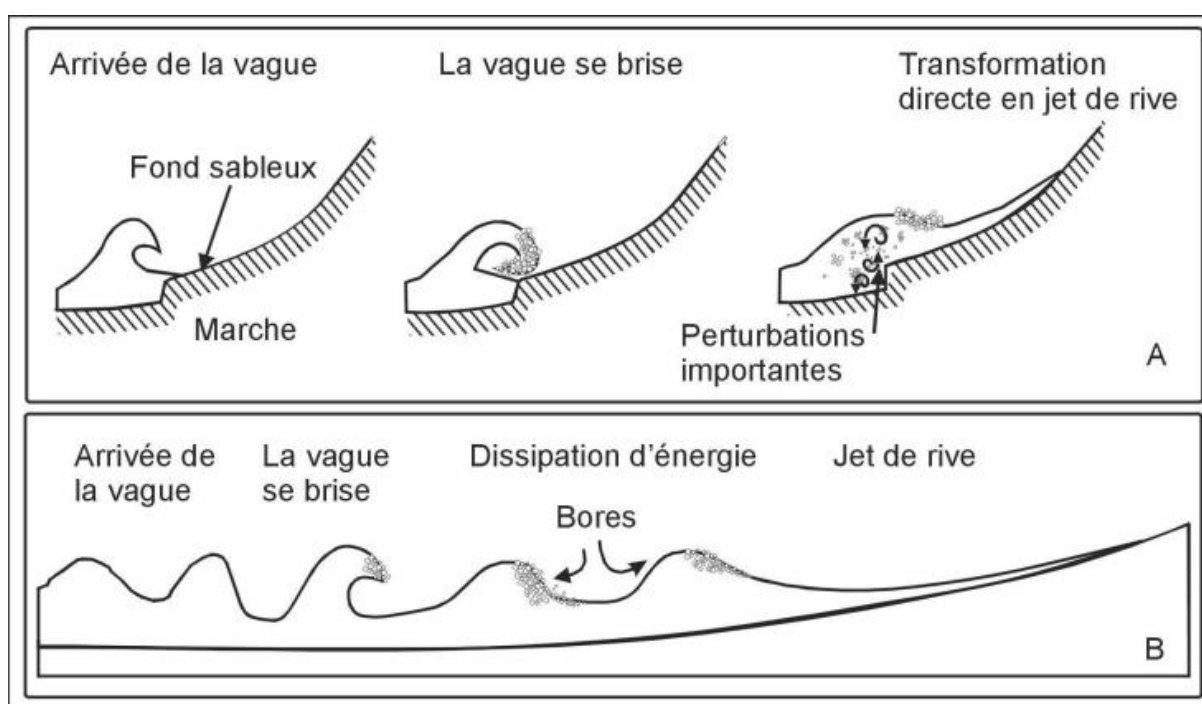


Figure I. 8 : propagation de la houle à la cote, **A** : cas d'une plage réfléchive, **B** : cas d'une plage dissipative (**Kulkarni, 2003**)

I.4 Transport sédimentaire

Le transport sédimentaire est contrôlé par de nombreux processus, parmi ces processus on peut citer l'intensité des courants et des houles. Cela veut dire que les sédiments vont être transportés au long des rivages par l'obliquité de propagation des houles par rapport à la direction générale du trait de côte et aussi par les courants littoraux. A cela s'ajoute l'énergie au moment du déferlement qui favorise la remise en suspension des sédiments (**Dahmani A., 2022**).

Il faut prendre en considération le type du littoral, dans notre cas, le choix de l'échelle spatio-temporelle est judicieux pour notre zone d'étude. Etant donné que l'échelle est grande, nous avons jugé nécessaire de prendre une seule plage pour mieux comprendre l'impact des événements extrêmes sur le transport sédimentaire longitudinal.

I.4.1 Les différents modes de transport

Les taux de transport total sont calculés de la manière suivante :

$$Q_t = Q_c + Q_s$$

Q_t = Le taux de transport total

Q_c = Le transport par charriage et saltation

Q_s = Le transport en suspension

La quantité des sédiments peut être mesurées en masse ou en volume, de sorte qu'en unités SI, le taux de transport des sédiments est donné en $kg\ m^{-1}\ s^{-1}$ ou en $m^3\ m^{-1}\ s^{-1}$ ($= m^2\ s^{-1}$).

1. Transport par charriage

Ce transport s'effectue dans le cas des fonds inclinés en présence de la gravité. Il est dominant pour les flux lents et les grains de grande taille. Dans ce cas de transport, les sédiments sont en contact avec le fond (sauf pour de très courtes durées pendant le « saut »). Sur les plages sableuses, ce mode est favorisé par la présence de conditions peu énergétiques. En général, le charriage est pour les grains plus grossiers qu'environ 2mm. (**Vah M., 2019**).

2. Transport par saltation

Ce type de transport correspond à un mouvement de grains par petits bonds, où les grains perdent alors le contact avec le fond pour un temps court et sur une hauteur de l'ordre de quelques diamètres de grains (**Vah M., 2019**).

3. Transport par suspension

Les sédiments peuvent être arrachés au fond (par turbulence ou par la présence d'un courant suffisamment intense), les grains de sable sont advectés par l'écoulement et sont transportés dans la colonne d'eau. Lors de ce transport, le sédiment ne touche plus le fond pendant de longues périodes. Ce mode est favorisé par la présence de conditions énergétiques plus fortes que celui du charriage, le flux est donc plus rapide et la taille des grains est moins de 0.2mm (**Vah M., 2019**).

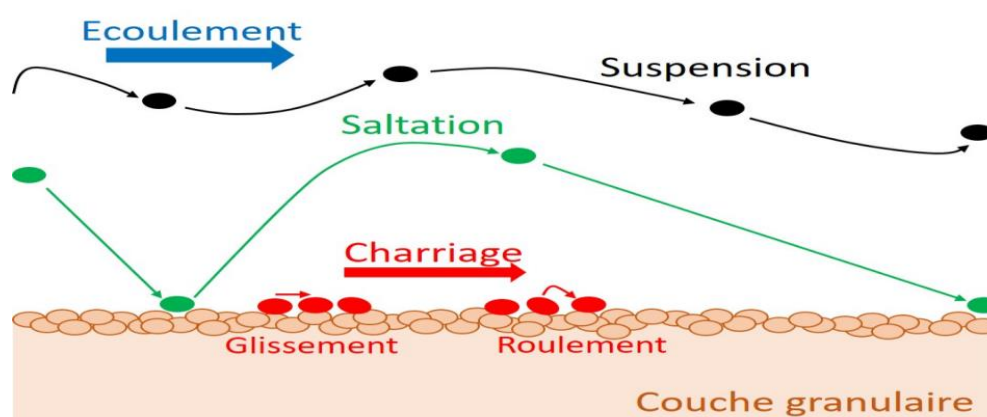


Figure I. 9: les modes de transport sédimentaire (Vah M., 2019).

I.5 Transport sédimentaire sous l'action de la houle déferlante et les courants engendrés

I.5.1 Transport sédimentaire sous l'action de la houle

La houle est le principal acteur responsable du transport des sédiments le long des rivages. Son action dépend du type de littoral et de l'obliquité de sa propagation par rapport à la direction générale du trait de côte (Dahmani A., 2021).

Selon la vitesse et la direction de la houle, les courants générés par celle-ci auront un effet destructif ou constructif vis-à-vis de la plage. L'effet de la houle sera d'autant plus important sur la mobilité du sédiment au fond que la période et l'amplitude sont plus grandes et que les fonds sont élevés. Les houles provoquent des transports (Adjal M., et EL-Hassanin M., 2014) :

- Perpendiculairement à la ligne de rivage : provoqué par le frottement des vagues sur le fond, le jet de rive et la nappe de retrait dans la zone de déferlement. En période d'été, il se forme des accumulations en haut de plage tandis qu'en hiver l'entraînement des sédiments se fait vers la plage avec une érosion de la plage et engraissement des barres pré littorales.
- Parallèlement au rivage : En déferlant, les lames arrachent des sédiments au fond et les ramènent en surface vers le haut de plage dans la direction de propagation de la houle. Après le déferlement, l'eau redescend sur la plage en entraînant les sédiments selon la ligne de plus grande pente (Figure I.8). Ainsi, sous l'action de lames déferlantes obliques, les sédiments suivent un chemin en dents de scie et progressent parallèlement au rivage dans le sens de l'obliquité de la houle.

I.5.2 Transport sédimentaire sous l'action des courants engendrés

On sait très bien que les houles de cambrure importante déferlent avant d'arriver sur le haut de plage. Leur courant de retour crée alors une barre de sable parallèle au rivage (barre sédimentaire). En déferlant sur cette barre, l'eau remet en suspension et l'entraîne dans le canal formé entre la barre et la plage (Figure I.8). Les sédiments sont ensuite emportés par charriage

et suspension par le courant littoral « longshore-current » qui circule dans ce canal (**Bougis j., 1993**).

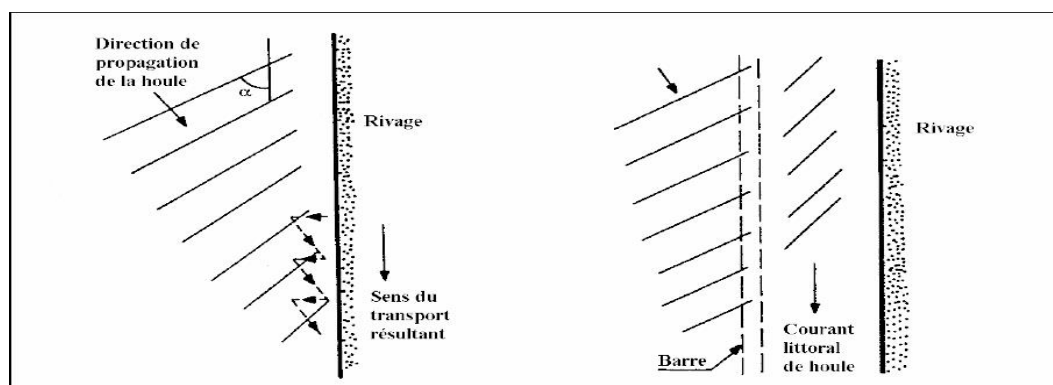


Figure I. 10: Schéma de transport par jet de rive et par courant littoral (**Bougis j., 1993**).

Les courants de retour peuvent également induire un intense transport sédimentaire vers le large en particulier pendant les épisodes de tempêtes. Ils peuvent aussi exposer les plages à l'érosion et provoquer des mouvements importants des barres sédimentaires perpendiculairement à la cote (**Dung T., 2009**).

I.6 La pression anthropique

Parmi les effets de forçage anthropique, la dégradation côtière qui est un problème que l'on retrouve dans le monde entier, notre littoral n'est malheureusement pas épargné par ce phénomène de plus en plus fréquent sur nos côtes. Le danger de voir nos plages se défigurer et perdre de leur biodiversité est aujourd'hui encore plus réel, atteignant un niveau suffisamment alarmant pour que les autorités se décident à mettre en œuvre une stratégie qui permettra leur reconstitution et leur protection (**Otmani H., 2010**).

La pression démographique, constructions côtières, ouvrages de protection, barrages et urbanisation : telles sont les conséquences à redouter sur le littoral qui vont intervenir dans son évolution (érosion, engraissement, blocage du transit sédimentaire...), l'augmentation de sa vulnérabilité est donc inévitable.

I.7 Les évènements extrêmes

Tempête, storms, ouragan, tempstade... sont autant de noms qui désignent, dans le monde, les phénomènes météo-marins de forte intensité affectant les littoraux, mais aussi les territoires continentaux. De nombreuses cotes basses, parfois gagnées sur la mer au cours des siècles derniers, sont aujourd'hui soumises à des processus d'érosion et de recul du trait de côte, ainsi qu'à des submersions des cordons dunaires et des fronts de mer, dans lesquels l'urbanisation croissante, les nombreux aménagements et protections côtières jouent un rôle non négligeable (**Stive et al., 2002**). Ces événements ont une capacité destructrice (érosion, vents violent, inondation) dont elles vont avoir une influence très remarquable sur la morpho dynamique côtière y compris pour le transport sédimentaire au niveau du littoral.

I.7.1 Les tempêtes

Une tempête au sens météorologique se définit par la notion de régime de tempête analysé notamment par (**Tripzit.et al., 1977**), durant lequel une perturbation génère des vents forts et une chute de la pression atmosphérique. En termes de météorologie marine, une tempête se caractérise par une augmentation de l'intensité des agents de forçage météo-marin, c'est-à-dire du vent, de la houle, de la pression atmosphérique et du niveau instantané de la mer. (**Provansal M., 1996**).

Pour l'espace littoral, Les tempêtes provoquent des modifications instantanées à son niveau. Leur répartition pluriannuelle pose des problèmes du rapport entre le fonctionnement modal et les phénomènes exceptionnels dans l'évolution morphologique côtière et de leur identification sédimentaire (**Bruzzi, C., Provansal, M, 1996**). Elles sont des agents morphogéniques essentiels qui interviennent dans l'évolution des milieux littoraux.

Il est bien clair que les tempêtes peuvent avoir des conséquences destructives sur le milieu littoral (**Provansal M., 1996**).

a) Processus physiques

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

- La chute de la pression atmosphérique entraîne une surélévation du niveau de plan d'eau. C'est le phénomène de baromètre inverse. Une diminution de 1hPa équivaut approximativement à une élévation de 1cm du plan d'eau.
- Le vent a un double effet sur le plan d'eau :
 - Les vagues dont les caractéristiques, hauteur, période, secteur de provenance, sont directement liés à celles du vent et au Fetch.
 - Il exerce une contrainte à la surface de l'eau en générant une modification du niveau du plan d'eau statique (surcote ou décote) et des courants.
- Les vagues générées au large par le vent, se propagent vers la cote d'une manière plus intense, cela veut dire que l'énergie du déferlement va provoquer une surélévation moyenne du niveau de la mer (wave set-up), ou set-up, pouvant s'élever à plusieurs dizaines de centimètres.

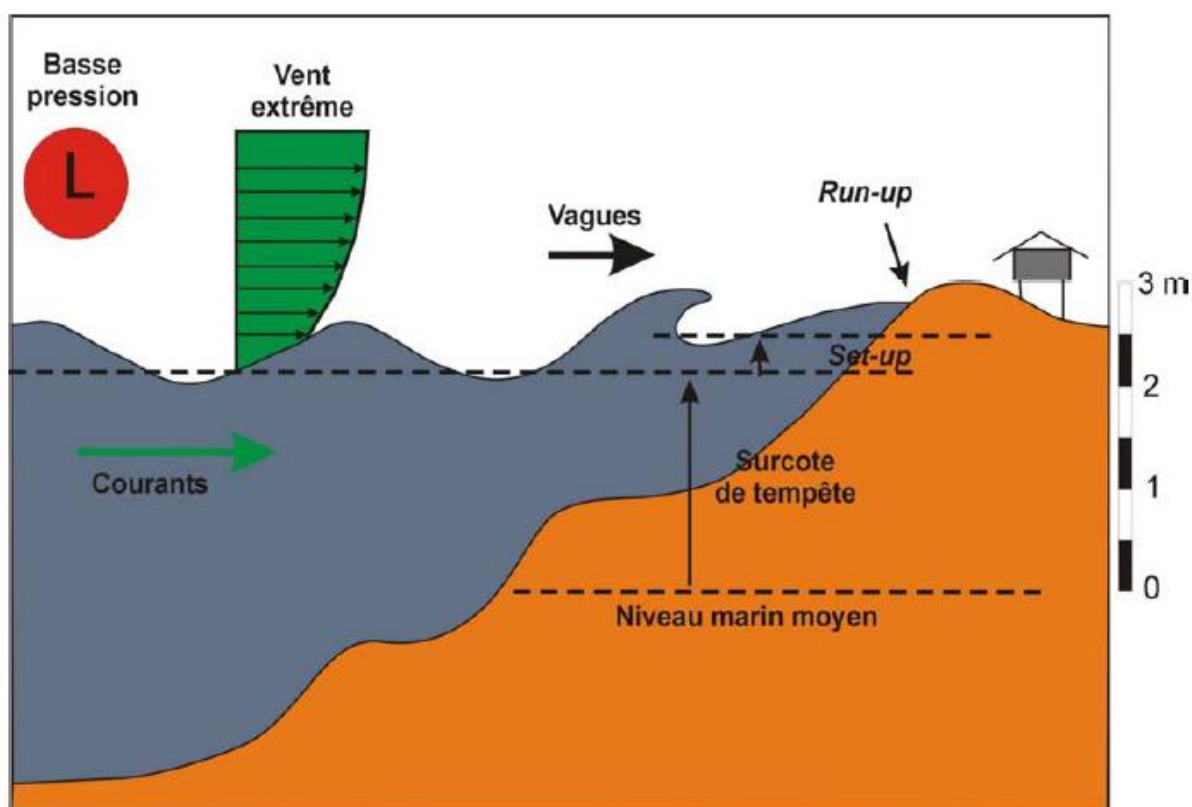


Figure I. 11: Processus physiques en action lors d'une tempête (Frissant N., 2011).

Le niveau maximal atteint par la mer est défini en tenant compte du jet-de-rive « swash ». On appelle run-up, l'altitude maximale atteinte par le jet-de-rive sur la côte.

b) Aléas et risques côtiers liés aux tempêtes

Les risques côtiers associés aux phénomènes de tempêtes sont :

- La submersion marine
- L'érosion et recul dur trait de cote
 - **Submersion marine**

La submersion marine est définie comme une inondation temporaire de zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques et marégraphiques sévères (Meedat, 1997). Les submersions envahissent généralement les terrains situés en dessous du niveau des plus hautes mers mais atteignant aussi parfois des altitudes supérieures si des projections d'eaux marines franchissent des ouvrages de protection ou la crête des cordons littoraux. Elles peuvent se produire lorsqu'il y a :

- . Rupture d'un cordon sédimentaire (plage, dunes) suite à une forte érosion.
- . Débordement ou rupture de digues et d'ouvrages de protection.
- . Franchissements exceptionnels de ces ouvrages.

- **Recul du trait de cote**

Le recul du trait de côte est le déplacement vers l'intérieur des terres de la limite entre le domaine marin et continental (**Meedat, 1997**). C'est la conséquence d'une perte de matériaux sous l'effet de l'érosion marine, combinée parfois à des actions humaines (barrages, prélèvements de sédiments...).

CHAPITRE II

Présentation de la zone d'étude

II Introduction

Notre recherche est réalisée dans la baie de Bou Ismail située à l'Ouest d'Alger. Dans ce chapitre on se base sur le contexte général de notre zone d'étude, la baie de Bou Ismail. En commençant par aborder la situation géographique, ensuite passer aux descriptions des différents cadres : géomorphologiques, sédimentologiques, climatologiques, hydrographiques et océanographiques. Nous allons aussi parler des pressions anthropiques que subisse cette zone, ces pressions peuvent avoir des impacts sur la côte Ouest algéroise sans oublier le contexte environnemental qui se porte sur l'état de pollution de la région de Bou Ismail.

II.1 Cadre géographique

II.1.1 Baie de Bou Ismail

La baie de Bou Ismail est située dans la partie centrale du littoral algérien, à 50km à l'Ouest d'Alger dans la wilaya de Tipaza, dont une petite partie empiète sur la wilaya d'Alger, sa latitude est de $36^{\circ}38'33''$ Nord, et sa longitude est de $2^{\circ}41'24''$ Est. L'ouverture de cette baie s'oriente selon un axe nord-ouest d'environ 40km et couvre une surface de l'ordre de 350km². Elle est délimitée à l'Ouest par le massif du Chenoua et à l'Est par le massif de Bouzeréah, la plaine de la Mitidja au Sud et par la mer méditerranéenne au Nord.

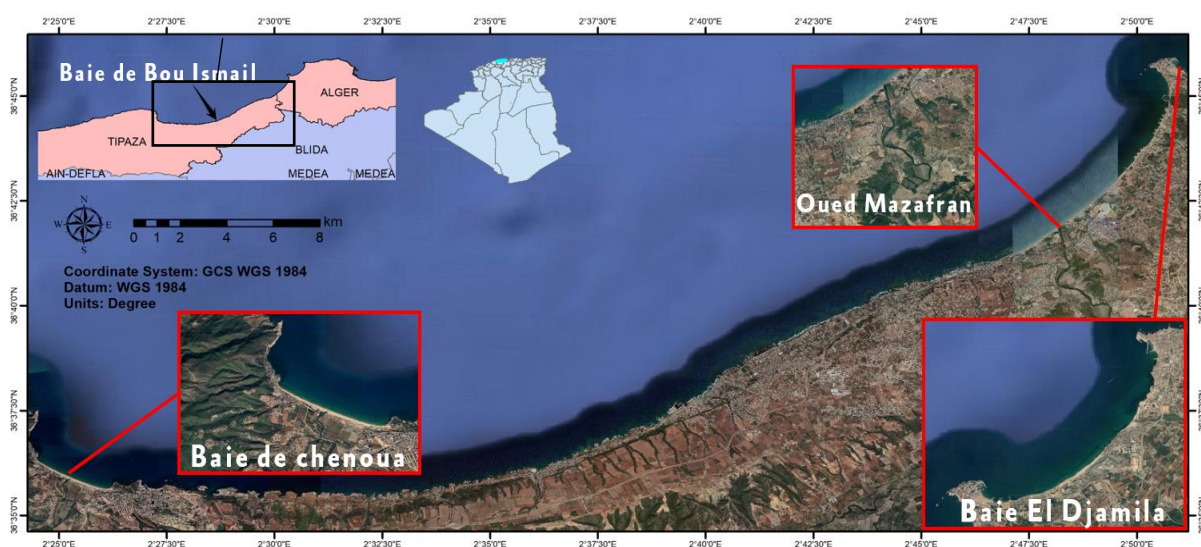


Figure II. 1: Situation géographique de la baie de Bou Ismail (SASplanet. 2022).

La baie de Bou Ismail est divisée en quatre zones géographiques :

- La baie d'El Djamilia limitée à l'Est par Ras Acrata et à l'Ouest par la presqu'île de Sid Fredj caractérisée par une cote basse sableuse et de nombreuses formations dunaires.
- Le Secteur SidiFredj-Oued Mazafran constitué environ 12km de plages.
- Une côte rocheuse : au long de 30km la limite à l'Ouest est Tipaza
- La baie du Chenoua où se jette l'oued Nador débute à partir de Tipaza : elle est bordée dans sa partie Ouest par le massif du Chenoua.

II.1.2 Description du site d'étude

La zone d'étude englobe deux plages de différentes wilayas (Alger et Tipaza) séparées par le fameux oued Mazafran, cette zone est délimitée par deux épis Est et Ouest.

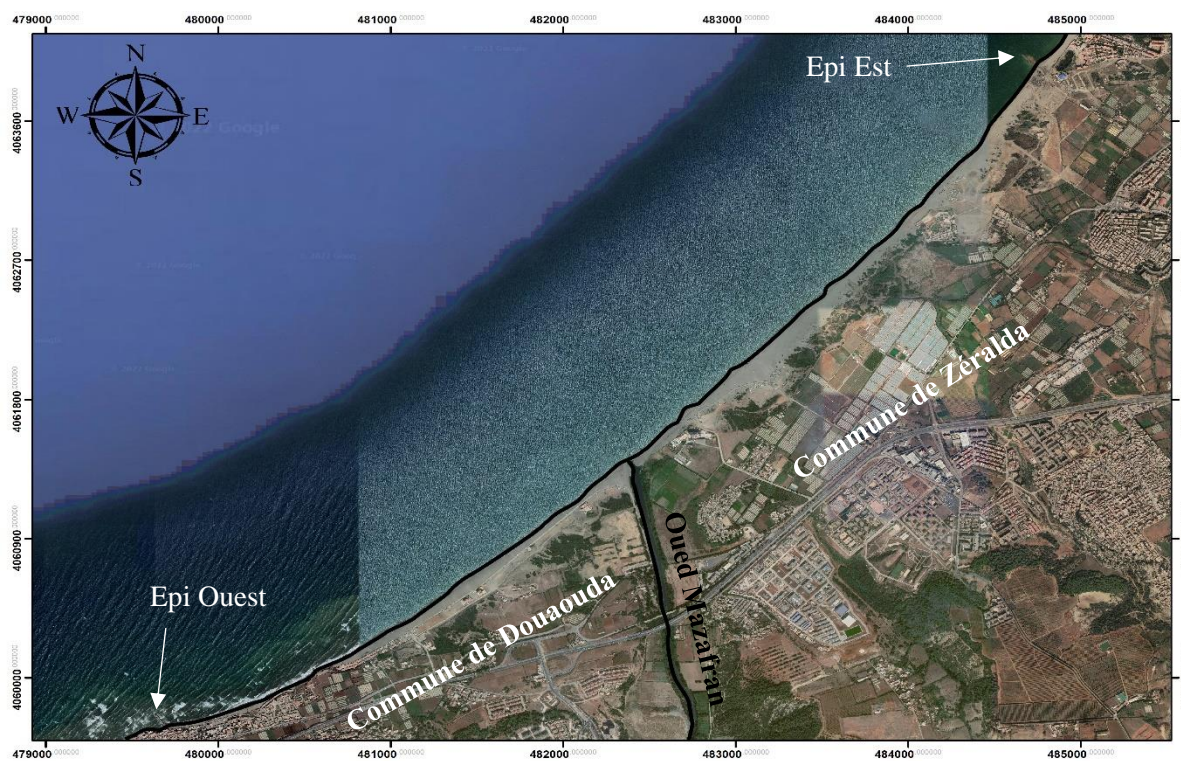


Figure II. 2 : Localisation de la zone d'étude (SasPlanet, 2021)

II.1.2.1 La commune de Zéralda

Zéralda est une commune de la Wilaya d'Alger en Algérie, située dans la banlieue Ouest d'Alger à environ 26km, On trouve au sud-ouest l'oued Mazafran et au nord-est Mehelma dit aussi « ravin des voleurs ».



Figure II. 3: Situation géographiques des plages de la zone d'étude (Sasplanet.2021).

A) La plage Khelloufi :

Située à gauche de la plage Zéralda 1 près de l'embouchure de l'oued Mazafran, d'une longueur de 800m et une largeur de 40m, elle est constituée de sable fin à grossier (CNL Tipaza, 2022).



Figure II. 4 : Situation géographique de la plage Khelloufi (GoogleEarth Pro, 2021)

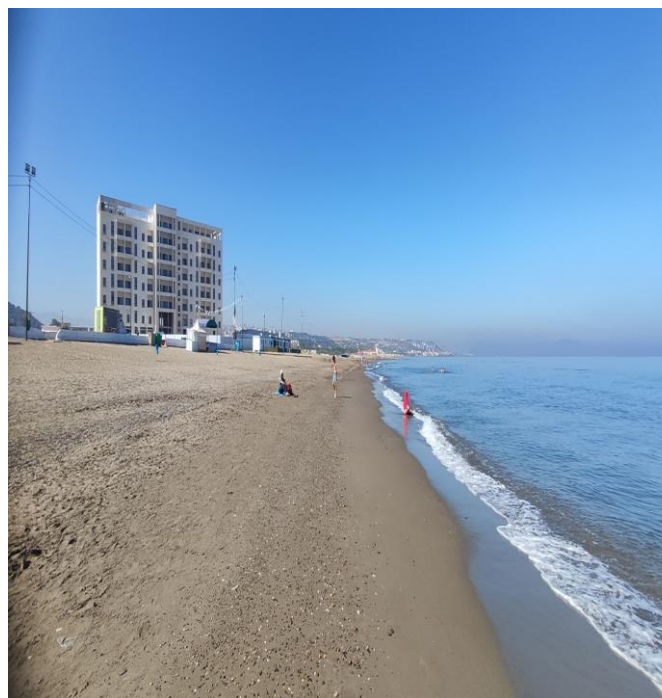


Figure II. 5 : Illustration de la plage Khelloufi (12/06/2022)

II.1.2.2 La commune de Douaouda

La commune d'est située au nord-est de la Wilaya de Tipaza, à la limite administrative de la wilaya d'Alger, à environ 33km au sud-ouest d'Alger à environ 36km à l'est de Tipaza. À l'est se trouve l'oued Mazafran dont les eaux pompées irriguent les terres agricoles de Douaouda.

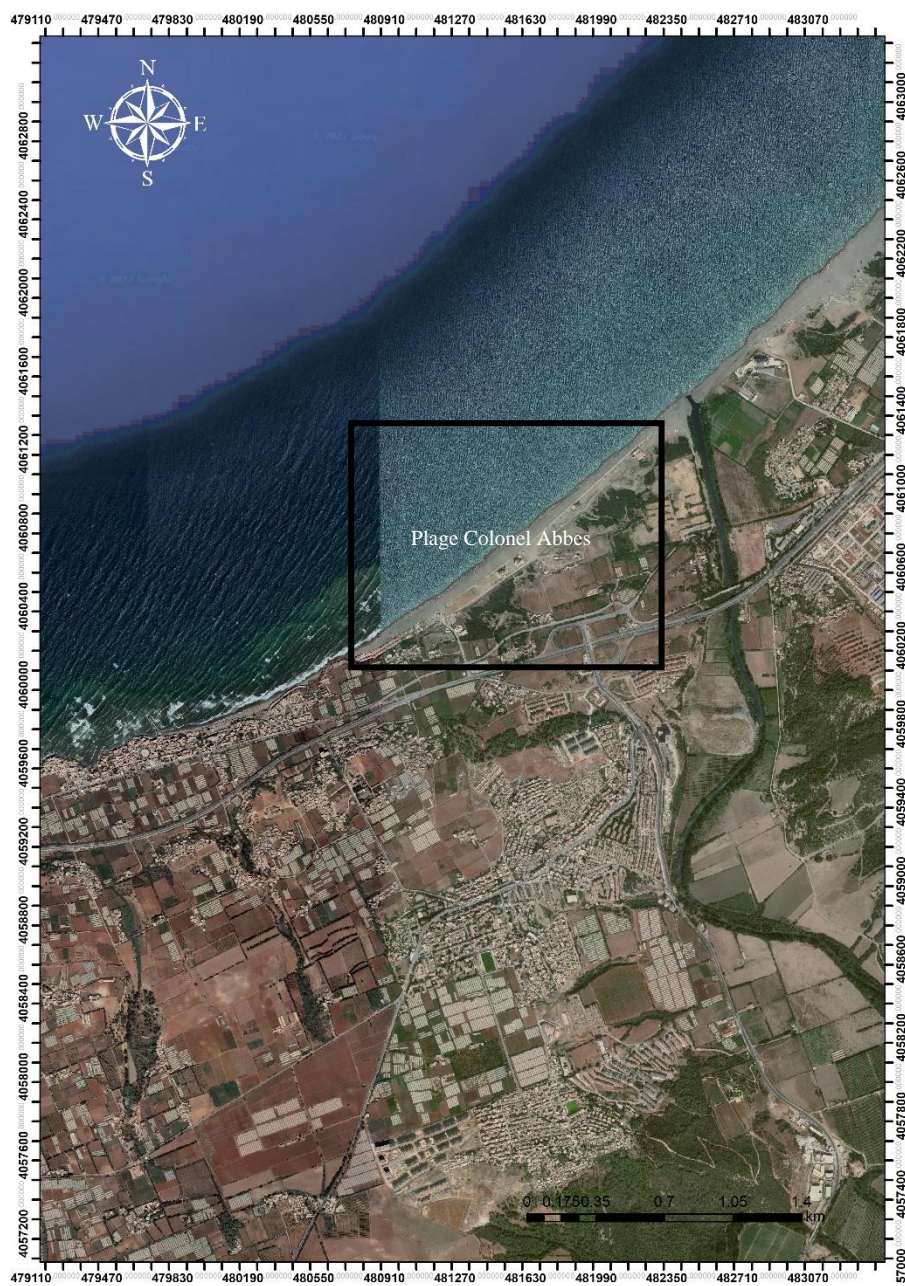


Figure II. 6: situation géographique de la plage de la zone d'étude (SasPlanet, 2021).

A) Plage Colonel Abbas :

C'est une plage sableuse intermédiaire de 2245.35m de longueur et d'une largeur de 80m, cette plage est constituée de sable fin à grossier (CNL Tipaza, 2022).



Figure II. 8: situation géographique de la plage Colonel Abbas (GoogleEarth Pro, 2021)



Figure II. 7: Illustration de la plage Colonel Abbas (12/06/2022)

II.2 Géomorphologie de la Baie

La baie de Bou Ismail est caractérisée par une morphologie côtière diversifiée composée des côtes rocheuses, de falaises, de plages et de dunes (Grimes, 2004) :

- Les falaises : La falaise la plus importante dans la baie de Bou Ismail est celle de Mont Chenoua qui est située à l'ouest de la commune du chef-lieu de Tipaza.
- Les côtes rocheuses : localisées entre Tipaza (les différentes anses) et Bou Haroun (rocher plat).
- Les plages : La baie comprend 16 plages dont la plus développée est celle de Colonel Abbas (Douaouda) qui s'étale sur une longueur de 3000m. La granulométrie de ces plages est constituée de sable fin, allant vers des galets.
- Les dunes : c'est des formations qu'on retrouve immédiatement sur la continuité des plages puisqu'elles sont à l'origine de leur formation.

II.3 Description sédimentologique de la Baie de Bou Ismail

Vers l'embouchure de l'oued de Mazafran et jusqu'à une profondeur de 25m, les sables grossiers caractérisent la baie. Au-delà de ce dépôt fluvio marin et jusqu'à une profondeur de 10 à 15m, les sables moyens ne réapparaissent qu'au niveau de Khemisti sur une bande étroite continue jusqu'à Tipaza (Al Sid Chikh et al., 2009).

Une bande de sable fin apparaît au large de Sidi-Fredj et Palm Beach à moins de 2m de profondeur et tapisse le fond de 15m à 25m tout le long de la baie.

Parallèlement à ces faciès, les sables fins vaseux longent la cote entre 25 à 40m de profondeur. Au large de Sidi Fredj, un dépôt de sable moyen et gravier (LEM, 2009).

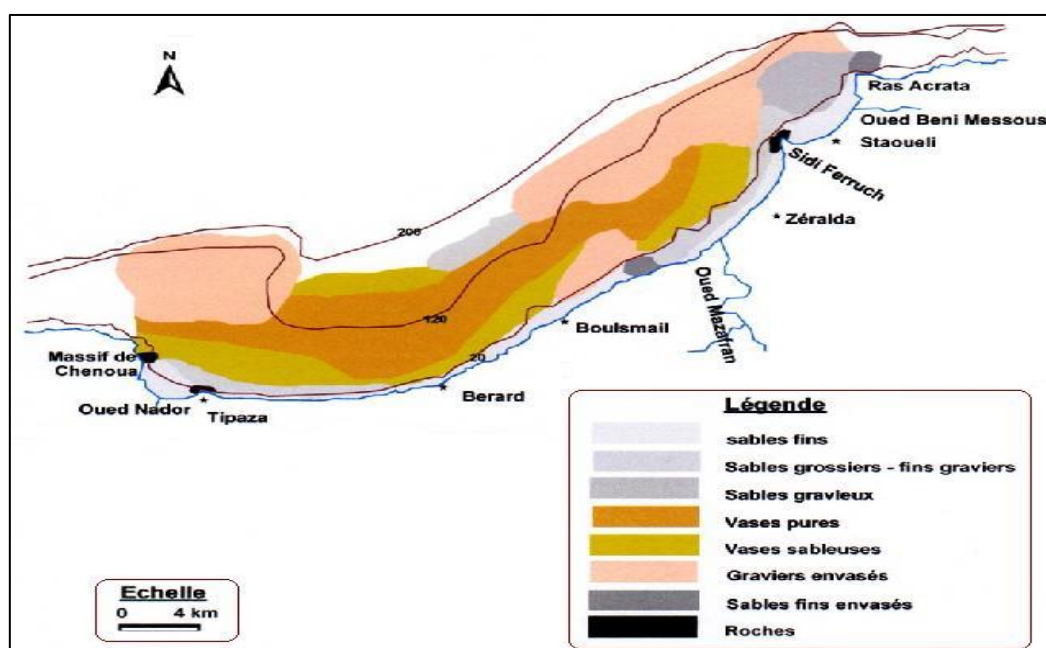


Figure II. 9 : Carte sédimentologique de la baie de Bou Ismail (LEM, 2009)

D'après les données fournies au sein du CNL de Tipaza (2022), le Tableau II.1 représente les différentes plages au long de la zone d'étude avec leurs différentes caractéristiques :

Tableau II. 1: Caractéristiques des plages de la baie de Bou Ismail (CNL Tipaza,2022)

Nom de la plage	Type de plage	Superficie (Ha)	Longueur (m)	Largeur (m)	Granulométrie
Colonel Abbas	Intermédiaire	12.46	2245.32	80	Sableuse (sable fin à grossier)
Plage Khelloufi	Intermédiaire	2.46	800.64	40	Sableuse (sable fin à grossier)
Colonel Haoues	Réflexive	2.75	930.22	30	Sableuse (sable fin à grossier)
Front de mer Bou Ismail	Dissipative	0.29	295.27	15	Sable moyen
Plage Sidi Boumaaza	Intermédiaire	1.76	662.20	30	Sableuse (sable moyen)
Plage Mahiendine	Dissipative	0.29	295.27	15	Sable moyen
Plage centre	Réflexive	0.56	476.86	12	Sableuse (sable fin)
Plage Kouali	Dissipative	0.59	442.45	13	Sableuse (sable moyen)
Complexe CET Tipasa	Dissipative	0.20	142.15	15	Sableuse (sable fin)
Corne d'or Est	Dissipative	0.32	186.31	30	Sableuse (sable fin)
Corne d'or Ouest	Dissipative	0.15	93.95	17	Sableuse (sable fin)
Matares	Dissipative	2.33	486.03	50	Sableuse (sable fin)
Centre de repos familial (CRF)	Dissipative	5.58	812.59	80	Sableuse (sable fin)
Plage Touring Chenoua	Dissipative	3.19	599.70	50	Sableuse (sable fin)
Chenoua	Dissipative	2.50	735.28	45	Sableuse (sable fin)
Plage des galets	Réflexive	2.70	1088.73	10	Galets

II.4 Cadre climatologique et hydrographique de la zone

II.4.1 Température et Précipitations :

Le climat de Bou Ismail est chaud et tempéré. La saison hivernale se caractérise par des précipitations bien plus importantes qu'en été. La température moyenne annuelle est de 20.4°C. Les précipitations annuelles moyennes sont de 567,2 mm/an (Infoclimat.fr, 2022).

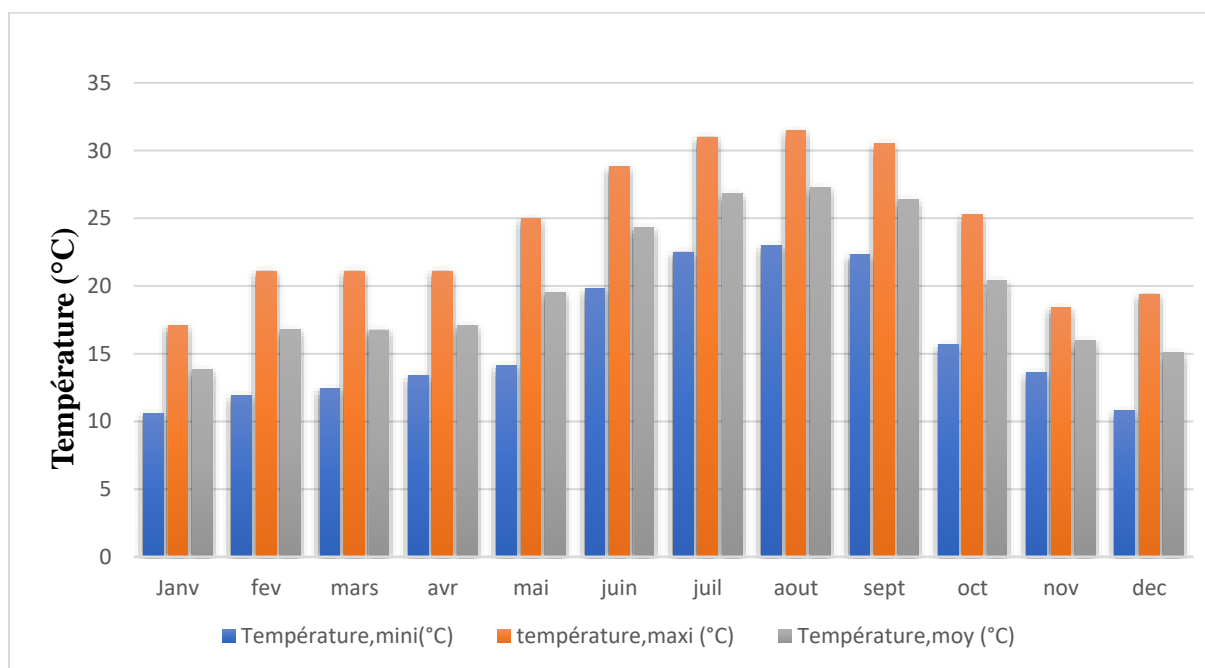


Figure II. 10: Histogramme de température moyenne annuelle 2021 (Infoclimat.fr, 2022)

Interprétation :

D'après la figure II.9, la température moyenne mensuelle pendant l'année complète varie entre 13.1°C et 20°C, sauf durant la période en atteignant 27.3°C.

Tableau II. 2: évolution au cours de l'année 2021 (Températures moyennes mensuelles et précipitations totales mensuelles)

	Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
Température (°C)	13,8	16,8	16,75	17,1	19,55	24,3	26,8	27,3	26,4	20,4	16	15,1
Précipitations (mm)	49,2	9,8	1,2	53	9,5	8,4	0,15	0,2	11,8	45	375,5	1,6

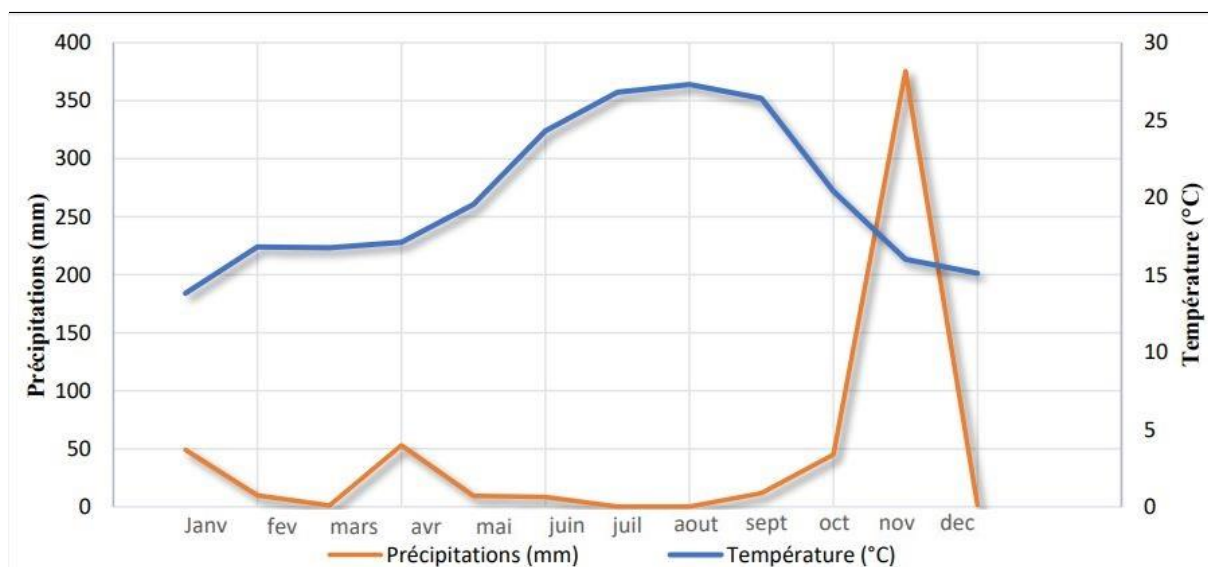


Figure II. 11: Diagramme ombrothermique d'évolution au cours de l'année 2021 (températures moyennes en °C et précipitations mensuelles en mm) dans la région de Bou Ismail (infoclimat.fr, 2022)

Interprétation :

A partir de la **figure II.10** et le **tableau II.2**, on remarque que la période estivale est caractérisée par des températures relativement élevées atteignant une valeur 27.3°C en mois d'Aout. Cette période est accompagnée par un taux de précipitation très faible. En mois d'Aout, la concentration des précipitations est presque nulle (0.2mm). Cela explique que le climat est sec.

La valeur maximale pendant toute l'année est enregistrée au niveau du mois de Novembre avec une valeur de 375mm. D'ailleurs, les précipitations pendant ce mois ont causé des changements dans la morphologie du littoral dans certaines régions d'une façon remarquable vu que le taux de précipitation est très élevé pour un seul mois.

Durant la période hivernale, le taux de concentration maximale est 49.2mm, le climat en hiver est donc doux pour un climat sec en été.

II.4.2 Réseau hydrographique :

Le bassin versant d'oued Mazafran est l'un des plus importants bassins du côtier Algérois, d'après la subdivision faite par l'ANRH avec une superficie totale de près de 1900 km². Il occupe la partie centrale de la Mitidja. Il est limité au nord par le Sahel de direction Est-Ouest, au Sud par l'Atlas de Blida qui s'étend également d'Est en Ouest, à l'Ouest par le lac de Halloula et les collines de Hadjout. (ABH, 2013).

Le débit solide dans l'oued Mazafran est estimé entre 1400 et 1800 t/km², tandis que le débit liquide à 43.8 millions m³ /an. Le débit solide à l'embouchure de l'oued est d'environ trois millions t/an. Ces apports dépendent étroitement du régime hydrologique de l'oued : marqué

par un long étiage de Juin à début Décembre avec des débits représentant 17,38% du débit liquide annuel. Entre Décembre et Avril, ces débits sont 82,61%, débouchant au niveau d'une plage sablonneuse entre Douaouda et Zéralda avec un débit de 7.566 m³ (Bachari F., 2009).

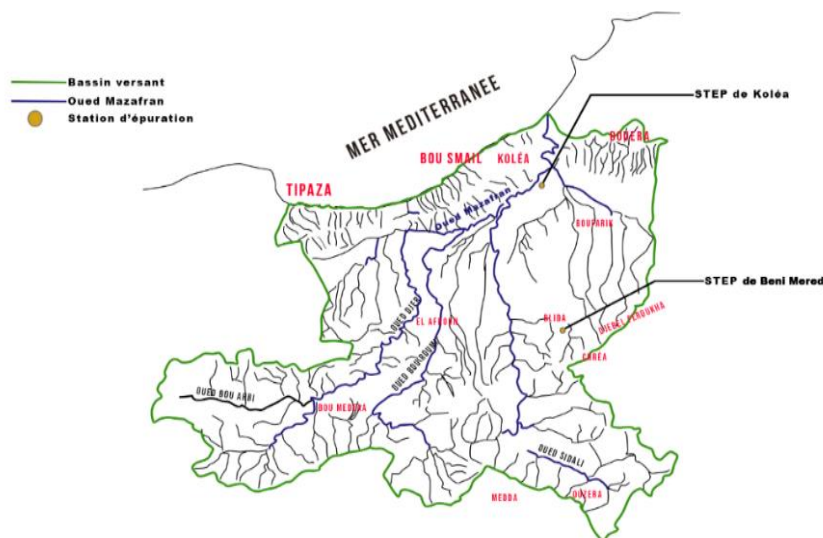


Figure II. 12 : Réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Mazafran (ANRH, 2005)

II.5 Données océanographiques

II.5.1 Le vent :

La détermination des régimes des vents est très importante pour une zone côtière, La base de données au large de la zone d'étude (Infoplaza, 2020) nous a permis déterminer la fréquence d'apparition du vent par direction et tracer les roses des vents annuelles et saisonnières.

Tableau II. 3: Les coordonnées d'enregistrement

Longitude	36°45'0''N	Début d'enregistrement	Fin d'enregistrement
Latitude	2°30'0''E	01/01/2020	31/12/2020

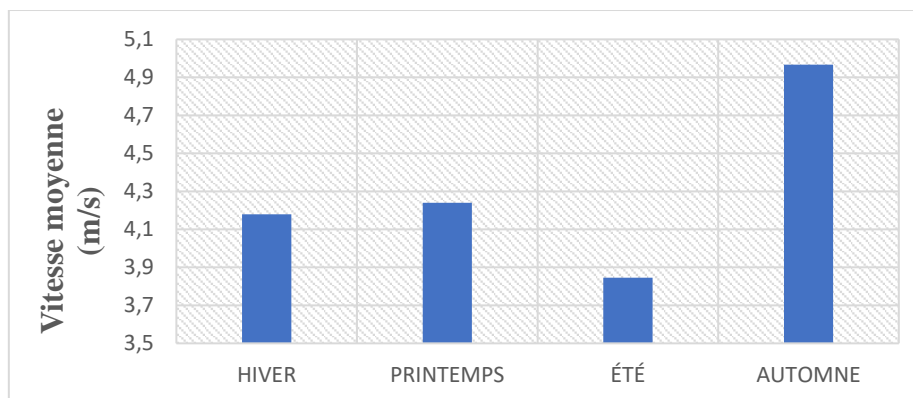


Figure II. 13: vitesses moyennes des vents saisonnières au large de la baie de Bou Ismail

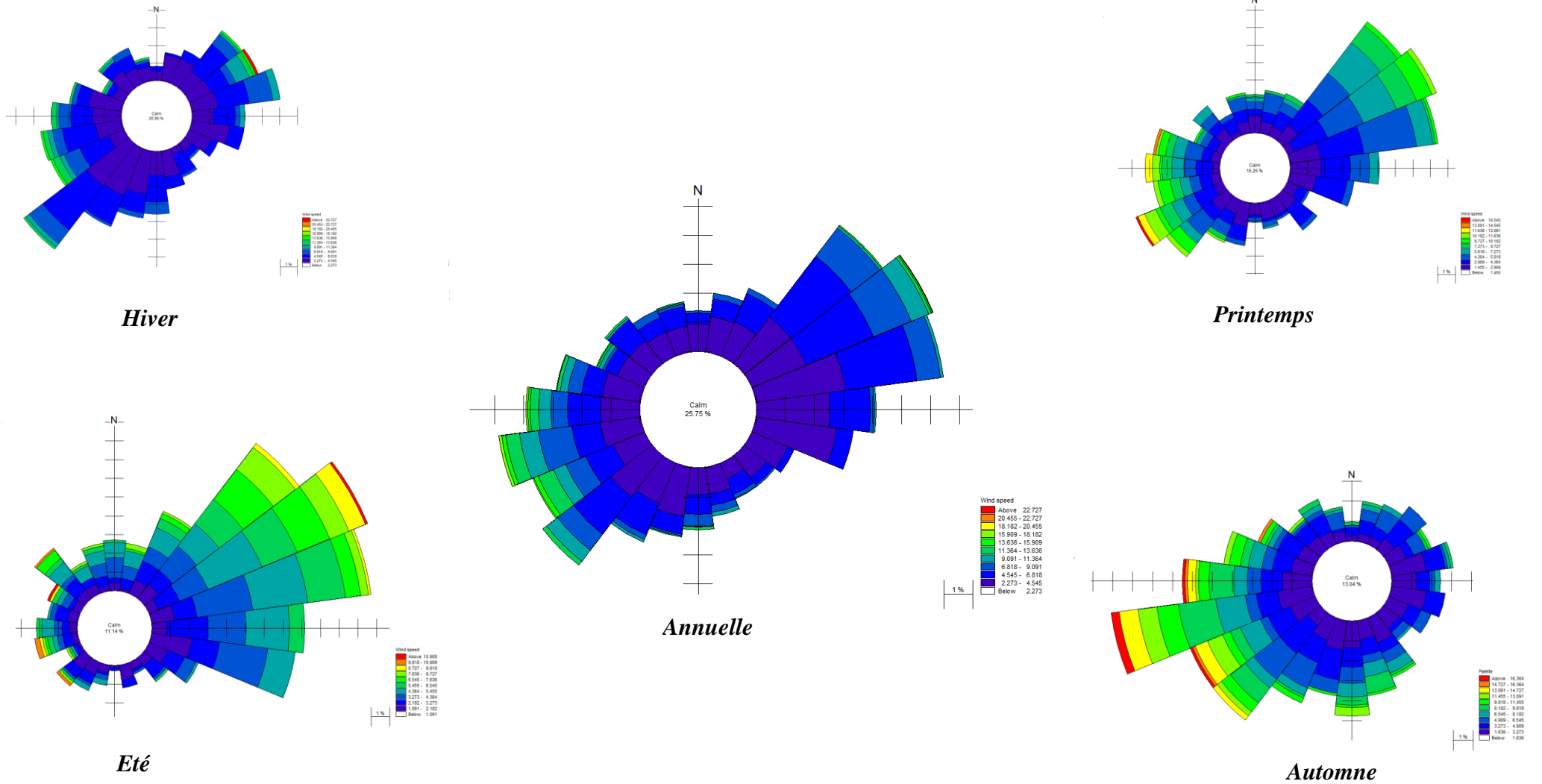


Figure II. 14 : roses des vents annuels et saisonniers (Infoplaza ,2020)

Tableau II. 4: Pourcentage d'apparition des vents au large par direction (annuel et saisonnier) (Infoplaza,2020)

	Annuelle (%)	Hiver (%)	Printemps (%)	Eté (%)	Automne (%)
N (0°)	4.5	3.5	7	6.5	4
NE (45°)	30.4	19	32	39	15
E (90°)	7	6	8	11	5
SE (135°)	1.3	2.6	2.3	3	1.7
S (180°)	2	3.5	1	0.2	4.8
SW (225°)	16	26	26	11.2	31
W (270°)	3.9	4	4.3	2.1	6.3
NW (315°)	2	2	2.3	3	3

A partir des roses des vents obtenues (**Figure II.13**) et le **tableau II.4** :

Hiver : On remarque une dominance de deux secteurs mais d'une intensité différente, le secteur le plus dominant générant des vagues défavorables est celui du Sud-Ouest avec un pourcentage de temps de 26% et une vitesse de 15m/s, pour le Nord-Est, une dominance est aussi remarquable avec un pourcentage de temps de 19% et une vitesse atteignant 22.27m/s.

Printemps : Le secteur le plus dominant est celui du Nord-Est, atteignant un pourcentage de temps de 32% et une vitesse maximale de 11m/s, la variation des vitesses du vent est répartie d'une façon équitable, ce qui montre que durant cette période le régime est dépourvu d'événement extrêmes. Par contre, le secteur Sud-Ouest montre une très grande variation de vitesse de vents dans des laps de temps très serrés, et donc, atteignant un pique 14.54 m/s.

Eté : La dominance est présente seulement dans le secteur Nord-Est avec un pourcentage de temps de 39%, la vitesse est de 10.90 m/s.

Automne : la rose des vents de cette saison montre une très grande dominance dans le secteur Sud-Ouest avec des piques de vitesses de 16.36m/s, il s'agit de la vitesse la plus grande durant cette période

Annuelle : d'après l'analyse des roses des vents de toutes les saisons et les données (**Infoplaza,2020**) de notre zone d'étude au large, la rose annuelle valide qu'il y a une dominance de deux secteurs (Sud-Ouest en Hiver et Nord-Est en été), donc on peut dire l'apparition des tempêtes persiste éventuellement dans le secteur Sud-Ouest, ce qui va générer des vagues défavorables pour la cote, cela induit à des grands dégâts remarquables dans le système littoral.

II.5.2 Les courants

Le courant atlantique (pénétration des eaux par le détroit de Gibraltar) longe d'Ouest en Est côtes d'Afrique du Nord, sa vitesse est de l'ordre de 3 à 4km/h. Ce courant s'étale sur plusieurs milles nautiques. Encore très sensible au large de l'Algérois (vitesse = 0.7 nœud), son action va en diminuant vers l'Est occidental de la Méditerranée (**LEM, 2009**).

II.5.3 La houle

À partir de la base de données **Infoplaza** sous forme de tableaux bi-variables contenant les fréquences d'apparition annuelles et saisonnières. Ces fréquences d'apparition sont calculées à partir de la série de données enregistrée

La houle est le facteur le plus important dans la dynamique sédimentaire des petits fonds, les données au large de notre zone d'étude localisée à **2°30'0''E** et **36°45'0''N** au large de la Baie de Bou Ismail durant toute l'année 2020 (**infoplaza,2020**) nous ont permis de réaliser les roses des houles :

Tableau II. 5: Fréquences d'apparition annuelles et saisonnières des houles au large par direction (**Infoplaza,2020**)

	Annuelle (%)	Hiver (%)	Printemps (%)	Eté (%)	Automne (%)
N (0°)	5.5	6	4	5.7	6
NE (45°)	24	15.1	33	42	13
E (90°)	2.3	2.2	2	2	2.6
SE (135°)	2.1	2	2.1	2	3
S (180°)	2.5	2.3	2	2	3.8
SW (225°)	2	2.2	2	2.4	2.1
W (270°)	11	10	15.6	6	13.2
NW (315°)	3.8	5.1	4.2	6.3	5.1

L'analyse statistique des directions de houles au large nous a permis de tracer les roses annuelles et saisonnières (**Figure. II.14**). L'analyse de ces roses fait ressortir que les directions dominantes proviennent des secteurs :

- Ouest à 11% du temps annuellement, mais avec une fréquence d'apparition plus importante en printemps (15.6%) qu'en été (6%).
- Nord Est à 24% du temps annuellement, mais avec une fréquence d'apparition plus importante en été (42%) qu'en automne (13%).

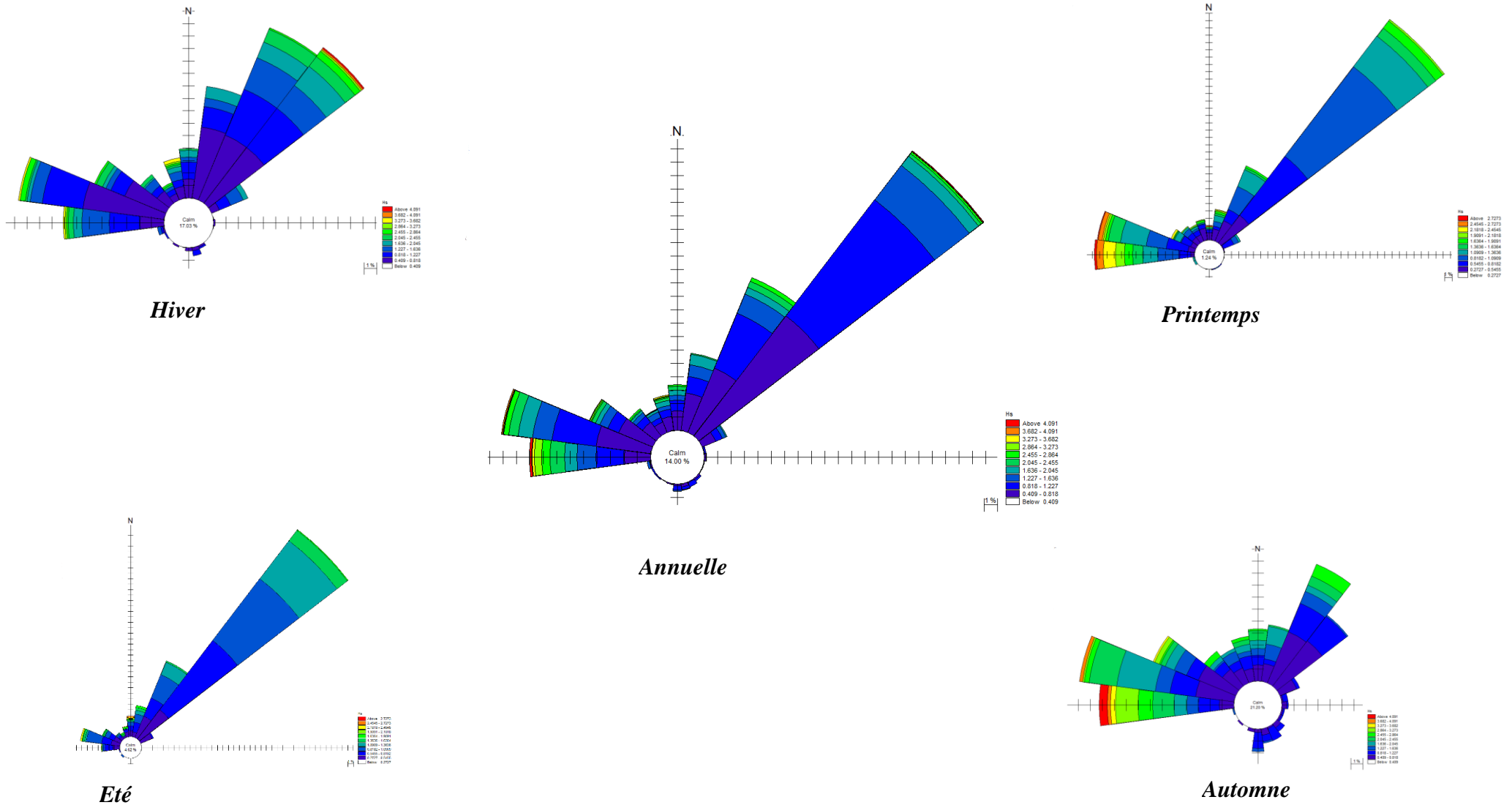


Figure II. 15 : roses des houles annuelles et saisonnières (Infoplaza ,2020).

II.6 La pression anthropique dans la baie de Bou Ismail

La baie de Bou Ismail est soumise à des pressions anthropiques non seulement par la croissance démographique, mais aussi par l'artificialisation du littoral dans le début remonte en 1985. Il s'agit de la construction des ports et des ouvrages de protection (brise-lames, épis) au long de toute la baie, toutes ces infrastructures se font dans le cadre de la protection du littoral mais qui interviennent d'une manière négative et indirecte sur la dynamique sédimentaire que ce soit pour le transport sédimentaire transversal ou longitudinal selon le type d'ouvrage, les phénomènes d'accrétion et d'érosion sont donc inévitables.



Figure II. 16 : Images satellitaires entre 1985 et 2022 (GoogleEarth Pro)

II.6.1 Structures côtières

Les structures côtières sont dimensionnées pour répondre à une vocation initiale de fixation du trait de côte, de lutte contre l'érosion et de soutènement des terres. On peut définir l'artificialisation du littoral par :

- **Les ouvrages statiques lourds** : dispositifs d'opposition à l'environnement marin.
- **Les ouvrages légers dynamiques** : dispositifs d'intégration ou de préservation des flux hydro sédimentaires.

Dans la zone de Bou Ismail, on distingue 2 catégories d'ouvrages statiques :

II.6.2 Les Ouvrages longitudinaux

- ✓ **Les enrochements** : Des barrières en enrochement naturel ou préfabriqué pour éviter la dégradation de la cote par opposition aux attaques frontales.



Figure II. 17 : Enrochement naturel pour la protection de la station de dessalement d'eau de mer de Fouka à Bou Ismail (SASplanet, 2022).

L'inconvénient de ce type d'ouvrage dépend de la pente de la structure qui augmente l'énergie de réflexion des vagues et conduit donc à l'accélération de l'effet érosif, au déchaussement et perte des matériaux.

- ✓ **Les brise-lames** : c'est des ouvrages parallèles au rivage placés sur l'avant cote afin de faire face aux attaques des houles perpendiculaires à la cote. L'accumulation des sédiments est gagnée en arrière des brise-lames, donc un succès de promenade.

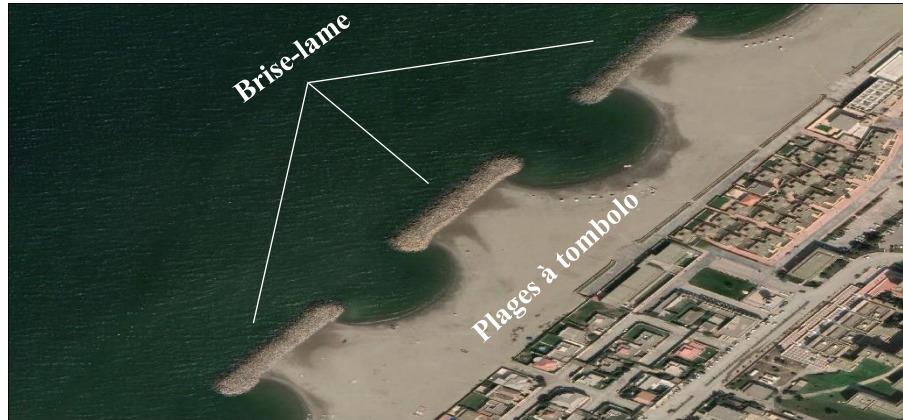


Figure II. 18: Formation des plages à tombolo dans la partie Ouest de l'oued Mazafran (SASplanet, 2022)

La formation des plages à tombolo n'est pas toujours favorable, le point négatif repose le manque de régénération des eaux, ce qui favorise certaines formes de pollution.

II.6.3 Les ouvrages transversaux (épis)

Dans la partie Ouest de la baie de Bou Ismail, une batterie d'épis a été placée dans le but de bloquer le transit sédimentaire, en l'arrêtant, ces ouvrages perpendiculaires au rivage produisent une accrétion du côté amont du transport solide et une érosion du côté aval.

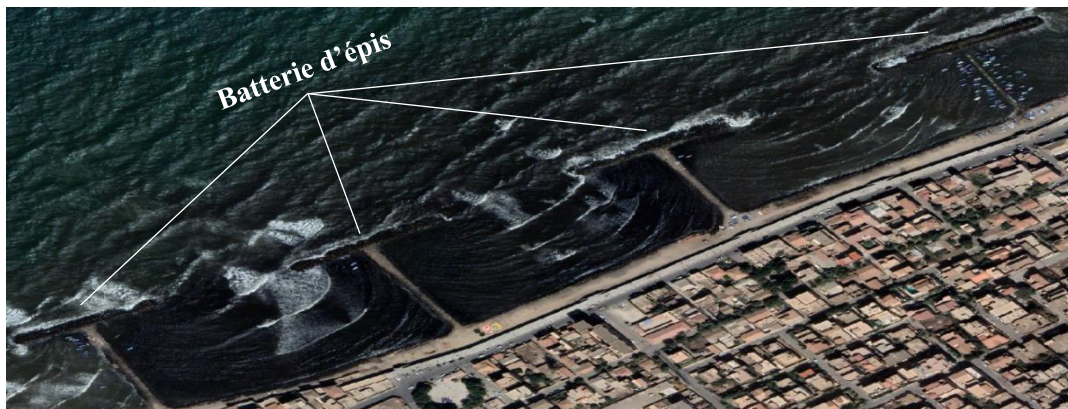


Figure II. 19: Batterie d'épis à front de mer au centre de Bou Ismail (SASPlanet, 2022)

II.6.4 Les ports

L'armée militaire a construit un port dans la zone et cela a créé des problèmes dans cette dernière, le transit littoral a été donc bloqué ce qui a causé le recul du trait de côte, des ouvrages tels que les brise-lames ont été mis à l'ouest du port afin d'assurer un certain-équilibre littoral et de protéger les plages adjacentes.

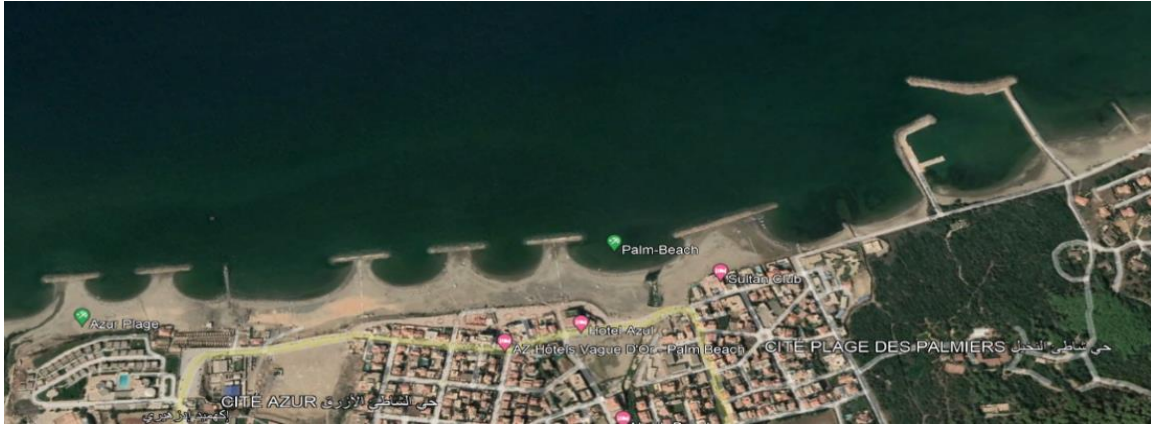


Figure II. 20: le Port suivi par des brise-lames pour éviter l'érosion (GoogleEarth, 2022)

CHAPITRE III

Etude granulo-sédimentaire

III Introduction

Une mission sur terrain a été effectuée pour notre étude, elle consiste à faire des prélèvements d'échantillons en mer de la couche superficielle du sédiment au niveau de la plage sur laquelle repose notre étude (Khelloufi et Colonel Abbes).

Une fois les sédiments prélevés, ces derniers sont emmenés au laboratoire de ENSSMAL, Nous avons fait une analyse granulométrique qui comporte deux phases, la première est une phase technique expérimentale conduisant à l'évaluation en pourcentage de chaque dimension de grains à la masse totale du sédiment et la deuxième est une phase d'interprétation des résultats sous forme de tableau Excel traité et calculé par le logiciel MATLAB. Il a été aussi nécessaire de faire la cartographie de la répartition des sédiments dans notre zone d'étude grâce aux pourcentages péritique et les diamètres des grains moyens.

Ce chapitre est composé en trois parties :

- Travaux sur terrain
- Travaux au laboratoire
- Cartographie de la répartition des sédiments analysés

III.1 Travaux sur terrain

III.1.1 Déroulement de la sortie

Notre mission s'est déroulée le dimanche 12/06/2022 à 8h30min du matin à Douaouda située à 36°41'50.80'Nord, 2°48'10.66''Est. Notre zone est subdivisée en deux plages : la plage Khelloufi et Colonel Abbes.

La météo du jour même de la sortie montrait un ciel dégagé pour une température de 27°C. La direction du vent la plus dominante était de 35° et la hauteur significative des vagues atteignait les 0.6m.

Pendant notre mission, on a constaté qu'au niveau de notre zone d'étude, une laisse de mer de galets et de coquilles était présente, ceci a une relation avec un événement extrême (tempête) qui s'est produit quatre jours avant la sortie.



Photo III. 1 : Illustration d'une laisse de mer dans la zone d'étude

Pour notre étude granulo-sédimentaire, la sortie comprend :

- Des prélèvements de 32 échantillons de sédiments superficiels dans 32 stations différentes
- Des mesures de vitesses du courant
- Des coordonnées géographiques grâce au GPS

III.1.2 Matériel utilisé

- GPS 72H GARMIN
- Echo-test (pour la mesure de la profondeur)
- Courantomètre type Fp101
- Sachet à plastique
- Papiers calque
- Carnet de note



Photo III. 2 : GPS 72H GARMIN



Photo III. 3 : Courantomètre (ENSSMAL)



Photo III. 4 : matériel utilisé pendant la sortie (sachets, carnet...)

III.1.3 Prélèvement et positionnement des points de prélèvement

Dans chacune des plages, les stations que nous avons choisies étaient divisées en 4 profils perpendiculaires à la cote, chaque profil est composé de 4 stations (deux terrestres et deux marines).

16 prélèvements ont été effectués dans chaque plage, en notant sur chaque point les coordonnées géographiques à l'aide du GPS et la vitesse du courant (pour les stations marines) avec un courantomètre.

Les échantillons sont directement conservés dans des sacs en plastique étiquetés puis transférés au laboratoire d'ENSSMAL pour effectuer les analyses granulométriques.

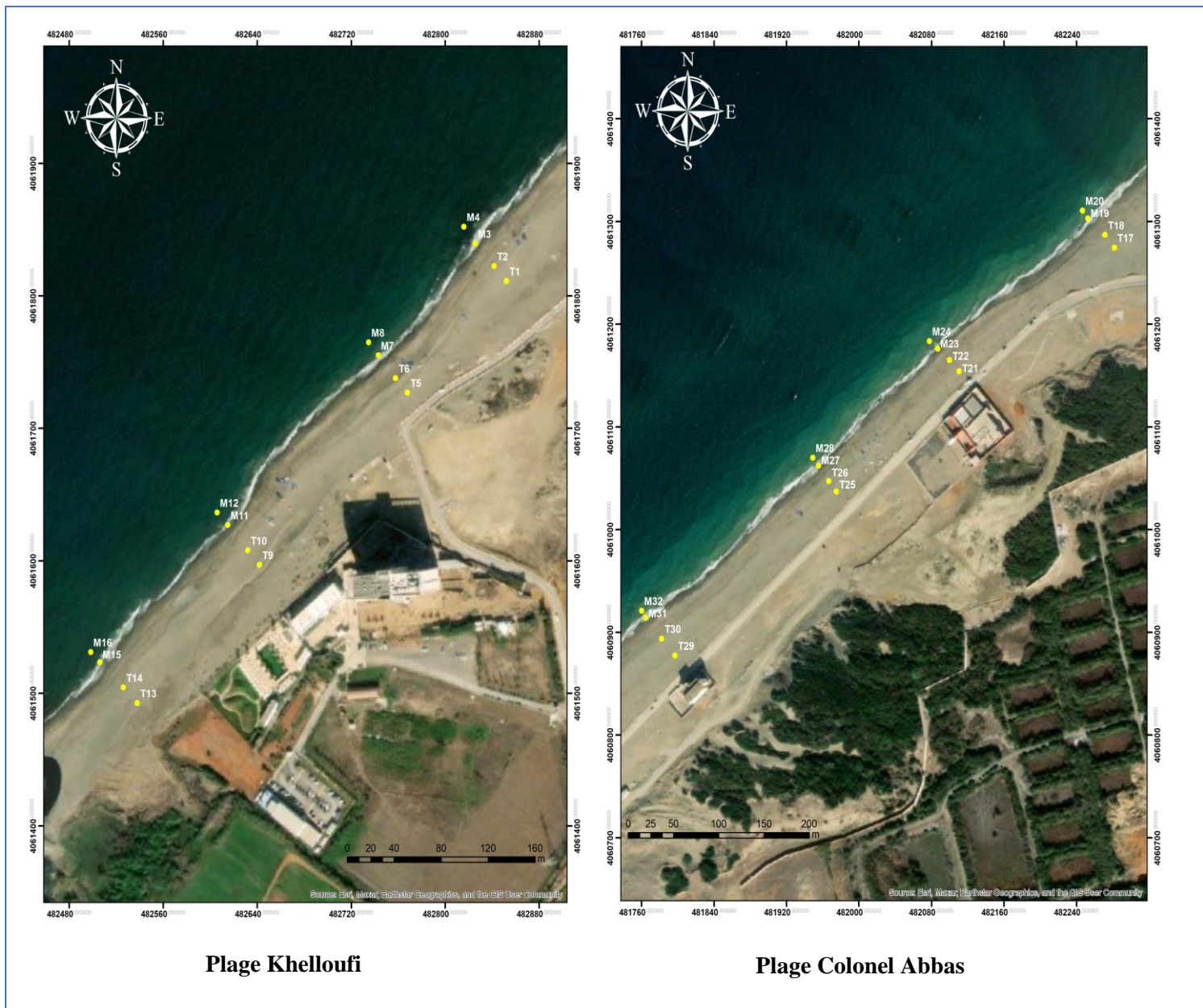


Figure III. 1 : Positionnement des points de prélèvement des plages dans la partie terrestre et marine de la zone d'étude

III.2 Travaux au laboratoire

Grace à l'analyse granulométrique, nous avons pu étudier la répartition des différents grains des échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids, taille...).

Un échantillon sédimentaire est caractérisé par sa répartition en masse en fonction du diamètre des particules qui le constituent, Cette répartition obtenue à partir de l'analyse granulométrique (Dahmani A., 2021).

III.2.1 Analyse granulométrique par tamisage dans laboratoire :

- **Définition** : L'analyse granulométrique se propose de définir la répartition des grains constitutifs d'un sol selon leurs dimensions. On étudie la granulométrie en tamisant le matériau sur une série normalisée de tamis à mailles carrées. Les grains sont ainsi séparés selon leur taille.
- **But de cette analyse** : L'analyse granulométrique par voie sèche correspond à la détermination de la granularité c'est à dire la détermination de la distribution dimensionnelle des grains (exprimée en pourcentage de masse) qui constituent l'échantillon.
- **Equipement nécessaire** : L'équipement nécessaire pour effectuer une opération de tamisage sont :
 - Des échantillons de sable sec (32 échantillons) ;
 - Une Spatule et un pinceau ;
 - Une série de tamis d'ouvertures de mailles normalisées de (2000 à 40 μm) ;
 - Une machine à tamiser (Vibrotamis) ;
 - Un couvercle qui évite la perte de matériau pendant le tamisage et un réceptacle de fond pour recueillir le dernier tamisât,
 - Des boites de pétris ;
 - Une balance de précision 0.01 g ;
 - Une étuve réglée à 105 °C 24 h ;
 - Ordinateur



Photo III. 5 : échantillons avant le séchage



Photo III. 6 : étuve Memmert UN110



Photo III. 7 : machine à tamiser

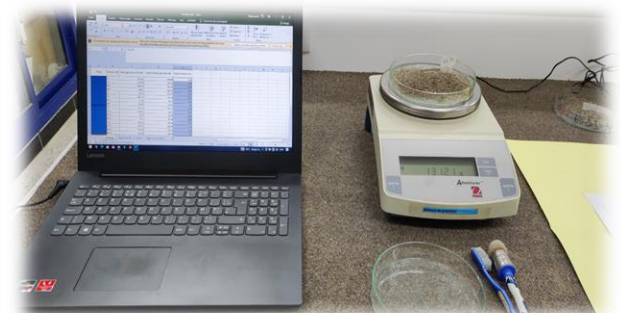


Photo III. 8 : ordinateur et balance de précision

- **Principe de l'analyse**

L'essai consiste en fait à classer les différents grains constituant l'échantillon par une série de tamis emboîtés les uns dans les autres. Les ouvertures de ces tamis sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau est placé en partie supérieure et le classement est obtenu alors par vibration manuelle de la colonne de tamis.

- ✓ **Refus sur un tamis** : partie du matériau retenu sur un tamis.
- ✓ **Tamisés ou passant** : partie du matériau passant à travers les mailles d'un tamis.
- ✓ **Refus cumulé** : c'est la somme de tous les refus, celui du tamis lui-même plus tous les refus des tamis de maille plus grande. Il peut être exprimé en gramme ou en % de refus cumulés.
- ✓ **Pourcentage massique de refus** : c'est le rapport, exprimé en pourcentage, de la masse de matériau sec retenu par un tamis d'ouverture d , à la masse totale initiale de matériau sec passant à travers le tamis de maille.
- ✓ **Pourcentage massique d'un tamis** : c'est le rapport, exprimé en pourcentage, de la masse sèche du passant à travers un tamis d'ouverture d , à la masse totale initiale de matériau sec passant à travers le tamis de maille.

- ✓ **Courbe granulométrique** : représentation du pourcentage massique par les différents tamis en fonction de la dimension nominale d'ouverture des tamis sous forme d'une courbe logarithmique.

- **Méthode d'analyse :**

L'ensemble des prélèvements sédimentaires est analysé selon les techniques classiques de tamisage, cela dit, l'analyse granulométrique passe par plusieurs étapes :

- **Exécution de l'essai :**

- ✓ **La séparation de la fraction fine (pélites)** : les prélèvements sédimentaires sont analysés selon les techniques classiques de tamisage au laboratoire.

- Mise de l'échantillon dans l'étuve, séchage à 105° pendant 24h ;
- Pesage d'une quantité d'échantillon de 150g pour chaque station ;
- Rinçage de l'échantillon dans un tamis de 40µm pour soustraire les fractions fines ;
- Séchage de la fraction grossière à l'étuve à 105° pendant 24heures ;

- ✓ **Tamisage de la fraction grossière :**

- Peser la masse (M) de chaque échantillon
- Le matériau séché, puis repeser de masse M , est versé sur une série de tamis dont le diamètre des mailles en microns des tamis est dans l'ordre décroissant : 2000-1600-1250-1000-800-630-500-400-315-250-200-160-125-100-80-63-50-40 « en µm » ; choisis de telle manière que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers haut. En partie inférieur, on dispose un tamis de 40µm sur montant un fond étanche afin de récupérer les éléments fins qui passant à travers ces tamis.
- Fixer la série de tamis sur la une tamiseuse de type AFNOR et la soumettre aux vibrations pendant 10 minutes à une fréquence de 60 Hz). Terminer par des secousses manuelles horizontales et verticales.
- Prendre le tamis supérieur seul avec son contenu et l'agiter sur une boîte de pétries propre. Tamiser de même jusqu'au dernier tamis. En pesant le tamisât contenu dans le fond
- Avec la somme des refus cumulés nous avons retrouvé la masse pesée au départ. Puis nous avons Tracer la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamis sous les tamis dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique.

III.2.2 Paramètres granulométriques

a) Calcul des paramètres granulométriques

Cette étape se traduit par une représentation d'une courbe granulométrique représentant le pourcentage des refus cumulés. L'axe des abscisses porte les ouvertures des tamis sur une échelle logarithmique, en ordonnée, les pourcentages sont rapportés sur une échelle arithmétique (Courbe semi-logarithmique), c'est à partir de cette courbe que les paramètres granulométriques sont déduits.

- Les paramètres de position

A partir de la courbe cumulative, les paramètres de position sont déduits en faisant une projection sur l'axe des pourcentages qui sert à déterminer le diamètre du tamis qui lui correspond afin de calculer les différents indices granulométriques

- Les quartiles

- D25 : diamètre du grain à l'ordonnée 25%, (Premier quartile).
- D50 : diamètre du grain à l'ordonnée 50%, (Médiane)
- D75 : diamètre du grain à l'ordonnée 75%, (Second quartile)

- Les centiles

- **D5** : diamètre du grain à l'ordonnée 5%
- **D16** : diamètre du grain à l'ordonnée 16%
- **D30** : diamètre du grain à l'ordonnée 30%
- **D60** : diamètre du grain à l'ordonnée 60%
- **D84** : diamètre du grain à l'ordonnée 84%
- **D95** : diamètre du grain à l'ordonnée 95%

b) Calcul des indices granulométriques

Nous avons utilisé un script sous le langage MATLAB afin d'effectuer le calcul des paramètres et indices granulométriques dans les différentes stations d'échantillonnage.

❖ La fraction grossière

Les indices granulométriques sont exprimés en unité (ϕ). L'échelle est une unité de mesure définie par la relation suivante :

$$\Phi = -\log(D)$$

D : diamètre des grains en mm.

- La moyenne granulométrique (Mz)

Il s'agit d'une représentation de la distribution granulométrique moyenne des sédiments, elle permet la disposition globale d'échantillons sur l'échelle des dimensions des sédiments, sa formule est la suivante :

$$Mz = \frac{\varphi_{16} + \varphi_{50} + \varphi_{84}}{3}$$

Tableau III. 1 : Classification de la moyenne granulométrique Mz

Moyenne granulométrique Mz	Taille moyenne du grain
$Mz < -6$	Galet
$-6 < Mz < -2$	Granule
$-2 < Mz < -1$	Sable très grossier
$-1 < Mz < 0$	Sable grossier
$0 < Mz < 1$	Sable moyen
$1 < Mz < 2$	Sable fin
$3 < Mz < 3$	Sable très fin
$3 < Mz < 3.98$	Vase

- **Le coefficient d'asymétrie (SK : Skewness de Trask)**

Ce coefficient caractérise le degré de symétrie de la courbe par rapport à la médiane, par la relation suivante :

✓ **Le sorting de trask : $Sk_i = \frac{Q_1 * Q_3}{Q_2}$**

✓ **Folk et Ward : $Sk = \left[\frac{\varphi_{16} + \varphi_{84} - 2 * \varphi_{50}}{2} * (\varphi_{84} + \varphi_{16}) \right] + \left[\frac{\varphi_5 + \varphi_{95} - 2 * \varphi_{50}}{2} \right]$**

Tableau III. 2 : Classification de l'indice d'asymétrie Sk

Indice Sk	Classement
$Sk < 1$	Maximum vers les grossiers
$Sk = 1$	Symétrie parfaite
$Sk > 1$	Maximum vers les fins

- **Indice de dispersion ou de classement So (Folk et Ward)**

Cet indice renseigne sur l'hydrodynamisme lors du dépôt du sédiment. Il indique la qualité du classement, plus il est faible, plus le sédiment est bien classé (Edjrogan M., 2019). Sa formule est :

✓ **Le sorting de trask : $So = \left[\frac{Q_{75}}{Q_{25}} \right]^{\frac{1}{2}}$**

✓ **Folk et Ward : $So = \frac{\varphi_{84} - \varphi_{16}}{4} + \frac{(\varphi_{95} - \varphi_5)}{6.6}$**

Tableau III. 3 : classification de l'indice de dispersion S_o

Valeur de S_o	Classement
[1 – 1.5]	Très bien classé
]1.5 – 2.5]	Bien classé
]2.5 – 3.5]	Normalement classé
]3.5 – 4.5]	Faiblement classé
$S_o > 4.5$	Mal classé

- Le coefficient d'uniformité C_u

Le C_u est le rapport entre deux diamètres apparents, définis de telle sorte que la taille de 60% et respectivement 10% des particules soit inférieure, c'est un indice d'irrégularité de la distribution

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

D_{60} et D_{10} étant les valeurs lues en abscisse pour les points de la courbe granulométrique correspondant aux ordonnées de 60 % et 10 %. Par conséquent, la référence suivante permet de déterminer l'uniformité de la courbe (**Thior M. et al., 2019**) :

- Si $C_u < 3$, alors la granulométrie est uniforme ou encore serrée.
- Si $C_u > 3$, alors la granulométrie est variée ou encore étalée.

- Le coefficient de courbure C_c

Le coefficient de classement ou de courbure (C_c) quant à lui, permet de décrire la forme de la courbe granulométrique entre D_{10} et D_{60} . La détermination de ce coefficient est donnée par la formule suivante (**Thior M. et al., 2019**) :

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}}$$

- Si $1 < C_c < 3$, alors les matériaux sont bien gradués
- Si $C_c < 1$ ou $C_c > 3$, alors les matériaux sont mal gradués

III.3 Les résultats et discussions :

III.3.1 L'analyse des courbes granulométriques

Après avoir fait l'analyse granulométrique dans le laboratoire de l'ENSSMAL, nous avons pu obtenir les Courbe granulométriques de chaque station de notre zone d'étude :

❖ **Plage Khelloufi :**

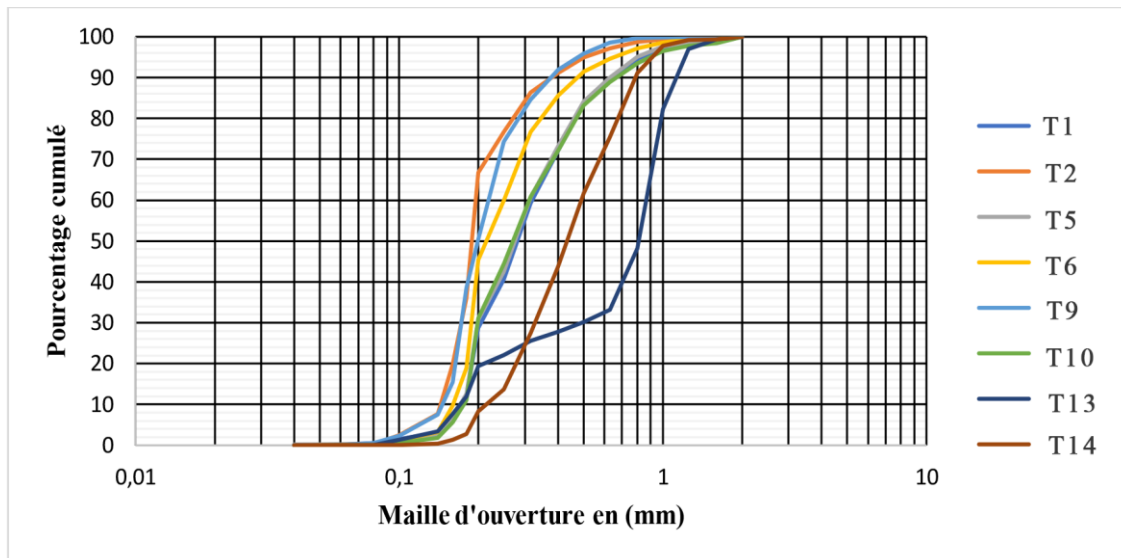


Figure III. 2 : Courbes cumulatives des 8 échantillons des sédiments terrestres de la plage Khelloufi

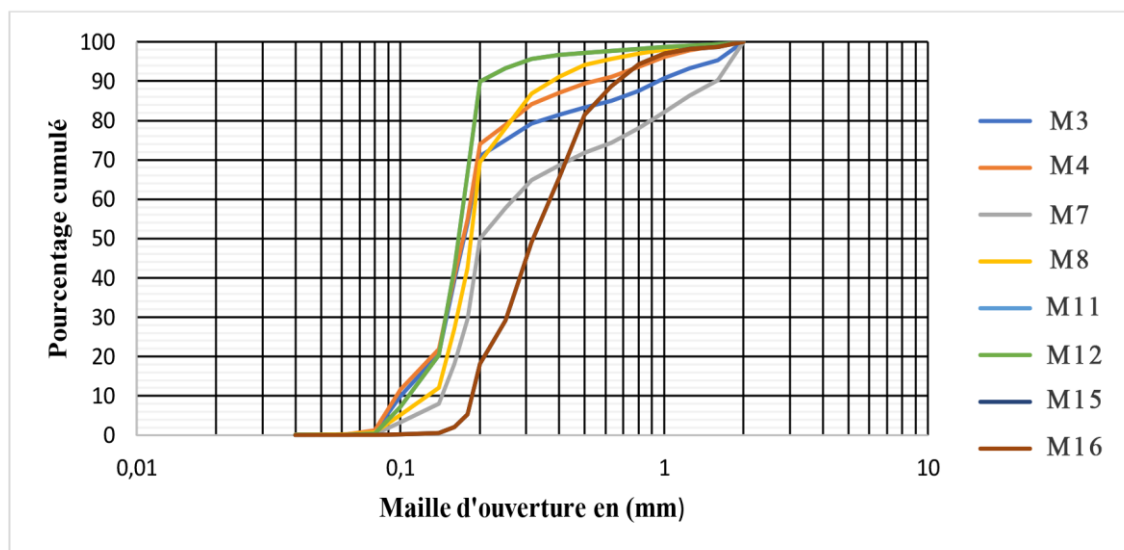


Figure III. 3 : Courbes cumulatives des 8 échantillons des sédiments marins de la plage Khelloufi

Tableau III. 4 : Résultats du coefficient de courbure et d'uniformité de la plage Khelloufi

Stations	Cc	Cu	Degré de Classement	Degré de Classement
T1	0.70	1.75	Matériaux mal gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
T2	1.15	1.42	Matériaux bien gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
M3	1.28	2	Matériaux bien gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
M4	1.28	2	Matériaux bien gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
T5	0.73	1.88	Matériaux mal gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
T6	1	1.56	Matériaux bien gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
M7	0.86	1.66	Matériaux mal gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
M8	0.91	1.42	Matériaux mal gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
T9	0.81	1.56	Matériaux mal gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
T10	0.70	1.77	Matériaux mal gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
M11	1.01	1.28	Matériaux bien gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
M12	1.02	128	Matériaux bien gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
T13	1.56	6.25	Matériaux bien gradués	Granulométrie étalée
T14	1.6	2.55	Matériaux bien gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
M15	0.78	2	Matériaux mal gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
M16	0.78	2	Matériaux mal gradués	Granulométrie uniforme ou serrée

Interprétation :

- Les courbes cumulatives représentant la partie terrestre de la plage Khelloufi montrent que 90% des particules sont comprises entre 0.16mm <D < 1.6mm.
- Dans la partie marine, 97.47% des particules sont compris dans un intervalle de 0.1mm et 2mm.

❖ **Plage Colonel Abbas :**

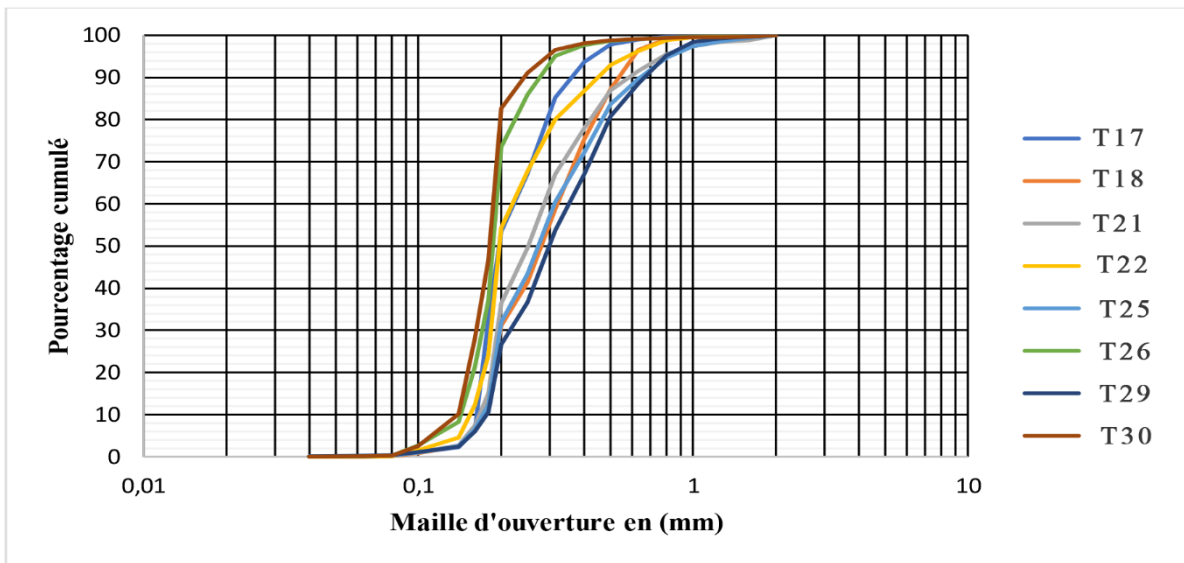


Figure III. 4 : Courbe cumulatives des 8 échantillons de sédiments terrestres de la plage Colonel Abbas

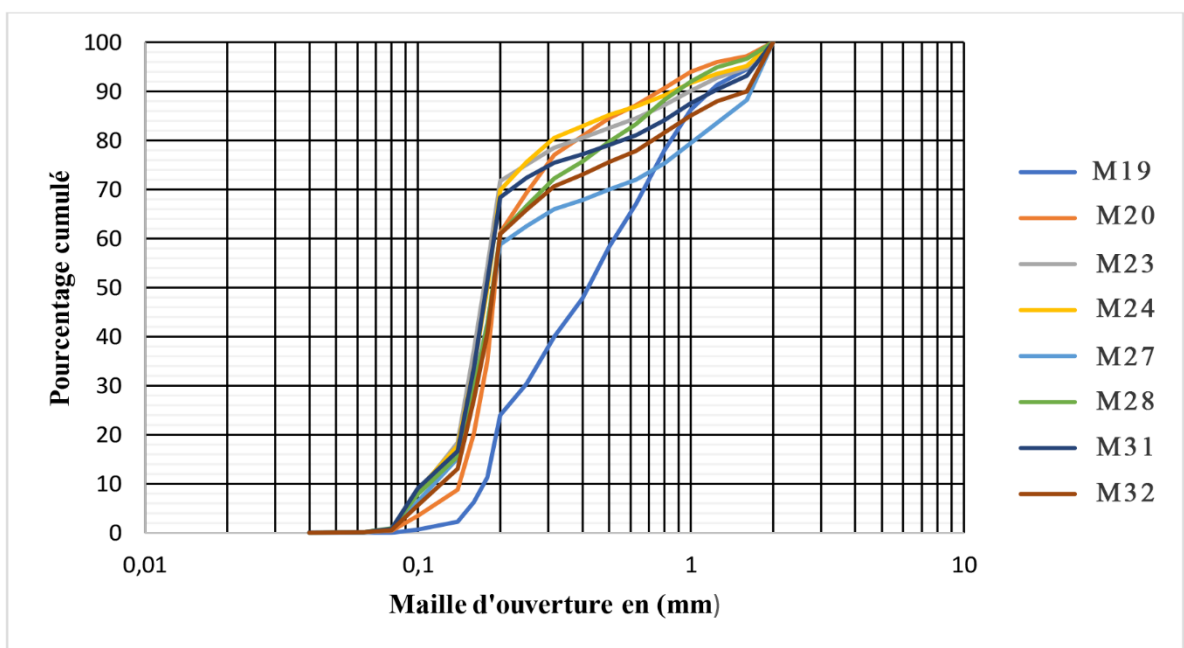


Figure III. 5 : Courbes cumulatives des 8 échantillons de sédiments marins de la plage Colonel Abbas

Tableau III. 5 : résultats du coefficient de courbure et d'uniformité de plage Colonel Abbes

Stations	Cc	Cu	Degré de Classement	Degré de Classement
T17	0.698	1.27	Matériaux mal gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
T18	0.71	1.72	Matériaux mal gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
M19	0.69	2.77	Matériaux mal gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
M20	0.96	1.33	Matériaux bien gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
T21	0.65	1.72	Matériaux mal gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
T22	0.90	1.56	Matériaux bien gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
M23	0.90	1.83	Matériaux mal gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
M24	1.22	2.1	Matériaux bien gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
T25	0.64	2.14	Matériaux mal gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
T26	0.88	1.52	Matériaux mal gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
M27	0.85	2.08	Matériaux mal gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
M28	0.46	4.54	Matériaux mal gradués	Granulométrie étalée
T29	0.63	1.94	Matériaux mal gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
T30	1.03	1.21	Matériaux bien gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
M31	1.01	2.09	Matériaux bien gradués	Granulométrie uniforme ou serrée
M32	1.06	1.54	Matériaux bien gradués	Granulométrie uniforme ou serrée

Commentaire :

- La présence des particules grossières et fines est décrite sur la courbe granulométrique, Dans la partie terrestre, on remarque que 98% des particules sont comprises entre $0.1\text{mm} < D < 1\text{mm}$.
- Dans la partie marine, on constate que 97% des particules sont comprise entre $0.1\text{mm} < D < 2\text{mm}$.

III.3.2 Calcul des Indices granulométriques

Les paramètres de position sont déduits grâce à la courbe cumulative obtenue par le logiciel Matlab2020R, Ces paramètres servent à calculer les différents indices granulométriques (SO, Sk et Mz). Les résultats obtenus sont classés dans un tableau pour chacune des plages :

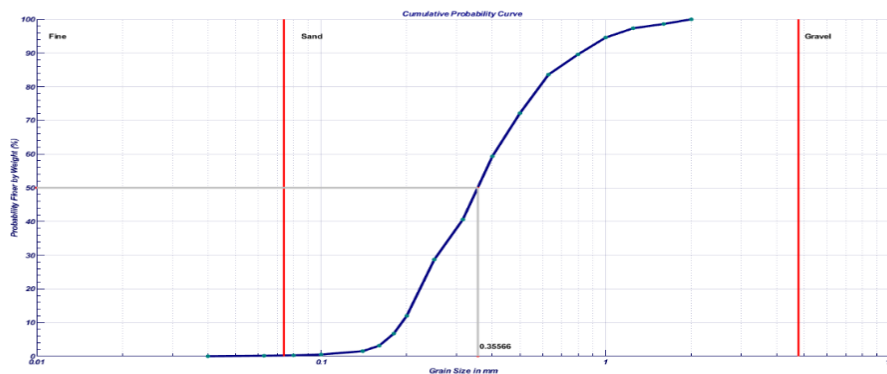


Figure III. 6 : Courbe granulométrique l'une stations avec Matlab

❖ **Plage Khelloufi :**

Tableau III. 6 : résultats des indices granulométriques avec classement au niveau de la plage Khelloufi

Stations	Indice (So)	Indice (Ski)	Mz	Classement So	Classement Ski	Classement
T1	1.58	0.31	0.49	Bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
T2	1.17	0.22	0.65	Très bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
M3	1.25	0.22	0.62	Très bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
M4	1.25	0.22	0.62	Très bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
T5	1.41	0.25	0.50	Très bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
T6	1.26	0.25	0.57	Très bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
M7	1.87	0.56	0.48	Bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
M8	1.25	0.2	0.65	Très bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
T9	1.17	0.22	0.65	Très bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
T10	1.58	0.31	0.49	Bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
M11	1.1	0.17	0.75	Très bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen

M12	1.11	0.17	0.77	Très bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
T13	1.76	0.46	0.26	Bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
T14	1.40	0.40	0.30	Très bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
M15	1.41	0.39	0.45	Très bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
M16	1.41	0.39	0.45	Très bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen

❖ **Plage Colonel Abbes :**

Tableau III. 7 : résultats des indices granulométriques avec classement au niveau de la plage Khelloufi

Stations	Indice (So)	Indice (Ski)	Mz	Classement So	Classement Ski	Classement
T17	1.19	0.23	0.60	Très bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
T18	1.45	0.29	0.46	Très bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
M19	1.86	0.39	0.21	Bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
M20	1.32	0.29	0.57	Très bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
T21	1.43	0.26	0.45	Très bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
T22	1.28	0.26	0.54	Très bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
M23	1.29	0.19	0.55	Très bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
M24	1.29	0.18	0.55	Très bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
T25	1.50	0.23	0.39	bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
T26	1.21	0.19	0.63	Très bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
M27	2.30	0.55	0.39	Bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
M28	1.6329	0.27	0.39	Bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen

T29	1.52	0.27	0.39	Bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
T30	1.52	0.18	0.77	Bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
M31	1.44	0.26	0.43	Très bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen
M32	1.80	0.40	0.47	Bien classé	Classement maximum vers grossier	Sable moyen

III.4 Cartographie de la répartition des sédiments analysés

III.4.1 Cartographie de la fraction pélitique :

L'étude de la fraction pélitique consiste à évaluer pour chaque échantillon le pourcentage de cette fraction pour ensuite réaliser des cartes des pélites qui nous montre la répartition de la fraction fine au niveau des deux plages de notre zone d'étude.

❖ Plage Khelloufi :

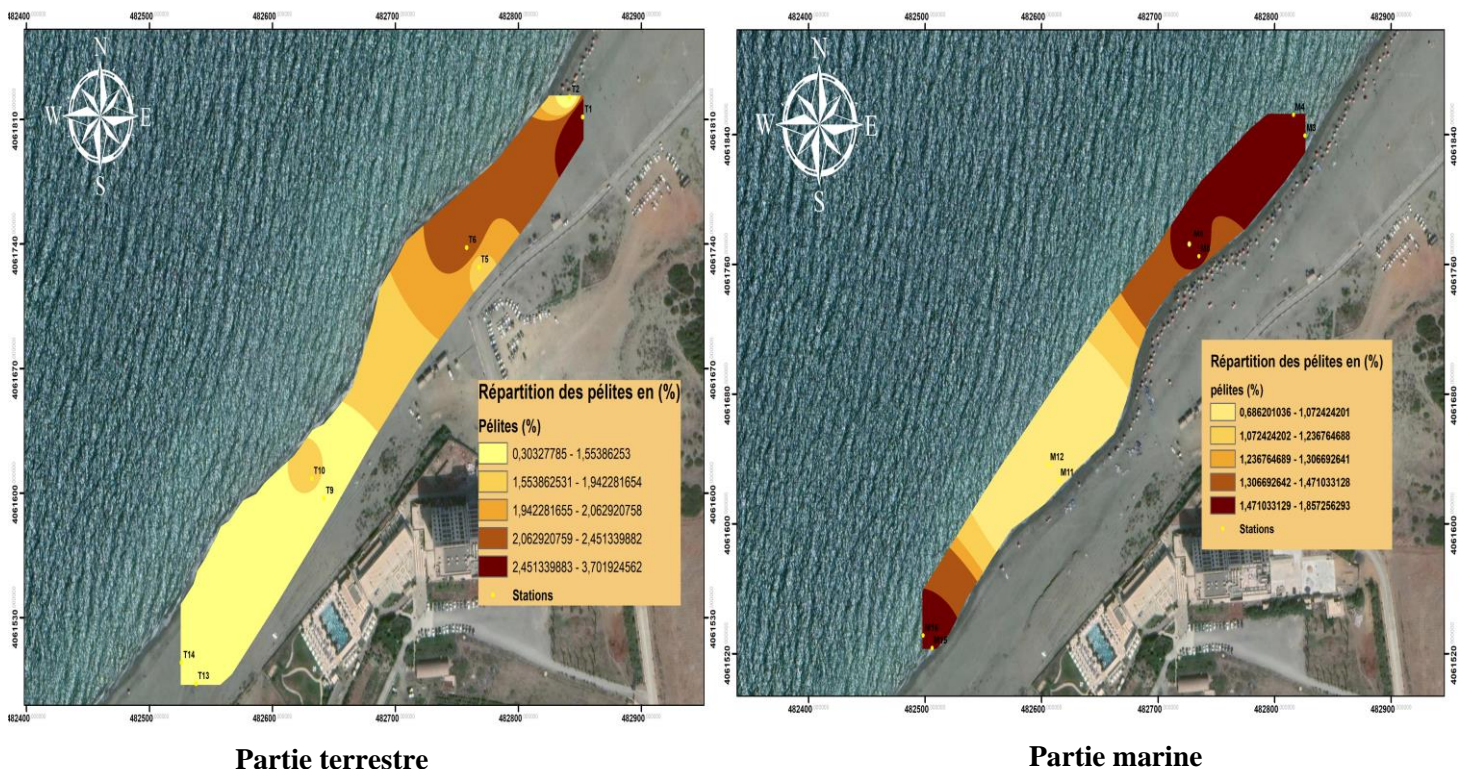
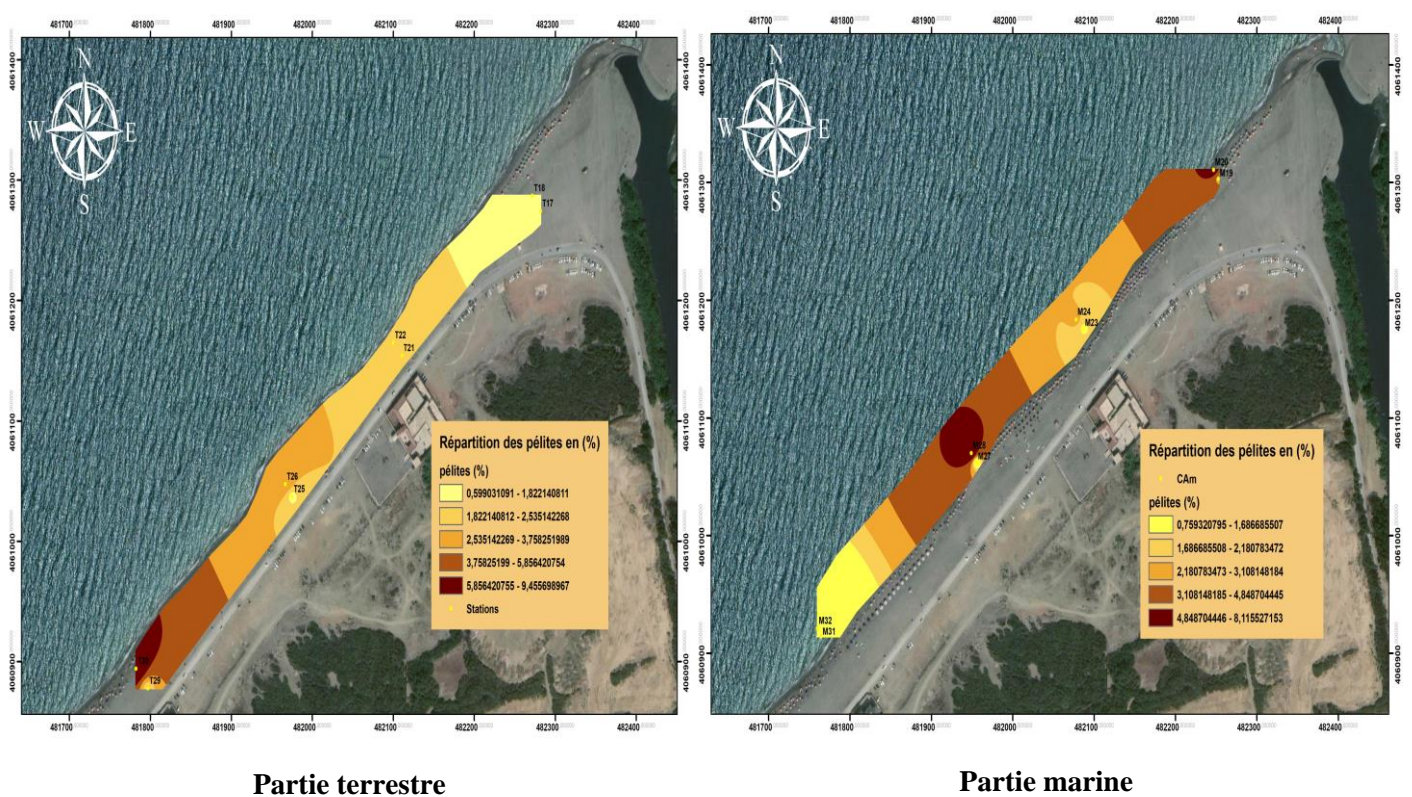


Figure III. 7 : Carte de la répartition des pélites au niveau de la plage Khelloufi

Interprétation :

- La répartition des pourcentages de pélites au niveau de la marine terrestre de la plage Khelloufi nous montre une augmentation de 3.70% dans la station T1, en allant vers l'ouest, le pourcentage diminue dans la partie terrestre, tandis que dans la partie marine le pourcentage pélitique augmente de 1.87%.
- On trouve le même pourcentage pour les stations (M11, M12) car la vitesse du courant est constante pour les deux points atteignant une vitesse de 0.1 m/s. c'est même cas pour les stations (M15, M16) avec une vitesse de courant de 0.11 m/s.

❖ Plage Colonel Abbès :**Figure III. 8 :** Carte de la répartition des pélites au niveau de la plage Colonel Abbès**Interprétation :**

- La répartition du pourcentage des pélites au niveau de cette plage montre une augmentation dans la partie terrestre en allant vers l'ouest de la zone jusqu'à la station T30, tandis que pour la partie marine l'augmentation est remarquée au niveau du flanc gauche de l'oued Mazafran.

- Une prédominance de la fraction fine avec un pourcentage de 8.11% se trouve dans la station M28 pour la partie marine et 9.45% pour la partie terrestre.
- La présence de grands taux de la fraction fine dans cette zone est due à l'embouchure de l'oued Mazafran qui transport des matériaux fins vers la mer.

III.4.2 Cartographie de la fraction grossière :

Il s'agit de créer des cartes de répartitions de la médiane, dans la partie terrestre et marine des deux plages de la zones d'étude après avoir évalué pour chaque échantillon le pourcentage de la fraction supérieure à 40um dans un poids considéré.

❖ Plage Khelloufi :

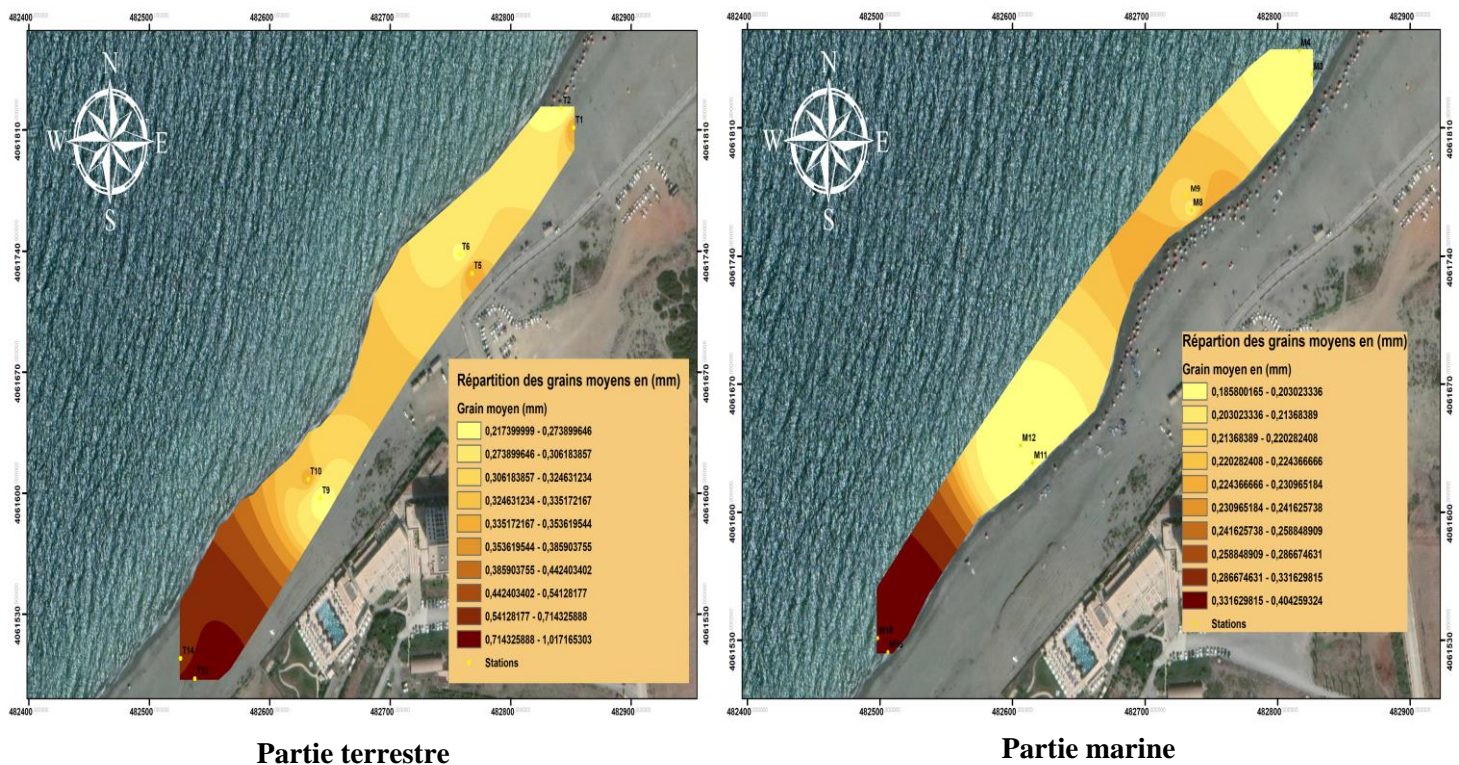


Figure III. 9 : Carte de la répartition des grains moyens au niveau de la plage Khelloufi

Interprétation :

- La carte de la distribution des médianes au niveau de la plage Khelloufi montre que le D50 varie entre 0.18 jusqu'à 0.40 mm pour la partie marine.
- En allant vers l'ouest de la zone, on remarque une augmentation du D50 dans les deux parties (1.07 mm dans la partie terrestre, et 0.40 mm pour dans la partie marine), cela peut être en relation avec un fort hydrodynamisme dans la zone.

- Les stations (M11, M12) ont le même grain moyen qui correspondent à une vitesse de courant de 0.12 m/s. C'est le même cas pour les stations (M15, M16) avec une vitesse de courant de 0.11 m/s.

❖ Plage Colonel Abbès

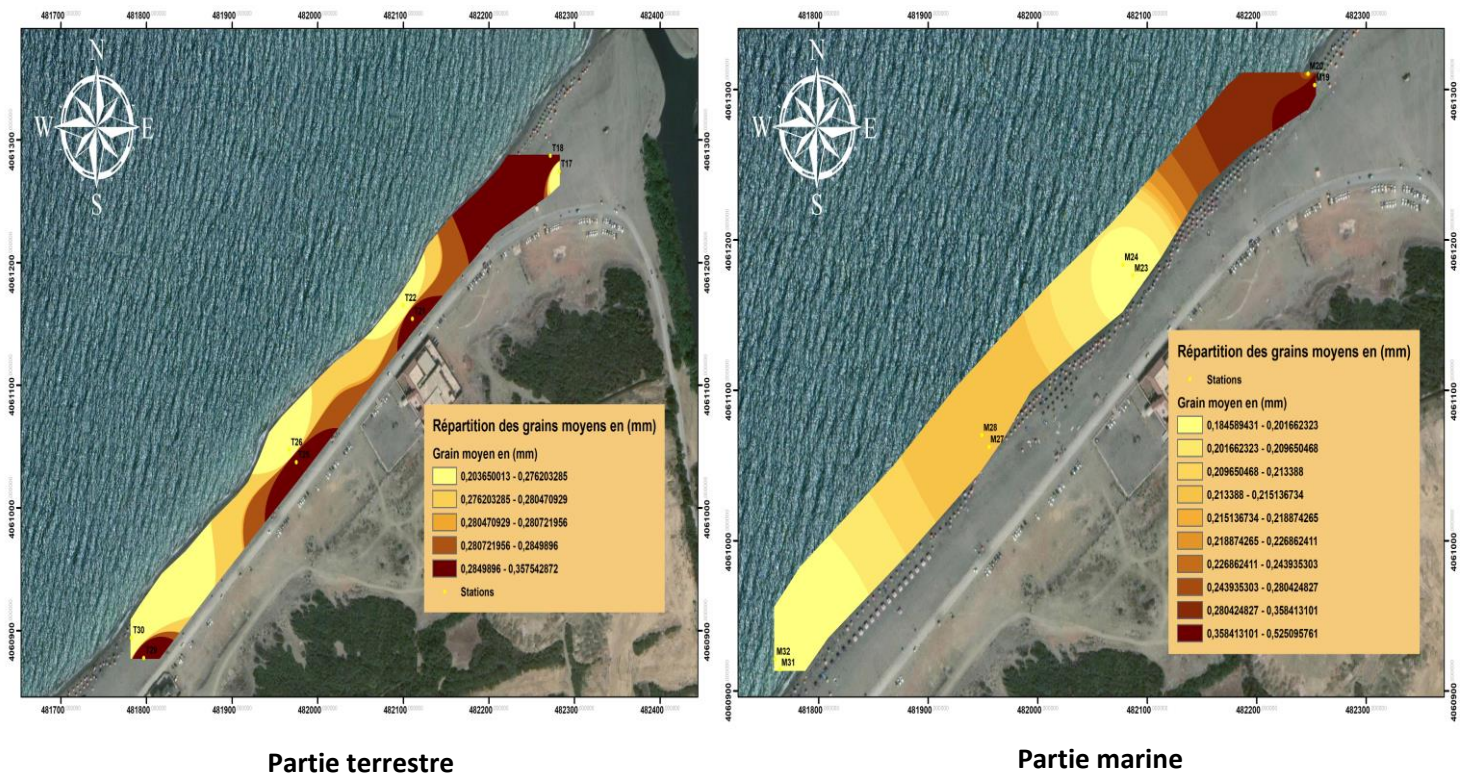


Figure III. 10 : Carte de la répartition des grains moyens au niveau de la plage Colonel Abbès

Interprétation :

- La répartition spatiale des grains moyen pour cette zone montre que le D50 varie entre 0.20 mm jusqu'à 0.35 mm dans la partie terrestre. Dans la partie marine, le grain moyen varie entre 0.18 et 0.52 mm.
- On remarque une diminution du grain moyen en allant vers l'ouest de cette zone, cela peut être expliqué par la présence de l'oued Mazafran.

Conclusion :

Ce chapitre nous a conduit à en tirer (grâce aux courbes cumulatives après une analyse granulométrique ainsi que les résultats des Indices SO, Ski et Mz) la conclusion suivante :

- ✓ Au niveau des deux plages , une répartition de sable fin qui tend vers les moyens, l'indices Ski dans ces plages indique qu'une surabondance de grains grossiers ou une carence de grains fins, la turbulence de l'eau au voisinage de la cote est responsable de la perte des fines et induire un indice de biais négatif, sur les deux plages, la surabondance de sédiments grossiers provient des fragments de coraux, des galets des coquilles brisées et peuvent être à l'origine d'un indice d'asymétrie interquartiles négatif.
- ✓ Le diamètre D50 dans la plage Khelloufi est de 0.33 mm, avec une répartition de sable fin qui converge vers le moyen.
- ✓ Pour la plage Colonel Abbes, le diamètre D50 est de 0.26 mm, avec une répartition de sable fin qui converge vers le moyen.
- ✓ Toutes les stations ont un sable moyen au niveau de des plages de notre zone d'étude
- ✓ La distribution de la fraction fine se répartie d'une manière plus importante au flanc gauche de l'embouchure de l'oued Mazafran (Prés de la plage colonel Abbes) car l'oued transporte des matériaux fins et après, les particules fines sont transportées par le courant de dérive littoral.
- ✓ La distribution des grains moyens montre une concentration élevée à l'Est de l'oued (Plage Khelloufi), le diamètre diminue en allant vers l'ouest ou vers la plage Colonel Abbes.

CHAPITRE IV

Prévisions de la houle au large et

Modélisation de la dynamique hydro-sédimentaire

IV Introduction

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

Le moyen de prédire ces évènements consiste en des prédictions probabilistes, en se basant sur un échantillon de données. L'idée est, étant donné un évènement extrême, d'en caractériser la probabilité d'occurrence. En ce sens, les mathématiques, et plus particulièrement la théorie probabiliste et la statistique en tant que discipline nous offrent des outils très puissants permettant de répondre à ces questions (Clément A., 2018).

Dans ce chapitre, Nous allons nous pencher vers l'analyse statistique des houles extrêmes du large de la baie de Bou Ismail avec le logiciel Hyfran-Plus. afin d'extraire les périodes de retour (annuelles, centennales et décennales), ces périodes de retour nous permettent de faire la simulation des différents modèles du MIKE21/3 FM.

Ce chapitre contiendra 2 parties :

- Analyse des houles extrêmes et détermination des périodes de retour.
- Modélisation numérique des différents modèles (SW, HD, ST).

IV.1 Analyse statistique des houles extrêmes au large de la baie de Bou Ismail :

- **Hauteur significative et période significative :**

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

$$H_s = \frac{1}{N^{\frac{1}{3}}} \sum H_i$$

IV.2 Analyse des houles extrêmes :

Il existe nombreuses approches pour le calcul des houles extrêmes dans notre base de données de 28ans, il est important de noter que l'augmentation de la taille de l'échantillon est proportionnellement positive par rapport à la précision des résultats (si l'échantillon augmente, la précision augmente), il y a plusieurs méthodes d'échantillonnage tel que :

- ✓ La méthode des maxima annuels : Le principe c'est de prendre le seuil maximal pour chaque année pendant plusieurs années.

- ✓ La méthode du peak-over threshold (POT) : Contrairement à la méthode des maxima annuels, elle consiste à fixer un seuil H et prendre toute la valeur supérieure à ce seuil. Cette méthode est plus avantageuse car elle augmente le nombre de l'échantillon N.

IV.3 Traitement des hauteurs significatives maximales au large de la baie de Bou Ismail

Le traitement a été fait à partir d'une base de données de la zone contenant des séries temporaires de paramètres atmosphériques et océanographiques de 1992 jusqu'à 2020, l'intervalle horaire entre chaque enregistrement de ces paramètres est de trois heures (Waveclimate, 2020).

A partir de ces informations, plusieurs informations sont obtenues telles que :

- L'historique et données sur la houle
- Vitesse et direction des vents dominants

La série des hauteurs significatives maximales annuelles de 1992 à 2020 présente les valeurs des Hs de 28ans (Figure IV.1) :

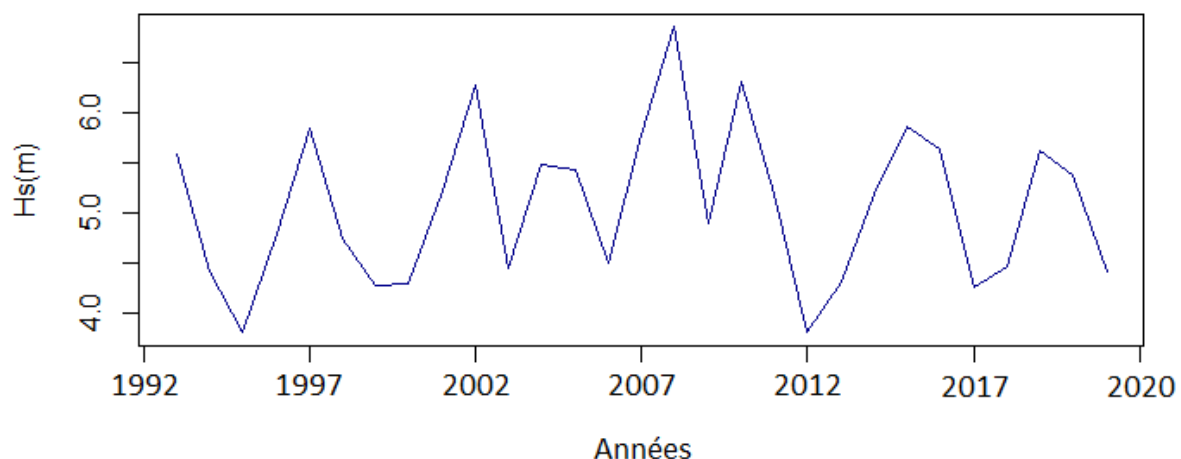


Figure IV. 1 : hauteurs significatives maximales annuelles (Waveclimate, 2020).

IV.3.1 La Méthode série des maxima annuel (SMA) :

Dans le cas de la méthode AM, le fait de prendre le maximum de chaque année assure de manière quasiment automatique l'indépendance (Tiogum I, & Delcaillau D., 2018).

Aussi appelé blocks maxima, cette méthode consiste à prendre pour chaque année le maximum annuel. Dans notre cas la taille de l'échantillon N=28. Nous allons utiliser trois fonctions de distribution qui reviennent souvent dans la théorie des valeurs extrêmes : loi de GEV, Gumbel et Log-Normal.

IV.3.1.1 La loi de la valeur extrême généralisée (GEV) :

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

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

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

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

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

La base de données a été traité ensuite introduite dans le logiciel Hyfran-Plus, un logiciel de statistiques et de calcul à base du langage Rstudio, il est utile pour déterminer les périodes de retour. La loi GEV nous donne les valeurs des paramètres qui sont :

Tableau IV. 1 : valeurs des paramètres de la loi GEV

Paramètres	x_0	α	k	r
Valeurs	4.74304	0.733748	0.182201	0.95

La méthode de GEV nous a permis d'obtenir les résultats suivants :

Tableau IV. 2 : valeurs des quantiles pour les périodes de retour GEV

Période de retour	Probabilité de fréquence au non-dépassement	Quantile $H_{S_{max}}$ (m)	Intervalle de confiance
100.0	0.9900	7.05	6.17 - 7.92
50.0	0.9800	6.81	6.10 - 7.52
20.0	0.9500	6.45	5.92 - 6.98
10.0	0.9000	6.12	5.69 - 6.55
5.0	0.8000	5.73	5.36 - 6.09
3.0	0.6667	5.37	5.04 - 5.71
2.0	0.5000	5.02	4.71 - 5.33
1.0	0.4767	4.06	3.88 - 4.90

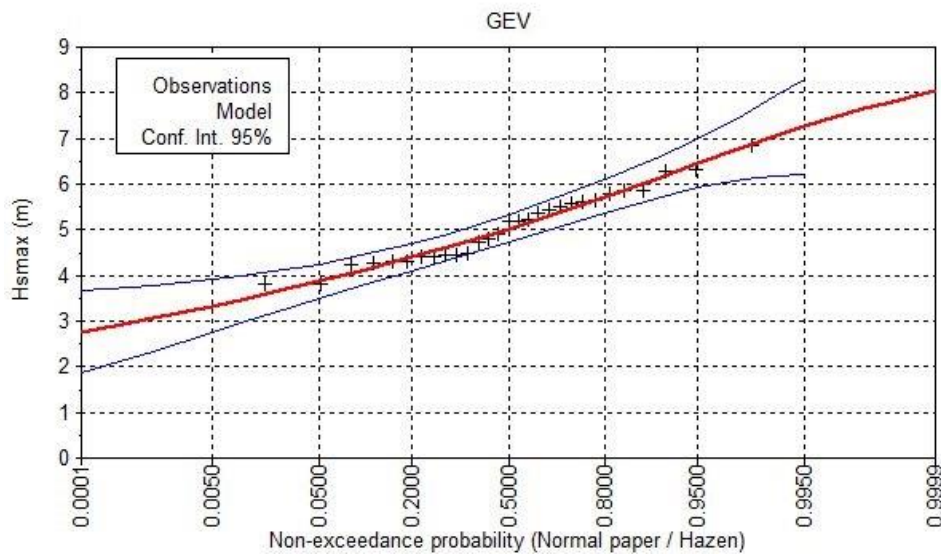


Figure IV. 2 : représentation graphique de la loi GEV

IV.3.1.2 La loi de distribution Gumbel :

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

On dit que X suit la loi de Gumbel de paramètres a et b si sa fonction de répartition vaut :

$$F(x) = \exp (-\exp (-x - \alpha)/b))$$

La loi de Gumbel est très utilisée en hydrologie et en climatologie pour estimer les valeurs extrêmes de phénomènes. Ainsi, si des variables aléatoires indépendantes suivent une loi normale centrée, leur maximum suit approximativement, pour n grand, une loi de Gumbel de paramètres

$$F(x) = \exp \left[- \exp \left(- \frac{x - x_0}{\alpha} \right) \right] : -\infty < x < +\infty$$

Cette loi possède deux paramètres : x₀, α sont respectivement location et l'échelle de la loi.

Le résultat de la distribution de Gumbel est sur le tableau et figure :

Tableau IV. 3 : valeurs des paramètres de la loi Gumbel

Paramètres	X ₀	α	r
Valeurs	4.72089	0.609604	0.95

Tableau IV. 4 : valeurs des quantiles pour les périodes de retour Gumbel

Période de retour	Probabilité de fréquence au non dépassement	Quantile H_{Smax} (m)	Intervalle de confiance
100.0	0,9900	7,53	6.41 - 8.64
50.0	0.9800	7.10	6.14 - 8.06
20.0	0.9500	6.53	5.78 - 7.28
10.0	0.9000	6.09	5.50 - 6.69
5.0	0.8000	5.64	5.20 - 6.08
3.0	0.6667	5.27	4.94 - 5.60
2.0	0.5000	4.94	4.68 - 5.21
1.0	0.4767	3.89	3.55 - 4.51

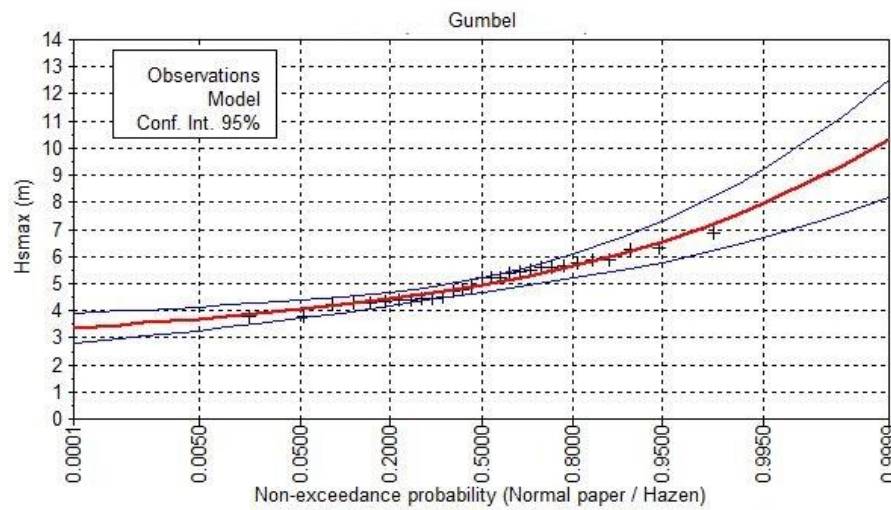


Figure IV. 3 : représentation graphique de la loi Gumbel

IV.3.1.3 La loi de distribution Log Normal :

$$F(x) = \int_0^x f(t)dt : 0 < x < \infty$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\alpha x}} \exp \left[-\frac{(\ln x - x_0)^2}{2\alpha^2} \right]$$

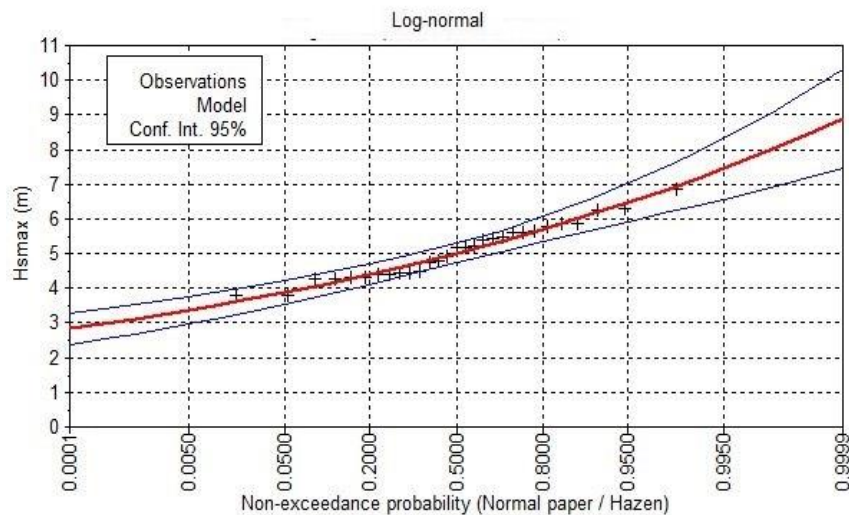
Les résultats de cette loi sont montrés par le tableau et figure :

Tableau IV. 5 : valeur des paramètres de la loi Log-normal

Paramètres	x_0	α	r
Valeurs	1.6124	0.1537	0.95

Tableau IV. 6 : valeurs des quantiles pour les périodes de retour Log-normal

Période de retour	Probabilité de fréquence au non dépassement	Quantile H_{Smax} (m)	Intervalle de confiance
100.0	0,9900	7.17	6.39 - 7.95
50.0	0.9800	6.88	6.19 - 7.56
20.0	0.9500	6.46	5.90 - 7.02
10.0	0.9000	6.11	5.64 - 6.57
5.0	0.8000	5.71	5.33 - 6.08
3.0	0.6667	5.36	5.04 - 5.67
2.0	0.5000	5.02	4.73 - 5.30
1.0	0.4767	3.90	3.20 - 4.66

**Figure IV. 4 :** représentation graphique de la loi Log-normal

IV.3.1.4 Comparaison entre les lois

Les trois distributions ont été utilisées dans notre étude car elles sont adéquates, afin de bien choisir la bonne méthode, on doit comparer avec le paramètre d'étalement qui estime le degré d'efficacité de la densité de probabilité de la fonction

Le paramètre d'étalement est défini par (Goda, 2004) comme le ratio entre la hauteur de période de retour de 50 ans sur celle de 10 ans équation II-6. Tableau II-7 Présente les résultats sur les différentes lois.

$$y_{50} = \frac{H_{50}}{H_{10}} = 1 + \frac{y_{50} - y_{10}}{\left(y_{10} + \frac{x_0}{\alpha}\right)}$$

- y_{50}, y_{10} sont la variable réduite correspondant des périodes de retour de 50 ans et 10 ans.

Tableau IV. 7 : résultat des paramètres d'étalement des différentes lois

Loi	GEV	Gumbel	Log-normal
y_{50}	1.113	1.201	1.126

(Gencarelli et al. 2007a) conclu que sur la mer méditerranéenne, le paramètre d'étalement varie de 1.1 à 1.27. Pour $N=28$, par rapport à cet intervalle, la distribution Gumbel semble la plus satisfaisante.

IV.3.2 La méthode POT (Peaks Over Threshold)

Le principe de cette méthode consiste à prendre un seuil H qui dépend du nombre d'échantillons N par rapport aux années d'observation T .

Dans notre cas, on projette de fixer un seuil omnidirectionnel $H=3$ m, ce seuil correspond mieux à la distribution des valeurs en fonction des périodes de retour avec une correspondance graphique de la courbe logarithmique, au-delà de ce seuil, les pics des H_s sont considérés comme des valeurs qui caractérisent les événements extrêmes.

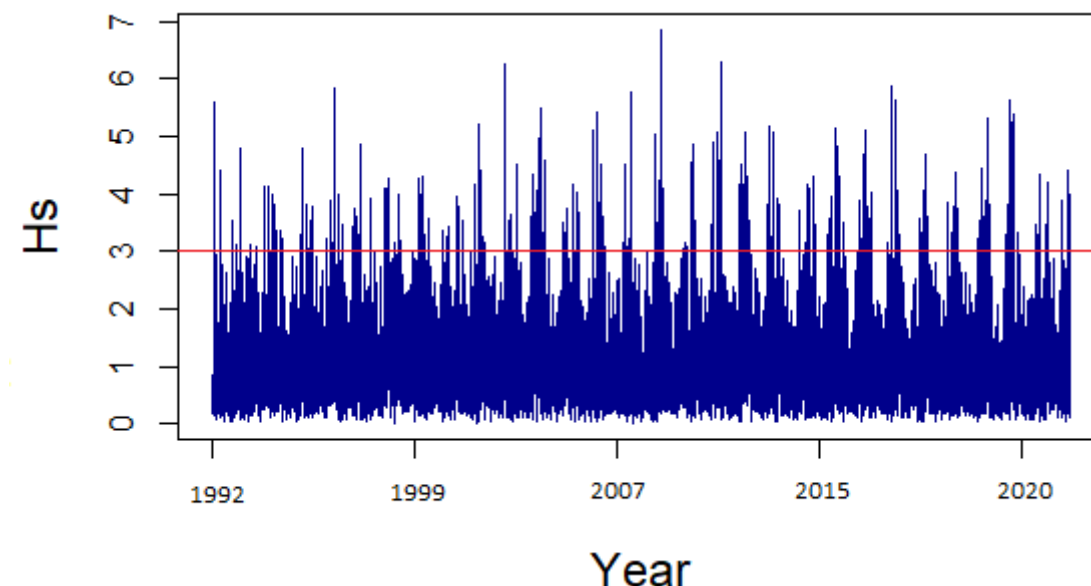


Figure IV. 5 : valeurs des hauteurs significatives maximales avec la méthode POT

IV.3.2.1 La loi GPD (Generalized Pareto distribution)

Soit H_s une variable aléatoire réelle (hauteurs significative) de fonction de répartition F , \hat{H} le seuil fixé et $Y=H_s - \hat{H}$. Sous condition que $H_s > \hat{H}$ (Y représentant ici la variable aléatoire de dépassement du seuil \hat{H}). (Pickands ,1975) a démontré que lorsque \hat{H} approche le point terminal de l'échantillon (valeur finie ou infinie dont la probabilité de dépassement est nulle).

La loi des dépassements de u peut être approchée par la distribution généralisée de Pareto (GPD) (Hamm, 2010).

$$F(y) = 1 - \left(1 + k \left(\frac{y}{\alpha}\right)\right)^{\frac{1}{k}} : 0 < y < \infty$$

Après avoir traité les données sur Hyfran-plus avec la méthode GPD, nous avons déterminé les résultats des calculs des différentes périodes de retour montrés dans le tableau :

Tableau IV. 8 : hauteurs significatives extrêmes en fonction des périodes de retour

Période de retour	Hauteur significative extrême
1.0	4.74
5.0	5.71
10.0	6.06
20.0	6.38
30.0	6.56
50.0	6.77
100.0	7.03

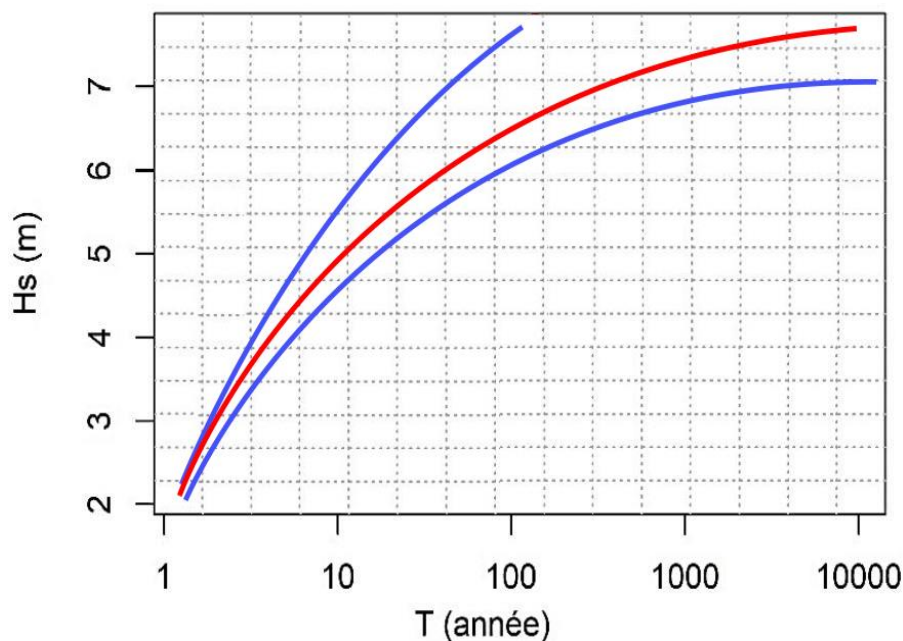


Figure IV. 6 : ajustement par la loi de GPD

IV.3.2.2 La période significative

(Callaghan et al, 2003) ont donné une relation qui relie la hauteur significative à sa période en négligeant la vitesse des vents exprimer dans la formule de **Wilson, 1934**.

$$T_s = 3.3H_s^{0.63}$$

Dans le cas de notre étude, la méthode d'ajustement statistique POT (peak over threshold) est une méthode plus précise que celle de SMA (série maximas annuels) car la méthode POT utilise les données exhaustives au fil des années avec un échantillon assez grand qui intervient dans l'augmentation de la précision des résultats, contrairement à SMA qui utilise seulement les hauteurs significatives maximales de chaque année ce qui conduit à réduire la taille de

L'échantillon. Le tableau montre les périodes T_s trouvées pour les valeurs des H_s avec la méthode POT :

Tableau IV. 9 : hauteurs significatives extrêmes en fonction des périodes de retour

	NE (45°)	N (360°)	NO (315°)	O (270°)
Période de retour	Annuelle	Décennale (10ans)	Cinquantennale (50ans)	Centennale (100ans)
H_s (m)	4.74	6.07	6.77	7.03
T_s (s)	8.79	10.27	11.01	11.27

IV.4 Modélisation numérique

Les modèles numériques reposent sur la description des phénomènes physiques à l'aide (De systèmes) d'équations mathématiques. Celles-ci sont ensuite résolues numériquement, pour chaque paramètre étudié, par un programme informatique. (Dahmani A., 2016).

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

Les estimations du transport sédimentaire doivent reposer sur des études analytiques 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 hydro sédimentaire, une carte bathymétrique demeure indispensable (Benallou I., 2020).

Dans cette partie, le but principal est faire une simulation du climat hydro-sédimentaire au niveau de notre zone d'étude, avoir choisi deux plages est un choix judicieux afin de mieux comprendre l'impact des événements extrêmes sur le transport sédimentaire longitudinal après avoir utilisé de nombreux modèles numériques calibrés par les données acquises au niveau des stations de mesure lors de la sortie sur terrain. Cette étude comporte 3 étapes importantes :

- **Etude bathymétrique :** cette étape est essentielle grâce à laquelle on commence à faire la modélisation du fonctionnement hydro-sédimentaire
- **Modélisation Mike21 :** des modules intégrés dans le système de modélisation tels que SW, HD, ST se font en fonction de notre objectif afin de l'atteindre et avoir un aperçu hydrosédimentaire de la zone.
- **Interprétations des résultats :** issus de la simulation sous Mike 21

- **Mike Zero**

Mike Zero est le nom commun des implémentations Windows de DHI intégrant l'interface utilisateur graphique pour la mise en place des simulations, la pré-analyse, le post-traitement et la visualisation dans un environnement de projet orientée (DHI, 2007).

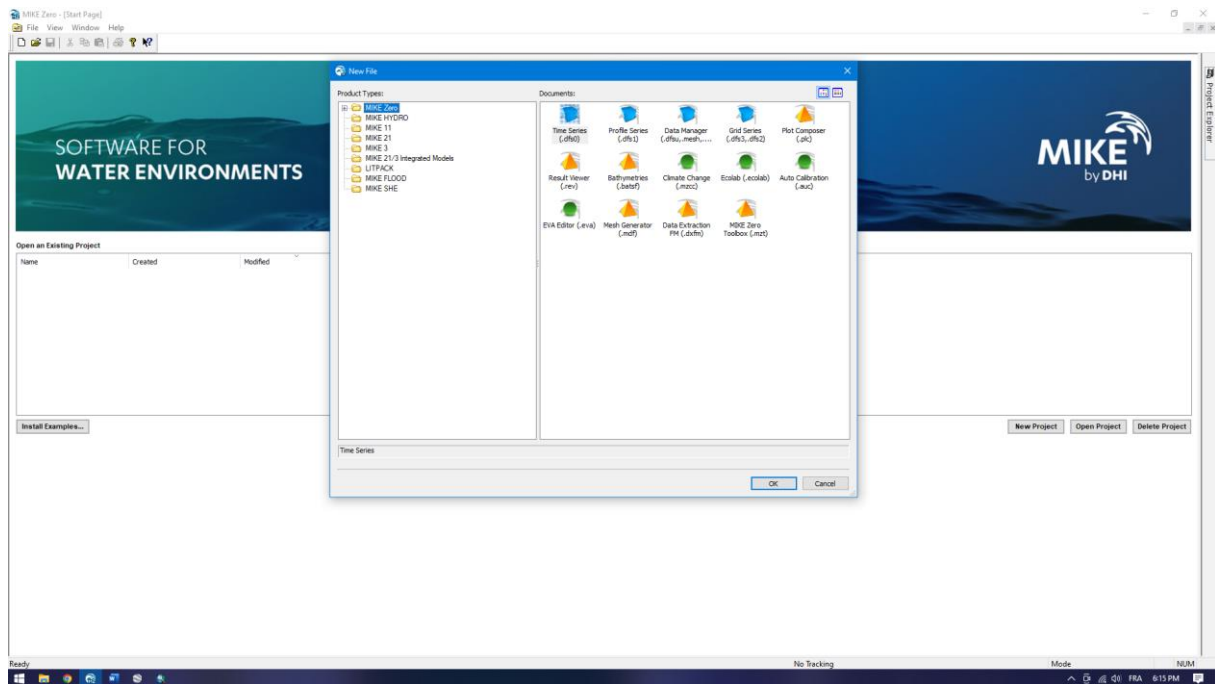


Figure IV. 7 : Interface de Mike Zero

- **Mike 21**

MIKE 21 est une suite logicielle professionnelle de modélisation numérique 2D des écoulements à surface libre, développée par DHI Water & Environnement. Il permet la simulation de l'hydraulique et des phénomènes associés dans les rivières, les lacs, les baies, les zones côtières et les océans (DHI, 2014).

La modélisation de la dynamique sédimentaire en milieu côtier, doit tenir compte des courants induits par la marée et les houles. Il s'ensuit que l'approche modélisatrice doit faire appel à un système de modélisation intégré comprenant 3 modèles numériques : un modèle hydrodynamique, un modèle de houle et un modèle de transport sédimentaire de particules non cohésifs, sous l'effet de l'action combinée des vagues et des courants. Dans ce contexte, le module MIKE 21, comprend les calculs suivants (DHI, 2014) :

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

a) MIKE21-SW (Spectral waves Flexible Mesh)

Il s'agit d'un Modèle spectral de vague de 3^{ème} génération similaire au SWAN, avec certaines améliorations. Il simule : la croissance des vagues en présence du vent, l'interaction vague non-linéaire, la dissipation par le déferlement et par la friction sur le fond, la réfraction par le changement de profondeur et l'interaction vague-courant. Les calculs du modèle MIKE21-SW utilisent une grille de maillage flexible et non imbriqué (DHI, 2014).

Les principales applications du modèle MIKE21-SW sont :

- Conception et optimisation des structure de défense des ports et marinas contre les vagues ;
- Etablissement du climat des vagues dans une région côtière en fonction des vagues du large ;
- Génération des cisaillements de radiations des vagues pour le calcul des courants côtiers par MIKE21/3 ;
- Couplage avec les modèles de transport de sable et de boues dans les zones littorales ;

b) MIKE21-HD (Hydrodynamic model)

Le modèle traite le frottement sur le fond, l'effet des événements météorologiques (vents et pression atmosphérique), et la force de Coriolis, etc.... Il nous permet de simuler les courants côtiers dû à l'action de la houle dans la zone de déferlement. Il fournit aussi les conditions hydrodynamiques aux autres modules de ce système tel que le module MIKE 21-ST (Labdi, A., et Mandi, K. 2021).

Les équations suivantes, la conservation de la masse et la dynamique intégrée à la verticale, décrivent les variations du débit et de l'eau :

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{c^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] \\ - \Omega q - fVv_x + \frac{h}{\rho w} \frac{\partial}{\partial x} (P\alpha) = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{c^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] \\ + \Omega q - fVv_y + \frac{h}{\rho w} \frac{\partial}{\partial y} (P\alpha) = 0 \end{aligned}$$

Les symboles suivants sont utilisés dans ces équations (DHI, 2014) :

$h(x, y, t)$: Profondeur de l'eau (m).

(x, y, t) : Variation temporelle de la profondeur de l'eau (m).

$Z(x, y, t)$: L'élévation de surface (m).

$p(x, y, t)$: Densités de flux dans les directions x et y ($m^3/s/m$).

(x, y) : Coefficient de Chezy.

g : L'accélération de la pesanteur (m/s^2).

(V) : Facteur de frottement de vent.

$V, X, VY(x, y, t)$: Vitesse et composantes du vent dans les directions x et y (m/s).

$\Omega(x, y)$: Paramètre de Coriolis (s^{-1}).

$P(x, y, t)$: Pression atmosphérique (kg/m^2).

ρ_w : Masse volumique de l'eau (kg/m^3).

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$: Composantes de l'effort de cisaillement effectif.

c) MIKE21-ST

C'est un modèle de transport de sédiment non-cohésif (sable). Ce modèle est couplé au modèle hydrodynamique MIKE21/3-HD et au modèle de vagues MIKE21/SW.

Grace au MIKE21-SW, on obtient des formulations pour le calcul du transport sédimentaire : la formulation de Bijker (courants seuls) et la formulation STP du DHI (courant et vagues).

Ce modèle peut être appliqué à tous les endroits où les courants et les vagues déplacent le sable.

Quelques applications du modèle MIKE21/3-ST :

- La gestion du littoral ;
- L'optimisation de l'entrée d'un port ou d'une marina ;
- La conception des ouvrages de protection côtières ;
- L'étude de la stabilité des passes d'entrée tidales ;
- L'étude de la morphologie côtière et fluviale ;
- La conception des plages artificielles ;

L'équation de base : l'équation de base de ce modèle est l'équation de conservation de l'action de vagues (Komen, et al. 1996).

L'équation de conservation pour l'action des vagues peut être écrite comme suite :

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

Avec :

$\mathbf{N}(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$: densité d'action des vagues ;

t : le temps;

$\vec{x} = (x, y)$: Les coordonnées cartésiennes ;

σ = Pulsation ;

$\vec{v}(c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$: La vitesse de propagation d'un groupe de vagues (dans l'espace de phase à quatre dimensions ;

\mathbf{S} : Source pour l'équation de l'équilibre énergétique ;

∇ : l'opérateur différentiel à quatre dimensions dans l'espace x, y, σ, θ . Les quatre vitesses de propagation caractéristiques sont données par :

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

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla_{\vec{x}^d} \right] - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s}$$

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

IV.5 Approche Méthodologique

L'approche méthodologique nous a permis de recueillir les données nécessaires (bathymétrie, données des houles, granulométrie de la zone...) Afin de les introduire dans les logiciels utilisés pour notre étude afin de réaliser des simulations représentatives à la réalité.

IV.5.1 Acquisition des données bathymétriques

- **ArcGIS 10.8**

ArcGIS est un logiciel permettant de traiter des informations géographiques, il s'agit d'un système qui sert à collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser ces informations géographiques.

Dans notre cas d'étude, nous avons utilisé ce logiciel pour la représentation des données bathymétriques, nous avons extrait ces données au large du site GEBCO qu'on a superposé sur une carte Navionics.

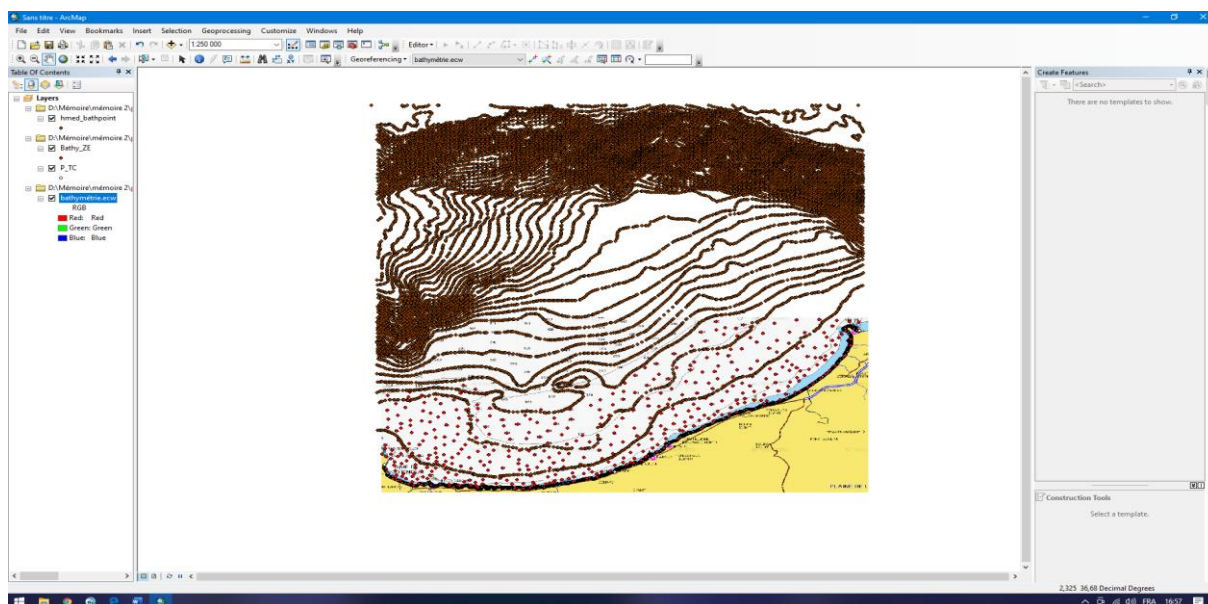


Figure IV. 8 : création des points bathymétriques sur Arc Gis

- La bathymétrie

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

Grace à l'acquisition des données bathymétriques

Les changements morphologiques du domaine marin et les migrations longitudinales et/ou transversales des corps sédimentaires ont pu être observés sur des cartes bathymétriques. Au total deux cartes bathymétriques ont été acquises, une carte de la baie de Bou Ismail (données bathymétriques de Navionics digitalisées avec ArcGIS) et une autre de la zone d'étude réalisée sur le terrain le 12 juin 2022. Cette base de données a été complétée par plusieurs levés au large réalisés par GEBCO, afin d'obtenir une carte globale de la région à partir de la ligne de cote jusqu'au large (plus de 2000 m de profondeur).

Les données bathymétriques de notre site d'étude proviennent des profils perpendiculaires à la cote lors de la sortie à une profondeur d'environ -0.5m jusqu'à -1m de la cote.

L'acquisition des données bathymétriques lors de la sortie nous a aidé à obtenir une précision sur la propagation de la houle du large vers le rivage de notre zone d'étude, la bathymétrie à son niveau a donc une influence plus réaliste sur la simulation des différents modèles (SW, HD et ST).

IV.5.2 Principe de simulation du MIK21-DHI

Le modèle numérique utilisé dans le cadre de cette étude est le MIKE21-DHI, il s'agit d'un système de modélisation utile pour plusieurs simulations des phénomènes physiques (houles, courants et le transport sédimentaire), le système est efficace sur des grandes échelles avec la possibilité d'augmenter la résolution des mailles dans les endroits précis à l'aide des maillages.

IV.5.2.1 Création de la Bathymétrie sous maillage

➤ L'étude bathymétrique

L'étude bathymétrique est une étude importante pour l'interprétation de la morphologie sous-marine de notre zone d'étude afin d'obtenir des résultats fiables et précis. Pour ce faire, nous avons introduit les points bathymétriques obtenues précédemment sur le MIKE21 pour réaliser une carte bathymétrique, et pour cela, plusieurs étapes sont requises :

➤ Création des arcs :

Utiles pour déterminer lors de la simulation les conditions des limites et la direction des houles incidentes.

➤ Création de la Mesh :

Grace au module « MeshGenerator », on peut obtenir une présentation de bathymétrie numérique 2D détaillées, il fournit également les utilitaires pour importer les données du trait de côte ainsi que les points bathymétriques avec un système de coordonnées WGS84 de projection UTM zone 31, le maillage est composé d'éléments triangulaires dont la taille est ajustée automatiquement du large vers la cote (le maillage réduit sa taille en arrivant vers le trait de côte). Un autre maillage a été fait au niveau de la zone d'étude pour avoir réduire la taille des triangulations afin d'obtenir plus d'informations sur la propagation des houles.

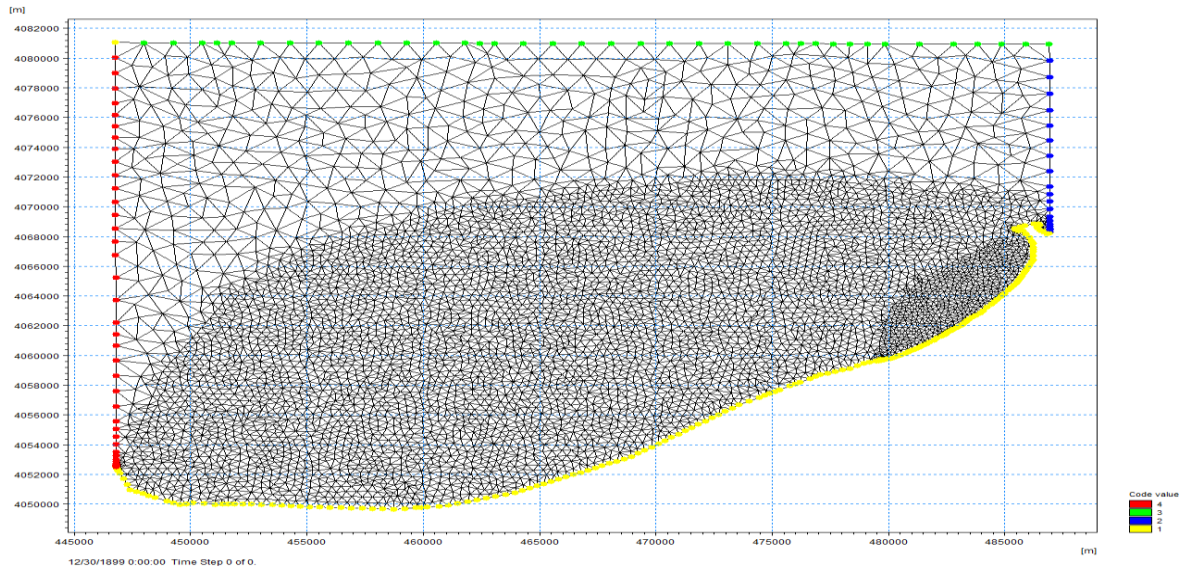


Figure IV. 9 : maillage du modèle côtier de la baie de Bou Ismail

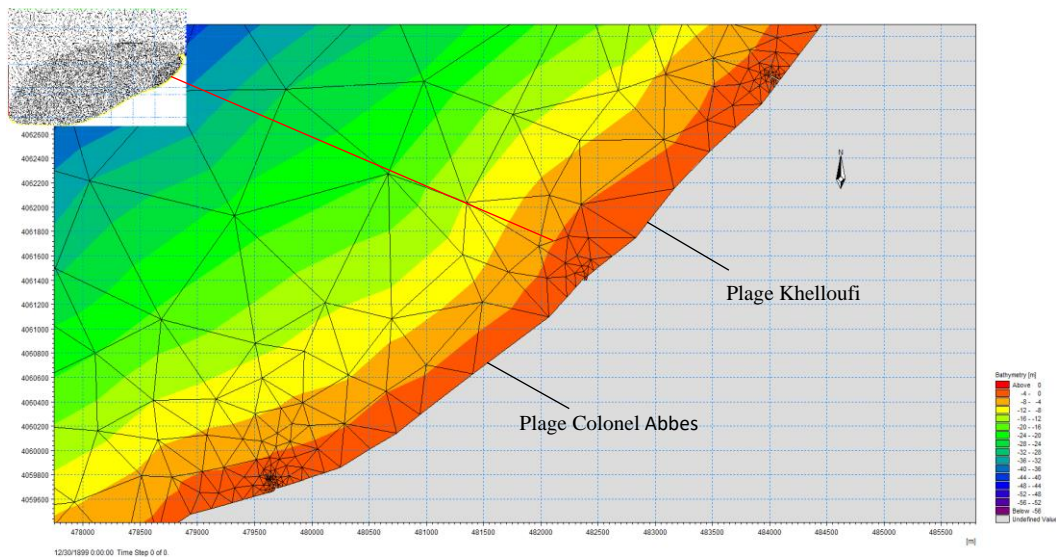


Figure IV. 10 : maillage du modèle côtier des deux plages de la zone d'étude

➤ Exportation de la bathymétrie :

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

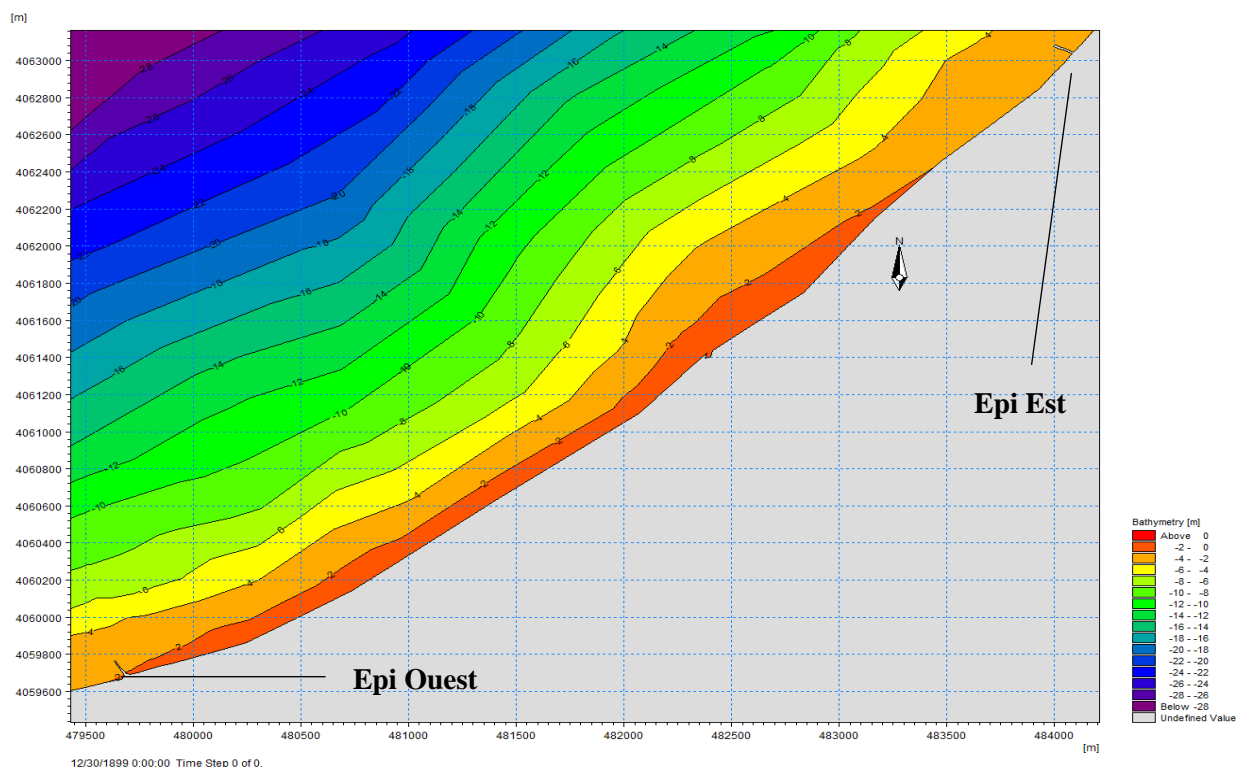


Figure IV. 11 : Bathymétrie de la zone d'étude

Interprétation de la bathymétrie :

Dans cette partie, nous expliquerons les résultats obtenus dans la partie précédente afin de mieux décrire la morphologie sous-marine et le critère de la zone d'étude, l'interprétation est divisée en deux parties :

➤ Bathymétrie de la baie de Bou Ismail (échelle globale) :

Après la conception d'une carte bathymétrique de la baie de Bou Ismail, la carte couvre la zone s'étendant de rase Acrata à l'Est jusqu'au mont Chenoua à l'Ouest, on peut observer que les deux régions morphologiques mises en évidence selon la répartition des isobathes sont ce qui suit :

➤ Zone du large

La courbe bathymétrique (-200m) est considérée généralement comme la limite de la marge continentale algérienne et le domaine des plaines abyssales, sa largeur moyenne est de 24km, elle atteint 55km au maximum dans la baie de Bou Ismail.

Le plateau continental étant très étroit a atteint un maximum de 13km au niveau du mont Chenoua, il est caractérisé par une pente de l'ordre de 2 à 3% (**Bachari H.F., 2009**).

Généralement, les isobathes sont entre -100 et -2000m, parallèles à la cote et relativement espacés sur la carte, reflétant le fond régulier et la pente douce, cela se traduit par une faible

activité du fond par rapport à d'autres zones, cependant, au niveau des deux caps Ras Acrata à l'Est et mont Chenoua à l'ouest, les isobathes sont serrés et il peut y avoir un fond rocheux.

➤ **Zone d'étude**

Montre des isobathes généralement bien serrés entre -0.5 et -10m, et une morphologie particulière caractérisée par la présence des rides d'avant cote discontinues, cette irrégularité est due au rapport de l'oued Mazafran et l'implantation des ouvrages de protection (Epi à l'est et à l'ouest de la zone d'étude).

On remarque qu'il y a une ligne d'inflexion d'isobathes près de l'embouchure qui est traduite par un flux très important au niveau de l'embouchure de l'oued vers le large du aux forts débits solides qui sont transportés par l'oued vers le large.

IV.5.2.2 Configuration du modèle de simulation « coupled model (FM)

Dans le cadre de ce travail, l'approche consiste à englober les trois modèles : Hydrodynamique (HD), Spectral wave (SW) et Transport sédimentaire (ST) dans un modèle couplé MIKE 21/3 FM.

a) **Modèle SW et HD**

Il est nécessaire de prendre plusieurs types de données pour cette étude :

- La bathymétrie
- Les directions dominantes sont par rapport à la propagation des houles : **Nord-Est, Nord, Nord-Ouest, Ouest**
- Les vitesses du vent : la direction du vent est la même que celle des houles.

- **Conditions initiales des limites**

Les conditions initiales imposées dans le module SW dans les limites de la zone d'étude sont les paramètres de la houle.

Etant donné que le traitement statistique des valeurs extrêmes a été déjà fait dans la partie précédente de ce chapitre, nous avons pris les hauteurs significatives en fonction des périodes de retour afin de réaliser des simulations omnidirectionnelles.

Tableau IV. 10 : Données utilisées pour la simulation du modèle SW et HD

	NE (45°)			N (360°)			NO (315°)			O (270°)		
	Hs(m)	Tp(s)	U(m/s)	Hs(m)	Tp(s)	U(m/s)	Hs(m)	Tp(s)	U(m/s)	Hs(m)	Tp(s)	U(m/s)
Annuelle	4.74	8.79	11.13	4.74	8.79	10.02	4.74	8.79	16.80	4.74	8.79	16.73
Décennale	6.07	10.27	13.82	6.07	10.27	13.90	6.07	10.27	21.26	6.07	10.27	21.26
Centennal	7.03	11.27	15.96	7.03	11.27	16.07	7.03	11.27	23.50	7.03	11.27	23.05

Tableau IV. 11 : sortants du modèle SW

	Symbole	Unité
Hauteur Significative	Hs	Mètres
Période pique	Tp	Secondes
Direction moyenne	MWD	Degrés
Contrainte de radiation	Sxx, Sxy, Syx	m ³ /s ²

Pour la configuration du modèle HD, on prend en considération le frottement sur le fond $n=0.03$, la viscosité turbulente et la force des vents change en fonction de la direction. Les données sortantes du modèle HD sont les suivantes :

Tableau IV. 12 : sortants du modèle HD

	Symbole	Unité
U Velocity	Vu	m/s
V Velocity	Vv	m/s
Vitesse du courant	V	m/s
Direction du courant	-	

b) Modèle ST

Le paramètre le plus important dans le modèle ST est celui du diamètre des grains ainsi que sa graduation, la bathymétrie joue aussi un rôle pour le calcul des taux de transport, avant la simulation du transport sédimentaire, une table de sédiment doit être générée avec le module MIKE21-ST.

Le diamètre médian du sable pour notre zone d'étude est de 0.3 mm avec une gradation de 1.74 obtenus à partir de l'analyse granulométrique effectuée dans le chapitre précédent.

Le modèle ST dépendra des sortants du module SW (Hs, Tp, Dir) et HD (Vitesse du courant) simulés pour les 3 périodes de retour précédente.

Tableau IV. 13 : Sortants du modèle ST

	Symbole	Unité
Total load x- compnent	STx	m ³ /s/m
Total load y- compnent	STy	m ³ /s/m
Total load - magnitude	ST	m ³ /s/m
Total load - direction	-	Degrés

IV.5.3 Interprétation des résultats de simulation pour chaque période de retour en fonction des directions

a. Période de retour annuelle

Au large de la baie de Bou Ismail, les houles de direction **Nord-Est** ne subissent aucune modification ($H_s = 4.73\text{m}$) jusqu'à ce qu'elles rencontrent le cap Ras Acrata qui réoriente la propagation de ces houles par réfraction, au fur à mesure, elles commencent à ressentir le fond.

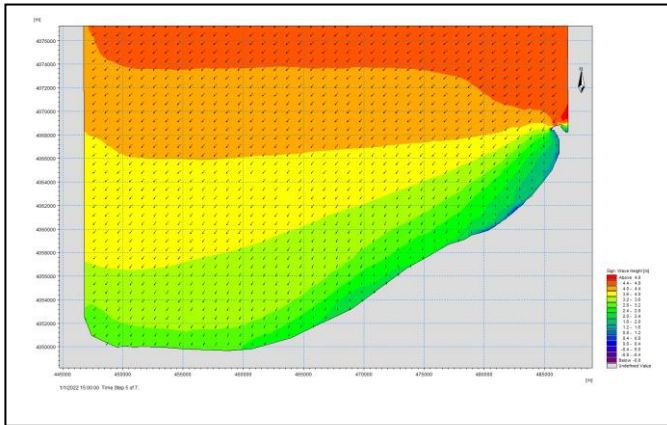
Dans la partie Est et Ouest de l'oued Mazafran, la hauteur de la houle diminue considérablement pour atteindre 0.70 m dans la plage Khelloufi et 0.95 m dans la plage Colonel Abbas, il faut noter également que la pente de Colonel Abbas est plus raide par rapport à celle de Khelloufi, donc le déferlement au niveau de la plage Colonel Abbas est plus proche de la cote avec une hauteur H_b plus importante. Pour cette période de retour, les houles engendrent un courant qui varie entre 0.65m/s et 0.70m/s avec un transport sédimentaire de 1987.56 m³/an dans la plage Khelloufi et 2426.26 m³/an dans celle de Colonel Abbas.

Pour la direction **Nord**, la hauteur de la houle au niveau de la zone d'étude atteint les 0.70m pour la plage Khelloufi et 0.91 m pour la plage Colonel Abbas, tandis que la vitesse du courant de dérive varie entre 0.72 m/s et 0.75 m/s ce qui engendre un transport sédimentaire de 1005.64m³/an dans la plage Khelloufi, et atteignant 2546.65m³/an en allant vers la plage Colonel Abbas.

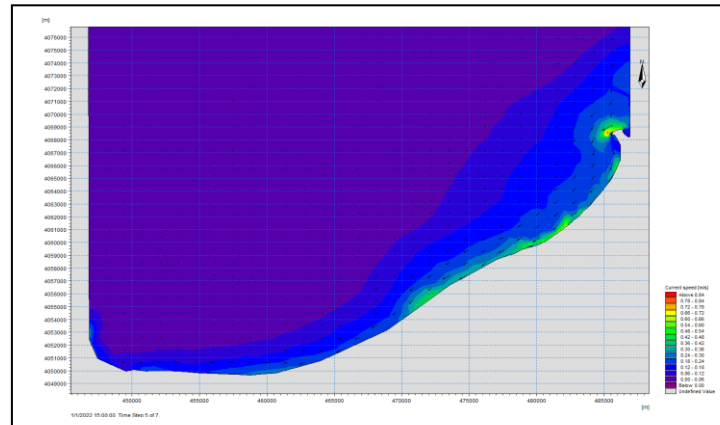
La propagation des houles de secteur **Nord-Ouest** est presque perpendiculaire de la cote (entre 2.5 à 3°) atteignant les 0.65m, ceci engendre un courant de dérive littoral très faible de 0.11 m/s à 0.20 m/s pour les deux plages, le transport sédimentaire longitudinal est donc très faible dû à l'angle d'incidence des houles, mais pour une telle période de retour, cette direction favorise l'érosion côtière et entraîne forcément les particules sédimentaires vers le large vu que le courant transversal est important (voir les directions des vecteurs dans la **figure IV.14**).

Le secteur **Ouest** montre des hauteurs de houles atteignant 0.58 m au niveau de la cote, vu que l'angle d'incidence est plus important par rapport au secteur nord-ouest, ce qui fait que le courant de dérive est plus important (0.55 m/s) avec un transport sédimentaire longitudinal de 978.256 m³/an.

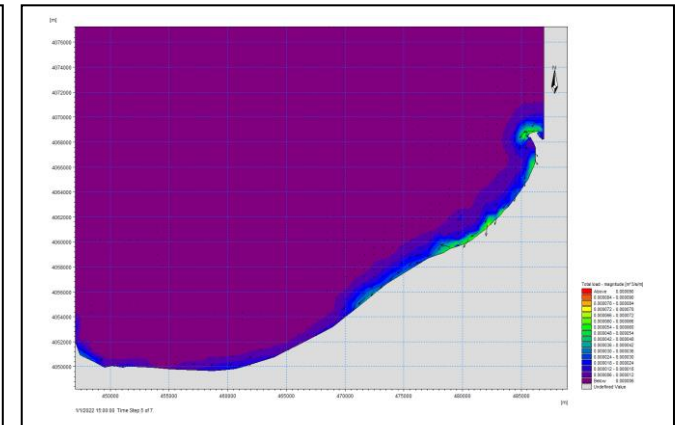
On remarque que la direction la plus dominante pour le transport sédimentaire longitudinal est celle du **Nord-Est**, car l'angle d'incidence est plus important, ceci à une relation avec le cap qui joue un rôle important dans déviation de la houle vers la cote qui favorise au maximum le transport sédimentaire par un courant longitudinal important.



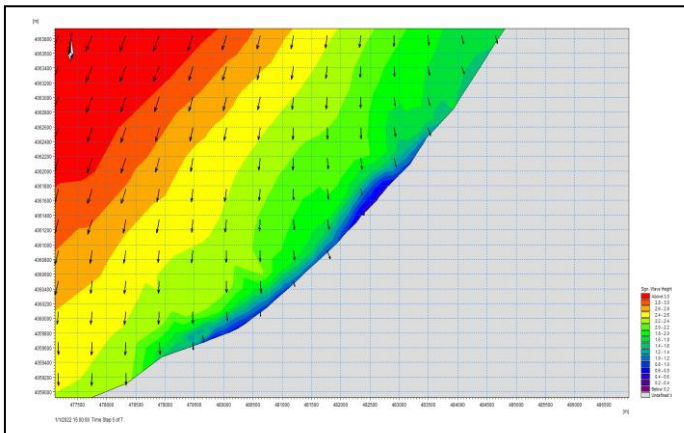
Champ des houles dans la baie de Bou Ismail NE 45°



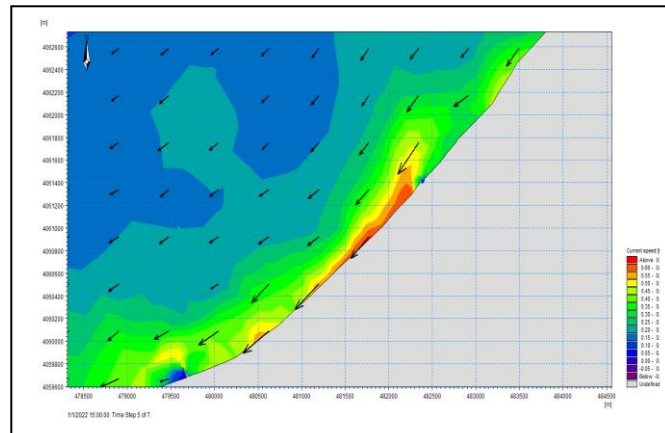
Champ des courants dans la baie de Bou Ismail NE 45°



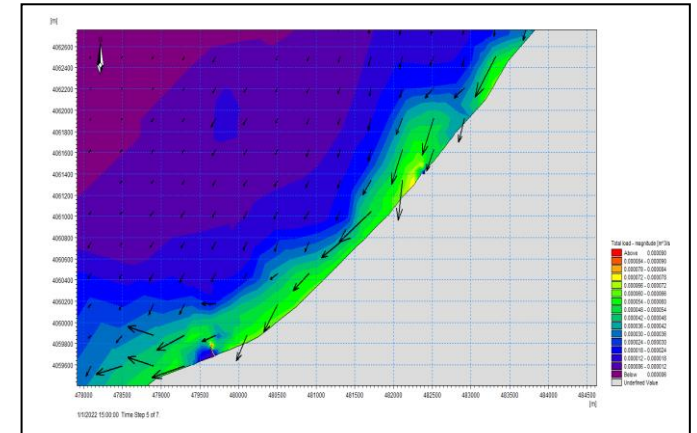
Dynamique sédimentaire dans la baie de Bou Ismail NE 45°



Champ des houles dans la zone d'étude NE 45°

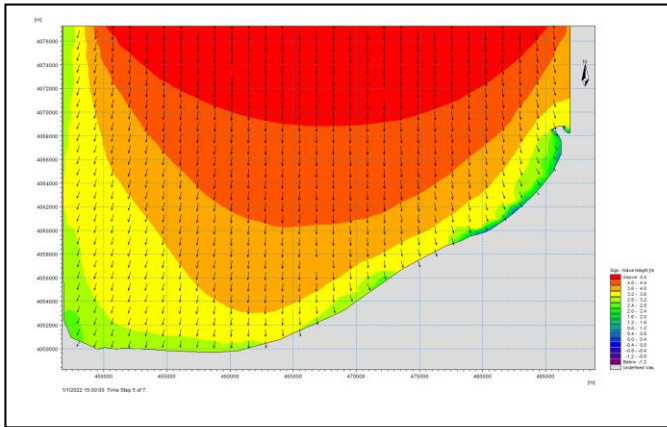


Champ des courants dans la zone d'étude NE 45°

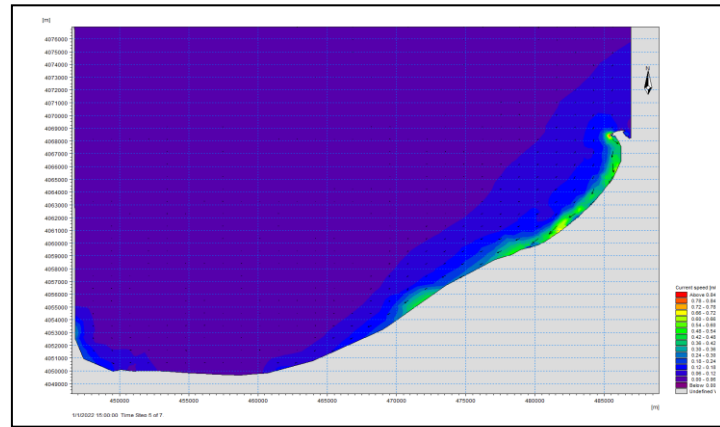


Dynamique sédimentaire dans la zone d'étude NE 45°

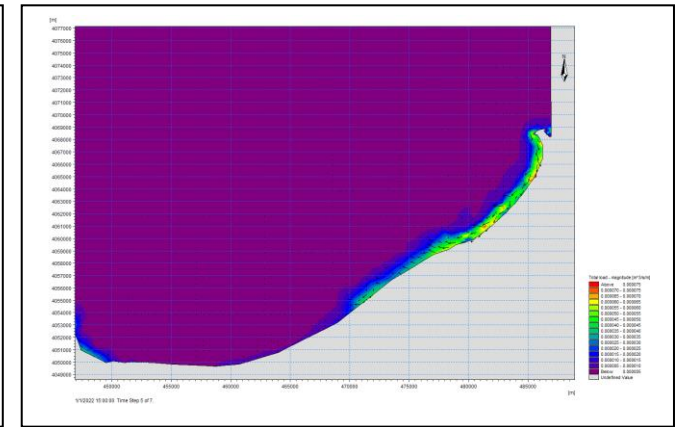
Figure IV. 12 : simulation des modèles direction NE45° pour une période de retour annuelle



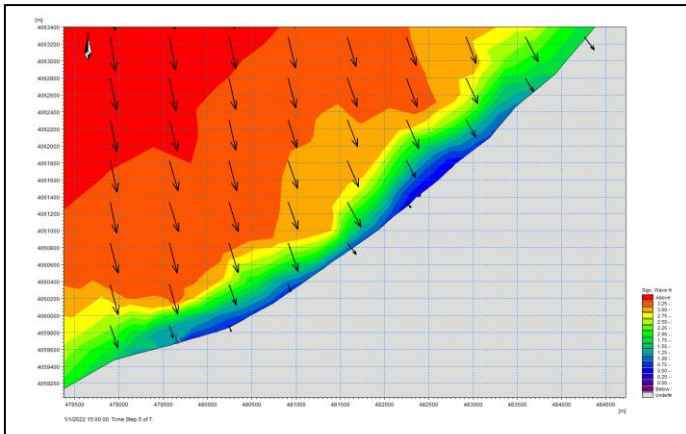
Champ des houles dans la baie de Bou Ismail N 360°



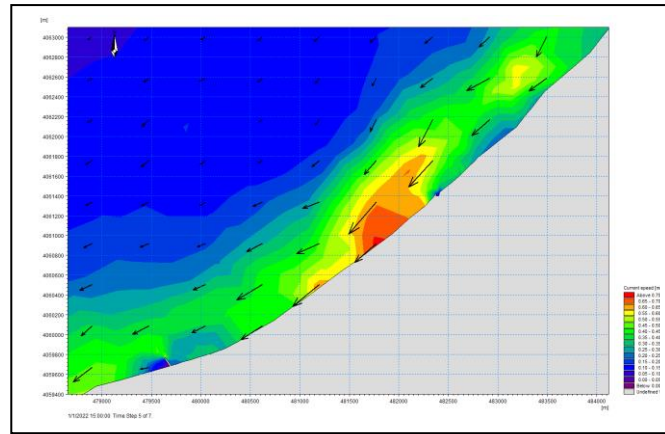
Champ des courants dans la baie de Bou Ismail N 360°



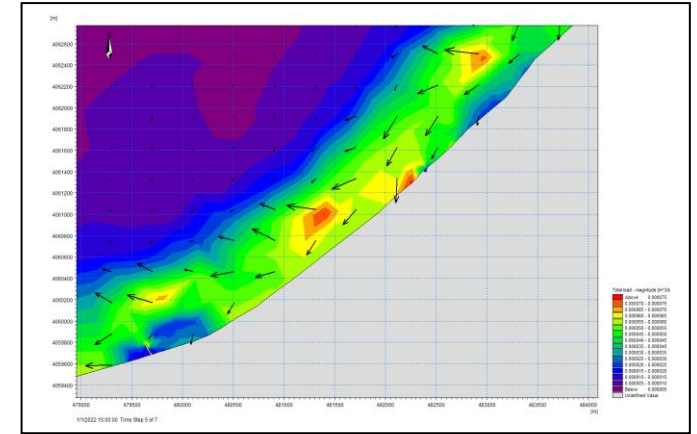
Dynamique sédimentaire dans la baie de Bou Ismail N 360°



Champ des houles dans la zone d'étude N 360°

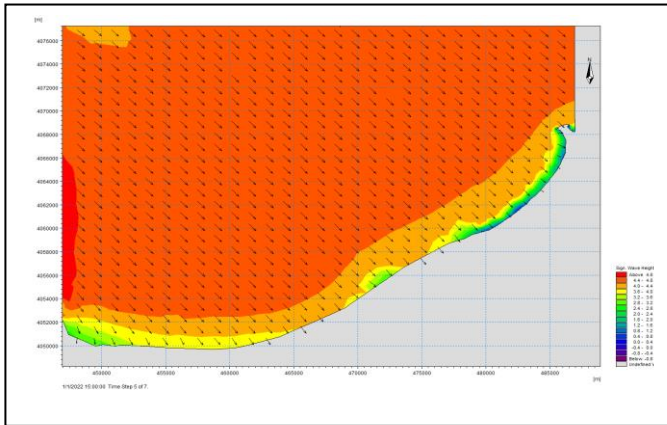


Champ des courants dans la zone d'étude N 360°

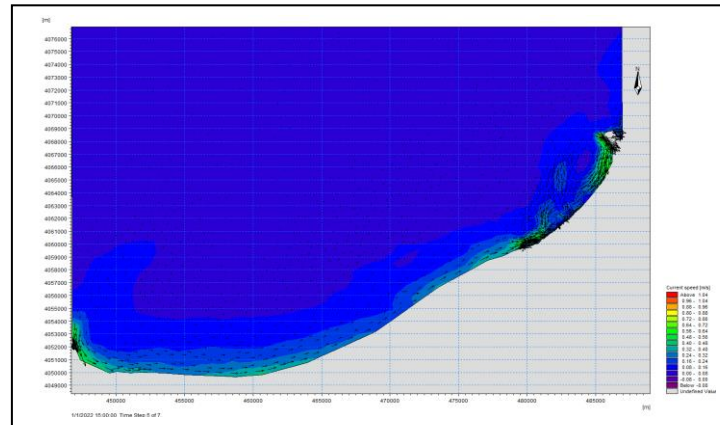


Dynamique sédimentaire dans la zone d'étude N 360°

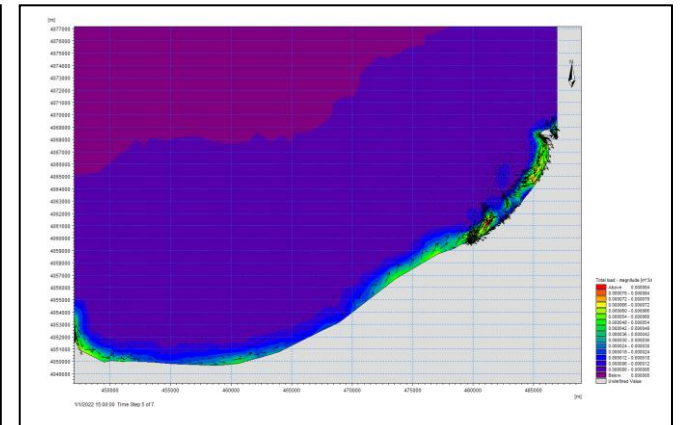
Figure IV. 13 : simulation des modèles direction N 360° pour une période de retour annuelle



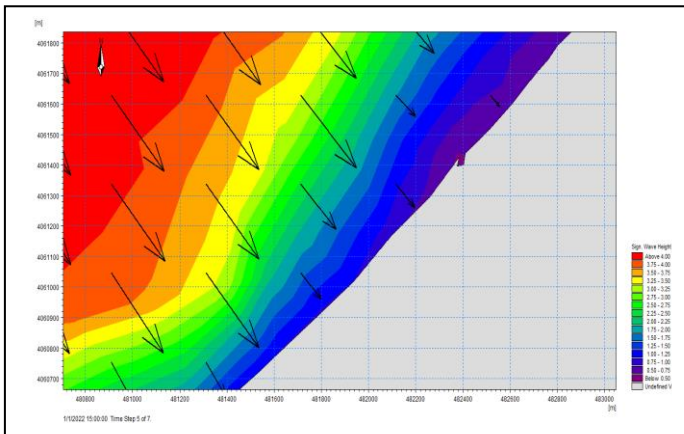
Champ des houles dans la baie de Bou Ismail NW 315°



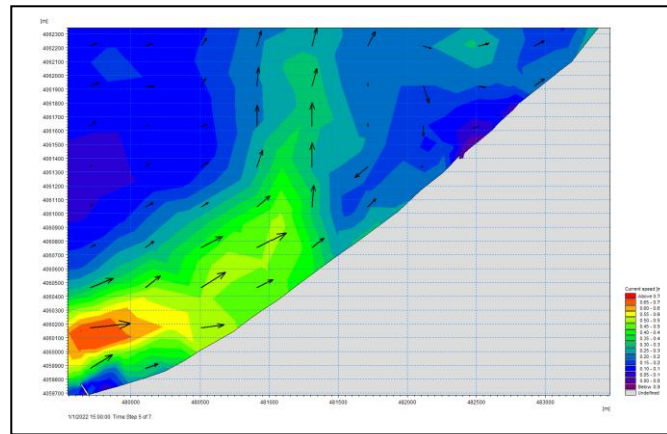
Champ des courants dans la baie de Bou Ismail NW 315°



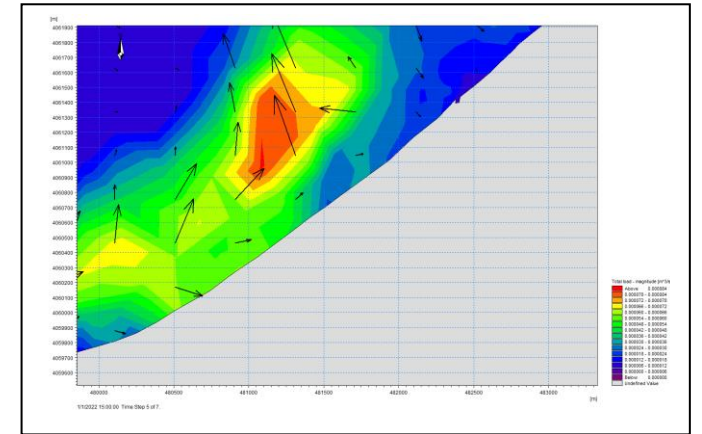
Dynamique sédimentaire dans la baie de Bou Ismail NW 315°



Champ des houles dans la zone d'étude NW 315°

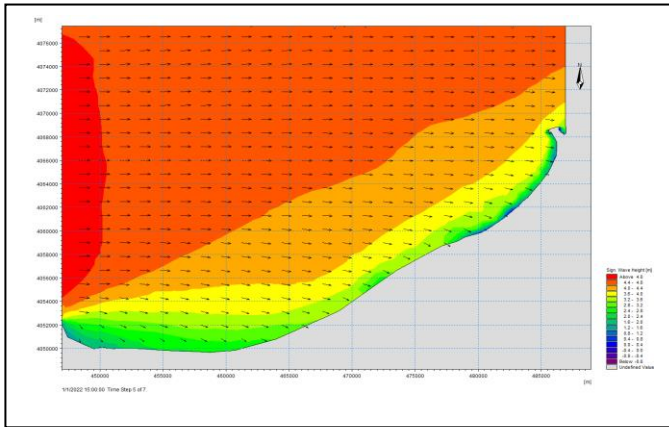


Champ des courants dans la zone d'étude NW 315°

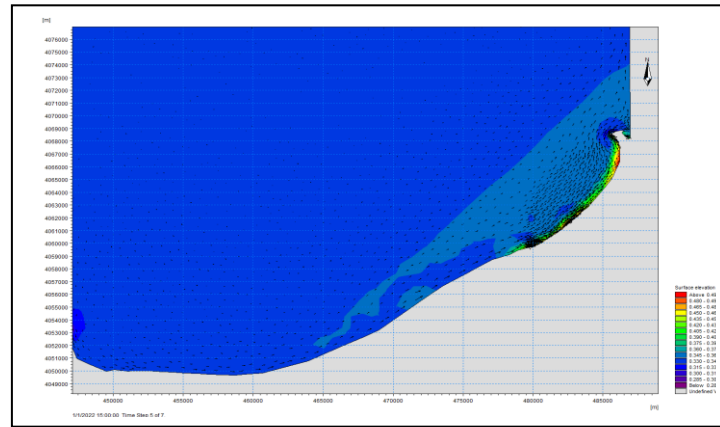


Dynamique sédimentaire dans la zone d'étude NW 315°

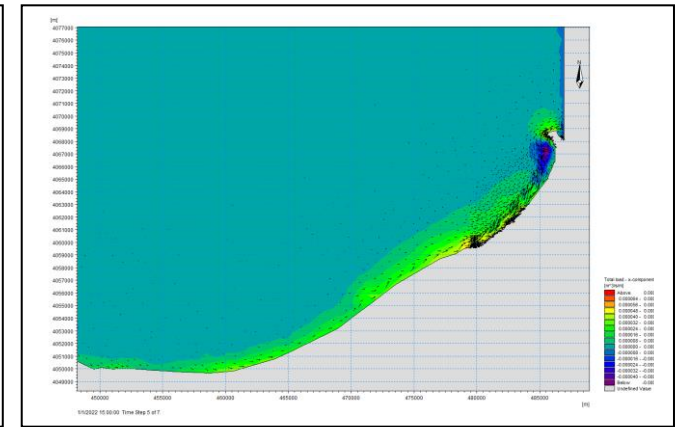
Figure IV. 14 : simulation des modèles direction NW 315° pour une période de retour annuelle



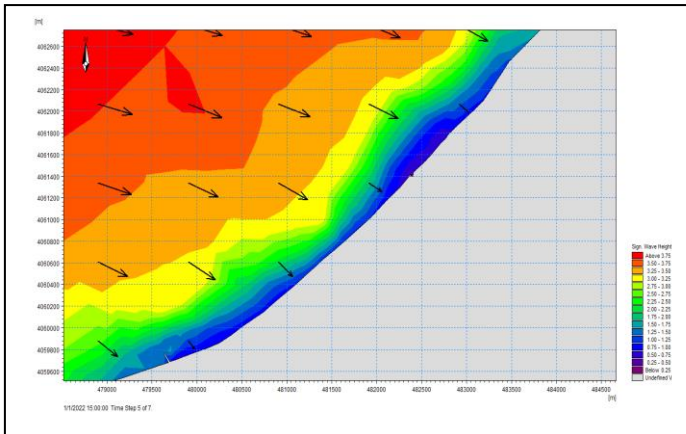
Champ des houles dans la baie de Bou Ismail W 270°



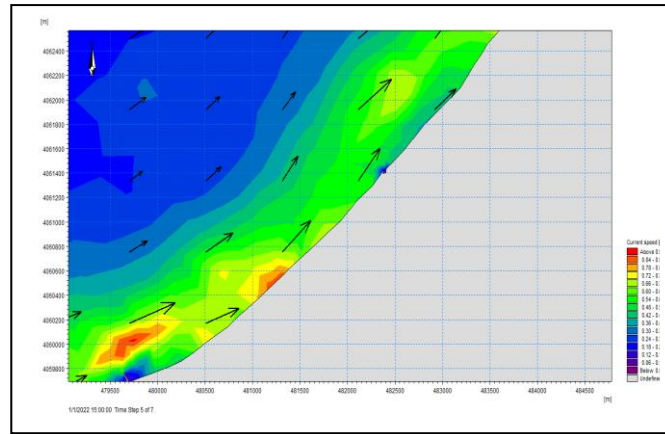
Champ des courants dans la baie de Bou Ismail W 270°



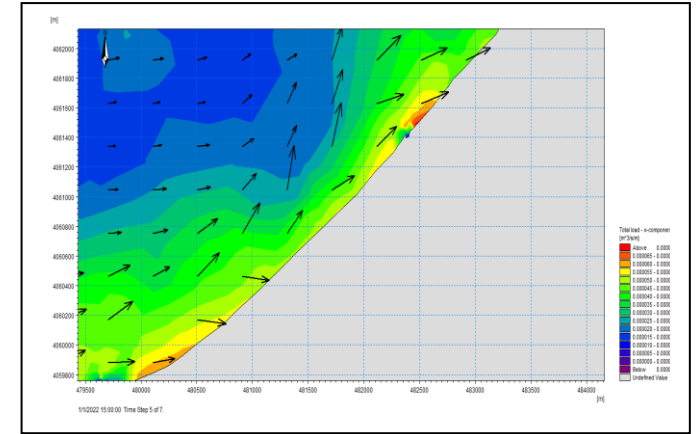
Dynamique sédimentaire dans la baie de Bou Ismail W 270°



Champ des houles dans la zone d'étude W 270°



Champ des courants dans la zone d'étude W 270°



Dynamique sédimentaire dans la zone d'étude W 270°

Figure IV. 15 : simulation des modèles direction W 270° pour une période de retour annuelle

b. Période de retour décennale

Pour une telle période, la même hauteur significative des vagues au large est considérée ($H_s=6.07\text{m}$) qui se propage du large vers la cote, en arrivant vers la cote, ces houles rencontrent le fond et commencent à diminuer.

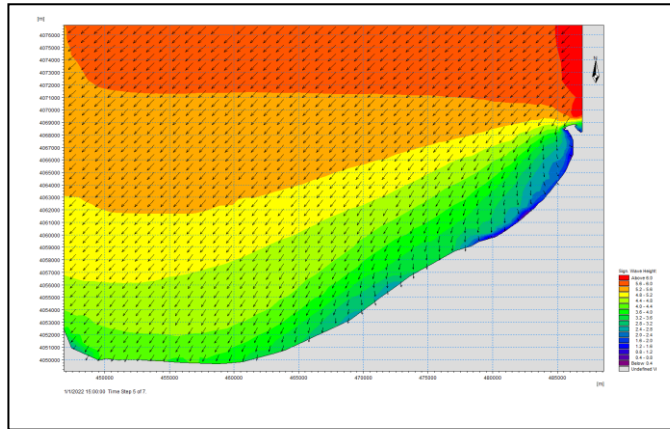
Pour la direction **Nord-Est**, la hauteur significative au niveau de notre zone d'étude atteint 0.77m dans la plage Khelloufi et 1.02m pour celle de colonel Abbes, on remarque qu'elles sont importantes par rapport à une période de retour annuelle. La propagation de ces houles entraîne un courant parallèle à la cote avec une valeur de 0.72m/s avec un transport sédimentaire de $2684.45\text{m}^3/\text{an}$ et de $3904.645\text{m}^3/\text{an}$.

La direction **Nord** montre des valeurs plus importantes par rapport à une période de retour annuelle, les houles se propagent vers la cote pour atteindre 0.73m au niveau de la plage Khelloufi, la hauteur de la houle dans la plage Colonel Abbes est de 1.0m , le courant littoral atteint donc une vitesse de 0.67m/s avec un transport sédimentaire de $2023.65\text{m}^3/\text{an}$ dans la plage Khelloufi et $4000\text{m}^3/\text{an}$. Dans la plage Colonel Abbes.

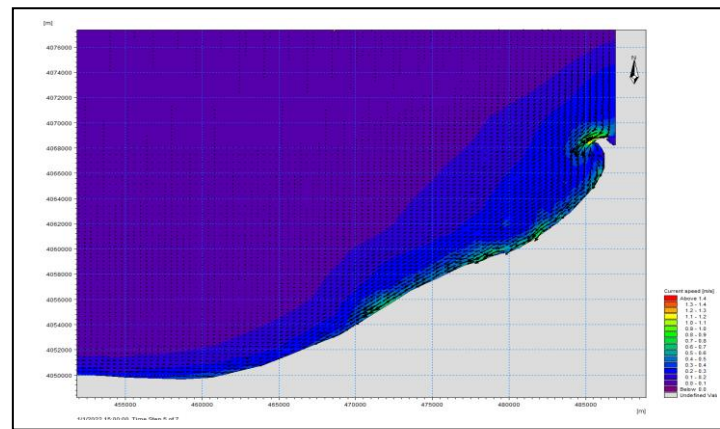
On remarque que dans la direction **Nord-Ouest**, l'effet érosif est plus accentué pour cette période de retour, vu que les houles arrivent vers la cote de manière presque perpendiculaire.

Au niveau des deux plages, la direction **Ouest** a un angle d'incidence plus important par rapport au secteur Nord-Ouest, la hauteur significative de la houle est de 0.65m à Khelloufi et 0.86m à Colonel Abbes Pour entraîner finalement un courant de dérive d'une vitesse de 0.68m/s avec un transport sédimentaire de $1854.46\text{m}^3/\text{an}$.

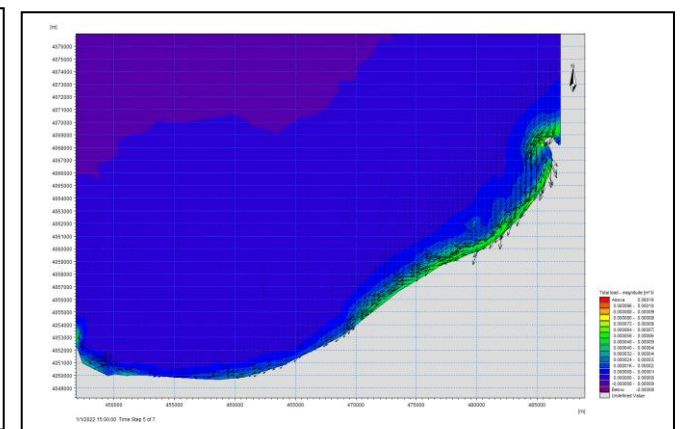
En se basant sur ces valeurs obtenues grâce à la simulation des modèles SW, HD et ST, la période de retour décennale a un impact important pour le transport sédimentaire longitudinal par rapport à une période de retour annuelle, l'angle d'incidence joue un rôle dans l'érosion et l'accumulation du trait de côte.



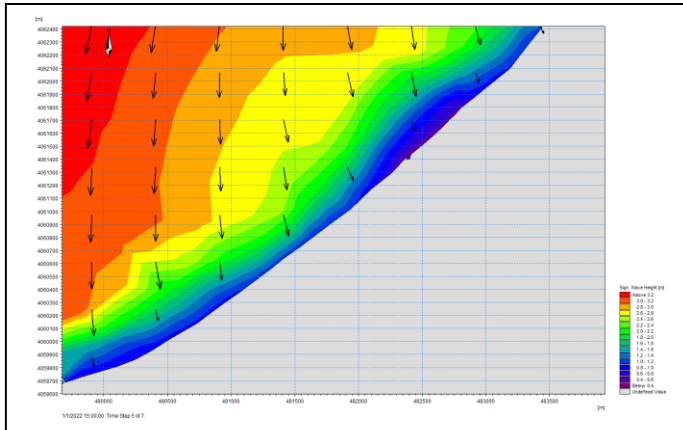
Champ des houles dans la baie de Bou Ismail NE 45°



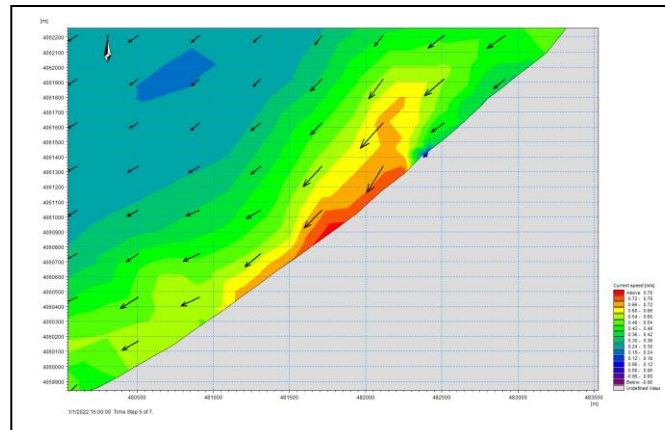
Champ des courants dans la baie de Bou Ismail NE 45°



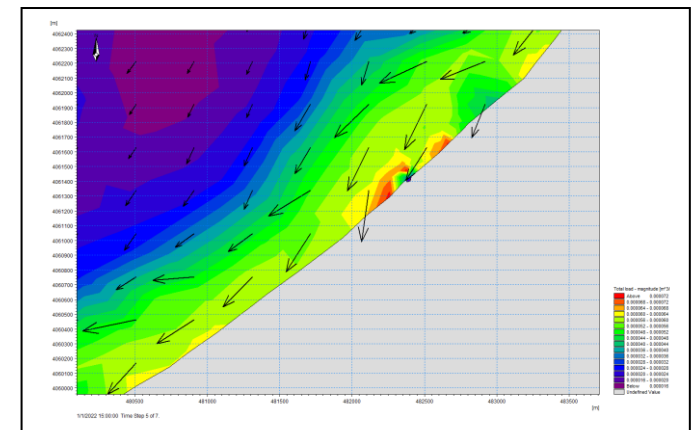
Dynamique sédimentaire dans la baie de Bou Ismail NE 45°



Champ des houles dans la zone d'étude NE 45°

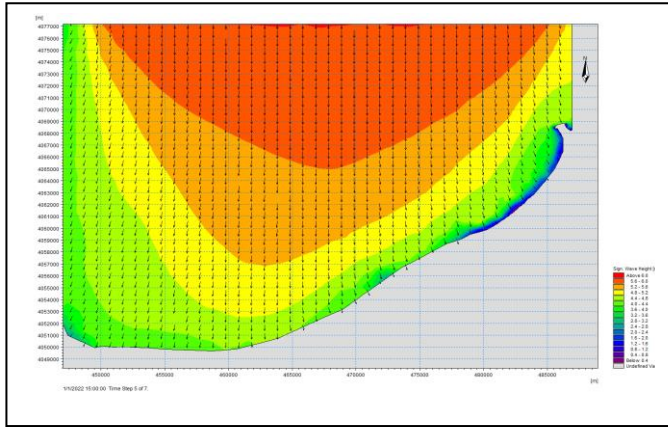


Champ des courants dans la zone d'étude NE 45°

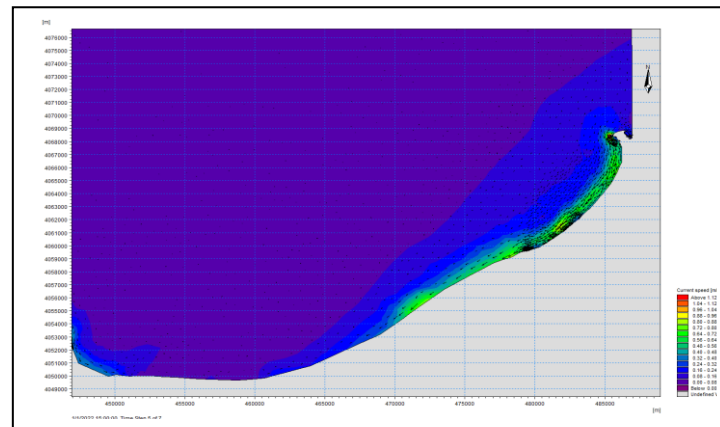


Dynamique sédimentaire dans la zone d'étude NE 45°

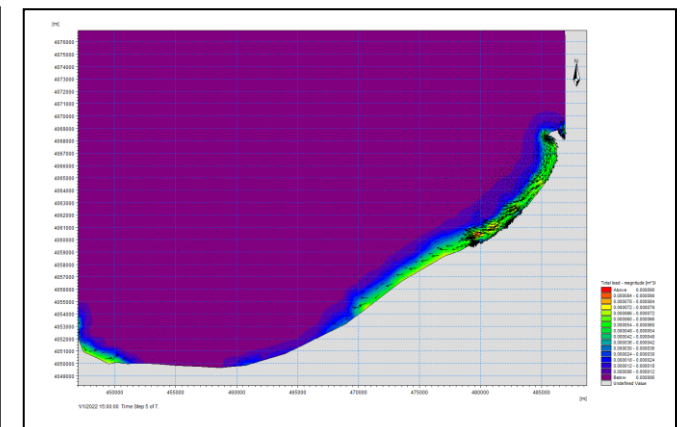
Figure IV. 16 : simulation des modèles direction NE 45° pour une période de retour décennale



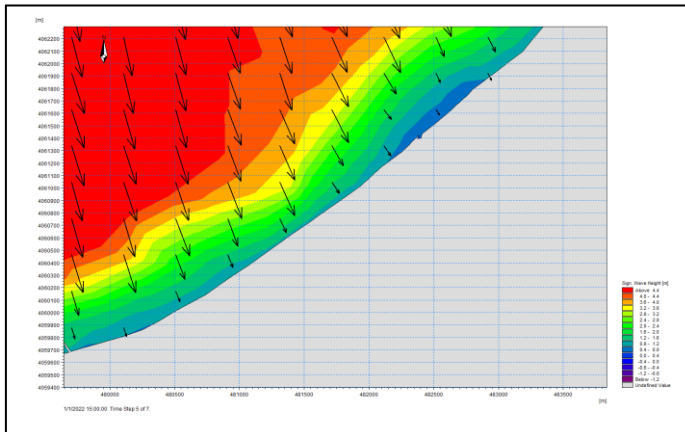
Champ des houles dans la baie de Bou Ismail N 360°



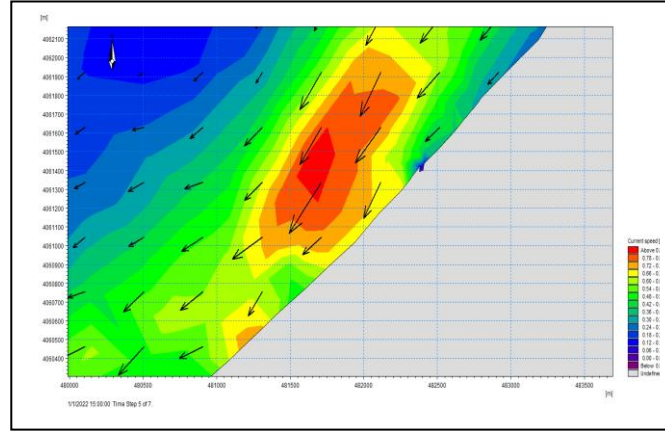
Champ des courants dans la baie de Bou Ismail N 360°



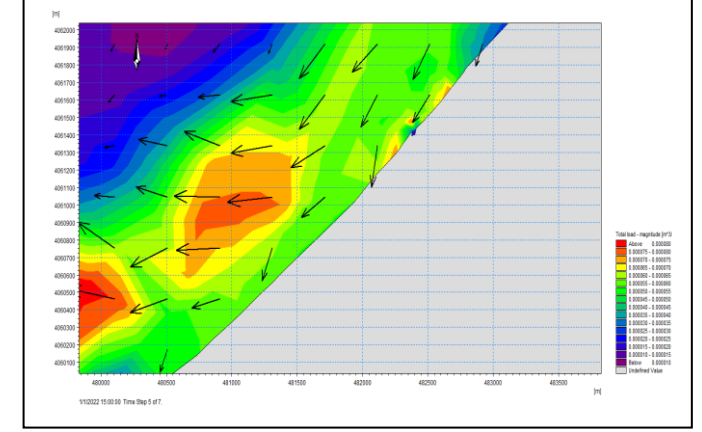
Dynamique sédimentaire dans la baie de Bou Ismail N 360°



Champ des houles dans la zone d'étude N 360°

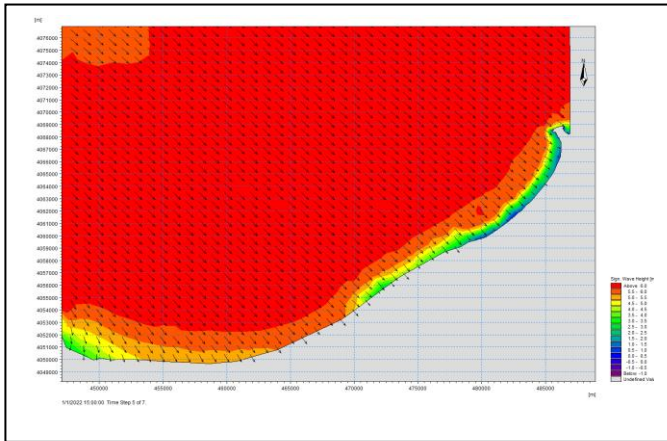


Champ des courants dans la zone d'étude N 360°

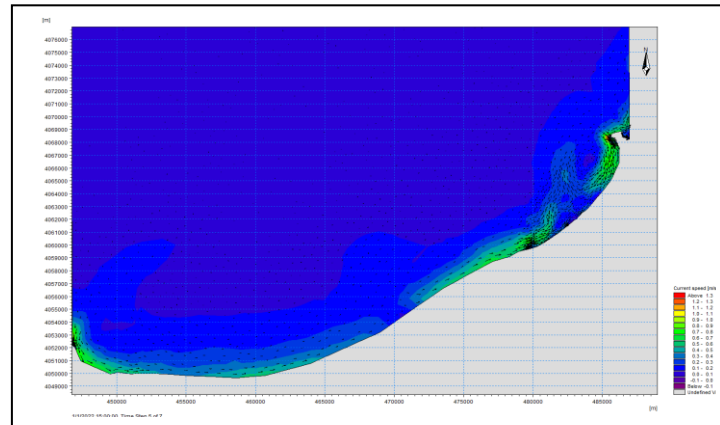


Dynamique sédimentaire dans la zone d'étude N 360°

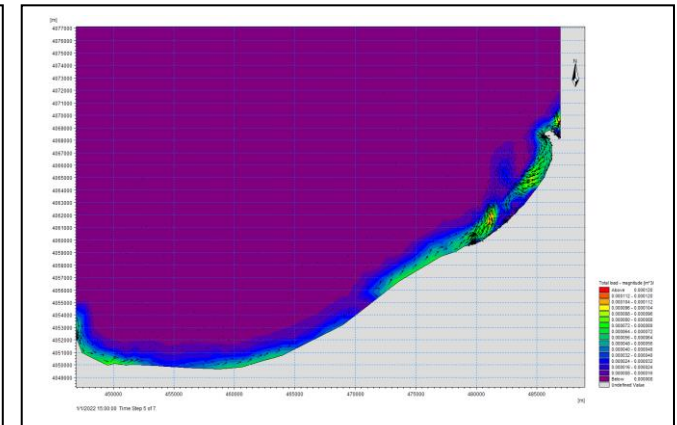
Figure IV. 17 : simulation des modèles direction N 360° pour une période de retour décennale



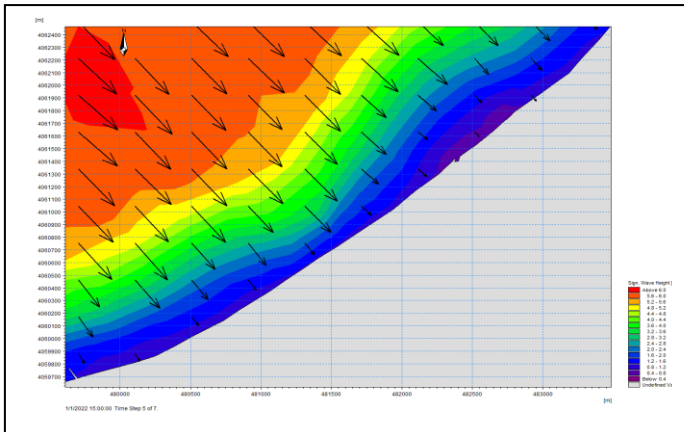
Champ des houles dans la baie de Bou Ismail
NW 315°



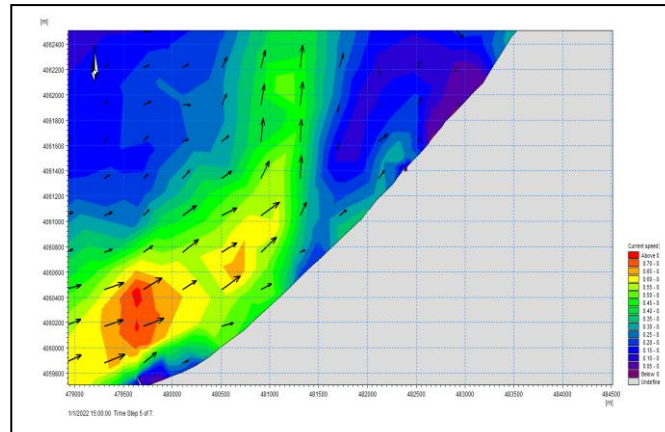
Champ des courants dans la baie de Bou Ismail NW 315°



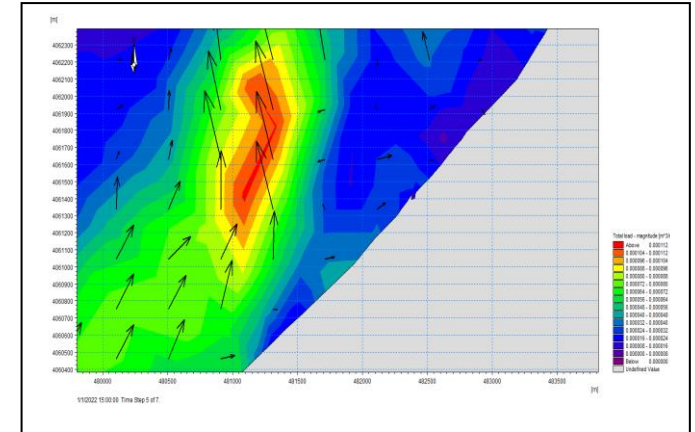
Dynamique sédimentaire dans la baie de Bou Ismail NW 315°



Champ des houles dans la zone d'étude NW 315°

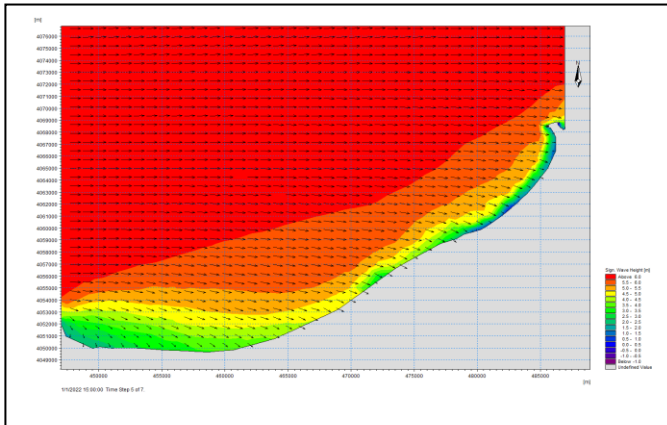


Champ des courants dans la zone d'étude NW 315°

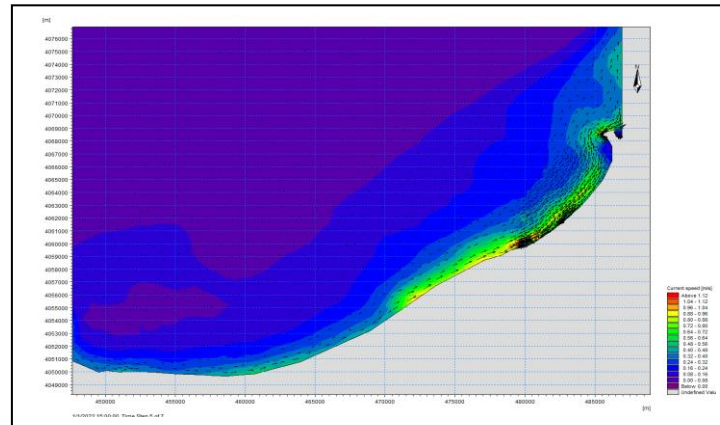


Dynamique sédimentaire dans la zone d'étude NW 315°

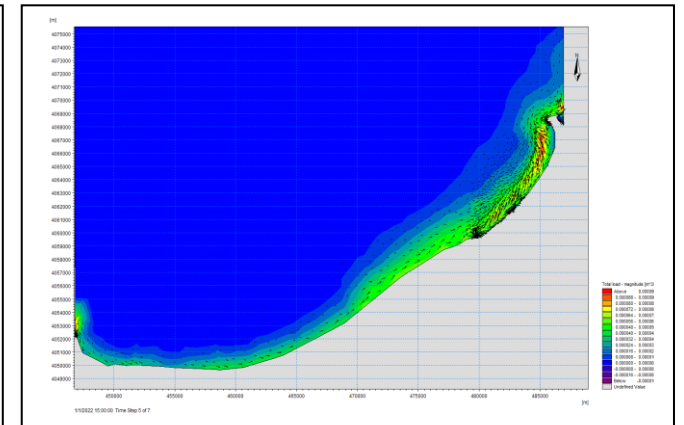
Figure IV. 18 : simulation des modèles direction NW 315° pour une période de retour décennale



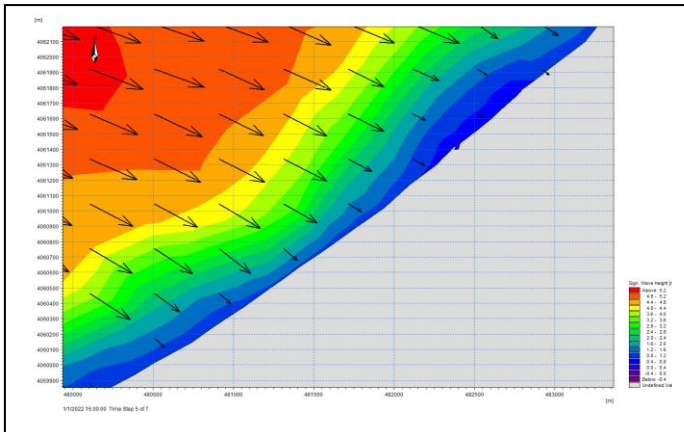
Champ des houles dans la baie de Bou Ismail W 270°



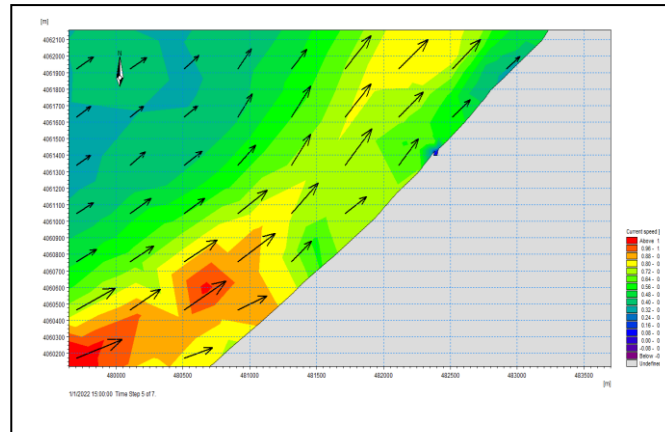
Champ des courants dans la baie de Bou Ismail W 270°



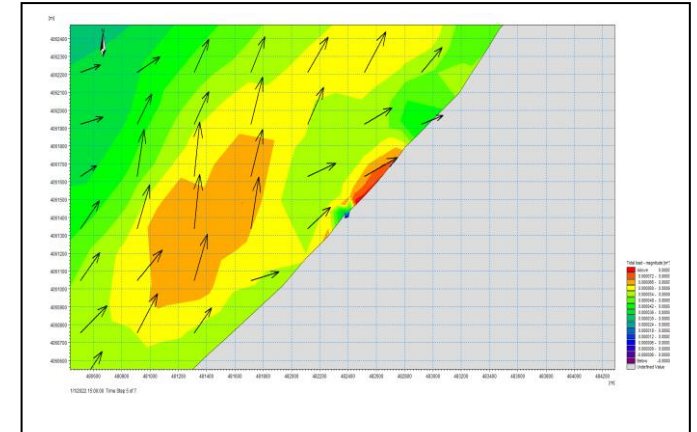
Dynamique sédimentaire dans la baie de Bou Ismail W 270°



Champ des houles dans la zone d'étude W 270°



Champ des courants dans la zone d'étude W 270°



Dynamique sédimentaire dans la zone d'étude W 270°

Figure IV. 19 : simulation des modèles direction W 270° pour une période de retour décennale

c. Période de retour centennale

Cette période est caractérisée par une hauteur significative élevée ($H_s=7.03$ m) au large de la baie de Bou Ismail, la **figure IV.20**, **figure IV.21**, **figure IV.22** et **figure IV.23** montre les différentes simulations pour chaque direction.

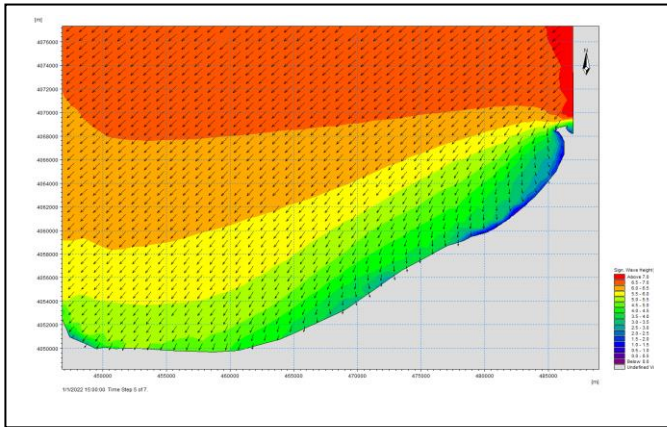
Pour la direction **Nord-Est**, les houles commencent à ressentir le fond en arrivant vers la cote, malgré la présence du Cap qui peut freiner la propagation des houles, leurs hauteurs diminuent jusqu'à ce qu'elles atteignent 0.87 m dans la plage Khelloufi et 1.08 m dans la plage Colonel Abbas. La vitesse du courant de dérive est donc de 0.75 m/s avec un transport sédimentaire de 3454 m³/an au niveau de la plage Khelloufi, et pourrait atteindre 4304.645 m³/an dans la plage Colonel Abbas, il est souligné que cette direction favorise énormément le transport longitudinal de l'Est vers l'Ouest de la cote.

Les houles pour la direction **Nord** arrivent vers la zone d'étude avec une valeur de 0.76 m dans la plage Khelloufi et 1.07 m dans l'autre plage. On remarque également que le courant de dérive est très élevé par rapport aux deux périodes de retour précédentes (0.75 m/s), le transport sédimentaire atteint donc 2605.54 m³/an dans la plage Khelloufi et 4803.65 m³/an dans la plage Colonel Abbas.

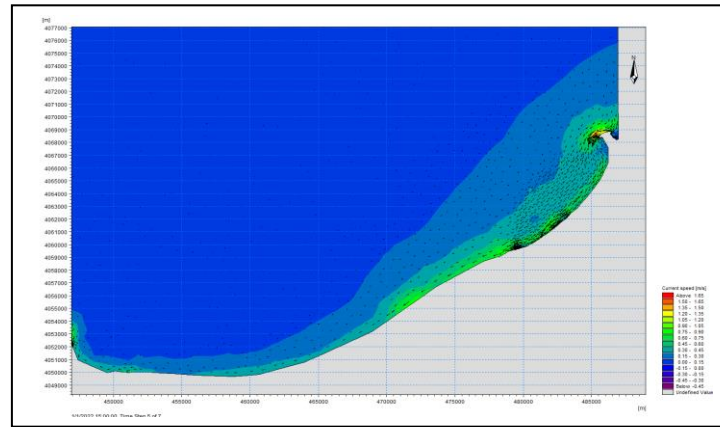
La propagation des houles de secteur **Nord-Ouest** est presque perpendiculaire de la cote atteignant les 0.79 m à 0.94 m en allant de Khelloufi vers Colonel Abbas, le transport sédimentaire longitudinal est faible dû à l'angle d'incidence des houles, la période de retour centennale montre que dans cette direction, l'érosion côtière est plus élevée qui entraîne une quantité très remarquable en particules sédimentaires vers le large.

La direction Ouest montre des hauteurs significatives près de du site d'étude atteignant, 0.72 m à Khelloufi et 1.02 m à Colonel Abbas, la vitesse du courant longitudinal est plus importante par rapport à la direction Nord-Ouest et entraîne un transport sédimentaire 2265.37 m³/an, ce secteur est moins important que celui du Nord-est et Nord car le transit sédimentaire au niveau de la baie de Bou Ismail est de secteur Est (de l'Est vers l'Ouest).

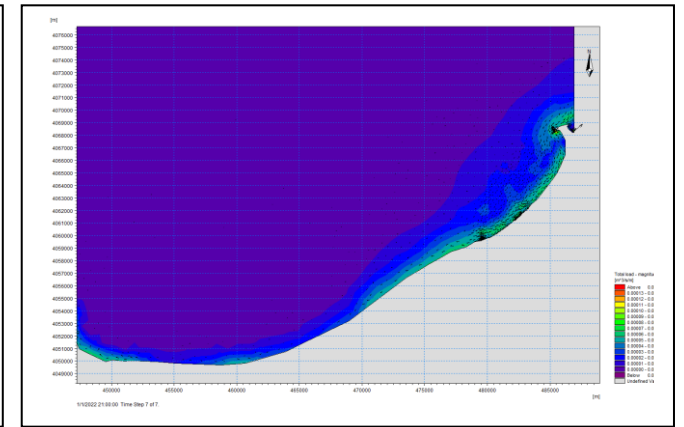
D'après les résultats de la simulation, cet évènement montre que son impact est plus intense par rapport aux périodes de retour annuelles et décennales, l'érosion est favorisée par la direction Nord-Ouest, pour une telle période, des dégâts dans la zone d'étude peuvent être considérable.



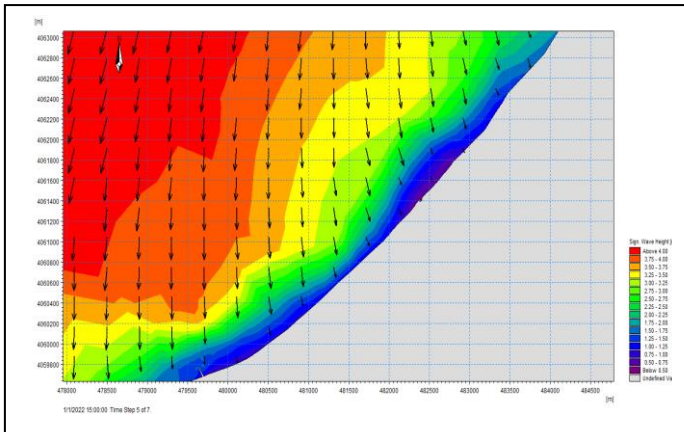
Champ des houles dans la baie de Bou Ismail NE 45°



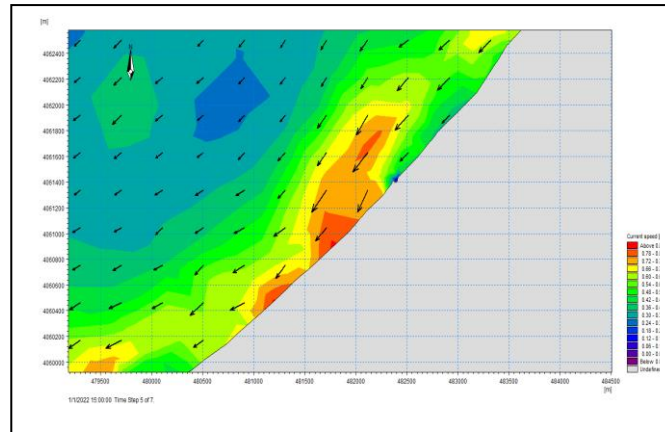
Champ des courants dans la baie de Bou Ismail NE 45°



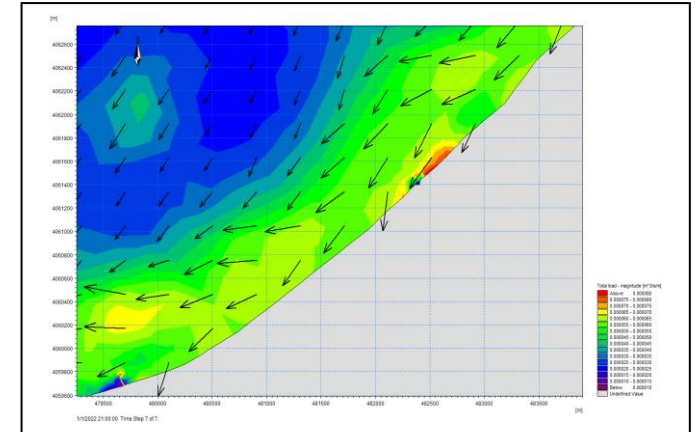
Dynamique sédimentaire dans la baie de Bou Ismail NE 45°



Champ des houles dans la zone d'étude NE 45°

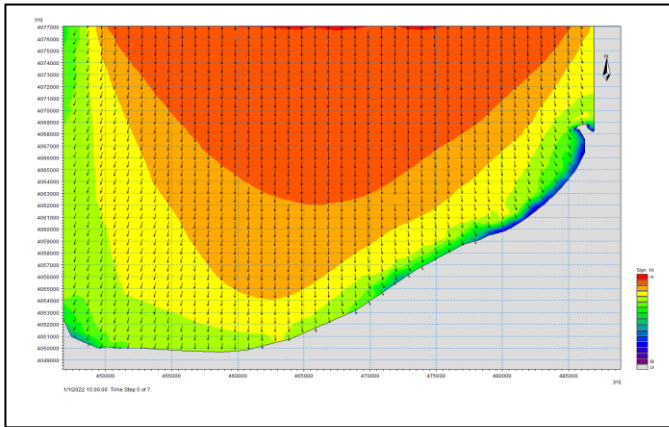


Champ des courants dans la zone d'étude NE 45°

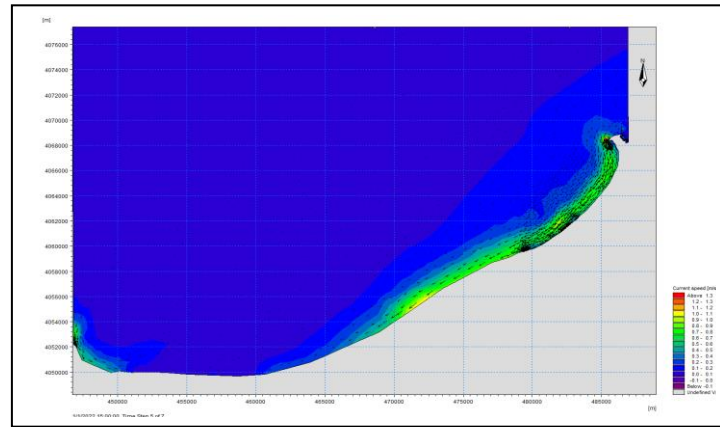


Dynamique sédimentaire dans la zone d'étude NE 45°

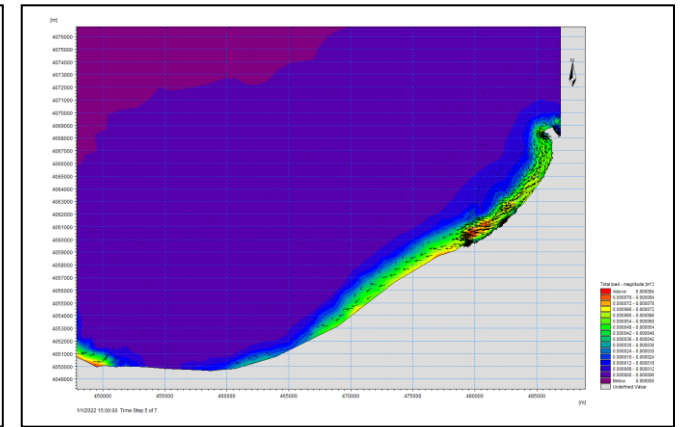
Figure IV. 20 : simulation des modèles direction NE 45° pour une période de retour centennale



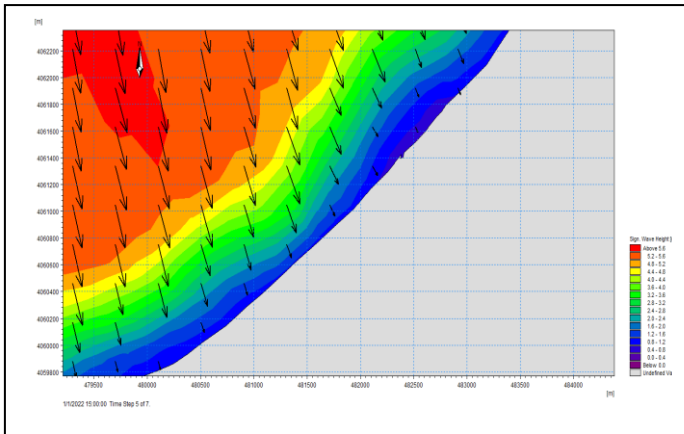
Champ des houles dans la baie de Bou Ismail N 360°



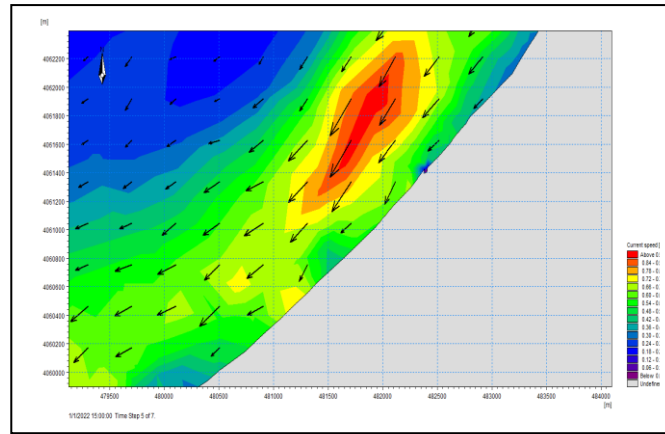
Champ des courants dans la baie de Bou Ismail N 360°



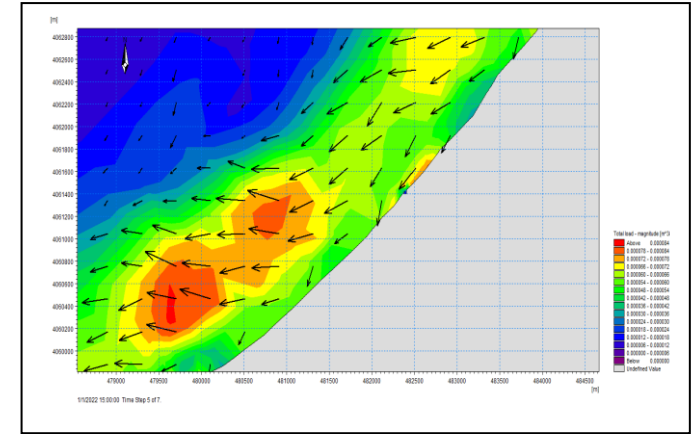
Dynamique sédimentaire dans la baie de Bou Ismail N 360°



Champ des houles dans la zone d'étude N 360°

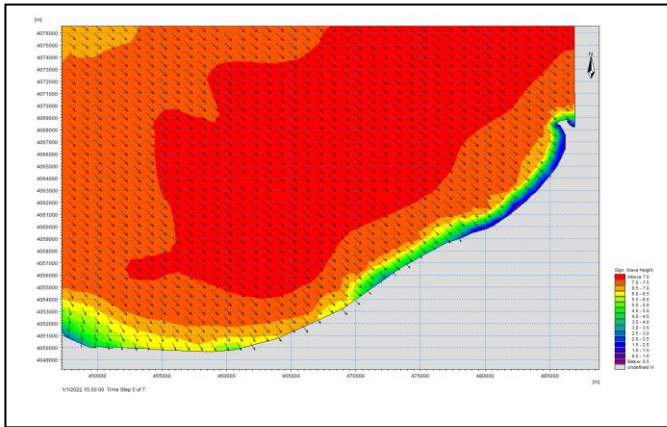


Champ des courants dans la zone d'étude N 360°

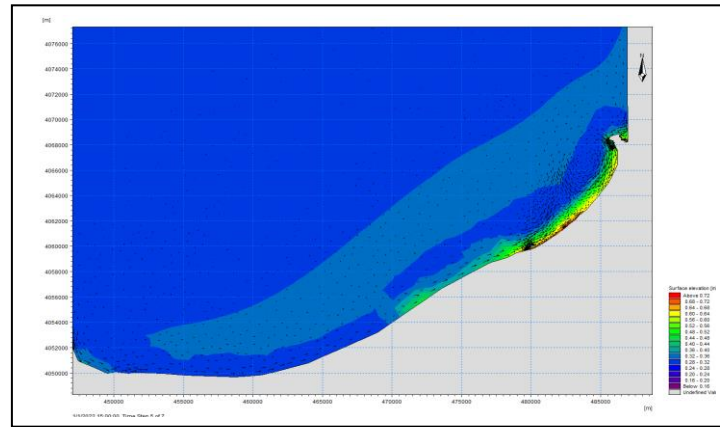


Dynamique sédimentaire dans la zone d'étude N 360°

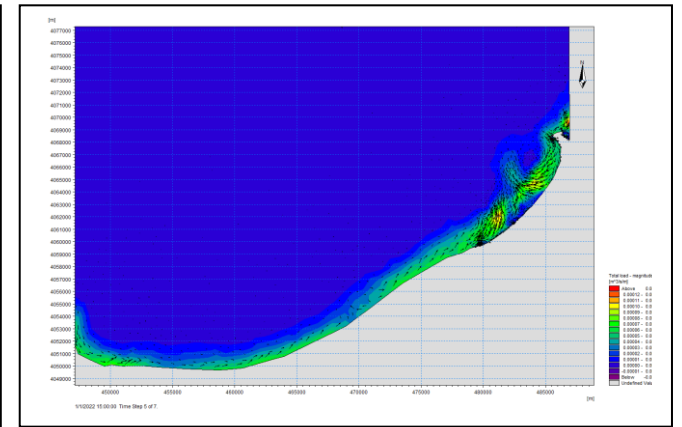
Figure IV. 21 : simulation des modèles direction N 360° pour une période de retour centennale



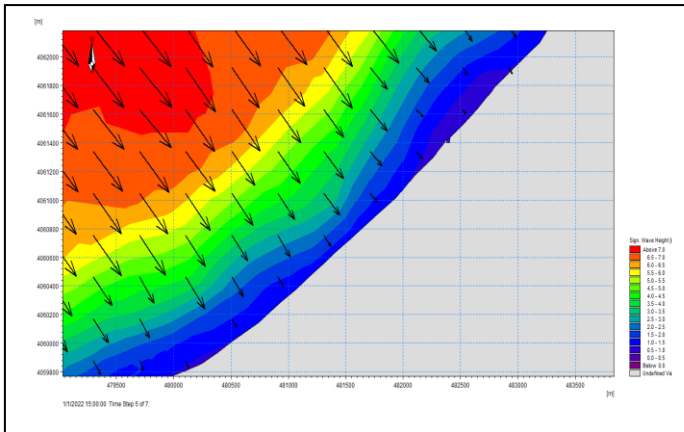
Champ des houles dans la baie de Bou Ismail NW 315°



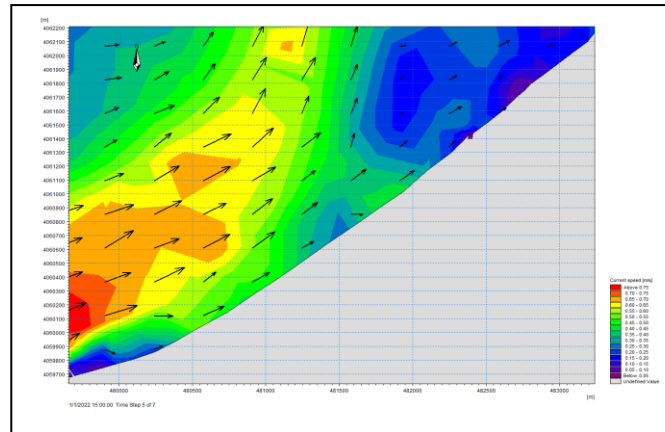
Champ des courants dans la baie de Bou Ismail NW 315°



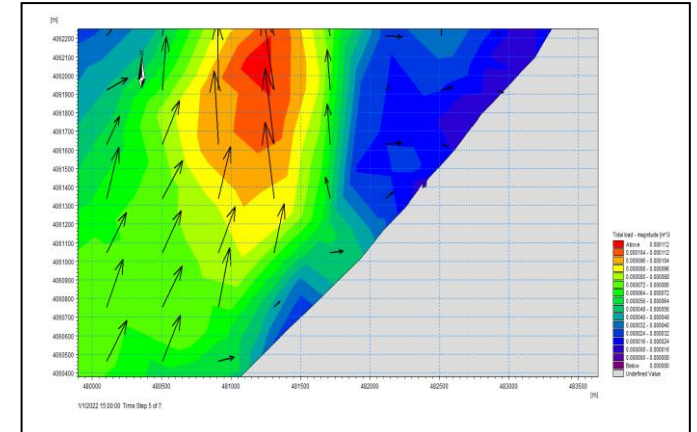
Dynamique sédimentaire dans la baie de Bou Ismail NW 315°



Champ des houles dans la zone d'étude NW 315°

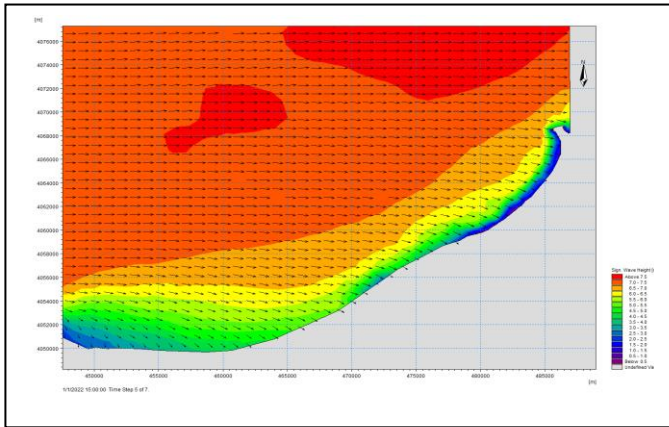


Champ des courants dans la zone d'étude NW 315°

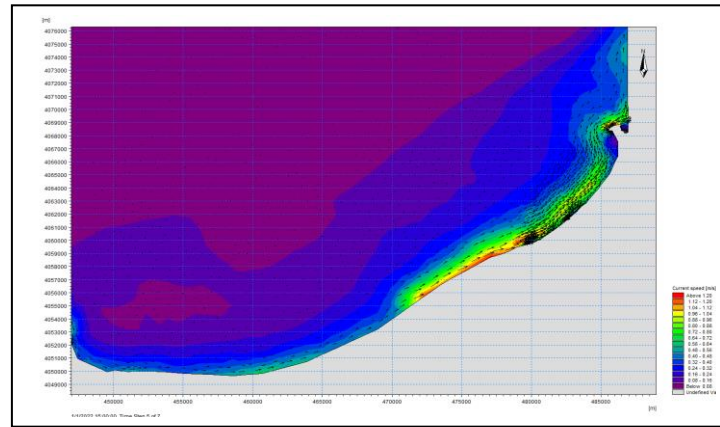


Dynamique sédimentaire dans la zone d'étude NW 315°

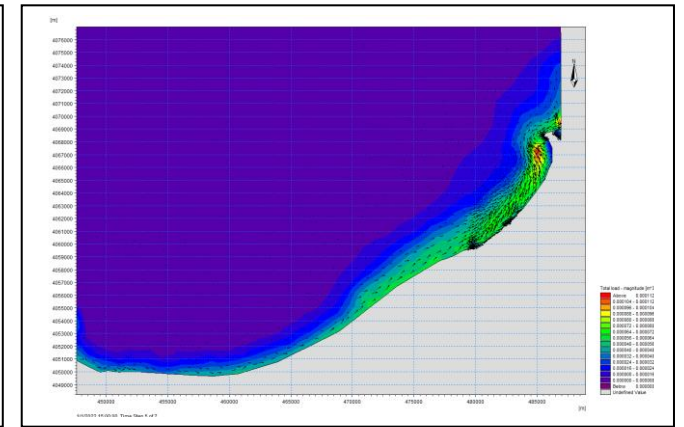
Figure IV. 22 : simulation des modèles direction NW 315° pour une période de retour centennale



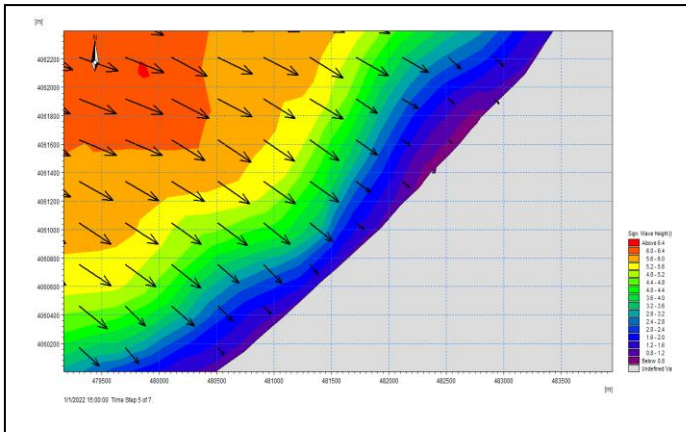
Champ des houles dans la baie de Bou Ismail W 270°



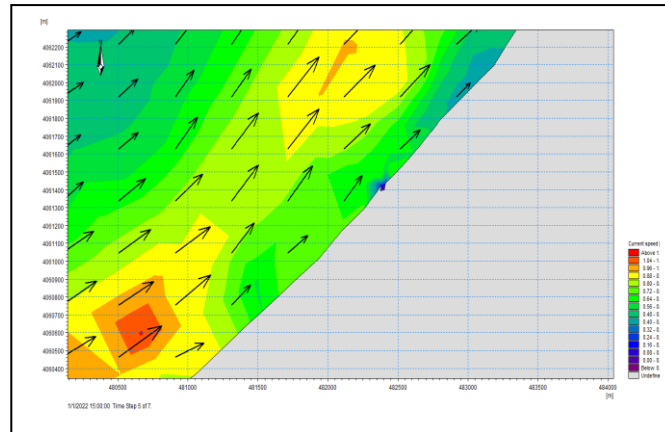
Champ des courants dans la baie de Bou Ismail W 270°



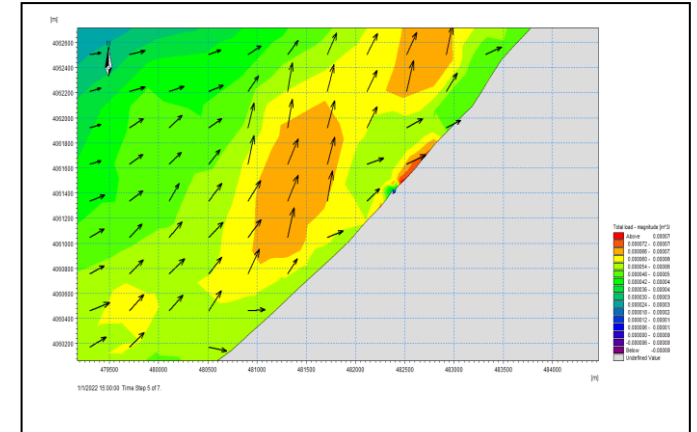
Dynamique sédimentaire dans la baie de Bou Ismail W 270°



Champ des houles dans la zone d'étude W 270°



Champ des courants dans la zone d'étude W 270°



Dynamique sédimentaire dans la zone d'étude W 270°

Figure IV. 23 : simulation des modèles direction W 270° pour une période de retour centennale

Conclusion :

- La morphologie sous-marine et l'action du frottement influent sur la propagation de la houle.
- Les directions dominantes qui favorisent le transport sédimentaire longitudinal sont caractérisées par des angles d'incidence qui engendrent un courant de dérive par lequel les flux sédimentaires seront transportés parallèlement par rapport au rivage.
- Les résultats de la simulation numériques montrent que les hauteurs significatives au niveau de la cote augmentent en fonction des périodes extrêmes.
- Les vitesses de courant de dérive sont fortes dans les deux plages dues aux houles extrêmes qui sont obliques selon leur angle d'incidence se propageant du large vers la cote, ceci engendre un très fort transport sédimentaire longitudinal.
- La direction Nord-Ouest est considérée comme la direction la plus favorable à l'érosion des deux plages qui conduit à l'entraînement des sédiments vers le large, ce processus est accentué également par l'oued Mazafran qui transporte des débits solides de manière importante lors des conditions hydrodynamiques extrêmes.

CHAPITRE V

Quantification du transit sédimentaire longitudinal

V Introduction

Comprendre la dérive littorale est le facteur clé dans le suivi de l'évolution du trait de côte et budgets sédimentaires de toute région côtière. Son importance réside dans le fait que la rupture de tout transport sédimentaire littoral engendre un phénomène d'érosion sur la cote (Galvin, 1990).

La quantification du transport sédimentaire littoral a été abordée par plusieurs auteurs, qui proposent diverses formules de calcul du transit au niveau de la zone de déferlement sous l'effet combiné de houle-courant, Ces formules sont issues de travaux en laboratoire sur un modèle physique réduit, qui ne tient en compte que des houles propageant au même sens du courant ou dans une direction diamétralement opposée. La quantification de ce transit sédimentaire sous l'interaction entre le courant et la houle reste un phénomène non linéaire et très difficile à quantifier (Khelifi M., 2014).

Notre étude consiste à estimer le taux moyen du transit sédimentaire le long des plages sableuses de notre site d'étude (Plage Khelloufi et Colonel Abbes) et comment ce taux est influencé par les différentes périodes extrêmes (Annuelles, décennales et centennales).

V.1 Agents du transport sédimentaire :

Trois (03) agents de transport à prendre en compte sont : la houle, les courants et les vents (Khelifi M., 2014) :

- La houle est le facteur essentiel agissant sur les mouvements sédimentaires de la zone sédimentaire « active ».
- Les courants ne sont à prendre en compte que dans les zones de déferlement.
- Le vent joue un rôle fondamental dans les mouvements des sables de l'estran (haut estran) et bien sûr dans des dunes littorales.

V.2 Conditions du déferlement

Pour localiser le point de déferlement, deux hypothèses sont émises :

- La vague déferlante est la plus haute possible.
- Le déferlement survient quand la vitesse orbitale maximale des particules d'eau est égale à la célérité de la vague (limite des tensions superficielles).

a) Hauteur de la vague au point de déferlement H_b

L'amplitude du déferlement H_b est la différence entre la cote maximale et minimale de la position de déferlement au cours d'une période. Nous avons déduit la hauteur de la houle au déferlement par les résultats de la simulation, à partir de la profondeur du déferlement calculée par l'équation de Van Rijn, 1990/2011 (voir l'équation 6.5).

La hauteur au point de déferlement H_b peut être calculées par différentes formules empiriques (Miche (1944). Batjes, & Jenssen (1978). Goda (1970), In Khelfani D., 2014).

b) Indice de déferlement

En 1880, **G.G Stokes** a montré que la crête de la vague la plus haute présente un angle de 120° . Pour une vague en eau profonde, cette valeur angulaire correspond à une valeur théorique maximale de la cambrure (H_0/λ_0) estimée par (**J.H Michell., 1893**) à 14% :

$$(6.1) \quad \left[\frac{H_0}{\lambda_0} \right]_{max} = 0.142$$

- H_0 : la hauteur crête à creux
- λ_0 : la longueur d'onde de la vague

En profondeur limitée, **Miche, R. (1951)** a proposé une expression de la cambrure maximale de la houle au déferlement qui dépend de la profondeur relative (d_B/λ_B) :

$$(6.2) \quad \left[\frac{Hb}{\lambda b} \right] = 0.142 \operatorname{th} \left(2\pi \frac{db}{\lambda b} \right)$$

En très faible profondeur relative, la hauteur maximale des vagues déferlantes est contrôlée uniquement par la profondeur. La hauteur relative Hb/db , obtenu par le passage à la limite devient un critère pour localiser le point de déferlement. La formule de Miche conduit à la valeur limite de la hauteur relative (**Bougis. J., 2011**) :

$$(6.3) \quad \left[\frac{Hb}{db} \right]_{max} = 0.892$$

c) Paramètre de déferlement

Les conditions de déferlement sont ainsi estimées à partir du paramètre d'Iribaren-Battjes défini comme le rapport de la pente de la plage et la racine carrée de la cambrure de la houle :

$$(6.4) \quad \xi_0 = \frac{\tan\beta}{\sqrt{H_0/\lambda_0}} \quad \text{et} \quad \xi_B = \frac{\tan\beta}{\sqrt{HB/\lambda_0}}$$

Le paramètre ξ_0 est le paramètre initial en eau profonde, tandis que le paramètre ξ_B est le paramètre au point de déferlement.

d) Profondeur de déferlement d_b :

La profondeur de déferlement d_b peut être prise égale à :

- d_t : Profondeur sous le creux.
- d_m : Profondeur sous le niveau moyen d'eau.
- d_s : Profondeur sous le niveau de l'eau au repos.

En supposant une cote rectiligne uniforme avec des contours de profondeur parallèles, la profondeur de l'eau à la ligne de déferlement (emplacement où 5% des vagues déferlent) peut être estimée à partir de (**Van Rijn, 2011**) :

$$(6.5) \quad d_b = \left[\left(\frac{H_{s,0}^2 * C_0 * \cos \theta_0}{a * y^2 * g^{0.5}} \right)^{0.4} \right]$$

L'angle d'incidence des vagues au niveau de la zone de déferlement (θ_b) peut être déterminé à partir de :

$$(6.5.a) \quad \sin \theta_b = \left(\frac{C_b}{C_0} \right) \sin \theta_0$$

Avec :

d_b : Profondeur au point de déferlement

$H_{s,0}$: Hauteur significative des vagues en eaux profondes

C_0 : Vitesse de propagation des vagues en eau profonde $C_0 = \lambda_0 / T_0$

λ_0 : longueur d'onde en eau profonde

y : indice de déferlement $y = \frac{H_b}{d_b}$

e) La pente des plages β :

La pente β est un paramètre très important pour certaines formules empiriques de calcul du débit du transit littoral, elle est le rapport entre la profondeur du point de déferlement en mètre et la distance entre le trait de côte et cette profondeur. Nous avons choisi de prendre ce rapport car le domaine de validité des formules empiriques de quantification du transport sédimentaire longitudinal est seulement dans la zone de surf, au-delà de cette zone, il est improbable d'avoir un calcul valide.

La formule de (**Van Rijn, 2011**) nous a permis d'obtenir les pentes des deux plages, une fois le d_b obtenu, une projection sur les cartes bathymétriques déjà établies en se basant sur les résultats obtenus lors de la sortie sur terrain créées dans le chapitre précédent afin d'obtenir les coordonnées métriques du point de déferlement ainsi que sa distance entre le trait de côte et la profondeur du déferlement.

Le choix de la détermination de D qui la distance entre le trait de côte et la profondeur du point de déferlement car les équations de quantification du transport sédimentaire longitudinal

Tableau V. 1 : calculs de la pente des plages de la zone d'étude pour une houle extrême annuelle ($H_s = 4.75$)

	$X(m)$	$Y(m)$	$D(m)$	$d_b(m)$	$\text{tang } \beta$
<i>Plage Khelloufi</i>	482694.84543	4061751.213974	17.68	0.53 m	0.03
<i>Plage Colonel Abbas</i>	482007.114879	4061129.365145	14.60	1.35 m	0.09

Tableau V. 2 : calculs de la pente des plages de la zone d'étude pour une houle extrême décennale ($H_s = 6.07$)

	$X(m)$	$Y(m)$	$D(m)$	$d_b(m)$	$\text{tang } \beta$
<i>Plage Khelloufi</i>	482694.84543	4061756.213974	22.59	0.68 m	0.03
<i>Plage Colonel Abbas</i>	482007.114879	4061130.365145	18.67	1.68 m	0.09

Tableau V. 3 : calculs de la pente des plages de la zone d'étude pour une houle extrême centennale ($H_s = 7.03$)

	$X(m)$	$Y(m)$	$D(m)$	$d_b(m)$	$\text{tang } \beta$
<i>Plage Khelloufi</i>	482694.84543	4061759.78603	26.16	0.78 m	0.03
<i>Plage Colonel Abbas</i>	482007.114879	4061133.31206	21.61	1.94 m	0.09

Avec :

- x : Coordonnées métriques (longitude)
- y : Coordonnées métriques (latitude)
- D : Distance entre le point de déferlement et le trait de cote
- d_b : profondeur au point du déferlement
- $\text{tang } \beta$: pente de la plage

V.3 Quantification du transport sédimentaire longitudinal

Dans la zone littorale, des quantités importantes de sables sont transportées sous l'action de la houle et des courants. Quand les vagues atteignent la côte et déferlent sur la plage, elles génèrent des courants côtiers qui interagissent avec les vagues incidentes pour transporter le sédiment (Masselink et al., 2006). Quand les crêtes de ces vagues forment un angle significatif

avec le trait de côte, elles induisent la formation d'un courant long shore parallèle à la côte, et restreint à la zone côtière entre la ligne de déferlement et la plage. Ce courant peut être localement modifié par l'action de courants induits par le vent ou par la marée (Van Rijn 1998). Sur des plages soumises à des houles obliques dominantes, ce mode de transport est bien souvent prépondérant. Les variations longitudinales (augmentation ou diminution) du taux de transport (long shore gradient) induisent l'existence de zones d'érosion lorsque le taux de transport augmente ou des zones d'accrétion lorsque ce dernier diminue. Modéliser ce processus est une approche couramment utilisée en géomorphologie et/ou en ingénierie côtière (Lafon et al., 2004) car elle présente l'avantage de donner une vision globale des transits sédimentaire à macro-échelles, dans le cadre des cellules hydro sédimentaires en vue d'une gestion raisonnée, ou dans des perspectives de modélisation simples d'évolution du rivage.

V.3.1 Formules empiriques pour le calcul des flux sédimentaires longitudinaux dans la zone de déferlement

V.3.1.1 La formule de CERC, Van Rijn (2006) :

L'équation inclue les deux types de modes de transport par charriage et par suspension, elle a été dérivée sur un certain nombre d'années et récemment par (Inman, D.L et Bagnold, R.A., 1963) ; (Komar, 1969) et (Komar, P.D et Inman, D.L., 1970, In Khelifani D., 2014). Les campagnes de mesures de courant, de houle et de transport sédimentaire ont laissé entrevoir que le transport littoral était proportionnel à la composante du flux d'énergie dirigée parallèlement à la côte dans la zone du surf. En s'inspirant de la relation intuitive suggérée par les mesures et utilisant la similitude des unités entre le flux d'énergie et le poids de sédiment immergé, (Komar, P.D et Inman, D.L., 1970, In Khelifani D., 2014) proposent une équation de calcul du taux de transport massique :

$$(6.6) \quad Q_t = K * \left[\frac{\rho * \sqrt{g}}{16 * \sqrt{y} (\rho_s - \rho)(1 - P)} \right] * H_b^{2.5} \sin(\theta_b)$$

On note que:

- Q_t : Sédiments transportés parallèlement à la cote (m^3/s),
- H_b : Hauteur de la houle significative au point de déferlement,
- θ_b : Angle d'incidence de la houle au point de déferlement en degré ($^\circ$),
- K : Coefficient empirique dimensionnel,
- y : Indice de déferlement (0.78) pour les plages plates et augmente plus que 1.0 selon la pente de plage (Weggel, 1972).

Diverses valeurs du coefficient empirique dimensionnel K ont été obtenues à partir des analyses de régression de différents ensembles de données qui lient le poids submergé des sédiments transportés et le flux d'énergie des vagues.

$k = 2.2$ (Caldwell, 1956) ; $k = 0.77$ (Komar, P.D et Inman, D.L., 1970) ; $k = 0.2$ (Kraus, et al. 1982) ; $k = 1.23$ (Dean, et al. 1982) ; $k = 0,39$ et 0.92 (SPM., 1984) ; $k = 0.82$ (Schoonees et Theron (1993, 1994)) ; $KSPM_{rms} = 0,92$ (Rosati, et al. 2002) ;

Dans notre cas, vous avons choisi de tester la formule du CERC, 2006 en employant le coefficient k de (Komar, P.D et Inman, D.I., 1970, In Khelfani D., 2014).

V.3.1.2 La formule de Kraus *et al.* (1982)

La formule de (Kraus, et al. 1988) a été déterminée au moyen de 8 campagnes de traceurs fluorescents dans la zone du déferlement sur des plages du Japon.

$$(6.7) \quad Q_t = \frac{0.00038}{y \tan \beta} * Hb^2 V$$

- V : vitesse moyenne du courant de dérive au milieu du déferlement (m/s)
- Q_t : taux de transport côtier (m^3/s)

V.3.1.3 Formule de Bayram et al, (2007) :

La formule de Bayram et al. (2007) considère le transport des sédiments en suspension par la combinaison des effets du courant côtier et une fraction de l'énergie des vagues. Pour calculer le débit volumétrique LST Q_t (en m^3/s), l'équation suivante a été utilisée :

$$(6.8) \quad Q_t = \frac{\varepsilon}{(\rho_s - \rho)(1-P)g W_s} F_b \bar{V}$$

Le paramètre essentiel dans le mécanisme du débit d'entraînement des sédiments est suffisant pour vaincre les forces de frottements et de cohésion sur le fond ; Il est utile avant toute de définir les paramètres adimensionnels (Diamètre sédimentologique d^*) (Mignot ,1981)

Différentes formules peuvent être utiliser pour calculer W_s (la vitesse de chute des particules). Soulsby (1997) a proposé une formule donnée par :

$$(6.8.a) \quad W_s = \frac{v}{D_{50}} * [\sqrt{10.36^2 + 1.049d_*^3} - 10.36]$$

Avec :

- D_{50} : diamètre médian des particules en (m)
- Viscosité cinématique de l'eau ; $\nu = 1.10^{-6} m^2/s$

$$d_* : \text{diamètre sédimentologique} : d_* = \left(\frac{(\rho_s - \rho)g}{\nu^2} \right)^{1/3} * D_{50} \quad (6.8.b)$$

Où W_s est la vitesse de chute des sédiments, et ε est un coefficient du transport sédimentaire donné par l'équation par :

$$(6.8.c) \quad \varepsilon = \left(9 + 4 \frac{Hb}{W_s T_p}\right) * 10^{-5}$$

F_b représente le flux d'énergie des vagues (après déferlement) qui, pour la théorie des vagues irrégulières, est donné par :

$$(6.8.d) \quad F_b = \frac{\rho}{2^{1.75}} * \sqrt{\frac{g^3}{yb}} * H_b^{2.5} \cos(\theta_b)$$

- \bar{V} : est la vitesse moyenne du courant de dérive littoral à l'absence des données réelles mesurées,
- θ_b : angle d'incidence des vagues à la zone de déferlement en (°).

En supposant que le profil de la plage peut être approximé par le profil de (Dean & Dalrymple, 2004), \bar{V} peut être estimé comme :

$$(6.8.e) \quad \bar{V} = \frac{5}{32} \frac{\pi y b \sqrt{g}}{C_f} A^{3/2} \sin(\theta_b)$$

Où C_f est un facteur de frottement adopté par Larson et Kraus (1995) pour être égal à 0,005, et A est un paramètre de forme fourni par Dean et Dalrymple (2004) et donné par :

$$(6.8.f) \quad A = 2.25 * \left(\frac{W_s^2}{g}\right)^{1/3}$$

Nouvelle formule de Kamphius Mil-Homens et Al. (2013).

Mil-Homens et al. (2013) ont également tenté d'améliorer la formule de Kamphius. Cela a abouti à l'introduction d'un coefficient et de valeurs modifiées comme :

$$(6.9) \quad Q_t = k_{MH,KPH} H_b^{2.75} T_p^{0.98} m_b^{0.86} D_{50}^{-0.69} \sin^{0.5}(2a_b)$$

$$k_{MH,KPH} = \frac{0.149}{(\rho_s - \rho)(1 - \rho)}$$

Tableau V. 4 : représentation des formules empiriques de la quantification du transit sédimentaire longitudinal

Formules empiriques	Abréviations	Formules
CERC, Van Rijn, (2006)	C.VR, 06	$Q_t = K * \left[\frac{\rho * \sqrt{g}}{16 \sqrt{y} (\rho_s - \rho)(1 - P)}\right] * H_b^{2.5} \sin(2\theta)$
Kraus et al., (1982)	K.R, 82	$Q_t = \frac{0.00038}{y \tan \beta} * H_b^2 V$
Bayram et al., (2007)	B.r, 07	$Q_t = \frac{\varepsilon}{(\rho_s - \rho)(1 - P) g W_s} F_b \bar{V}$
Mil-Homens et Al, 2013	M.h, al, 13	$Q_t = k_{MH,KPH} H_b^{2.75} T_p^{0.98} m_b^{0.86} D_{50}^{-0.69} \sin^{0.5}(2a_b)$

V.4 Résultat et discussion

Les résultats de l'étude comparatives des transits sédimentaires obtenus dans la baie de Bou Ismail (plage Khelloufi et plage Colonel Abbes) selon les quatre formules sont représentées dans les tableaux ci-dessous :

➤ Plage Khelloufi

Tableau V. 5 : Transport sédimentaire longitudinal calculé par la formule de **CERC, Van Rijn (2006)** dans la plage Khelloufi en m³/an

	CERC, Van Rijn (2006) (m³/an)			
	NE (45°)	N (360°)	NO (315°)	O (270°)
Annuelle	2480936.98	815348.49	926980.59	1514886.03
Décennale	3021642.98	931900.26	1207159.81	2014157.22
Centennale	4171209.05	1115358.69	1509575.88	2601005.18

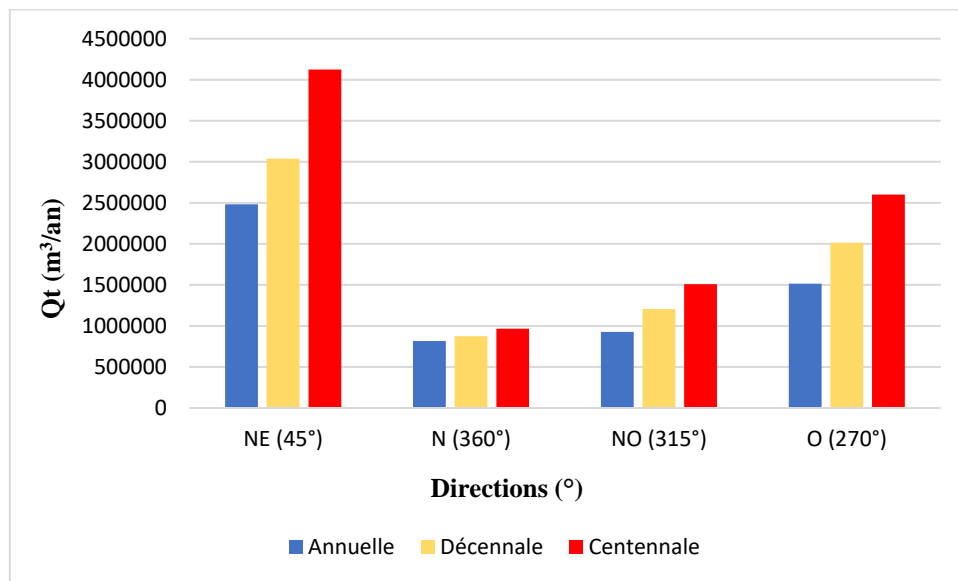


Figure V. 1 : histogramme des résultats de calcul du transport sédimentaire longitudinal (m³/an) de la plage Khelloufi avec la formule de **CERC, Van Rijn (2006)**

Tableau V. 6 : transport sédimentaire longitudinal calculé par la formule de **Kraus et al., (1982)** dans la plage Khelloufi en m³/an

	Kraus et al., (1982) (m³/an)			
	NE (45°)	N (360°)	NO (315°)	O (270°)
Annuelle	68527.86	83212.40	23213.06	59715.14
Décennale	109571.16	114453.02	46606.94	90239.01
Centennale	162562.38	144248.16	65461.59	128410.33

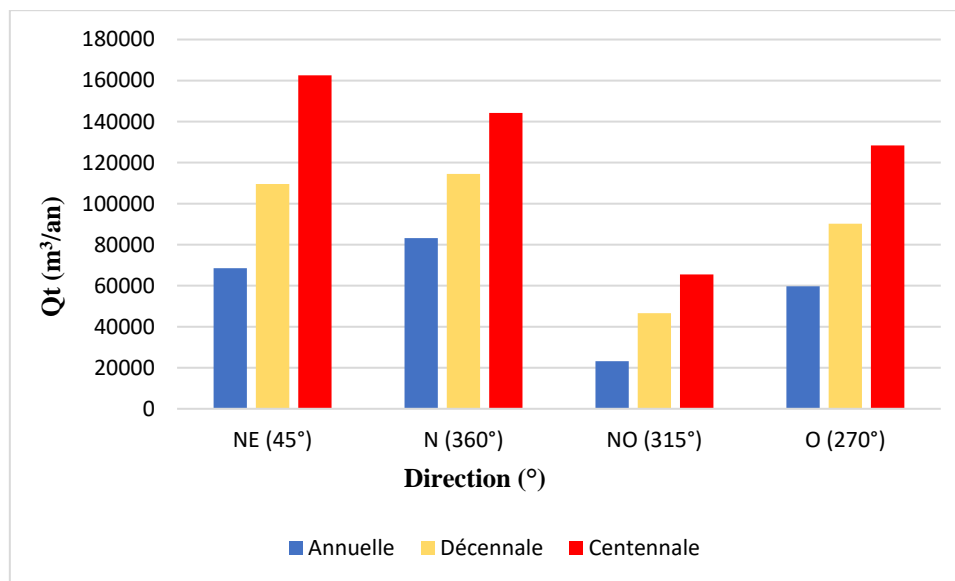
**Figure V. 2 :** histogramme des résultats de calcul du transport sédimentaire longitudinal (m³/an) de la plage Khelloufi avec la formule de **Kraus et al., (1982)**

Tableau V. 7 : transport sédimentaire longitudinal calculé par la formule de **Bayram et al., (2007)** dans la plage Khelloufi en m³/an

	Bayram et al., (2007) (m³/an)			
	NE (45°)	N (360°)	NO (315°)	O (270°)
Annuelle	6334.11	20581.68	2266.17	19760.10
Décennale	9868.02	106481.99	3944.24	31851.65
Centennale	18248.43	146648.74	7623.55	50569.36

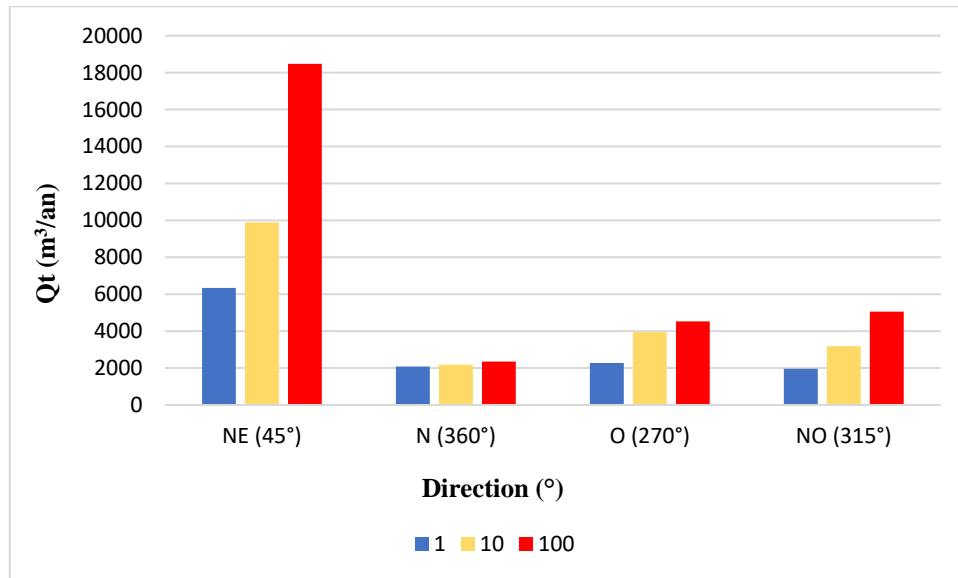
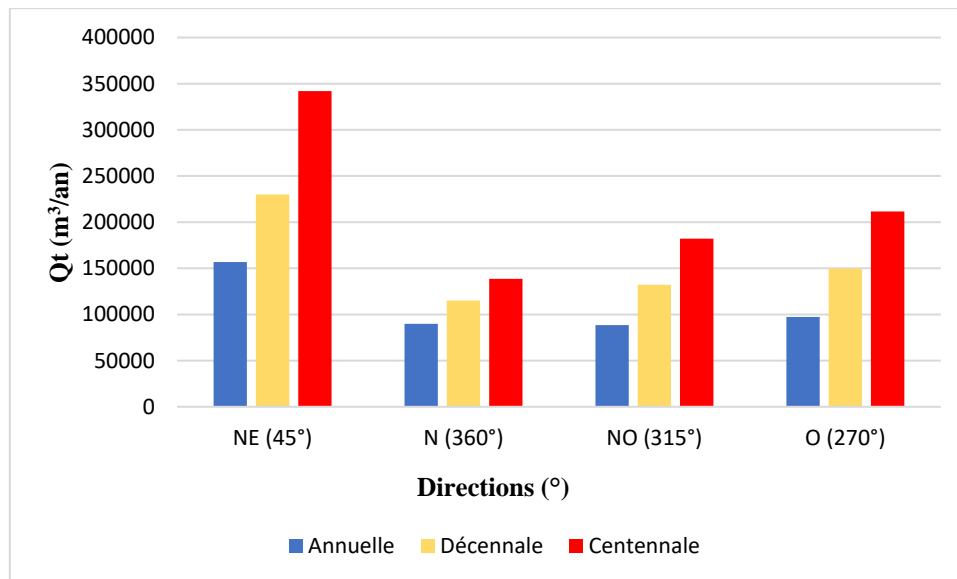


Figure V. 3 : histogramme des résultats de calcul du transport sédimentaire longitudinal (m³/an) de la plage Khelloufi avec la formule de **Bayram et al., (2007)**

Tableau V. 8 : transport sédimentaire longitudinal calculé par la formule de **Mil-Homens et al., (2013)** dans la plage Khelloufi en m³/an

	Mil-Homens et al., (2013) (m³/an)			
	NE (45°)	N (360°)	NO (315°)	O (270°)
Annuelle	156774.76	89875.36	88454.61	97286.92
Décennale	230040.06	114980.86	132137.24	149754.03
Centennale	341980.44	138513.25	182178.43	211568.60

**Figure V. 4** : histogramme des résultats de calcul du transport sédimentaire longitudinal (m³/an) de la plage Khelloufi avec la formule de **Mil-Homens et al., (2013)**

Interprétation des résultats de la plage Khelloufi

✓ Formule de CERC, Van Rijn (2006) :

D'après les résultats obtenus pour chaque direction en fonction des périodes de retour, on remarque que la direction la plus pénalisante est celle du Nord-Est avec une valeur de $Q_t = 2480936.98 \text{ m}^3/\text{an}$ pour une période de retour annuelle. L'augmentation du transport dans cette formule dépend des deux paramètres essentiels (H_b et l'angle d'incidence) ainsi que le coefficient K qui prend des valeurs très élevées, la hauteur de la vague au point de déferlement augmente en fonction des périodes de retour extrêmes (annuelle, décennale et centennale).

La formule de CERC est une équation polynomiale et multivariable, c'est-à-dire que cette formule prend en considération plusieurs paramètres (l'angle d'incidence, la hauteur significative au point de déferlement, la viscosité et la porosité).

✓ Formule de Kraus et al., (1982) :

Les prédictions de la formule (Kraus et al., 1982) (Tableau V. 8 et V. 9), montrent que la direction du transit sédimentaire dominante se fait de l'Est vers l'Ouest dans la plage Khelloufi par la dominance de deux directions, direction Nord-Est (45°) d'une valeur de $68527.86 \text{ m}^3/\text{an}$ et $83212.41 \text{ m}^3/\text{an}$ pour la direction Nord (360°).

On trouve le paramètre de la vitesse du courant de dérive selon l'angle d'incidence ce qui fait augmenter le débit sédimentaire pour la direction Nord, le faible débit pour la direction Nord-Ouest (315°) est dû à l'angle d'incidence par rapport à la plage.

La formule de Kraus et al., (1982) prend en considération la pente de la plage, le débit sédimentaire diminue pour cette formule en fonction de la pente.

✓ Formule de Bayram et al., (2007) :

La direction qui a plus de capacité sur le transport sédimentaire longitudinal est toujours celle du Nord-Est avec une valeur de $6334.119 \text{ m}^3/\text{an}$ pour une période de retour annuelle, les périodes de retour décennales et centennales montrent une augmentation très importante dans le débit sédimentaire longitudinal. Cette formule prend en considération le coefficient $\frac{\varepsilon}{w_s} F_b \bar{V}$, on considère que le coefficient $x = \frac{\varepsilon}{w_s} F_b \bar{V}$, si le x augmente, alors le débit augmente.

La vitesse de chute, la vitesse du courant littoral et le D50 des grains sont les paramètres les plus importants dans cette formule.

✓ Formule de Mil-Homens et al., (2013) :

D'après les résultats obtenus, on remarque la dominance de deux directions en capacité de transport sédimentaire longitudinal, la direction Nord-Est (45°) avec un transport sédimentaire de $156774.7634 \text{ m}^3/\text{an}$, tandis que la direction Nord est caractérisée par un transport sédimentaire de $97286.92131 \text{ m}^3/\text{an}$.

La formule de **Mil-Homens et al., (2013)** prend en considération plusieurs paramètres (la hauteur des vagues au point de déferlement, les périodes de retour, la pente de la zone d'étude, la taille des grains et l'angle d'incidence au rivage).

➤ **Plage Colonel Abbès**

Tableau V. 9 : transport sédimentaire longitudinal calculé par la formule de **CERC, Van Rijn (2006)** dans la plage Colonel Abbès en m³/an

	CERC, Van Rijn (2006) (m³/an)			
	NE (45°)	N (360°)	NO (315°)	O (270°)
Annuelle	1584388.24	3842388.61	573652.73	2827244.37
Décennale	1843673.26	5416877.95	663988.43	3387540.61
Centennale	2029776.36	5855137.02	783021.11	5189658.85

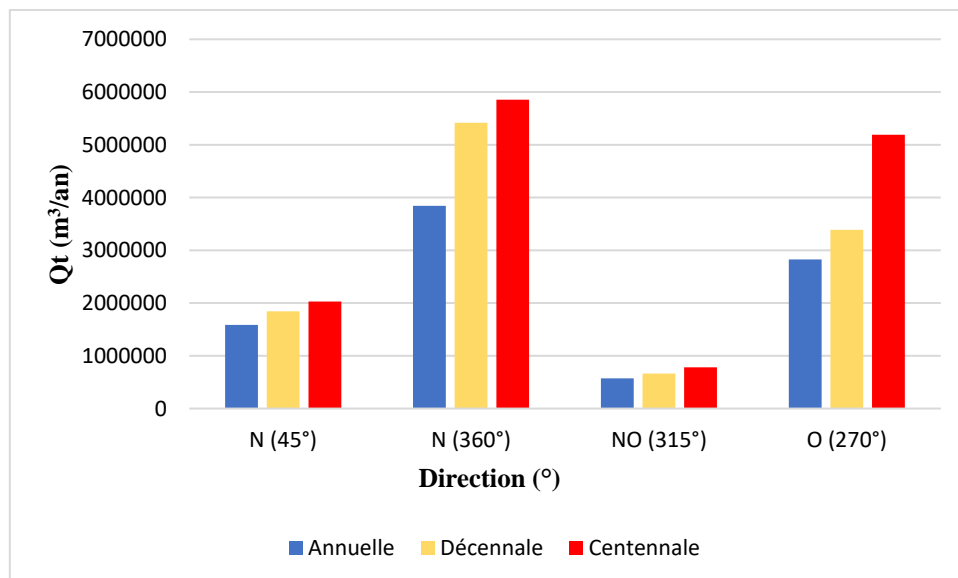


Figure V. 5 : histogramme des résultats de calcul du transport sédimentaire longitudinal (m³/an) de la plage Colonel Abbès avec la formule de **CERC, Van Rijn (2006)**

Tableau V. 10 : transport sédimentaire longitudinal calculé par la formule de **Kraus et al., (1982)** dans la plage Colonel Abbes en m³/an

	Kraus et al., (1982) (m³/an)			
	NE (45°)	N (360°)	NO (315°)	O (270°)
Annuelle	94979.62	89252.24	20645.27	52744.48
Décennale	117636.07	122153.48	33233.22	77122.62
Centennale	184562.15	150026.80	46340.22	117636.30

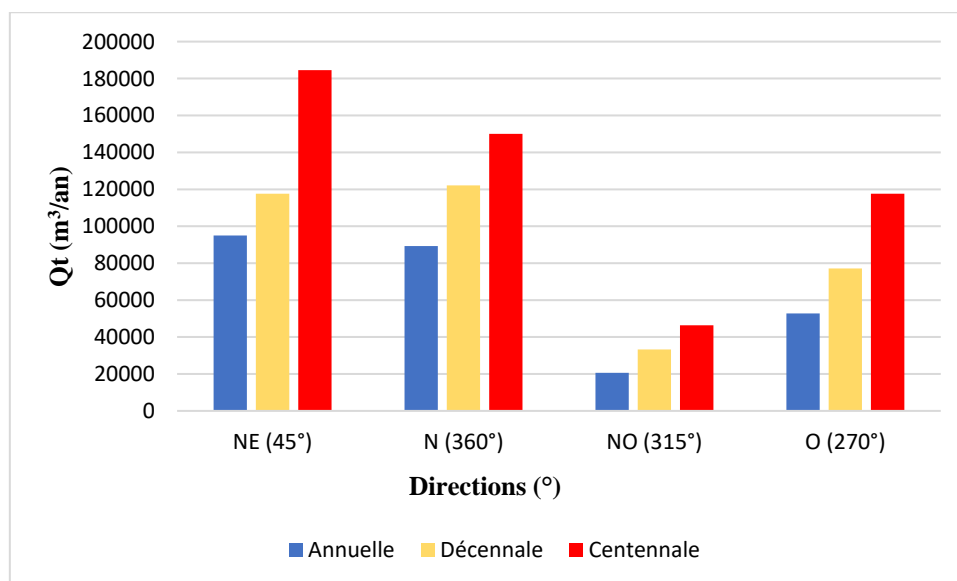


Figure V. 6 : histogramme des résultats de calcul du transport sédimentaire longitudinale (m³/an) de la plage Colonel Abbes avec la formule de **Kraus et al., (1982)**

Tableau V. 11 : transport sédimentaire longitudinal calculé par la formule de **Bayram et al., (2007)** dans la plage Colonel Abbes en m³/an

	Bayram et al., (2007) (m³/an)			
	NE (45°)	N (360°)	NO (315°)	O (270°)
Annuelle	15144.74	55253.92	6403.25	30851.45
Décennale	19292.98	76992.36	6986.48	35160.34
Centennale	22601.77	80046.65	8108.18	56437.92

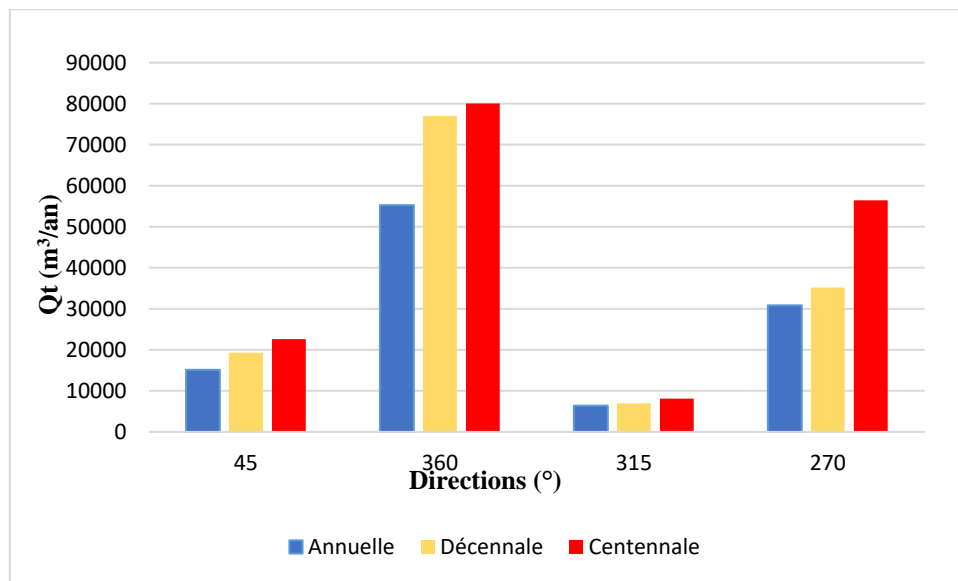


Figure V. 7 : histogramme des résultats de calcul du transport sédimentaire longitudinal (m³/an) de la plage Colonel Abbes avec la formule de **Bayram et al., (2007)**

Tableau V. 12 : transport sédimentaire longitudinal calculé par la formule de **Mil-Homens et al., (2013)** dans la plage Colonel Abbas en m³/an

	Mil-Homens et al., (2013) (m³/an)			
	NE (45°)	N (360°)	NO (315°)	O (270°)
Annuelle	642372.72	1027778.72	318981.77	674557.10
Décennale	862184.20	1680239.24	425797.63	933009.50
Centennale	1033827.97	1977059.72	547943.71	1571238.37

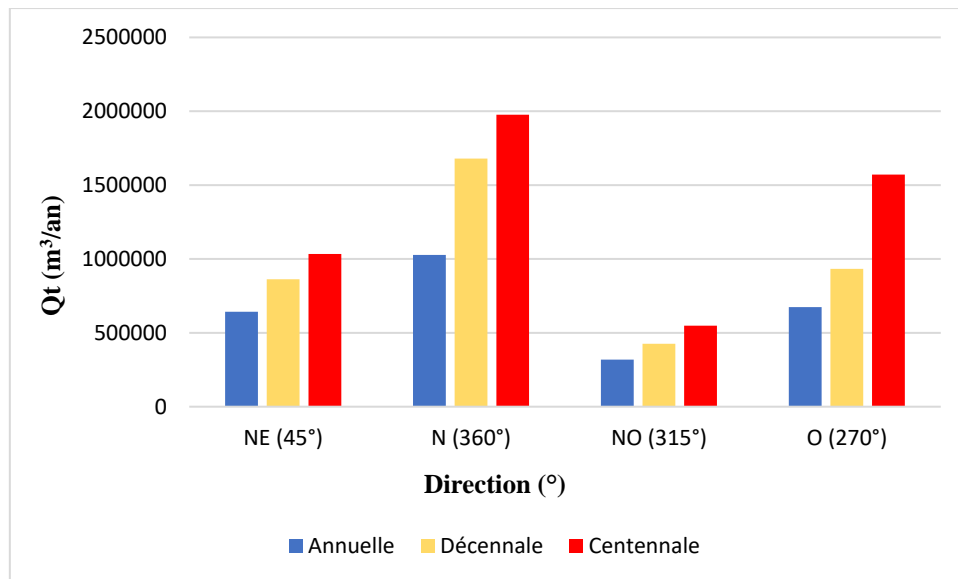


Figure V. 8 : histogramme des résultats de calcul du transport sédimentaire longitudinal (m³/an) de la plage Colonel Abbas avec la formule de **Mil-Homens et al., (2013)**

Interprétation des résultats de la plage Colonel Abbès

✓ Formule de CERC, Van Rijn (2006) :

Le transport sédimentaire longitudinal calculé par la formule de (CERC, Van Rijn (2006) pour la plage colonel Abbès demeure trop élevée par rapport à ceux des autres formules, cette importante différence est expliquée par la constante K, prise pour le calcul, qui reste trop élevée, à titre d'exemple $K=128$. La valeur le débit est de du transit sédimentaire dans cette plage selon la formule est de $3842388.61\text{m}^3/\text{an}$ pour une période de retour annuelle dans la direction Nord (360°).

Pour cette plage, la dominance du transit sédimentaire longitudinal est de direction Nord (360°), vu que l'angle d'incidence pour cette direction est le plus favorable pour le transport sédimentaire longitudinal.

Les évènements extrêmes interviennent dans l'augmentation du débit sédimentaire car la hauteur de la vague au point de déferlement devient plus importante en fonction de ces événements, la période de retour centennale et la valeur maximale du transit sédimentaire pour toutes les directions.

✓ Formule de Kraus et al., (1982) :

La formule de Kraus prend en considération la pente de la plage, le débit sédimentaire diminue pour cette formule diminue en fonction de la pente.

On remarque deux directions dominantes, la direction Nord-Est (45°) pour un transport sédimentaire de 94979.62 et Nord (360°) de $89252.29\text{ m}^3/\text{an}$

✓ Formule de Bayram et al., (2007) :

La direction Nord (360°) et la plus dominante pour le transport sédimentaire longitudinal dans cette plage son angle d'incidence est le plus favorable pour un transport de l'Est vers l'Ouest.

✓ Formule de Mil-Homens et al., (2013) :

D'après les résultats obtenus, on remarque la dominance de deux directions, la direction Ouest (270°) avec un transport sédimentaire de $642372.72\text{m}^3/\text{an}$, tandis que la direction Nord est de $1027778.72\text{m}^3/\text{an}$.

La formule de Mil-Homens et al., (2013) prend en considération plusieurs paramètres (la hauteur des vagues au point de déferlement, la pente de la zone d'étude, la taille des grains et l'angle d'incidence au rivage ce qui la rend plus justifiable physiquement par rapport à celle de CERC, Van Rijn (2006).

Conclusion :

D'après l'interprétation des figures et des tableaux pour les différentes formules, nous sommes arrivés à conclure dans ce chapitre les points suivants :

- Les valeurs du transit littoral prédites par la formule de (CERC, Van Rijn, 2006) représente le débit le plus élevé. Pour toutes les plages, les valeurs demeurent trop élevées par rapport à ceux obtenus par les autres formules, cette importante différence peut être expliquée par la constante K, prise pour le calcul, qui reste trop élevée, à titre d'exemple $K=128$. Cette constante ne peut être déterminée avec exactitude à cause du caractère empirique de l'équation, le coefficient doit donc être calibré avec des essais par rapport aux flux sédimentaires mesurés.
- Les formules différentes sont selon les paramètres, nous avons constaté que les paramètres les plus importants qui influent sur le débit sédimentaire longitudinal sont : la hauteur au point de déferlement H_b , la pente de la plage, l'angle d'incidence des vagues, la vitesse moyenne du courant littoral et le diamètre moyens des grains D_{50} .
- Les résultats obtenus montrent que les débits les plus forts sont situés dans la plage de Colonel Abbes comparés à celle de Khelloufi, ceci est dû à la pente de la plage de 0.09 qui conduit à des profondeurs de déferlements plus élevés, à leurs niveaux, les hauteurs des vagues au point de déferlement H_b sont donc plus importants au niveau de la cote. L'effet érosif est plus important dans la plage de Colonel Abbes.
- La plage Khelloufi est caractérisée par une dominance de transport sédimentaire Nord-Est (45°), tandis que dans la plage Colonel Abbes, la dominance est présente au niveau de la direction Nord (360°), ceci a une relation avec l'angle d'incidence des vagues qui favorise pour chaque plage le transport maximal.
- Les évènements extrêmes ont un impact très important sur le transport sédimentaire longitudinal, l'analyse comparative entre les formules dans cette étude a montré que les périodes de retour ont une influence sur la hauteur des vagues au point de déferlement, si la période de retour est plus rare, ces hauteurs augmentent et engendrent des débits de transport sédimentaires très importants.

CHAPITRE VI

Evolution du trait de cote

VI Introduction

Les zones côtières sont des environnements connus pour leur fragilités et leur importance du point de vue économique et environnementale. Les littoraux constituent une zone de transition (écotone) entre les écosystèmes marins et terrestres et fournissent à ce titre des services écosystémiques fondamentaux (Carboni et al., 2009). Ces zones e général sujettes à divers risques comme la submersion et l'érosion et les populations installées dans ces milieux sont alors exposées à ces risques avec un niveau de vulnérabilité pouvant être plus ou moins élevé selon leur sensibilité et capacité d'adaptation (Birkmann et al., 2013).

Dans ce chapitre, on a effectué une analyse diachronique de l'évolution du trait de côte de notre zone d'étude (Plage Khelloufi - Colonel Abbes). Cette étude a été déterminée grâce à la comparaison de différentes images satellitaires obtenues à l'aide de Google Earth afin d'obtenir des résultats significatifs et fiables concernant l'évolution de 23ans (1999-2022) de notre site d'étude.

VI.1 Logiciels utilisés

- **Google Earth Pro**

Google Earth est un logiciel SIG qui permet de voyager dans le monde via le globe virtuel et d'afficher des images satellitaires de grande résolution, ces images sont mises à jour au fur et à mesure et sont issues de plusieurs satellites (SPOT, QUICKBIRD, IKONOS,).

- **ArcGIS 10.8**

ArcGIS est un logiciel permettant de traiter des informations géographiques, il s'agit d'un système qui sert à collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser ces informations géographiques, le logiciel offre également de nombreuses potentialités pour la manipulation et la gestion des données spatiales.

- **Aperçu de l'extension DSAS**

Un outil de mesure des écarts entre les traits de cote d'une même série mais aussi de calculer les statistiques des taux de changement pour une série chronologiques des données vectorielles du littoral (en m/an). Les méthodes utilisées peuvent être décrite comme suite :

a) **NSM (Mouvement net des rivages)** : qui indique la distance entre les traits de cote les plus anciens et les plus récents pour chaque transect.

b) **EPR (End point rate)** : un taux calculé en divisant la distance du changement de trait de côte par me temps s'écoulant (nombre d'années) entre le trait de côte le plus anciens et le plus récent.

$$EPR = \frac{NSM}{\text{Durée entre l'ancien shorline et le récent}}$$

A partir du paramètre EPR, on peut classer la progression d'érosion ou d'accrétion selon le résultat obtenu par le paramètre :

Tableau VI. 1 : Classification des valeurs changement du trait de côte à partir du paramètre EPR (Nassar K et al., 2018).

	Taux de changement de trait de côte (m/an)	Classification
1	> -2	Erosion très élevée
2	> -1 à <-2	Erosion élevée
3	> -1 à <-0	Erosion modérée
4	0	Stable
5	> 0 à <+1	Accrétion modérée
6	> +1 à <+2	Accrétion élevée
7	> +2	Accrétion très élevée

c) **LRR (méthode de la régression linéaire)** : est la pente de la ligne de régression dans le nuage de points formé par les mesures de distances entre tous les points d'intersection de chaque transect et des traits de cote comparés.

d) **WLR** : taux de régression linéaire pondéré

VI.2 Méthodologie

VI.2.1 Les opérations de pré calculs

Il s'agit de créer au début une Géodatabase personnelle composée essentiellement de deux entités : une première entité contenant plusieurs lignes de références nommées baseline et une seconde entité constituée de traits de cote déjà numérisés sur ArcMap nommée shorlines.

➤ La Baseline

Il s'agit de numériser une ligne de base imaginaire à partir de laquelle DSAS crée des transects qui coupent les différents traits de cote. Ainsi, les transects sont perpendiculaires à cette Baseline qui doit être parallèle au rivage digitalisé dans la limite de la végétation.

➤ Les shorlines

Les shorlines représentent les traits de cote déjà numérisés dans la Géodatabase. Il s'agit en effet, des traits de cote auxquels, la Baseline doit être parallèle et devant servir de mesure dans l'environnement de DSAS. Ainsi, pour pouvoir effectuer un calcul d'indices (EPR, LRR). Les shorlines doivent être au minimum de deux entités de date ou encore d'heures différentes.

VI.2.2 Digitalisation

La digitalisation a été faite sur douze images satellitaires géoréférencées des dates différentes entre 1999 et 2022.



Figure VI. 1 : digitalisation des traits de cote selon différentes périodes entre 1999 et 2022

VI.2.3 Génération des transects

L'analyse de l'évolution spatio-temporelle entre 1999 et 2022 de la position du trait de côte des deux plages délimitées par deux ouvrages transversaux (épis), cette approche consiste de créer 468 transects d'une longueur de 230m espacés de 15m.

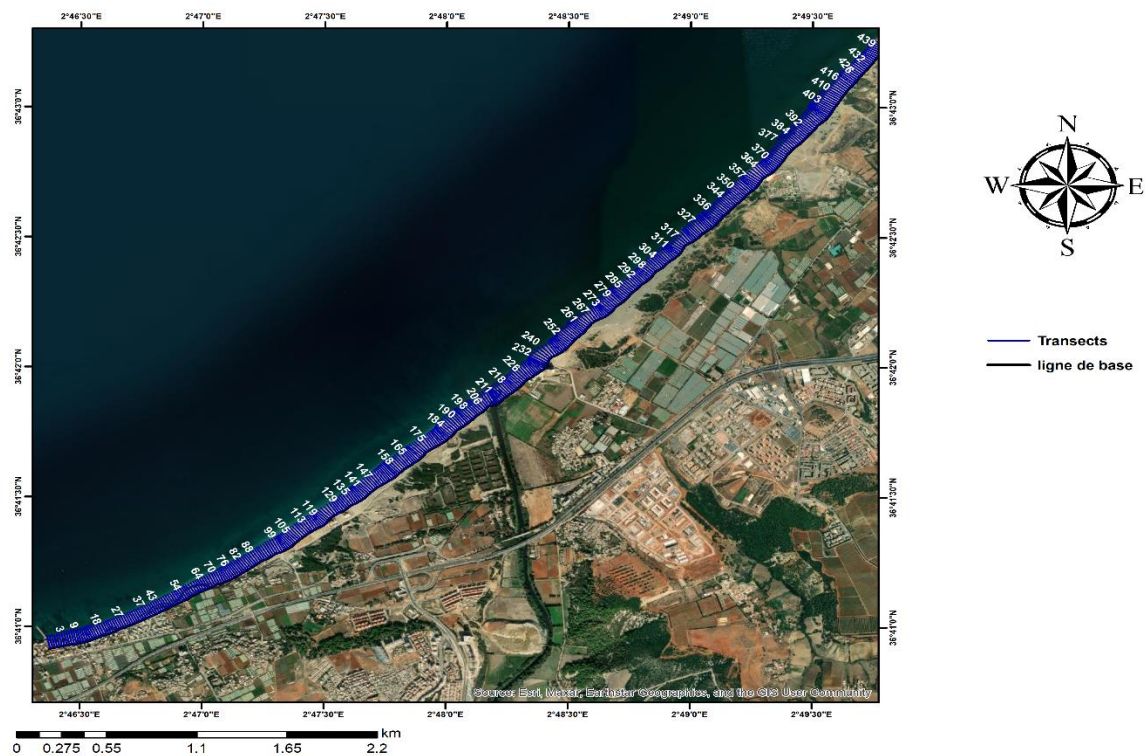


Figure VI. 2 : position des transects au niveau de la ligne de cote entre 1999 et 2022

VI.2.4 Calculs statistiques

Le calcul statistique consiste, en fonction des indices considérés, à faire ressortir les données tabulaires calculées automatiquement par DSAS. En effet, c'est l'analyse automatique de tous les transects qui permet de définir des secteurs d'évolution et d'en calculer les valeurs moyennes (Faye et al., 2010).

Afin de bien comprendre l'évolution diachronique du trait de côte à partir des différentes années selon l'échelle spatio-temporelle, on a calculé les paramètres du DSAS pour but d'obtenir ces données statistiques tel que le **EPR**, **NSM** et **LRR**.

VI.3 Résultats et discussions

a) Calcul du mouvement net des rivages (NSM)

Le calcul du mouvement net des rivages (NSM) est important pour évaluer l'évolution de la distance et non la vitesse en fonction du temps, nous avons calculé ce paramètre afin d'élaborer une carte représentative de notre site d'étude.

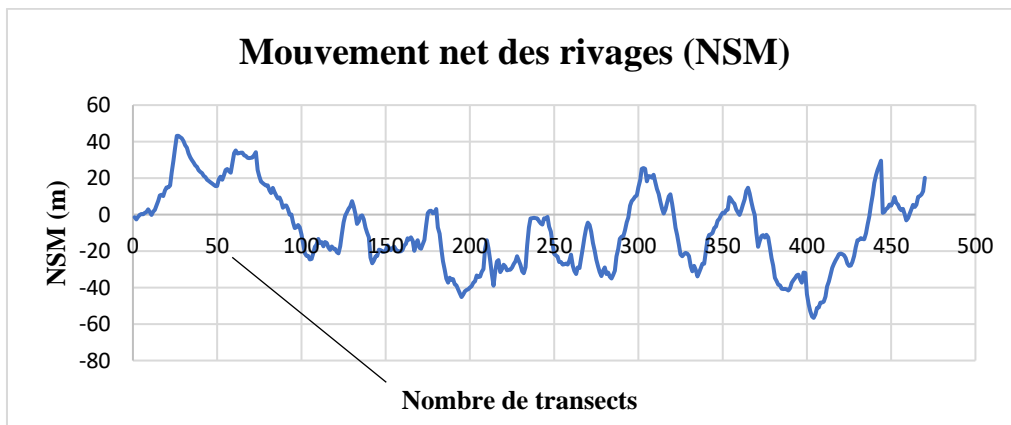
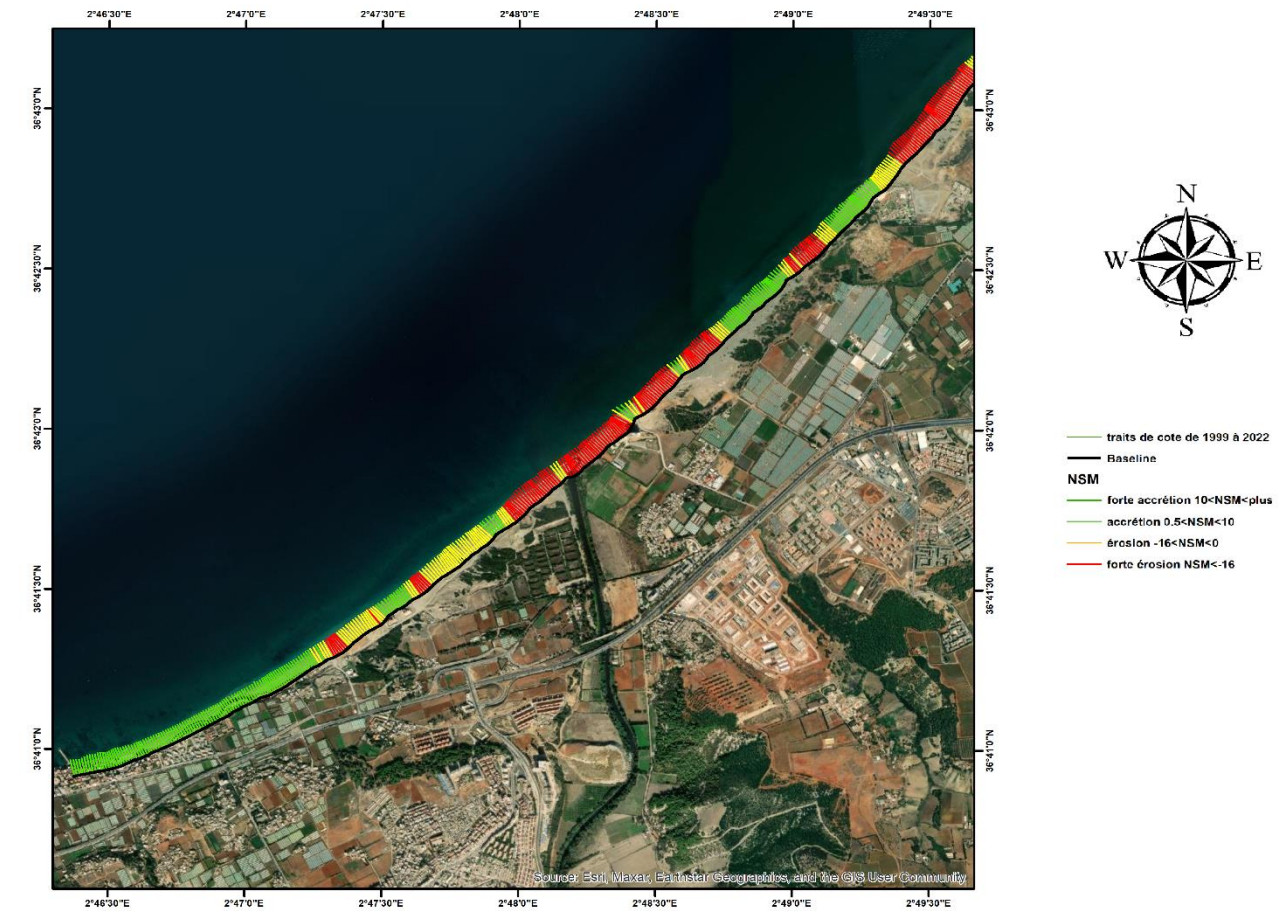


Figure VI. 3 : Mouvement net des rivages (NSM) de la zone d'étude entre 1999 et 2022.

Interprétation des résultats

La figure VI. 3 nous renseigne sur la distance de déplacement du trait de côte sur chaque transect entre 1999 et 2022 du site d'étude.

La couleur verte des transects correspond à l'accrétion de 0.5 à 40m, par contre, les couleurs qui indique la régression sont le jaune et le rouge de grandeurs respectueusement d'environ 0 à -38.9m.

- L'accrétion dans l'extrémité Ouest est très importante atteignant le pic des 40.6m du e à la présence de l'épi Ouest qui joue le rôle d'un ouvrage de piégeage de sédiments.
- L'érosion est remarquée au niveau de l'embouchure de l'oued Mazafran et dans la partie Est de l'épi.

b) Le taux de point final (EPR)

Pour bien comprendre l'évolution de ces traits de cote selon l'échelle spatio-temporelle, on a projeté le support statistique du taux de point final (End Point Rate) pour élaborer une carte représentative.

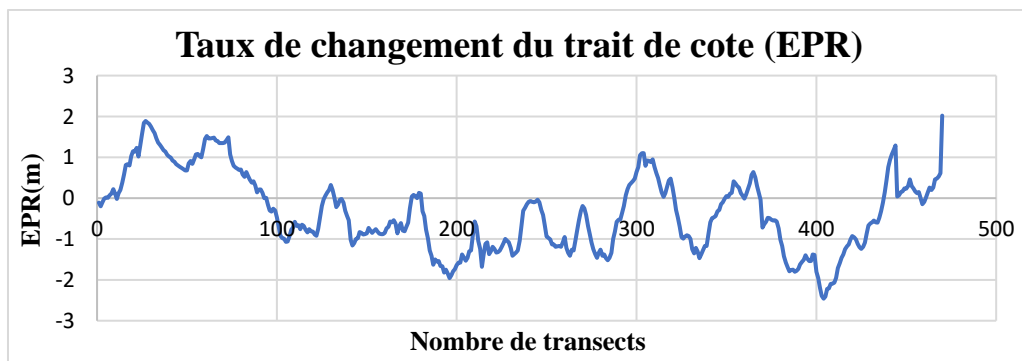
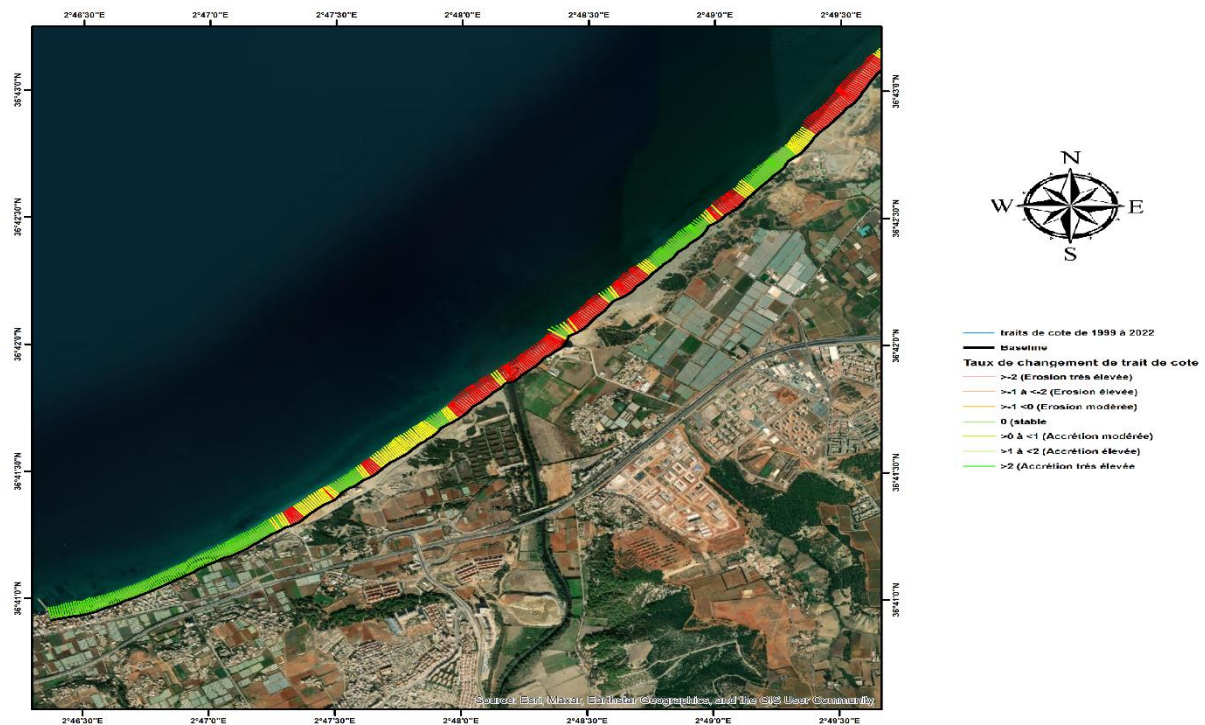


Figure VI. 4 : Evolution du trait de côte entre 1999 et 2022

Interprétation des résultats :

La **figure VI. 4** représente l'évolution du trait de côte de notre site d'étude entre 1999 et 2022, cette période est caractérisée par la construction d'ouvrages transversaux (épis), on note durant la période de 1999 à 2009, la construction de deux épis aux extrémités est et ouest de la zone d'étude et entre 2009 et 2013 d'un épi central au centre de la zone, au flanc gauche de l'embouchure de l'oued. Ces ouvrages ont eu un impact remarquable sur l'évolution du trait de côte, il s'agit d'une accrétion à l'est de l'ouvrage et une érosion à l'ouest. Les débits solides interviennent également dans la morphologie du trait de côte en prenant en considération les conditions hydrauliques incidentes sur la cote.

On constate une variation irrégulière du trait de côte, de la limite Ouest et la limite Est.

- Une accrétion progressive atteignant un pic de 1.82m/an au niveau du transect 29, cela correspond à un avancement remarquable du trait de côte de 41.86m, cette accumulation est à cause de l'épi ouest de la zone d'étude.
- Ensuite, une érosion irrégulière est remarquée à partir du transect 95 jusqu'au transect 294 (présence de l'oued) avec un pic de recul de -1.96m/an, cela correspond à un recul de -45.08m/an. Cette érosion est due à la mobilité des débits solide de l'oued Mazafran durant toute cette période.
- A partir du transect 300 vers 450, une présence d'irrégularités dans l'évolution du trait de côte, l'érosion est très importante dans l'extrémité Est atteignant -2.41m/an, l'érosion est due à la présence d'un épi qui bloque le transit sédimentaire de secteur Est.

Pour des images satellitaires extraites de google Earth, l'incertitude peut atteindre les 4m, car les images les plus récentes ont une résolution meilleure que celles des anciennes, cela peut fausser les calculs, mais dans notre cas, le calcul du coefficient de corrélation entre l'EPR mesuré et le LRR calculé montre que notre résultat tend vers une corrélation fiable.

Pour ce cas, l'EPR et LRR ont un coefficient de détermination $R^2 = 0.81$.

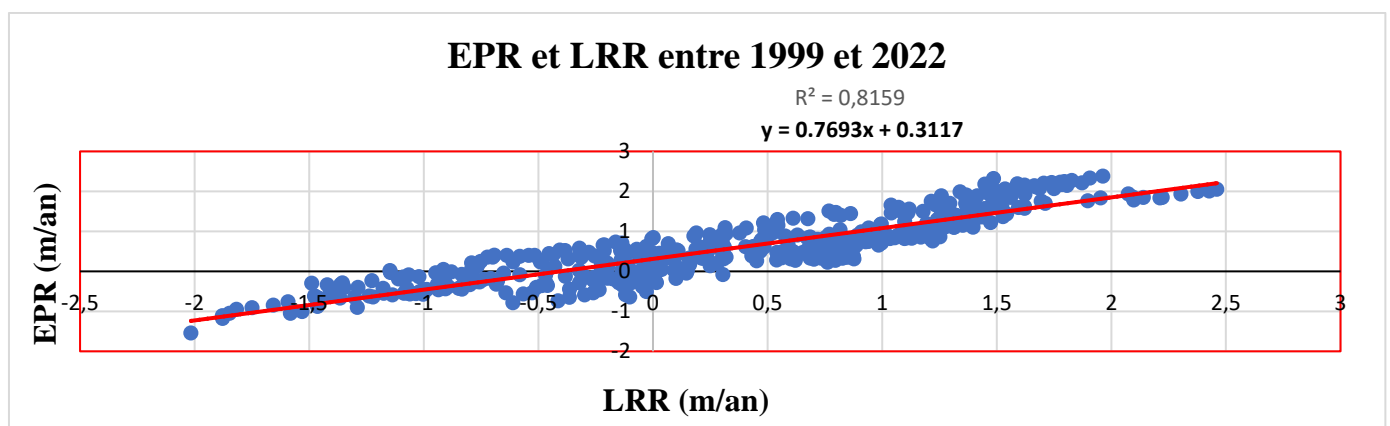


Figure VI. 5 : Corrélation entre les taux d'évolution EPR et LRR dans de la zone d'étude

Et entre EPR et WLR avec un $R^2 = 0.81$. Le résultat montre une bonne relation entre ces deux paramètres.

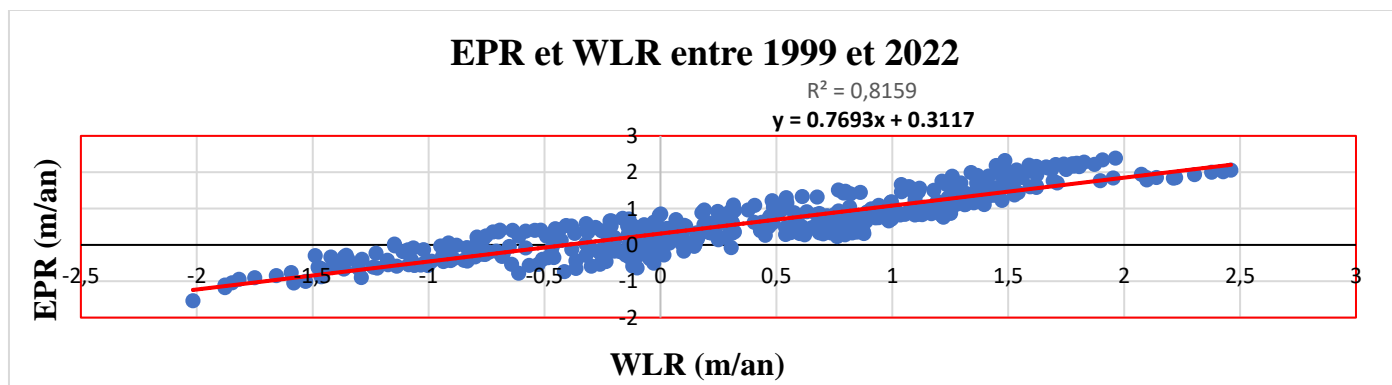


Figure VI. 6 : Corrélation entre les taux d'évolution EPR et WLR dans de la zone d'étude

L'analyse dynamique spatio-temporelle du trait de côte de la zone d'étude s'est faite d'abord suivant trois périodes afin d'évaluer l'impact de 1999 à 2022, des différentes modifications anthropiques apportées en termes d'ouvrages côtiers à Bou Ismail.

Suivant les données disponibles, cette analyse s'étend sur :

- (1) 1999 à 2009, avant et après la construction des épis Est et Ouest dans la zone,
- (2) de 2009 à 2013, soit avant et après la construction de l'épis présent près de l'oued Mazafran,
- (3) de 2013 à 2017, qui ne correspond à aucune nouvelle construction, mais un changement au niveau de l'embouchure est remarqué à cause des conditions hydrodynamiques qui été favorable pour l'accrétion de la zone.

VI.4 Evolution du trait de cote

1. L'évolution du trait de côte entre 1999 et 2009 :

La variation du taux d'évolution du trait de côte montre une dynamique irrégulière du trait de côte :

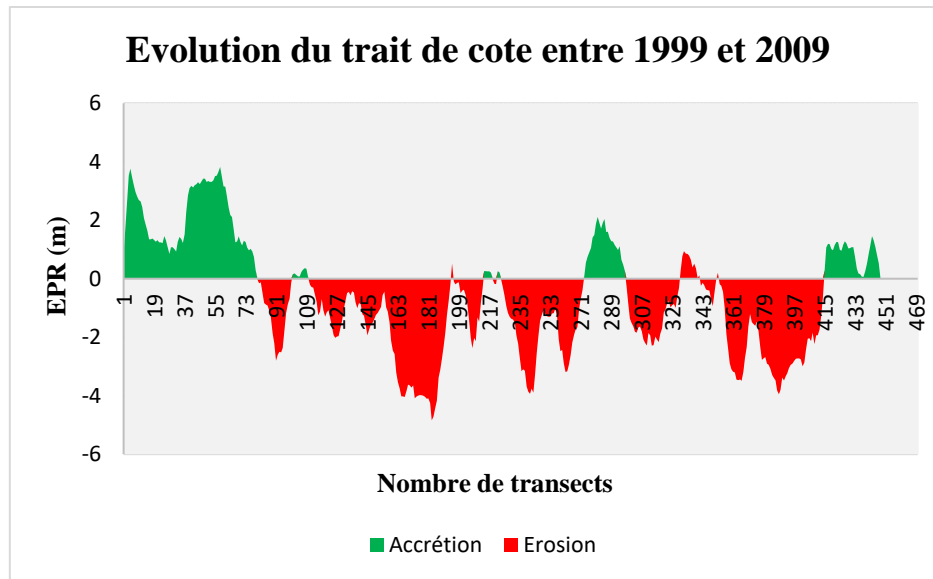


Figure VI. 7 : Evolution du trait de côte entre 1999 et 2009

- Un secteur d'accrétion à l'Ouest très remarquable avec une vitesse de 3.8m/an jusqu'au transect 73^{ème}.
- Un secteur affecté par une très forte érosion avec une vitesse -4.3m/an au niveau de l'embouchure de l'oued Mazafran situé au centre de la zone d'étude.
- Une érosion au niveau du secteur Est avec une vitesse de 3.6m/an.

Sur la figure, on peut observer la répartition spatiale des secteurs présentant des évolutions entre 1999 et 2009, c'est au cours de cette même période que l'implantation des épis Est et Ouest a été mise en place. L'accrétion et l'érosion dans les extrémités sont due au blocage du transit sédimentaire par ces deux épis.

L'érosion dans l'embouchure est le résultat des forts écoulements d'oued durant les périodes d'hiver.

2. L'évolution du trait de côte entre 2009 et 2013 :

L'évolution irrégulière du trait de côte durant cette période est en fonction de l'EPR.

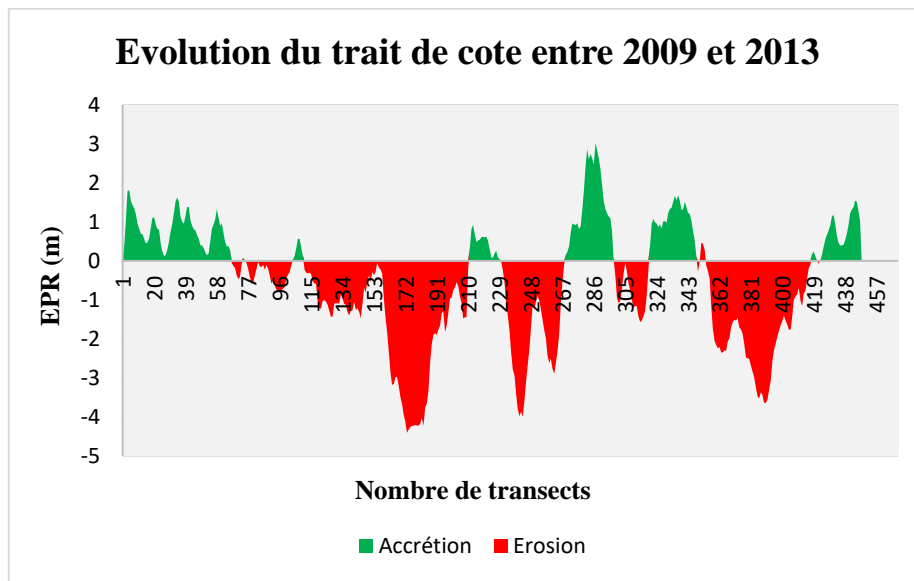


Figure VI. 8 : Evolution du trait de côte entre 2009 et 2013

- La forte érosion au niveau de l’embouchure qui dépasse les -4m/an est due éventuellement à une période de tempêtes, cela a provoqué un très fort écoulement d’oued.
- Le secteur d’accrétion au niveau de l’épis Ouest est moins fort par rapport à la période précédente, ceci indique que le taux d’érosion est plus dominant que l’accumulation au long du trait de côte.

3. L’évolution du trait de côte entre 2013 et 2017 :

En une période si courte, on note une accumulation au niveau de L’embouchure. Cela peut être expliqué par une période calme où il y a eu une accumulation d’une manière plus rapide que l’érosion vu que la zone d’étude est considérée comme une zone avec des courants forts. Cette période est corroborée par des images satellitaires respectivement de 2013 et 2017.

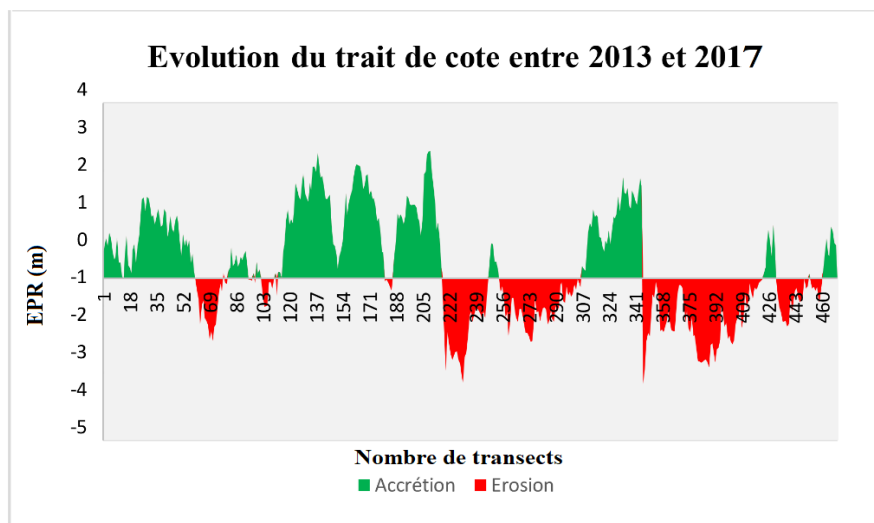


Figure VI. 9 : Evolution du trait de côte entre 2013 et 2017

- L'oued Mazafran est considéré comme source en alimentation par les débits solides dans la zone, l'accrétion à son niveau montre que les conditions hydrodynamiques été calmes et favorables pour que le transit sédimentaire soit assez important pour être remarqué à l'Ouest gauche de l'embouchure.



Figure VI. 10 : images satellitaires entre 2013 et 2017

- Le secteur d'accrétion dans la zone Ouest atteint une vitesse de 2.1m/ due à la création d'une zone calme qui favorise le piégeage des sédiments par les ouvrages de protection.

VI.5 Analyse du bilan sédimentaire

Cette analyse nous permet de calculer les surfaces d'érosion et d'accrétion afin de quantifier les pertes et les gains dans les différentes zones du trait de côte.

A l'aide de la cartographie de l'évolution superficielle de notre zone d'étude, nous avons pu créer une carte représentative du bilan sédimentaire.

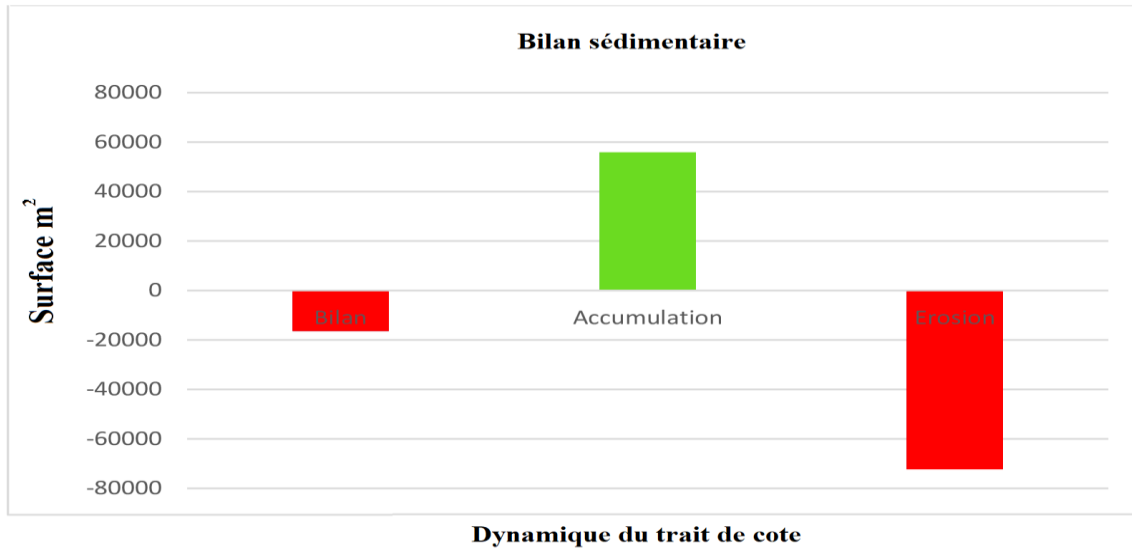


Figure VI. 11 : bilan sédimentaire de la zone d'étude entre 1999 et 2022

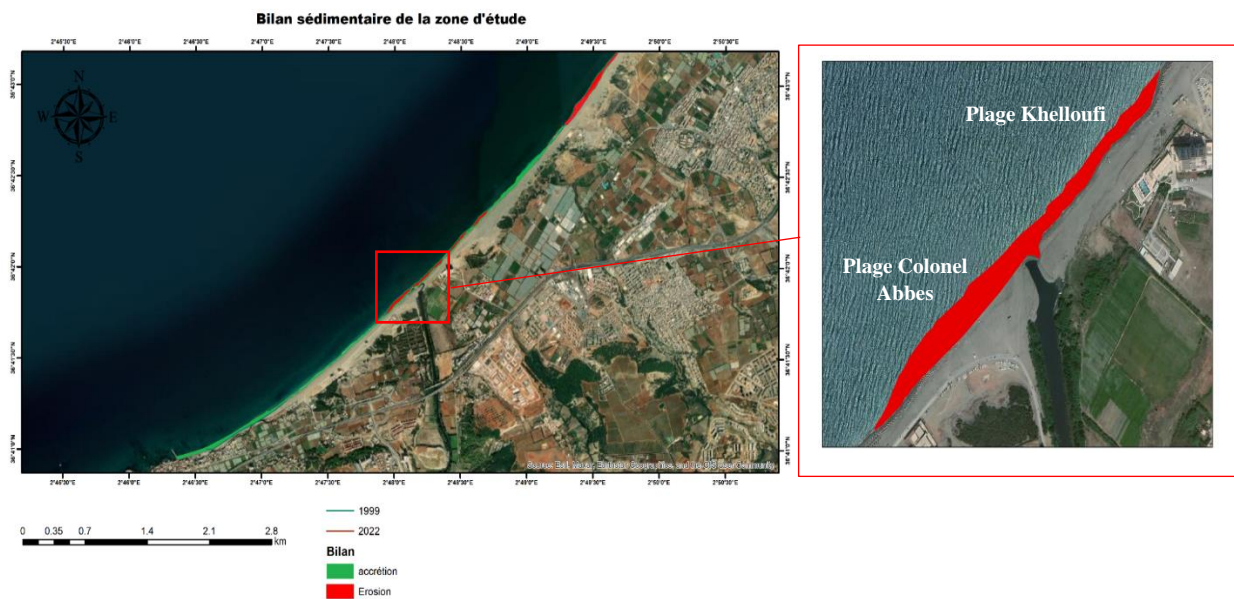


Figure VI. 12 : Analyse de taux d'évolution en surface de la zone d'étude entre 1999 et 2022.

Interprétation :

Les deux figures nous ont permis d'avoir un aperçu sur la dynamique du trait de côte de notre site d'étude :

- Nous remarquons une accumulation qui atteint une surface d'environ 55851 m², cette accumulation se trouve au niveau de l'ouvrage transversal à l'Ouest de la plage Colonel Abbas.

- La surface perdue est plus grande que celle gagnée d'environ 72299 m², les zones d'érosion se trouve au niveau de l'embouchure de l'oued Mazafran et la présence de l'épi Est qui bloque le transport sédimentaire, donc pas de compensation des pertes en sédiments.
- Le bilan sédimentaire de notre trait de côte entre 1999 et 2022 nous renseigne sur l'état de la zone d'étude, ce bilan est négatif d'une surface de 16448 m².
- L'érosion est présente pour les deux plages de notre zone d'étude (Khelloufi et Colonel Abbas), la surface érodée dans la plage Colonel Abbas est de 24561.64 m² et 12615.26 m² dans la plage Khelloufi.

Conclusion :

Ce chapitre nous a conduit à obtenir les résultats de l'analyse diachronique qui montrent que notre zone d'étude est zone soumise à une forte érosion, cela nous a aidé à confirmer la dynamique du trait de côte de la plage Khelloufi et Colonel Abbas par les points suivants :

- Les deux plages subissent une érosion, d'après les résultats obtenus dans le chapitre précédent, le transport sédimentaire longitudinal au niveau de la plage Colonel Abbas est plus important dû à sa pente. Il faut noter également que l'effet érosif provoqué par la direction Nord-Ouest est plus intense par rapport à la plage Khelloufi.
- L'érosion au niveau de la plage Colonel Abbas est plus importante que celle de Khelloufi, ceci a été confirmé par les calculs empiriques en fonction des houles extrêmes.
- Nous concluons que notre site d'étude est soumis à des tempêtes rares qui sont à l'origine de la dynamique complexe du trait de côte. Le transport sédimentaire longitudinal est fortement présent dans la zone, ce qui prouve la forte accumulation au niveau de l'épi Ouest de l'oued Mazafran.

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire avait pour objectif de contribuer à la compréhension de l'impact des événements extrêmes sur le transport sédimentaire longitudinal au niveau des deux plages de la zone d'étude, la plage Khelloufi et plage Colonel Abbas, deux plages dont les caractéristiques hydrodynamiques et morphologiques plus au moins complexes qui affectent le site d'étude.

Les résultats de l'étude granulométrique montrent :

- L'indice de classement et du coefficient d'asymétrie indique la présence d'un sédiment très bien classé avec un classement de sables moyens, cela explique que les courants qui existent dans les deux plages sont forts.
- Le diamètre moyen des grains de notre zone d'étude est de 0.3 mm.

La modélisation numérique avait pour objectif de déterminer le comportement hydrodynamique et hydro-sédimentaire dans la baie de la zone d'étude en utilisant les périodes de retour pic annuelles, décennales et centennales traités par traitement statistique comme données entrantes à l'aide du logiciel DHI MIKE21 :

- La direction la plus dominante pour le transport sédimentaire longitudinal dans la plage Khelloufi est de secteur Nord-Est, tandis que la direction Nord montre des valeurs de transport sédimentaire longitudinal élevées pour la plage Colonel Abbas.
- La propagation des houles vers la cote montre que les hauteurs significatives arrivant dans la plage Colonel Abbas, sont plus élevées par rapport à celles de la plage Khelloufi, la structure géomorphologique complexe de la baie de Bou Ismail est la cause de la différence d'intensité des hauteurs significatives entre les plages notamment la différence plus au moins considérable entre la pente des deux plages.
- Cette modélisation a été faite en utilisant des périodes de retour extrême, les résultats ont montré que ces événements ont une influence très importante qui amplifient les hauteurs significatives, la vitesse du courant de dérive et le transport sédimentaire longitudinal associé.

L'importance du transport sédimentaire longitudinal est la compréhension longue de l'état de la plage et la prévention des tendances d'érosion et d'accrétion à court terme.

La quantification des transferts sédimentaires dans la zone de déferlement par des formules empiriques est une opération simple et rapide par rapport à l'expérimentation par la méthode du piégeage des sédiments qui est coûteuse et exige du matériel et du temps.

Le processus qui gouverne l'écoulement dans la zone de déferlement est un phénomène encore non quantifiable dans la mesure où le problème de la mécanique des fluides correspondant n'a pas actuellement reçu de solutions. On s'est intéressé que sur le transport sédimentaire longitudinal durant cette étude car il repose sur des formules empiriques crédibles et traitées au fil du temps. Ces résultats nous ont montré que le transport longitudinal est influencé énormément par les événements extrêmes et la configuration morphologique des deux plages.

L'utilisation du DSAS dans nous a permis de faire une étude diachronique de 23 ans pour essayer de prédire les phénomènes d'érosion et d'accumulation dans notre site d'étude, les résultats obtenus par les différents paramètres (EPR, NSM et LRR) montrent une présence

d'érosion au niveau des deux plages, mais l'intensité de l'effet érosif durant ces 23ans dans la plage colonel Abbes est plus importante par rapport à la plage de Khelloufi qui a une tendance à s'accumuler plus rapidement.

Ce qui nous pousse à conclure de cette étude, on dit que les évènements extrêmes ont un impact sur le transport sédimentaire longitudinal et cela a été corroboré grâce à des modèles numériques, formules empiriques, différents calculs et observations.

BIBLIOGRAPHIE

Aber, K. & Ounis, S. (2020). *Etude d'aménagement d'une marina au niveau de la ville d'Alger (exemple de la Marina Bay d'Alger)*. Mémoire fin d'étude. Dely Brahim. Alger : [Mémoire d'ingénieur en Aménagement du littoral] ENSSMAL.

Ateeth shetty and Jayappa K. (2020). *Seasonal variation in longshore sediment transport rate and its impact on sediment budget along the wave-dominated Karnataka coast, India*. Department of Marine Geology, Mangalore University, Mangalagangothri, Mangaluru, Karnataka 574 199, India.

Bennett, M. (2021). *Using the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) to Analyze Changes in Shoreline Position Caused by Seawalls Along a Section of Oregon's Coast*. Master's thesis. University of Southern California. Geographic Information Science and Technology.

Berni, C. (2011). *Processus de mobilisation et transport de sédiments dans la zone de déferlement*. Thèse de Doctorat. Université de GRENOBLE, p 159-166.

Cartier, A. (2014). *Evaluation des flux sédimentaires sur le littoral du Nord-Pas de Calais : vers une meilleure compréhension de la morphodynamique des plages macrotidales*. Laboratoire d'Océanographie et de Géosciences. p 127-244.

Camenen. (2002). *Modélisation numérique du transport sédimentaire sur une plage sableuse*. Phd Thesis. Université Grenoble I, p 85.

Celikoglu Y., Yuksel Y. & Kabdash M-S (2009). *Quantification de transport sédimentaire longshore : application à la Baie d'El Haouzia (région d'El Jadida Maroc)*. Bulletin de l'institut scientifique, Rabat, section Science de la terre [article 31,21-27].

Chaibi, M. (2003). *Dynamique sédimentaire et morphogénèse actuelle du littoral d'EL Jadida (Maroc)*. Thèse de Doctorat en géographie physique. Université d'Aix Marseille.

Chen, C. & Zhang, Q. (2016). *Development of a depth-integrated longshore current model with unstructured grids*. China Ocean Engineering.

Cui, L., Tang, J. and Sheng, Y. M. (2008). *Numerical simulation of wave field and coastwise current in alongshore zone*, Chinese Journal of Hydraulic Engineering, **39**(12): 1340–1345.

Dahmani, AEA. (2016). *Utilisation de la modélisation physique et numérique pour l'étude des paramètres hydrodynamiques dans la zone centre Algéroise « Le site des Sablettes »*. Mémoire de Post-Graduation. ENSSMAL.

Dahmani, AEA. (2021). *Longshore transport*. Cours 2021/2022. ENSSMAL.

Guide technique pour la mesure et la modélisation du transport solide : <https://professionnels.ofb.fr/fr/doc-guides-protocoles/guide-technique-mesure-modelisation-transport-solide>

Haddouche, C. et Baouz, Y. (2019). *Etude de protection de la plage de la Verte Rive (Bordj El Kiffan)*. Mémoire fin d'étude. Dely Brahim. Alger : [Mémoire d'ingénieur en Aménagement du littoral] ENSSMAL.

Huynh, T., Lehoai, N. & Vinh, B. (2013). *Mechanism of beach erosion at the west of Phu Quoc Island, Southern Vietnam*. Faculty of Geology & Petroleum Engineering. P 69-74.

<https://eprints.hrwallingford.com/209/1/SR168.pdf> [article].

Kulkarni, Ch. (2002). *Morphodynamique de la zone de swash*. Thèse de doctorat. Université de Caen. Sciences de la Terre et de l'Univers, Espace.

Kulling, B., Sabatier, F. & Anthony, E. (2016). *Modélisation du potentiel de transport sédimentaire longitudinal des plages du Languedoc-Roussillon*. Rapport Aix-Marseille université. p 229-237.

Kouassi, A. Nassa, A. Yao, K. Koumane, F. & Biemi, J. (2018). *Modélisation statistique des pluies maximales annuelles dans le district d'Abidjan (sud de la cote d'Ivoire)*. Laboratoire du Génie Civil, des Géosciences et des Sciences Géographiques. [Article 149-158].

Khalfani, D. (2014). *Etude hydro-sédimentaire à l'avant cote de côte de Cap-Djenat wilaya de Boumerdes* ». Mémoire fin d'étude. Dely Brahim. Alger : [Mémoire d'ingénieur en Aménagement du littoral] ENSSMAL.

Khelifi, M. (2014). *Etude de protection de la plage Est de Boumerdes*. Mémoire fin d'étude. Dely Brahim. Alger : [Mémoire d'ingénieur en Aménagement du littoral] ENSSMAL.

Kroon, A. (1994). *Sediment transport and morphodynamics of the beach and nearshore zone, near Egmond, The Netherlands*. Thèse de Doctorat. Netherlands : Université d'Utrecht, p 275.

Laffitte, E. (2018). *Modélisation de la propagation de la houle en présence de courant cisailés et par bathymétrie variable*. Thèse de doctorat. Institut Méditerranéen d'Océanographie : Océanographie Physique.

Maspataud, A. (2011). *Impact des tempêtes sur la morphodynamique du profil côtier en milieu macrotidale*. Thèse de doctorat. Ecole doctorale EDSMRE. p 116-132.

Mezouar, K. (2009). *Etude comparative entre les méthodes de protection des deux littoraux Algérien et Roumain*. Thèse de Doctorat, Université Technique de construction de Bucarest, Roumanie, p 404.

Mezouar, K. (2020). *Zonation hydrodynamique du littoral*. Cours 2020/2021. ENSSMAL.

Moron, V. & Sabtier, F (2007). *Impact des événements extrêmes (tempêtes et surcotes) sur les hydrosystèmes du littoral méditerranéen dans le cadre du changement climatique*. Université d'Aix-Marseille I & GEREGE.

Nassar, K. Mahmood, W. Fath, H. & Masria, A. (2018). *Shoreline change detection using DSAS technique: Case of North Sinai coast, Egypt*. *Marin Georesources & Geotechnology* [Article p 7].

Nolan K.M. Gray J.R. & Glyssen G.D., U.S. Geological Survey, *Introduction to Suspended-Sediment Sampling*. Scientific Investigations Report [article2005-5077].

Ouahil, A. (2017). *Etat de la pollution par matières particulaires et dissoutes dans le système fluvio-marin d'Oued Mazafran-embouchure (Baie de Bousmail)*. Mémoire de master. ENSH.

Rabehi, W. Guerfi, M. & Mahi, H. (2018). *Cartographie de la vulnérabilité des communes de la baie d'Alger : Approche socio-économique et physique de la cote* : <https://journals.openedition.org/mediterranee/8625#authors>.

Thior, M. Abou Sy, A. Cisse, I. Dieye, H. Sane, T. Demba Ba, B. Solly, B. & Descroix, L. (2021). *Approche cartographique de l'évolution du trait de cote dans l'estuaire de la Casmance* : <https://journals.openedition.org/mappemonde/5939>

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

Trabi, Z. (2013). *Etude de l'impact des activités anthropiques et de la variabilité climatique sur la végétation et les usages des sols, par utilisation de la télédétection et des statistiques agricoles, sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc)*. Thèse de Doctorat. Université d'Artois : Géographie physique. p 50-53.

Shore protection manuel Volum 1

Shore protection manuel Volum 2

Vah, M. (2019). *Transport sédimentaire induit par un courant : effet du disponible sédimentaire*. Thèse de doctorat. Normandie université : mécanique des fluides.

ANNEXES

Annexe 01

Création des roses des vents et de houles

1

2

3

4

5

6

Name	Type	Unit
1	Wind speed	m/s
2	Direction	degree

7 : introduire la base de données

8

9

10

11

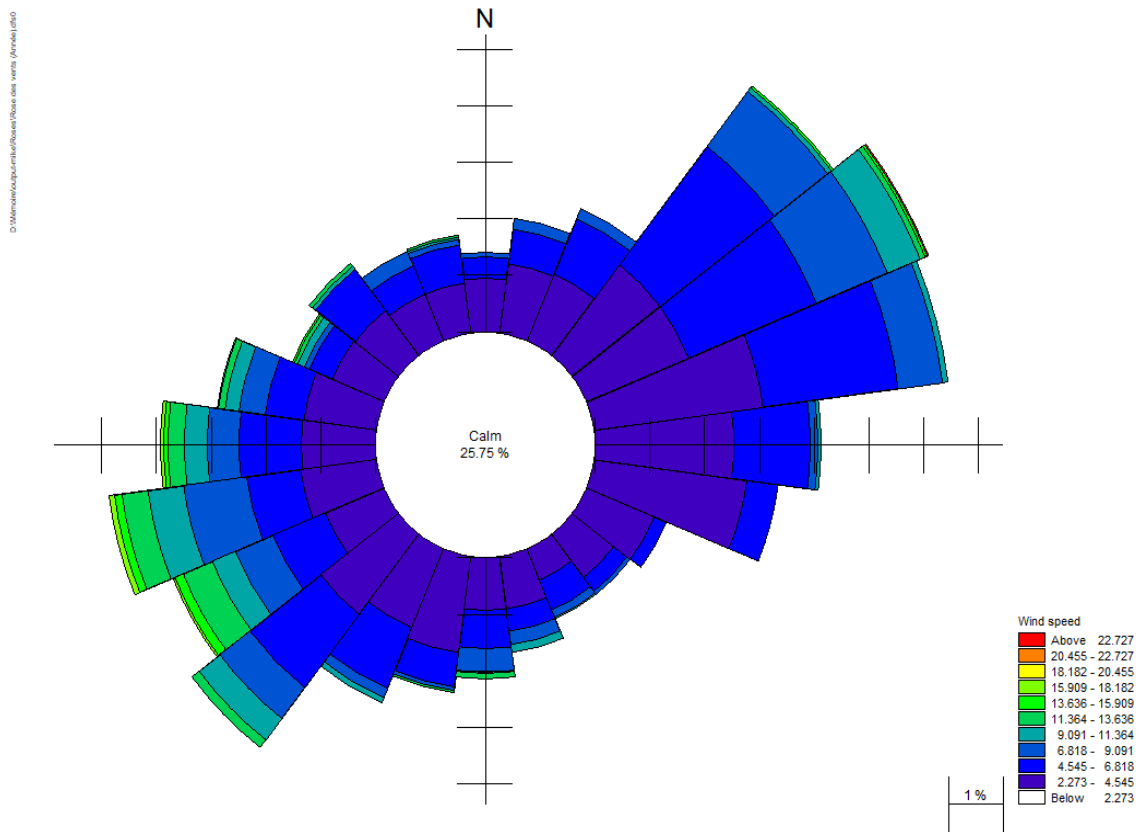


Figure 1 : Rose des vents annuelle

Annexe 02

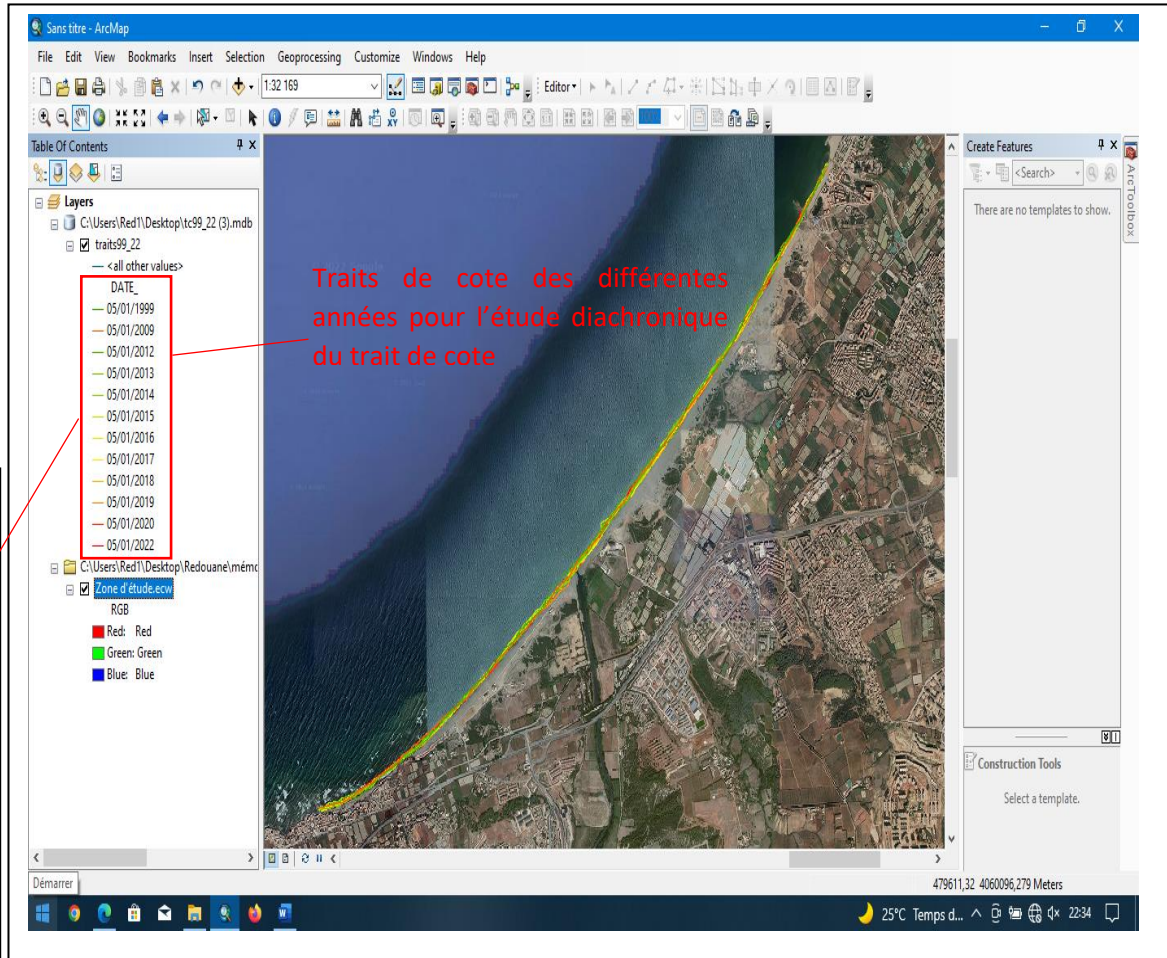
Etapes du DSAS

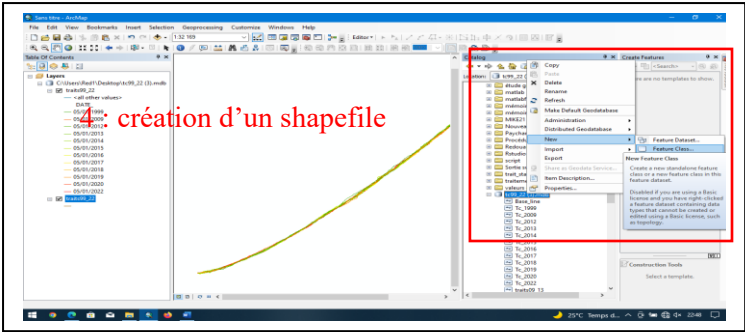


1 Digitalisation des traits de cote à partir des images satellitaires (Google Earth, SasPlanet, USGS...)

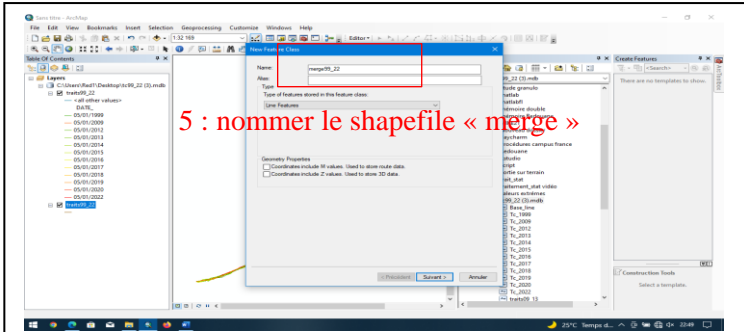


2 : Convertir les kml vers Shapefiles

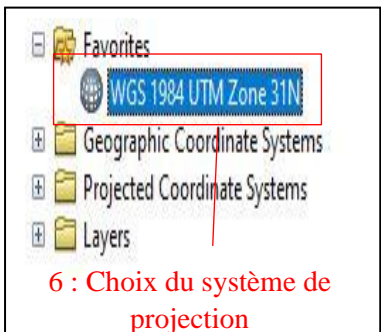




4 : création d'un shapefile



5 : nommer le shapefile « merge »



6 : Choix du système de projection

OBJECTID	Object ID
SHAPE	Geometry
DATE_	Text
UNCERTAINTY	Double

7 : configurer le shapefile en remplissant les cases « DATE_ et UNCERTAINTY »



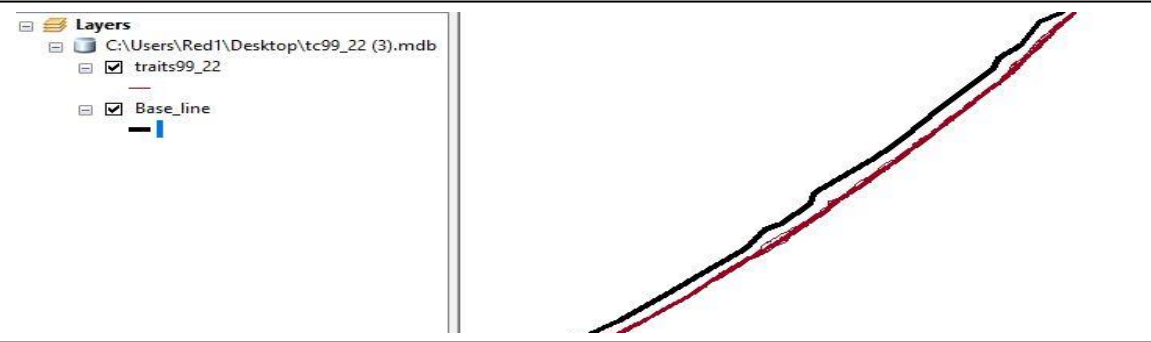
8 : Copier les traits de cote et les coller dans le shapefile merge



9 : Création d'un autre shapefile « ligne de base »

OBJECTID	Object ID
SHAPE	Geometry
ID	Long Integer
Group_	Long Integer
OFFshore	Short Integer
CastDir	Short Integer

10: Configuration du Shapefile « ID, Group_, OFFshore et CastDir

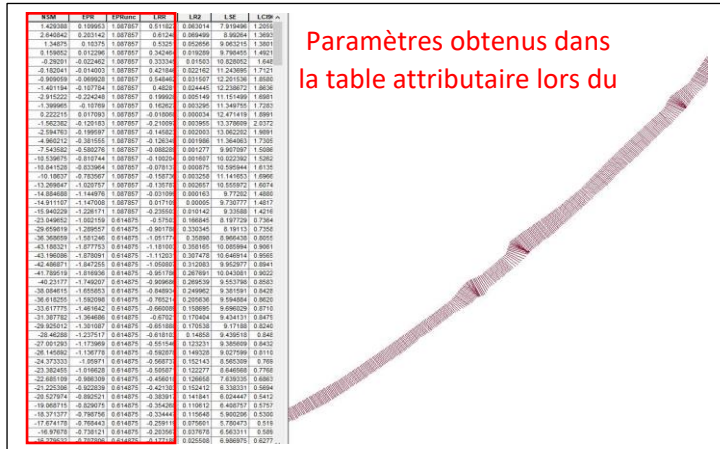


ID	Group	OFFshore	CastDir
1	1	1	1

11 : dans la table attributive de la ligne de base, attribuer « 1 » dans les cases créées précédemment pour représenter l'OFFshore avec le chiffre 1 pour une ligne de base dans la mer, le 0 est pour une ligne de base dans le haut de plage

- [DSASCore | Distance Measurement] SCE: Shoreline Change Envelope
- [DSASCore | Distance Measurement] NSM: Net Shoreline Movement
- [DSASCore | Point Change] EPR: End Point Rate
- [DSASCore | Regression Statistics] LRR: Linear Regression Rate
- [DSASCore | Regression Statistics] WLR: Weighted Linear Regression
- [DSASCore | Advanced Statistics] LMS: Least Median of Squares

13 : choix des paramètres à calculer pour l'étude diachronique du trait de cote



Transect layer selection 12 : Configuration du DSAS

Set Default Parameters

Shoreline Parameters

Shoreline Layer: **trats99_22**

Shoreline Date Field: **DATE_**

Shoreline Uncertainty Field: **UNCERTAINTY**

Default Data Uncertainty: 10 +/- meters

Intersection Parameters

Seaward Intersection

Landward Intersection

Log File Output

Regular

Extended None

Show Log Location

Cancel OK

Set Default Parameters

Baseline Settings | Shoreline Settings | Metadata Settings

Baseline Parameters

Baseline Layer: **Base_line**

Baseline ID Field: [?]

Optional Parameters

Baseline Group Field: [?]

Baseline Search Distance Field: [?]

Location of Land Relative to Baseline Orientation

Left Right

LAND WATER LAND WATER

Baseline placement

Midshore (or combination) Onshore Offshore

Log File Output

Regular Extended None

Show Log Location

Cancel OK

Selon l'orientation de la ligne de base

Propriétés de la couche

Quantités avec des couleurs représentant les valeurs.

Champs: **EPR**

Valeur: [?]

Normalisation: <Aucun>

Dégradé de couleurs: [?]

Classification

Seuils naturels (Jenks)

Classes: **5**

Valeur	Etiquette
-2.015972 - 0.677489	-2.015972 - 0.677489
-0.677488 - 0.111956	-0.677488 - 0.111956
0.111957 - 0.735931	0.111957 - 0.735931
0.735932 - 1.352705	0.735932 - 1.352705
1.352706 - 2.461031	1.352706 - 2.461031

Afficher les bornes des classes avec les valeurs des entités

OK Annuler Appliquer

14 : choix du paramètre pour la création de cartes diachroniques

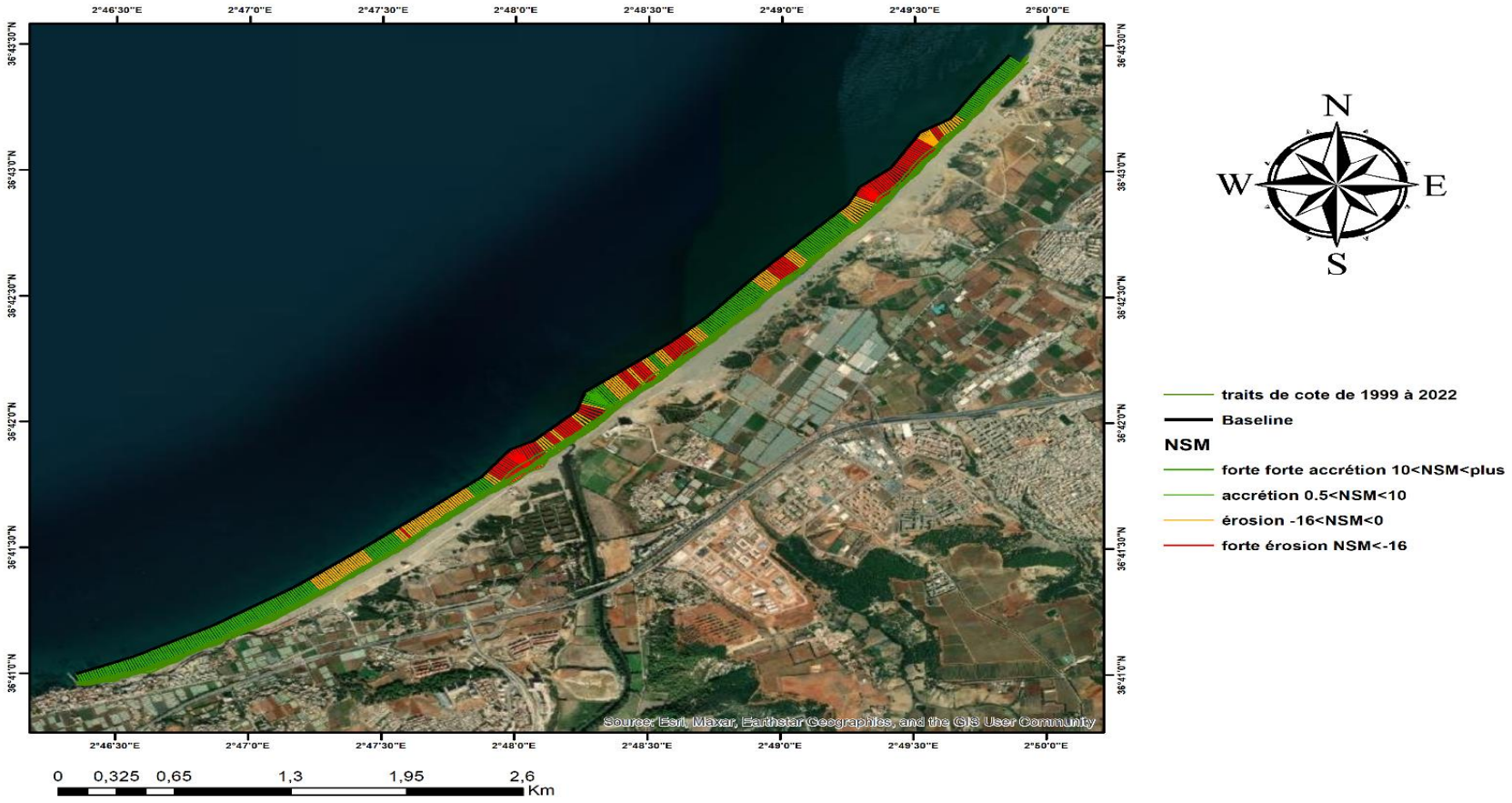


Figure 2 : Carte représentant le mouvement net des rivages NSM

Annexe 03

Etapes de l'analyse granulo-sédimentaire

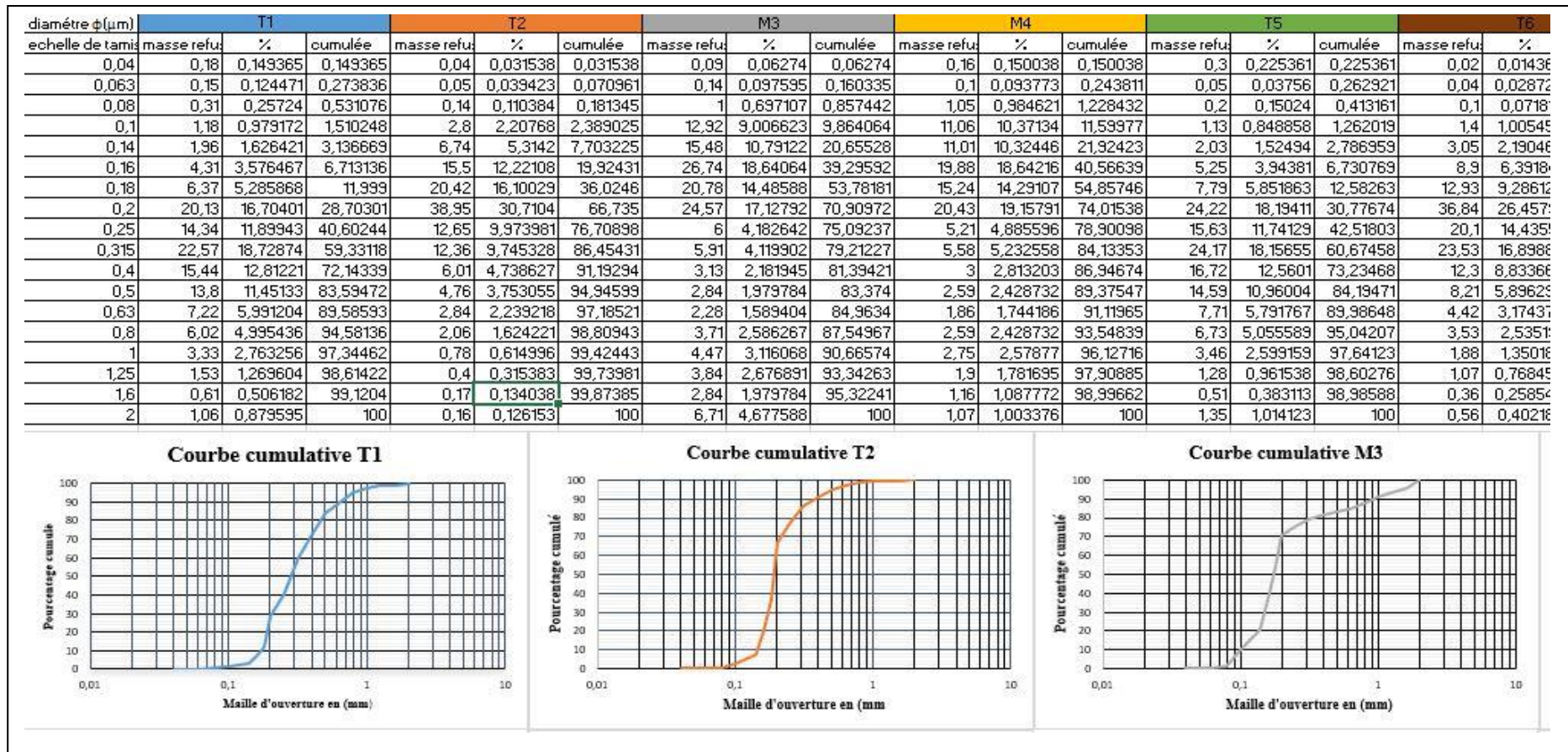


Figure 3 : Calculs des pourcentages des refus sur Excel

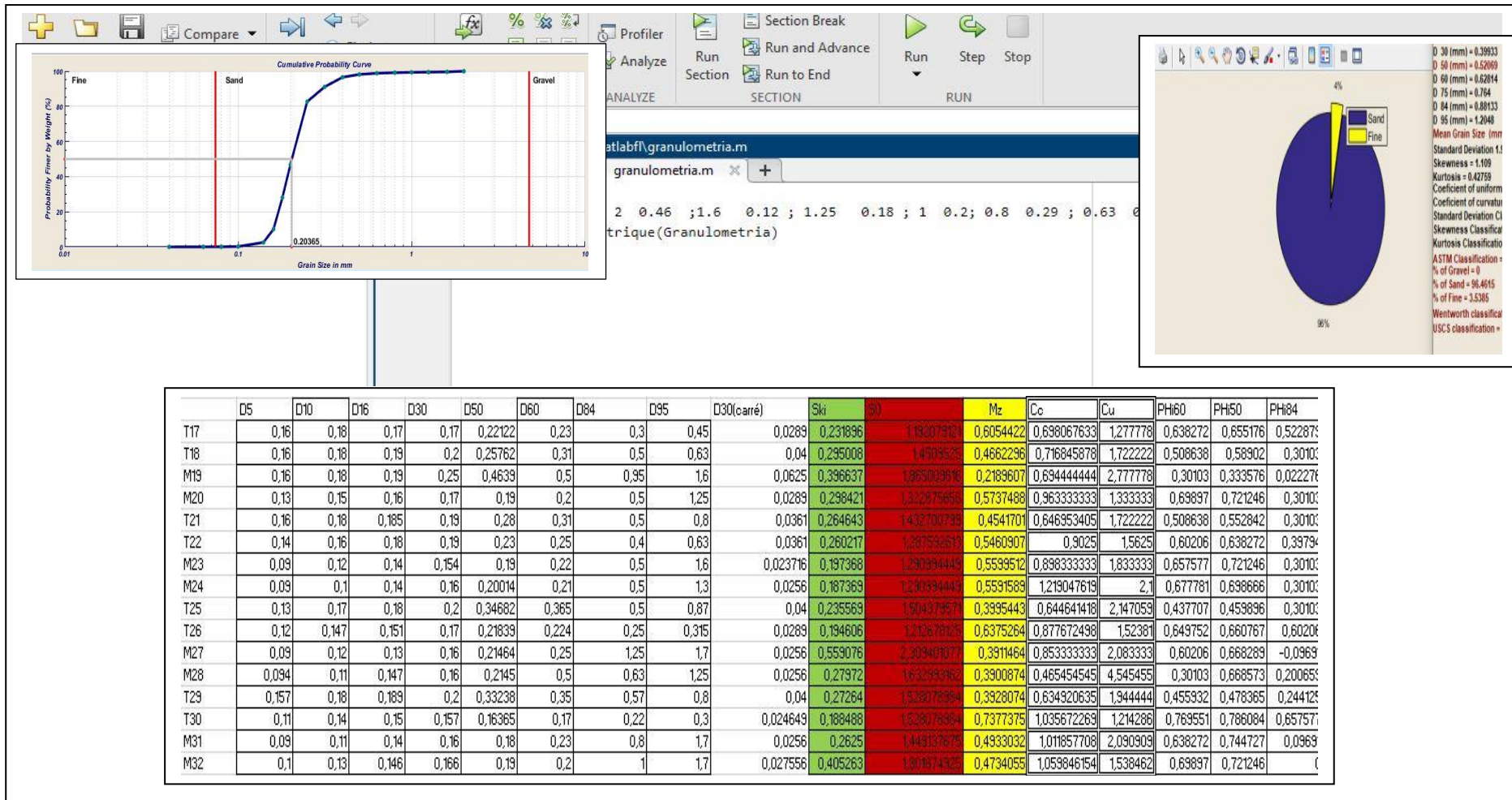


Figure 4 : résultats obtenus par Matlab et calcul des indices

Cartographie de la répartition spatiale des sédiments analysés

Tableau 1 : Les coordonnées géographiques des stations de prélèvement avec le pourcentage des particules fines et le diamètre de grain moyen de la zone d'étude (plage Khelloufi et Plage Colonel Abbes)

	Stations (St)	X	Y	Pélites %	D50
Plage Khelloufi	T1	482852.311	4061811.37	3.7025	0.35566
	T2	482841.883	4061822.6	1.0693	0.21735
	M3	482825.84	4061839.45	1.8273	0.19368
	M4	482816.214	4061852.28	1.8573	0.19217
	T5	482768	4061727	1.8513	0.34875
	T6	482758	4061738	2.2263	0.26657
	M7	482743.218	4061755.22	1.2209	0.25033
	M8	482735	4061765	1.5959	0.21045
	T9	482642	4061597	1.2688	0.21045
	T10	482632	4061608	1.6677	0.24864
	M11	482615	4061627	0.6862	0.34123
	M12	482606.05	4061636.5	0.6862	0.1858
	T13	482537.911	4061492.69	0.3032	1.0172
	T14	482526.026	4061504.49	1.3805	0.54052
	M15	482506.023	4061523.47	1.5161	0.40426
	M16	482498.329	4061531.16	1.5161	0.40426
Plage C. Abbes	T17	482282.052	4061274.38	1.45228	0.23922
	T18	482271.733	4061287.08	0.59846	0.35762
	M19	482252.683	4061302.95	2.7848	0.52639
	M20	482246.832	4061310.6	6.1522	0.22199
	T21	482110.633	4061154.14	2.15448	0.3169
	T22	482099.858	4061164.92	2.2981	0.2398
	M23	482086.927	4061176.12	1.6038	0.19377
	M24	482077.876	4061183.45	2.3459	0.20014
	T25	481975	4061037	1.64379	0.34682
	T26	481966.675	4061047.25	3.511	0.21839
	M27	481955.469	4061062.34	0.758	0.21464
	M28	481949	4061070	8.1391	0.2145
	T29	481796.857	4060877.43	1.923	0.33238
	T30	481782.203	4060893.81	9.4557	0.20365
	M31	481764.532	4060914.07	0.9814	0.18458
	M32	481760	4060921	0.758	0.197456

Préparer sur Excel un tableau regroupant 4 colonnes station, longitude, latitude, pélites (pour la carte répartition de pourcentage des pélites) et station, longitude, latitude, D50(pour la carte de répartition des diamètres de grains moyens)

- convertir l'Excel en fichier csv

- ouvrir le fichier csv sur ArcGIS avec Add data puis clic droit dessus " display x et y". Une fois les points ajoutés, enregistrez les sous forme de shapefile (clic droit, data, export data)

- dans arctoolbox, chercher les outils d'interpolation IDW.

- si l'interpolation dépasse la zone désirée, création d'un polygone de la zone désirée puis rogner l'image d'interpolation avec le polygone.

- mise en page et enregistrer la carte (clic droite export carte, format jpg).

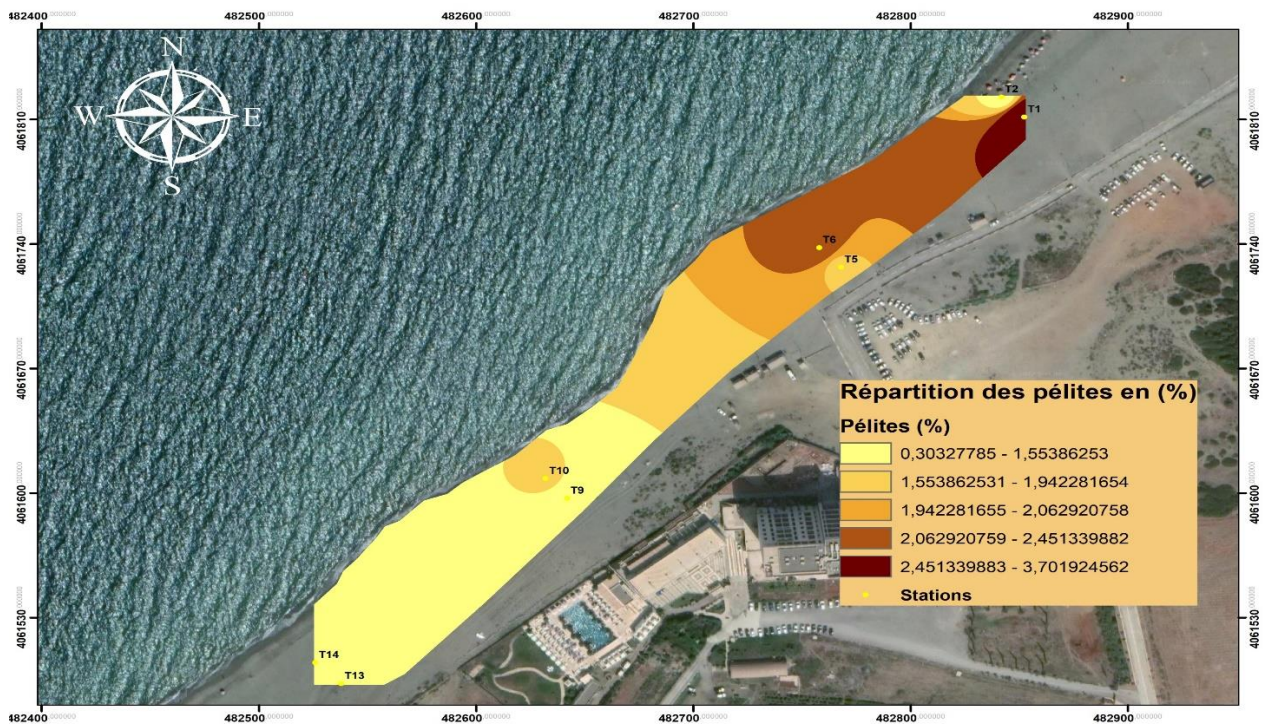
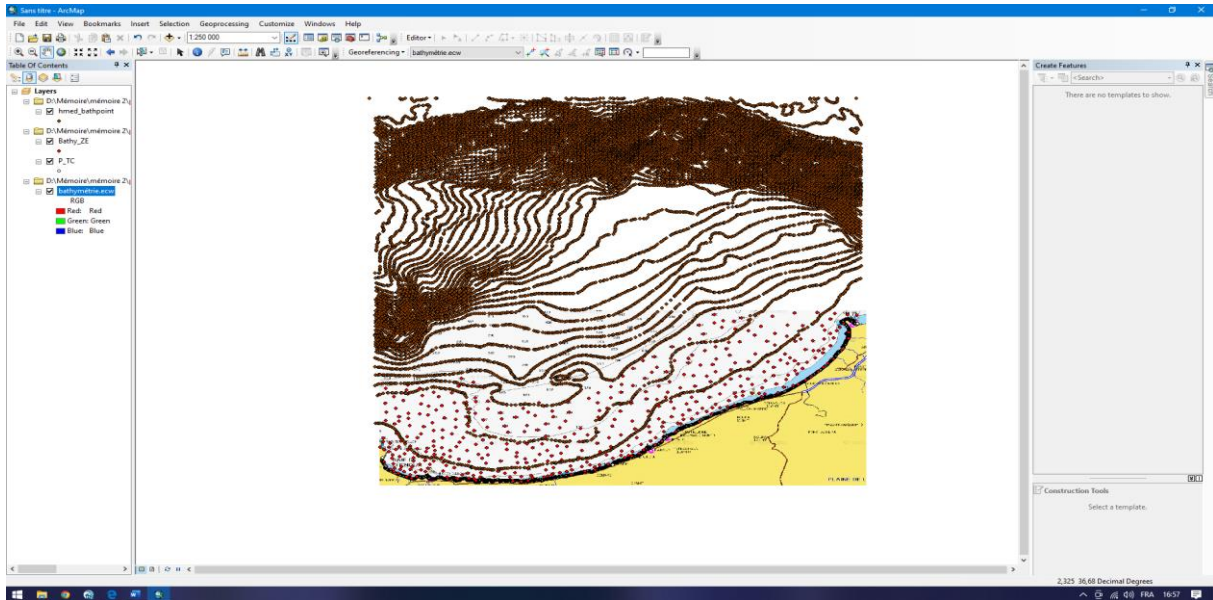


Figure 5 : résultat de la cartographie de la répartition des sédiments analysés

Annexe 04

➤ Acquisition des données bathymétriques sur ArcGIS



➤ Création de la mesh

